

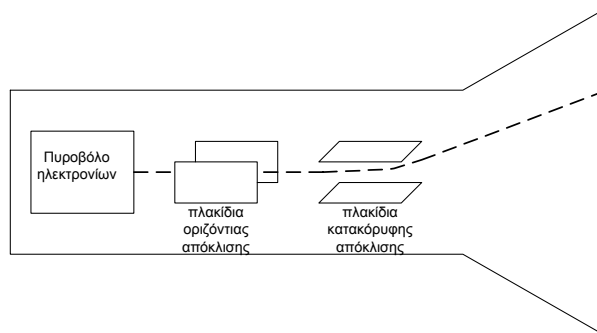
Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής Ι

Χανιά 2006

Ο παλμογράφος :

Ο παλμογράφος (oscilloscope) είναι ένα από τα σημαντικότερα όργανα του εργαστηρίου. Επιτρέπει την οπτική απεικόνιση σημάτων και δείχνει πληροφορίες γι' αυτά, τις οποίες δεν μπορούμε να έχουμε με ένα πολύμετρο. Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι παλμογράφου, ο αναλογικός και ο ψηφιακός, ενώ πολλοί παλμογράφοι διαθέτουν ταυτόχρονα αναλογικό και ψηφιακό τμήμα. Ο αναλογικός παλμογράφος στηρίζει τη λειτουργία του στον καθοδικό του σωλήνα, ενώ ο ψηφιακός προσομοιώνει τη λειτουργία του αναλογικού παλμογράφου, συνήθως με τεχνικές παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, και παρέχει πολύ περισσότερες δυνατότητες, με σημαντικότερη την αποθήκευση της κυματομορφής σε μνήμη, που επιτρέπει την άνετη παρατήρησή της. Ο αναλογικός παλμογράφος έχει σχετικά απλή λειτουργία που μπορεί να εξηγηθεί με σχετική ευκολία.

Η οθόνη του αναλογικού παλμογράφου πάνω στην οποία σχηματίζονται οι κυματομορφές είναι απλώς η πρόσοψη μιας ειδικής λυχνίας που ονομάζεται **σωλήνας καθοδικών ακτίνων** (Cathode Ray Tube ή CRT), ή εικονογράφος, ή λυχνία οθόνης, ή απλά καθοδικός σωλήνας). Η τομή του φαίνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1. Ο σωλήνας καθοδικών ακτίνων

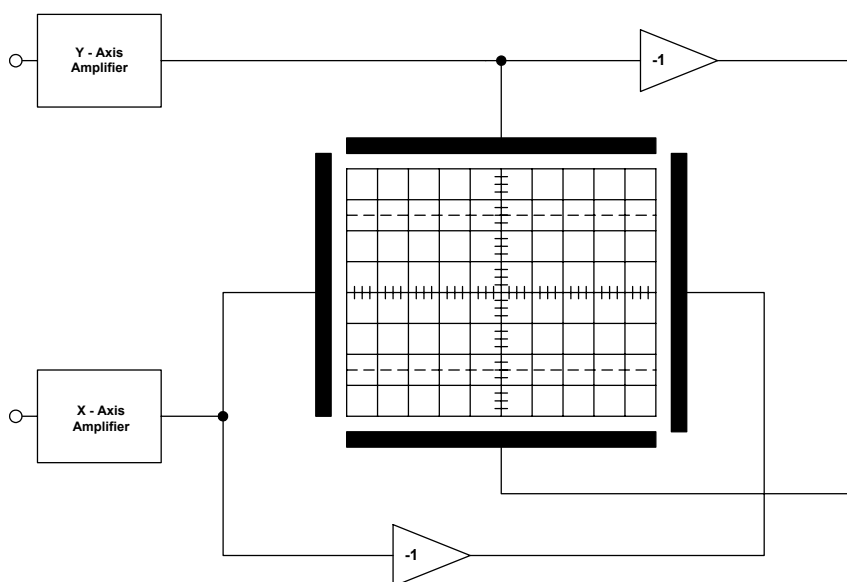
Το εσωτερικό του σωλήνα καθοδικών ακτίνων είναι κενό από αέρα και περιέχει τις απαραίτητες διατάξεις για τη λειτουργία του. Αυτές είναι κυρίως το πυροβόλο ηλεκτρονίων, τα πλακίδια οριζόντιας απόκλισης, τα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης και η φθορίζουσα οθόνη. Το πυροβόλο ηλεκτρονίων είναι μια διάταξη που παράγει μια λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων. Τα πλακίδια οριζόντιας και κατακόρυφης απόκλισης αλλάζουν τη διεύθυνση αυτής της δέσμης ανάλογα με το δυναμικό τους και καθορίζουν το σημείο της φθορίζουσας οθόνης στο οποίο αυτή θα προσπέσει. Η ενέργεια των ηλεκτρονίων διεγείρει την φθορίζουσα επίστρωση, με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο σημείο να φωτίζεται.

Χονδρικά, η λειτουργία του πυροβόλου ηλεκτρονίων έχει ως εξής: Μια πηγή χαμηλής τάσης (συνήθως 6,3V) θερμαίνει ένα **νήμα** που είναι μια αντίσταση κατασκευασμένη από ειδικό σύρμα (συνήθως βολφραμίου) μέχρι ερυθροπύρωσης. Το νήμα με τη σειρά του θερμαίνει ένα ηλεκτρόδιο που το περιβάλλει, την **κάθοδο**, και που είναι κατασκευασμένο από κάποιο θερμιονικό υλικό (συνήθως νικέλιο με οξειδία στροντίου και βαρίου). Θερμιονικά ονομάζονται τα υλικά που έχουν μικρό έργο εξαγωγής ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα την ιδιότητα όταν θερμανθούν να απελευθερώνουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και να δημιουργούν γύρω τους μ' αυτά ένα πυκνό "νέφος". Η κάθοδος περιβάλλεται μ' ένα ηλεκτρόδιο που έχει σχήμα κυπέλου με μια μικρή οπή στο κέντρο της επίπεδης πλευράς του. Το ηλεκτρόδιο αυτό ονομάζεται **εσχάρα** ή **πλέγμα ελέγχου**. Στην άλλη άκρη του καθοδικού σωλήνα και ακριβώς πριν από τη φθορίζουσα επίστρωση υπάρχει ένα άλλο ηλεκτρόδιο της

λυχνίας, που ονομάζεται **άνοδος** και έχει υψηλή θετική τάση σχετικά με την κάθοδο. Το δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο προσελκύει ηλεκτρόνια από το νέφος του θερμιονικού υλικού της καθόδου, που κινούνται προς την άνοδο με αποτέλεσμα από την οπή της εσχάρας ελέγχου να φεύγει μια λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων. Η ένταση της δέσμης αυτής μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας την τάση μεταξύ της εσχάρας ελέγχου και της καθόδου (ρύθμιση φωτεινότητας). Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων περάσει από την οπή της εσχάρας ελέγχου, διέρχεται δια μέσου μιας ιδιόμορφης εσχάρας που ονομάζεται **εσχάρα εστίασεως** η οποία λειτουργεί, για τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια της δέσμης, σαν ένας φακός μεταβλητής εστιακής απόστασης. Το δυναμικό αυτής της εσχάρας καθορίζεται ώστε τα ηλεκτρόνια να αφήνουν το μικρότερο δυνατό ίχνος στην οθόνη.

Συνήθως πίσω από κάθε αναλογικό παλμογράφο υπάρχει μια επιπλέον είσοδος η τάση της οποίας καθορίζει την ένταση της δέσμης (είσοδος Z).

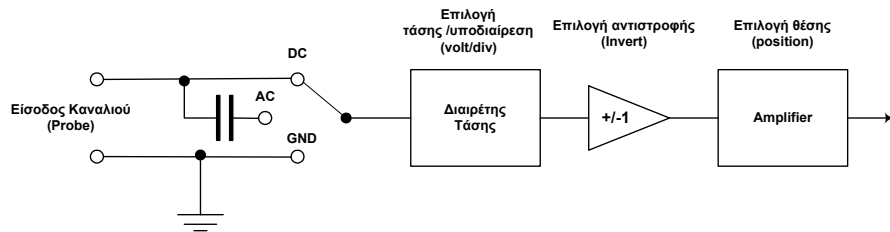
Η τάση στα πλακίδια οριζόντιας και κάθετης απόκλισης καθορίζεται από την έξοδο του ενισχυτή οριζόντιας και του ενισχυτή κάθετης απόκλισης αντίστοιχα. Οι τάσεις αυτές είναι ανάλογες των τάσεων των X και Y εισόδων αντίστοιχα και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο που χρησιμοποιείται για να εκτρέψει τη δέσμη ηλεκτρονίων. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της λειτουργίας X-Y του παλμογράφου φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ.2. Διάγραμμα βαθμίδων λειτουργίας X-Y.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα φωτεινό σημείο, στο σημείο που προσπίπτει, στην πρόσοψη του καθοδικού σωλήνα (οθόνη του παλμογράφου). Η εκτροπή της δέσμης που προκαλείται από κάποια τάση εισόδου μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια των γραμμών βαθμονόμησης της οθόνης. Η εκτροπή της δέσμης των ηλεκτρονίων του παλμογράφου είναι ανάλογη της τάσης εισόδου. Η απόσταση δύο παράλληλων συνεχών γραμμών στην οθόνη αντιστοιχεί σε μια υποδιαίρεση, ή τάση ίση με την υποδιαίρεση που δείχνει το αντίστοιχο κουμπί που καθορίζει την ενίσχυση του αντίστοιχου ενισχυτή εισόδου (volts/div).

Ένα τυπικό διάγραμμα βαθμίδων του ενισχυτή εισόδου ενός καναλιού υπάρχει στο Σχ. 3.



Σχ.3 Τυπικό διάγραμμα βαθμίδων ενισχυτή εισόδου καναλιού.

Το σήμα εφαρμόζεται στην είσοδο του καναλιού μέσω ενός βύσματος BNC. Η είσοδος του ενισχυτή μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν στην είσοδο του καναλιού (DC mode), μέσω ενός πυκνωτή (AC mode) ή μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν στα 0V (GND). Η σύνδεση μέσω πυκνωτή χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί η συνεχής συνιστώσα από το σήμα και να μπορέσουμε να εξετάσουμε με ακρίβεια την εναλλασσόμενη συνιστώσα του σήματος που εφαρμόζεται στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή ο πυκνωτής με την εσωτερική αντίσταση του ενισχυτή (τυπική τιμή 1MΩ) σχηματίζει ένα υψιπερατό φίλτρο.

Ο διαιρέτης τάσης ελέγχεται από το κουμπί (επιλογέα) που καθορίζει την ενίσχυση και δείχνει πόση τάση αντιστοιχεί σε μια υποδιαίρεση. Στη συνέχεια το σήμα μπορεί να περάσει από την επιλογή αντιστροφής της ένδειξης του καναλιού και τελικά οδηγεί τον ενισχυτή. Στον ενισχυτή αυτόν υπάρχει ένα ποτενσιόμετρο που μας επιτρέπει να αλλάξουμε την θέση του καναλιού στην οθόνη. Τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή εισόδου είναι:

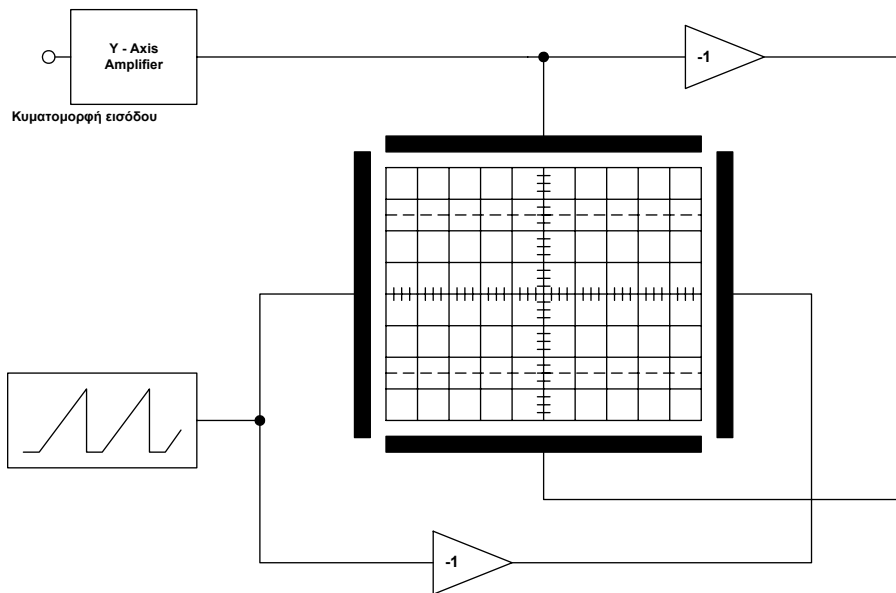
Volts/div Ρυθμίζει την αντιστοιχία τάσης ανά υποδιαίρεση. Ο έλεγχος αυτός είναι ένας απλός διαιρέτης τάσης που μεταβάλλει την ευαισθησία του παλμογράφου. Υπάρχει και η μικρομετρική ρύθμιση που συνήθως βρίσκεται στο κέντρο του επιλογέα της ευαισθησίας. Στην περίπτωση που αυτή δεν είναι κουμπωμένη στο τέρμα της ορθής φοράς υπάρχει μικρή διαφορά στην πραγματική τάση ανά υποδιαίρεση σε σχέση με αυτήν που δείχνει ο επιλογέας.

INV Αντιστροφή του καναλιού. Υπάρχει πάντα τουλάχιστον στο δεύτερο κανάλι. Χρησιμοποιείται για τη λήψη διαφορικής μέτρησης σε συνδυασμό με το πλήκτρο ADD (που προσθέτει τις εισόδους από τα δύο κανάλια και εμφανίζει το άθροισμά τους σε μια δέσμη). Στην περίπτωση της διαφορικής μέτρησης η ένδειξη του παλμογράφου αντιστοιχεί στη διαφορά δυναμικού των δύο καναλιών και μας επιτρέπει να πάρουμε μετρήσεις ανεξάρτητες από τη σύνδεση της γείωσης του παλμογράφου.

Position Από το κουμπί αυτό μπορούμε να αλλάξουμε τη θέση της δέσμης στην οθόνη. Χρησιμοποιείται για να μας επιτρέψει να δούμε την κυματομορφή όσο το δυνατόν μεγαλύτερη (και να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα ανάγνωσης) ή για να τοποθετήσουμε στο επιθυμητό σημείο την κυματομορφή για να κάνουμε ειδικές μετρήσεις (ποσοστών ή σχετικές μετρήσεις μεταξύ των καναλιών).

Λειτουργία του παλμογράφου (Τάση – Χρόνος)

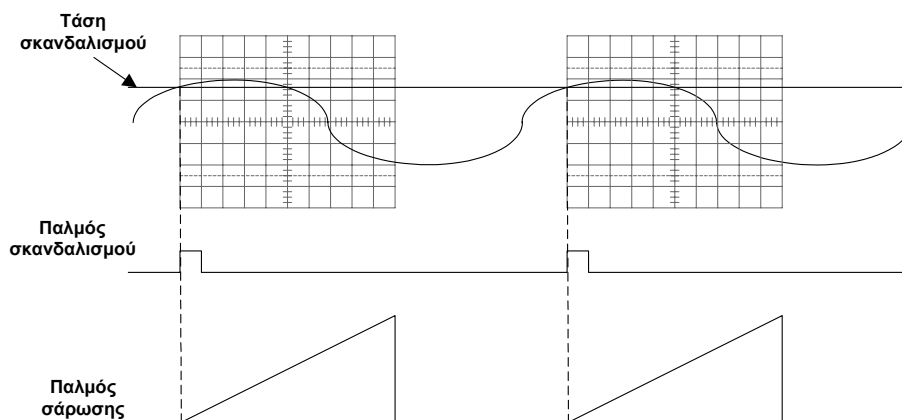
Η κύρια χρήση του παλμογράφου είναι να δείχνει την μορφή της τάσης σε σχέση με τον χρόνο. Αυτό γίνεται με τη χρήση μιας πριονωτής τάσης σαν είσοδο στον ενισχυτή οριζόντιας απόκλισης που δημιουργεί μια περιοδική σάρωση της οθόνης από την κηλίδα της δέσμης. Η τάση αυτή παράγεται από τη γεννήτρια σάρωσης η οποία κατά την επιστροφή της δέσμης παράγει και έναν αμαυρωτικό παλμό που αποκόπτει την δέσμη ώστε να μην αφήνει ίχνος επιστροφής. Η λειτουργία της σάρωσης φαίνεται στο Σχ. 4.



Σχ. 4. Βασική λειτουργία τάση - χρόνος

Για να έχουμε μια σταθερή εικόνα στην οθόνη του παλμογράφου θα πρέπει η ράμπτα (ο προιονωτός παλμός) σάρωσης να βρίσκεται σε φάση με το σήμα που δείχνει ο παλμογράφος. Αυτή την εργασία την αναλαμβάνει το κύκλωμα σκανδαλισμού (trigger) του παλμογράφου. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να λειτουργεί αυτόματα χρησιμοποιώντας το επιλεγμένο κανάλι, χειροκίνητα, ή ακόμα να χρησιμοποιεί εξωτερικό σήμα συγχρονισμού στην είσοδο EXT.

Στην απλοποιημένη εξήγηση της λειτουργίας στο κύκλωμα αυτό επιλέγεται μια τιμή τάσης και μια κλίση (θετική ή αρνητική). Κάθε φορά που το σήμα έχει την επιλεγμένη τιμή τάσης και με την επιλεγμένη κλίση η γεννήτρια σάρωσης σκανδαλίζεται ώστε να παράγει ένα παλμό σάρωσης με αποτέλεσμα η κυματομορφή να αρχίζει να εμφανίζεται στην οθόνη.



Σχ.5. Εξήγηση της λειτουργίας του σκανδαλισμού.

Ο αναλογικός παλμογράφος έχει την δυνατότητα να εμφανίσει ταυτόχρονα δύο κυματομορφές. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση της λειτουργίας dual (alternate mode). Σε αυτή τη περίπτωση οι κυματομορφές που εφαρμόζονται στα δυο κανάλια εμφανίζονται η μια μετά την άλλη. Αν αυτό δεν είναι επιθυμητό μπορούμε να επιλέξουμε τη λειτουργία chop στην οποία εμφανίζονται πολλά εναλλασσόμενα δείγματα από κάθε κυματομορφή σε κάθε πέρασμα της δέσμης.

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να παρατηρήσουμε μια κυματομορφή με μεγάλη πληροφορία (π.χ. σήμα video) μπορούμε να κάνουμε χρήση της λειτουργίας 10X. Στην περίπτωση αυτή ο παλμογράφος μεγεθύνει την εικόνα του 10 φορές στον χρόνο και εμφανίζει στην οθόνη μόνο το ένα δέκατο της κυματομορφής. Μπορούμε να πλοηγηθούμε στην κυματομορφή κάνοντας χρήση του κουμπιού X-position.

Η ικανότητα του παλμογράφου να απεικονίζει σήματα πολύ υψηλών συχνοτήτων περιορίζεται από την υψηλή συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή κατακόρυφης απόκλισης και την απόδοση της φωτεινότητας του CRT σε μεγάλες ταχύτητες κίνησης της ηλεκτρονικής δέσμης. Στη μέγιστη συχνότητα λειτουργίας του παλμογράφου μια ημιτονοειδής κυματομορφή εμφανίζεται με πλάτος 0,707 (-3dB) μικρότερο του αναμενόμενου. Για να διατηρήσουμε την εικόνα των μετρούμενων κυματομορφών θα πρέπει αυτές να έχουν βασική συχνότητα πολύ μικρότερη της μέγιστης συχνότητας του παλμογράφου.

Το σήμα στον παλμογράφο έρχεται μέσω ενός ειδικού καλωδίου που ονομάζεται σηματολήπτης (probe). Το καλώδιο αυτό λειτουργεί σαν γραμμή μεταφοράς και περιέχει κύκλωμα προσαρμογής στην αντίσταση εισόδου του παλμογράφου. Η επιλογή του επηρεάζει σημαντικά την λειτουργία του παλμογράφου κοντά στη μέγιστη συχνότητά του. Συνήθως το καλώδιο αυτό περιέχει και ένα κύκλωμα υποβιβασμού τάσης προκειμένου να δώσει στον παλμογράφο τη δυνατότητα να μετρήσει υψηλότερες τάσεις. Ο υποβιβασμός του καλωδίου αναγράφεται σε κάποιο από τα άκρα του. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι σηματολήπτες είναι αυτοί με υποβιβασμό 1:1, 1:2, 1:10 ή 1:100. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες (π.χ. ακουστικές συχνότητες) μπορεί χωρίς πρόβλημα να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε θωρακισμένο (μπλεντάζ) καλώδιο σαν σηματολήπτης 1:1.

Πριν από κάθε χρήση του παλμογράφου καλό είναι να ελέγχουμε την κατάστασή του μετρώντας το σήμα βαθμονόμησης που ο παλμογράφος μας παρέχει σε κάποιο σημείο. Το σήμα αυτό είναι ένας τετραγωνικός παλμός γνωστού πλάτους και συχνότητας που μας επιτρέπει να επιβεβαιώσουμε ότι ο παλμογράφος έχει τις ρυθμίσεις που αναμένουμε. Επιπλέον μας επιτρέπει να δούμε αν οι ρευματολήπτες έχουν σωστό τερματισμό.

Μετρήσεις με τον παλμογράφο:

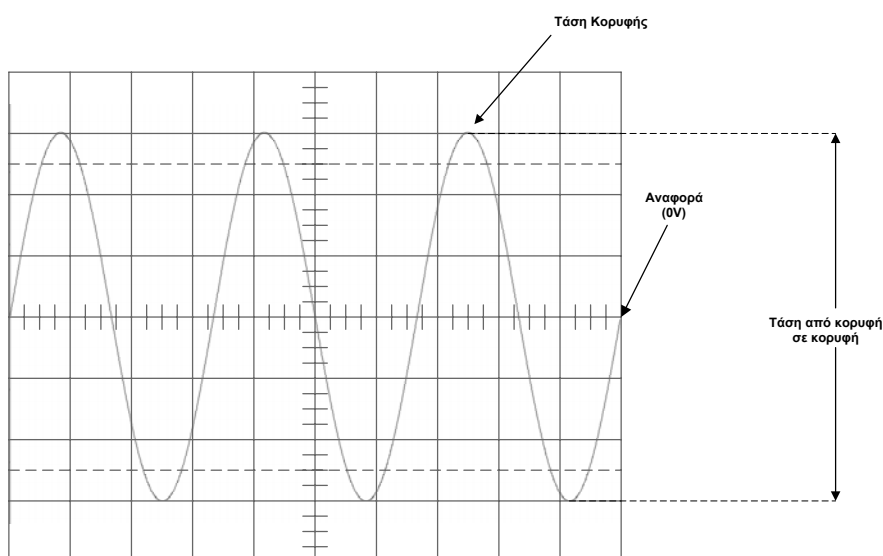
Πριν τη μέτρηση τάσεων με τον παλμογράφο πρέπει να καθοριστεί το επίπεδο της αναφοράς. Η εκλογή της αναφοράς γίνεται με κύριο κριτήριο την επίτευξη της μέγιστης κάθετης απόκλισης κατά τη μέτρηση, γιατί τότε το σφάλμα ανάγνωσης του παλμογράφου γίνεται ελάχιστο. Η αναφορά μεταβάλλεται θέτοντας την αντίστοιχη είσοδο στη θέση GND, οπότε η ένδειξη του καναλιού γίνεται μια ευθεία στα 0V, και με χρήση του αντίστοιχου Y-Position. Κατά την παρατήρηση καθαρά εναλλασσόμενων κυματομορφών συνηθίζεται η αναφορά να τοποθετείται στη μεσαία οριζόντια γραμμή της οθόνης.

