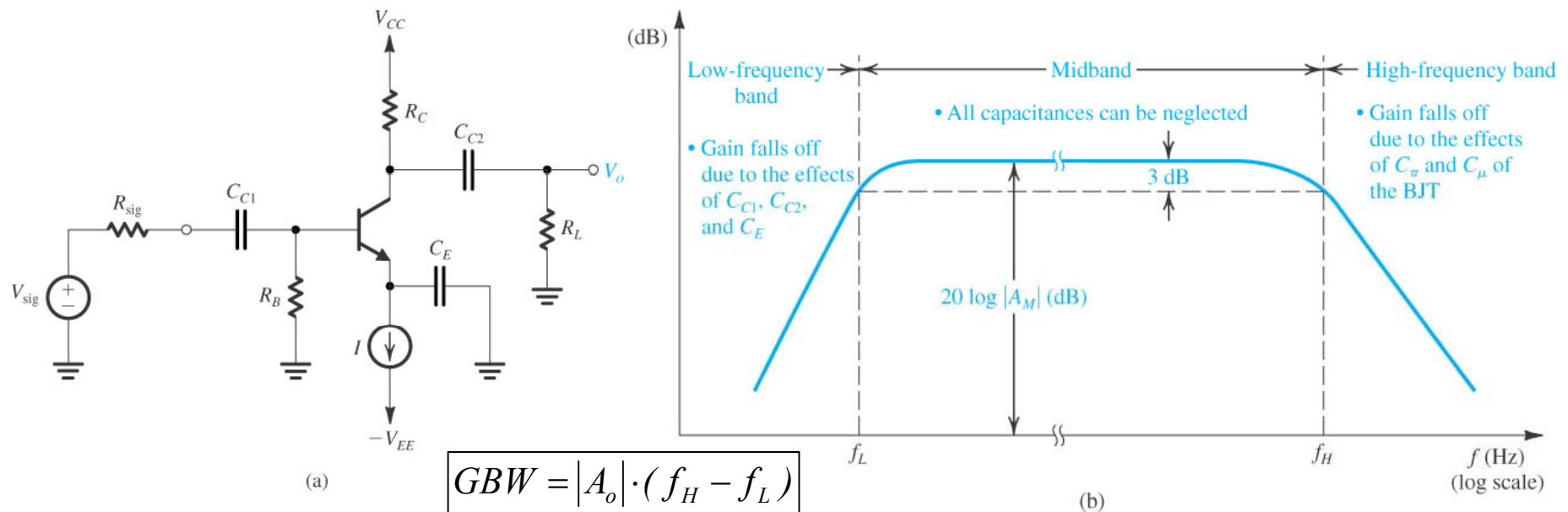


Απόκριση κατά Συχνότητα των  
Ενισχυτών μιας βαθμίδας  
με διπολικά τρανζίστορ

# Τυπική Συνάρτηση Μεταφοράς Ενισχυτή (απολαβή τάσης)



- Εν γένει η απολαβή τάσης ενός ενισχυτή είναι συνάρτηση της συχνότητας.
- Στις χαμηλές συχνότητες, η πτώση της απολαβής οφείλεται στους πυκνωτές σύζευξης και διαρροής.
- Στις υψηλές συχνότητες, η πτώση της απολαβής οφείλεται στις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ.
- Πάνω από την  $f_L$ , οι χωρητικές αντιστάσεις των πυκνωτών σύζευξης και διαρροής είναι τόσο μικρές ώστε μπορούν να θεωρηθούν βραχυκύκλωμα.
- Κάτω από την  $f_H$ , οι χωρητικές αντιστάσεις των παρασιτικών χωρητικοτήτων είναι τόσο μεγάλες ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ανοιχτοκύκλωμα.

Παράδειγμα: Υπολογισμός του διαγράμματος Bode Συνάρτησης Μεταφοράς Ενισχυτή με έναν πόλο και μία ρίζα.

Η συνάρτηση μεταφοράς (απολαβή τάσης) του ενισχυτή αυτού μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μορφή:

$$\mathcal{A}(j\omega) = A_o \frac{1 + j\omega / \omega_1}{1 + j\omega / \omega_2} = |\mathcal{A}| e^{j\mathcal{G}}$$

όπου  $|\mathcal{A}| = |A_o| \frac{\sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2}}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_2)^2}}$  και  $\mathcal{G} = \left( \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_1} \right) - \left( \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_2} \right)$

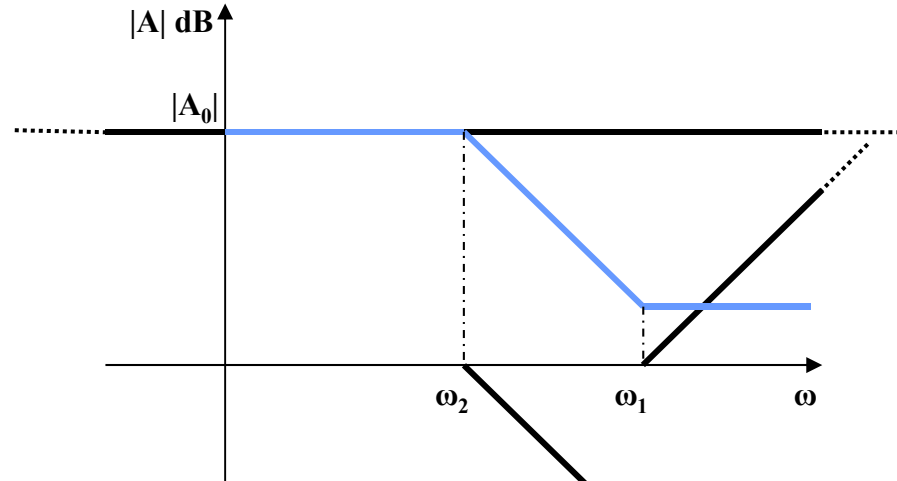
Αν υπολογίσουμε την απολαβή σε db θα έχουμε:

$$|\mathcal{A}|_{db} = 20 \log |A_o| + 20 \log \sqrt{1 + (\omega / \omega_1)^2} - 20 \log \sqrt{1 + (\omega / \omega_2)^2}$$

Ο πρώτος όρος είναι σταθερός, ο δεύτερος εμφανίζει κλίση 6db/οκτάβα ή 20db/δεκάδα για  $\omega \gg \omega_1$  και ο τρίτος δίνει κλίση -6db/οκτάβα ή -20db/δεκάδα για  $\omega \gg \omega_2$ . Στις συχνότητες  $\omega_1$  και  $\omega_2$  η πραγματική καμπύλη διαφέρει από το γόνατο κατά 3db.

