

Appunti di Elettronica Analogica

Corso DF-M (prof. Giovanni Scarpetta)

a.a. 2008-2009

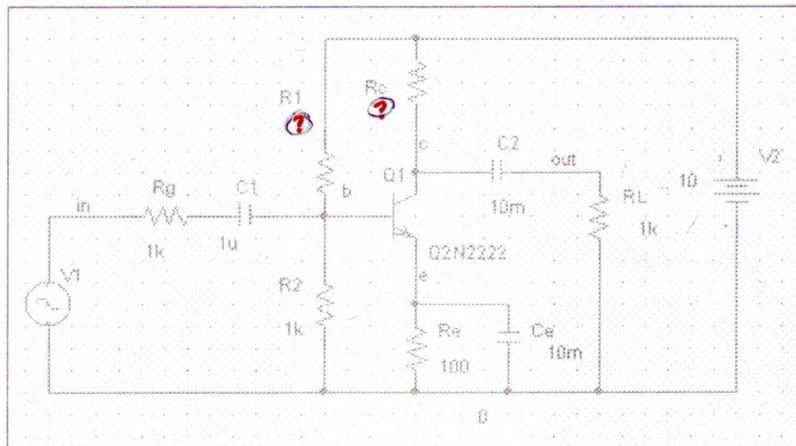
Riassunto esercitazioni V - VI

Nota bene: Questi appunti sono da considerarsi puramente indicativi e possono contenere anche errori. Per segnalare sviste o fornire suggerimenti, contattate l'autore all'indirizzo e-mail: mesand16@hotmail.it

ESERCITAZIONE V

Progetto e verifica con SPICE di un circuito amplificatore E.C.

- ×1. Progettare uno stadio E.C. con le seguenti specifiche:
 - $I_{CO}=8m$
 - $V_{CO}=2$E' assegnato lo schema con alcuni componenti.
- ×2. Simulare il circuito per ricavare il punto di funzionamento simulato e verificare la rispondenza con le specifiche di progetto (i risultati sono validi con tolleranza di 1%).
3. Determinare al simulatore la risposta armonica e controllare la corrispondenza con i risultati teorici per α_v e α_i a centro banda, F_i e F_s ; verificare quale delle tre maglie introduce la F_i (calcolare le reattanze di C_1 , C_2 e C_e per F quasi uguale a F_i e confrontarle con le rispettive resistenze).



Sappiamo che per il circuito amplificatore emettitore comune valgono le seguenti equazioni:

$$V_{CC} = V_{CO} + R_C I_{CO}$$

$$V_{eq} = R_{eq} I_{B0} + V_{BE0} + R_E (\beta + 1) I_{B0}$$

$$V_{eq} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Sostituendo le ultime due equazioni nella seconda otteniamo:

$$V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_{B0} + V_{BE0} + R_E (\beta + 1) I_{B0}$$

Ora ricaviamo le due incognite presenti nello schema circuitale della traccia, ovvero i valori di R_c e R_1 . Il primo è abbastanza semplice da ricavare: poiché sappiamo che $V_{cc} = V_2 = 10$ (infatti si tratta della batteria di alimentazione), $I_{C0} = 8m = 8 \cdot 10^{-3}$ e $V_{C0} = 2$, usando l'equazione $V_{cc} = V_{C0} + R_c I_{C0}$ risulta che:

$$10 = 2 + R_c (8 \cdot 10^{-3})$$

$$8 = R_c (8 \cdot 10^{-3})$$

$$R_c = \frac{8}{8 \cdot 10^{-3}} = 10^3 \Omega = 1k$$

Il secondo, invece, richiede l'uso dell'equazione $V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_{B0} + V_{BE0} + R_E (\beta + 1) I_{B0}$. A prima vista quest'equazione sembra complicata da risolvere: infatti il progetto (escluso ovviamente R_1) non fornisce alcun valore per I_{B0} e V_{BE0} . Anche considerando $I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta}$, non possiamo dire nulla sulla corrente di base, in quanto conosciamo I_{C0} , ma non β . Come spiegato però in aula, adotteremo una strategia particolare: useremo dei valori standard per β e per V_{BE0} , ricavando un valore approssimativo (ma sbagliato) di R_1 e poi ci faremo aiutare da PSPICE per pervenire al risultato corretto. Procediamo con ordine per avere le idee chiare.

