



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρονική

Ενότητα 8: Απόκριση κατά Συχνότητα των
Ενισχυτών μιας βαθμίδας με διπολικά τρανζίστορ

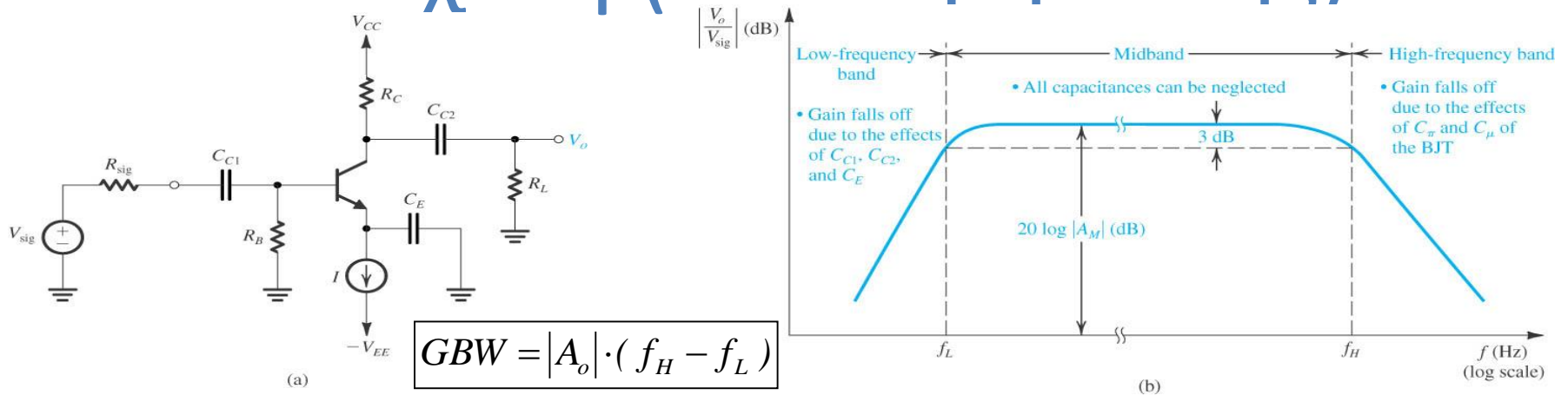
Αγγελική Αραπογιάννη
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Περιεχόμενα ενότητας

- Η έννοια της απόκρισης κατά συχνότητα με βάση τη συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή.
- Η έννοια του εύρους ζώνης και του GBW.
- Χρήση των διαγραμμάτων Bode για τη χάραξη της απόκρισης κατά συχνότητα.
- Ισοδύναμο μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ στις υψηλές συχνότητες. Συχνότητα αποκοπής και συχνότητα μοναδιαίας απολαβής ρεύματος βραχυκύκλωσης.
- Απόκριση του ενισχυτή κοινού εκπομπού στις υψηλές συχνότητες. Απόκριση του ενισχυτή κοινού εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες.



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 ανοιχτό κύκλωμα.

Παράδειγμα (1 από 2)

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:

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

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

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 ω_1 και ω_2 η πραγματική καμπύλη διαφέρει από το γόνατο κατά 3db.



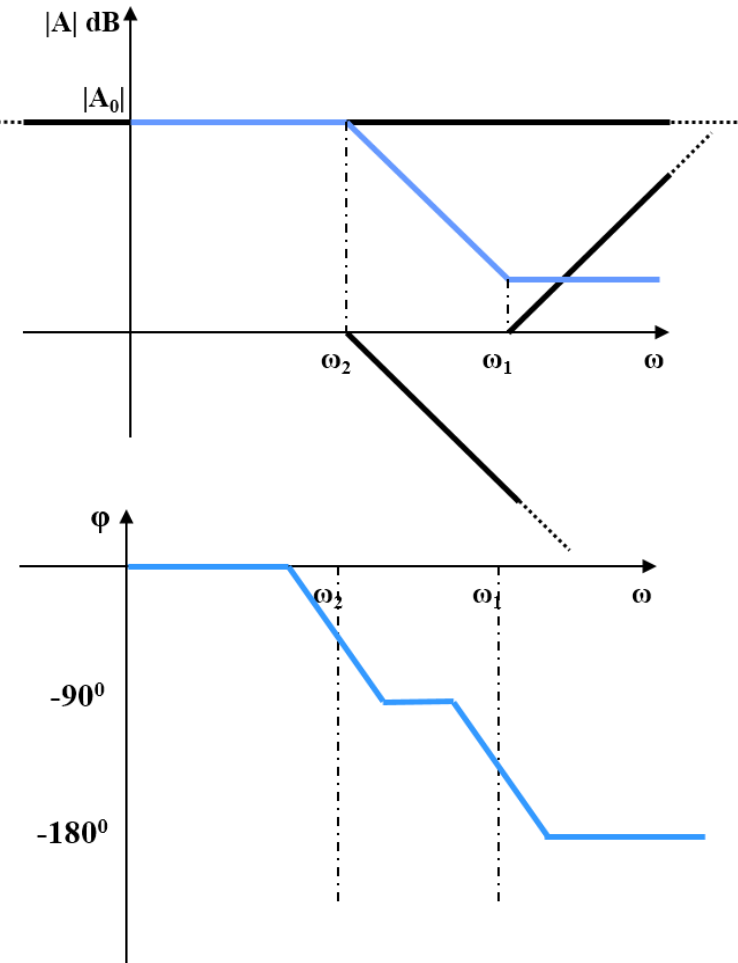
Παράδειγμα (2 από 2)

