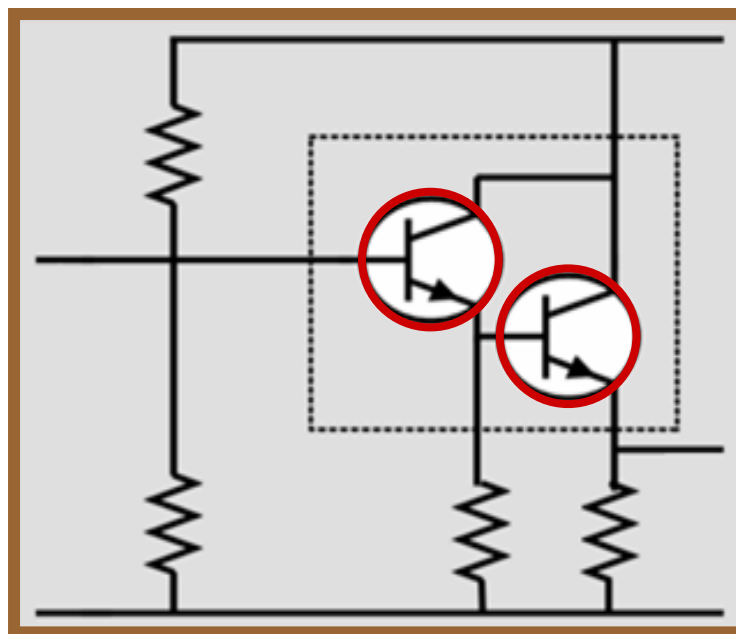


# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ



Λάμπρος Μπισδούνης  
Καθηγητής



# Διδάσκων και διαλέξεις του μαθήματος



- **Διδάσκων:** Λάμπρος Μπισδούνης, Καθηγητής
- **Γραφείο:** Εργαστήριο Αναλογικών Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων, 1<sup>ος</sup> όροφος κτηρίου Α1



- **Τηλέφωνο:** 2610 369293



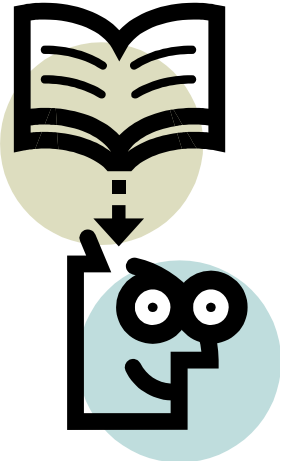
- **E-mail:** [bisdounis@uop.gr](mailto:bisdounis@uop.gr)



- **Διδασκαλία μαθήματος:**  
Τετάρτη, 09:00 – 12:00, Αίθουσα Κ04

# Προτεινόμενα βιβλία

---



Γ. Χαριτάντη, **Ηλεκτρονικά (Γραμμικά κυκλώματα συνεχούς χρόνου)**, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος, 2013.

R. L. Boylestad, L. Nashelsky, **Ηλεκτρονικές διατάξεις και θεωρία κυκλωμάτων**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.

A. Sedra, K. Smith, **Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2017.

R. Jaeger, T. Blalock, **Μικροηλεκτρονική**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.

Στην ιστοσελίδα του μαθήματος είναι επίσης διαθέσιμα **βιβλία σε ηλεκτρονική μορφή**.

# Πρόσθετο διδακτικό υλικό

---



- Ιστοσελίδα του μαθήματος:

**<https://eclass.uop.gr/courses/718>**

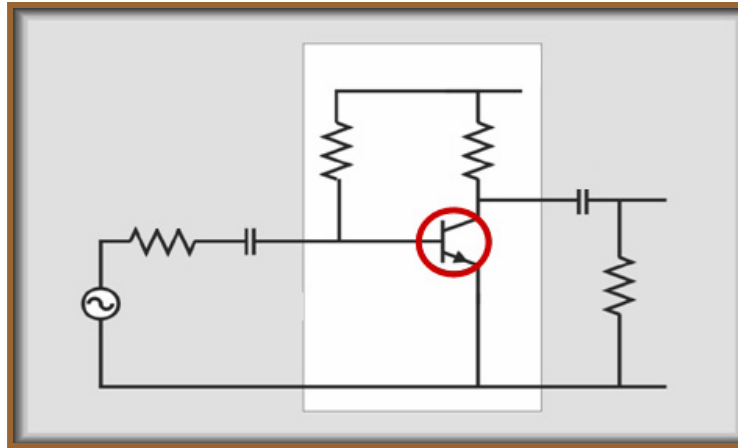
- Οι διαλέξεις περιλαμβάνουν **στοιχεία θεωρίας**, **παραδείγματα** και **λυμένες ασκήσεις**.



- Όλο το υλικό των διαλέξεων αναρτάται στην ιστοσελίδα του μαθήματος, στην οποία η πρόσβαση είναι ελεύθερη.

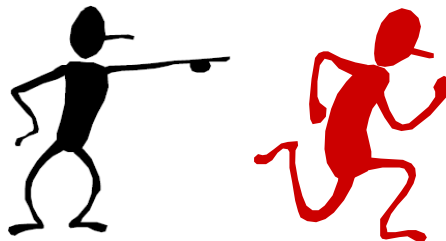
# Ενότητες του μαθήματος

- Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία αναλογικών σημάτων είναι η ενίσχυση τους, που επιτυγχάνεται με **ηλεκτρονικά κυκλώματα** που ονομάζονται **ενισχυτές**.
- Η σχέση αναλογίας που υπάρχει στους ενισχυτές μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου, τους χαρακτηρίζει ως **αναλογικά κυκλώματα**.
- Οι **ενισχυτές** αποτελούν και το **βασικό αντικείμενο** του μαθήματος.
- Οι ενότητες που θα μελετηθούν είναι οι παρακάτω:
  1. Ανασκόπηση βασικών στοιχείων και απλές βαθμίδες ενισχυτών.
  2. Τα τρανζίστορ στις υψηλές συχνότητες.
  3. Απόκριση συχνότητας ενισχυτών.
  4. Ενισχυτές πολλών βαθμίδων.
  5. Ανατροφοδότηση στους ενισχυτές.
  6. Τελεστικός ενισχυτής.
  7. Ενισχυτές ισχύος.



1<sup>η</sup> ενότητα:

# ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΛΕΣ ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ



# Περιεχόμενα 1<sup>ης</sup> ενότητας

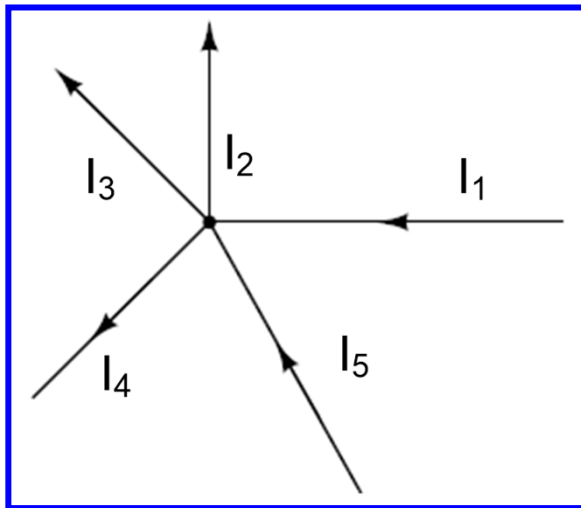
- Ανασκόπηση βασικών στοιχείων ανάλυσης κυκλωμάτων: κανόνες Kirchhoff, διαιρέτες και πραγματικές πηγές τάσης και ρεύματος, μετασχηματισμοί Thevenin και Norton, ημιτονικά σήματα.
- Ανασκόπηση λειτουργίας διπολικού τρανζίστορ.
- Εισαγωγή στους ενισχυτές και στις απλές βαθμίδες ενισχυτών.
- Μελέτη απλών βαθμίδων ενισχυτών με διπολικό τρανζίστορ στο συνεχές (πόλωση).
- Μελέτη απλών βαθμίδων ενισχυτών με διπολικό τρανζίστορ στο εναλλασσόμενο.
- Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών.
- Ανασκόπηση λειτουργίας τρανζίστορ MOSFET και μελέτη απλής βαθμίδας ενισχυτή με MOSFET στο συνεχές (πόλωση).
- Μελέτη απλής βαθμίδας ενισχυτή MOSFET στο εναλλασσόμενο.
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

# Ανασκόπηση: 1<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff

Το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων σε έναν κόμβο ισούται με 0:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

Στο αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων ενός κόμβου, στα ρεύματα που εισέρχονται στον κόμβο θέτουμε θετικό πρόσημο, ενώ στα ρεύματα που εξέρχονται από τον κόμβο θέτουμε αρνητικό πρόσημο:



$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

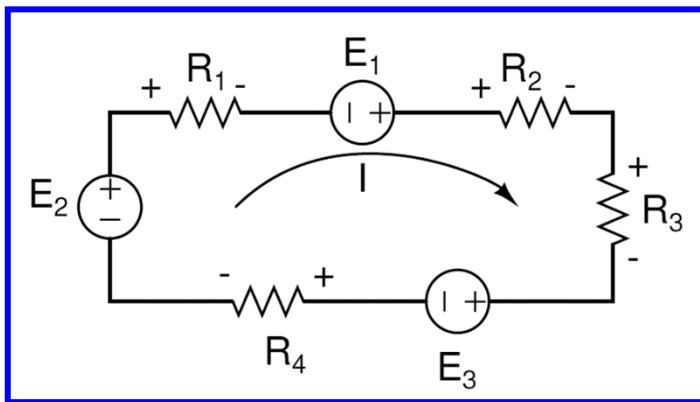


# Ανασκόπηση: 2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchoff

Το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων σε έναν βρόχο (δηλ. κλειστό κύκλωμα) ισούται με 0:

$$\sum_{i=1}^M V_i = 0$$

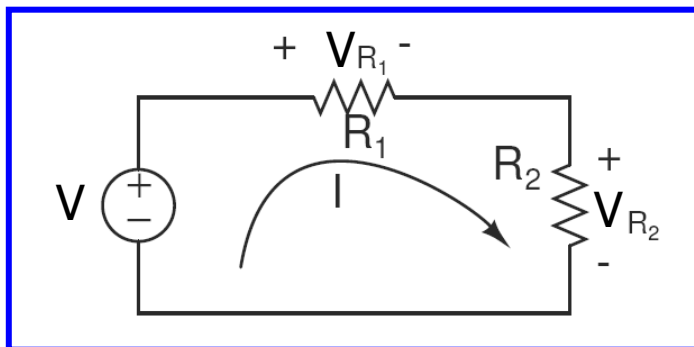
Όταν διατρέχουμε ένα βρόχο δεξιόστροφα, στις πηγές τάσης θέτουμε θετικό πρόσημο, εάν συναντάμε πρώτα τον θετικό ακροδέκτη (πόλο) τους και αρνητικό πρόσημο εάν συναντάμε πρώτα τον αρνητικό ακροδέκτη (πόλο) τους. Στις πτώσεις τάσης των αντιστάσεων θέτουμε θετικό πρόσημο, εάν η φορά που διατρέχουμε το βρόχο είναι ίδια με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις και αρνητικό πρόσημο εάν η φορά που διατρέχουμε το βρόχο είναι αντίθετη με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις.



$$I \cdot R_1 - E_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 + E_3 + I \cdot R_4 - E_2 = 0$$

# Ανασκόπηση: διαιρέτες τάσης και ρεύματος

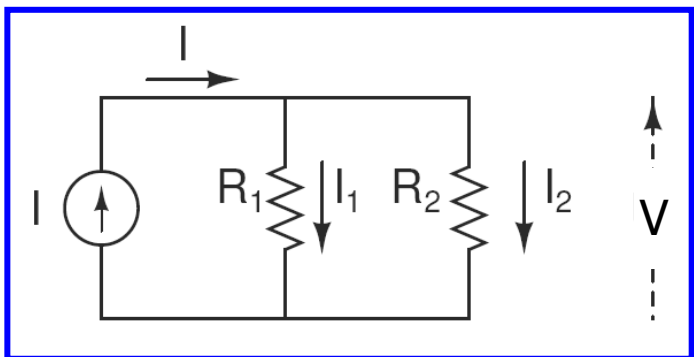
## Διαιρέτης τάσης



$$V_{R_1} = I \cdot R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V$$

$$V_{R_2} = I \cdot R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V$$

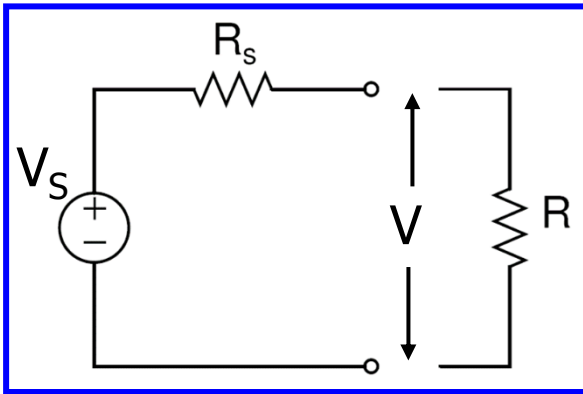
## Διαιρέτης ρεύματος



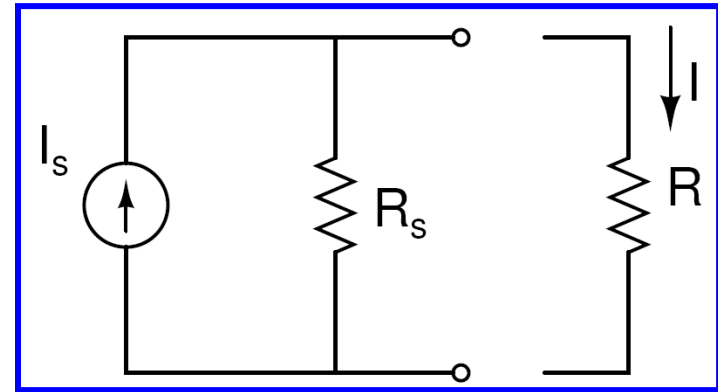
$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{R_{o\lambda} \cdot I}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{R_{o\lambda} \cdot I}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

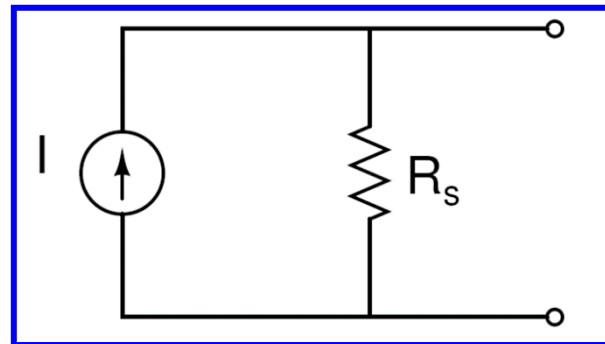
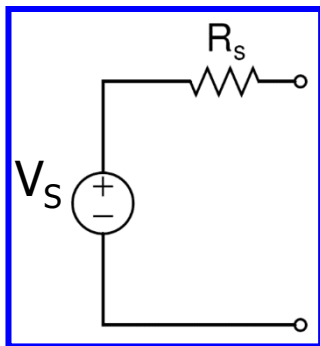
# Ανασκόπηση: πραγματικές πηγές ρεύματος και τάσης



$$V = \frac{R}{R_s + R} \cdot V_S$$



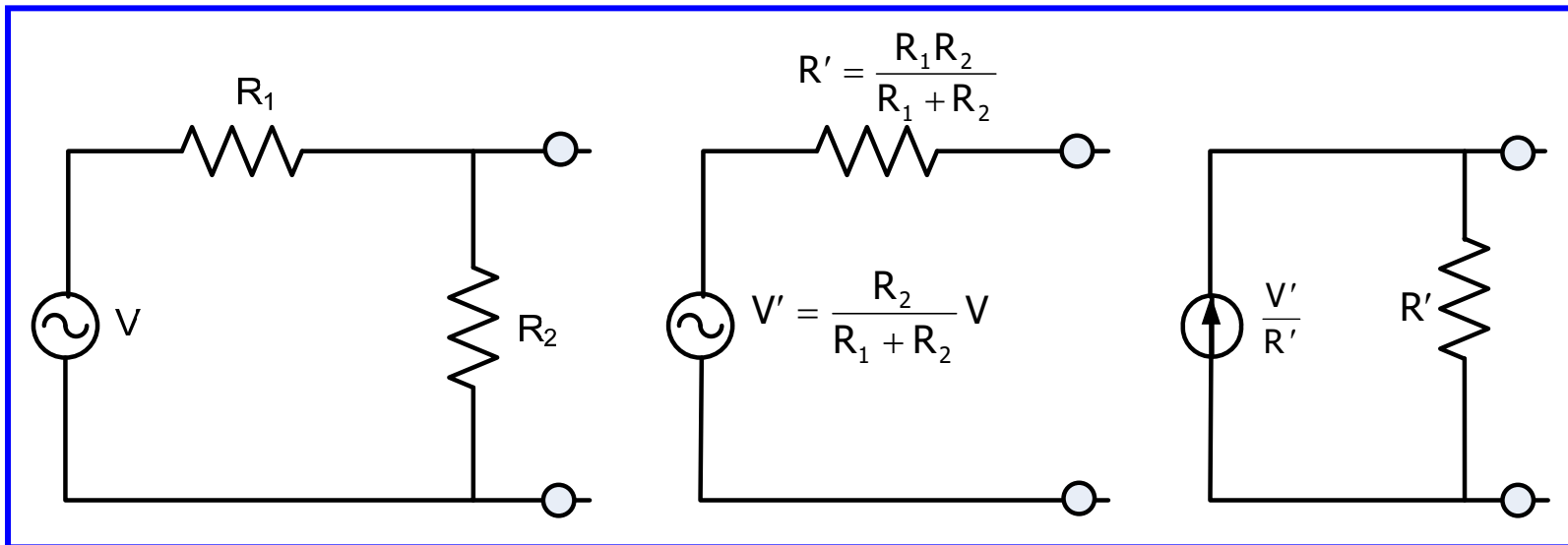
$$I = \frac{R_s}{R_s + R} \cdot I_s$$



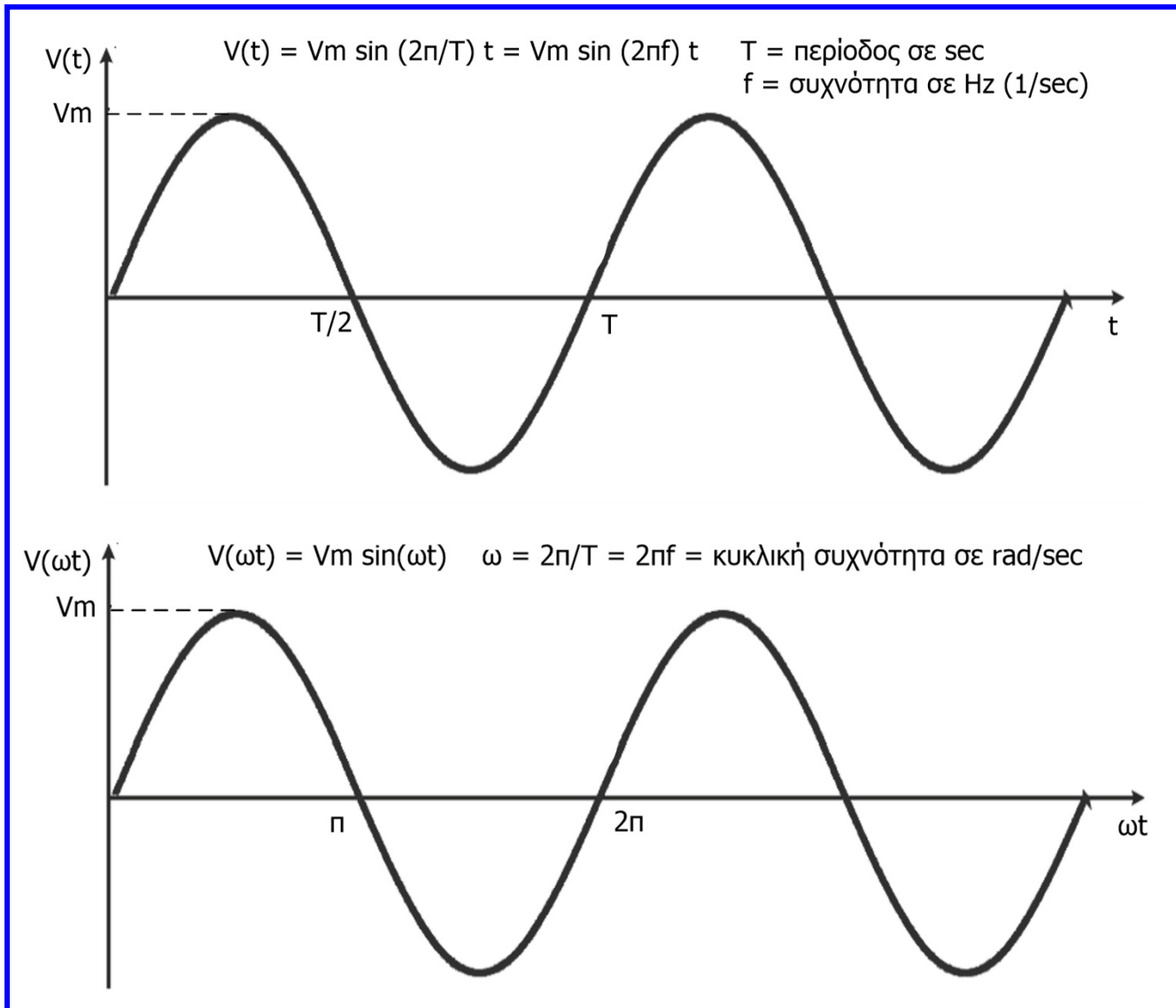
$$I = \frac{V_S}{R_s}$$

# Ανασκόπηση: μετασχηματισμοί Thevenin και Norton

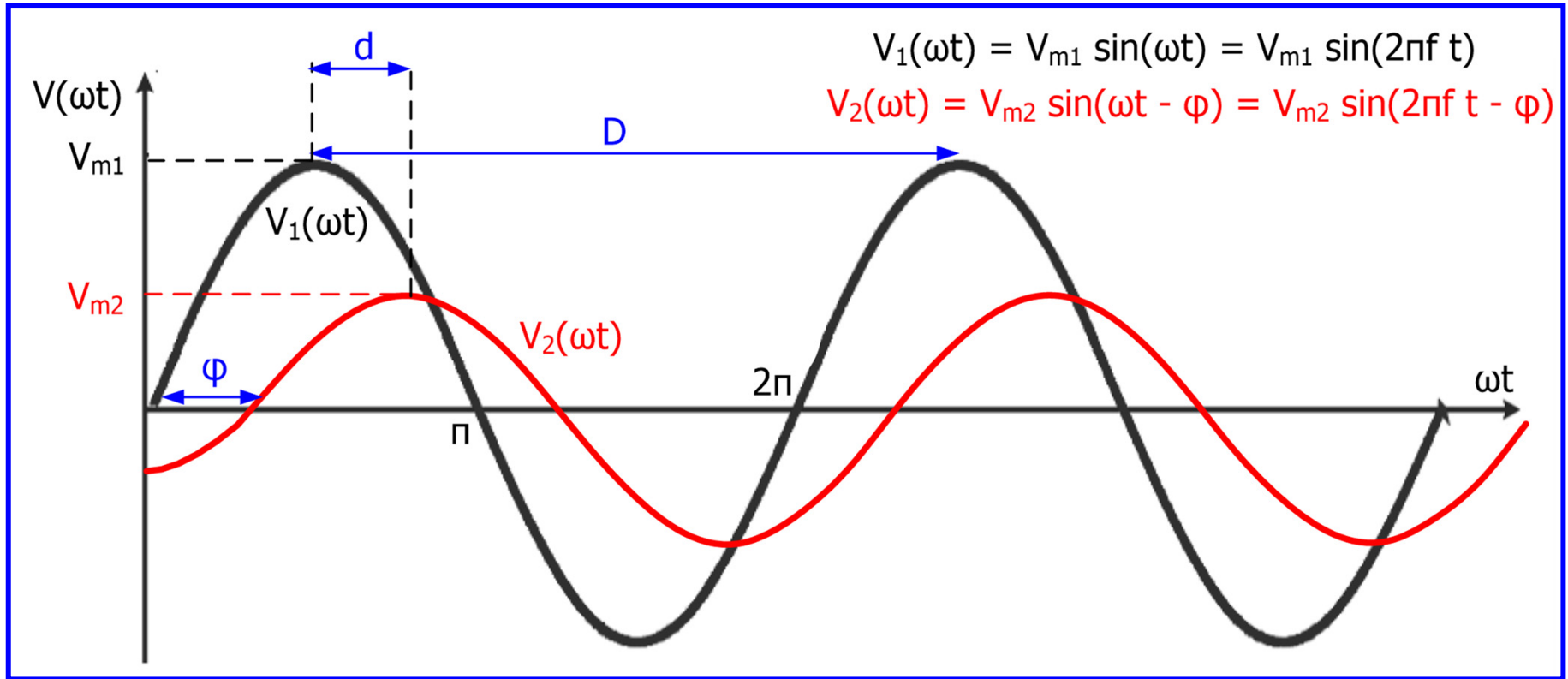
- **Θεώρημα Thevenin:** Κάθε γραμμικό κύκλωμα δύο ακροδεκτών μπορεί να αντικατασταθεί με μία πηγή τάσης ίση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταξύ των ακροδεκτών, σε σειρά με την αντίσταση  $R$  που «φαίνεται» από τους ακροδέκτες αυτούς.
- **Θεώρημα Norton:** Κάθε γραμμικό κύκλωμα δύο ακροδεκτών μπορεί να αντικατασταθεί με μία πηγή ρεύματος ίσου με το ρεύμα βραχυκυκλώματος μεταξύ των ακροδεκτών, παράλληλα με την αντίσταση  $R$  που «φαίνεται» από τους ακροδέκτες αυτούς.
- Η αντίσταση  $R$  υπολογίζεται εάν θεωρήσουμε βραχυκυκλωμένες όλες τις πηγές τάσης και ανοιχτές όλες τις πηγές ρεύματος.



# Ανασκόπηση: ημιτονικά σήματα



# Ανασκόπηση: διαφορά φάσης ημιτονικών σημάτων

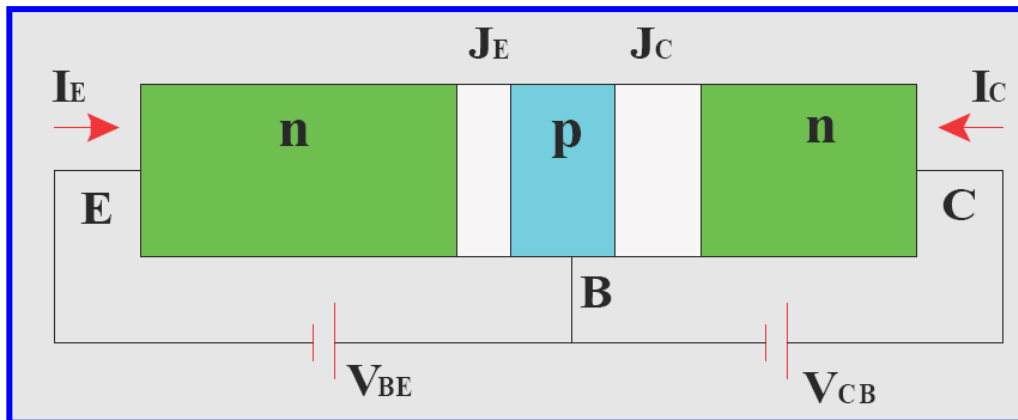


Προηγείται η κυματομορφή της  $V_1$  κατά  $\phi$

$$\phi^\circ = (d / D) \cdot 360$$

# Ανασκόπηση: λειτουργία διπολικού τρανζίστορ (BJT)

- Με τον όρο **πόλωση του τρανζίστορ** αναφερόμαστε στη **λειτουργία του στο συνεχές ρεύμα** και εννοούμε τον τρόπο με τον οποίο πολώνονται οι επαφές που συνιστούν το τρανζίστορ.
- Το τρανζίστορ λειτουργεί ως **ενισχυτική βαθμίδα** όταν η επαφή **βάσης-εκπομπού πολώνεται ορθά** και η επαφή **βάσης-συλλέκτη πολώνεται ανάστροφα** (πόλωση στην **ενεργό περιοχή**).
- Τα ρεύματα φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων βάσης και οπών συλλέκτη) έχουν μικρή συνεισφορά στο ρεύμα συλλέκτη, δηλ. το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης επαφής συλλέκτη  $I_{CBO}$  μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.



Πόλωση στην ενεργό περιοχή (τρανζίστορ npn)

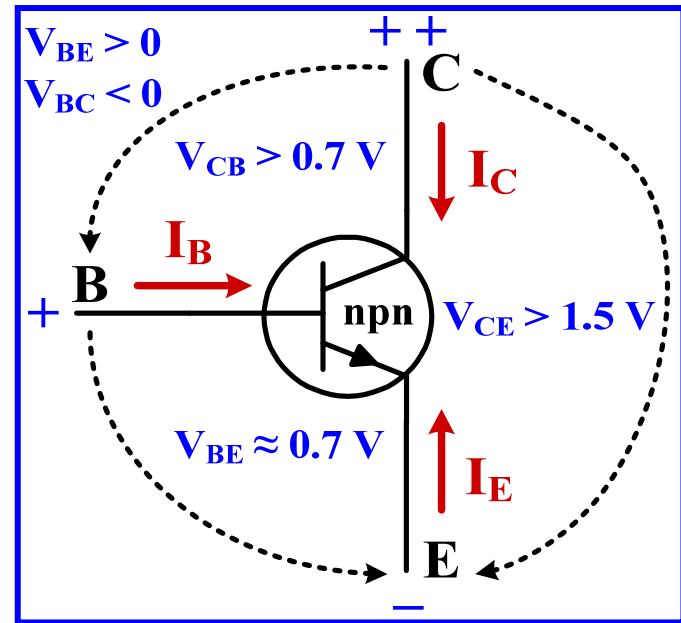
# Ανασκόπηση: λειτουργία διπολικού τρανζίστορ (BJT)

Προσεγγιστική λειτουργία στο συνεχές  
(ενεργός περιοχή)

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$

$$I_C \approx \beta I_B \quad \beta \gg 1$$

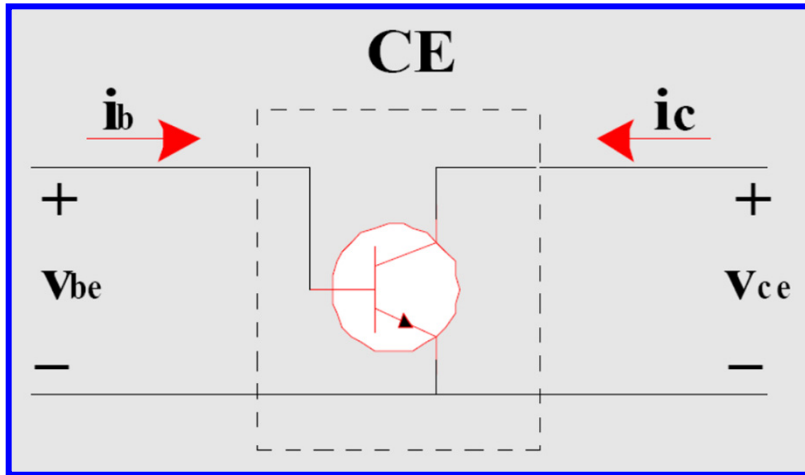
$$I_E = -(I_C + I_B) = -(I_C + \frac{1}{\beta} I_C) \approx -I_C$$



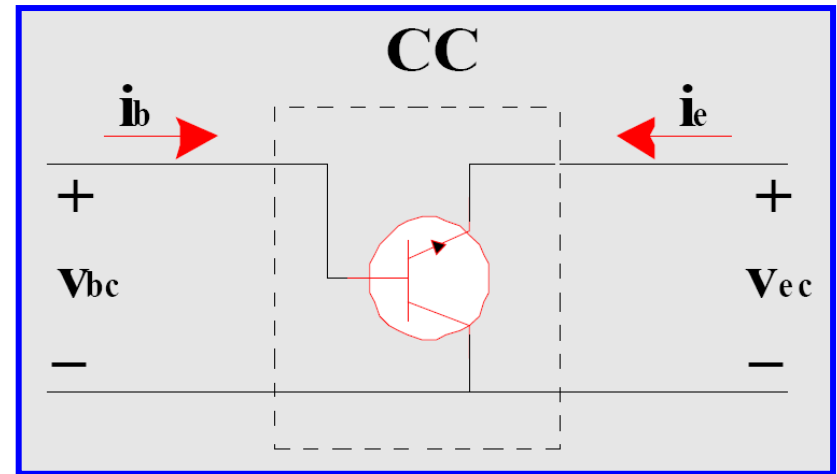
- Το τρανζίστορ προσεγγιστικά λειτουργεί ως δρόμος ρεύματος από τον συλλέκτη στον εκπομπό και το μέγεθος του ρεύματος αυτού ελέγχεται από το ρεύμα βάσης που «σταματά» στη βάση (εάν θεωρήσουμε ότι  $\beta \gg 1$ ).
- Το συνεχές δυναμικό βάσης είναι υψηλότερο από το δυναμικό εκπομπού ( $V_{BE} \cong 0,7 \text{ V}$  για τρανζίστορ πυριτίου τύπου npn) και το συνεχές δυναμικό συλλέκτη είναι υψηλότερο από το δυναμικό βάσης
- $\beta$ : ενίσχυση (απολαβή) ρεύματος στο συνεχές (συνήθως από 50 έως 350).



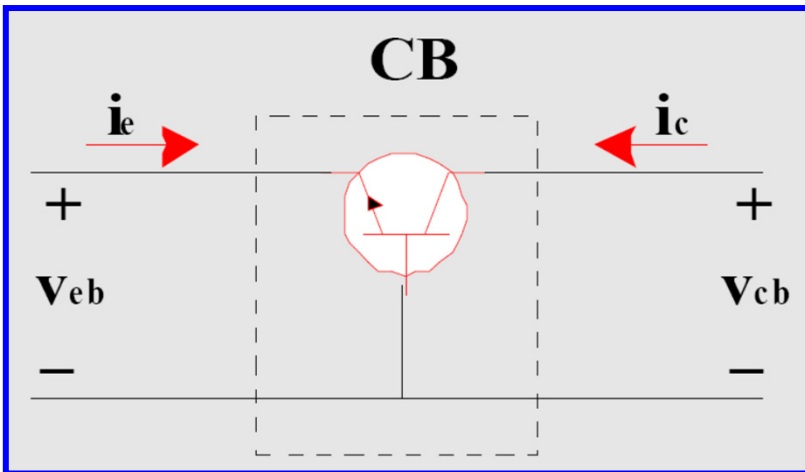
# Ανασκόπηση: τρόποι σύνδεσης διπολικού τρανζίστορ



Σύνδεση κοινού εκπομπού



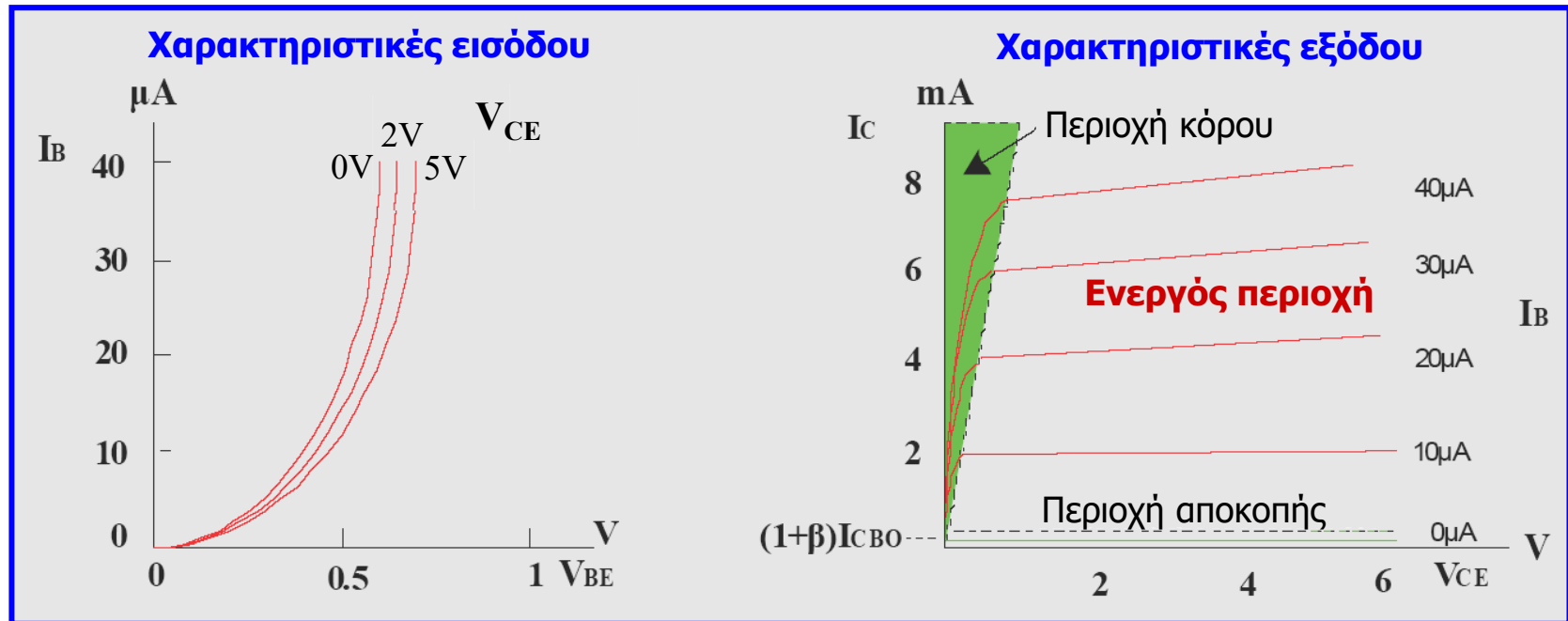
Σύνδεση κοινού συλλέκτη



Σύνδεση κοινής βάσης

# Ανασκόπηση: χαρακτηριστικές διπολικού τρανζίστορ

- Χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου και εξόδου διπολικού τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού:



- Τα ρεύματα συλλέκτη και βάσης διαφέρουν περίπου κατά δύο τάξεις μεγέθους.
- Το τρανζίστορ λειτουργεί ως **ενισχυτική βαθμίδα** όταν πολώνεται στην ενεργό περιοχή (όπου ισχύει προσεγγιστικά:  $I_C = \beta I_B$ ), ενώ όταν λειτουργεί ως **διακόπτης** αλλάζει κατάσταση αγωγής μεταξύ των περιοχών κόρου & αποκοπής.

