

12. Il rumore negli amplificatori

Il rumore presente negli amplificatori può essere suddiviso in due categorie: rumore causato da sorgenti esterne e rumore causato da sorgenti interne.

Sorgenti esterne.

Il rumore proveniente dalla linea dei $220V$ si presenta come una piccola oscillazione a $50Hz$ o $100Hz$ ed è il residuo di alternata che passa attraverso la filtratura delle alimentazioni in corrente continua. Si presenta come una piccola oscillazione sulle linee di alimentazione ed è dell'ordine di qualche mV per alimentatori con buona regolazione.

Può essere di un ordine di grandezza più grande per alimentatori *switching* che danno ampiezze di oscillazione residua maggiore a frequenze più alte, tipicamente della decina di kHz . Un buon operazionale dovrebbe essere in larga misura insensibile a tali interferenze se il suo guadagno di modo comune è abbastanza basso. Comunque i suoi effetti possono essere minimizzati con un accurato posizionamento dei componenti nel sistema e con connessioni a massa in un singolo punto di ritorno all'alimentatore.

Altre sorgenti di rumore possono essere stazioni radio o sorgenti simili di segnale. La cura consiste in una accurata schermatura e nella limitazione della bandapassante del sistema alle frequenze utili.

Anche le vibrazioni meccaniche possono indurre rumore, soprattutto nelle connessioni e nei condensatori. Se le vibrazioni riescono a far variare anche di poco la struttura meccanica di un condensatore carico, provocando ad esempio una variazione della distanza delle armature, generano tensioni ai capi del componente. È noto che i migliori microfoni sono realizzati con capacità ceramiche, infatti questo rumore è anche chiamato microfonicità.

Anche l'apertura o chiusura di relay che commutano correnti rilevanti generano archi che possono interferire con gli amplificatori situati nelle vicinanze e non adeguatamente schermati. In generale comunque le sorgenti di rumore esterne possono essere rese ininfluenti con tecniche opportune di cablaggio e/o schermatura del sistema.

Sorgenti interne

I rumori di corrente e tensione interne agli amplificatori dipendono invece da fenomeni fisici intrinseci e sono per loro natura casuali, aperiodici e scorrelati. Tipicamente hanno una distribuzione d'ampiezza di tipo Gaussiano e le componenti di massima ampiezza hanno la probabilità minima. La relazione fra il valore picco picco e il valore efficace di queste componenti è di tipo statistico. Si può dare come regola qualitativa che il valore efficace moltiplicato per 6 non supera il valore picco picco nel 99,73% dei casi.

Nella valutazione del rumore negli operazionali si usa riferire tutte le sorgenti di rumore all'ingresso essendo questa la connessione nella quale le sorgenti provocano il massimo dell'effetto.

Essendo le sorgenti scorrelate il loro effetto andrà *sommato quadraticamente* nella banda di funzionamento dell'amplificatore.

Analizziamo ora i meccanismi che generano questi rumori avendo prima definito alcune quantità utili alla loro valutazione quantitativa.

Le sorgenti di rumore sono caratterizzate dal loro spettro di frequenza, la distribuzione in ampiezza e dal meccanismo fisico che le genera.

Definiamo, per tensione e corrente, la *densità spettrale di potenza di rumore*, e_n^2 e i_n^2 , come il quadrato della tensione e della corrente efficace di rumore totale *per Hz* secondo le formule

$$e_n^2 = \frac{E_n^2}{\Delta f} \quad (1.12)$$

e

$$i_n^2 = \frac{I_n^2}{\Delta f} \quad (2.12)$$

ove E_n^2 e I_n^2 sono i rumori totali efficaci di tensione e corrente misurati all'interno di una banda di frequenza B . Nel seguito sostituirò a *densità spettrale di potenza di rumore* la dizione *densità di rumore*.

Le densità di rumore vengono espresse come *tensione o corrente su radice di Hz*.

Dalle relazioni precedenti si calcolano i valori efficaci E_n^2 e I_n^2 come

$$E_n^2 = \int_{f_L}^{f_H} e_n^2 df \quad (3.12)$$

e

$$I_n^2 = \int_{f_L}^{f_H} i_n^2 df \quad (4.12)$$

dalle quali appare evidente che per la valutazione dei contributi totali efficaci di rumore dobbiamo conoscere le densità di rumore e le frequenze che definiscono la banda B .

