

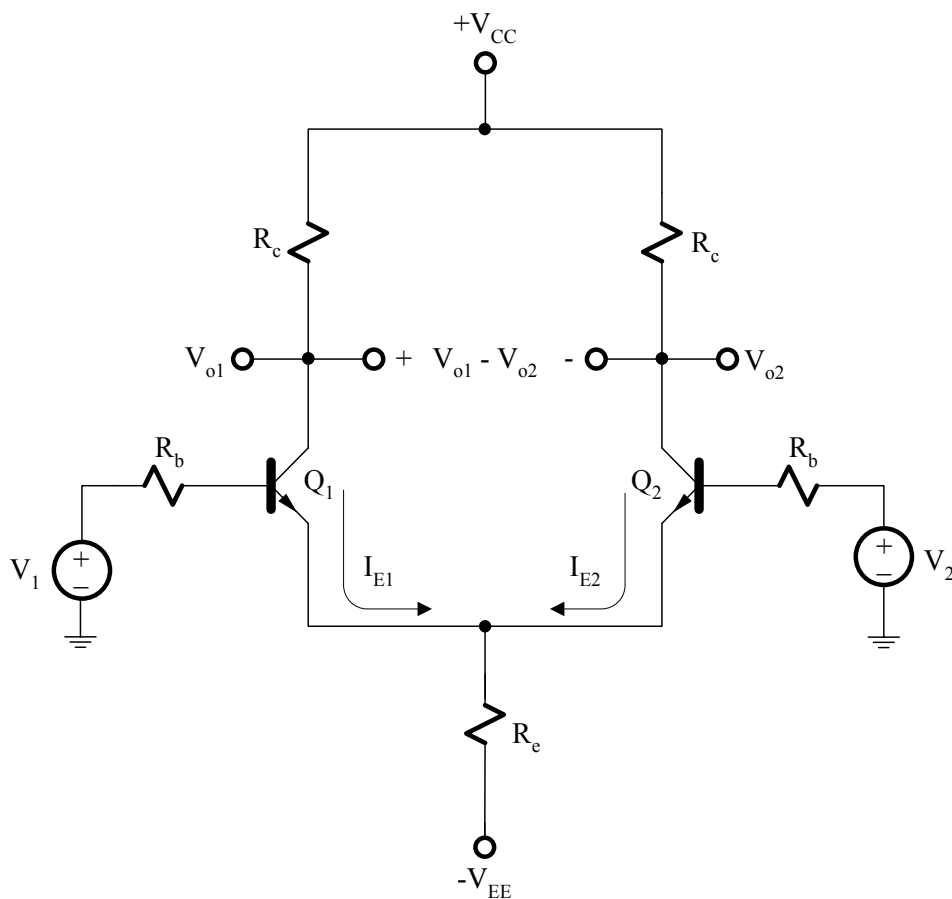
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Ο διαφορικός ενισχυτής

Ο διαφορικός ενισχυτής χρησιμοποιείται στη βαθμίδα εισόδου πολλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ιδιαίτερα των τελεστικών ενισχυτών. Το βασικό κύκλωμα ενός διαφορικού ενισχυτή αποτελείται από δύο τρανζίστορ συνδεδεμένα συμμετρικά όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1.



Σχ. 3.1 Ο διαφορικός ενισχυτής.

Τα δύο τρανζίστορ Q_1 και Q_2 πρέπει να έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας (ιδανικός διαφορικός ενισχυτής). Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό, ειδικά όταν πρόκειται για

διακριτά στοιχεία. Το σήμα εξόδου ενός ιδανικού διαφορικού ενισχυτή είναι ανάλογο της διαφοράς των δύο σημάτων εισόδου:

$$V_{out} = V_{o1} - V_{o2} = A_d \cdot V_d$$

όπου το A_d είναι το **διαφορικό κέρδος τάσης** του διαφορικού ενισχυτή και:

$$V_d = V_2 - V_1$$

είναι το **διαφορικό σήμα** εισόδου.

Η μέση τιμή των τάσεων εισόδου ονομάζεται **κοινό σήμα**, συμβολίζεται με v_a (ή v_c) και ορίζεται ως εξής:

$$v_a = \frac{V_2 + V_1}{2}$$

Όταν τα δύο σήματα που εφαρμόζουμε στις εισόδους είναι ίσα και έχουν την ίδια φάση, τότε ο διαφορικός ενισχυτής λειτουργεί υπό τη συνθήκη κοινού σήματος (common-mode operation). Στην περίπτωση αυτή ισχύει για τον ιδανικό διαφορικό ενισχυτή:

$$V_d = V_2 - V_1 = 0 \text{ οπότε } V_{out} = 0$$

Αυτό σημαίνει ότι σε λειτουργία κοινού σήματος, ο ιδανικός διαφορικός ενισχυτής απορρίπτει το κοινό σήμα εισόδου και η έξοδος είναι μηδενική. Σε έναν πραγματικό διαφορικό ενισχυτή όμως, δεν υπάρχει πλήρης συμμετρία των τμημάτων του κυκλώματος, γι' αυτό προκύπτει ένα πολύ μικρό σήμα εξόδου κατά τη λειτουργία κοινού σήματος και η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή είναι:

$$V_{out} = V_{o1} - V_{o2} = A_a \cdot v_a$$

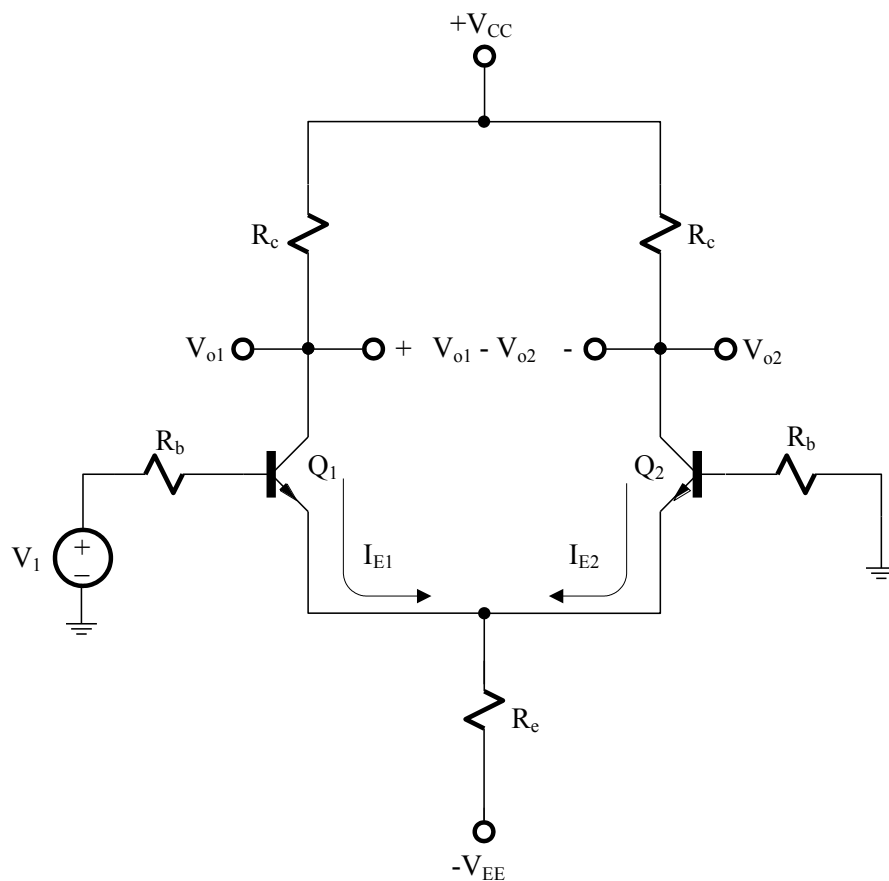
όπου A_a είναι το **κέρδος κοινού σήματος**.

Στη γενική περίπτωση η τάση εξόδου ενός διαφορικού ενισχυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{out} = V_{o1} - V_{o2} = A_d \cdot V_d + A_a \cdot v_a$$

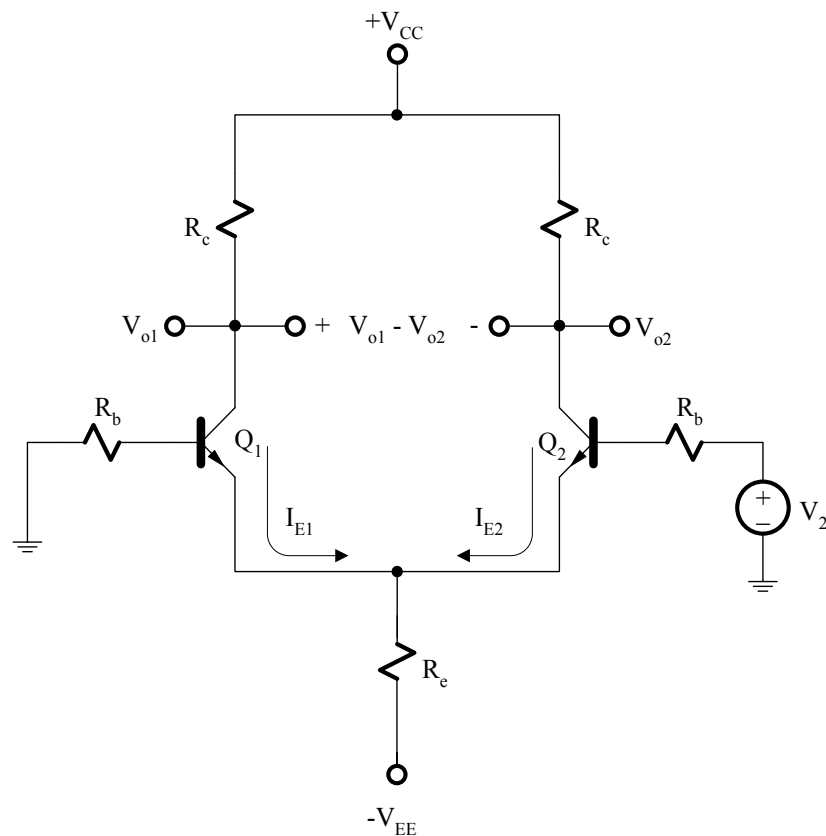
3.1.2 Διαφορικός ενισχυτής με ένα σήμα εισόδου