Partiamo dai valori che assegneremo di default a β e a V_{BE0} : essi sono $\beta = 165$ e $V_{BE0} = 0,65$. Sostituendo tali valori (unitamente a $V_{cc} = 10$, $R_2 = 1k = 10^3$, $I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{165}$ e $R_E = 100 = 10^2$) nell'equazione che stiamo utilizzando per ricavare R_1 , si ha che:

$$10 \frac{10^3}{R_1 + 10^3} = \frac{10^3 R_1}{R_1 + 10^3} \frac{8 \cdot 10^{-3}}{165} + 0,65 + 10^2 (165 + 1) \frac{8 \cdot 10^{-3}}{165}$$

Siccome nell'ultimo termine a destra $165+1=166$ e 165 sono quasi uguali, possiamo per approssimazione considerarli equivalenti ed eliderli a vicenda; in pratica:

$$\frac{10^4}{R_1 + 10^3} = \frac{R_1}{R_1 + 10^3} \frac{8}{165} + 0,65 + 8 \cdot 10^{-1}$$

Ora, ricavando il valore della frazione $\frac{8}{165} = 0,048 \approx 48 \cdot 10^{-3}$ e moltiplicando ad ambo i membri il valore $R_1 + 10^3$, l'equazione diventa:

$$10^4 = 48 \cdot 10^{-3} R_1 + 0,65(R_1 + 10^3) + 8 \cdot 10^{-1}(R_1 + 10^3)$$

$$10^4 = 48 \cdot 10^{-3} R_1 + 0,65 R_1 + 650 + 8 \cdot 10^{-1} R_1 + 8 \cdot 10^2$$

$$10000 - 650 - 800 = 0,048 R_1 + 0,65 R_1 + 0,8 R_1$$

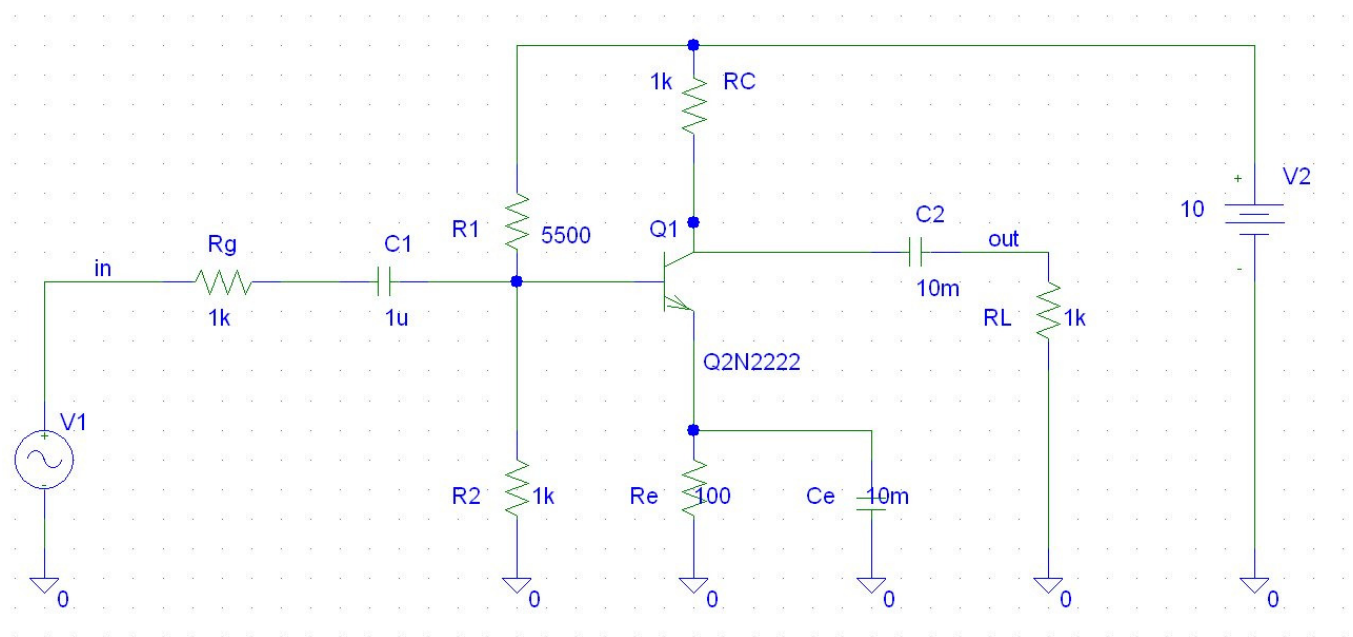
$$10000 - 650 - 800 = 0,048 R_1 + 0,65 R_1 + 0,8 R_1$$

