

4.10 Il rumore dei microamplificatori

In tutti i circuiti di amplificazione visti in precedenza, sia in corrente continua, sia in corrente alternata, è presente in uscita una quota di una tensione particolare che viene a sommarsi al segnale perturbandolo. Detta tensione, a volte percepibile sul segnale a volta non percepibile, in dipendenza della propria intensità, è detta “tensione di rumore”.

La tensione di rumore è generata all’ingresso dei microamplificatori a seguito dell’agitazione degli elettroni, dovuta alla temperatura, che si sviluppa, sia nelle resistenze d’ingresso poste all’esterno del microcircuito, che nelle giunzioni dei transistori che costituiscono l’integrato stesso.

La tensione di rumore è formata da un insieme contemporaneo di frequenze che si sommano tra loro in modo casuale dando luogo ad una notevole variabilità d’ampiezza e forma che si manifesta nel tempo. La misura della tensione di rumore viene fatta in volt efficaci con riferimento alla banda di frequenza nella quale si intende eseguire la citata misura. Un esempio di tipo comparativo tra misure sui segnali sinusoidali e su tensioni di rumore è utile per comprendere meglio questa asserzione:

Con la dizione $S = 3.5 V_{eff}$ s’indica la tensione, in volt efficaci, di un segnale sinusoidale unifrequenziale dotato di una ampiezza di picco pari a $V_{picco} = 3.5 V_{eff} * 1.41 = 4.93 V_p$.

Con la dizione $N = 3.5 V_{eff} / \sqrt{100 \text{ Hz}}$ s’indica la tensione, in volt efficaci, di un rumore presente all’uscita di un filtro di banda la cui larghezza è di 100 Hz; questa tensione potrà raggiungere, casualmente, in alcuni istanti un’ ampiezza di picco pari a $V_{picco} \approx 2.5 * 3.5 V_{eff} = 8.75 V_p$.

Normalmente, nei cataloghi dei microcircuiti, l’indicazione del rumore prodotto all’ingresso da questi dispositivi è riportato con le dizioni:

$$\mu V / \sqrt{\text{Hz}}$$

microvolt efficaci misurati idealmente all’uscita di un filtro di banda della larghezza di 1 Hz
od in

$$nV / \sqrt{\text{Hz}}$$

nanovolt efficaci misurati idealmente all’uscita di un filtro di banda della larghezza di 1 Hz.

Entrambe le indicazioni vengono dette di “intensità spettrale di rumore”.

Con l’aiuto dei valori della tensione di rumore all’ingresso degli amplificatori è possibile calcolare il rumore d’uscita per valutare se questo è tollerabile o meno per l’ottenimento dei nostri obiettivi di progetto; un ennesimo esempio chiarirà come utilizzare questi nuovi parametri dei microamplificatori:

Sia da dimensionare un microamplificatore in corrente alternata con le seguenti caratteristiche:

- guadagno di 100 volte (40 dB) in un campo di frequenza compreso tra 4000 Hz e 5000 Hz
- minimo segnale d’ingresso di $10 \mu V_{eff}$
- massimo segnale d’ingresso di $1 mV_{eff}$
- resistenza minima d’ingresso 100000 ohm
- rapporto tra segnale e rumore d’uscita in banda non inferiore a 6.3 (16 dB).

Prima scelta del circuito d’amplificazione e dell’integrato:

La scelta del circuito può essere orientata sullo schema di figura 4.16 già esaminato nel paragrafo 4.8 nel quale si pensi di impiegare, come primo approccio, l’integrato LM741.

Valutazione del rumore massimo accettato all'uscita:

Se il segnale minimo d'ingresso è di $10 \mu\text{Veff}$. ed il guadagno richiesto è di 100 volte, all'uscita avremo

$$V_{su} = 10 \mu\text{Veff} \cdot 100 = 1 \text{ mVeff}.$$

Dovendo essere il rumore V_{nu} d'uscita inferiore ad $10/6.3$ del minimo segnale, dovrà essere

$$V_{nu} = V_{su} / 6.3 = 1 \text{ mVeff} / 6.3 = 159 \mu\text{Veff}.$$

Dato che la tensione di rumore s'intende distribuita in tutta la banda di lavoro compresa tra 4000 Hz e 5000 Hz, pari ad una larghezza di banda

$$\Delta = 5000 \text{ Hz} - 4000 \text{ Hz} = 1000 \text{ Hz}$$

la tensione V_{nu} dovrà essere indicata come

$$V_{nu} = 159 \mu\text{Veff} / \sqrt{1000 \text{ Hz}}$$

Valutazione del rumore massimo accettato all'ingresso:

Il calcolo del rumore massimo totale V_{Ni} accettato all'ingresso è dato dal rumore d'uscita diviso per il guadagno del circuito

$$V_{Ni} = V_{nu} / 100 = (159 \mu\text{Veff} / \sqrt{1000 \text{ Hz}}) / 100 = 1.59 \mu\text{Veff} / \sqrt{1000 \text{ Hz}}$$

Per poter controllare se l'ingresso del circuito ha le caratteristiche di rumore voluto il valore di V_{Ni} , espresso in banda 1000 Hz, deve essere espresso in banda 1 Hz (in intensità spettrale); ciò si ottiene dividendo V_{ni} per la radice quadrata della banda, quindi

$$V_{Ni}(\text{spettrale}) = (1.59 \mu\text{Veff}) / \sqrt{1000 \text{ Hz}} = 50 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Controllo del rumore d'ingresso dell'integrato selezionato:

Tra i valori caratteristici del LM741 troviamo il valore medio della tensione di rumore all'ingresso, per frequenze comprese nella banda 4000 Hz – 5000 Hz, essere:

$$V_{ni} = 60 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Questo livello di rumore è nettamente superiore del valore calcolato al punto precedente e pertanto indica che l'integrato selezionato non è adatto all'impiego voluto e che un altro tipo d'integrato deve essere scelto da catalogo.

È opportuno evidenziare che qualora il valore di V_{ni} (spettrale) fosse stato entro i limiti indicati la verifica avrebbe dovuto coinvolgere non soltanto V_{ni} ma anche le tensioni di rumore d'ingresso dovute sia all'agitazione termica delle resistenze esterne, sia alla corrente di rumore dell'integrato che in dette resistenze fluisce.

Seconda scelta del circuito integrato:

Visto che l'integrato LM741 non è adatto allo scopo previsto, procediamo ad una nuova selezione orientandoci sull'integrato tipo LF156.

Tra valori caratteristici del LF156 troviamo il valore medio della tensione di rumore spettrale all'ingresso, per frequenze comprese nella banda 4000 Hz – 5000 Hz, è:

$$V_{ni} = 14 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Valutazione del rumore globale all'ingresso del circuito:

Come già accennato in precedenza la valutazione del rumore d'ingresso dell'amplificatore coinvolge sia il rumore espresso da V_{ni} , sia il rumore dovuto alla corrente d'ingresso I_{ni} che fluisce nelle resistenze esterne all'integrato sia il rumore delle resistenze stesse.

L'espressione generale per il calcolo del rumore spettrale V_{Ni} d'ingresso di un amplificatore è data da:

$$V_{Ni} = \sqrt{[V_{ni}^2 + (I_{ni} * R_g)^2 + 1.5 * 10^{-20} * R_g]}$$

dove

$R_g = (R_1 * R_2 / R_1 + R_2) + R_3$ espresso in ohm

I_{ni} = rumore spettrale dell'integrato espresso in Ampere

V_{ni} = rumore spettrale dell'integrato espresso in Volt

Il valore di R_g si calcola sulla base dell'impostazione dei valori del circuito di figura 4.16 che, per avere un guadagno di 100 volte ed una resistenza d'ingresso di 100000 ohm, deve comprendere i seguenti valori delle resistenze esterne:

$R_3 = 100000 \text{ ohm}$

$R_1 = 100000 \text{ ohm}$

$R_2 = 1000 \text{ ohm}$

Dalle quali si ha

$$R_g = (100000 \text{ ohm} * 1000 \text{ ohm} / 100000 \text{ ohm} + 1000 \text{ ohm}) + 100000 \text{ ohm} = 100990 \text{ ohm}$$

L'integrato LF156, con ingresso di tipo JFET, ha una corrente di rumore d'ingresso molto piccola, dell'ordine di

$$I_{ni} = 0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} = 0.01 * 10^{-12} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Il valore di V_{ni} è già stato rilevato in precedenza e risulta

$$V_{ni} = 14 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} = 14 * 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Con questi valori si applica la formula data e si ottiene:

$$\begin{aligned} V_{Ni} &= \sqrt{[(14 * 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (0.01 * 10^{-12} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}} * 100990)^2 + 1.5 * 10^{-20} * 100990]} = \\ &= 40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

quest'ultimo calcolo indica che il rumore complessivo d'ingresso, di 40 nV/√Hz, è inferiore al rumore massimo richiesto dal progetto ed indicato in 50 nV/√Hz e che, quindi l'integrato LF156 è adatto alle necessità del progetto stesso.