Ένας διαφορικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με ένα μόνο σήμα εισόδου, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2 (Single-ended operation). Το σήμα εξόδου μπορεί να ληφθεί μεταξύ των δύο συλλεκτών ή μεταξύ του ενός συλλέκτη (π.χ. του Q_2) και της γείωσης. Αν στη μία είσοδο, π.χ. στη βάση του Q_1 εφαρμοστεί ένα ημιτονοειδές σήμα, τότε το ενισχυμένο σήμα που θα εμφανισθεί στην έξοδο του συλλέκτη του Q_1 θα έχει διαφορά φάσης 180° με το σήμα εισόδου, ενώ η τάση στα άκρα της R_e είναι σε φάση με το σήμα εισόδου.



Σχ. 3.2 Ο διαφορικός ενισχυτής με σήμα εισόδου στη βάση του τρανζίστορ Q_1 .

Αν εξετάσουμε το σήμα εξόδου στο συλλέκτη του Q_2 και το συγκρίνουμε με το σήμα εισόδου, η κυματομορφή εξόδου v_{o2} θα είναι σε φάση με το σήμα εισόδου v_1 οπότε η είσοδος 1 του διαφορικού ενισχυτή ονομάζεται **μη αναστρέφουσα (non-inverting input)**. Αν εφαρμόσουμε το σήμα στη βάση του τρανζίστορ Q_2 , όπως φαίνεται στο κύκλωμα του Σχ. 3.3, τότε η κυματομορφή εξόδου v_{o2} έχει διαφορά φάσης 180° σε σχέση με την είσοδο, οπότε η είσοδος 2 του διαφορικού ενισχυτή ονομάζεται **αναστρέφουσα είσοδος (inverting input)**.



Σχ. 3.3 Ο διαφορικός ενισχυτής με σήμα εισόδου στη βάση του τρανζίστορ Q_2 .

3.1.3 Διαφορική Είσοδος

Σε έναν διαφορικό ενισχυτή μπορούμε να εφαρμόσουμε στις βάσεις των Q_1 και Q_2 ημιτονοειδή σήματα που είναι ίσα κατά πλάτος, αλλά έχουν διαφορά φάσης 180° . Ας εξετάσουμε την περίπτωση όπου το πλάτος του σήματος στη βάση του Q_1 αυξάνεται προς τη θετική κατεύθυνση, ενώ το πλάτος του σήματος στη βάση του Q_2 αυξάνεται προς την αρνητική. Ας υποθέσουμε προς στιγμή ότι το Q_2 δεν υπάρχει στο κύκλωμα και ας εστιάσουμε την προσοχή μας μόνο στη λειτουργία του Q_1 . Στη βάση του Q_1 το σήμα αυξάνεται, ενώ στο συλλέκτη εμφανίζεται ένα σήμα ενισχυμένο του οποίου το πλάτος αυξάνεται προς την αρνητική κατεύθυνση. Επίσης, το σήμα που παρουσιάζεται στην R_e έχει την ίδια φάση με το σήμα εισόδου, επειδή από τη βάση μέχρι τον εκπομπό η φάση δεν μεταβάλλεται. Αν τώρα θεωρήσουμε ότι το τρανζίστορ Q_1 δεν υπάρχει στο κύκλωμα και εστιάσουμε την προσοχή μας μόνο στη λειτουργία του Q_2 , θα έχουμε τα εντελώς αντίθετα αποτελέσματα.

