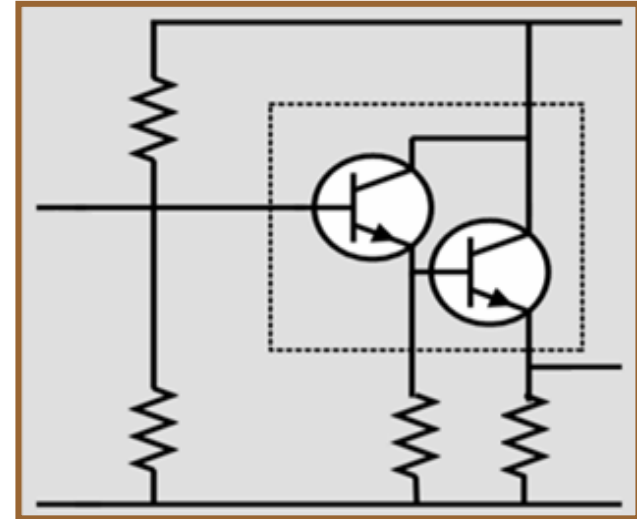


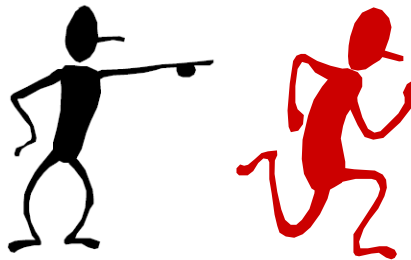
ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής



4^η ενότητα

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΠΟΛΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

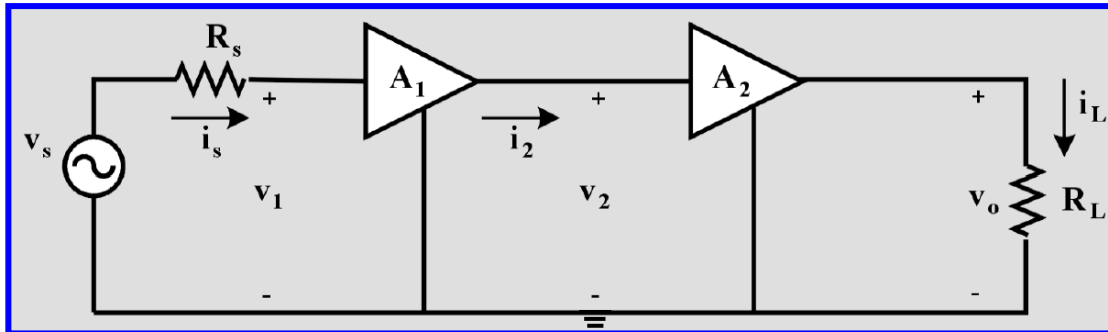


Περιεχόμενα 4^{ης} ενότητας

- Στην τέταρτη ενότητα θα μελετήσουμε τους **ενισχυτές πολλών βαθμίδων** που χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται ενισχύσεις σήματος μεγαλύτερες από εκείνες που μπορούν να παρέχουν οι ενισχυτές μίας βαθμίδας.
- Ενισχυτές με **διαδοχικές βαθμίδες**.
- Τρόποι **σύζευξης** βαθμίδων ενισχυτών (μέσω πυκνωτή, απευθείας, επαγωγική).
- Ενισχυτές με **απευθείας σύζευξη (DC, direct coupling)** ή **σύνθετοι ενισχυτές**:
 - ✓ Κοινού συλλέκτη – κοινού συλλέκτη (**ζεύγος Darlington**).
 - ✓ Κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού.
 - ✓ Κοινού εκπομπού – κοινής βάσης (**κασκωδικός ενισχυτής**).
- **Διαφορικός ενισχυτής τάσης** (κοινού εκπομπού – κοινού εκπομπού με κοινή αντίσταση εκπομπού) και **διαφορικός ενισχυτής με MOSFET**.
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

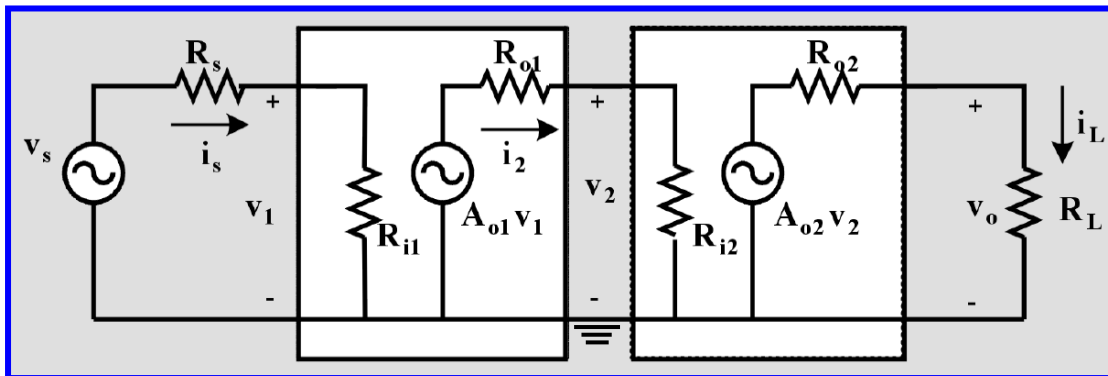
Ενισχυτές με διαδοχικές βαθμίδες

- Όταν θέλουμε να πετύχουμε υψηλές ενισχύσεις, οδηγούμε την έξοδο μίας βαθμίδας ενισχυτή στην είσοδο μιας δεύτερης βαθμίδας κ.ο.κ. δημιουργώντας έναν σύνθετο ενισχυτή που αποτελείται από διαδοχικές βαθμίδες.
- Οι ενισχύσεις τάσης, ρεύματος και ισχύος ενός ενισχυτή με διαδοχικές βαθμίδες δίνεται από το γινόμενο των ενισχύσεων των επιμέρους βαθμίδων.



$$A_V = \frac{V_o}{V_1} = \frac{V_o}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} = A_{V2} \cdot A_{V1}$$

$$A_I = \frac{i_L}{i_s} = \frac{i_L}{i_2} \cdot \frac{i_2}{i_s} = A_{i2} \cdot A_{i1}$$



$$A_P = A_V \cdot A_I = (A_{V2} \cdot A_{i2}) \cdot (A_{V1} \cdot A_{i1}) = A_{P1} \cdot A_{P2}$$

Ενισχυτές με διαδοχικές βαθμίδες

- Εάν για τον προσδιορισμό των ενισχύσεων των επιμέρους βαθμίδων, εξεταστεί η καθεμία χωριστά, θα πρέπει η αντίσταση φορτίου κάθε βαθμίδας να είναι ίση με την αντίσταση εισόδου της βαθμίδας που ακολουθεί.
- Η αντίσταση εισόδου ενός ενισχυτή με διαδοχικές βαθμίδες ισούται με την αντίσταση εισόδου της πρώτης βαθμίδας, ενώ η αντίσταση εξόδου του ισούται με την αντίσταση εξόδου της τελευταίας βαθμίδας.
- Το μέγεθος των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου διαφοροποιείται όταν εφαρμόζεται ανατροφοδότηση.
- Ο αναλυτικός προσδιορισμός της απόκρισης συχνότητας σε ενισχυτές πολλαπλών βαθμίδων είναι περίπλοκος, ιδιαίτερα όταν οι βαθμίδες δεν είναι ίδιες μεταξύ τους.
- Όταν οι επιμέρους βαθμίδες είναι ίδιες, μπορούμε να προσδιορίσουμε την ανώτερη και την κατώτερη συχνότητα αποκοπής, εάν είναι γνωστή η απόκριση συχνότητας μίας βαθμίδας.

Ενισχυτές με διαδοχικές βαθμίδες

- Περιοχή χαμηλών συχνοτήτων:

Απόκριση
συχνότητας
ενισχυτή
μίας βαθμίδας

$$A = \frac{A_m}{1 - j \frac{\omega_L}{\omega}}$$

$$A_n = \left(\frac{A_m}{1 - j \frac{\omega_L}{\omega}} \right)^n$$

Απόκριση
συχνότητας
ενισχυτή
n όμοιων
βαθμίδων

$$\omega_{Ln} = \frac{\omega_L}{\sqrt{2^{1/n} - 1}} \Rightarrow \omega_{Ln} > \omega_L$$

Κατώτερη
συχνότητα
αποκοπής

$$\sqrt{2^{1/n} - 1} < 1$$

- Περιοχή υψηλών συχνοτήτων:

Απόκριση
συχνότητας
ενισχυτή
μίας βαθμίδας

$$A = \frac{A_m}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

$$A_n = \left(\frac{A_m}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}} \right)^n$$

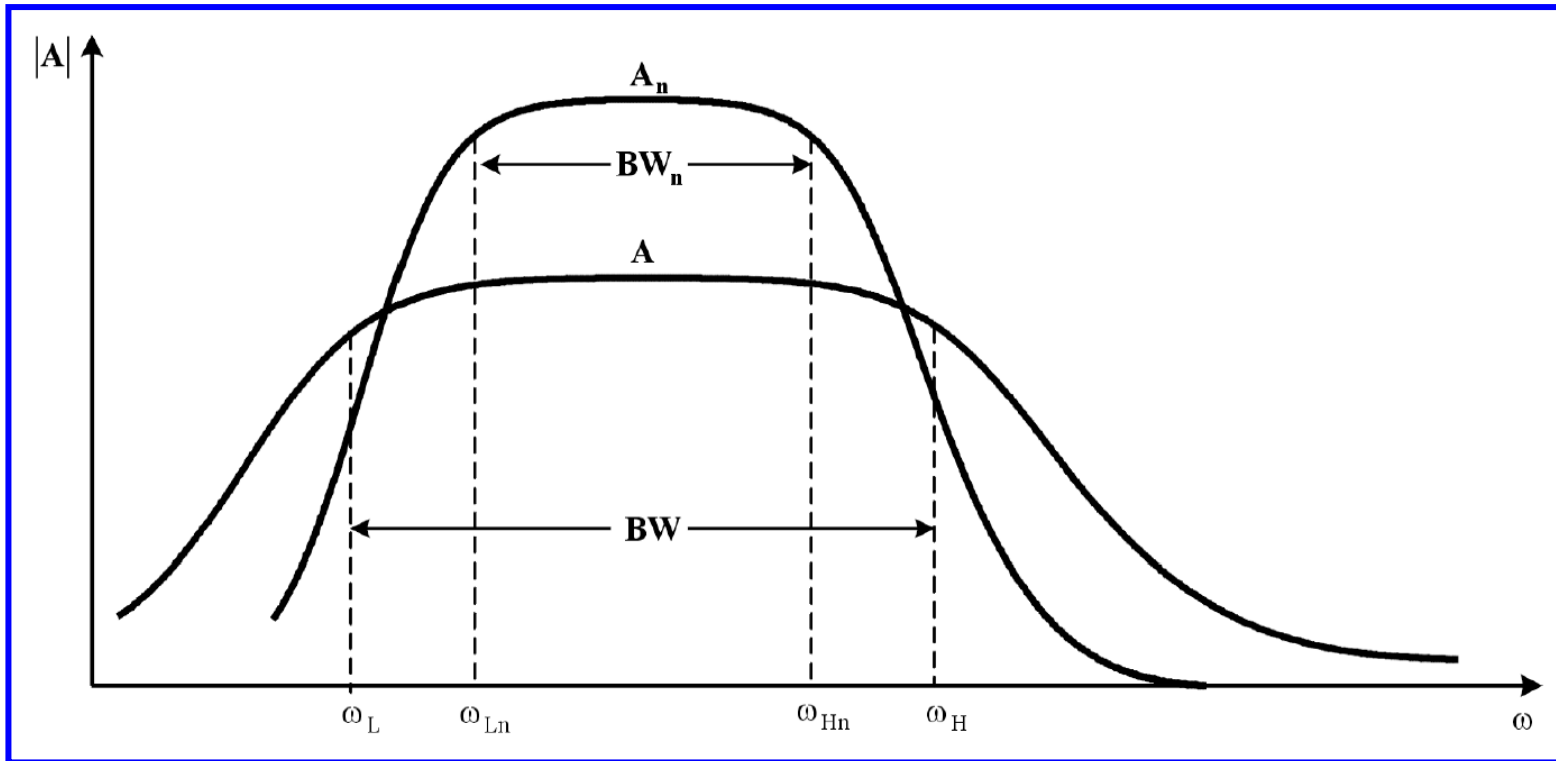
Απόκριση
συχνότητας
ενισχυτή
n όμοιων
βαθμίδων

$$\omega_{Hn} = \omega_H \cdot \sqrt{2^{1/n} - 1} \Rightarrow \omega_{Hn} < \omega_H$$

Ανώτερη συχνότητα
αποκοπής

Ενισχυτές με διαδοχικές βαθμίδες

- Επομένως, για το σχεδιασμό ενός ενισχυτή πολλών όμοιων βαθμίδων, απαιτείται οι επιμέρους βαθμίδες να έχουν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων από το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων του ενισχυτή πολλαπλών βαθμίδων.

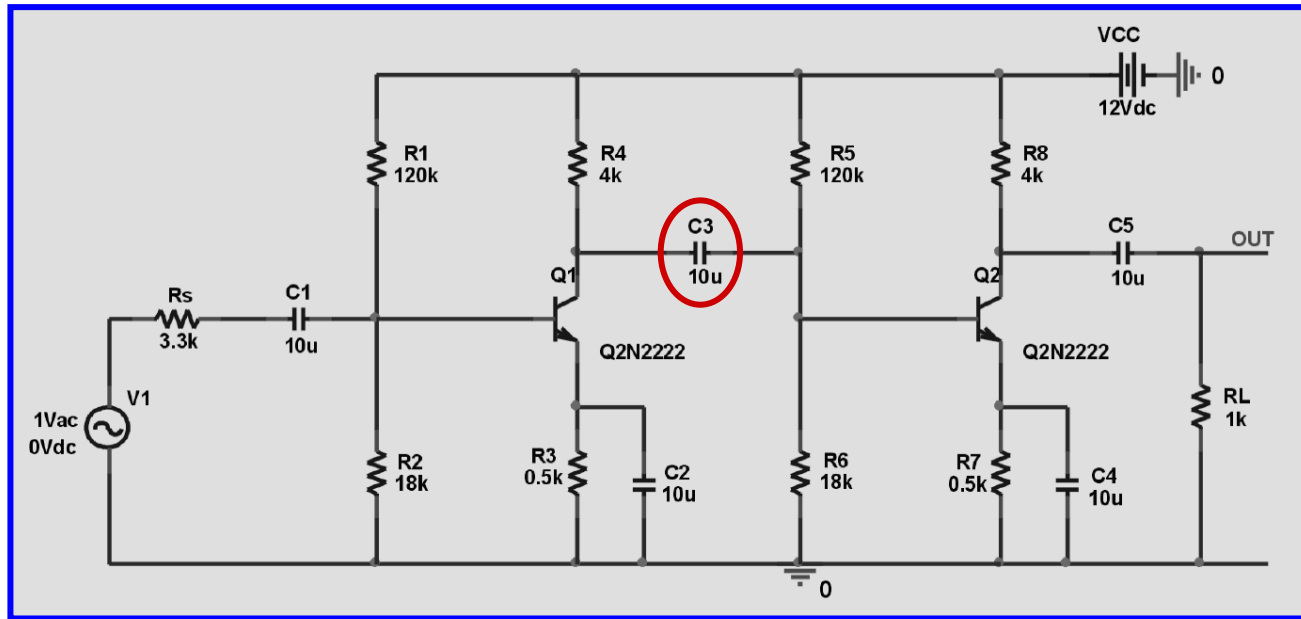


- Γενικά, το εύρος συχνοτήτων ενός ενισχυτή πολλών ανόμοιων βαθμίδων καθορίζεται από τη βαθμίδα με το στενότερο εύρος συχνοτήτων.

Τρόποι σύζευξης βαθμίδων ενισχυτών

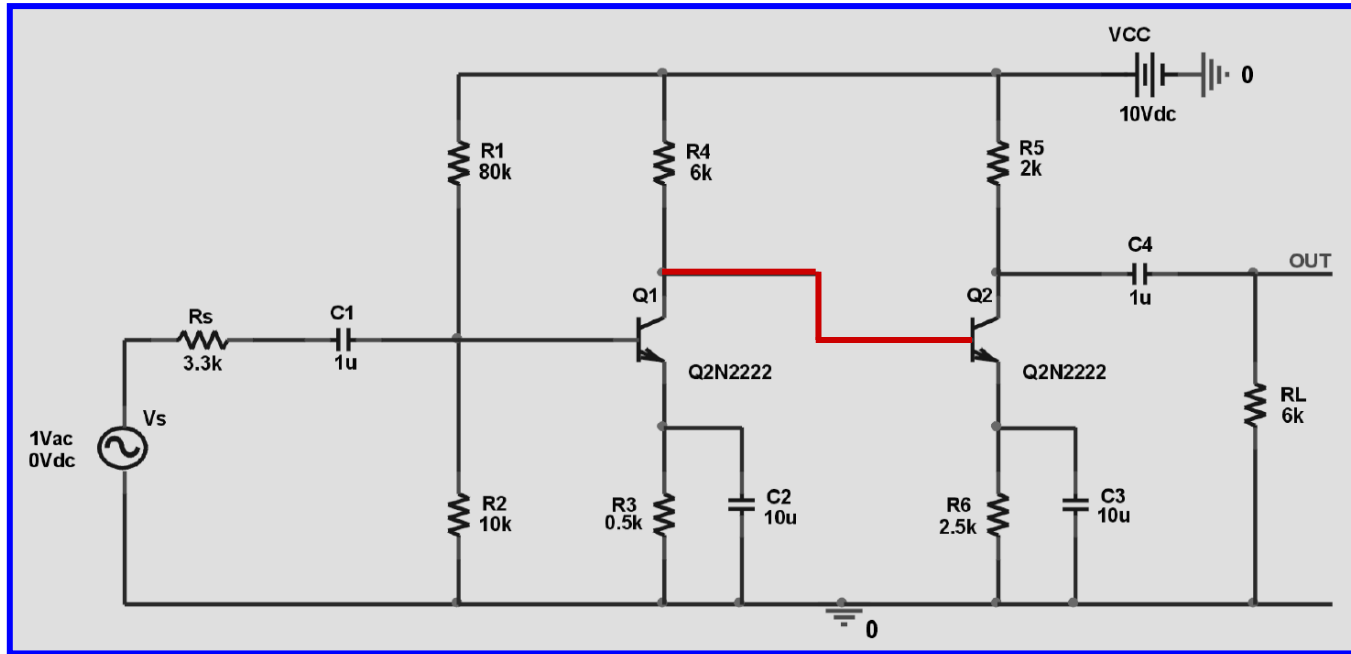
- Η σύζευξη ενισχυτικών βαθμίδων για τη δημιουργία ενός ενισχυτή πολλών βαθμίδων μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:
 - ✓ Μέσω **πυκνωτή σύζευξης** (**capacitor coupled** ή **RC-coupled** amplifiers).
 - ✓ Με **απευθείας σύζευξη** (**DC, direct coupling**) των βαθμίδων.
 - ✓ Μέσω **μετασχηματιστή** (**επαγωγική σύζευξη**).
- Ο τρόπος σύζευξης των βαθμίδων προσδίδει στον ενισχυτή ορισμένα χαρακτηριστικά, με βάση τα οποία ο ενισχυτής επιλέγεται για συγκεκριμένη χρήση.

