

Amplificatori a BJT

Per realizzare un semplice amplificatore, utilizzando un BJT, si procede come segue:

- Si polarizza un BJT in regione attiva, usando una adeguata rete di polarizzazione; ricordiamo che, in questa regione il dispositivo si comporta da generatore di corrente pilotato dalla corrente di base
- Si utilizza la sorgente che fornisce il segnale che si vuole amplificare per far variare la grandezza di controllo (I_b); quest'ultima farà variare sensibilmente la corrente di uscita del dispositivo

Amplificatore ad emettitore comune (CE)

Studio grafico

La rete di polarizzazione che si usa, in genere, è la rete VDB (a singola alimentazione); per questo motivo, sorgente e carico vanno accoppiati capacitivamente alla rete di polarizzazione. Vediamo un esempio di amplificatore a BJT. (fig. 1)

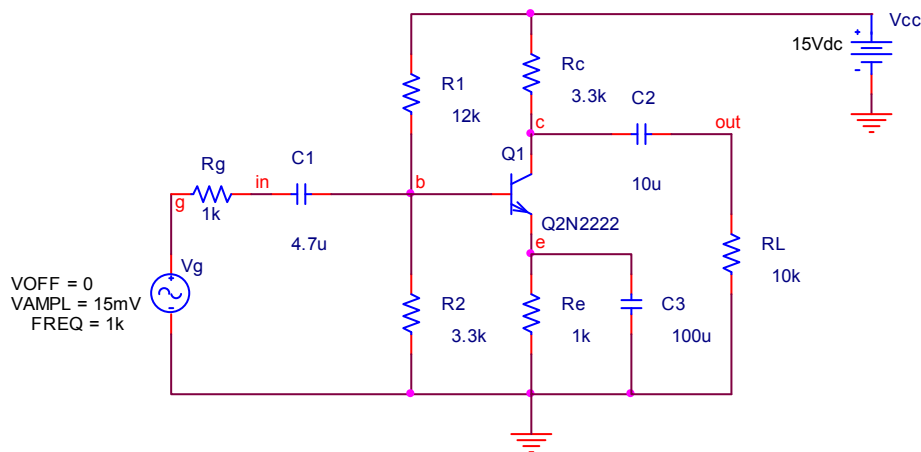


fig. 1

Come si vede dallo schema:

- La sorgente è connessa capacitivamente alla base del BJT, facendo, così, variare la tensione base-emettitore e la corrente di base
- Il carico R_L è connesso capacitivamente al collettore del BJT
- L'emettitore è posto dinamicamente a massa (a medie frequenze) mediante il condensatore C_3 ; la presenza di C_3 ha lo scopo di massimizzare l'amplificazione di tensione, come avremo occasione di vedere

Questo amplificatore è chiamato amplificatore ad emettitore comune; esso ha:

- l'ingresso in base
- l'uscita al collettore
- l'emettitore dinamicamente a massa, e quindi, comune sia alla coppia di terminali di ingresso che alla coppia di terminali di uscita

Ovviamente, sia C_1 che C_2 e C_3 devono avere capacità sufficientemente elevate in modo da risultare dei cortocircuiti in banda passante (è opportuno ricordare che, in banda passante, le capacità parassite sono, invece, dei tasti aperti).

In questo amplificatore, come in tutti gli altri, la tensione e la corrente in ogni ramo hanno due componenti:

- quella continua, dovuta all'alimentazione continua (V_{cc})
- quella variabile, dovuta alla sorgente di segnali (V_g); la componente variabile si va a sovrapporre a quella continua.

La fig. 2 riporta alcune forme d'onda, relative al circuito di ingresso dell'amplificatore.

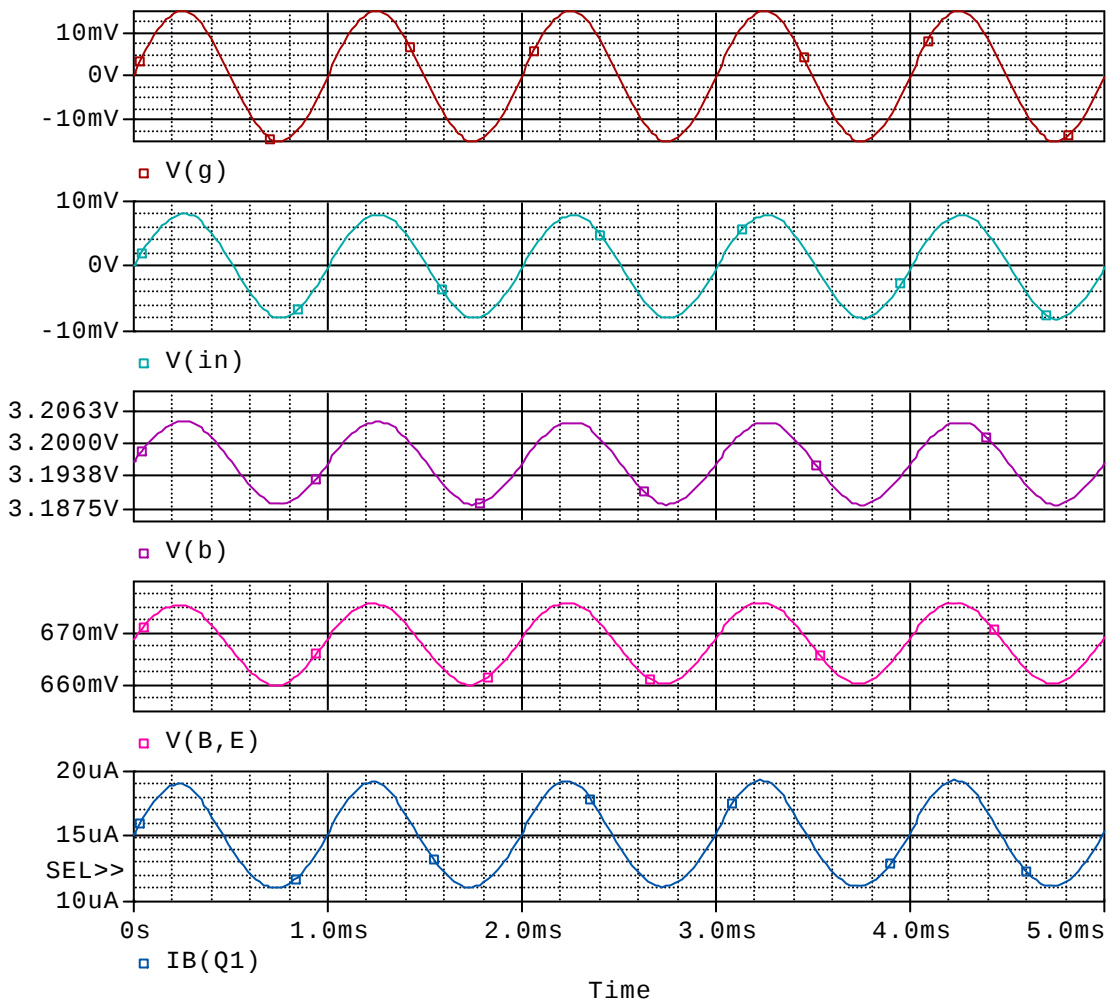


fig.2

Tenendo presente lo schema di fig. 1 e le forme d'onda di fig. 2, osserviamo che:

- la tensione V_g ha picco 15mV e frequenza 1kHz
- la tensione V_{in} è quella parte di V_g che arriva all'ingresso dell'amplificatore; il suo picco è minore di 10mV
- la tensione V_{in} attraversa il condensatore C_1 , che in banda passante è un cortocircuito, e va a sovrapporsi alla tensione continua V_{bq} presente in base; il risultato della sovrapposizione è la tensione $V_{b(t)} \cong V_{bq} \oplus V_{in}$
- il segnale che arriva in base, cioè V_{in} , si distribuisce tra la giunzione base-emettitore e la resistenza R_e , facendo variare la tensione ai loro capi; cioè $V_{in} = \Delta V_{be(t)} \oplus \Delta V_{RE(t)}$
- la variazione subita da V_{be} , attorno al suo valore di riposo (circa 15µA) fa variare I_b , sempre attorno al suo valore di riposo; la variazione subita da I_b ha un picco di circa 4 µA

E' importante notare che se, in parallelo a R_e , poniamo un condensatore di capacità elevata, come nello schema di fig. 1, esso mantiene costante la tensione ai capi di R_e e, quindi, la variazione subita da $V_{RE(t)}$ è nulla; cioè $\Delta V_{RE(t)} \cong 0$; di conseguenza $V_{in} = \Delta V_{be(t)}$ e il segnale che arriva in base viene utilizzato tutto per far variare V_{be} ; in queste condizioni, la variazione subita dalla corrente di base (e quindi quella subita dalla corrente di collettore) è massima ed anche l'amplificazione risulta rilevante.