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

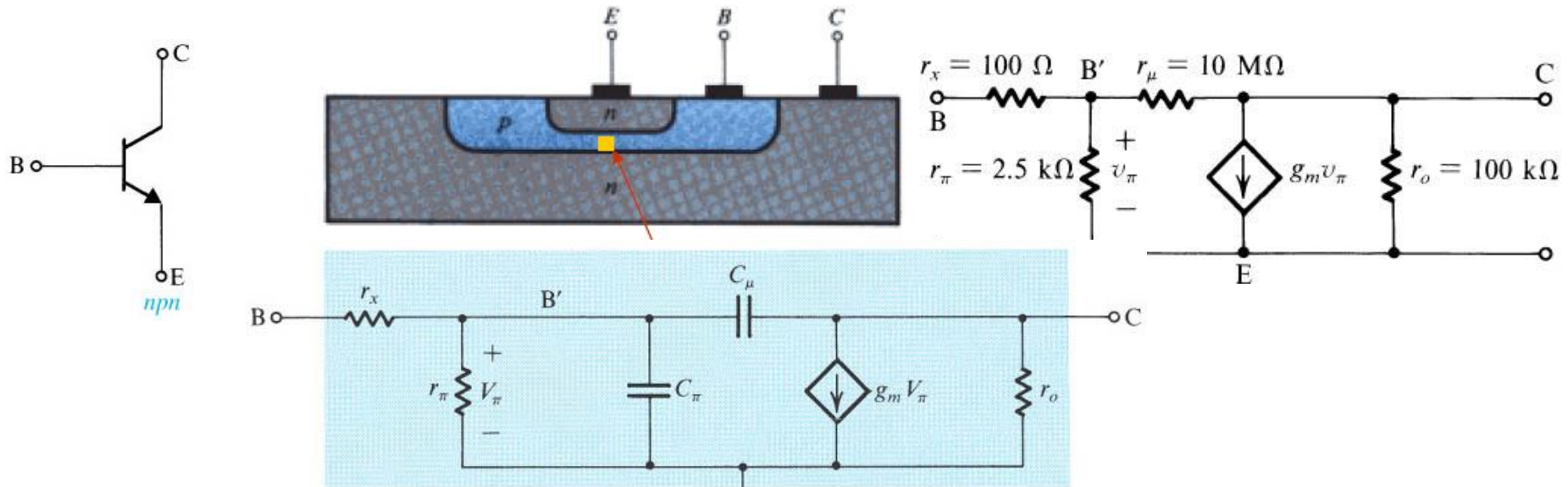
$$\mathcal{A}(j\omega) = A_o \frac{1 + j\omega / \omega_1}{1 + j\omega / \omega_2}$$

Αντίστοιχα για τη φάση έχουμε:

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

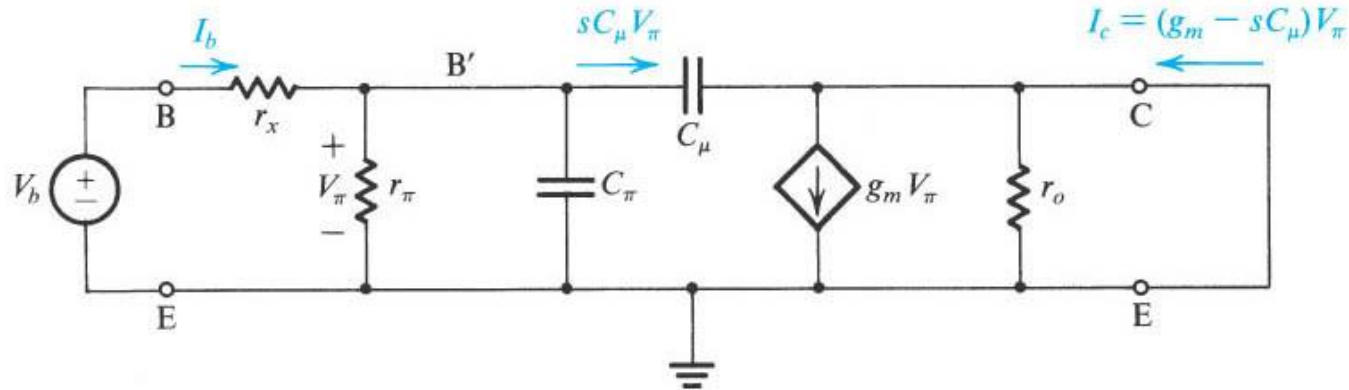


Ισοδύναμο μικρού σήματος διπολικού τρανζίστορ στις Υψηλές Συχνότητες



- C_π : χωρητικότητα διάχυσης της ορθά πολωμένης επαφής βάσης- εκπομπού.
- C_μ : 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 ρεύματος βραχυκύκλωσης



