

Differenziale come blocco

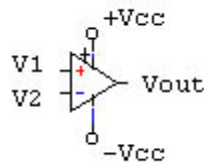


Fig. 1

L'amplificatore differenziale funziona tipicamente in continua e perciò utilizza quasi sempre la doppia alimentazione. Come mostra la figura 1, esso ha due ingressi, V1 e V2, ed una sola uscita Vout. Assumendo che la tensione a riposo V_{outdc} sia nulla, nel caso ideale la tensione di uscita assume la forma:

$$V_{out} = A_d \bullet (V_1 - V_2) = A_d \bullet V_1 - A_d \bullet V_2$$

L'amplificatore differenziale ideale amplifica la differenza tra le due tensioni applicate in ingresso.

Notiamo che V1 e V2 vengono amplificati entrambi di A_d , però V1 non viene sfasato mentre V2 subisce l'inversione di fase; in sostanza nel differenziale ideale, le amplificazioni rispetto a ciascun ingresso sono identiche ma un morsetto è invertente mentre l'altro no. Ciò risulta evidente dal simbolo.

Osserviamo ancora che se $V_1 = V_2$, Vout è nulla (Fig.2); il differenziale ideale sopprime, cioè, tutte le tensioni che si presentano in egual modo ai due ingressi (segnale di modo comune) ; ciò risulta particolarmente utile per la riduzione del rumore presente ai due ingressi o per la eliminazione di fastidiose componenti continue sovrapposte al segnale.

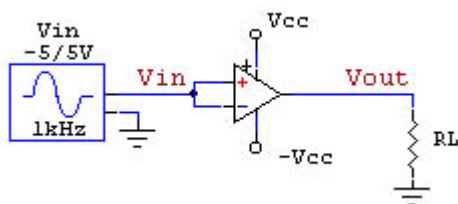


Fig.2

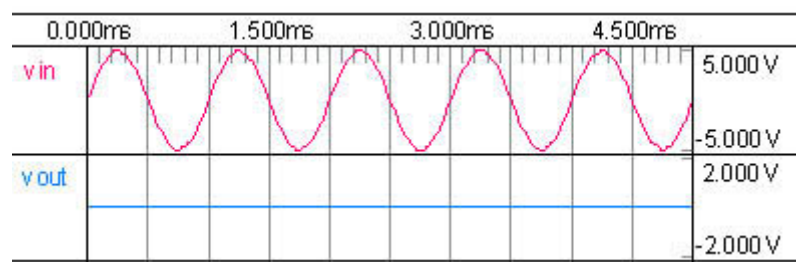


Fig.3

Nell'amplificatore differenziale reale le amplificazioni relative ai due ingressi non saranno mai perfettamente uguali; applicando due segnali identici ai due ingressi, essi produrranno in uscita effetti di segno opposto ma leggermente diversi, e perciò Vout sarà leggermente diversa da zero. Il differenziale reale non sopprime completamente il segnale di modo comune.

Indicando con A_1 e A_2 l'amplificazione subita rispettivamente da V1 e V2, Vout assume l'espressione

$$V_{out} = A_1 \bullet V_1 - A_2 \bullet V_2$$

Nel differenziale conviene esprimere V_1 e V_2 in funzione di altri due segnali: il segnale differenza $V_d = V_1 - V_2$ e il segnale di modo comune $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$. Esprimendo V_1 e V_2 in funzione di V_c e V_d , si ottiene

$$V_1 = V_c + \frac{V_d}{2} \quad V_2 = V_c - \frac{V_d}{2}$$

Sostituendo e ponendo $A_c = A_1 - A_2$ e $A_d = \frac{A_1 + A_2}{2}$ la tensione di uscita assume allora la forma:

$$V_{out} = A_c \bullet V_c + A_d \bullet V_d$$

A_c è chiamata amplificazione di modo comune, A_d è l'amplificazione differenziale; in un buon differenziale ovviamente A_d deve essere molto più grande di A_c .