Όταν θεωρήσουμε ότι και στις βάσεις δύο τρανζίστορ εφαρμόζονται ίσα αλλά αντίθετα σήματα, τότε, επειδή έχουμε γραμμική λειτουργία, σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης τα σήματα που εμφανίζονται στους εκπομπούς θα είναι ίσα κατά πλάτος, αλλά αντίθετα σε φάση και

το ένα θα αναιρεί το άλλο, έτσι ώστε δεν θα υπάρχει σήμα AC πάνω στην αντίσταση R_e . Στην περίπτωση αυτή, η αντίσταση δεν διαρρέεται από ρεύμα AC και το κύκλωμα συμπεριφέρεται σαν να έχει πυκνωτή παράκαμψης για το εναλλασσόμενο σήμα. Η έξοδος στον κάθε συλλέκτη θα είναι ένα ενισχυμένο σήμα με διαφορά φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου του αντίστοιχου τρανζίστορ. Αν η τάση εξόδου ληφθεί μεταξύ των δύο συλλεκτών, το πλάτος του από κορυφή-σε-κορυφή θα είναι διπλάσιο από αυτό που λαμβάνουμε από το συλλέκτη του κάθε τρανζίστορ και της γείωσης. Έτσι, μπορούμε να έχουμε τρεις εξόδους από έναν διαφορικό ενισχυτή: δύο από τους συλλέκτες ως προς τη γείωση και μία μεταξύ των δύο συλλεκτών.

3.1.4 Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος

Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος, ρ , ορίζεται ως το πηλίκο του διαφορικού κέρδους προς το κέρδος κοινού σήματος:

$$\rho = \frac{A_d}{A_a}$$

Ο λόγος ρ αποτελεί ένα είδος δείκτη για την αποτελεσματικότητα ενός διαφορικού ενισχυτή να ενισχύει μόνο το διαφορικό σήμα και να απορρίπτει το κοινό σήμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρ , τόσο καλύτερος θεωρείται ο διαφορικός ενισχυτής.

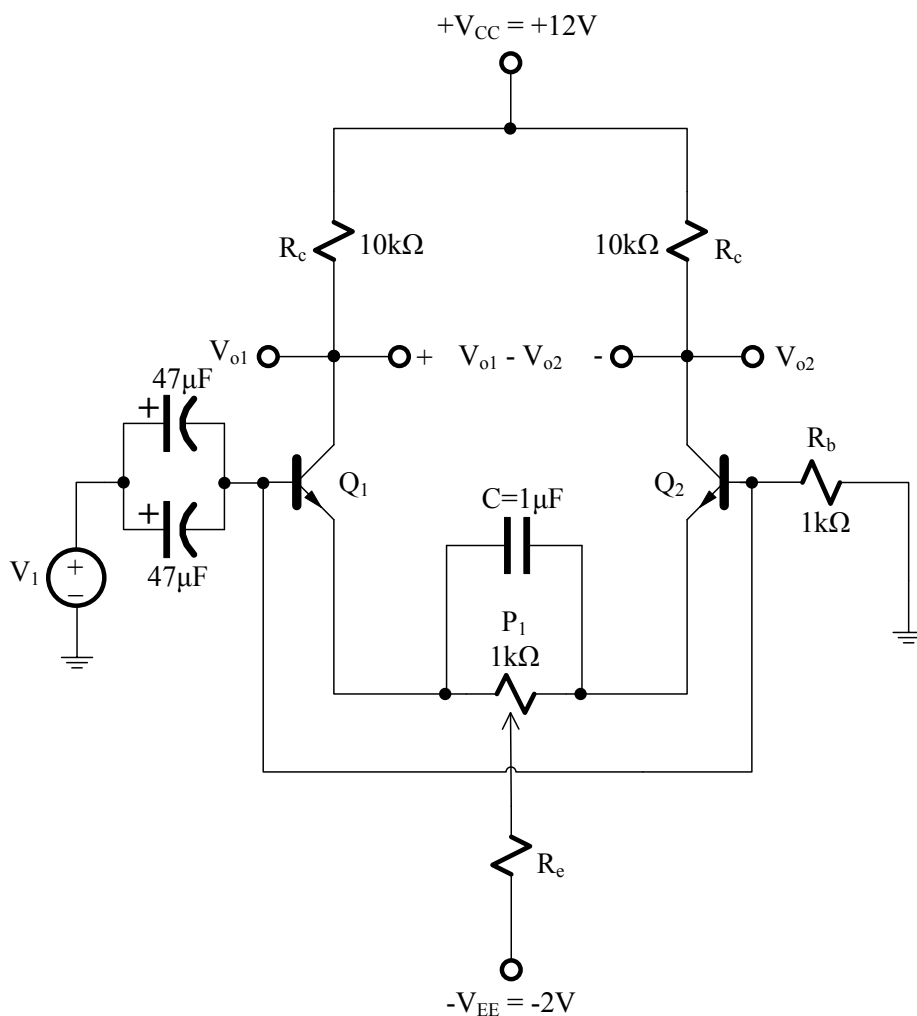
3.2 Πειραματική διαδικασία

3.2.1 Διαφορικός ενισχυτής με αντίσταση στον εκπομπό

Να συνδεθεί το κύκλωμα του Σχ. 3.4(α) χρησιμοποιώντας τα τρανζίστορ $Q_1=Q_2=2N3904$ [Σχ. 3.4(β)] και με $R_e=680\Omega$.