Για τη μέτρηση της τάσης ενός σημείου στην οθόνη του παλμογράφου θα πρέπει να μετρηθεί με τη μέγιστη ακρίβεια η απόστασή του από την ευθεία της αναφοράς. Για το λόγο αυτό μπορούμε να μετακινήσουμε την παρατηρούμενη κυματομορφή ώστε το μετρούμενο σημείο να συμπίπτει με την μεσαία κάθετη ευθεία της οθόνης. Η ευθεία αυτή έχει υποδιαιρέσεις που μας επιτρέπουν να έχουμε ακρίβεια ίση με το 1/4 ή το 1/5 (0.25 ή 0,2 div, ανάλογα με τον παλμογράφο) της απόστασης δύο οριζόντιων γραμμών (1 div). Για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δυο σημείων μιας κυματομορφής πρέπει να μετρήσουμε με αντίστοιχο τρόπο την κάθετη απόστασή τους με την μέγιστη ακρίβεια.

Για την εύρεση της διαφοράς δυναμικού και εφόσον έχουμε υπολογίσει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια την κάθετη απόσταση σε οριζόντιες γραμμές (div) ισχύει ο τύπος:

$$V = \text{απόσταση (σε div)} \times \text{ένδειξη αντίστοιχου επιλογέα τάσης (V/div)}$$

Αν ο παλμογράφος δεν υποστηρίζει αυτόματη προσαρμογή της μέτρησης στον υποβιβασμό του σηματολήπτη θα πρέπει η μέτρηση να πολλαπλασιαστεί και με τον αντίστοιχο συντελεστή της διαίρεσης. Ένα παράδειγμα για τη μέτρηση με τον παλμογράφο δίνεται στο Σχ. 6.



Σχ. 6 Μέτρηση τάσης με τον παλμογράφο.

Η απόσταση της τάσης κορυφής (V_p) της ημιτονοειδούς κυματομορφής από την αναφορά στο Σχ. 6 είναι τρία div. Η τάση από κορυφή σε κορυφή (V_{p-p}) είναι έξι div. Υπενθυμίζεται ότι η σχέση που συνδέει τις δύο τάσεις σε ημιτονοειδείς κυματομορφές είναι:

$$V_p = \frac{V_{p-p}}{2}$$

και η ενεργός τιμή της ημιτονοειδούς κυματομορφής είναι:

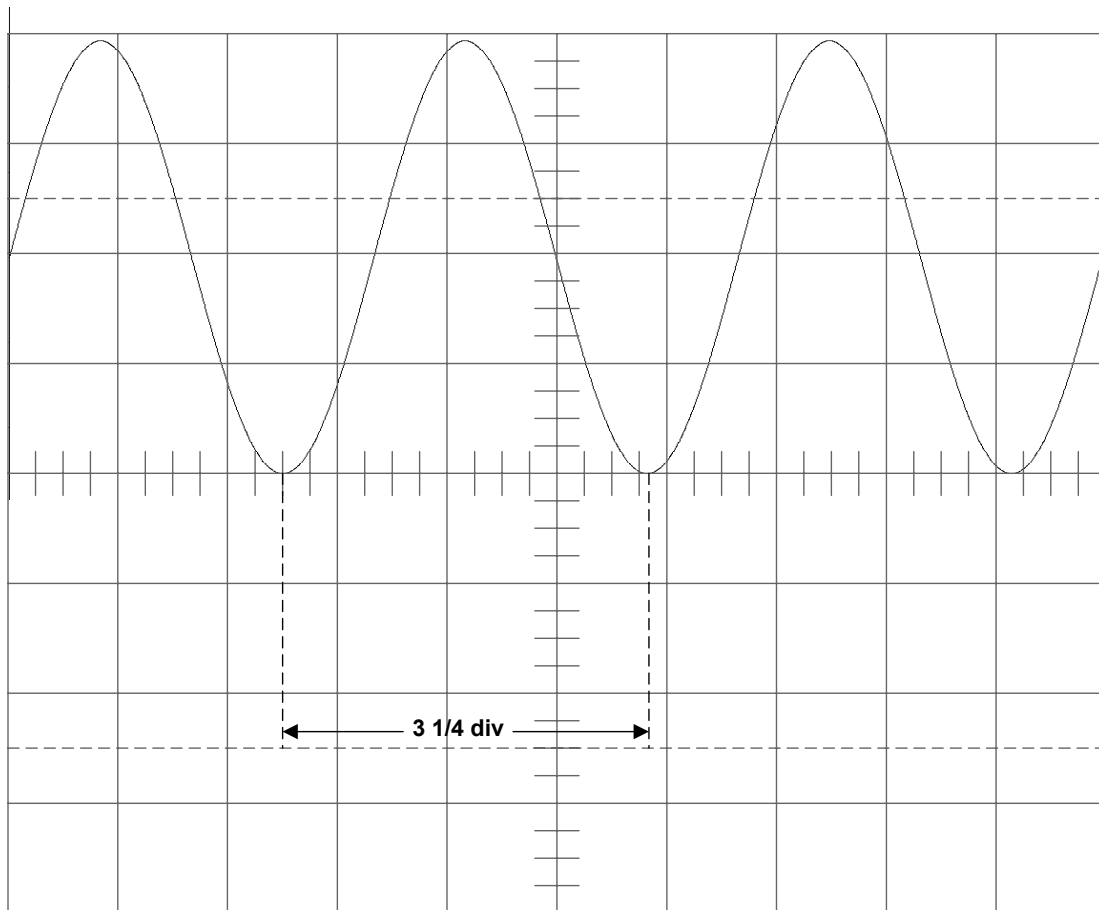
$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Μέτρηση συχνότητας με τον παλμογράφο:

Η εκτίμηση της συχνότητας ενός σήματος με τον παλμογράφο γίνεται μέσω της μέτρησης της περιόδου του. Για να γίνει αυτή η μέτρηση με την μέγιστη ακρίβεια πρέπει να μετρηθεί η απόσταση που έχουν δύο διαδοχικές και ισοφασικές διελεύσεις πάνω στην μεσαία οριζόντια γραμμή (συνήθως κορυφές ή διελεύσεις από το μηδέν). Στην περίπτωση αυτή ισχύει ο τύπος:

$$T = \text{οριζόντια απόσταση (σε div)} \times \text{ένδειξη επιλογέα βάσης χρόνου (sec/div)}$$

Ένα παράδειγμα για τη μέτρηση της περιόδου με τον παλμογράφο δίνεται στο Σχ. 7.



Σχ. 7. Μέτρηση περιόδου με τον παλμογράφο.

Εφόσον έχει υπολογιστεί η περίοδος (T), η συχνότητα (f) υπολογίζεται από τον τύπο:

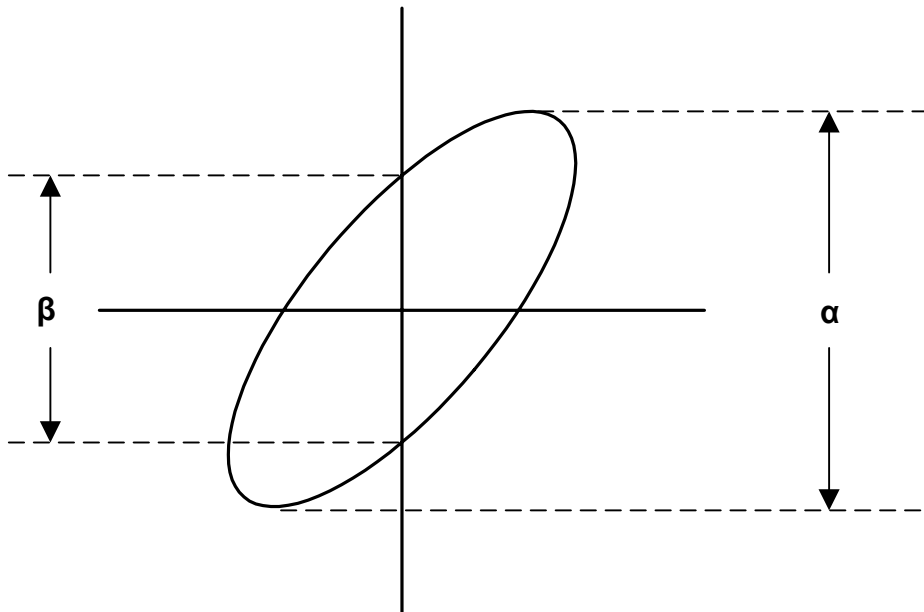
$$f = \frac{1}{T}$$

Αν τώρα πρέπει να μετρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημάτων αυτή μπορεί να εκτιμηθεί από τη μέτρηση της χρονικής τους υστέρησης t_d . Αυτή μπορεί να μετρηθεί μεταξύ δύο ισοφασικών σημείων των σημάτων. Η διαφορά φάσης τους δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\phi = \frac{t_d}{T} \cdot 360^\circ \text{ σε μοίρες, ή } \Delta\phi = \frac{t_d}{T} \cdot 2\pi \text{ σε rad.}$$

Εναλλακτική μέθοδος για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης και τη μέτρηση της σχετικής συχνότητας είναι και η μέθοδος Lissajous. Κατά τη μέθοδο αυτή ενεργοποιούμε τη x-y mode στον παλμογράφο, οπότε συνήθως το κανάλι 1 ευθύνεται για την κίνηση της φωτεινής κηλίδας στον x-άξονα και το κανάλι 2 στον y-άξονα (Αν δεν δουλεύετε σε παλμογράφο που να κάνει έτσι την αντιστοίχιση απλώς αντιμεταθέστε τα κανάλια). Στην συνέχεια κάνουμε σύνθεση στην οθόνη μιας εικόνας Lissajous από τα σήματα που εφαρμόζονται στα κανάλια του παλμογράφου. Από μετρήσεις που κάνουμε πάνω στην εικόνας Lissajous μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για τη σχέση των εφαρμοζόμενων σημάτων.

Η πιο απλή περίπτωση μέτρησης με χρήση της μεθόδου Lissajous είναι αυτή της διαφοράς φάσης δύο ημιτονοειδών σημάτων. Στην περίπτωση αυτή στην οθόνη εμφανίζεται μια έλλειψη (από ευθεία για συμφασικά ή αντίθετης φάσης σήματα, έως κύκλος για διαφορά φάσης $\pm 90^\circ$). Ο τρόπος μέτρησης της διαφοράς φάσης με τη μέθοδο Lissajous φαίνεται στο Σχ. 8.



Σχ. 8. Μέτρηση της διαφοράς φάσης με τη μέθοδο Lissajous.

Πρώτα πρέπει να μετρηθεί η απόσταση «β». Αυτό μπορεί να γίνει μετακινώντας ελαφρά την έλλειψη στην κατακόρυφη διεύθυνση ώστε η κάτω τομή της με τον άξονα y να συμπίπτει και με μια οριζόντια γραμμή. Τότε η απόσταση β μπορεί να μετρηθεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Στην συνέχεια μετατοπίζουμε την έλλειψη πάνω στον οριζόντιο άξονα ώστε το κατώτερο σημείο της να συμπίπτει με τον άξονα των y . Στην συνέχεια μετατοπίζουμε την έλλειψη κατακόρυφα ώστε το σημείο αυτό να συμπίπτει με μια οριζόντια γραμμή. Μετατοπίζουμε τώρα την έλλειψη οριζόντια ώστε η υψηλότερη κορυφή της να συμπίπτει με τον y -άξονα και μετράμε την απόσταση «α». Όταν μετράμε με τον αναλογικό παλμογράφο φροντίζουμε οι κυματομορφές μας να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες και όλες οι μετρήσεις να γίνονται πάνω στους δύο άξονες γιατί τότε οι μετρήσεις μας έχουν το μικρότερο σφάλμα. Όταν οι αποστάσεις «α» και «β» έχουν μετρηθεί τότε η διαφορά φάσης « $\Delta\theta$ » των σημάτων που εφαρμόζονται στην είσοδο δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)$$

Εργαστηριακή Άσκηση:

1) Ρυθμίστε τον παλμογράφο για κανονική λειτουργία με ενεργοποιημένο το κανάλι 1. Συνδέστε στην είσοδο του καναλιού, μια DC τάση 1V από το τροφοδοτικό (μετρήστε την με βολτόμετρο). Μετρήστε την τιμή της DC τάσης με τον παλμογράφο, τοποθετώντας τον επιλογή ευαισθησίας (Volt/div) και στις τρεις συγκεκριμένες θέσεις που αναγράφονται στον Πίνακα 1 και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας σε αυτόν. Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία για τάσεις 5 και 10V.

Μέτρηση DC τάσης με τον παλμογράφο			
Τάση	Volt/div	Μετατόπιση δέσμης (div)	Τιμή μέτρησης
1V	0,5		
	1		
	2		
5V	1		
	5		
	10		
10V	2		
	5		
	10		

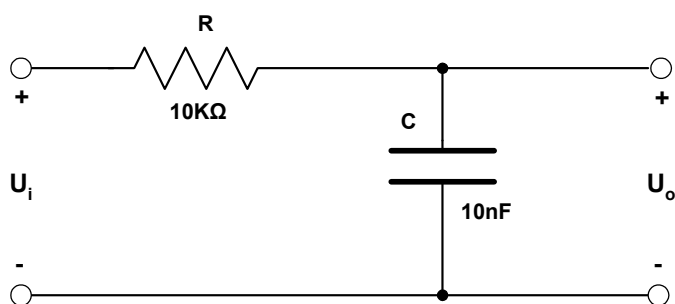
Πίνακας 1.

2) Συνδέστε στην είσοδο του καναλιού 1 τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων και ρυθμίστε την έξοδό της σε ημίτονο συχνότητας 400Hz και τάση 1 V_{rms} (μετρήστε την με το πολύμετρο). Μετρήστε την απόκλιση από κορυφή σε κορυφή και πολλαπλασιάστε επί την ένδειξη του επιλογέα ευαισθησίας (Volt/div) για να βρείτε την τιμή της τάσης από κορυφή σε κορυφή (V_{p-p}). Βάσει της τιμής V_{p-p} βρείτε την V_{rms}. Επαναλάβετε την παραπάνω μέτρηση για τις τρεις διαφορετικές θέσεις του επιλογέα ευαισθησίας που αναγράφονται στον Πίνακα 2 και καταχωρίστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σας σε αυτόν. Επαναλάβετε το προηγούμενο βήμα για εναλλασσόμενες τάσεις 3 και 5V_{rms}, που θα πάρετε από την γεννήτρια.

Μέτρηση AC τάσης με τον παλμογράφο				
Τάση	Volt/div	Απόκλιση (div)	V _{p-p} (V)	V _{rms} (V)
1V _{rms}				
3V _{rms}				
5V _{rms}				

Πίνακας 2.

3) Πραγματοποιήστε το κύκλωμα:



Συνδέστε την γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων στην είσοδο του κυκλώματος. Συνδέστε το ένα κανάλι του παλμογράφου στην είσοδο του κυκλώματος (παράλληλα με τη γεννήτρια συχνοτήτων) και το δεύτερο κανάλι στην έξοδο του κυκλώματος. Ρυθμίστε την γεννήτρια στα 1600Hz, $10V_{p-p}$, και παρατηρείστε τις εμφανιζόμενες κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε με την βοήθεια του παλμογράφου την περίοδο και υπολογίστε τη συχνότητα της γεννήτριας και συγκρίνετε την μετρούμενη τιμή με αυτή που αναγράφεται στην ένδειξη της γεννήτριας.

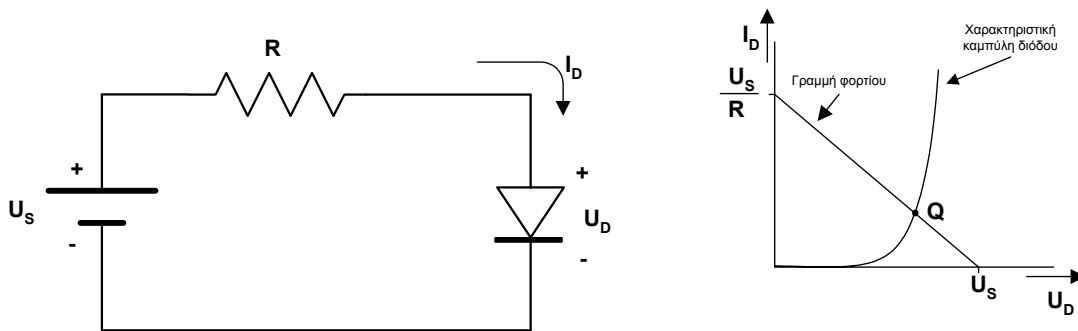
4) Μετρήστε με την βοήθεια του παλμογράφου την διαφορά χρόνου ανάμεσα στα σήματα U_o και U_i . Με τη βοήθεια της μέτρησης της περιόδου που έχετε ήδη κάνει υπολογίστε τη διαφορά φάσης $\Delta\theta$.

5) Βάλτε τον παλμογράφο σε x-y mode και μετρήστε τη διαφορά φάσης με την μέθοδο Lissajous. Συγκρίνεται τα αποτελέσματα με τα προηγούμενα και σχολιάστε τα.

Εργαστηριακή Άσκηση 1

Κυκλώματα με διόδους

Μια αντίσταση είναι γραμμικό στοιχείο, γιατί η τάση στους ακροδέκτες της είναι ανάλογη του ρεύματος ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του. Η διόδος επαφής ρ-η, αντίθετα, είναι μη-γραμμικό στοιχείο, γιατί η τάση στους ακροδέκτες της δεν είναι ανάλογη του ρεύματος. Επιπλέον, η διόδος άγει μόνον όταν είναι ορθά πολωμένη, ενώ σε ανάστροφη πόλωση το ρεύμα είναι πολύ μικρό, ειδικά για διόδους πυριτίου. Για τέτοιες διόδους, ο λόγος ανάστροφης προς ορθή αντίσταση είναι πολύ μεγαλύτερος από 1000-προς-1. Η διόδος άγει όταν είναι συνδεδεμένη όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Τότε λέμε ότι η διόδος βρίσκεται σε ορθή πόλωση.



Σχ. 1. Ορθή πόλωση διόδου και γραφική επίλυση του βρόχου.

Όταν η διόδος βρίσκεται σε ορθή πόλωση τότε η τάση αγωγής (U_D) στα άκρα της διόδου είναι σχετικά ανεξάρτητη από το ρεύμα (I_D) που διαρρέει τη διόδο. Η τάση αυτή είναι περίπου 0.7V για μια διόδο πυριτίου και 0.3V για μια διόδο γερμανίου. Για αυτό το λόγο το ρεύμα της διόδου σε ορθή πόλωση πρέπει να περιορίζεται από εξωτερική αντίσταση σε σειρά με τη διόδο. Η «γραμμή φορτίου» είναι η ευθεία που συσχετίζει το ρεύμα και την τάση στα σημεία του κυκλώματος που είναι συνδεδεμένη η διόδος. Το σημείο τομής της γραμμής φορτίου και της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου καθορίζει το σημείο λειτουργίας.

Η στατική (ή dc) αντίσταση μιας διόδου σε οποιοδήποτε σημείο στη χαρακτηριστική της προσδιορίζεται από τον λόγο της τάσης διόδου U_D σε αυτό το σημείο και του ρεύματος της διόδου I_D , δηλ.

$$R_{dc} = U_D / I_D$$

Η δυναμική (ή ac) αντίσταση σ' ένα συγκεκριμένο ρεύμα διόδου μπορεί να προσδιοριστεί από την εφαπτομένη σ' αυτό το σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης. Η εφαπτομένη αυτή μπορεί να προσεγγιστεί λαμβάνοντας μικρές αποκλίσεις γύρω από το σημείο:

$$r_{ac} = \Delta U_D / \Delta I_D$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου είναι:

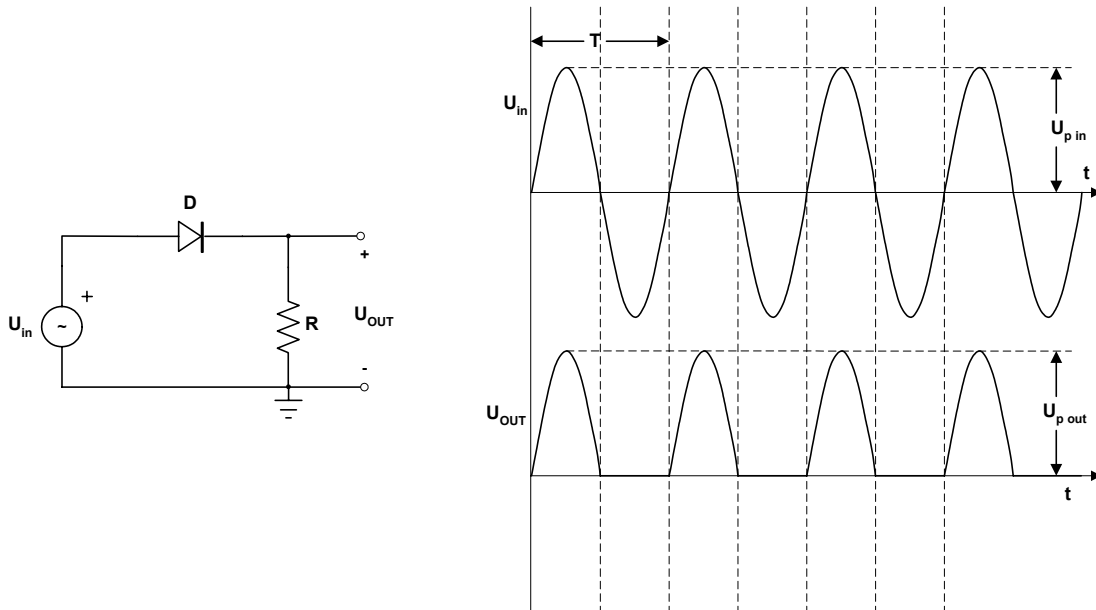
$$I_D = I_s \cdot \left(e^{\frac{U_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

όπου n είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το υλικό και V_T είναι το «θερμοηλεκτρικό ισοδύναμο» που ισούται περίπου με 26mV@25°C. Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση μπορούμε να βρούμε για μεγάλα ρεύματα την παρακάτω προσεγγιστική σχέση για την δυναμική αντίσταση μιας διόδου:

$$r_{ac} = V_T / I_D = 25\text{mV} / I_D \text{ στους } 25^\circ\text{C}$$

Κυκλώματα ανορθωτών:

Μια από τις κυριότερες χρήσεις των διόδων είναι τα κυκλώματα ανορθωτών. Στο Σχ.2 φαίνεται ένα κύκλωμα ανορθωτή μισού κύματος:



Σχ. 2. Κύκλωμα ανορθωτή μισού κύματος.