# Εισαγωγή στους ενισχυτές

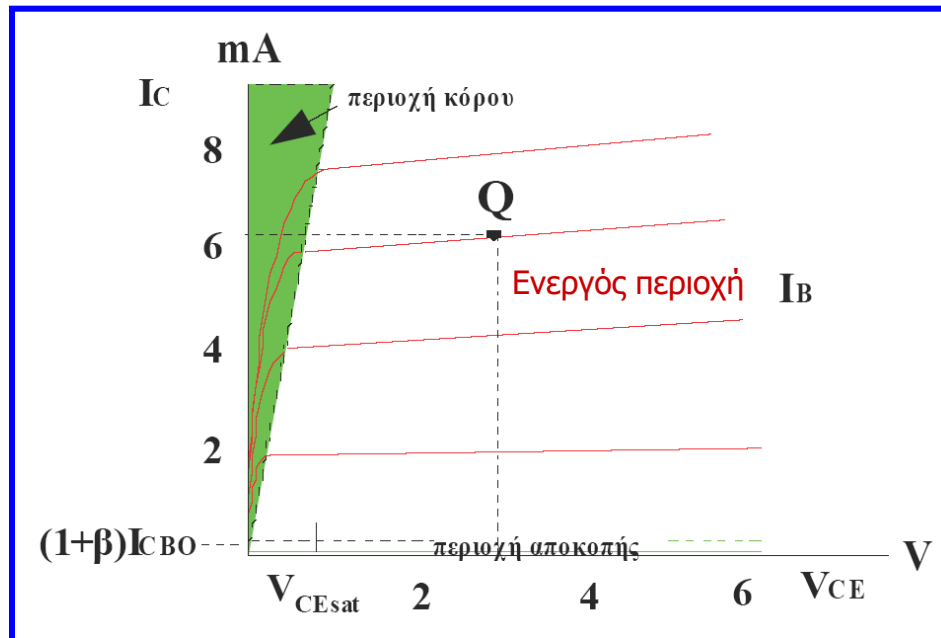
- Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία αναλογικών σημάτων είναι η ενίσχυση τους που επιτυγχάνεται με δίθυρα ηλεκτρονικά κυκλώματα μίας κατεύθυνσης (από την είσοδο προς την έξοδο) που ονομάζονται **ενισχυτές**.
- Σήματα από πηγές τάσης ή ρεύματος που εφαρμόζονται στην είσοδο ενός ενισχυτή, αναπαράγονται ενισχυμένα στην έξοδό του.
- Ο λόγος του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου καθορίζει το **κέρδος (gain)** ή αλλιώς την **ενίσχυση (amplification)** του ενισχυτή.
- Επειδή τα σήματα μπορεί να είναι τάσεις ή ρεύματα, ο λόγος τους μπορεί να εκφράζει **ενίσχυση τάσης, ενίσχυση ρεύματος, διαγωγιμότητα ή διεμπέδηση**.
- Ένας ενισχυτής παρεμβάλλεται μεταξύ μίας πηγής σήματος και ενός φορτίου, ενεργεί δηλαδή ως βαθμίδα προσαρμογής του φορτίου προς την πηγή σήματος.
- Η βασική συμπεριφορά των ενισχυτών προσδιορίζεται από την ενίσχυσή τους, την αντίσταση (ή εμπέδηση) εισόδου και την αντίσταση (ή εμπέδηση) εξόδου.
- Η σχέση αναλογίας που υπάρχει στους ενισχυτές μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου, τους χαρακτηρίζει ως **αναλογικά κυκλώματα**.

# Απλές βαθμίδες ενισχυτών

- Η ενίσχυση ενός σήματος επιτυγχάνεται μέσω **ελεγχόμενων πηγών σήματος**.
- Οι **ελεγχόμενες πηγές σήματος** υλοποιούνται με **τρανζίστορ**, τα οποία αποτελούν και τη βάση για τη δημιουργία ενισχυτών.
- Μία **απλή βαθμίδα ενισχυτή** (ενισχυτής μίας βαθμίδας) δημιουργείται από διακριτά στοιχεία, όπως ένα τρανζίστορ, αντιστάσεις και πυκνωτές.
- Οι **ενισχυτές** παρεμβάλλονται **μεταξύ** μιας **πηγής σήματος** (που μπορεί να είναι μία πραγματική πηγή ή μία προηγούμενη ενισχυτική βαθμίδα) και ενός **φορτίου** (που μπορεί να είναι και μία επόμενη ενισχυτική βαθμίδα).
- Η πηγή σήματος οδηγεί την είσοδο του ενισχυτή με το σήμα εισόδου, το οποίο αφού ενισχυθεί από τον ενισχυτή εφαρμόζεται ενισχυμένο στο φορτίο.
- Για την μελέτη ενός ενισχυτή, αρχικά προσδιορίζουμε τα μεγέθη (τάσεις, ρεύματα) που αφορούν τη **λειτουργία** του στο **συνεχές** ρεύμα (δηλ. μόνο με την εφαρμογή συνεχούς τάσης τροφοδοσίας) με χρήση κανόνων Kirchhoff και των σχέσεων που διέπουν τη λειτουργία του τρανζίστορ και στη συνέχεια διενεργούμε ανάλυση **λειτουργίας** του ενισχυτή στο **εναλλασσόμενο** ρεύμα (δηλ. με ταυτόχρονη εφαρμογή εναλλασσόμενου σήματος στην είσοδό του ενισχυτή).

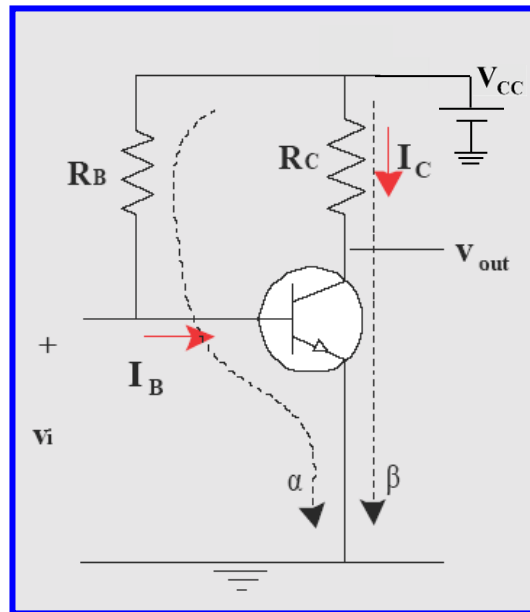
# Μελέτη ενισχυτών στο συνεχές (πόλωση)

- Με τον όρο **πόλωση** ενός τρανζίστορ αναφερόμαστε στη λειτουργία του στο συνεχές και εννοούμε τον τρόπο με τον οποίο πολώνονται οι δύο επαφές του.
- Για να λειτουργήσει ένα **διπολικό τρανζίστορ** ως **ενισχυτής** θα πρέπει να πολωθεί στην **ενεργό περιοχή**.
- Το ζεύγος τιμών ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ) που προκύπτει με την εν λόγω πόλωση, καθορίζει στις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ ένα σημείο Q που αναφέρεται ως **σημείο λειτουργίας** ή **σημείο ηρεμίας**.



# Σταθερή πόλωση

- Η ανάλυση ενός ενισχυτή για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων του και του σημείου λειτουργίας βασίζεται στους κανόνες του Kirchhoff και στις σχέσεις που διέπουν την προσεγγιστική λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ.
- Υπάρχουν αρκετές τοπολογίες κυκλωμάτων κατάλληλες για την πόλωση του διπολικού τρανζίστορ τύπου **npn** στην ενεργό περιοχή.
- **Κύκλωμα σταθερής πόλωσης:** χρησιμοποιεί μία πηγή συνεχούς τάσης  $V_{CC}$  και δύο αντιστάσεις και το ρεύμα βάσης δεν εξαρτάται από το ρεύμα συλλέκτη.



Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}$$
$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

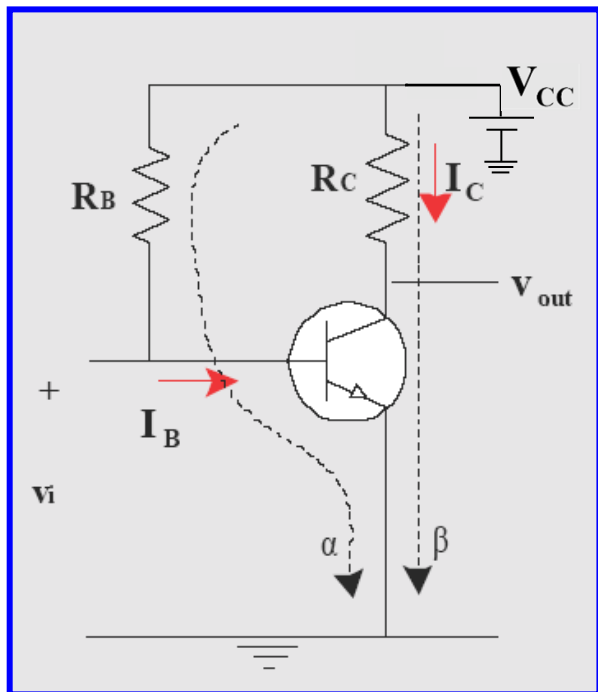
$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V για τρανζίστορ Si}$$

Με τις σχέσεις αυτές υπολογίζεται εύκολα το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ) εάν είναι γνωστά η τάση της πηγής συνεχούς και οι αντιστάσεις ή αντίστροφα

# Παράδειγμα 1<sup>ο</sup>: σταθερή πόλωση

Εάν είναι επιθυμητό το σημείο λειτουργίας για κύκλωμα σταθερής πόλωσης ενός διπολικού τρανζίστορ πυριτίου να είναι  $Q (V_{CE}, I_C) = Q (5V, 1mA)$  να υπολογιστούν οι αντιστάσεις  $R_B$  και  $R_C$ . Δίνονται  $V_{CC} = 10V$ ,  $\beta=100$  και  $V_{BE} = 0.7V$ .



$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 10 \mu A$$

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} \Rightarrow R_B = 930 \text{ k}\Omega$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \Rightarrow R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{BE} = 0.7V \Rightarrow$$

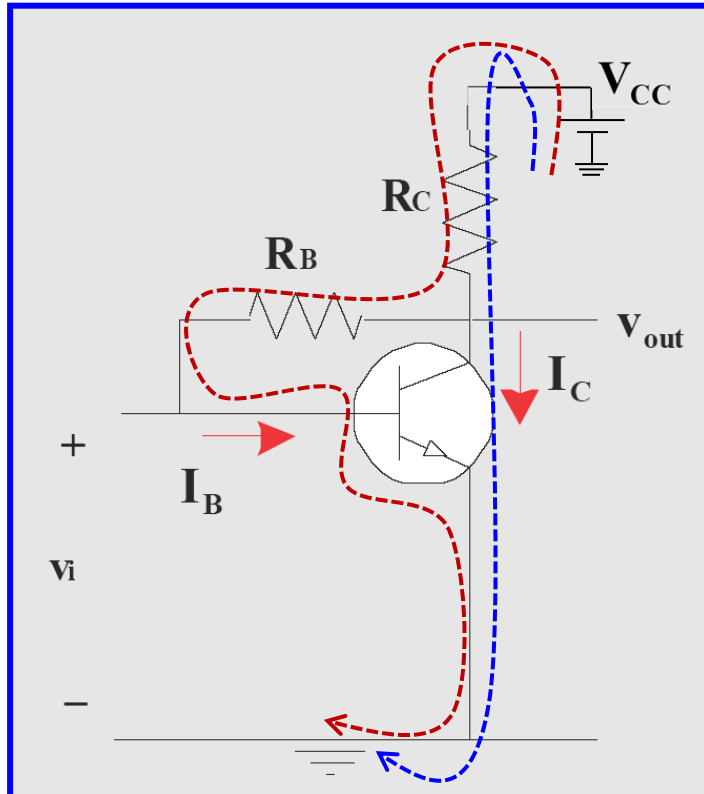
επαφή βάσης-εκπομπού **ορθά πολωμένη**

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \Rightarrow V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -4.3V \Rightarrow$$

επαφή βάσης-συλλέκτη **ανάστροφα πολωμένη**

# Πόλωση από το συλλέκτη

Κύκλωμα με πόλωση από το συλλέκτη



Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

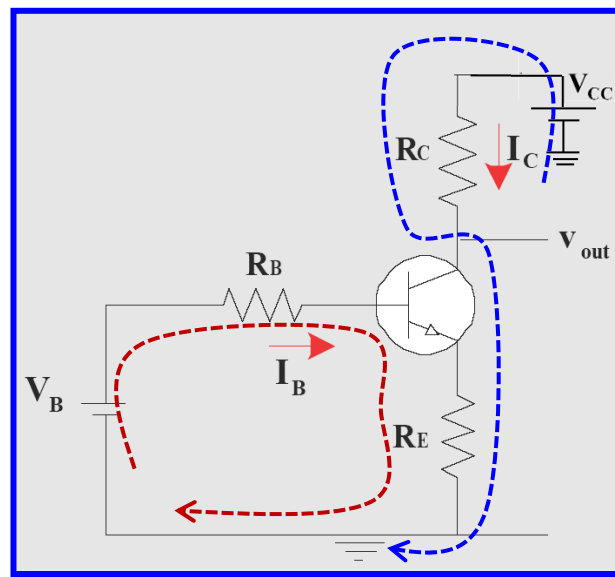
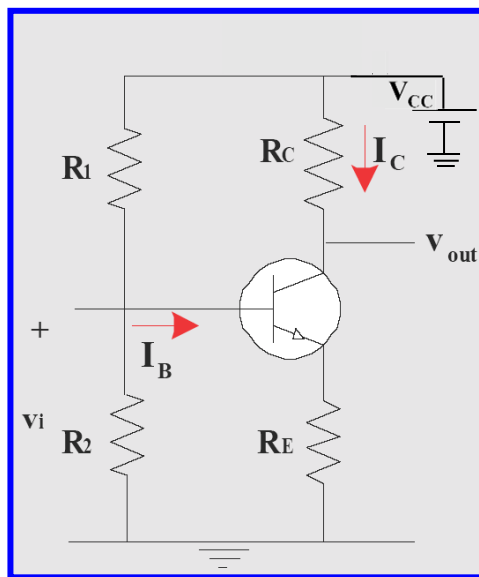
$$V_{CC} = (I_C + I_B)R_C + I_B R_B + V_{BE}$$

$$V_{CC} = (I_C + I_B)R_C + V_{CE}$$



# Πόλωση με διαιρέτη τάσης και αυτοπόλωση εκπομπού

Κύκλωμα με διαιρέτη τάσης και αυτοπόλωση εκπομπού



Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin

Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E$$

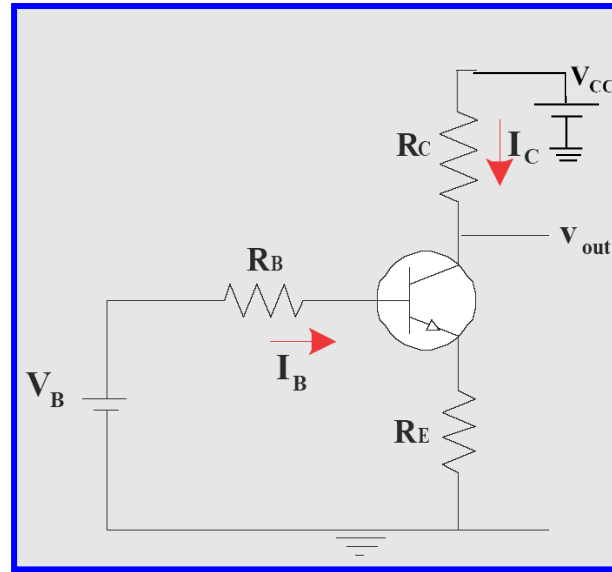
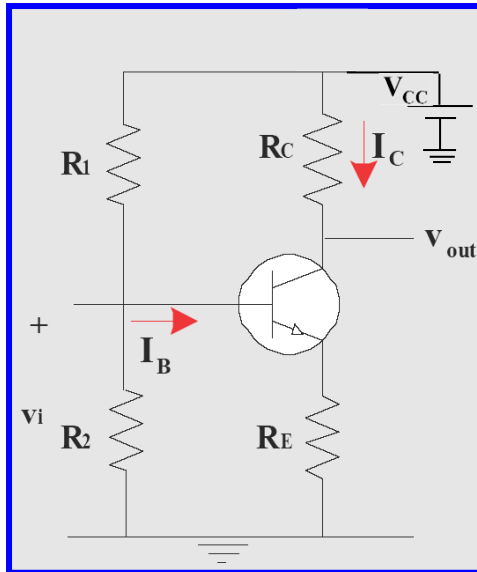
$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B) R_E$$

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

$$R_B = R_1 // R_2$$

# Παράδειγμα 2<sup>ο</sup>: πόλωση με διαιρέτη τάσης

Να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας για κύκλωμα με διαιρέτη τάσης και αυτοπόλωση εκπομπού, όταν δίνονται  $R_1 = 85\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 20\text{k}\Omega$ ,  $R_C = 2\text{k}\Omega$ ,  $R_E = 0.5\text{k}\Omega$ ,  $\beta = 200$ ,  $V_{CC} = 10\text{ V}$  και  $V_{BE} = 0.73\text{V}$ .



$$R_B = R_1 // R_2 = 16,2\text{ K}$$

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,9\text{ V}$$

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 10\mu\text{A} \Rightarrow I_C = \beta I_B = 2\text{mA}$$

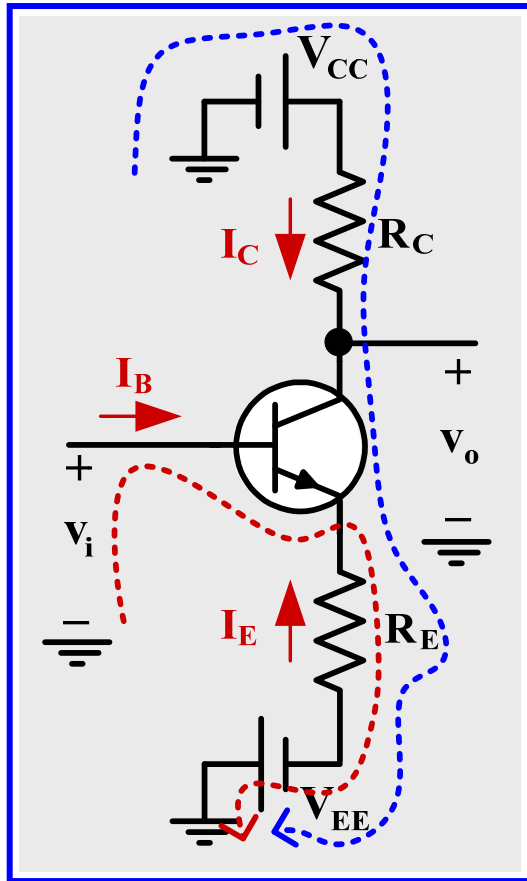
$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B) R_E$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 5\text{V}$$

$$Q(V_{CE}, I_C) = Q(5\text{V}, 2\text{mA})$$

# Πόλωση με συμμετρικές πηγές τάσης

Κύκλωμα πόλωσης με  
συμμετρικές πηγές τάσης



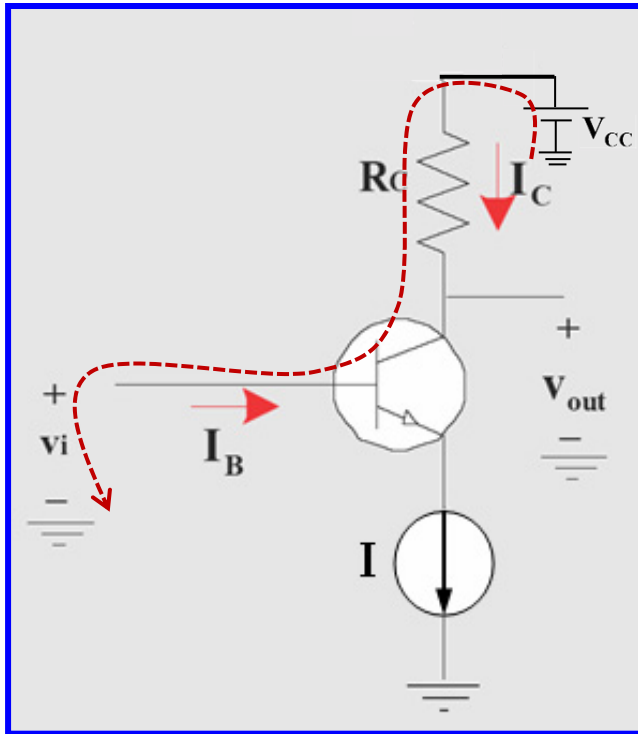
Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$V_{BE} + (I_C + I_B)R_E - V_{EE} = 0$$

$$V_{CC} + V_{EE} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B)R_E$$

# Πόλωση με σταθερή πηγή ρεύματος

Κύκλωμα πόλωσης με σταθερή πηγή ρεύματος



Με 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$I = I_C + I_B \quad I_B = I_C / \beta \quad \Rightarrow \quad I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I \Rightarrow I_C = \frac{1}{1 + 1/\beta} \cdot I$$

Εάν θεωρήσουμε ότι  $\beta \gg 1$  τότε  $I_C = I$ .

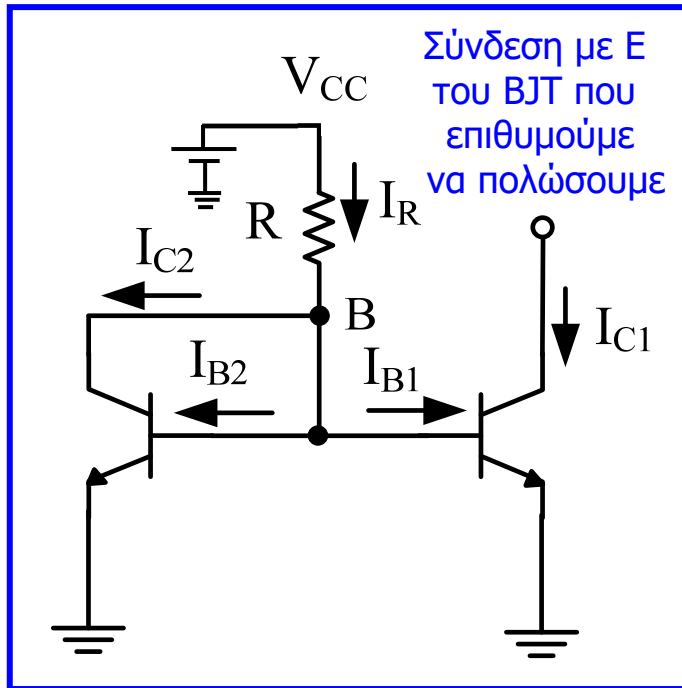
Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$\begin{aligned} -V_{CC} + I_C R_C + V_{CB} &= 0 \Rightarrow \\ -V_{CC} + I_C R_C - (V_{BE} + V_{EC}) &= 0 \Rightarrow \\ -V_{CC} + I_C R_C - (V_{BE} - V_{CE}) &= 0 \Rightarrow \\ V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C + V_{BE} \end{aligned}$$

Το κύκλωμα αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι το ρεύμα  $I$  που παρέχεται στον εκπομπού του τρανζίστορ είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την τιμή της ενίσχυσης ρεύματος  $\beta$  του τρανζίστορ.

# Πόλωση με σταθερή πηγή ρεύματος

Η πηγή σταθερού ρεύματος υλοποιείται με **κύκλωμα καθρέπτη ρεύματος** που αποτελείται από 2 διπολικά τρανζίστορ.



Για μεγάλο  $\beta$  προκύπτει ότι το ρεύμα που παρέχει η πηγή ρεύματος είναι σταθερό ( $I_C = I_R$ ). Για παράδειγμα, όταν  $\beta=100$ , το ρεύμα αυτό είναι κατά 2% μόνο μικρότερο από το σταθερό ρεύμα που διαρρέει την R.

Οι  $V_{BE}$  των τρανζίστορ είναι **ίσες** και αφού τα τρανζίστορ είναι όμοια, τα **ρεύματα βάσης** και **συλλέκτη** είναι επίσης **ίσα**.

$$V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}, \quad \beta_1 = \beta_2 = \beta \\ I_{C1} = I_{C2} = I_C, \quad I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

Με 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff:

$$V_{CC} = V_{BE} + I_R R \Rightarrow I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

Με 1<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff (κόμβος B):

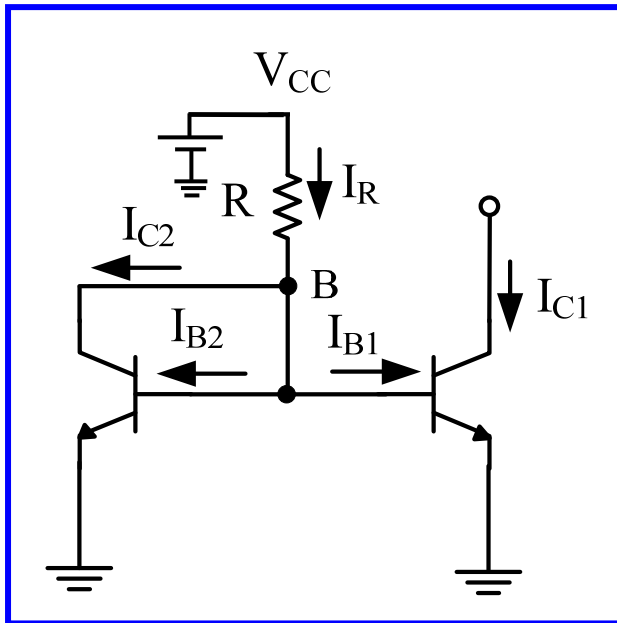
$$I_C + 2 \cdot I_B - I_R = 0 \quad \overset{I_B = I_C / \beta}{\Rightarrow} \quad I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R \Rightarrow$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \Rightarrow$$

$$I_C = \frac{1}{1 + 2/\beta} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

# Παράδειγμα 3<sup>ο</sup>: πόλωση με σταθερή πηγή ρεύματος

Για την παρακάτω πηγή (καθρέπτη) ρεύματος που περιλαμβάνει δύο όμοια τρανζίστορ, να προσδιοριστεί η τιμή της αντίστασης  $R$ , ώστε το ρεύμα εξόδου της να είναι  $1 \text{ mA}$ . Δίνονται:  $\beta = 100$ ,  $V_{CC} = 15 \text{ V}$  και  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ . Να προσδιοριστεί επίσης η ποσοστιαία μεταβολή του ρεύματος εξόδου της πηγής όταν  $\beta = 200$ . Στη συνέχεια να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας ενός επίσης όμοιου τρανζίστορ με  $R_c = 10 \text{ k}\Omega$ , εάν για την πόλωσή του χρησιμοποιηθεί η παρακάτω πηγή ρεύματος.



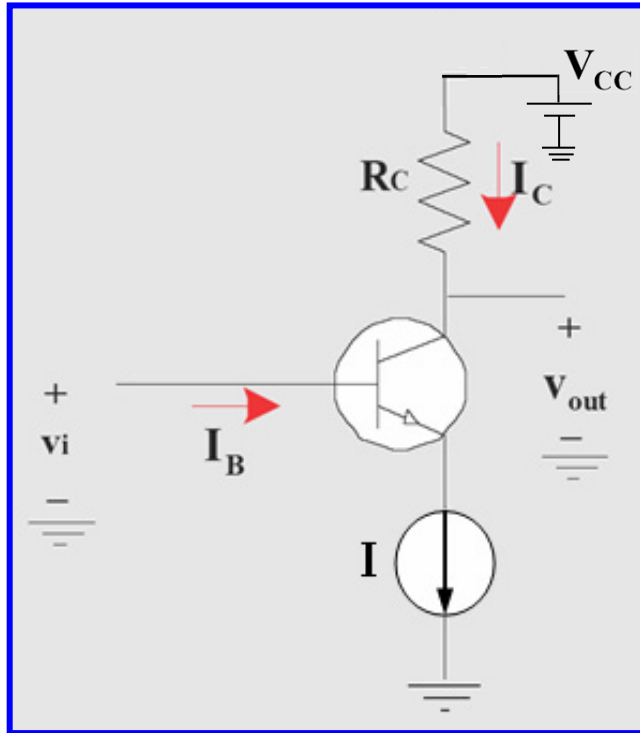
$$I_C + 2 \cdot I_B - I_R = 0 \quad \overset{I_B = I_C / \beta}{\Rightarrow} \quad I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R \Rightarrow$$
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \Rightarrow R = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_C} = 14 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 200 \Rightarrow I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} = 1.0099 \text{ mA}$$

Ποσοστιαία μεταβολή:

$$\frac{1.0099 - 1}{1} \cdot 100 = 0.99 \%$$

# Παράδειγμα 3<sup>ο</sup>: πόλωση με σταθερή πηγή ρεύματος



$$I = I_C + I_B \quad I_B = I_C / \beta \quad \Rightarrow \quad I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I = \frac{1}{1 + 1/\beta} \cdot I$$

$$I = 1 \text{ mA} \quad \Rightarrow \quad I_C = 0.99 \text{ mA}$$

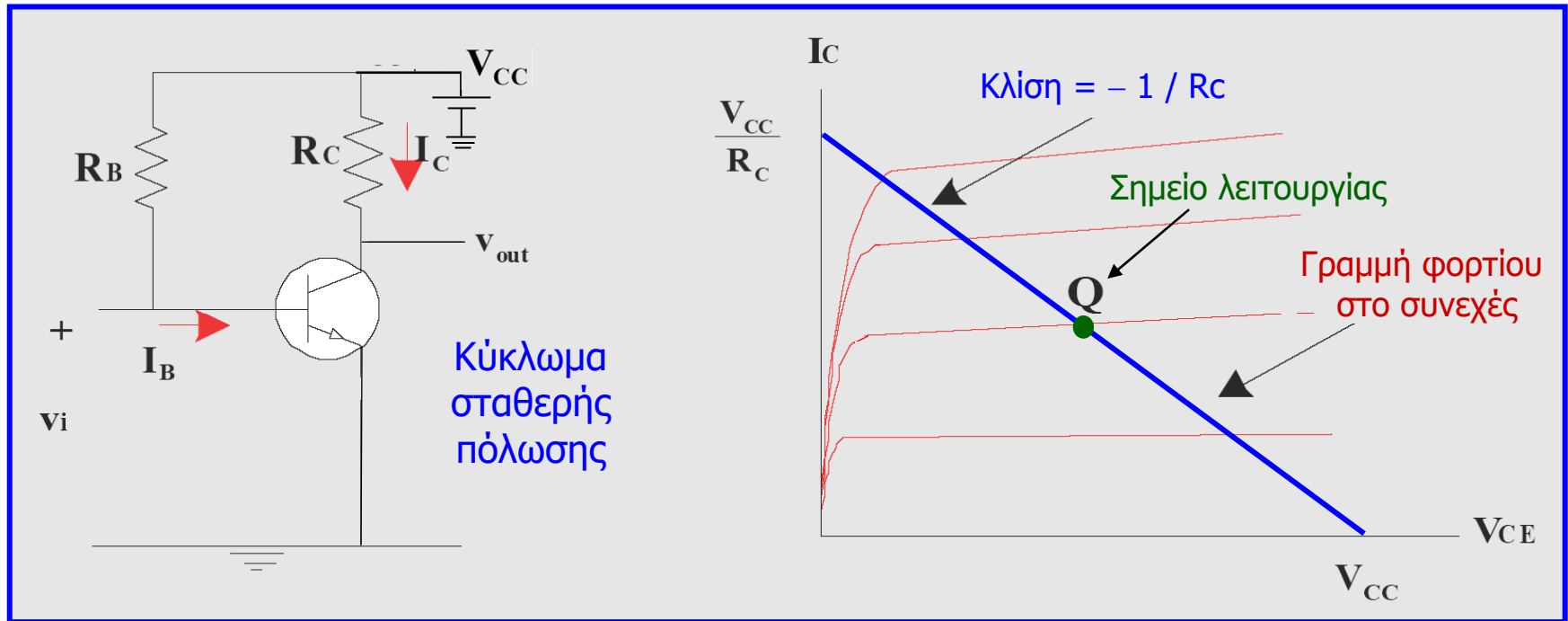
Εάν θεωρήσουμε ότι  $\beta \gg 1$  τότε  $I_C = I = 1 \text{ mA}$ .

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C + V_{BE} \Rightarrow V_{CE} = 5.8 \text{ V}$$

$$Q(V_{CE}, I_C) = Q(5.8 \text{ V}, 1 \text{ mA})$$

Οι τοπολογίες κυκλωμάτων πόλωσης που εξετάσαμε αφορούν διπολικό τρανζίστορ τύπου npn. Η πόλωση **διπολικού τρανζίστορ τύπου npn** εξετάζεται στις ασκήσεις 2 και 5 της 1<sup>ης</sup> ενότητας.

# Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο συνεχές



2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff  
στο **βρόχο εξόδου**:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

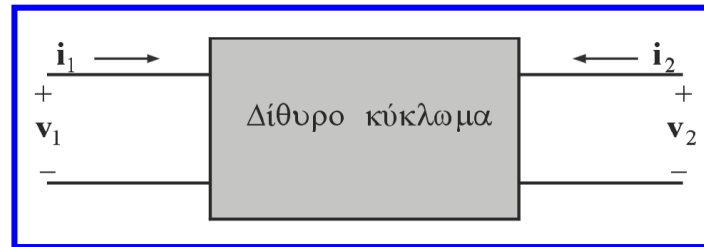
Εάν χαράξουμε στους ίδιους άξονες με τις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ, τη γραφική παράσταση της σχέσης που δίνει την εξάρτηση του  $I_C$  από την  $V_{CE}$ , προκύπτει μία ευθεία γραμμή με κλίση  $(-1/R_C)$  που αναφέρεται ως **γραμμή φορτίου (ή ευθεία φόρτου) στο συνεχές** και καθορίζει την ευθεία στην οποία κινείται το Q για διάφορες τιμές του  $I_B$ , το οποίο καθορίζεται από την  $R_B$  (με δεδομένα  $V_{CC}$ ,  $R_C$ )

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}, \quad V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC}/R_C$$

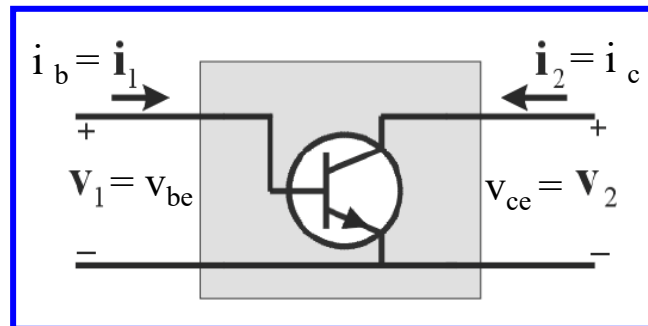


# Μελέτη ενισχυτών στο εναλλασσόμενο

- Με τον όρο λειτουργία ενισχυτών στο εναλλασσόμενο, εννοούμε ότι στην είσοδο του ενισχυτή εφαρμόζεται μικρό (ασθενές) ημιτονικό σήμα & διενεργείται ανάλυση για να διαπιστωθεί πως το σήμα αυτό μεταφέρεται στην έξοδο του ενισχυτή.
- Για την ανάλυση της **λειτουργίας** των **ενισχυτών** στο **εναλλασσόμενο**, χρησιμοποιούμε την περιγραφή τους ως **δίθυρα κυκλώματα**.