$$8550 = 1,498 R_1$$

$$R_1 = \frac{8550}{1,498} \approx 5700$$

Ultimati questi calcoli, costruite il circuito su PSICE usando i componenti R, C, AGND, Q2N2222, VDC e VSIN; per quest'ultimo, impostate i seguenti valori: DC=0; AC=1m; VOFF=0; VAMPL=1m; FREQ=1.

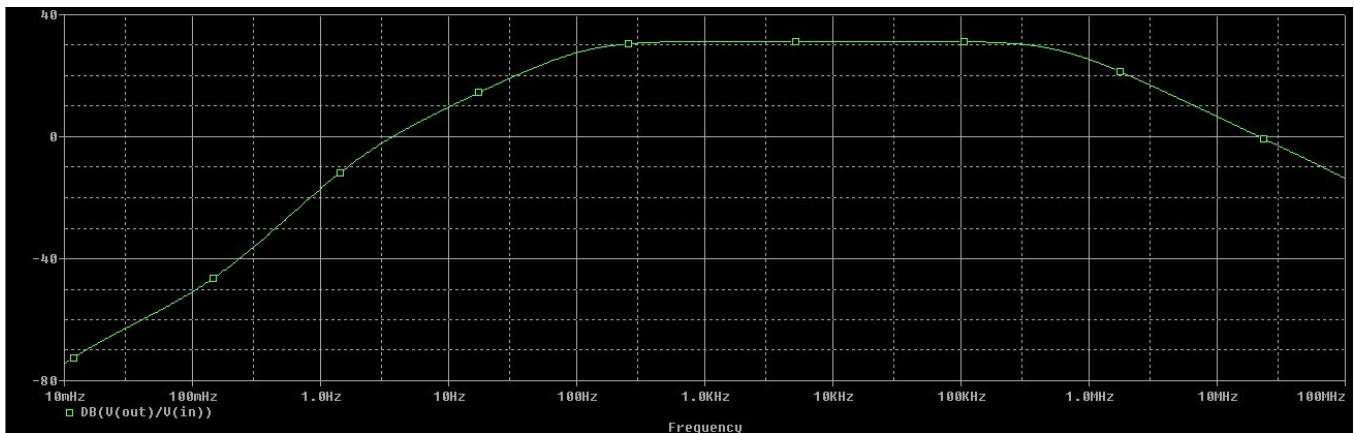
Il circuito va disegnato come riportato nella figura sottostante:



Ora, ricordiamoci del fatto che il valore calcolato per R_1 , in realtà, non è quello corretto, in quanto non potevamo conoscere a priori β e V_{BE0} . A questo inconveniente, però, ci viene in soccorso il PSICE: vediamo come. Simulate direttamente il circuito premendo F11 (senza impostare né AC Sweep né Transient), poi andate sulla barra del menù e selezionate Analysis ---> Examine Output: si aprirà un file di testo (tramite il Blocco Note di Windows) con estensione .out, che riporta tutti i valori del circuito. Scorrete la finestra in basso, fino ad arrivare alla parte dove c'è scritto BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS: lì troverete tutti i parametri del transistore. Di questi parametri ce ne interessando due in particolare: VBE e BETADC, che corrispondono rispettivamente a β e V_{BE0} , stavolta calcolati da PSPICE tramite la simulazione. In pratica, è come se il calcolatore ricavasse i valori esatti per noi, senza doverci scervellare facendo i conti con carta e penna. Come facciamo a sapere se sono esatti o meno? Semplice: nella specifica è stata richiesta una tolleranza dell'1% sui