Στο κύκλωμα του ανορθωτή μισού κύματος, η διάδος άγει κατά την θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, ενώ αποκόπτεται κατά την αρνητική ημιπερίοδο. Για περιοδικό σήμα εισόδου περιόδου T , η συχνότητα του σήματος στην έξοδο του κυκλώματος είναι ίδια με αυτήν του σήματος εισόδου.

Η DC (συνεχής) συνιστώσα του σήματος εξόδου U_{OUT} είναι ίση με τη μέση τιμή (V_{DC}) του σήματος εξόδου και δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{OUT}(t) dt \Rightarrow V_{DC} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} U_{p-out} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right) \Rightarrow$$

επειδή, αν η διάδος θεωρηθεί ιδανική, ισχύει $U_{p-out} = U_{p-in}$

$$V_{DC} = \frac{U_{p-in}}{T} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]_0^{T/2} \Rightarrow V_{DC} = \frac{U_{p-in}}{2\pi} \cdot [-\cos(\pi) + \cos(0)]$$

η παραπάνω σχέση δίνει DC συνιστώσα για το ημιανορθωμένο ημίτονο:

$$V_{DC} = \frac{U_{p-in}}{\pi}$$

Αν τώρα θελήσουμε να υπολογίσουμε την ενεργό τιμή (V_{rms}) του ανορθωμένου ημιτόνου έχουμε:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{out}^2(t) dt} \Rightarrow \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{p-in}^2 \sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt}$$

Το πιο πάνω ολοκλήρωμα επιλύεται με τη βοήθεια του τριγωνομετρικού τύπου:

$$\sin^2(x) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2x)]$$

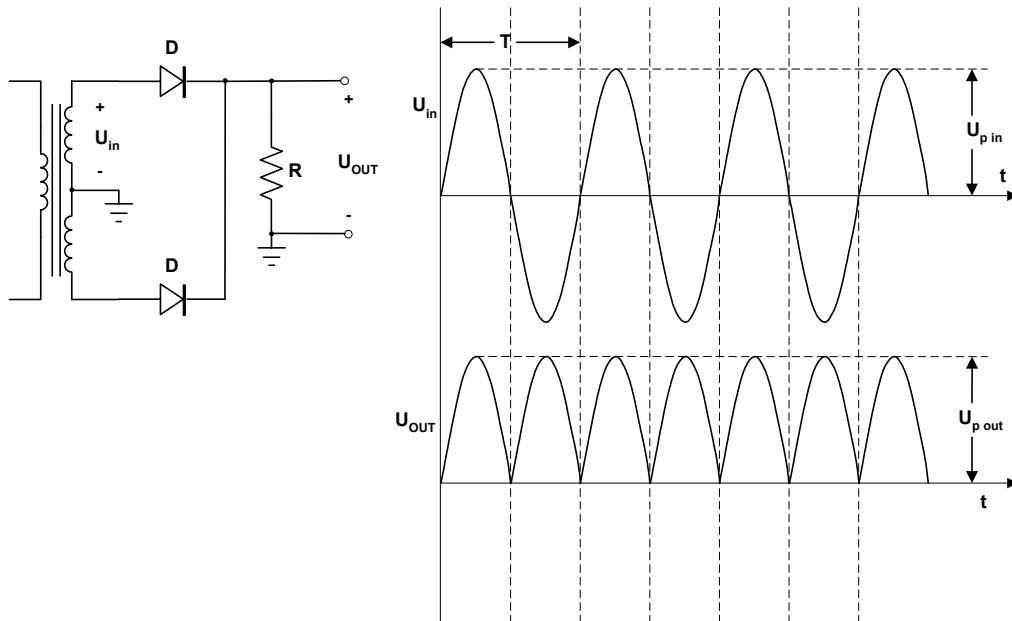
και γίνεται:

$$V_{rms} = U_{p_in} \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^{T/2} \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \right] dt} \Rightarrow V_{rms} = U_{p_in} \sqrt{\frac{1}{2T} \left[t \Big|_0^{T/2} - \frac{T}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \Big|_0^{T/2} \right]}$$

και κάνοντας τις πράξεις στο παραπάνω ολοκλήρωμα:

$$V_{rms} = \frac{U_{p_in}}{2}$$

Με χρήση δύο ανορθωτών μισού κύματος που λειτουργούν συμπληρωματικά με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή με μεσαία λήψη μπορούμε να υλοποιήσουμε ένα ανορθωτή πλήρους κύματος. Ένας τέτοιος ανορθωτής φαίνεται στο Σχ.3.

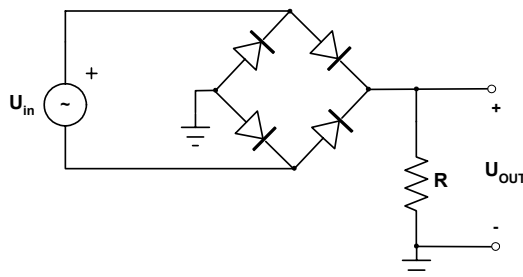


Σχ. 3. Ανορθωτής πλήρους κύματος.

Σε ένα κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος παρατηρούμε ότι η συχνότητά του σήματος εξόδου είναι διπλάσια από τη συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος στην είσοδο του ανορθωτή. Αν υπολογίσουμε τη συνεχή συνιστώσα και την ενεργό τιμή της τάσης του πλήρως ανορθωμένου ημιτόνου αυτές είναι:

$$V_{DC} = \frac{2U_{p_out}}{\pi} \text{ και } V_{rms} = \frac{U_{p_out}}{\sqrt{2}}$$

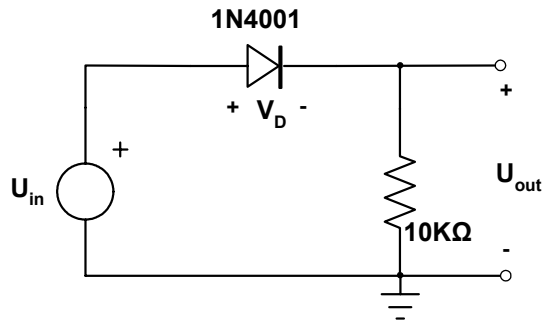
Ένα ακόμα κύκλωμα που κάνει ανόρθωση πλήρους κύματος είναι και ο ανορθωτής γέφυρας που φαίνεται στο Σχ.4.



Σχ. 4. Ανορθωτής γέφυρας.

ΠΕΙΡΑΜΑ

1) Να πραγματοποιηθεί το παρακάτω κύκλωμα:



i) Για DC τάσεις εισόδου 5V, 10V, 15V και 20V να μετρηθεί η τάση V_D στα άκρα της διόδου. Τι παρατηρείτε; Γιατί;

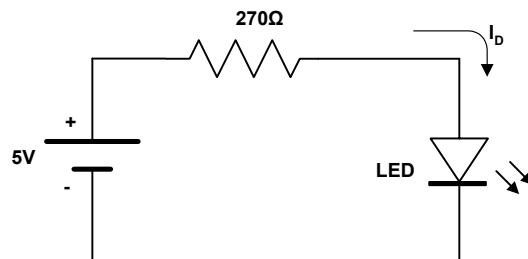
ii) Για ημιτονοειδή τάση εισόδου U_{in} , με συχνότητα 1KHz και πλάτος 5V, να χαραχθούν τα διαγράμματα των κυματομορφών V_{in} και V_{out} σε χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες, όπως αυτά παρατηρούνται στην οθόνη του παλμογράφου.

iii) Καθώς παρατηρείτε την κυματομορφή της εξόδου βάλτε το συγκεκριμένο κανάλι σε AC mode. Μετρήστε την μετατόπιση της κυματομορφής. Η μετατόπιση είναι ίση με την συνεχή συνιστώσα της κυματομορφής. Από το διάγραμμα της κυματομορφής εξόδου υπολογίστε τα μεγέθη V_{dc} και V_{rms} του ημιανορθωμένου σήματος. Συγκρίνετε την συνεχή συνιστώσα που μετρήσατε με αυτήν που υπολογίσατε και σχολιάστε.

iv) Συνδέστε παράλληλα στην αντίσταση R, πυκνωτή χωρητικότητας 100nF. Τι παρατηρείτε τότε στην οθόνη του παλμογράφου για την τάση U_{out} ; Δώστε μια εξήγηση γι αυτό. Χαραξτε τα διαγράμματα των κυματομορφών U_{in} και U_{out} σε χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες, όπως αυτά παρατηρούνται στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε την κυμάτωση (τάση από κορυφή σε κορυφή, $U_{out\ p-p}$) στο σήμα εξόδου.

v) Επαναλάβετε το προηγούμενο ερώτημα χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά πυκνωτή 10μF (προσέχοντας την πολικότητα γιατί ο πυκνωτής είναι ηλεκτρολυτικός). Πόση είναι η τάση V_{dc} στην έξοδο του κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση; Συγκρίνετέ την με αυτήν που μετρήσατε χωρίς καθόλου πυκνωτή και σχολιάστε.

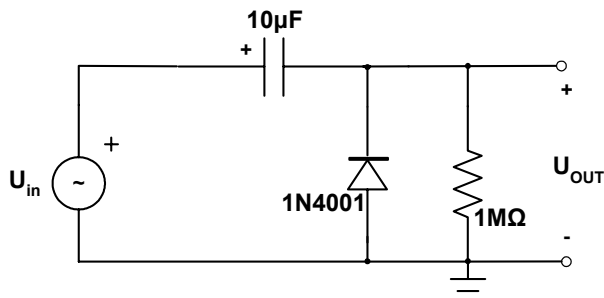
2) Να πραγματοποιηθεί το παρακάτω κύκλωμα:



i) Μετρήστε την τάση στην αντίσταση και υπολογίστε το ρεύμα που διαρρέει το βρόχο.

ii) Πόση είναι η τάση στα άκρα του LED (φωτοεκπέμπουσα δίοδος); Υπολογίστε, χρησιμοποιώντας την τιμή του ρεύματος που υπολογίσατε προηγουμένως, την ισχύ που καταναλώνεται στην αντίσταση R και στο LED.

3) Να πραγματοποιηθεί το παρακάτω κύκλωμα πρόσδεσης:



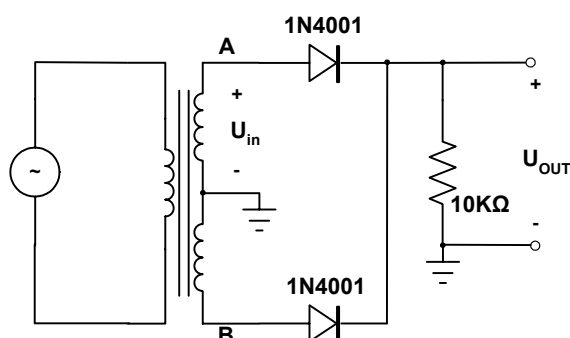
i) Επιλέξτε ημιτονοειδή κυματομορφή με τέτοια συχνότητα f για την κυματομορφή U_{in} , ώστε η σταθερά χρόνου RC του κυκλώματος να είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από την περίοδο του σήματος εισόδου. Για είσοδο και πλάτος της επιλογής σας για την U_{in} , σχεδιάστε τις κυματομορφές U_{in} και U_{out} σε πλήρη χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες, όπως παρατηρούνται στην οθόνη του παλμογράφου.

ii) Να επαναλάβετε το ερώτημα i) αφού πρώτα αντιστρέψετε την πολικότητα της διόδου και του πυκνωτή.

iii) Να επαναλάβετε το ερώτημα i) για τριγωνική και για τετραγωνική κυματομορφή εισόδου.

iv) Εξηγήστε τη λειτουργία του κυκλώματος.

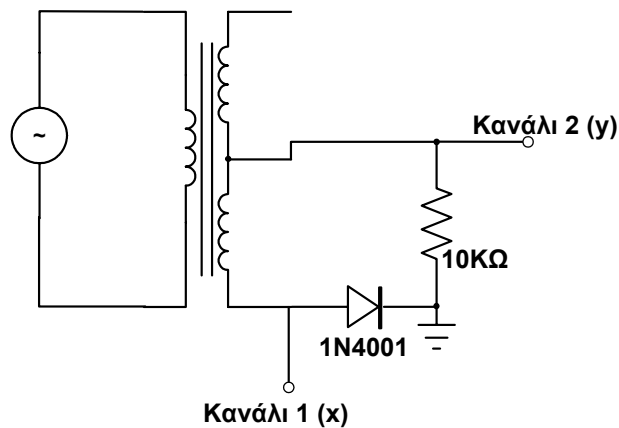
3) Πραγματοποιείτε τον ανορθωτή πλήρους κυματος:



i) Να χαραχθούν τα διαγράμματα των κυματομορφών U_A , U_B , και U_{out} σε χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες, όπως αυτά παρατηρούνται στην οθόνη του παλμογράφου. Βάσει των μετρήσεων να εξηγήσετε αναλυτικά την λειτουργία του κυκλώματος.

ii) Μετρήστε την V_{dc} της κυματομορφής εξόδου και την rms τιμή της U_{in} . Από το διάγραμμα της κυματομορφής εξόδου, να υπολογίσετε τα μεγέθη V_{dc} και V_{rms} για την τάση εξόδου U_{out} .

4) Πραγματοποιείτε την παρακάτω συνδεσμολογία:



Με την συνδεσμολογία αυτή εφαρμόζετε στο κανάλι 1 την τάση στα άκρα της διόδου και στο κανάλι 2 μια τάση ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο και με αντίθετο πρόσημο. Το πρόσημο στο κανάλι 2 μπορεί να διορθωθεί με χρήση του πλήκτρου invert του καναλιού. Βάλτε τον παλμογράφο σε x-y mode. Στην οθόνη εμφανίζεται η χαρακτηριστική της διόδου. Να καταγράψετε σε βαθμολογημένο διάγραμμα την χαρακτηριστική που βλέπετε στην οθόνη. Πως καθορίζονται οι τιμές των άκρων του διαγράμματος;

Εργαστηριακή Άσκηση 2

Απλά κυκλώματα με τρανζίστορ

Τα διπολικά τρανζίστορ κατασκευάζονται από πυρίτιο (Silicon) ή σπάνια σήμερα, από γερμάνιο (Germanium). Η δομή τους αποτελείται από δύο τμήματα ημιαγωγού **τύπου n** που χωρίζονται από ένα τμήμα ημιαγωγού **τύπου p** (ηρη τρανζίστορ), ή από δύο τμήματα ημιαγωγού **τύπου p** που χωρίζονται από ένα τμήμα ημιαγωγού **τύπου n** (ρηρ τρανζίστορ). Στην κάθε περίπτωση, και τα τρία τμήματα του ημιαγωγού αποτελούν ένα συνεχή κρύσταλλο. Το μεσαίο τμήμα είναι λεπτό και σχηματίζει τη **βάση** (base) του τρανζίστορ, ενώ από τα άλλα δύο το μεγαλύτερο σχηματίζει το συλλέκτη (collector) και τον μικρότερο τον εκπομπό (emitter). Ο τύπος ενός τρανζίστορ προσδιορίζει την πολικότητα των τάσεων που εφαρμόζουμε, καθώς και την κατεύθυνση των ρευμάτων. Το βέλος στον ακροδέκτη εκπομπού στο σχηματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ δείχνει την κατεύθυνση του ρεύματος, όταν η επαφή βάσεως-εκπομπού είναι ορθά πολωμένη και έτσι παρέχεται μια χρήσιμη αναφορά.

Με ένα πολύμετρο στη θέση που μετράει τις διόδους μπορούμε εύκολα να βρούμε το υλικό κατασκευής του από την τάση αγωγής των δύο διόδων που σχηματίζει η επαφή της βάσης με τον εκπομπό και το συλλέκτη. Μπορούμε επιπλέον να ξεχωρίσουμε την επαφή του εκπομπού από αυτή του συλλέκτη διότι λόγω της μικρότερης κατασκευής της παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερη αντίσταση από αυτήν του συλλέκτη.

Η βασική λειτουργία του τρανζίστορ είναι, όταν βρίσκεται σε κατάλληλη πόλωση, ένα μικρό ρεύμα στη βάση του να προκαλεί ένα σταθερό και σχετικά ανάλογο ρεύμα στο συλλέκτη.

Ένας από τους σκοπούς για τον οποίο χρησιμοποιούνται συνήθως τα τρανζίστορ, είναι η ενίσχυση. Ο ενισχυτής είναι ένα κύκλωμα το οποίο παίρνει ένα σήμα στην είσοδό του και το αποδίδει ενισχυμένο κατά πλάτος στην έξοδο του. Την ανάλυση των κυκλωμάτων ενισχυτών με τρανζίστορ την εξετάσουμε σε δύο μέρη:

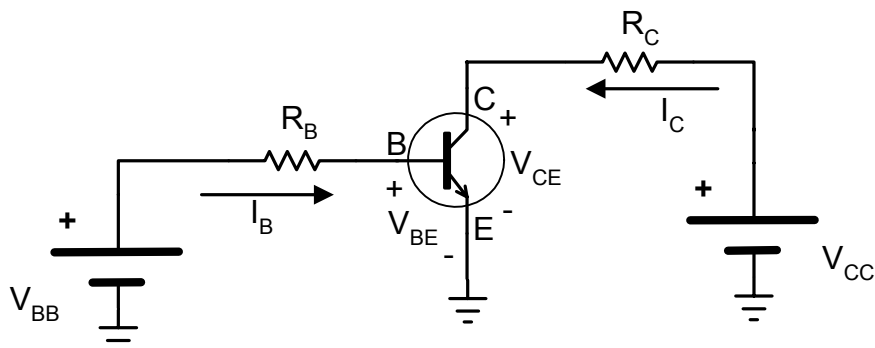
A. Ανάλυση συνθηκών λειτουργίας στο D.C. ή D.C. ανάλυση.

B. Ανάλυση συνθηκών λειτουργίας στο A.C. ή A.C. ανάλυση.

Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με το τρανζίστορ σε κυκλώματα ενίσχυσης μικρού σήματος.

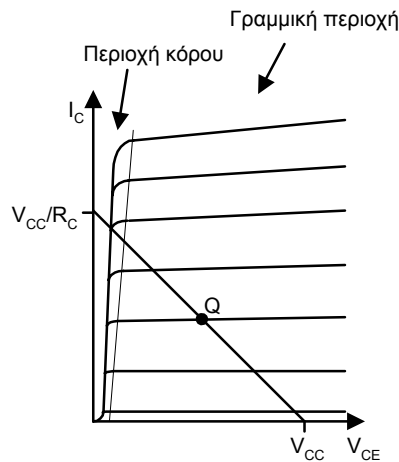
Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (CE). DC ανάλυση:

Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (C.E.). Μια τέτοια συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχ. 1 .



Σχ. 1. Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. DC ανάλυση.

Στο κύκλωμα του Σχ. 1 μπορούμε θεωρώντας ότι η επαφή βάσης-εκπομπού σαν μια κοινή δίοδο να βρούμε το ρεύμα της βάσης. Στη συνέχεια μπορεί να λυθεί γραφικά ο βρόχος του συλλέκτη, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.

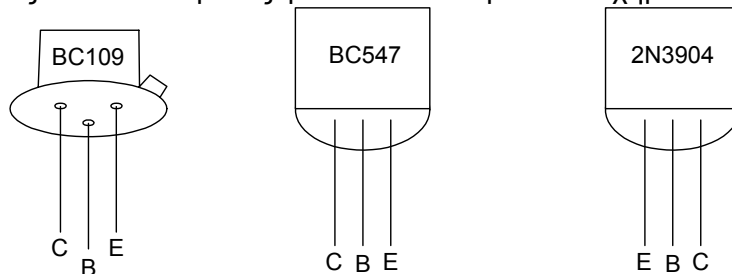


Σχ. 2. Γραφική εύρεση του σημείου λειτουργίας για συνδεσμολογία CE.

Σε τάσεις V_{CE} μικρότερες των 0,3V αρχίζει η περιοχή κόρου και το τρανζίστορ βγαίνει έξω από την γραμμική περιοχή. Το άλλο άκρο της γραμμικής περιοχής είναι η περιοχή αποκοπής στην οποία το ρεύμα συλλέκτη είναι σχεδόν μηδέν.

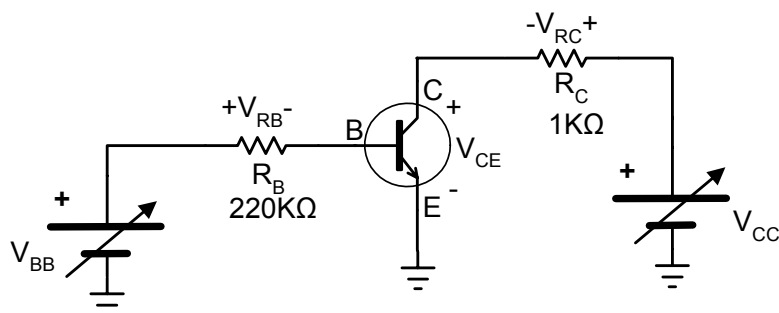
ΠΕΙΡΑΜΑ

Τρεις ομάδες τρανζίστορ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πειράματα. Η πρώτη ομάδα είναι τα BC107, BC108 και BC109, η δεύτερη τα BC546 και BC547 και η τρίτη ομάδα είναι το 2N3904. Οι δύο πρώτες ομάδες είναι ευρωπαϊκοί τύποι. Το γράμμα B σημαίνει ότι είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο και το γράμμα C ότι είναι για μικρό σήμα. Ένα ακόμα γράμμα ακολουθεί τον αριθμό και σε αυτούς τους τύπους αντιστοιχεί σε μια περιοχή τιμών το β του τρανζίστορ. Για τα πειράματα διαλέγουμε τρανζίστορ χωρίς γράμμα μετά τον αριθμό, ή με το γράμμα A. Η διάταξη των ακροδεκτών στις πιο πάνω ομάδες φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



1) Επιβεβαιώστε με το πολύμετρο ότι η διάταξη των ακροδεκτών αντιστοιχεί με αυτήν που δίνεται στο παραπάνω σχήμα.

