

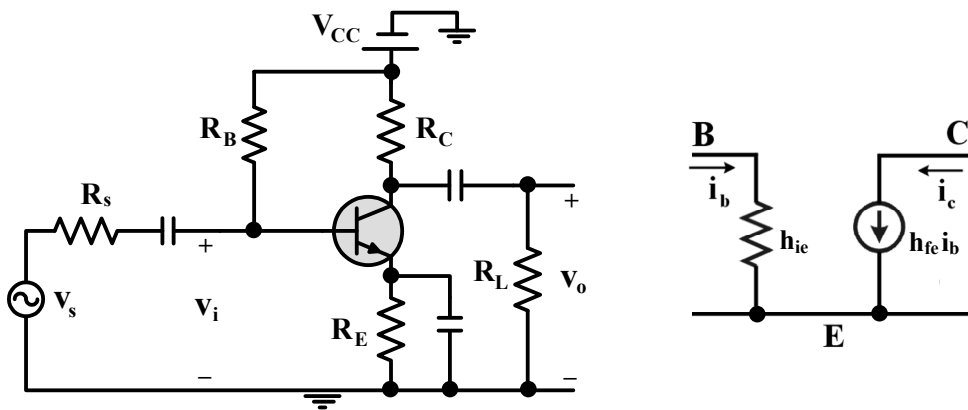
# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ - ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ

### 1

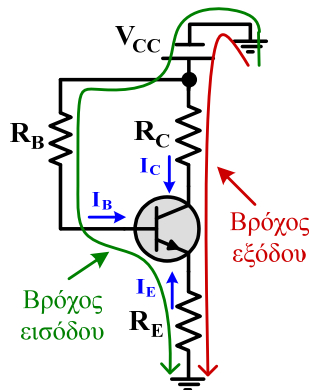
Για τον ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνονται  $V_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $R_s = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 4 \text{ k}\Omega$  και για το τρανζίστορ του ενισχυτή δίνονται  $V_{BE} = 0.75 \text{ V}$ ,  $h_{ie} = 2.5 \text{ k}\Omega$  και  $\beta = h_{fe} = 100$ .

- (α) Να υπολογίσετε τις τιμές των αντιστάσεων  $R_B$  και  $R_C$ , έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ να είναι Q (5.45 V, 4.75 mA).
- (β) Να χαράξετε τη γραμμή φορτίου (ευθεία φόρτου) του τρανζίστορ στο συνεχές.
- (γ) Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ που δίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- (δ) Να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_v = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



### ΛΥΣΗ

- (α) Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στους βρόχους εισόδου και εξόδου του κυκλώματος στο συνεχές ρεύμα, όπου οι πυκνωτές λειτουργούν ως ανοιχτά κυκλώματα:



Ο 2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff στο βρόχο εισόδου του παραπάνω κυκλώματος έχει ως εξής:

$$-V_{CC} + I_B R_B + V_{BE} - I_E R_E = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E = 0 \Rightarrow$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - (I_C + I_B) R_E}{I_B} \Rightarrow R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} \right) R_E}{I_C / \beta} \Rightarrow$$

$$R_B = \frac{15 - 0.75 - (4.75 + 0.0475) \cdot 1}{0.0475} \text{ k}\Omega \Rightarrow R_B = 199 \text{ k}\Omega .$$

Ο 2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του παραπάνω κυκλώματος έχει ως εξής:

$$-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} - I_E R_E = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B)R_E = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - \left(I_C + \frac{I_C}{\beta}\right)R_E}{I_C} \Rightarrow R_C = \frac{15 - 5.45 - (4.75 + 0.0475) \cdot 1}{4.75} \text{ k}\Omega \Rightarrow R_C = 1 \text{ k}\Omega.$$

Στους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:  $I_E = -(I_C + I_B)$  και  $I_B = I_C / \beta$ .

- (β) Τα δύο ακραία σημεία της γραμμής φορτίου του ενισχυτή στο συνεχές, προκύπτουν από τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του ενισχυτή, ο οποίος αναφέρθηκε στο ερώτημα (α):

$$V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B)R_E = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - \left(I_C + \frac{I_C}{\beta}\right)R_E \Rightarrow$$

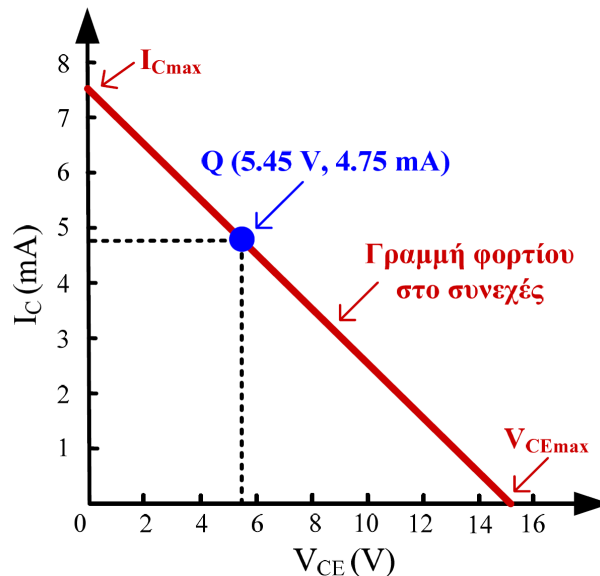
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot \left(R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta}\right) \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta}}.$$

Από την παραπάνω σχέση, υπολογίζονται τα δύο ακραία σημεία της γραμμής φορτίου του τρανζίστορ, ως εξής:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_{C\max} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta}} = \frac{15}{1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 + \frac{1 \cdot 10^3}{100}} \text{ A} \Rightarrow I_{C\max} \approx 7.5 \text{ mA}$$

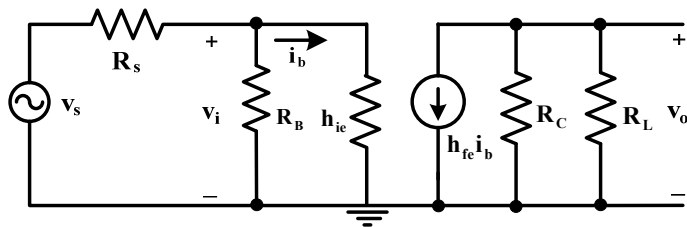
$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE\max} = V_{CC} \Rightarrow V_{CE\max} = 15 \text{ V}$$

Η γραμμή φορτίου στο συνεχές σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ με βάση τις τιμές του  $I_C$  και της  $V_{CE}$  που δίνονται, υποδεικνύεται επίσης στο παρακάτω σχήμα και ανήκει στη γραμμή φορτίου.



Επισημαίνεται ότι, επειδή είναι δεδομένο το σημείο λειτουργίας Q, θα μπορούσε κανείς να προσδιορίσει μόνο το ένα από τα δύο ακραία σημεία και να χαράξει τη γραμμή φορτίου χρησιμοποιώντας το ένα ακραίο σημείο και το σημείο λειτουργίας.

- (γ) Για το σχεδιασμό του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο, λαμβάνουμε υπόψη ότι στις μεσαίες συχνότητες οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα (συνεπώς η αντίσταση  $R_E$  δε συμμετέχει στο ισοδύναμο κύκλωμα), καθώς και ότι η πηγή σταθερής τάσης ( $V_{CC}$ ) βραχυκυκλώνεται. Επίσης, αντικαθιστούμε το τρανζίστορ με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμά του που δίνεται με εκφώνηση του θέματος:



- (δ) Η ενίσχυση τάσης που ζητείται υπολογίζεται με βάση το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, αφού αρχικά αντικαταστήσουμε τις παράλληλα συνδεδεμένες αντιστάσεις  $R_C$  και  $R_L$  με την ισοδύναμη αντίσταση

$$R'_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{1 \cdot 4}{1 + 4} \text{ k}\Omega = 0.8 \text{ k}\Omega.$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στις αντιστάσεις  $R'_L$  και  $h_{ie}$  προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$v_o = -h_{fe} \cdot i_b \cdot R'_L = -100 \cdot 0.8 \cdot 10^3 \cdot i_b \Rightarrow v_o = -80 \cdot 10^3 \cdot i_b, \quad i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}.$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι:

$$v_o = -80 \cdot 10^3 \cdot \frac{v_i}{h_{ie}} \Rightarrow v_o = -80 \cdot 10^3 \cdot \frac{v_i}{2.5 \cdot 10^3} \Rightarrow v_o = -32 \cdot v_i.$$

Από το διαιρέτη τάσης στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή, προκύπτει ότι:

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s, \quad \text{όπου } R_i = \frac{R_B \cdot h_{ie}}{R_B + h_{ie}} = \frac{199 \cdot 2.5}{199 + 2.5} \text{ k}\Omega = 2.47 \text{ k}\Omega.$$

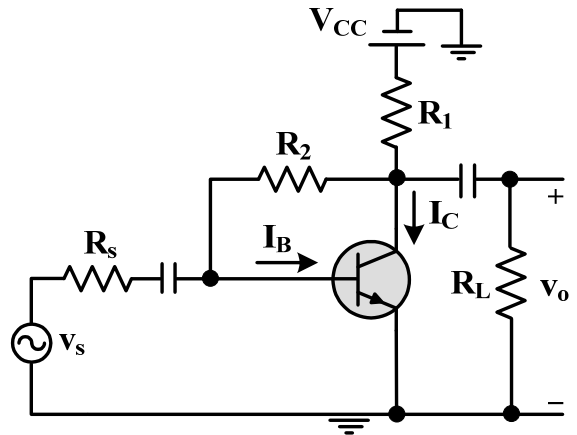
Μετά τα παραπάνω, η ζητούμενη ενίσχυση τάσης, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} v_o &= -32 \cdot v_i \Rightarrow v_o = -32 \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s \Rightarrow v_o = -\frac{32 \cdot 2.47 \cdot 10^3}{2.47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} \cdot v_s \Rightarrow \\ &\Rightarrow v_o = -6.34 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = -6.34 \Rightarrow A_v = -6.34. \end{aligned}$$

## 2

Για τον ενισχυτή του διπλανού σχήματος δίνεται ότι η τάση τροφοδοσίας είναι 12 V. Για το τρανζίστορ του ενισχυτή δίνεται ότι η τάση βάσης-εκπομπού είναι 0.7 V, το ρεύμα συλλέκτη είναι 2.8 mA, η τάση συλλέκτη-εκπομπού είναι 6.35 V και η ενίσχυση ρεύματος (απολαβή) στο συνεχές είναι 100.

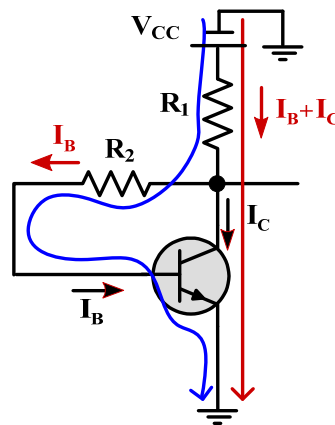
- (α) Να υπολογίσετε τις τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  του ενισχυτή.  
 (β) Να χαράξετε τη γραμμή φορτίου (ευθεία φόρτου) του τρανζίστορ στο συνεχές.



### ΛΥΣΗ

- (α) Αρχικά υπολογίζουμε το ρεύμα βάσης:  $I_B = I_C / \beta \Rightarrow I_B = 2.8 \text{ mA} / 100 \Rightarrow I_B = 28 \mu\text{A}$ .

Στη συνέχεια, αναλύουμε το κύκλωμα στο συνεχές, εφαρμόζοντας τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στους βρόχους εισόδου και εξόδου του κυκλώματος. Παρατηρήστε ότι η αντίσταση  $R_1$  διαρρέεται από το άθροισμα των ρευμάτων συλλέκτη και βάσης.



Βρόχος εξόδου:

$$-V_{CC} + (I_C + I_B) \cdot R_1 + V_{CE} = 0 \Rightarrow (I_C + I_B) \cdot R_1 = V_{CC} - V_{CE} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C + I_B} \Rightarrow R_1 = \frac{12 - 6.35}{2.8 \cdot 10^{-3} + 28 \cdot 10^{-6}} \Omega \Rightarrow R_1 = 1998 \Omega \approx 2 \text{ k}\Omega.$$

Βρόχος εισόδου:

$$-V_{CC} + (I_C + I_B) \cdot R_1 + I_B \cdot R_2 + V_{BE} = 0 \Rightarrow I_B \cdot R_2 = V_{CC} - (I_C + I_B) \cdot R_1 - V_{BE} \Rightarrow$$

$$R_2 = \frac{V_{CC} - (I_B + I_C) \cdot R_1 - V_{BE}}{I_B} \Rightarrow R_2 = \frac{12 - (2.8 \cdot 10^{-3} + 28 \cdot 10^{-6}) \cdot 2 \cdot 10^3 - 0.7}{28 \cdot 10^{-6}} \Omega \Rightarrow$$

$$R_2 = 201663 \Omega \approx 201.7 \text{ k}\Omega.$$

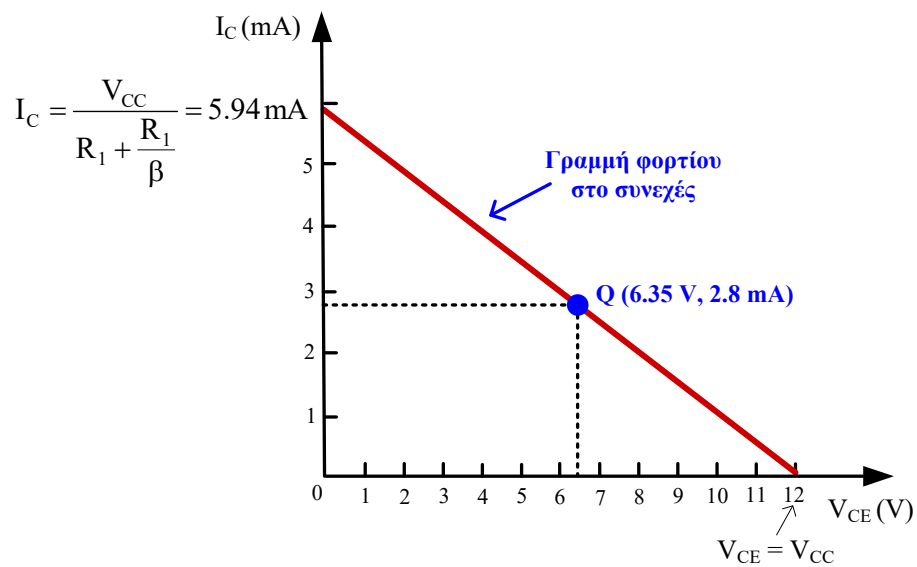
- (β) Η γραμμή φορτίου στο συνεχές προκύπτει από τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του ενισχυτή.

$$-V_{CC} + (I_C + I_B) \cdot R_1 + V_{CE} = 0$$

- $V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_1 + \frac{R_1}{\beta}} = \frac{12}{2 \cdot 10^3 + \frac{2 \cdot 10^3}{100}} \text{ A} \Rightarrow I_C = 5.94 \text{ mA}$

- $I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} \Rightarrow V_{CE} = 12 \text{ V}$

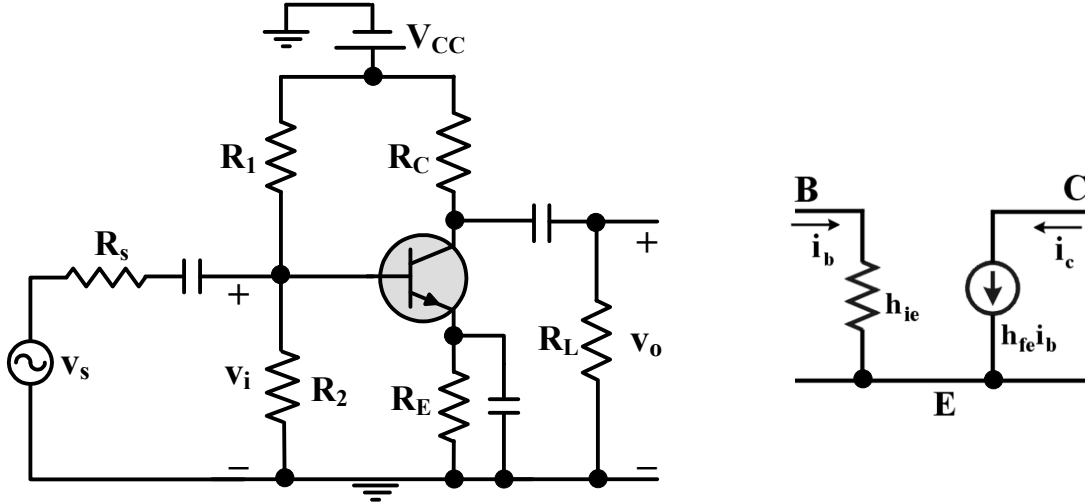
Η γραμμή φορτίου του τρανζίστορ στο συνεχές σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου διακρίνεται και το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ:



### 3

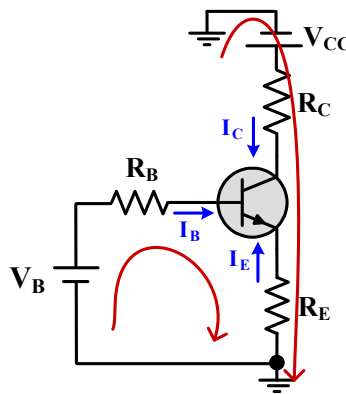
Για τον ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνονται:  $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 60\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 30\text{ k}\Omega$  και  $R_s = R_C = R_E = R_L = 2\text{ k}\Omega$ , ενώ για το τρανζίστορ δίνονται:  $V_{BE} = 0.78\text{ V}$ ,  $\beta = h_{fe} = 100$  και  $h_{ie} = 2\text{ k}\Omega$ .