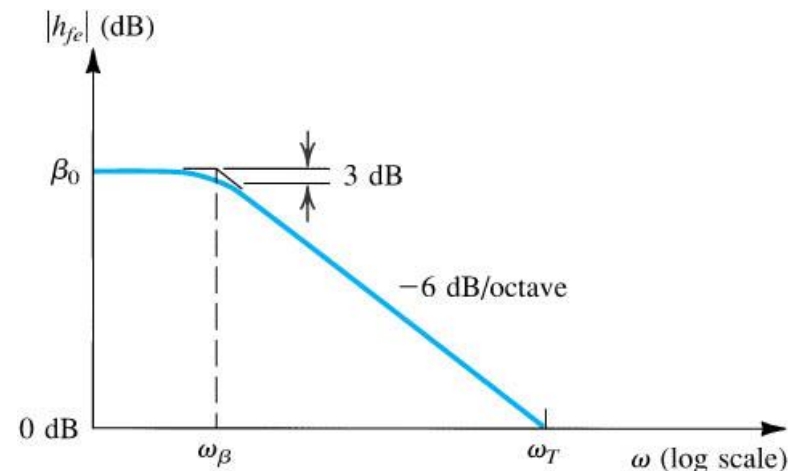
Το ρεύμα βραχυκύκλωσης συλλέκτη είναι: $I_c = (g_m - sC_\mu)V_\pi$

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

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

$$= \frac{\beta_0}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

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



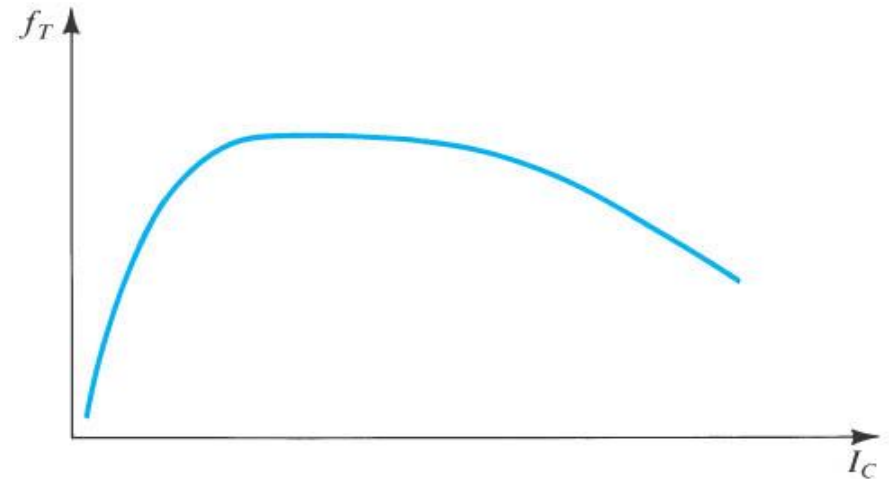
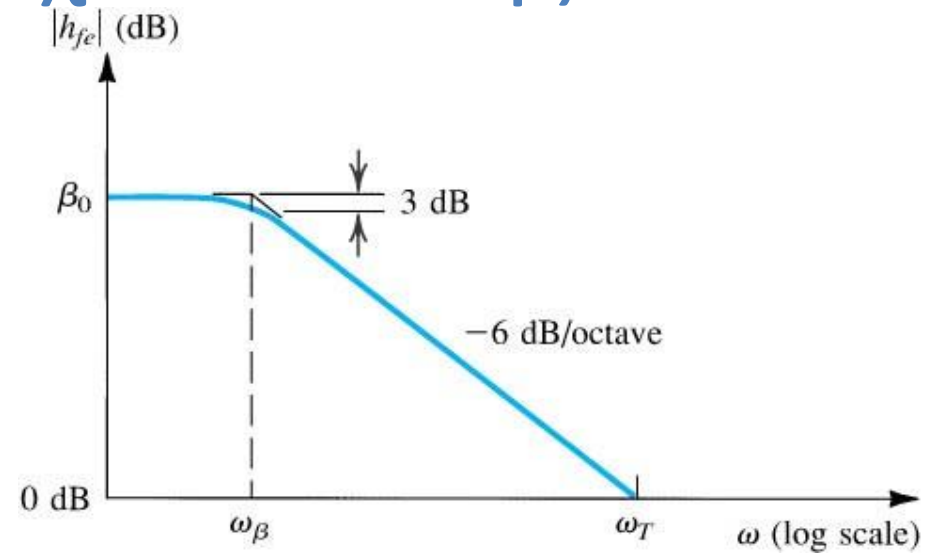
Συχνότητα μοναδιαίας απολαβής ρεύματος βραχυκύκλωσης

Συχνότητα μοναδιαίας απολαβής:

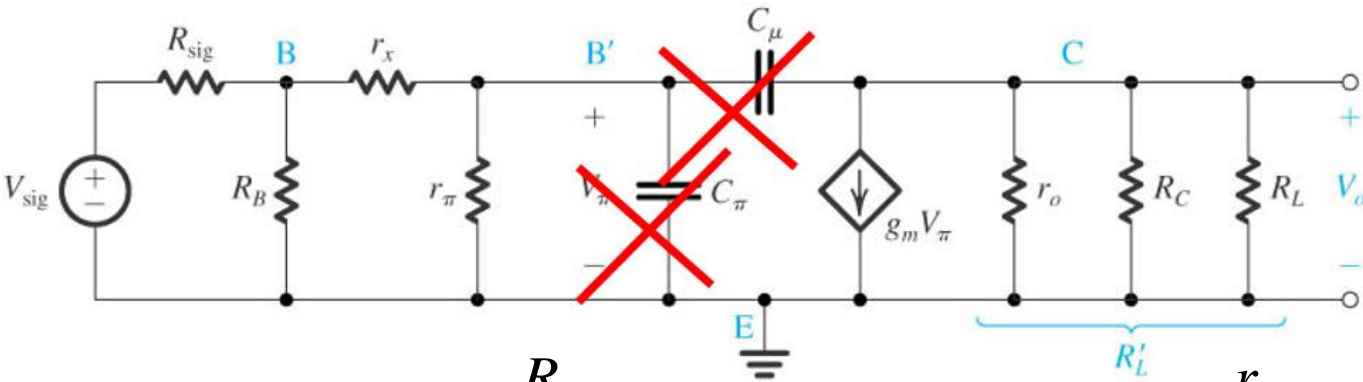
$$\omega_T = \beta_o \omega_\beta \quad (\text{λαμβάνοντας υπόψη ότι το GBW=σταθ.})$$

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

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



Απόκριση του ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις μεσαίες συχνότητες



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

$$V_B = V_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}}$$

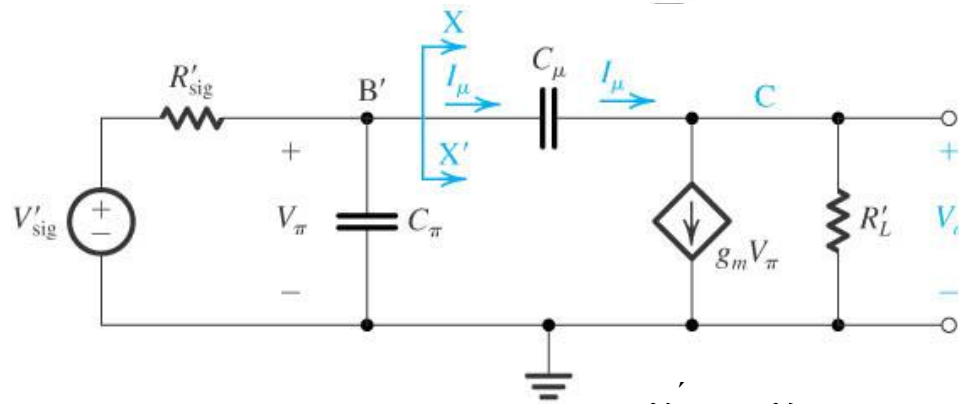
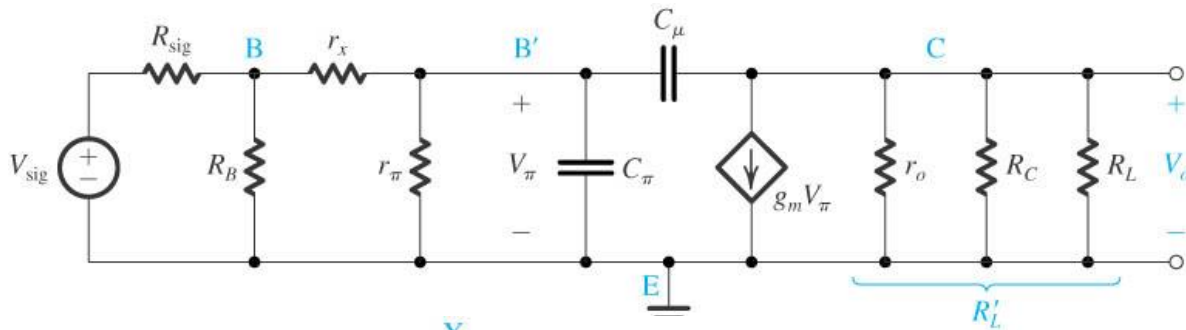
$$V_\pi = V_B \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_{sig} \parallel R_B)}$$

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

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



Απόκριση ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (1από2)



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

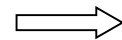
$$R'_{sig} = r_\pi // [r_x + (R_{sig} // R_B)]$$

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 ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (2από2)

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

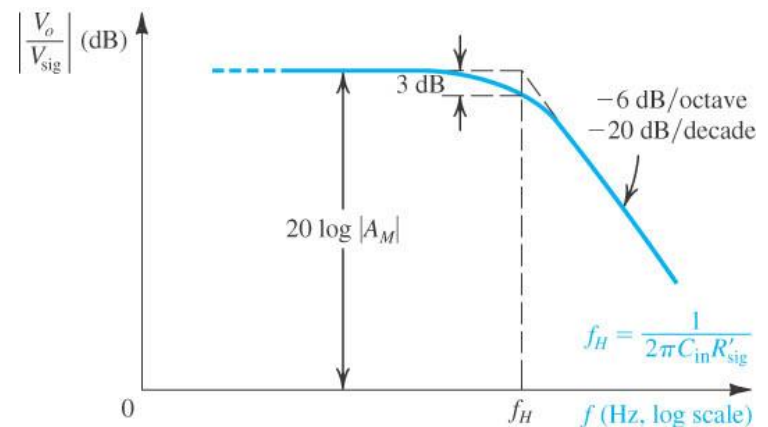
$$D = \left(\frac{s}{\omega_{p1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{p2}} + 1\right) = \frac{s^2}{\omega_{p1}\omega_{p2}} + \left(\frac{1}{\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p2}}\right)s + 1 \Rightarrow \text{για } \omega_{p2} \gg \omega_{p1} \Rightarrow$$