La qualità del differenziale è misurata dal rapporto di soppressione del segnale di modo comune o CMRR (common mode rejection ratio); esso è definito come

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

e deve essere molto elevato (almeno qualche migliaio). Il CMRR molto spesso è espresso in dB dalla relazione

$$CMRR_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

Per misurare A_c , si sottopone l'amplificatore ad un pilotaggio simmetrico (Fig.4); in questo caso $V_1 = V_2 = V$ per cui $V_c = V$ $V_d = 0$.

Pertanto $V_{out} = A_c \bullet V$ e:

$$A_c = \frac{V_{out}}{V} \bigg|_{\substack{V_1 = V \\ V_2 = V}}$$

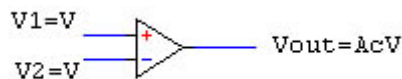


fig.4

Per misurare A_d , si sottopone l'amplificatore ad un pilotaggio antisimmetrico (Fig.5); in questo caso $V_1 = V$ $V_2 = -V$ per cui $V_c = 0$ $V_d = 2V$.

Perciò $V_{out} = A_d \bullet 2V$

e

$$Ad = \frac{V_{out}}{2V} \bigg|_{\substack{V_1 = V \\ V_2 = -V}}$$



Fig.5

Riscrivendo l'espressione della V_{out} di un differenziale reale, otteniamo:

$$V_{out} = Ad \cdot \left(V_d + \frac{Ac}{Ad} \cdot V_c \right) = Ad \cdot \left(V_d \pm \frac{V_c}{CMRR} \right) = Ad \cdot (V_d \pm V_{ECM})$$

La tensione $V_{ECM} = \frac{V_c}{CMRR}$ è ciò che rimane del segnale di modo comune, dopo che l'amplificatore differenziale ha provato a sopprimerlo; essa viene chiamata segnale errore di modo comune e deve essere molto più piccola di V_d ; cioè deve essere $\frac{V_c}{CMRR} \ll V_d$ e ciò

comporta che il CMRR deve soddisfare la condizione $CMRR \gg \frac{V_c}{V_d}$. Noti V_c e V_d , si può scegliere il differenziale con un CMRR adeguato.

L'accuratezza di un differenziale è tanto maggiore quanto più piccolo è il segnale di modo comune; essa è definita da $\varepsilon\% = \frac{V_{ECM}}{V_d} \cdot 100$

Differenziale ad accoppiamento di emettitore

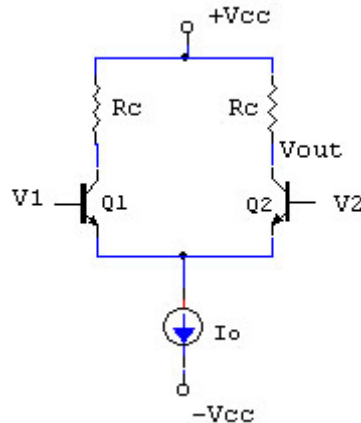


Fig.6

Un eccellente amplificatore differenziale è quello riportato in Fig. 6; esso ha una struttura completamente simmetrica, nell'ipotesi che $Q1=Q2$.

A riposo $V_1 = V_2 = 0$ e $V_{be1q} = V_{be2q}$; ciò comporta che $I_{c1q} = I_{c2q} = \frac{I_o}{2}$

visto che i due BJT hanno la stessa caratteristica I_c/V_{be} e la stessa V_{beq} .

L'amplificatore è un ottimo differenziale perchè sopprime abbastanza bene il segnale di modo comune V_c

Infatti, se applichiamo, un pilotaggio simmetrico ($V_1 = V_2 = V = V_c$) la presenza di tale segnale dovrebbe far aumentare I_{c1} e I_{c2} della stessa quantità; ciò è però impedito dal generatore di corrente I_o , che mantiene costante la somma $i_{c1} + i_{c2} = I_o$. In definitiva, in presenza di un segnale di modo comune, non variano nè I_{c1} nè I_{c2} e neanche V_{out} , che rimane al suo valore di riposo.

Vedere a proposito le figure 7 e 8.