Rumore Johnson

Ogni resistenza produce ai suoi terminali un rumore, noto come *rumore Johnson*, la cui densità di rumore è

$$e_{jw}^2 = 4kTR \quad (5.12)$$

La caratteristica di questo rumore è di essere Gaussiano e *bianco* perché ha una distribuzione piatta su tutto lo spettro nel senso che la densità di rumore è costante al variare della frequenza. Il termine bianco è mutuato dalla definizione di luce bianca perché contiene tutte le frequenze dello spettro. Utilizzando la (5.12) nella (3.12) otteniamo la tensione efficace di rumore Johnson come

$$E_{jw} = \sqrt{4kTR} \sqrt{B} \approx \sqrt{4kTRf_H} \quad (6.12)$$

avendo supposto che $B \approx f_H$ se $f_H \gg f_L$.

Rumore "shot"

Una corrente elettrica è generata dal fluire di cariche discrete la cui fluttuazione statistica da origine al *rumore shot* la cui densità è data da

$$i_{sw}^2 = 2qI \quad (7.12)$$

dove q è la carica dell'elettrone e I è il valore medio della corrente. Utilizzando la (7.12) nella (4.12) otteniamo il valore efficace come

$$I_{sw} = \sqrt{2qIf_H} \quad (8.12)$$

analogamente a prima. Anche questo rumore è bianco e Gaussiano.

Rumore 1/f

Rumore *Johnson e shot* sono generati da fenomeni fisici e sono inevitabili e non dipendono ad esempio dalla qualità della resistenza per quanto riguarda il rumore Johnson. Esistono tuttavia altri rumori dovuti alla tecnologia costruttiva della resistenza o dal meccanismo di conduzione nei transistori che hanno uno spettro del tipo $1/f$ ovvero che hanno *densità inversamente proporzionale alla frequenza*. Il rumore $1/f$ affligge sia tensioni che correnti ed ha le densità espresse da

$$e_F^2 = \frac{K_e^2}{f} \quad (9.12)$$

e

$$i_F^2 = \frac{K_i^2}{f} \quad (10.12)$$

La valutazione dei valori efficaci in questo caso non è banale perché non sono a priori note le costanti K . È altresì chiaro che il contributo di questo rumore è significativo solo per frequenza molto basse e molte volte il suo contributo può essere trascurato. In alcuni casi, ad esempio applicazioni che richiedano basso rumore anche a frequenze molto basse, si cercano operazionali a bassissimo rumore. Per questi componenti il fabbricante fornisce normalmente la curva di rumore dalla quale si ricava la cosiddetta *frequenza d'angolo* di cui spiegheremo l'uso. Le curve del tipo di Fig. 1.12 danno le densità per un operazionale a basso rumore.

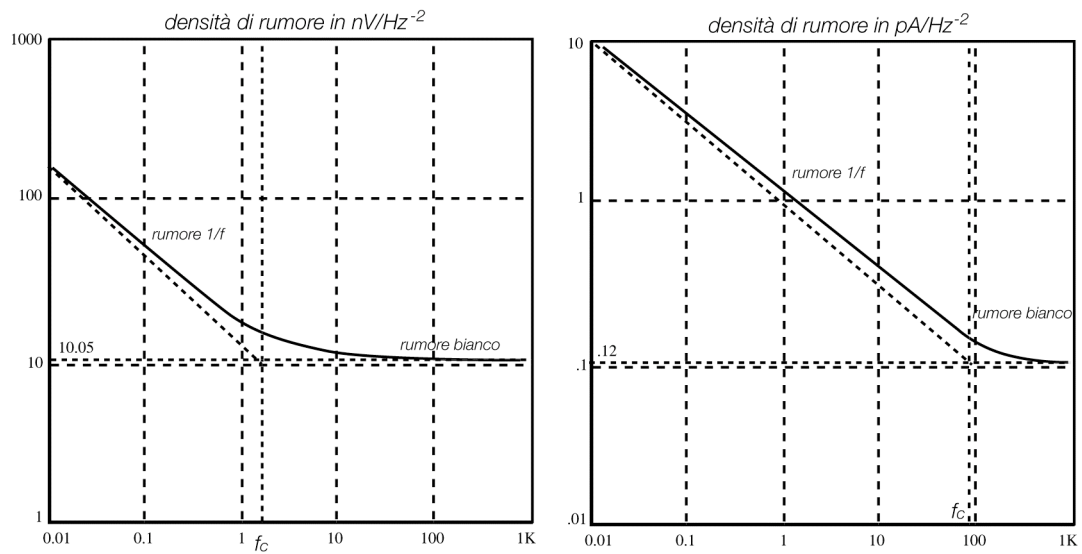


Fig. 1.12

La frequenza d'angolo è definita come quella per la quale il contributo della densità di rumore $1/f$ è uguale a quella del rumore bianco il cui valore è ricavabile dai grafici come punto d'intersezione fra le due rette. Alle frequenze d'angolo sia per tensione che corrente, f_{ce} e f_{ci} , valgono le relazioni