- (α) Να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας (ηρεμίας) του τρανζίστορ.  
 (β) Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ που δίνεται στο παρακάτω σχήμα.  
 (γ) Να προσδιορίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_v = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



### ΛΥΣΗ

- (α) Για την ευκολότερη ανάλυση του ενισχυτή στο συνεχές ρεύμα με στόχο τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας του, εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή κατά Thevenin που ακολουθεί. Επισημαίνεται ότι οι πυκνωτές στο συνεχές ρεύμα λειτουργούν ως ανοικτά κυκλώματα.



$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 30}{60 + 30} \text{ k}\Omega = 20 \text{ k}\Omega \quad V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{30}{60 + 30} \cdot 12 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

Ο 2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff στο βρόχο εισόδου του παραπάνω κυκλώματος έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} -V_B + I_B \cdot R_B + V_{BE} - I_E \cdot R_E &= 0 \Rightarrow -V_B + I_B \cdot R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) \cdot R_E = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow -V_B + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{BE} + \left(I_C + \frac{I_C}{\beta}\right) \cdot R_E &= 0 \Rightarrow -V_B + I_C \cdot \left(\frac{R_B}{\beta} + R_E + \frac{R_E}{\beta}\right) + V_{BE} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_B - V_{BE} = I_C \cdot \left(\frac{R_B}{\beta} + R_E + \frac{R_E}{\beta}\right) \Rightarrow I_C &= \frac{V_B - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_E + \frac{R_E}{\beta}} \Rightarrow I_C = \frac{4 - 0.78}{\frac{20}{200} + 2 + \frac{2}{200}} \text{ mA} \Rightarrow I_C = 1.45 \text{ mA} \end{aligned}$$

Στον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις  $I_B = I_C / \beta$  και  $I_E = -(I_C + I_B)$  που διέπουν τα ρεύματα των ακροδεκτών του τρανζίστορ.

Ο 2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του παραπάνω κυκλώματος έχει ως εξής:

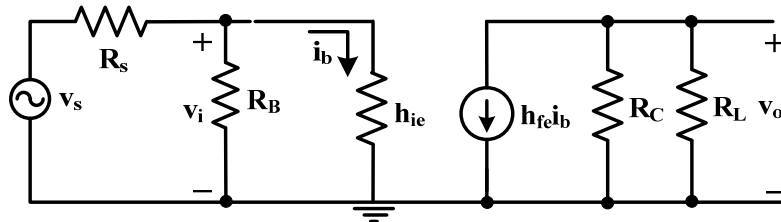
$$-V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} - I_E \cdot R_E = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} + (I_C + I_B) \cdot R_E = 0 \Rightarrow$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} \right) \cdot R_E = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot \left( R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta} \right) \Rightarrow$$

$$V_{CE} = \left[ 12 - 1.45 \cdot \left( 2 + 2 + \frac{2}{100} \right) \right] V \Rightarrow V_{CE} = (12 - 5.83) V \Rightarrow V_{CE} = 6.17 V.$$

Το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ είναι:  $Q (V_{CE}, I_C) = (6.17 V, 1.45 mA)$ .

- (β) Το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο πυκνωτές του κυκλώματος στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη συμμετοχή της αντίστασης εκπομπού στο ισοδύναμο κύκλωμα. Επίσης, η πηγή σταθερής τάσης βραχυκυκλώνεται με αποτέλεσμα την παράλληλη σύνδεση των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  και την αντικατάστασή τους με την αντίσταση  $R_B$ . Το τρανζίστορ αντικαθίσταται με το ισοδύναμο κύκλωμά του για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



- (γ) Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα που σχεδιάστηκε στο ερώτημα (β), μπορούμε να προσδιορίσουμε την ζητούμενη ενίσχυση τάσης, απλοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα στο βρόχο εξόδου, αφού οι αντιστάσεις  $R_C$  και  $R_L$  συνδέονται παράλληλα.

$$R'_L = (R_L \cdot R_C) / (R_L + R_C) = (2 \cdot 2) / (2 + 2) \text{ k}\Omega = 1 \text{ k}\Omega.$$

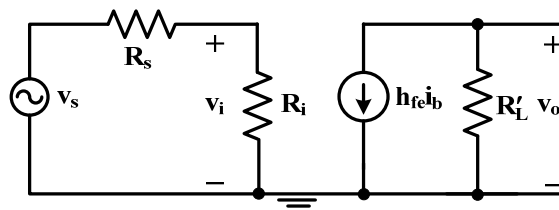
Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στις αντιστάσεις  $R'_L$  και  $h_{ie}$  προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις (1) και (2):

$$v_o = -h_{fe} \cdot i_b \cdot R'_L \quad (1) \quad i_b = v_i / h_{ie} \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow v_o = -h_{fe} \cdot R'_L \cdot \frac{v_i}{h_{ie}} \Rightarrow v_o = -\frac{100 \cdot 1 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot v_i \Rightarrow v_o = -50 \cdot v_i. \quad (3)$$

Οι αντιστάσεις  $R_B$  και  $h_{ie}$  συνδέονται παράλληλα και μπορούν να αντικατασταθούν από μια αντίσταση  $R_i$ .

$$R_i = (R_B \cdot h_{ie}) / (R_B + h_{ie}) = (20 \cdot 2) / (20 + 2) \text{ k}\Omega = 1.8 \text{ k}\Omega.$$



Από το διαιρέτη τάσης στην είσοδο του ενισχυτή προκύπτει ότι:

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s \Rightarrow v_i = \frac{1.8}{1.8 + 2} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.47 \cdot v_s. \quad (4)$$

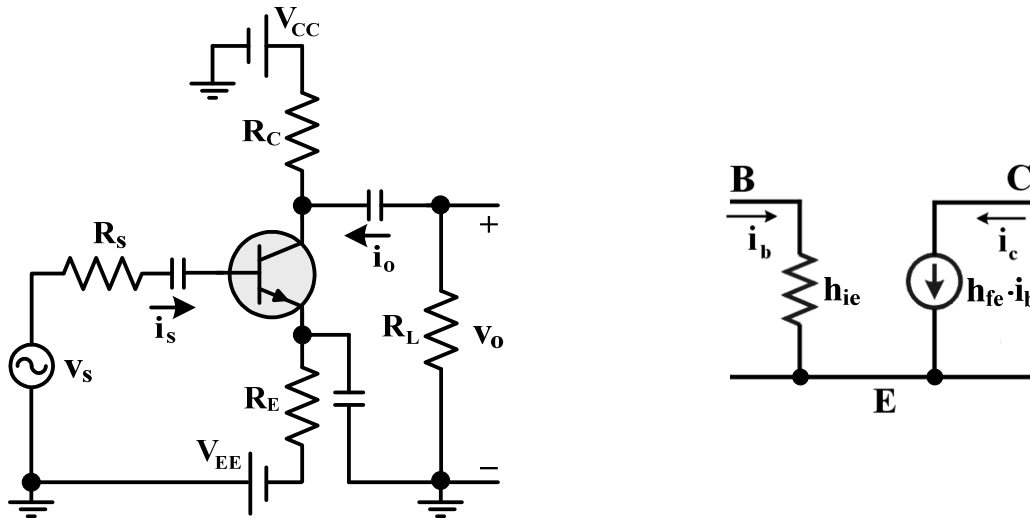
$$(3), (4) \Rightarrow v_o = -50 \cdot 0.47 \cdot v_s \Rightarrow v_o = -23.5 \cdot v_s \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_s} = -23.5.$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει διαφορά φάσης  $180^\circ$  της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

## 4

Για τον ενισχυτή του παρακάτω σχήματος, στον οποίο το τρανζίστορ πολώνεται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας με συμμετρικές πηγές τάσης  $V_{CC}$  και  $V_{EE}$  των 8 V, δίνονται:  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 10 \text{ k}\Omega$  και  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ . Για το τρανζίστορ δίνονται:  $I_B = 20 \mu\text{A}$  και  $\beta = h_{fe} = 50$ .

- Να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας (ηρεμίας) του τρανζίστορ.
- Να χαράξετε με ακρίβεια τη γραμμή φορτίου (ευθεία φόρτου) του ενισχυτή στο συνεχές και να υποδείξετε σε αυτή το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ.
- Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ, που επίσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- Να υπολογίσετε την ενίσχυση ρεύματος  $A_i = i_o / i_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.

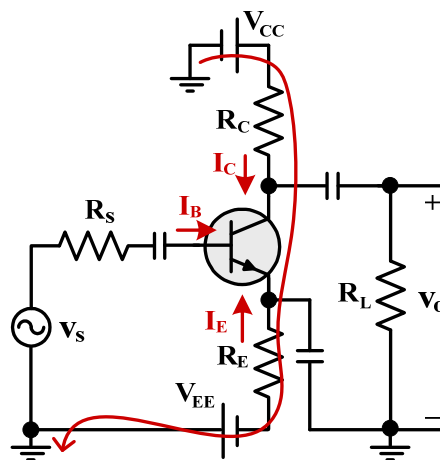


### ΛΥΣΗ

- Αφού το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, ισχύει ότι:

$$I_C = \beta \cdot I_B \Rightarrow I_C = 50 \cdot 20 \mu\text{A} \Rightarrow I_C = 1000 \mu\text{A} = 1 \text{mA}.$$

Για τον υπολογισμό της τάσης συλλέκτη-εκπομπού ( $V_{CE}$ ) του τρανζίστορ, εφαρμόζουμε το 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του κυκλώματος που διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επισημαίνεται ότι, οι πικνωτές στο συνεχές ρεύμα λειτουργούν ως ανοιχτά κυκλώματα.



$$-V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} - I_E \cdot R_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} + (I_C + I_B) \cdot R_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow$$

$$-V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} + \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} \right) \cdot R_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C \cdot \left( R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta} \right) \Rightarrow$$



$$\Rightarrow V_{CE} = 8 + 8 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 2 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3 + \frac{10 \cdot 10^3}{50} \right) V \Rightarrow V_{CE} = 3.8 V.$$

- (β) Τα δύο ακραία σημεία της γραμμής φορτίου του ενισχυτή στο συνεχές, προκύπτουν από τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του ενισχυτή, ο οποίος αναφέρθηκε στο ερώτημα (α):

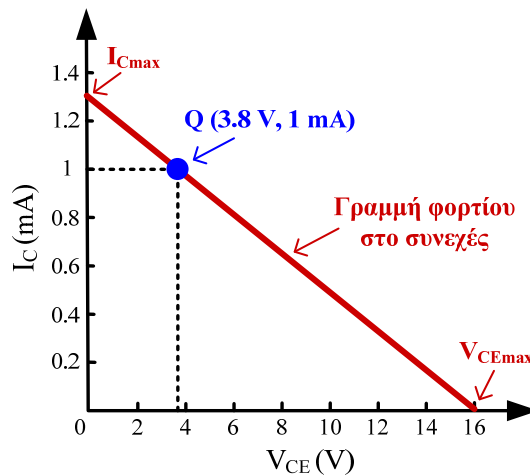
$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C \cdot \left( R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta} \right).$$

Στην παραπάνω σχέση,

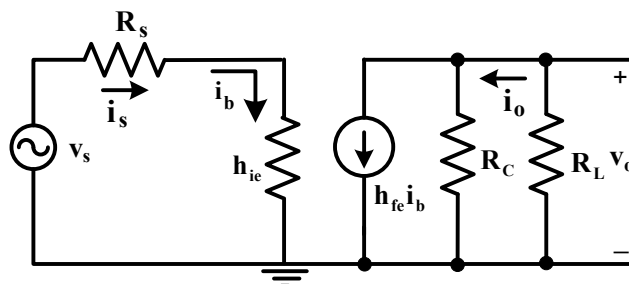
$$\text{όταν } V_{CE} = 0 \Rightarrow I_{C\max} = \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R_C + R_E + \frac{R_E}{\beta}} = \frac{8 + 8}{2 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3 + \frac{10 \cdot 10^3}{50}} A \Rightarrow I_{C\max} = 1.3 \text{ mA},$$

$$\text{ενώ όταν } I_C = 0 \Rightarrow V_{CE\max} = V_{CC} + V_{EE} \Rightarrow V_{CE\max} = (8 + 8) V \Rightarrow V_{CE\max} = 16 V.$$

Η γραμμή φορτίου στο συνεχές σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ με βάση την τιμή του  $I_C$  και την τιμή της  $V_{CE}$  που υπολογίστηκαν στο ερώτημα (α), είναι το σημείο Q ( $V_{CE}, I_C$ ) = Q (3.8 V, 1 mA), το οποίο υποδεικνύεται στο παρακάτω σχήμα.



- (γ) Για να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιούμε για το τρανζίστορ (που είναι σε σύνδεση κοινού εκπομπού) το ισοδύναμο κύκλωμα που δίνεται. Στις μεσαίες συχνότητες, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα (συνεπώς η αντίσταση  $R_E$  δε συμμετέχει στο ισοδύναμο κύκλωμα) και οι πηγές σταθερής τάσης ( $V_{CC}$  και  $V_{EE}$ ) βραχυκυκλώνονται.



- (δ) Για τον υπολογισμό της ενίσχυσης ρεύματος, αξιοποιούμε την παρουσία του διαιρέτη ρεύματος στην έξοδο του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο, για τον οποίο ισχύει ότι:

$$i_o = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} \cdot i_b.$$

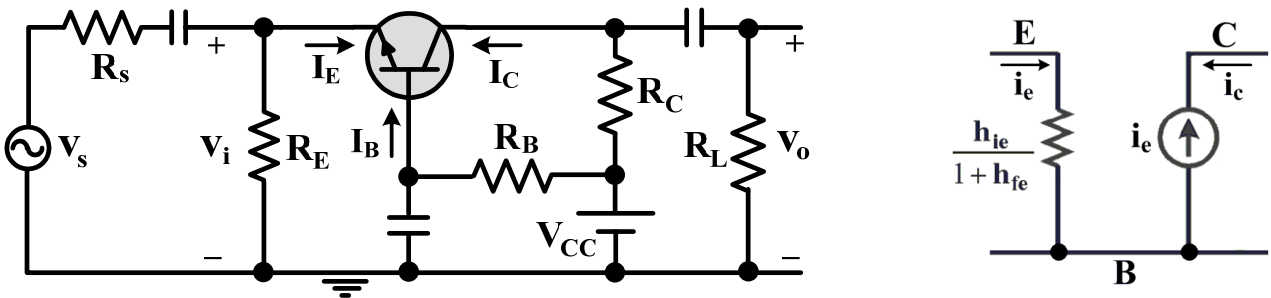
Από το ισοδύναμο κύκλωμα, είναι προφανές ότι  $i_s = i_b$ , συνεπώς μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$i_o = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} \cdot i_s \Rightarrow \frac{i_o}{i_s} = \frac{R_C \cdot h_{fe}}{R_C + R_L} \Rightarrow A_i = \frac{R_C \cdot h_{fe}}{R_C + R_L} \Rightarrow A_i = \frac{2 \cdot 50}{2 + 2} \Rightarrow A_i = 25.$$

## 5

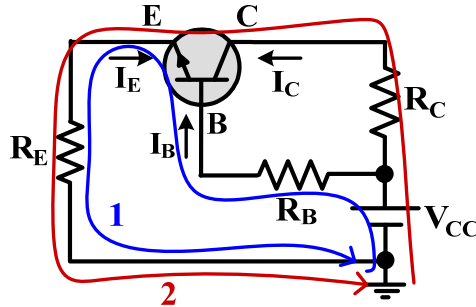
Για τον ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνεται ότι  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $R_s = 20 \Omega$ ,  $R_B = 500 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = R_C = 1 \text{ k}\Omega$  και  $R_L = 4 \text{ k}\Omega$ . Επίσης, για το τρανζίστορ του ενισχυτή δίνεται ότι  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $h_{ie} = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = h_{fe} = 200$ , καθώς και ότι αυτό λειτουργεί στη ενεργό περιοχή.

- Να υπολογίσετε το ρεύμα συλλέκτη και το ρεύμα εκπομπού του τρανζίστορ.
- Να υπολογίσετε την τάση συλλέκτη-εκπομπού και την τάση βάσης-συλλέκτη του τρανζίστορ.
- Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ, που επίσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- Να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_{vs} = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



### ΛΥΣΗ

- Για να υπολογίσουμε το ρεύμα συλλέκτη ( $I_C$ ) του τρανζίστορ, αρχικά εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο 1 του κυκλώματος όταν αυτό λειτουργεί στο συνεχές ρεύμα, όπου οι πυκνωτές λειτουργούν ως ανοιχτά κυκλώματα:



$$\begin{aligned}
 -V_{CC} + I_B \cdot R_B + V_{BE} - I_E \cdot R_E &= 0 \Rightarrow -V_{CC} + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) \cdot R_E = 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow -V_{CC} + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{BE} + \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} \right) \cdot R_E &= 0 \Rightarrow I_C \cdot \left( \frac{R_B}{\beta} + R_E + \frac{R_E}{\beta} \right) = V_{CC} - V_{BE} \Rightarrow \\
 I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_E + \frac{R_E}{\beta}} \Rightarrow I_C &= \frac{10 - 0.7}{\frac{500}{200} + 1 + \frac{1}{200}} \text{ mA} \Rightarrow I_C = 2.65 \text{ mA} .
 \end{aligned}$$

Κατά τον παραπάνω υπολογισμό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση μεταξύ των ρευμάτων του τρανζίστορ ( $I_E = I_C + I_B$ ), η οποία προκύπτει από τη φορά των ρευμάτων αυτών που δίνεται στο κύκλωμα του ενισχυτή, καθώς και η σχέση που ισχύει για το ρεύμα βάσης του τρανζίστορ ( $I_B = I_C / \beta$ ) στη γραμμική περιοχή λειτουργίας.