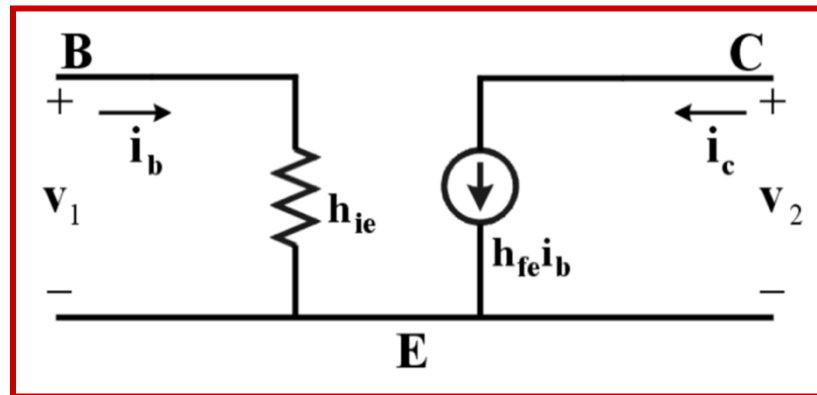


- Για παράδειγμα το **διπολικό τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού** μπορεί να αντιμετωπιστεί και να αναλυθεί ως δίθυρο κύκλωμα:



# Ισοδύναμα μοντέλα διπολικού τρανζίστορ

- Για να μελετήσουμε τη λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ στο εναλλασσόμενο χρησιμοποιούμε το **h-υβριδικό ισοδύναμο μοντέλο** που περιγράφει τη λειτουργία του τρανζίστορ στην **περιοχή των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων**.
- Το μοντέλο είναι **γραμμικό** και συνίσταται από μία **ελεγχόμενη πηγή ρεύματος** και ένα **ωμικό στοιχείο** και οι παράμετροί του δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας.
- Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων υφίσταται επίδραση από τις εσωτερικές χωρητικότητες των επαφών του τρανζίστορ και έτσι το γραμμικό μοντέλο δεν προσεγγίζει με επαρκή ακρίβεια τη συμπεριφορά του τρανζίστορ.
- Το **απλοποιημένο ισοδύναμο μοντέλο (κύκλωμα) του τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού** περιγράφεται μέσω των h-παραμέτρων  $h_{ie}$  (ωμικό στοιχείο εισόδου) και  $h_{fe}$  (καθαρός αριθμός που δηλώνει την ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ):

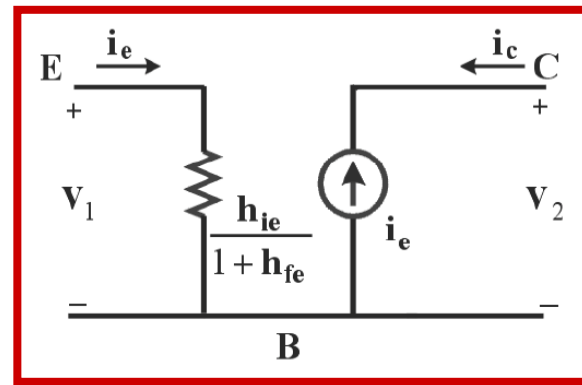
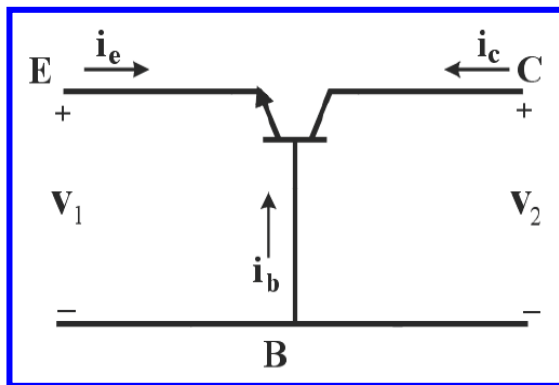


# Ισοδύναμα μοντέλα διπολικού τρανζίστορ

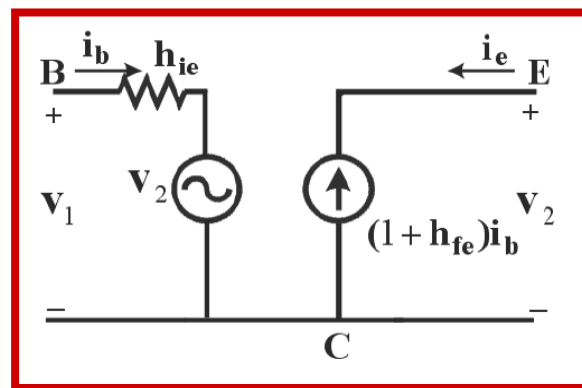
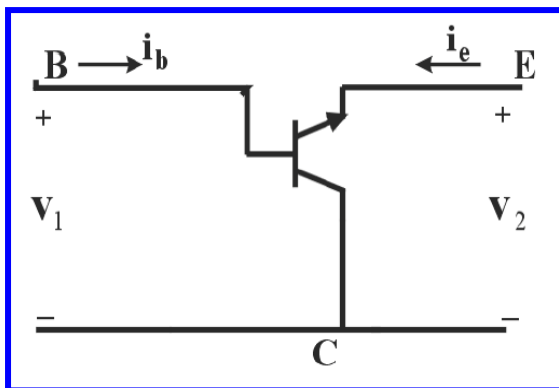
- Οι **τιμές ηρεμίας** ρευμάτων και τάσεων υπολογίζονται με τη μέθοδο της πόλωσης και δεν επηρεάζουν την ανάλυση λειτουργίας του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος.
- Το **ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος** χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων και των ρευμάτων σε σχέση με το σημείο λειτουργίας (δηλ. με τα μεγέθη  $V_{CE}$ ,  $I_C$  που υπολογίστηκαν από την ανάλυση λειτουργίας στο συνεχές), που προκαλούνται από την εφαρμογή μικρού (ασθενούς) σήματος στην είσοδο του ενισχυτή.
- Κατά τη **δημιουργία του ισοδύναμου κυκλώματος** μικρού σήματος, οι **πηγές σταθερής τάσης** και οι **πυκνωτές** αντιμετωπίζονται ως **βραχυκυκλώματα**, ενώ οι **πηγές σταθερού ρεύματος** ως **ανοιχτά κυκλώματα**.
- Η ισοδυναμία των εξωτερικών πυκνωτών με βραχυκυκλώματα δεν είναι ακριβής στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, αλλά είναι **ακριβής στις μεσαίες συχνοότητες**.
- Αντικαθιστούμε το(α) τρανζίστορ με το ισοδύναμο κύκλωμά του(ς), διατηρώντας τους ακροδέκτες B, C, E και τα υπόλοιπα στοιχεία στις ίδιες θέσεις με το αρχικό κύκλωμα.
- Υπολογίζουμε τα ζητούμενα μεγέθη (τάσεις, ρεύματα κλπ.) με εφαρμογή των κανόνων Kirchhoff στους κόμβους και τους βρόχους του γραμμικού κυκλώματος που προκύπτει.
- **Συμβολισμοί τάσεων και ρευμάτων**: με κεφαλαία γράμματα και δείκτες (π.χ.  $I_B$ ) συμβολίζονται οι τιμές ηρεμίας, με μικρά γράμματα και δείκτες οι τιμές των μεταβολών μικρού σήματος (π.χ.  $i_b$ ), ενώ με μικρά γράμματα και κεφαλαίους δείκτες οι ολικές στιγμιαίες τιμές (π.χ.  $i_B$ ).

# Ισοδύναμα μοντέλα διπολικού τρανζίστορ

Εκτός από το μοντέλο του διπολικού τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού, έχουν προσδιοριστεί και μοντέλα διπολικού τρανζίστορ για **σύνδεση κοινής βάσης** και **σύνδεση κοινού συλλέκτη**. Τα μοντέλα αυτά προκύπτουν με βάση το απλοποιημένο μοντέλο κοινού εκπομπού.

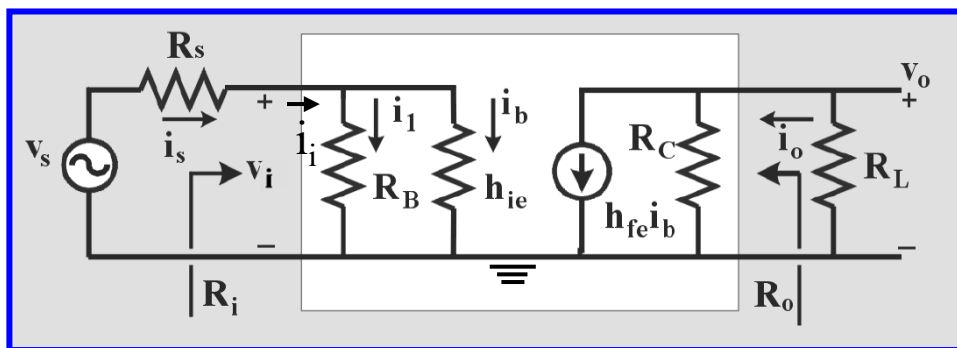
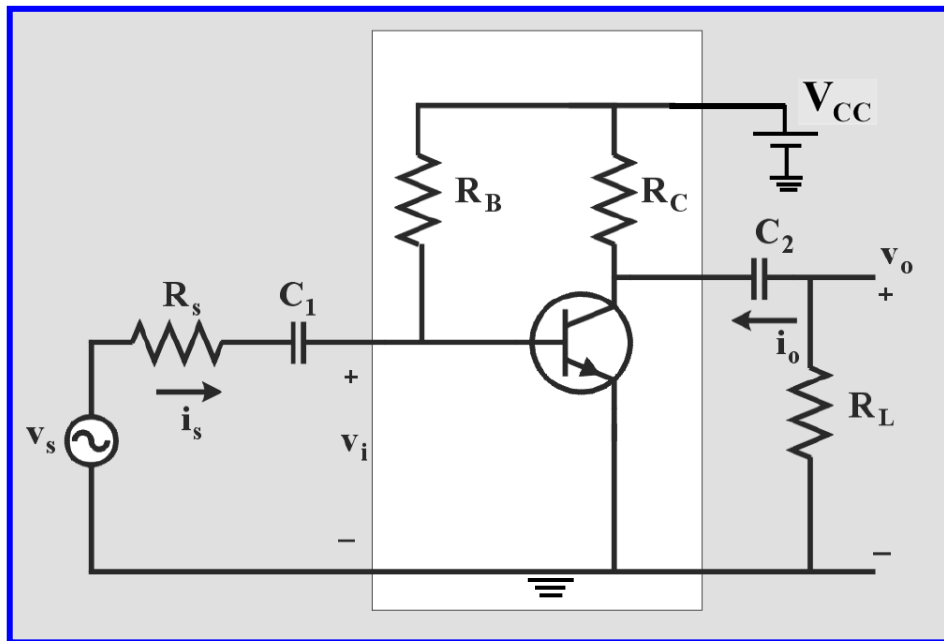


← Ισοδύναμο μοντέλο κοινής βάσης



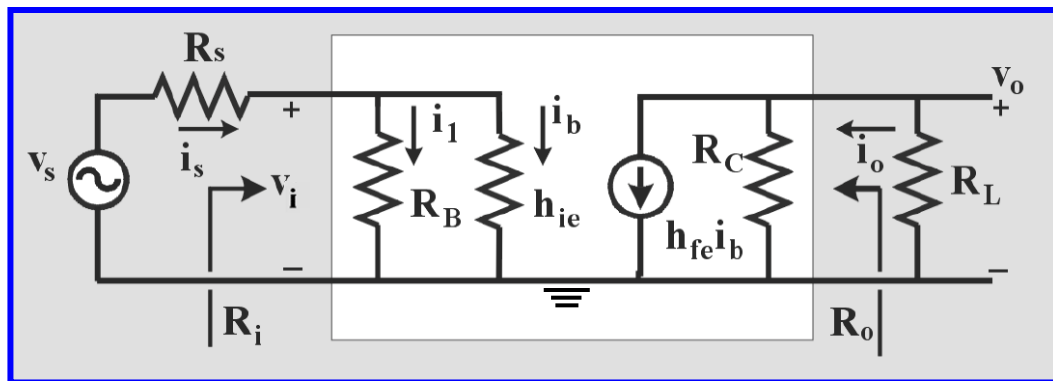
← Ισοδύναμο μοντέλο κοινού συλλέκτη

# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού εκπομπού



- Ο ενισχυτής συνδέεται με πηγή τάσης εσωτερικής αντίστασης  $R_s$  και φορτίο  $R_L$  και η λειτουργία του περιγράφεται πλήρως όταν προσδιοριστούν η **ενίσχυση χωρίς φορτίο** και οι **αντιστάσεις εισόδου και εξόδου**.
- Έτσι, αποδεικνύεται η **ισοδυναμία** του με **ελεγχόμενη πηγή**, αφού δεν είναι δυνατή η ύπαρξη ενισχυτή χωρίς την παρουσία ελεγχόμενης πηγής.
- Παρατηρείστε ότι στο ισοδύναμο κύκλωμα δεν υπάρχουν ποσότητες συνεχούς, δηλ. η τάση τροφοδοσίας ( $V_{CC}$ ) έχει αντικατασταθεί από βραχυκύκλωμα, αφού ο ακροδέκτης του κυκλώματος που συνδέεται σε αυτή έχει πάντα σταθερή τάση.
- Με άλλα λόγια κάθε ακροδέκτης του κυκλώματος που συνδέεται σε σταθερή πηγή θεωρείται γείωση όσον αφορά τη λειτουργία μικρού σήματος.

# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού εκπομπού



$$i_L = -i_o$$

## Βασικά μεγέθη ενισχυτή

Ενίσχυση τάσης:

$$A_{v_i} = \frac{V_o}{V_i}$$

Ενίσχυση τάσης χωρίς φορτίο:

$$A_{v_o} = A_{v_i} \Big|_{R_L = \infty}$$

Ενίσχυση ρεύματος:

$$A_{i_L} = \frac{i_L}{i_s}$$

Ενίσχυση ρεύματος χωρίς φορτίο:

$$A_{i_o} = \frac{i_L}{i_s} \Big|_{R_L = 0}$$

Ενίσχυση ισχύος:

$$A_P = \frac{P_L}{P_i} = \frac{V_o i_L}{V_i i_s} = A_{v_i} A_{i_L}$$

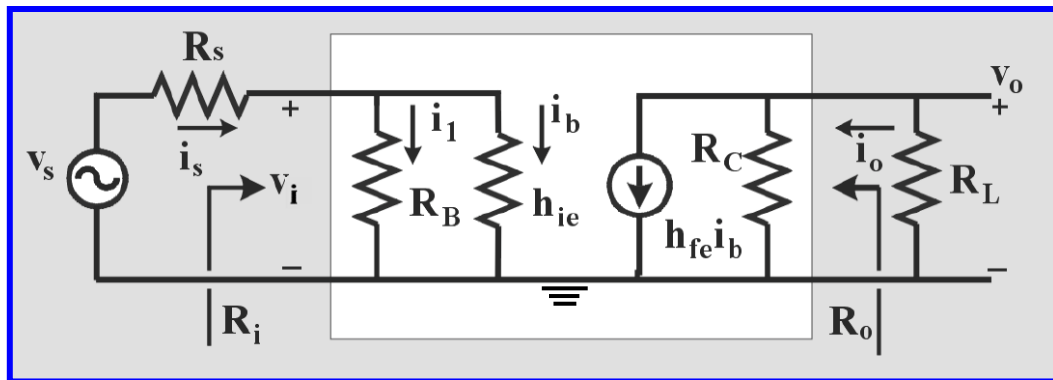
Αντίσταση εισόδου:

$$R_i = \frac{V_i}{i_s}$$

Αντίσταση εξόδου:

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{(v_i=0, R_L=\infty)}$$

# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού εκπομπού



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

$$V_o = -h_{fe} i_b R'_L$$

$$i_b = \frac{V_i}{h_{ie}}$$

$$V_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} V_i$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_s} = \frac{V_i}{i_b + i_1} = \frac{V_i}{\frac{V_i}{h_{ie}} + \frac{V_i}{R_B}} = R_B // h_{ie}$$

$$V_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} V_s$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{(v_i=0, R_L=\infty)} \Rightarrow R_o = R_C$$

$$V_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i} V_s$$

$$i_{L} = -h_{fe} i_b \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} = -h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{h_{ie} + R_B} \cdot i_s$$

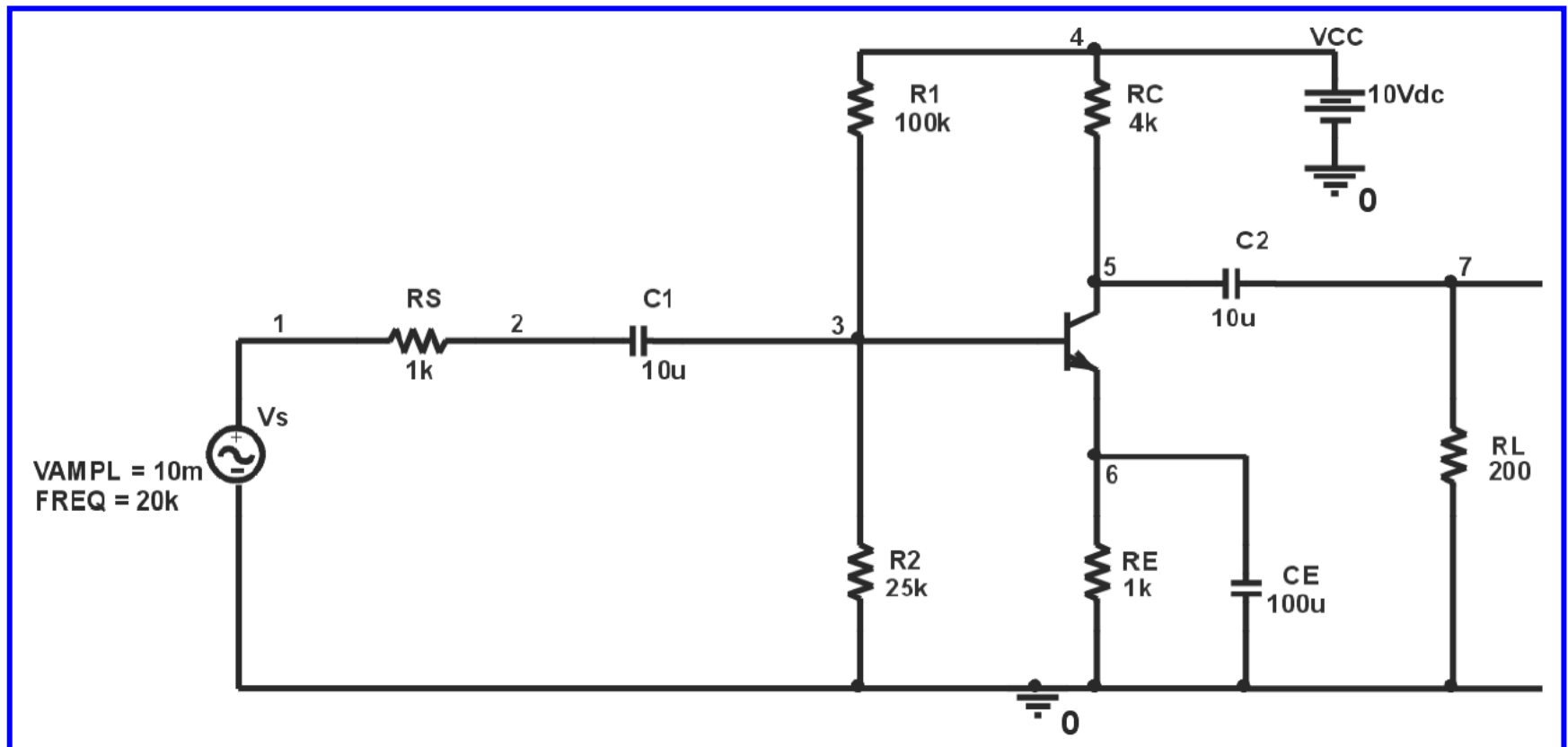
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

$$A_{iL} = \frac{i_L}{i_s} = -h_{fe} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$$

$$A_P = A_{vs} A_{iL} = \frac{h_{fe}^2 R'_L}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i} \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$$

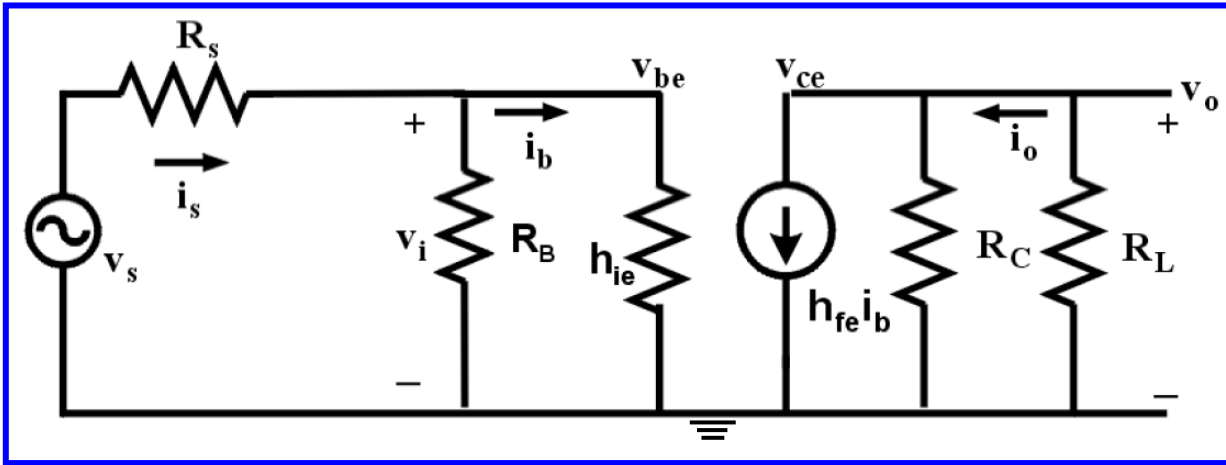
# Παράδειγμα 4<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού εκπομπού

Δίνεται ο ενισχυτής του σχήματος με ημιτονική τάση εισόδου πλάτους 10 mV και συχνότητας 20 kHz. Για το διπολικό τρανζίστορ δίνονται  $h_{fe} = 250$  και  $h_{ie} = 4 \text{ k}\Omega$  και θεωρούμε ότι ο ενισχυτής λειτουργεί στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων (επομένως οι πυκνωτές ισοδυναμούν με βραχυκυκλώματα). Ζητείται να προσδιοριστεί το σήμα (τάση) εξόδου σε σχέση με το σήμα που εφαρμόζεται στην είσοδο και να χαραχθούν οι δύο κυματομορφές.





# Παράδειγμα 4<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού εκπομπού



$$R_B = R_1 // R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$
$$R'_L = R_L // R_C = 0,19 \text{ k}\Omega$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R'_L$$

$$i_b = \frac{V_i}{h_{ie}}$$

$$V_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} V_i$$

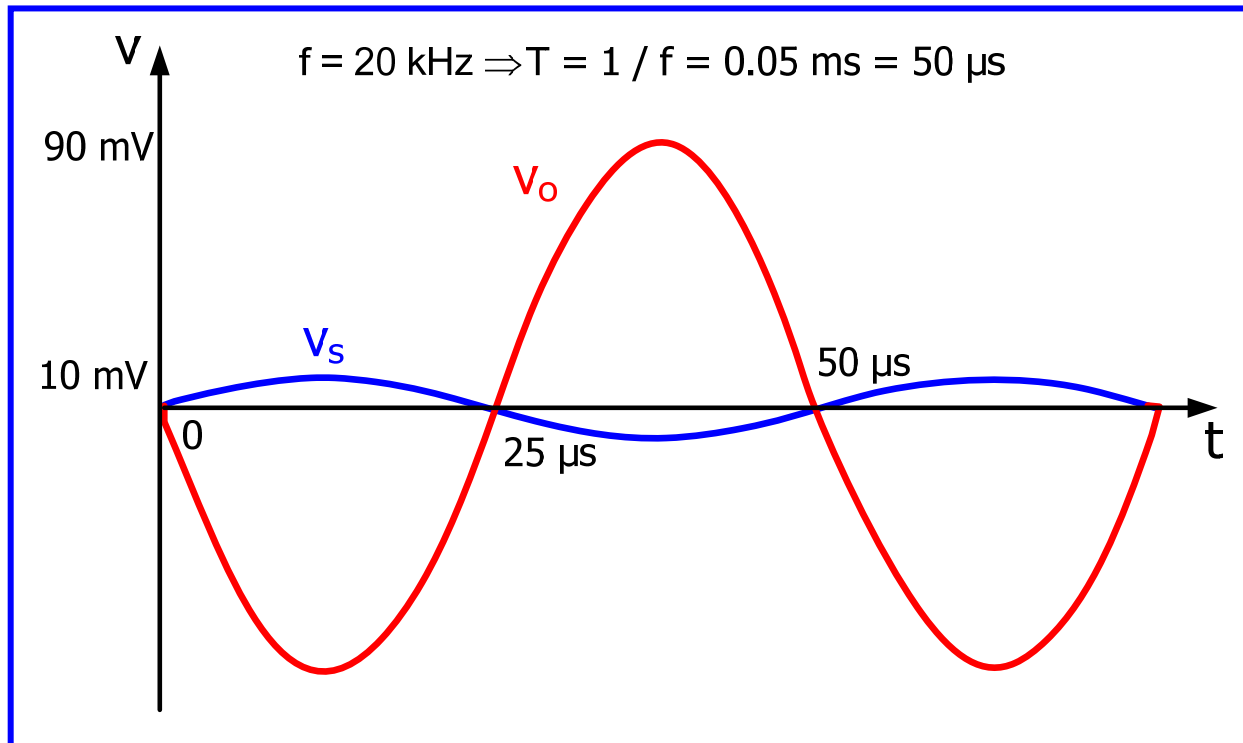
$$V_i = \frac{(R_B // h_{ie})}{R_s + (R_B // h_{ie})} V_s = 0,77 V_s$$

$$V_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \cdot 0,77 V_s = -9,1 V_s$$

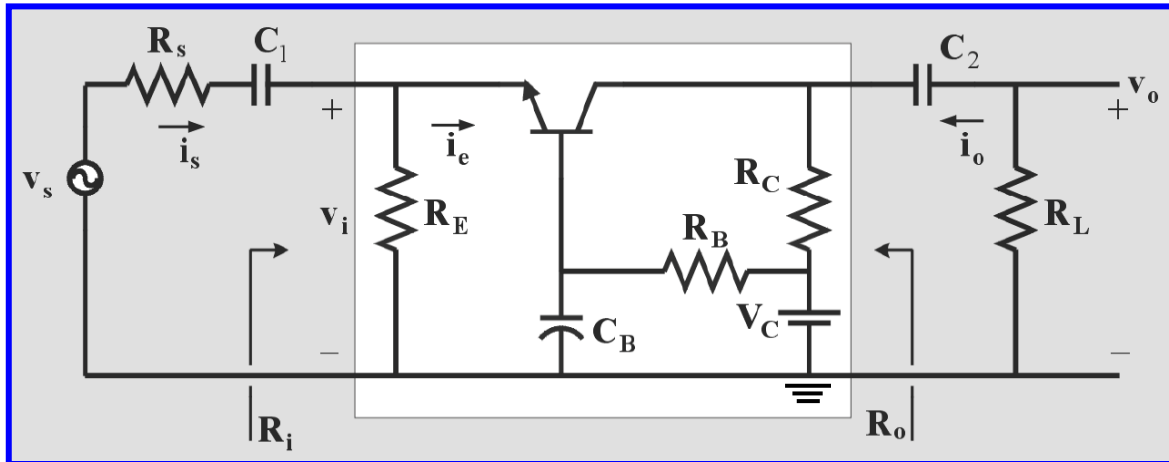
# Παράδειγμα 4<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού εκπομπού

$$V_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \cdot 0,77 V_s = -9,1 V_s$$

- Το μείον που προκύπτει στην ενίσχυση σημαίνει διαφορά φάσης 180°, μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου.
- Στην χάραξη των κυματομορφών είναι εμφανής η ενίσχυση του σήματος εισόδου κατά 9 φορές περίπου, καθώς επίσης και η διαφορά φάσης των 180°.



# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής βάσης



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

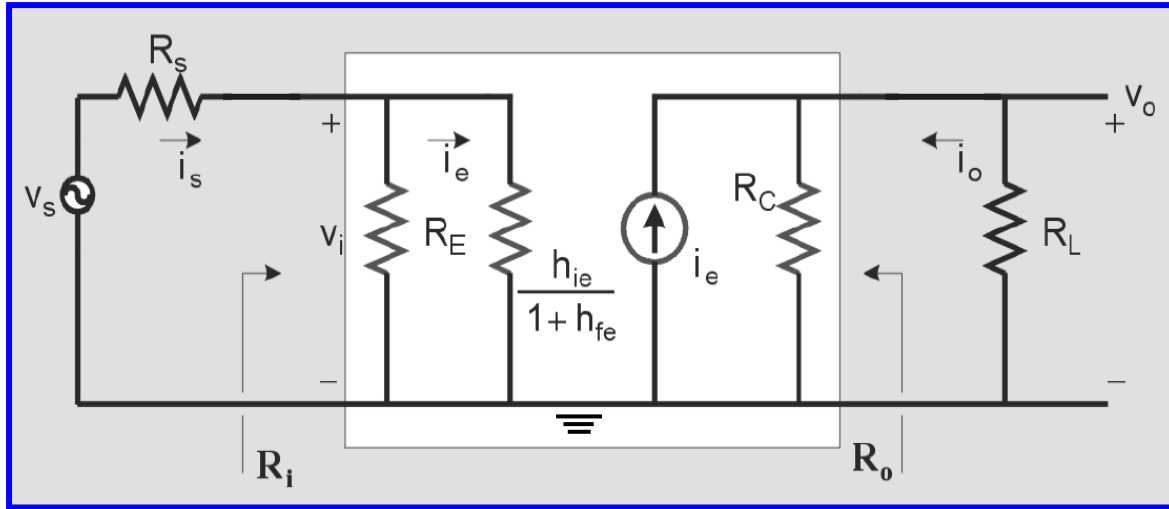
$$V_o = i_e \cdot R'_L$$

$$i_e = \frac{(1 + h_{fe})}{h_{ie}} V_i$$

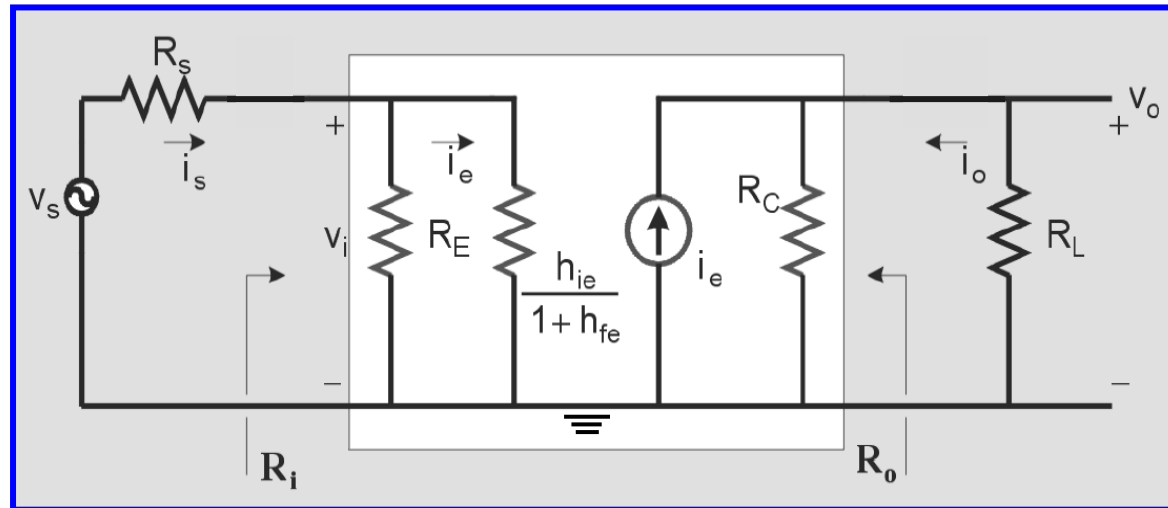
$$A_{v_i} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie}}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_s} = R_E // \left( \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \right) \approx \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{R_L = \infty, v_i = 0} = R_C$$



# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής βάσης



$$A_{i_L} = \frac{i_L}{i_s} = \frac{\frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot i_e}{i_s} = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_E}{\left(\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}\right) + R_E}$$

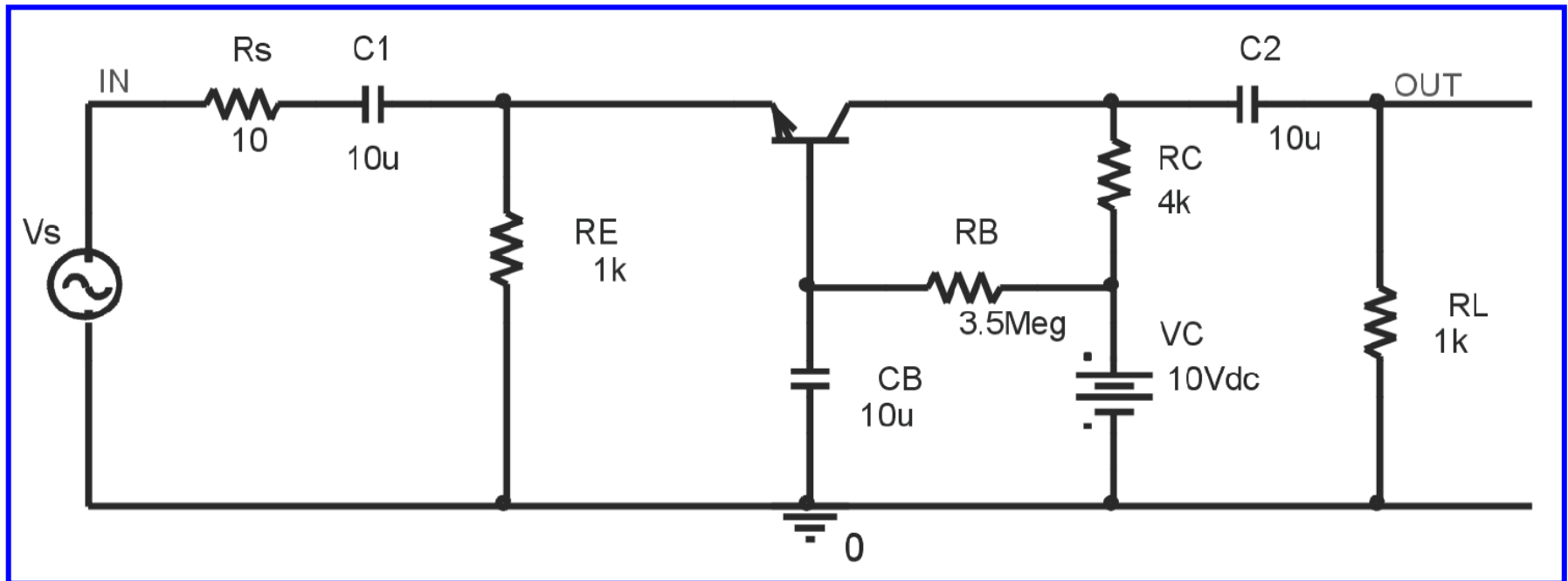
$$i_L = -i_o$$

$$A_{i_o} = A_{i_L} \Big|_{R_L=0} = \frac{R_E}{\left(\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}\right) + R_E} \approx 1$$

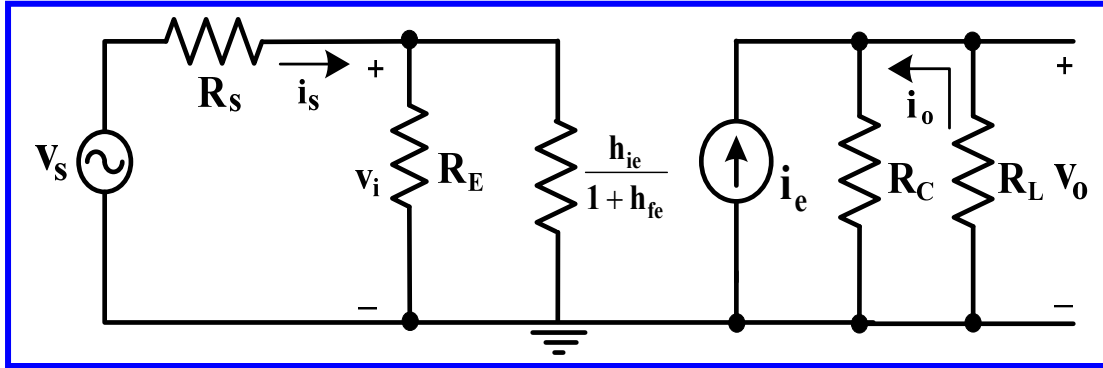
Μοναδιαία ενίσχυση  
ρεύματος χωρίς  
φορτίο

# Παράδειγμα 5<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινής βάσης

Δίνεται ο ενισχυτής του σχήματος με ημιτονική τάση εισόδου πλάτους 10 mV και συχνότητας 20 KHz. Για το διπολικό τρανζίστορ δίνονται  $h_{fe} = 545$  και  $h_{ie} = 11,9 \text{ k}\Omega$  και θεωρούμε ότι ο ενισχυτής λειτουργεί στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων. Ζητείται να προσδιοριστεί το σήμα εξόδου σε σχέση με το σήμα που εφαρμόζεται στην είσοδο (δηλ. ζητείται η ενίσχυση  $A_{vs}$ ).