$$e_{nW}^2 = \frac{K_e^2}{f_{ce}} \quad (11.12)$$

e

$$i_{nW}^2 = \frac{K_i^2}{f_{ci}} \quad (12.12)$$

dalle quali ricaviamo le K che possiamo sostituire nelle (9.12) e (10.12) per cui le densità per il rumore $1/f$ diventano

$$e_F^2 = e_{nW}^2 \frac{f_{ce}}{f} \quad (13.12)$$

e

$$i_F^2 = i_{nW}^2 \frac{f_{ci}}{f} \quad (14.12)$$

dove i valori del secondo termine vengono ricavati dai grafici nella Fig. 1.12.

I valori efficaci si ricavano utilizzando ora la (3.12) e la (4.12) come segue

$$E_{nF}^2 = \int_{f_L}^{f_H} e_{nW}^2 \frac{f_{ce}}{f} df = e_{nW}^2 f_{ce} \ln \frac{f_H}{f_L} \quad (15.12)$$

$$I_{nF}^2 = \int_{f_L}^{f_H} i_{nW}^2 \frac{f_{ci}}{f} df = i_{nW}^2 f_{ci} \ln \frac{f_H}{f_L} \quad (16.12)$$

Facciamo ora a titolo d'esempio il calcolo pratico del rumore in un operazionale del tipo 741 descritto nel capitolo precedente. Dalle caratteristiche del fabbricante ricaviamo le densità di rumore e le frequenze d'angolo. Supponiamo di avere un amplificatore non invertente come quello della Fig. 2.12.

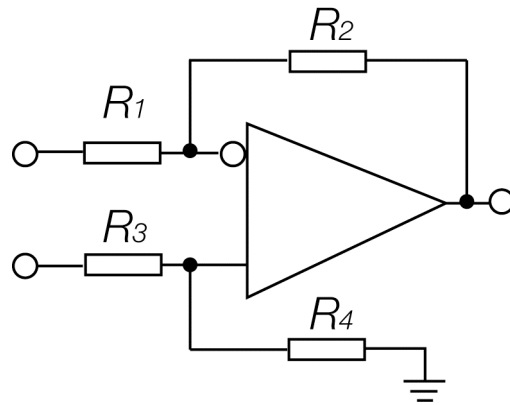


Fig. 2.12

Il circuito equivalente per il calcolo del rumore è in Fig. 3.12. Il generatore di tensione E_{R1} rappresenta il rumore Johnson della R_1 mentre E_P esprime il rumore Johnson del parallelo delle resistenze R_3 e R_4 . Poiché stiamo cercando di rappresentare le sorgenti di rumore all'ingresso, è opportuno chiedersi l'effetto della R_2 . Ricordando come si

trasformano i generatori da tensione a corrente e viceversa, conviene trasformare il generatore di tensione di rumore Johnson della R_2 nel suo generatore di corrente equivalente I_{R2} , visto che sarà questa corrente di rumore che, chiudendosi sulla R_1 , contribuirà al rumore in ingresso.

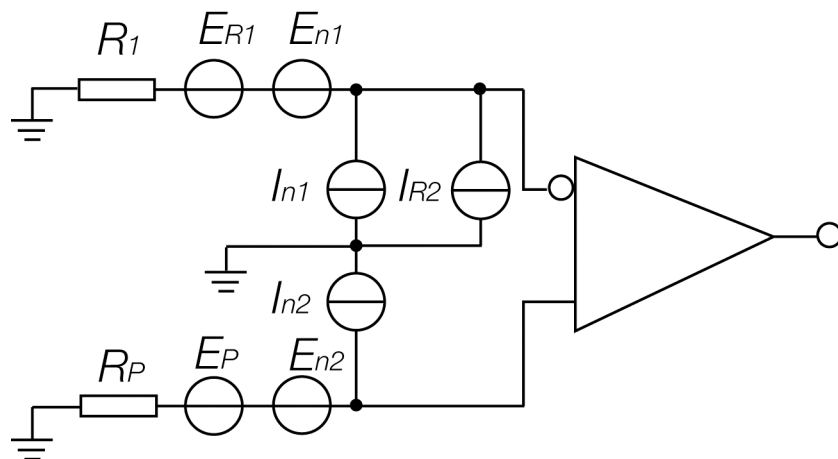


Fig. 3.12

I_{R2} varrà

$$I_{R2} = \frac{\sqrt{4kTR_2B}}{R_2} = \sqrt{\frac{4kTB}{R_2}} \quad (17.12)$$

dalla quale risulta evidente come, dal punto di vista del contributo di rumore, convengano resistenze di controreazione di alto valore.