Riferendoci alle forme d'onda riportate in fig. 3, occorre notare ancora che:

- la piccola variazione subita da I_b fa variare la corrente di collettore attorno al suo valore di riposo ($I_{CQ} \approx 2.5\text{mA}$); la variazione subita da I_c ha un picco di circa 0.7mA ; in sostanza I_c varia in fase sia con I_b , sia con V_g (e V_{in})
- quando I_c aumenta, aumenta anche la caduta su R_c e, perciò, il potenziale al collettore V_c diminuisce; in definitiva V_c varia in opposizione di fase con I_c , I_b , V_{in} e V_g ; la variazione subita da V_c ha un picco di circa 1.6V
- la tensione di uscita V_{out} non è altro che la tensione V_c che è stata privata della sua componente continua da C_2 ; e infatti il picco di V_{out} è circa 1.6V , come il picco della variazione subita da V_c
- l'amplificatore è invertente perché V_{out} varia in opposizione di fase rispetto a V_g ;

l'amplificazione di tensione complessiva è $A_{vt} = \frac{V_{outp}}{V_{gp}} = \frac{1.6\text{V}}{15 \cdot 10^{-3}} = 106.7$

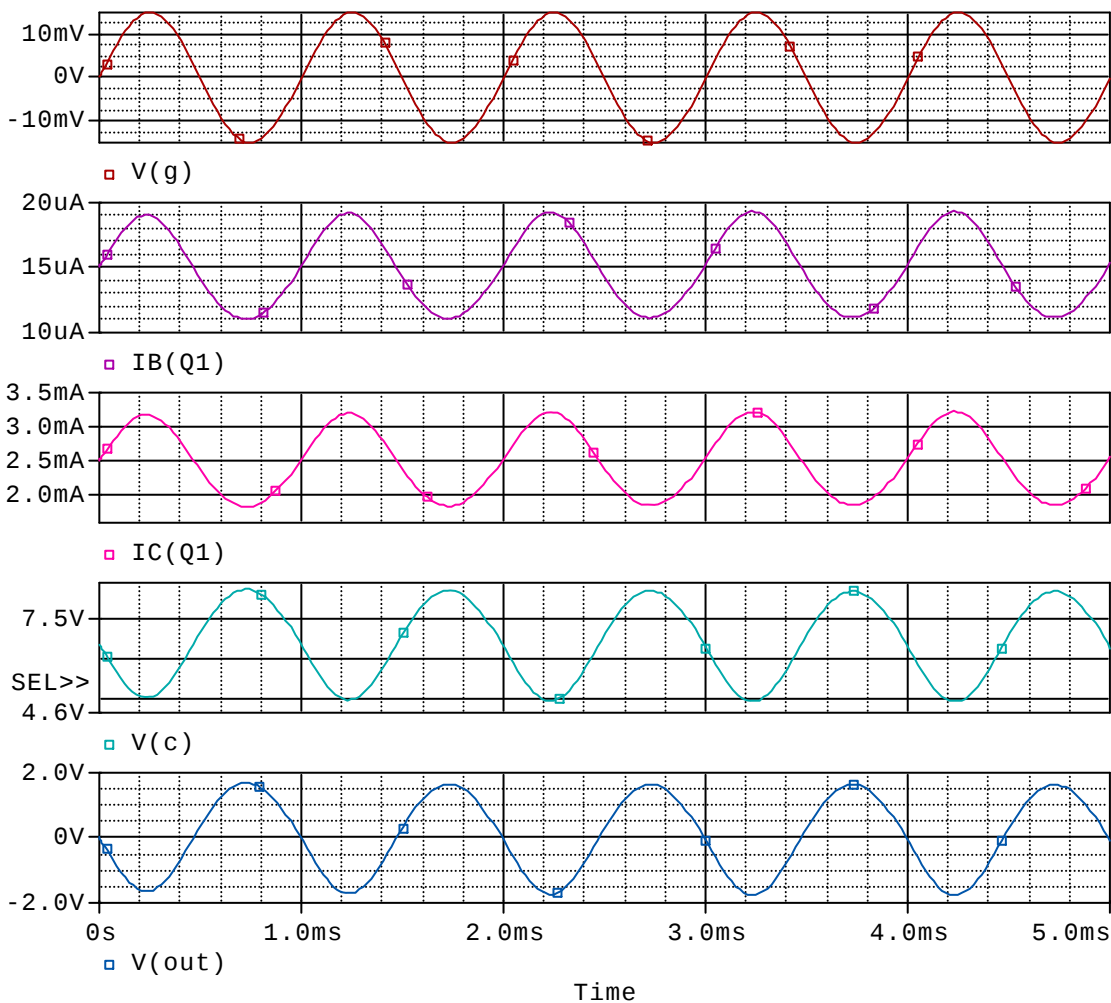


fig. 3

Le forme d'onda appena viste non evidenziano bene un fenomeno che si manifesta più o meno in tutti gli amplificatori, non appena l'escursione della corrente di base e di quella di collettore attorno al valore di riposo diventa rilevante; il fenomeno di cui parliamo è la distorsione di non linearità, dovuta al fatto che le caratteristiche dei dispositivi attivi non sono lineari.

La distorsione di non linearità è tanto più evidente quanto più elevata è l'escursione del punto di funzionamento del BJT attorno al punto di riposo Q ; viceversa è tanto più ridotta quanto più piccola è l'escursione attorno a Q , come nelle forme d'onda di fig. 3.

In fig. 4 sono riportate le forme d'onda relative alla corrente di collettore, alla tensione di collettore e a quella di uscita; l'amplificatore è lo stesso di fig. 1 in cui il picco di V_g è stato

portato a 30mV; come possiamo vedere, la semionda positiva della corrente di collettore risulta più appuntita mentre quella negativa risulta più arrotondata. Al contrario, la semionda positiva di V_c e V_{out} è più arrotondata mentre quella negativa è più appuntita; ciò è dovuto al fatto che, quando I_c aumenta, V_c e V_{out} diminuiscono e viceversa per cui, alla semionda positiva di I_c , corrisponde la semionda negativa di V_c e V_{out} .

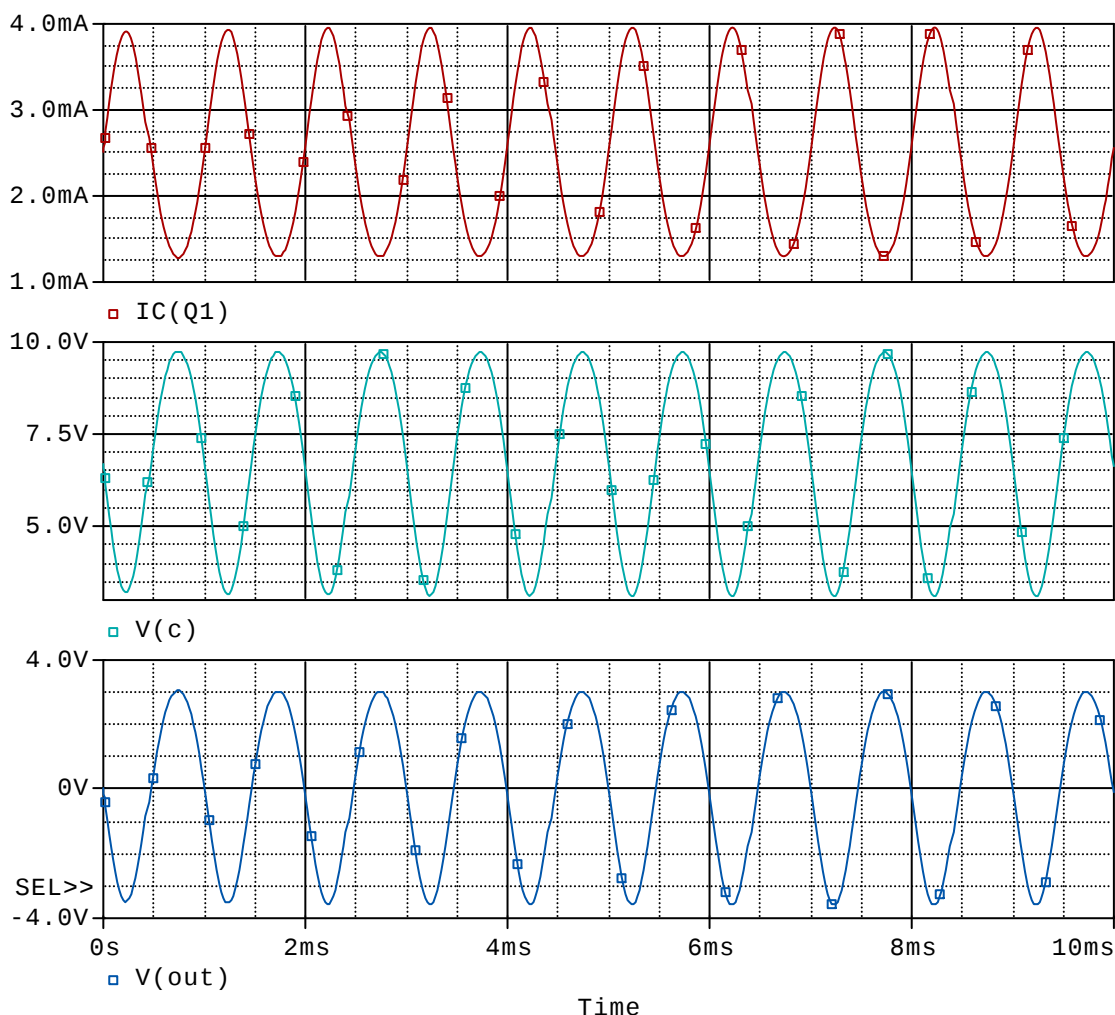


fig. 4

Il fatto che la semionda positiva di I_c risulta più appuntita mentre quella negativa è più arrotondata è dovuta al fatto che, per il carattere esponenziale della caratteristica I_c/V_{be} , a parità di variazione di V_{be} attorno al valore di riposo, I_c aumenta più di quanto non diminuisca.