2) Να πραγματοποιηθεί το παρακάτω κύκλωμα:



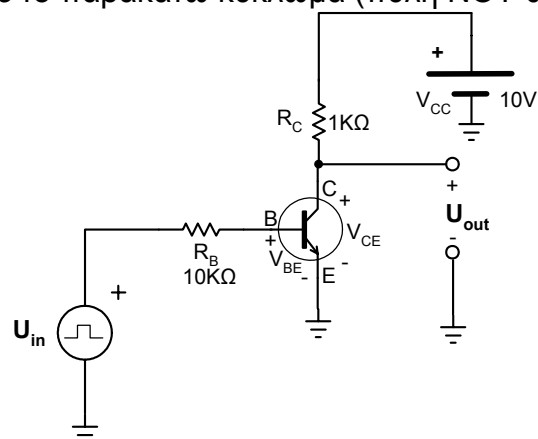
i. να ρυθμιστεί η πηγή V_{BB} ώστε $V_{RB}=2,2V$,

- ii. να ρυθμιστεί η πηγή V_{CC} ώστε $V_{CE}=2V$,
 iii. με το πολύμετρο στη θέση DC [Volt], να μετρηθούν οι τάσεις V_{RC} και V_{BE} και να καταχωρηθούν οι τιμές στον Πίνακα 1.
 iv. να επαναληφθούν τα βήματα (i)-(iii) για όλες τις τιμές των τάσεων V_{CE} και V_{RB} που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πειραματικές μετρήσεις					Θεωρητικοί υπολογισμοί			
V_{RB} (V)	I_B (μA)	V_{CE} (V)	V_{RC} (V)	V_{BE} (V)	I_C	I_E	α	β
2,2	10	2						
2,2	10	4						
2,2	10	6						
2,2	10	8						
2,2	10	10						
2,2	10	12						
2,2	10	14						
2,2	10	16						
4,4	20	2						
4,4	20	4						
4,4	20	6						
4,4	20	8						
4,4	20	10						
4,4	20	12						
4,4	20	14						
6,6	30	2						
6,6	30	4						
6,6	30	6						
6,6	30	8						
6,6	30	10						
8,8	40	2						
8,8	40	4						
8,8	40	6						
8,8	40	8						
11	50	2						
11	50	4						
11	50	6						

iv. Κάντε γραφική παράσταση του β συναρτήσει του ρεύματος I_C . Τι παρατηρείτε;

2) Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα (πύλη NOT-αντιστροφίας):



i) Από τη γεννήτρια συχνοτήτων, τροφοδοτήστε με τετραγωνικούς παλμούς $4V_{p-p}$ 1KHz την είσοδο του κυκλώματος, έτσι ώστε να εμφανιστούν παλμοί στην έξοδο του.

ii) Σχεδιάστε σε διάγραμμα τις κυματομορφές U_{in} , U_{out} και V_{be} σε χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες όπως τις παρατηρείτε στην οθόνη του παλμογράφου. Εξηγήστε τη λειτουργία του κυκλώματος. Σε ποιες χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας εργάζεται το τρανζίστορ στο παραπάνω κύκλωμα; Σημειώστε πάνω στο διάγραμμα σε ποια χαρακτηριστική περιοχή λειτουργίας βρίσκεται το τρανζίστορ την κάθε χρονική στιγμή.

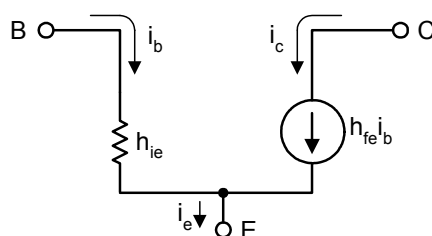
iii) Επαναλάβετε τα i) και ii) για ημιτονοειδή και τριγωνική κυματομορφή εισόδου $4V_{p-p}$ (στη συχνότητα του 1 KHz). Εξηγήστε και πάλι τι παρατηρείτε.

Ενισχυτής C. Ε.

Η ανάλυση των κυκλωμάτων ενισχυτών χωρίζεται σε δύο περιοχές. Αρχικά γίνεται μια ανάλυση για την εύρεση του σημείου ηρεμίας. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται **DC ανάλυση**. Για να γίνει αυτή η ανάλυση ανοιχτοκυκλώνονται (κόβεται η σύνδεση μέσω αυτών) οι πυκνωτές (άπειρη αντίσταση στο DC), βραχυκυκλώνονται οι AC πηγές τάσης και ανοιχτοκυκλώνονται οι AC πηγές έντασης.

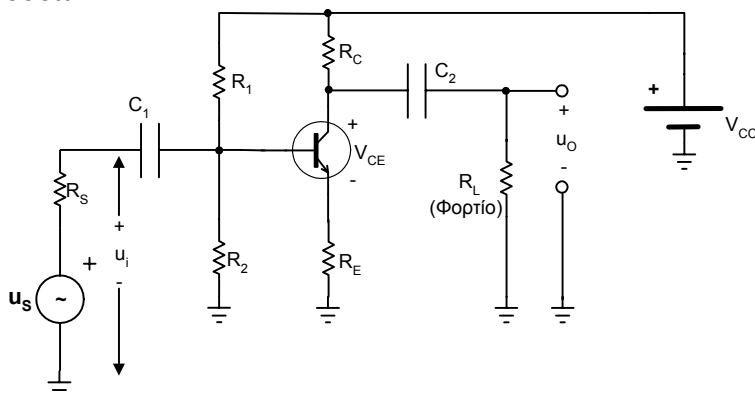
Στη συνέχεια εξετάζεται το κύκλωμα μέσα στη χρήσιμη περιοχή της AC λειτουργίας. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται **AC ανάλυση**. Κατά την AC ανάλυση αντικαθιστούμε το τρανζίστορ με το AC ισοδύναμό του κύκλωμα. Στη συνέχεια βραχυκυκλώνονται οι πυκνωτές (αμελητέα αντίσταση στην χρήσιμη περιοχή λειτουργίας), βραχυκυκλώνονται οι DC πηγές τάσης και ανοιχτοκυκλώνονται οι DC πηγές έντασης. Οι AC παράμετροι συμβολίζονται με μικρά γράμματα ενώ οι DC με κεφαλαία.

Το απλοποιημένο AC ισοδύναμο κύκλωμα για ένα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού φαίνεται στο Σχ. 3. Η παράμετρος h_{ie} παριστά την AC αντίσταση της βάσης και η h_{fe} είναι ίση με το β_{ac} .



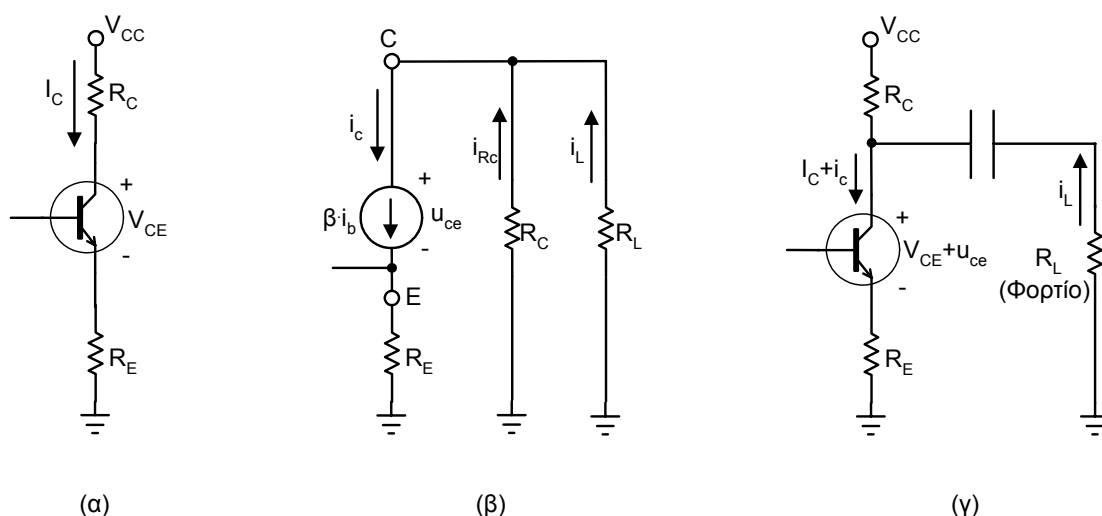
Σχ. 3. Το απλοποιημένο AC ισοδύναμο κοινού εκπομπού.

Το σύνολο των τάσεων και εντάσεων του κυκλώματος μπορεί να βρεθεί με υπέρθεση των δύο αναλύσεων.



Σχ.4. Γενική περίπτωση ενισχυτή κοινού εκπομπού.

Στο Σχ.4 φαίνεται η γενική περίπτωση του ενισχυτή κοινού εκπομπού και στο Σχ.5 η ανάλυση στο κύκλωμα του φορτίου.



Σχ. 5. (α) DC, (β) AC και (γ) συνολικό ισοδύναμο στο κύκλωμα του συλλέκτη.

Η αντίσταση που βλέπει στη σύνδεση συλλέκτη - εκπομπού το τρανζίστορ στην DC ανάλυση (συνεχές ρεύμα) είναι $R_{DC} = R_C + R_E$ (1), ενώ στην AC ανάλυση είναι $R_{ac} = R_E + R_C \parallel R_L$ (2). Οι αντίστοιχες τάσεις συλλέκτη – εκπομπού δίνονται:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} \cdot I_C \quad (3) \text{ (DC ευθεία φορτίου) και } u_{ce} = -R_{ac} \cdot i_c \quad (4)$$

Για το συνολικό ισοδύναμο μπορούμε να γράψουμε:

$$u_{CE} = u_{ce} + V_{CE} \quad (5) \text{ και } i_C = i_c + I_C \quad (6).$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις σχέσεις (3), (4) και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5), (6) βρίσκουμε:

$$u_{CE} = -R_{ac}(i_C - I_C) + V_{CC} - R_{dc} \cdot I_C \quad (7)$$

από την οποία παίρνουμε :

$$i_C = -\frac{1}{R_{ac}} \cdot u_{CE} + \frac{V_{CC} - (R_{dc} - R_{ac}) \cdot I_C}{R_{ac}} \quad (8)$$

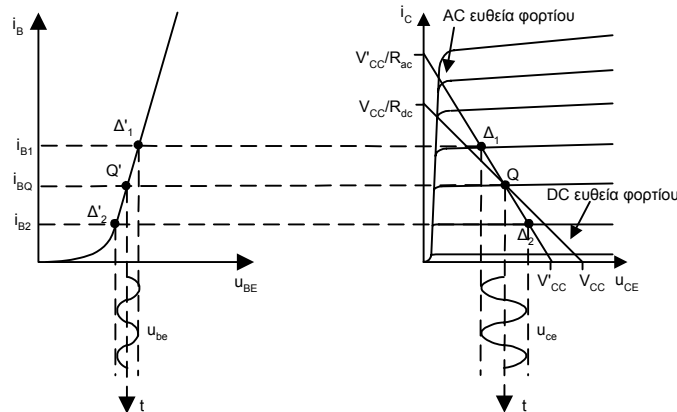
$$\text{ή} \quad i_C = -\frac{1}{R_{ac}} \cdot u_{CE} + \frac{V'_{CC}}{R_{ac}} \quad (9)$$

$$\text{όπου} \quad V'_{CC} = V_{CC} - (R_{dc} - R_{ac}) \cdot I_C \quad (10)$$

Η σχέση (9) αποτελεί την AC ευθεία φόρτου η οποία συσχετίζει το σύνθετο ρεύμα i_C που διαρρέει το τρανζίστορ με την σύνθετη τάση u_{CE} που αναπτύσσεται στα άκρα του. Παρόλο που τα μεγέθη αυτά δεν είναι μόνο εναλλασσόμενα, έχει επικρατήσει η ευθεία φόρτου να χαρακτηρίζεται ως AC. Η λειτουργία του ενισχυτή στηρίζεται στην AC ευθεία φόρτου.

Με βάση τη σχέση (3) μπορούμε να εκφράσουμε την DC ευθεία φόρτου σαν:

$$I_C = -\frac{1}{R_{dc}} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_{dc}} \quad (11)$$

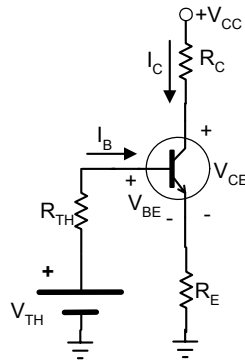


Σχ. 6. Διαγράμματα λειτουργίας ενισχυτή κοινού εκπομπού (C.E.)

Η AC τάση εισόδου u_i , προκαλεί ένα AC ρεύμα i_b στη βάση του τρανζίστορ και μια αντίστοιχη AC τάση u_{be} . Το συνολικό ρεύμα βάσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών i_{B1} και i_{B2} , όπως φαίνεται στη χαρακτηριστική εισόδου. Η διακύμανση αυτή του ρεύματος βάσης προκαλεί μία αντίστοιχη διακύμανση του ρεύματος συλλέκτη ανάμεσα στα σημεία λειτουργίας Δ_1 και Δ_2 , όπως φαίνεται στη χαρακτηριστική εξόδου. Η διακύμανση αυτή του ρεύματος συλλέκτη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πτώσης τάσης στα άκρα των αντιστάσεων R_L και R_C (βλ. Σχ. 5). Αυτή η πτώση τάσης αποτελεί το ενισχυμένο σήμα εξόδου u_o .

Πόλωση του ενισχυτή:

Για την μελέτη της πόλωσης του ενισχυτή είναι βολικό το κύκλωμα πόλωσης της βάσης να αντικατασταθεί με το ισοδύναμο του κατά Thevenin. Σε αυτήν την περίπτωση το κύκλωμα για την DC ανάλυση φαίνεται στο Σχ. 7.



Σχ. 7. DC ισοδύναμο του ενισχυτή.

Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται τα DC ρεύματα καθώς και οι DC τάσεις όπως εμφανίζονται στα διάφορα σημεία του κυκλώματος. Η αντίσταση R_{TH} και η τάση V_{TH} , που εικονίζονται στο σχήμα αυτό αποτελούν το κατά Thevenin ισοδύναμο του διαιρέτη τάσης R_1 , R_2 (Σχ. 4). Δηλαδή:

$$R_{TH} = R_1 // R_2 \Rightarrow R_{TH} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (12) \quad \text{και} \quad V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad (13)$$

Επίσης ισχύει: $V_{TH} = R_{TH} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E \Rightarrow V_{TH} = R_B \cdot \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + R_E \cdot I_C$

που γίνεται τελικά: $V_{TH} = \left(\frac{R_B}{\beta} + R_E\right) \cdot I_C + V_{BE}$ (14)

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν σχεδιαστικό εργαλείο στην περίπτωση που γνωρίζοντας το I_C , ζητάμε να προσδιορίσουμε τις τιμές των εξαρτημάτων R_1 και R_2 . Συνήθως η εκλογή του ρεύματος πόλωσης συλλέκτη I_C γίνεται έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας Q να βρίσκεται όσο το δυνατό στο μέσο της AC ευθείας φόρτου (βλ. Σχ. 6). Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζει λειτουργία του ενισχυτή με μέγιστο σήμα δίχως παραμόρφωση στην έξοδο.

Προκειμένου το Q να είναι στο μέσο της ευθείας φόρτου θα πρέπει για $u_{CE} = 0$ να είναι $i_C = 2 I_C$ (βλ. σχήμα 3) που σε συνδυασμό με την σχέση (8) δίνει:

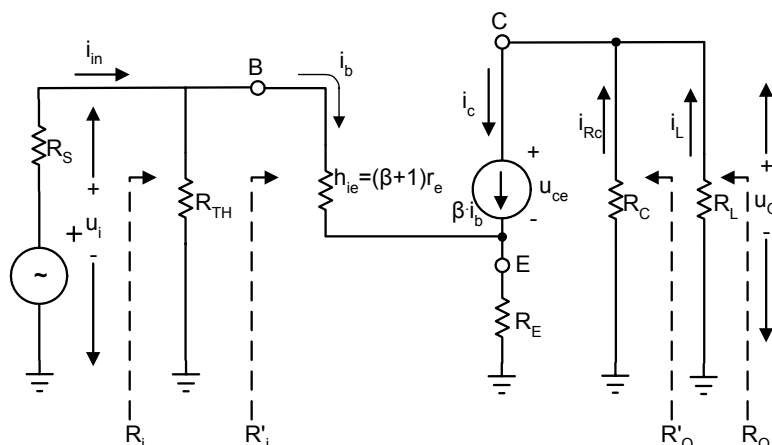
$$2 \cdot I_C = \frac{V_{CC} - (R_{dc} - R_{ac}) \cdot I_C}{R_{ac}} \quad (15)$$

ή $I_C = \frac{V_{CC}}{R_{dc} + R_{ac}} \quad (16)$

ή $V_{CE} = \frac{R_{ac} \cdot V_{CC}}{R_{dc} + R_{ac}} \quad (17)$

AC ανάλυση:

Στο Σχ. 8 φαίνεται το AC ισοδύναμο του ενισχυτή κοινού εκπομπού.



Σχ. 8. AC ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή CE.

Στο παραπάνω εικονιζόμενο AC ισοδύναμο του ενισχυτή CE αναγράφονται, εκτός των άλλων, οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου στα διάφορα σημεία του κυκλώματος οι οποίες υπολογίζονται αναλυτικά παρακάτω.

Αντίσταση εισόδου:

Από το Σχ. 8: $u_i = u_{be} + R_E \cdot (i_c + i_b) \Rightarrow u_i = (\beta + 1) \cdot r_e \cdot i_b + (\beta + 1) \cdot R_E \cdot i_b \quad (18)$

Οπότε :

$$R'_i = \frac{u_i}{i_b} = (\beta + 1) \cdot (r_e + R_E) \quad (19)$$

Όπου R'_i , η αντίσταση εισόδου στην βάση του τρανζίστορ και r_e η δυναμική αντίσταση του εκπομπού ($r_e \approx \frac{26\text{mV}}{I_E}$ στους 25°C).

Από τη σχέση (19) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\beta \gg 1$ και $R_E \gg r_e$, βρίσκουμε :

$$R'_i \approx \beta \cdot R_E \quad (20)$$

Λόγω της ύπαρξης της αντίστασης R_{TH} , η συνολική αντίσταση εισόδου του κυκλώματος R_i (η αντίσταση που «βλέπει» η γεννήτρια) είναι η $R'_i \parallel R_{TH}$, δηλαδή :

$$R_i \approx \frac{\beta \cdot R_E \cdot R_{TH}}{(\beta \cdot R_E + R_{TH})} \quad (21)$$

Αντίσταση εξόδου:

Επειδή η αντίσταση εξόδου στον συλλέκτη του τρανζίστορ (h_{oe}) είναι περίπου άπειρη (έχει πολύ μεγάλη τιμή, γεγονός που φαίνεται από την κλίση των χαρακτηριστικών συλλέκτη στην γραμμική περιοχή), η συνολική αντίσταση εξόδου (όπως αυτή φαίνεται από το φορτίο) είναι :

$$R'_o \approx R_C \quad (22)$$

Απολαβή τάσης:

Η απολαβή τάσης A_v , ορίζεται ως :

$$A_v = \frac{u_o}{u_i} \quad (23)$$

Από το Σχ. 8 διαπιστώνουμε ότι:

$$u_o = -R'_C \cdot i_c \Rightarrow u_o = -R'_C \cdot \beta \cdot i_b \quad (24)$$

Όπου:

$$R'_C = R_C \parallel R_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \quad (25)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (23), (24) και (18) βρίσκουμε τελικά:

$$A_v = \frac{-\beta \cdot R'_C}{(\beta + 1)(r_e + R_E)} \approx \frac{-R'_C}{R_E} \quad (26)$$

Απολαβή ρεύματος:

Η απολαβή ρεύματος του τρανζίστορ είναι:

$$A_{iT} = \frac{i_c}{i_b} = \beta \quad (27)$$

Η απολαβή ρεύματος του κυκλώματος είναι:

$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} \quad (28)$$

Όμως:
$$i_{in} = \frac{R_{TH} + R'_i}{R_{TH}} \cdot i_b \quad (29) \quad \text{και} \quad i_L = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \beta \cdot i_b \quad (30)$$

Οι σχέσεις (29), (30) προκύπτουν από τους διαιρέτες ρεύματος $R_{TH} - R'_i$ και $R_C - R_L$ στην είσοδο και στην έξοδο του κυκλώματος αντίστοιχα. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (28), (29) και (30), βρίσκουμε τελικά ότι:

$$A_i = \frac{R_{TH}}{R_{TH} + R'_i} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \beta \quad (31)$$

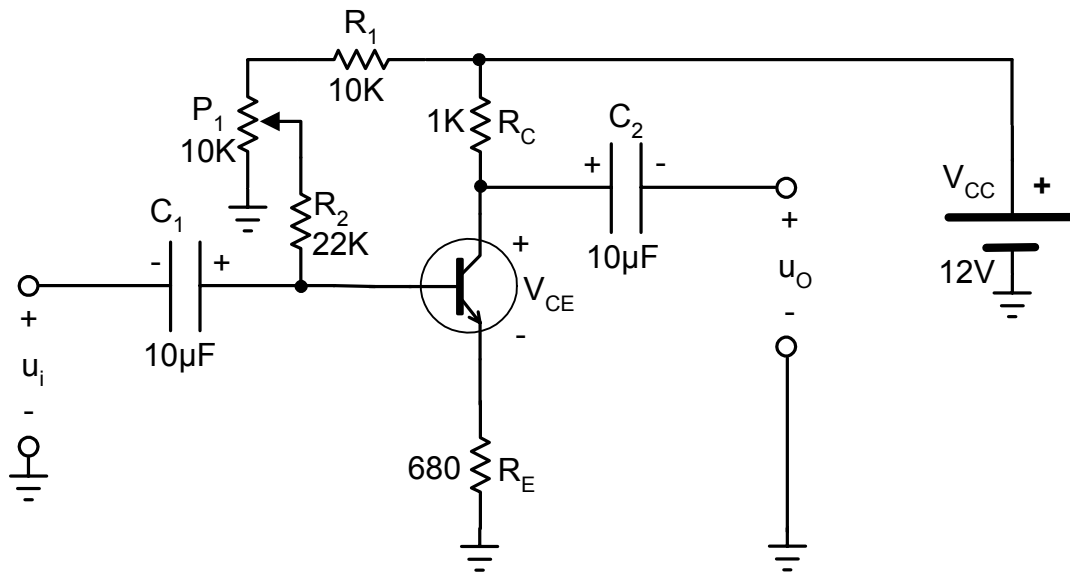
Απολαβή ισχύος:

Η απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος είναι ο λόγος της ισχύος στην αντίσταση φορτίου προς την παρεχόμενη ισχύ στην είσοδο και ισούται με το γινόμενο της απολαβής τάσης επί την απολαβή ρεύματος:

$$A_p = \frac{u_o \cdot i_L}{u_i \cdot i_{in}} = A_u \cdot A_i \quad (32)$$

Πείραμα (μέτρηση αντιστάσεων εισόδου, εξόδου και απολαβής τάσης χωρίς φορτίο):

Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα:



Ποια η χρησιμότητα των πυκνωτών C_1 και C_2 ;

ι) Προκειμένου το παραπάνω κύκλωμα να λειτουργήσει ως ενισχυτής του σήματος u_i με μέγιστη συμμετρική διαδρομή στην τάση εξόδου, απαιτείται το σημείο λειτουργίας Q να τοποθετηθεί όσο το δυνατό πλησιέστερα στο μέσο της ευθείας φόρτου (βλ. Σχ. 6). Γι' αυτό, ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P_1 έτσι ώστε να πετύχετε την βέλτιστη V_{CE} που δίνεται από τη σχέση (17).

ii) Συνδέστε γεννήτρια ακουστικού σήματος συχνότητας 1KHz στην είσοδο του κυκλώματος. Παρατηρώντας στον παλμογράφο τόσο το σήμα εισόδου όσο και το σήμα στην έξοδο. Ρυθμίζετε πάντα το πλάτος του σήματος της γεννήτριας έτσι ώστε να έχετε σήμα χωρίς παραμόρφωση στην έξοδο (λειτουργία μόνο στη γραμμική περιοχή). Μετρήστε τις τάσεις εισόδου u_{ip-p} και εξόδου u_{op-p} και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 1.

iii) Τοποθετήστε σε σειρά, ανάμεσα στη γεννήτρια και την είσοδο του κυκλώματος, ένα ροοστάτη. Ρυθμίστε την αντίσταση του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την αντίσταση του με ένα πολύμετρο. Η τιμή αυτή της αντίστασης ισούται με την αντίσταση εισόδου R_i του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σημειώστε την τιμή της R_i στο αντίστοιχο πεδίο του πίνακα μετρήσεων.

iv) Συνδέστε και πάλι τη γεννήτρια ακουστικού σήματος απευθείας στην είσοδο του κυκλώματος. Συνδέστε ροοστάτη ως αντίσταση φορτίου R_L , στην έξοδο του κυκλώματος (παράλληλα). Ρυθμίστε την τιμή της αντίστασης του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την τιμή της αντίστασης του με ένα πολύμετρο. Η τιμή της αντίστασης αυτής ισούται με την αντίσταση εξόδου R_o του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σημειώστε την τιμή της R_o στο αντίστοιχο πεδίο του πίνακα 1.

v) Επαναλάβετε τα i), ii), iii), iv) για $R_C = 2,2K$ και για $R_C = 4,7K$ και συμπληρώστε τα υπόλοιπα πεδία του πίνακα 1. Συγκρίνεται τις πειραματικά υπολογιζόμενες κάθε φορά τιμές για την απολαβή τάσης και την αντίσταση εξόδου με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές και σχολιάστε τυχόν διαφορές.

