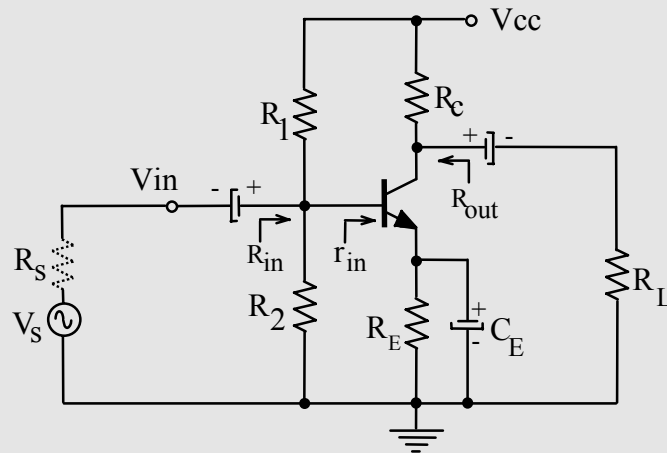


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Α. Α. Χατζόπουλος

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ



ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

1. Δηλώσεις συμμετοχής

Δηλώσεις για συμμετοχή στα εργαστήρια Ηλεκτρονικής Ι γίνονται μετά από σχετική ανακοίνωση πριν την έναρξη των μαθημάτων. Οι εργαστηριακές ασκήσεις είναι υποχρεωτικές και διεξάγονται κατά τη διάρκεια του εξαμήνου σε ομάδες των 30 φοιτητών (15 δυάδες φοιτητών) σε μέρες και ώρες που ανακοινώνονται.

Το εργαστήριο, εκτός από την πρακτική άσκηση, περιλαμβάνει και εκμάθηση του προγράμματος ανάλυσης κυκλωμάτων SPICE. Η παρουσίαση του προγράμματος γίνεται σε μέρες και ώρες που ανακοινώνονται. Η παρακολούθηση δεν είναι υποχρεωτική, είναι όμως υποχρεωτική η προφορική εξέταση στο τέλος του εξαμήνου.

Η παρακολούθηση των εργαστηριακών ασκήσεων, η παράδοση σχετικής εργασίας στο τέλος του εξαμήνου, η επιτυχής πρακτική εξέταση στο εργαστήριο και η επιτυχής εξέταση στη χρήση του προγράμματος SPICE είναι οι αναγκαίες προϋποθέσεις για τη συμμετοχή στις εξετάσεις του μαθήματος.

2. Υποβολή Εργασίας

Η υποβολή εργασίας με τις εργαστηριακές ασκήσεις και με τις ασκήσεις προσομοίωσης γίνεται στο τέλος του εξαμήνου σε μέρες και ώρες που ανακοινώνονται. Προϋπόθεση για την παράδοση εργασίας είναι η συμμετοχή στις εργαστηριακές ασκήσεις.

Η εργασία που παραδίνεται περιλαμβάνει εξώφυλλο (όνομα / επώνυμο, ακαδημαϊκό έτος) και τα αποτελέσματα των αναλύσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε άσκησης.

3. Πρακτική εξέταση στο εργαστήριο

Μετά την ολοκλήρωση όλων των εργαστηριακών ασκήσεων θα ακολουθήσει πρακτική εξέταση ατομικά για κάθε φοιτητή. Για να θεωρηθεί επιτυχής η εξέταση πρέπει να πάρει βαθμό ίσο ή μεγαλύτερο του πέντε (5). Ο βαθμός του εργαστηρίου αποτελεί το 10% του τελικού βαθμού του μαθήματος.

4. Προφορική εξέταση στη χρήση του προγράμματος SPICE

Μετά την ολοκλήρωση όλων των εργαστηριακών ασκήσεων θα ακολουθήσει προφορική εξέταση στη χρήση του προγράμματος SPICE ατομικά για κάθε φοιτητή, σε μέρες και ώρες που θα ανακοινωθούν. Για να θεωρηθεί επιτυχής η εξέταση πρέπει να πάρει βαθμό ίσο ή μεγαλύτερο του πέντε (5). Ο βαθμός της εξέτασης στο SPICE αποτελεί το 10% του τελικού βαθμού του μαθήματος.

5. Οι εξετάσεις στο εργαστήριο και στη χρήση του προγράμματος SPICE είναι υποχρεωτική για όλους όσους δεν έχουν περάσει το μάθημα μέχρι τώρα. Οσοι φοιτητές παρακολούθησαν τα εργαστήρια ή εξετάστηκαν στο πρόγραμμα SPICE σε προηγούμενα εξάμηνα δεν υποχρεούνται να τα παρακολουθήσουν ξανά, αλλά θα πρέπει να συμμετέχουν υποχρεωτικά στις σχετικές εξετάσεις.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Οι **αντιστάτες** (resistors) χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα για τη ρύθμιση, γενικά, του ρεύματος και κατασκευάζονται από διάφορα υλικά και σε διαφορετικές μορφές ανάλογα με την εφαρμογή. Συνηθέστεροι τύποι αντιστατών είναι οι γνωστοί ωμικοί αντιστάτες άνθρακος (γραφίτη) και σύρματος.

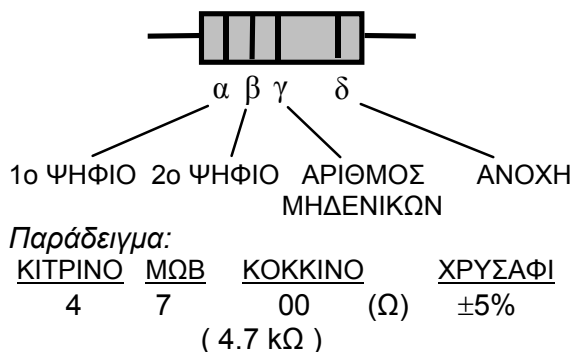
Οι **αντιστάτες άνθρακος** κατασκευάζονται για σχετικά μικρή ισχύ (0.25 W - 3 W) και οι τιμές τους είναι από μερικά δέκατα του Ω μέχρι περίπου 50 ΜΩ. Οι τιμή αντίστασης αναγράφεται πάνω στο εξάρτημα είτε με αριθμούς είτε με ειδικά χρώματα, όπως περιγράφεται στον κώδικα χρωμάτων του πίνακα 1 και στο παράδειγμα του σχήματος 1. Εμφανίζονται συνήθως 4 έγχρωμες λωρίδες α, β, γ και δ, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η τιμή της αντίστασης είναι:

$$R = (10\alpha + \beta) \cdot 10^{\gamma} \quad (1)$$

ενώ η ανοχή της καθορίζεται από το δ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1
Κώδικας χρωμάτων αντιστάσεων

0	μαύρο
1	καφέ
2	κόκκινο
3	πορτοκαλί
4	κίτρινο
5	πράσινο
6	μπλέ
7	μώβ
8	γκρί
9	άσπρο
±5 % ανοχή	χρυσάφι
±10% ανοχή	ασημί



Σχήμα 1. Χρωματικός κώδικας αντιστάτη άνθρακος.

Η ακρίβεια της τιμής κάθε αντίστασης κυμαίνεται σε κάποια όρια που καθορίζονται από την ανοχή και αναγράφονται επίσης πάνω στο εξάρτημα είτε με αριθμούς είτε με ειδικά χρώματα. Οι συνήθεις ανοχές είναι ±10%, ±5%, ±2% ή ±1%. Για να γίνει κατανοητή η έννοια της ανοχής αναφέρεται ένα απλό παράδειγμα: αντίσταση 100 Ω με ανοχή ±5% σημαίνει ότι η πραγματική της τιμή μπορεί να είναι από 95 μέχρι 105 Ω. Οι καλύτεροι ποιοτικά αντιστάτες είναι εκείνοι με ανοχή ±1% ή ±0.5%. Στη συνήθη σειρά ωμικών αντιστατών του εμπορίου (E12) με ανοχή ±5% υπάρχουν οι εξής ονομαστικές τιμές αντίστασης: 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2 Ω, καθώς και όλες οι πολλαπλάσιες τιμές (π.χ. 33 kΩ, 5.6 kΩ). Στις σειρές αντιστατών με ανοχή ±2% ή ±1% (E24 και E96) διατίθενται και άλλες τιμές, θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η τιμή της αντίστασης δίνεται με τέσσερις έγχρωμες λωρίδες α, β, γ, δ και υπάρχει επιπλέον λωρίδα ε για την ανοχή. Η τιμή της αντίστασης θα είναι:

$$R = (100\alpha + 10\beta + \gamma) \cdot 10^{\delta} \quad (2)$$

ενώ η ανοχή της καθορίζεται από το ε. Μπορεί επίσης να υπάρχει και λωρίδα για τον συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής.

Οι **αντιστάτες σύρματος** κατασκευάζονται για μεγαλύτερες ισχείς 4 W-1000 W και οι τιμές τους είναι από λίγα Ω μέχρι περίπου 50 kΩ με ανοχές ±5% ή ±10%.

Ο **πυκνωτής** είναι εξάρτημα που αποτελείται από δύο αγωγούς (οπλισμούς) τοποθετημένους σε μικρή απόσταση ο ένας από τον άλλο, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται αέρας ή άλλο μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό).