In fig. 5, troviamo la caratteristica I_c/V_{be} di un BJT in regione attiva. Il punto Q è quello di riposo in cui $V_{beq}=720mV$ e $I_{cq}=8mA$.

Aumentando V_{be} di 20mV, il punto di funzionamento si sposta nel punto B in cui $I_{cq}=16mA$; viceversa, diminuendo V_{be} di 20mV, il punto di funzionamento si sposta nel punto A in cui $I_{cq}=4mA$.

Notiamo allora che, se aumentiamo V_{be} di 20mV, I_c aumenta di 8mA; mentre, se V_{be} diminuisce della stessa quantità, I_c diminuisce solo di 4mA.

Come abbiamo già detto, questo comportamento è dovuto al carattere esponenziale della caratteristica; diminuendo l'escursione di V_{be} attorno al valore di riposo, le non linearità diventano meno evidenti e la distorsione si riduce.

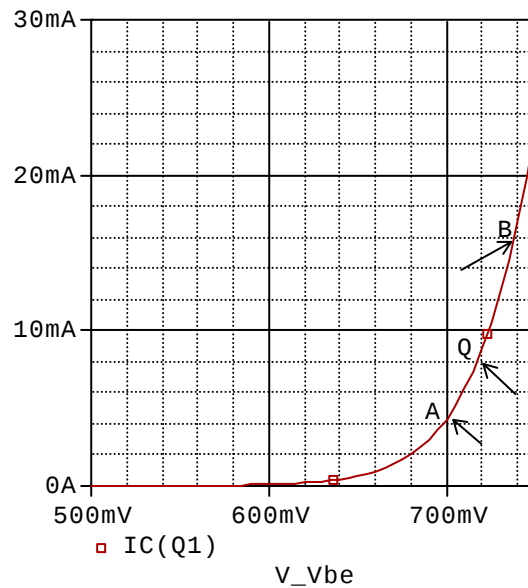


fig. 5

In definitiva, per ridurre la distorsione di non linearità, in un amplificatore a BJT, bisogna ridurre l'escursione della corrente di collettore attorno al suo valore di riposo.

Un amplificatore per piccoli segnali è un amplificatore in cui l'escursione della corrente di collettore attorno al suo valore di riposo non supera il 10%

Studio analitico

Per effettuare lo studio analitico del comportamento del CE in banda passante, occorre tracciare il circuito dinamico relativo alle medie frequenze (fig. 6)

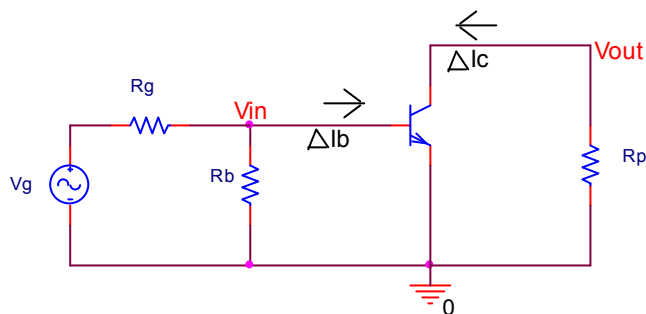


fig. 6

Ricordiamo che, nel circuito dinamico, agiscono le variazioni delle grandezze elettriche, rispetto ai valori di riposo; perciò, nello schema:

$$I_{in} = \Delta I_b, \quad I_{out} = \Delta I_c, \quad V_{in} = \Delta V_{be}, \quad V_{out} = \Delta V_{ce}$$

Inoltre, abbiamo $R_p = R_c // R_L$ e $R_b = R_1 // R_2$

Come sappiamo, il BJT è un dispositivo attivo pilotato dalla corrente di base; il comando esercitato dalla corrente di base I_b sulla corrente di collettore I_c , nel circuito dinamico, è descritto dalla relazione:

$$\Delta I_c = h_{fe} \Delta I_b$$

Il parametro h_{fe} è chiamato "hfe dinamico ed è leggermente diverso dal guadagno statico di corrente (h_{FE}); noi, spesso, in prima approssimazione non faremo distinzione tra i due parametri e assumeremo $h_{fe} \cong h_{FE}$

Ricaviamo l'amplificazione intrinseca di tensione $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$.

Dallo schema di fig. 6, abbiamo:

$$I_c = \frac{0 - V_{out}}{R_p} = -\frac{V_{out}}{R_p}$$

per cui:

$$V_{out} = -R_p I_c$$

e, poiché $V_{in} = \Delta V_{be}$, troviamo:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_p I_c}{\Delta V_{be}}$$

Osserviamo che $r_e = \frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_e}$ è la resistenza differenziale associata alla giunzione base-emettitore che, nei BJT funzionanti in regione attiva, è polarizzata direttamente; ricordiamo anche che la resistenza differenziale di una giunzione polarizzata direttamente è piccola perché piccole variazioni della tensione diretta provocano grandi variazioni di corrente. Basta osservare, a tale scopo, la caratteristica I_c/V_{be} di fig. 5 che evidenzia come una piccola variazione di V_{be} provochi una grande variazione di I_c e, quindi, di I_e .

In base a quanto detto, abbiamo $\Delta V_{be} = r_e \Delta I_e \approx r_e \Delta I_c$, dato che in regione attiva, $\Delta I_c \cong \Delta I_e$, e, pertanto:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_p I_c}{\Delta V_{be}} = \frac{-R_p I_c}{I_c r_e} = -\frac{R_p}{r_e}$$

Osserviamo che A_v è il rapporto tra R_p , il cui ordine di grandezza è il k Ω , negli amplificatori per piccoli segnali, e la resistenza differenziale di emettitore r_e , che è piccola e il cui ordine di grandezza è la decina di ohm; di conseguenza, l'amplificazione di tensione del CE è abbastanza elevata.

Inoltre, dalla teoria della giunzione, si può dimostrare che:

$$r_e = \frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_e} = \frac{V_T}{I_c}$$

dove V_T è una tensione il cui valore è legato alla temperatura a cui opera il BJT; a 27°C, cioè a 300°K, abbiamo $V_T = 25\text{ mV}$.

In definitiva, otteniamo:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_p}{r_e} = -\frac{R_p}{V_T / I_c} = -\frac{I_c R_p}{V_T}$$

Negli amplificatori per piccoli segnali, l'escursione di I_c attorno al valore di riposo si mantiene piccola; perciò possiamo assumere $I_c \cong I_{cq}$ e, di conseguenza:

$$A_v \cong A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{I_{cq} R_p}{V_T}$$

Il fatto che A_v risulti negativa significa soltanto che V_{out} varia in opposizione di fase rispetto a V_{in} e che, quindi, l'amplificatore è invertente.

NOTA 1

Il valore di A_v che si ottiene nella realtà può essere un po' minore rispetto a quello preventivato; ciò è dovuto al fatto che:

- l'espressione ottenuta per A_v è strettamente valida solo nell'ambito di segnali molto piccoli
- la giunzione base emettitore ha qualche effetto resistivo che si va a sommare alla resistenza differenziale r_e e ciò riduce l'amplificazione

NOTA 2

Abbiamo visto che $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-I_c R_p}{V_T}$; ciò significa che, se l'escursione di I_c , attorno al valore di riposo, non è piccola :

- durante la semionda positiva di V_g , I_c aumenta e anche $|A_v|$ aumenta;
- durante la semionda negativa, I_c diminuisce ed anche $|A_v|$ diminuisce

In sostanza, nell'amplificatore ad emettitore comune, la semionda positiva di V_g viene amplificata di più (e invertita di fase); invece, la semionda negativa è amplificata di meno (e invertita di fase); ciò comporta una non trascurabile distorsione di non linearità che si traduce nella comparsa di alcune armoniche del segnale di ingresso che, ricordiamolo, è puramente sinusoidale.

Ripetiamo che, per ridurre la distorsione di non linearità, bisogna ridurre l'escursione di I_c

attorno al valore di riposo e, in questo caso, $A_v = \frac{-I_{cq} R_p}{V_T}$

Ricaviamo adesso la resistenza di ingresso dell'amplificatore, necessaria per calcolare

l'amplificazione di tensione complessiva $A_{vt} = \frac{V_{out}}{V_g}$.