Ενισχυτές με σύζευξη βαθμίδων μέσω πυκνωτή



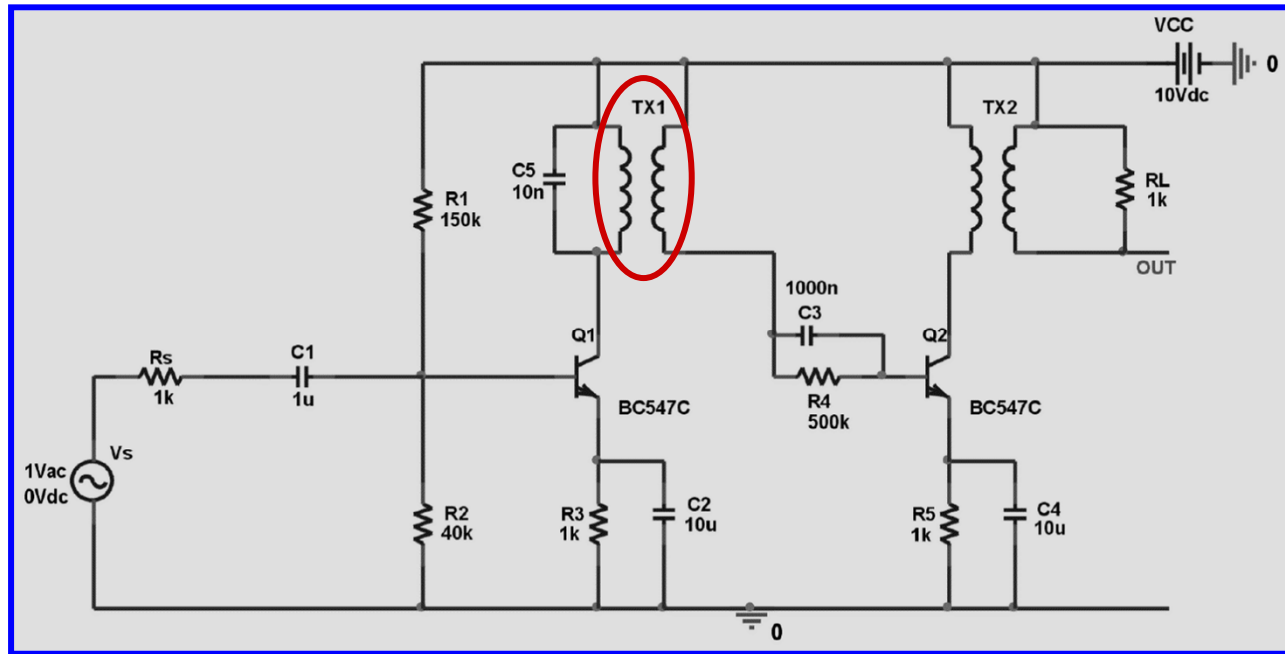
- Στη σύζευξη βαθμίδων μέσω πυκνωτή, οι επιμέρους βαθμίδες είναι απομονωμένες μεταξύ τους όσον αφορά τη λειτουργία τους το συνεχές, επομένως η πόλωση της μίας βαθμίδας δεν επηρεάζεται από τις άλλες.
- Συνεπώς, οι βαθμίδες μπορεί να είναι ίδιες μεταξύ τους και έτσι σχεδιάζοντας τη μια από αυτές αποφεύγουμε τον σχεδιασμό των υπολοίπων.
- Χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι: η απλότητα του σχεδιασμού, ο επηρεασμός της απόκρισης συχνότητας των ενισχυτών από την παρουσία του πυκνωτή σύζευξης και η μη αποφυγή των αντιστάσεων πόλωσης για κάθε τρανζίστορ.

Ενισχυτές με απευθείας σύζευξη (DC)



- Απλούστερη δομή όπου η πόλωση του δεύτερου τρανζίστορ επιτυγχάνεται χωρίς αντιστάσεις, αλλά μέσω του πρώτου τρανζίστορ.
- Το συνεχές δυναμικό του συλλέκτη του δεύτερου τρανζίστορ είναι κατά V_{CB} μεγαλύτερο από το δυναμικό του συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ.
- Η αύξηση αυτή θέτει περιορισμό στον αριθμό των βαθμίδων που μπορούν να συζευχθούν, λόγω περιορισμού των περιθωρίων τάσεων πόλωσης, αλλά το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με χρήση συμπληρωματικών ηρη-ρηρ τρανζίστορ.

Ενισχυτές με επαγωγική σύζευξη



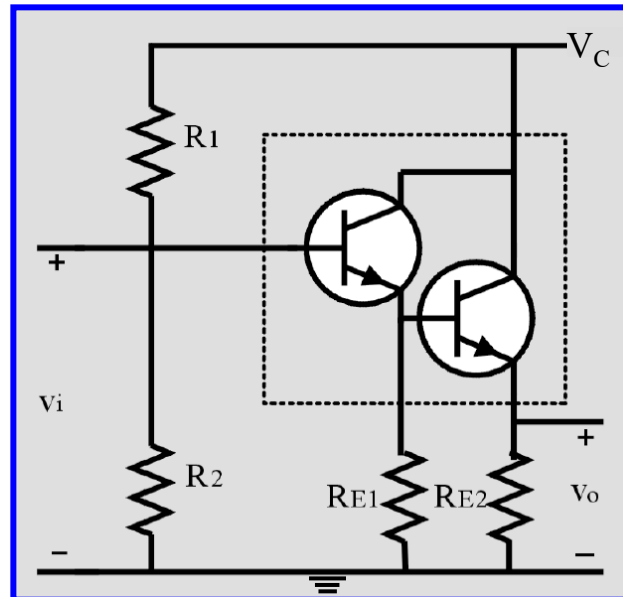
- Ο μετασχηματιστής δημιουργεί σύζευξη του εναλλασσόμενου σήματος εξόδου της πρώτης βαθμίδας προς την είσοδο της επόμενης βαθμίδας, ενώ υπάρχει απομόνωση των βαθμίδων ως προς το συνεχές.
- Δεν καταναλώνεται ισχύς συνεχούς στον μετασχηματιστή.
- Η ικανότητα του μετασχηματιστή να δημιουργεί ενίσχυση, συνεισφέρει στην αύξηση της ενίσχυσης του ενισχυτή.

Ενισχυτές με απευθείας σύζευξη (σύνθετοι ενισχυτές)

- Με τον όρο **σύνθετοι ενισχυτές**, εννοούμε τους ενισχυτές που προκύπτουν με απευθείας σύζευξη βαθμίδων απλών ενισχυτών σε σύνδεση κοινού εκπομπού (ΚΕ), κοινής βάσης (ΚΒ) και κοινού συλλέκτη (ΚΣ).
- Με τον τρόπο αυτό μπορούν να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των επιμέρους βαθμίδων και να σχεδιαστούν ενισχυτές με ιδιαίτερα και χρήσιμα χαρακτηριστικά.
- Από τους εννέα δυνατούς συνδυασμούς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τρεις (**ΚΣ–ΚΣ**, **ΚΣ–ΚΕ**, **ΚΕ–ΚΒ**), καθώς και ο **διαφορικός ενισχυτής τάσης (ΚΕ–ΚΕ με κοινή αντίσταση εκπομπού)**.

Ενισχυτής κοινού συλλέκτη – κοινού συλλέκτη

- Το ζεύγος των τρανζίστορ που περιλαμβάνεται στον σύνθετο ενισχυτή ΚΣ–ΚΣ, είναι γνωστό ως **ζεύγος Darlington**.
- Οι δύο συλλέκτες συνδέονται μεταξύ τους και ο εκπομπός του πρώτου τρανζίστορ συνδέεται στη βάση του δεύτερου.
- Αυτός ο τρόπος σύνδεσης οδηγεί στην ουσία σε ένα μεγαλύτερο τρανζίστορ του οποίου ο συλλέκτης είναι οι κοινοί συλλέκτες των δύο τρανζίστορ, βάση είναι η βάση του πρώτου τρανζίστορ και εκπομπός είναι ο εκπομπός του δεύτερου τρανζίστορ.

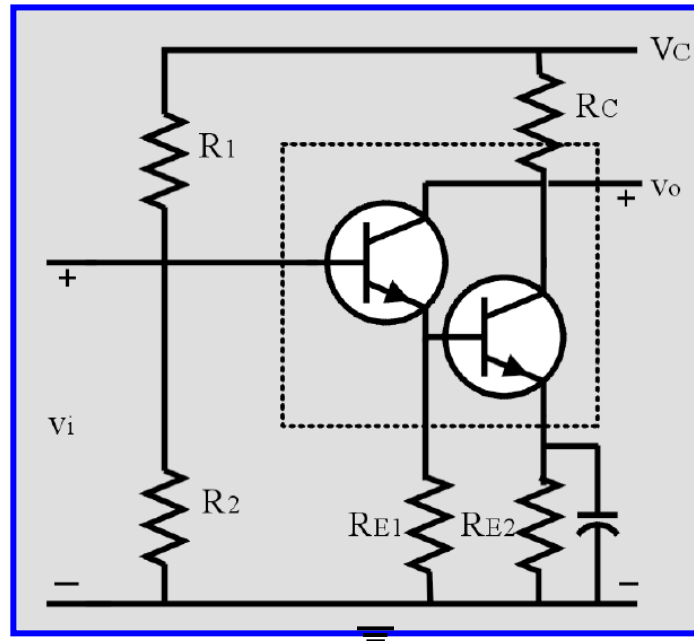


Ενισχυτής κοινού συλλέκτη – κοινού συλλέκτη

- Η **ενίσχυση ρεύματος** του ζεύγους Darlington είναι περίπου ίση με το **γινόμενο των ενισχύσεων ρεύματος των δύο τρανζίστορ**.
- Η **αντίσταση εισόδου** είναι **αυξημένη κατά h_{fe} φορές** περίπου από ότι σε έναν ενισχυτή ΚΣ απλής βαθμίδας, η δε **αντίσταση εξόδου** είναι **πολύ μικρότερη**.
- Η **συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης (f_T)** του ζεύγους Darlington είναι περίπου **h_{fe} φορές μικρότερη** από εκείνη που παρουσιάζει ένας ενισχυτής ΚΣ απλής βαθμίδας.
- Η **ενίσχυση τάσης** πλησιάζει περισσότερο προς τη **μονάδα** από ότι σε έναν ενισχυτή απλής βαθμίδας ΚΣ, καθιστώντας τον σύνθετο ενισχυτή έναν πιο αποτελεσματικό **απομονωτή**.
- Η παρουσία του ζεύγους Darlington είναι συχνή σε ολοκληρωμένους ενισχυτές και σε εφαρμογές όπου απαιτείται **υψηλή ενίσχυση ρεύματος**.

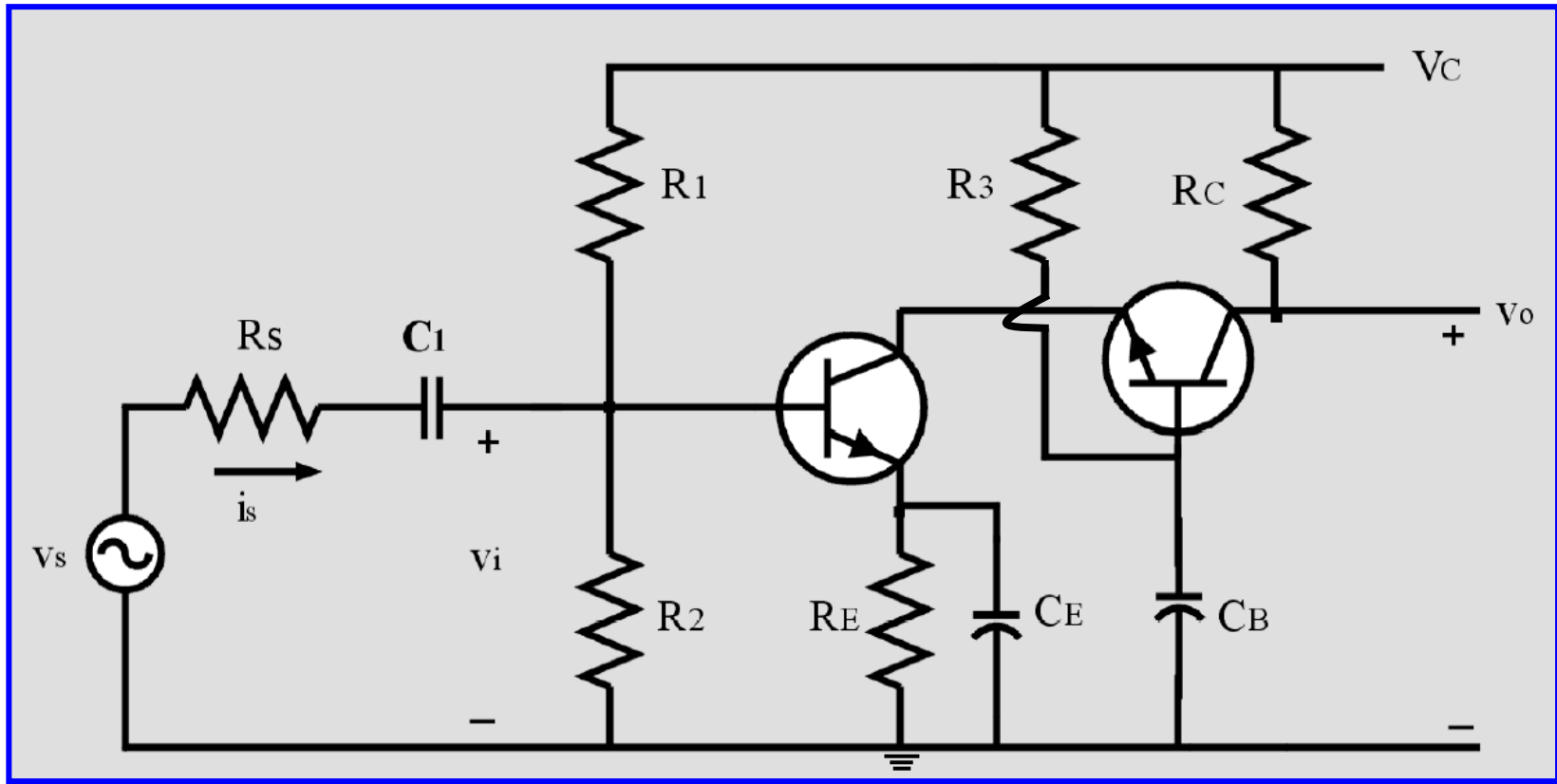
Ενισχυτής κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού

- Όταν εκτός από μεγάλη ενίσχυση ρεύματος και μεγάλη αντίσταση εισόδου απαιτείται και **μεγάλη ενίσχυση τάσης**, τότε η λύση είναι ο **σύνθετος ενισχυτής κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού (ΚΣ–ΚΕ)**.
- Ουσιαστικά, ένας ενισχυτής ΚΣ–ΚΕ προκύπτει εάν σε μία απλή βαθμίδα κοινού εκπομπού (ΚΕ) αντικαταστήσουμε το τρανζίστορ με ένα ζεύγος Darlington.
- Η **ενίσχυση ρεύματος** και η **αντίσταση εισόδου** είναι **αυξημένη κατά h_{fe} φορές** περίπου από ότι σε ένα διπολικό τρανζίστορ (**βλέπε Άσκηση 1 της ενότητας**).



Κασκωδικός ενισχυτής

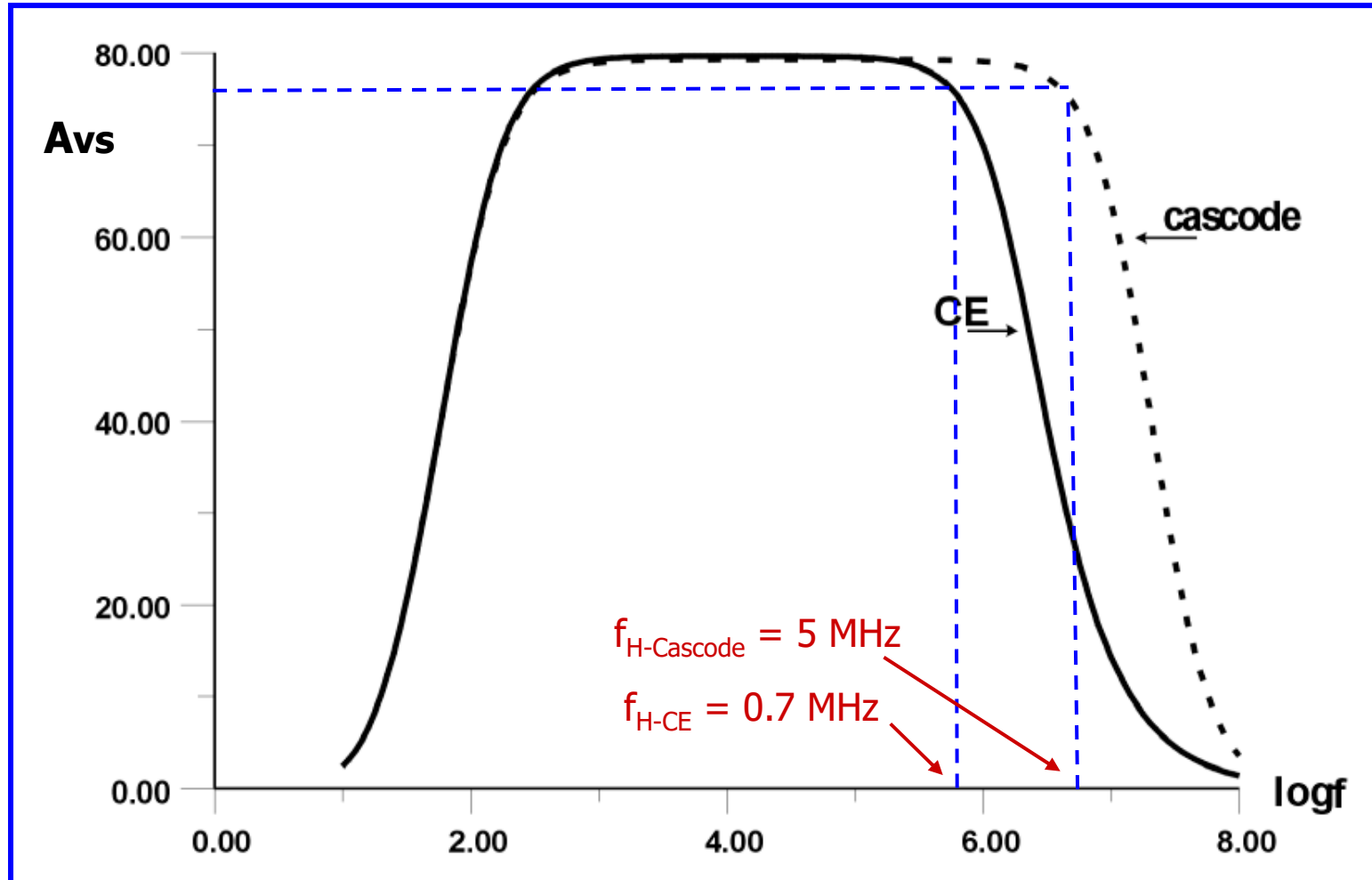
- Ο **κασκωδικός (cascode) ενισχυτής** είναι σύνθετος ενισχυτής που προκύπτει από **απευθείας σύζευξη** μίας βαθμίδας κοινού εκπομπού και μίας βαθμίδας κοινής βάσης (**ΚΕ-ΚΒ**).



Κασκωδικός ενισχυτής

- Στον ενισχυτή αυτόν, η **απόκριση υψηλών συχνοτήτων καθορίζεται από τη βαθμίδα ΚΕ**, αφού η βαθμίδα ΚΒ έχει καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες συγκριτικά με τη βαθμίδα ΚΕ.
- Ο συλλέκτης της βαθμίδας ΚΕ έχει ως φορτίο την αντίσταση εισόδου της βαθμίδας ΚΒ, η οποία όπως είναι πολύ μικρή.
- Επομένως, η **ισοδύναμη χωρητικότητα της βαθμίδας ΚΕ στις υψηλές συχνότητες είναι μικρότερη στον κασκωδικό ενισχυτή** από εκείνη της απλής βαθμίδας ΚΕ [$C_{eq} = C_{\pi} + C_{\mu} (1 + g_m \cdot R_L)$].
- Αφού στις υψηλές συχνότητες η απόκριση του ενισχυτή καθορίζεται από το κύκλωμα εισόδου (δηλ. από την C_{eq}), η **σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου του κασκωδικού ενισχυτή είναι μικρότερη** από εκείνη της απλής βαθμίδας ΚΕ, οπότε η **ανώτερη συχνότητα αποκοπής του κασκωδικού ενισχυτή είναι μεγαλύτερη**, οδηγώντας σε καλύτερη απόκριση συχνότητας.
- Ο κασκωδικός ενισχυτής έχει **υψηλή αντίσταση εισόδου** (όπως η βαθμίδα ΚΕ) και **υψηλή αντίσταση εξόδου** (όπως η βαθμίδα ΚΒ).
- Οι ενισχύσεις τάσης και ρεύματος του κασκωδικού ενισχυτή **προσεγγίζουν τις αντίστοιχες του ενισχυτή κοινού εκπομπού**.