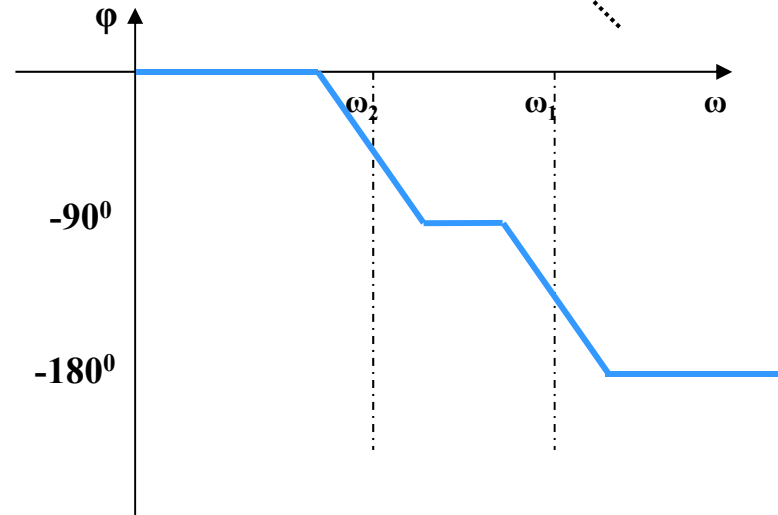
Η απόκριση κατά συχνότητα του ενισχυτή αυτού μπορεί να προσεγγιστεί από ένα διάγραμμα Bode της μορφής που δίνεται παρακάτω, αν υποθέσουμε ότι  $\omega_1 \gg \omega_2$  :

$$\mathcal{A}(j\omega) = A_o \frac{1 + j\omega / \omega_1}{1 + j\omega / \omega_2}$$

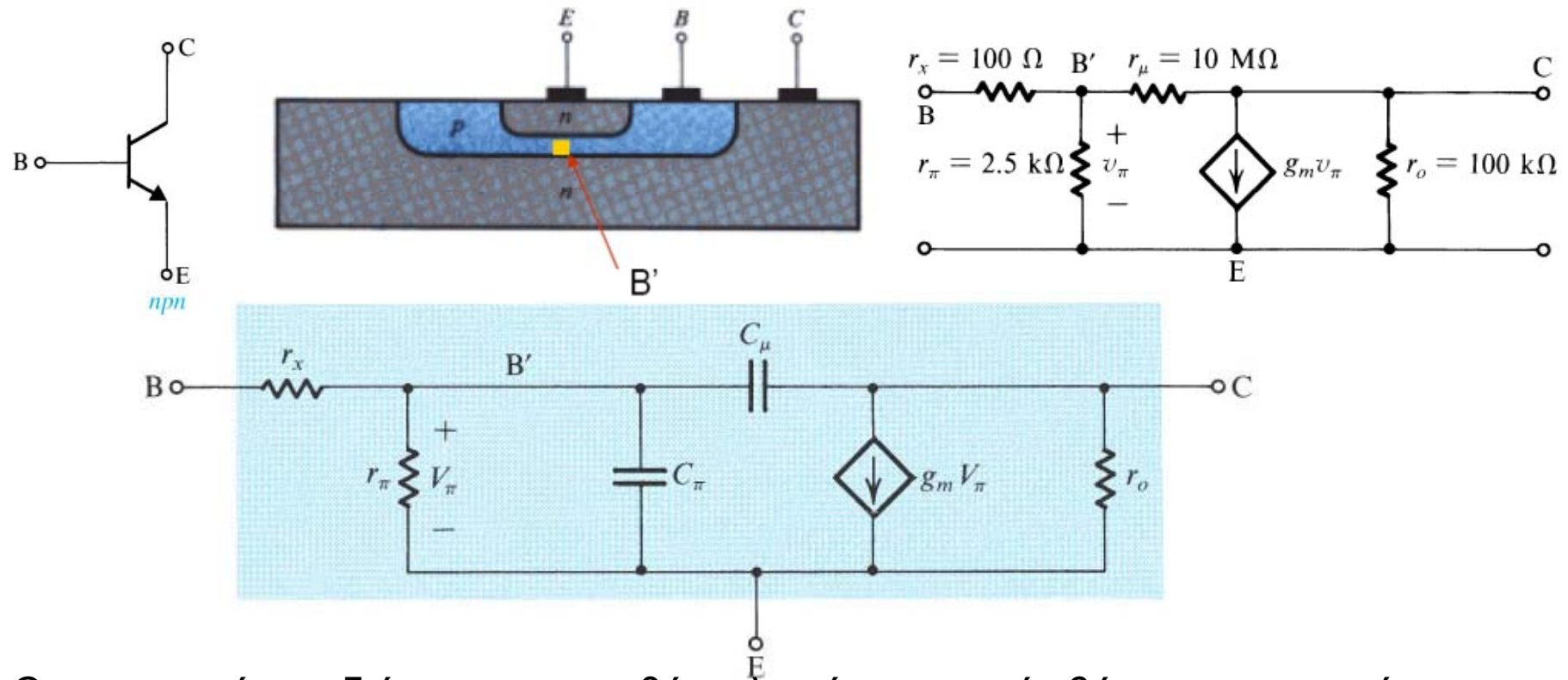


Αντίστοιχα για τη φάση έχουμε:

$$\mathcal{G} = \begin{cases} 0^\circ & \text{για } \omega < \frac{\omega_1}{10} \\ 45^\circ \left(1 + \log \frac{\omega}{\omega_1}\right) & \text{για } \frac{\omega_1}{10} < \omega < 10\omega_1 \\ 90^\circ & \text{για } \omega > 10\omega_1 \end{cases}$$