La resistenza di ingresso dell'amplificatore è la resistenza vista dalla sorgente che pilota l'amplificatore (fig. 7)

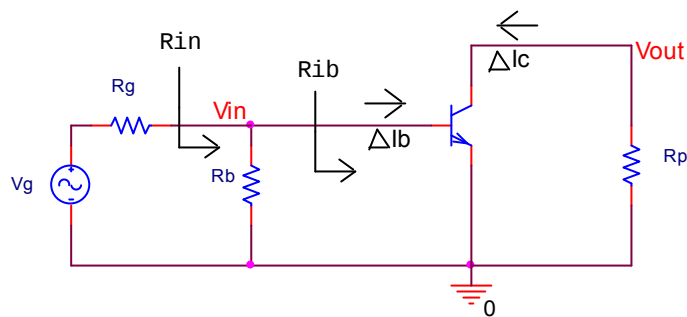


fig. 7

Dallo schema è evidente che $R_{in} = R_b \parallel R_{ib}$, dove R_{ib} è la resistenza che si vede guardando dentro la base, che adesso calcoleremo; per farlo. Teniamo presente che:

$$R_{ib} = \frac{V_{in}}{\Delta I_b} = \frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_b}$$

Poiché $\Delta V_{be} = r_e \Delta I_e \cong r_e \Delta I_c$, sostituendo otteniamo:

$$R_{ib} = \frac{r_e \Delta I_c}{\Delta I_b} = h_{fe} r_e = h_{fe} \frac{V_T}{I_c} = h_{ie}$$

Come possiamo vedere, la resistenza che si vede, guardando dentro la base di un BJT che ha l'emettitore a massa, è h_{fe} volte più grande rispetto alla resistenza differenziale di emettitore r_e e varia con la corrente di collettore I_c (d'altronde il BJT è un componente non lineare); essa prende il nome di h_{ie} e, per calcolarne il valore in un amplificatore per piccoli segnali, si assume $I_c \cong I_{cq}$ e, perciò:

$$h_{ie} \cong h_{fe} \frac{V_T}{I_{cq}}$$

A questo punto, possiamo calcolare $A_{vt} = \frac{V_{out}}{V_g}$; tenendo presente che $V_{out} = A_v \cdot V_{in}$, otteniamo:

$$A_{vt} = \frac{V_{out}}{V_g} = \frac{A_v \cdot V_{in}}{V_g} = A_v \cdot \alpha_{in} = A_v \cdot \frac{R_{in}}{R_g \parallel R_{in}}$$

Per quanto riguarda l'amplificazione intrinseca di corrente:

$$A_I = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = h_{fe}$$

ed è abbastanza elevata; mentre per quella complessiva $A_{It} = \frac{I_L}{I_g}$, occorre far riferimento alla fig. 8

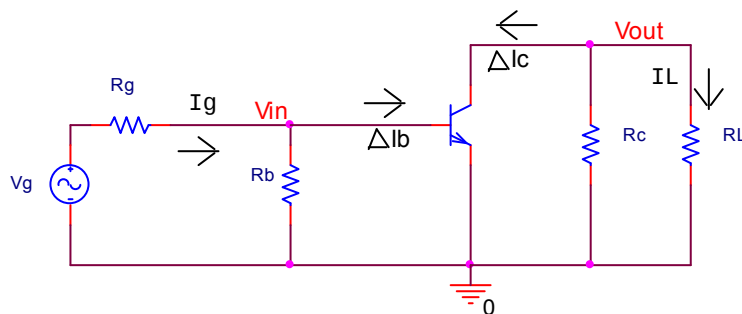


fig. 8

da cui ricaviamo:

$$A_{It} = \frac{I_L}{I_g} = \frac{\frac{V_{out}}{R_L}}{\frac{V_g}{R_g \parallel R_{in}}} = \frac{V_{out}}{R_L} \cdot \frac{R_g \parallel R_{in}}{V_g} = A_{vt} \cdot \frac{R_g \parallel R_{in}}{R_L}$$

Ricaviamo adesso la resistenza di uscita R_{out}

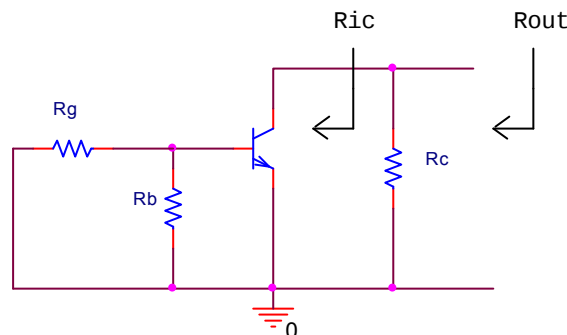


fig. 9

per farlo, riferiamoci alla fig. 9; la resistenza di uscita R_{out} è la resistenza vista dal carico (guardando verso l'interno dell'amplificatore), con l'ingresso chiuso sulla resistenza R_g .

Dallo schema si ricava che:

$$R_{out} = R_c // R_{ic}$$

dove R_{ic} è la resistenza vista guardando dentro al collettore del BJT; poiché il BJT è in regione attiva, esso si comporta da generatore di corrente nei confronti del carico sul collettore; di conseguenza R_{ic} è elevata e, quindi, si può assumere:

$$R_{out} = R_c // R_{ic} \cong R_c$$

In realtà, la resistenza di uscita è un po' più piccola di R_c .

In conclusione, l'amplificatore ad emettitore comune:

- amplifica in corrente
- amplifica in tensione ed è invertente
- introduce un certo grado di distorsione di non linearità, perché A_v dipende da I_c (la si riduce, riducendo l'escursione di I_c attorno al valore di riposo)
- ha una resistenza di ingresso di medio valore (qualche k Ω)
- ha una resistenza di uscita di medio valore (qualche k Ω)

Circuito equivalente del BJT

Lo studio dell'amplificatore ad emettitore comune, e di tutti gli amplificatori a BJT, può essere affrontato, utilizzando il circuito equivalente a parametri h (ibridi) del BJT (fig. 10).

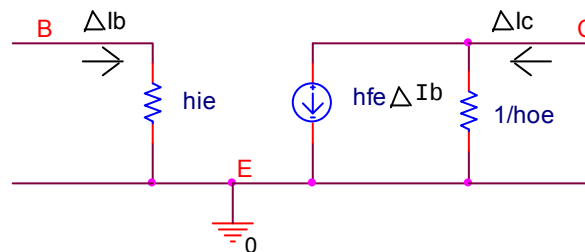


fig. 10

Il circuito equivalente tiene conto del fatto che la base del BJT assorbe la tensione ΔV_{be} e la corrente di pilotaggio ΔI_b ; il circuito di ingresso del BJT è, perciò, rappresentato dalla resistenza che si vede guardando dentro la base, cioè da $h_{ie} = h_{fe} r_e = h_{fe} \frac{V_T}{I_c} \cong h_{fe} \frac{V_T}{I_{cq}}$

Il circuito di uscita tiene conto del fatto che il BJT è un generatore di corrente, pilotato dalla corrente di base, che eroga la corrente $h_{fe} \Delta I_b$.

Il generatore di corrente ha una resistenza elevata, ma non infinita, descritta da $\frac{1}{h_{oe}}$; h_{oe}

ha le dimensioni di una conduttanza e $\frac{1}{h_{oe}}$ è la resistenza che si vede guardando dentro il collettore di un BJT che ha l'emettitore a massa.

NOTA

In genere $\frac{1}{h_{oe}}$ è molto maggiore di tutte le resistenze che essa si trova ad avere in parallelo; per questo motivo, noi la ignoreremo quasi sempre.

Se adesso, nel circuito di fig. 6, al BJT sostituiamo il suo circuito equivalente, otteniamo il circuito di fig. 11

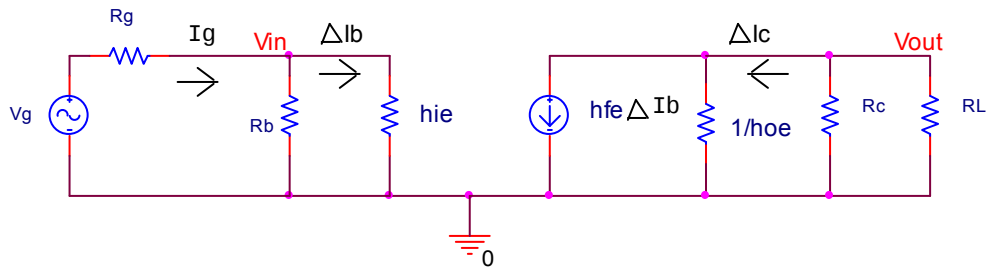


fig. 11

Se teniamo conto che:

$$R_p = R_C // R_L // \frac{1}{h_{oe}} \cong R_C // R_L$$

il circuito di fig. 11 si riconduce a quello di fig. 12:

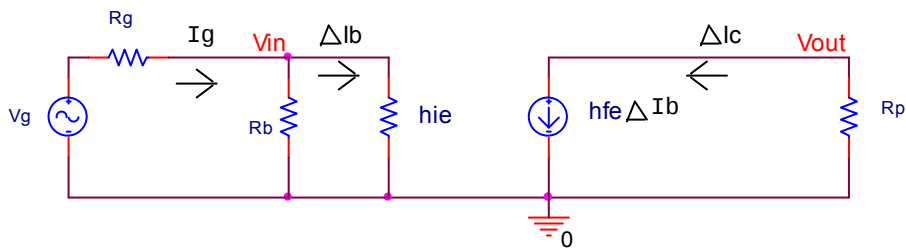


fig. 12

Osserviamo che (fig. 12):

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-h_{fe} \Delta I_b R_p}{h_{ie} \Delta I_b} = \frac{-h_{fe} R_p}{h_{ie}}$$

Poiché $h_{ie} = h_{fe} r_e$, otteniamo:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-h_{fe} R_p}{h_{fe} r_e} = \frac{-R_p}{r_e}$$

come avevamo già trovato, senza ricorrere al circuito a parametri ibridi del BJT; per questo motivo, da ora in poi, noi faremo a meno del circuito a parametri h del BJT, il cui comportamento sarà descritto dalla relazione $\Delta I_c = h_{fe} \Delta I_b$.