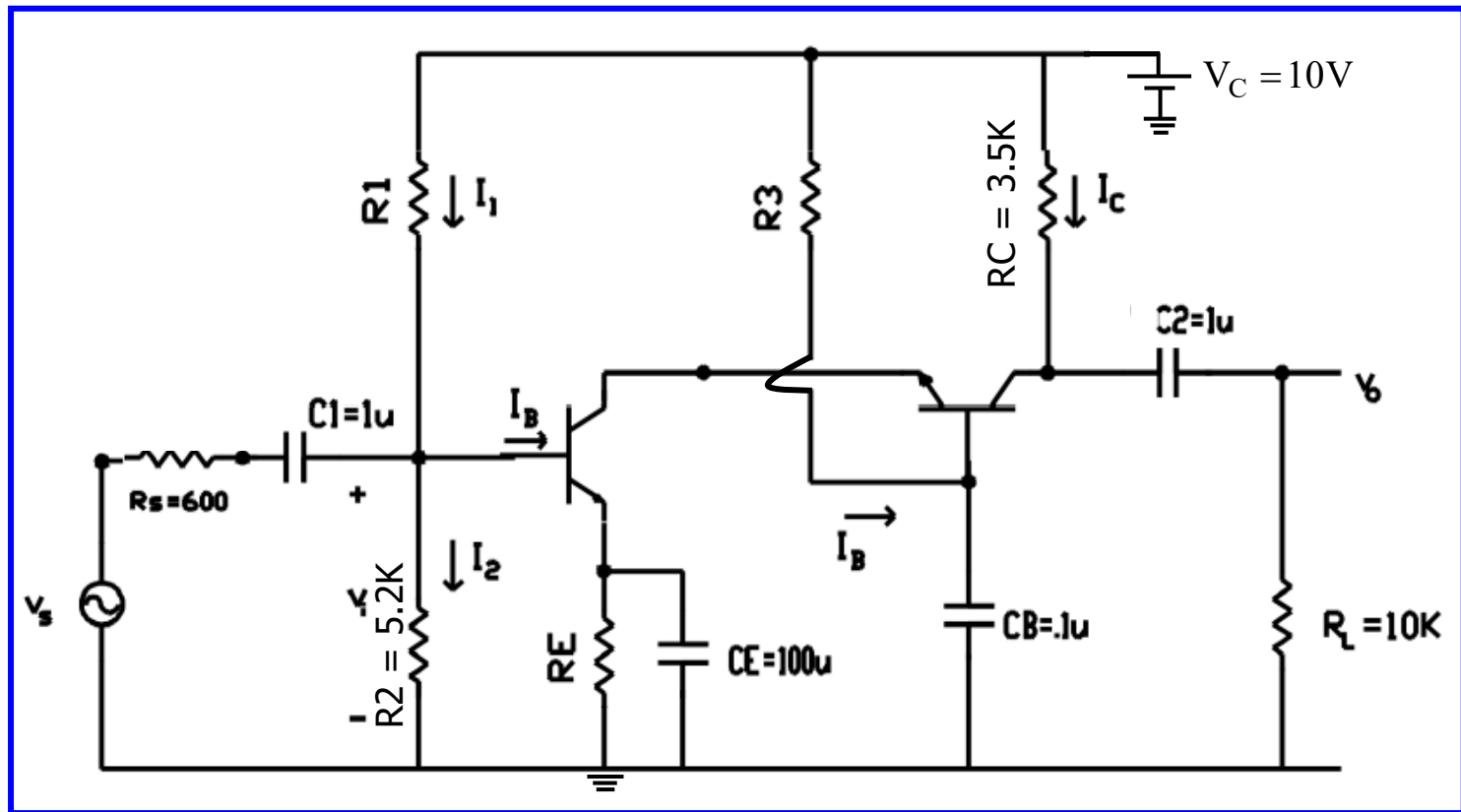
Κασκωδικός ενισχυτής



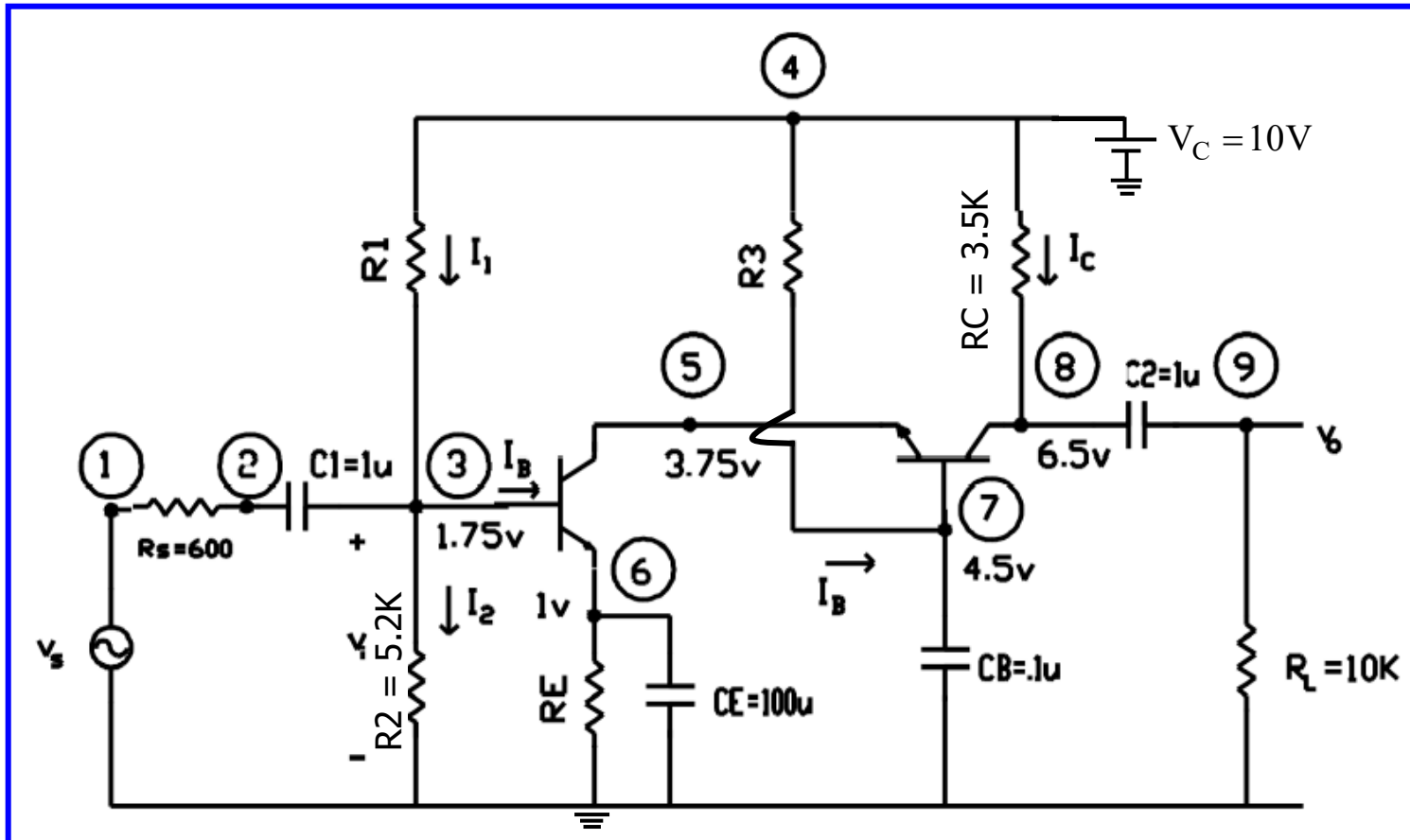
Στις υψηλές συχνότητες ο κασκωδικός ενισχυτής υπερέχει έναντι του ενισχυτή ΚΕ, ενώ στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες οι δύο αποκρίσεις είναι παρόμοιες.

Παράδειγμα 1^ο: κασκωδικός ενισχυτής

Για τον κασκωδικό ενισχυτή του σχήματος προσδιορίστε τις τιμές των αντιστάσεων R_1 , R_3 και R_E . Για τα δύο τρανζίστορ του ενισχυτή δίνονται: $\beta = 200$, $I_C = 1 \text{ mA}$, $V_{BE} = 0.75 \text{ V}$ και $V_{CB} = 2 \text{ V}$.



Παράδειγμα 1^ο: κασκωδικός ενισχυτής



Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα υπολογίζουμε τα δυναμικά στους κόμβους του κυκλώματος ξεκινώντας από τον κόμβο της τάσης τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

$$V_C - I_C R_C = 6.5 \text{ V} = V_8$$

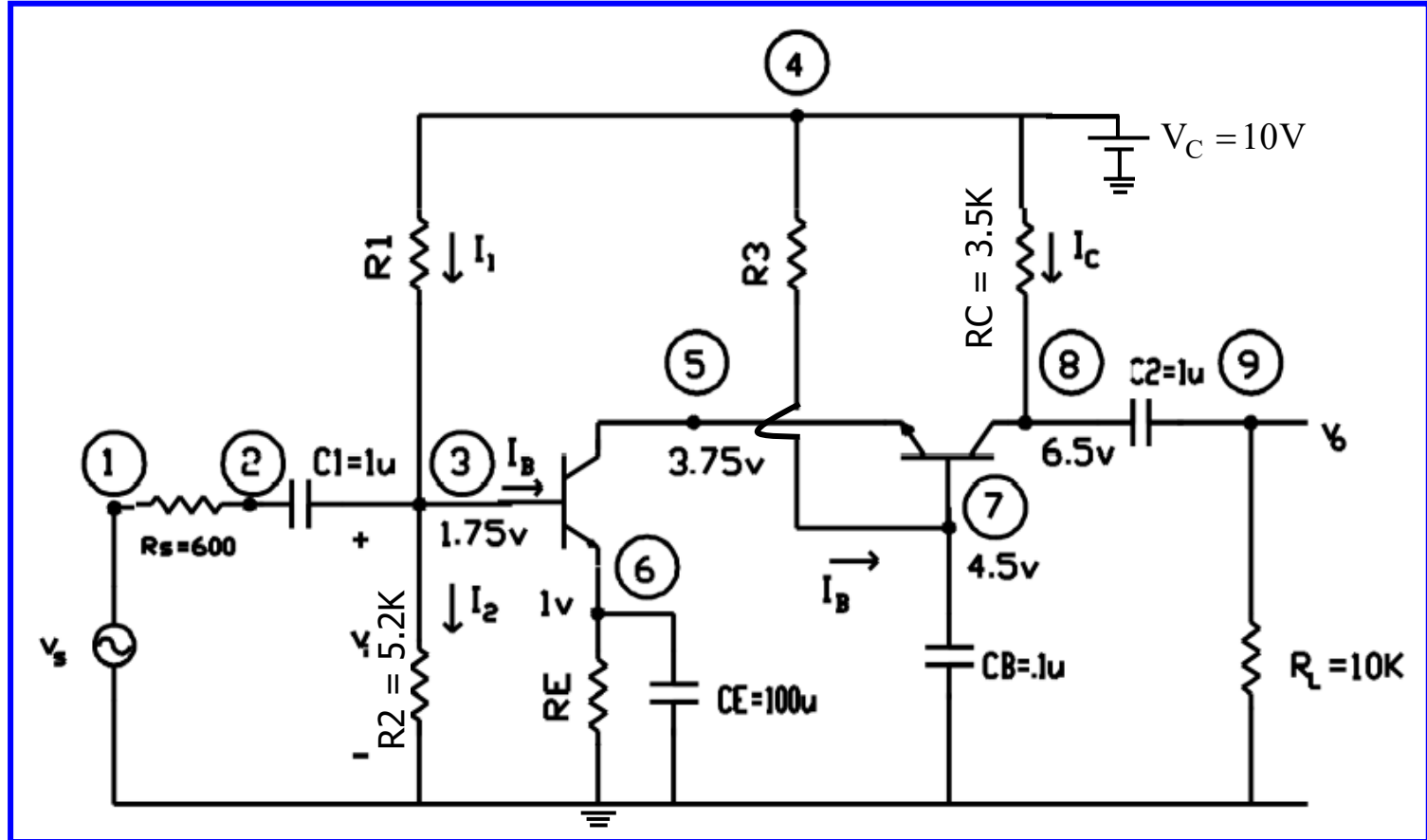
$$4.5 \text{ V} - V_{BE} = 3.75 \text{ V} = V_5$$

$$1.75 \text{ V} - V_{BE} = 1 \text{ V} = V_6$$

$$6.5 \text{ V} - V_{CB} = 4.5 \text{ V} = V_7$$

$$3.75 \text{ V} - V_{CB} = 1.75 \text{ V} = V_3$$

Παράδειγμα 1^ο: κασκωδικός ενισχυτής



$$R_E = \frac{1}{I_C} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{10 - 4,5}{I_B} = 1,1 \text{ M}\Omega$$

$$I_2 = \frac{1,75}{R_2} = 337 \mu\text{A}$$

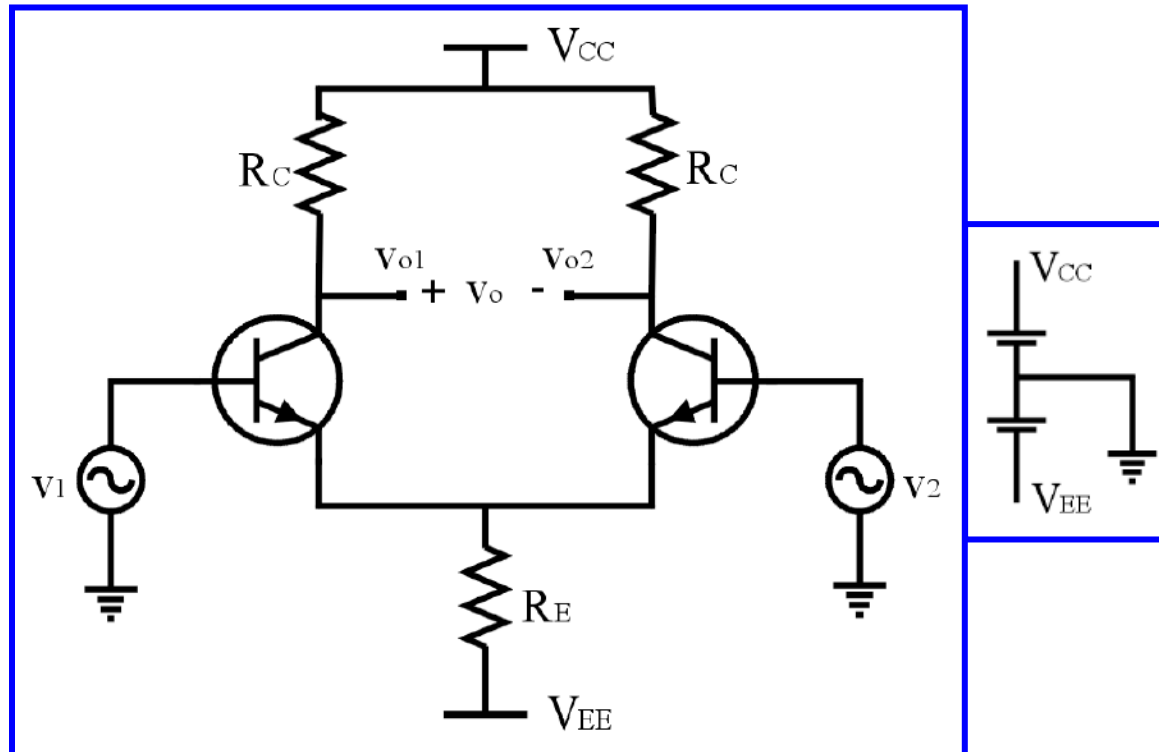
$$R_1 = \frac{10 - 1,75}{I_1} = 24 \text{ k}\Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 5 \mu\text{A}$$

$$I_1 = I_2 + I_B = 342 \mu\text{A}$$

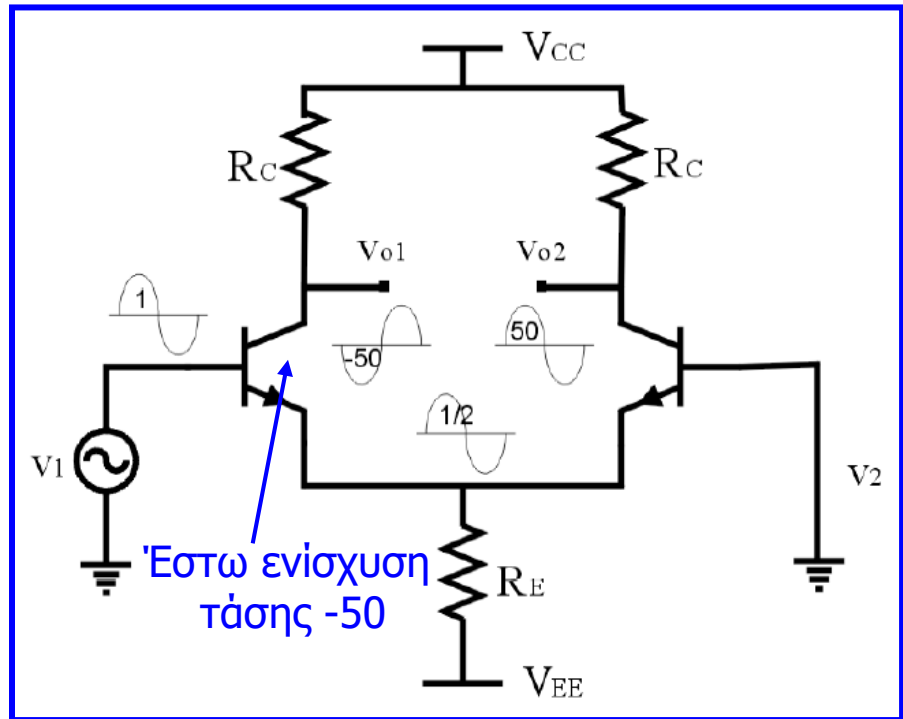
Διαφορικός ενισχυτής τάσης

- Ο διαφορικός ενισχυτής τάσης (voltage differential amplifier) αποτελείται από **δύο όμοιες βαθμίδες ΚΕ με κοινή αντίσταση εκπομπού** και είναι ένα από τα πλέον χρήσιμα κυκλώματα ενισχυτών.
- Ο διαφορικός ενισχυτής συνήθως περιλαμβάνει **διπλή τροφοδοσία** συνεχούς και **διπλή είσοδο**.



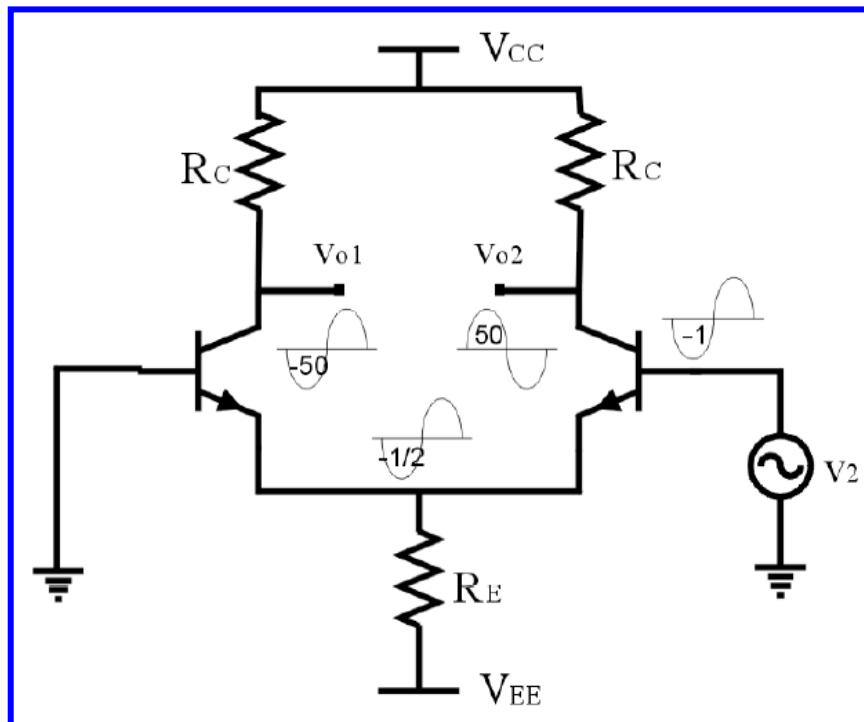
Λειτουργία διαφορικού ενισχυτή τάσης

- Η ανάλυση της λειτουργίας του διαφορικού ενισχυτή με διπλή είσοδο γίνεται ευκολότερα με χρήση της **αρχής της επαλληλίας**, οπότε θεωρούμε αρχικά ότι υπάρχει σήμα στη μία είσοδο, ενώ η άλλη είσοδος είναι γειωμένη.
- Το σήμα της πρώτης εισόδου εμφανίζεται ενισχυμένο και ανεστραμμένο στο συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ (αφού πρόκειται για βαθμίδα ΚΕ).
- Το σήμα εισόδου προκαλεί μεταβολή του ρεύματος εκπομπού ίδιας φάσης i_{e1} και εμφανίζεται στον εκπομπού εξασθενημένο κατά 50% ($v_e = v_1 / 2$).
- Η v_e προκαλεί μεταβολή ρεύματος στον εκπομπού του δεύτερου τρανζίστορ: $i_{e2} = -i_{e1}$.
- Συνέπεια αυτού είναι η εμφάνιση στο δεύτερο συλλέκτη σήματος ίδιου μεγέθους και αντίθετης φάσης: $V_{o2} = -V_{o1}$, λόγω της αντίθετης πολικότητας των ρευμάτων εκπομπών.



