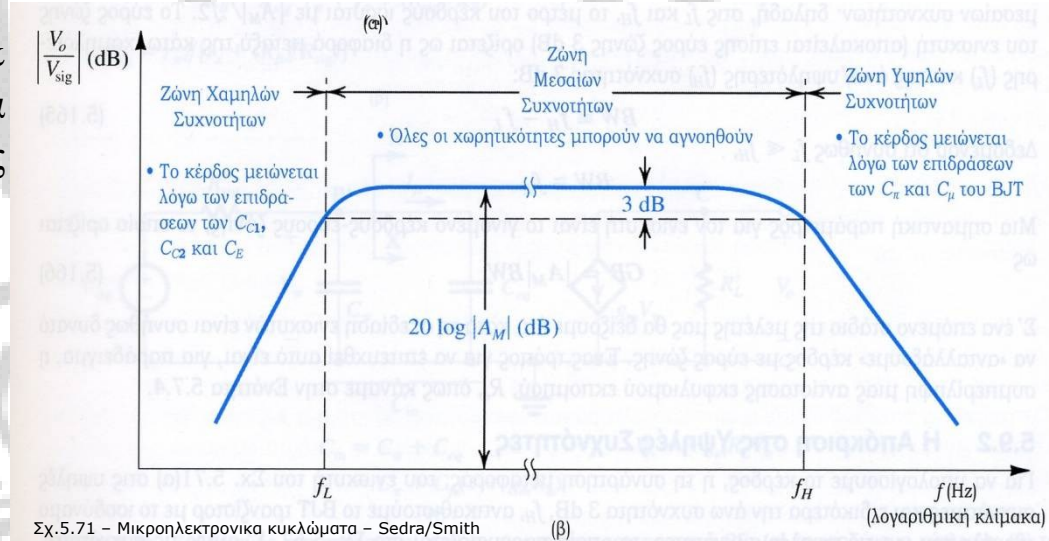


Απόκριση συχνότητας ενισχυτή CE (I)

Θεωρώντας ότι οι πυκνωτές σύζευξης & παράκαμψης λειτουργούν ως τέλεια βραχυκυκλώματα και ότι οι εσωτερικές χωρητικότητες ως ανοιχτοκυκλώματα, τότε:

$$A_m = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \quad \omega_L \leq \omega \leq \omega_H$$



Όμως:

- για χαμηλές συχνότητες → Υψηπερατή συμπεριφορά. Οφείλεται στους πυκνωτές C_i , C_o που δρουν ως πυκνωτές διαφόρισης (χωρητικότητες τάξης μF)
- για υψηλές συχνότητες → βαθυπερατή συμπεριφορά. Οφείλεται στις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ κυρίως (χωρητικότητες τάξης pF).

Συνεπώς η συμπεριφορά του ενισχυτή προσδιορίζεται:

- στις χαμηλές συχνότητες από τις σταθερές χρόνου των εξωτερικών πυκνωτών
- στις υψηλές συχνότητες από τις σταθερές χρόνου που σχηματίζουν οι παρασιτικές χωρητικότητες

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή CE (II)

Η απόκριση συχνότητας του ενισχυτή είναι

$$\mathbf{A}(s) = \mathbf{A}_m \mathbf{A}_L(s) \mathbf{A}_H(s)$$

$\mathbf{A}_L(s) \rightarrow$ εξάρτηση της ενίσχυσης από την συχνότητα στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων

$\mathbf{A}_H(s) \rightarrow$ εξάρτηση της ενίσχυσης από την συχνότητα στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων.

Περιοχή μεσαίων συχνοτήτων (ζώνη διέλευσης $\omega_L < \omega < \omega_H$) .. Έχουμε $\mathbf{A}(s) = \mathbf{A}_m$, η ενίσχυση υπολογίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος του ενισχυτή (πυκνωτές ζεύξης \rightarrow βραχυκυκλώματα & παρασιτικές χωρητικότητες BJT αγνοούνται)

περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Έχουμε $\mathbf{A}(s) = \mathbf{A}_m \mathbf{A}_H(s)$, η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του τροποποιημένου κατά Miller ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή (πυκνωτές ζεύξης \rightarrow βραχυκυκλώματα & παρασιτικές χωρητικότητες BJT λαμβάνονται υπόψη)

περιοχή χαμηλών συχνοτήτων. Έχουμε $\mathbf{A}(s) = \mathbf{A}_m \mathbf{A}_L(s)$, η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του h- ή π- ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή (πυκνωτές ζεύξης λαμβάνονται υπόψη & παρασιτικές χωρητικότητες BJT αγνοούνται)