# Παράδειγμα 5<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινής βάσης



$$R'_L = R_C // R_L = 800 \Omega$$

$$v_o = i_e R'_L = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} R'_L = 36.7 \cdot v_i$$

$$R_i = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} // R_E \Rightarrow R_i = 21.3 \Omega$$

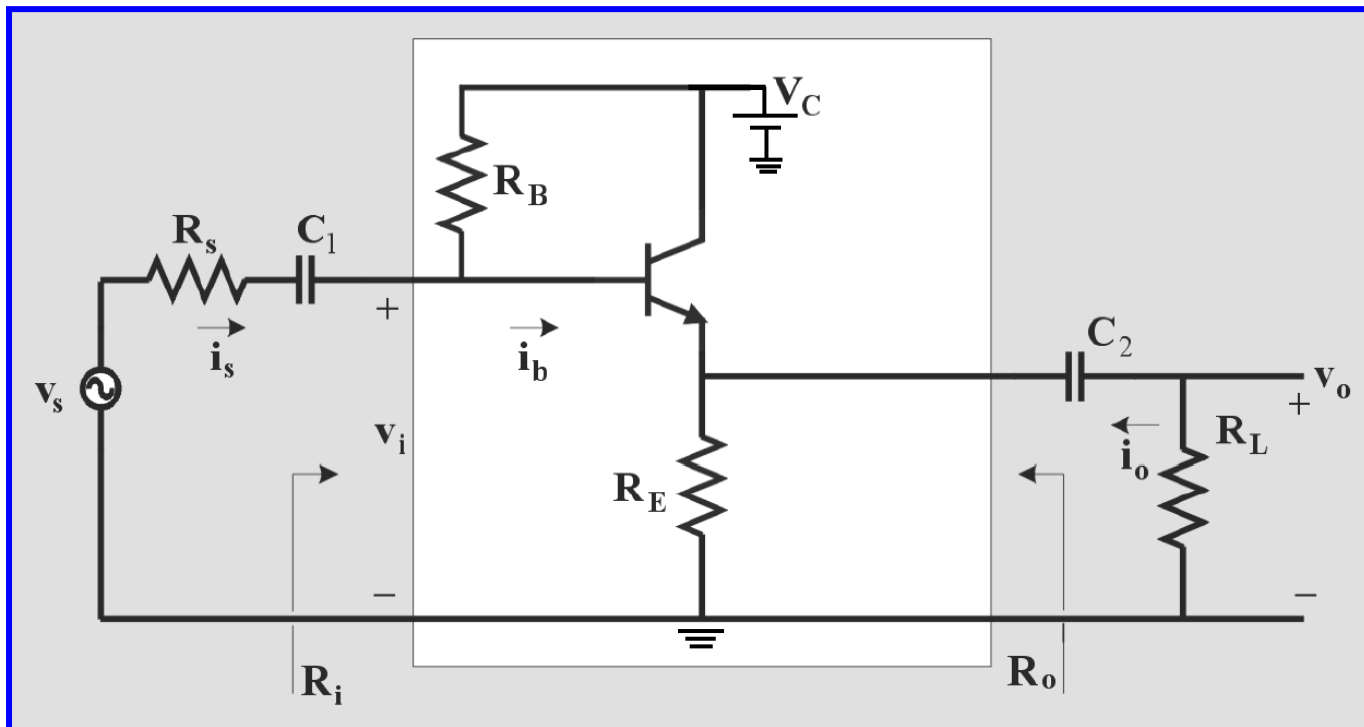
$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s = \frac{21.3}{10 + 21.3} v_s \Rightarrow v_i = 0.68 \cdot v_s$$

$$v_o = 36.7 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 36.7 \cdot 0.68 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = 24.95 \Rightarrow A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = 24.95$$

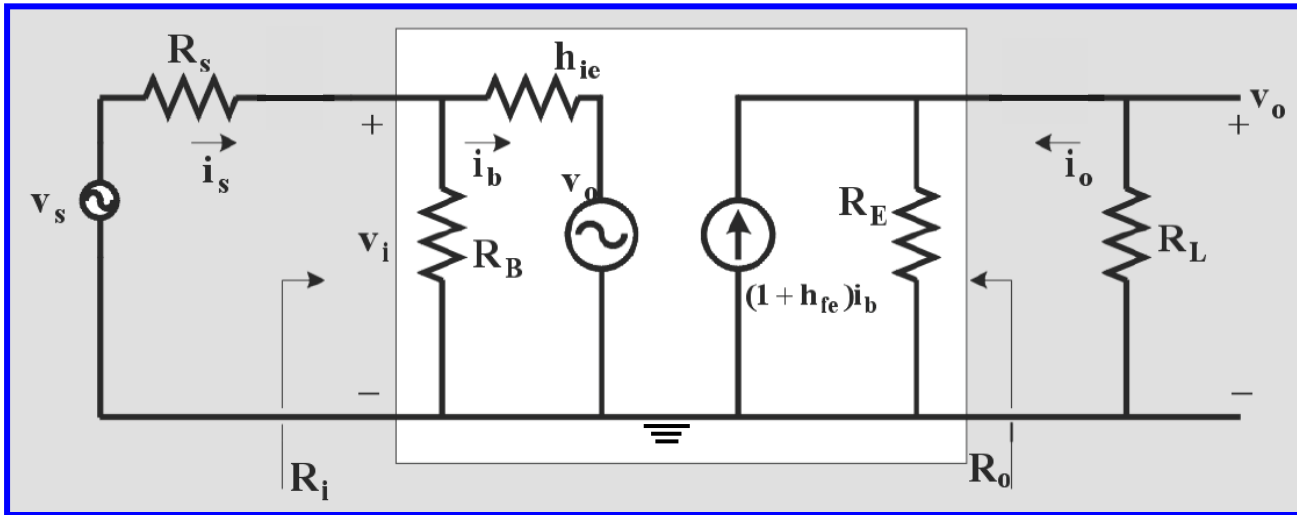
Επομένως, η **τάση εξόδου** παρουσιάζεται κατά 25 φορές **ενισχυμένη** σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου και **χωρίς διαφορά φάσης**.

# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού συλλέκτη

- Η απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού συλλέκτη περιλαμβάνει ένα διπολικό τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού συλλέκτη και αναφέρεται ως **ακολουθητής** ή **ακόλουθος εκπομπού**.
- Τα κύρια χαρακτηριστικά του ενισχυτή αυτού είναι η μεγάλη αντίσταση εισόδου, η μικρή αντίσταση εξόδου και η περίπου **μοναδιαία ενίσχυση τάσης**, που τον καθιστά εύχρηστο ως **απομονωτή τάσης (buffer)**.



# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού συλλέκτη



$$R'_L = R_L // R_E$$

$$v_o = (1 + h_{fe}) i_b R'_L$$

$$i_b = \frac{v_i - v_o}{h_{ie}}$$

$$v_o = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie}} v_i - \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie}} v_o$$

$$A_{v_i} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L}$$

$$A_{v_o} = A_{v_i} \Big|_{R_L = \infty} = \frac{(1 + h_{fe})R_E}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E} \approx 1$$

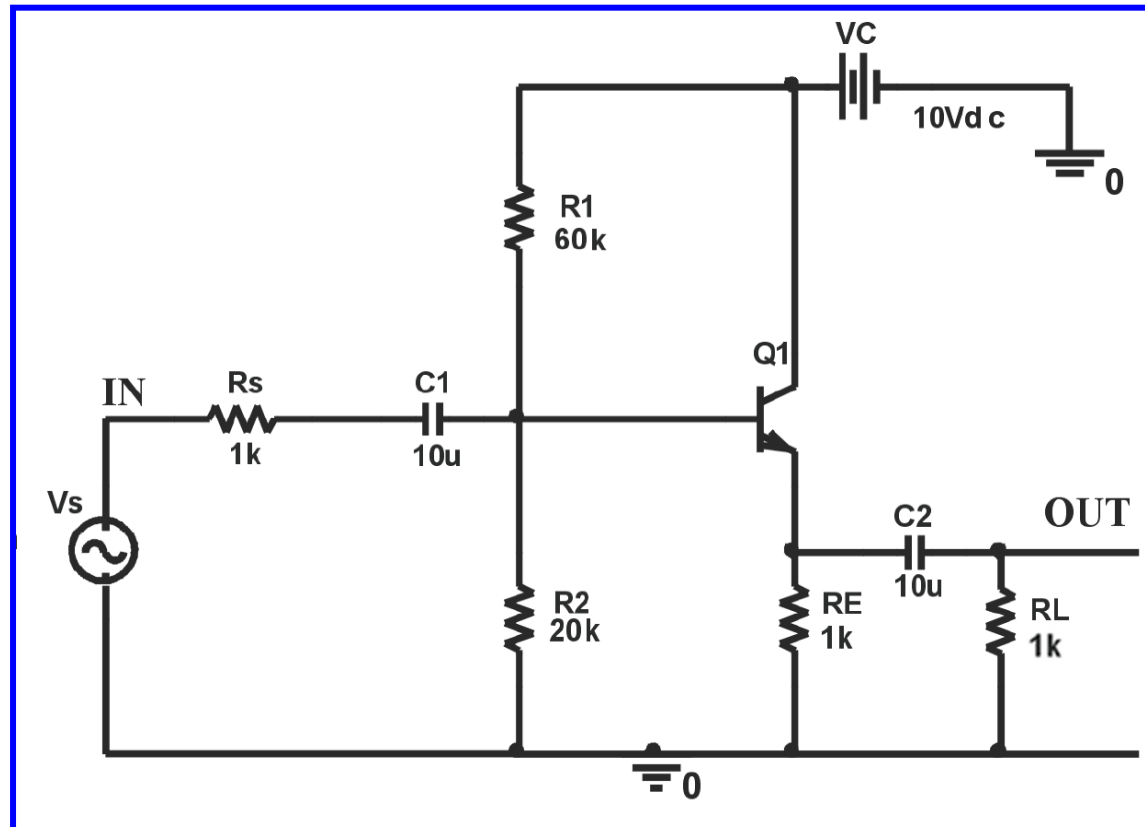
Η παρουσία της  $v_o$  στο κύκλωμα εισόδου, που σημαίνει επίδραση της εξόδου επί της εισόδου (δηλ. **ανατροφοδότηση**), επιδρά έτσι ώστε η ενίσχυση τάσης (χωρίς φορτίο) να είναι μοναδιαία.



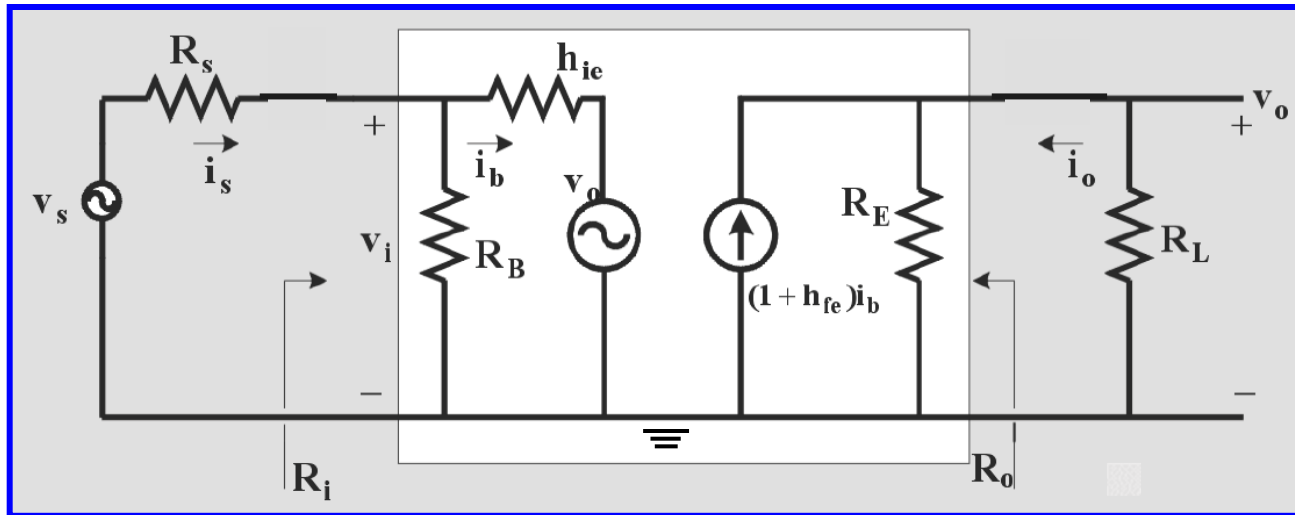
# Παράδειγμα 6<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού συλλέκτη

Δίνεται ο ενισχυτής του σχήματος με ιδανική πηγή ημιτονικής τάσης πλάτους 10 mV και συχνότητας 20 kHz. Για το διπολικό τρανζίστορ δίνονται  $h_{fe} = 350$  και  $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$  και θεωρούμε ότι ο ενισχυτής λειτουργεί στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων.

Ζητείται να προσδιοριστεί η ενίσχυση τάσης  $A_{Vs} = v_o / v_{s'}$  καθώς επίσης να χαραχθούν οι κυματομορφές των τάσεων εισόδου και εξόδου σε κοινούς άξονες.



# Παράδειγμα 6<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού συλλέκτη



$$R_B = R_1 // R_2 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_E // R_L = 0.5 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = (1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot R'_L = 351 \cdot 0.5 \cdot 10^3 \cdot i_b \Rightarrow v_o = 175.5 \cdot 10^3 \cdot i_b \quad i_b = \frac{v_i - v_o}{h_{ie}} \Rightarrow i_b = \frac{v_i - v_o}{2 \cdot 10^3}$$

$$v_o = 175.5 \cdot 10^3 \cdot i_b \Rightarrow v_o = 175.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{v_i - v_o}{2 \cdot 10^3} \Rightarrow v_o = 87.75 \cdot (v_i - v_o) \Rightarrow$$

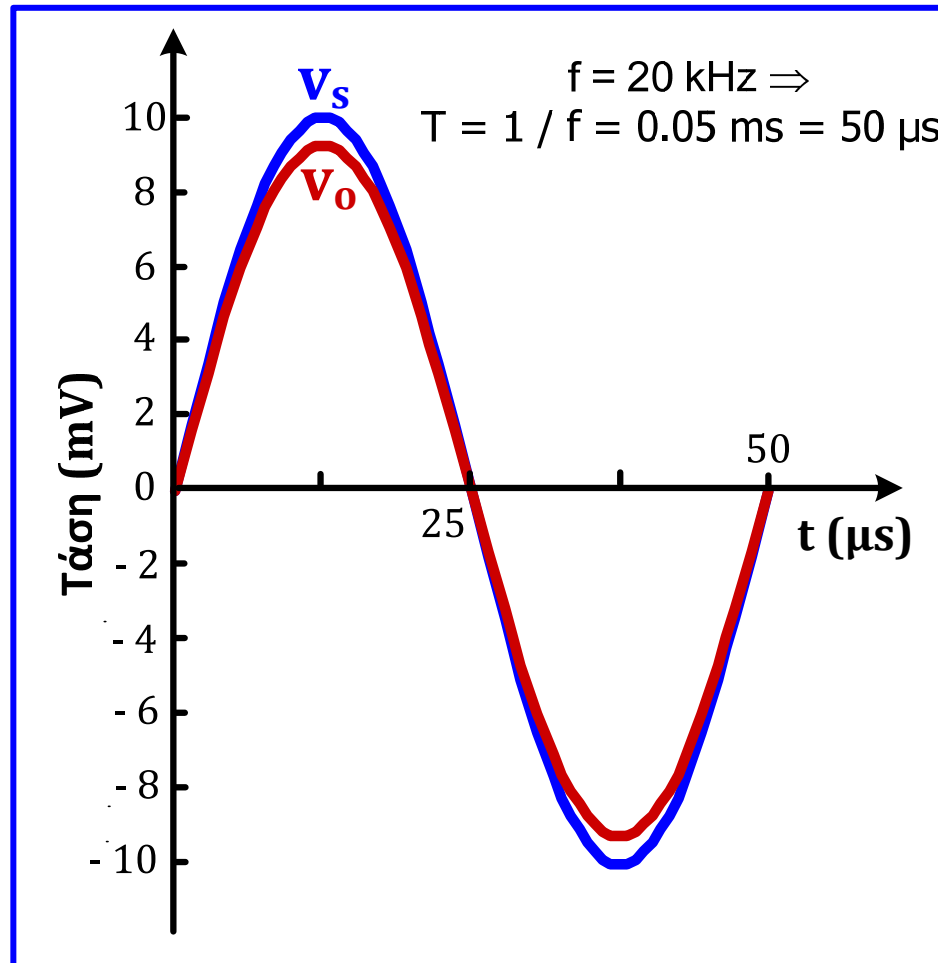
$$88.75 \cdot v_o = 87.75 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 0.989 \cdot v_i$$

$$v_i = \frac{R_B}{R_B + R_s} \cdot v_s \Rightarrow v_i = \frac{15}{15 + 1} \cdot v_s \Rightarrow v_i = \frac{15}{16} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.9375 \cdot v_s$$

$$v_o = 0.989 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 0.989 \cdot 0.9375 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = 0.927 \Rightarrow A_V = 0.927$$

Μικρή  
εξασθένηση  
τάσης αντί  
για ενίσχυση

# Παράδειγμα 6<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινού συλλέκτη



Η τάση εξόδου παρουσιάζεται ελαφρώς εξασθενημένη σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου και χωρίς διαφορά φάσης.

# Χαρακτηριστικά μεγέθη ενισχυτών απλής βαθμίδας

- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή ΚΕ:**

- ✓ Μεγάλη ενίσχυση τάσης και ρεύματος, οπότε και μεγάλη ενίσχυση ισχύος
- ✓ Μεγάλες αντιστάσεις εισόδου & εξόδου

$A_{vo}$	-200
$A_{io}$	$\approx -100$
$R_i$	$\approx 2 \text{ K}\Omega$
$R_o$	2 K $\Omega$

ΚΕ

- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή ΚΒ:**

- ✓ Μεγάλη ενίσχυση τάσης
- ✓ Μοναδιαία ενίσχυση ρεύματος
- ✓ Πολύ μικρή αντίσταση εισόδου
- ✓ Μεγάλη αντίσταση εξόδου

$$h_{fe} = 100, h_{ie} = 2\text{K}\Omega$$
$$R_C = 2\text{K}\Omega, R_E = 1\text{K}\Omega,$$
$$R_B = 50\text{K}\Omega$$

$A_{vo}$	200
$A_{io}$	$\approx 1$
$R_i$	20 $\Omega$
$R_o$	2 K $\Omega$

ΚΒ

- **Απλή βαθμίδα ενισχυτή ΚΣ:**

- ✓ Μοναδιαία ενίσχυση τάσης
- ✓ Μεγάλη ενίσχυση ρεύματος
- ✓ Πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου
- ✓ Πολύ μικρή αντίσταση εξόδου

$A_{vo}$	$\approx 1$
$A_{io}$	$\approx 100$
$R_i$	$\approx 40 \text{ K}\Omega$
$R_o$	20 $\Omega$

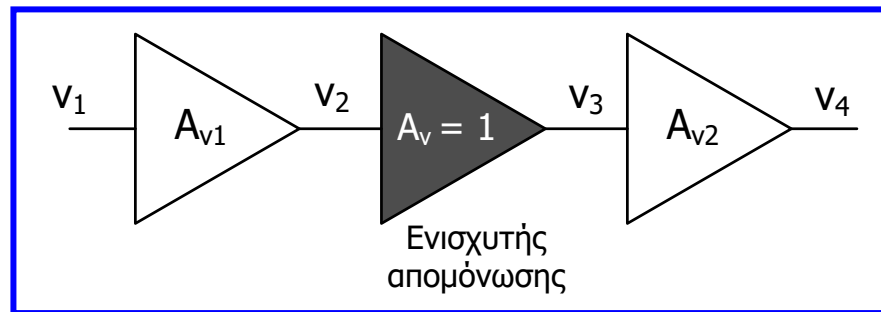
ΚΣ

# Χαρακτηριστικά μεγέθη ενισχυτών απλής βαθμίδας

- Όταν ένας ενισχυτής παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πηγής και ενός φορτίου ή όταν παρεμβάλλεται μεταξύ δύο άλλων βαθμίδων, η **αντίσταση εισόδου** έχει το ρόλο αντίστασης φορτίου για τη βαθμίδα που προηγείται και η **αντίσταση εξόδου** έχει το ρόλο αντίστασης πηγής για τη βαθμίδα που ακολουθεί.
- Μερικές φορές σχηματίζεται η εντύπωση ότι οι παράγοντες ενίσχυσης έχουν τον κυρίαρχο ρόλο σε έναν ενισχυτή.
- Ωστόσο, οι **αντιστάσεις εισόδου** και **εξόδου** (όπως είδαμε κατά τον καθορισμό των ενισχύσεων στις τρεις συνδέσεις ενισχυτών απλής βαθμίδας) συχνά **επηρεάζουν** την **ενίσχυση** και γενικότερα τη **λειτουργία** ενός **ενισχυτή**.
- Για παράδειγμα εάν σε μία εφαρμογή επιδιώκουμε την απομόνωση μεταξύ δύο βαθμίδων με **παρεμβολή ενισχυτή απομόνωσης (buffer)** ώστε να μην υπάρχει επίδραση της μίας βαθμίδας επί της άλλης, τότε ο ρόλος των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου είναι καθοριστικός.

# Ενισχυτές απομόνωσης

- Η συμπεριφορά των ενισχυτών απομόνωσης προσεγγίζεται από έναν **ενισχυτή κοινού συλλέκτη**, ο οποίος παρουσιάζει περίπου **μοναδιαία ενίσχυση τάσης**, με αποτέλεσμα η συνάρτηση μεταφοράς του συνολικού κυκλώματος να ισούται με το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των επιμέρους κυκλωμάτων.



$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_4}{V_3} \cdot \frac{V_3}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} = A_{v2} \cdot A_v \cdot A_{v1} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

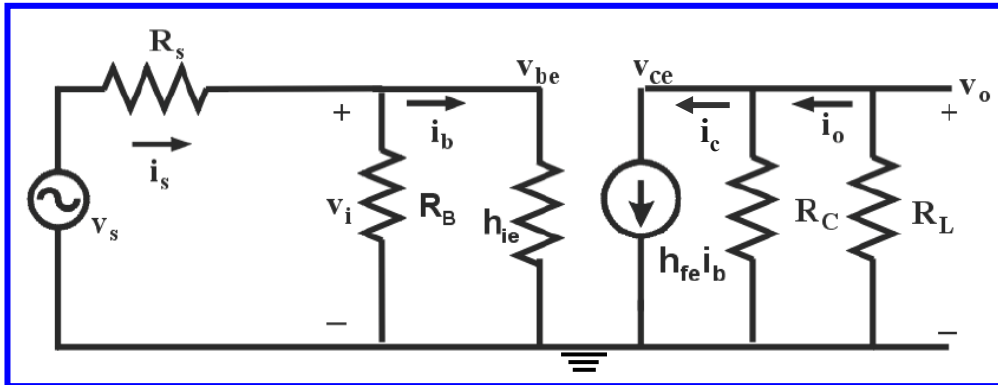
- Λόγω της μεγάλης αντίστασης εισόδου, ο ενισχυτής απομόνωσης δεν «φορτώνει» την προηγούμενη βαθμίδα, αφού «τραβάει» πολύ λίγο ρεύμα εισόδου και επίσης η τάση εξόδου του ενισχυτή απομόνωσης δεν επηρεάζεται από το φορτίο που θα του συνδεθεί (δηλ. από την επόμενη βαθμίδα) λόγω της πολύ μικρής αντίστασης εξόδου του.

# Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο

- Η γραμμή φορτίου (ή ευθεία φόρτου) στο συνεχές είναι η γραφική παράσταση του 2<sup>ου</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του κυκλώματος στο συνεχές.
- Η **γραμμή φορτίου** (ή **ευθεία φόρτου**) στο **εναλλασσόμενο** προκύπτει με όμοιο τρόπο από τον βρόχο εξόδου του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος.
- Υπενθυμίζεται ότι με κεφαλαία γράμματα και δείκτες (π.χ.  $I_C$ ) συμβολίζονται οι τιμές ηρεμίας, με μικρά γράμματα και δείκτες οι τιμές των μεταβολών μικρού σήματος (π.χ.  $i_c$ ), ενώ με μικρά γράμματα και κεφαλαίους δείκτες οι ολικές στιγμιαίες τιμές (π.χ.  $i_C$ ).

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

Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού



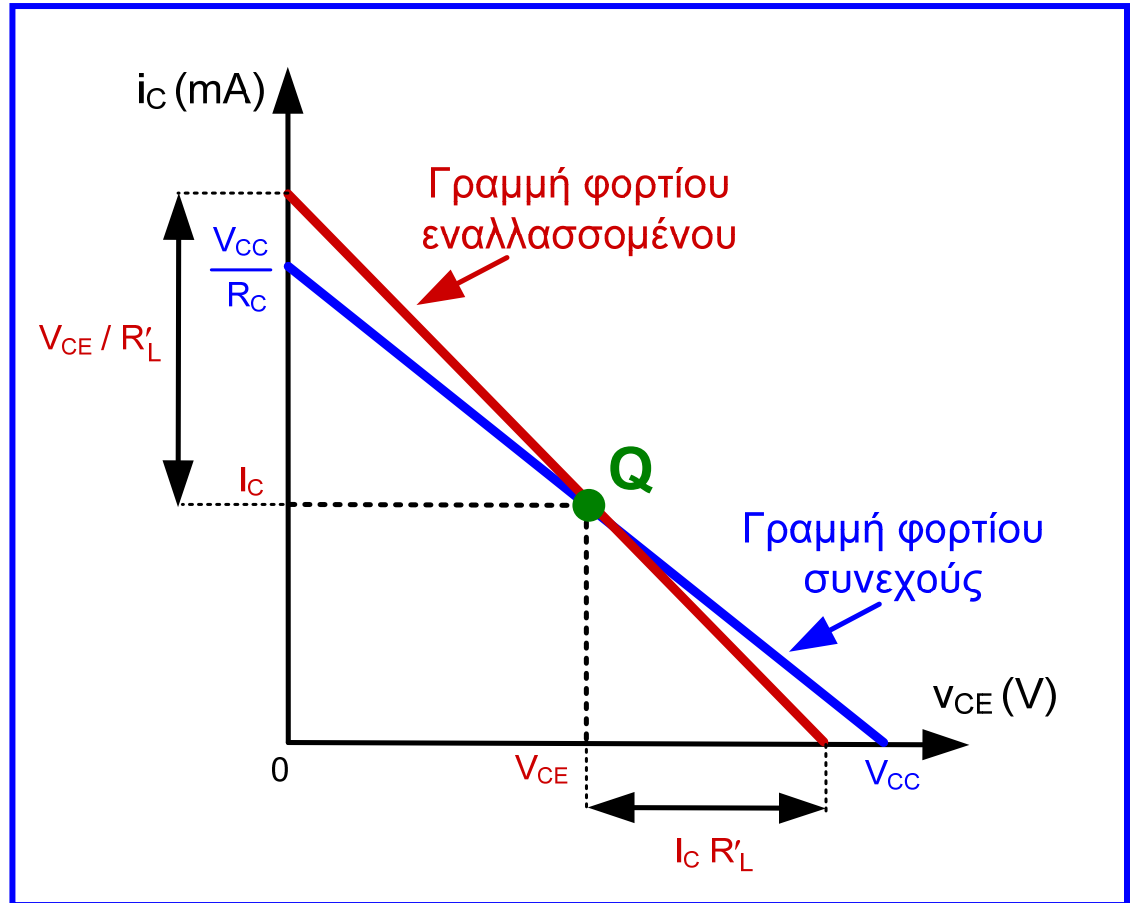
$$v_o = v_{ce} = -i_c R'_L \Rightarrow$$
$$V_{CE} - v_{ce} = -(i_c - I_C) R'_L \Rightarrow$$
$$i_c = -\frac{1}{R'_L} v_{ce} + \frac{V_{CE}}{R'_L} + I_C$$

# Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο

Η γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο έχει κλίση  $(-1/R'_L)$  και διέρχεται από το σημείο λειτουργίας (Q):

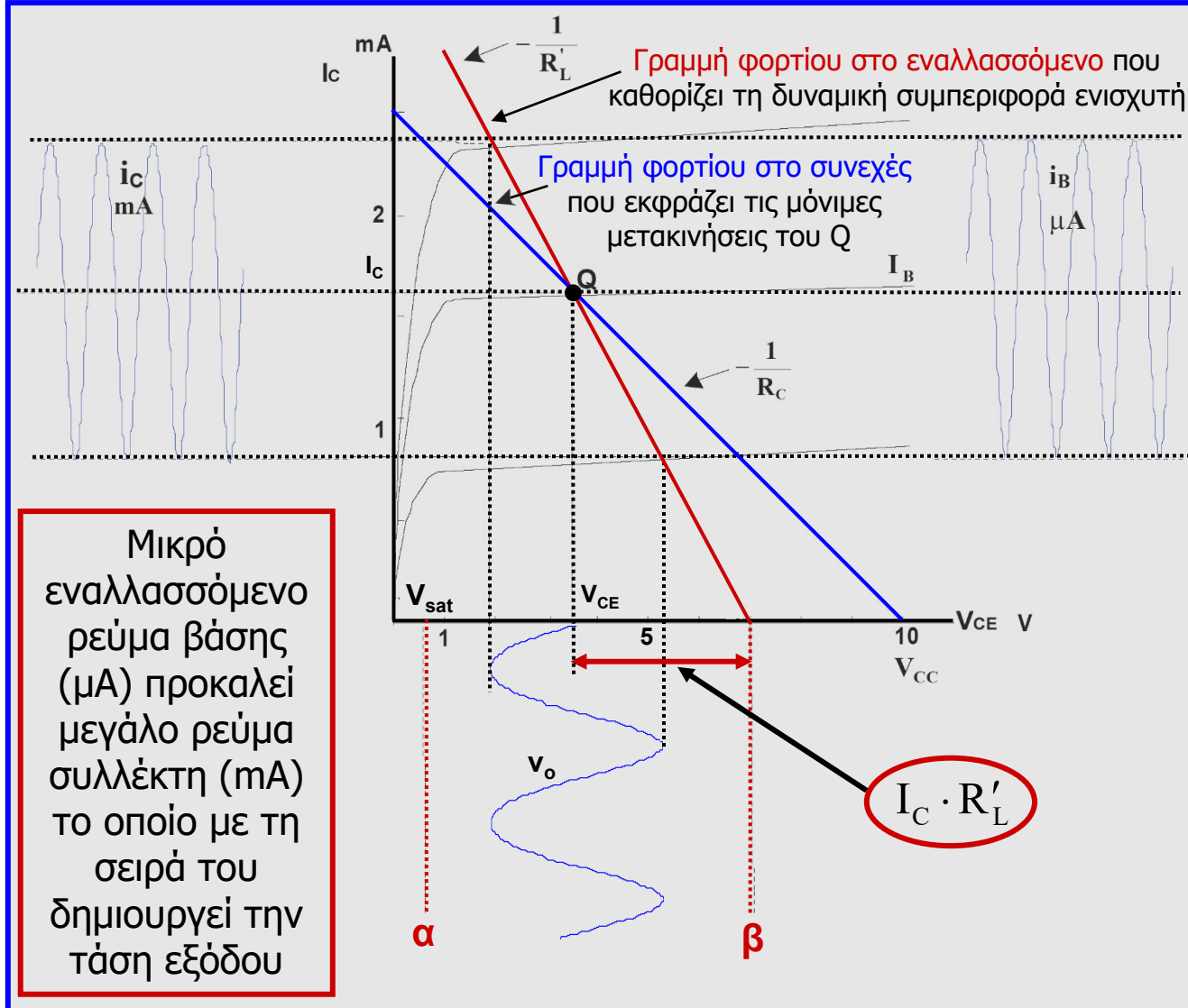
$$i_C = -\frac{1}{R'_L} v_{CE} + \frac{V_{CE}}{R'_L} + I_C$$

$$i_C = 0 \Rightarrow v_{CE} = V_{CE} + I_C R'_L$$
$$v_{CE} = 0 \Rightarrow i_C = I_C + \frac{V_{CE}}{R'_L}$$





# Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο



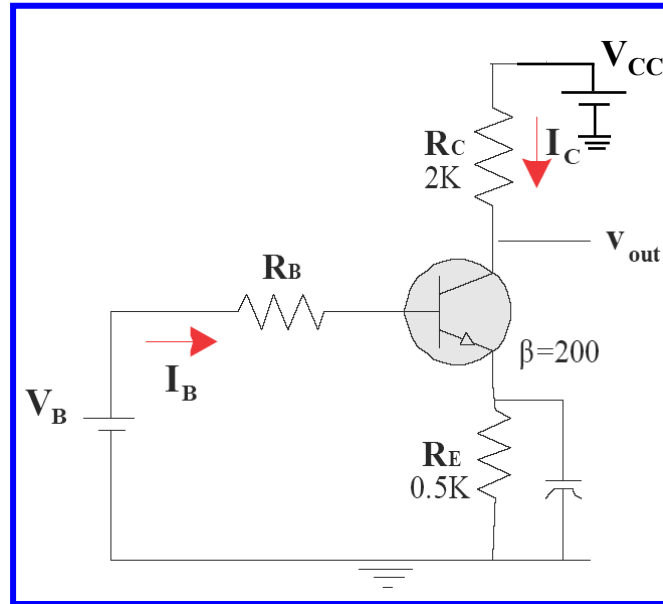
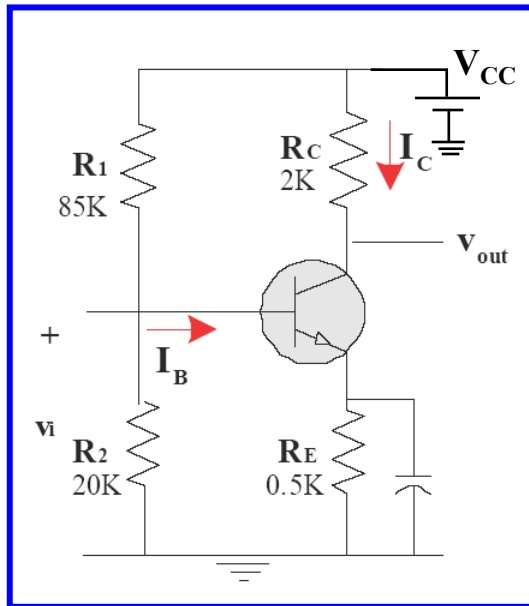
Οι 2 γραμμές φορτίου συναντώνται στο Q του τρανζίστορ και καθορίζουν τη διαδρομή της  $v_o$

Η μέγιστη διαδρομή της  $v_o$  καθορίζεται από το όριο  $\alpha$  ( $V_{sat}$ ) και το όριο  $\beta$  (τέρμα γραμμής φορτίου στο εναλλασσόμενο). Πέρα από αυτά τα όρια εμφανίζεται ψαλιδισμός της  $v_o$

Για συμμετρική λειτουργία της  $v_o$  και αξιοποίηση όλης της περιοχής, θα πρέπει το Q να τίθεται στη μέση των ορίων

# Παράδειγμα 7<sup>ο</sup>: γραμμές φορτίου (dc, ac)

Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιοριστούν το σημείο λειτουργίας, οι γραμμές φορτίου στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο και να καθοριστούν τα όρια της μέγιστης διαδρομής της τάσης εξόδου. Δίνονται:  $\beta = 200$ ,  $V_{CC} = 10\text{ V}$ ,  $V_{BE} = 0,73\text{V}$ ,  $V_{sat} = 300\text{ mV}$ .



$$R_B = R1 // R2 = 16,2\text{ K}$$

$$V_B = \frac{R2}{R1 + R2} V_{CC} = 1,9\text{ V}$$

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 10\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 2\text{mA}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B) R_E$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 5\text{V}$$

$$Q(V_{CE}, I_C) = Q(5\text{V}, 2\text{mA})$$

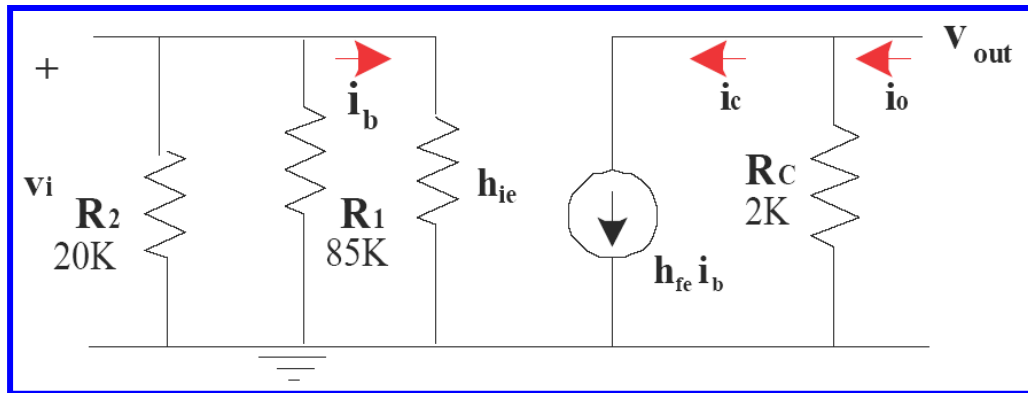
# Παράδειγμα 7<sup>ο</sup>: γραμμές φορτίου (dc, ac)