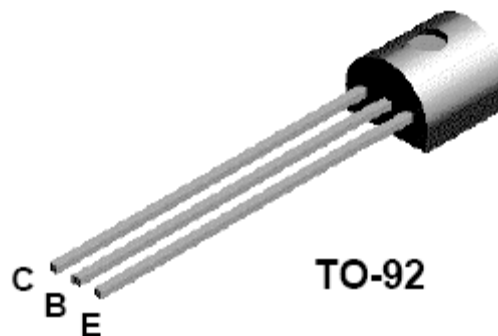
ΠΡΟΣΟΧΗ: Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής πρέπει να συνδέεται πάντα με τον ακροδέκτη + στη θετική τάση και τον ακροδέκτη – στην αρνητική τάση. Αντίστροφη σύνδεση μπορεί να προκαλέσει έκρηξη του πυκνωτή.

Να εφαρμοστούν τάσεις τροφοδοσίας $V_{CC}=+12V$ και $V_{EE}=-2V$ και να ρυθμιστεί το ποτενσιόμετρο P_1 ώστε οι DC τάσεις στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να γίνουν ακριβώς ίσες. Η τάση εισόδου, V_1 , να τεθεί ίση με το μηδέν.



(α)

2N3904



(β)

Σχ. 3.4

- (α) Με το πολύμετρο στη θέση DC [Volt], να μετρηθούν ως προς τη γείωση οι DC τάσεις στους συλλέκτες, στις βάσεις και στους εκπομπούς των δύο τρανζίστορ και να καταγραφούν οι αντίστοιχες τιμές:

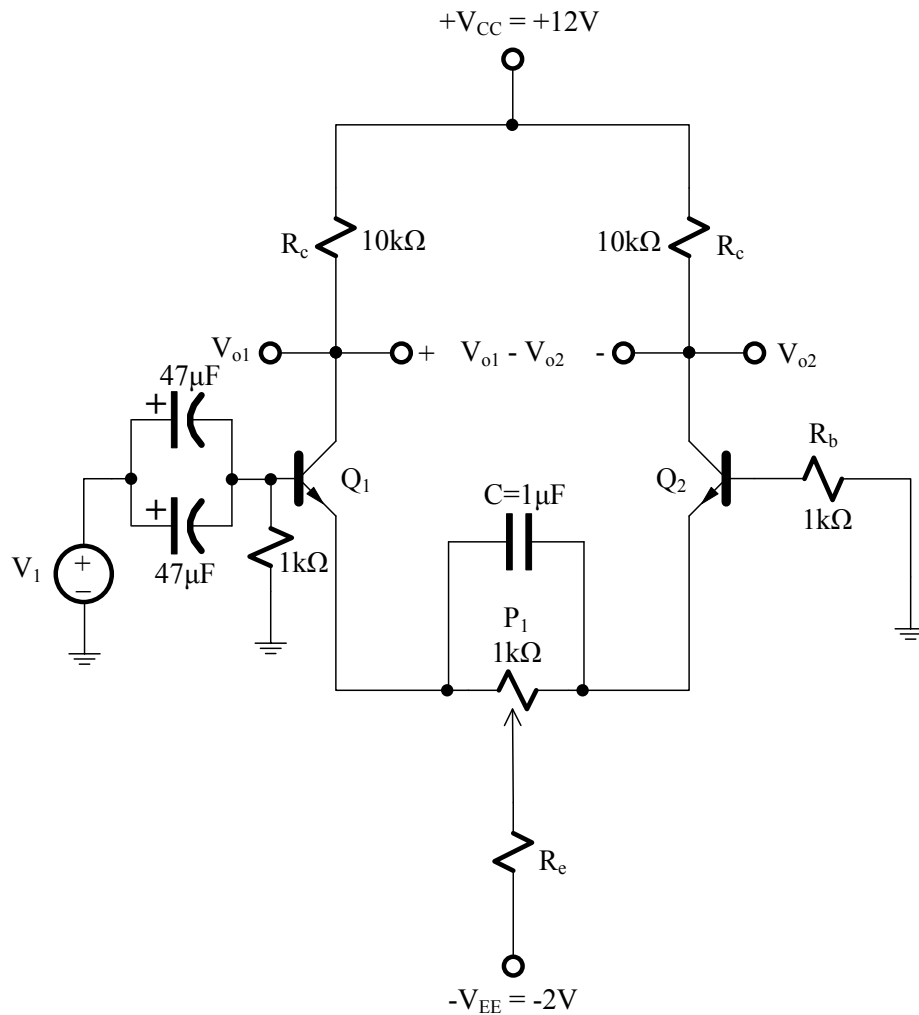
$$\begin{array}{lll} V_{C1} = \dots\dots\dots, & V_{C2} = \dots\dots\dots, & V_{B1} = \dots\dots\dots \\ V_{B2} = \dots\dots\dots, & V_{E1} = \dots\dots\dots, & V_{E2} = \dots\dots\dots \end{array}$$