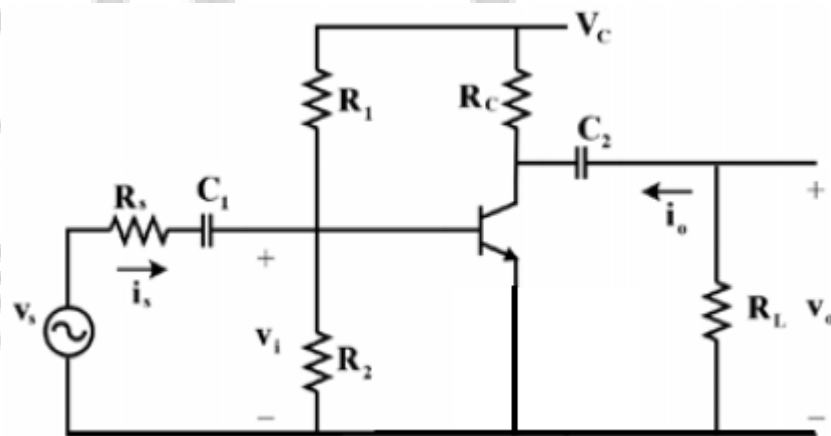
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή CE (III)

Περιοχή Χαμηλών Συχνοτήτων

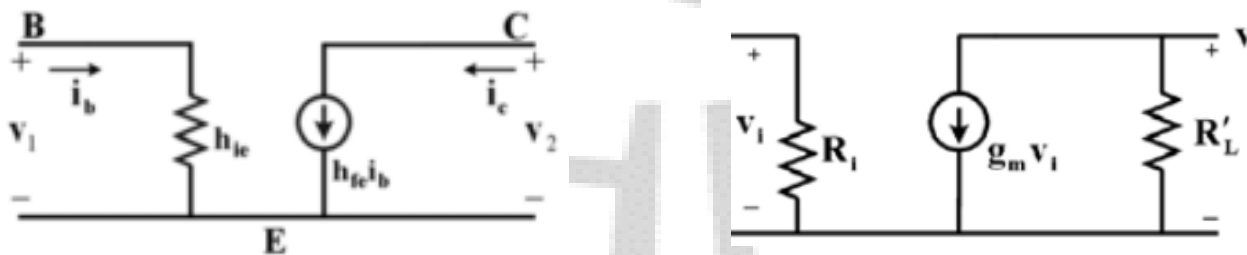
➤ Όταν υπάρχουν άνω του ενός πυκνωτές η απόκριση συχνότητας οφείλεται στη συνδυασμένη δράση όλων

➤ Για να την υπολογίσουμε, εξετάζουμε τη δράση του κάθε πυκνωτή ξεχωριστά, βραχυκυκλώνοντας τους υπόλοιπους

➤ Γίνεται χρήση του απλοποιημένου h- η π-ισοδυνάμου



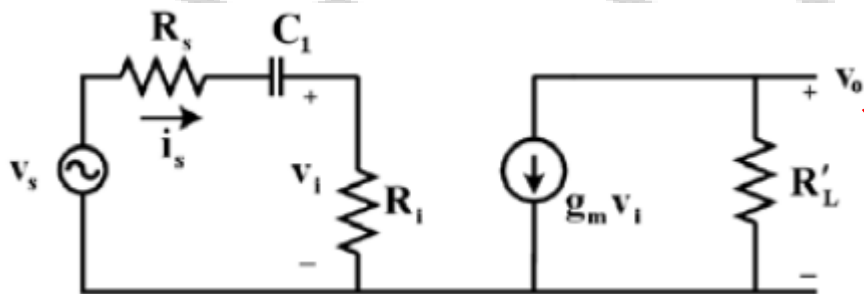
Σχ.3.4 - Ηλεκτρονικά II, Χαριταντής Γ.



Σχ.1.8 - Ηλεκτρονικά II, Χαριταντής Γ.

Χαμηλές συχνότητες – Επίδραση C1

Ισοδύναμο μοντέλο με επίδραση C1



Σχ.3.7 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

$$h_{ie} \approx r_{\pi}$$

$$R_B = R_1 // R_2$$

$$h_{fe} \approx g_m r_{\pi}$$

$$R_i = R_B // r_{\pi}$$

$$R'_L = R_c // R_L$$

Ενίσχυση στις μεσαίες συχνότητες

$$A_m = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{g_m R'_L R_i}{R_i + R_s}$$

$$v_o = -g_m R'_L v_i = \frac{-g_m R'_L R_i}{R_i + R_s} v_s$$

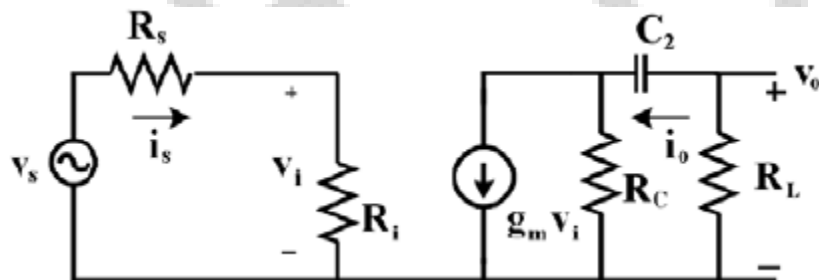
Το κύκλωμα εισόδου δημιουργεί τη σταθερά χρόνου, το οποίο λειτουργεί ως υψηπέρατο