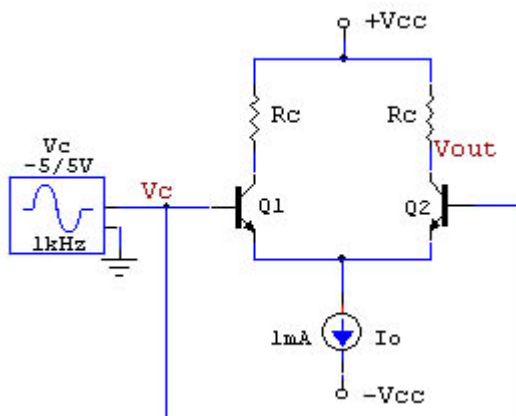


Fig.7

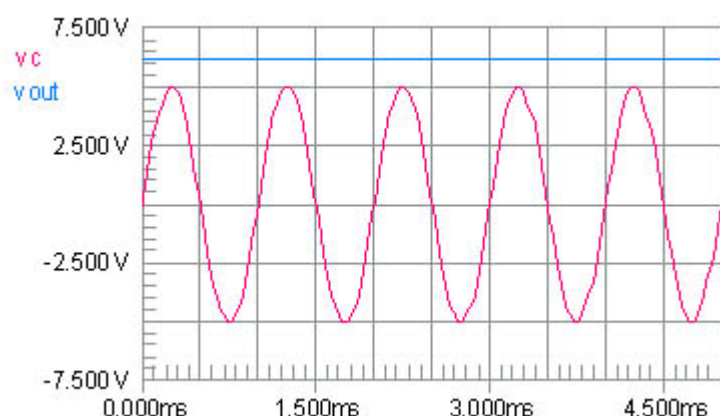


Fig.8

In presenza di un pilotaggio antisimmetrico ($V_1 = V$ $V_2 = -V$ $V_C = 0$ $V_d = 2V$), I_{c1} e I_{c2} hanno variazioni uguali ed opposte e la loro somma rimane, perciò, costante al valore I_o ; la variazione di I_{c2} fa variare sensibilmente V_{out} attorno al suo valore di riposo (Figg.9,10). L'amplificatore sente, quindi, il segnale differenza ma non quello di modo comune e , perciò, è un eccellente differenziale

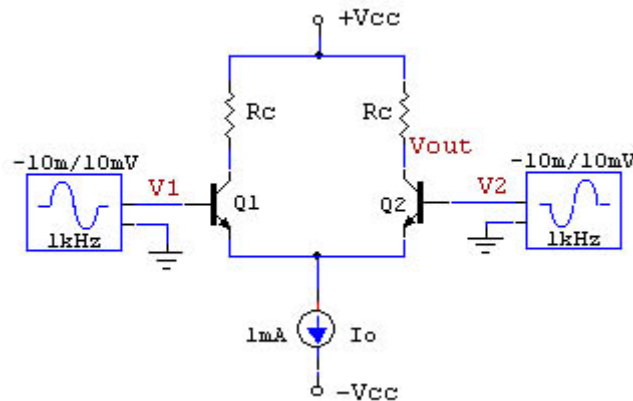


Fig.9

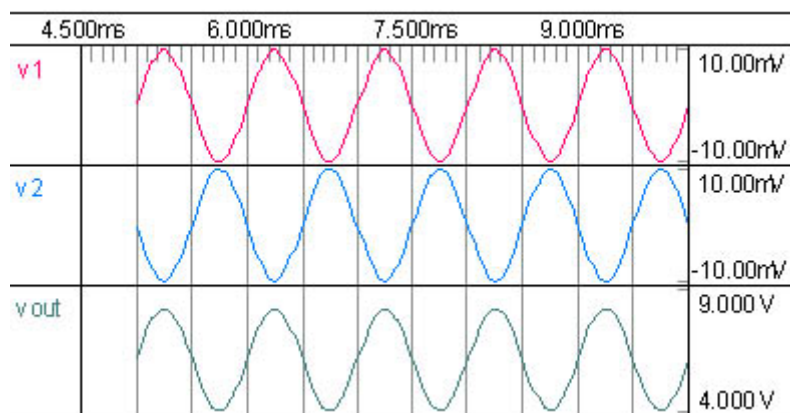


Fig.10

Nell'amplificatore differenziale di Fig.9, il morsetto non invertente è la base di Q1, quello invertente è la base di Q2; infatti ,supponendo di porre la base di Q2 a massa, quando V_1 è positivo, aumenta I_{c1} e diminuisce I_{c2} ; ciò provoca l'aumento di V_{out} attorno al suo valore di riposo; v_{out} varia, perciò, in fase con V_1 (Figg.11,12)