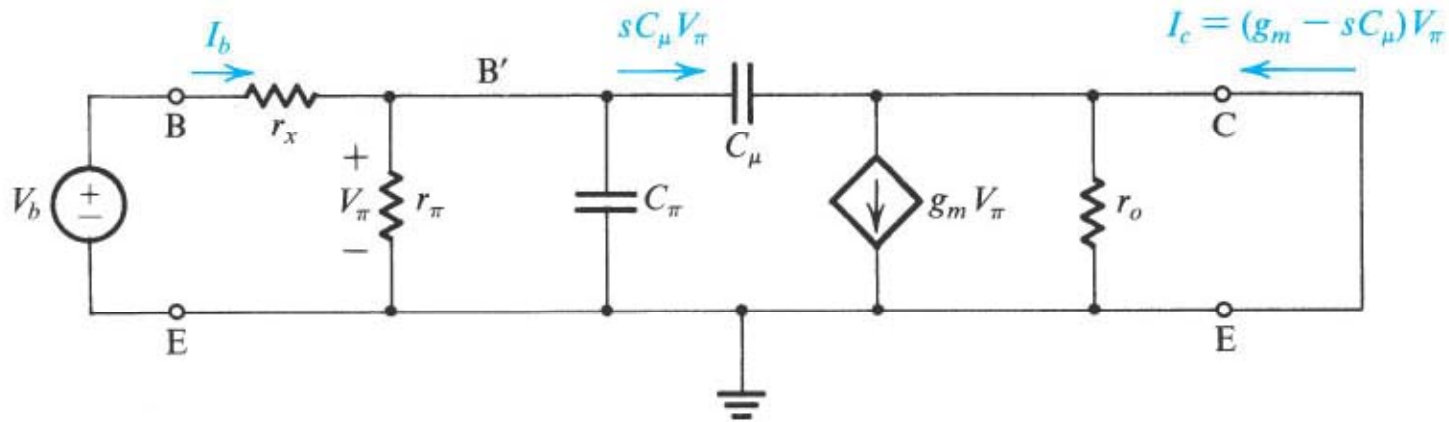


## Ισοδύναμο μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ στις Υψηλές Συχνότητες



- $C_\pi$ : χωρητικότητα διάχυσης της ορθά πολωμένης επαφής βάσης- εκπομπού.
- $C_\mu$ : χωρητικότητα απογύμνωσης της ανάστροφα πολωμένης επαφής βάσης- συλλέκτη.
- $r_x$ : η αντίσταση του υλικού-πυριτίου της περιοχής της βάσης μεταξύ του ακροδέκτη βάσης και της ενεργού περιοχής της βάσης  $B'$  που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την περιοχή του εκπομπού.

## Συχνότητα αποκοπής-Συχνότητα μοναδιαίας απολαβής ρεύματος βραχυκύκλωσης.



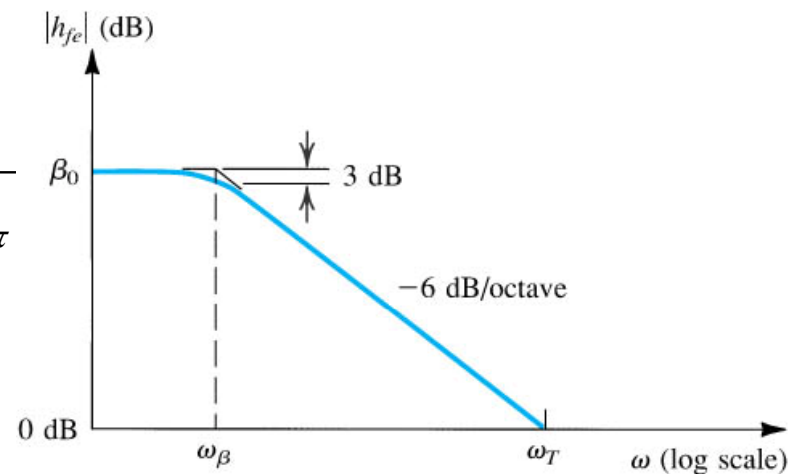
Το ρεύμα βραχυκύκλωσης συλλέκτη είναι:  $I_c = (g_m - sC_\mu)V_\pi$

όπου:  $V_\pi = I_b (r_\pi \parallel C_\pi \parallel C_\mu)$

$$h_{fe} \equiv \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m - sC_\mu}{1/r_\pi + s(C_\pi + C_\mu)} \approx \frac{g_m r_\pi}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

$$= \frac{\beta_o}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

$$\omega_\beta \equiv \frac{1}{(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$