$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1$$

$$A_1(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = A_m \frac{\tau_1 s}{\tau_1 s + 1}$$

Χαμηλές συχνότητες – Επίδραση C2

Ισοδύναμο μοντέλο με επίδραση C2



Σχ.3.8 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Το κύκλωμα εξόδου δημιουργεί τη σταθερά χρόνου, το οποίο λειτουργεί και εδώ ως υψηπέρατο

$$A_2(s) = A_m \frac{\tau_2 s}{\tau_2 s + 1}$$

$$\tau_2 = (R_c + R_L)C_2$$

Χαμηλές συχνότητες – Ολική επίδραση

➤ Περιοχή χαμηλών συχνοτήτων → η ενίσχυση προσδιορίζεται με χρήση του ισοδύναμου μοντέλου και εξωτερικούς πυκνωτές. Η ολική ενίσχυση είναι:

$$A_L(s) = A_m \frac{\tau_1 \cdot s \cdot \tau_2 \cdot s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)}$$

➤ Η παραπάνω συνάρτηση εμφανίζει δύο πόλους → Ο αντιστοιχών σε μικρότερη σταθερά χρόνου αντιστοιχεί και στη μεγαλύτερη συχνότητα.

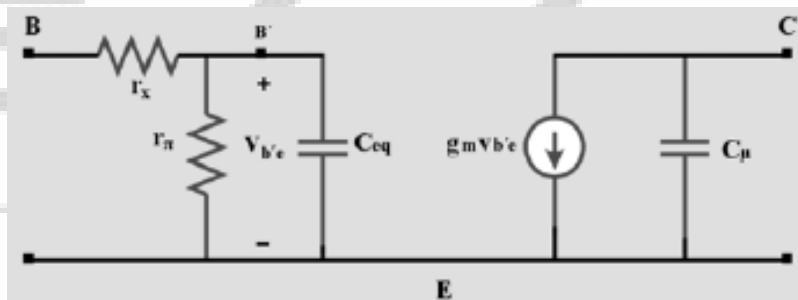
➤ Με χρήση της προσέγγισης επικρατούντος πόλου αγνοούμε εκείνον που αντιστοιχεί σε μικρότερη συχνότητα αποκοπής (ή μεγαλύτερη σταθερά χρόνου). Από πρακτικής άποψης λαμβάνουμε υπόψη τη συχνότητα αποκοπής που μας χειροτερεύει την απόκριση χαμηλών συχνοτήτων.

➤ Θεωρώντας ως επικρατών πόλο εκείνο που αντιστοιχεί στη σταθερά χρόνου τ_2 , έχουμε

$$A_L(s) = A_m \frac{\tau_2 s}{\tau_2 s + 1}$$

Υψηλές Συχνότητες (I)

Τροποποιημένο κατά Miller π-ισοδύναμο μοντέλο



Σχ.2.6 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

C_π : χωρητικότητα ορθά πολωμένης επαφής B-E

C_μ : χωρητικότητα ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C

$$v_o = -g_m R'_L v_{b'e} = k v_{b'e}$$

$$R'_L = R_L // r_o$$

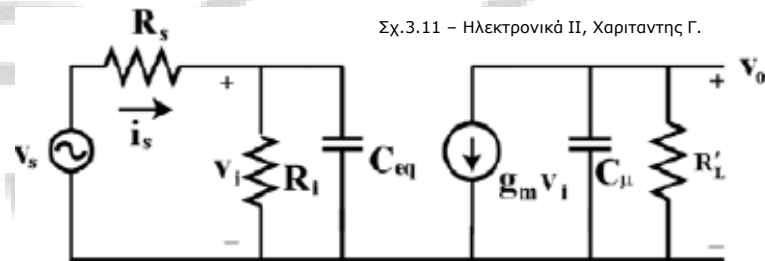
$$k = -g_m R'_L$$

$$C_{eq} = C_\pi + C_\mu (1 + g_m R'_L)$$

Υψηλές συχνότητες (II)

Η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του τροποποιημένου κατά Miller ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή (πυκνωτές ζεύξης θεωρούνται βραχυκυκλώματα ενώ οι παρασιτικές χωρητικότητες BJT λαμβάνονται υπόψη)

Ισοδύναμο με χρήση τροποποιημένου κατά Miller π-ισοδύναμου



Τόσο το κύκλωμα εισόδου όσο και το κύκλωμα εξόδου παρουσιάζουν βαθυπερατή συμπεριφορά, συνεπώς :

$$\tau_i = (R_i // R_s)C_{eq} \quad \rightarrow \quad A_4(s) = A_m \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad A_5(s) = A_m \frac{1}{\tau_o s + 1} \quad \leftarrow \quad \tau_o = R'_L C_{\mu}$$

Η ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες δίνεται από :

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{(\tau_i s + 1)(\tau_o s + 1)}$$