Η **χωρητικότητα** ενός πυκνωτή δίνεται από τον τύπο:

$$C = Q / V \quad (3)$$

όπου Q είναι το φορτίο του πυκνωτή και V η τάση που εφαρμόζεται στους οπλισμούς του. Η μιγαδική αντίσταση που παρουσιάζει σε ημιτονικό σήμα συχνότητας ω είναι:

$$Z = -j (1 / C\omega) \quad (4)$$

Η χωρητικότητα εξαρτάται από: α) το μέγεθος των αγωγών (μεταλλικών επιφανειών), β) την απόσταση μεταξύ τους και γ) το είδος του διηλεκτρικού. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Farad (F). Είναι όμως πολύ μεγάλη και στις εφαρμογές χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσια της (mF, μ F, nF, pF). Η τιμή της χωρητικότητας αναγράφεται πάνω στο εξάρτημα είτε με αριθμούς (για παράδειγμα, 4n7 που σημαίνει 4.7 nF), είτε με χρώματα, όπως και στους αντιστάτες. Η τιμή με τον χρωματικό κώδικα είναι συνήθως σε pF.

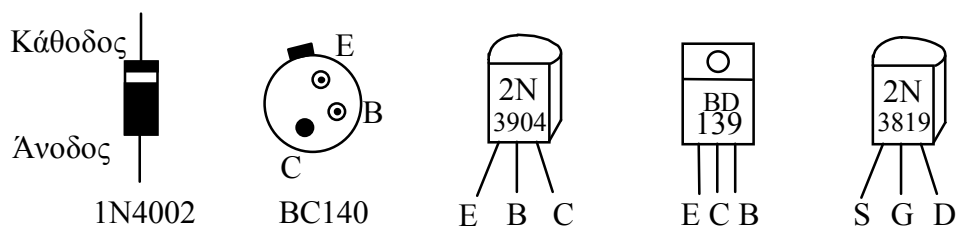
Υπάρχουν πολλά είδη πυκνωτών: χάρτου, κεραμικοί, πολυεστερικοί, ηλεκτρολυτικοί, μεταβλητοί κ.α. Τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου είναι η περιοχή χωρητικοτήτων (Capacitance range), η μέγιστη τάση (maximum voltage), η ακρίβεια της τιμής (Accuracy), η σταθερότητα με τη θερμοκρασία (Temperature stability) και η διαρροή (Leakage).

Τα πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια των διαφόρων μονάδων μέτρησης έχουν ιδιαίτερα ονόματα και συμβολισμό που δίνονται στον πίνακα 2.

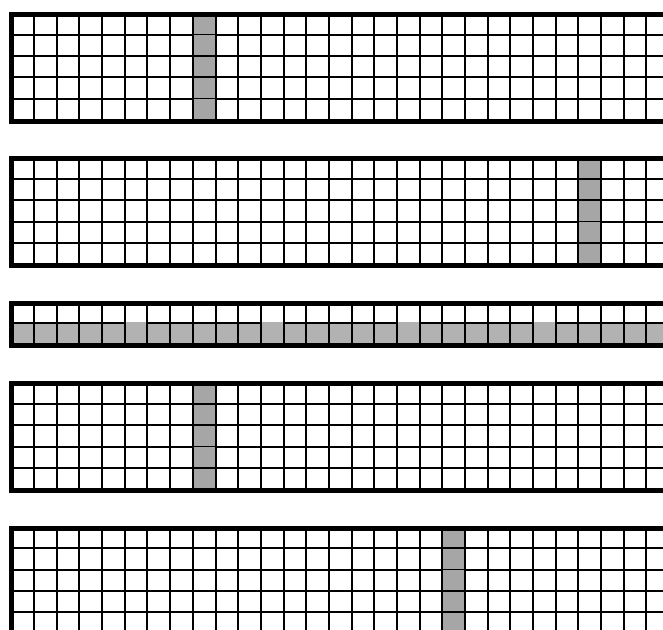
Στις εργαστηριακές ασκήσεις θα χρησιμοποιηθούν διάφορα ημιαγωγικά εξαρτήματα. Στο σχήμα 2 δίνονται οι ακροδέκτες ορισμένων από αυτά. Στο σχήμα 3 δίνεται η σχηματική παράσταση ενός board συνδέσεων (mini-board ή raster) που θα χρησιμοποιηθεί. Στο σχήμα εμφανίζεται σκιασμένη η μία οριζόντια ομάδα θέσεων, που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες μεταξύ τους, καθώς και 4 (τυχαίες) κάθετες ομάδες (πέντε) θέσεων. Οι οριζόντιες ομάδες χρησιμοποιούνται συνήθως για τις τάσεις τροφοδοσίας και τη γείωση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ 10
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	K	10^3
Hecto	h	10^2
Deca	da	10^1
Deci	d	10^{-1}
Centi	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Micro	μ (ή u)	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}



Σχήμα 2. Ακροδέκτες εξαρτημάτων.



Σχήμα 3. Σχηματική παράσταση ενός board συνδέσεων (raster).

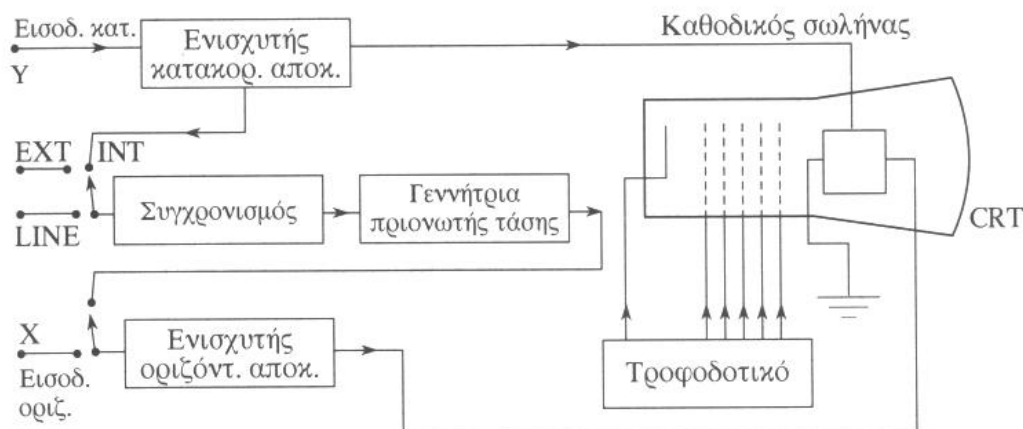
ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ

Ο **παλμογράφος** είναι το πιο σημαντικό όργανο οπτικού ελέγχου και μετρήσεων σε πάρα πολλούς τομείς, κυρίως όμως στα ηλεκτρονικά. Μας δείχνει την οπτική παράσταση ενός ηλεκτρονικού σήματος που εφαρμόζεται στην είσοδό του, ως προς ένα σήμα ή ως προς το χρόνο.

Υπάρχουν παλμογράφοι "μονής" και "διπλής" δέσμης. Οι μονής δέσμης απεικονίζουν στην οθόνη μία μόνο κυματομορφή ενώ οι διπλής δέσμης απεικονίζουν στην οθόνη συγχρόνως δύο διαφορετικές κυματομορφές. Υπάρχουν επίσης ψηφιακοί, που λειτουργούν με δειγματοληψία και διαθέτουν μνήμη για την καταχώρηση των κυματομορφών. Λειτουργούν με δύο, τρία ή και τέσσερα κανάλια εισόδου.

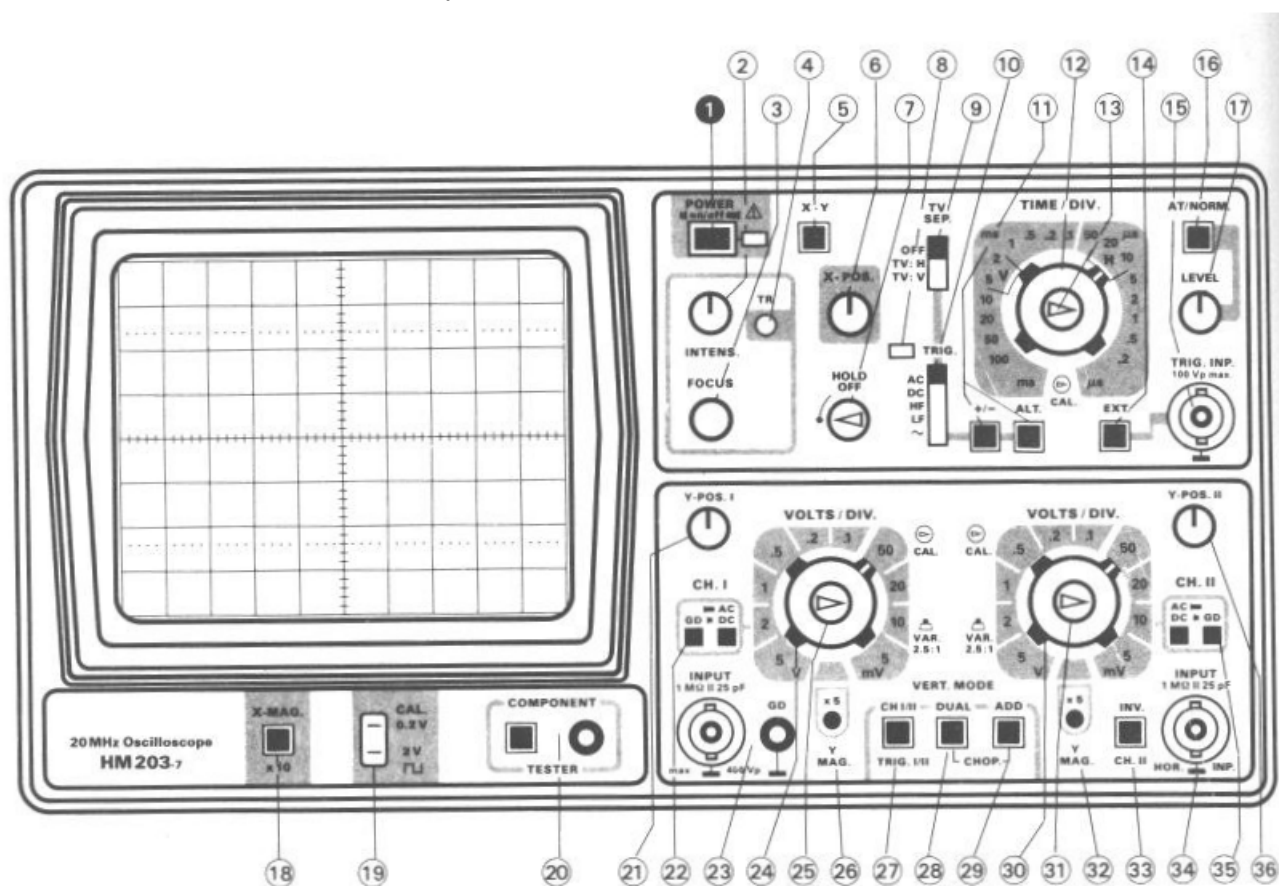
Ενας κοινός παλμογράφος αποτελείται από πέντε βασικά μέρη (σχήμα 4):

1. Τον καθοδικό σωλήνα
2. Το σύστημα κατακόρυφης απόκλισης (σάρωσης)
3. Το σύστημα οριζόντιας απόκλισης (σάρωσης)
4. Τη γεννήτρια πριονωτής τάσης και το συγχρονισμό
5. Το τροφοδοτικό



Σχήμα 4

Στο σχήμα 5 φαίνεται ένας παλμογράφος διπλής δέσμης. Οι χρήσεις των σημαντικότερων επιλογέων και εισόδων δίνονται στη συνέχεια.