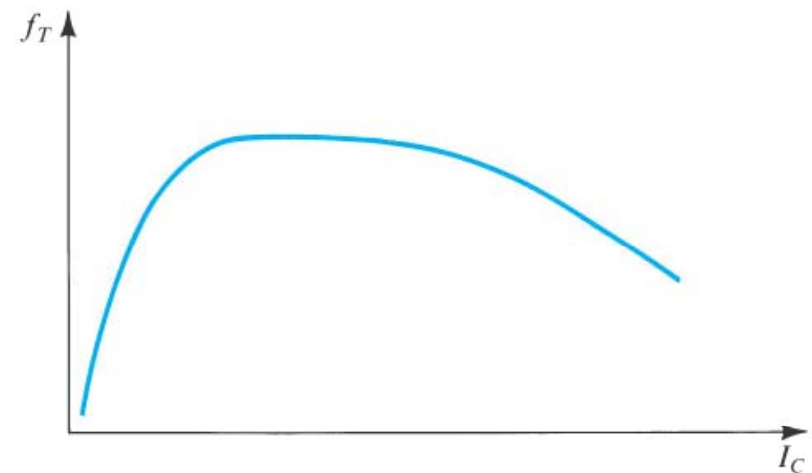
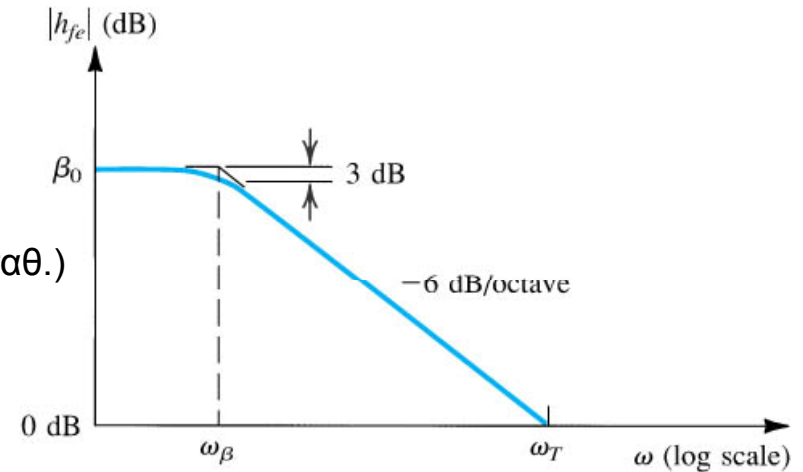
# Συχνότητα αποκοπής-Συχνότητα μοναδιαίας απολαβής ρεύματος βραχυκύκλωσης (συνέχεια).

Συχνότητα μοναδιαίας απολαβής:

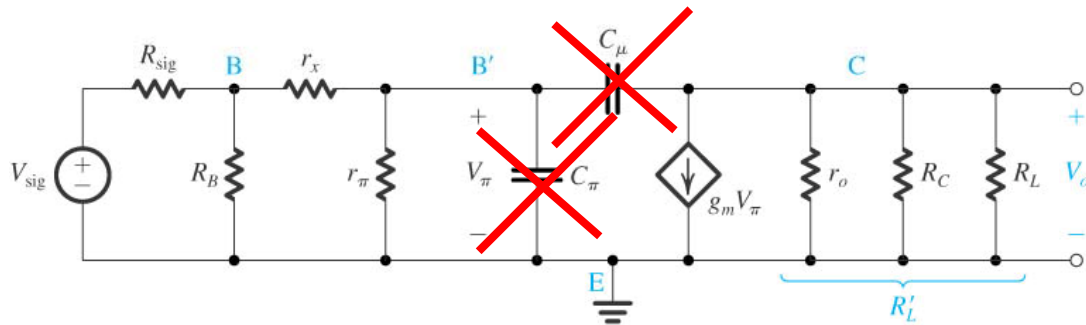
$$\omega_T = \beta_o \omega_\beta \quad (\text{λαμβάνοντας υπόψη ότι το GBW=σταθ.})$$

$$\omega_T = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$



## Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις μεσαίες συχνότητες



$$R'_L = r_o \parallel R_C \parallel R_L$$

$$v_B = v_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}}$$

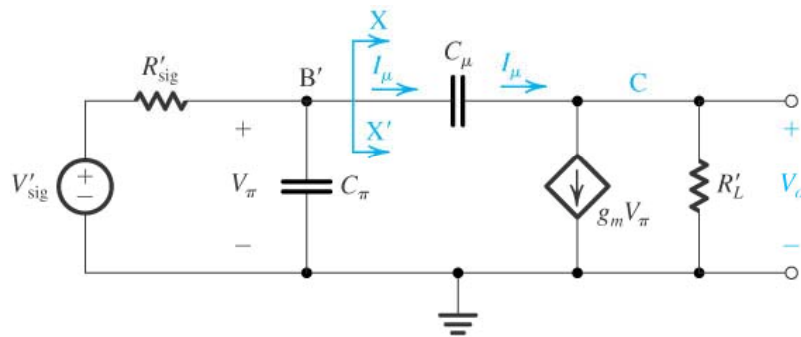
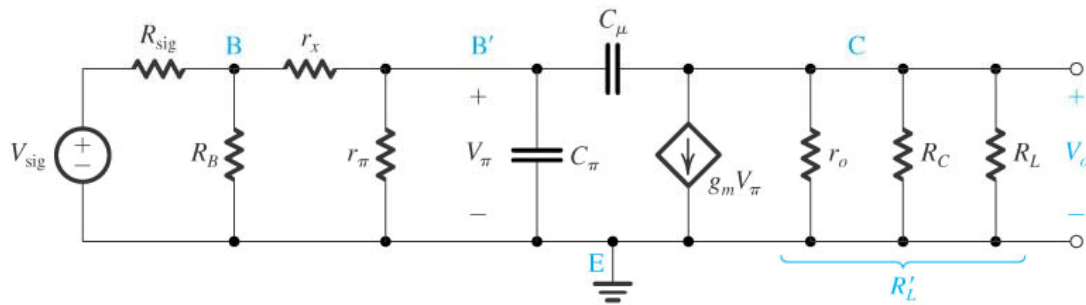
$$v_\pi = v_B \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_{sig} \parallel R_B)}$$

$$v_o = -g_m v_\pi R'_L = -g_m v_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_{sig} \parallel R_B)} R'_L$$

$$A(\omega) = \frac{v_o}{v_{sig}} = -g_m \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_{sig} \parallel R_B)} R'_L$$



# Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις υψηλές συχνότητες



$$v'_{sig} = v_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_{sig} // R_B)}$$

$$R'_{sig} = r_\pi // [r_x + (R_{sig} // R_B)]$$

Από τον κόμβο B':

$$\frac{v'_{sig} - v_\pi}{R'_{sig}} = sC_\pi v_\pi + sC_\mu (v_\pi - v_o)$$

Από τον κόμβο C:

$$sC_\mu (v_\pi - v_o) = g_m v_\pi + \frac{v_o}{R'_L}$$

} ⇒

## Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (συνέχεια)

$$\frac{v_o}{v_{sig}} = -g_m R'_L \frac{1 - sC_\mu / g_m}{1 + s[C_\mu R'_L(1 + g_m R'_{sig}) + R'_{sig}(C_\pi + C_\mu)] + s^2 C_\mu C_\pi R'_{sig} R'_L}$$

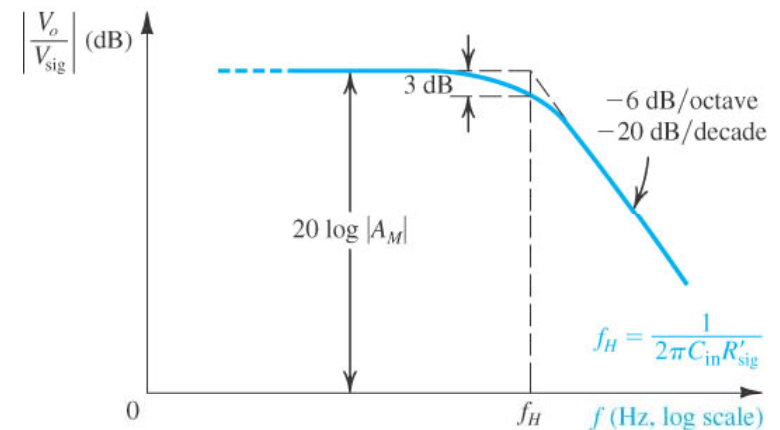
$$D = \left( \frac{s}{\omega_{p1}} + 1 \right) \left( \frac{s}{\omega_{p2}} + 1 \right) = \frac{s^2}{\omega_{p1}\omega_{p2}} + \left( \frac{1}{\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p2}} \right) s + 1 \Rightarrow \text{για } \omega_{p2} \gg \omega_{p1} \Rightarrow$$

$$\omega_H = \omega_{p1} \cong \frac{1}{C_\mu R'_L(1 + g_m R'_{sig}) + R'_{sig}(C_\pi + C_\mu)} \cong \frac{1}{R'_{sig}(g_m R'_L C_\mu + C_\pi)}$$

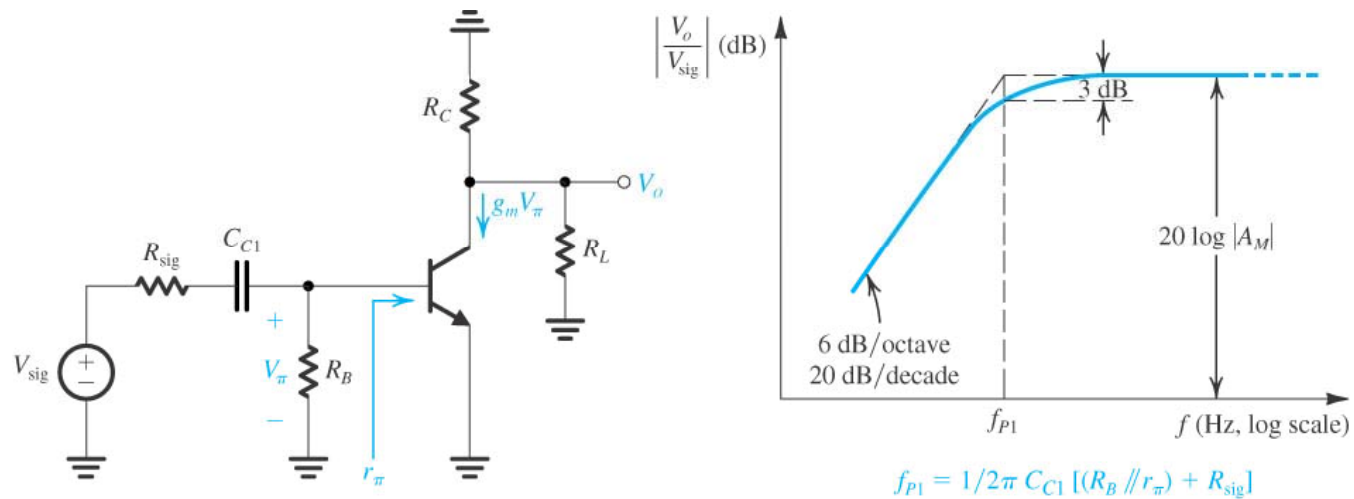
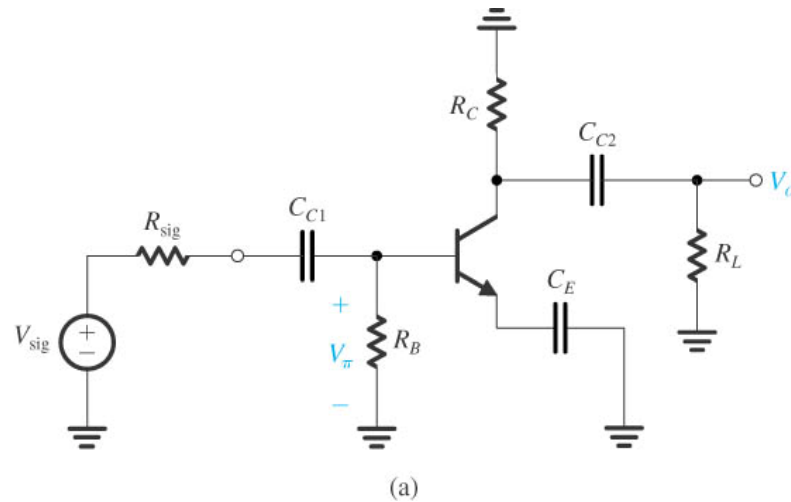
$$\omega_{p1}\omega_{p2} = \frac{1}{C_\mu C_\pi R'_L R'_{sig}} \Rightarrow$$