Συνήθως η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κυκλώματος εξόδου, οπότε μπορεί να παραληφθεί η συχνότητα αποκοπής που δημιουργεί το κύκλωμα εξόδου και να λάβουμε προσεγγιστικά την

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{\tau_i s + 1}$$

Συνδυασμένη απόκριση συχνότητας

Λαμβάνοντας υπόψη τη δράση των πυκνωτών & παρασιτικών χωρητικοτήτων, όπως περιγράφηκαν, έχουμε την κάτωθι σχέση που περιγράφει τη συνδυασμένη απόκριση του ενισχυτή

$$A(s) = A_m A_L(s) A_H(s) = A_m \frac{\tau_1 s \tau_2 s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_i s + 1)(\tau_o s + 1)}$$

Με χρήση των προσεγγίσεων έχουμε

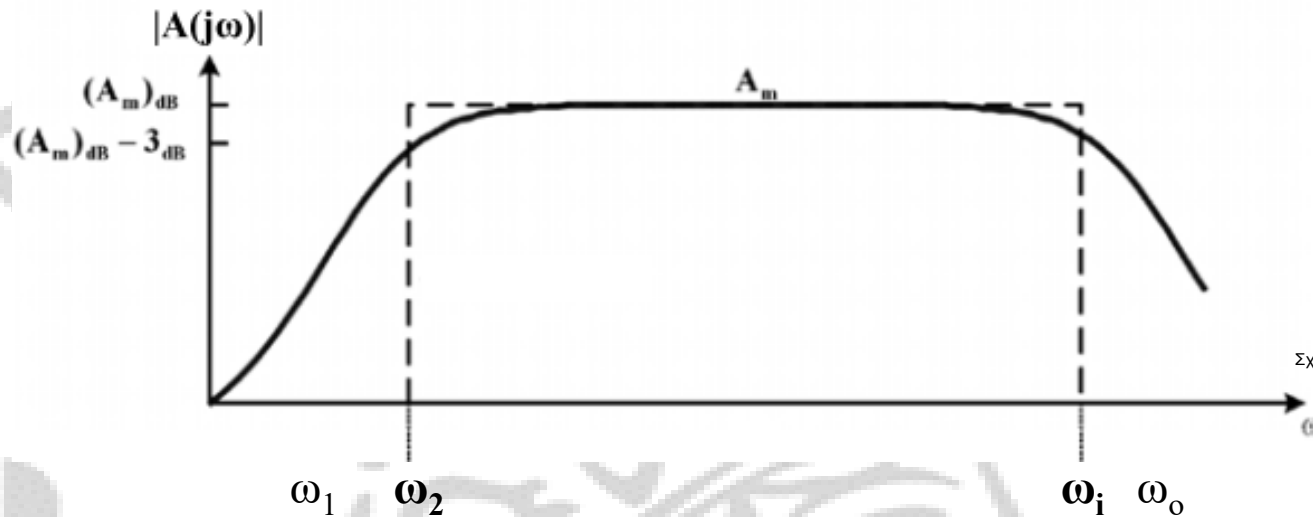
$$A(s) = A_m \frac{\tau_2 s}{(\tau_2 s + 1)(\tau_i s + 1)}$$

Άρα για τη συνδυασμένη απόκριση :

Κάτω συχνότητα αποκοπής → καθορίζεται από εξωτερικούς πυκνωτές και ιδιαίτερα από αυτόν που δημιουργεί τη μικρότερη σταθερά χρόνου

Άνω συχνότητα αποκοπής → καθορίζεται από παρασιτικές χωρητικότητες τρανζίστορ και ιδιαίτερα από τη σταθερά χρόνου που σχηματίζει το ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου

Συνδυασμένη απόκριση συχνότητας (II)



Σχ.3.5 - Ηλεκτρονικά II, Χαριτανής Γ.

Κατώτερη συχνότητα αποκοπής

$$\omega_L = \omega_2 = \frac{1}{\tau_2} \Rightarrow f_L = \frac{1}{2\pi\tau_2}$$

Ανώτερη συχνότητα αποκοπής

$$\omega_H = \omega_i = \frac{1}{\tau_i} \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi\tau_i}$$

συνδυασμένη απόκριση

$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_2 s}{(\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_i s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$

Ερώτηση αυτοαξιολόγησης:

Διεύρυνση ανώτερης συχνότητας

- Στις υψηλές συχνότητες, για τον ενισχυτή CE, είδαμε ότι ισχύει

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{(\tau_i s + 1)(\tau_o s + 1)}$$

- Θεωρώντας ότι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι μεγαλύτερη, καταλήξαμε ότι το κύκλωμα εισόδου καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής
- Εξετάζοντας το πρόβλημα υπό διαφορετική σκοπιά αυτό που διακρίνουμε είναι ότι, στις υψηλές συχνότητες, ο ενισχυτής παρουσιάζει δύο πόλους, εκ των οποίων αυτός που αντιστοιχεί στο κύκλωμα εισόδου καθορίζει και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής.
- Υπάρχει η δυνατότητα να **αντισταθμίσουμε τον επικρατούντα πόλο** εάν εισάγουμε έναν μηδενισμό στην $A_H(s)$?