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

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

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

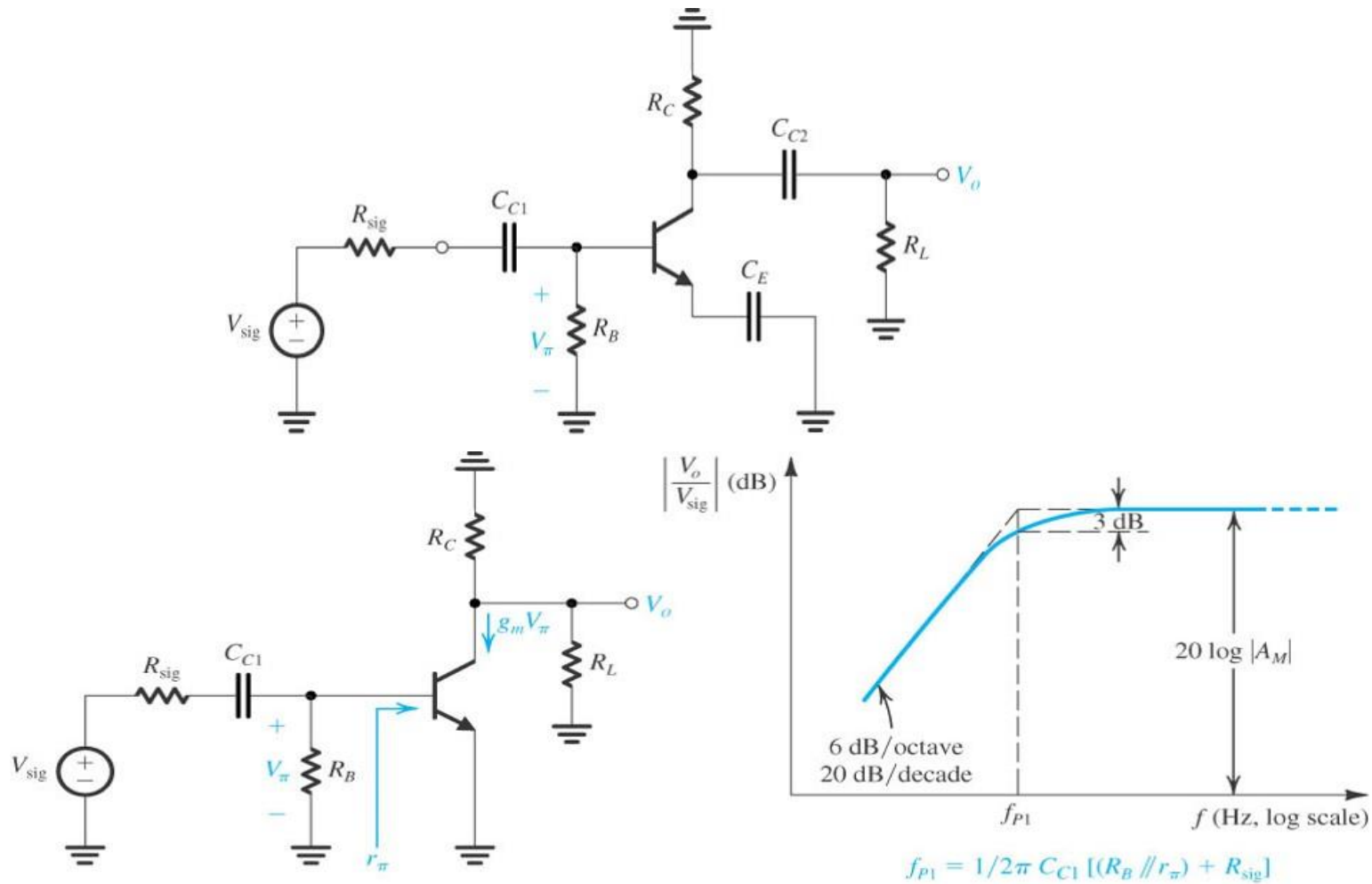
$$\omega_z = \frac{g_m}{C_\mu}$$



(d)



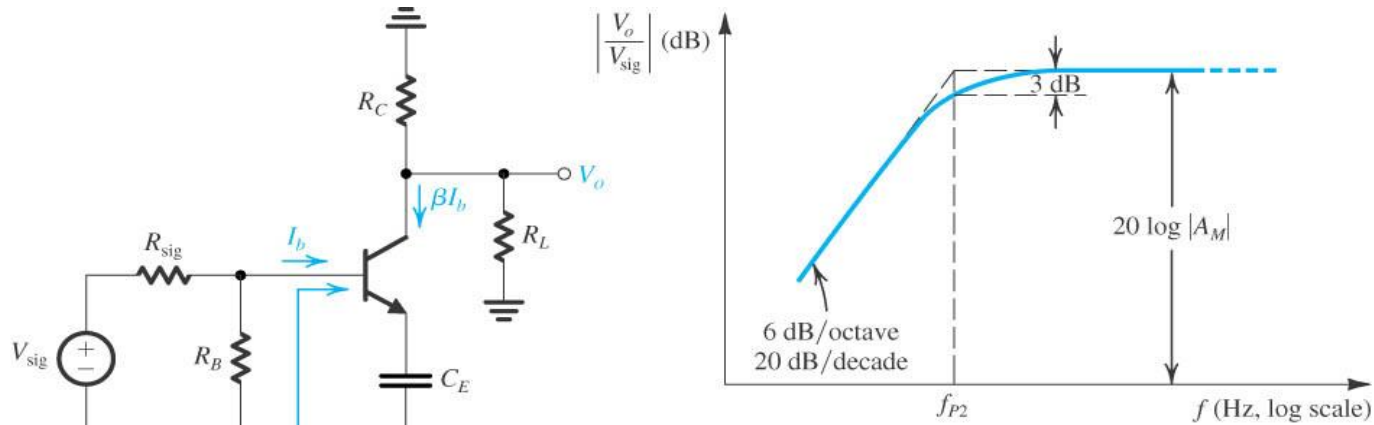
Απόκριση ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (1 από 3)