Amplificatore con retroazione di emettitore

L'amplificatore con retroazione di emettitore è una variante dell'amplificatore ad emettitore comune (CE); infatti, come si vede dalla figura 13, il suo schema è quello di un CE in cui la resistenza di emettitore è stata suddivisa in due parti, di cui solo una è shuntata dal condensatore di bypass.

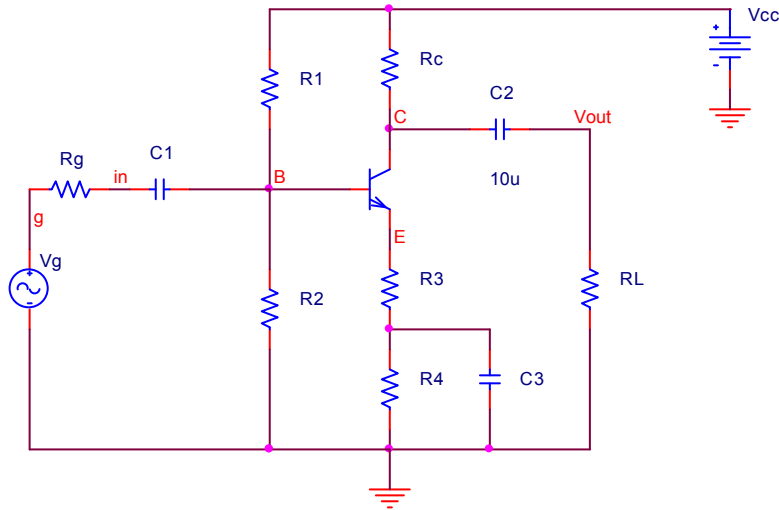


fig. 13

Il circuito statico dell'amplificatore è riconducibile ad una rete VDB in cui la resistenza sull'emettitore è $R_e = R_3 \parallel R_4$.

Il fatto che la resistenza di emettitore sia shuntata solo parzialmente ha delle conseguenze sul comportamento dell'amplificatore in banda passante; infatti, adesso, una parte della tensione V_{in} che arriva in base si trasferisce sulla resistenza R_3 ; il resto (e non più tutta la V_{in} , come nel CE) viene utilizzato per far variare V_{be} e, quindi I_b e I_c , che variano di meno che nel CE; aspettiamoci, quindi, che, in questo amplificatore, l'amplificazione di tensione sia minore che nel CE.

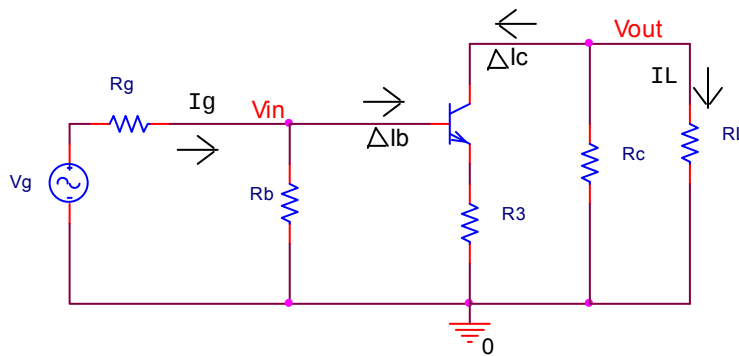


fig. 14

La fig. 14 riporta il circuito dinamico alle medie frequenze dell'amplificatore con retroazione di emettitore.

Ricaviamo l'amplificazione di tensione intrinseca A_v , facendo riferimento alla fig. 15:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_p \Delta I_c}{\Delta V_{be} \parallel R_3 \Delta I_e} = \frac{-R_p \Delta I_c}{r_e \Delta I_e \parallel R_3 \Delta I_e} \cong \frac{-R_p \Delta I_c}{r_e \parallel R_3 \Delta I_c} = \frac{-R_p}{r_e \parallel R_3}$$

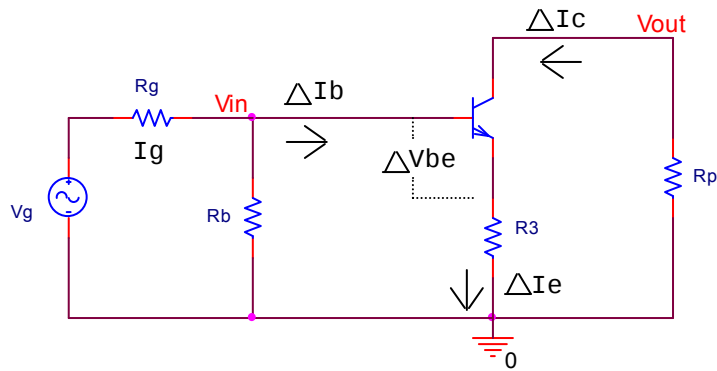


fig. 15

Osserviamo che:

- in questo amplificatore, invertente come il CE, l'amplificazione di tensione $\square A_v \square$ è sicuramente minore rispetto al valore che ha nell'amplificatore ad emettitore comune; infatti nel CE abbiamo $\square A_v \square \equiv \frac{R_p}{r_e}$ che è sicuramente maggiore di $\frac{R_p}{r_e \square R_3}$
- quasi sicuramente $R_3 \gg r_e$ e, perciò, $A_v \equiv \frac{-R_p}{R_3}$; A_v è, quindi, quasi costante e, soprattutto, pressochè indipendente dalla corrente di collettore I_c .

In definitiva, in questo amplificatore, l'amplificazione di tensione è più ridotta ed è quasi costante; questo significa che entrambe le semionde del segnale sinusoidale di ingresso vengono amplificate allo stesso modo e che la distorsione di non linearità è molto più ridotta.

Calcoliamo adesso la resistenza R_{ib} , che si vede guardando dentro la base del BJT (fig. 16):

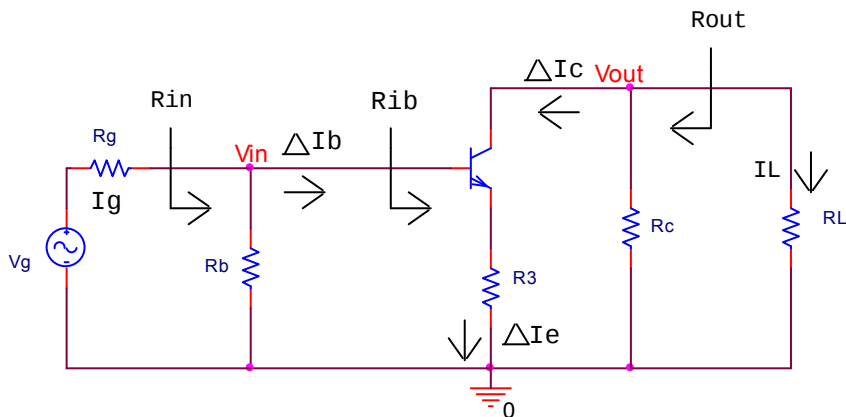


fig. 16

Abbiamo:

$$R_{ib} = \frac{V_{in}}{\Delta I_b} = \frac{\Delta V_{be} \square R_3 \square \Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{r_e \square \Delta I_e \square R_3 \square \Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{r_e \square R_3 \square \Delta I_e}{\Delta I_b} \cong h_{fe} \square r_e \square R_3 \equiv h_{ie} \square h_{fe} \square R_3$$

Osserviamo che la resistenza che si vede guardando dentro la base di un BJT, che ha una resistenza R_3 sull'emettitore, è decisamente maggiore rispetto a quella ottenuta nell'amplificatore ad emettitore comune; in quest'ultimo, infatti, $R_3 = 0$ e, perciò, R_{ib} è soltanto $h_{fe} \square r_e$, cioè h_{ie} .

La resistenza di ingresso (fig. 16) dell'amplificatore, anche in questo caso, è $R_{in} = R_b \parallel R_{ib}$ e tende ad essere maggiore che nel CE, visto che R_{ib} è più grande.

La resistenza di uscita R_{out} (fig. 16), come nel CE, è:

$$R_{out} = R_C // R_{ic} \cong R_C$$

dato che R_{ic} , cioè la resistenza vista guardando dentro al collettore, è molto elevata.