I generatori di corrente I_n esprimono le densità di rumore di corrente e i generatori di tensione E_n rappresentano le densità di rumore di tensione degli ingressi dell'amplificatore. Dal modello appare anche la ragione per cui sinonimo di rumore di tensione è *rumore serie*, mentre quello di rumore di corrente è *rumore parallelo*.

Conviene valutare le sorgenti di rumore in ingresso indipendentemente per ingresso invertente e non invertente. Per l'invertente abbiamo un rumore efficace totale in ingresso dato da

$$E_{N-}(f_H, f_L) = \sqrt{E_{n1}^2 + E_{R1}^2 + (I_{n1}R_1)^2 + (I_{R2}R_1)^2} \quad (18.12)$$

Supponiamo che tutte le R siano uguali a $10k\Omega$, mentre dalle caratteristiche ricaviamo $f_{ce}=200Hz$, $f_{ci}=2kHz$, $e_n=20 nV/Hz^{-2}$, $i_n=0.71 pA/Hz^{-2}$.

Tenendo presente che nella (18.12) i rumori efficaci degli ingressi dell'amplificatore sono la somma quadratica delle componenti bianche e $1/f$ risulta che

$$E_n^2 = e_{nw}^2 \left[f_{ce} \ln \frac{f_H}{f_L} + (f_H - f_L) \right] \quad (19.12)$$

e

$$I_n^2 = i_{nw}^2 \left[f_{ci} \ln \frac{f_H}{f_L} + (f_H - f_L) \right] \quad (20.10)$$

Consideriamo la banda da $0.01Hz$ ai $150kHz$, ragionevole per un 741 con quel guadagno, otteniamo per la (19.12) che

$$E_n^2 = (20^{-9})^2 \left[200 \ln \frac{15 * 10^4}{10^{-2}} + (15 * 10^4) \right] \approx 3 * 10^{-12} \quad (21.10)$$

e per la (20.10)

$$I_n^2 = (.71^{-12})^2 \left[2000 \ln \frac{15 * 10^4}{10^{-2}} + (15 * 10^4) \right] \approx 1.3 * 10^{-19} \quad (22.10)$$

Per la resistenza R_l otteniamo dalla (6.12)

$$E_{Rl}^2 = 24.8 * 10^{-12} \quad (23.10)$$

In definitiva la (18.12) diventa

$$E_{N-}(f_H, f_L) = \sqrt{3 * 10^{-12} + 24.8 * 10^{-12} + 1.3 * 10^{-19} (10^4)^2 + 2.48 * 10^{-19} (10^4)^2} \approx 8\mu V \quad (24.10)$$

Per l'ingresso non invertente abbiamo

$$E_{N+}(f_H, f_L) = \sqrt{E_{n1}^2 + E_p^2 + (I_{n1}R_1)^2} = \sqrt{3 * 10^{-12} + 12.4 * 10^{-12} + 1.3 * 10^{-19} (5 * 10^3)^2} \approx 4.3 \mu V$$

(25.10)

Aggiungiamo qualche considerazione utile qualora si utilizzassero amplificatori a componenti discreti e si volesse calcolare il rumore all'ingresso di un transistor bipolare.

Il rumore all'ingresso è essenzialmente quello provocato dal rumore shot della corrente del transistor sulla r_e ovvero

$$e_{nT}^2 = i_{nT}^2 r_e^2 = 2qI_C r_e^2$$

(26.10)

e ricordando l'espressione (4.9) della V_T

$$e_{nT}^2 = 2qI_C r_e^2 = 2kTr_e$$

(27.10)

Dovrebbe essere anche considerato il rumore Johnson della $r_{bb'}$, che tuttavia nella maggior parte dei casi è trascurabile.

La densità di rumore di corrente dipende dalla corrente di base ed è data dalla (7.12) ove si consideri I_B

$$i_{nT}^2 = 2qI_B$$

(28.10)

Dalla (26.10) si vede che per tenere il rumore serie basso è necessario che r_e sia minima e quindi il miglior componente per quanto riguarda il rumore serie è di nuovo il transistor bipolare, che tuttavia ha dalla (28.10) un rumore parallelo molto rilevante rispetto a transistori del tipo jFet che hanno corrente di gate ordini di grandezza inferiore alla corrente di base del bipolare.

Nel caso del transistor jFet la relazione tra transconduttanza e resistenza r_e equivalente è $g_m = .7/r_e$.