Σχήμα 5

Ρύθμιση INTENSITY (2): Ρυθμίζουμε την φωτεινότητα της δέσμης

Ρύθμιση FOCUS (3): Μετά το ρύθμισμα της φωτεινότητας, ρυθμίζουμε την εστίαση (FOCUS) μέχρι η απεικόνιση να είναι η δυνατόν καθαρότερη.

Επιλογέας VOLT/DIV (24, 30): Είναι ένας βηματικός εξασθενητής ο οποίος επιλέγει τον κάθετο συντελεστή απόκλισης. Ρυθμίστε τον έτσι ώστε να παρακολουθείται εύκολα στην οθόνη

όλη η κυματομορφή. Για εξασθένηση της κυματομορφής 1/10 χρησιμοποιείτε το PROBE στην θέση 10:1.

Επιλογέας TIME/DIV (12): Ο χρόνος σάρωσης έχει 18 βήματα από 0.2 $\mu\text{sec}/\text{DIV}$ μέχρι 100 msec/DIV .

X-Y: Στη θέση αυτή ο παλμογράφος χρησιμοποιείται σε λειτουργία X-Y. Η είσοδος X είναι το κανάλι 1 (οριζόντιο) και η είσοδος Y είναι το κανάλι 2 (κάθετο) με κλίμακα απόκλισης από το λιγότερο ένα μιλιβόλτ μέχρι 5 V/DIV σε περιορισμένη συχνότητα των 500 KHZ.

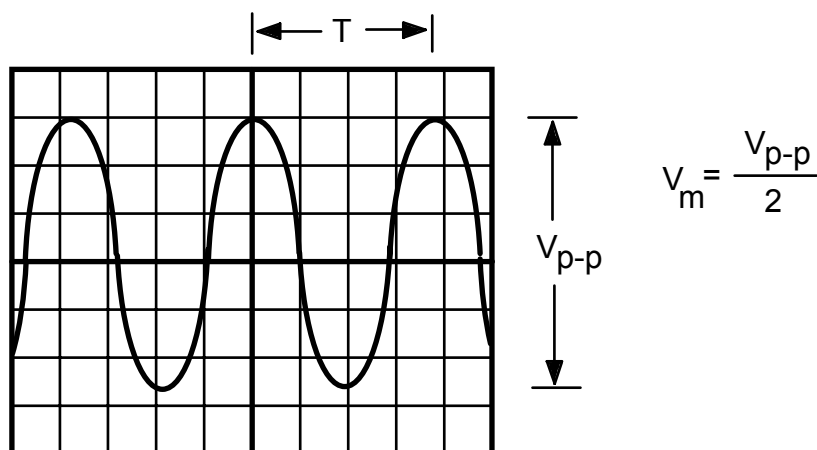
Ελεγχος POSITION (6): Χρησιμοποιείτε για την μετακίνηση (δεξιά ή αριστερά) της κυματομορφής κατά μήκος του οριζόντιου άξονα. Η μετακίνηση αυτή δεν επηρεάζει τις ρυθμίσεις χρόνου του παλμογράφου.

Για να μετρηθεί DC τάση τοποθετούμε τον διακόπτη εισόδου στη θέση GND και ρυθμίζουμε με το position τη γραμμή που εμφανίζεται στην οθόνη να είναι ακριβώς στη μέση της οθόνης. Τοποθετούμε το διακόπτη στη θέση DC και βάζουμε στην είσοδο του καναλιού τάση DC. Η ευθεία γραμμή μετακινείται προς τα επάνω (για θετική τάση) ή προς τα κάτω (για αρνητική τάση). Εστω ότι η ευθεία στην οθόνη ανέβηκε 3 τετράγωνα και ο διακόπτης Volts/Div είναι στη θέση 2. Τότε $V_{DC} = 3 \times 2 = 6 \text{ V}$

Για να μετρηθεί ένα σήμα AC με τον παλμογράφο εισάγεται (συνδέεται) σε μια από τις δύο εισόδους του (σε ένα κανάλι εισόδου). Τοποθετείται ο διακόπτης (AC-DC-GND) εισόδου στη θέση AC. Το εσωτερικό ποτενσιόμετρο του διακόπτη (επιλογή) Volts/Div θα πρέπει να είναι στη θέση cal (calibrated). Ρυθμίζονται οι διακόπτες - επιλογείς Time/Div και Volts/Div έτσι, ώστε να φαίνεται στην οθόνη σταθερή κυματομορφή και να εμφανίζονται στην οθόνη δύο ή τρεις πλήρεις περίοδοι του σήματος. Με τα ρυθμιστικά Position τοποθετείται η κυματομορφή έτσι, ώστε οι πάνω (ή οι κάτω) κορυφές της να εφάπτονται σε μία οριζόντια γραμμή της οθόνης και μία πάνω (ή κάτω) κορυφή να είναι ακριβώς στον κάθετο κεντρικό άξονα της οθόνης που έχει και τις υποδιαιρέσεις (σχήμα 6).

Για τη μέτρηση του πλάτους V_m ή του πλάτους από-κορυφή-σε-κορυφή (V_{p-p}) σημειώνονται τα τετράγωνα της οθόνης που καταλαμβάνει η κυματομορφή κατακόρυφα. Ο αριθμός αυτός πολλαπλασιάζεται επί την τιμή που δείχνει ο διακόπτης Volts/Div.

Για τη μέτρηση της περιόδου T του σήματος σημειώνονται τα τετράγωνα της οθόνης μεταξύ δύο σημείων της ίδιας φάσης (για παράδειγμα, μεταξύ δύο διαδοχικών θετικών κορυφών). Ο αριθμός αυτός πολλαπλασιάζεται επί τον χρόνο που δείχνει ο διακόπτης Time/Div και βρίσκεται η περίοδος. Η συχνότητα f του σήματος είναι το αντίστροφο της περιόδου: $f = 1 / T$.



Σχήμα 6. Κυματομορφή στην οθόνη παλμογράφου.

Για τη απεικόνιση χαρακτηριστικών I-V χρησιμοποιείται η λειτουργία X-Y. Με την ενεργοποίηση του αντίστοιχου διακόπτη, ο οριζόντιος άξονας της οθόνης αντιστοιχεί στην X είσοδο του παλμογράφου, ενώ ο κατακόρυφος στην Y είσοδο. Η βαθμολόγηση των αξόνων γίνεται με βάση τις θέσεις των αντιστοίχων επιλογών Volts/Div.

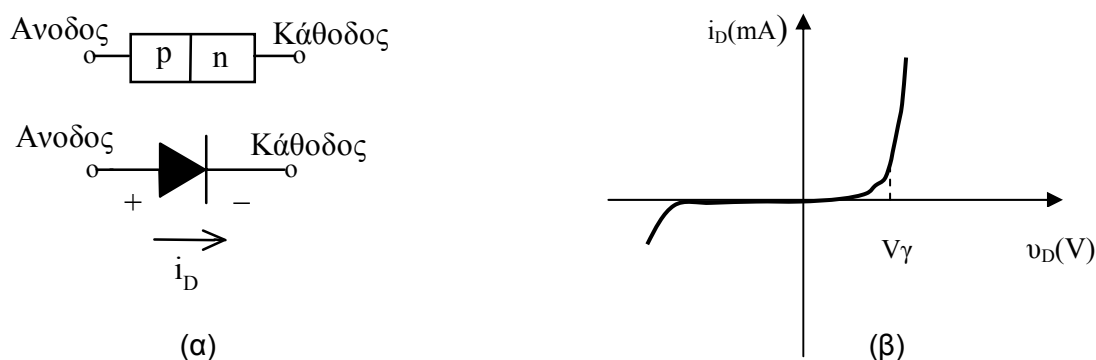
ΑΣΚΗΣΗ 1 ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ

Α. Θεωρητική εισαγωγή.