R_C (KΩ)	U_i (mVp-p)	U_o (Vp-p)	R_i (Ω) (πειρ.)	R_o (Ω) (πειρ.)	R_o (Ω) (θεωρ.)	A_u (πειρ.)	A_u (θεωρ.)

Πίνακας 1. Μετρήσεις χωρίς φορτίο στην έξοδο.

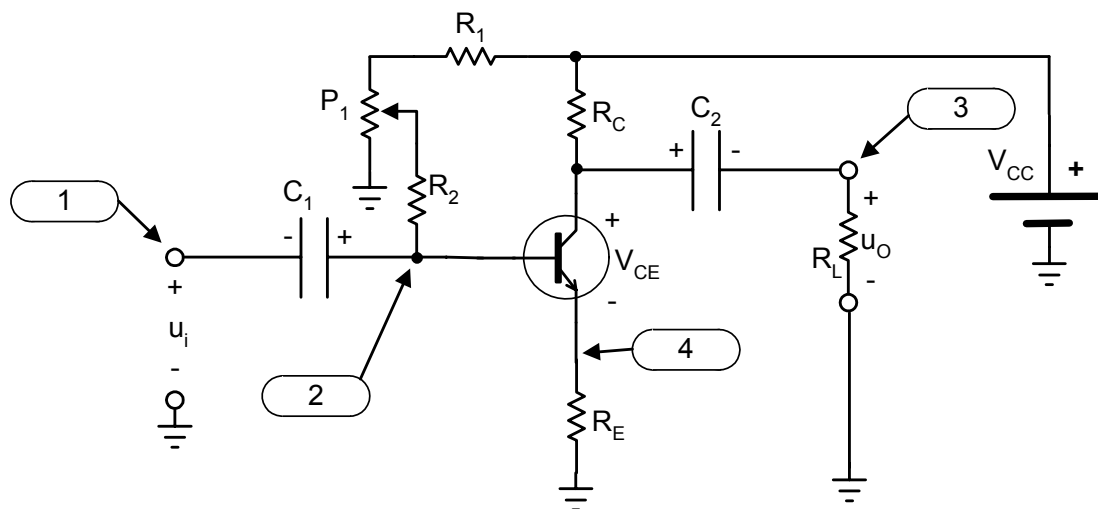
vi) Επαναλάβετε τα βήματα i), ii) και iii) για $R_C = 1K$, $R_C = 2,2K$ και $R_C = 4,7K$ έχοντας όμως αυτή τη φορά συνδεδεμένο στην έξοδο του κυκλώματος φορτίο $R_L = 1KΩ$ και συμπληρώστε πεδία του Πίνακα 2.

R_C (KΩ)	U_i (mVp-p)	U_o (Vp-p)	R_i (Ω) (πειρ.)	A_u (πειρ.)	A_u (θεωρ.)	A_i (πειρ.)	A_p (πειρ.)

Πίνακας 2. Μετρήσεις με φορτίο $R_L = 1KΩ$ στην έξοδο

vii) Για την περίπτωση που $R_C = 4,7K$, συνδέστε έναν πυκνωτή 10μF παράλληλα με την R_E και μετρήστε την απολαβή τάσης. Τι παρατηρείτε; Σχολιάστε και εξηγήστε το αποτέλεσμα. (Η συχνότητα της γεννήτριας είναι 1KHz και όλες οι μετρήσεις γίνονται για απαραμόρφωτο σήμα στην έξοδο).

viii) Για την περίπτωση που $R_C = 4,7K$, συνδέστε τον παλμογράφο στα σημεία που υποδεικνύονται στο παρακάτω σχήμα και σχεδιάστε τα σήματα που παρατηρείτε σε απόλυτη χρονική αντιστοιχία και σε βαθμονομημένους άξονες.



Υποδείξεις :

Προκειμένου να συμπληρωθούν τα στοιχεία στους πίνακες χρησιμοποιείστε την σχέση (23) για τον υπολογισμό της απολαβής τάσης, την σχέση (28) για την απολαβή ρεύματος λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον ότι $i_L = u_o / R_L$ και $i_{in} = u_i / R_i$, και την σχέση (32) για τον υπολογισμό της απολαβής ισχύος.

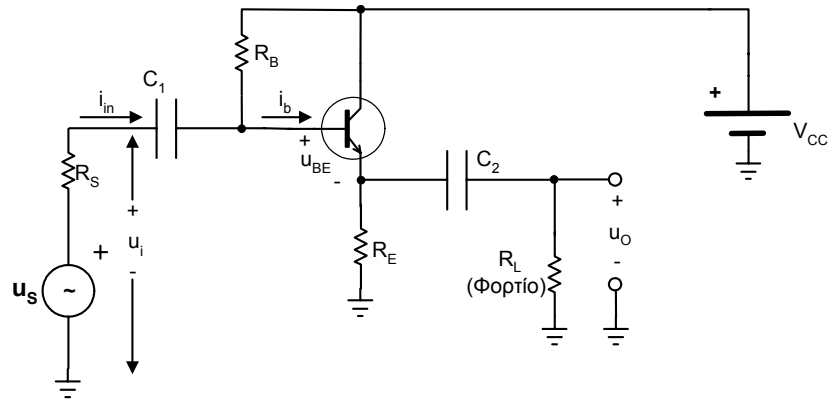
Ερωτήσεις :

- 1) Πως επιδρά η αντίσταση R_C στην απολαβή τάσης;
- 2) Πως επιδρά η αντίσταση φορτίου στην απολαβή τάσης;
- 3) Έχει νόημα να μιλάμε για απολαβή ρεύματος και ισχύος στην περίπτωση που δεν έχουμε φορτίο στην έξοδο του κυκλώματος;
- 4) Στην περίπτωση που δεν έχουμε φορτίο στην έξοδο του κυκλώματος, έχουμε απολαβή τάσης;
- 5) Ποια είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου;
- 6) Από τις μετρήσεις που λάβατε, μπορείτε να υπολογίσετε το κέρδος ρεύματος (β) του τρανζίστορ;

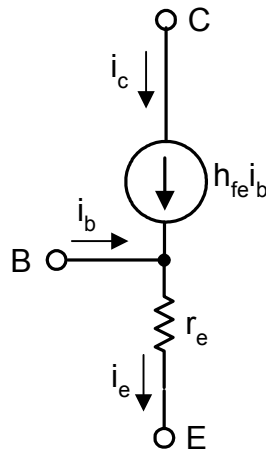
Εργαστηριακή Άσκηση 3

Ενισχυτής κοινού συλλέκτη (C.C. – ακόλουθος εκπομπού)

Η συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη χρησιμοποιείται κυρίως για προσαρμογή αντιστάσεων. Μια τυπική συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη φαίνεται στο Σχ. 1.

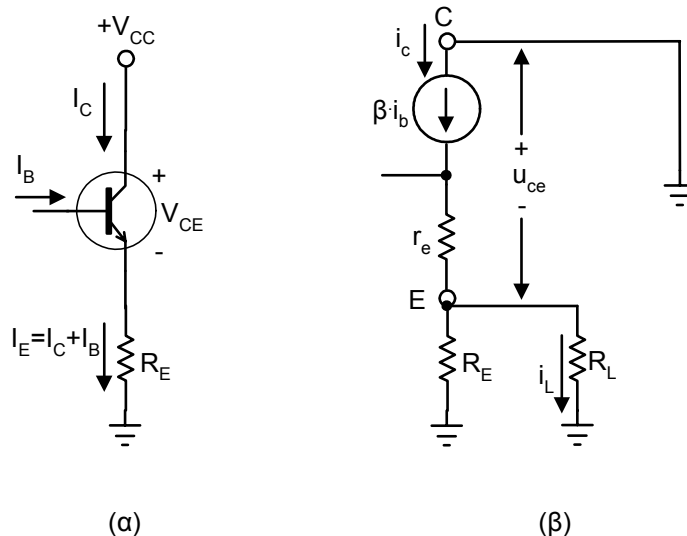


Ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη δεν πραγματοποιεί ενίσχυση τάσης, αλλά παρέχει τάση στην έξοδο του σχεδόν ίση με την τάση της εισόδου του, γι αυτό και λέγεται ακολουθητής τάσης (συνήθως αναφέρεται και ως ακόλουθος εκπομπού, διότι συνήθως χρησιμοποιείται σε διαδοχή μετά από μία βαθμίδα C.E). Παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εξόδου, ιδιότητες που επιτρέπουν τη χρήση του ως βαθμίδα απομόνωσης (buffer). Δηλαδή, μπορεί να οδηγηθεί από πηγή σήματος με υψηλή εσωτερική αντίσταση και να οδηγήσει, με την ίδια σχεδόν τάση της πηγής, ένα φορτίο R_L χαμηλής αντίστασης. Για την AC ανάλυση της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη χρησιμοποιείται συνήθως το ισοδύναμο του Σχ. 2.



Σχ. 2. AC ισοδύναμο για τη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη.

Και τα δύο ισοδύναμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση και δίνουν φυσικά τα ίδια αποτελέσματα. Η επιλογή του ισοδύναμου γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πράξεις. Η αντίσταση r_e είναι η δυναμική αντίσταση του εκπομπού ($r_e \approx \frac{25\text{mV}}{I_E}$ στους 25°C) που έχει ήδη αναφερθεί στην προηγούμενη άσκηση.



Σχ. 3. α) DC και β) AC ισοδύναμο στο κύκλωμα του συλλέκτη.

Πόλωση του ενισχυτή C.C:

Για την πόλωση του ενισχυτή C.C. ισχύουν τα ίδια με την περίπτωση του ενισχυτή C.E. που έχει ήδη αναλυθεί. Δηλαδή, οι ευθείες φόρτου μπορούν να χαραχθούν κατά τα γνωστά, με την μόνη διαφορά σε σχέση με τον ενισχυτή C.E., ότι για την περίπτωση του κοινού συλλέκτη είναι :

$$R_{DC} = R_E \quad (1)$$

και
$$R_{ac} = R_E // R_L \quad (2)$$

Η απαιτούμενη τιμή της R_B για την πόλωση είναι:

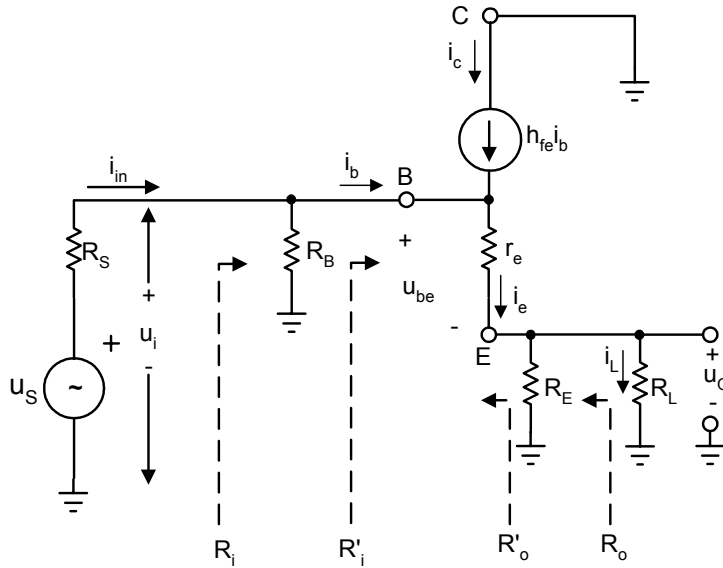
$$R_B = \frac{V_{CC} - V_B}{I_B} \quad (3)$$

Όπου
$$V_B = R_E \cdot I_C + V_{BE} \quad (4)$$

Και
$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (5)$$

Αξίζει να επισημάνουμε και πάλι ότι η R_B επιλέγεται συνήθως να έχει τέτοια τιμή έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας του κυκλώματος να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στο μέσο της ευθείας φόρτου. Αντί της R_B είναι δυνατό να επιλέξουμε να χρησιμοποιήσουμε διαιρέτη τάσης για την πόλωση της βάσης. Στην περίπτωση αυτή η R_B θα αντιπροσωπεύει το κατά Thevenin ισοδύναμο του διαιρέτη τάσης.

AC προσεγγιστική ανάλυση:



Σχ. 4. AC ισοδύναμο κύκλωμα κοινού συλλέκτη.

Στο Σχ. 4 εικονίζεται το AC ισοδύναμο του ενισχυτή CE και αναγράφονται οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου στα διάφορα σημεία του κυκλώματος, οι οποίες και υπολογίζονται αναλυτικά παρακάτω.

Αντίσταση εισόδου:

Από το Σχ. 4, έχουμε :

$$u_i = u_{be} + i_e \cdot (R_E // R_L) \Rightarrow u_i = u_{be} + (\beta + 1) \cdot i_b \cdot R_{ac} \quad (6)$$

$$\text{Όμως:} \quad u_{be} = (\beta + 1) \cdot r_e \cdot i_b \quad (7)$$

$$\text{Επομένως:} \quad u_i = (\beta + 1) \cdot r_e \cdot i_b + i_b \cdot (\beta + 1) \cdot R_{ac} \quad (8)$$

Όπου r_e η AC δυναμική αντίσταση της επαφής του εκπομπού ($r_e = \frac{25\text{mV}}{I_E}$).

Επομένως, η αντίσταση εισόδου R_i' , στην βάση του τρανζίστορ θα είναι :

$$R_i' = \frac{u_i}{i_b} = (\beta + 1) \cdot (r_e + R_{ac}) \quad (9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας $r_e \ll R_{ac}$ και ότι $\beta + 1 \approx \beta$, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά ως:

$$R_i' \approx \beta \cdot R_{ac} \quad (10)$$

Λόγω της ύπαρξης της αντίστασης R_B , η συνολική αντίσταση εισόδου του κυκλώματος R_i (η αντίσταση που «βλέπει» η πηγή του σήματος) είναι:

$$R_i = R_B // R_i' \quad (11)$$

Αντίσταση εξόδου:

Από το Σχ. 4 διαπιστώνουμε ότι: $R'_s \cdot i_b + u_{be} + u_o = 0$ (12)

Όπου $R'_s = R_s // R_b = \frac{R_s \cdot R_b}{R_s + R_b}$ (13)

Η σχέση (12) μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$u_o = -u_{be} - R'_s \cdot i_b = r_e \cdot i_e + \frac{R'_s}{\beta + 1} \cdot i_e \quad (14)$$

Επομένως η αντίσταση εξόδου R_o' , στον εκπομπό του τρανζίστορ, θα είναι:

$$R_o' = \frac{u_o}{i_e} = r_e + \frac{R'_s}{\beta + 1} \approx r_e + \frac{R'_s}{\beta} \quad (15)$$

Η συνολική αντίσταση εξόδου R_o (δηλ. η αντίσταση εξόδου που «φαίνεται» από το φορτίο) είναι:

$$R_o = R_o' // R_E \quad (16)$$

Παρατηρώντας τις σχέσεις (15) και (16) και λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση r_e είναι πολύ μικρή ενώ επιπλέον το β είναι ένας σχετικά μεγάλος αριθμός, διαπιστώνουμε ότι η συνολική αντίσταση εξόδου είναι περίπου η R_s' υποβιβασμένη κατά β φορές – δηλαδή, ο κοινός συλλέκτης υποβιβάζει την εσωτερική αντίσταση R_s της πηγής τουλάχιστο κατά β φορές

Απολαβή τάσης:

Η ολική απολαβή τάσης A_u ορίζεται ως ο λόγος της τάσης στην έξοδο προς την τάση εισόδου. Παρατηρώντας το Σχ. 4, καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση, όσον αφορά την A_u :

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_{ac} \cdot i_e}{R'_i \cdot i_b} = \frac{(\beta + 1) \cdot i_b \cdot R_{ac}}{R'_i \cdot i_b} = \frac{(\beta + 1) \cdot i_b \cdot R_{ac}}{(\beta + 1) \cdot (R_{ac} + r_e) \cdot i_b} = \frac{R_{ac}}{R_{ac} + r_e} \Rightarrow A_u \approx 1 \quad (17)$$

Η ολική απολαβή τάσης είναι περίπου 1, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού $u_i = u_{be} + u_o$, όπου όμως η u_{be} είναι πάντοτε λίγα mV, επομένως $u_o \approx u_i$.

Απολαβή ρεύματος:

Η απολαβή ρεύματος A_{IT} του τρανζίστορ είναι

$$A_{IT} = \frac{i_e}{i_b} = \frac{i_c + i_b}{i_b} = \beta + 1 \approx \beta \quad (18)$$

Ενώ η ολική απολαβή ρεύματος του κυκλώματος είναι:

$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} \quad (19)$$

Ομως:

$$i_{in} = \frac{R_b + R'_i}{R_b} \cdot i_b \quad (20)$$

και

$$i_L = \frac{R_E}{R_L + R_E} \cdot (\beta + 1) \cdot i_b \quad (21)$$

Οι σχέσεις (20), (21) προκύπτουν από τους διαιρέτες ρεύματος $R_b - R'_i$ και $R_o - R_L$ στην είσοδο και στην έξοδο του κυκλώματος αντίστοιχα. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (19) (20) (21), βρίσκουμε τελικά ότι:

$$A_i = \frac{R_b}{R_b + R'_i} \cdot \frac{R_E}{R_E + R_L} \cdot (\beta + 1) \Rightarrow A_i \approx \frac{R_b}{R_b + R'_i} \cdot \beta \quad (22)$$

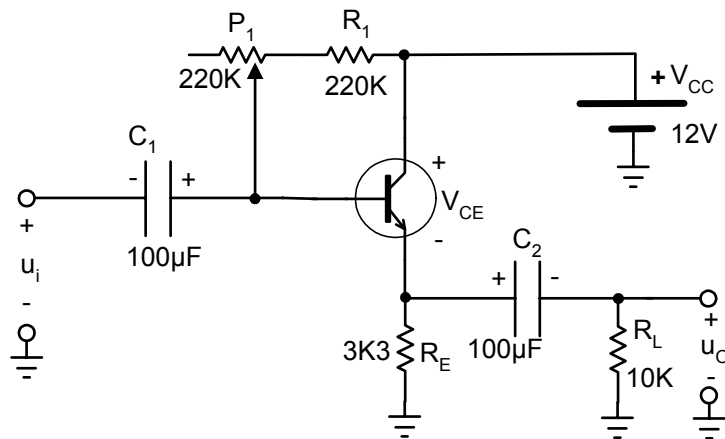
Απολαβή ισχύος:

Η απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος είναι ο λόγος της ισχύος στην αντίσταση φορτίου προς την παρεχόμενη ισχύ στην είσοδο και ισούται με το γινόμενο της απολαβής τάσης επί την απολαβή ρεύματος:

$$A_p = \frac{u_o \cdot i_L}{u_i \cdot i_{in}} = A_u \cdot A_i \quad (23)$$

Πείραμα (μέτρηση αντιστάσεων εισόδου, εξόδου και απολαβής τάσης χωρίς φορτίο):

Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα:



i) Προκειμένου το σημείο λειτουργίας Q να τοποθετηθεί όσο το δυνατό πλησιέστερα στο μέσο της ευθείας φόρτου, πρέπει να ρυθμίσετε το ποτενσιόμετρο P_1 έτσι ώστε να πετύχετε την βέλτιστη V_{CE} . (βλ. σχέση 17, από την θεωρία του ενισχυτή CE).

ii) Συνδέστε γεννήτρια ακουστικού σήματος συχνότητας 1KHz στην είσοδο του κυκλώματος. Παρατηρώντας στον παλμογράφο τόσο το σήμα εισόδου όσο και το σήμα εξόδου, ρυθμίστε το πλάτος του σήματος της γεννήτριας έτσι ώστε να έχετε σήμα χωρίς παραμόρφωση στην έξοδο. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου $u_{i\ p-p}$ και εξόδου $u_{o\ p-p}$ και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία του πίνακα 1.

iii) Τοποθετήστε σε σειρά ανάμεσα στη γεννήτρια και την είσοδο του κυκλώματος ροοστάτη. Ρυθμίστε την αντίσταση του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την αντίσταση του με ένα πολύμετρο. Η τιμή αυτή της αντίστασης ισούται με την αντίσταση εισόδου R_i του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σημειώστε την τιμή της R_i στο αντίστοιχο πεδίο του πίνακα μετρήσεων.

iv) Επαναλάβετε τα i) και ii) iii) για αντιστάσεις φορτίου 1MΩ, 100KΩ, 4,7KΩ, 1KΩ, 330Ω, 100Ω

R_L (K Ω)	U_i (mVp-p)	U_o (mVp-p)	R_i (Ω)	A_i	A_u	A_p

Πίνακας 1. Πειραματικές τιμές.