2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff για το βρόχο εξόδου  
του ενισχυτή στο συνεχές:

$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE}$$

$$I_C = -\frac{1}{(R_C + R_E)} V_{CE} + \frac{1}{(R_C + R_E)} V_{CC}$$

Γραμμή  
φορτίου στο  
συνεχές



Στο εναλλασσόμενο η  $R_E$   
είναι βραχυκυκλωμένη,  
λόγω της παρουσίας του  
πυκνωτή στα άκρα της

2<sup>ος</sup> κανόνας Kirchhoff για το βρόχο εξόδου του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο:

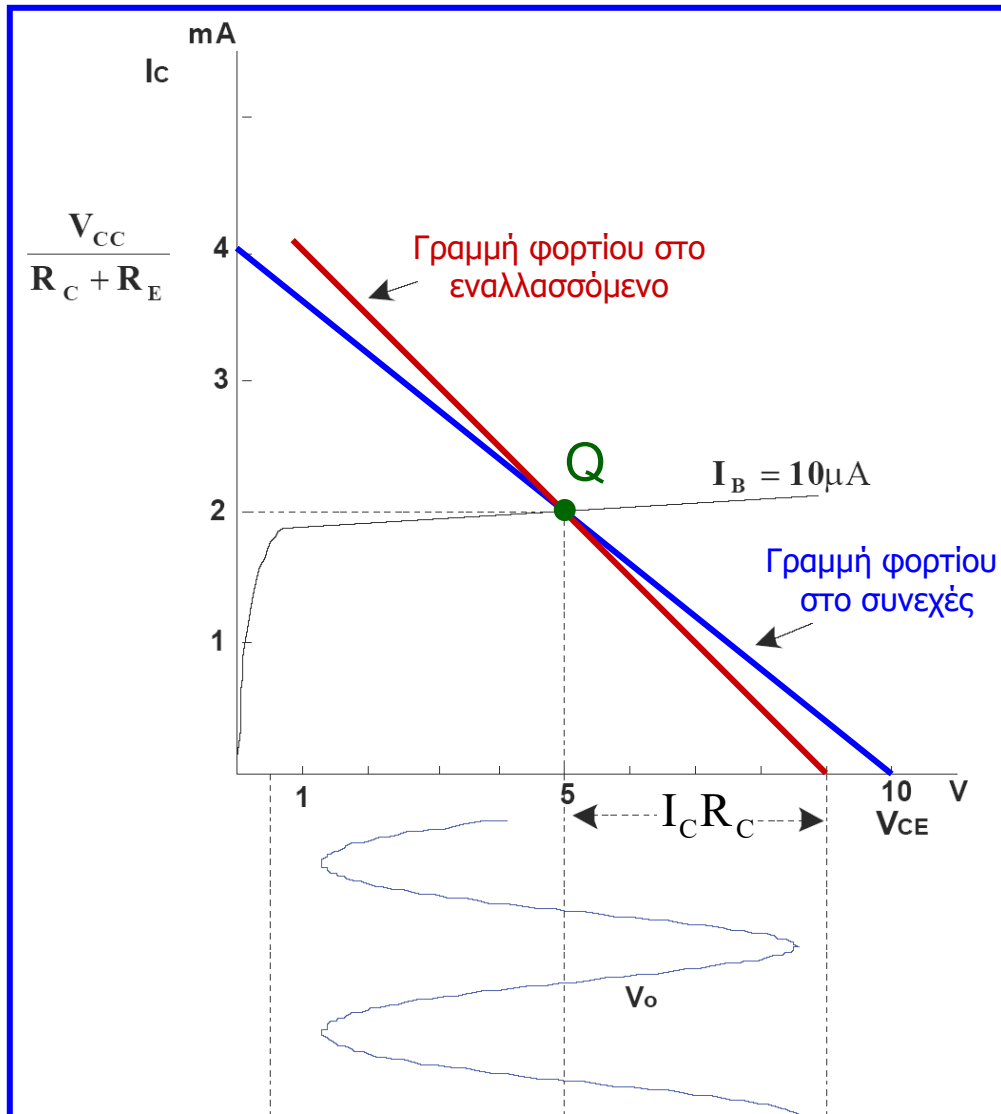
$$v_{ce} = -i_c R_C$$

$$V_{CE} - V_{CE} = -(i_C - I_C) R_C$$

$$i_C = -\frac{1}{R_C} v_{CE} + \frac{V_{CE}}{R_C} + I_C$$

Γραμμή φορτίου  
στο εναλλασσόμενο

# Παράδειγμα 7<sup>ο</sup>: γραμμές φορτίου (dc, ac)



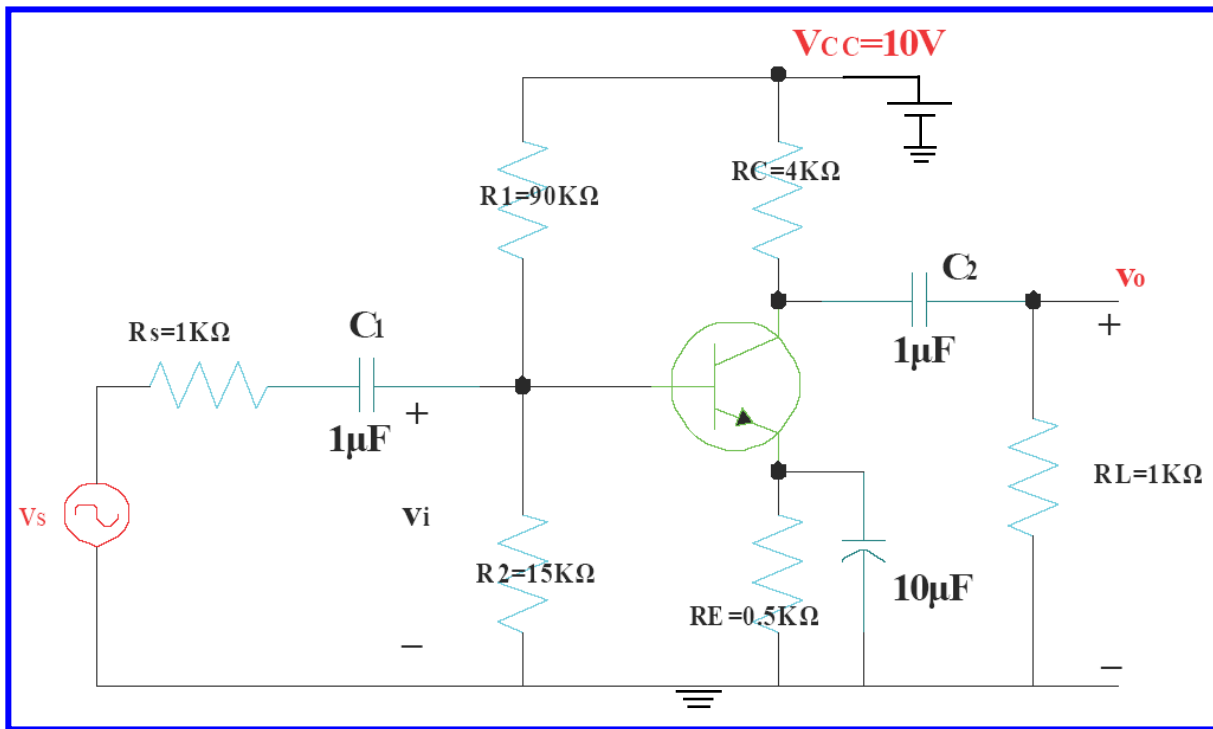
Το κάτω όριο της μέγιστης διαδρομής της  $v_o$  είναι η  $V_{sat} = 300mV$  και το άνω όριο υπολογίζεται ως εξής:

$$i_C = -\frac{1}{R_C} v_{CE} + \frac{V_{CE}}{R_C} + I_C$$

$$i_C = 0 \Rightarrow v_{CE} = V_{CE} + I_C R_C = 5V + 4V = 9V$$

# Παράδειγμα 8<sup>ο</sup>: μελέτη ενισχυτή (dc, ac)

Για τον ενισχυτή κοινού εκπομπού του σχήματος να προσδιοριστούν το σημείο λειτουργίας, η ενίσχυση τάσης, οι γραμμές φορτίου στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο, η κυματομορφή του σήματος εξόδου και το άνω όριο του πλάτους σήματος εξόδου χωρίς ψαλιδισμό. Δίνονται:  $\beta = 100$ ,  $V_{BE} = 0,775V$ ,  $h_{fe} = 100$  και  $h_{ie} = 2,5 k\Omega$  και τάση εισόδου πλάτους 30 mV και συχνότητας 20 KHz.



Λειτουργία στο συνεχές:

$$R_B = R_1 // R_2 = 12,86 k\Omega$$
$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,43 V$$

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} + I_C R_E$$
$$V_B = I_B R_B + V_{BE} + \beta I_B R_E$$

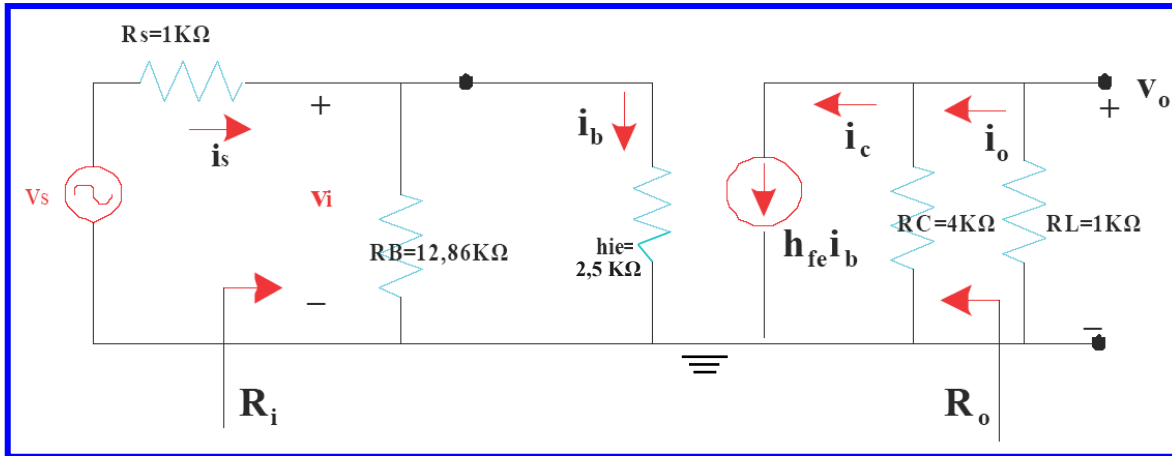
$$I_B = 10,3 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1,03 mA$$

$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE}$$

$$V_{CE} = 5,35 V$$

# Παράδειγμα 8<sup>ο</sup>: μελέτη ενισχυτή (dc, ac)



Λειτουργία στο  
εναλλασσόμενο:

$$R_i = R_B // h_{ie} = 2.09 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_C // R_L = 0.8 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = -h_{fe} R'_L i_b$$

$$i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$$

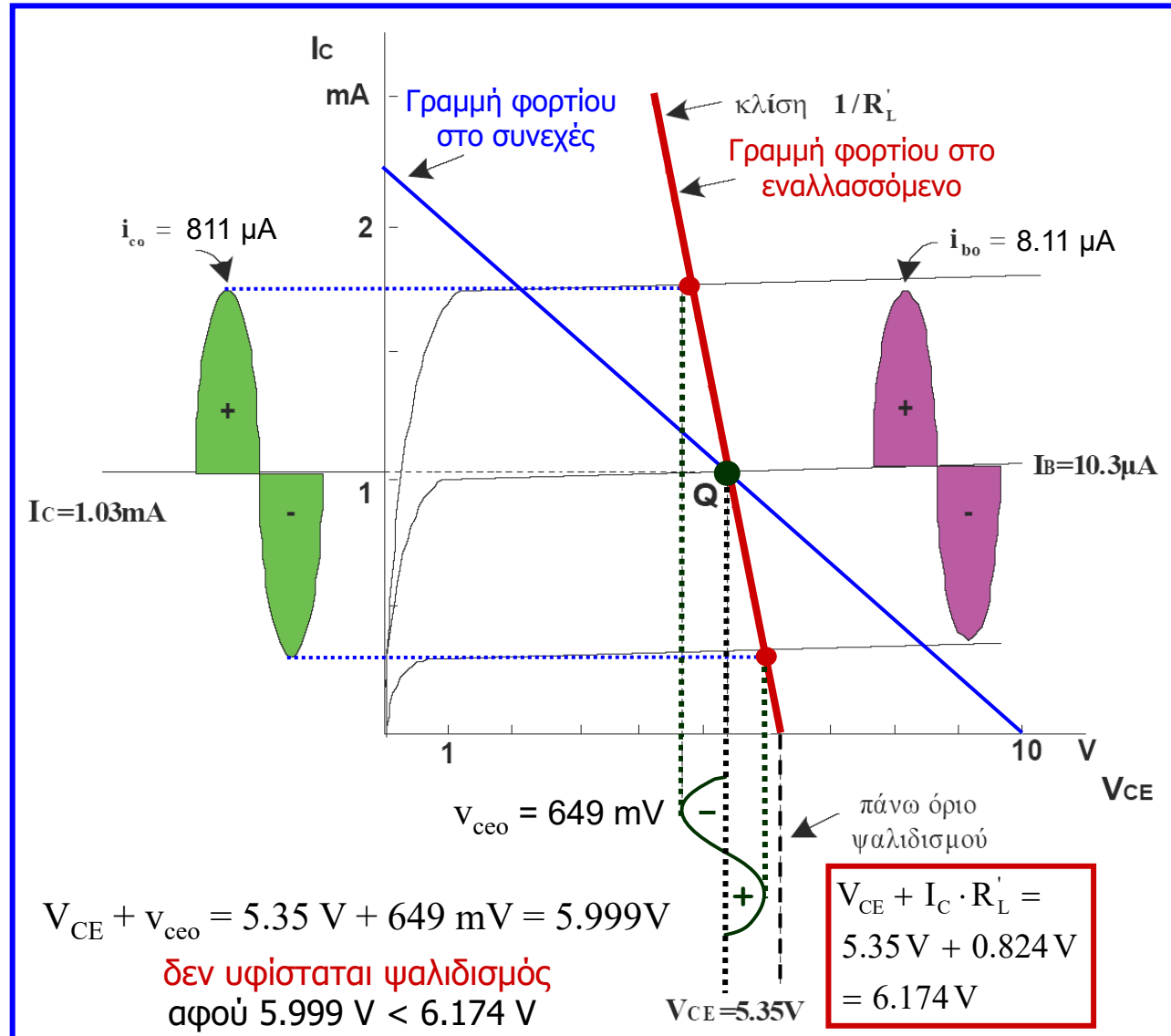
$$v_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} v_i$$

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s$$

$$v_o = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_s + R_i} = -21.6$$

# Παράδειγμα 8<sup>ο</sup>: μελέτη ενισχυτή (dc, ac)



$$\frac{v_i}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} = 0.676$$

Μέγιστο πλάτος τάσης εισόδου:  
 $30 \text{ mV} \times 0.676 = 20.28 \text{ mV}$

$$i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$$

Μέγιστο πλάτος ρεύματος βάσης:  
 $20.28 \text{ mV} / 2.5 \text{ k}\Omega = 8.11 \mu A$

$$i_c = h_{fe} i_b$$

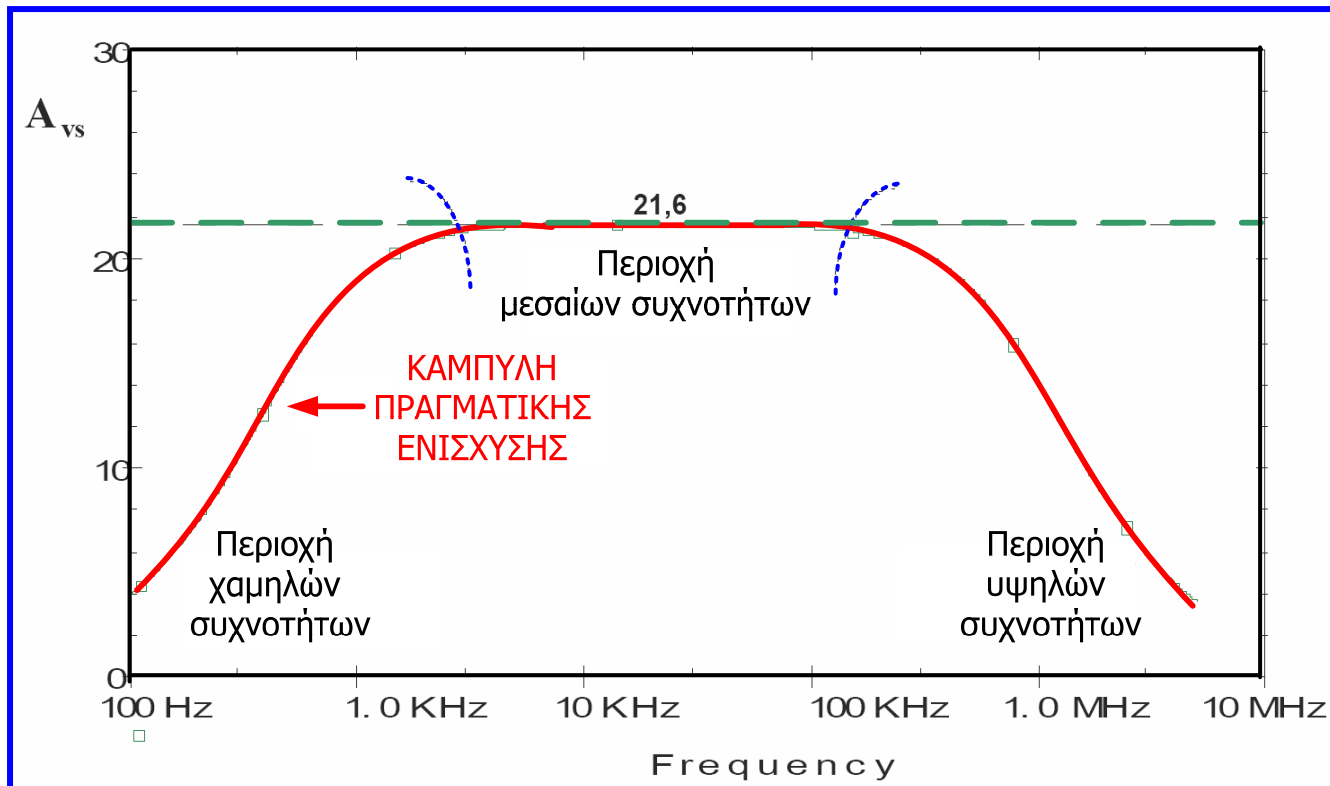
Μέγιστο πλάτος ρεύματος συλλέκτη:  
 $100 \times 8.11 \mu A = 811 \mu A$

$$v_{ce} = -i_c R'_L$$

Μέγιστο πλάτος τάσης εξόδου:  
 $811 \mu A \times 0.8 \text{ k}\Omega = 649 \text{ mV}$   
 και διαφορά φάσης  $180^\circ$

# Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών

- Οι ενισχύσεις που υπολογίσαμε ήταν σταθερές, κάτι που όμως δε συμβαίνει στην πράξη όπου οι ενισχύσεις μεταβάλλονται ανάλογα με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος εισόδου.
- Η καμπύλη του μέτρου της ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας αναφέρεται ως **απόκριση συχνότητας μέτρου** ενός ενισχυτή.

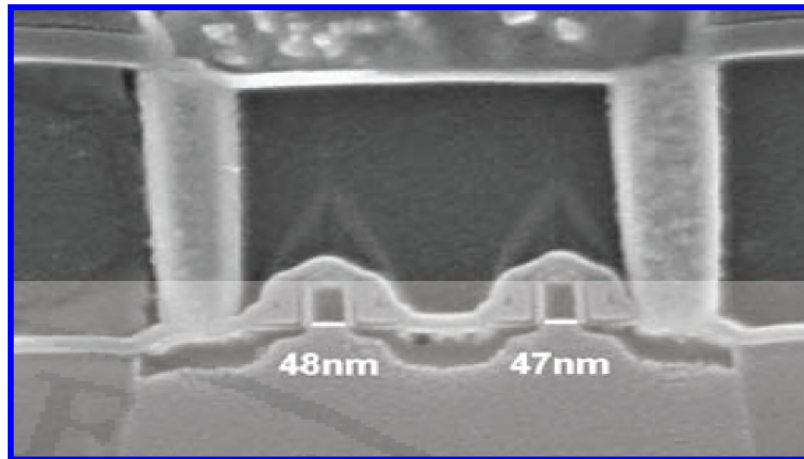
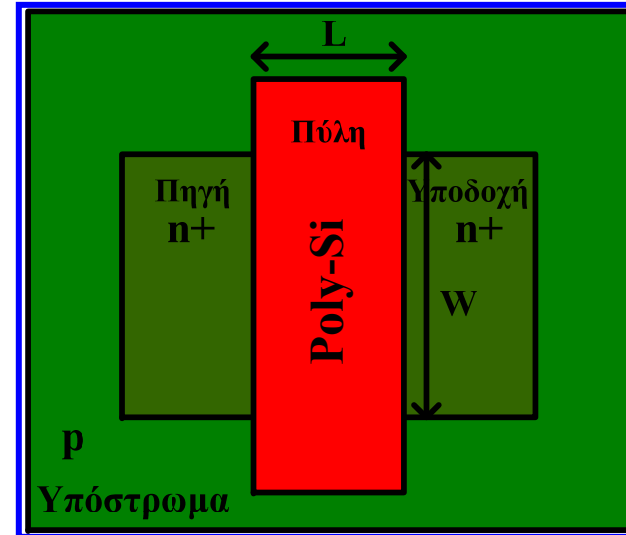
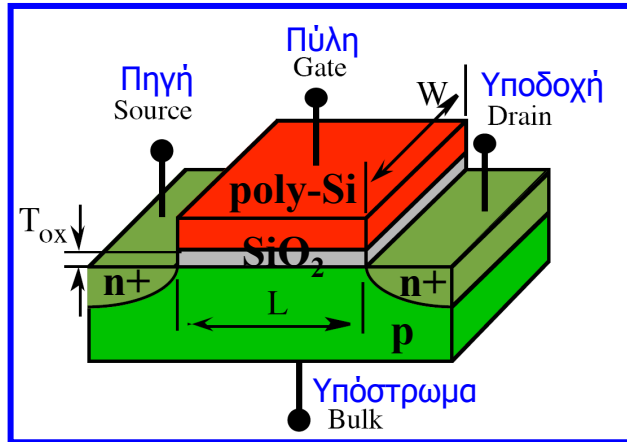




# Εισαγωγή στην απόκριση συχνότητας ενισχυτών

- Η τιμή του μέτρου ενίσχυσης που υπολογίσαμε μέχρι τώρα ισχύει μόνο στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων**, όπου ο ενισχυτής παρουσιάζει **ωμική συμπεριφορά**.
- Το **υβριδικό μοντέλο** του τρανζίστορ περιγράφει τη λειτουργία του τρανζίστορ μόνο στην περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων.
- Η απόκλιση που εμφανίζεται στην **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων** οφείλεται στο ότι για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή θεωρήσαμε τους **εξωτερικούς πυκνωτές** ως βραχυκυκλώματα, κάτι που δεν είναι ακριβές στην περιοχή αυτή.
- Η συμπεριφορά του ενισχυτή στην **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων** οφείλεται στις **εσωτερικές χωρητικότητες των επαφών του τρανζίστορ**, οι οποίες περιορίζουν την ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες.

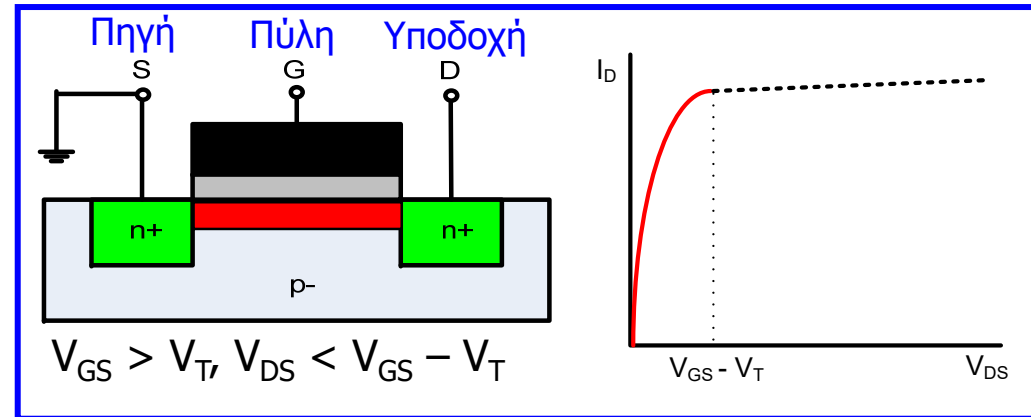
# Ανασκόπηση: τρανζίστορ MOSFET



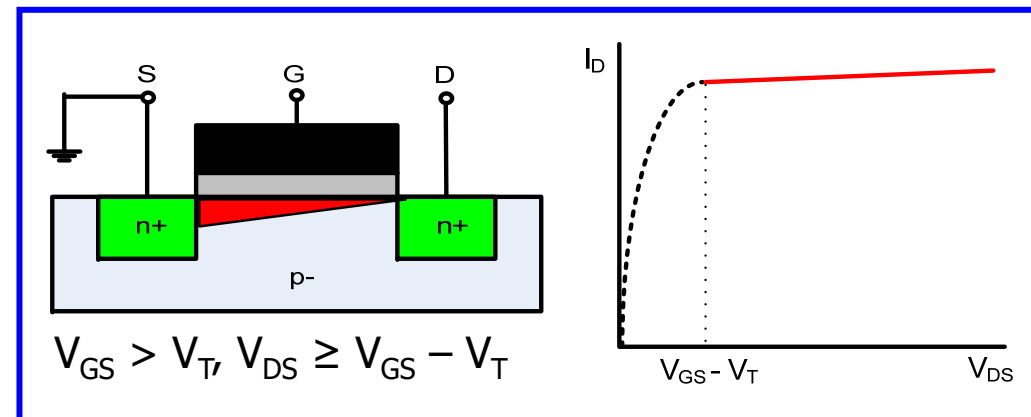
MOSFETs  
(2010)

# Ανασκόπηση: λειτουργία τρανζίστορ MOSFET

- Στο τρανζίστορ nMOS όταν η τάση πύλης-πηγής υπερβαίνει την τάση κατωφλίου ( $V_T$ ), δημιουργείται αγώγιμο κανάλι τύπου n (ρεύμα ηλεκτρονίων).
- Αντίστοιχα, στο pMOS δημιουργείται ρεύμα οπών.
- Τα MOSFET αναφέρονται ως μονοπολικά τρανζίστορ αφού το ρεύμα που δημιουργείται συνίσταται από ένα είδος φορέων.
- $V_{GS} > V_{Tr}$ ,  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ : ομοιόμορφο κανάλι και το ρεύμα υποδοχής ( $I_D$ ) μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την  $V_{DS}$  (ωμική περιοχή).
- $V_{GS} > V_{Tr}$ ,  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ : το κανάλι στενεύει στην περιοχή της υποδοχής και το  $I_D$  παραμένει σχεδόν σταθερό σε σχέση με την  $V_{DS}$  (περιοχή κόρου).

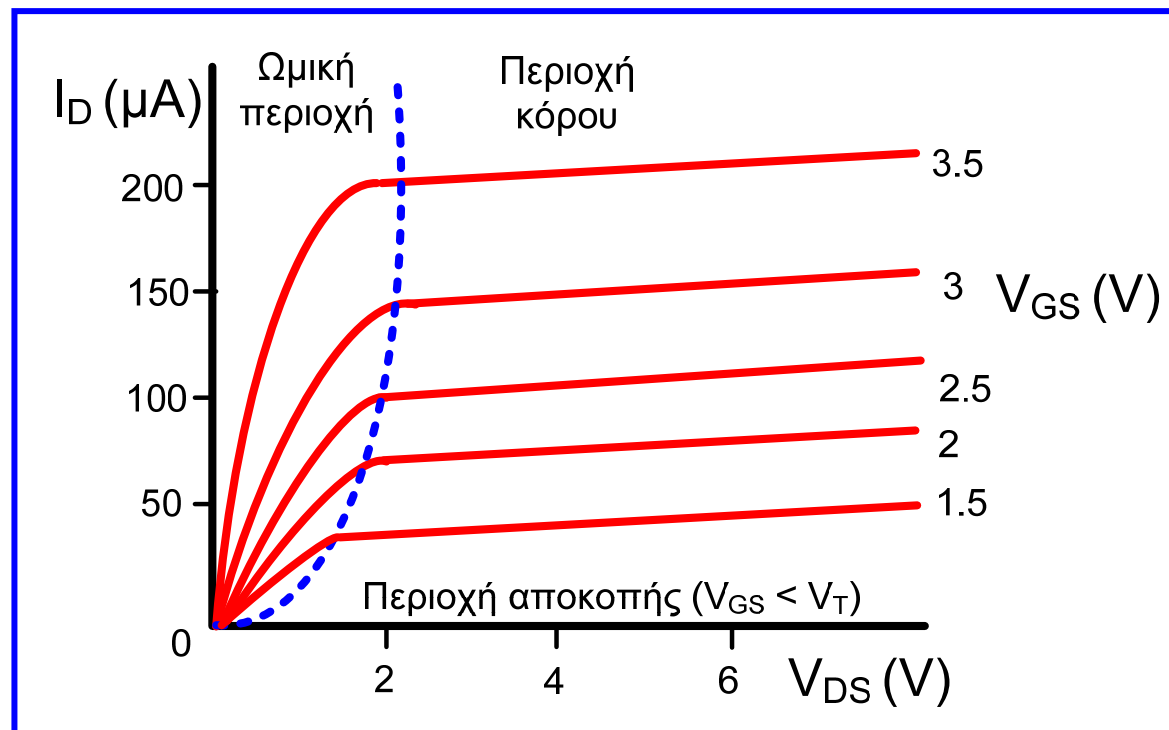


Πόλωση στην ωμική περιοχή



Πόλωση στην περιοχή κόρου

# Ανασκόπηση: χαρακτηριστικές εξόδου MOSFET



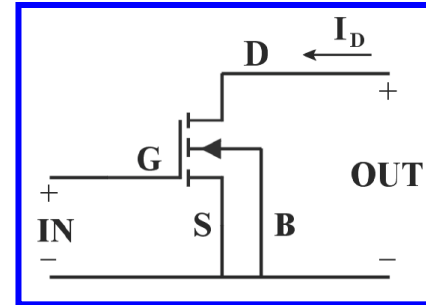
Στην περιοχή κόρου (που αντιστοιχεί στην ενεργό περιοχή του διπολικού τρανζίστορ), όσο αυξάνεται η  $V_{DS}$ , προκαλεί μία μικρή γραμμική αύξηση στο  $I_D$  λόγω του ότι μειώνεται το ενεργό μήκος του καναλιού (**διαμόρφωση μήκους καναλιού**).

Η εξάρτηση αυτή λαμβάνεται υπόψη όταν επιθυμούμε να περιγράψουμε με αυξημένη ακρίβεια τη λειτουργία του τρανζίστορ στην περιοχή κόρου.

# Λειτουργία ενισχυτή MOSFET στο συνεχές (πόλωση)

$$I_D = 0, V_{GS} \leq V_T$$

$$I_G = 0, \forall V_{GS}, V_{DS}$$



$$I_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}, V_{GS} > V_T, V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

Ωμική περιοχή

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2, V_{GS} > V_T, V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

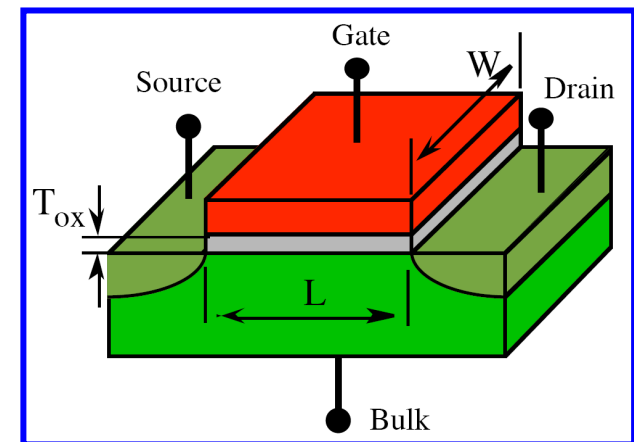
Περιοχή κόρου:  
λειτουργία  
ενισχυτή

$\beta = K_p (W / L)$  (παράγοντας κέρδους ή απολαβή)

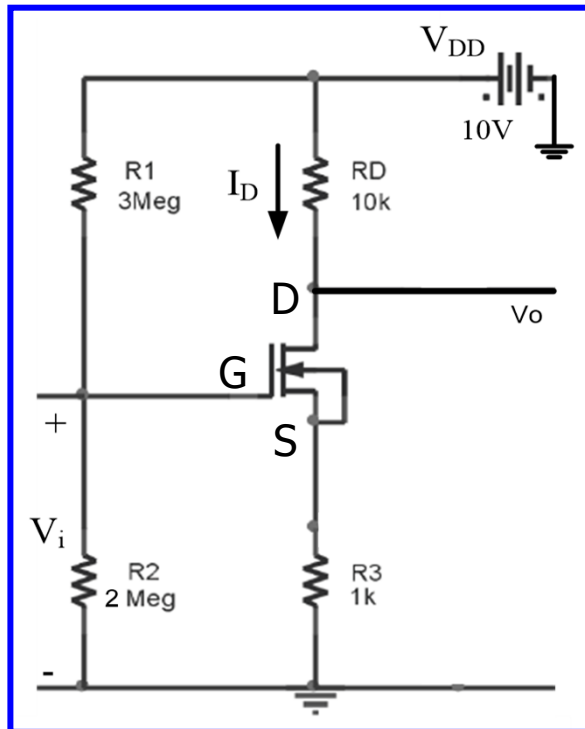
$K_p$ : παράμετρος διαγωγιμότητας

W: πλάτος καναλιού,

L: μήκος καναλιού



# Παράδειγμα 9<sup>ο</sup>: πόλωση τρανζίστορ MOSFET



Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας και ο λόγος  $W/L$  του τρανζίστορ, όταν το ρεύμα ηρεμίας ( $I_D$ ) είναι 0.5 mA. Δίνονται:  $V_T = 0.75$  V,  $K_p = 50$   $\mu\text{A}/\text{V}^2$

$$\begin{aligned} -V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_3 &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{DS} &= V_{DD} - I_D (R_D + R_3) = 4.5 \text{ V} \end{aligned}$$

Σημείο λειτουργίας (Q):  $(V_{DS}, I_D) = (4.5 \text{ V}, 0.5 \text{ mA})$

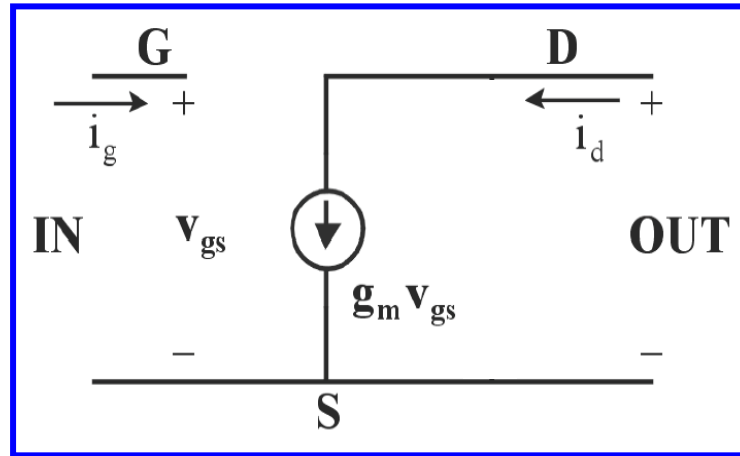
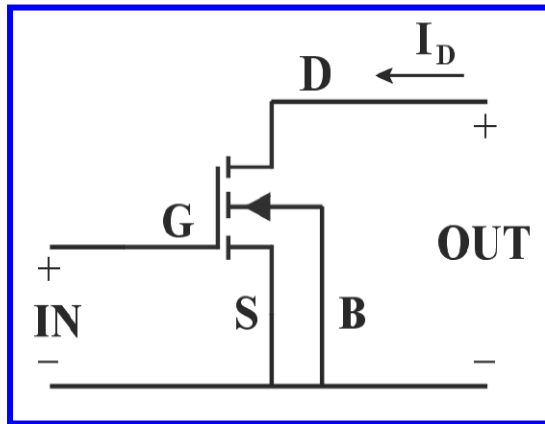
$$V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - I_D R_3 = 3.5 \text{ V}$$

Αφού πρόκειται για ενισχυτή, το τρανζίστορ είναι πολωμένο στην περιοχή κόρου ( $V_{GS} > V_T$ , και  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ ), οπότε:

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow \beta = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)^2} \Rightarrow \beta = 0.13 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} = 132 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2}$$

$$\beta = K_p \frac{W}{L} \Rightarrow \frac{W}{L} = \frac{\beta}{K_p} \Rightarrow \frac{W}{L} = 2.64$$

# Λειτουργία ενισχυτή MOSFET στο εναλλασσόμενο

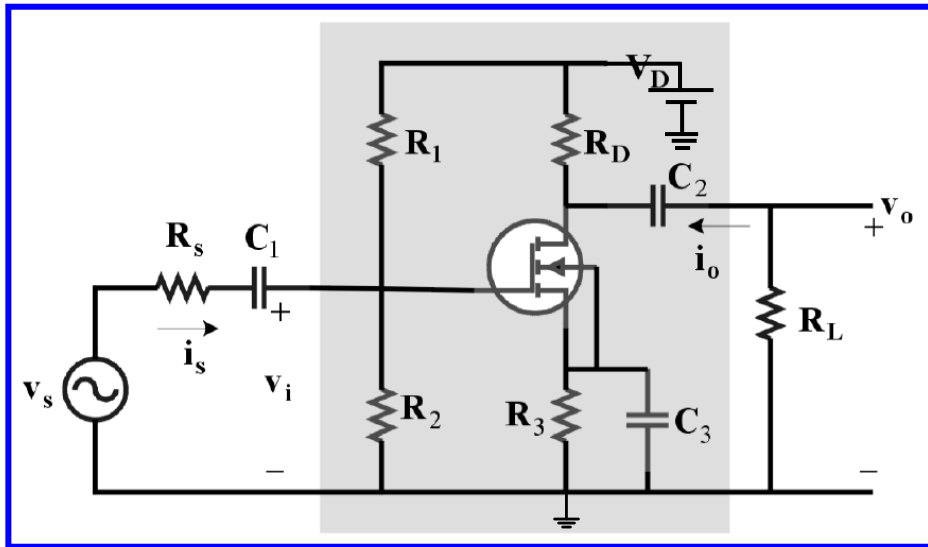


Ισοδύναμο  
κύκλωμα  
τρανζίστορ  
σε σύνδεση  
κοινής πηγής

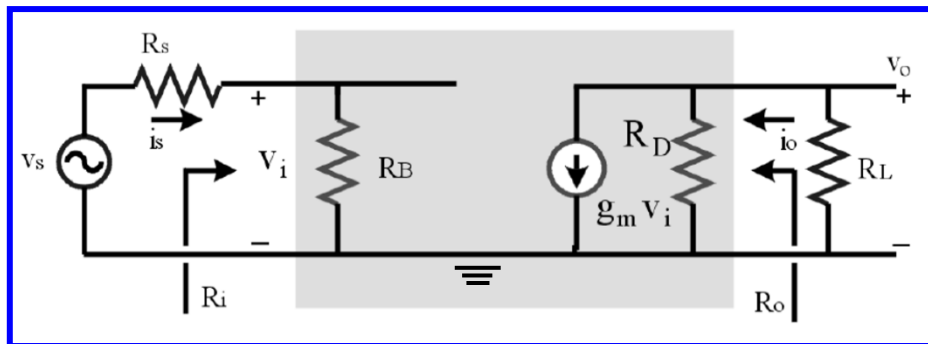
Το MOSFET σε σύνδεση κοινής πηγής αντικαθίσταται στο εναλλασσόμενο (περιοχή μεσαίων συχνοτήτων) από μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση (ισοδύναμο κύκλωμα) με τη βοήθεια της παραμέτρου  $g_m$  (διαγωγιμότητα).