risultati; ciò significa che I_{C0} è accettabile anche al di sopra o al di sotto dell'1% del suo valore assegnato, e siccome l'1% di $8 \cdot 10^{-3}$ è $0,08 \cdot 10^{-3}$, ciò significa che il valore IC presente in Examine Output dovrà essere compreso nell'intervallo $[8 \cdot 10^{-3} \pm 0,08 \cdot 10^{-3}] = [7,92 \cdot 10^{-3}; 8,08 \cdot 10^{-3}]$ (nel file di testo dovremo leggere un valore per IC compreso tra 7.92E-03 e 8.08E-03). In questo caso, essendo IC pari a 7.53E-03, non possiamo accettarlo, poiché si trova al di fuori di quanto richiesto. Pertanto segnatevi quei 2 valori che trovate in corrispondenza di VBE e BETADC e ricalcolate R_1 inserendoli al posto di β e V_{BE0} . Dopo il ricalcolo (di cui non verranno mostrati i passaggi, ma si consiglia di farlo per esercizio) verrà fuori che $R_1 \approx 5500$. Dovrete ripetere questa procedura finché non trovate un valore per IC compreso per l'intervallo detto in precedenza.

Ora modificate il valore di R_1 inserendo il nuovo valore calcolato e risimulate il circuito premendo F11, poi ritornate su Examine Output e rileggete il valore di IC. Fortunatamente si scopre che vale 7.95E-03, il quale rientra nell'intervallo, quindi la nostra ricerca dei valori incogniti può definirsi conclusa. Ora, passando ai punti 2 e 3 della traccia, simulate il circuito con AC Sweep (impostando come al solito la visualizzazione a decadi, la Start Freq. = 0.01 e la End Freq. = 100meg e premendo F11). Una volta aperta la classica finestra nera, impostate come traccia DB(V(out)/V(in)): se tutto è andato a buon fine, vi dovrebbe comparire una caratteristica simile a quella di un filtro passabanda, come questa riportata in figura.



Dalla traccia elaborata dal PSPICE, il guadagno a centro banda α_{vCB} risulta essere pari a 31,3 dB (per verificarlo, basta selezionare il cursore col pulsante “Toggle cursor” e muoverlo lungo la traccia, fino ad arrivare al valore massimo centrale: sulla mini finestra “Probe Cursor” dovrebbe comparire un valore attorno a 31.3 in alto a destra). Volendolo calcolare manualmente per controverifica, possiamo servirci della formula:

$$\alpha_{vCB} = -g_m R_L \parallel R_C \frac{R^*}{R_g + R^*}$$

dove $g_m = 2,99 \cdot 10^{-1}$ S (è una conduttanza, il cui valore viene fornito in automatico da PSPICE: basta consultare Examine Output e leggere il valore in corrispondenza di GM; se proprio lo si vuole calcolare a mano, si ricordi che $g_m = \frac{I_{C0}}{V_T}$, dove I_{C0} è già noto dalla traccia, mentre V_T è una costante, pari solitamente a 25mV), R^* è la resistenza in ingresso data dal parallelo: $R^* = R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi \approx 355 \Omega$ (come per g_m , anche $r_\pi = 6,09 \cdot 10^2$ è calcolato automaticamente da PSPICE, leggendo il valore RPI in Examine Output, ma volendolo calcolare con carta e penna, si sappia che $r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$, dove β è il nuovo valore di BETADC calcolato da PSPICE), mentre R_L , R_C e R_g sono noti dalla traccia. Essendo un valore negativo, il risultato deve essere considerato in modulo.

Per il calcolo di F_i ed F_s , innanzitutto servitevi della simulazione per segnarvi i valori calcolati da PSPICE: per fare ciò, adoperate nuovamente il cursore e spostatelo a sinistra, fino a quando il valore 31.3 non scenda fino a 28.3 (in pratica, dovete posizionarvi 3 dB al di sotto del guadagno a centro banda) e a quel punto scrivete il valore che compare in basso a sinistra in “Probe Cursor”, che sarebbe la frequenza di taglio inferiore F_i (più o meno pari a 120 Hz); ripetete la stessa procedura, ma stavolta spostandovi verso destra per ricavare la frequenza di taglio superiore F_s (che dovrebbe essere attorno ai 575 KHz). Una volta segnati i valori, verificateli con carta e penna adoperando le seguenti formule:

$$F_i = F_i' + F_i''$$

$$F_i' = \frac{1}{2\pi C_1 (R_g + R^*)}$$

$$F_i'' = \frac{1}{2\pi C_2 (R_L + R_C)}$$

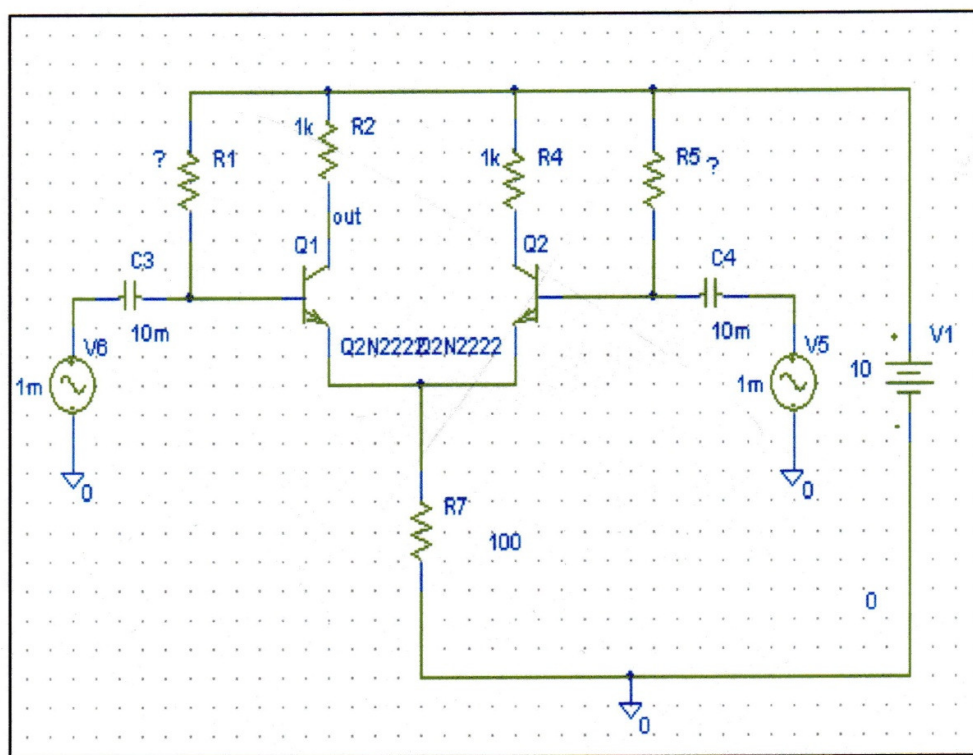
$$F_s = \frac{1}{2\pi C_E (R_g \parallel R^*)}$$

Anche se i valori non dovessero coincidere perfettamente, non preoccupatevi troppo: l'importante è che lo scostamento riscontrato non sia eccessivamente grande.

ESERCITAZIONE VI

Progetto e verifica per uno stadio differenziale

1. Per lo stadio assegnato, progettare la rete di polarizzazione affinché $I_{C0}=1\text{m}$ con errore del $\pm 1\%$; come prima approssimazione si consideri $V_{BE0}=0.65$ e $\beta=165$.
2. Simulare il circuito per determinare α_d e α_c confrontandoli con i valori teorici. (Notare che i due guadagni sono del tipo passabanda)
3. Verificare la possibilità di ottenere $V_{BO}=0$ (a meno di $.5\text{m}$) per eliminare i condensatori di ingresso (quindi $\omega_i=0$).
4. Simulare il nuovo circuito per evidenziare che i guadagni non sono cambiati a centro banda mentre $\omega_i=0$.



Osservando lo schema circuitale della traccia, sembra apparentemente che dobbiamo calcolare due incognite diverse, ossia R_1 e R_5 ; in realtà, nello schema generale del circuito differenziale, le due resistenze corrispondenti a R_1 e R_5 sono di valore identico, pertanto $R_1 = R_5$ (e quindi, calcolata una, ricaviamo automaticamente anche l'altra).

Per trovare il valore di R_1 , ci serviamo della formula riguardante la V_{BE0} :

$$V_{BE0} = V_{CC} - RI_{B0} - 2R_E(1 + \beta) I_{B0}$$

dove $V_{BE0} = 0,65$ e $\beta = 165$ sono assegnate a priori dalla traccia (sono esattamente gli stessi valori approssimativi visti nell'esercitazione precedente), $V_{CC} = V_1 = 10$, $R = R_1 = R_5$ (è l'incognita da calcolare), $R_E = R_7 = 100 = 10^2$ e $I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta} = \frac{1m}{165} = \frac{10^{-3}}{165}$.