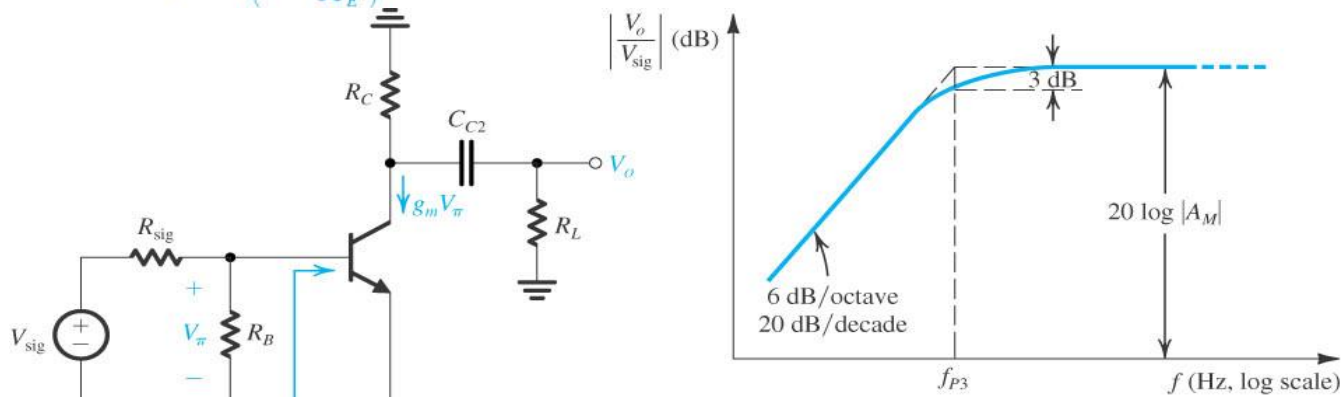
(b)



Απόκριση ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (2 από 3)



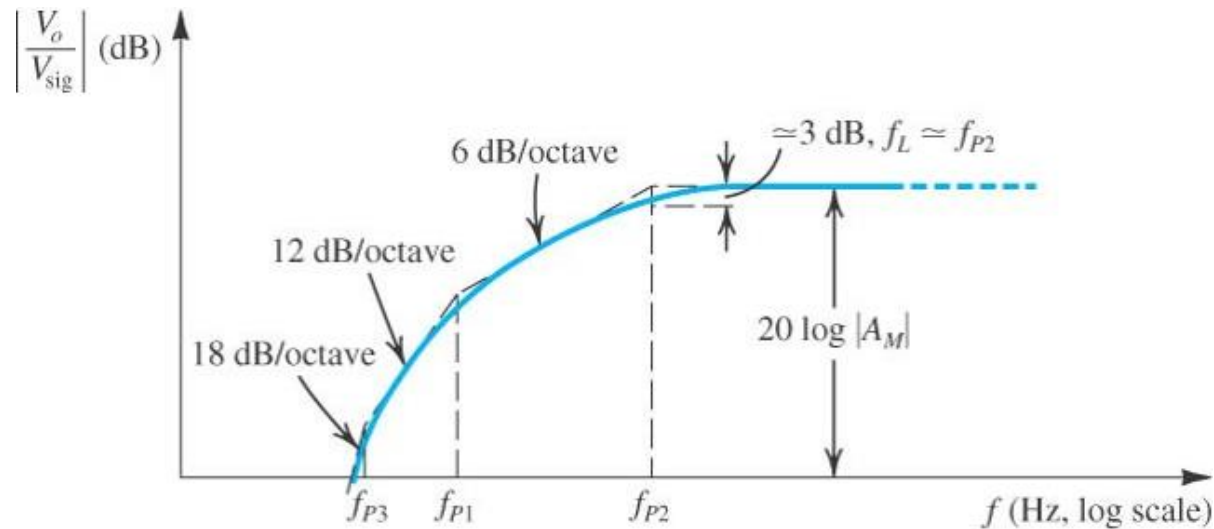
$$f_{p2} = 1/2\pi C_E \left[r_e + \frac{R_B // R_{sig}}{\beta + 1} \right]$$



$$f_{p3} = 1/2\pi C_{C2} (R_C + R_L)$$

(d)

Απόκριση ενισχυτή κοινού Εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (3 από 3)



(e)