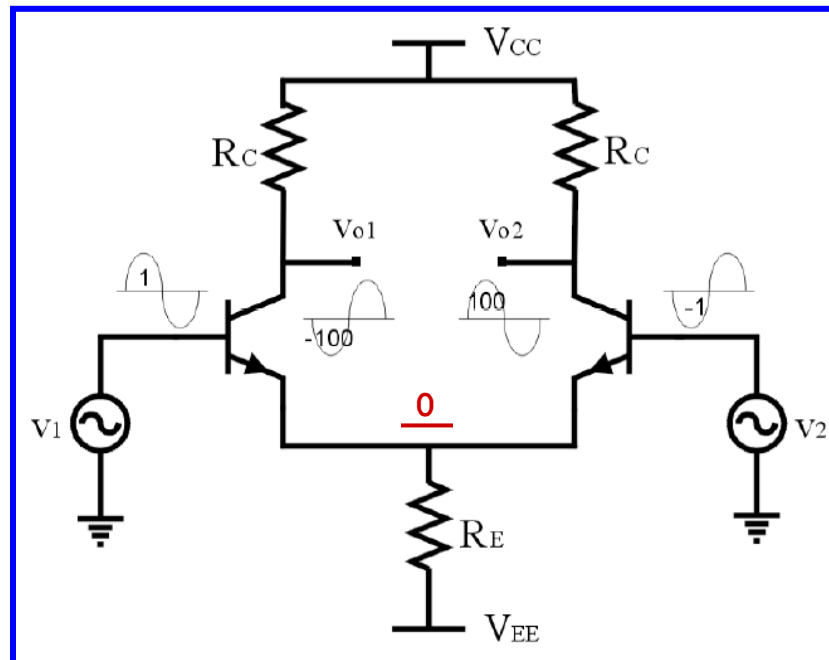
Λειτουργία διαφορικού ενισχυτή τάσης

- Παρόμοια διεργασία συμβαίνει εάν εφαρμόσουμε σήμα μόνο στη δεύτερη είσοδο και μάλιστα με αντίθετη φάση απ' ότι στην προηγούμενη περίπτωση ($v_2 = -v_1$).
- Τα σήματα στους συλλέκτες είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ το σήμα στους κοινούς εκπομπούς ακολουθεί τη φάση της τάσης εισόδου και παρουσιάζει αντίθετη φάση με την προηγούμενη περίπτωση.

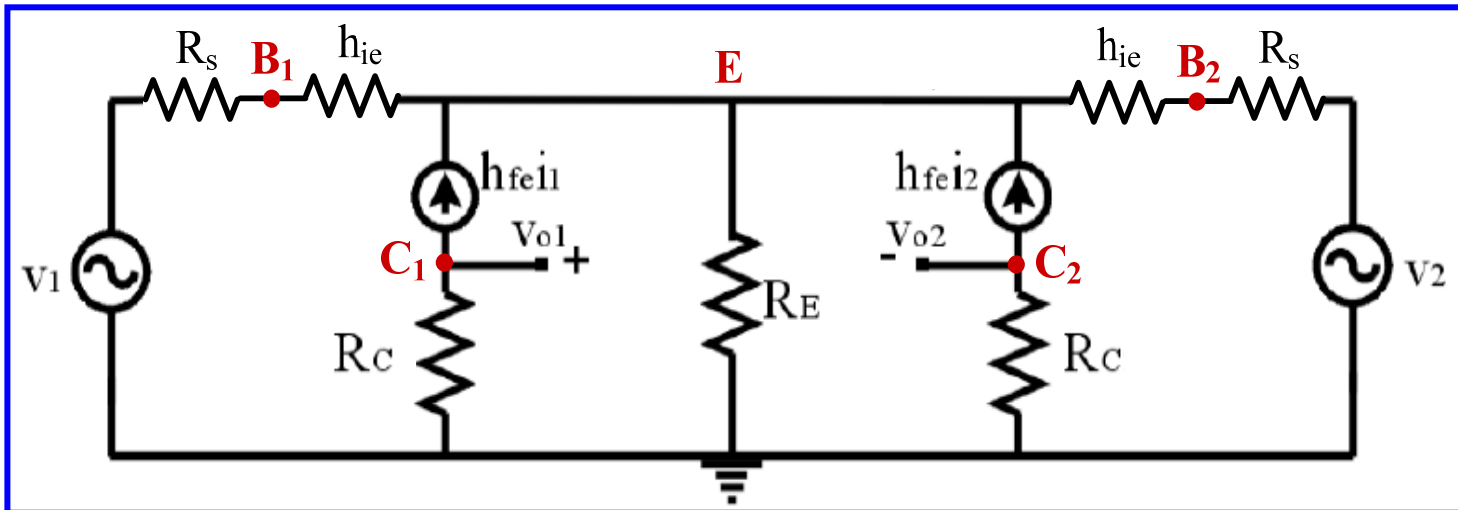
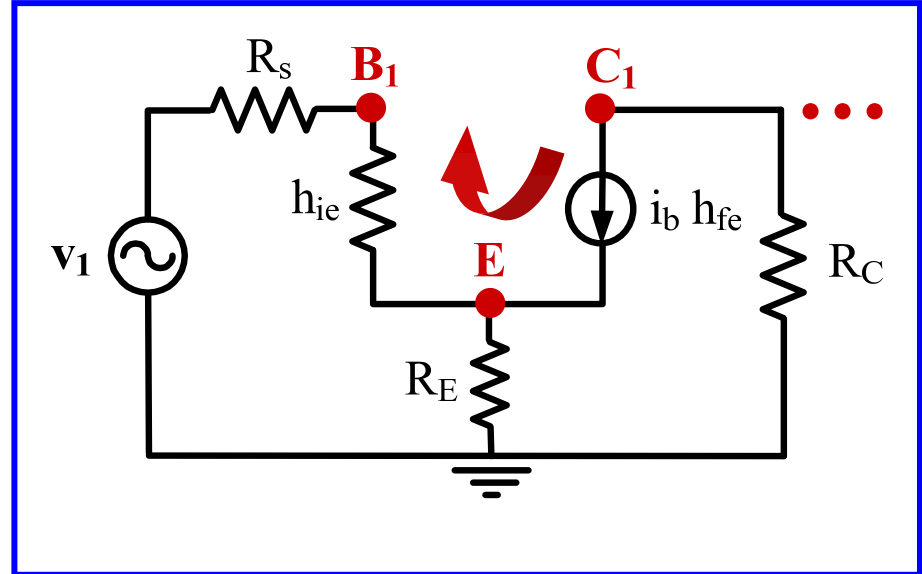
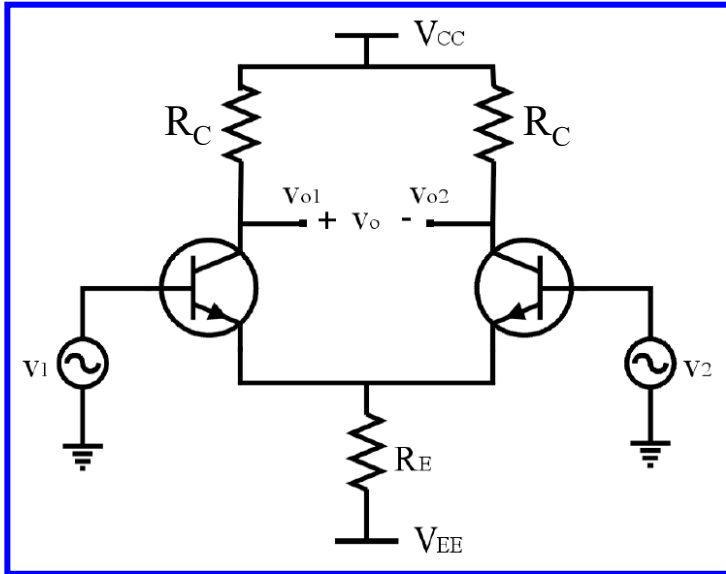


Λειτουργία διαφορικού ενισχυτή τάσης

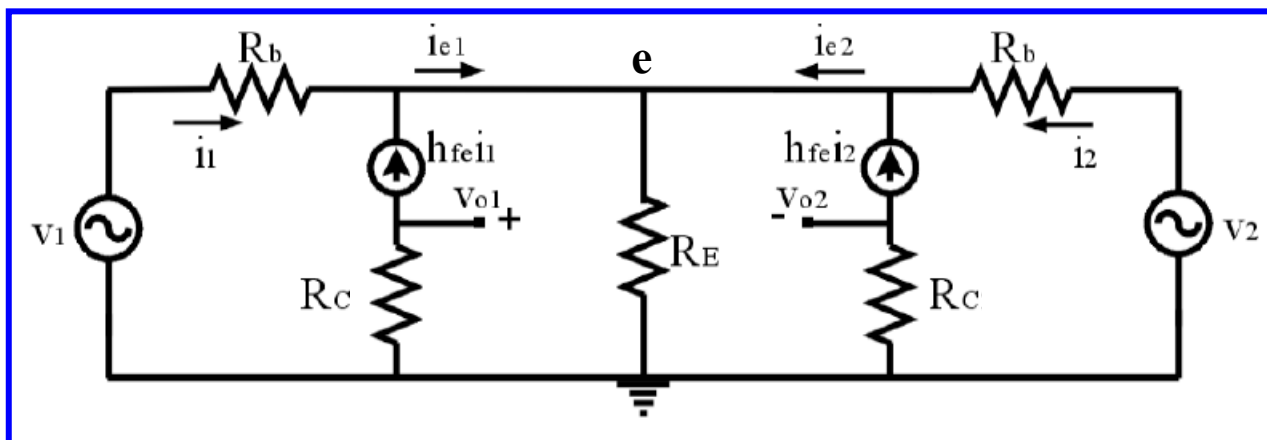
- Εάν θεωρήσουμε ότι τα **δύο διαφορικά σήματα εισόδου** ($v_2 = -v_1$) εφαρμόζονται ταυτόχρονα στις εισόδους του ενισχυτή, σύμφωνα με την **αρχή της επαλληλίας** στους κόμβους του κυκλώματος οι τάσεις θα ισούνται με το άθροισμα των τάσεων που υπήρχαν όταν καθένα από τα σήματα εφαρμοζόταν μόνο του.
- Τα σήματα συλλεκτών γίνονται διπλάσια, ενώ το **σήμα των κοινών εκπομπών μηδενίζεται**.
- Στην περίπτωση εφαρμογής **σημάτων εισόδου κοινού τρόπου** (δηλ. $v_2 = v_1$), η ίδια ανάλυση καταλήγει **ιδανικά σε μη εμφάνιση σήματος εξόδου ανάμεσα στους συλλέκτες**, και η λειτουργία αυτή του ενισχυτή αναφέρεται ως **απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου**.



Ισοδύναμο κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή στο ac



Ανάλυση διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο



Διαφορικά σήματα εισόδου

$$V_1 = -V_2$$

$$R_b = R_s + h_{ie}$$

R_s : αντίσταση πηγών σήματος

Λόγω της απόλυτης **συμμετρίας** του κυκλώματος (όμοια τρανζίστορ και αντιστάσεις) και λόγω των διαφορικών (**αντίθετων σημάτων εισόδου**), τα ρεύματα εκπομπού (i_{e1} , i_{e2}) είναι ίσα και αντίθετα, συνεπώς ο **κόμβος e** παρουσιάζει μηδενική τάση (συμπεριφέρεται ως **εικονική γη**).

$$v_e = (1 + h_{fe})R_E (i_1 + i_2) = 0 \rightarrow \text{Συμπεριφορά του κόμβου e ως εικονική γη}$$

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= R_b i_1 + v_e = R_b i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{V_1}{R_b} \\ v_2 &= R_b i_2 + v_e = R_b i_2 \Rightarrow i_2 = \frac{V_2}{R_b} = -\frac{V_1}{R_b} \\ v_{o1} &= -h_{fe} R_C i_1 = -h_{fe} R_C \frac{V_1}{R_b} \\ v_{o2} &= -h_{fe} R_C i_2 = h_{fe} R_C \frac{V_1}{R_b} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{o1} = -v_{o2}$$

Ανάλυση διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο

$$v_{o1} = -h_{fe} R_C \left(\frac{v_1}{R_b} \right)$$

$$v_{o2} = h_{fe} R_C \left(\frac{v_1}{R_b} \right)$$

Διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή με απλή έξοδο

$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{v_{o2}}{2v_1} \Rightarrow$$

$$A_d = h_{fe} \frac{R_C}{2R_b}$$

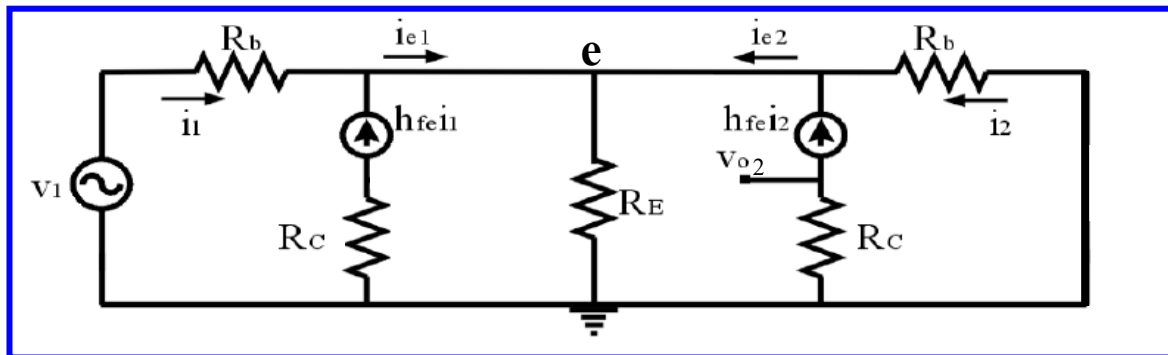
Διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή με διαφορική έξοδο

$$A'_d = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_1 - v_2} = \frac{2v_{o2}}{2v_1} = \frac{v_{o2}}{v_1} \Rightarrow$$

$$A'_d = 2A_d = h_{fe} \frac{R_C}{R_b}$$

- Εάν το κύκλωμα είναι απόλυτα **συμμετρικό** (όσον αφορά αντιστάσεις και χαρακτηριστικά τρανζίστορ), τότε για μηδενική τάση και στις δύο εισόδους, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των συλλεκτών θα είναι μηδενική.
- Αν το κύκλωμα παρουσιάζει κάποια **ασυμμετρία**, τότε για μηδενική τάση και στις δύο εισόδους, υπάρχει μη μηδενική τάση (DC) μεταξύ των συλλεκτών που ονομάζεται **τάση ασυμμετρίας** του διαφορικού ενισχυτή.

Ανάλυση διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο



Απλή πηγή
σήματος

$$v_2 = 0$$

$$v_e = -R_b i_2 \quad (1)$$

$$v_e = (i_{e1} + i_{e2})R_E = (i_1 + h_{fe}i_1 + i_2 + h_{fe}i_2)R_E = (1 + h_{fe})(i_1 + i_2)R_E \stackrel{(1)}{\Rightarrow} i_1 = -\frac{R_b + (1 + h_{fe})R_E}{(1 + h_{fe})R_E} i_2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= R_b i_1 + v_e \\ v_e &= -R_b i_2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow v_1 = R_b (i_1 - i_2) \quad (2)$$

$$v_1 = -R_b \left(\frac{R_b}{(1 + h_{fe})R_E} + 2 \right) i_2$$

$$(1 + h_{fe})R_E \gg R_b \Rightarrow v_1 \approx -2R_b i_2 \Rightarrow i_2 \approx -\frac{v_1}{2R_b}$$

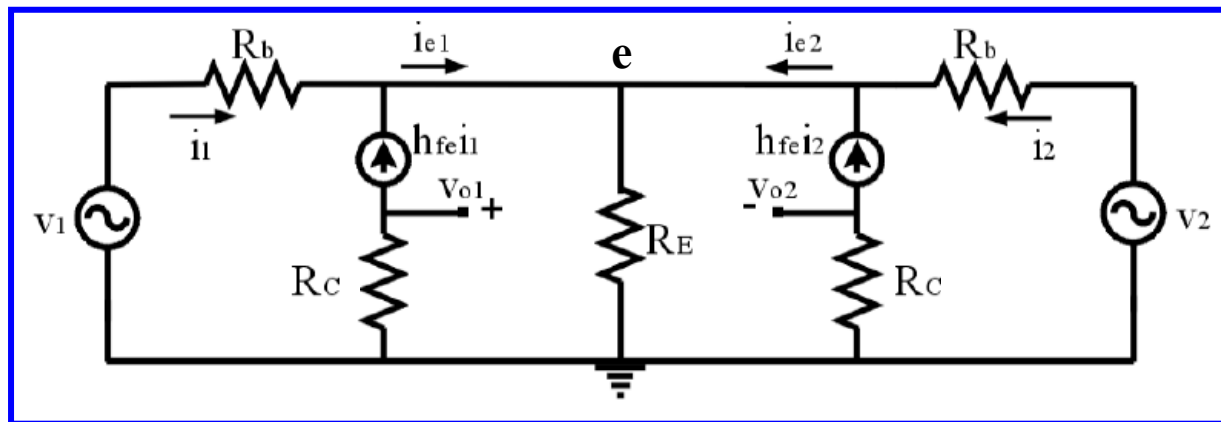
$$v_e = -R_b i_2 \Rightarrow v_e = \frac{1}{2} v_1$$

$$v_{o2} = -h_{fe} R_C i_2 = h_{fe} \frac{R_C}{2R_b} v_1$$

$$A = \frac{v_{o2}}{v_1} = h_{fe} \frac{R_C}{2R_b} \Rightarrow A = A_d$$

Ενίσχυση με
απλή είσοδο

Ανάλυση διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο



Σήματα εισόδου κοινού τρόπου

$$v_1 = v_2$$

$$v_1 = R_b i_1 + v_e$$

$$v_2 = R_b i_2 + v_e$$

$$v_1 - v_2 = R_b (i_1 - i_2) \Rightarrow i_1 = i_2$$

$$v_2 = R_b i_2 + v_e = R_b i_2 + R_E (i_{e1} + i_{e2}) = R_b i_2 + (1 + h_{fe}) R_E (i_1 + i_2) \Rightarrow i_2 = \frac{v_2}{R_b + 2(1 + h_{fe}) R_E}$$

$$v_{o2} = -h_{fe} R_C i_2 = -\frac{h_{fe} R_C v_2}{R_b + 2(1 + h_{fe}) R_E} = -\frac{h_{fe} R_C v_1}{R_b + 2(1 + h_{fe}) R_E}$$

$$v_{o1} = -h_{fe} R_C i_1$$

$$v_{o1} = v_{o2}$$

Ενίσχυση σημάτων κοινού τρόπου

$$A_{CM} = \frac{v_{o2}}{v_1} = -\frac{h_{fe} R_C}{R_b + 2(1 + h_{fe}) R_E} \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$

Μηδενικό σήμα μεταξύ συλλεκτών

Απόρριψη σημάτων εισόδου κοινού τρόπου

$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = h_{fe} \frac{R_C}{2R_b}$$

$$A_{CM} = \frac{v_{o2}}{v_1} \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$

- Δείκτης ποιότητας του διαφορικού ενισχυτή είναι ο **λόγος απόρριψης κοινού τρόπου (common mode rejection ratio)**:

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{CM}} \right| \Rightarrow CMRR \approx \frac{h_{fe} R_E}{R_b}$$

$$\text{Σε dB: } CMRR_{dB} = 20 \cdot \log \left| \frac{A_d}{A_{CM}} \right|$$

- **Μεγάλες τιμές της R_E** οδηγούν σε μεγάλο λόγο απόρριψης κοινού τρόπου άρα σε **ποιοτικότερο διαφορικό ενισχυτή** όσον αφορά την απόρριψη σημάτων εισόδου κοινού τρόπου.
- Επίσης, **μεγάλες τιμές της R_C** οδηγούν σε **μεγάλη διαφορική ενίσχυση**.