L'amplificazione di corrente intrinseca è:

$$A_I = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = h_{fe}$$

ed è abbastanza elevata, mentre quella complessiva, al solito, è:

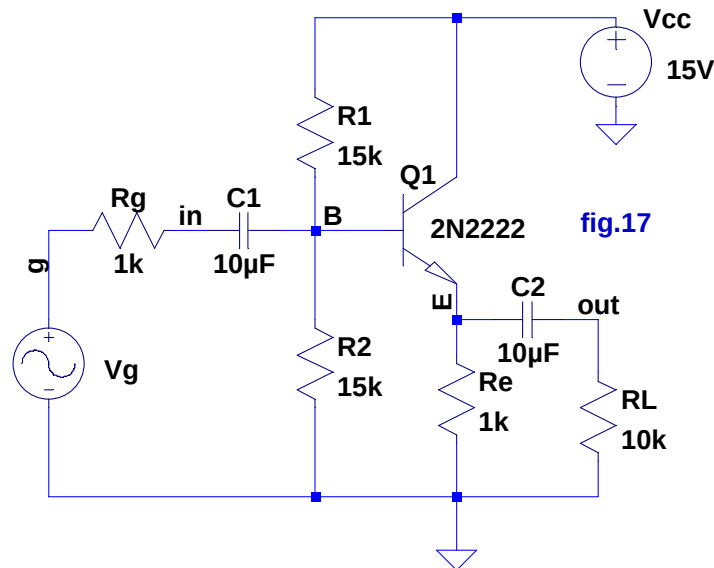
$$A_{It} = \frac{I_L}{I_g} = A_{vt} \frac{R_{in} \parallel R_g}{R_L}$$

Riepilogando, in questo amplificatore, la presenza della resistenza R_3 sull'emettitore comporta:

- una riduzione dell'amplificazione di tensione, che, però, diventa quasi indipendente da I_C , in quanto è determinata principalmente dal rapporto tra due resistenze (R_p e R_3)
- una riduzione della distorsione di non linearità
- un aumento della resistenza vista guardando dentro la base e, quindi, un aumento della resistenza di ingresso R_{in} (a parità di R_b)
- aumenta la larghezza di banda dell'amplificatore, come avremo occasione di constatare nel corso del programma

In definitiva, la presenza di R_3 migliora le prestazioni dell'amplificatore a fronte di un modesto prezzo da pagare (la riduzione di A_v)

Amplificatore a collettore comune (Emitter follower)



In questo amplificatore, l'ingresso è in base mentre il segnale di uscita è prelevato sull'emettitore; il collettore è staticamente a $+V_{cc}$ e, quindi, dinamicamente a massa.

Osserviamo che, in questo amplificatore, R_e è l'unico carico statico e, perciò, su di essa, cade una parte consistente di V_{cc} ; ciò garantisce una buona stabilità al punto di riposo nei confronti della variazione di V_{be} con la temperatura.

Osserviamo ancora che essendo $V_{be} = V_b - V_e \cong 0.7V$:

- nella semionda in cui il potenziale di base aumenta, anche il potenziale di emettitore deve aumentare, quasi dello stesso valore, per mantenere costante la differenza tra V_b e V_e
- nella semionda in cui il potenziale di base diminuisce il potenziale di emettitore diminuisce, quasi dello stesso valore, in modo che $V_b - V_e$ si mantenga quasi costante al valore di $0.7V$

In buona sostanza, in questo amplificatore:

- il potenziale di emettitore varia quasi come quello di base e, per questo motivo, l'amplificatore è chiamato emitter follower (il potenziale di emettitore segue la variazione del potenziale di base)
- quindi, in banda passante, dove C_1 e C_2 , sono dei cortocircuiti, V_{out} , che è la variazione di V_e (ΔV_e) è circa uguale a V_{in} , che è la variazione di V_b (ΔV_b)

In definitiva, nel collettore comune, il segnale che arriva in base, si trasferisce quasi tutto sull'emettitore e l'amplificatore non amplifica in tensione e non sfasa; ovviamente, l'emitter follower amplifica in corrente, visto che la corrente di ingresso è quella di base mentre quella di uscita è la corrente di emettitore.

Le forme d'onda (fig.18), relative ad una tensione V_g di picco $1V$ e frequenza $1KHz$, evidenziano che:

- V_{in} ha un picco di poco inferiore al Volt
- V_{in} arriva in base e si va a sovrapporre a $V_{bq} \cong 7.25V$
- dalla base, V_{in} si trasferisce quasi tutta sull'emettitore, sovrapponendosi a $V_{eq} \cong 6.55V$; infatti V_e varia come V_b , solo che è slittato più in basso di circa $0.7V$
- il segnale presente sull'emettitore si trasferisce in uscita, privo della sua componente continua, trattenuta da C_2

- V_{out} è in fase con V_g ed ha un picco di poco inferiore a 0.9V

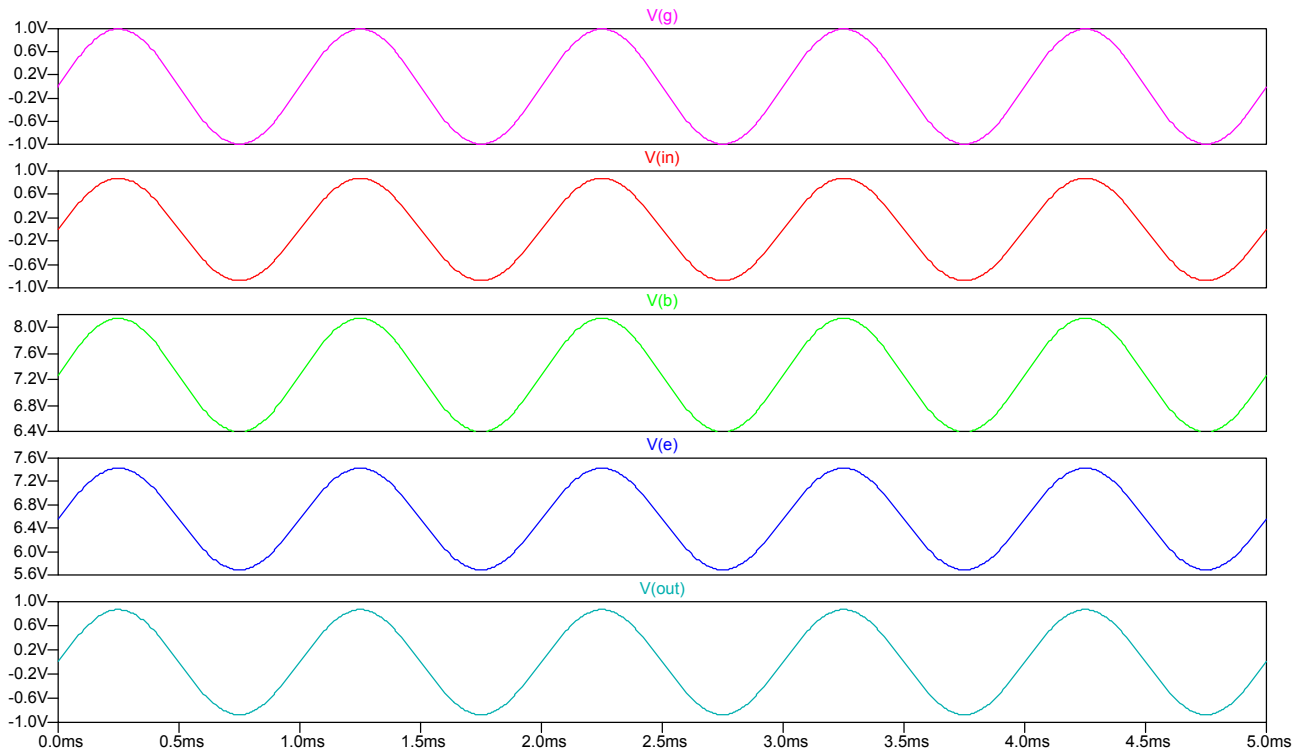


fig. 18

Per effettuare lo studio analitico in banda passante occorre disegnare il circuito dinamico relativo alle medie frequenze (fig.19)

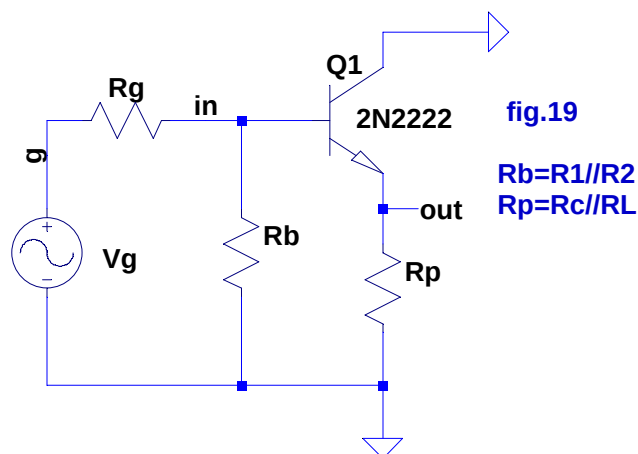


fig.19

$$R_b = R_1 // R_2$$

$$R_p = R_c // R_L$$

Abbiamo:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_c R_p}{V_{be}} = \frac{I_c R_p}{I_c r_e} = \frac{R_p}{r_e}$$

dove r_e è la resistenza differenziale della giunzione base-emettitore.