Από τη σχέση των τριών ρευμάτων του τρανζίστορ, υπολογίζουμε εύκολα το ζητούμενο ρεύμα εκπομπού:

$$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_E = I_C + \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_E = \left( 2.65 + \frac{2.65}{200} \right) \text{ mA} \Rightarrow I_E = 2.66 \text{ mA} .$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η φορά του ρεύματος είναι αντίθετη από εκείνη που λήφθηκε κατά την ανάλυση του κυκλώματος και υποδεικνύεται στο παραπάνω σχήμα.

- (β) Για να υπολογίσουμε την τάση συλλέκτη-εκπομπού ( $V_{CE}$ ) του τρανζίστορ, εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο 2 του κυκλώματος:

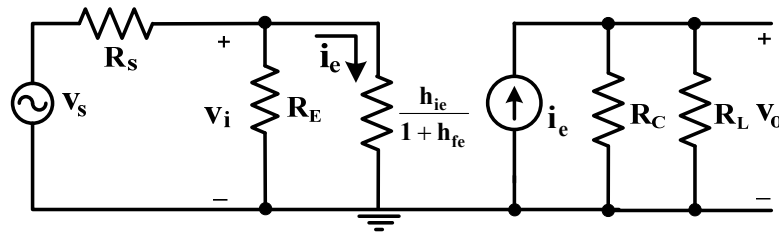
$$-V_{CC} + I_C \cdot R_C + V_{CE} - I_E \cdot R_E = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C + I_E \cdot R_E \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{CE} = (10 - 2.65 \cdot 1 - 2.66 \cdot 1) \text{ V} \Rightarrow V_{CE} \approx 4.7 \text{ V} .$$

Στο τρανζίστορ ισχύει ότι:

$$V_{CE} + V_{EB} + V_{BC} = 0 \Rightarrow V_{CE} - V_{BE} + V_{BC} = 0 \Rightarrow V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} \Rightarrow V_{BC} = 0.7 - 4.7 = -4 \text{ V} .$$

Επισημαίνεται ότι, επειδή η επαφή βάσης-εκπομπού είναι πολωμένη ορθά ( $V_{BE} = 0.7 \text{ V} > 0$ ) και η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πολωμένη ανάστροφα ( $V_{BC} = -4 \text{ V} < 0$ ), επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, το οποίο δίνεται στην εκφώνηση του θέματος.

- (γ) Σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας για το τρανζίστορ (που είναι σε σύνδεση κοινής βάσης) το ισοδύναμο κύκλωμα που δίνεται. Στις μεσαίες συχνότητες, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και η πηγή σταθερής τάσης ( $V_{CC}$ ) βραχυκυκλώνεται. Συνεπώς, η αντίσταση  $R_B$  βραχυκυκλώνεται και δε συμμετέχει στο ισοδύναμο κύκλωμα.



- (δ) Στο ισοδύναμο κύκλωμα που σχεδιάστηκε στο ερώτημα (γ), οι αντιστάσεις συλλέκτη και φορτίου είναι συνδεδεμένες παράλληλα:

$$R'_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{1 \cdot 4}{1 + 4} \text{ k}\Omega = 0.8 \text{ k}\Omega .$$

Μετά την παραπάνω απλοποίηση, με βάση το νόμο του Ohm στην ισοδύναμη αντίσταση, η τάση εξόδου του ενισχυτή προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_o = i_e \cdot R'_L = 0.8 \cdot 10^3 \cdot i_e . \quad (1)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στην αντίσταση  $h_{ie} / 1 + h_{fe}$ , προκύπτει:

$$i_e = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} \Rightarrow i_e = \frac{v_i}{\frac{10 \cdot 10^3}{1 + 200}} \Rightarrow i_e = 0.02 \cdot v_i . \quad (2)$$

Στο τμήμα εισόδου του ενισχυτή, οι αντιστάσεις  $R_E$  και  $h_{ie} / 1 + h_{fe}$  είναι συνδεδεμένες παράλληλα:

$$R_i = \frac{R_E \cdot \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} \Rightarrow R_i = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{1 + 200}}{1 \cdot 10^3 + \frac{10 \cdot 10^3}{1 + 200}} \Rightarrow R_i = 47.4 \Omega .$$

Από τον διαιρέτη τάσης στην είσοδο του ενισχυτή, προκύπτει ότι:

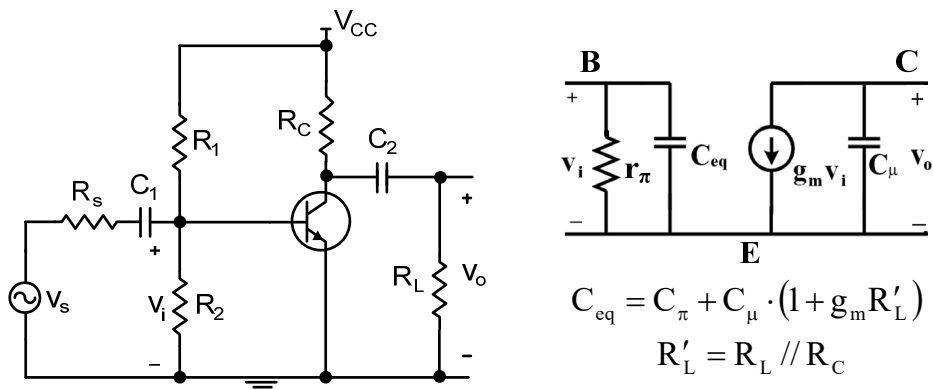
$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot v_s = \frac{47.4}{20 + 47.4} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.7 \cdot v_s \quad (3)$$

$$(1), (2), (3) \Rightarrow v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot i_e \Rightarrow v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot 0.02 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot 0.02 \cdot 0.7 \cdot v_s \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_o = 11.2 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = 11.2 \Rightarrow A_{v_s} = 11.2 .$$

## 6

Για τον ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνονται:  $|A_m| = 26$  (μέτρο ενίσχυσης τάσης στις μεσαίες συχνότητες),  $R_s = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 60 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 0.5 \text{ }\mu\text{F}$ . Να προσδιορίσετε την κατώτερη και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής και να χαράξετε την απόκριση συχνότητας μέτρου του ενισχυτή (μέτρο ενίσχυσης τάσης σε dB συναρτήσει του  $\log f$ ). Το τρανζίστορ είναι πολωμένο στην ενεργό περιοχή και έχει τις εξής παραμέτρους:  $r_\pi = 1.25 \text{ k}\Omega$ ,  $C_\pi = 10 \text{ pF}$ ,  $C_\mu = 3 \text{ pF}$ ,  $g_m = 200 \text{ mS}$ . Για τον προσδιορισμό της ανώτερης συχνότητας αποκοπής να χρησιμοποιήσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ στις υψηλές συχνότητες, που επίσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Δίνεται ότι:  $\log 26 = 1.4$ .

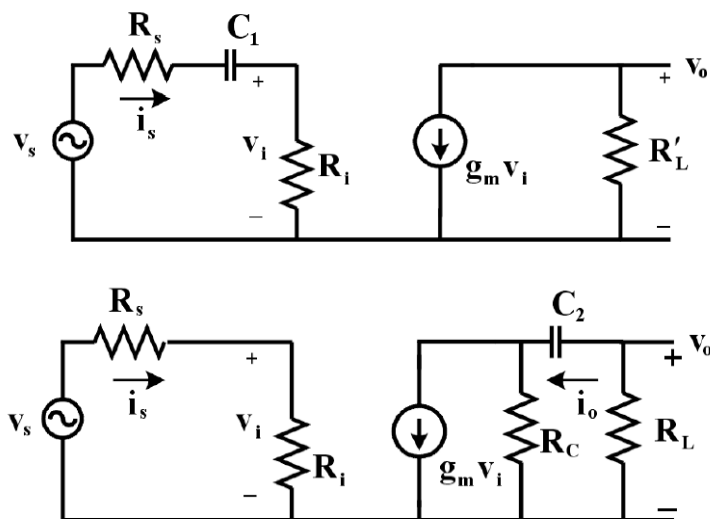


### ΛΥΣΗ

Για να προσδιορίσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου του ενισχυτή ακολουθούμε την τεχνική σταδιακής ανάλυσης κατά περιοχές συχνοτήτων.

Στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, είναι δεδομένο το μέτρο της ενίσχυσης:  $|A_m| = 26$ .

Στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, επειδή συνυπάρχουν οι επιδράσεις των δύο εξωτερικοί πυκνωτές ζεύξης, προσδιορίζουμε την απόκριση συχνότητας θεωρώντας τη δράση καθενός από τους δύο πυκνωτές χωριστά και λαμβάνοντας στο τέλος τη συνδυασμένη δράση όλων των δύο πυκνωτών. Θεωρούμε αρχικά ότι επιδρά στο κύκλωμα μόνο ο πυκνωτής  $C_1$  (ενώ ο  $C_2$  λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα) και στη συνέχεια ότι επιδρά μόνο ο πυκνωτής  $C_2$  (ενώ ο  $C_1$  λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα) και σχεδιάζουμε το ισοδύναμο μοντέλο του ενισχυτή για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις:



$$R_B = R_1 // R_2 = 17.65 \text{ k}\Omega, \quad R_i = R_B // r_\pi = 1.17 \text{ k}\Omega$$

Στο πρώτο από τα παραπάνω ισοδύναμα, η σταθερά χρόνου (οπότε και η συχνότητα αποκοπής) προσδιορίζεται από το κύκλωμα εισόδου, το οποίο λειτουργεί ως υπερπαρατό κύκλωμα:

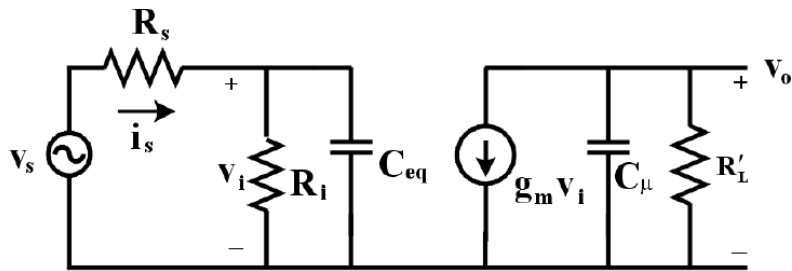
$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 = 44.7 \text{ ms} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 3.56 \text{ Hz}$$

Στο δεύτερο ισοδύναμο, η σταθερά χρόνου (οπότε και η συχνότητα αποκοπής) προσδιορίζεται από το κύκλωμα εξόδου, το οποίο επίσης λειτουργεί ως υπερηρατό κύκλωμα:

$$\tau_2 = (R_C + R_L)C_2 = 1 \text{ ms} \Rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 159.2 \text{ Hz}$$

Επειδή,  $f_2 > f_1$  η κυρίαρχη συχνότητα στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων είναι η  $f_2$ . Άρα η κατώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή είναι:  $f_L = f_2 = 159.2 \text{ Hz}$ .

Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, η συχνότητα αποκοπής προσδιορίζεται με ανάλυση του τροποποιημένου κατά Miller ισοδύναμο μοντέλου του ενισχυτή που λαμβάνει υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ, θεωρώντας ως βραχυκυκλώματα τους εξωτερικούς πυκνωτές ζεύξης.



$$R'_L = R_L // R_C = 0.5 \text{ k}\Omega, \quad C_{eq} = C_\pi + (1 + g_m R'_L) C_\mu = 313 \text{ pF}$$

Το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα εξόδου έχουν βαθυπερατή συμπεριφορά και οι αντίστοιχες σταθερές χρόνου και συχνότητες αποκοπής έχουν ως εξής:

$$\tau_i = (R_i // R_s)C_{eq} = 270.35 \text{ ns} \Rightarrow f_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} = 588.9 \text{ kHz}$$

$$\tau_o = R'_L C_\mu = 1.5 \text{ ns} \Rightarrow f_o = \frac{1}{2\pi\tau_o} = 106.16 \text{ MHz}$$

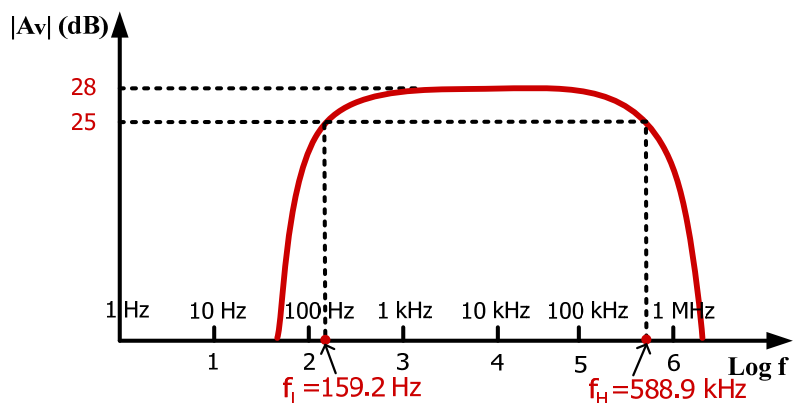
Επειδή,  $f_i < f_o$  η κυρίαρχη συχνότητα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων είναι η  $f_i$ . Άρα η ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή είναι:  $f_H = f_i = 588.9 \text{ kHz}$ .

Η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

και η καμπύλη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή (μέτρο ενίσχυσης τάσης σε dB συναρτήσει του  $\log f$ ) έχει ως εξής:

$$20 \cdot \log 26 = 20 \cdot 1.4 = 28 \text{ dB}, \quad \log 159.2 = 2.2, \quad \log 588.9 = 5.77$$



## 7

Η απόκριση συχνότητας μέτρου ενός ενισχυτή, ο οποίος δεν περιλαμβάνει πυκνωτές, περιγράφεται από τη διπλανή σχέση.

- (α) Να προσδιορίσετε τη μέγιστη τιμή του μέτρου της ενίσχυσης, δηλαδή το μέτρο της ενίσχυσης στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, καθώς και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή.
- (β) Να υπολογίσετε τη συχνότητα για την οποία το μέτρο της ενίσχυσης του ενισχυτή μειώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής του.

$$A = \frac{10^3}{1 + j \cdot \frac{f}{10^5}}$$

### ΛΥΣΗ

- (α) Η απόκριση συχνότητας μέτρου ενός ενισχυτή, ο οποίος δεν περιλαμβάνει πυκνωτές (βαθυπερατή βαθμίδα ενίσχυσης), δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$A = \frac{A_m}{1 + j \cdot \frac{f}{f_H}}$$

όπου  $A_m$  είναι το μέτρο της ενίσχυσης στην περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων (δηλαδή η μέγιστη τιμή του μέτρου της ενίσχυσης και  $f_H$  η ανώτερη συχνότητα αποκοπής, αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μεγέθη αυτά έχουν ως εξής:

$$A_m = 10^3 = 1000 \text{ και } f_H = 10^5 \text{ Hz} = 100 \text{ kHz.}$$

- (β) Με βάση την απόκριση συχνότητας μέτρου που δίνεται, το μέτρο της ενίσχυσης του ενισχυτή, έχει ως εξής:

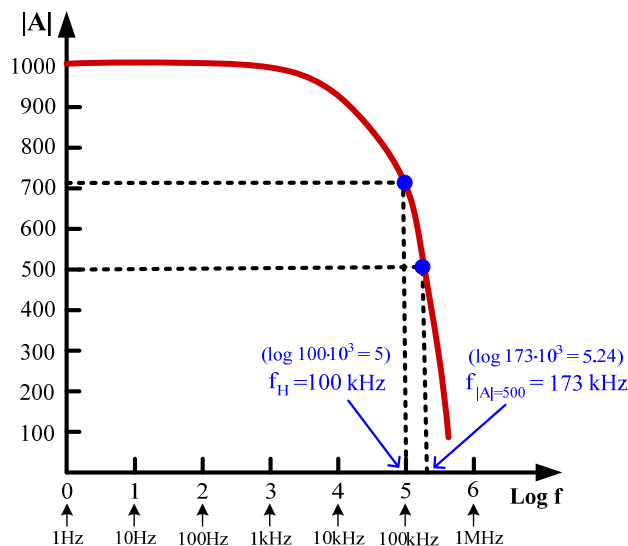
$$|A| = \frac{10^3}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{10^5}\right)^2}} = \frac{10^3}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{10}}}}$$

Επομένως, η συχνότητα για την οποία το μέτρο της ενίσχυσης μειώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής του (δηλαδή γίνεται ίσο με 500, υπολογίζεται ως εξής:

$$500 = \frac{10^3}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{10}}}} \Rightarrow \sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{10}}} = \frac{1000}{500} \Rightarrow \sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{10}}} = 2 \Rightarrow 1 + \frac{f^2}{10^{10}} = 2^2 \Rightarrow \frac{f^2}{10^{10}} = 3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f^2 = 3 \cdot 10^{10} \Rightarrow f = \sqrt{3 \cdot 10^{10}} \Rightarrow f = \sqrt{3} \cdot 10^5 \Rightarrow f = 1.73 \cdot 10^5 \text{ Hz} \Rightarrow f = 173 \text{ kHz.}$$