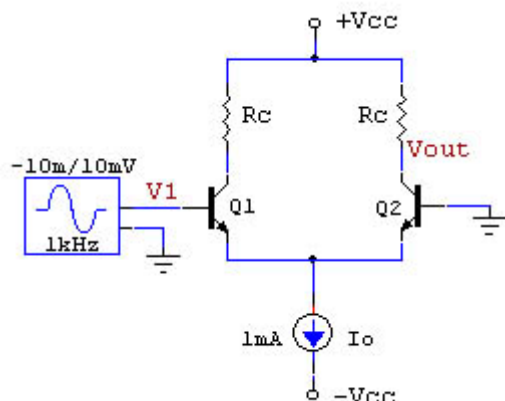


Fig.11

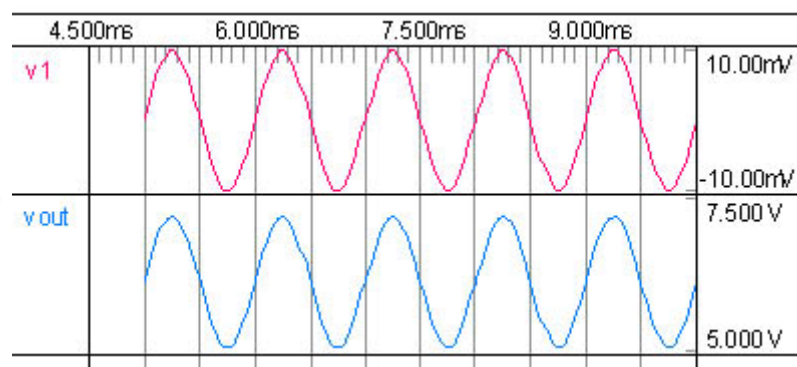


Fig.12

Se, invece poniamo la base di Q1 a massa, quando Q2 è positivo, aumenta I_{c2} e diminuisce I_{c1} ; ciò provoca la diminuzione di V_{out} attorno al suo valore di riposo; V_{out} varia, quindi, in opposizione di fase con V_2 . (Figg. 13,14)

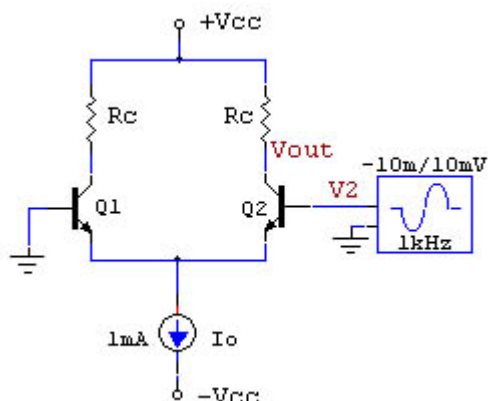


Fig.13

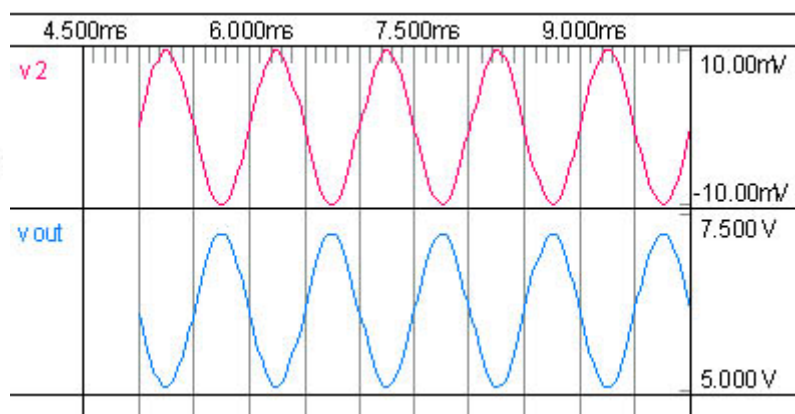


Fig.14

Vediamo un pò più in dettaglio la struttura del nostro differenziale

Per realizzare il generatore di corrente si usa il BJT Q3, polarizzato in regione attiva mediante il partitore $R1$ - $R2$; la corrente di riposo di Q3 (I_o) è stabilizzata dalla presenza di $R3$. Se si fa in modo che il partitore sia attraversato da una corrente I_1 molto più grande rispetto a I_o (basta imporre $I_1 > 0.2I_o$). Otteniamo:

$$I_o = \frac{V_{R2} - V_{be}}{R3} \quad \text{con} \quad V_{R2} = V_{CC} \cdot \frac{R2}{R1 + R2}$$

$R3$ va scelta in modo che la caduta su di essa sia non inferiore a 1V, in modo che I_o

sia poco sensibile alla variazione di V_{be} con la temperatura T . Spesso in serie a $R2$

vengono messi uno o due diodi per compensare la diminuzione di V_{be} con la temperatura

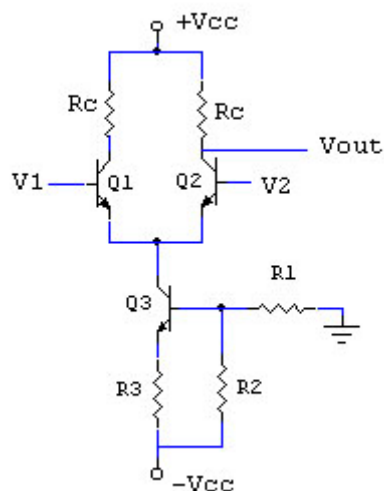


Fig.15

In questo modo, la caduta su R_3 , e quindi, I_o restano costanti al variare di T . Nella realtà dei fatti il generatore di corrente sarà di buona qualità ma non sarà mai ideale; questo comporta che il CMRR del differenziale sarà senz'altro elevato ma non sarà mai infinito. In uscita troveremo quindi qualche effetto residuo del segnale di modo comune.

Nel differenziale che abbiamo studiato sino a questo momento il carico è connesso tra un collettore e la massa; questo differenziale, peraltro il più comune, è detto ad uscita sbilanciata. A volte la tensione di uscita è prelevata tra i due collettori; in questo caso il differenziale è ad uscita bilanciata (Fig.16).

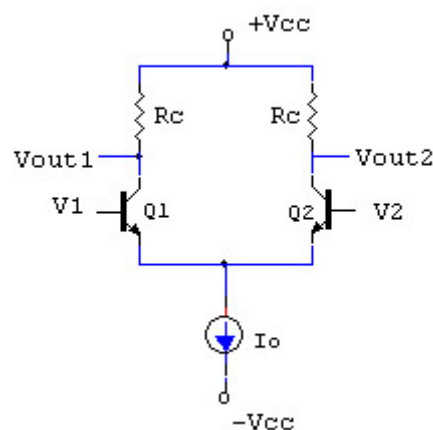


fig. 16

Nel differenziale di fig. 16:

- i due collettori , a riposo, sono allo stesso potenziale V_{outdc}
- gli effetti del segnale di modo comune ai due collettori sono identici, vista la simmetria della rete
- gli effetti del segnale differenza ai due collettori sono uguali ed opposti, visto che il segnale differenza fa variare le due correnti in modo opposto

La tensione di uscita è $V_{out} = V_{out1} - V_{out2}$

Prelevando la tensione di uscita tra un collettore e l'altro:

- vengono sottratte le due tensioni di riposo (e il carico non è percorso dalla corrente continua)
- vengono sottratti gli effetti residui del segnale di modo comune ai due collettori
- la tensione di uscita (e quindi l'amplificazione differenziale) raddoppia, dato che il carico è pilotato da due tensioni in controfase

Nella simulazione di fig. 17, V_1 è un segnale sinusoidale di picco 10mV (V_{in}) applicato all'ingresso non invertente a massa, mentre $V_2 = 0$.