$$\omega_{p2} \cong \frac{R'_{sig}(g_m R'_L C_\mu + C_\pi)}{C_\mu C_\pi R'_L R'_{sig}} \cong \frac{g_m}{C_\pi}$$

$$\omega_z = \frac{g_m}{C_\mu}$$

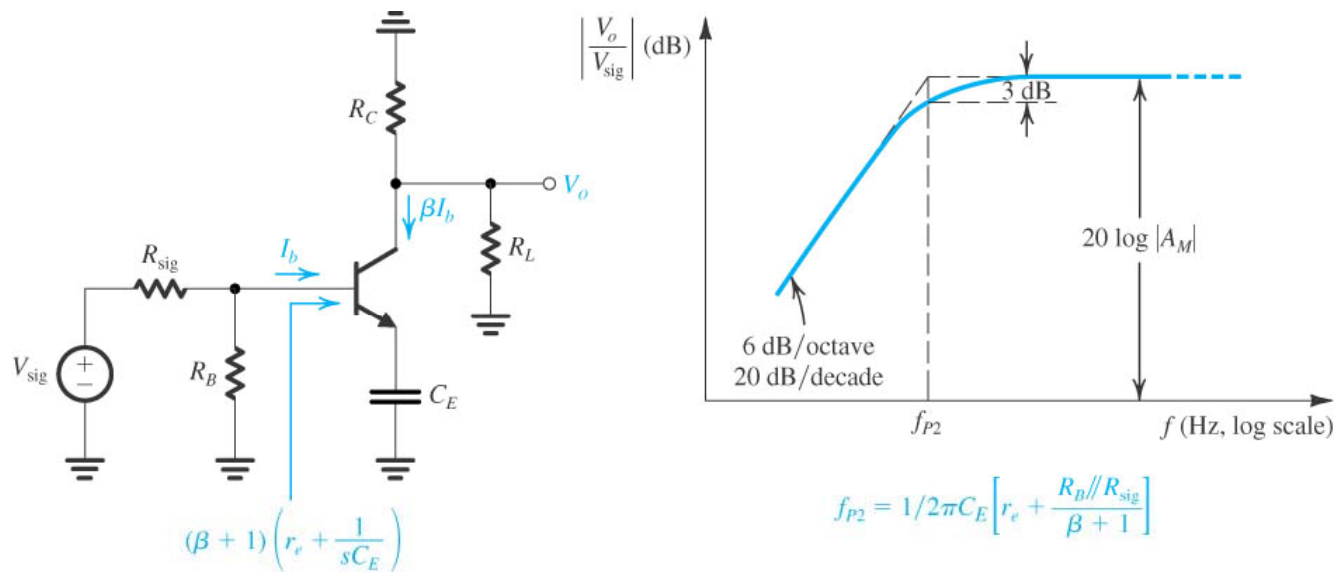


# Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες

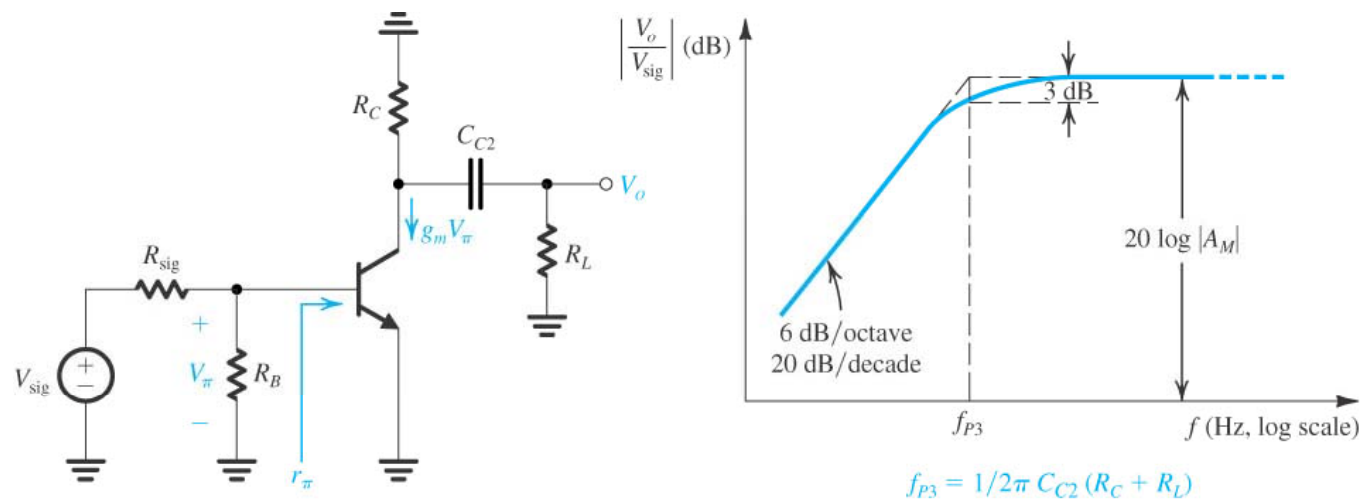


$$f_{P1} = 1/2\pi C_{C1} [(R_B // r_{\pi}) + R_{sig}]$$

# Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (συνέχεια)

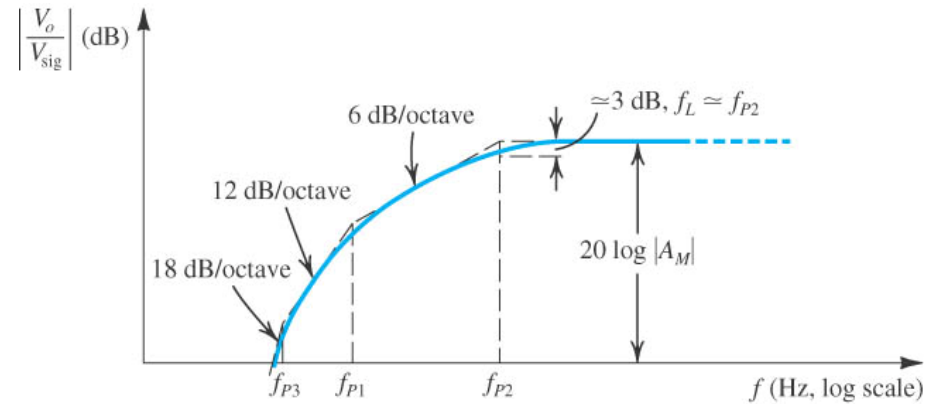


(c)