ν) Από τις μετρήσεις σας, υπολογίστε την απολαβή τάσης A_u , την απολαβή ρεύματος A_i καθώς και την απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος σε κάθε περίπτωση. Σχολιάστε τα αποτελέσματα. Τα A_u , A_i , εξαρτώνται από το φορτίο R_L ;

vi) Συνδέστε και πάλι τη γεννήτρια ακουστικού σήματος απευθείας στην είσοδο του κυκλώματος. Αφαιρέστε την αντίσταση φορτίου R_L και στη θέση της συνδέστε ροοστάτη. Ρυθμίστε την τιμή της αντίστασης του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την τιμή της αντίστασης του με ένα πολύμετρο. Η τιμή της αντίστασης αυτής ισούται με την αντίσταση εξόδου R_o του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σχολιάστε το αποτέλεσμα.

vii) Για την περίπτωση που έχετε συνδεμένη αντίσταση φορτίου $R_L=1M\Omega$, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές u_i και u_o σε βαθμονομημένους άξονες και σε πλήρη χρονική αντιστοιχία. Πόση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών σημάτων;

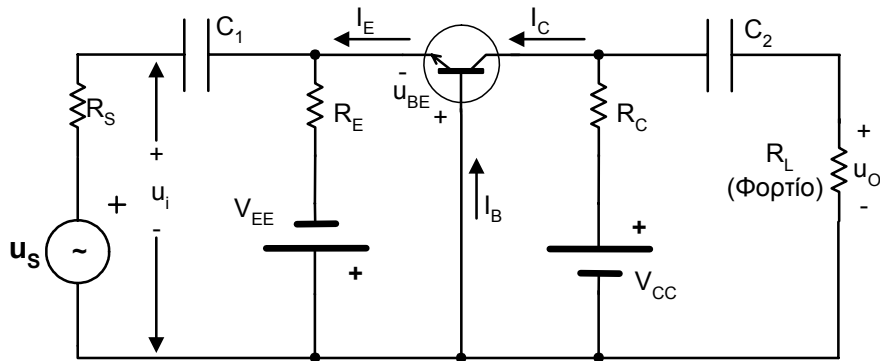
Υποδείξεις :

Προκειμένου να συμπληρωθεί ο πίνακας 1, χρησιμοποιείτε την σχέση $A_u = u_o / u_i$ για τον υπολογισμό της απολαβής τάσης, την σχέση (19) για την απολαβή ρεύματος λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον ότι $i_L = u_o / R_L$ και $i_{in} = u_i / R_i$, και την σχέση (23) για τον υπολογισμό της απολαβής ισχύος.

Εργαστηριακή Άσκηση 4

Ενισχυτής κοινής βάσης (C.B.)

Ο ενισχυτής κοινής βάσης μπορεί να προσφέρει υψηλό κέρδος τάσης, αλλά έχει τα μειονεκτήματα ότι η αντίσταση εισόδου του είναι πολύ χαμηλή και το κέρδος ρεύματος μικρότερο της μονάδας. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων γιατί προσφέρει καλύτερη απόκριση στις υψηλές συχνότητες σε σχέση με τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Ένας τυπικός ενισχυτής κοινής βάσης φαίνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1. Ενισχυτής κοινής βάσης (C.B.)

Πόλωση του ενισχυτή:

Από το Σχ. 1 διαπιστώνουμε ότι:

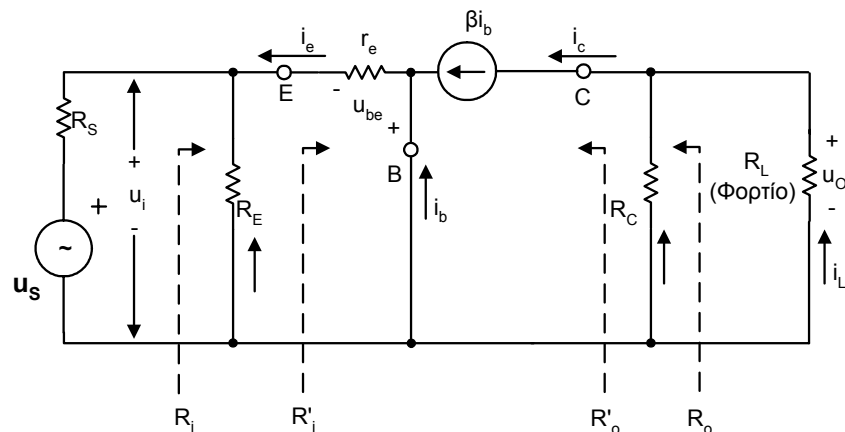
$$I_E = -\frac{1}{R_E} \cdot V_{BE} + \frac{V_{EE}}{R_E} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) ορίζει την ευθεία φόρτου που αφορά το κύκλωμα εισόδου του ενισχυτή. Προσεγγιστικά, θεωρώντας ότι $V_{BE} \approx 0,7V$, η σχέση (1) γίνεται:

$$I_E = \frac{V_{EE} - 0,7V}{R_E} \quad (2)$$

AC ανάλυση:

Για την AC ανάλυση του ενισχυτή κοινής βάσης είναι βολικό να χρησιμοποιηθεί το ίδιο ισοδύναμο που χρησιμοποιείται και για την ανάλυση του κοινού συλλέκτη. Στο Σχ. 2 φαίνεται το AC ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή κοινής βάσης.



Σχ. 2. AC ισοδύναμο ενισχυτή κοινής βάσης.

Αντίσταση εισόδου:

Η αντίσταση εισόδου R_i που «βλέπει» η πηγή του σήματος εισόδου είναι:

$$R_i = \frac{u_i}{i_{in}} = \frac{u_i}{u_i / (r_e // R_E)} = r_e // R_E \approx r_e \quad (3)$$

Παρατηρούμε ότι η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή CB έχει εξαιρετικά μικρή τιμή (μερικά Ω). Το γεγονός αυτό συνιστά μειονέκτημα που πρακτικώς καθιστά τον ενισχυτή CB ακατάλληλο για τις περισσότερες εφαρμογές στις οποίες η εσωτερική αντίσταση R_S της πηγής σήματος είναι συγκρίσιμη με την R_i .

Αντίσταση εξόδου:

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση εξόδου του τρανζίστορ στον ακροδέκτη του συλλέκτη είναι πολύ μεγάλη καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση εξόδου που «βλέπει» το φορτίο είναι περίπου ίση με την αντίσταση R_C .

Απολαβή τάσης:

Η ολική απολαβή τάσης A_u ορίζεται ως ο λόγος της τάσης u_o στο φορτίο προς την τάση u_i στην είσοδο του κυκλώματος. Δηλαδή:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-(R_C // R_L) \cdot i_c}{-i_c \cdot r_e} = \frac{(R_C // R_L)}{r_e} \quad (4)$$

Επειδή η αντίσταση r_e έχει μικρή σχετικά τιμή, η απολαβή τάσης του ενισχυτή CB είναι σχετικά μεγάλη.

Απολαβή ρεύματος:

Η ολική απολαβή ρεύματος, A_i ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος i_L στο φορτίο, προς το ρεύμα εισόδου i_{in} :

$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} = \frac{u_o / R_L}{u_i / R_i} \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας από τις σχέσεις (4) και (3), στην (5), έχουμε τελικά:

$$A_i = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_E}{R_E + r_e} \approx \frac{R_C}{R_C + R_L} \quad (6)$$

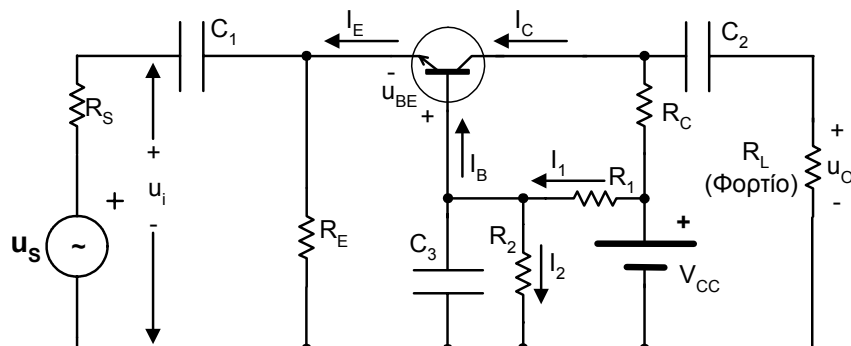
Απολαβή ισχύος:

Η απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος είναι ο λόγος της ισχύος στην αντίσταση φορτίου προς την παρεχόμενη ισχύ στην είσοδο και ισούται με το γινόμενο της απολαβής τάσης επί την απολαβή ρεύματος:

$$A_p = \frac{u_o \cdot i_L}{u_i \cdot i_{in}} = A_u \cdot A_i \quad (7)$$

Ενισχυτής C.B με μια πηγή τάσης :

Χρησιμοποιώντας την συνδεσμολογία του Σχ. 4, είναι δυνατό να υλοποιήσουμε κύκλωμα ενισχυτή CB με μια πηγή τάσης. Στην περίπτωση αυτή ο διαιρέτης τάσης R_1 , R_2 , εξασφαλίζει την τάση πόλωσης της βάσης ενώ ο πυκνωτής C_3 εξασφαλίζει τη σύνδεση της βάσης στον κοινό κόμβο εισόδου και εξόδου για τα AC σήματα.



Σχ. 4. Ενισχυτής κοινής βάσης με μια πηγή τροφοδοσίας

Η AC ανάλυση του κυκλώματος του Σχ. 4 δεν διαφέρει σε τίποτα από την γενική περίπτωση που αναλύθηκε έως τώρα. Όσον αφορά την DC ανάλυση, θεωρώντας σαν κόμβο αναφοράς τον κοινό κόμβο εισόδου-εξόδου και ότι δηλαδή το ρεύμα βάσης είναι αμελητέο σε σχέση με τα ρεύματα I_1 και I_2 η τάση της βάσης μπορεί να βρεθεί:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad (8)$$

Επιπλέον ισχύει:
$$V_B = V_{BE} + I_E \cdot R_E \quad (9)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (8) και (9) καταλήγουμε στη σχέση (10), η οποία ορίζει την ευθεία φόρτου στο κύκλωμα της βάσης:

$$I_E = -\frac{1}{R_E} \cdot V_{BE} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{V_{CC}}{R_E} \quad (10)$$

Αντίστοιχα, για το κύκλωμα εξόδου έχουμε

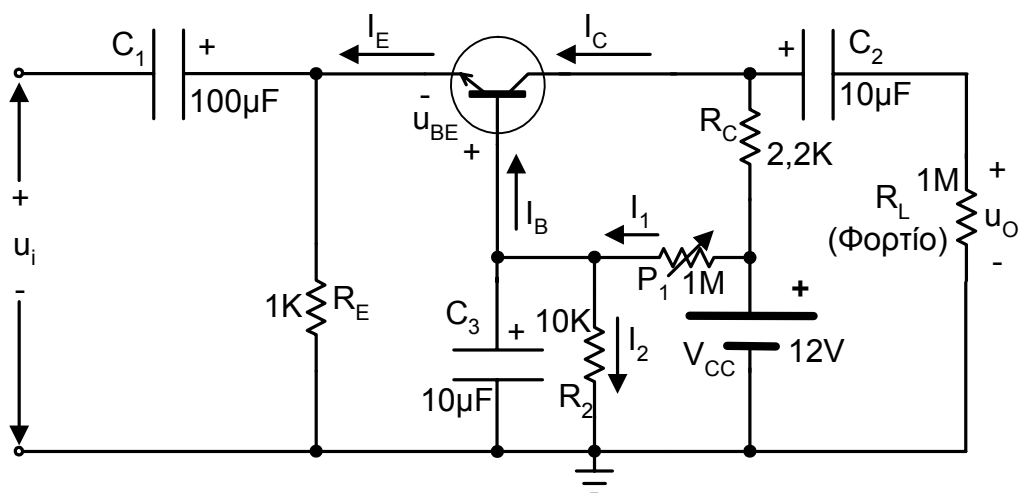
$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CB} + V_B \quad (11)$$

που σε συνδυασμό με την σχέση (8) δίνει τη σχέση (12) η οποία ορίζει την DC ευθεία φόρτου στο κύκλωμα του συλλέκτη.

$$I_C = -\frac{1}{R_C} \cdot V_{CB} + \frac{V_{CC}}{R_C} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (12)$$

Πείραμα (μέτρηση αντιστάσεων εισόδου, εξόδου και απολαβής τάσης χωρίς φορτίο):

Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα:



i) Προκειμένου το παραπάνω κύκλωμα να λειτουργήσει ως ενισχυτής του σήματος u_i με όσο το δυνατό μεγαλύτερη δυναμική περιοχή, απαιτείται το σημείο λειτουργίας Q να τοποθετηθεί όσο το δυνατό πλησιέστερα στο μέσο της ευθείας φόρτου. Γι' αυτό, ρυθμίστε κατάλληλα το ποτενσιόμετρο P_1 .

ii) Συνδέστε γεννήτρια ακουστικού σήματος συχνότητας 1KHz στην είσοδο του κυκλώματος. Παρατηρώντας στον παλμογράφο τόσο το σήμα εισόδου όσο και το σήμα εξόδου, ρυθμίστε το πλάτος του σήματος της γεννήτριας έτσι ώστε να έχετε σήμα χωρίς παραμόρφωση στην έξοδο. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου $u_{i\text{ p-p}}$ και εξόδου $u_{o\text{ p-p}}$ και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία του Πίνακα 1.

iii) Να σχεδιάσετε τις κυματομορφές u_i και u_o σε βαθμονομημένους άξονες και σε πλήρη χρονική αντιστοιχία. Πόση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών σημάτων;

iv) Τοποθετήστε σε σειρά ανάμεσα στη γεννήτρια και την είσοδο του κυκλώματος ροοστάτη. Ρυθμίστε την αντίσταση του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την αντίσταση του με ένα πολύμετρο. Η τιμή αυτή της αντίστασης ισούται με την αντίσταση εισόδου R_i του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σημειώστε την τιμή της R_i στο αντίστοιχο πεδίο του πίνακα μετρήσεων.

v) Επαναλάβετε τα i) και ii) iv) για αντιστάσεις φορτίου 100KΩ, 10K, 4,7K, 2,2K, 1K, 330Ω

R_L (KΩ)	U_i (mVp-p)	U_o (mVp-p)	R_i (Ω)	A_i	A_u	A_p

Πίνακας 1. Πειραματικές τιμές

vi) Από τις μετρήσεις σας, υπολογίστε την απολαβή τάσης A_u , την απολαβή ρεύματος A_i καθώς και την απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος σε κάθε περίπτωση. Σχολιάστε τα αποτελέσματα. Τα A_u , A_i , εξαρτώνται από το φορτίο R_L ;

vii) Συνδέστε και πάλι τη γεννήτρια ακουστικού σήματος απευθείας στην είσοδο του κυκλώματος. Αφαιρέστε την αντίσταση φορτίου R_L και στη θέση της συνδέστε ροοστάτη. Ρυθμίστε την τιμή της αντίστασης του ροοστάτη έτσι ώστε το σήμα εξόδου να λάβει το μισό της αρχικής του τιμής. Αποσυνδέστε τότε τον ροοστάτη από το κύκλωμα και μετρήστε την τιμή της αντίστασης του με ένα πολύμετρο. Η τιμή της αντίστασης αυτής ισούται με την αντίσταση εξόδου R_o του κυκλώματος. Εξηγήστε γιατί συμβαίνει αυτό. Σχολιάστε το αποτέλεσμα.

Υποδείξεις :

Προκειμένου να συμπληρωθεί ο πίνακας 1, χρησιμοποιείτε την σχέση $A_u = u_o / u_i$ για τον υπολογισμό της απολαβής τάσης, την σχέση (5) για την απολαβή ρεύματος και την σχέση (7) για τον υπολογισμό της απολαβής ισχύος.

Ερωτήσεις :

- 1) Πως επιδρά η αντίσταση φορτίου στην απολαβή τάσης;
- 2) Έχει νόημα να μιλάμε για απολαβή ρεύματος και ισχύος στην περίπτωση που δεν έχουμε φορτίο στην έξοδο του κυκλώματος;
- 3) Στην περίπτωση που δεν έχουμε φορτίο στην έξοδο του κυκλώματος, έχουμε απολαβή τάσης;
- 5) Ποια είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου;

Εργαστηριακή Άσκηση 5

Απόκριση συχνότητας ενισχυτών

Εξετάζοντας τις γενικές εκφράσεις για τις απολαβές τάσης, ρεύματος και ισχύος, όπως αυτές προκύπτουν από την προσεγγιστική θεωρητική ανάλυση των ενισχυτών που αναλύσαμε, διαπιστώνουμε ότι:

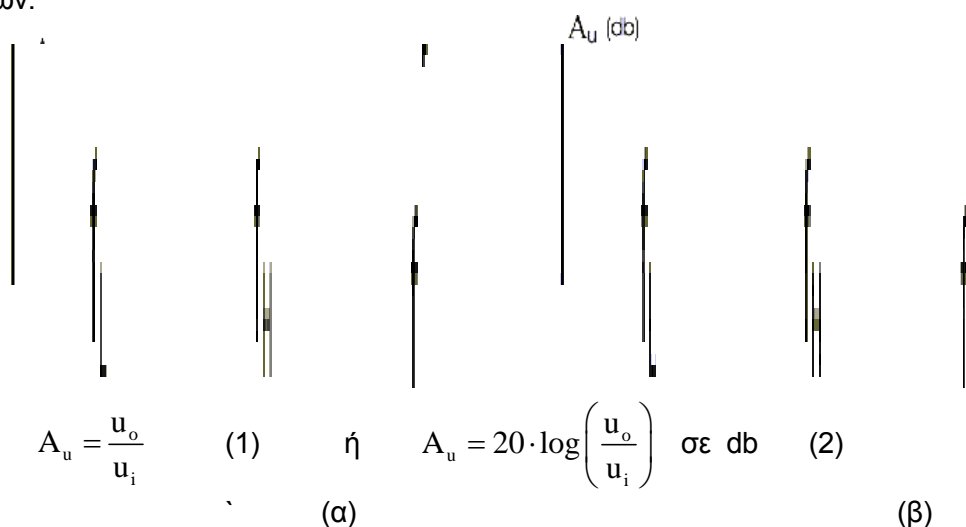
- 1) Οι απολαβές αυτές εξαρτώνται από τα στοιχεία του κυκλώματος και το εκάστοτε φορτίο.
- 2) Καθόσον τα στοιχεία του κυκλώματος και το φορτίο είναι ανεξάρτητα της συχνότητας και οι απολαβές του εκάστοτε ενισχυτή είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.

Τα μόνα στοιχεία σε ένα κύκλωμα που παραμένουν ανεξάρτητα της συχνότητας είναι οι ωμικές αντιστάσεις. Για το λόγο αυτό, οι ενισχυτές που στην ιδανική περίπτωση δομούνται αποκλειστικά από ωμικά στοιχεία (τόσο το φορτίο, όσο και τα στοιχεία του κυκλώματος, πλην των ενεργών, είναι ωμικά) παρουσιάζουν συμπεριφορά ανεξάρτητη της συχνότητας. Στην πράξη όμως λόγω των χωρητικοτήτων και των αυτεπαγωγών που υπάρχουν σε όλα τα πραγματικά κυκλώματα (είτε πρόκειται για εκούσια είτε πρόκειται για παρασιτικά στοιχεία) τα χαρακτηριστικά των ενισχυτών μεταβάλλονται συναρτήσει της συχνότητας. Η μεταβολή της συμπεριφοράς των παραμέτρων ενός πραγματικού ενισχυτή συναρτήσει της συχνότητας μπορεί να εκφραστεί με τις καμπύλες απόκρισης.

Οι καμπύλες απόκρισης είναι γραφικές παραστάσεις των χαρακτηριστικών του ενισχυτή (απολαβή τάσης, απολαβή ρεύματος, απολαβή ισχύος, αντίσταση εισόδου, αντίσταση εξόδου, ολίσθηση φάσης) συναρτήσει της συχνότητας.

Καμπύλη απόκρισης απολαβής τάσης :

Μία από τις σημαντικότερες καμπύλες απόκρισης, για τους ενισχυτές τάσης, είναι η καμπύλη απόκρισης της απολαβής τάσης σε σχέση με τη συχνότητα, που συχνά ονομάζεται απλά «καμπύλη απόκρισης» του ενισχυτή. Η καμπύλη απόκρισης απολαβής τάσης είναι η γραφική παράσταση της απολαβής τάσης A_u του ενισχυτή κάτω από δεδομένες συνθήκες λειτουργίας (π.χ συγκεκριμένο φορτίο, τάση τροφοδοσίας κ.λ.π), συναρτήσει της συχνότητας. Η απολαβή τάσης A_u (βλ. σχέση 1), ως λόγος που είναι, δεν έχει μονάδες. Συνήθως η απολαβή **τάσης** ή **έντασης** εκφράζεται σε db με βάση τη σχέση (2). Αυτό συμβαίνει γιατί οι λογαριθμικοί άξονες απολαβής και συχνότητας (διαγράμματα Bode) επιτρέπουν την προσέγγιση της απόκρισης με χρήση ασυμπτωτικών.



Σχ. 1. Τυπική καμπύλη απόκρισης ενισχυτή, εκφρασμένη σε λόγο τάσεων (α) και σε db (β).

Στο Σχ. 1 εικονίζεται μια τυπική καμπύλη απόκρισης ενός ενισχυτή τάσης. Οι συχνότητες F_L και F_H , που εμφανίζονται στο διάγραμμα ονομάζονται κατώτερη και ανώτερη συχνότητα απόκρισης αντίστοιχα και θεωρείται ότι ορίζουν την περιοχή επίπεδης απόκρισης του ενισχυτή. Η φυσική σημασία των F_L και F_H είναι ότι στις συχνότητες αυτές η απολαβή τάσης μειώνεται στο 0,707 της μέγιστης απολαβής τάσης, με αποτέλεσμα η ισχύς στο φορτίο να πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής της (γι αυτό και ονομάζονται συχνά ως συχνότητες μισής ισχύος). Η τιμή της χαμηλότερης συχνότητας συνήθως καθορίζεται από τα υπεραπλά φίλτρα που δημιουργούν οι πυκνωτές σύζευξης (συνήθως της εισόδου και του φορτίου) και η τιμή της υψηλότερης συχνότητας από τις παρασιτικές χωρητικότητες των τρανζίστορ. Οι κύριες παρασιτικές χωρητικότητες είναι αυτή της επαφής βάσης- εκπομπού και η χωρητικότητα Miller (μεταξύ βάσης και συλλέκτη).