- (β) Να συνδεθεί ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο V_1 , συχνότητας 1kHz. Με τα κανάλια του παλμογράφου σε σύζευξη AC, να παρατηρηθούν τα σήματα στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ και να αυξηθεί προοδευτικά το πλάτος του σήματος εισόδου μέχρι να προκύψει στο καθένα το μέγιστο πλάτος p-p χωρίς ψαλίδιση ή παραμόρφωση. Να μετρηθούν, ως προς τη γείωση, οι τιμές p-p του σήματος εισόδου, των σημάτων εξόδου στα δύο τρανζίστορ καθώς και της διαφοράς των σημάτων εξόδου και να καταγραφούν σε χρονική αντιστοιχία οι αντίστοιχες κυματομορφές. Η μέτρηση της διαφοράς των σημάτων εξόδου πρέπει να γίνει με τον παλμογράφο σε διαφορική λειτουργία (differential mode).

$$V_1 = \dots\dots\dots, \quad V_{o1} = \dots\dots\dots, \quad V_{o2} = \dots\dots\dots, \quad V_{o1} - V_{o2} = \dots\dots\dots$$

- (γ) Για τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους τάσης να συνδεθεί το κύκλωμα του Σχ. 3.5 με $Q_1=Q_2= 2N3904$ και $R_e=680\Omega$. Να ρυθμιστεί το ποτενσιόμετρο P_1 ώστε οι DC τάσεις στους

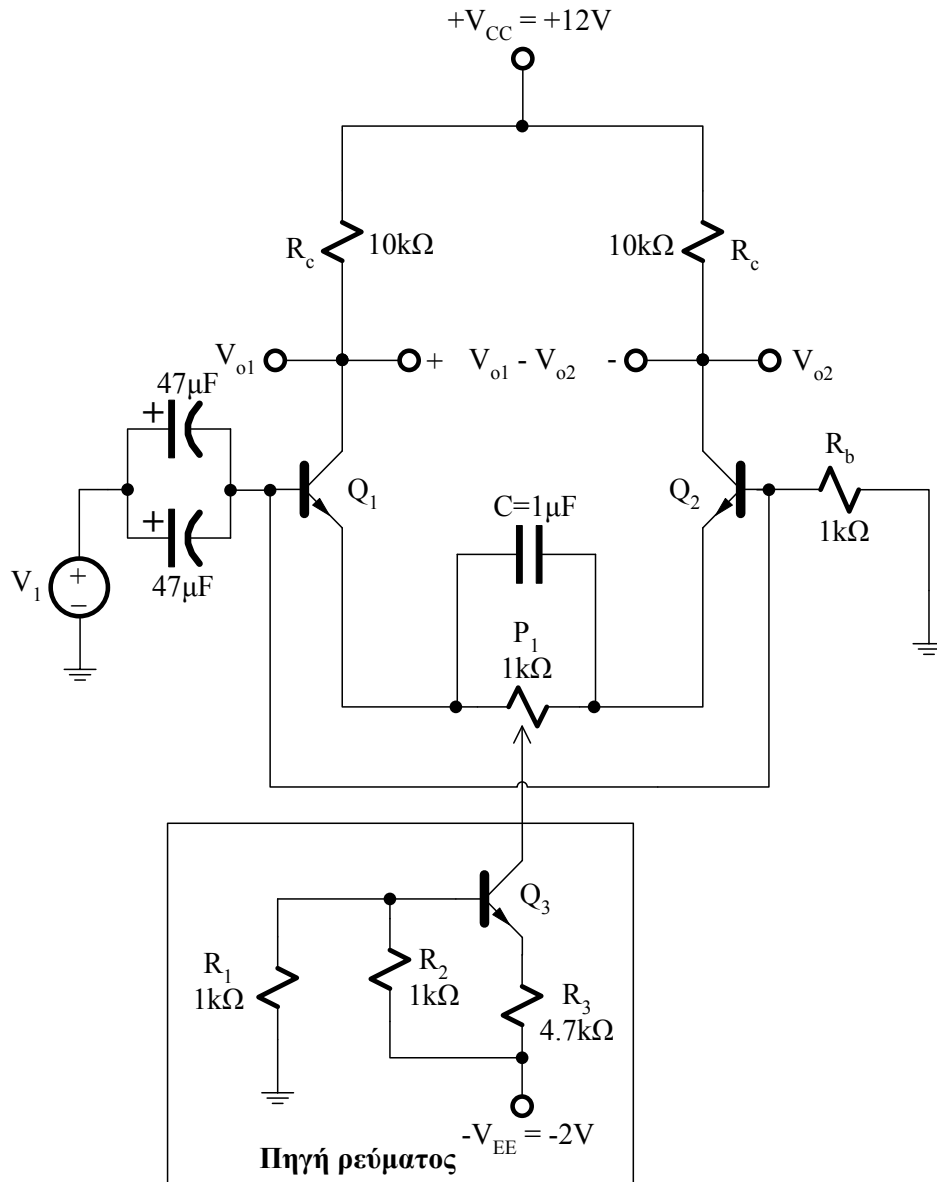
συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να γίνουν ακριβώς ίσες και να επαναληφθούν τα μέρη 3.2.1(α) και (β).