Παράδειγμα 1

Με χρήση της τεχνικής σταδιακής ανάλυσης κατά περιοχές συχνοτήτων, να προσδιοριστεί η απόκριση συχνότητας μέτρου του ενισχυτή του σχήματος. Το τρανζίστορ είναι πολωμένο στην ενεργό περιοχή και δίδονται:

$$r_{\pi} = 1.25\text{K}\Omega$$

$$C_{\pi} = 10\text{pF}$$

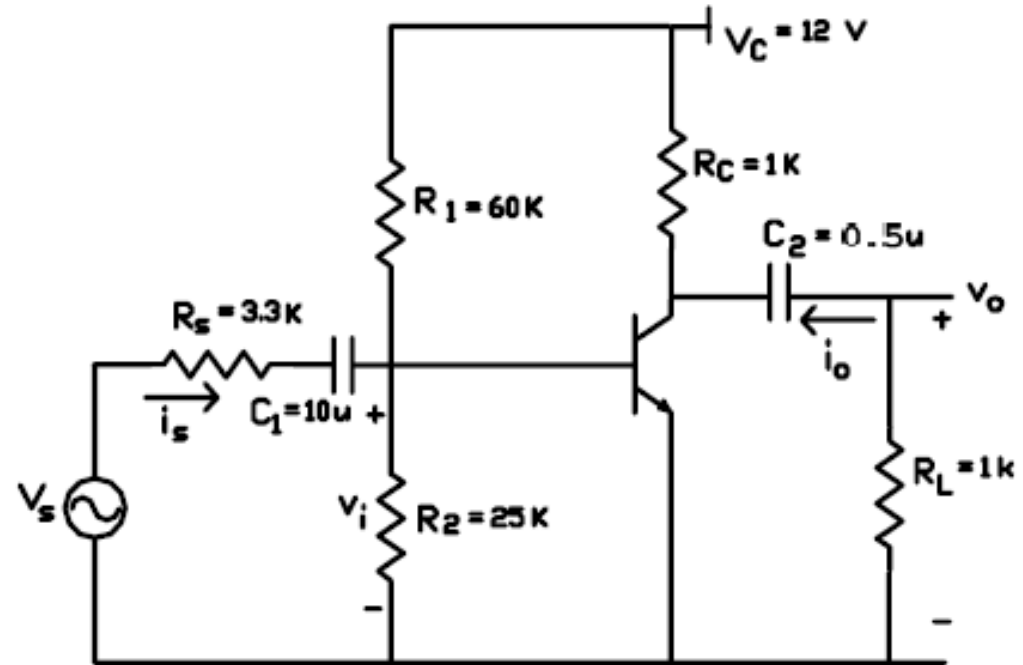
$$C_{\mu} = 3\text{pF}$$

$$g_m = 200\text{mS}$$

$$r_x = 0$$

$$r_o = \infty$$

$$r_{b'c'} = \infty$$



Σχ.Α3.2 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Παράδειγμα 1 (II)

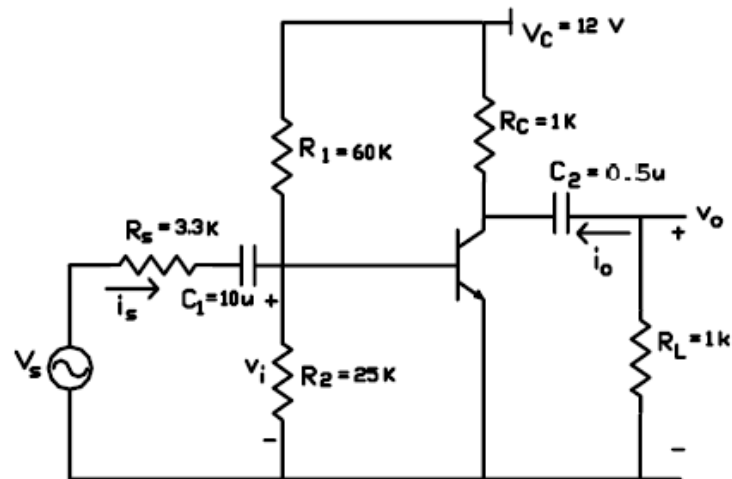
$$R_B = R_1 // R_2 = 17.64K$$

$$R_i = R_B // r_\pi = 1.17K$$

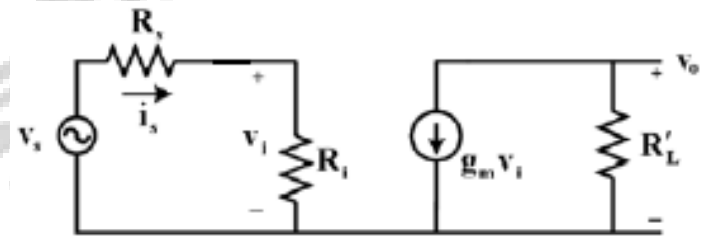
$$R'_L = R_L // R_C = 0.5K$$

• Για τις μεσαίες συχνότητες έχω

$$v_o = -g_m R'_L \frac{R_i}{R_i + R_s} v_s$$



Σχ.Α3.2 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.