(d)

## Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (συνέχεια)



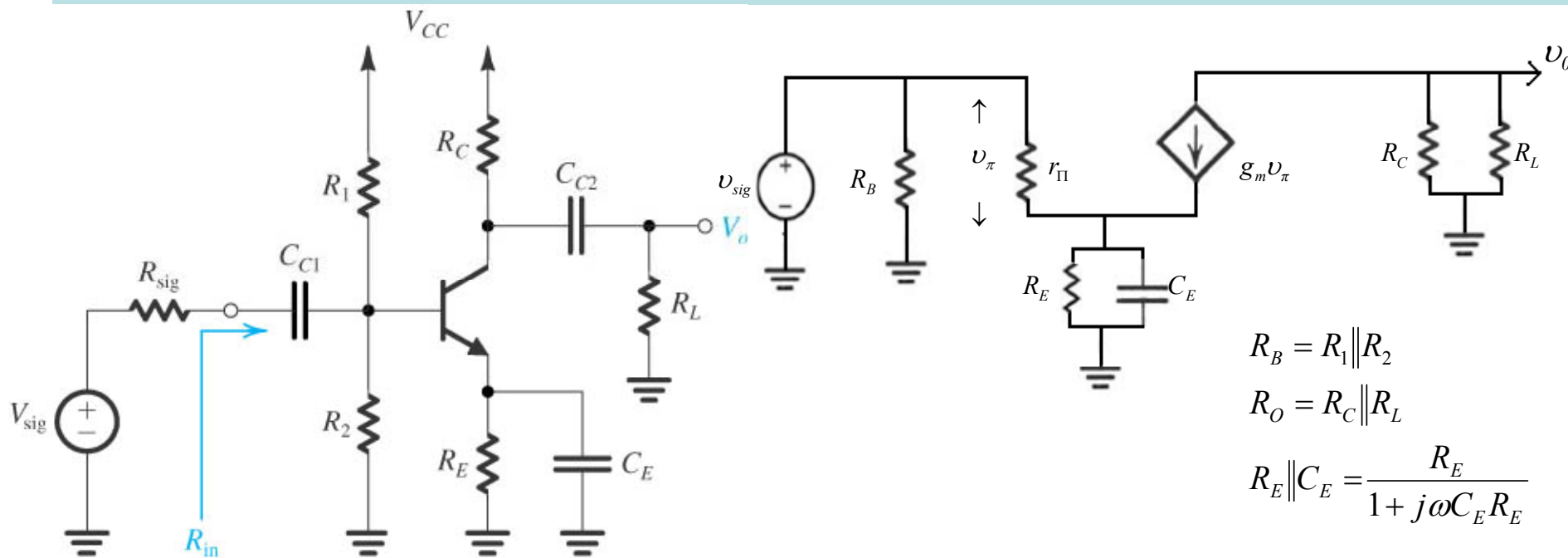
(c)

Επειδή η  $R_E$  είναι η μικρότερη αντίσταση, επιλέγουμε την  $C_E$  έτσι ώστε να δίνει την επιθυμητή κάτω συχνότητα αποκοπής. Οι υπόλοιποι πυκνωτές επιλέγονται έτσι ώστε να δίνουν πόλους σε χαμηλότερες συχνότητες. Με αυτό τον τρόπο οι πυκνωτές που θα επιλεγούν θα έχουν όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές.

**Άσκηση:** Στο κύκλωμα του σχήματος θεωρούμε ότι  $C_{c1}, C_{c2} \rightarrow \infty, R_{sig}=0, r_x=0$  και  $r_o=r_\mu=\infty$  αλλά η  $C_E$  δεν μπορεί να παραλειφθεί.

Υπολογίστε την απολαβή τάσης μικρού σήματος συναρτήσει της συχνότητας (στις χαμηλές και ενδιαμέσες συχνότητες) και σχεδιάστε το αντίστοιχο προσεγγιστικό διάγραμμα της απόκρισης κατά συχνότητα.

Δίνεται  $\beta=100$ .



$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$R_O = R_C \parallel R_L$$

$$R_E \parallel C_E = \frac{R_E}{1 + j\omega C_E R_E}$$

$$\left. \begin{aligned} v_o &= -g_m v_\pi R_O \\ v_{sig} &= v_\pi + \left( g_m v_\pi + \frac{v_\pi}{r_\pi} \right) (R_E \parallel C_E) \end{aligned} \right\} A(\omega) = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{g_m R_O}{1 + \frac{g_m r_\pi + 1}{r_\pi} \cdot \frac{R_E}{1 + j\omega C_E R_E}} =$$

Συνέχεια:

$$= -\frac{g_m R_0 r_\pi (1 + j\omega C_E R_E)}{r_\pi (1 + j\omega C_E R_E) + (1 + g_m r_\pi) R_E} = -\frac{g_m R_0 r_\pi (1 + j\omega C_E R_E)}{j\omega C_E R_E r_\pi + r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} \Rightarrow$$