Le forme d'onda mostrano che :

- V_{out1} varia in opposizione di fase rispetto a V_{in} , attorno a V_{outdc} , e che il valore picco picco del segnale è 2.5V
- V_{out2} varia in fase con V_{in} , attorno a V_{outdc} , e che il valore picco picco del segnale è 2.5V
- V_{out} non ha componente continua ed ha un valore di picco doppio rispetto a V_{out1} e V_{out2}

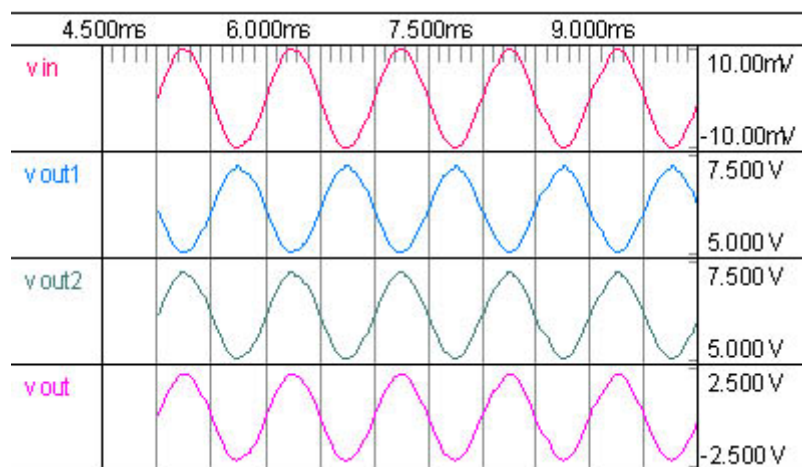


Fig. 17

La simulazione conferma perciò che nell'uso ad uscita bilanciata, la tensione continua presente in ciascuno dei due collettori viene sottratta e che il guadagno differenziale raddoppia. Le tensioni ai due collettori sono, come ci aspettavamo, in opposizione di fase.

Lo stesso differenziale, quindi, ha un CMRR senz'altro elevato se usato ad uscita sbilanciata; ha un CMRR elevatissimo se usato ad uscita bilanciata perchè, come abbiamo appena visto, in questo uso, gli effetti residui del segnale di modo comune ai due collettori vengono ulteriormente sottratti.

L'uso del differenziale ad uscita bilanciata è possibile soltanto quando l'utilizzatore non deve avere un punto a massa; ad esempio quando il carico è un indicatore a bobina mobile oppure quando lo stadio successivo è un altro differenziale.

Approfondimenti

Nella sua versione più semplice, l'amplificatore differenziale ha lo schema di fig.15, in cui la resistenza R_e sostituisce il generatore di corrente I_o ; ovviamente R_e non è in grado di mantenere costante la somma $I_{c1}+I_{c2}$, a meno che essa non sia molto elevata, e quindi l'amplificatore lascia a desiderare dal punto di vista della soppressione del segnale di modo comune. La corrente che scende in R_e a riposo è :

$$I_o = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_e}$$

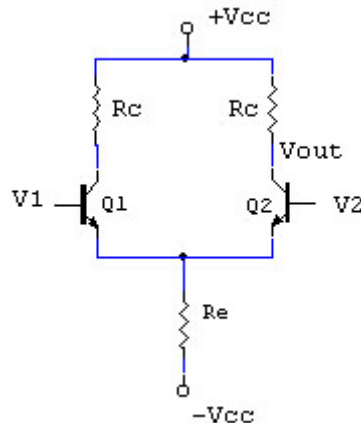


Fig.15

Essa si suddivide in parti uguali, per cui $I_{c1q} = I_{c2q} = \frac{I_o}{2}$.

Per ricavare l'amplificazione di modo comune A_c , si sottopone l'amplificatore ad un pilotaggio simmetrico e si disegna il circuito dinamico, come in Fig.16.