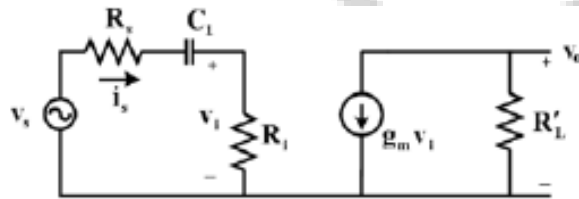
Σχ.Α3.2 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

$$A_m = -g_m \cdot \frac{R'_L R_i}{R_i + R_s} = -26.17$$

Παράδειγμα 1 (III)

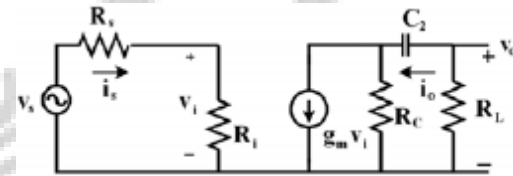
Για τις χαμηλές συχνότητες έχω

Επίδραση C1



Σχ.3.7 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Επίδραση C2



Σχ.3.8 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 \quad \Rightarrow \quad f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 3.56\text{Hz} \quad \tau_2 = (R_C + R_L)C_2 \quad \Rightarrow \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 160\text{Hz}$$

Επειδή, $f_2 > f_1$ κυρίαρχη συχνότητα στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων είναι η f_2 . Άρα,

$$\mathbf{f_L = f_2 = 160\text{Hz}}$$

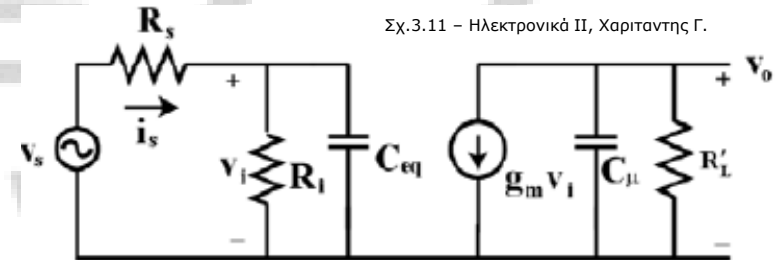
Παράδειγμα 1 (IV)

Για τις υψηλές συχνότητες έχω

$$C_{eq} = C_{\pi} + (1 + g_m R'_L) C_{\mu} = 313 \text{ pF}$$

$$\tau_i = (R_i // R_s) C_{eq} = 270 \text{ ns}$$

$$\tau_o = R'_L C_{\mu} = 1.5 \text{ ns}$$



Επειδή $\tau_i > \tau_o$ ο επικρατών πόλος είναι αυτός που καθορίζεται από το κύκλωμα εισόδου.

$$f_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} = 588 \text{ KHz}$$

Άρα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων η συχνότητα αποκοπής είναι

$$f_H = f_i = 588 \text{ KHz}$$

Παράδειγμα 1 (V)

Η προσεγγιστική συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή δίνεται από την :

$$A_v(s) = \frac{A_m}{(1 + \tau_H s) \left(1 + \frac{1}{\tau_L s}\right)} = \frac{A_m \cdot \tau_L s}{(\tau_H s + 1)(\tau_L s + 1)}$$

$$\begin{aligned} A_m &= -26.17 \\ \tau_H &= 270 \text{ ns} \\ \tau_L &= \text{ms} \end{aligned}$$

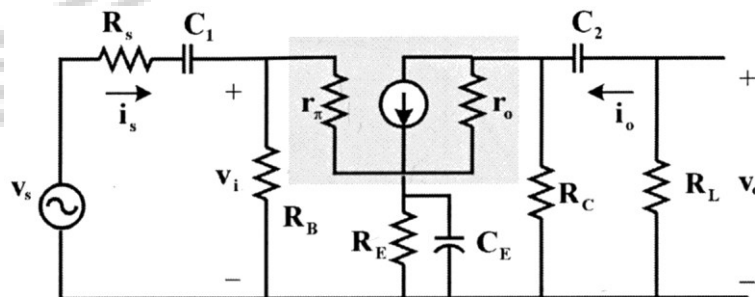
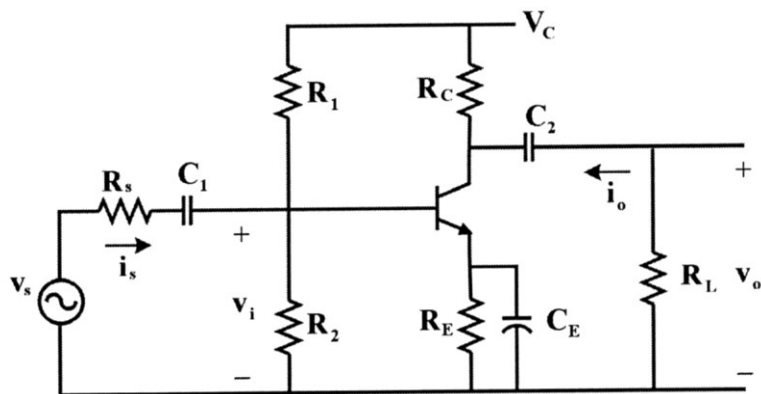
ή