Ο λόγος τάσης προς ένταση για τα γραμμικά στοιχεία κυκλώματος παραμένει σταθερός, σύμφωνα με το νόμο του Ohm. Οι διόδους ημιαγωγοί σαν στοιχεία κυκλώματος δεν ακολουθούν το νόμο του Ohm, είναι δηλαδή μη γραμμικά στοιχεία, όπως φαίνεται και από τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης $I-V$, που είναι μη γραμμική. Η διόδος περιλαμβάνει μια επαφή p και επομένως επιτρέπει την διόδου του ρεύματος κατά τη μία διεύθυνση (σχήμα 1.1α). Το άκρο που συνδέεται με τη περιοχή p της ένωσης p ονομάζεται **άνοδος**, ενώ το άκρο που συνδέεται με την περιοχή n ονομάζεται **κάθοδος**. Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει τη χαρακτηριστική της διόδου, που δίνεται στο σχήμα 1.1β είναι:

$$i_D = I_S (e^{qV_D / nKT} - 1)$$

όπου I_S είναι το ανάστροφο ρεύμα, q το φορτίο του ηλεκτρονίου ($= 1.6 \times 10^{-19}$ C), k η σταθερά Boltzman ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/°K), T η θερμοκρασία της ένωσης p σε °K και n είναι η σταθερά εκπομπής με τυπική τιμή 1 για το Ge και 2 για το Si.



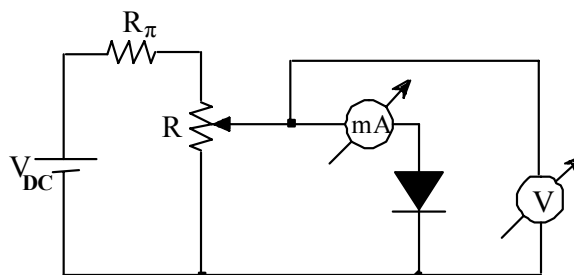
Σχήμα 1.1. Σχηματική παράσταση και σύμβολο της διόδου (α) και χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (β).

Όταν το δυναμικό της ανόδου είναι θετικότερο από το δυναμικό στην κάθοδο, τότε η διόδος χαρακτηρίζεται ως **ορθά πολωμένη** και άγει (διαρρέεται από ρεύμα ορθής φοράς). Όταν η κάθοδος είναι θετικότερη από την άνοδο, τότε η διόδος είναι **ανάστροφα πολωμένη** και δεν άγει (δεν διαρρέεται από ρεύμα). Κατά την ορθή πόλωση μιας διόδου, η ορθή τάση πρέπει να ξεπεράσει το κατώφλι τάσης V_γ (που για το Si είναι 0.6 ως 0.7 Volts, ενώ για το Ge είναι 0.2 ως 0.3 Volts) για να αρχίσει η διέλευση σημαντικού ορθού ρεύματος. Έτσι, για μια ιδανική διόδο θεωρείται ότι για τάσεις μικρότερες από το κατώφλι το ρεύμα είναι μηδενικό, ενώ για την τάση κατωφλίου ή και ελάχιστα μεγαλύτερες το ρεύμα αυξάνεται απότομα και μπορεί να έχει οποιαδήποτε μεγάλη τιμή, ανάλογα με τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ για το εξάρτημα.

Η στατική αντίσταση μιας διόδου μπορεί να μετρηθεί με ωμόμετρο. Συνδέοντας τους ακροδέκτες του ωμομέτρου, έτσι ώστε η διόδος να πολώνεται ορθά, το όργανο θα δείχνει μια μικρή τιμή αντίστασης (εκατοντάδες Ω). Αντιστρέφοντας την πολικότητα των ακροδεκτών το όργανο θα δείχνει πολύ μεγάλη αντίσταση (άπειρη). Με τις παραπάνω μετρήσεις μπορεί να γίνει ένας αρχικός έλεγχος καλής λειτουργίας μιας διόδου.

Η σχεδίαση της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης $I-V$ μπορεί να γίνει σημείο προς σημείο με μετρήσεις στο κύκλωμα του σχήματος 1.2. Μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο R σημειώνονται οι τιμές της ορθής τάσης στα άκρα της διόδου και του ορθού ρεύματος που τη διαρρέει. Η αντίσταση R_T είναι αντίσταση προστασίας και τίθεται για να περιορίζεται το μέγιστο ρεύμα της διόδου.

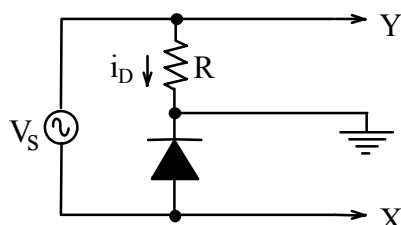
Αντιστρέφοντας τα άκρα της διόδου μπορεί να συμπληρωθεί η χαρακτηριστική για την περιοχή ανάστροφης πόλωσης.



Σχήμα 1.2. Κύκλωμα για τη μέτρηση ρεύματος-τάσης σε δίοδο.

Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης $I-V$ μπορεί να εμφανιστεί απ' ευθείας στην οθόνη παλμογράφου με τη χρήση του κυκλώματος του σχήματος 1.3. Στον οριζόντιο άξονα του παλμογράφου (X) μετράται η τάση στα άκρα της διόδου, ενώ στον κατακόρυφο (Y) δίνεται η τάση στα άκρα της αντίστασης που είναι ανάλογη (γραμμικά) του ρεύματος της διόδου. Για δεδομένη αντίσταση R το ρεύμα της διόδου είναι:

$$i \text{ (mA)} = u_R \text{ (V)} / R \text{ (k}\Omega\text{)}$$



Σχήμα 1.3. Κύκλωμα για την εμφάνιση χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης διόδου σε παλμογράφο.

B. Πειραματικό μέρος.

1. Να συνδεθεί το κανάλι 1 του παλμογράφου με την έξοδο της γεννήτριας. Για ένα τυχόν ημιτονικό σήμα χαμηλής συχνότητας (π.χ. 10 V, 100 Hz) να σχεδιαστεί η εικόνα του παλμογράφου σε βαθμολογημένους άξονες.

2. Να μετρηθούν το πλάτος του V_m και το πλάτος V_{p-p} . Να γράψετε βήμα προς βήμα τις μετρήσεις σας.

3. Να μετρηθεί το ίδιο σήμα με ένα πολύμετρο και να συγκριθεί η ένδειξη του πολυμέτρου με εκείνη του παλμογράφου. Εξηγήστε τις πιθανές διαφορές. Υπενθυμίζεται ότι το πολύμετρο δείχνει την ενεργό τιμή (rms) του σήματος και η ένδειξη είναι σωστή μόνο για χαμηλές συχνότητες (για παράδειγμα, μέχρι 100 Hz).

4. Να μετρηθεί η περίοδος του σήματος και να βρεθεί η συχνότητά του.

5. Να κατασκευαστεί το κύκλωμα του **σχήματος 1.2** με πηγή συνεχούς τάσης $V_{DC} = 5 \text{ V}$, ποτενσιόμετρο $R = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_{\pi} = 120 \Omega$ και τη δίοδο (1N4007) συνδεδεμένη κατά την ορθή φορά. Να υπολογιστεί θεωρητικά το μέγιστο ρεύμα διόδου που επιτρέπει αυτή η τιμή της R_{π} , καθώς και η μέγιστη ισχύς στην R_{π} .

6. Μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο ρυθμίζεται η ανοδική τάση V_D από την τιμή 0 μέχρι να γίνει το ανοδικό ρεύμα $I_D = 20 \text{ mA}$ και σημειώνονται οι αντίστοιχες τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 1.

7. Να αντιστραφεί η πολικότητα της διόδου. Με τη δίοδο συνδεδεμένη στο κύκλωμα κατά την ανάστροφη φορά και τάση $V_{DC} = 30 \text{ V}$, να ρυθμιστεί η τάση στο βολτόμετρο (που ισούται με την τάση στα άκρα της διόδου, αφού $V_{\text{(αμπερόμετρου)}} = 0$) από 0 μέχρι 25 Volt και να συμπληρωθεί ο

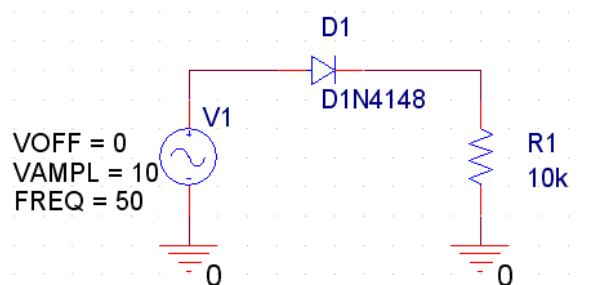
πίνακας 2.

8. Με τις μετρήσεις των πινάκων 1 και 2 να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική της διόδου κατά την ορθή και ανάστροφη φορά.

9. Να κατασκευαστεί το κύκλωμα του **σχήματος 1.3** με $V_s = 30 \text{ Vp-p}$ και $R = 1 \text{ k}\Omega$, και να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης της διόδου όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

Γ. Θεωρητική ανάλυση και προσομοίωση με τον υπολογιστή (πρόγραμμα PSpice)

10. Δίνεται το κύκλωμα του ανορθωτή του Σχ. 1.4. Για το κύκλωμα αυτό, να παρασταθεί γραφικά η τάση εισόδου και εξόδου για 2 περιόδους. Τι παρατηρείτε;

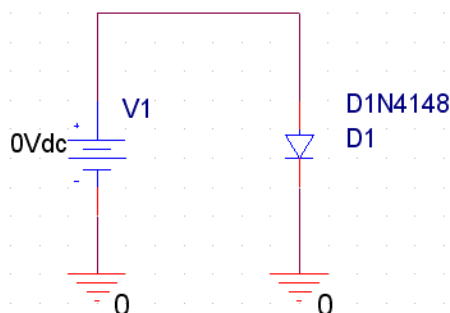


Σχήμα 1.4 Κύκλωμα Απλού Ανορθωτή

11. Να επαναληφθεί το βήμα 10 για τις τιμές της θερμοκρασίας: 0°C , 27°C , 50°C , 100°C και 200°C .

12. Να παρασταθεί γραφικά η κυματομορφή της ισχύος που καταναλώνει το φορτίο.

13. Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του Σχ. 1.5 και με τη βοήθεια της Συνεχούς Σάρωσης (DC Sweep), να παρασταθεί γραφικά η χαρακτηριστική της διόδου.

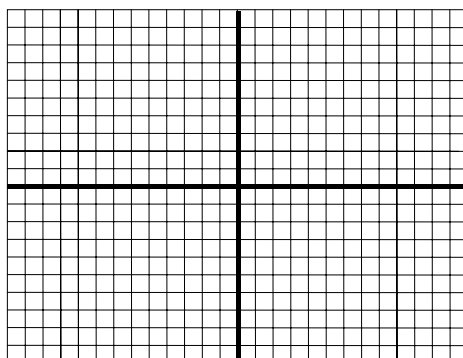


Σχήμα 1.5 Κύκλωμα για την απεικόνιση της χαρακτηριστικής της διόδου

ΑΣΚΗΣΗ 1
ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΕΠΩΝΥΜΟ :
 ΟΝΟΜΑ :
 ΑΕΜ :
 Ημερ/νία :
 Ομάδα :

Βήμα 1:



Βήμα 2:

$V_m =$

$V_{p-p} =$

Βήμα 3:

$V_{\text{με πολύμετρο}} =$

Συσχέτιση με το βήμα 2:

Βήμα 4:

$T =$

$f =$

Βήματα 5, 6 και 7:

(θεωρητικά) $I_{dmax} =$

$P_{Rmax} =$

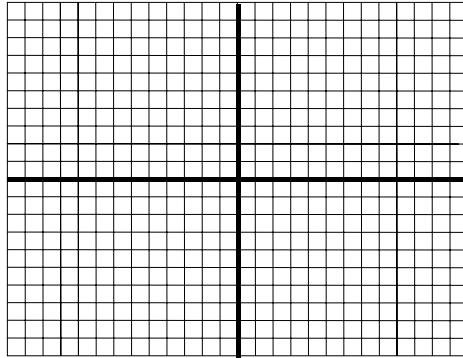
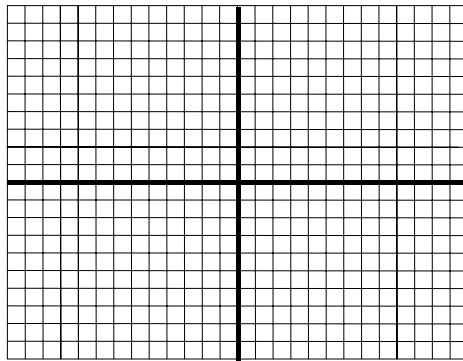
Πίνακας 1.

I_D (mA)	V_D (volts)
0	
0.1	
0.2	
0.5	
1	

3	
5	
7	
10	
15	
20	

Πίνακας 2.

V_D (volts)	I_D (μA)
0	
-1	
-2	
-5	
-10	
-15	
-20	
-25	

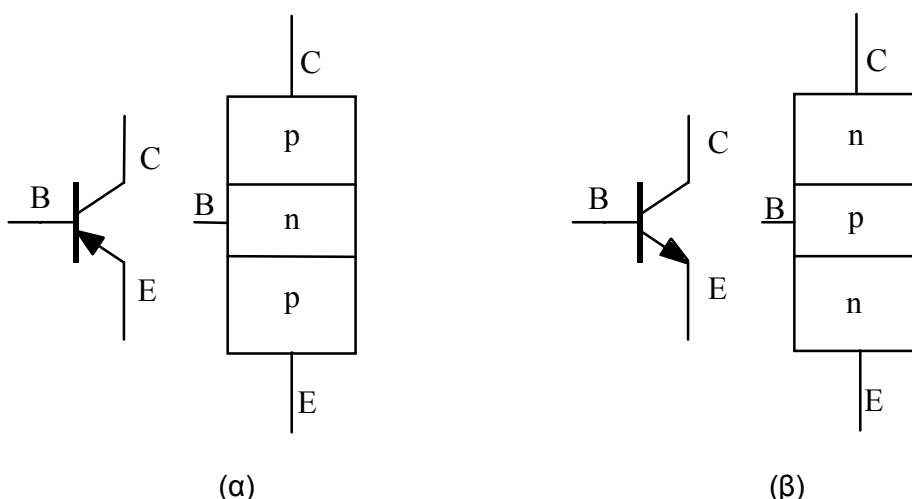
Βήμα 8:**Βήμα 9:**

Α Σ Κ Η Σ Η 2

ΠΟΛΩΣΗ, ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΙΚΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

1. Διπολικό τρανζίστορ

Το διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor, BJT) είναι κρύσταλλος ημιαγωγού με τρεις περιοχές προσμίξεων τύπου p ή n στη σειρά που δημιουργούν δύο εσωτερικές επαφές pn, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η μεσαία περιοχή ονομάζεται **βάση** (base), ενώ οι άλλες δύο λέγονται **εκπομπός** (emitter) και **συλλέκτης** (collector). Υπάρχουν διπολικά τρανζίστορ τύπου pnp (σχήμα 2.1α) και τύπου npn (σχήμα 2.1β) με αντίστοιχο συμβολισμό.



Σχήμα 2.1. Σύμβολο και σχηματικό διάγραμμα τρανζίστορ τύπου **pnp** (α) και **nnp** (β).

Για την κανονική λειτουργία του το τρανζίστορ πρέπει να πολωθεί κατάλληλα με εξωτερικές πηγές τάσης. Η επαφή βάσης-συλλέκτη πρέπει να είναι **ανάστροφα πολωμένη**, ενώ η επαφή βάσης-εκπομπού πρέπει να πολωθεί **ορθά**. Στην πράξη επιτυγχάνεται με διάφορες μεθοδολογίες η πόλωση και των δύο επαφών χρησιμοποιώντας μια και μόνο πηγή.

Σε τρανζίστορ τύπου npn το ρεύμα οφείλεται κυρίως σε κίνηση ηλεκτρονίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, ενώ σε τρανζίστορ τύπου pnp οφείλεται κυρίως στις οπές. Για τα ρεύματα μέσα στο τρανζίστορ ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$I_C + aI_E - I_{CO} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_C = -aI_E + I_{CO} \quad (1)$$

και

$$I_B + (1-a)I_E + I_{CO} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_E = -I_B / (1-a) - I_{CO} / (1-a) \quad (2)$$

Ο συντελεστής a προκύπτει:

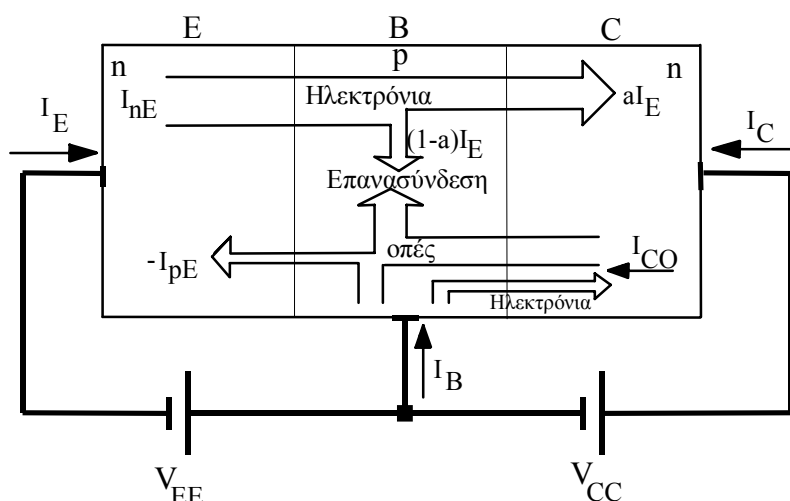
$$a = - \frac{I_C - I_{CO}}{I_E} \quad (3)$$

ενώ ο συντελεστής β είναι:

$$\beta = a / (1-a) \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (4) προκύπτει:

$$I_C = \beta I_B + (\beta+1)I_{CO} \quad (5)$$



Σχήμα 2.2. Τα ρεύματα σε τρανζίστορ ηρη.

Για τα τρανζίστορ **πυριτίου** το I_{CO} θεωρείται αμελητέο, οπότε:

$$a \cong -I_C / I_E \quad (6)$$

και $\beta \cong I_C / I_B \quad (7)$

Επίσης, επειδή το a είναι περίπου μοναδιαίο, μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι τα ρεύματα I_C και I_E είναι αριθμητικά ίσα.

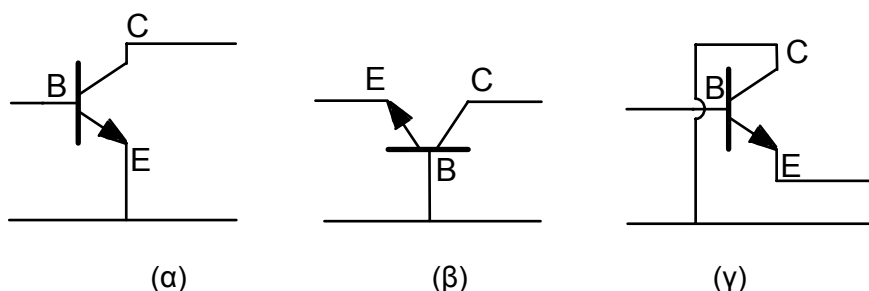
Για τη συνδεσμολογία του τρανζίστορ σε κύκλωμα πρέπει ο ένας από τους τρεις ακροδέκτες να είναι κοινός στην είσοδο και στην έξοδο. Ετσι προκύπτουν τρεις τρόποι συνδεσμολογίας του τρανζίστορ, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3: α) συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (common emitter, CE), β) συνδεσμολογία κοινής βάσης (common base, CB), γ) συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη (common collector, CC).