Απόρριψη σημάτων εισόδου κοινού τρόπου

- Όπως προαναφέρθηκε, στην ιδανική (θεωρητική) περίπτωση για σήματα εισόδου κοινού τρόπου, οι τάσεις στους συλλέκτες των τρανζίστορ είναι ίσες, δηλαδή η τάση μεταξύ των συλλεκτών είναι μηδενική (απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου).
- Συνεπώς, η ενίσχυση κοινού σήματος με διαφορική έξοδο είναι μηδενική και ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος για διαφορική έξοδο είναι άπειρος.

$$A'_{CM} = \frac{V_{o2} - V_{o1}}{V_1} = 0$$

$$CMRR' = \frac{A'_d}{A'_{CM}} = \infty$$

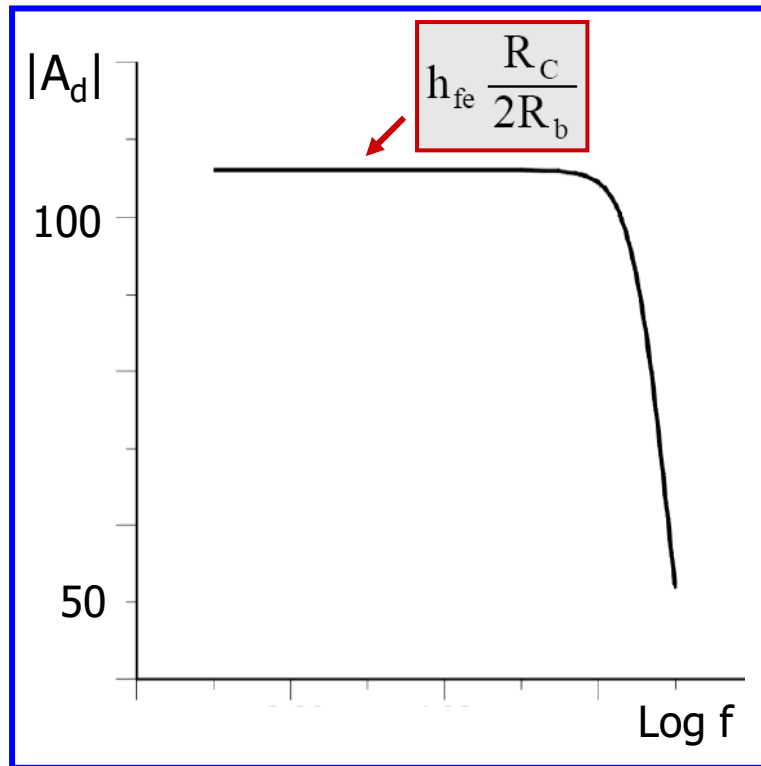
- Ωστόσο, στους πραγματικούς διαφορικούς ενισχυτές, όπου παρουσιάζεται **ασυμμετρία**, η ενίσχυση κοινού σήματος με διαφορική έξοδο δεν είναι μηδενική με αποτέλεσμα ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος για διαφορική έξοδο, να είναι πεπερασμένος.

Απόρριψη σημάτων εισόδου κοινού τρόπου

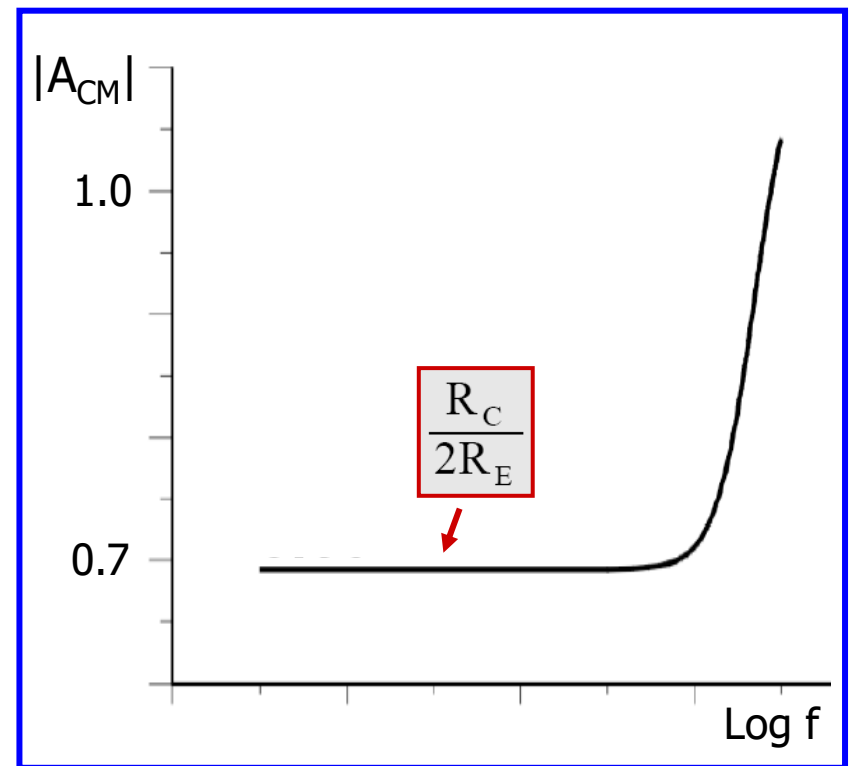
- Η απόρριψη σημάτων εισόδου κοινού τρόπου είναι εφικτή μόνο σε διαφορικούς ενισχυτές.
- Στην πράξη, τα σήματα εισόδου ενός διαφορικού ενισχυτή δεν είναι μόνο διαφορικά σήματα, ούτε μόνο σήματα κοινού τρόπου.
- Με βάση την αρχή της επαλληλίας (δηλ. εάν και τα δύο είδη σημάτων εισόδου εφαρμοστούν ανεξάρτητα στον ενισχυτή), συμπεραίνουμε ότι ο διαφορικός ενισχυτής τελικά απορρίπτει τη συνιστώσα κοινού τρόπου στην έξοδό του.
- Η σημασία της απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου είναι μεγάλη σε εφαρμογές όπου υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης μικρών σημάτων, τα οποία είναι εγκλωβισμένα σε ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολών και θόρυβο.
- Για παράδειγμα, σήματα που δημιουργούνται από την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς έχουν πλάτος μικρότερο των 50 μV , ενώ συνοδεύονται από σήματα παρεμβολών που συχνά το πλάτος τους ξεπερνά τα 100 mV.
- Τα ασθενή χρήσιμα σήματα μπορούν να αναδειχθούν με χρήση ειδικών διαφορικών ενισχυτών.

Αποκρίσεις διαφορικού ενισχυτή

- Ο διαφορικός ενισχυτής έχει βαθυπερατή συμπεριφορά και παρουσιάζει σταθερή ενίσχυση στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες.
- Η ενίσχυση σημάτων κοινού τρόπου του ενισχυτή παραμένει σταθερή στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες και αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες.

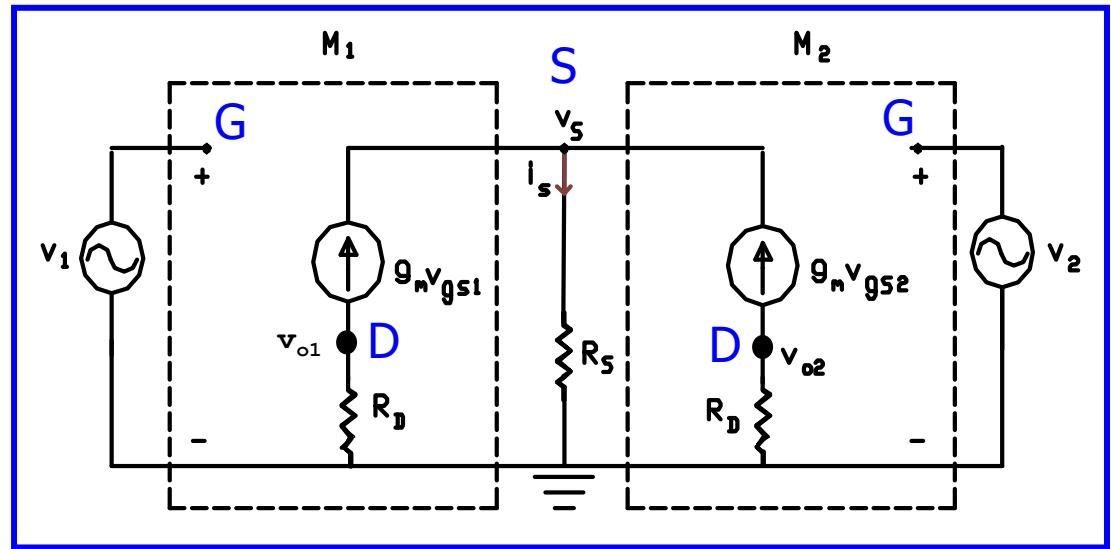
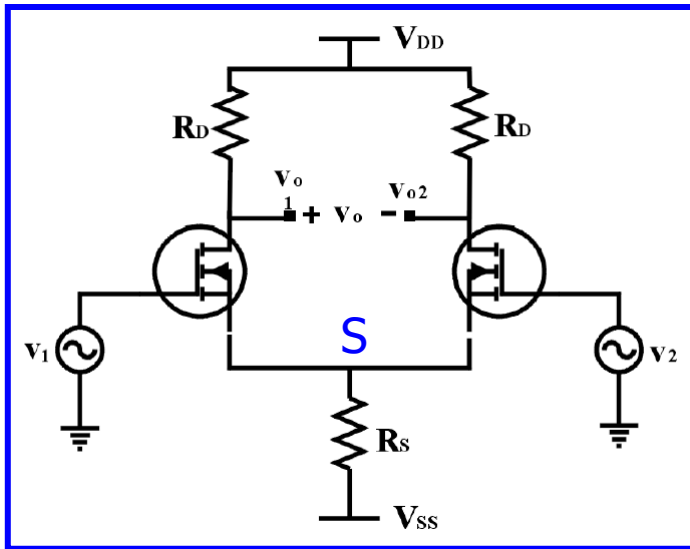


Διαφορική απόκριση συχνότητας



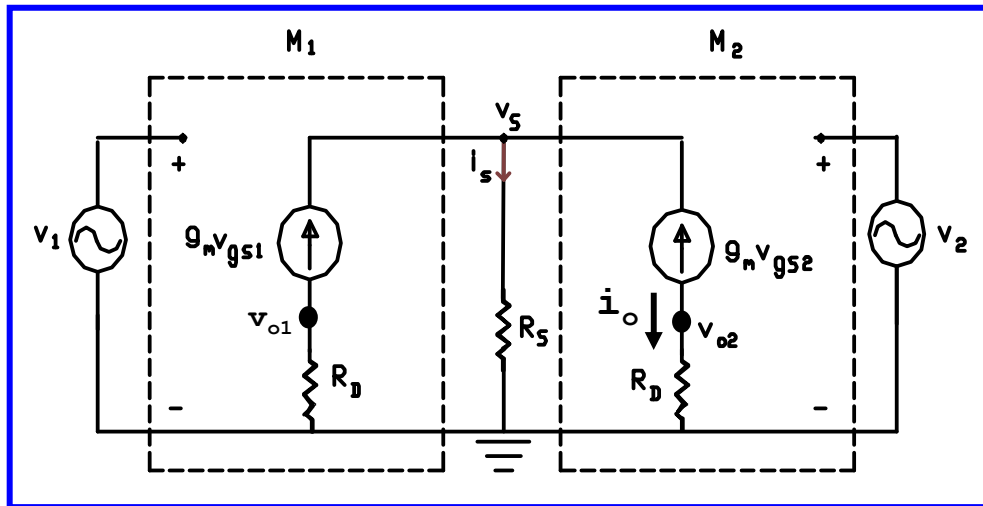
Απόκριση κοινού τρόπου

Διαφορικός ενισχυτής με MOSFET



$$v_S = g_m v_{gs1} R_S + g_m v_{gs2} R_S \Rightarrow$$
$$v_S = g_m R_S (v_1 - v_S) + g_m R_S (v_2 - v_S) \Rightarrow$$
$$v_S = \frac{g_m R_S}{1 + 2g_m R_S} (v_1 + v_2)$$

Διαφορικός ενισχυτής με MOSFET



$$v_S = \frac{g_m R_S}{1 + 2g_m R_S} (v_1 + v_2)$$

$$v_1 = -v_2 \rightarrow v_S = 0$$

Ο κόμβος S συμπεριφέρεται ως εικονική γη

$$v_{o2} = -g_m R_D v_{gs2} \Rightarrow$$

$$v_{o2} = -g_m R_D (v_2 - v_S) \Rightarrow$$

$$v_{o2} = -g_m R_D v_2 = g_m R_D v_1$$

Με όμοιο τρόπο προκύπτει ότι:

$$v_{o1} = -g_m R_D v_1 \Rightarrow v_{o1} = -v_{o2}$$

Διαφορική ενίσχυση με απλή έξοδο:

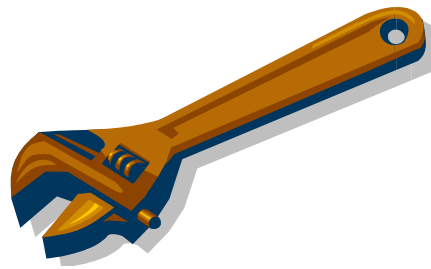
$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{v_{o2}}{2v_1} = \frac{g_m R_D}{2}$$

Διαφορική ενίσχυση με διαφορική έξοδο:

$$A'_d = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_1 - v_2} = \frac{2v_{o2}}{2v_1} = g_m R_D$$

Συμπεράσματα

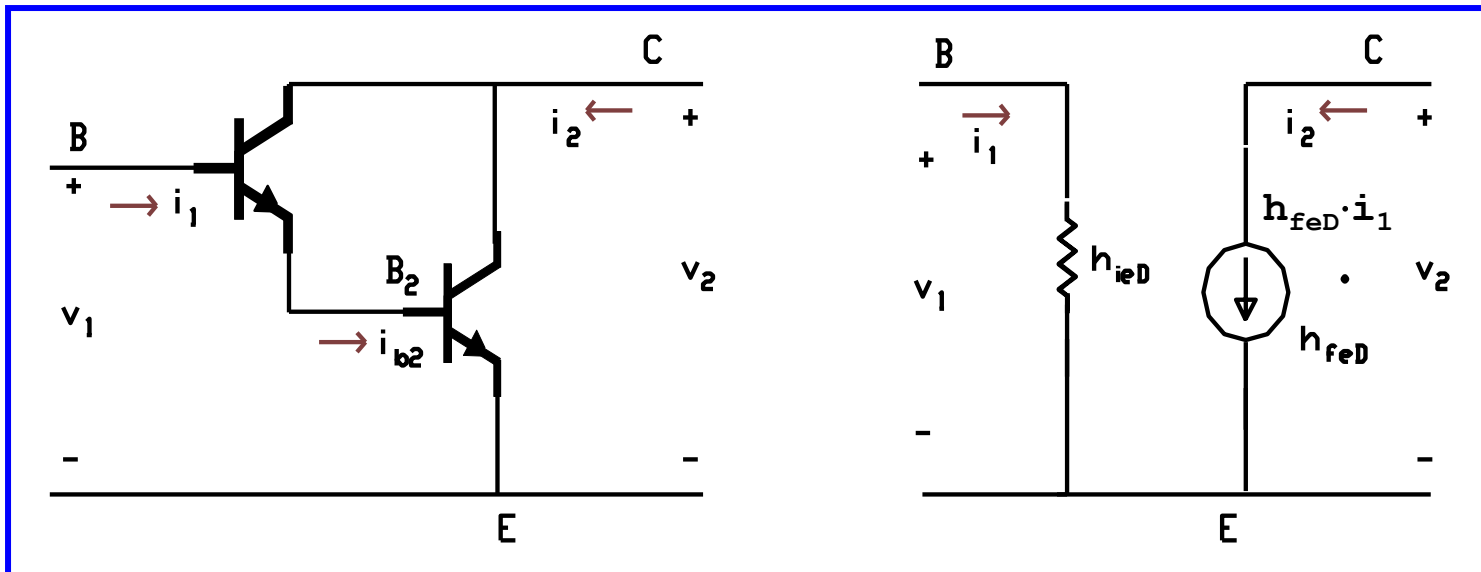
- Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για τη διασύνδεση απλών ενισχυτικών βαθμίδων με σκοπό τη δημιουργία πιο σύνθετων ενισχυτών.
- Οι ενισχυτές πολλών βαθμίδων εμφανίζουν μεγάλη ενίσχυση τάσης, ρεύματος και ισχύος.
- Η σύζευξη ενισχυτικών βαθμίδων για τη δημιουργία ενός ενισχυτή πολλών βαθμίδων μπορεί να γίνει μέσω πυκνωτή σύζευξης, με απευθείας σύζευξη και μέσω μετασχηματιστή (επαγωγική σύζευξη).
- Από τους δυνατούς συνδυασμούς σύζευξης απλών βαθμίδων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνδυασμοί ΚΣ–ΚΣ, ΚΣ–ΚΕ και ο κασκωδικός ενισχυτής (ΚΕ–ΚΒ).
- Επίσης, ένα από τα πιο σημαντικά κυκλώματα σύνθετου ενισχυτή αποτελεί ο διαφορικός ενισχυτής τάσης, ο οποίος εκτός από τους πολλαπλούς τρόπους λειτουργίας που διαθέτει, εμφανίζει και το σημαντικό χαρακτηριστικό της απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου.