$$A_v(s) = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$

$$\begin{aligned} A_m &= -26.17 \\ f_H &= 588 \text{ KHz} \\ f_L &= 160 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Ερώτηση Αυτοαξιολόγησης

Δείξτε ότι ο ενισχυτής CE με πυκνωτή παράκαμψης της R_E έχει την παρακάτω ΣΜ

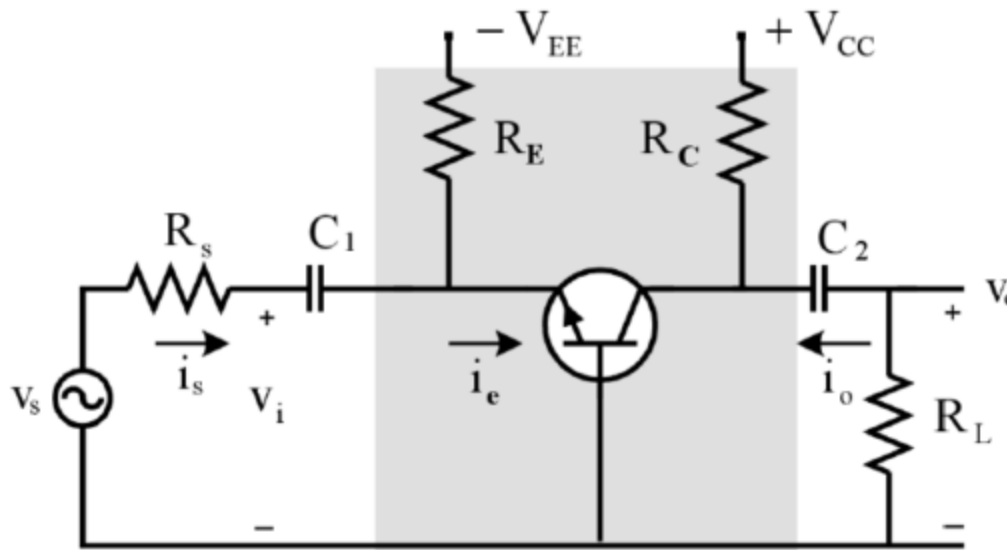


$$A(s) = A_m \cdot \frac{\tau_1 s \cdot \tau_2 s \cdot (\tau_E s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_E s + \nu)(\tau_i s + 1)(\tau_o s + 1)}$$

Απόκριση ενισχυτή CB

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία ανάλυσης που εφαρμόσαμε στον ενισχυτή CE (μελέτη επίδρασης κάθε χωρητικότητας ξεχωριστά) μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη απόκριση συχνότητας του ενισχυτή CB. Θα καταλήξουμε ότι η ενίσχυση του δίνεται προσεγγιστικά ως:

$$A(s) = A_m \cdot \frac{\tau_1 s}{\tau_1 s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_o s + 1}$$



Σχ.3.22 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Απόκριση ενισχυτή CB (συν.)

Περιοχή Μεσαίων συχνοτήτων

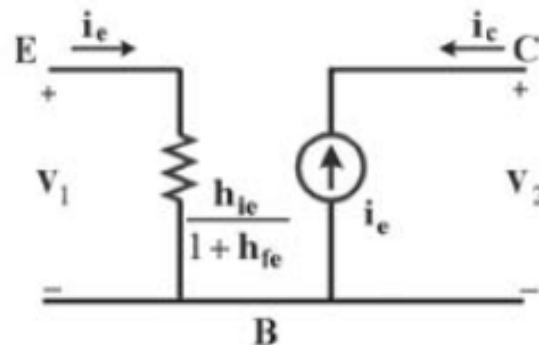
$$v_o = R'_L \cdot i_e = R'_L \cdot \frac{v_s}{R_s + R_i} \Rightarrow A_m = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R'_L}{R_s + R_i}$$

$$R_i = R_E \parallel \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = R_E \parallel \frac{r_\pi}{1 + g_m r_\pi}$$