Πείραμα:

ι) Στον ενισχυτή CE που θα σας δοθεί, συνδέστε ωμικό φορτίο $R_L = 1K$. Για διάφορες συχνότητες λειτουργίας από 40Hz έως 300KHz λάβετε μετρήσεις και συμπληρώστε τα πεδία του παρακάτω πίνακα :

A/A	F (KHz)	U_i (mVp-p)	U_o (mVp-p)	A_u	A_u (db)	P_L (mW)
1	0,004					
2	0,008					
3	0,016					
4	0,032					
5	0,064					
6	0,125					
7	0,300					
8	0,400					
9	0,8					
10	1					
11	2					
12	4					
13	8					
14	12					
15	25					
16	30					
17	40					
18	50					
19	60					
20	80					
21	100					
22	120					
23	140					
24	160					
25	180					
26	200					
27	220					
28	250					
29	280					
30	300					
31	$F_L =$					
32	$F_H =$					

ii) Εντοπίστε πειραματικά τις συχνότητες μισής ισχύος F_L και F_H και την περιοχή λειτουργίας του ενισχυτή.

iii) Από τις μετρήσεις σας χαράξτε την καμπύλη απόκρισης της απολαβής τάσης του ενισχυτή σε δύο διαγράμματα (το ένα εξ αυτών σε db) φροντίζοντας ο άξονας της συχνότητας να είναι λογαριθμικός.

iv) Υπολογίστε την ισχύ στο φορτίο σε κάθε συχνότητα και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία του πίνακα. Κάντε γραφική παράσταση της ισχύος στο φορτίο συναρτήσει της συχνότητας. Πόση είναι η μέγιστη ισχύς P_{max} στο φορτίο; Πόση είναι η ισχύς στο φορτίο στις συχνότητες θλάσης F_L και F_H ;

v) Χαράξτε την κανονικοποιημένη ως προς P_{max} γραφική παράσταση της ισχύος P_n στο φορτίο, συναρτήσει της συχνότητας, σε db. Όπου P_n σε db, δίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$P_{n(db)} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_i}{P_{max}} \right)$$

Πόση είναι κανονικοποιημένη ισχύς P_n σε db στο φορτίο στις συχνότητες θλάσης F_L και F_H ;

Υποδείξεις :

Ο υπολογισμός της απολαβής τάσης A_u σε κάθε συχνότητα μπορεί να γίνει από τις σχέσεις (1) και (2). Επιπλέον, προκειμένου να υπολογίσετε την ισχύ P_L στο φορτίο, σε κάθε περίπτωση, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τις σχέσεις (3) και (4):

$$P_L = \frac{u_{o(rms)}^2}{R_L} \quad (3), \quad \text{όπου} \quad u_{o(rms)} = \frac{u_{o(p-p)}}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (4)$$

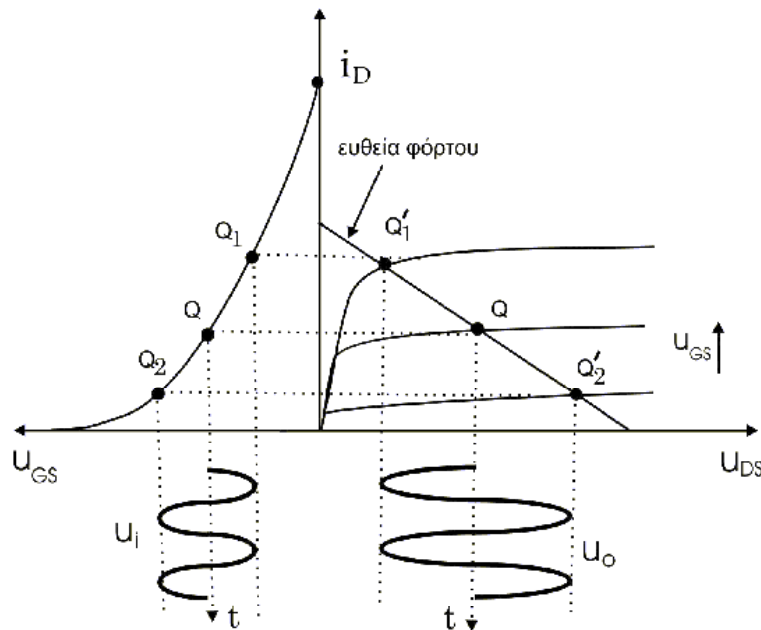
Στα διαγράμματα που θα παρουσιάσετε φροντίστε ο άξονας της συχνότητας να είναι λογαριθμικός, δεδομένου ότι η συνολική περιοχή συχνοτήτων είναι σχετικά μεγάλη, γεγονός που καθιστά δύσκολη την απεικόνιση σε γραμμικό άξονα.

Εργαστηριακή Άσκηση 6

Ενισχυτές με FET

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ή FET (Field Effect Transistor) είναι ένα στοιχείο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που η χρήση του σε ορισμένες περιπτώσεις προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με το διπολικό τρανζίστορ. Θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των τρανζίστορ επαφής (BJT) και των FET είναι ότι τα πρώτα ελέγχονται με το ρεύμα βάσης ενώ τα δεύτερα ελέγχονται από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από την επίδραση μιας τάσης στην πύλη. Τα FET παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των BJT, με κύριο την πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου. Συγχρόνως τα FET παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα με κύρια την αρνητικότερη τάση πόλωσης της πύλης και μη γραμμική συμπεριφορά τους (το ρεύμα εκροής δεν είναι ανάλογο της τάσης πύλης αλλά γενικότερα διέπεται από μία μη γραμμική εξάρτηση σε σχέση με αυτό).

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε απλά κυκλώματα ενισχυτών κοινής πηγής και κοινής εκροής (ακολουθητής τάσης) με J-FET n-καναλιού. Η αρχή λειτουργίας των ενισχυτών με FET δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτή των τρανζίστορ επαφής με εξαίρεση την βασική διαφορά ότι τα FET οδηγούνται με την τάση u_{GS} στην είσοδο, ενώ τα τρανζίστορ επαφής με το ρεύμα βάσης i_b . Στο Σχ.1 εξηγείται ο μηχανισμός ενίσχυσης σε έναν ενισχυτή με FET:

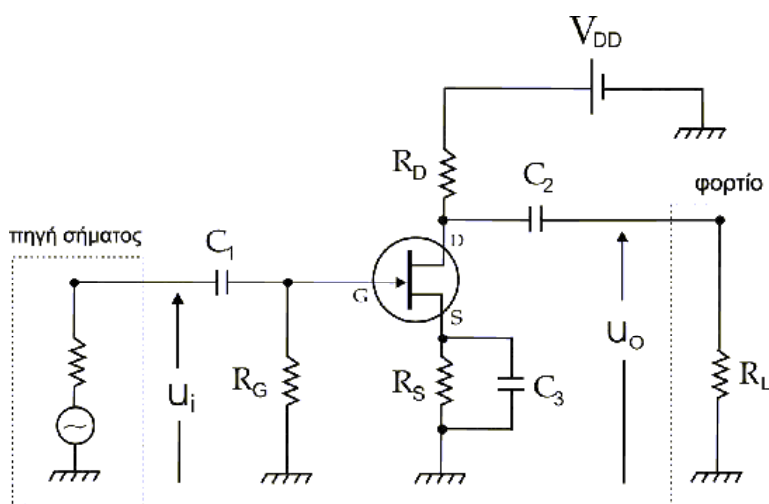


Σχ. 1. Μηχανισμός ενίσχυσης σε ενισχυτή με FET

Αν θεωρήσουμε ένα μικρό σήμα τάσης u_{GS} , έστω ημιτονοειδές, τότε το ρεύμα i_D και η τάση u_{DS} μεταβάλλονται περίπου ημιτονοειδώς γύρω από το σημείο λειτουργίας, όπως ακριβώς γίνεται και με τους ενισχυτές με τρανζίστορ επαφής που ήδη εξετάσαμε. Το μικρό σήμα εισόδου u_i , προκαλεί ένα μεγάλο σήμα u_o στην έξοδο. Αξίζει να σημειώσουμε επίσης ότι στους ενισχυτές με FET η σχέση $i_D = F(u_{GS})$ είναι μία μη γραμμική σχέση σε αντίθεση με τη σχέση $i_C = \beta i_B$ που ισχύει για τα BJT. Για το λόγο αυτό, οι ενισχυτές με FET, πρέπει να λειτουργούν με μικρά πλάτη προκειμένου να μην παρουσιάζουν μεγάλη παραμόρφωση. Η ανάγκη λειτουργίας με μικρά

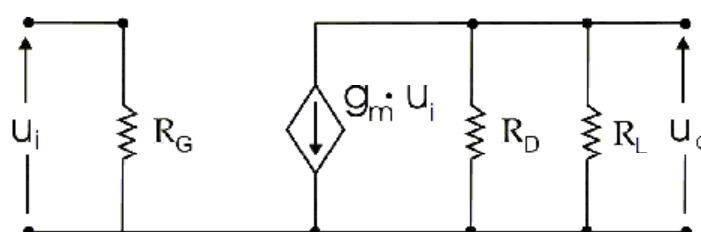
σήματα δεν καθιστά απαραίτητη την τοποθέτηση του σημείου λειτουργίας Q στο μέσο της AC ευθείας φόρτου, όπως συμβαίνει στους ενισχυτές με BJT.

Στο Σχ. 2 εικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων με η J-FET, σε συνδεσμολογία κοινής πηγής, ενώ στο Σχ. 3 εικονίζεται το AC ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή. Το AC ισοδύναμο προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη ότι το FET συμπεριφέρεται ως μία πηγή ρεύματος με διαγωγιμότητα g_m , ελεγχόμενη από την τάση u_{GS} .



Σχ. 2. Ενισχυτής κοινής πηγής με η J-FET.

Οι πυκνωτές C_1 και C_2 είναι πυκνωτές σύζευξης. Ο πυκνωτής C_3 είναι πυκνωτής απόζευξης και χρησιμεύει στο να βραχυκυκλώνει την R_S για τα AC ρεύματα.



Σχ. 4. AC ισοδύναμο του ενισχυτής κοινής πηγής

Η αντίσταση εισόδου στην πύλη του FET έχει πρακτικά άπειρη τιμή και για το λόγο αυτό η συνολική αντίσταση εισόδου του κυκλώματος είναι η R_G . Δηλαδή:

$$R_i \approx R_G \quad (1)$$

Η αντίσταση εξόδου στην εκροή του FET είναι επίσης πρακτικά άπειρη και για τον λόγο αυτό η συνολική αντίσταση εξόδου του κυκλώματος είναι η R_D . Δηλαδή:

$$R_o \approx R_D \quad (2)$$

Η ολική απολαβή τάσης A_u ορίζεται ως ο λόγος της τάσης u_o στο φορτίο προς την τάση u_i στην είσοδο του κυκλώματος. Δηλαδή:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-g_m \cdot u_i \cdot (R_L // R_D)}{u_i} = -g_m \cdot (R_L // R_D) = -g_m \cdot \frac{R_L \cdot R_D}{R_L + R_D} \quad (3)$$

Η ολική απολαβή ρεύματος, A_i ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος i_L στο φορτίο, προς το ρεύμα εισόδου i_{in} :

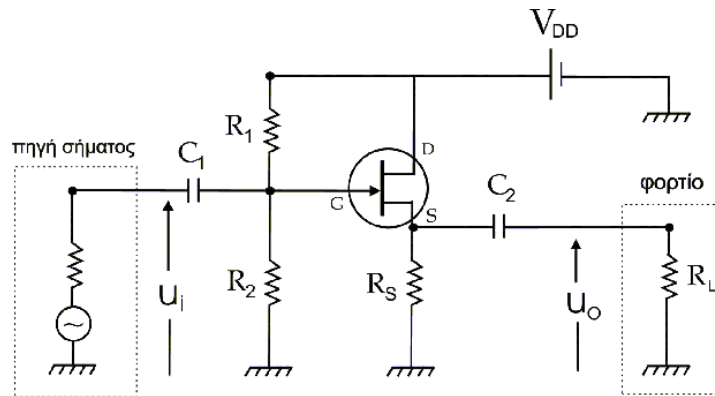
$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} = \frac{u_o / R_L}{u_i / R_G} = A_u \cdot \frac{R_G}{R_L} \quad (4)$$

Η απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος είναι ο λόγος της ισχύος στην αντίσταση φορτίου προς την παρεχόμενη ισχύ στην είσοδο και ισούται με το γινόμενο της απολαβής τάσης επί την απολαβή ρεύματος:

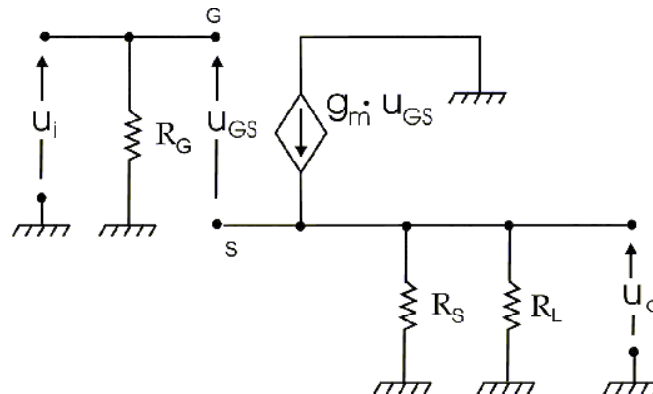
$$A_p = \frac{u_o \cdot i_L}{u_i \cdot i_{in}} = A_u \cdot A_i \quad (5)$$

Ενισχυτής κοινής εκροής με n J-FET:

Στο Σχ. 4 εικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων με n J-FET, σε συνδεσμολογία κοινής εκροής, ενώ στο Σχ. 5 εικονίζεται το AC ισοδύναμο του ενισχυτή. Ο ενισχυτής κοινής εκροής δεν πραγματοποιεί ενίσχυση τάσης, αλλά παρέχει τάση στην έξοδο του σχεδόν ίση με την τάση της εισόδου του, γι αυτό και λέγεται ακολουθητής τάσης (συχνά ονομάζεται και ακόλουθος πηγής διότι συχνά χρησιμοποιείται σε διαδοχή με ενισχυτή κοινής πηγής). Παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εξόδου, ιδιότητες που τον καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμο κύκλωμα ως βαθμίδα απομόνωσης (buffer). Δηλαδή, μπορεί να οδηγηθεί από πηγή σήματος με υψηλή εσωτερική αντίσταση και να οδηγήσει, με την ίδια σχεδόν τάση της πηγής, ένα φορτίο R_L χαμηλής αντίστασης.



Σχ. 4. Ενισχυτής κοινής εκροής με n J-FET



Σχ. 5. AC ισοδύναμο του ενισχυτής κοινής πηγής.

Το AC ισοδύναμο προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη ότι το FET συμπεριφέρεται ως μία πηγή ρεύματος με διαγωγιμότητα g_m , ελεγχόμενη από την τάση u_{GS} .

Η αντίσταση εισόδου στην πύλη του FET έχει πρακτικά άπειρη τιμή και για το λόγο αυτό η συνολική αντίσταση εισόδου του κυκλώματος είναι η R_G . Δηλαδή:

$$R_i \approx R_G = R_1 // R_2 \quad (6)$$

Η τάση εξόδου u_o ισούται με το γινόμενο της αντίστασης $R = R_S // R_L$ επί το ρεύμα που την διαρρέει. Δηλαδή:

$$u_o = R \cdot (u_i - u_o) \cdot g_m \quad (7)$$

οπότε:
$$u_o \cdot (1 + R \cdot g_m) = R \cdot g_m \cdot u_i \quad (8)$$

Συνεπώς, Χρησιμοποιώντας τη σχέση (8), καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση για την συνολική απολαβή τάσης A_u , του κυκλώματος:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m} \approx 1 \quad (9)$$

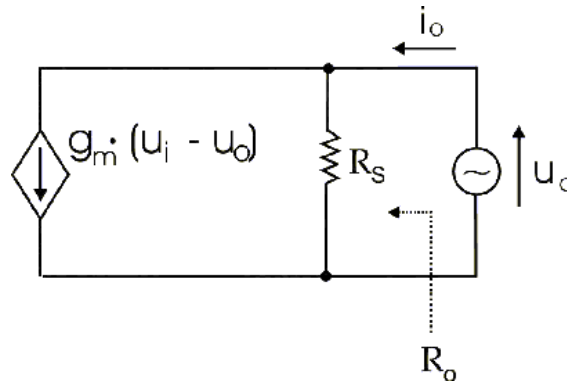
Η ολική απολαβή ρεύματος, A_i ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος i_L στο φορτίο, προς το ρεύμα εισόδου i_{in} :

$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} = \frac{u_o / R_L}{u_i / R_G} = A_u \cdot \frac{R_G}{R_L} \quad (10)$$

Η απολαβή ισχύος A_p του κυκλώματος είναι ο λόγος της ισχύος στην αντίσταση φορτίου προς την παρεχόμενη ισχύ στην είσοδο και ισούται με το γινόμενο της απολαβής τάσης επί την απολαβή ρεύματος:

$$A_p = \frac{u_o \cdot i_L}{u_i \cdot i_{in}} = A_u \cdot A_i \quad (11)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε θεωρητικά την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή κοινής πηγής, Θεωρούμε την περίπτωση που για μηδενικό σήμα εισόδου μια πηγή τάσης u_o δρα στην έξοδο και καταστρώνουμε το παρακάτω ισοδύναμο :



Σχ. 6. Ισοδύναμο κύκλωμα για την εύρεση της αντίστασης εξόδου.

Η υποθετική πηγή u_o προκαλεί ένα ρεύμα i_o . Λαμβάνοντας υπόψη και την δράση της πηγής ρεύματος με επιπλέον $u_i = 0$, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$u_o = R_S (i_o - u_o \cdot g_m) \Rightarrow (1 + g_m \cdot R_S) \cdot u_o = R_S \cdot i_o \quad (12)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (12), βρίσκουμε τελικά για την αντίσταση εξόδου R_o ότι:

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{R_s}{1 + R_s \cdot g_m} \quad (13)$$

Επειδή $R_s \cdot g_m \gg 1$, συμπεραίνουμε ότι :

$$R_o \approx \frac{1}{g_m} \quad (14)$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι για τις τυπικές τιμές διαγωγιμότητας g_m , των περισσότερων FET η αντίσταση εξόδου του ακολουθητή πηγής προκύπτει γενικά μεγαλύτερη από αυτή του ακόλουθου εκπομπού (ενισχυτή C.C). Επιπλέον υπενθυμίζεται ότι η σχέση που συνδέει το ρεύμα του καναλιού με την τάση πύλης-πηγής στο FET ονομάζεται σχέση του Shockley και είναι:

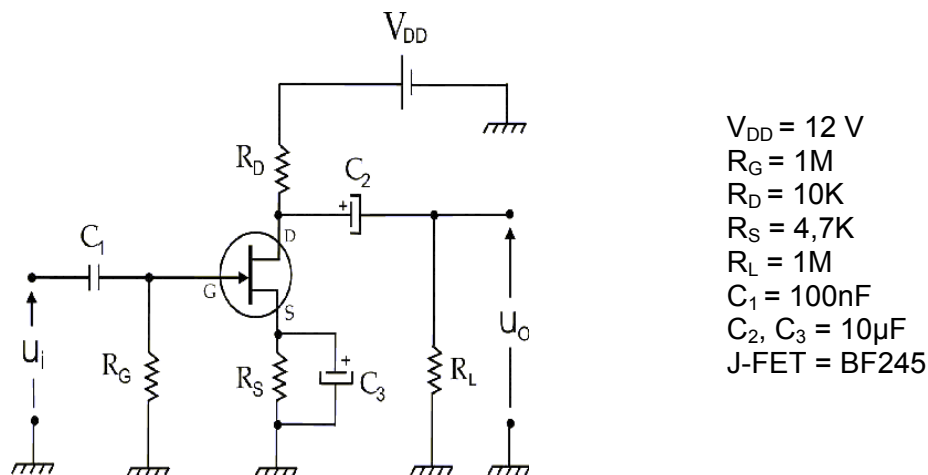
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad (15)$$

όπου I_{DSS} είναι το μέγιστο ρεύμα καναλιού (για $V_{GS}=0$) και $V_{GS(off)}$ η τάση για την οποία το ρεύμα του καναλιού μόλις που μηδενίζεται. Με παραγωγή της σχέσης του Shockley προκύπτει η σχέση για τη διαγωγιμότητα του FET:

$$g_m = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) \quad \text{όπου} \quad g_{mo} = -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS(off)}} \quad (16)$$

Πείραμα 1 (Ενισχυτής κοινής πηγής) :

Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα:



i) Μετρήστε με βολτόμετρο τις τάσεις V_{DS} , πτώση τάσης στην R_D , πτώση τάσης στην R_S και επαληθεύστε τον 2^ο κανόνα του Kirchhoff για τον βρόχο της πηγής V_{DD} . Πόσο είναι το ρεύμα πόλωσης I_D ; Σημειώστε την τιμή του ρεύματος I_D στα αντίστοιχα πεδία, του πίνακα 1.

ii) Συνδέστε γεννήτρια ακουστικού σήματος συχνότητας $f=1\text{KHz}$, στην είσοδο του ενισχυτή. Συνδέστε επίσης τον παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή. Ρυθμίστε την τάση του σήματος της γεννήτριας ώστε να πάρετε το μέγιστο απαραμόρφωτο σήμα στην έξοδο. Μετρήστε στην περίπτωση αυτή την τάση εισόδου

u_i και την τάση εξόδου u_o και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία του πίνακα 1. Πόση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων u_o και u_i ;

iii) Επαναλάβετε το ερώτημα ii) για τις περιπτώσεις που $R_L = 10K$, $R_L = 1K$.