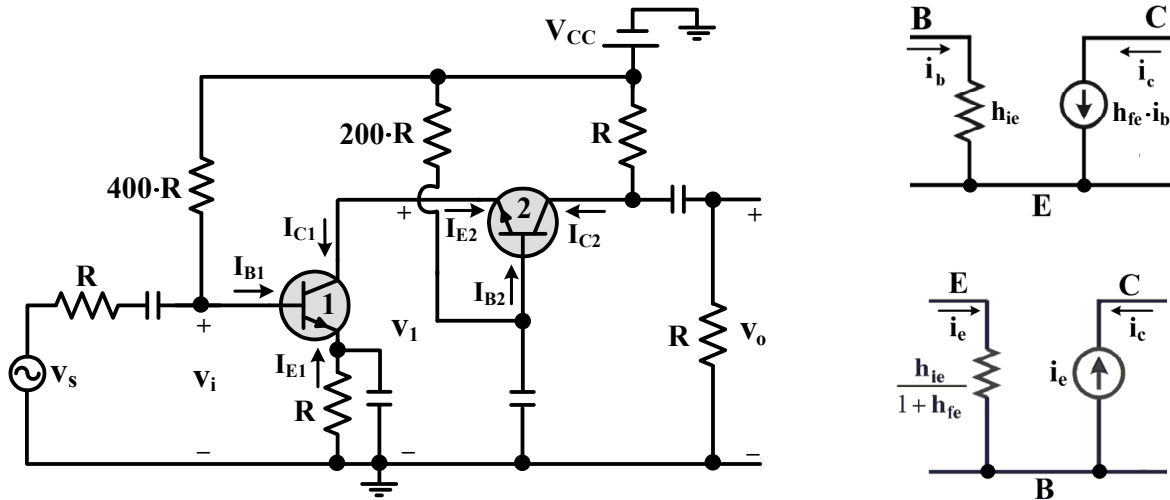
Λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα που υπολογίστηκε, καθώς και ότι η συχνότητα αποκοπής αντιστοιχεί στη μέγιστη ενίσχυση (1000) διαιρεμένη με  $\sqrt{2}$ , μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα του μέτρου της ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας (αν και δε ζητείται):



## 8

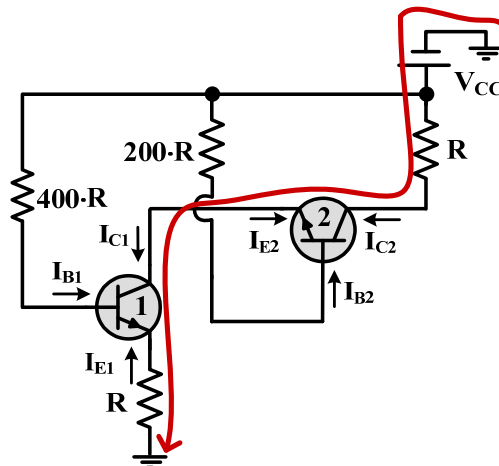
Για τον касωδικό ενισχυτή του παρακάτω σχήματος, στον οποίο τα δύο τρανζίστορ λειτουργούν στην ενεργό περιοχή τους, δίνεται ότι:  $V_{CC} = 10 \text{ V}$  και  $R = 2 \text{ k}\Omega$ . Για τα τρανζίστορ δίνεται ότι  $I_{B2} = 9.5 \mu\text{A}$ ,  $V_{CE2} = 2.6 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = h_{fe1} = h_{fe2} = 100$ ,  $h_{ie1} = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $h_{ie2} = 40 \text{ k}\Omega$ , καθώς και ότι σε κάθε τρανζίστορ το ρεύμα συλλέκτη είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ρεύμα εκπομπού.

- Να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας (σημείο ηρεμίας) του πρώτου τρανζίστορ.
- Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τα απλοποιημένα ισοδύναμα κυκλώματα των τρανζίστορ, που επίσης δίνονται στο παρακάτω σχήμα.
- Να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_v = v_1 / v_s$  της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή, στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



## ΛΥΣΗ

- Αφού το δεύτερο τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή ισχύει η σχέση  $I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2}$ , από την οποία προκύπτει εύκολα ότι  $I_{C2} = 100 \cdot 9.5 \mu\text{A} = 0.95 \text{ mA}$ . Επίσης, αφού δίνεται ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ρεύμα εκπομπού, ισχύει η σχέση  $I_{E2} = -I_{C2} = -0.95 \text{ mA}$ . Ο εκπομπός του δεύτερου τρανζίστορ συνδέεται στον συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ, επομένως προκύπτει ότι:  $I_{C1} = -I_{E2} = 0.95 \text{ mA}$ . Για τον υπολογισμό της τάσης συλλέκτη-εκπομπού ( $V_{CE1}$ ) του πρώτου τρανζίστορ, εφαρμόζουμε το 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος που υποδεικνύεται στο παρακάτω σχήμα. Επισημαίνεται ότι, οι πυκνωτές στο συνεχές ρεύμα λειτουργούν ως ανοιχτά κυκλώματα.



$$-V_{CC} + I_{C2} \cdot R + V_{CE2} + V_{CE1} - I_{E1} \cdot R = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_{C2} \cdot R + V_{CE2} + V_{CE1} + I_{C1} \cdot R = 0 \Rightarrow$$

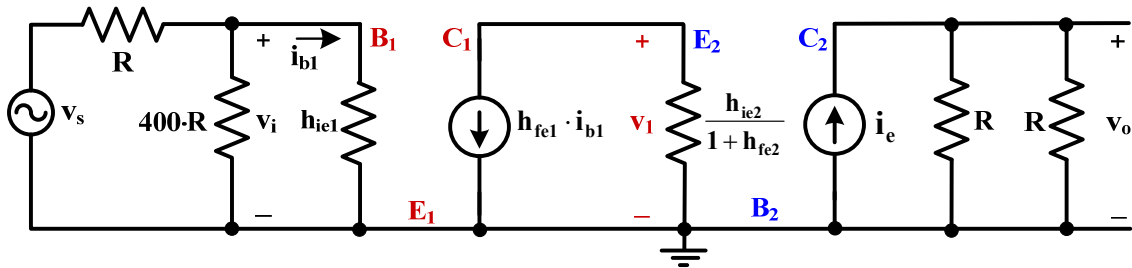
$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R - V_{CE2} - I_{C1} \cdot R = 0 \Rightarrow V_{CE1} = (10 - 0.95 \cdot 2 - 2.6 - 0.95 \cdot 2) \text{ V} \Rightarrow V_{CE1} = 3.6 \text{ V}.$$

Στην παραπάνω εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> κανόνα Kirchhoff χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $I_{E1} = -I_{C1}$  (λόγω του ότι για κάθε τρανζίστορ δίνεται ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ρεύμα εκπομπού).

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι το σημείο λειτουργίας του πρώτου τρανζίστορ είναι:

$$Q_1 (V_{CE1}, I_{C1}) = Q_1 (3.6 \text{ V}, 0.95 \text{ mA}).$$

- (β) Για να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιούμε για το πρώτο τρανζίστορ (που είναι σε σύνδεση κοινού εκπομπού) το πάνω δεξιά ισοδύναμο κύκλωμα που δίνεται στην εκφώνηση του θέματος, ενώ για το δεύτερο τρανζίστορ (που είναι σε σύνδεση κοινής βάσης) χρησιμοποιούμε το κάτω δεξιά ισοδύναμο κύκλωμα που επίσης δίνεται στην εκφώνηση του θέματος. Στις μεσαίες συχνότητες, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και η πηγή σταθερής τάσης ( $V_{CC}$ ) βραχυκυκλώνεται. Συνεπώς, η αντίσταση  $R$  που συνδέεται στον εκπομπού του πρώτου τρανζίστορ, καθώς και η αντίσταση  $200 \cdot R$  που συνδέεται στην βάση του δεύτερου τρανζίστορ δεν συμμετέχουν στο ισοδύναμο κύκλωμα, αφού βραχυκυκλώνονται.



- (γ) Στο ισοδύναμο κύκλωμα που σχεδιάστηκε στο ερώτημα (β), με βάση το νόμο του Ohm στην αντίσταση  $h_{ie2} / (1 + h_{fe2})$ , η τάση εξόδου  $v_1$  της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή, προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_1 = -h_{fe1} \cdot i_{b1} \cdot \frac{h_{ie2}}{1 + h_{fe2}} = -100 \cdot i_{b1} \cdot \frac{40 \cdot 10^3}{1 + 100} = -39.6 \cdot 10^3 \cdot i_{b1}. \quad (1)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στην αντίσταση  $h_{ie1}$ , προκύπτει:

$$i_{b1} = \frac{v_i}{h_{ie1}} \Rightarrow i_{b1} = \frac{v_i}{2 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{b1} = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot v_i. \quad (2)$$

Στο τμήμα εισόδου του ενισχυτή, οι αντιστάσεις  $400 \cdot R$  και  $h_{ie1}$  είναι συνδεδεμένες παράλληλα:

$$R_i = \frac{400 \cdot R \cdot h_{ie1}}{400 \cdot R + h_{ie1}} \Rightarrow R_i = \frac{400 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3}{400 \cdot 2 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3} \Rightarrow R_i \approx 2 \text{ k}\Omega.$$

Από τον διαιρέτη τάσης στην είσοδο του ενισχυτή, προκύπτει ότι:

$$v_i = \frac{R_i}{R + R_i} \cdot v_s = \frac{2}{2 + 2} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.5 \cdot v_s. \quad (3)$$

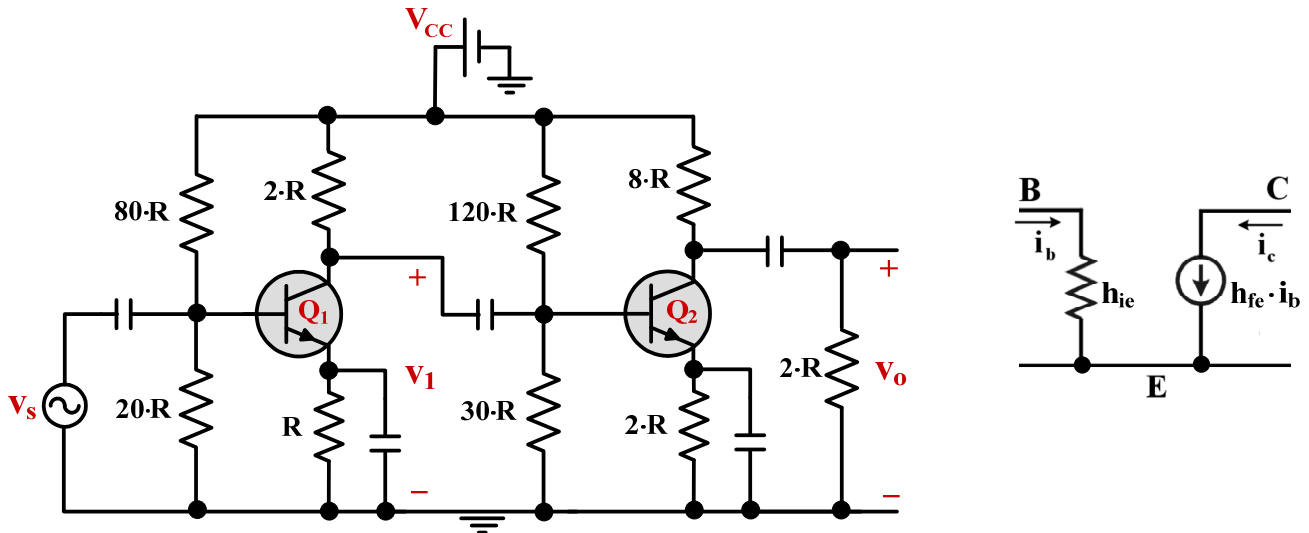
$$(1), (2), (3) \Rightarrow v_1 = -39.6 \cdot 10^3 \cdot i_{b1} \Rightarrow v_1 = -39.6 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot v_i \Rightarrow v_1 = -39.6 \cdot 10^3 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 \cdot v_s \Rightarrow \\ \Rightarrow v_1 = -9.9 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_1}{v_s} = -9.9 \Rightarrow A_v = -9.9.$$



## 9

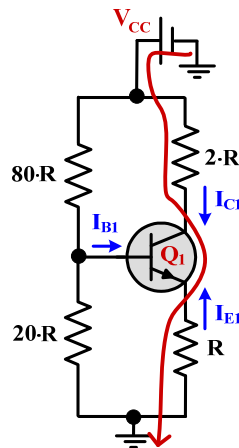
Για τον ενισχυτή δύο βαθμίδων με χωρητική σύζευξη του παρακάτω σχήματος, δίνεται ότι  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ  $Q_1$  είναι  $(V_{CE1}, I_{C1}) = (7.6 \text{ V}, 1.46 \text{ mA})$ . Για τα τρανζίστορ δίνεται επίσης ότι:  $\beta_1 = \beta_2 = 100$ ,  $V_{BE2} = 0.75 \text{ V}$ ,  $h_{fe2} = 100$ ,  $h_{ie2} = 2 \text{ k}\Omega$ , καθώς και ότι λειτουργούν στη ενεργό περιοχή τους.

- Να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ  $Q_2$ .
- Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ, που επίσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- Εάν η ενίσχυση τάσης της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή είναι  $A_{v1} = v_1 / v_s = -48$ , να υπολογίσετε την συνολική ενίσχυση τάσης  $A_v = v_o / v_s$  του ενισχυτή, στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



### ΛΥΣΗ

- Λόγω της χωρητικής σύζευξης των δύο βαθμίδων (δηλαδή, της σύνδεσης μέσω πυκνωτή), στο συνεχές ρεύμα δεν υφίσταται αλληλεπίδραση των δύο βαθμίδων, αφού οι πυκνωτές στο συνεχές ρεύμα λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Για τον ίδιο λόγο, η πηγή σήματος δεν επηρεάζει τη λειτουργία της πρώτης βαθμίδας στο συνεχές και το φορτίο ( $2 \cdot R$ ) δεν επηρεάζει τη λειτουργία της δεύτερης βαθμίδας στο συνεχές.



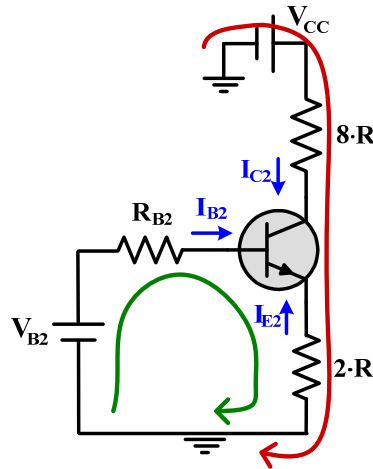
Αφού δίνεται το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή (το κύκλωμα της οποίας στο συνεχές, δίνεται στο παραπάνω σχήμα), μπορούμε εφαρμόζοντας τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου της βαθμίδας αυτής, να υπολογίσουμε την τάση τροφοδοσίας  $V_{CC}$  του ενισχυτή.

$$-V_{CC} + I_{C1} \cdot 2 \cdot R + V_{CE1} - I_{E1} \cdot R = 0 \Rightarrow V_{CC} = I_{C1} \cdot 2 \cdot R + V_{CE1} + (I_{C1} + I_{B1}) \cdot R \Rightarrow$$

$$V_{CC} = I_{C1} \cdot 2 \cdot R + V_{CE1} + \left( I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_1} \right) \cdot R \Rightarrow V_{CC} = (1.46 \cdot 2 \cdot 1 + 7.6 + 1.01 \cdot 1.46 \cdot 1) \Rightarrow V_{CC} = 12 \text{ V}.$$

Στον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις  $I_{B1} = I_{C1} / \beta_1$  και  $I_{E1} = -(I_{C1} + I_{B1})$  που διέπουν τα ρεύματα των ακροδεκτών του τρανζίστορ.