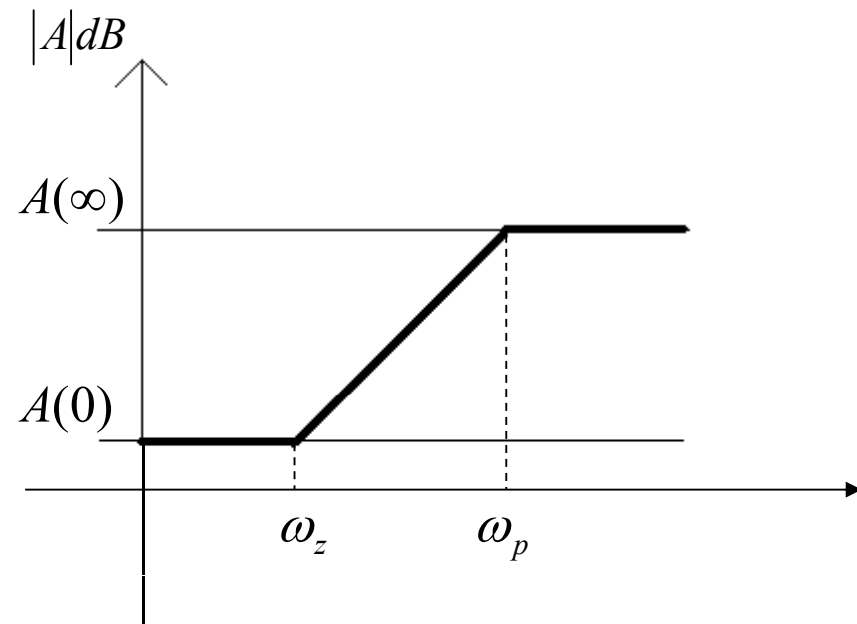
$$A(\omega) = -\frac{g_m R_0 r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} \cdot \frac{1 + j\omega C_E R_E}{1 + j\omega \frac{C_E R_E r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}} \Rightarrow$$

$$A(0) = -\frac{g_m r_\pi R_0}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

$$A(\infty) = -g_m R_0$$

$$\omega_z = \frac{1}{R_E C_E}$$

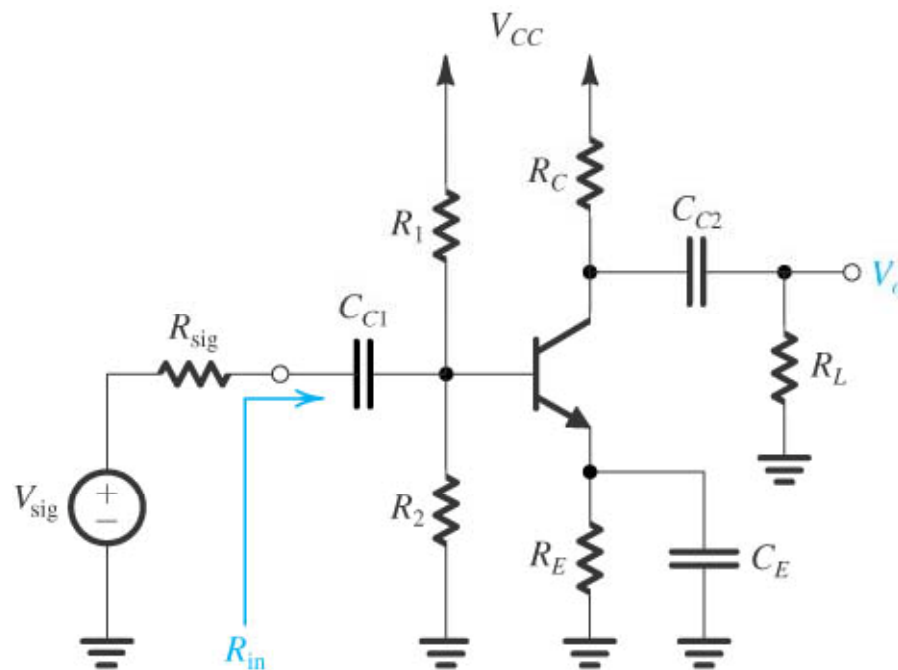
$$\omega_p = \frac{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}{C_E R_E r_\pi}$$



**Άσκηση 1:** Στο κύκλωμα του σχήματος θεωρούμε ότι  $C_E$  και  $C_{C2} \rightarrow \infty$ ,  $R_{sig}=0$ ,  $r_x=0$  και  $r_o=r_\mu=\infty$  αλλά η  $C_{C1}$  δεν μπορεί να παραλειφθεί.

Υπολογίστε την απολαβή τάσης μικρού σήματος συναρτήσει της συχνότητας (στις χαμηλές και ενδιάμεσες συχνότητες) και σχεδιάστε το αντίστοιχο προσεγγιστικό διάγραμμα της απόκρισης κατά συχνότητα.

Δίνεται:  $R_1=51.2\text{k}\Omega$ ,  $R_2=9.6\text{k}\Omega$ ,  $R_C=2\text{k}\Omega$ ,  $R_L=2\text{k}\Omega$ ,  $C_{C1}=1\mu\text{F}$ ,  $g_m=69.6\text{mA/V}$  και  $r_\pi=1.44\text{k}\Omega$ .





**Άσκηση 2:** Για τον ενισχυτή κοινής βάσης του σχήματος έχουμε:  $R_1=22\text{k}\Omega$ ,  $R_2=33\text{k}\Omega$ ,  $R_3=4,7\text{k}\Omega$ ,  $R_4=3,9\text{k}\Omega$ ,  $R_7=5,6\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC}=5\text{V}$  και  $R_i=75\Omega$ .

α) Ναδειχθεί ότι το DC ρεύμα εκπομπού είναι  $I_E=0,33\text{mA}$  περίπου.

β) Να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος,  $A(\omega)=U_o/U_i$ .

γ) Να υπολογιστεί η απολαβή μέσω των συχνοτήτων.

δ) Να εντοπιστούν οι πόλοι της συνάρτησης και να υπολογιστεί η άνω συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος.

Δίνονται:  $V_{BE}=0,7\text{V}$ ,  $\beta=120$ ,  $r_x=0$ ,  $r_o=r_\mu=\infty$ ,  $C_\mu=0,5\text{pF}$ ,  $f_T=700\text{MHz}$  και  $C_1, C_2, C_3 \rightarrow \infty$ .