Σχ. 3.5

3.2.2 Διαφορικός ενισχυτής με πηγή ρεύματος στον εκπομπό

Στη θέση της αντίστασης R_e να συνδεθεί η διάταξη της πηγής ρεύματος που φαίνεται στο Σχ. 3.6. Να συνδεθεί το κύκλωμα του Σχ. 3.6 χρησιμοποιώντας τα τρανζίστορ $Q_1=Q_2=Q_3=2N3904$ και $-V_{EE} = -2V$. Να ρυθμιστεί το ποτενσιόμετρο P_1 ώστε οι DC τάσεις στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να είναι ίσες. Η τάση εισόδου, V_1 , να τεθεί ίση με το μηδέν.



Σχ. 3.6

- (α) Με το πολύμετρο στη θέση DC [Volt], να μετρηθούν ως προς τη γείωση οι DC τάσεις στους συλλέκτες, στις βάσεις και στους εκπομπούς των δύο τρανζίστορ και να καταγραφούν οι αντίστοιχες τιμές:

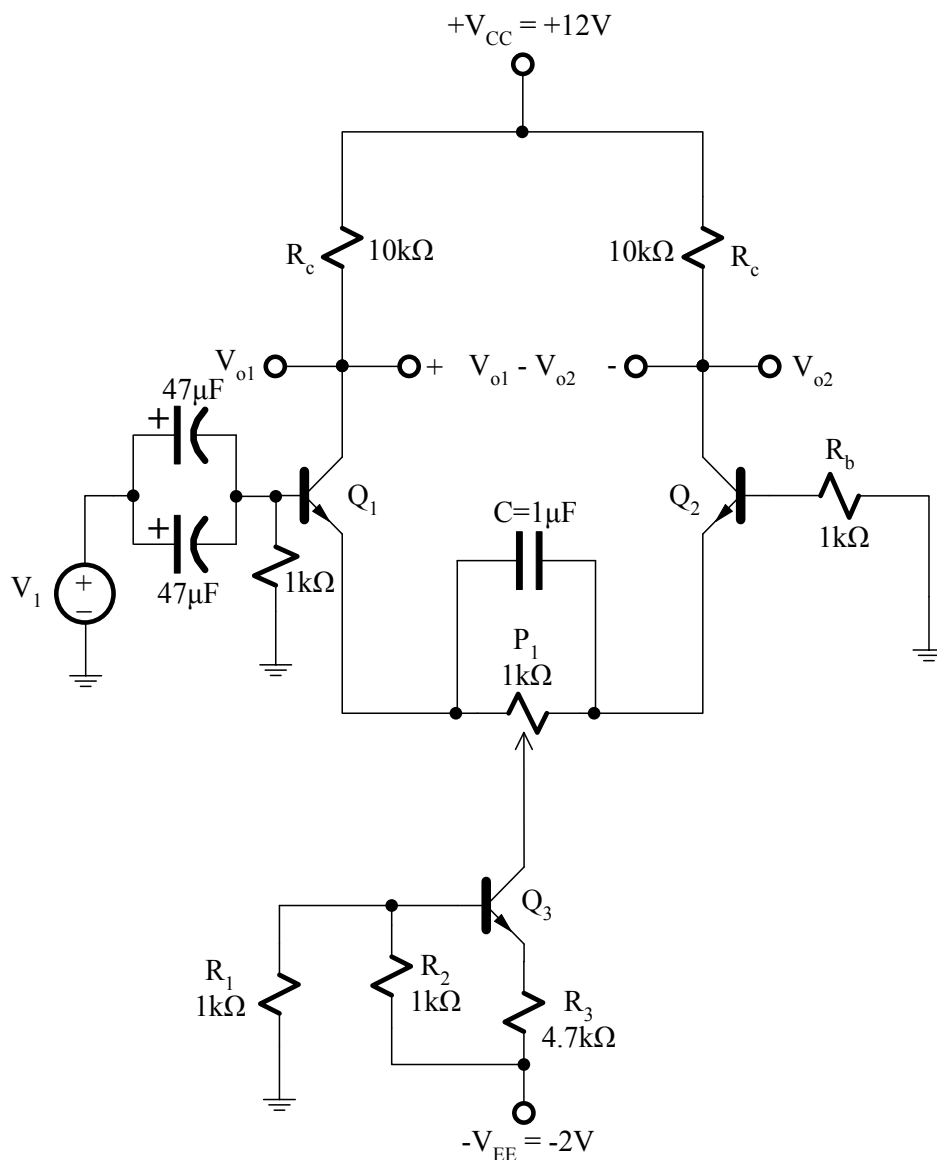
$$\begin{aligned} V_{C1} &= \dots\dots\dots, & V_{C2} &= \dots\dots\dots, & V_{B1} &= \dots\dots\dots \\ V_{B2} &= \dots\dots\dots, & V_{E1} &= \dots\dots\dots, & V_{E2} &= \dots\dots\dots \end{aligned}$$