Για να υπολογίσουμε το σημείο λειτουργίας της δεύτερης βαθμίδας, αρχικά εξάγουμε το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα της βαθμίδας αυτής κατά Thevenin, ώστε να διενεργήσουμε πιο εύκολα την ανάλυσή του στο συνεχές ρεύμα.



$$R_{B2} = 120 \cdot R // 30 \cdot R = \frac{120 \cdot R \cdot 30 \cdot R}{120 \cdot R + 30 \cdot R} = \frac{3600 \cdot R}{150} = 24 \text{ k}\Omega \text{ και}$$

$$V_{B2} = \frac{30 \cdot R}{120 \cdot R + 30 \cdot R} \cdot V_{CC} = \frac{30}{150} \cdot 12 \text{ V} = 2.4 \text{ V}.$$

Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εισόδου του παραπάνω κυκλώματος:

$$-V_{B2} + I_{B2} \cdot R_{B2} + V_{BE2} - I_{E2} \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow -V_{B2} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \cdot R_{B2} + V_{BE2} + (I_{C2} + I_{B2}) \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow$$

$$-V_{B2} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \cdot R_{B2} + V_{BE2} + \left( I_{C2} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \right) \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow -V_{B2} + V_{BE2} + I_{C2} \cdot \left( \frac{R_{B2}}{\beta_2} + 2 \cdot R + \frac{2 \cdot R}{\beta_2} \right) \Rightarrow$$

$$I_{C2} = \frac{V_{B2} - V_{BE2}}{\frac{R_{B2}}{\beta_2} + 2 \cdot R + \frac{2 \cdot R}{\beta_2}} \Rightarrow I_{C2} = \frac{2.4 - 0.75}{\frac{24}{100} + 2 + \frac{2}{100}} \text{ mA} \Rightarrow I_{C2} = 0.73 \text{ mA}.$$

Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του παραπάνω κυκλώματος:

$$-V_{CC} + I_{C2} \cdot 8 \cdot R + V_{CE2} - I_{E2} \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow -V_{CC} + I_{C2} \cdot 8 \cdot R + V_{CE2} + (I_{C2} + I_{B2}) \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow$$

$$-V_{CC} + I_{C2} \cdot 8 \cdot R + V_{CE2} + \left( I_{C2} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \right) \cdot 2 \cdot R = 0 \Rightarrow$$

$$V_{CE2} = [12 - 0.73 \cdot 8 - (0.73 + 0.73/100) \cdot 2] \text{ V} \Rightarrow V_{CE2} = 4.69 \text{ V}.$$

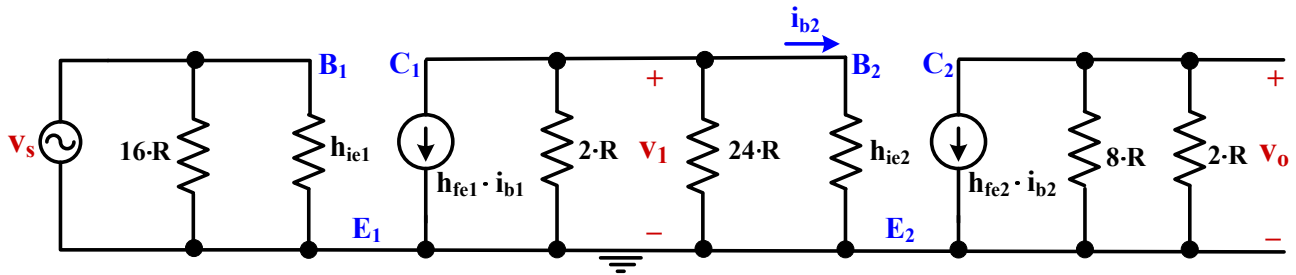
Στους παραπάνω υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις  $I_{B2} = I_{C2} / \beta_2$  και  $I_{E2} = -(I_{C2} + I_{B2})$  που διέπουν τα ρεύματα των ακροδεκτών του τρανζίστορ.

Με βάση τα παραπάνω, το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ  $Q_2$  είναι:  $(V_{CE2}, I_{C2}) = (4.69 \text{ V}, 0.73 \text{ mA})$ .

- (β) Για το σχεδιασμό του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο, λαμβάνουμε υπόψη ότι στις μεσαίες συχνότητες, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Συνεπώς, οι αντιστάσεις που συνδέονται μεταξύ των εκπομπών των τρανζίστορ και της γείωσης δε συμμετέχουν στο ισοδύναμο κύκλωμα. Επίσης, η πηγή σταθερής τάσης ( $V_{CC}$ ) βραχυκυκλώνεται. Λόγω του βραχυκυκλώματος της πηγής σταθερής τάσης, οι αντιστάσεις  $80 \cdot R$  και  $20 \cdot R$ , καθώς και οι αντιστάσεις  $120 \cdot R$  και  $30 \cdot R$  βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση και η ισοδύναμή τους αντίσταση είναι  $16 \cdot R$  και  $24 \cdot R$ , αντίστοιχα, όπως υπολογίζεται στη συνέχεια.

$$80 \cdot R // 20 \cdot R = \frac{80 \cdot R \cdot 20 \cdot R}{80 \cdot R + 20 \cdot R} = \frac{1600 \cdot R}{100} = 16 \cdot R \quad \text{και} \quad 120 \cdot R // 30 \cdot R = \frac{120 \cdot R \cdot 30 \cdot R}{120 \cdot R + 30 \cdot R} = \frac{3600 \cdot R}{150} = 24 \cdot R$$

Τα δύο τρανζίστορ αντικαθίστανται με το ισοδύναμο κύκλωμα που δίνεται στην εκφώνηση. Το ζητούμενο ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή, έχει ως εξής:



- (γ) Αφού δίνεται η ενίσχυση τάσης της πρώτης βαθμίδας, για να υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης του συνολικού ενισχυτή, αρκεί να υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης της δεύτερης βαθμίδας ( $A_{v2} = v_o / v_1$ ). Αυτή υπολογίζεται με βάση το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, αφού αρχικά αντικαταστήσουμε τις παράλληλα συνδεδεμένες αντιστάσεις  $2 \cdot R$  και  $8 \cdot R$  με μια ισοδύναμη αντίσταση φορτίου της δεύτερης βαθμίδας:

$$R_L = 2 \cdot R // 8 \cdot R = \frac{2 \cdot R \cdot 8 \cdot R}{2 \cdot R + 8 \cdot R} = \frac{16 \cdot R}{10} = 1.6 \text{ k}\Omega.$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm η τάση εξόδου του ενισχυτή, είναι:

$$v_o = -h_{fe2} \cdot i_{b2} \cdot R_L = -100 \cdot 1.6 \cdot 10^3 \cdot i_{b2} \Rightarrow v_o = -160 \cdot 10^3 \cdot i_{b2}.$$

Με εφαρμογή του νόμου του Ohm στην αντίσταση  $h_{ie2}$ , το ρεύμα  $i_{b2}$  εκφράζεται ως εξής:

$$i_{b2} = \frac{v_1}{h_{ie2}}.$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, η ενίσχυση τάσης της δεύτερης βαθμίδας, υπολογίζεται ως εξής:

$$v_o = -160 \cdot 10^3 \cdot \frac{v_1}{h_{ie2}} \Rightarrow v_o = -160 \cdot 10^3 \cdot \frac{v_1}{2 \cdot 10^3} \Rightarrow v_o = -80 \cdot v_1 \Rightarrow A_{v2} = \frac{v_o}{v_1} = -80.$$

Αφού δίνεται ότι η ενίσχυση τάσης της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή ( $A_{v1} = v_1 / v_s = -48$ ) και έχουμε υπολογίσει την ενίσχυση τάσης της δεύτερης βαθμίδας, η ζητούμενη ενίσχυση τάσης του συνολικού ενισχυτή ( $A_v = v_o / v_s$ ), υπολογίζεται εύκολα, ως εξής:

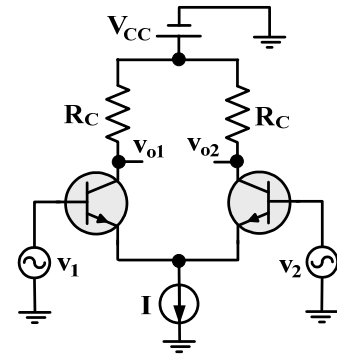
$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_s} \cdot \frac{v_1}{v_1} = \frac{v_o}{v_1} \cdot \frac{v_1}{v_s} = A_{v2} \cdot A_{v1} = (-80) \cdot (-48) = 3840.$$

## 10

Ο διαφορικός ενισχυτής του διπλανού σχήματος περιλαμβάνει δύο όμοια τρανζίστορ με παραμέτρους:  $h_{fe} = 80$  και  $h_{ie} = 5 \text{ k}\Omega$ . Επίσης:  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ .

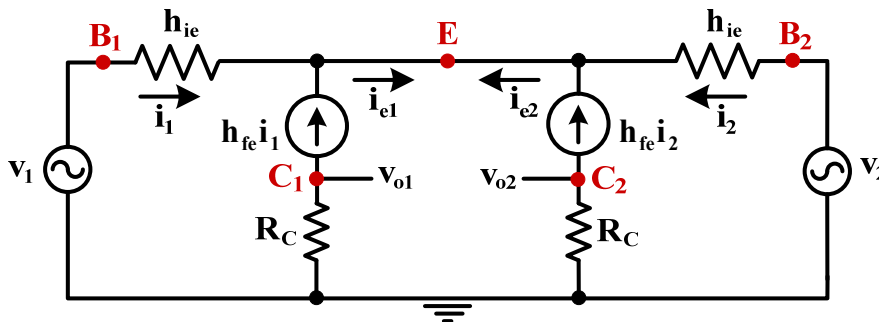
(α) Να υπολογίσετε τη διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή με απλή έξοδο [ $A_d = v_{o2} / (v_1 - v_2)$ ] για διαφορετικά σήματα εισόδου. Για τον προσδιορισμό της  $A_d$  να χρησιμοποιήσετε το κατάλληλο ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ από αυτά που δίνονται στο προηγούμενο θέμα.

(β) Εάν η τάση εισόδου  $v_1$  είναι ημιτονική με πλάτος  $100 \text{ mV}$  και συχνότητα  $50 \text{ kHz}$ , να χαράξετε στους ίδιους άξονες τις κυματομορφές των τάσεων  $v_1$ ,  $v_2$  και  $v_{o2}$ .



## ΛΥΣΗ

(α) Το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο έχει ως εξής. Η πηγή σταθερού ρεύματος αντικαθίσταται από ανοιχτό κύκλωμα και για τα τρανζίστορ χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα υπ' αριθμ. 1 που δίνεται στο προηγούμενο θέμα (σύνδεση κοινού εκπομπού).



Αφού εφαρμόζονται διαφορικά σήματα εισόδου, ισχύει:  $v_1 = -v_2$ .

$$v_1 = h_{ie} i_1 + v_e, \quad v_2 = h_{ie} i_2 + v_e$$

$$v_1 - v_2 = h_{ie} (i_1 - i_2) \Rightarrow 2v_1 = h_{ie} (i_1 - i_2) \Rightarrow i_2 = -\left(\frac{2v_1}{h_{ie}}\right) + i_1$$

$$i_{e1} = -i_{e2} \Rightarrow (1 + h_{fe}) i_1 = -(1 + h_{fe}) i_2 \Rightarrow i_1 = -i_2 \quad \text{και} \quad i_2 = -\frac{v_1}{h_{ie}}$$

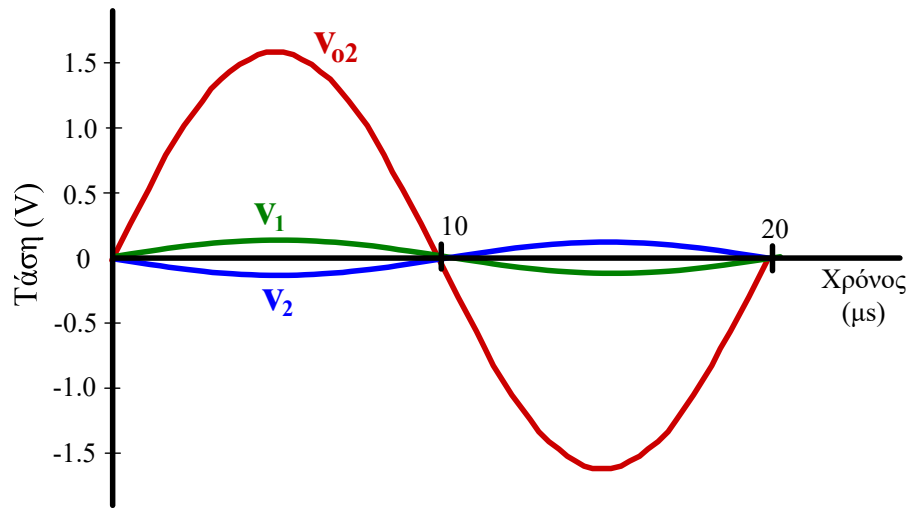
$$v_{o2} = -h_{fe} R_C i_2 = h_{fe} R_C \frac{v_1}{h_{ie}} \Rightarrow \frac{v_{o2}}{v_1} = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{v_{o2}}{2v_1} = \frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}} \Rightarrow A_d = \frac{80 \cdot 1 \cdot 10^3}{2 \cdot 5 \cdot 10^3} \Rightarrow A_d = 8$$

(β) Με βάση τα δεδομένα της εκφώνησης, η τάση εισόδου  $v_1$  έχει πλάτος  $100 \text{ mV}$  και περίοδο:  $T = 1 / f = 1 / 50 \text{ kHz} = 0.02 \text{ ms} = 20 \mu\text{s}$ . Αφού πρόκειται για διαφορικά σήματα εισόδου ( $v_1 = -v_2$ ), η τάση εισόδου  $v_2$  θα έχει το ίδιο πλάτος και την ίδια συχνότητα με την  $v_1$ , αλλά διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Η τάση εξόδου  $v_{o2}$  είναι σήμα συμφασικό με την  $v_1$ , με περίοδο  $20 \mu\text{s}$  και το πλάτος του υπολογίζεται από την τελευταία εξίσωση του ερωτήματος (α), ως εξής:

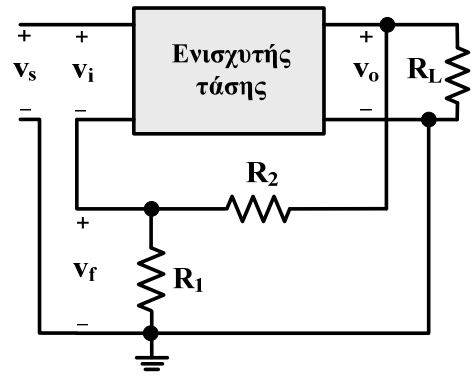
$$A_d = \frac{v_{o2}}{2v_1} \Rightarrow v_{o2} = A_d 2v_1 \Rightarrow v_{o2\text{max}} = A_d 2v_{1\text{max}} \Rightarrow v_{o2\text{max}} = 8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \text{ V} \Rightarrow v_{o2\text{max}} = 1.6 \text{ V}$$

Τα τρία σήματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



## 11

- (α) Στον ενισχυτή τάσης του διπλανού σχήματος, να υποδείξετε την τοπολογία αρνητικής ανατροφοδότησης που εφαρμόζεται και στη συνέχεια να προσδιορίσετε το λόγο ανατροφοδότησης  $\beta$  σε σχέση με τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ .
- (β) Αν η ενίσχυση τάσης χωρίς ανατροφοδότηση ισούται με 20, να προσδιορίσετε το λόγο των αντιστάσεων  $R_1 / R_2$ , ώστε να επιτυγχάνεται ενίσχυση τάσης με ανατροφοδότηση ίση με 4.
- (γ) Να προσδιορίσετε το ποσό ανατροφοδότησης σε dB.
- (δ) Εάν η τάση εισόδου του κυκλώματος ( $v_s$ ) είναι 0.125 V, να προσδιορίσετε τις τάσεις  $v_i$ ,  $v_f$  και  $v_o$ .
- (ε) Εάν η ενίσχυση τάσης χωρίς ανατροφοδότηση αυξηθεί κατά 200%, να προσδιορίσετε το ποσοστό αύξησης της ενίσχυσης τάσης με ανατροφοδότηση.



Για την απάντηση των ερωτημάτων (γ), (δ) και (ε) να χρησιμοποιήσετε τα δεδομένα του ερωτήματος (β).