Osserviamo che:

- A_v è positiva e minore di 1; ciò significa che v_{out} varia in fase con v_{in}
- se $R_p \gg r_e$, il che è facile da ottenere visto il piccolo valore di r_e , $A_v \approx 1$; cioè

$v_{out} \cong v_{in}$, come avevamo già visto nello studio grafico

- se $A_v \cong 1$, essa risulta quasi costante e poco dipendente dalla corrente di collettore i_c ; le due semionde di v_{in} vengono, allora, amplificate allo stesso modo e l'emitter follower presenta un piccolo grado di distorsione di non-linearità

L'amplificazione di corrente è:

$$A_I = \frac{i_e}{i_b} \approx h_{fe}$$

e, quindi, l'inseguitore amplifica in corrente

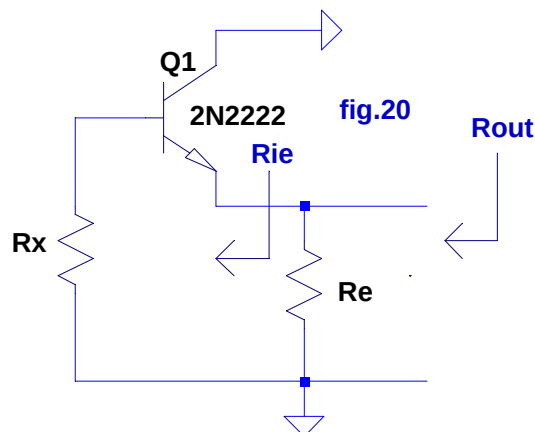
La resistenza R_{ib} vista dalla base dovrebbe essere elevata, vista la presenza della resistenza R_p sull'emettitore; infatti:

$$R_{ib} = \frac{V_{in}}{I_b} = \frac{i_c r_e + R_p}{I_b} = h_{fe} r_e + R_p$$

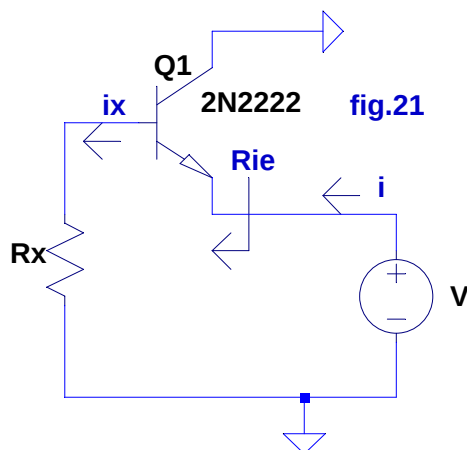
Ovviamente:

$$R_{in} = R_b // R_{ib}$$

La resistenza di uscita è la resistenza vista dal carico, con la sorgente V_g annullata (fig. 20)



In fig 20 abbiamo $R_x = R_b // R_g$ mentre R_{ie} è la resistenza che si vede guardando dentro l'emettitore (fig. 21)



Calcoliamo Rie:

$$R_{ie} = \frac{V}{i} = \frac{V_{eb} + i_x R_x}{i} = \frac{V_{eb} + i_b R_x}{i_e} = r_e + \frac{R_x}{h_{fe}}$$

Osserviamo che Rie risulta piuttosto piccola e, ancora di più, lo è Rout. In conseguenza di ciò, la tensione sul carico dipende poco dal carico stesso e l'amplificatore, nei confronti di RL, si comporta come un generatore quasi ideale di tensione.

In definitiva, l'amplificatore ad emettitore comune (emitter follower):

- non amplifica in tensione e non sfa
- amplifica in corrente
- ha Rin relativamente elevata
- ha Rout piuttosto piccola

L'inseguitore viene utilizzato:

- come stadio finale, per elevare il livello di corrente di un segnale già preamplificato in tensione
- come preamplificatore: spesso accade che la sorgente fornisca una corrente debolissima, incapace di pilotare l'amplificatore di tensione. Tra sorgente e amplificatore di tensione si interpone un inseguitore che, appunto, preamplifica la corrente.

Sostanzialmente l'inseguitore è un adattore di impedenza, esso, infatti, trasferisce la tensione fornita da una sorgente ad elevata resistenza interna, che può fornire solo una corrente molto debole, ad un carico di piccolo valore ohmico che, perciò, richiede parecchia corrente

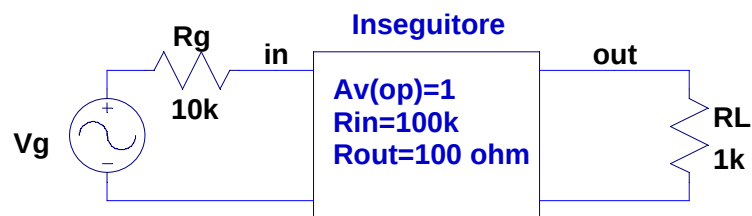


fig. 22

In fig. 22 la tensione Vg, fornita da una sorgente avente Rg=10k, viene trasferita ad un carico RL=1k, interponendo un inseguitore tra sorgente e carico; infatti:

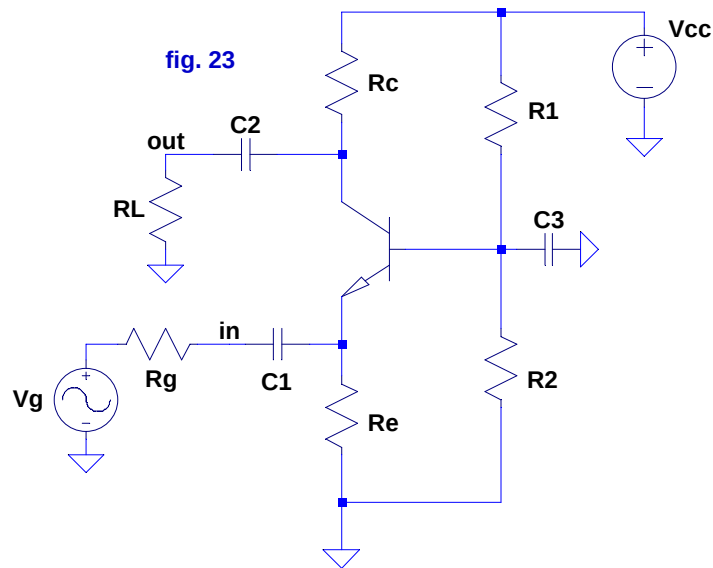
$$V_{in} = V_g \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \approx V_g$$

e

$$V_{out} = A_{v(op)} V_{in} \frac{R_L}{R_{out} + R_L} \approx V_g$$

perchè $R_L \gg R_{out}$ e $A_{v(op)} = 1$

Amplificatore a base comune (C.B.)



Nell'amplificatore a base comune, il terminale di ingresso è quello di emettitore, mentre quello di uscita è il collettore. Il potenziale di base è mantenuto costante dal condensatore C3, che deve avere una capacità sufficientemente elevata; ciò equivale a dire che la base è posta dinamicamente a massa.

Osserviamo subito che **questo amplificatore non può amplificare in corrente**; infatti, la corrente di uscita (quella di collettore) è di sicuro più piccola, sia pure di poco, di quella di ingresso (la corrente di emettitore).

Lo studio a riposo dell'amplificatore a base è identico a quello dell'amplificatore ad emettitore comune (il circuito statico di entrambi è riconducibile ad una normale rete VDB).

In figura 24 abbiamo le forme d'onda più significative, relativamente allo studio grafico del base comune.

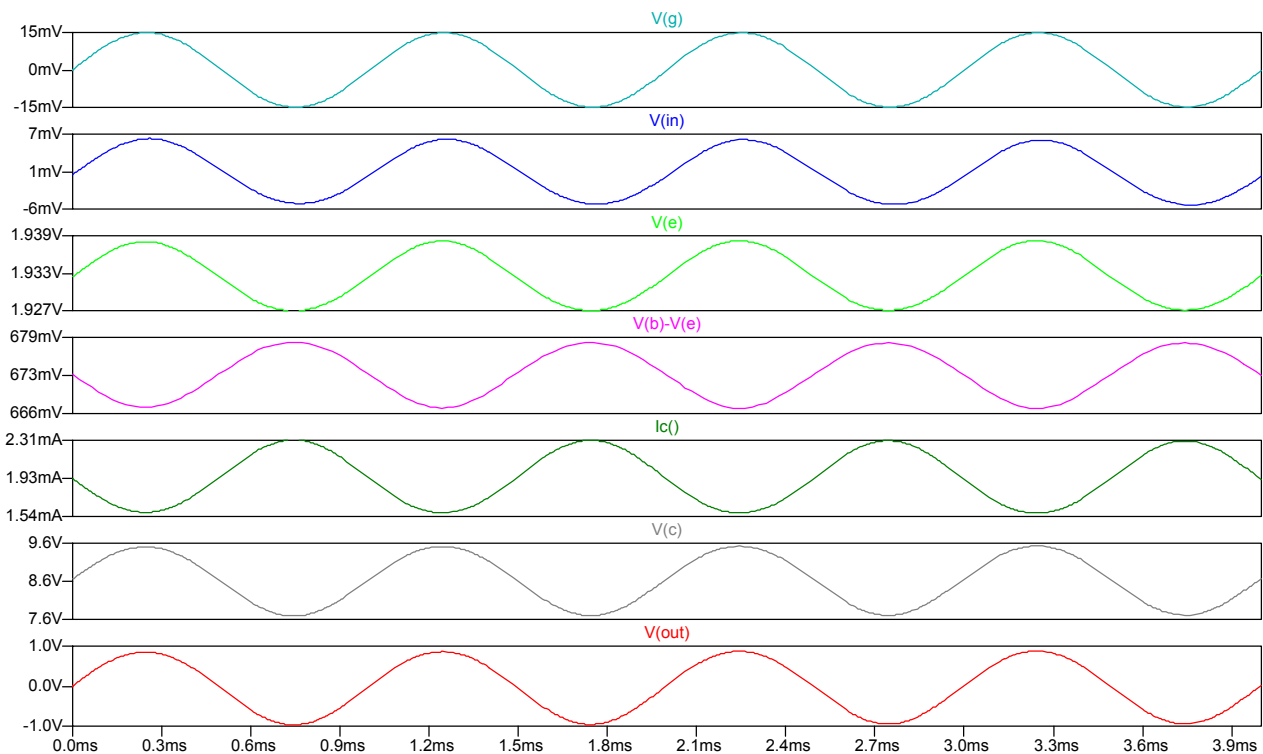


Fig. 24

Osserviamo che:

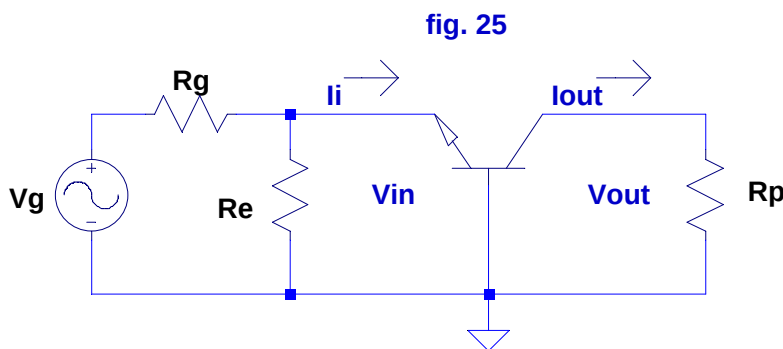
- una parte di V_g (circa il 50%, in questo caso) arriva all'ingresso dell'amplificatore (V_{in})
- V_{in} arriva al terminale di emettitore, sovrapponendosi al livello continuo
- durante la semionda positiva di V_g , V_e aumenta mentre V_b , come abbiamo già detto, rimane costante; ciò comporta che, durante la semionda positiva del segnale di ingresso, $V_{be} = V_b - V_e$ diminuisce e con essa la corrente di collettore I_c ; viceversa, durante la semionda negativa di V_g , sia V_{be} che I_c aumentano
- in sostanza V_{be} e I_c variano in opposizione di fase rispetto a V_g
- V_c e V_{out} variano in opposizione di fase con I_c e quindi in fase con la tensione V_g ; V_{out} è amplificata rispetto a V_g

In sintesi, l'amplificatore a base comune:

- non amplifica in corrente
- amplifica in tensione e non sfasa

Aspettiamoci, anzi, che l'amplificazione di tensione intrinseca A_v sia grossomodo la stessa che nell'amplificatore ad emettitore comune; in entrambi gli amplificatori, infatti, la tensione V_{in} viene utilizzata tutta per far variare V_{be} .

Per effettuare lo studio analitico in banda passante, bisogna tracciare il circuito dinamico alle medie frequenze che, in ogni caso, è quello di fig.25:



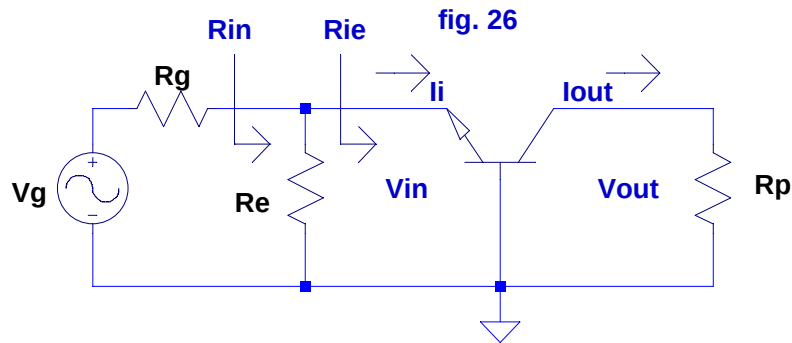
Notiamo che:

- le resistenze del partitore di base non compaiono nel circuito a medie frequenze, in quanto corto-circuitate da C_3
- l'amplificazione di corrente è $A_I = \frac{I_{out}}{I_i} = \frac{I_c}{I_e} \approx 1$ e, come abbiamo già anticipato, l'amplificatore a base comune non amplifica in corrente
- il CB richiede una corrente di ingresso ($\Delta I_e \approx h_{fe} \cdot \Delta I_b$) decisamente maggiore rispetto a quella richiesta (ΔI_b) dagli altri amplificatori studiati sino ad ora; per questo motivo è poco utilizzato e, quando lo si usa, bisogna farlo precedere da uno stadio che preamplifichi la corrente
- l'amplificazione di tensione intrinseca è

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_c R_p}{V_{be}} = \frac{I_c R_p}{I_e r_e} = \frac{R_p}{r_e} \approx \frac{I_c R_p}{V_T}$$

In sostanza, il CB può amplificare parecchio in tensione (tanto quanto il C.E.) e non sfasa; inoltre, anche nel C.B. come nel C.E., l'amplificazione di tensione dipende da I_c e, perciò, l'amplificatore a base comune tende a distorcere e va usato nell'ambito di piccoli segnali.

La resistenza di ingresso dell'amplificatore è, al solito, quella vista dalla sorgente ed è $R_{in}=R_e//R_{ie}$ (fig. 26)

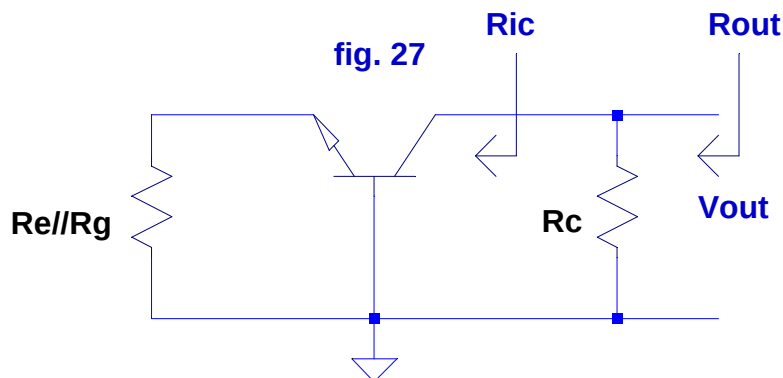


dove

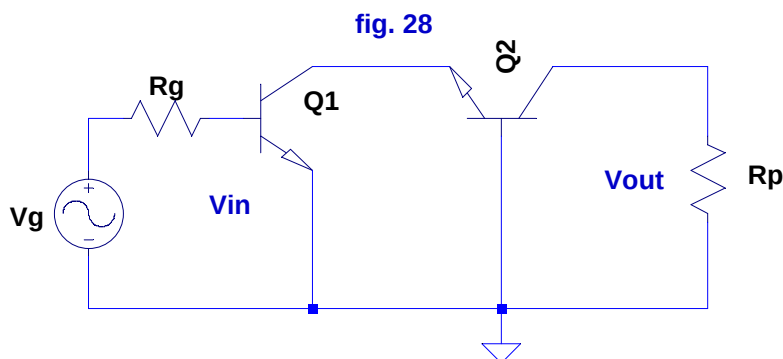
$$R_{ie} = \frac{V_{in}}{I_i} = \frac{V_{eb}}{I_e} = \frac{I_e r_e}{I_e} = r_e$$

è la resistenza vista guardando dentro l'emettitore ed è molto piccola; di conseguenza, **$R_{in}=R_e//R_{ie} \approx r_e$** e la resistenza di uscita dell'amplificatore a base comune è molto più piccola rispetto a quella degli amplificatori studiati sinora (infatti richiede una corrente di ingresso decisamente maggiore). Ovviamente l'attenuazione nella maglia di ingresso è rilevante per cui A_{vt} è sensibilmente minore di A_v .

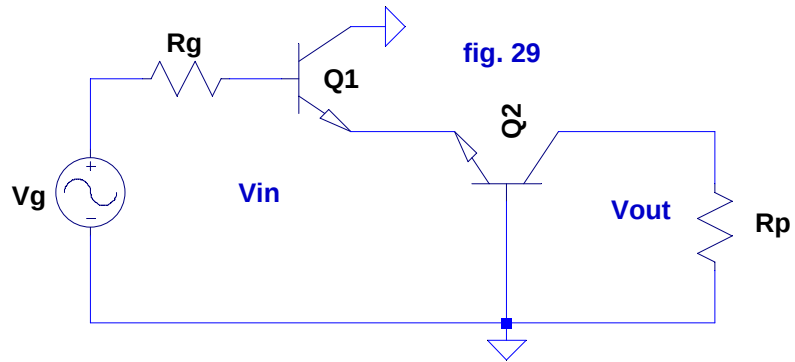
La resistenza di uscita R_{out} è, al solito, la resistenza vista dal carico, con la sorgente V_g disattivata (e quindi la corrente di emettitore rimane costante) (fig. 27)



Osserviamo che $R_{out}=R_c//R_{ic}$, dove R_{ic} è la resistenza che si vede guardando dentro il collettore di un BJT in regione attiva, la cui corrente di emettitore (e quindi quella di collettore) è mantenuta costante; il BJT si comporta da generatore di corrente e R_{ic} è molto elevata e, perciò **$R_{out} \approx R_c$**



Per via del fatto che l'amplificatore a base comune richiede una corrente di pilotaggio "rilevante", il suo uso non è molto frequente. Quando lo si usa, in genere come amplificatore a larga banda perchè ha un eccellente comportamento alle alte frequenze, lo si fa precedere da uno stadio che preamplifica la corrente ;o un emettitore comune, come in fig. 28; o un collettore comune, come in fig. 29



Gli schemi di fig. 28 e fig. 29 sono del tutto indicativi e alcune resistenze sono omesse.