Se avessimo avuto, invece, come incognita $R_2 = R_C$, avremmo usato quest'altra formula:

$$V_{CE0} = V_{CC} - R_C I_{C0} - 2R_E(1 + \beta) I_{C0}$$

Tornando alla nostra esercitazione, ricaviamo adesso R_1 inserendo tutti i valori descritti in precedenza:

$$0,65 = 10 - \frac{10^{-3}}{165} R_1 - 2 \cdot 10^2 (1 + 165) \frac{10^{-3}}{165}$$

Anche qui $1+165 = 166$ e 165 li possiamo considerare pressoché uguali, per cui cancellandoli l'un altro e semplificando le potenze di 10, otteniamo:

$$0,65 = 10 - \frac{10^{-3}}{165} R_1 - 2 \cdot 10^{-1}$$

$$0,65 = 10 - \frac{0,001}{165} R_1 - 0,2$$

$$0,65 - 10 + 0,2 = -\frac{0,001}{165} R_1$$

$$9,15 = 6,06 \cdot 10^{-6} R_1$$

$$R_1 = R_5 = 1,5 \cdot 10^{-6} = 1.5meg$$

Ora disegnate il circuito esattamente come quello mostrato nella traccia, usando R, C, AGND, Q2N2222, VDC e VSIN; per quest'ultimo, impostate sia per V5 sia per V6 i seguenti valori: DC=0; AC=1m; VOFF=0; VAMPL=1m; FREQ=1.

Ora adottiamo la stessa strategia vista nella precedente esercitazione: simuliamo il circuito senza AC Sweep e Transient premendo direttamente F11, poi andiamo su Analysis ---> Examine Output per aprire il file di testo contenente i parametri dei transistori (nella sezione BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS). Trascrivete i valori di BETADC e VBE che ha calcolato PSPICE (BETADC = 1.62E+02 = $1,62 \cdot 10^2$; VBE = 6.43E-01 = $6,43 \cdot 10^{-1}$) ed inseriteli rispettivamente al posto di β e V_{BE0} all'interno dell'equazione usata per ricavare R_1 e ricalcolatelo. Ricordatevi che questa procedura va ripetuta finché non viene rispettata la tolleranza richiesta per I_{C0} ; siccome è l'1% del suo valore, cioè: $1\% (10^{-3}) = 10^{-5}$, l'intervallo di valori accettabile per I_{C0} è $[10^{-3} \pm 0,01 \cdot 10^{-3}] = [1,01 \cdot 10^{-3}; 0,99 \cdot 10^{-3}]$. Se andate a leggere il valore IC in Examine Output, risulta essere 9.84E-04, ossia $0,984 \cdot 10^{-3}$, il quale è fuori dell'intervallo, quindi siamo obbligati a ricalcolare

R_1 , altrimenti il progetto risulta errato.

Nel riconteggio di R_1 (fatelo per esercizio) viene fuori adesso che $R_1 = R_5 = 1,48 \cdot 10^{-6} = 1.48\text{meg}$. Dopo aver modificato i valori delle resistenze nel circuito e risimulato con F11, andando a rileggere i nuovi valori contenuti in Examine Output si nota che BETADC e VBE sono rimasti invariati, mentre (cosa ancor più importante) IC adesso vale $1.01\text{E-}03$, ossia $1,01 \cdot 10^{-3}$, che rientra nell'intervallo, quindi la ricerca di R_1 è terminata.

Adesso calcoliamo i guadagni α_d e α_c . Il primo è abbastanza semplice da ricavare: applicando la formula:

$$\alpha_d = -\frac{1}{2} g_m R_C$$

e prelevando il valore di g_m calcolato dal simulatore da Examine Output ($G_M = 3.87\text{E-}02 = 3,87 \cdot 10^{-2}$), sostituendo abbiamo:

$$\alpha_d = -\frac{1}{2} 3,87 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3 = -19,35$$

Il secondo, invece, si calcola tramite la formula:

$$\alpha_c = -\frac{g_m R_C r_\pi}{r_\pi + 2R_E(1 + g_m r_\pi)}$$

e andando a leggere il valore di r_π in Examine Output ($R_{PI} = 4.65\text{E+}03 = 4,65 \cdot 10^3$), inserendo tutti i valori otteniamo:

$$\alpha_c = -\frac{3,87 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3 \cdot 4,65 \cdot 10^3}{4,65 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2(1 + 3,87 \cdot 10^{-2} \cdot 4,65 \cdot 10^3)} = -4,40$$