## ΛΥΣΗ

- (α) Πρόκειται για ενισχυτή στον οποίο εφαρμόζεται αρνητική **ανατροφοδότηση τάσης σε σειρά με την είσοδο**. Ο λόγος ανατροφοδότησης  $\beta$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

- (β) Η ενίσχυση τάσης μετά την εφαρμογή της ανατροφοδότησης δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} A_f = \frac{A}{1 + \beta A} &\Rightarrow 1 + \beta A = \frac{A}{A_f} \Rightarrow \beta A = \frac{A}{A_f} - 1 \Rightarrow \beta = \frac{1}{A_f} - \frac{1}{A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \beta = \frac{1}{4} - \frac{1}{20} \Rightarrow \beta = 0.25 - 0.05 \Rightarrow \beta = 0.2 \end{aligned}$$

Συνεπώς, από τη σχέση (1) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} &\Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.2 \Rightarrow R_1 = 0.2(R_1 + R_2) \Rightarrow R_1 = 0.2R_1 + 0.2R_2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0.8R_1 = 0.2R_2 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{0.2}{0.8} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 0.25. \end{aligned}$$

- (γ) Το ποσό ανατροφοδότησης (ή επιστρεφόμενη ποσότητα) ισούται με:

$$1 + \beta A = 1 + 0.2 \cdot 20 \Rightarrow 1 + \beta A = 5$$

Συνεπώς, το ποσό ανατροφοδότησης σε dB, έχει ως εξής:

$$20 \log(1 + \beta A) = 20 \log 5 = 20 \cdot 0.7 = 14 \text{ dB.}$$

- (δ) Για την ενίσχυση με ανατροφοδότηση ισχύει:

$$A_f = \frac{v_o}{v_s} \Rightarrow v_o = A_f v_s \Rightarrow v_o = 4 \cdot 0.125 \text{ V} \Rightarrow v_o = 0.5 \text{ V.}$$

Για την ενίσχυση χωρίς ανατροφοδότηση ισχύει:

$$A = \frac{v_o}{v_i} \Rightarrow v_i = \frac{v_o}{A} \Rightarrow v_i = \frac{0.5}{20} \text{ V} \Rightarrow v_i = 0.025 \text{ V}$$

Επίσης ισχύει ότι:

$$v_f = \beta v_o \Rightarrow v_f = 0.2 \cdot 0.5 \text{ V} \Rightarrow v_f = 0.1 \text{ V}$$

Η τάση  $v_i$ , θα μπορούσε να υπολογιστεί και ως εξής:

$$v_i = v_s - v_f \Rightarrow v_i = 0.125 - 0.1 \Rightarrow v_i = 0.025 \text{ V}.$$

- (ε) Με βάση τις ενισχύσεις  $A$  και  $A_f$  που δίνονται στο ερώτημα (β), έχει υπολογιστεί ο λόγος ανατρο-φοδότησης  $\beta = 0.2$ . Εάν λοιπόν η ενίσχυση τάσης χωρίς ανατροφοδότηση  $A$  αυξηθεί κατά 200%, δηλ. γίνει ίση με 60, η ενίσχυση τάσης με ανατροφοδότηση θα έχει ως εξής:

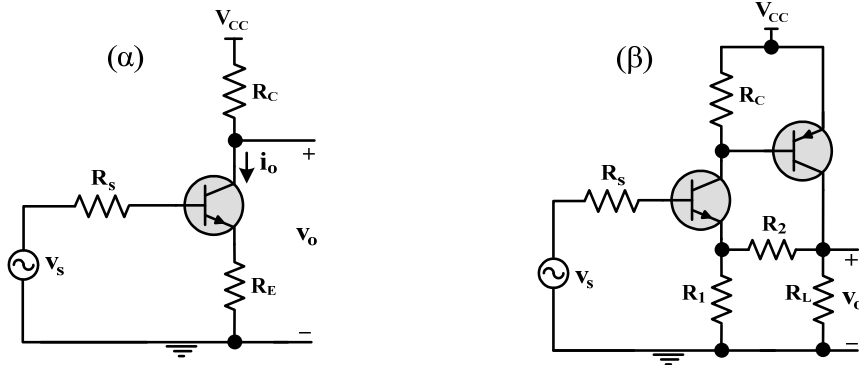
$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} \Rightarrow A_f = \frac{60}{1 + 0.2 \cdot 60} \Rightarrow A_f = 4.615$$

Το ποσοστό αύξησης της ενίσχυσης τάσης με ανατροφοδότηση είναι:

$$\frac{A_{f-\text{τελ.}} - A_{f-\text{αρχ.}}}{A_{f-\text{αρχ.}}} \cdot 100 = \frac{4.615 - 4}{4} \cdot 100 = 15.37\%.$$

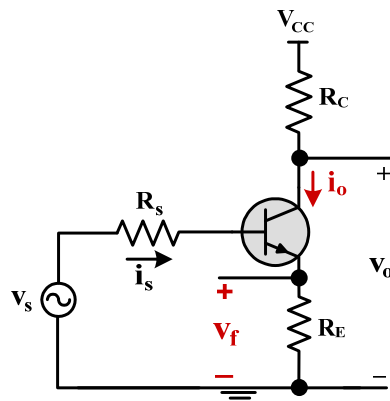
## 12

- (α) Στο παρακάτω κύκλωμα (α) να υποδείξετε ποια από τις τέσσερις τοπολογίες αρνητικής ανατροφοδότησης εφαρμόζεται και στη συνέχεια να προσδιορίσετε το λόγο ανατροφοδότησης  $\beta$ . Θεωρήστε ότι στο τρανζίστορ, το ρεύμα του συλλέκτη είναι ποσοτικά ίσο με το ρεύμα του εκπομπού. Δίνεται ότι:  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ .
- (β) Στο παρακάτω κύκλωμα (β) να υποδείξετε ποια από τις τέσσερις τοπολογίες αρνητικής ανατροφοδότησης εφαρμόζεται και στη συνέχεια να προσδιορίσετε το λόγο ανατροφοδότησης  $\beta$ . Δίνεται ότι:  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  και  $R_2 = 9 \text{ k}\Omega$ .



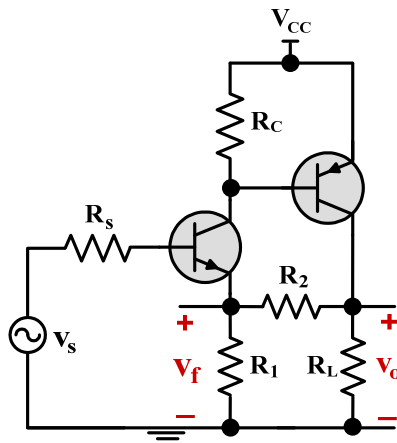
### ΛΥΣΗ

- (α) Στο κύκλωμα (α) εφαρμόζεται **αρνητική ανατροφοδότηση ρεύματος σε σειρά με την είσοδο**. Ο λόγος ανατροφοδότησης  $\beta$  υπολογίζεται ως εξής:



$$\beta = \frac{v_f}{i_o} \Rightarrow \beta = \frac{i_o R_E}{i_o} \Rightarrow \beta = R_E \Rightarrow \beta = 1 \text{ k}\Omega.$$

- (β) Στο κύκλωμα (β) εφαρμόζεται **αρνητική ανατροφοδότηση τάσης σε σειρά με την είσοδο**. Ο λόγος ανατροφοδότησης  $\beta$  υπολογίζεται ως εξής:



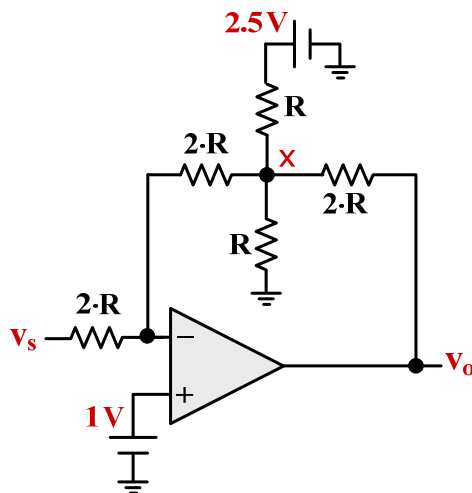


$$\beta = \frac{v_f}{v_o} \Rightarrow \beta = \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o}{v_o} \Rightarrow \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow \beta = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 9 \text{ k}\Omega} \Rightarrow \beta = \frac{1}{10} \Rightarrow \beta = 0.1.$$

### 13

Το κύκλωμα του διπλανού σχήματος περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, πέντε (5) αντιστάσεις και δύο (2) πηγές σταθερής τάσης των 2.5 V και 1 V.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου  $v_s$ .
- (β) Εάν η είσοδος  $v_s$  είναι ημιτονικό σήμα τάσης με συχνότητα 5 kHz και πλάτος 1 V, να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες και για χρονικό διάστημα μιας περιόδου, τις κυματομορφές:
- (β<sub>1</sub>) της τάσης εισόδου  $v_s$  του κυκλώματος,  
 (β<sub>2</sub>) της τάσης του κόμβου x του κυκλώματος και  
 (β<sub>3</sub>) της τάσης εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος.



### ΛΥΣΗ

- (α) Χρησιμοποιούμε τη **μέθοδο ανάλυσης των κόμβων**, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον κόμβο αντιστροφής και στον κόμβο x του κυκλώματος (οι οποίοι δεν αποτελούν είσοδο ή έξοδο του κυκλώματος). Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Στον κόμβο αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left(\frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R}\right) \cdot v_- = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_s + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_x \Rightarrow v_- = \frac{v_s}{2} + \frac{v_x}{2} \Rightarrow 1 = \frac{v_s}{2} + \frac{v_x}{2} \Rightarrow 2 = v_s + v_x \Rightarrow v_x = -v_s + 2.$$

Στην παραπάνω σχέση, χρησιμοποιήσαμε την ιδιότητα αντιγραφής τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή ( $v_- = v_+$ ) και λόγω του  $v_+ = 1$  V, συμπεραίνουμε ότι και  $v_- = 1$  V.

Στον κόμβο x, έχουμε:

$$\left(\frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R}\right) \cdot v_x = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_- + \frac{1}{R} \cdot 2.5 + \frac{1}{R} \cdot 0 + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_o \Rightarrow$$

$$\left(\frac{1}{2} + 1 + 1 + \frac{1}{2}\right) \cdot v_x = \frac{v_-}{2} + 2.5 + \frac{v_o}{2} \Rightarrow 3 \cdot v_x = \frac{1}{2} + 2.5 + \frac{v_o}{2} \Rightarrow 6 \cdot v_x = 1 + 5 + v_o \Rightarrow$$

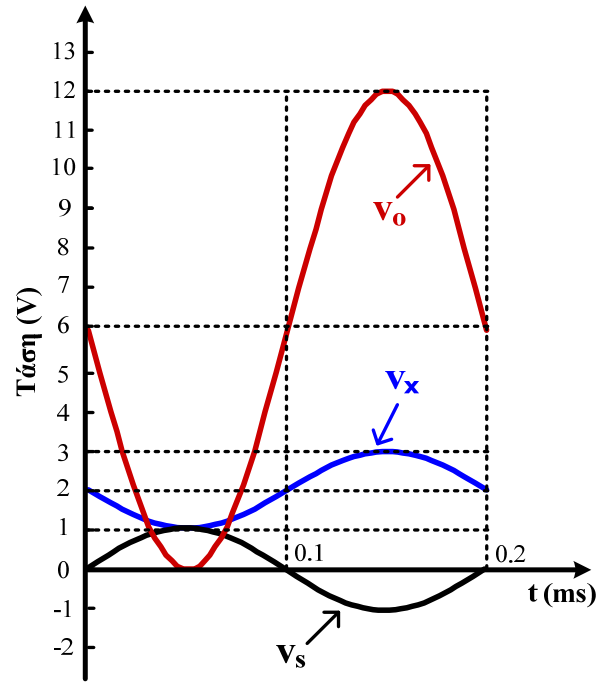
$$6 \cdot (-v_s + 2) = 6 + v_o \Rightarrow -6 \cdot v_s + 12 = 6 + v_o \Rightarrow v_o = -6 \cdot v_s + 6.$$

Κατά την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:  $v_- = 1$  V και  $v_x = -v_s + 2$ .

- (β) Με βάση τα δεδομένα, η τάση εισόδου  $v_s$  έχει πλάτος (δηλαδή μέγιστη τιμή) 1 V και περίοδο  $T = 1 / f = 1 / 5000$  Hz = 0.2 ms. Με βάση τη σχέση  $v_x = -v_s + 2$ , που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), η τάση του κόμβου x είναι ημιτονικό σήμα με όμοια περίοδο 0.2 ms, όμοιο πλάτος 1 V και διαφορά φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου. Επίσης, είναι μετατοπισμένο στον άξονα της τάσης κατά 2 V.

Η τάση εξόδου του κυκλώματος, με βάση τη σχέση που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), είναι ημιτονικό σήμα με όμοια περίοδο 0.2 ms, πλάτος  $6 \cdot 1$  V = 6 V και διαφορά φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου. Επίσης, είναι μετατοπισμένο στον άξονα της τάσης κατά 6 V.

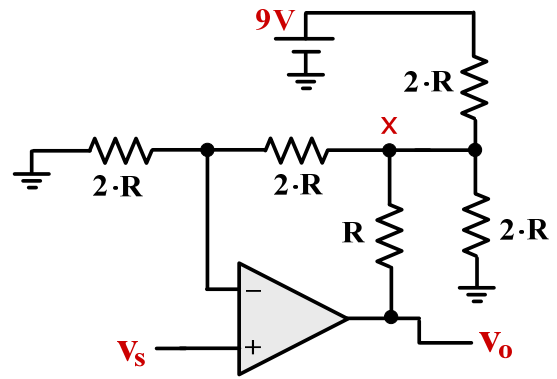
Με βάση τα παραπάνω, οι ζητούμενες κυματομορφές, έχουν ως εξής:



## 14

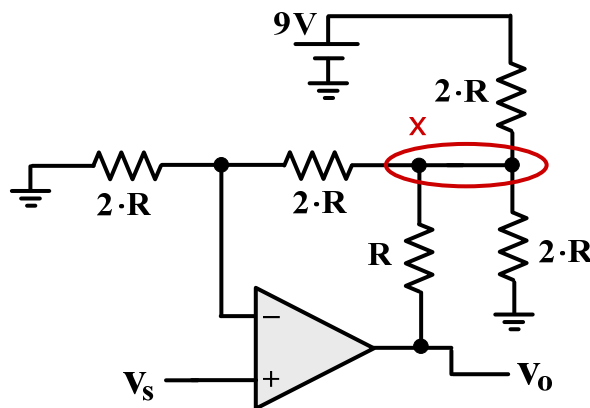
Το κύκλωμα του διπλανού σχήματος περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, πέντε (5) αντιστάσεις και μια πηγή σταθερής τάσης των 9 V.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου  $v_s$ .
- (β) Εάν η είσοδος  $v_s$  είναι ημιτονικό σήμα τάσης με συχνότητα 1 kHz και πλάτος 1 V, να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες και για χρονικό διάστημα μιας περιόδου, τις κυματομορφές:
- (β<sub>1</sub>) της τάσης εισόδου  $v_s$  του κυκλώματος,  
 (β<sub>2</sub>) της τάσης του κόμβου x του κυκλώματος και  
 (β<sub>3</sub>) της τάσης εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος.



### ΛΥΣΗ

- (α) Χρησιμοποιούμε τη **μέθοδο ανάλυσης των κόμβων**, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον κόμβο αντιστροφής και στον κόμβο x του κυκλώματος (οι οποίοι δεν αποτελούν είσοδο ή έξοδο του κυκλώματος). Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.



Στον κόμβο αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R} \right) \cdot v_- = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot 0 + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_x \Rightarrow v_- = \frac{1}{2} \cdot v_x \Rightarrow v_x = 2 \cdot v_- ,$$

Χρησιμοποιούμε την ιδιότητα αντιγραφής τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή ( $v_- = v_+$ ) και λόγω του  $v_+ = v_s$ , συμπεραίνουμε ότι:  $v_x = 2 \cdot v_s$ .

Στον κόμβο x, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R} \right) \cdot v_x = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_- + \frac{1}{R} \cdot v_o + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot 0 + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot 9 \Rightarrow$$

$$\left( \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \cdot 2 \cdot v_s = \frac{1}{2} \cdot v_s + v_o + \frac{1}{2} \cdot 9 \Rightarrow 5 \cdot v_s = \frac{v_s}{2} + v_o + 4.5 \Rightarrow v_o = 4.5 \cdot v_s - 4.5 .$$

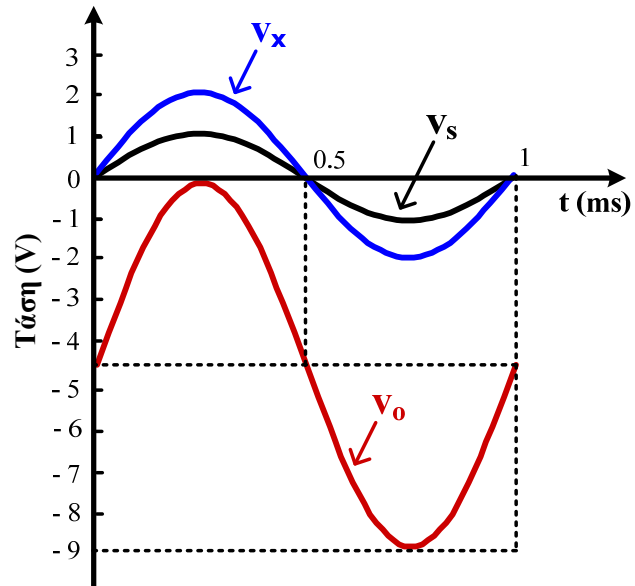
Κατά την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:  $v_- = v_s$ , και  $v_x = 2 \cdot v_s$ .

- (β) Με βάση τα δεδομένα, η τάση εισόδου  $v_s$  έχει πλάτος (δηλαδή μέγιστη τιμή) 1 V και περίοδο  $T = 1 / f = 1 / 1000 \text{ Hz} = 1 \text{ ms}$ . Με βάση τη σχέση  $v_x = 2 \cdot v_s$  που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), η τάση του κόμβου x είναι ημιτονικό σήμα με όμοια περίοδο 1 ms, πλάτος  $2 \cdot 1 \text{ V} = 2 \text{ V}$  και συμφασικό με το σήμα

εισόδου.

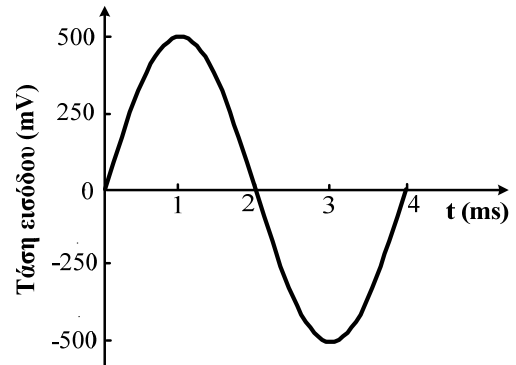
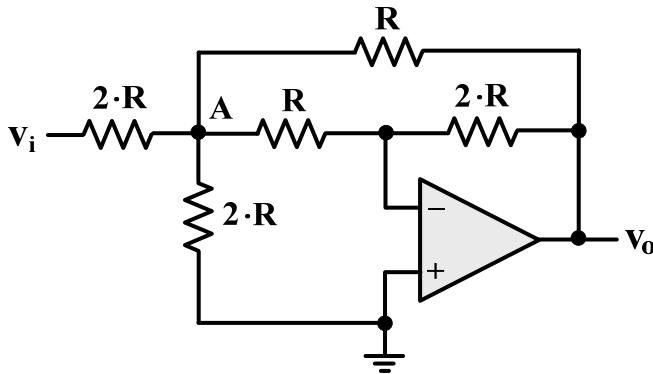
Η τάση εξόδου του κυκλώματος, με βάση τη σχέση που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), είναι ημιτονικό σήμα με όμοια περίοδο 1 ms, πλάτος  $4.5 \cdot 1 \text{ V} = 4.5 \text{ V}$  και συμφασικό με το σήμα εισόδου. Επίσης, είναι μετατοπισμένο στον άξονα της τάσης κατά  $-4.5 \text{ V}$ .