Στην κανονική λειτουργία η τάση της επαφής βάσης-εκπομπού σε τρανζίστορ **πυριτίου** είναι:

$$V_{BE} \cong 0.7 \text{ Volt} \quad (\text{Si}) \quad (8)$$

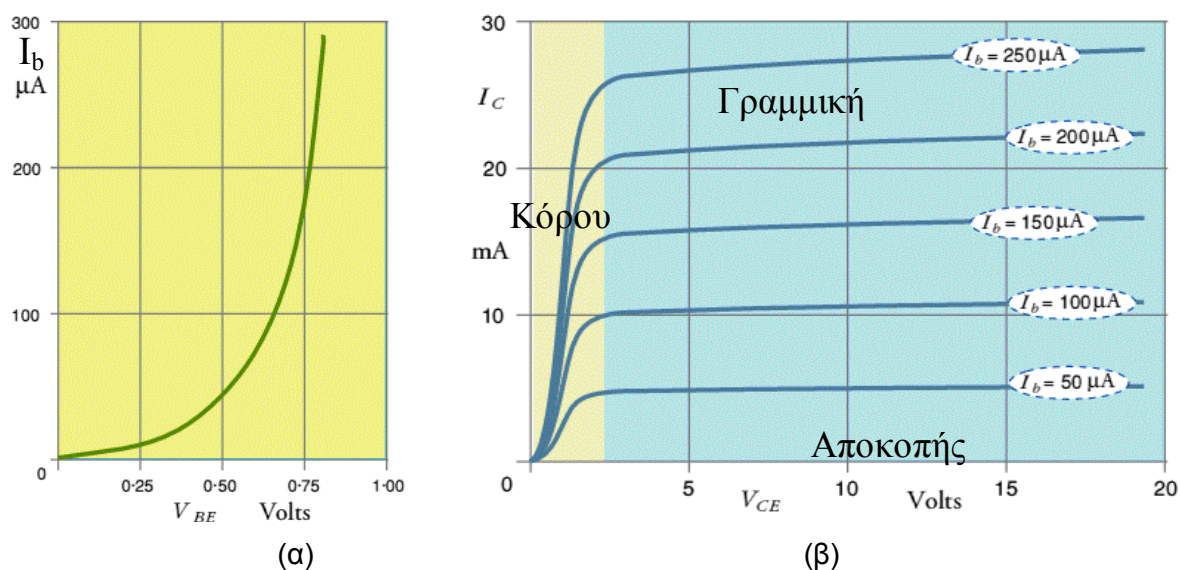
ενώ για τρανζίστορ **γερμανίου** είναι:

$$V_{BE} \cong 0.2 \text{ Volt} \quad (\text{Ge}) \quad (9)$$



Σχήμα 2.3. Συνδεσμολογίες τρανζίστορ ηρη: α) κοινού εκπομπού, β) κοινής βάσης, γ) κοινού συλλέκτη.

Η λειτουργία του τρανζίστορ σε κάθε συνδεσμολογία μπορεί να περιγραφεί για διάφορες συνθήκες με τις χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου. Στο σχήμα 2.4 δίνονται οι χαρακτηριστικές εισόδου (2.4α) και εξόδου (2.4β) για συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Στις χαρακτηριστικές εξόδου διακρίνονται οι περιοχές κόρου (saturation), αποκοπής (cut-off) και η περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

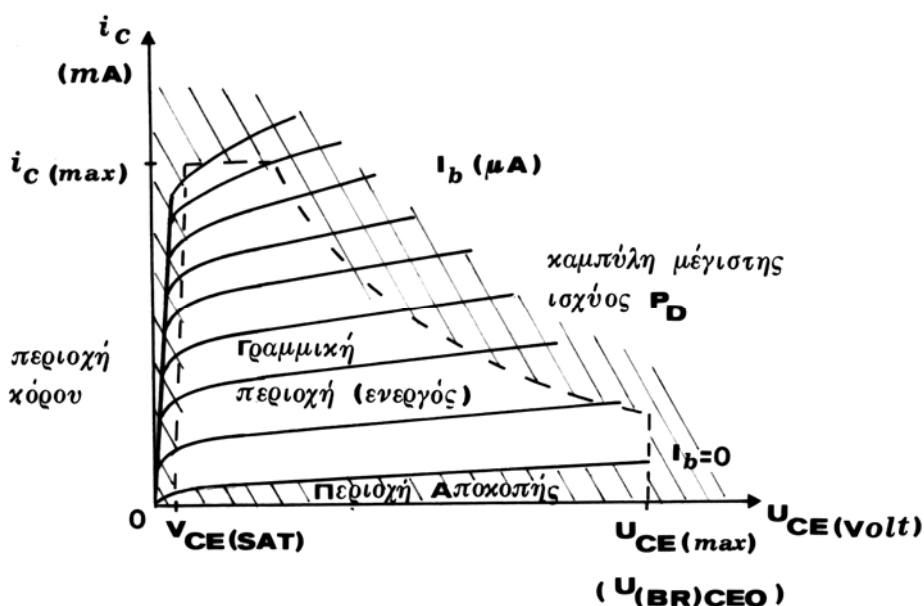


Σχήμα 2.4. Χαρακτηριστικές εισόδου (α) και εξόδου (β) για συνδεσμολογία κοινού εκπομπού.

Η γραμμική περιοχή για τη λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ περιορίζεται στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών εξόδου από τις μέγιστες επιδόσεις του εξαρτήματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, αυτή η περιοχή καθορίζεται από:

1. Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα συλλέκτη i_{Cmax} .
2. Την ευθεία κόρου κοντά στο $u_{CE} \approx 0$.
3. Την ευθεία αποκοπής για $i_B = 0$ κοντά στον άξονα u_{CE} .
4. Το μέγιστο επιτρεπτό δυναμικό u_{CE} .

5. Τις υπερβολικές καμπύλες επιτρεπτής ισχύος $P_D = V_{CE} I_C$ που δείχνουν τη μέγιστη αντοχή στη θερμοκρασία. Αν ξεπεραστεί η ισχύς P_D , τότε το τρανζίστορ θα υπερθερμανθεί και κινδυνεύει να καταστραφεί.



Σχήμα 2.5. Περιοχές λειτουργίας στις χαρακτηριστικές εξόδου κοινού εκπομπού.

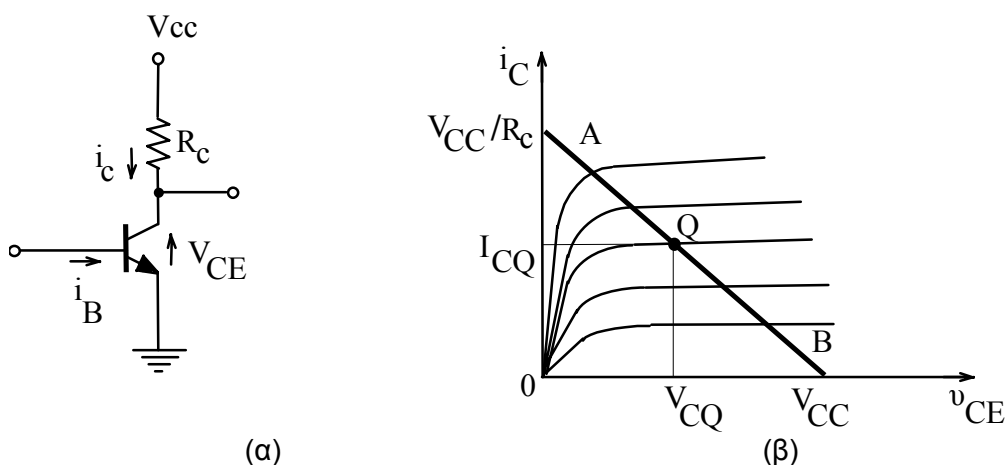
Για τη λειτουργία του τρανζίστορ απαιτείται ρεύμα βάσης i_B (πόλωση), οπότε το κύκλωμα του συλλέκτη (εξόδου) θα διαρρέεται από ρεύμα $i_C = \beta i_B$. Για το κύκλωμα συλλέκτη στο σχήμα

(2.6α) ισχύει η σχέση:

$$V_{CC} = i_C R_C + u_{CE} \Rightarrow i_C = -u_{CE}/R_C + V_{CC}/R_C \quad (10)$$

Η σχέση $i_C - u_{CE}$ είναι μία ευθεία που σχεδιάζεται όπως στο σχήμα (2.6β) και ονομάζεται **ευθεία φόρτου** ή φορτίου (load line). Το σημείο όπου η ευθεία φόρτου τέμνει την χαρακτηριστική εξόδου για το επιλεγμένο ρεύμα βάσης i_B λέγεται σημείο ηρεμίας ή σημείο λειτουργίας και συμβολίζεται με το Q. Για γραμμική λειτουργία το σημείο ηρεμίας πρέπει να βρίσκεται στην κεντρική περιοχή, όπου οι καμπύλες είναι περισσότερο γραμμικές και ομοιόμορφα κατανεμημένες. Λειτουργία κοντά στα σημεία A ή B των χαρακτηριστικών (σχήμα 2.6β) μπορεί να δημιουργήσει παραμόρφωση του σήματος εξόδου (ψαλιδισμό), που οφείλεται σε κόρο ή αποκοπή. Επίσης, η ευθεία φόρτου δεν πρέπει να τέμνει την υπερβολή της P_D (σχήμα 2.5).