Πίνακας 1:

V_{DD} (V)	I_D (mA)	R_L (K Ω)	u_i (mVp-p)	u_o (mVp-p)	A_u	g_m

iv) Επαναλάβετε τα ερωτήματα i) έως iii) για την περίπτωση που $V_{DD} = 16V$.

v) Επαναλάβετε τα ερωτήματα i) έως iv) για την περίπτωση που $V_{DD} = 20V$.

vi) Από τις μετρήσεις σας υπολογίστε την απολαβή τάσης A_u του ενισχυτή σε κάθε περίπτωση καθώς και την διαγωγιμότητα g_m του FET και συμπληρώστε τα αντίστοιχα πεδία του πίνακα 1.

vii) Ερμηνεύστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σας. Τι παρατηρείτε; Η απολαβή τάσης και η διαγωγιμότητα εξαρτώνται από το φορτίο; Η απολαβή τάσης και η διαγωγιμότητα εξαρτώνται από το ρεύμα πόλωσης I_D ;

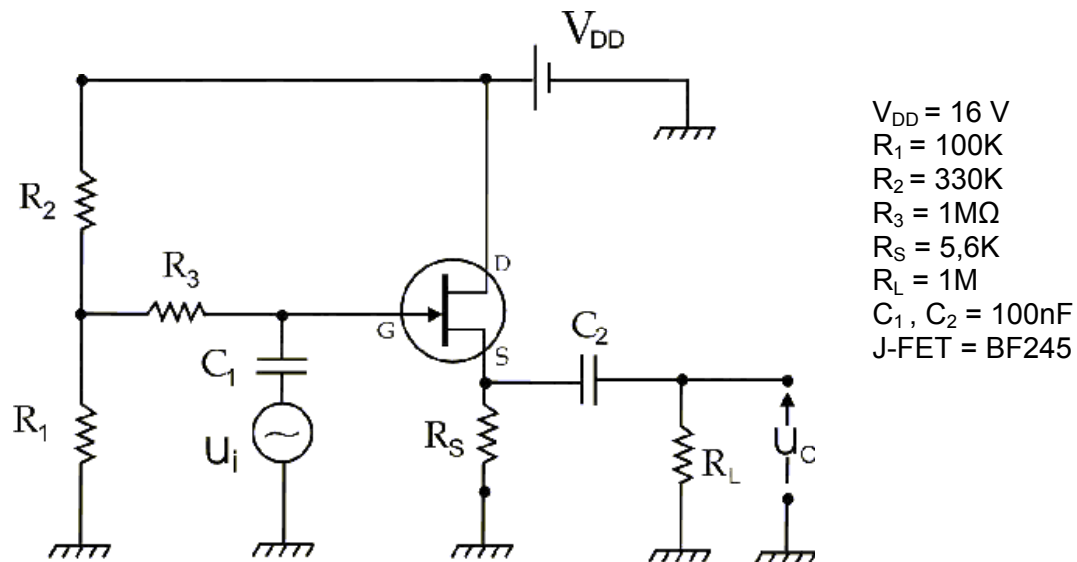
viii) Για την περίπτωση που $V_{DD} = 20V$ και $R_L = 1M\Omega$, υπολογίστε την απολαβή τάσης του ενισχυτή για τις περιπτώσεις που η συχνότητα της γεννήτριας γίνεται 50Hz, 100Hz, 1KHz, 5KHz, 10KHz, 40KHz, 100KHz, 300KHz, 600KHz, 1MHz, 1,5MHz, 2MHz, 2,5MHz, 3MHz, 3,5MHz, 4MHz, 4,5MHz, 5MHz και χαράξτε την καμπύλη απόκρισης $A_u(f)$ του ενισχυτή.

Υποδείξεις :

Ο υπολογισμός του g_m να γίνει με βάση τη σχέση (3)

Πείραμα 2 (Ενισχυτής κοινής εκροής) :

Πραγματοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα:



i) Συνδέστε γεννήτρια ακουστικού σήματος συχνότητας $F=1\text{ KHz}$, στην είσοδο του ενισχυτή. Συνδέστε επίσης τον παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή. Ρυθμίστε την τάση του σήματος της γεννήτριας ώστε να πάρετε το μέγιστο απαραμόρφωτο σήμα στην έξοδο. Μετρήστε στην περίπτωση αυτή την τάση εισόδου u_i και την τάση εξόδου u_o και βρείτε την απολαβή τάσης.

ii) Πόση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων u_o και u_i ;

iii) Επαναλάβετε το ερώτημα i) για φορτία $R_L = 100\text{ K}$ και $R_L = 10\text{ K}$.

iv) Πόση είναι η απολαβή τάσης του ενισχυτή κοινής εκροής; Επηρεάζεται από το φορτίο; Γιατί;

v) Για την περίπτωση που $R_L = 1\text{ M}\Omega$, προσδιορίστε πειραματικά την καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή στο φάσμα 20 Hz έως 5 MHz .

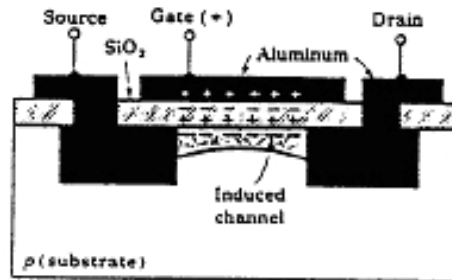
Εργαστηριακή Άσκηση 7

Ενισχυτές με MOSFET

Θεωρία

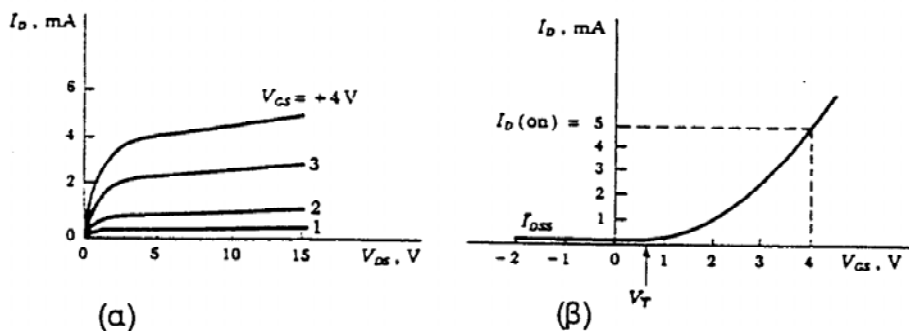
Η λειτουργία του MOSFET είναι παρόμοια με αυτή του FET επαφής, αλλά υπάρχουν βασικές διαφορές στην κατασκευή του που έχουν σαν αποτέλεσμα να έχει το MOSFET χαμηλότερη χωρητικότητα και μεγαλύτερη αντίσταση εισόδου από το FET επαφής.

Το MOSFET καναλιού η αποτελείται από υπόστρωμα (substrate) τύπου p χαμηλής πυκνότητας προσμίξεων, πάνω στο οποίο έχουν σχηματιστεί δύο περιοχές υψηλής πυκνότητας προσμίξεων τύπου n, όπως φαίνεται στο Σχ.1. Οι δύο αυτές περιοχές σχηματίζουν την πηγή (Source) και την υποδοχή (Drain). Ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) αναπτύσσεται στην επιφάνεια αυτής της δομής και στη συνέχεια ανοίγονται τρύπες στο στρώμα του διοξειδίου για να επιτρέψουν επαφή με την πηγή (Source) και την υποδοχή (Drain). Τέλος, μια στρώση με μέταλλο (ή polysilicon) σχηματίζει την πύλη (Gate) και του ακροδέκτες του MOSFET. Το στρώμα του διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) που είναι μονωτικό είναι υπεύθυνο για τη μεγάλη αντίσταση εισόδου (τυπικά $10^{14} \Omega$).



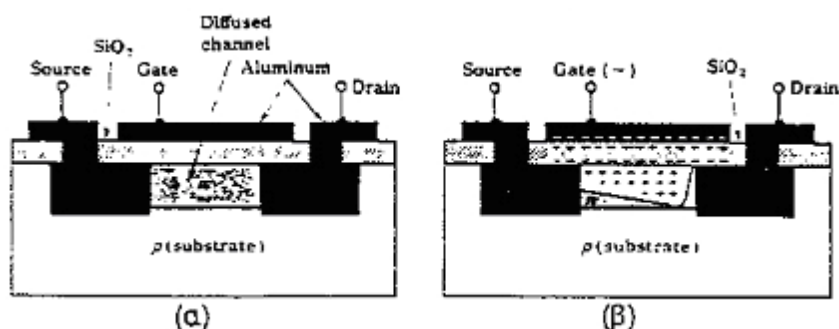
Σχ. 1. Το MOSFET ενίσχυσης.

Αν γειώσουμε το υπόστρωμα στο Σχ.1 και εφαρμόσουμε θετική τάση στην πύλη (Gate), το ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζεται κατακόρυφα, δια μέσου του διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), επάγει αρνητικά φορτία στον ημιαγωγό, όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Τα αρνητικά αυτά φορτία είναι ηλεκτρόνια τα οποία δημιουργούν ένα στρώμα αναστροφής. Καθώς αυξάνεται η θετική τάση στην πύλη (Gate), το επαγόμενο (induced) ηλεκτρικό φορτίο στον ημιαγωγό αυξάνεται. Η περιοχή κάτω από το διοξείδιο (SiO_2) έχει τώρα φορείς τύπου n, η αγωγιμότητα αυξάνεται και ρεύμα μπορεί να διέρχεται από την υποδοχή (Drain) προς την πηγή (Source) δια μέσου του επαγόμενου καναλιού (induced channel). Έτσι το ρεύμα υποδοχής (Drain) «ενισχύεται» από τη θετική τάση, και γι αυτό το τρανζίστορ αυτό ονομάζεται MOSFET ενισχύσεως (Enhancement MOSFET).



Σχ. 2. (α) Χαρακτηριστική εξόδου (β) Χαρακτηριστική μεταφοράς

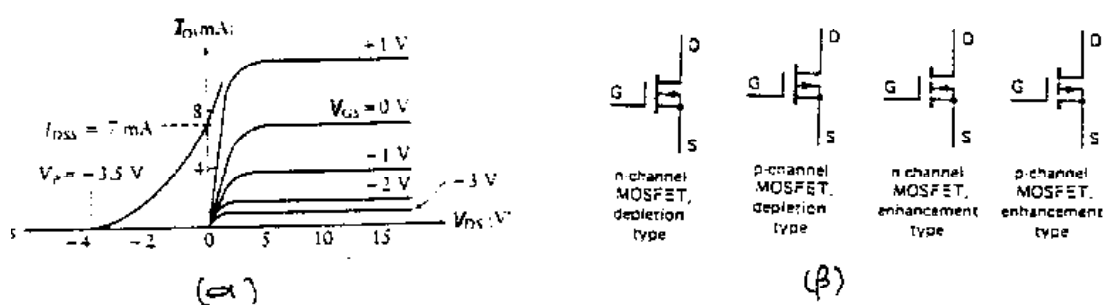
Μια τυπική χαρακτηριστική εξόδου για MOSFET ενισχύσεως δίνεται στο Σχ. 2(α) και η χαρακτηριστική μεταφοράς στο Σχ. 2(β). Το ρεύμα I_{DSS} για $V_{GS} < 0$ είναι πολύ μικρό, της τάξης των λίγων nA. Καθώς η τάση V_{GS} αυξάνεται θετικά, το ρεύμα I_D αυξάνεται, αργά στην αρχή και πολύ γρήγορα με την αύξηση της V_{GS} . Η τάση V_{GS} για την οποία $I_D = 10 \mu A$, ονομάζεται τάση κατωφλίου (Threshold voltage) και συμβολίζεται με V_T . Τυπικές τιμές της V_T είναι από 2 μέχρι 5 Volt.



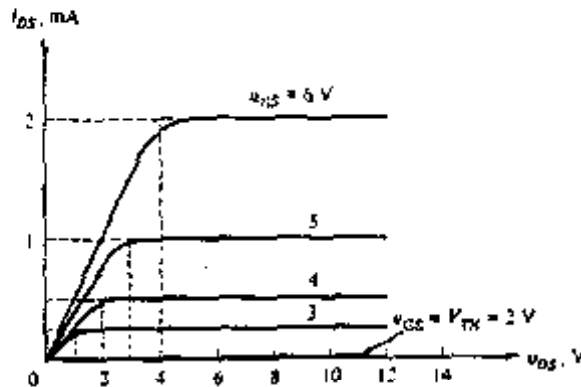
Σχ. 3. Το MOSFET εκκένωσης

Ένας δεύτερος τύπος MOSFET μπορεί να κατασκευαστεί αν, στην βασική δομή του Σχ. 1, σχηματιστεί με διάχυση ένα κανάλι τύπου p μεταξύ πηγής(Source) και υποδοχής(Drain), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(α). Στο τρανζίστορ αυτό διέρχεται σημαντικό ρεύμα I_{DSS} όταν $V_{GS} = 0$. Αν εφαρμόσουμε αρνητική τάση στην πύλη (Gate), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β), οι φορείς πλειονότητας (τα ηλεκτρόνια εδώ) «εκκενώνονται» από το κανάλι μέχρις ότου «φράξει» εντελώς, όταν $V_{GS} \geq V_T$ και το ρεύμα $I_D = 0$. Γι' αυτό το λόγω, το FET αυτό ονομάζεται MOSFET εκκενώσεως (Depletion MOSFET).

Αν εφαρμόσουμε θετική τάση στην πύλη(Gate) του MOSFET εκκενώσεως, επάγονται περισσότεροι φορείς (ηλεκτρόνια εδώ) στο κανάλι, συνεπώς η αγωγιμότητα του καναλιού αυξάνεται και το ρεύμα I_D μπορεί να αυξηθεί πάνω από το I_{DSS} . Έτσι το MOSFET τώρα λειτουργεί σαν MOSFET ενίσχυσης. Τυπικές χαρακτηριστικές εξόδου δίνονται στο Σχ. 4(β).



Σχ. 4. (α) Χαρακτηριστικές MOSFET εκκένωσης, (β) συμβολισμοί



Σχ. 5 Χαρακτηριστικές εξόδου για MOSFET ενίσχυσης

Επανερχόμαστε στις χαρακτηριστικές εξόδου MOSFET ενίσχυσης που δίνονται στο Σχ. 5 όπου βλέπουμε ότι όταν $V_{GS} = V_T$ το ρεύμα $I_D = 0$ για όλες τις τιμές του V_{DS} . Ρεύμα, όμως, υπάρχει όταν $V_{GS} > V_T$. Στις χαρακτηριστικές αυτές βλέπουμε επίσης ότι η τάση στο σημείο διάτρησης είναι:

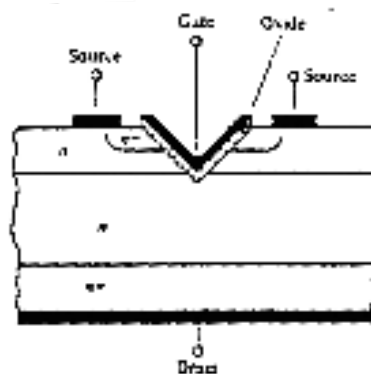
$$V_{GS} = V_{GS} - V_T$$

Το ρεύμα υποδοχής (Drain) πέραν του σημείου διάτρησης δίνεται από μια σχέση αντίστοιχη αυτής του Shockley:

$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{για } V_{GS} \geq V_T$$

όπου k είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία και άλλες παραμέτρους του MOSFET. Η διαγωγιμότητα ορίζεται με τον ίδιο τρόπο και στο MOSFET.

Από τα δύο είδη του MOSFET θα μελετήσουμε το MOSFET ενίσχυσης και συγκεκριμένα το VMOSFET, γνωστό απλώς ως VMOS. Ο όρος VMOS προέρχεται από το σχήμα V της δομής του, όπως φαίνεται σε τομή στο Σχ. 6. Σημειώσετε ότι η πηγή (Source) είναι ένας "κώνος" γύρω από την πύλη (Gate) και ότι στην ουσία σχηματίζονται δύο MOSFET, ένα από κάθε μεριά, που συνδέονται παράλληλα συνδέοντας τις δύο πηγές μαζί. Μ' αυτό τον τρόπο διπλασιάζεται η χωρητικότητα ρεύματος του VMOS. Τα συνηθισμένα FET περιορίζονται σε ρεύματα της τάξεως των 10-20 mA, αλλά υπάρχουν VMOS που λειτουργούν και μέχρι 100 A. Τα VMOS υπερέχουν επίσης λύση σε εφαρμογές υψηλής ισχύος υψηλών συχνοτήτων. Μπορούν να διακόψουν ρεύματα της τάξεως των δεκάδων



Σχ. 6 Τομή VMOS

ampere σε λίγα nsec. Έχουν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας και έτσι αποφεύγεται η θερμική διαφυγή (thermal runaways).

Τα VMOS FET έχουν πάρα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής (leakage current). Μπορούν να κατασκευαστούν σήμερα από 0,3A μέχρι 100A με τάσεις διασπάσεως μέχρι 600V και με συχνότητα λειτουργίας μέχρι πολλών εκατοντάδων MHz. Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο BS170 VMOS FET με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$(I_D)_{\max}=0,3A, \quad (V_D)_{\max}=60V \quad \text{και} \quad (P_D)_{\max}=830 \text{ mW}.$$

Πείραμα

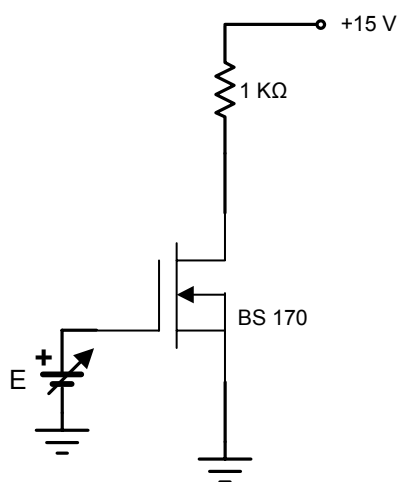
B1. Τάση κατωφλίου V_T

Συνδέστε το κύκλωμα του Σχ.7 (α). Στο Σχ. 7 (β) δίνονται οι ακροδέκτες του BS170.

Ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας E , χρησιμοποιώντας τη χονδρική και τη λεπτή ρύθμιση, ώστε η πτώση τάσεως στην αντίσταση υποδοχής(Drain) (1K) να είναι 10 mV, που αντιστοιχεί σε ρεύμα υποδοχής(Drain) $I_D=10\mu A$. Μετρήστε την τάση V_{GS} που προκαλεί αυτό το ρεύμα. Η τάση αυτή είναι η τάση κατωφλίου V_T για το VMOS FET που έχετε.

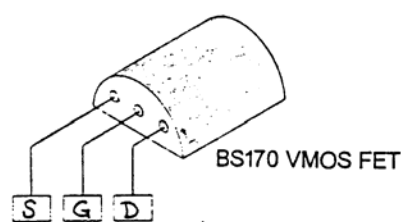
$$V_T = V_{GS} \text{ (για } I_D = 10 \mu A) = \dots\dots\dots$$

Πάρτε από δύο άλλες ομάδες συμφοιτητών σας τις τιμές που μέτρησαν εκείνοι για την τάση V_T . Συγκρίνετε τις τιμές αυτές με τη δική σας και σχολιάστε τυχόν διαφορές.



(β) Ακροδέκτες

1. $V_T = \dots\dots\dots$
2. $V_T = \dots\dots\dots$



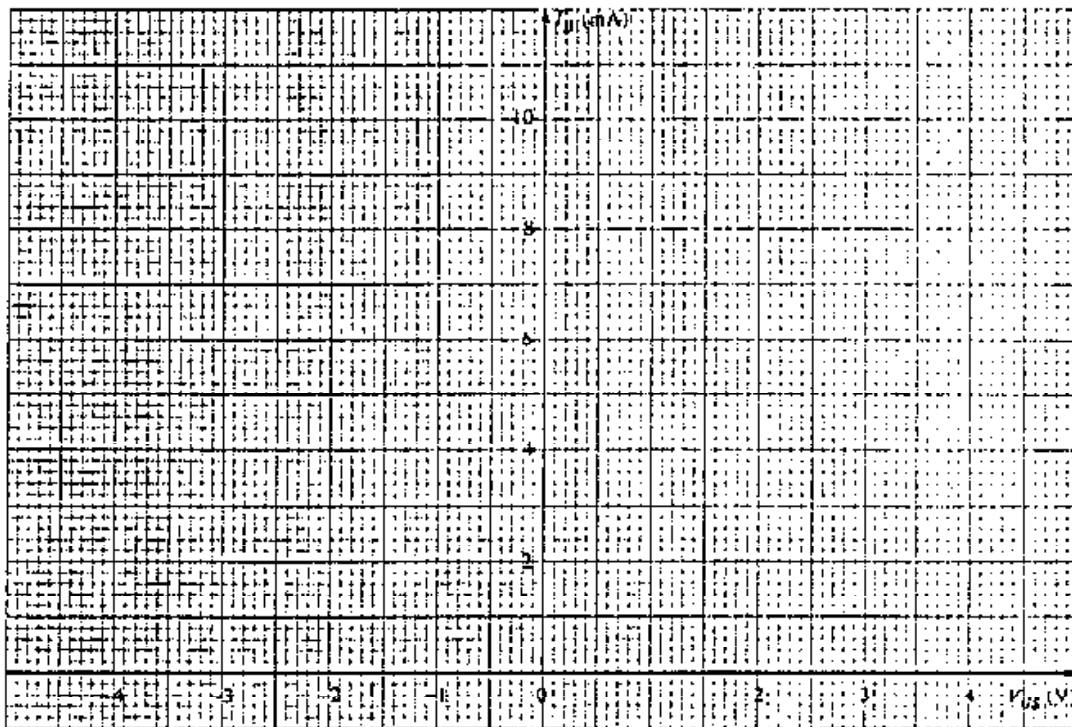
Σχ. 7 (α) Κύκλωμα

B2. Χαρακτηριστική μεταφοράς

α. Με το VMOS FET συνδεδεμένο στο κύκλωμα, ρυθμίστε τη χονδρική και τη λεπτή ρύθμιση της τροφοδοσίας E για να λάβετε τις τιμές του ρεύματος I_D που δίνονται στον Πίνακα . Μετρήστε και καταχωρήσετε στον Πίνακα την τιμή V_{GS} που αντιστοιχεί στο κάθε ρεύμα.

$I_D(\text{mA})$	10 μA	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{GS}(\text{V})$												

β. (Για το σπίτι) Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική μεταφοράς δηλ. το ρεύμα υποδοχής (Drain) I_D ως συνάρτηση της τάσεως V_{GS} στο Σχ.8

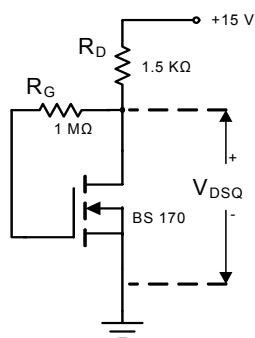


Σχ.8.

B3. Πόλωση του VMOS

α. Συνδέστε το κύκλωμα του Σχ. 9 Η πόλωση στην πύλη (Gate) παρέχεται από την τάση στην υποδοχή(Drain) δια μέσου της R_G . Επειδή δεν υπάρχει ρεύμα στην R_G , η τάση στη πύλη(Gate) είναι ίση με την τάση υποδοχής(Drain), δηλ.

Η μέθοδος αυτή παρέχει ευστάθεια στο σημείο ηρεμίας Q, λόγω **αρνητικής ανάδρασης**, γιατί αν το ρεύμα I_{DQ} τείνει να αυξηθεί, η τάση $V_{GS} = V_{SD}$ ελαττώνεται και το ρεύμα επανέρχεται.



Σχ. 9

Μετρήστε το I_{DQ} ($=V_{RD}/1,5k$) και τη V_{CEQ} και υπολογίστε τη σταθερά k .

1. $I_{DQ} = \dots\dots\dots$
 $V_{CEQ} = \dots\dots\dots$
 $k = \dots\dots\dots$

Ανταλλάξτε το VMOS σας με αυτό μιας διπλανής σας ομάδας και επαναλάβετε το μέρος β. Πάρτε και τις τιμές τους για το k και τη V_T . Σχολιάστε τυχόν διαφορές.

2. $I_{DQ} = \dots\dots\dots$
 $V_{CEQ} = \dots\dots\dots$
 $k = \dots\dots\dots$
 $V_T = \dots\dots\dots$