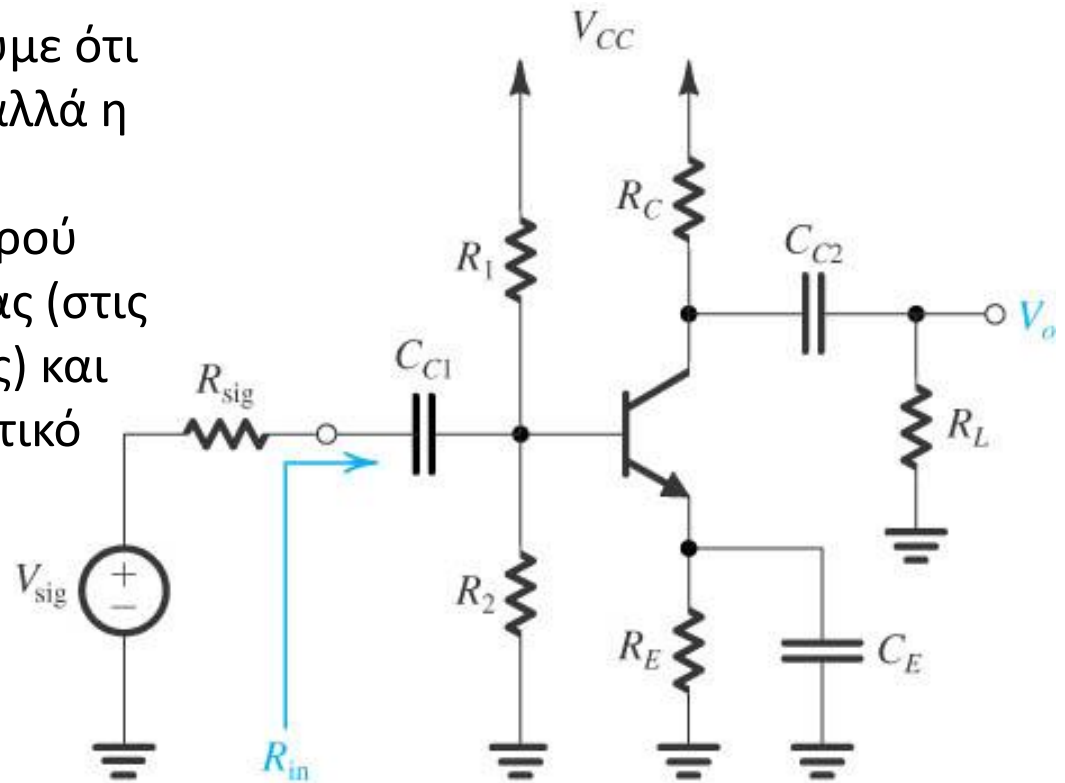
Επειδή η RE είναι η μικρότερη αντίσταση, επιλέγουμε την CE έτσι ώστε να δίνει την επιθυμητή κάτω συχνότητα αποκοπής. Οι υπόλοιποι πυκνωτές επιλέγονται έτσι ώστε να δίνουν πόλους σε χαμηλότερες συχνότητες. Με αυτό τον τρόπο οι πυκνωτές που θα επιλεγούν θα έχουν όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές.

Άσκηση1 (1 από 3)

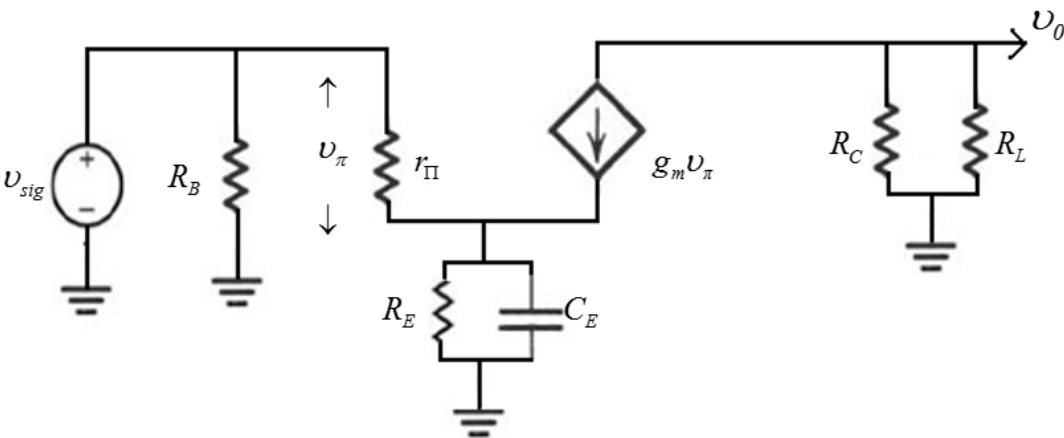
Στο κύκλωμα του σχήματος θεωρούμε ότι $C_{c1}, C_{c2} \rightarrow \infty, R_{sig}=0, r_x=0$ και $r_o=r_\mu=\infty$ αλλά η C_E δεν μπορεί να παραλειφθεί.

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

Δίνεται $\beta=100$.