Η θέση του Q ορίζει τις τιμές των I_C , I_B και V_{CE} . Επειδή ισχύει ότι $I_C = \beta I_B$, το σημείο Q στο σχήμα (2.6β) θα αλλάξει θέση όταν στο κύκλωμα τοποθετούνται διαφορετικά τρανζίστορ. Στις χαμηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν τα τρανζίστορ με μικρά σήματα, τη μετακίνηση του σημείου Q επηρεάζουν ιδιαίτερα η μεταβολή της u_{BE} με τη θερμοκρασία και οι αλλαγές στο β . Έτσι, με τα κυκλώματα πόλωσης παρέχεται κάποια σταθεροποίηση στα ρεύματα που αντιστοιχούν στο σημείο Q. Σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, πράγμα που συμβαίνει στους ενισχυτές ισχύος, τη μεγαλύτερη μεταβολή στο I_C την προκαλεί το ευαίσθητο στη θερμοκρασία ρεύμα I_{CBO} .

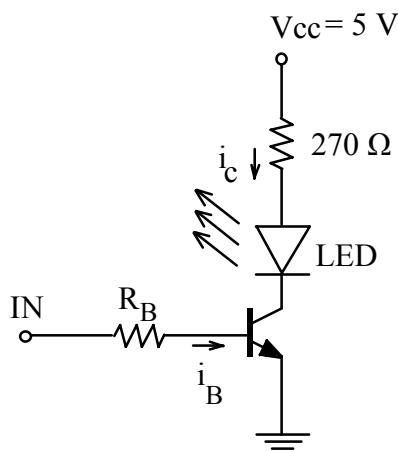


Σχήμα 2.6. Κύκλωμα κοινού εκπομπού (α) και ευθεία φόρτου (β).

Ένα τρανζίστορ λειτουργεί σωστά αν έχει τα κατάλληλα και σωστά χαρακτηριστικά κέρδους (ικανότητα να ενισχύει), δε διασπάται από τις τάσεις λειτουργίας, διατηρεί τη διαρροή ρευμάτων μέσα στα όρια των ανοχών και στην περίπτωση κυκλωμάτων παλμών, έχει τα ορθά χαρακτηριστικά, όπως είναι η καθυστέρηση (delay) και ο χρόνος αποθήκευσης. Οι δοκιμές μπορούν να γίνουν με εμπορικές εργαστηριακές συσκευές δοκιμής τρανζίστορ (curve tracers), ή με γεννήτρια και παλμογράφο. Είναι επίσης δυνατόν να δοκιμασθεί αν ένα τρανζίστορ είναι ανοικτό ή βραχυκυκλωμένο μόνο με ωμόμετρο. Οι απλές δοκιμές με ωμόμετρο δείχνουν επίσης αν είναι τύπου pnp ή npn και αν έχει σημαντική διαρροή Γνωρίζοντας ότι το τρανζίστορ έχει δύο επαφές pn, μία μεταξύ βάσης-εκπομπού και μία μεταξύ βάσης-συλλέκτη, ο έλεγχος του γίνεται μετρώντας την ωμική αντίσταση μεταξύ των συνδυασμών (B-E), (E-C) και (C-B) και με τις δύο πολικότητες ακροδεκτών. Η αντίσταση ορθής φοράς κυμαίνεται συνήθως από 20 Ω μέχρι 500 Ω σε διάφορους τύπους τρανζίστορ, ενώ τυπικές τιμές για την ανάστροφη αντίσταση είναι από 10 kΩ ως και 10 MΩ. Η αντίσταση μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού πρέπει να είναι πολύ μεγάλη (άπειρη), αφού δεν υπάρχει εσωτερική επαφή pn μεταξύ αυτών των δύο ακροδεκτών.

Το τρανζίστορ μπορεί να λειτουργεί σαν διακόπτης και να επιτρέπει ή όχι τη ροή ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου (φορτίου). Αυτό γίνεται όταν το τρανζίστορ λειτουργεί εναλλακτικά στον κόρο και την αποκοπή. Στο κύκλωμα του σχήματος 2.7 όταν το ρεύμα I_B είναι μηδέν, το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή και η LED (Light Emitting Diode) δεν φωτίζει. Αν δοθεί κατάλληλη τάση στην είσοδο IN, τότε το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή κόρου και η LED ανάβει. Η τάση V_{CE} όταν το τρανζίστορ είναι στον κόρο είναι:

$$V_{CE(SAT)} \cong 0.2 \text{ Volt} \quad (11)$$



Σχήμα 2.7. Κύκλωμα διακοπτικής λειτουργίας τρανζίστορ.

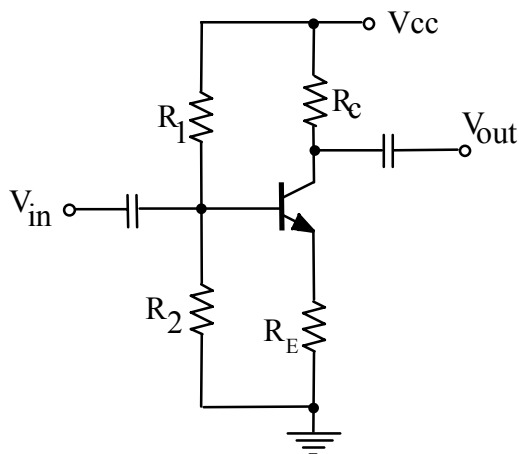
Το πιο συνηθισμένο στην πράξη κύκλωμα πόλωσης για τη λειτουργία στη γραμμική περιοχή είναι το κύκλωμα πόλωσης εκπομπού που σχεδιάζεται στο σχήμα 2.8. Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 δίνουν μια σταθερή πόλωση, ενώ η αντίσταση R_E του εκπομπού οδηγεί σε αρνητική ανάδραση ρεύματος, που τείνει να διατηρήσει σταθερό το I_E . Ετσι, αν το I_E αυξηθεί, η πτώση τάσης στην R_E αυξάνει, ελαττώνεται η V_{BE} και επομένως (από τις καμπύλες εισόδου) ελαττώνεται το ρεύμα I_B , οπότε το I_E σταθεροποιείται στην αρχική του τιμή.

Για να τεθεί το σημείο λειτουργίας Q στο μέσο της dc ευθείας φόρτου, πρέπει το δυναμικό V_{CQ} στο συλλέκτη να γίνει:

$$V_{CQ} = (V_{CC}/2)(1 + R_E/(R_E + R_C)) \quad (12)$$

οπότε το ρεύμα I_C θα είναι:

$$I_C = (V_{CC} - V_{CQ}) / R_C \quad (13)$$

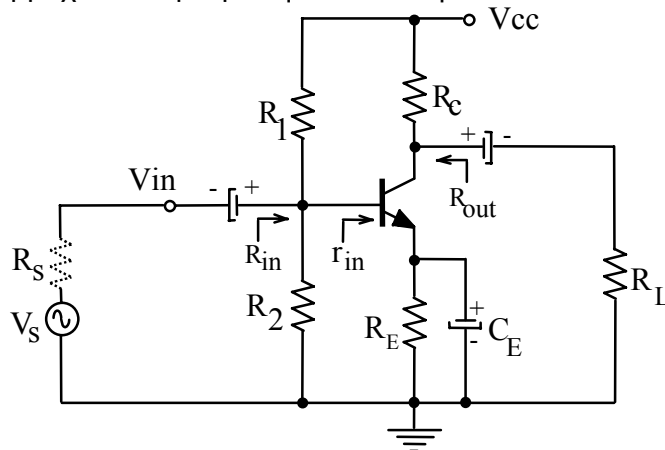


Σχήμα 2.8. Κύκλωμα πόλωσης εκπομπού.

2. Ενισχυτής κοινού εκπομπού

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το πιο συνηθισμένο στην πράξη κύκλωμα πόλωσης είναι το κύκλωμα πόλωσης εκπομπού (σχήματα 2.8, 2.9). Η παρουσία της R_E στο κύκλωμα εξόδου του ενισχυτή οδηγεί σε ανεπιθύμητη κατανάλωση ωφέλιμης ισχύος, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο σήμα. Επιπλέον οδηγεί σε ελάττωση της ενίσχυσης. Για την αποφυγή των τελευταίων μη επιθυμητών καταστάσεων, συνδέεται παράλληλα προς την R_E ένας **πυκνωτής**

διαρροής C_E . Η τιμή του εκλέγεται έτσι ώστε, για τη κατώτερη συχνότητα του προς ενίσχυση σήματος, να δρα σαν βραχυκύκλωμα για την αντίσταση R_E .



Σχήμα 2.9. Ενισχυτής κοινού εκπομπού

Χωρίς τον πυκνωτή C_E και το φορτίο R_L , στο βρόχο συλλέκτη-εκπομπού ισχύει η σχέση:

$$V_{CC} = i_C(R_C + R_E) + u_{CE} \Rightarrow$$

$$i_C = -u_{CE}/(R_C + R_E) + V_{CC}/(R_C + R_E) \quad (14)$$

Η σχέση (14) παριστάνει την εξίσωση της dc ευθείας φόρτου του ενισχυτή. Η dc ευθεία φόρτου καθορίζεται από τα σημεία V_{CC} στο άξονα u_{CE} και $V_{CC}/(R_C + R_E)$ στον άξονα i_C . Η ευθεία αυτή συμπίπτει και με την ac ευθεία φόρτου του ενισχυτή στο κύκλωμα χωρίς τον πυκνωτή C_E και το φορτίο R_L .