Ασκήσεις 4^{ης} ενότητας

Άσκηση 1^η

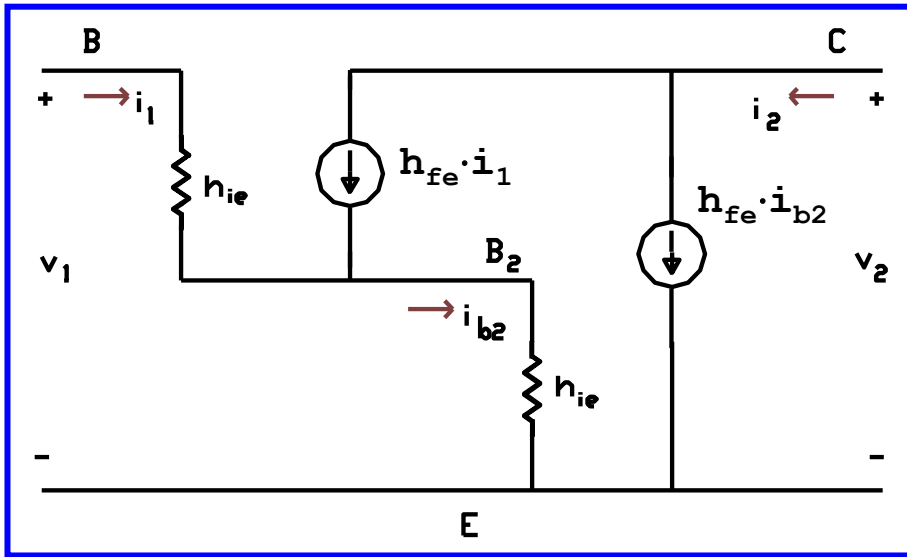
Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα ενός διπολικού τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού, να υπολογίσετε τις παραμέτρους του αντίστοιχου ισοδύναμου κυκλώματος για ένα ζεύγος Darlington σε σύνδεση κοινού εκπομπού, δηλαδή την αντίσταση εισόδου (h_{ieD}) και την απολαβή ρεύματος (h_{feD}) του ζεύγους, σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμέτρους h_{ie} και h_{fe} ενός διπολικού τρανζίστορ. Θεωρείστε ότι τα διπολικά τρανζίστορ του ζεύγους είναι όμοια με παραμέτρους h_{ie} και h_{fe} .



$$h_{ieD} = \frac{v_1}{i_1}$$

$$h_{feD} = \frac{i_2}{i_1}$$

Άσκηση 1^η



$$v_1 = h_{ie} i_1 + h_{ie} i_{b2} \Rightarrow$$

$$v_1 = h_{ie} i_1 + (1 + h_{fe}) i_1 h_{ie}$$

$$h_{ieD} = \frac{v_1}{i_1} \Rightarrow h_{ieD} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) h_{ie}$$

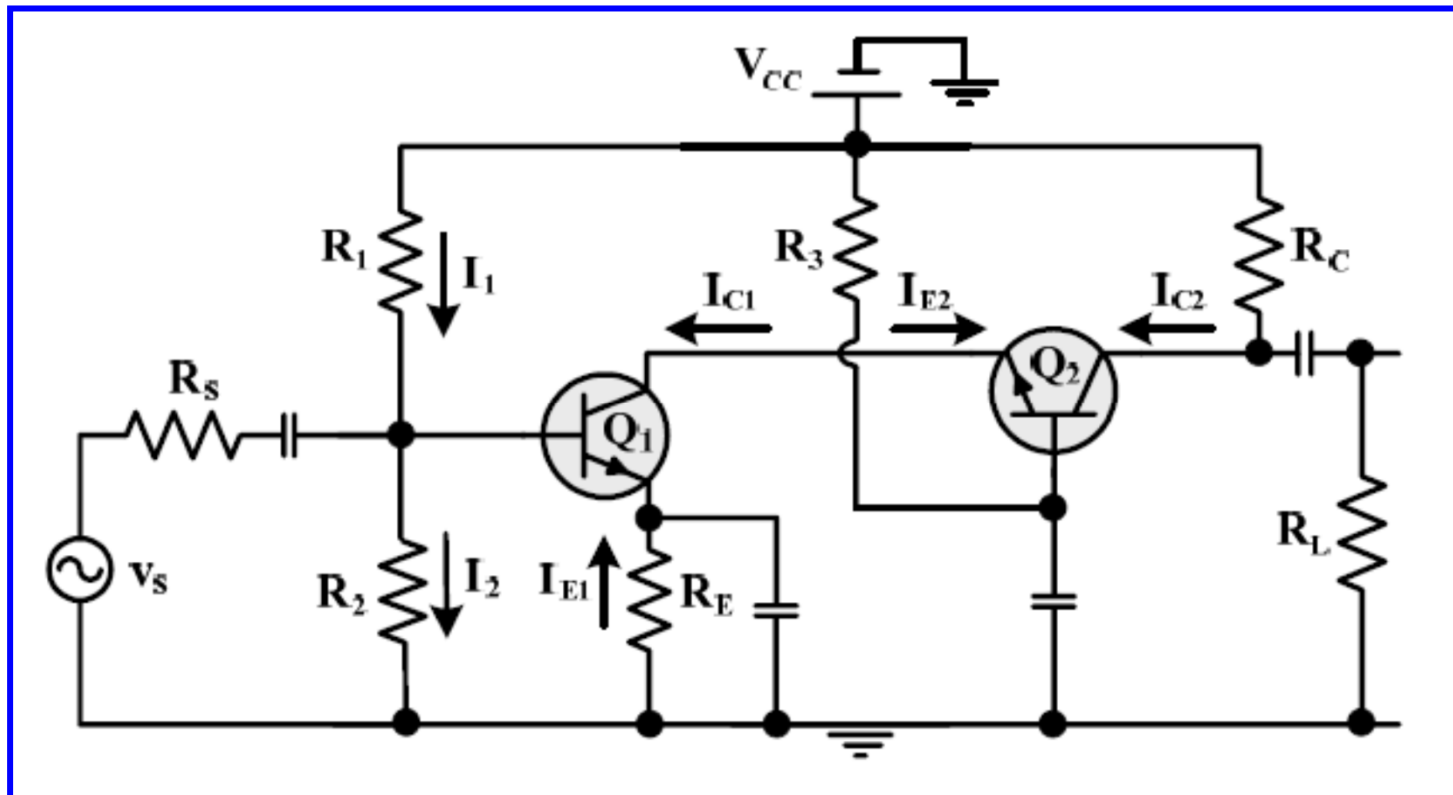
$$\Rightarrow h_{ieD} = h_{ie} (h_{fe} + 2)$$

$$i_2 = h_{fe} i_1 + h_{fe} i_{b2} \Rightarrow i_2 = h_{fe} i_1 + h_{fe} (1 + h_{fe}) i_1$$

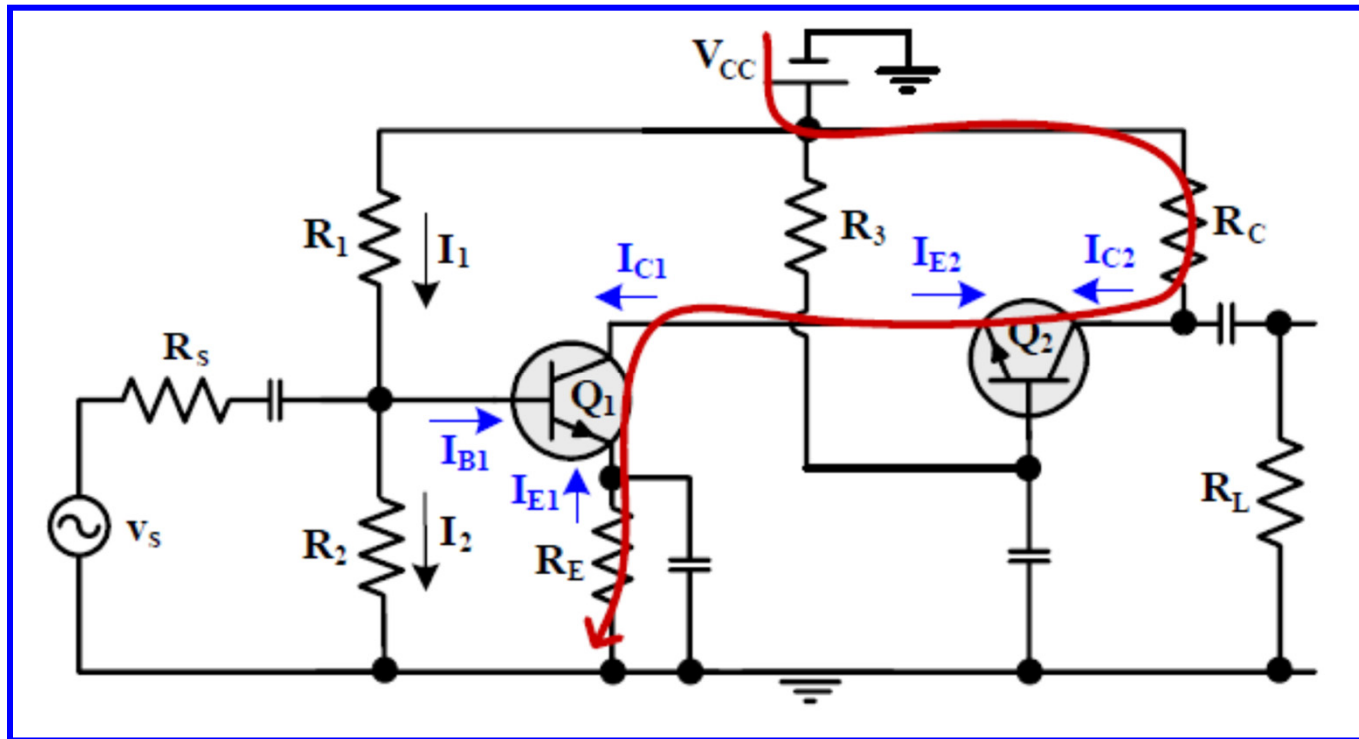
$$h_{feD} = \frac{i_2}{i_1} = h_{fe} + h_{fe} (1 + h_{fe}) \Rightarrow h_{feD} = h_{fe} (h_{fe} + 2)$$

Άσκηση 2^η

Για το τρανζίστορ Q_1 του κασκωδικού ενισχυτή του παρακάτω σχήματος δίνεται ότι $\beta_1 = 200$ και για το τρανζίστορ Q_2 δίνεται ότι $V_{CE2} = 4.25$ V. Επίσης δίνονται: $R_C = 1.5$ k Ω , $R_E = 1$ k Ω , $V_{CC} = 12$ V, $I_1 = 10$ μ A και $I_2 = 5$ μ A. Να προσδιορίσετε το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ Q_1 . Θεωρείστε ότι στα τρανζίστορ του ενισχυτή ισχύει κατά προσέγγιση ότι: $I_{C1} = -I_{E1}$ και $I_{C2} = -I_{E2}$.



Άσκηση 2^η



Από την εφαρμογή του 1ου κανόνα Kirchhoff στον κόμβο πριν από τη βάση του τρανζίστορ Q_1 , προκύπτει εύκολα το ρεύμα βάσης του τρανζίστορ, ως εξής:

$$I_{B1} = I_1 - I_2 \Rightarrow I_{B1} = (10 - 5) \mu\text{A} \Rightarrow I_{B1} = 5 \mu\text{A}$$

$$I_{C1} = \beta \cdot I_{B1} \Rightarrow I_{C1} = 200 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ A} \Rightarrow I_{C1} = 1 \text{ mA}$$

Άσκηση 2^η

Παρατηρούμε ότι $I_{C1} = -I_{E2}$ και επειδή $I_{C2} = -I_{E2}$, συμπεραίνουμε ότι $I_{C2} = I_{C1} = 1 \text{ mA}$. Επομένως, για να ολοκληρώσουμε τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας του τρανζίστορ Q_1 , αρκεί να υπολογίσουμε την τάση συλλέκτη-εκπομπού V_{CE1} . Εφαρμόζουμε τον 2ο κανόνα Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος που υποδεικνύεται στο προηγούμενο σχήμα:

$$-V_{CC} + I_{C2}R_C + V_{CE2} + V_{CE1} - I_{E1}R_E = 0 \Rightarrow$$

$$-V_{CC} + I_{C2}R_C + V_{CE2} + V_{CE1} + I_{C1}R_E = 0 \Rightarrow$$

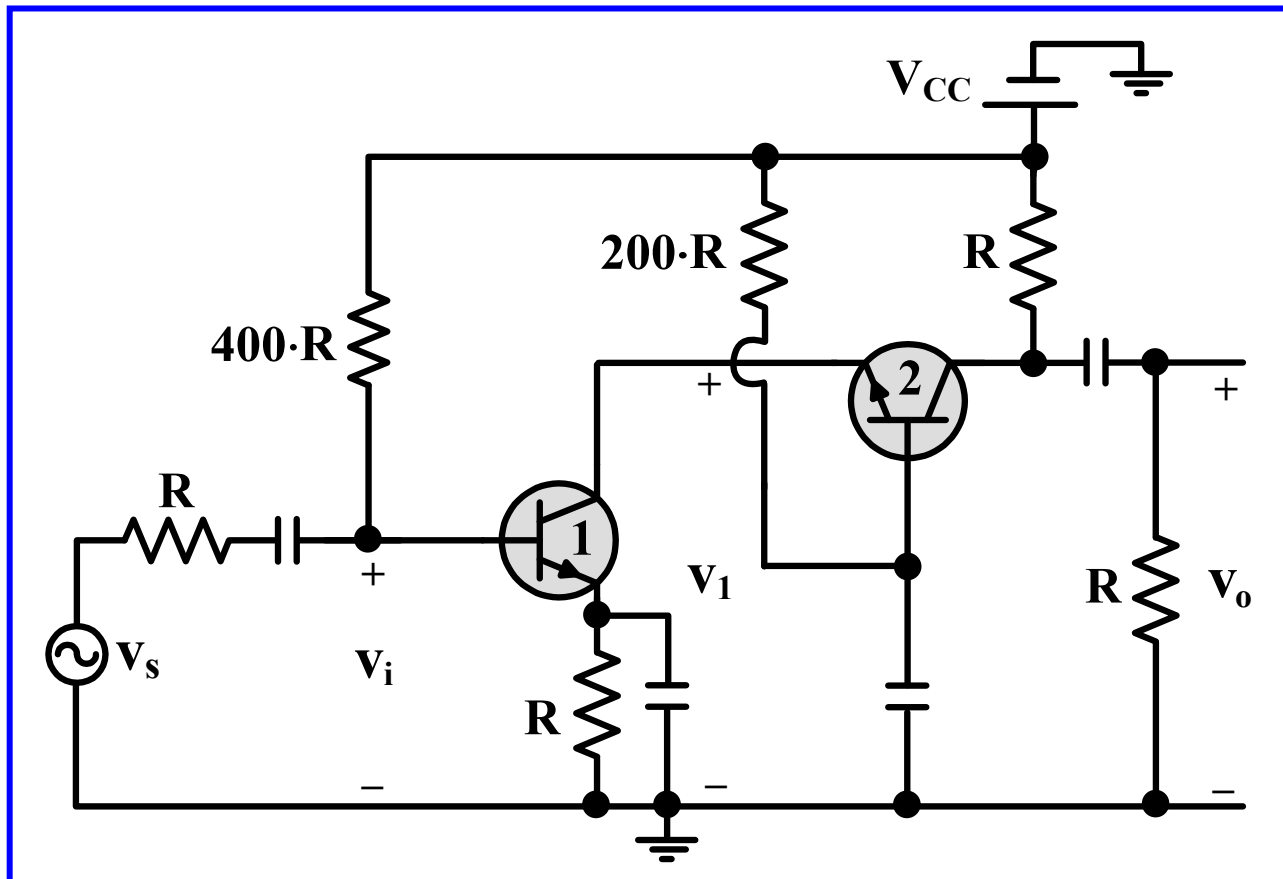
$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C2}R_C - V_{CE2} - I_{C1}R_E \Rightarrow$$

$$V_{CE1} = (12 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1.5 \cdot 10^3 - 4.25 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3) \text{ V} \Rightarrow V_{CE1} = 5.25 \text{ V}$$

$$(V_{CE1}, I_{C1}) = (5.25 \text{ V}, 1 \text{ mA})$$

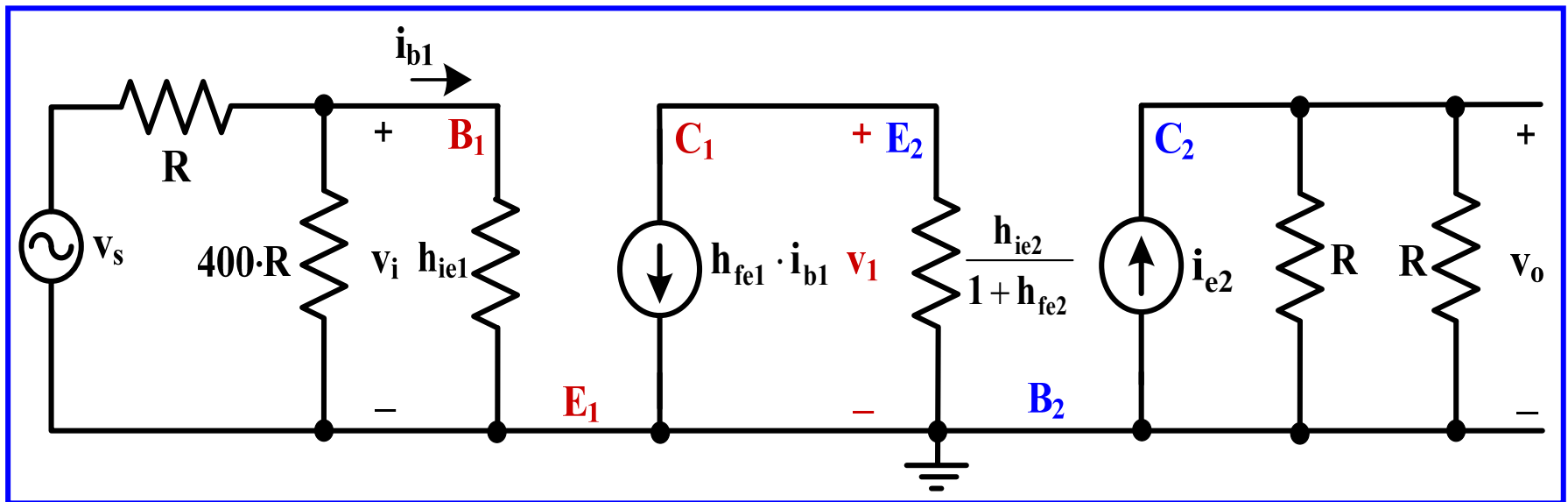
Άσκηση 3^η

Για τον παρακάτω κασκωδικό ενισχυτή, δίνεται ότι $R = 2\text{ k}\Omega$ και για τα τρανζίστορ δίνεται ότι $h_{fe1} = h_{fe2} = 100$, $h_{ie1} = 2\text{ k}\Omega$ και $h_{ie2} = 40\text{ k}\Omega$. Αφού σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, να υπολογίσετε την ενίσχυση τάσης της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή ($A_v = v_1 / v_s$).



Άσκηση 3η

Για να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, χρησιμοποιούμε για το πρώτο και το δεύτερο τρανζίστορ τα ισοδύναμα κυκλώματα τρανζίστορ σύνδεσης κοινού εκπομπού και κοινής βάσης, αντίστοιχα. Στις μεσαίες συχνότητες, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και η πηγή σταθερής τάσης 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 οι αντιστάσεις αυτές βραχυκυκλώνονται.