Tenendo presente che $V_{out} = -R_c \cdot \Delta I_c$ e $V \cong (r_e + 2R_e) \cdot \Delta I_c$, dove r_e è la resistenza differenziale della giunzione base emettitore e ΔI_c è la variazione della corrente di collettore, otteniamo che :

$$A_c = \frac{V_{out}}{V} = \frac{-R_c}{r_e + 2R_e}$$

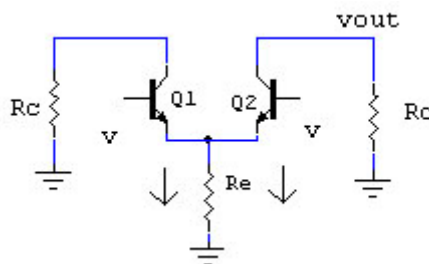


Fig.16

Di solito $R_E \gg r_e$ per cui $A_c \cong -\frac{R_c}{2R_E}$

Per ricavare l'amplificazione differenziale A_d , si utilizza invece un pilotaggio antisimmetrico (Fig.17).

Il pilotaggio antisimmetrico provoca, in R_E , variazioni di corrente uguali ed opposte; la variazione di corrente complessiva in R_E è, perciò, nulla e i due emettitori sono a massa. E allora, poichè $V_{out} = R_c \cdot \Delta I_c$ e $V = \Delta V_{be} \cong r_e \cdot \Delta I_c$, otteniamo:

$$A_d = \frac{V_{out}}{2V} = \frac{R_c}{2r_e} = \frac{R_c \cdot I_{cq}}{2V_T}$$

con $V_T = 25mV$

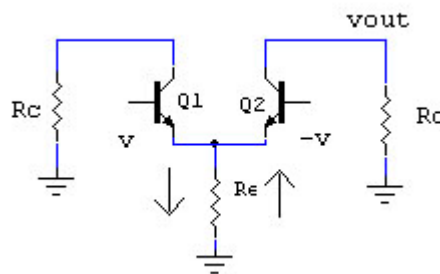


Fig.17

A questo punto possiamo ricavare il CMRR:

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_E}{r_e} = \frac{I_{cq} \cdot R_E}{V_T}$$

E' evidente che, per ottenere un CMRR molto elevato, R_E deve essere molto grande (e infatti, il generatore di corrente, che effettivamente si utilizza, si comporta , dal punto di vista dinamico, come una resistenza molto grande).

La resistenza di ingresso di modo comune R_{icm} è la resistenza vista dal segnale di modo comune $V_c=V$; più precisamente:

$$R_{icm} = \frac{V}{\Delta I_b} = \frac{\Delta V_{be} + 2 R_E \cdot \Delta I_c}{\Delta I_b} \cong \frac{2 R_E \cdot \Delta I_c}{\Delta I_b} = 2 h_{fe} \cdot R_E$$

La resistenza di ingresso differenziale R_{id} è la resistenza vista dal segnale differenza $V_d=2V$ (Fig.17). Essa è definita come:

$$R_{id} = \frac{2V}{\Delta I_b} = \frac{2 \Delta V_{be}}{\Delta I_b} \cong \frac{2 r_e \cdot \Delta I_c}{\Delta I_b} = 2 h_{fe} \cdot r_e = 2 h_{ie}$$

In entrambi i casi ΔI_b è la variazione della corrente di base mentre ΔV_{be} è la variazione della tensione base-emettitore e viene trascurata nel calcolo di R_{icm} .

Perché il differenziale è un eccellente amplificatore in continua?

Negli amplificatori in continua bisogna fare i conti con la deriva della tensione di uscita, dovuta alla lenta variazione della corrente di riposo con la temperatura, con l'invecchiamento dei componenti etc.; ciò comporta la fluttuazione lenta della tensione di uscita a riposo. Questo fenomeno è particolarmente importante negli amplificatori in continua a più stadi, perché la deriva del primo stadio è amplificata da tutti gli altri.

Il differenziale è un eccellente amplificatore in continua per la sua simmetria; infatti, essendo Q1 e Q2 identici (Fig. 6) e alloggiati sullo stesso integrato, le loro correnti di riposo dovrebbero variare allo stesso modo e ciò non è consentito dal generatore di corrente I_o (o lo è solo in parte); di conseguenza le correnti I_{c1q} e I_{c2q} variano pochissimo e anche V_{outdc} varia molto poco.

Il differenziale è perciò un amplificatore a bassa deriva e ciò è particolarmente vero nell'uso ad uscita bilanciata; esso è impiegato per la realizzazione su scala integrata di amplificatori in continua a più stadi (ad esempio l'amplificatore operazionale)