Άσκηση1 (2 από 3)



$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$R_O = R_C \parallel R_L$$

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

$$v_o = -g_m v_\pi R_O$$

$$v_{sig} = v_\pi + \left(g_m v_\pi + \frac{v_\pi}{r_\pi} \right) (R_E \parallel C_E)$$

$$A(\omega) = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{g_m R_O}{1 + \frac{g_m r_\pi + 1}{r_\pi} \cdot \frac{R_E}{1 + j\omega C_E R_E}} =$$

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

Άσκηση1 (3 από 3)

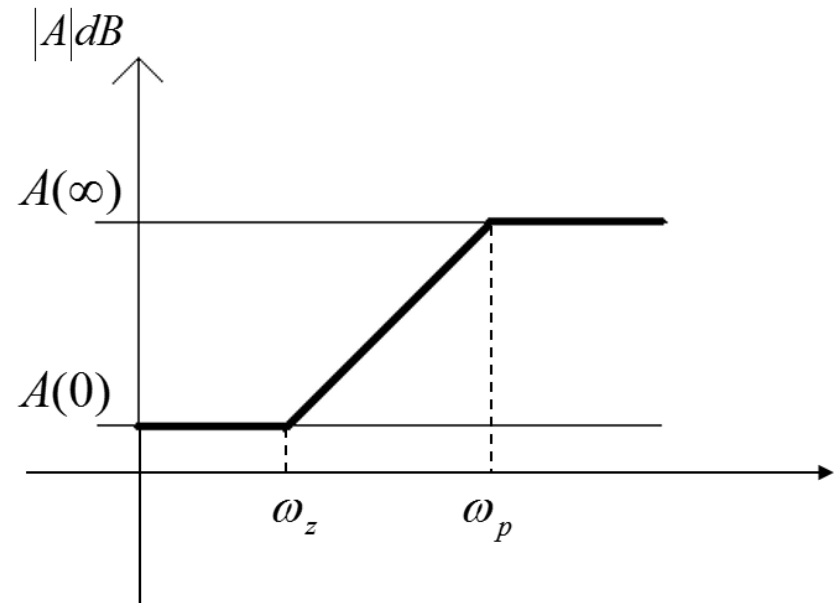
$$A(\omega) = -\frac{g_m R_0 r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} \cdot \frac{1 + j\omega C_E R_E}{1 + j\omega \frac{C_E R_E r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}} \Rightarrow$$

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

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

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

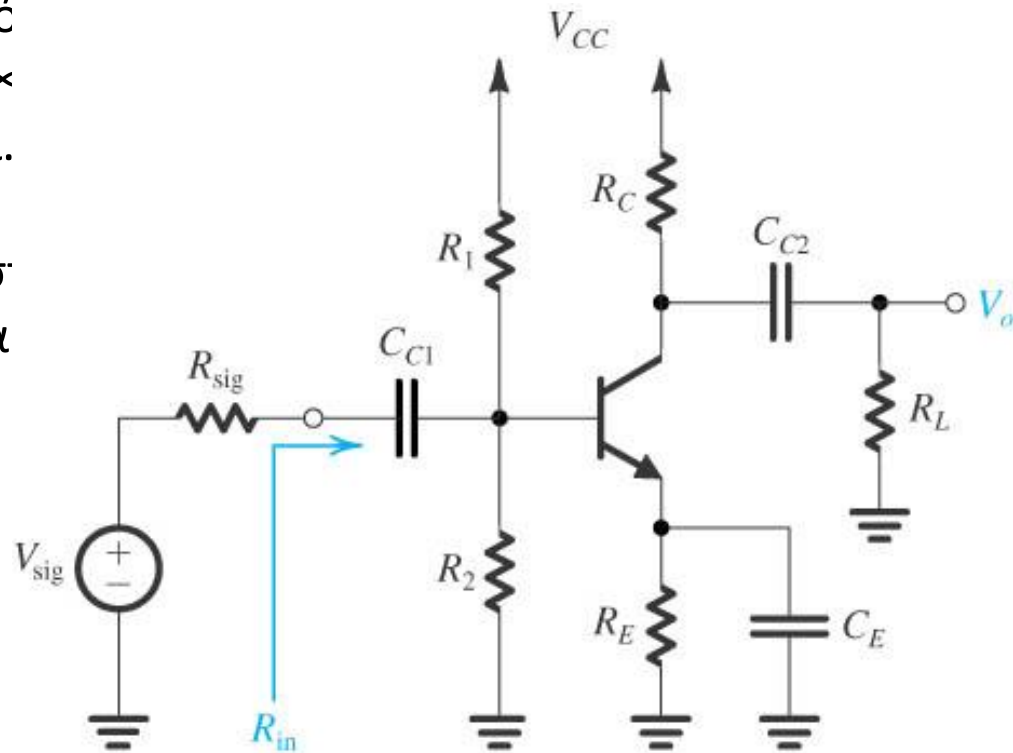
$$\omega_p = \frac{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}{C_E R_E r_\pi}$$



Άσκηση2

Στο κύκλωμα του σχήματος θεωρούμε C_E και $C_{C2} \rightarrow \infty$, $R_{sig}=0$, $r_x=0$ και $r_o=r_m=\infty$ αλλά η C_{C1} δεν μπορεί να παραλειφθεί. Υπολογίστε την απολαβή τάσης μικρού σήματος συναρτήσει της συχνότητας (σχαμηλές 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 $r_{\pi}=1.44\text{k}\Omega$.



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.01.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2014. «Ηλεκτρονική. Ενότητα 8: Απόκριση κατά Συχνότητα των Ενισχυτών μιας βαθμίδας με διπολικά τρανζίστορ». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://opencourses.uoa.gr/courses/DI4/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