- (β) Να συνδεθεί ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο V_1 , συχνότητας 1kHz. Με τα κανάλια του παλμογράφου σε σύζευξη AC, να παρατηρηθούν τα σήματα στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ και να αυξηθεί προοδευτικά το πλάτος του σήματος εισόδου μέχρι να προκύψει στο καθένα το μέγιστο πλάτος p-p χωρίς ψαλίδιση ή παραμόρφωση. Να μετρηθούν, ως προς

τη γείωση, οι τιμές p-p του σήματος εισόδου, των σημάτων εξόδου στα δύο τρανζίστορ καθώς και της διαφοράς των σημάτων εξόδου και να καταγραφούν σε χρονική αντιστοιχία οι αντίστοιχες κυματομορφές. Η μέτρηση της διαφοράς των σημάτων εξόδου πρέπει να γίνει με τον παλμογράφο σε διαφορική λειτουργία (differential mode).

$$V_1 = \dots\dots\dots, \quad V_{o1} = \dots\dots\dots, \quad V_{o2} = \dots\dots\dots, \quad V_{o1} - V_{o2} = \dots\dots\dots$$

- (γ) Για τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους τάσης να συνδεθεί το κύκλωμα του Σχ. 3.7 με $Q_1=Q_2=Q_3=2N3904$. Να ρυθμιστεί το ποτενσιόμετρο P_1 ώστε οι DC τάσεις στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να γίνουν ακριβώς ίσες και να επαναληφθούν τα μέρη 3.2.2(α) και (β).



Σχ. 3.7

3.3 Ερωτήσεις για την τελική αναφορά

1. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο μέρος 3.2.1 να υπολογιστεί το κέρδος κοινού σήματος (common-mode gain), A_{cm} , το διαφορικό κέρδος (differential-mode gain), A_{dm} , και ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος, ρ για τον διαφορικό ενισχυτή με αντίσταση στον εκπομπό.
2. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο μέρος 3.2.2 να υπολογιστεί το κέρδος κοινού σήματος (common-mode gain), A_{cm} , το διαφορικό κέρδος (differential-mode gain), A_{dm} , και ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος, ρ , για τον διαφορικό ενισχυτή με πηγή ρεύματος στον εκπομπό.
3. Να συγκριθούν τα αποτελέσματα των ερωτημάτων 1 και 2 με τις αντίστοιχες τιμές ενός ιδανικού διαφορικού ενισχυτή και να σχολιαστούν οι διαφορές.
4. Να αναλυθεί η επίδραση της πηγής ρεύματος στις τιμές του κέρδους κοινού σήματος, του διαφορικού κέρδους και του λόγου απόρριψης κοινού σήματος.
5. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των DC τάσεων που μετρήθηκαν στα μέρη 3.2.1(α) και 3.2.2(α) να υπολογιστούν οι περιοχές λειτουργίας (ενεργός περιοχή ή κορεσμός) των τρανζίστορ Q_1 και Q_2 .
6. Να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον προσομοιωτή QUCS.

Απαιτούμενα Υλικά

ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

2 x 10k Ω , 4 x 1k Ω , 1 x 680 Ω , 1 x 4.7k Ω

ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

1 x 1k Ω

ΠΥΚΝΩΤΕΣ

1 x 1 μ F, 2 x 47 μ F/63V (ηλεκτρολυτικός)

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

3 x 2N3904