Με βάση τα παραπάνω, οι ζητούμενες κυματομορφές, έχουν ως εξής:



## 15

- (α) Εάν ο τελεστικός ενισχυτής του κυκλώματος του παρακάτω σχήματος είναι ιδανικός, να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου  $v_i$ .
- (β) Εάν η είσοδος  $v_i$  είναι ημιτονικό σήμα τάσης, η κυματομορφή του οποίου για χρονικό διάστημα μιας περιόδου δίνεται στο παρακάτω σχήμα, να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες τις κυματομορφές της τάσης εξόδου  $v_o$  και της τάσης του κόμβου A, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου.



### ΛΥΣΗ

- (α) Χρησιμοποιούμε τη **μέθοδο ανάλυσης των κόμβων**, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον κόμβο A του κυκλώματος και στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή (οι οποίοι δεν αποτελούν είσοδο ή έξοδο του κυκλώματος). Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Έτσι, στον κόμβο A, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right) \cdot v_A = \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_i + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot 0 + \frac{1}{R} \cdot v_- + \frac{1}{R} \cdot v_o \Rightarrow 3 \cdot v_A = 0.5 \cdot v_i + v_- + v_o \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_A = \frac{0.5 \cdot v_i + v_- + v_o}{3}.$$

Χρησιμοποιούμε την ιδιότητα αντιγραφής τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή ( $v_- = v_+ = 0$ ) και καταλήγουμε στο ότι:

$$v_A = \frac{0.5 \cdot v_i + v_o}{3}. \quad (1)$$

Στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R} \right) \cdot v_- = \frac{1}{R} \cdot v_A + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_o \Rightarrow 0 = v_A + 0.5 \cdot v_o \Rightarrow v_o = -2 \cdot v_A.$$

Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιήσαμε και πάλι την ιδιότητα αντιγραφής τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή ( $v_- = v_+ = 0$ ).

Λόγω της σχέσης (1) που προέκυψε από την ανάλυση του κόμβου A, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$v_o = -2 \cdot v_A \Rightarrow v_o = -2 \cdot \frac{0.5 \cdot v_i + v_o}{3} \Rightarrow v_o = -\frac{v_i}{3} - \frac{2}{3} \cdot v_o \Rightarrow \frac{5}{3} \cdot v_o = -\frac{v_i}{3} \Rightarrow v_o = -\frac{v_i}{5}.$$

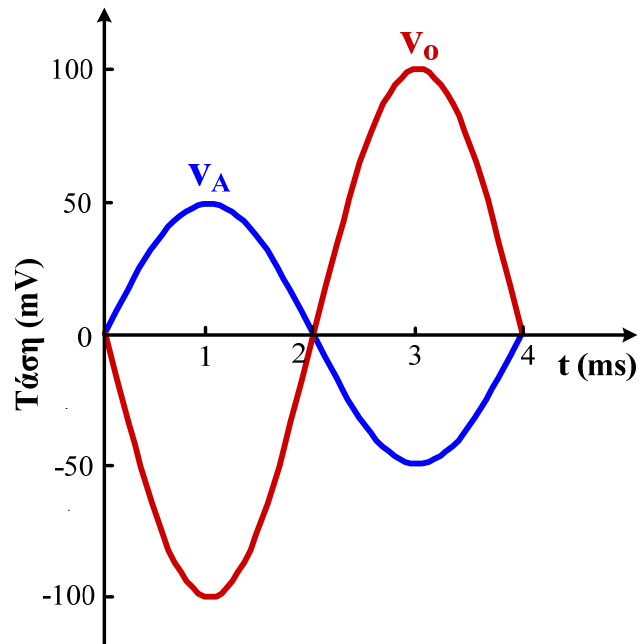
- (β) Με βάση τη δεδομένη κυματομορφή της τάσης εισόδου  $v_i$ , αυτή έχει πλάτος (δηλαδή μέγιστη τιμή) 500 mV και περίοδο  $T = 4$  ms. Σύμφωνα με την τελευταία σχέση που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), το σήμα εξόδου είναι ημιτονικό με όμοια περίοδο 4 ms, πλάτος  $500 / 5$  mV = 100 V και διαφορά φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου (λόγω του αρνητικού προσήμου που προέκυψε στην εν λόγω σχέση).

Όσον αφορά την τάση του κόμβου A, αυτή υπολογίζεται εάν συνδυάσουμε την σχέση (1) με την τελευταία σχέση που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α):

$$v_A = \frac{0.5 \cdot v_i + v_o}{3} \Rightarrow v_A = \frac{0.5 \cdot v_i - v_i}{3} \Rightarrow v_A = \frac{0.5 \cdot v_i - 0.2 \cdot v_i}{3} \Rightarrow v_A = \frac{0.3 \cdot v_i}{3} \Rightarrow v_A = 0.1 \cdot v_i.$$

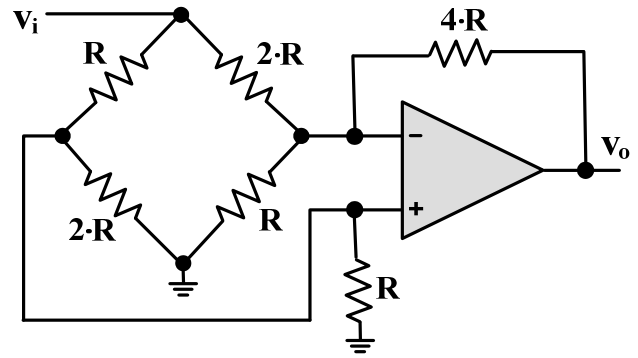
Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η τάση του κόμβου A είναι ημιτονικό σήμα με περίοδο 4 ms και πλάτος  $0.1 \cdot 500 \text{ mV} = 50 \text{ mV}$ , συμφασικό με την τάση εισόδου του κυκλώματος.

Συνεπώς, οι ζητούμενες κυματομορφές, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου, έχουν ως εξής:



Το κύκλωμα του διπλανού σχήματος περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή και έξι (6) αντιστάσεις.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου  $v_i$ .
- (β) Εάν η είσοδος  $v_i$  είναι ημιτονικό σήμα τάσης με συχνότητα 1.25 kHz και πλάτος 500 mV, να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες τις κυματομορφές της τάσης εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος και της τάσης του ακροδέκτη μη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου.



### ΛΥΣΗ

- (α) Χρησιμοποιούμε τη **μέθοδο ανάλυσης των κόμβων**, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή και στον κόμβο του ακροδέκτη μη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή (οι οποίοι δεν αποτελούν είσοδο ή έξοδο του κυκλώματος). Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Έτσι, στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής (-) του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{4 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} \right) \cdot v_- = \frac{1}{4 \cdot R} \cdot v_o + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot v_i + \frac{1}{R} \cdot 0 \Rightarrow 1.75 \cdot v_- = 0.25 \cdot v_o + 0.5 \cdot v_i \Rightarrow v_- = \frac{0.25 \cdot v_o + 0.5 \cdot v_i}{1.75}.$$

Στον κόμβο του ακροδέκτη μη αντιστροφής (+) του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R} \right) \cdot v_+ = \frac{1}{R} \cdot 0 + \frac{1}{R} \cdot v_i + \frac{1}{2 \cdot R} \cdot 0 \Rightarrow 2.5 \cdot v_+ = v_i \Rightarrow v_+ = 0.4 \cdot v_i.$$

Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, υπολογίζουμε την τάση εξόδου του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου του:

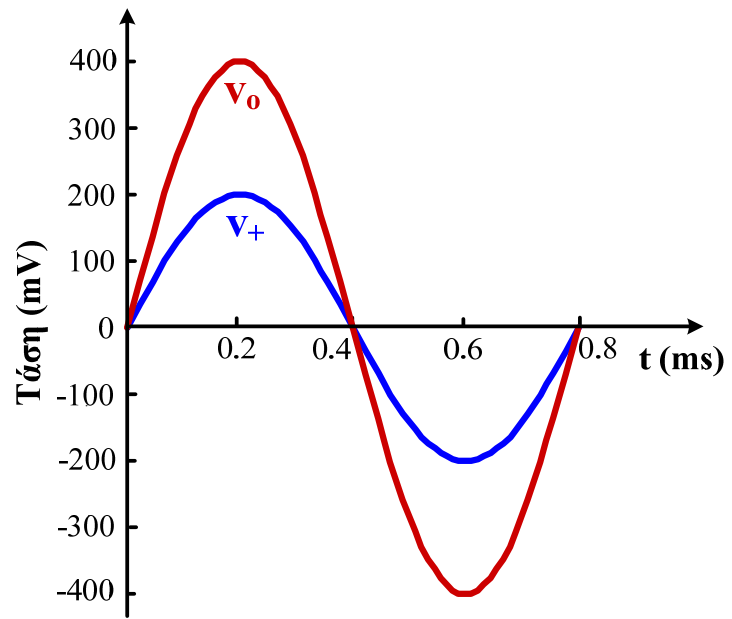
$$v_+ = v_- \Rightarrow 0.4 \cdot v_i = \frac{0.25 \cdot v_o + 0.5 \cdot v_i}{1.75} \Rightarrow 0.7 \cdot v_i = 0.25 \cdot v_o + 0.5 \cdot v_i \Rightarrow v_o = \frac{0.2 \cdot v_i}{0.25} \Rightarrow v_o = 0.8 \cdot v_i.$$

- (β) Με βάση τα δεδομένα, η τάση εισόδου  $v_i$  έχει πλάτος (δηλαδή μέγιστη τιμή) 500 mV και περίοδο  $T = 1 / f = 1 / 1250 \text{ Hz} = 0.0008 \text{ s} = 0.8 \text{ ms}$ . Με βάση τη σχέση που προέκυψε στην απάντηση του ερωτήματος (α), το σήμα εξόδου είναι ημιτονικό με όμοια περίοδο 0.8 ms, πλάτος  $0.8 \cdot 500 \text{ mV} = 400 \text{ mV}$ , συμφασικό με το σήμα εισόδου.

Όσον αφορά την τάση του ακροδέκτη μη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, με βάση τη σχέση  $v_+ = 0.4 \cdot v_i$ , που προέκυψε στο ερώτημα (α), προκύπτει ότι αυτή είναι ημιτονικό σήμα με περίοδο 0.8 ms και πλάτος  $0.4 \cdot 500 \text{ mV} = 200 \text{ mV}$ , συμφασικό με το σήμα εισόδου του κυκλώματος.

Συνεπώς, οι ζητούμενες κυματομορφές, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου, έχουν ως εξής:

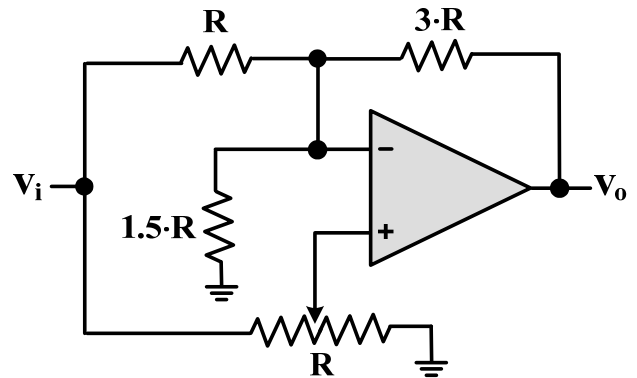




Το κύκλωμα του διπλανού σχήματος περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, τρεις (3) σταθερές αντιστάσεις και μία (1) μεταβλητή αντίσταση.

(α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος σε σχέση με την τάση εισόδου  $v_i$ , όταν ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο δεξί άκρο της, όταν ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο αριστερό άκρο της και όταν ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο μέσο της.

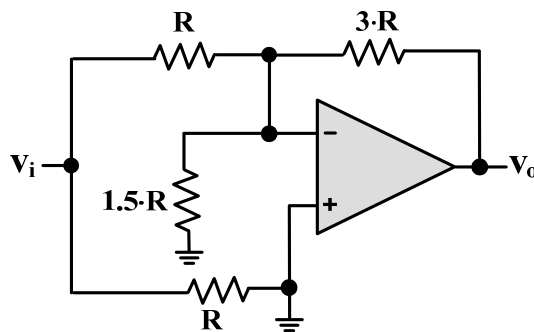
(β) Εάν η είσοδος  $v_i$  είναι ημιτονικό σήμα τάσης με συχνότητα 5 kHz και πλάτος 500 mV, να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες τις κυματομορφές της τάσης εισόδου  $v_i$  και της τάσης εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος για τις τρεις θέσεις του δρομέα της μεταβλητής αντίστασης που αναφέρονται στο ερώτημα (α), για χρονικό διάστημα μίας περιόδου.



### ΛΥΣΗ

(α) Κατά την ανάλυση του κυκλώματος χρησιμοποιούμε τη **μέθοδο ανάλυσης των κόμβων** του, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στους κόμβους του κυκλώματος που δεν είναι είσοδοι ή έξοδοί του. Σε κάθε κόμβο, εξισώνουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Στην περίπτωση που **ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο δεξί άκρο της**, ο ακροδέκτης μη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή γειώνεται ( $v_+ = 0$ ) και το κύκλωμα έχει ως εξής:



Στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής (-) του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

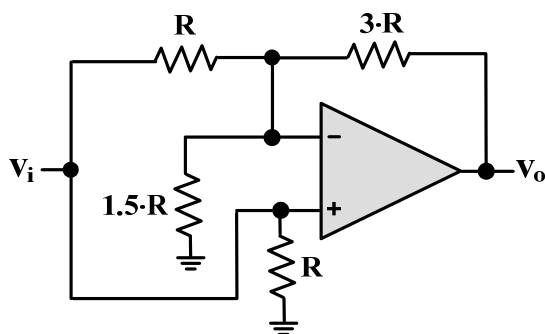
$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{1.5 \cdot R} + \frac{1}{3 \cdot R} \right) \cdot v_- = \frac{1}{R} \cdot v_i + \frac{1}{3 \cdot R} \cdot v_o + \frac{1}{1.5 \cdot R} \cdot 0 \Rightarrow 2 \cdot v_- = v_i + \frac{v_o}{3} \Rightarrow v_o = 6 \cdot v_- - 3 \cdot v_i. \quad (1)$$

Επομένως, αφού στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι  $v_+ = 0$ , λόγω της ιδιότητας αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή ( $v_+ = v_-$ ), προκύπτει ότι  $v_- = 0$  και η σχέση (1) γίνεται:

$$v_o = 6 \cdot v_- - 3 \cdot v_i \Rightarrow v_o = -3 \cdot v_i.$$

Παρατηρούμε ότι για αυτή τη θέση του δρομέα, το κύκλωμα αποτελεί ενισχυτή αρνητικής ενίσχυσης με αντίσταση εισόδου  $R$  και αντίσταση ανατροφοδότησης  $3 \cdot R$ .