Άσκηση 3η

Από το νόμο του Ohm στην αντίσταση $h_{ie2} / (1 + h_{fe2})$, η τάση εξόδου v_1 της πρώτης βαθμίδας του ενισχυτή, προσδιορίζεται ως εξής:

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

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

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

Οι αντιστάσεις $400 \cdot R$ και h_{ie1} είναι συνδεδεμένες παράλληλα:

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

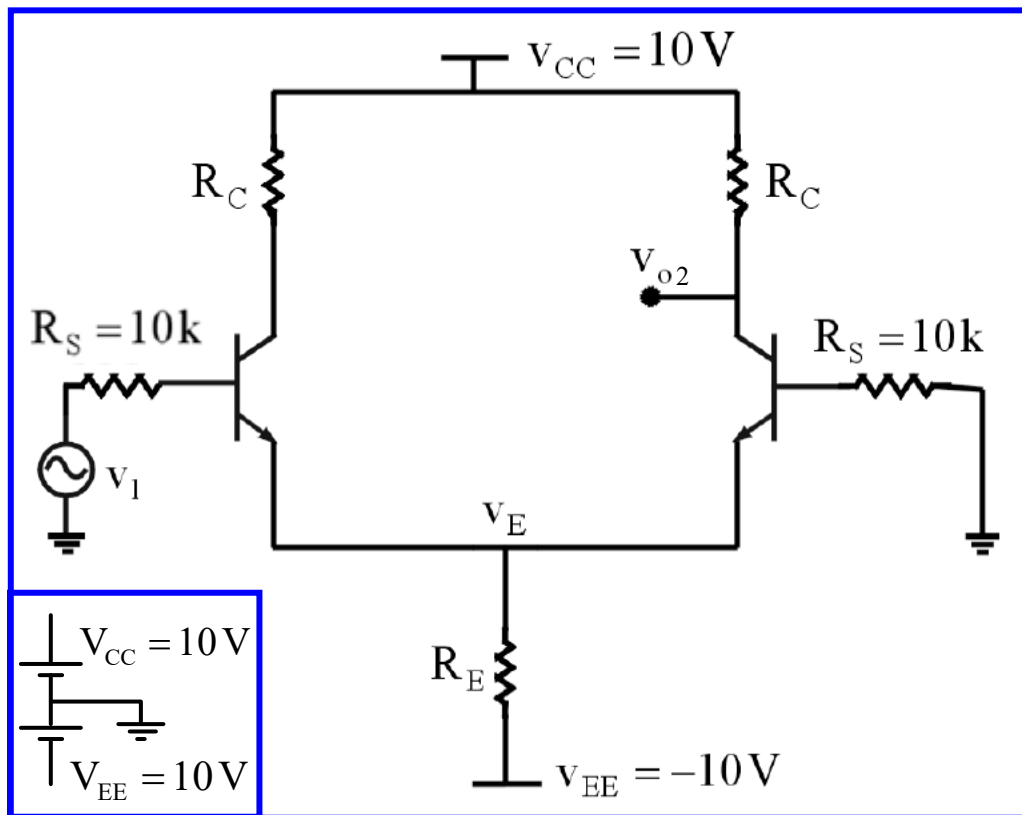
Από τον διαιρέτη τάσης στην είσοδο του ενισχυτή, προκύπτει ότι:

$$v_i = [R_i / (R + R_i)] \cdot v_s = [2 / (2 + 2)] \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.5 \cdot v_s \quad (3)$$

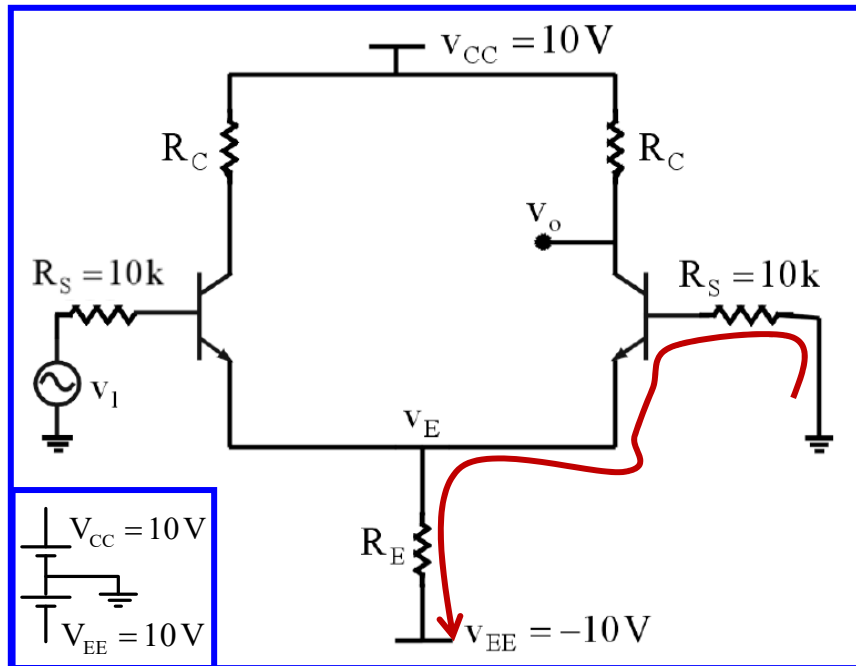
$$(1), (2), (3) \Rightarrow v_1 = -9.9 \cdot v_s \Rightarrow v_1 / v_s = -9.9 \Rightarrow A_v = v_1 / v_s = -9.9$$

Άσκηση 4^η

Στο κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή του σχήματος προσδιορίστε τις τιμές των αντιστατών R_C και R_E ώστε η ενίσχυση της βαθμίδας να είναι $A_v = v_{o2} / v_1 = 50$ και $I_C = 0.1 \text{ mA}$. Για τα δύο τρανζίστορ δίνονται: $\beta = h_{fe} = 250$, $V_{BE} = 0.715 \text{ V}$ και $h_{ie} = 65 \text{ k}\Omega$.



Άσκηση 4^η

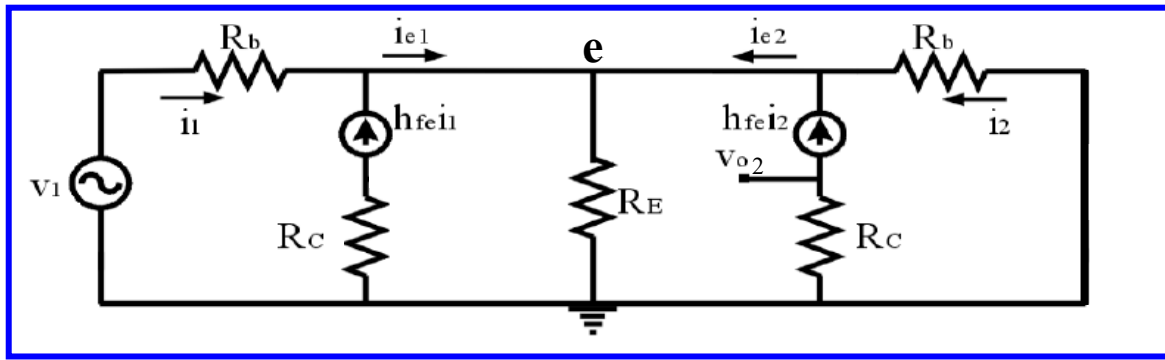


$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0.4 \mu A$$

$$I_B R_s + V_{BE} + 2I_C R_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow$$
$$R_E = \frac{V_{EE} - I_B R_s - V_{BE}}{2I_C} \Rightarrow$$
$$R_E = 46.4 k\Omega$$

Η τιμή της αντίστασης R_E υπολογίστηκε με ανάλυση του κυκλώματος στο συνεχές, ενώ στη συνέχεια ο υπολογισμός της τιμής της αντίστασης R_C καθώς και των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου του διαφορικού ενισχυτή θα διενεργηθεί με ανάλυση του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο.

Άσκηση 4^η



Απλή πηγή σήματος στον ΔΕ

$$R_b = R_s + h_{ie} = 74.6 \text{ k}\Omega$$

$$v_e = -R_b i_2 \quad (1)$$

$$v_e = (i_{e1} + i_{e2})R_E = (i_1 + h_{fe}i_1 + i_2 + h_{fe}i_2)R_E = (1 + h_{fe})(i_1 + i_2)R_E \stackrel{(1)}{\Rightarrow} i_1 = -\frac{R_b + (1 + h_{fe})R_E}{(1 + h_{fe})R_E} i_2 \quad (2)$$

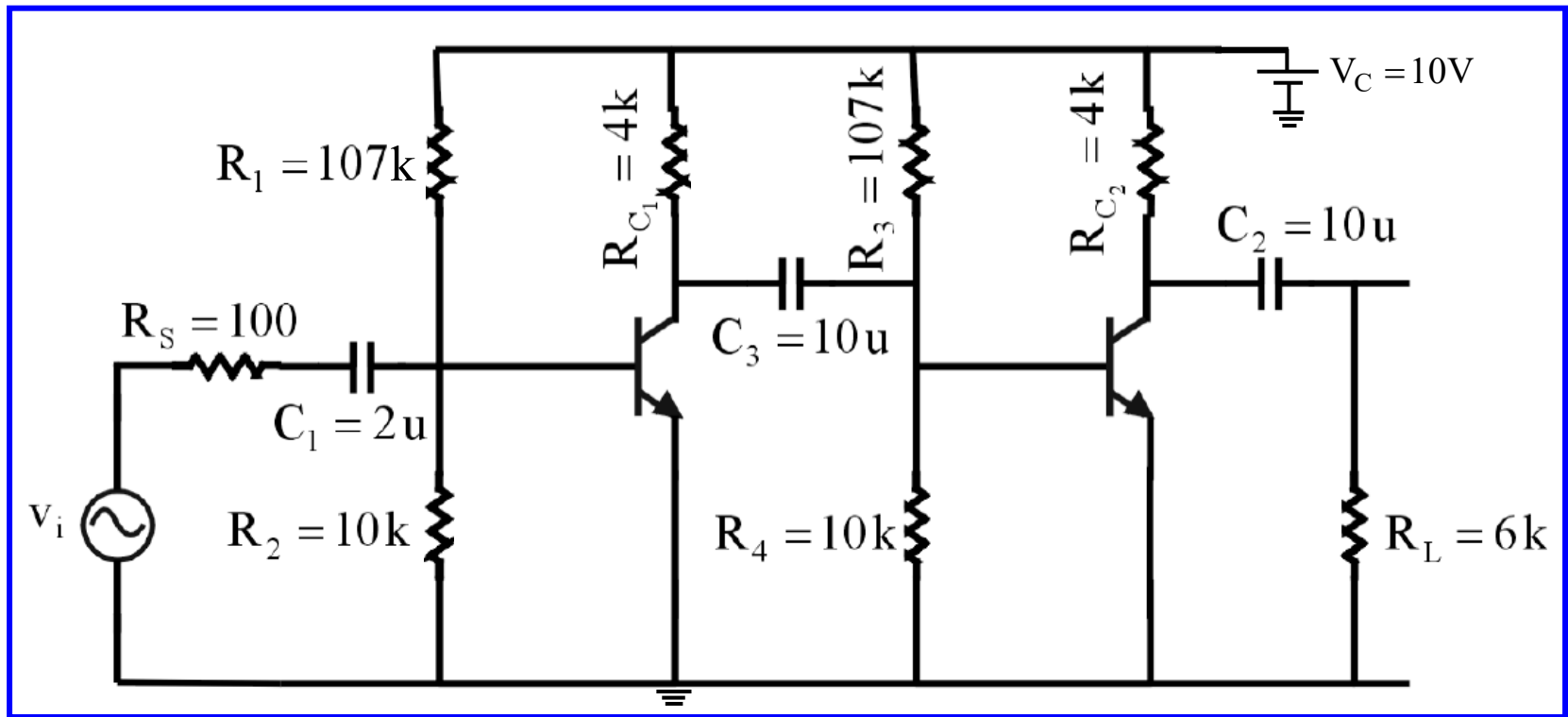
$$\begin{aligned} v_1 = R_b i_1 + v_e \\ v_e = -R_b i_2 \end{aligned} \Rightarrow v_1 = R_b (i_1 - i_2) \stackrel{(2)}{\Rightarrow} v_1 = -R_b \left(\frac{R_b}{(1 + h_{fe})R_E} + 2 \right) i_2$$

$$(1 + h_{fe})R_E \gg R_b \Rightarrow v_1 \approx -2R_b i_2 \Rightarrow i_2 \approx -\frac{v_1}{2R_b} \quad v_{o2} = -h_{fe}R_C i_2 = h_{fe} \frac{R_C}{2R_b} v_1$$

$$\text{Δίνεται ότι } A_v = v_{o2} / v_1 = 50 \Rightarrow A_v = \frac{v_{o2}}{v_1} = \frac{h_{fe}R_C}{2R_b} \Rightarrow R_C = 29.9 \text{ k}\Omega$$

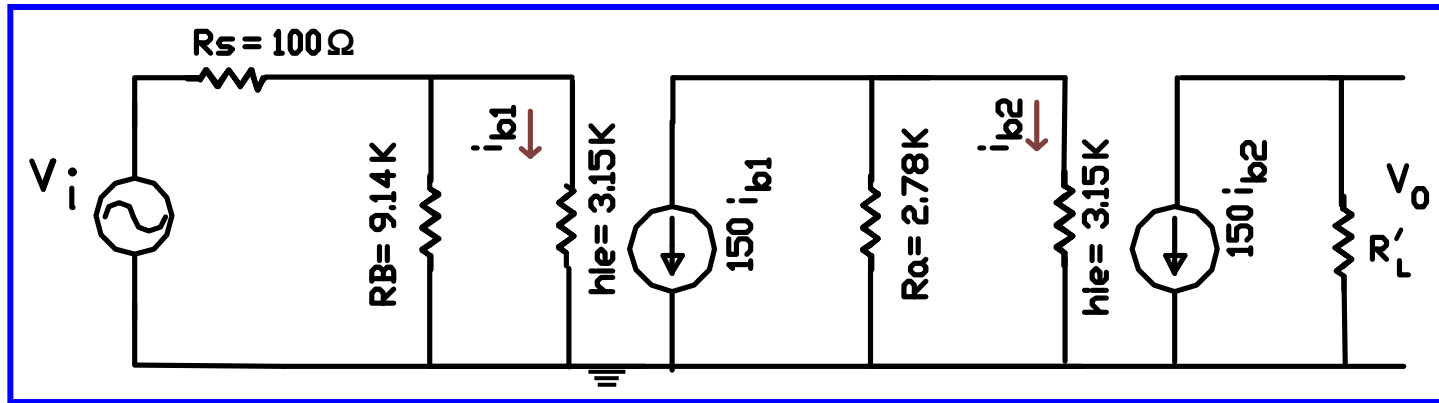
Άσκηση 5^η

Για τον ενισχυτή του σχήματος δύο όμοιων βαθμίδων με χωρητική σύζευξη, να προσδιορίσετε την απόκριση συχνότητας μέτρου σε όλη την περιοχή συχνοτήτων.
Για τα τρανζίστορ δίνονται: $h_{ie} = 3.15 \text{ k}\Omega$, $h_{fe} = 150$, $C_{\pi} = 17 \text{ pF}$, $C_{\mu} = 6 \text{ pF}$.



Άσκηση 5^η

Αρχικά προσδιορίζουμε την ενίσχυση στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων** με χρήση του παρακάτω ισοδύναμου κυκλώματος.



$$R_B = R_1 // R_2 = R_3 // R_4 = 9.14 \text{ k}\Omega$$

$$R_\alpha = R_{C1} // R_B = 2.78 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = R_B // h_{ie} = 2.34 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_{C2} // R_L = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = -150 i_{b2} R'_L$$

$$v_o = 150 R'_L \frac{R_\alpha}{R_\alpha + h_{ie}} 150 i_{b1}$$

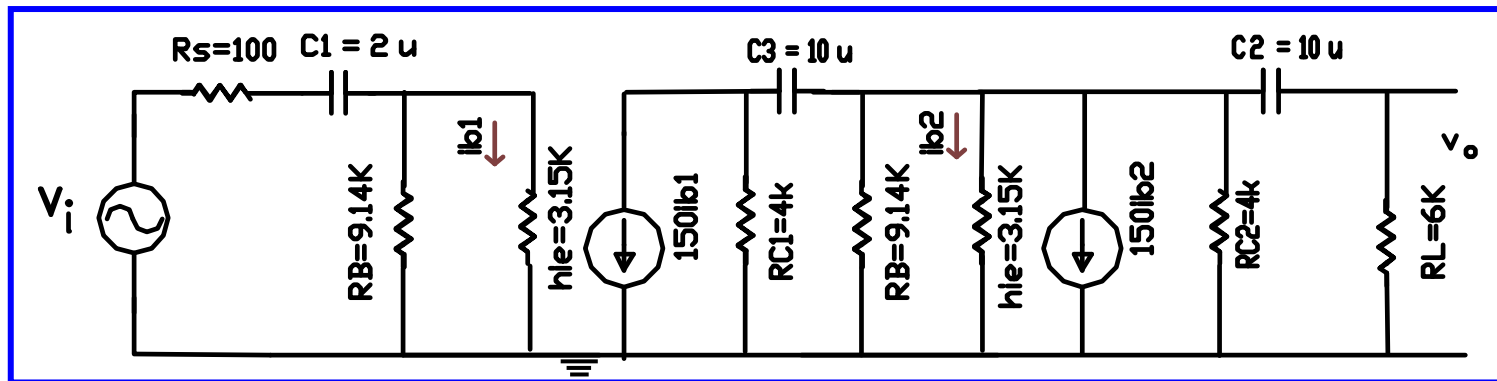
$$v_o = 150 R'_L \frac{R_\alpha}{R_\alpha + h_{ie}} 150 \frac{v_{be}}{h_{ie}}$$

$$v_o = 150 R'_L \frac{R_\alpha}{R_\alpha + h_{ie}} 150 \frac{1}{h_{ie}} \frac{R_i}{R_i + R_s} v_i$$

$$A_{vm} = \frac{v_o}{v_i} = 7706 \Rightarrow A_{vm} = 77.7 \text{ dB}$$

Άσκηση 5^η

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε την κατώτερη συχνότητα αποκοπής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στην **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων**.



Στο κύκλωμα εμφανίζονται τρεις βρόχοι με σταθερές χρόνου:

$$\tau_1 = (R_s + R_i) C_1 = 4.88 \text{ msec}$$

$$\tau_2 = (R_{C1} + R_i) C_3 = 0.063 \text{ sec}$$

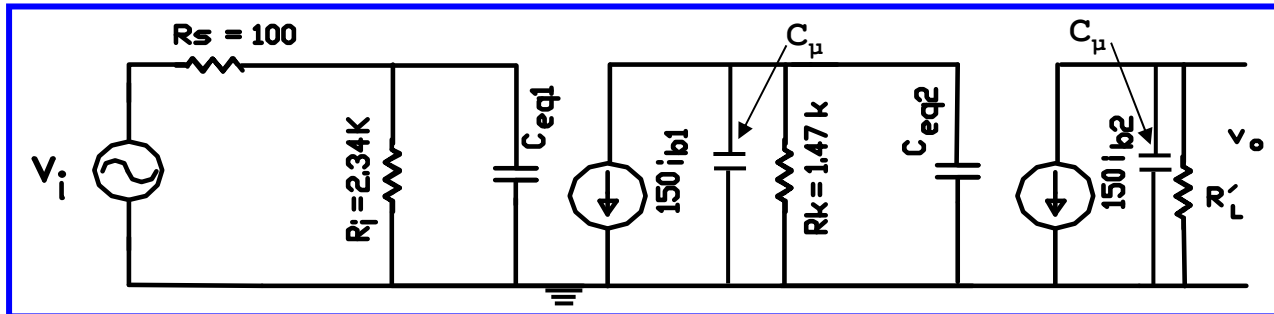
$$\tau_3 = (R_{C2} + R_L) C_2 = 0.1 \text{ sec}$$

Η μικρότερη σταθερά χρόνου καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή

$$\omega_L = \frac{1}{\tau_1} \Rightarrow f_L = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 33 \text{ Hz}$$

Άσκηση 5^η

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της ανώτερης συχνότητας αποκοπής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στην **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων**.



$$R_k = R_{\alpha} // h_{ie} = 1.47 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_{C2} // R_L = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$C_{eq1} = C_{\pi} + C_{\mu} (1 + g_m R_k) = C_{\pi} + C_{\mu} \left(1 + \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_k \right) = 443 \text{ pF}$$

$$C_{eq2} = C_{\pi} + C_{\mu} (1 + g_m R'_L) = C_{\pi} + C_{\mu} \left(1 + \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R'_L \right) = 709 \text{ pF}$$

Οι σταθερές χρόνου των κυκλωμάτων εισόδου των βαθμίδων είναι προφανώς μεγαλύτερες από εκείνες των κυκλωμάτων εξόδου και η μεγαλύτερη από τις σταθερές χρόνου εισόδου καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής

Στο κύκλωμα εμφανίζονται 2 βρόχοι με σταθερές χρόνου:

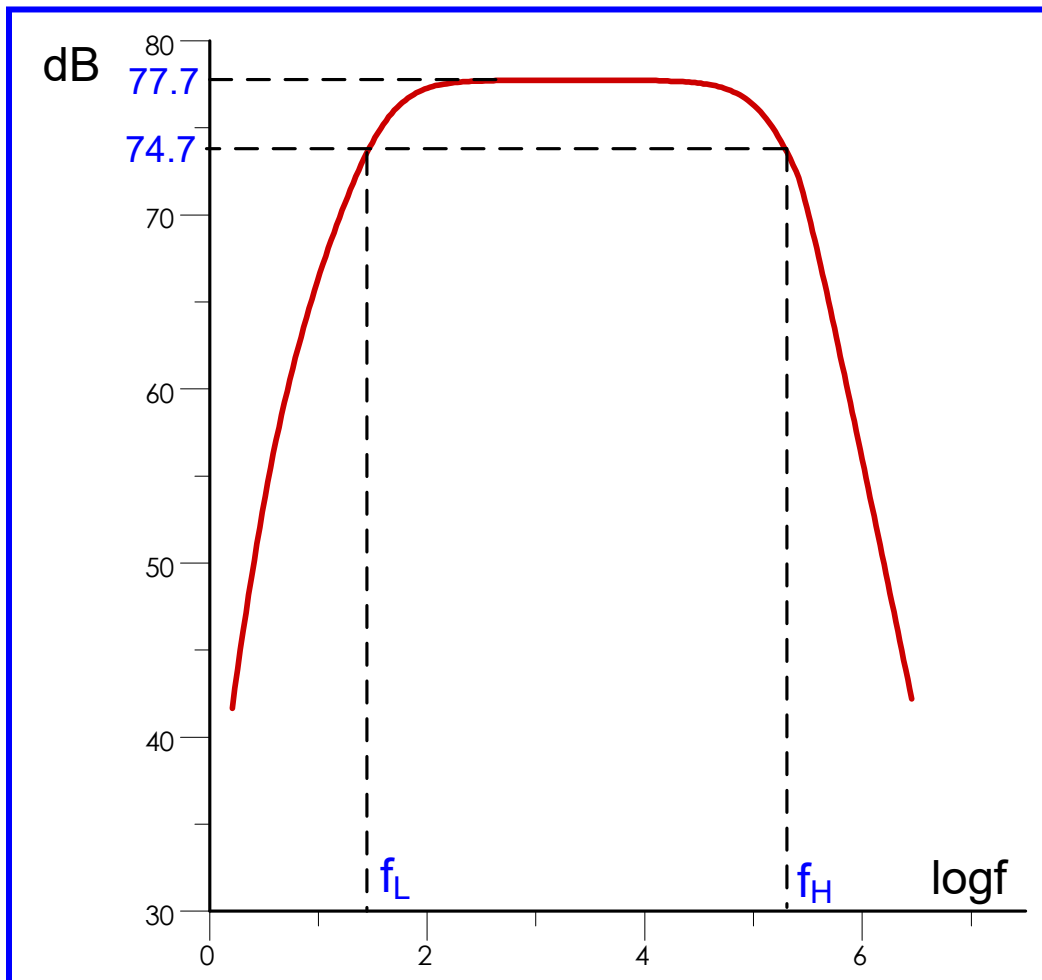
$$\tau_1 = (R_s // R_i) C_{eq1} = 4.25 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

$$\tau_2 = R_k C_{eq2} = 10.42 \times 10^{-7} \text{ sec}$$

$$\omega_H = \frac{1}{\tau_2} \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 152.8 \text{ kHz}$$

Άσκηση 5^η

Η απόκριση συχνότητας μέτρου σε όλη την περιοχή συχνοτήτων για το σύνθετο ενισχυτή έχει ως εξής:

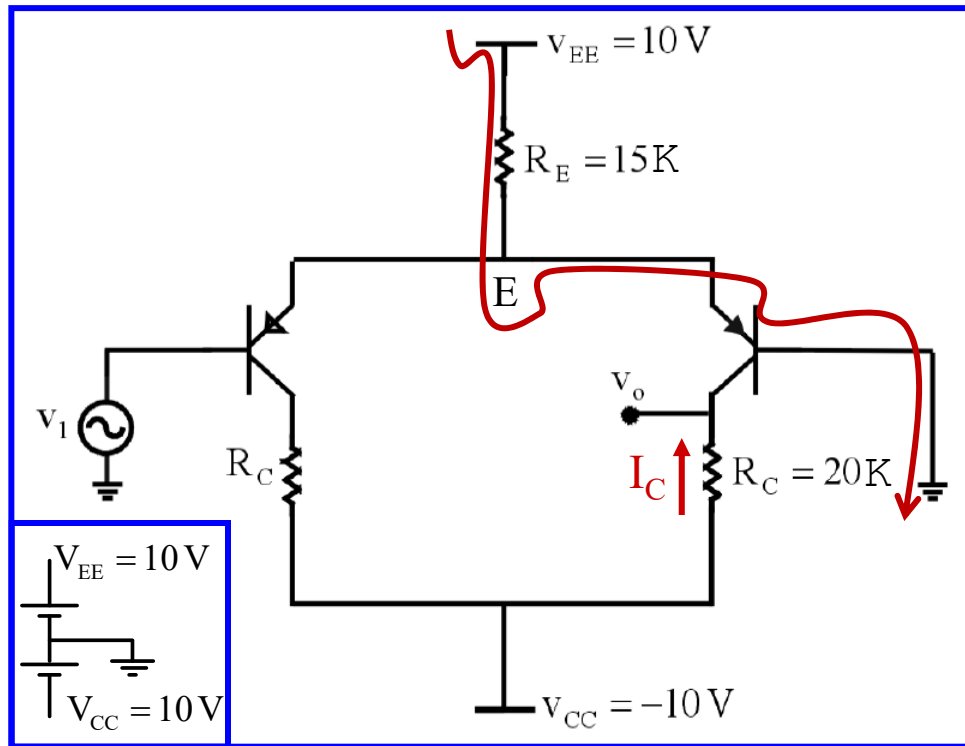


$$f_L = 33 \text{ Hz}$$
$$(\log 33 = 1.5)$$

$$f_H = 152.8 \text{ kHz}$$
$$(\log 152.8\text{K} = 5.2)$$

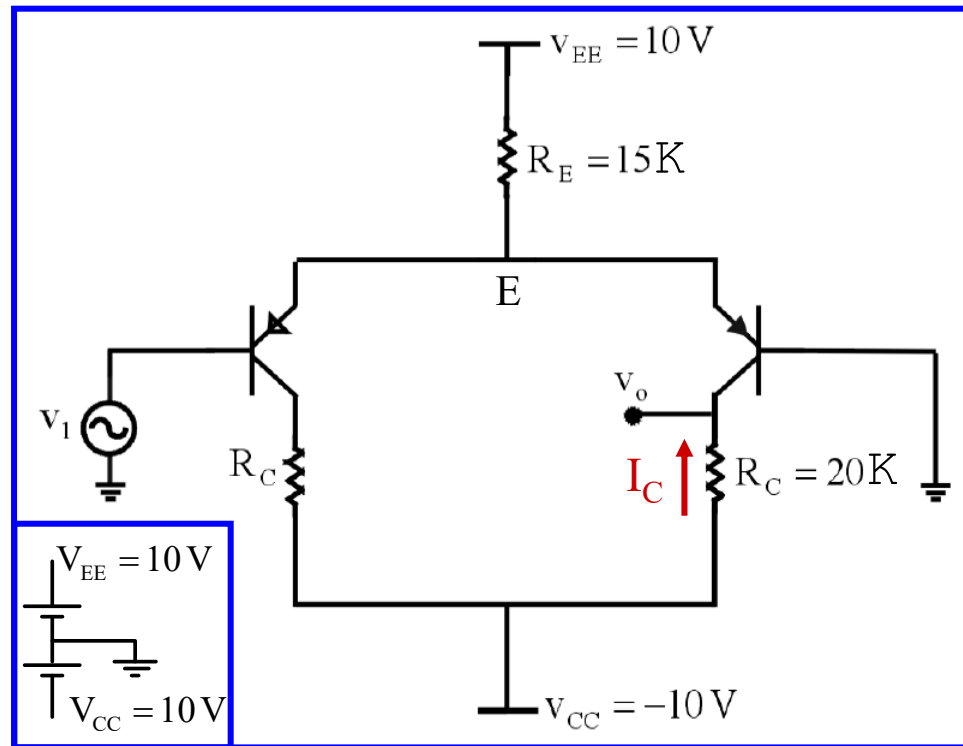
Άσκηση 6^η

Για τον διαφορικό ενισχυτή του σχήματος προσδιορίστε το ρεύμα πόλωσης I_C των τρανζίστορ. Για τα διπολικά τρανζίστορ τύπου **ρηρ** δίνεται ότι $V_{BE} = -0.7\text{ V}$.



$$\begin{aligned} -V_{EE} + I_{R_E} R_E + V_{EB} &= 0 \Rightarrow \\ -V_{EE} + 2I_E R_E - V_{BE} &= 0 \Rightarrow \\ -V_{EE} - 2I_C R_E - V_{BE} &= 0 \Rightarrow \\ I_C &= \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{2R_E} = -0.31\text{ mA} \end{aligned}$$

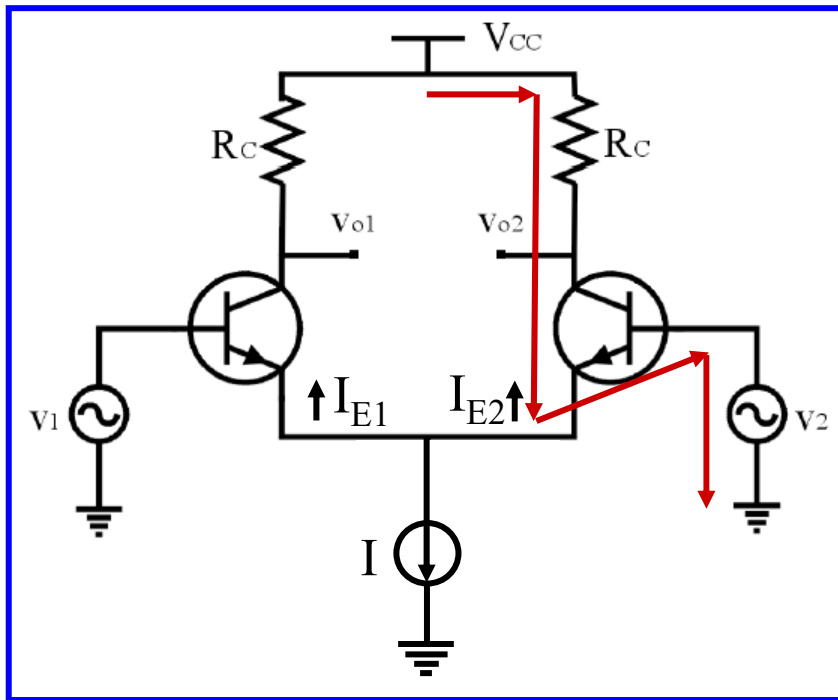
Άσκηση 6^η



- Το κύκλωμα στο συνεχές είναι συμμετρικό, αφού η πηγή σήματος τάσης αντιμετωπίζεται ως βραχυκύκλωμα, τα τρανζίστορ είναι όμοια, όπως επίσης και οι αντιστάσεις συλλέκτη. Επομένως τα τρανζίστορ πολώνονται με το ίδιο ρεύμα I_C .
- Το ρεύμα I_C προέκυψε αρνητικό, αφού πρόκειται για ρεύμα το οποίο πολώνει στην ενεργό περιοχή τρανζίστορ τύπου pnp.

Άσκηση 7η

Για τον διαφορικό ενισχυτή του σχήματος προσδιορίστε τα σημεία λειτουργίας και την ενίσχυση A_d για διαφορικά σήματα εισόδου. Δίνονται: $\beta = h_{fe} = 100$, $h_{ie} = 5.25 \text{ k}\Omega$, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega$, $R_S = 0$, $I = 1 \text{ mA}$, $V_{CC} = 10 \text{ V}$.



Αφού τα τρανζίστορ είναι όμοια και το κύκλωμα συμμετρικό, το σταθερό ρεύμα της πηγής ρεύματος μοιράζεται στους εκπομπούς των τρανζίστορ, οπότε:

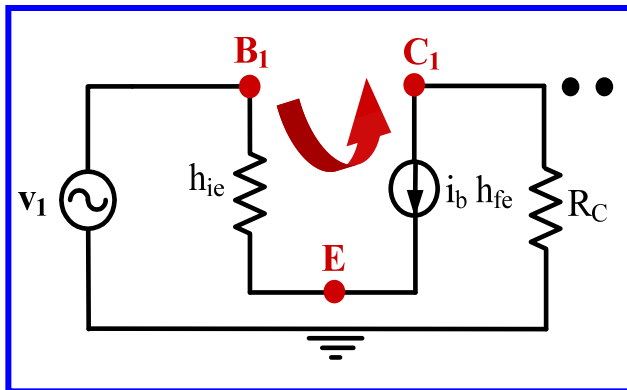
$$I_{E1} = I_{E2} = - (I / 2)$$

$$I_C = -(I_E + I_B) \quad \begin{matrix} I_B = I_C / \beta \\ I_E = -I / 2 \end{matrix} \Rightarrow I_C = - \left(-\frac{I}{2} + \frac{I_C}{\beta} \right) \Rightarrow$$

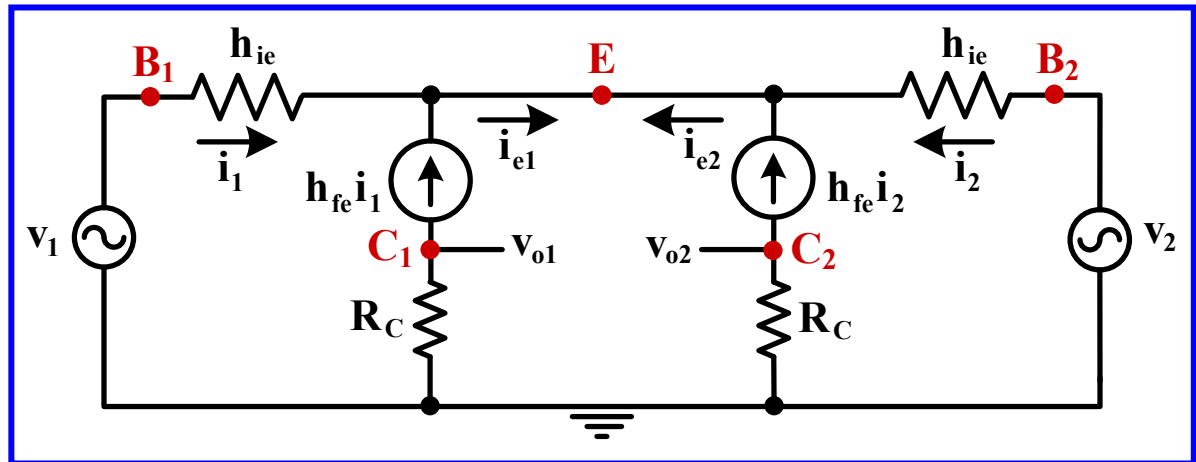
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{I}{2} \Rightarrow I_C = 0.495 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + V_{EB} &= 0 \Rightarrow \\ V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C + V_{BE} \Rightarrow V_{CE} = 5.75 \text{ V} \end{aligned}$$

Άσκηση 7η



Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η πηγή σταθερού ρεύματος αντικαθίσταται από ανοιχτό κύκλωμα.



$$v_1 = h_{ie} i_1 + v_e$$

$$v_2 = h_{ie} i_2 + v_e$$

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

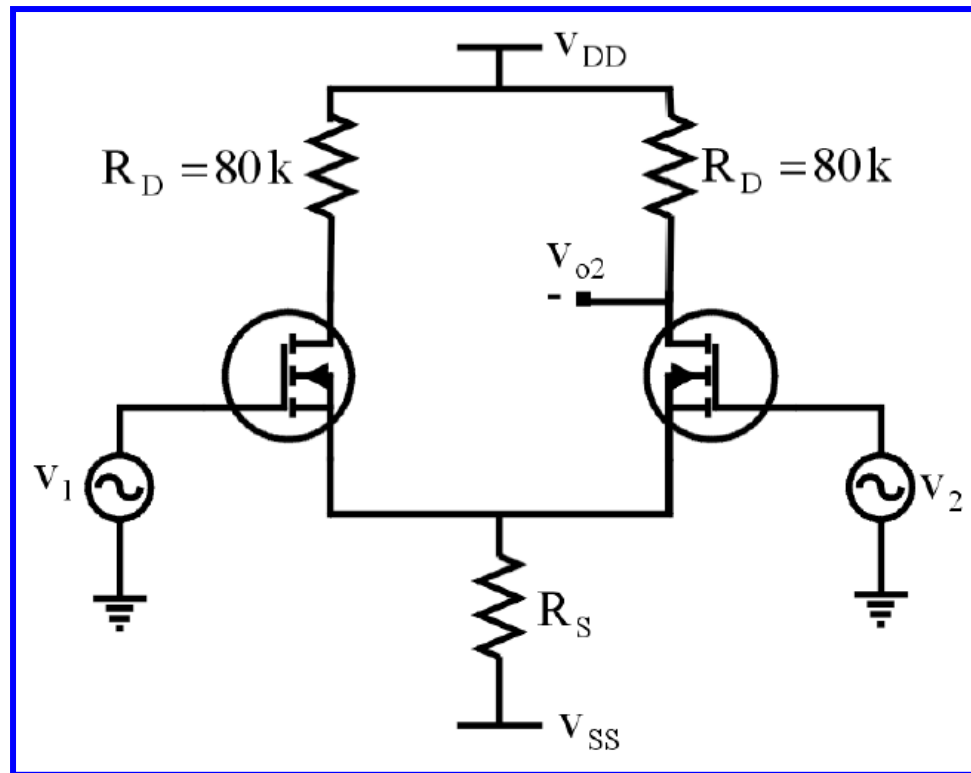
$$i_{e1} = -i_{e2} \Rightarrow (1 + h_{fe}) i_1 = -(1 + h_{fe}) i_2 \Rightarrow i_1 = -i_2$$

$$i_2 = -v_1 / h_{ie}$$

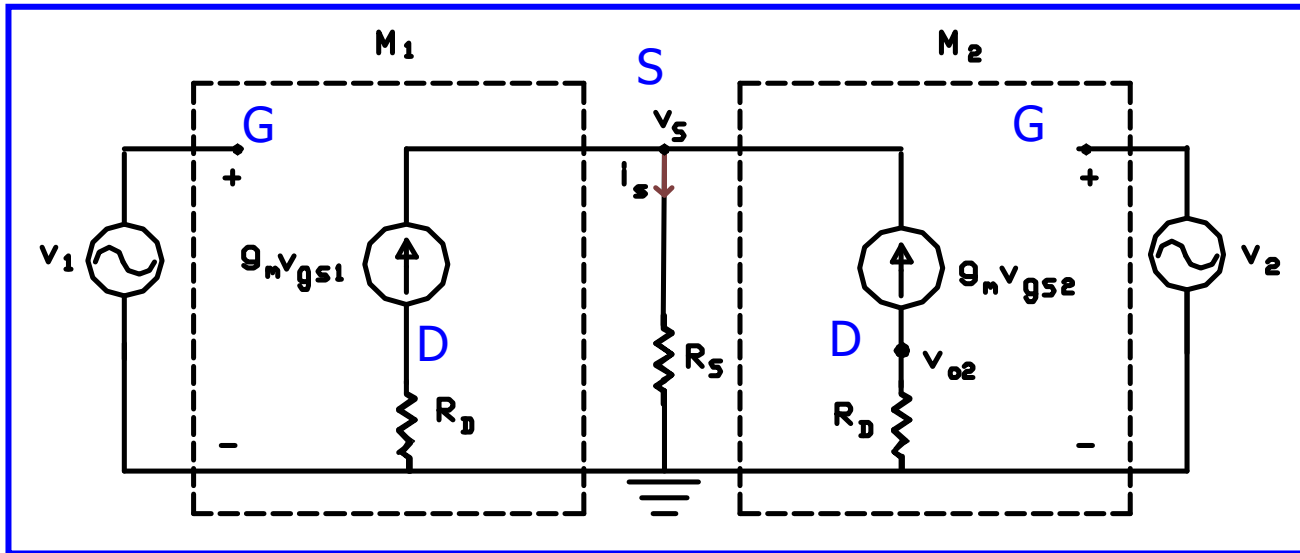
$$v_{o2} = -h_{fe} R_C i_2 = h_{fe} R_C \frac{v_1}{h_{ie}} \Rightarrow A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{v_{o2}}{2v_1} = \frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}} \Rightarrow A_d = 190.5$$

Άσκηση 8^η

Στο διαφορικό ενισχυτή με MOSFET του παρακάτω σχήματος εφαρμόζονται διαφορικά σήματα εισόδου. Να προσδιορίσετε τη διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή για απλή έξοδο. Για τα MOSFET δίνεται ότι $g_m = 0.5 \text{ mS}$.



Άσκηση 8^η



$$v_S = g_m v_{gs1} R_S + g_m v_{gs2} R_S \Rightarrow$$

$$v_S = g_m R_S (v_1 - v_S) + g_m R_S (v_2 - v_S) \Rightarrow$$

$$v_S = \frac{g_m R_S}{1 + 2g_m R_S} (v_1 + v_2)$$

$$v_{o2} = -g_m v_{gs2} R_D \Rightarrow$$

$$v_{o2} = -g_m R_D (v_2 - v_S) \Rightarrow$$

$$v_{o2} = -g_m R_D v_2$$

$$v_1 = -v_2 \rightarrow v_S = 0$$

$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{-g_m R_D v_2}{-2v_2} = \frac{g_m R_D}{2} = 20$$



Τέλος 4^{ης} ενότητας