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

$$h_{ie} \approx r_\pi$$

$$h_{fe} \approx g_m r_\pi$$

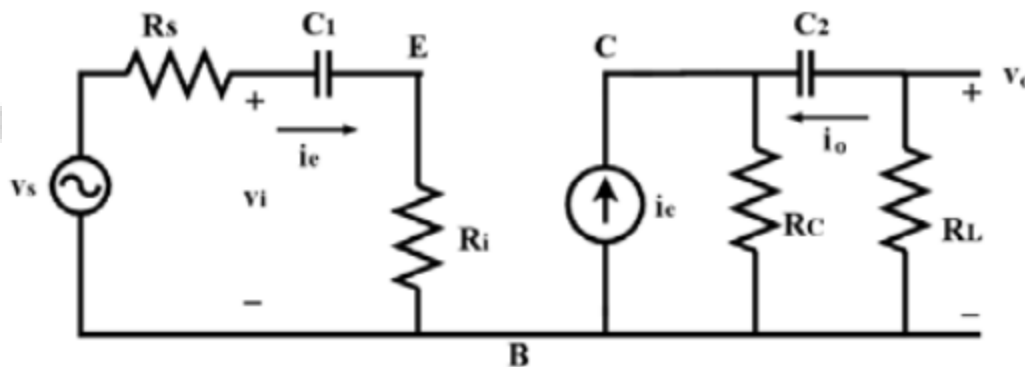


Σχ.1.24 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Απόκριση ενισχυτή CB (συν.)

Περιοχή Χαμηλών συχνοτήτων

- Για τις χαμηλές συχνότητες έχουμε να λάβουμε υπόψη δύο εξωτερικούς πυκνωτές
- Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με τον ενισχυτή CE, θα υπολογίσουμε την επίδραση του καθενός ξεχωριστά και στη συνέχεια θα συνθέσουμε την συνδυασμένη δράση τους
- Το ισοδύναμο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι το π-ισοδύναμο για χαμηλό-μεσαίες συχνότητες



Σχ.3.23 - Ηλεκτρονικά II, Χαριτανής Γ.

Απόκριση ενισχυτή CB (συν.)

Περιοχή Χαμηλών συχνοτήτων

- Τόσο το κύκλωμα εισόδου όσο και το κύκλωμα εξόδου παρουσιάζουν υπερερατή συμπεριφορά
- Για το κύκλωμα εισόδου (επίδραση C1) έχουμε: $\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 \rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1}$
- Για το κύκλωμα εξόδου (επίδραση C2) έχουμε: $\tau_2 = (R_C + R_L)C_2 \rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2}$
- Πρέπει να εξετάζουμε κατά περίπτωση τον επικρατούντα πόλο
- Στην πράξη, σε ενισχυτές CB έχουμε $C1 \approx C2$, και για τυπικές τιμές των αντιστάσεων R_s, R_c, R_i και R_L έχουμε

$$R_s + R_i \ll R_C + R_L \Rightarrow \omega_1 \gg \omega_2 \Rightarrow f_1 \gg f_2$$

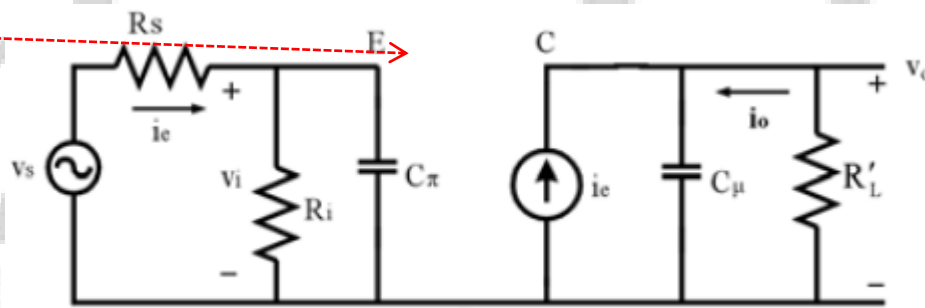
Που σημαίνει ότι το **κύκλωμα εισόδου** (με τον C1) καθορίζει την **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** $f_I = f_L$

Περιοχή υψηλών συχνοτήτων CB

Περιοχή Υψηλών συχνοτήτων

- Επαναλαμβάνουμε την ίδια μεθοδολογία με CE (χρήση ισοδύναμου με εισαγωγή παρασιτικών χωρητικότητας τρανζίστορ, αγνοούμε πυκνωτές σύζευξης)

Miller ???



Σχ.3.24 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντής Γ.

- Τόσο το κύκλωμα εισόδου όσο και το κύκλωμα εξόδου παρουσιάζουν βαθυπερατή συμπεριφορά
- Για το κύκλωμα εισόδου (επίδραση C_{π}) έχουμε: $\tau_i = (R_s // R_i)C_{\pi} \rightarrow f_i = \frac{1}{2\pi\tau_i}$
- Για το κύκλωμα εξόδου (επίδραση C_{μ}) έχουμε: $\tau_o = R'_L C_{\mu} \rightarrow f_o = \frac{1}{2\pi\tau_o}$
- Στην πράξη, σε ενισχυτές CB, έχουμε $\tau_i \ll \tau_o$, που σημαίνει ότι το **κύκλωμα εξόδου** καθορίζει την **ανώτερη συχνότητα αποκοπής** $f_o = f_H$