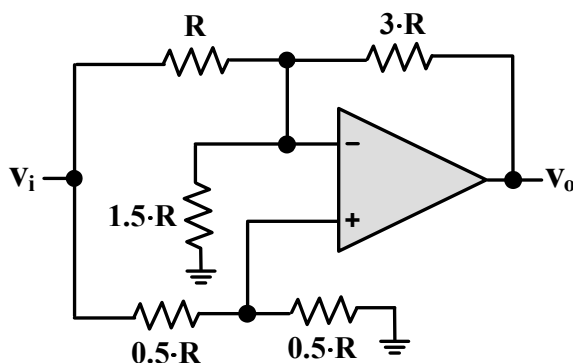
Στην περίπτωση που **ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο αριστερό άκρο της**, ο ακροδέκτης μη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή συνδέεται στην είσοδο του κυκλώματος ( $v_+ = v_i$ ) και το κύκλωμα έχει ως εξής:



Επομένως, αφού στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι  $v_+ = v_i$ , λόγω της ιδιότητας αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή ( $v_+ = v_-$ ), προκύπτει ότι  $v_- = v_i$  και η σχέση (1) γίνεται:

$$v_o = 6 \cdot v_- - 3 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 6 \cdot v_i - 3 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 3 \cdot v_i.$$

Στην περίπτωση που ο δρομέας της μεταβλητής αντίστασης βρίσκεται στο μέσο της, το κύκλωμα έχει ως εξής:



Στον κόμβο του ακροδέκτη μη αντιστροφής (+) του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{0.5 \cdot R} + \frac{1}{0.5 \cdot R} \right) \cdot v_+ = \frac{1}{0.5 \cdot R} \cdot v_i + \frac{1}{0.5 \cdot R} \cdot 0 \Rightarrow 4 \cdot v_+ = 2 \cdot v_i \Rightarrow v_+ = \frac{v_i}{2}. \quad (2)$$

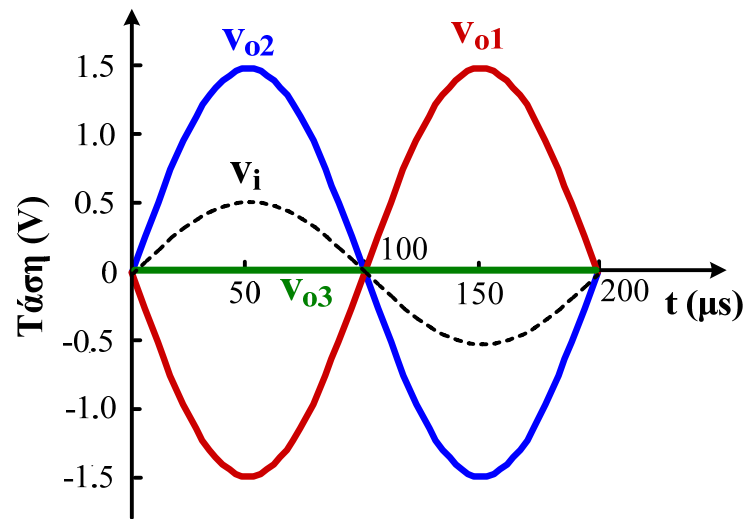
Από τη σχέση (2) και λόγω της ιδιότητας αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή ( $v_+ = v_-$ ), προκύπτει ότι  $v_- = v_i / 2$  και η σχέση (1) στην περίπτωση αυτή γίνεται:

$$v_o = 6 \cdot v_- - 3 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 6 \cdot \frac{v_i}{2} - 3 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 0.$$

### Παρατήρηση:

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, με μετακίνηση του δρομέα της μεταβλητής αντίστασης από το δεξί άκρο της αντίστασης έως το αριστερό, η ενίσχυση τάσης του κυκλώματος μεταβάλλεται από  $-3$  έως  $3$ . Εάν στο ίδιο κύκλωμα θέσουμε όπου  $3$  έναν θετικό φυσικό αριθμό  $n$  και όπου  $1.5 (= 3 / 2)$  τον αριθμό  $n / (n - 1)$ , μπορούμε με μετακίνηση του δρομέα της μεταβλητής αντίστασης από το δεξί άκρο της αντίστασης έως το αριστερό, να επιτυγχάνουμε ενίσχυση τάσης  $A_v$  τέτοια ώστε  $-n \leq A_v \leq n$ .

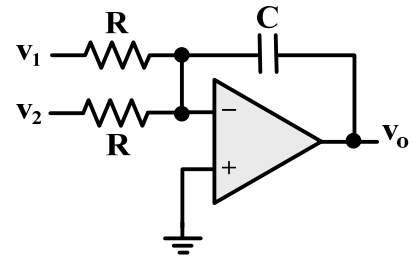
- (β) Με βάση τα δεδομένα, η τάση εισόδου  $v_i$  έχει πλάτος (δηλαδή μέγιστη τιμή)  $500 \text{ mV}$  και περίοδο  $T = 1 / f = 1 / 5 \text{ kHz} = 0.2 \text{ ms} = 200 \text{ } \mu\text{s}$ . Με βάση τις σχέσεις που προέκυψαν στην απάντηση του ερωτήματος (α), στην πρώτη περίπτωση το σήμα εξόδου είναι ημιτονικό με όμοια περίοδο  $200 \text{ } \mu\text{s}$ , πλάτος  $3 \cdot 500 \text{ mV} = 1.5 \text{ V}$  και διαφορά φάσης  $180^\circ$  σε σχέση με το σήμα εισόδου. Στην δεύτερη περίπτωση το σήμα εξόδου είναι επίσης ημιτονικό με όμοια περίοδο  $200 \text{ } \mu\text{s}$ , πλάτος  $3 \cdot 500 \text{ mV} = 1.5 \text{ V}$ , συμφασικό με το σήμα εισόδου και με διαφορά φάσης  $180^\circ$  σε σχέση με το σήμα εξόδου της πρώτης περίπτωσης. Στην τρίτη περίπτωση, το σήμα εξόδου είναι σταθερό με μηδενική τιμή. Συνεπώς, οι ζητούμενες κυματομορφές, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου, έχουν ως εξής:



## 18

Οι είσοδοι  $v_1$  και  $v_2$  του κυκλώματος του παρακάτω σχήματος είναι σταθερές τάσεις  $-4\text{ V}$  και  $3\text{ V}$ , αντίστοιχα. Οι δύο είσοδοι εφαρμόζονται στο κύκλωμα για το χρονικό διάστημα  $0 \leq t \leq 4\text{ sec}$  και ο τελεστικός ενισχυτής που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα είναι ιδανικός. Δίνεται ότι:  $R = 5\text{ k}\Omega$  και  $C = 100\text{ }\mu\text{F}$ .

- (α) Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας, να προσδιορίσετε την τάση εξόδου  $v_o$  του κυκλώματος ως συνάρτηση του χρόνου ( $t$ ).
- (β) Να χαράξετε με ακρίβεια στους ίδιους άξονες, τις γραφικές παραστάσεις των τάσεων  $v_1$ ,  $v_2$  και  $v_o$  ως προς το χρόνο, για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφαρμόζονται οι δύο είσοδοι.



### ΛΥΣΗ

- (α) Εφαρμόζουμε στο κύκλωμα την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα που δίνεται.

Εάν  $v_2 = 0$ , η αντίσταση που τροφοδοτείται από την είσοδο  $v_2$  βραχυκυκλώνεται λόγω του ότι  $v_- = v_+ = 0$ . Αφού το ρεύμα στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενικό, ισχύει:

$$I_R = I_C \Rightarrow \frac{v_R}{R} = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow \frac{v_1 - v_-}{R} = C \frac{d(v_- - v_o)}{dt} \Rightarrow \frac{v_1 - 0}{R} = C \frac{d(0 - v_o)}{dt} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{v_1}{R} = -C \frac{dv_o}{dt} \Rightarrow v_o = -\frac{1}{RC} \int v_1 dt$$

Συνεπώς, εάν  $v_2 = 0$  το κύκλωμα αποτελεί ολοκληρωτή.

Εάν  $v_1 = 0$ , το κύκλωμα αποτελεί και πάλι ολοκληρωτή (αφού η αντίσταση που τροφοδοτείται από την είσοδο  $v_1$  βραχυκυκλώνεται λόγω του ότι  $v_- = v_+ = 0$ ), οπότε με όμοιο τρόπο προκύπτει ότι:

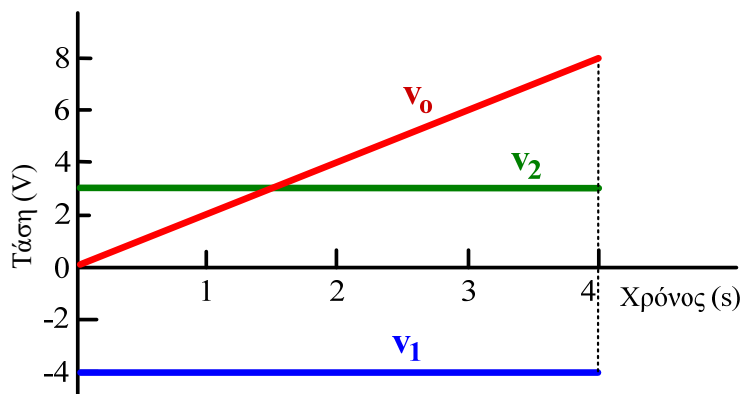
$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_2 dt$$

Με εφαρμογή και των δύο τάσεων εισόδου:

$$v_o = -\left( \frac{1}{RC} \int v_1 dt + \frac{1}{RC} \int v_2 dt \right) \Rightarrow v_o = -\frac{1}{5 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \left( \int -4 dt + \int 3 dt \right) \Rightarrow$$

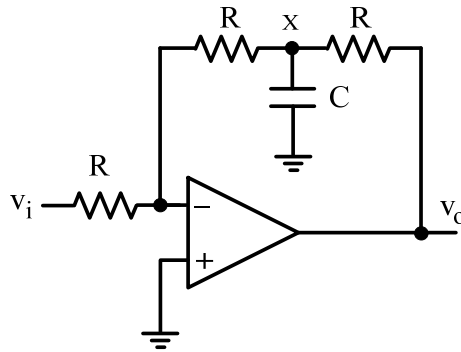
$$\Rightarrow v_o = -2(-4t + 3t) \text{ V} \Rightarrow v_o = 2t \text{ V} .$$

- (β) Η γραφική παράσταση των τάσεων εισόδου και εξόδου ως προς το χρόνο, για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφαρμόζονται οι δύο είσοδοι ( $0 \leq t \leq 4\text{sec}$ ), δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



## 19

Για το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος που περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, να προσδιορίσετε τη συνάρτηση μεταφοράς  $A(s)$ , όπου  $s = j\omega$  η μιγαδική συχνότητα.



### ΛΥΣΗ:

Λόγω της παρουσίας του πυκνωτή, χρησιμοποιούμε φάσορες κατά την εφαρμογή του 1ου κανόνα Kirchhoff, που σημαίνει ότι λειτουργούμε στο πεδίο της συχνότητας.

Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ανάλυσης των κόμβων, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή και στον κόμβο X. Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλ. των αντίστροφων αντιστάσεων ή σύνθετων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τον καθένα από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Έτσι στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right) \cdot V_- = \frac{1}{R} \cdot V_X + \frac{1}{R} \cdot V_i \Rightarrow \frac{2}{R} V_- = \frac{V_X + V_i}{R} \Rightarrow V_- = \frac{V_X + V_i}{2} .$$

Λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή:  $V_- = V_+ = 0$ , καταλήγουμε στη σχέση:  $V_X = -V_i$ .

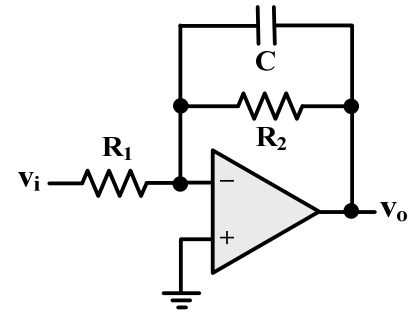
Στον κόμβο X έχουμε:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + Cs\right) \cdot V_X = \frac{1}{R} \cdot V_- + Cs \cdot 0 + \frac{1}{R} V_o \quad \begin{matrix} V_X = -V_i \\ V_- = V_+ = 0 \end{matrix} \Rightarrow -\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + Cs\right) \cdot V_i = \frac{1}{R} V_o \Rightarrow$$

$$A(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + Cs\right)}{\frac{1}{R}} \Rightarrow A(s) = -2 - RCs .$$

Για το κύκλωμα του διπλανού σχήματος, που περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, δίνεται ότι  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$  και  $C = 10 \text{ nF}$ .

- Να υποδείξετε την τοπολογία αρνητικής ανατροφοδότησης που εφαρμόζεται στο κύκλωμα και να αναφέρετε την επίδραση της στις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του ενισχυτή.
- Να προσδιορίσετε την συνάρτηση μεταφοράς  $A(s)$  του κυκλώματος ( $s = j \cdot \omega$ : μιγαδική συχνότητα).
- Να υπολογίσετε την ενίσχυση του κυκλώματος στο συνεχές ρεύμα.
- Να υπολογίσετε την συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος.



### ΛΥΣΗ

- Πρόκειται για ενισχυτή στον οποίο εφαρμόζεται αρνητική ανατροφοδότηση τάσης παράλληλα με την είσοδο, αφού μέσω του βρόχου ανατροφοδότησης που αποτελείται από την αντίσταση  $R_2$  και τον πυκνωτή  $C$ , λαμβάνεται η τάση εξόδου και αφαιρείται ανάλογο με αυτή ρεύμα από το ρεύμα εισόδου. Με την εφαρμογή αυτής της τοπολογίας ανατροφοδότησης, μειώνονται οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του ενισχυτή.
- Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ανάλυσης των κόμβων, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή. Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλ. των αντίστροφων αντιστάσεων ή σύνθετων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τον κόμβο αυτό πολλαπλασιασμένο με την τάση του, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν. Λόγω της παρουσίας του πυκνωτή, χρησιμοποιούμε φάσορες κατά την εφαρμογή του 1ου κανόνα Kirchhoff (δηλαδή, λειτουργούμε στο πεδίο της συχνότητας).

Έτσι, στον κόμβο του ακροδέκτη αντιστροφής του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

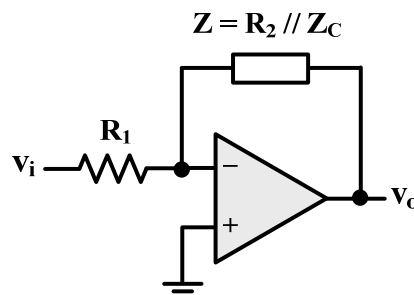
$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + C \cdot s \right) \cdot V_- = \frac{1}{R_1} \cdot V_i + \frac{1}{R_2} \cdot V_o + C \cdot s \cdot V_o \Rightarrow \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + C \cdot s \right) \cdot 0 = \frac{1}{R_1} \cdot V_i + \frac{1}{R_2} \cdot V_o + C \cdot s \cdot V_o \Rightarrow$$

$$\left( \frac{1}{R_2} + C \cdot s \right) \cdot V_o = -\frac{1}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2} + C \cdot s} \Rightarrow A(s) = \frac{-R_2/R_1}{1 + R_2 \cdot C \cdot s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A(s) = \frac{-20 \cdot 10^3 / 10 \cdot 10^3}{1 + 20 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot s} \Rightarrow A(s) = \frac{-2}{1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot s}.$$

Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιήσαμε την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, δηλαδή ότι  $V_- = V_+ = 0$ .

**Εναλλακτικά**, για να προσδιορίσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς, μπορούμε να απλοποιήσουμε το κύκλωμα, αξιοποιώντας την παράλληλη σύνδεση της αντίστασης  $R_2$  με τον πυκνωτή  $C$ . Το απλοποιημένο κύκλωμα αποτελεί αντιστροφή με αντίσταση εισόδου  $R_1$  και αντίσταση ανατροφοδότησης την σύνθετη αντίσταση  $Z$ :



$$Z = \frac{R_2 \cdot Z_C}{R_2 + Z_C} = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{C \cdot s}}{R_2 + \frac{1}{C \cdot s}} = \frac{R_2}{R_2 \cdot C \cdot s + 1}$$

Για τον αντιστροφέα ισχύει ότι:

$$V_o = -\frac{Z}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{R_2}{R_2 \cdot C \cdot s + 1}}{R_1} \Rightarrow A(s) = \frac{-R_2/R_1}{1 + R_2 \cdot C \cdot s} \Rightarrow A(s) = \frac{-2}{1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot s}$$

- (γ) Η ενίσχυση στο συνεχές ρεύμα προκύπτει εύκολα από την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος, εάν σ' αυτή μηδενίσουμε την συχνότητα. Έτσι, για  $s = j \cdot \omega = 0$ , προκύπτει ότι  $A_o = -2$ .

Στο ίδιο αποτέλεσμα μπορούμε να καταλήξουμε εάν στο κύκλωμα που δίνεται θεωρήσουμε τον πυκνωτή ως ανοικτό κύκλωμα, αφού έτσι λειτουργεί στο συνεχές ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή το κύκλωμα αποτελεί ενισχυτή αρνητικής ενίσχυσης (ή αντιστροφέα) για τον οποίο ισχύει ότι:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_i \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -2 \Rightarrow A_o = -2.$$

- (δ) Η συχνότητα αποκοπής είναι εκείνη για την οποία το μέτρο της ενίσχυσης του κυκλώματος ισούται με τη μέγιστη τιμή του, διαιρεμένη με την τετραγωνική ρίζα του 2.

Το μέτρο της ενίσχυσης του κυκλώματος έχει ως εξής:

$$|A| = \frac{|-2|}{|1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot s|} \Rightarrow |A| = \frac{2}{\sqrt{1 + (2 \cdot 10^{-4} \cdot \omega)^2}} \Rightarrow |A| = \frac{2}{\sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-8} \cdot \omega^2}}$$

Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ενίσχυσης προκύπτει για  $\omega = 0$  και ισούται με 2. Η συχνότητα αποκοπής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{2}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-8} \cdot \omega_c^2}} \Rightarrow 2 = 1 + 4 \cdot 10^{-8} \cdot \omega_c^2 \Rightarrow \omega_c^2 = \frac{1}{4 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow \omega_c = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} \text{ rad/sec} = 5000 \text{ rad/sec}.$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} \Rightarrow f_c = \frac{5000}{2\pi} \text{ Hz} \Rightarrow f_c = 796 \text{ Hz}.$$

**Εναλλακτικά**, εάν παρατηρήσουμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς  $[A(s) = -2 / (1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot s)]$  έχει τη μορφή συνάρτησης βαθυπερατού κυκλώματος (η οποία αναλύεται στην 3<sup>η</sup> ενότητα του μαθήματος), με σταθερά χρόνου  $\tau = 2 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$  και ενίσχυση  $-2$ , μπορούμε να αποφανθούμε ότι η γωνιακή συχνότητα (ή ταχύτητα) απόκοπής είναι  $\omega_c = 1 / \tau = 0.5 \cdot 10^4 \text{ rad/sec} = 5000 \text{ rad/sec}$ , χωρίς να διενεργήσουμε τον παραπάνω υπολογισμό μέσω του μέτρου της ενίσχυσης.