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = \sqrt{2\beta I_D}$$

# Απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής



$$R_B = R_1 // R_2$$



$$R'_L = R_D // R_L$$

$$A_{v_i} = \frac{V_o}{V_i} = -g_m R'_L$$

$$A_{v_o} = A_{v_i} |_{R_L = \infty} = -g_m R_D$$

$$A_{i_L} = \frac{i_L}{i_s} = -g_m \cdot \frac{R_D}{R_D + R_L} R_B$$

$$A_{i_o} = \frac{i_L}{i_s} \Big|_{R_L = 0} = -g_m R_B$$

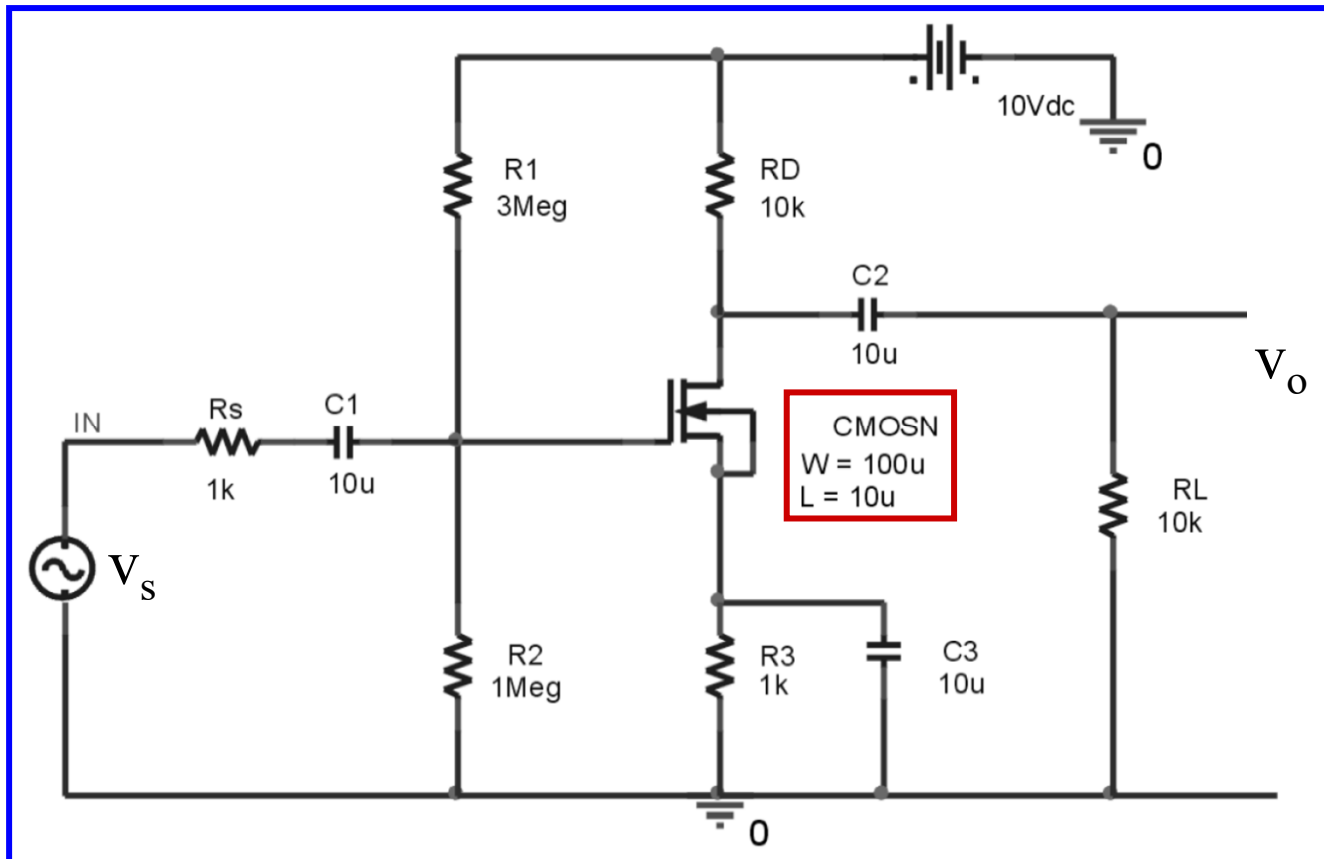
$$R_i = \frac{V_i}{i_s} = R_B$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{(v_i = 0, R_L = \infty)} = R_D$$

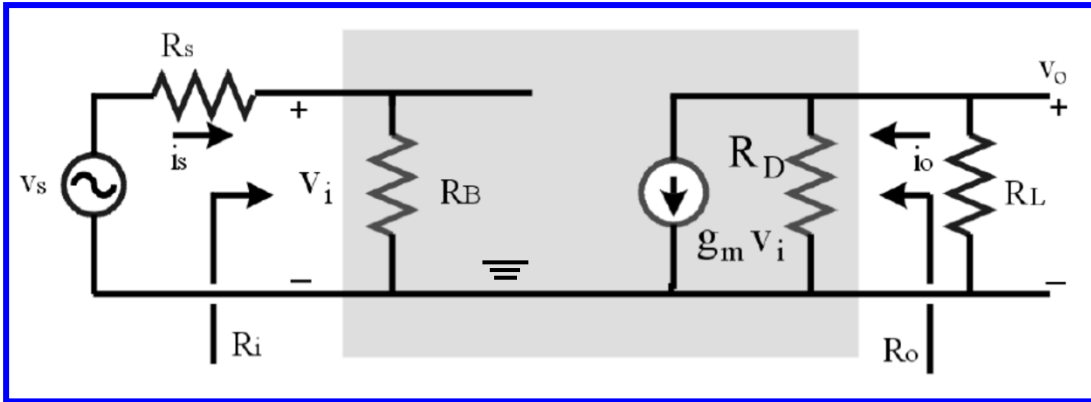


# Παράδειγμα 10<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινής πηγής

Δίνεται ο ενισχυτής κοινής πηγής του σχήματος με ημιτονική τάση εισόδου πλάτους 10 mV και συχνότητας 20 KHz. Για το MOSFET δίνονται  $K_p = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$ , ρεύμα λειτουργίας ( $I_D$ ) 0.42 mA. θεωρούμε ότι ο ενισχυτής λειτουργεί στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων. Ζητείται να προσδιοριστούν τα μεγέθη:  $A_{v_s}$ ,  $R_{i_r}$ ,  $R_{o_r}$  και να χαραχθούν οι κυματομορφές του σήματος πηγής εισόδου και του σήματος εξόδου.



# Παράδειγμα 10<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινής πηγής



$$R'_L = R_D // R_L = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = R_1 // R_2 = 0.75 \text{ M}\Omega$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 648 \mu\text{S}$$

$$V_o = -g_m V_i R'_L$$

$$V_i = \frac{R_B}{R_s + R_B} V_s$$

$$V_o = -g_m \frac{R_B}{R_s + R_B} V_s R'_L$$

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = -g_m \frac{R_B}{R_s + R_B} R'_L = -3.23$$

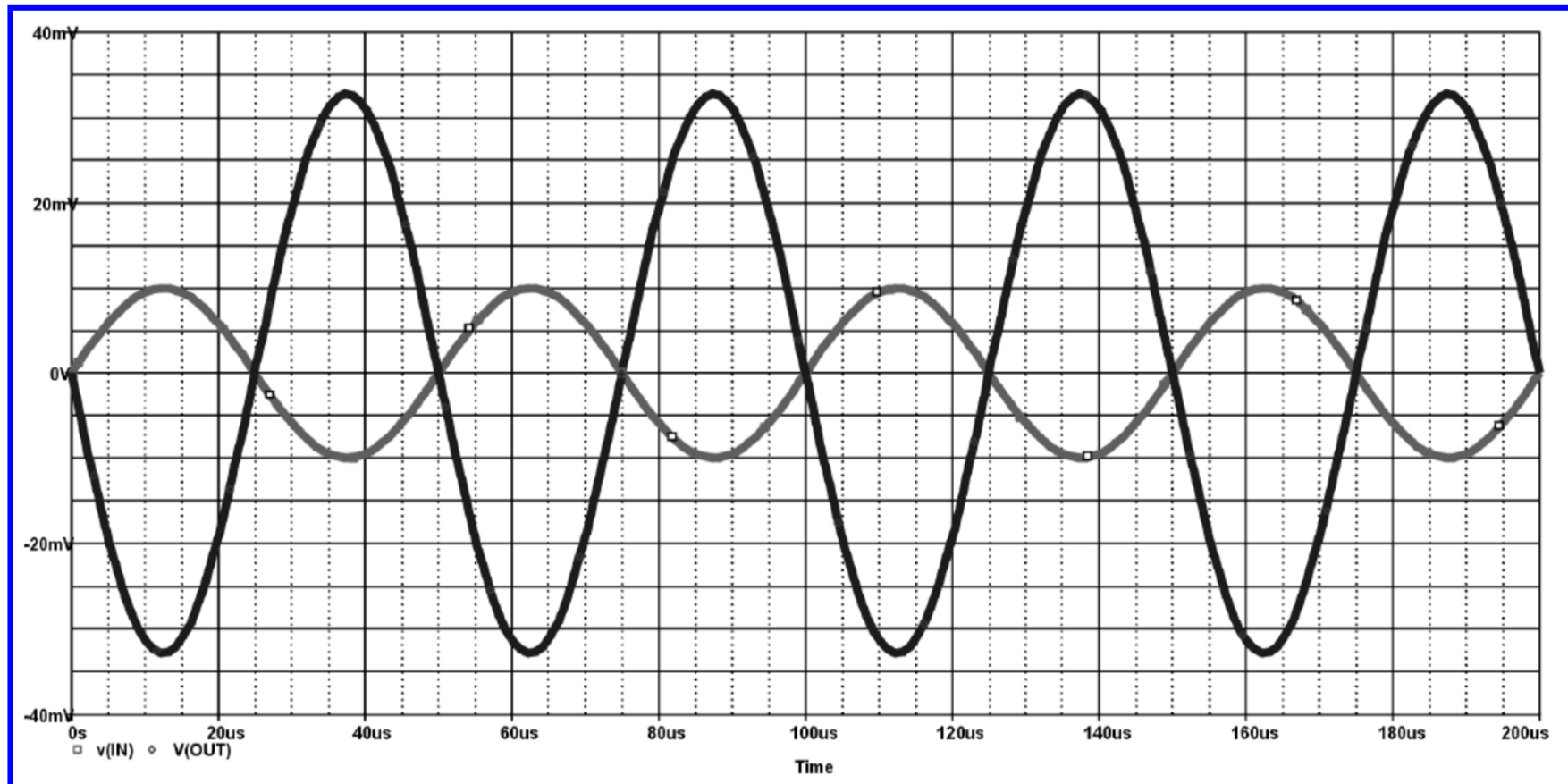
$$R_o = \frac{V_o}{i_o} \Big|_{(V_i=0, R_L=\infty)} = R_D$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_s} = R_B$$

- Το μείον που προκύπτει στην ενίσχυση σημαίνει διαφορά φάσης 180°, μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου.
- Στην χάραξη των κυματομορφών είναι εμφανής η ενίσχυση του σήματος εισόδου που προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς, καθώς επίσης και η διαφορά φάσης των 180°.

# Παράδειγμα 10<sup>ο</sup>: ενισχυτής κοινής πηγής

$$V_o = -3.23 V_s$$



# Συμπεράσματα

- Ενισχυτής είναι ένα **δίθυρο κύκλωμα** με έλεγχο της εξόδου από την είσοδο.
- Ένας ενισχυτής παρεμβάλλεται μεταξύ μίας **πηγής σήματος** και ενός **φορτίου**.
- Η πηγή σήματος οδηγεί την είσοδο του ενισχυτή με εναλλασσόμενο σήμα, το οποίο αφού ενισχυθεί από τον ενισχυτή, εφαρμόζεται στο φορτίο.
- Η δημιουργία ενός ενισχυτή είναι εφικτή όταν έχουμε στη διάθεσή μας ένα ηλεκτρονικό στοιχείο του οποίου η ηλεκτρική συμπεριφορά είναι **συμπεριφορά ελεγχόμενης πηγής τάσης ή ρεύματος**.
- Τέτοια στοιχεία παρέχουν τη δυνατότητα ενίσχυσης ισχύος σήματος και για το λόγο αυτό αναφέρονται ως **ενεργά στοιχεία** ή **βαθμίδες** σε αντιπαράθεση με τα παθητικά ηλεκτρικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία).
- Το **διπολικό τρανζίστορ** συμπεριφέρεται ως **ελεγχόμενη πηγή ρεύματος**, όπου το ρεύμα βάσης προκαλεί και ελέγχει το ρεύμα συλλέκτη, συγκριτικά με το οποίο είναι πολύ μικρότερο.
- Η ροή ρεύματος στο τρανζίστορ επιτυγχάνεται μέσω **πηγής συνεχούς τάσης (τροφοδοσία)**, ενώ οι **αντιστάσεις** του ενισχυτή καθορίζουν τις τιμές ρευμάτων και τάσεων συνεχούς (πόλωση) και την επιθυμητή ενίσχυση.

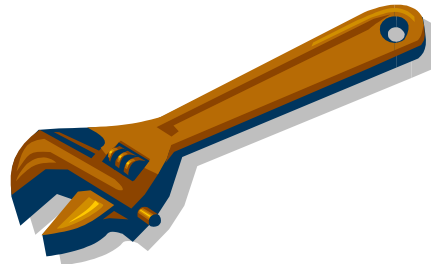
# Συμπεράσματα

- Το διπολικό τρανζίστορ, όταν το σημείο λειτουργίας του βρίσκεται στην **ενεργό περιοχή** των χαρακτηριστικών του, μπορεί να λειτουργήσει ως ενισχυτής με τρεις τρόπους σύνδεσης (**κοινού εκπομπού**, **κοινής βάσης** και **κοινού συλλέκτη**).
- Η **σύνδεση κοινού εκπομπού** είναι η μόνη που παρέχει ταυτόχρονα **ενίσχυση ρεύματος και τάσης**.
- Ο **προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας** γίνεται με χρήση των απλών γραμμικών κανόνων Kirchhoff, θεωρώντας το τρανζίστορ ως γραμμικό στοιχείο.
- Η **μελέτη ενισχυτών στο εναλλασσόμενο** γίνεται με χρήση **ισοδύναμων μοντέλων μικρού σήματος** των ενεργών βαθμίδων.
- Όπως τα ενεργά στοιχεία έτσι και ο **ενισχυτής** μπορεί να αντικατασταθεί από **ισοδύναμο κύκλωμα** (στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων) εάν είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά μεγέθη του, όπως η **ενίσχυση τάσης** ή **ρεύματος** και οι **αντιστάσεις εισόδου** και **εξόδου** του ενισχυτή.
- Στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων**, τα χαρακτηριστικά μεγέθη παραμένουν σταθερά και δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα.

# Συμπεράσματα

---

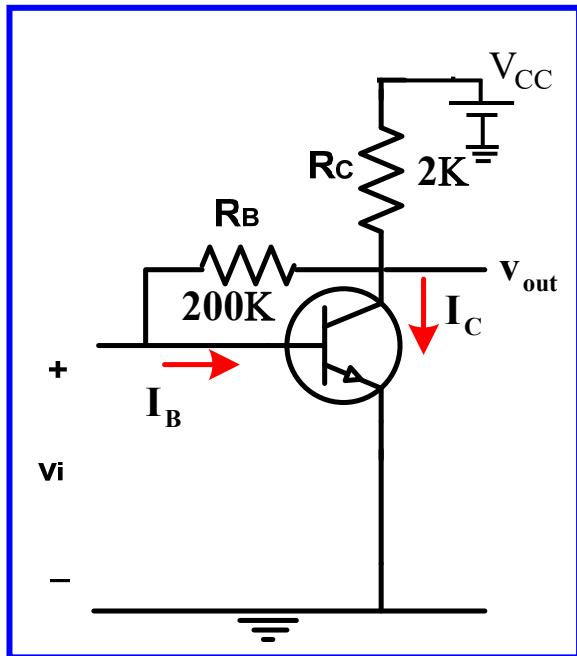
- Ιδιαίτερη σημασία στους ενισχυτές, έχει το γεγονός ότι μπορούν να προκαλέσουν **ταυτόχρονη ενίσχυση εναλλασσόμενης τάσης και ρεύματος** στην έξοδο.
- Μονομερής ενίσχυση τάσης θα μπορούσε να επιτευχθεί και με έναν μετασχηματιστή.
- Η ταυτόχρονη ενίσχυση τάσης και ρεύματος που επιτυγχάνουν οι ενισχυτές συνεπάγεται **αύξηση της στάθμης ισχύος** στην έξοδο.
- Η ενίσχυση ισχύος του σήματος στην έξοδο ενός ενισχυτή γίνεται εις βάρος της πηγής τροφοδοσίας συνεχούς, η οποία παρέχει την κύρια ροή ρεύματος στον ενισχυτή, αφού η μεταβολή του ρεύματος αυτού δημιουργεί το σήμα εξόδου.



# Ασκήσεις 1<sup>ης</sup> ενότητας

# Άσκηση 1<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος επιθυμούμε να προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας  $Q$  του διπολικού τρανζίστορ, όταν δίνονται  $\beta = 200$ ,  $V_{CC} = 10V$  και  $V_{BE} = 0.7V$ . Να χαραχθεί η γραμμή φορτίου για το συνεχές και να σημειωθεί σε αυτή το σημείο λειτουργίας  $Q$ .



Εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα Kirchhoff στους δύο βρόχους του κυκλώματος και χρησιμοποιούμε τη σχέση ρεύματος συλλέκτη και βάσης

$$\begin{aligned} V_{CC} &= (I_C + I_B) R_C + I_B R_B + V_{BE} \\ V_{CC} &= (\beta I_B + I_B) R_C + I_B R_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = 15.4 \mu A \\ I_C &= \beta I_B \Rightarrow I_C = 3.08 \text{ mA} \\ V_{CC} &= (I_C + I_B) R_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 3.8 \text{ V} \end{aligned}$$

$$Q (3.8V, 3.08mA)$$



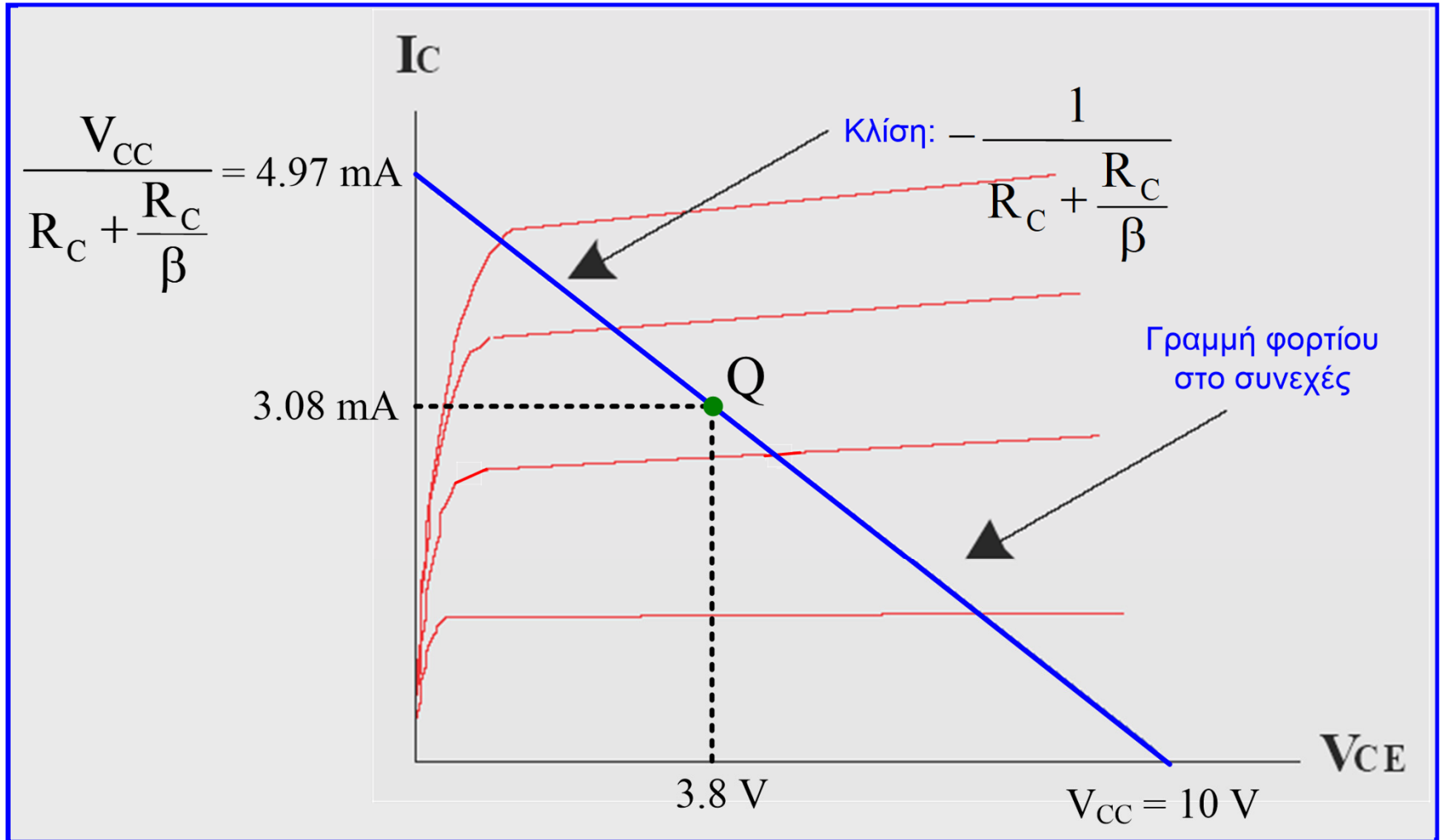
# Άσκηση 1<sup>η</sup>

Για να χαράξουμε την γραμμή φορτίου εφαρμόζουμε τον 2ο κανόνα Kirchhoff στο **βρόχο εξόδου** του ενισχυτή:

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

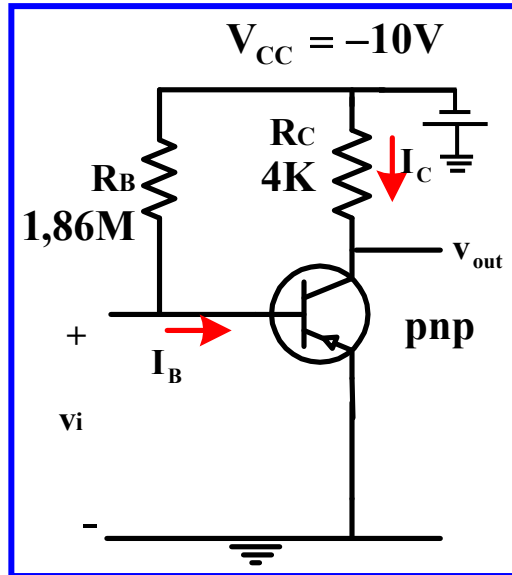
$$I_C = -\frac{1}{R_C + \frac{R_C}{\beta}}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + \frac{R_C}{\beta}}$$

# Άσκηση 1<sup>η</sup>



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος επιθυμούμε να προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας  $Q$  του διπολικού τρανζίστορ, όταν δίνονται  $\beta = 200$  και  $V_{BE} = -0.7V$ .



- Ο ενισχυτής περιλαμβάνει τρανζίστορ **pnp** και **όχι nnp** και η **τάση πόλωσης** ( $V_{CC}$ ) είναι **αρνητική**.
- Η τοπολογία του κυκλώματος πόλωσης είναι όμοια με εκείνη του τρανζίστορ nnp με τη διαφορά ότι η **τάση τροφοδοσίας είναι αρνητική**.
- Όταν ισχύουν τα παραπάνω, αντιμετωπίζουμε το pnp τρανζίστορ αρχικά όπως ένα nnp τρανζίστορ, δηλαδή εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα Kirchhoff θεωρώντας θετική την τάση τροφοδοσίας καθώς και τις υπόλοιπες συνεχείς τάσεις και τα συνεχή ρεύματα.
- Στο τέλος **θέτουμε αντίθετο πρόσημο** στα συνεχή ρεύματα και στις συνεχείς τάσεις που προκύπτουν.

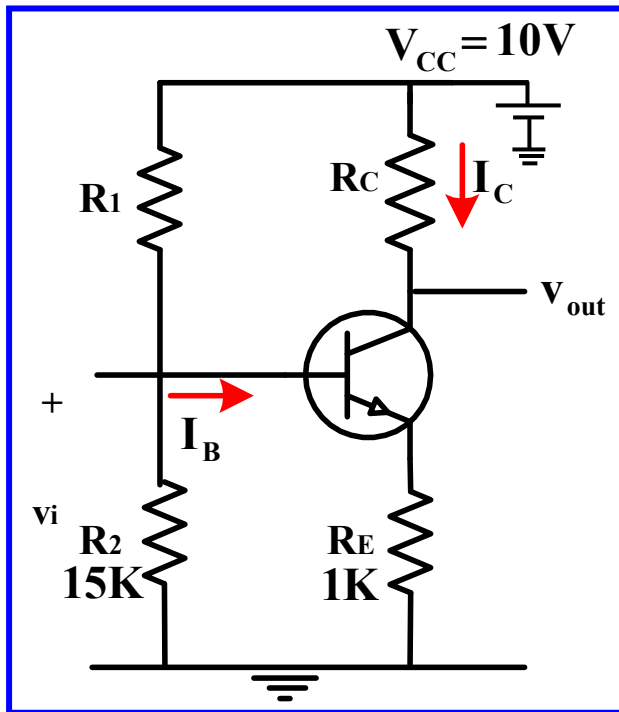
$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_B R_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = 5 \mu A \\ I_C &= \beta I_B = 1 \text{ mA} \\ V_{CC} &= I_C R_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 6 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_B &= -5 \mu A \\ I_C &= -1 \text{ mA} \\ V_{CE} &= -6 \text{ V} \end{aligned}$$

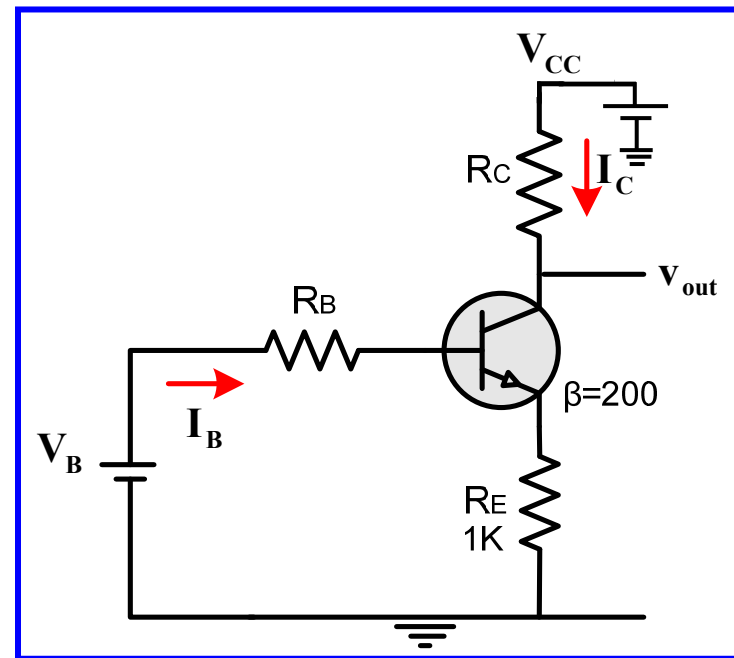
$$Q (-6V, -1mA)$$

# Άσκηση 3<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιοριστούν οι τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_C$  ώστε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ να είναι  $Q(4V, 2mA)$ . Δίνονται:  $\beta = 200$  και  $V_{BE} = 0.7 V$ .



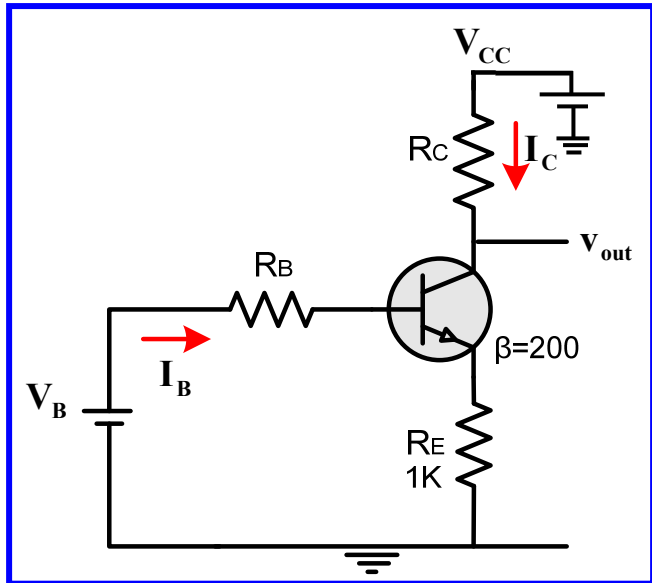
Στον ενισχυτή που δίνεται έχουμε κύκλωμα πόλωσης με διαιρέτη τάσης και αυτοπόλωση εκπομπού, οπότε αρχικά εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή κατά Thevenin:



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

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

# Άσκηση 3<sup>η</sup>



Θεωρήσαμε κατά προσέγγιση ότι στον εκπομπό του τρανζίστορ ρέει το ρεύμα του συλλέκτη, δηλ. ότι:  $I_C + (1/\beta) I_C = I_C$  ( $\beta \gg 1$ ).

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 10\mu\text{A}$$

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

$$V_B \approx I_B R_B + V_{BE} + I_C R_E$$

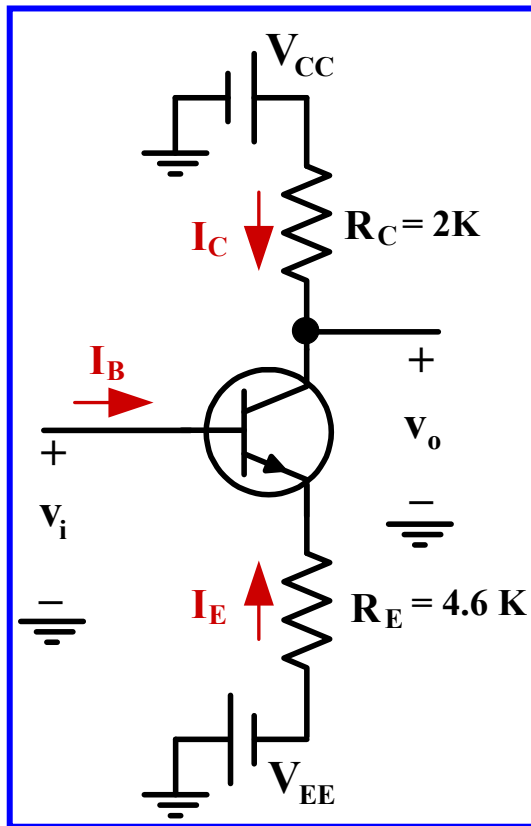
$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = 50.35\text{k}\Omega$$

$$V_{CC} \approx I_C R_C + V_{CE} + I_C R_E \Rightarrow R_C = 2\text{k}\Omega$$

# Άσκηση 4<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος επιθυμούμε να προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας Q του διπολικού τρανζίστορ, όταν δίνονται  $\beta = 200$  και  $V_{BE} = 0.7V$ .



Το τρανζίστορ έχει πολωθεί με συμμετρικές πηγές των 5 V.

Εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα Kirchhoff σε δύο βρόχους του κυκλώματος και χρησιμοποιούμε τη σχέση ρεύματος βάσης και συλλέκτη:

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

$$V_{BE} + (I_C + I_C / \beta)R_E - V_{EE} = 0$$

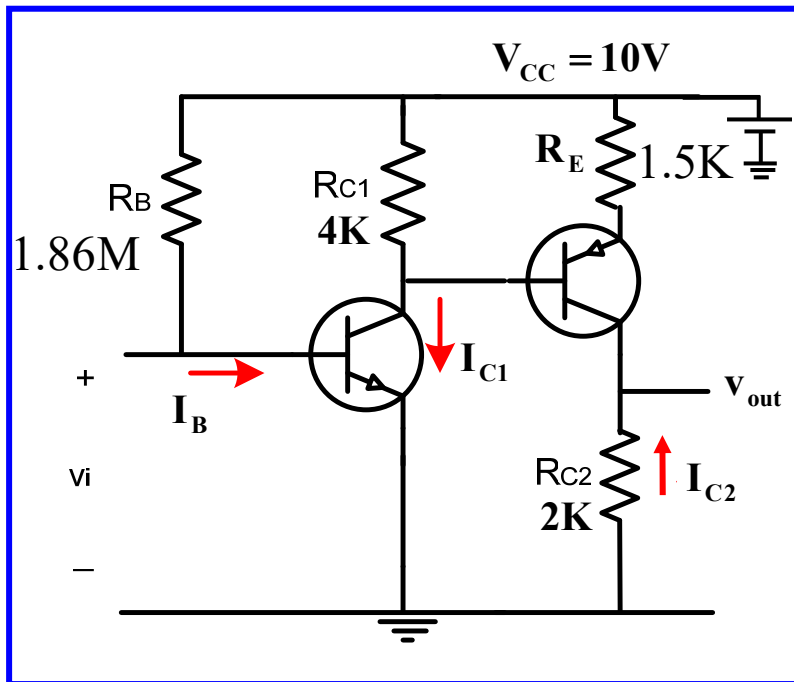
$$\Rightarrow I_C = 0.93 \text{ mA}$$

$$V_{CC} + V_{EE} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_B)R_E \Rightarrow$$
$$V_{CC} + V_{EE} = I_C R_C + V_{CE} + (I_C + I_C / \beta)R_E \Rightarrow$$
$$V_{CE} = 3.8 \text{ V}$$

$$Q (3.8V, 0.93mA)$$

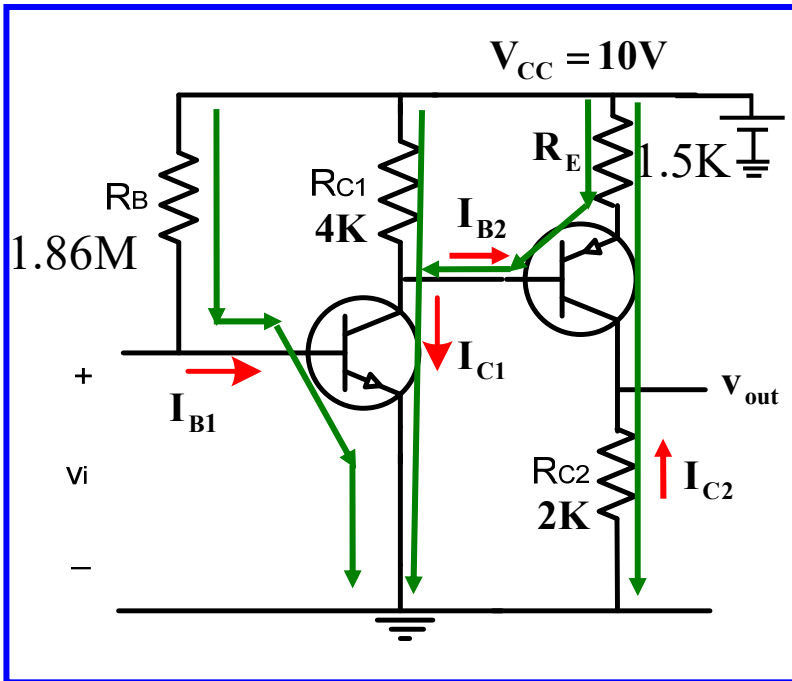
# Άσκηση 5<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος επιθυμούμε να προσδιορίσουμε τα σημεία λειτουργίας των τρανζιστορ, όταν δίνονται για κάθε τρανζιστορ:  $\beta = 200$  και  $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$ .  
Υποθέστε ότι  $\beta \gg 1$ .



- Ο ενισχυτής αποτελεί περίπτωση **πόλωσης** τρανζιστορ **npn** και **pnp** στο **ίδιο κύκλωμα** με **κοινή (θετική) τάση τροφοδοσίας**.
- Λόγω της θετικής τάσης τροφοδοσίας, η τοπολογία πόλωσης του **pnp** τρανζιστορ παρουσιάζεται ανεστραμμένη, με στόχο να διατηρηθούν η επαφή βάσης-εκπομπού ορθά πολωμένη και η επαφή βάσης-συλλέκτη ανάστροφα πολωμένη.

# Άσκηση 5<sup>η</sup>



Θεωρήσαμε κατά προσέγγιση ότι στον εκπομπό κάθε τρανζίστορ ρέει το ρεύμα του συλλέκτη, δηλ. ότι:  $I_C + (1/\beta) I_C = I_C$  ( $\beta \gg 1$ ).

$$V_{CC} = I_{B1} R_B + V_{BE1} \Rightarrow I_{B1} = 5 \mu A$$

$$I_{C1} = \beta \cdot I_{B1} \Rightarrow I_{C1} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = (I_{C1} + I_{B2}) R_{C1} + V_{CE1} \approx I_{C1} R_{C1} + V_{CE1}$$

$$\Rightarrow V_{CE1} = 6 \text{ V}$$

$$V_{CC} \approx -I_{C2} R_E + V_{EB2} + V_{CE1} \Rightarrow I_{C2} = -2.2 \text{ mA}$$

$$V_{CC} \approx -I_{C2} (R_{C2} + R_E) + V_{EC2} \Rightarrow V_{CE2} = -2.3 \text{ V}$$

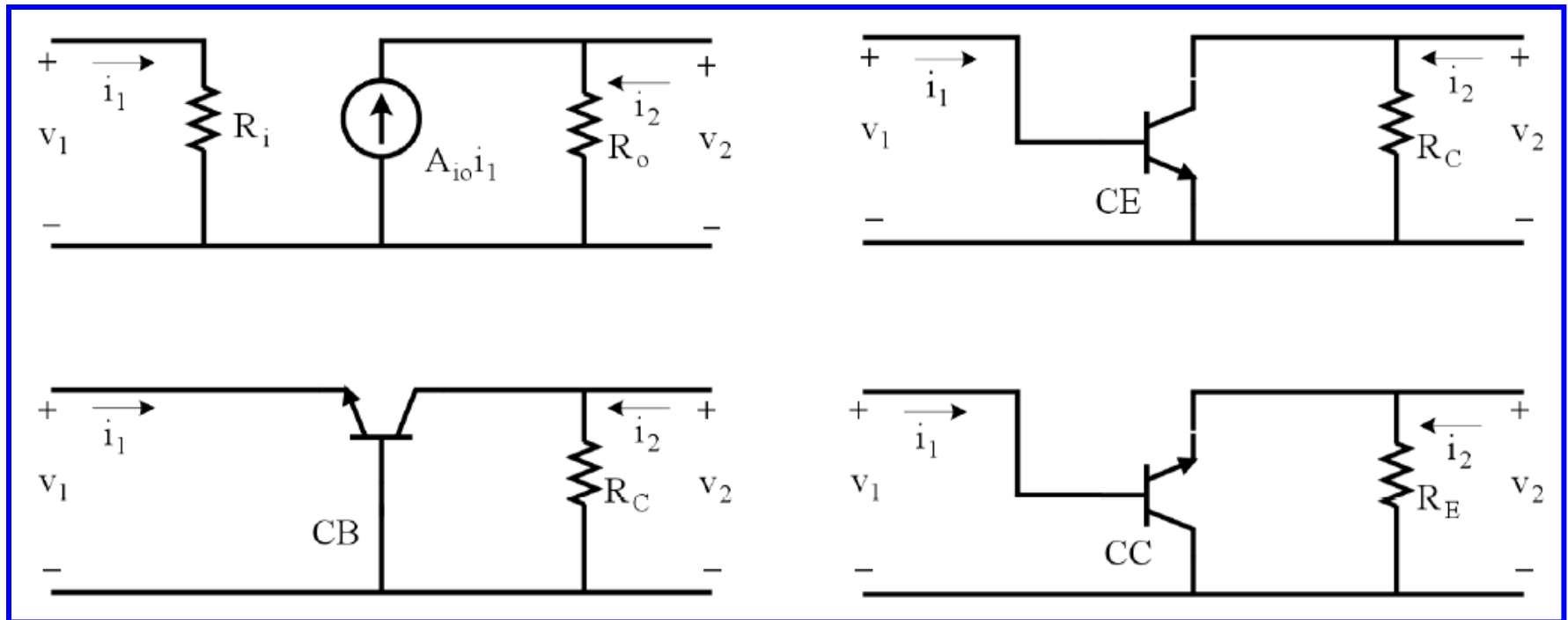
$Q_1$  (6V, 1mA)  
 $Q_2$  (-2.3V, -2.2mA)

Όπως αναμενόταν, οι τιμές ηρεμίας (ρεύμα συλλέκτη και τάση συλλέκτη-εκπομπού) του διπολικού τρανζίστορ **τύπου pnp**, προκύπτουν **αρνητικές**.

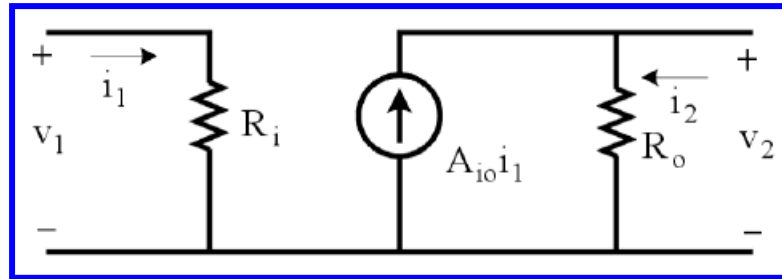


# Άσκηση 6<sup>η</sup>

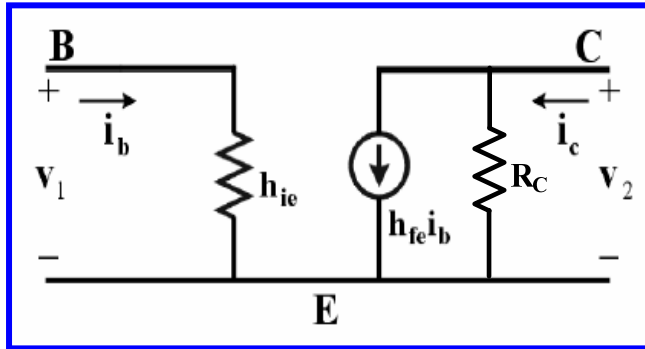
Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ενισχυτή, όπου  $R_i$  είναι η αντίσταση εισόδου,  $R_o$  η αντίσταση εξόδου και  $A_{io}$  η ενίσχυση ρεύματος του ενισχυτή. Προσδιορίστε τα παραπάνω στοιχεία για κάθε έναν από τους ενισχυτές που επίσης δίνονται στο παρακάτω σχήμα χρησιμοποιώντας τα ισοδύναμα μοντέλα των διπολικών τρανζίστορ και συγκρίνετε τα αποτελέσματα.



# Άσκηση 6<sup>η</sup>



Σύνδεση  
CE (ΚΕ)

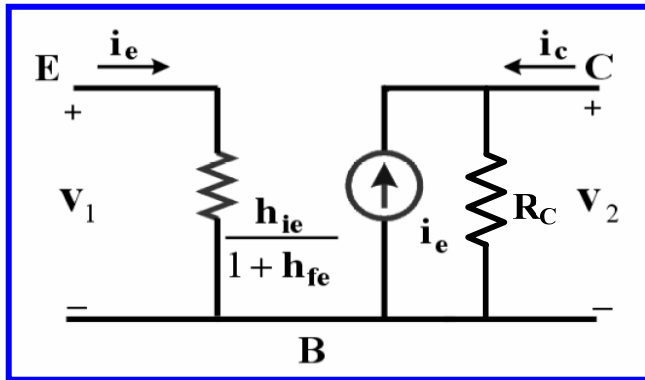


$$R_i = h_{ie}$$

$$R_o = R_C$$

$$A_{io} = -h_{fe}$$

Σύνδεση  
CB (ΚΒ)

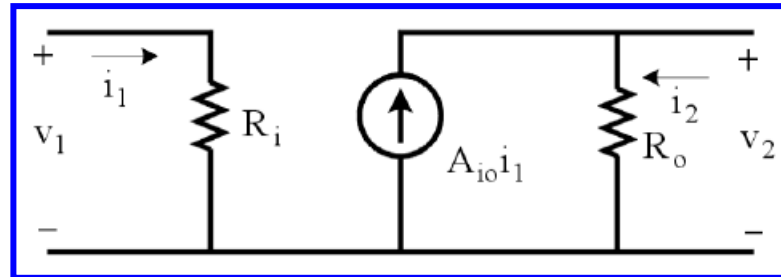


$$R_i = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

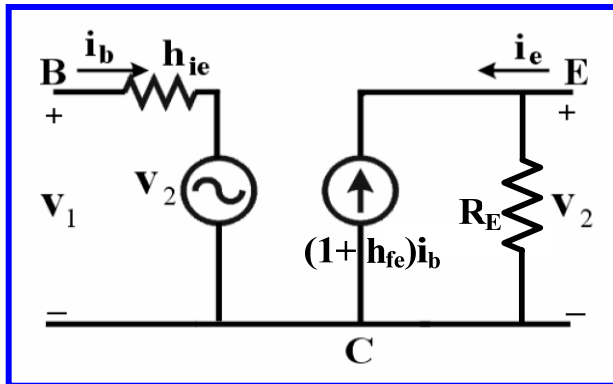
$$R_o = R_C$$

$$A_{io} = 1$$

# Άσκηση 6<sup>η</sup>



Σύνδεση CC (ΚΣ)



Υπάρχει ανατροφοδότηση της εξόδου ( $v_2$ ) στην είσοδο που επηρεάζει τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου.

$$A_{io} = 1 + h_{fe}$$

$$v_2 = (1 + h_{fe}) i_b R_E$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_b} = \frac{h_{ie} i_b + v_2}{i_b} = \frac{h_{ie} i_b + (1 + h_{fe}) i_b R_E}{i_b}$$

$$\Rightarrow R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E$$

$$R_o = \frac{v_2}{i_e} \Big|_{v_i=0} = \frac{v_2}{\frac{v_2}{R_E} + (1 + h_{fe}) i_b} = \frac{v_2}{\frac{v_2}{R_E} + (1 + h_{fe}) \frac{v_2}{h_{ie}}}$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{fe})}{h_{ie}}} = R_E // \frac{h_{ie}}{(1 + h_{fe})} \approx \frac{h_{ie}}{(1 + h_{fe})}$$

# Άσκηση 6<sup>η</sup>

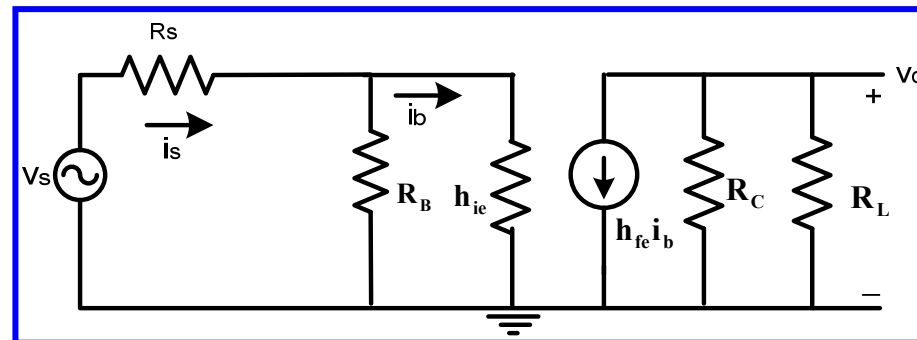
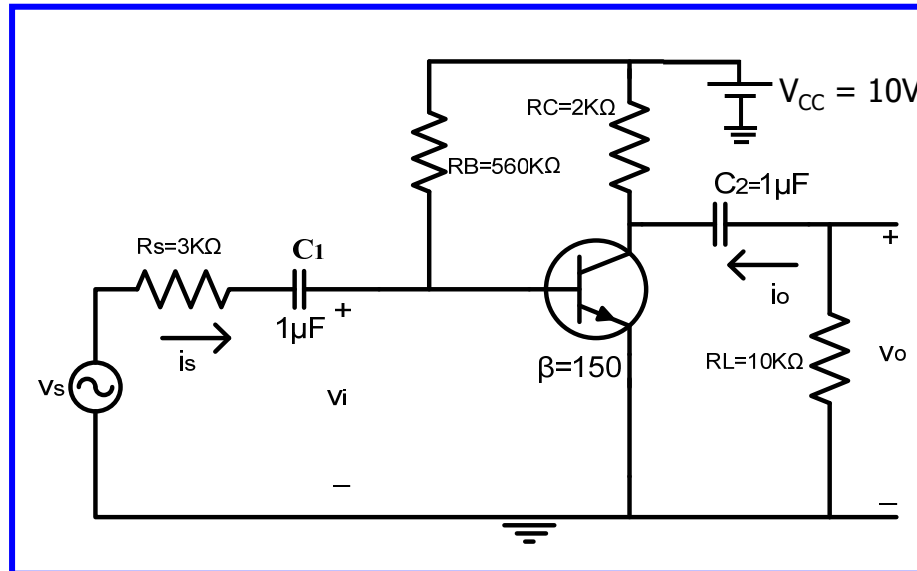
## Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στοιχεία ενισχυτή	Σύνδεση CE	Σύνδεση CB	Σύνδεση CC
$R_i$	$h_{ie}$	$h_{ie} / (1+h_{fe})$	$h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E$
$R_o$	$R_C$	$R_C$	$h_{ie} / (1+h_{fe})$
$A_{io}$	$-h_{fe}$	1	$(1+h_{fe})$

- Οι συνδέσεις CE και CC παρουσιάζουν μεγάλη **αντίσταση εισόδου** (της τάξης  $K\Omega$  για τη σύνδεση CE και μερικών δεκάδων  $K\Omega$  για τη σύνδεση CC, αφού η αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ  $h_{ie}$  είναι συνήθως της τάξης του  $K\Omega$ ), ενώ η σύνδεση CB παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση εισόδου (μερικά  $\Omega$ , αφού η αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ  $h_{ie}$  είναι συνήθως της τάξης του  $K\Omega$ , αλλά η ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ  $h_{fe}$  λαμβάνει συνήθως τιμές μεγαλύτερες του 100).
- Οι συνδέσεις CE και CB παρουσιάζουν μεγάλη **αντίσταση εξόδου** (της τάξης  $K\Omega$  αφού η αντίσταση συλλέκτη είναι συνήθως της τάξης του  $K\Omega$ ), ενώ η σύνδεση CC παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση εξόδου (μερικά  $\Omega$ ).
- Οι συνδέσεις CE και CC παρουσιάζουν μεγάλη **ενίσχυση ρεύματος** (αφού η ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ  $h_{fe}$  λαμβάνει συνήθως τιμές μεγαλύτερες του 100), ενώ η σύνδεση CB δεν παρουσιάζει ενίσχυση ρεύματος.

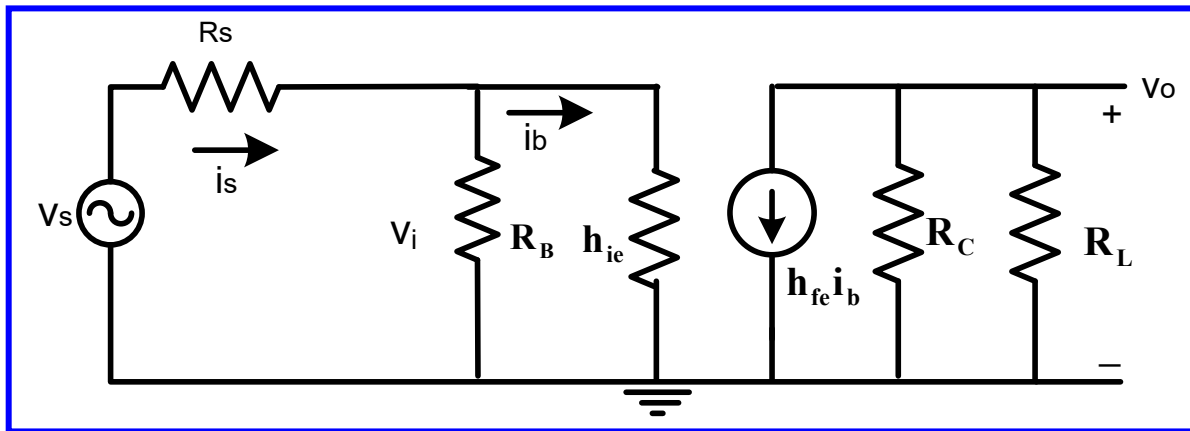
# Άσκηση 7<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιοριστεί η ενίσχυση τάσης  $A_{v_s}$  στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων όπου οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Δίνονται:  $h_{fe} = 150$  και  $h_{ie} = 1,5 \text{ k}\Omega$ .



Ισοδύναμο κύκλωμα  
του ενισχυτή  
στο εναλλασσόμενο

# Άσκηση 7η



$$R'_L = R_L // R_C = 1.66 \text{ k}\Omega$$

$$V_i = \frac{(R_B // h_{ie})}{(R_B // h_{ie}) + R_s} \cdot V_s = 0.333 \cdot V_s$$

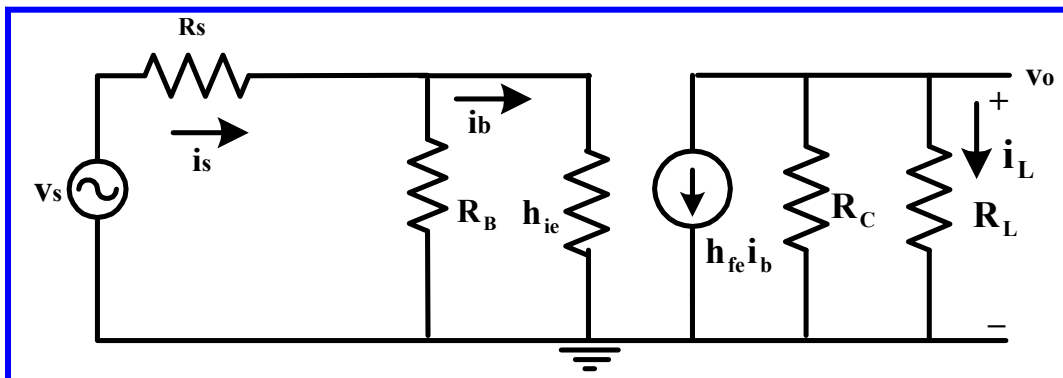
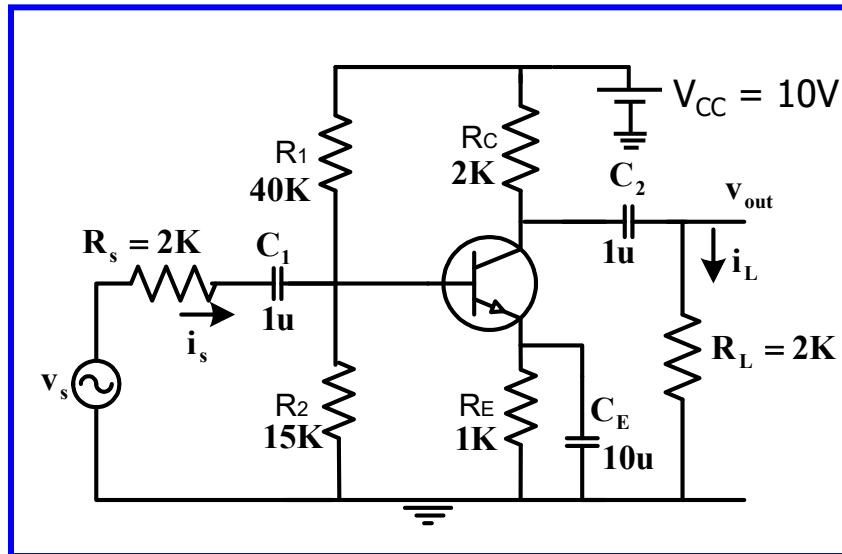
$$i_b = \frac{V_i}{h_{ie}}$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R'_L = -249 \cdot 10^3 \cdot i_b = -\frac{249 \cdot 10^3 \cdot V_i}{1.5 \cdot 10^3} = -\frac{249 \cdot 10^3 \cdot 0.333 \cdot V_s}{1.5 \cdot 10^3}$$

$$A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = -55.3$$

# Άσκηση 8<sup>η</sup>

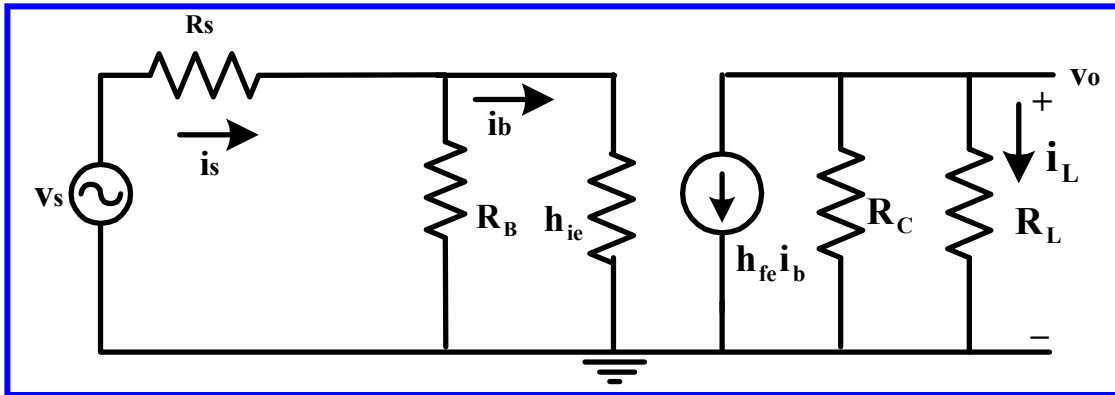
Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιοριστεί η ενίσχυση ρεύματος  $A_{iL}$  στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων του ενισχυτή όπου οι πυκνωτές  $C_1$ ,  $C_2$  και  $C_E$  λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Δίνονται:  $h_{fe} = 200$  και  $h_{ie} = 2.72 \text{ k}\Omega$ .



Ισοδύναμο κύκλωμα  
του ενισχυτή  
στο εναλλασσόμενο

$$R_B = R_1 // R_2 = 10.9 \text{ k}\Omega$$

## Άσκηση 8<sup>η</sup>



Υπολογίζουμε το ρεύμα του φορτίου μέσω των δύο διαιρετών ρεύματος που προκύπτουν στην έξοδο και στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος.

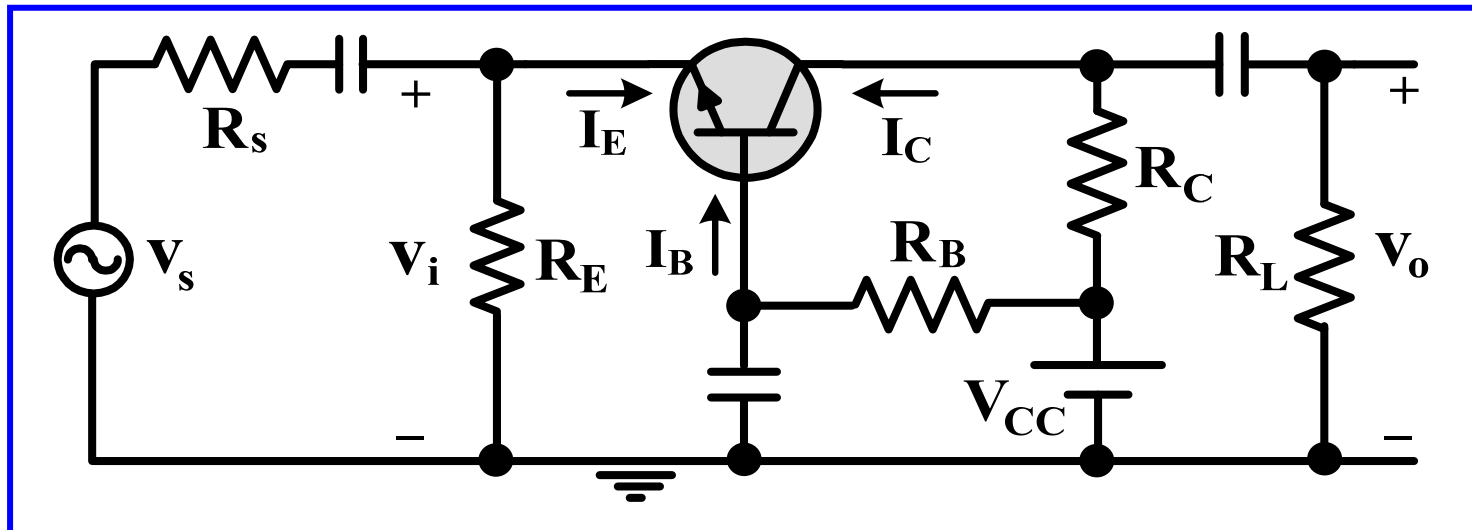
$$i_L = -h_{fe} i_b \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} = -h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{h_{ie} + R_B} \cdot i_s$$

$$A_{iL} = \frac{i_L}{i_s} = -h_{fe} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{ie}} = -80$$



# Άσκηση 9η

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 υπολογιστεί το ρεύμα συλλέκτη και η τάση συλλέκτη-εκπομπού του τρανζίστορ, καθώς και η ενίσχυση τάσης  $A_{v_s} = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



# Άσκηση 9η

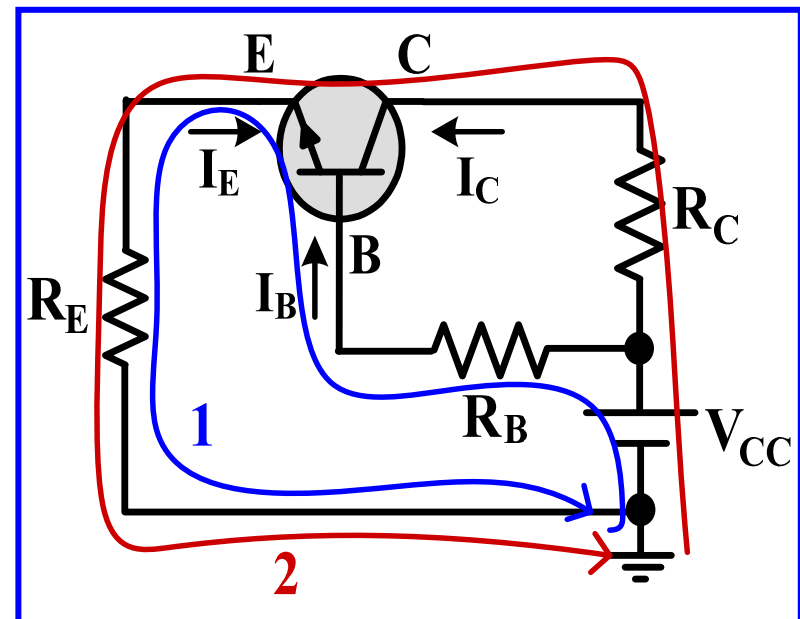
$$\begin{aligned} -V_{CC} + I_B \cdot R_B + V_{BE} - I_E \cdot R_E &= 0 \Rightarrow -V_{CC} + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) \cdot R_E = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow -V_{CC} + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{BE} + \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} \right) \cdot R_E &= 0 \Rightarrow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

Βρόχος 1

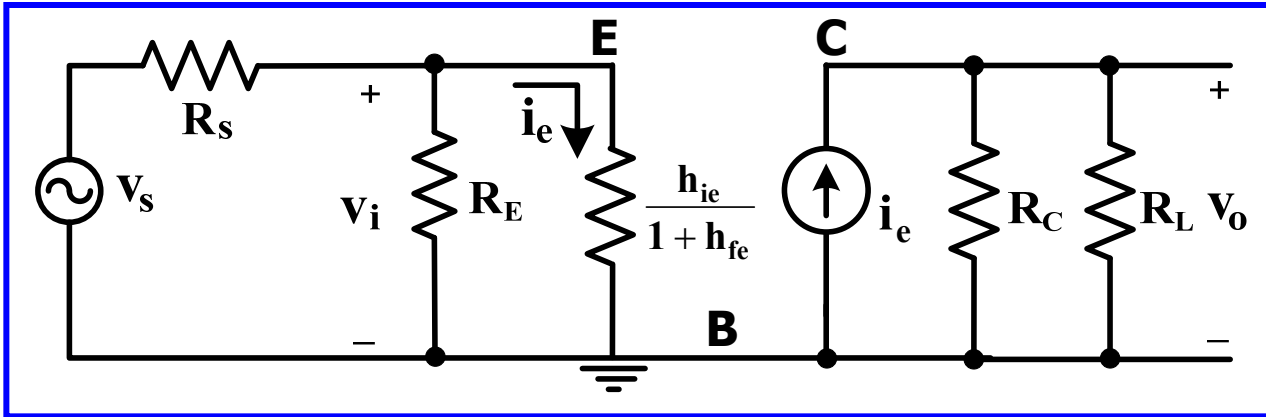
$$\begin{aligned} I_E &= -(I_C + I_B) = -(I_C + I_C / \beta) = \\ &= -(2.65 + 2.65 / 200) \text{mA} \approx -2.66 \text{mA} \end{aligned}$$

Βρόχος 2

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



# Άσκηση 9η



$R_B$ : βραχυκυκλώνεται στο AC

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

$$v_o = i_e \cdot R'_L = 0.8 \cdot 10^3 \cdot i_e$$

$$i_e = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} \Rightarrow i_b = \frac{v_i}{\frac{10 \cdot 10^3}{1 + 200}} \Rightarrow i_e = 0.02 \cdot v_i$$

$$R_i = \frac{R_E \cdot \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} \Rightarrow R_i = 47.4 \Omega$$

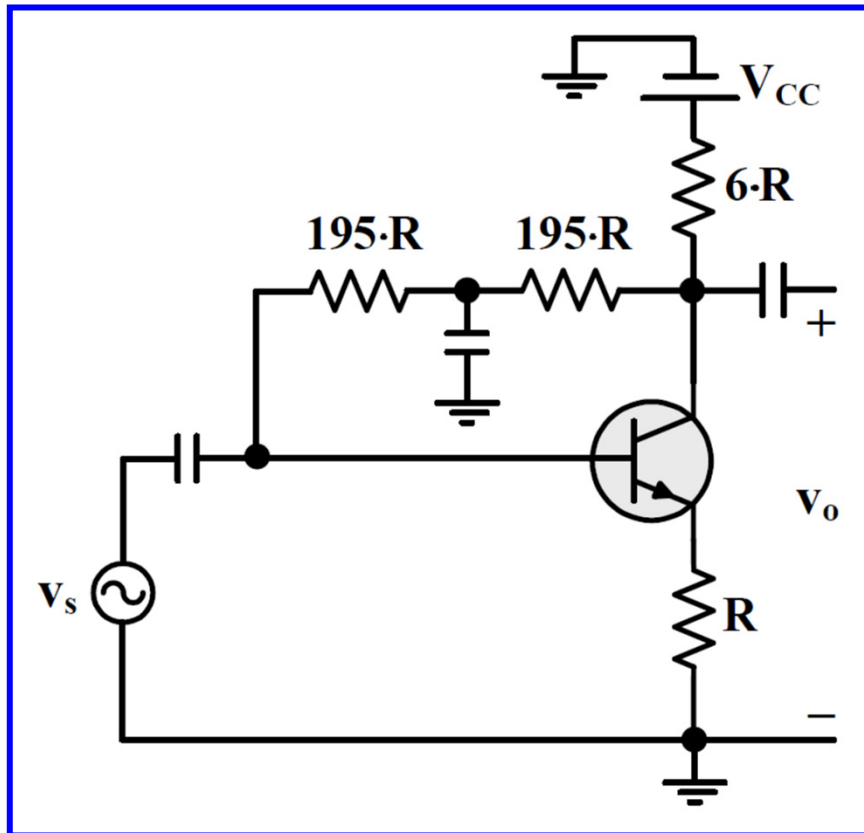
$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.7 \cdot v_s$$

$$v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot i_e \Rightarrow v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot 0.02 \cdot v_i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_o = 0.8 \cdot 10^3 \cdot 0.02 \cdot 0.7 \cdot v_s \Rightarrow v_o = 11.2 \cdot v_s \Rightarrow A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = 11.2$$

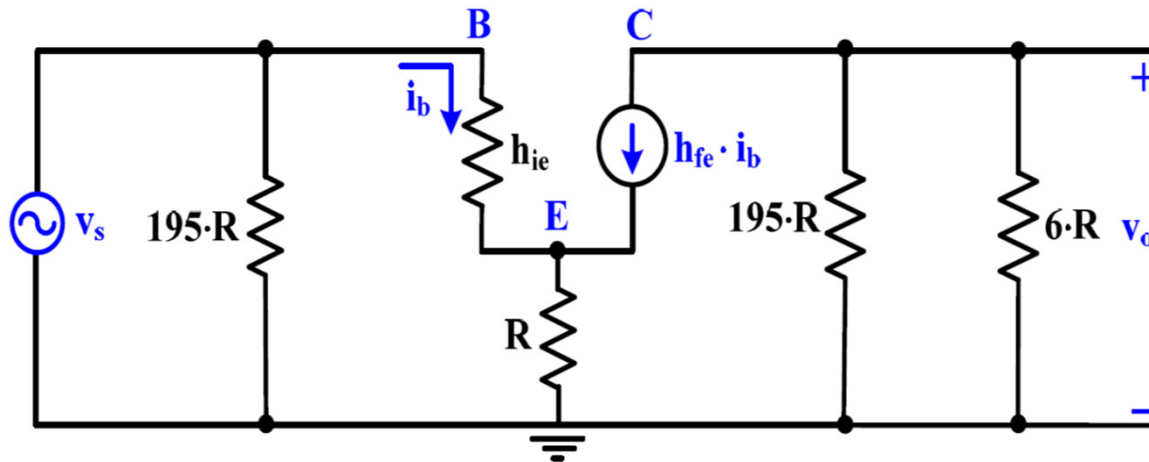
# Άσκηση 10<sup>η</sup>

Για το τρανζίστορ του ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνεται ότι  $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$  και  $h_{fe} = 100$ . Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων και να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_v = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων. Δίνεται ότι  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .



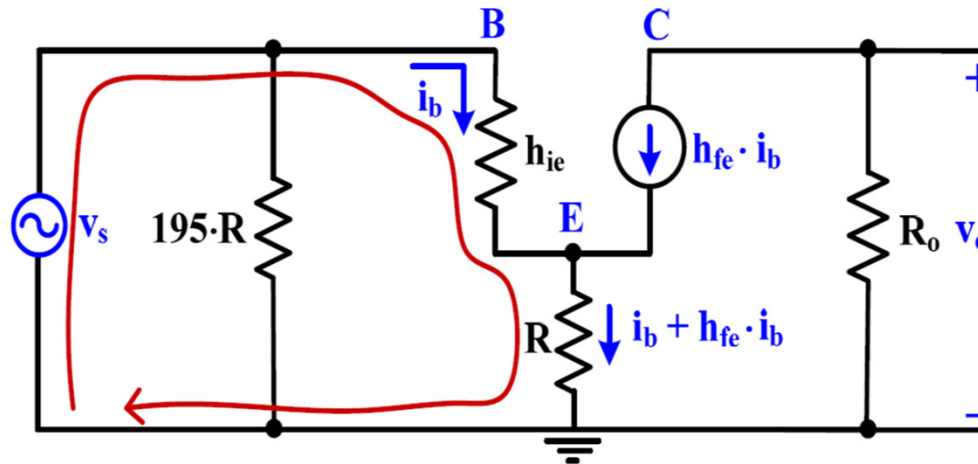
# Άσκηση 10<sup>η</sup>

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 η πρώτη από αριστερά αντίσταση  $195 \cdot R$  να συνδέεται μεταξύ της βάσης του τρανζίστορ και της γείωσης, ενώ η δεύτερη αντίσταση  $195 \cdot R$  να συνδέεται μεταξύ του συλλέκτη του τρανζίστορ και της γείωσης. Η αντίσταση εκπομπού  $R$  συμμετέχει στο κύκλωμα αφού δεν υφίσταται πυκνωτής στα άκρα της. Τέλος, η πηγή σταθερής τάσης βραχυκυκλώνεται, με αποτέλεσμα η αντίσταση συλλέκτη  $6 \cdot R$  να συνδέεται μεταξύ του συλλέκτη του τρανζίστορ και της γείωσης. Το τρανζίστορ αντικαθίσταται με το ισοδύναμο κύκλωμά του για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.



# Άσκηση 10<sup>η</sup>

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα που σχεδιάστηκε μπορούμε να υπολογίσουμε τη ζητούμενη ενίσχυση τάσης απλοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα στο βρόχο εξόδου, αφού οι αντιστάσεις  $195R$  και  $6R$  συνδέονται παράλληλα.



$$R_o = \frac{195 \cdot R \cdot 6 \cdot R}{195 \cdot R + 6 \cdot R} \Rightarrow R_o = \frac{1170 \cdot R}{201} \Rightarrow R_o \approx 5.8 \text{ k}\Omega.$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στην ισοδύναμη αντίσταση  $R_o$  του παραπάνω κυκλώματος, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$v_o = -h_{fe} \cdot i_b \cdot R_o. \quad (1)$$

# Άσκηση 10<sup>η</sup>

Από την εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο του παραπάνω κυκλώματος που υποδεικνύεται με κόκκινο χρώμα, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$v_s = i_b \cdot h_{ie} + (i_b + h_{fe} \cdot i_b) \cdot R \Rightarrow i_b = \frac{v_s}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R} \quad (2)$$

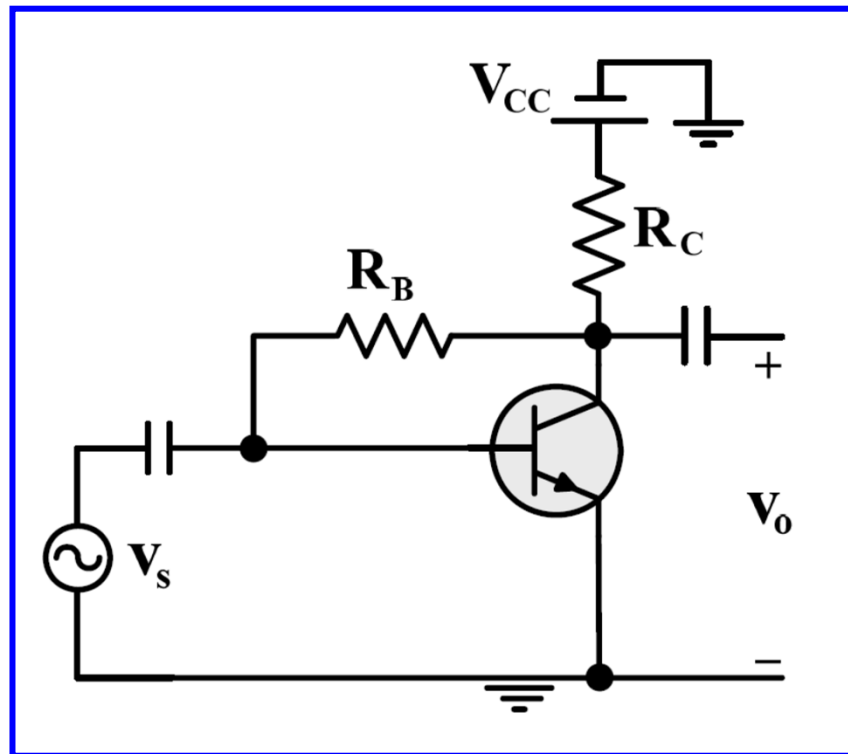
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1) και (2), υπολογίζουμε τη ζητούμενη ενίσχυση τάσης του κυκλώματος:

$$v_o = -\frac{h_{fe} \cdot R_o}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R} \cdot v_s \Rightarrow v_o = -\frac{100 \cdot 5.8}{2 + (1 + 100) \cdot 1} \cdot v_s \Rightarrow v_o = -5.6 \cdot v_s \Rightarrow A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = -5.6.$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει διαφορά φάσης 180° της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

# Άσκηση 11<sup>η</sup>

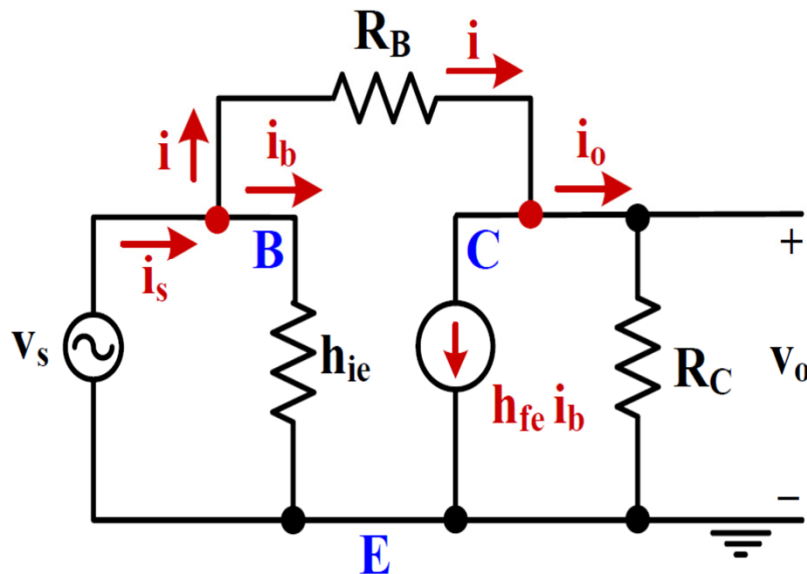
Για το τρανζίστορ του ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνεται ότι  $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$  και  $h_{fe} = 100$ . Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων και να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης  $A_v = v_o / v_s$  στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων.  
Δίνονται:  $R_B = 200 \text{ k}\Omega$  και  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ .





# Άσκηση 11<sup>η</sup>

Για να προσδιορίσουμε τη ζητούμενη ενίσχυση τάσης, αρχικά σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων. Αντικαθιστούμε τους πυκνωτές και την πηγή σταθερής τάσης με βραχυκυκλώματα και το τρανζίστορ με το ισοδύναμο κύκλωμά του που δίνεται στην εκφώνηση του θέματος. Σημειώνεται ότι, στον εν λόγω ενισχυτή, η αντίσταση  $R_B$  είναι συνδεδεμένη μεταξύ της βάσης και του συλλέκτη του τρανζίστορ. Με βάση τα παραπάνω, το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, έχει ως εξής:



# Άσκηση 11<sup>η</sup>

Εφαρμόζουμε τον νόμο του Ohm στην αντίσταση  $R_C$ :  $v_o = i_o \cdot R_C$

Για να προσδιορίσουμε το ρεύμα εξόδου εφαρμόζουμε τον πρώτο κανόνα Kirchhoff στο συλλέκτη του τρανζίστορ:  $i_o = i - h_{fe} \cdot i_b$ .

Συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες σχέσεις προκύπτει:  $v_o = (i - h_{fe}i_b) \cdot R_C$ .

Η τάση στα άκρα της  $R_B$  ισούται με  $(v_s - v_o)$ , συνεπώς το ρεύμα  $i$  που τη διαρρέει έχει ως εξής:

$$i = \frac{V_s - V_o}{R_B}$$

Το ρεύμα βάσης ισούται με:

$$i_b = \frac{V_s}{h_{ie}}$$

# Άσκηση 11<sup>η</sup>

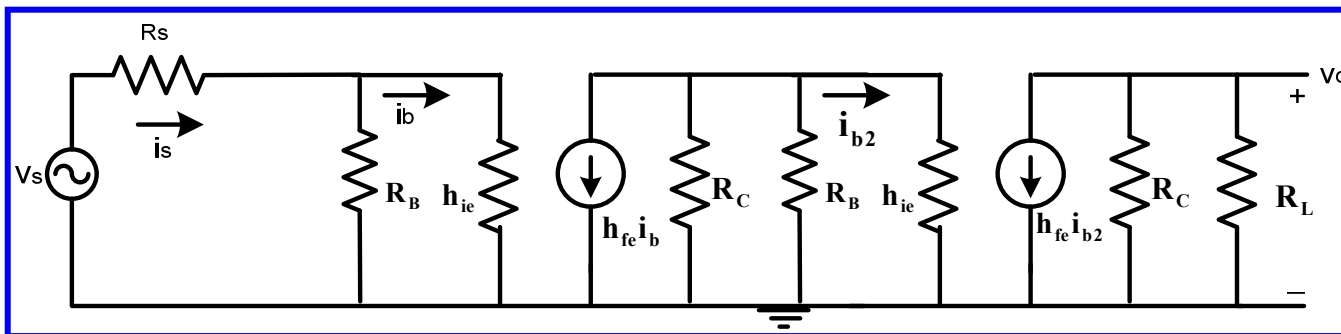
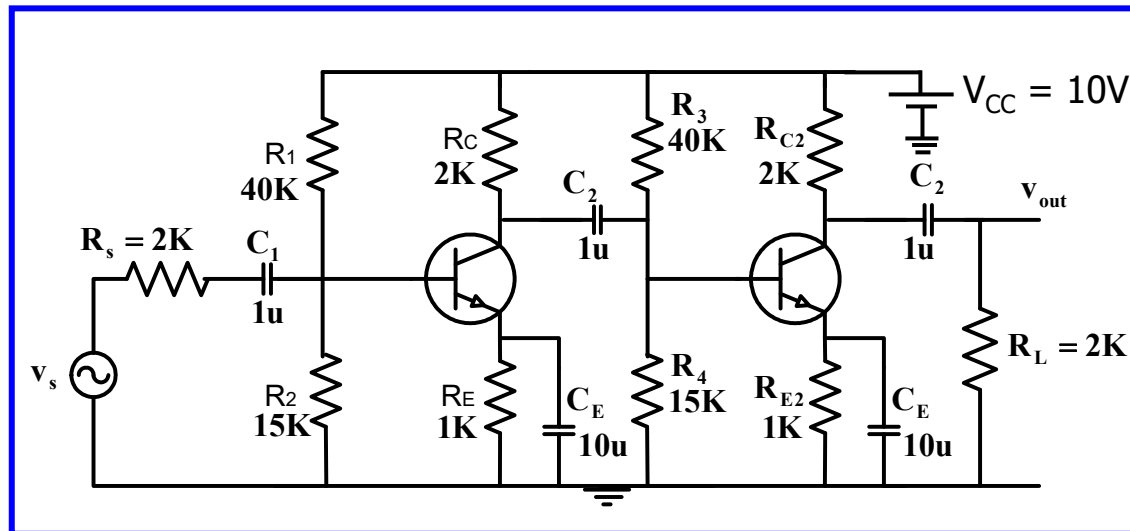
Αντικαθιστώντας τα παραπάνω ρεύματα στη σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου, υπολογίζουμε τη ζητούμενη ενίσχυση τάσης:

$$\begin{aligned}v_o &= \left( \frac{v_s - v_o}{R_B} - h_{fe} \cdot \frac{v_s}{h_{ie}} \right) \cdot R_C \Rightarrow v_o = \frac{v_s \cdot R_C}{R_B} - \frac{v_o \cdot R_C}{R_B} - \frac{v_s \cdot h_{fe} \cdot R_C}{h_{ie}} \Rightarrow \\ \Rightarrow v_o + \frac{v_o \cdot R_C}{R_B} &= \frac{v_s \cdot R_C}{R_B} - h_{fe} \cdot \frac{v_s \cdot h_{fe} \cdot R_C}{h_{ie}} \Rightarrow v_o \cdot \left( 1 + \frac{R_C}{R_B} \right) = v_s \cdot \left( \frac{R_C}{R_B} - \frac{h_{fe} \cdot R_C}{h_{ie}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} &= \frac{\frac{R_C}{R_B} - \frac{h_{fe} \cdot R_C}{h_{ie}}}{1 + \frac{R_C}{R_B}} \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = \frac{\frac{2}{200} - \frac{100 \cdot 2}{2}}{1 + \frac{2}{200}} \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = \frac{0.01 - 100}{1 + 0.01} \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = -99 = A_v\end{aligned}$$

Το αρνητικό πρόσημο της ενίσχυσης σημαίνει ότι η διαφορά φάσης των σημάτων εισόδου και εξόδου είναι 180°.

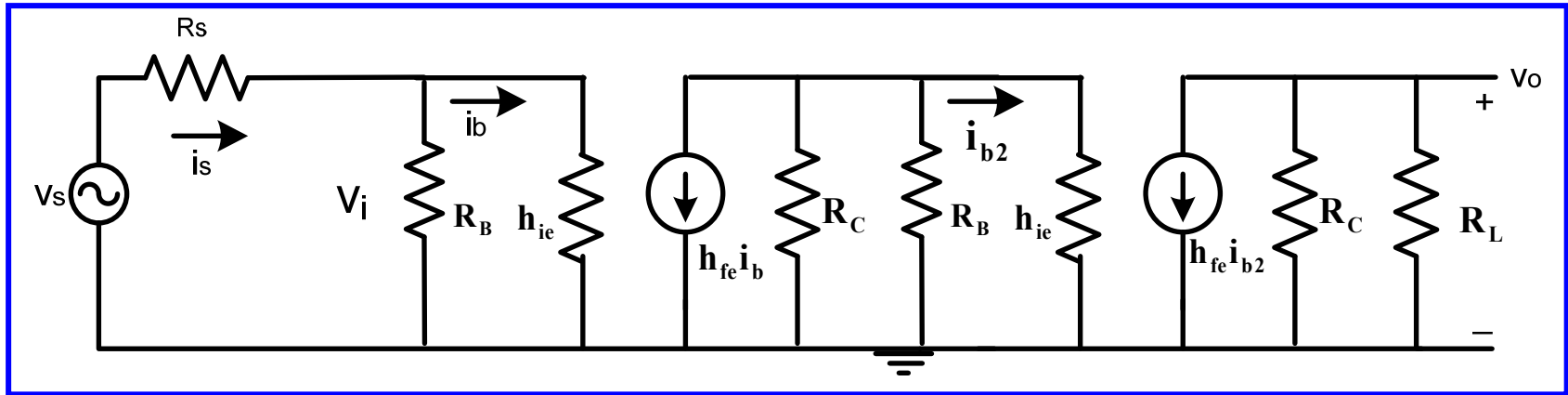
# Άσκηση 12<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή του σχήματος που συνίσταται από δύο όμοιες βαθμίδες, να προσδιοριστεί η ενίσχυση τάσης  $A_{vs}$  στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων όπου όλοι οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Δίνονται:  $h_{fe} = 200$ ,  $h_{ie} = 2.72 \text{ k}\Omega$ .



Ισοδύναμο κύκλωμα  
του ενισχυτή  
στο εναλλασσόμενο

# Άσκηση 12<sup>η</sup>



$$R'_L = R_L // R_C = 1\text{k}\Omega$$

$$R_B = R_1 // R_2 = R_3 // R_4 = 10.9\text{k}\Omega$$

$$R_A = R_C // R_B = 1.69\text{k}\Omega$$

$$V_i = \frac{(R_B // h_{ie})}{(R_B // h_{ie}) + R_s} \cdot V_s = 0.52 \cdot V_s$$

$$i_b = \frac{V_i}{h_{ie}} = \frac{0.52 \cdot V_s}{2.72 \cdot 10^3} = 0.191 \cdot 10^{-3} \cdot V_s$$

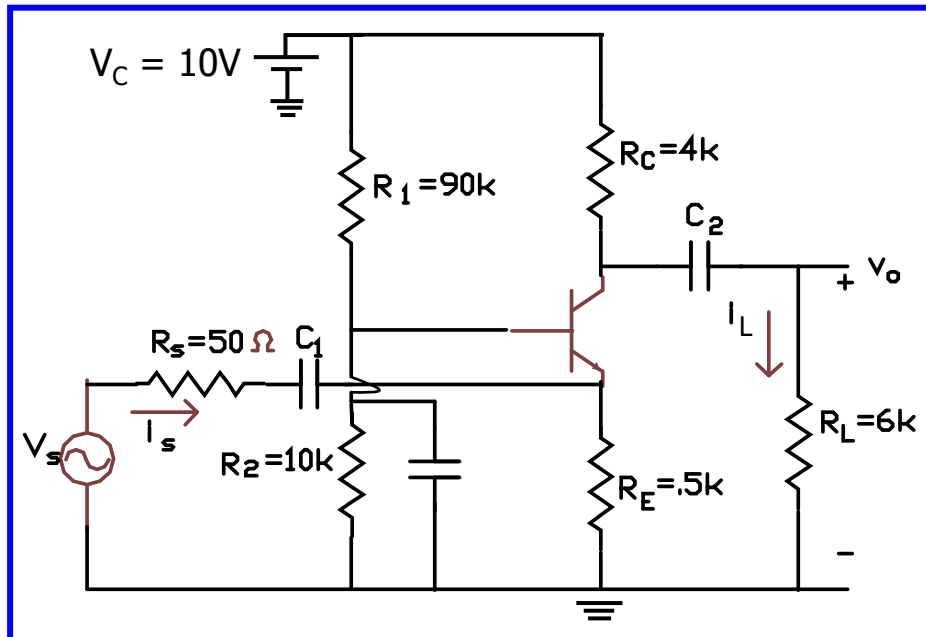
$$i_{b2} = -\frac{R_A}{R_A + h_{ie}} \cdot h_{fe} i_b = -76.64 \cdot i_b = -14.64 \cdot 10^{-3} \cdot V_s$$

$$V_o = -h_{fe} i_{b2} R'_L = -200 \cdot 10^3 i_{b2} = 2928 \cdot V_s \Rightarrow A_{vs} = 2928$$

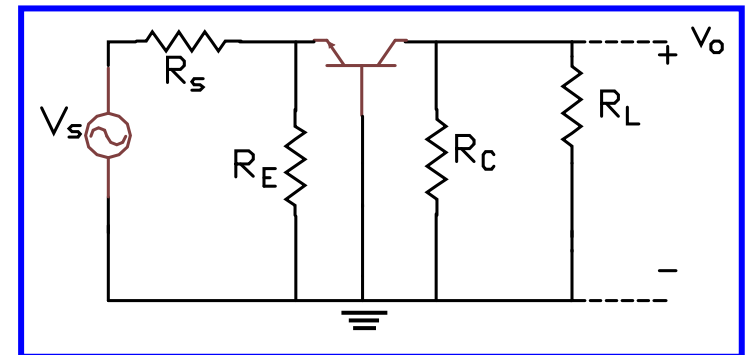
Η τάση εξόδου είναι  
συμφασική με την τάση  
εισόδου, αφού ο ενισχυτής  
αποτελείται από δύο  
συζευγμένες βαθμίδες  
κοινού εκπομπού

# Άσκηση 13<sup>η</sup>

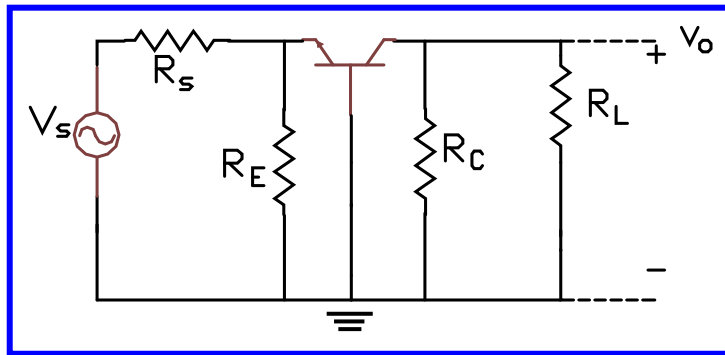
Για τον ενισχυτή κοινής βάσης του σχήματος προσδιορίστε για την περιοχή μεσαίων συχνοτήτων: την ενίσχυση τάσης  $A_{v_s}$ , την ενίσχυση ρεύματος  $A_{i_s}$  και τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του ενισχυτή. Δίνονται:  $h_{fe} = 100$ ,  $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$ .



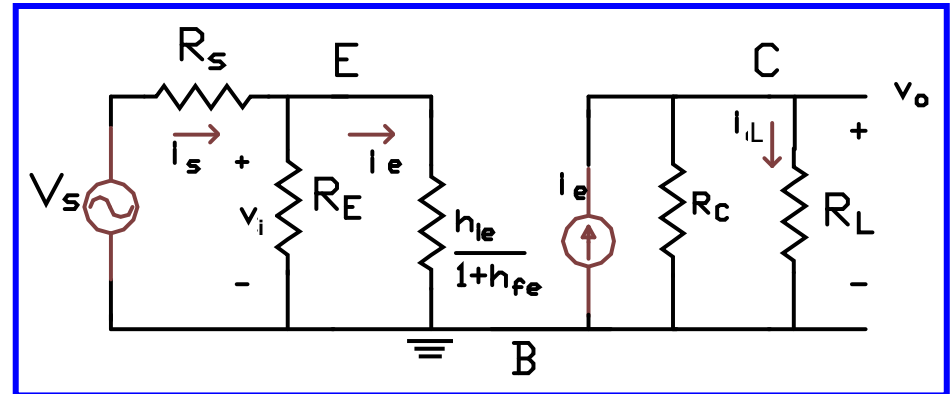
Ο ενισχυτής αυτός, στο εναλλασσόμενο αντιστοιχεί στο παρακάτω κύκλωμα. Κάθε ακροδέκτης που συνδέεται σε σταθερή πηγή θεωρείται γείωση όσον αφορά τη λειτουργία μικρού σήματος. Επίσης, οι πυκνωτές θεωρούνται ως βραχυκυκλώματα. Συνεπώς, οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  είναι βραχυκυκλωμένες και δε λαμβάνονται υπόψη στο εναλλασσόμενο.



# Άσκηση 13<sup>η</sup>



ac  
⇔



Κατά την ανάλυση **αγνοούμε την  $R_E$**  διότι  $R_E \gg h_{ie}/(1+h_{fe})$ . Εάν δεν αγνοηθεί η αντίσταση εκπομπού, η ανάλυση γίνεται με παρόμοιο τρόπο.

$$R'_L = R_C // R_L = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = i_e \cdot R'_L$$

$$i_e = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}}$$

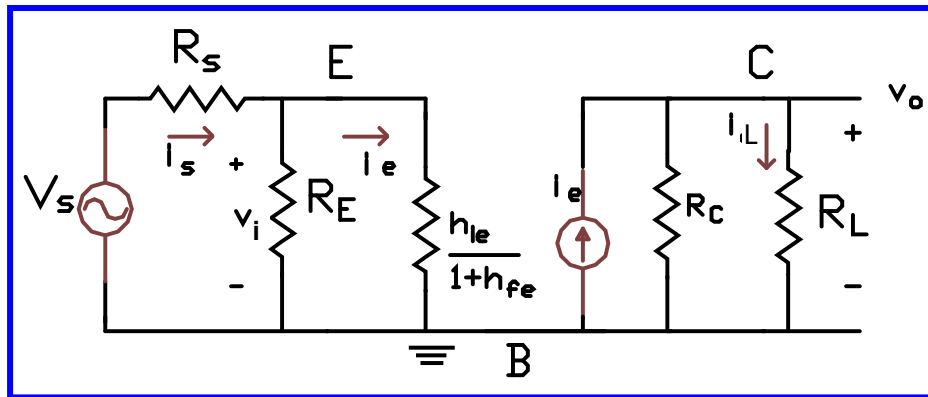
$$v_o = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}} R'_L$$

$$R_i = R_E // \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \approx \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} = 10 \Omega$$

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s = 0.167 v_s$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{0.167 R'_L}{\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}} = 40.5$$

# Άσκηση 13<sup>η</sup>



$$\dot{i}_L = \frac{R_C}{R_C + R_L} i_e$$

$$A_{is} = \frac{\dot{i}_L}{i_s} = \frac{R_C}{R_C + R_L} = 0.4$$

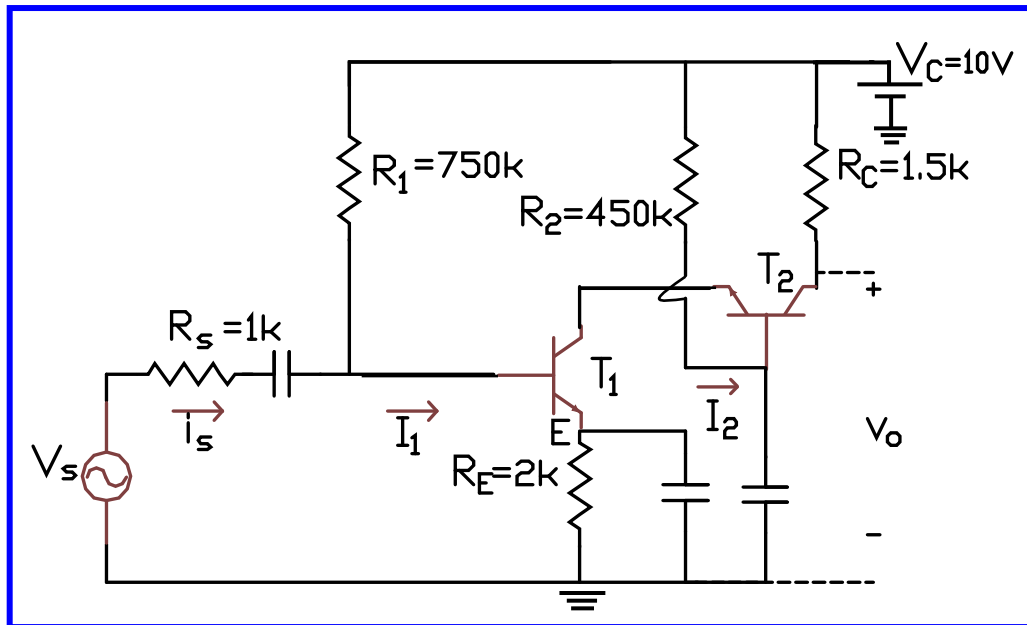
$$R_i = R_E // \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \approx \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = 10 \Omega$$

$$R_o = R_C = 4 \text{ k}\Omega$$



# Άσκηση 14<sup>η</sup>

Στον ενισχυτή του σχήματος, τα δύο τρανζίστορ είναι όμοια. Προσδιορίστε το ρεύμα βάσης και συλλέκτη, καθώς και την τάση συλλέκτη-εκπομπού των δύο τρανζίστορ. Για την περιοχή μεσαίων συχνοτήτων προσδιορίστε την ενίσχυση τάσης  $A_{vi}$ , την ενίσχυση τάσης  $A_{vs}$  και τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Δίνονται:  $\beta = h_{fe} = 100$ ,  $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{BE} = 0.5 \text{ V}$ ,  $\beta \gg 1$ .



$$V_C = I_1 R_1 + V_{BE1} + I_{C1} R_E \Rightarrow$$

$$V_C = I_1 R_1 + V_{BE1} + \beta I_1 R_E \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 = I_{B1} = 10 \mu\text{A}$$

$$I_{C1} = \beta \cdot I_{B1} = 1 \text{ mA} = -I_{E2} = I_{C2}$$

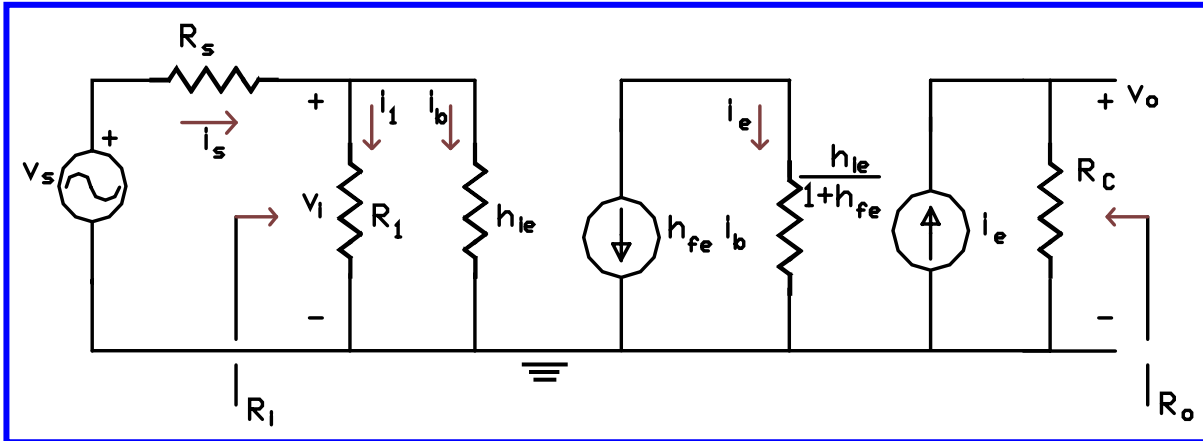
$$I_2 = I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta} = 10 \mu\text{A} = I_1$$

$$V_C = I_2 R_2 + V_{BE2} + V_{CE1} + I_{C1} R_E \Rightarrow V_{CE1} = 3 \text{ V}$$

$$V_C = I_{C2} R_C + V_{CE2} + V_{CE1} + I_{C1} R_E \Rightarrow V_{CE2} = 3.5 \text{ V}$$

# Άσκηση 14<sup>η</sup>

T1: σύνδεση κοινού εκπομπού, T2: σύνδεση κοινής βάσης



$$R_i = R_1 // h_{ie} \approx h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = R_C i_e = -R_C h_{fe} i_b = -R_C h_{fe} \frac{v_i}{h_{ie}}$$

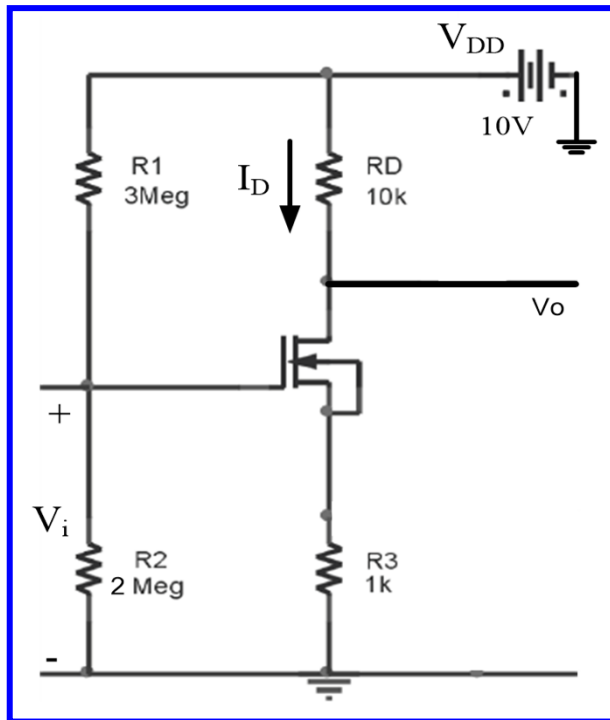
$$A_{v_i} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C h_{fe}}{h_{ie}} = -150$$

$$v_i = \frac{(R_1 // h_{ie})}{(R_1 // h_{ie}) + R_s} \cdot v_s = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.5 \cdot v_s$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = A_{v_i} \cdot 0.5 = -75$$

# Άσκηση 15<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας Q ( $V_{DS}$ ,  $I_D$ ) του MOSFET. Δίνονται:  $V_{GS} = 3.5 \text{ V}$  και  $V_T = 0.75 \text{ V}$ .



Εφόσον πρόκειται για ενισχυτή, το τρανζίστορ είναι πολωμένο στην περιοχή του κόρου ( $V_{GS} > V_T$  και  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ ).

$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - I_D R_3 \Rightarrow$$

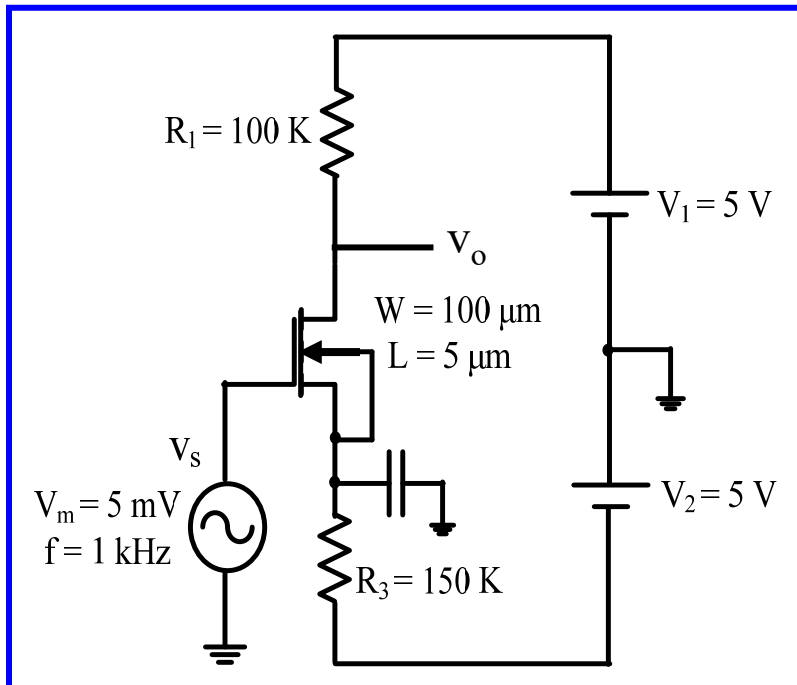
$$I_D = \frac{1}{R_3} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{GS} \right) \Rightarrow I_D = 0.5 \text{ mA}$$

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} + I_D R_3 = 0 \Rightarrow V_{DS} = 4.5 \text{ V}$$

**Σημείο λειτουργίας: Q (4.5 V, 0.5 mA)**

# Άσκηση 16<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή κοινής πηγής του σχήματος, να προσδιοριστούν το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ και η ενίσχυση τάσης για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων όπου οι εξωτερικοί πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα. Για το MOSFET δίνονται:  $V_{GS} = 1\text{ V}$  και  $g_m = 2.4 \cdot 10^{-4}\text{ S}$ .



Το MOSFET έχει πολωθεί με συμμετρικές πηγές συνεχούς τάσης.

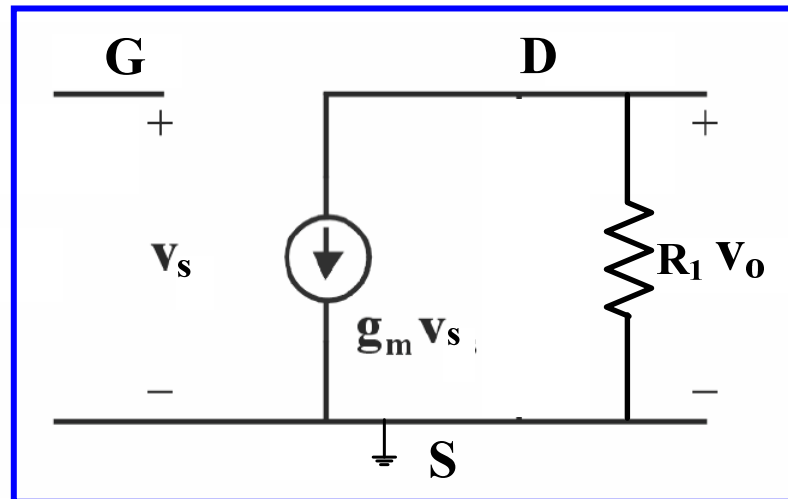
$$V_{GS} + I_D R_3 - V_2 = 0 \Rightarrow I_D = 26\text{ }\mu\text{A}$$

$$-V_1 + I_D R_1 + V_{DS} + I_D R_3 - V_2 = 0 \Rightarrow V_{DS} = 3.5\text{ V}$$

Σημείο λειτουργίας:  $Q (3.5\text{ V}, 26\text{ }\mu\text{A})$

# Άσκηση 16<sup>η</sup>

Για τη δημιουργία του ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο, βραχυκυκλώνουμε τους πυκνωτές και τις πηγές συνεχούς τάσης και αντικαθιστούμε το τρανζίστορ με το ισοδύναμο κύκλωμα του. Μετά τη βραχυκύκλωση των πυκνωτών η αντίσταση  $R_3$  δεν συμμετέχει στο κύκλωμα.



$$v_o = -g_m R_1 v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = -g_m R_1 \Rightarrow A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = -g_m R_1 \Rightarrow A_{vs} = -24$$



Τέλος 1<sup>ης</sup> ενότητας