Η ύπαρξη του πυκνωτή C_E διαφοροποιεί τις dc και ac ευθείες φόρτου. Θέτοντας $R_{ac} = (R_C // R_L)$, για το εναλλασσόμενο η **ac ευθεία φόρτου** προκύπτει:

$$i_C = -u_{ce} / R_{ac} \quad (15)$$

Η ευθεία αυτή τέμνει τον άξονα i_C στο σημείο:

$$i_{C(max)} = I_{CQ} + V_{CEQ} / R_{ac} =$$

$$= (V_{CC} - R_E I_{CQ}) / R_{ac} \quad (16)$$

και τον άξονα u_{CE} στο σημείο:

$$u_{CE(max)} = V_{CC} - R_E I_{CQ} =$$

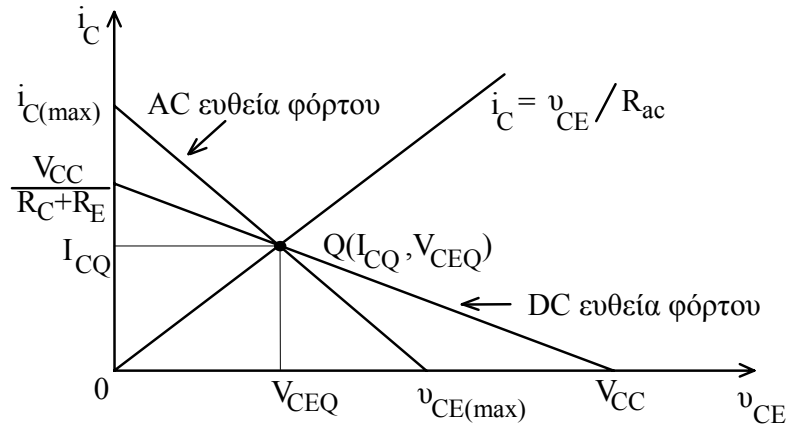
$$= V_{CEQ} + R_{ac} I_{CQ} \quad (17)$$

Στο σχήμα 2.10 φαίνονται τα σημεία τομής της dc και της ac ευθείας φόρτου με τους άξονες. Η θέση του σημείου Q πάνω στην ευθεία φόρτου εξαρτάται από τα στοιχεία του κυκλώματος. Το σημείο λειτουργίας Q **επιλέγεται στο μέσο της ac ευθείας φόρτου**, ώστε να λαμβάνεται στην έξοδο η μεγαλύτερη δυνατή διακύμανση χωρίς να συμβαίνει "ψαλλίδιση" του σήματος. Η αντίστοιχη τάση V_{CEQ} τότε είναι:

$$V_{CEQ} = V_{CC} / (1 + R_{dc} / R_{ac}) \quad (18)$$

όπου $R_{dc} = (R_C + R_E)$. Το ρεύμα λειτουργίας I_{CQ} θα είναι:

$$I_{CQ} = V_{CEQ} / R_{ac} \quad (19)$$



Σχήμα 2.10. Ευθείες φόρτου ac και dc.

Γραφικά, το σημείο Q προσδιορίζεται από την τομή της dc ευθείας φορτίου και της ευθείας που περιγράφεται από τη σχέση:

$$i_C R_{ac} = v_{CE} \quad (20)$$

και διέρχεται από την αρχή των αξόνων i_C και v_{CE} (σχήμα 2.10).

Η αντίσταση εισόδου R_{in} του ενισχυτή του σχήματος 2.9 είναι ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων R_1 , R_2 και της αντίστασης r_{in} που φαίνεται από τη βάση του τρανζίστορ.

$$R_{in} = R_1 // R_2 // r_{in} \quad (21)$$

Η αντίσταση r_{in} **με τον πυκνωτή C_E** είναι:

$$\begin{aligned} r_{in} &= r_{bb'} + r_{b'e} \\ &= r_{bb'} + (\beta + 1)r_d \end{aligned} \quad (22)$$

όπου η αντίσταση $r_{bb'}$ είναι η αντίσταση που παρουσιάζει το υλικό στην επαφή της βάσης (περίπου 50 ως 100 Ω) και η δυναμική αντίσταση r_d είναι:

$$r_d = nkT/qI_E \quad (23)$$

Για θερμοκρασία $T=300$ °K η σχέση (23) γίνεται:

$$r_d = \frac{n \cdot 26 \text{ (mV)}}{I_E \text{ (mA)}} \quad (24)$$

Για παράδειγμα, για $I_E=1$ mA και για τρανζίστορ πυριτίου ($n = 2$), η r_d είναι ίση με 52 Ω .

Χωρίς τον πυκνωτή C_E , η αντίσταση r_{in} γίνεται:

$$\begin{aligned} r_{in} &= r_{bb'} + (\beta + 1)(r_d + R_E) \\ &\cong (\beta + 1) R_E \end{aligned} \quad (25)$$

Η αντίσταση εξόδου R_{out} του ενισχυτή είναι περίπου ίση με την αντίσταση R_C .

$$R_{out} \cong R_C \quad (26)$$

Το κέρδος τάσης (ενίσχυση) του ενισχυτή είναι:

$$\begin{aligned} A_U &= V_{out} / V_{in} = \\ &= A (R_{in} / (R_{in} + R_s)) (R_L / (R_L + R_{out})) \end{aligned} \quad (27)$$

όπου A είναι η ενίσχυση τάσης μεταξύ βάσης και συλλέκτη:

$$A = -\beta R_C / r_{in} \quad (28)$$

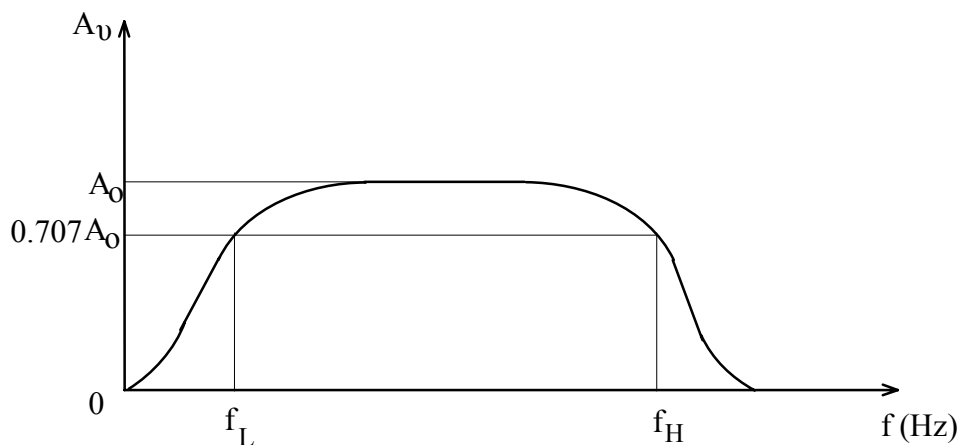
Είναι προφανές ότι αν χρησιμοποιηθεί ο πυκνωτής διέλευσης C_E στον εκπομπό, τότε η αντίσταση r_{in} θα δίνεται από τη σχέση (22), ενώ **χωρίς** τον πυκνωτή C_E ισχύει η σχέση (25) και η ενίσχυση γίνεται:

$$A \cong - R_C / R_E \quad (29)$$

Για να βρεθεί η συχνотική απόκριση του ενισχυτή χρησιμοποιούνται συνήθως τα λογαριθμικά συχνотικά διαγράμματα ή διαγράμματα Bode και η μονάδα Decibel (dB) που ορίζεται σαν:

$$A_U \text{ (σε dB)} = 20 \log(V_{out} / V_{in}) \quad (30)$$

Το διάγραμμα Bode (συχνотότητας-πλάτους) σχεδιάζεται σε ημιλογαριθμικό ή λογαριθμικό χαρτί (ο άξονας της συχνотότητας είναι πάντα λογαριθμικός). Στο διάγραμμα σημειώνονται οι αποκρίσεις για διάφορες συχνотότητες στην περιοχή που ενδιαφέρει. Τα σημεία όπου η έξοδος γίνεται μικρότερη κατά 3 dB (ή στο 70.7%) της τιμής της στις μέσες συχνотότητες (A_0), ορίζουν την κατώτερη (f_L) και την ανώτερη (f_H) συχνотητα αποκοπής (σχήμα 2.11).

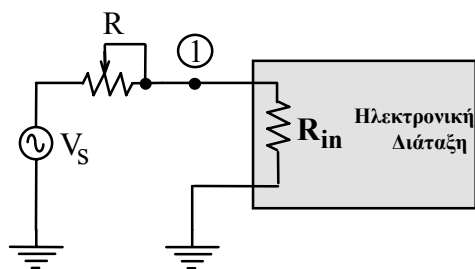


Σχήμα 2.11. Συχνотική απόκριση πλάτους.

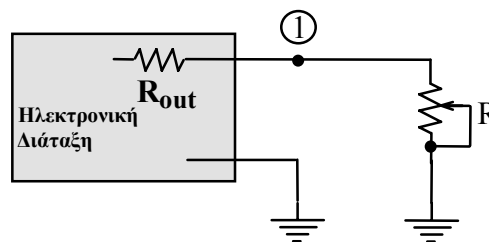
3. Μέτρηση αντιστάσεων εισόδου και εξόδου.

Για τη μέτρηση της αντίστασης εισόδου R_{in} μιας ηλεκτρονικής, γενικά, διάταξης σημειώνεται αρχικά το πλάτος του σήματος V_s , όταν αυτό συνδέεται απ' ευθείας στην είσοδο της διάταξης. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται σε σειρά στην είσοδο μεταβλητή αντίσταση R ή κιβώτιο αντιστάσεων (σχήμα 2.12). Η αντίσταση R μεταβάλλεται μέχρι να ελαττωθεί το σήμα στην είσοδο της διάταξης (κόμβος 1) στο μισό της τιμής που είχε χωρίς την R . Η τιμή αυτή της R ισούται με την αντίσταση εισόδου R_{in} του ενισχυτή, όπως εύκολα προκύπτει από τον διαιρέτη τάσης των αντιστάσεων R_{in} και R .

Για τη μέτρηση της αντίστασης εξόδου R_{out} μιας ηλεκτρονικής διάταξης, σημειώνεται αρχικά το πλάτος της εξόδου χωρίς την ύπαρξη φορτίου. Στη συνέχεια συνδέεται στην έξοδο μία μεταβλητή αντίσταση R ή κιβώτιο αντιστάσεων (σχήμα 2.13) ρυθμισμένο στη **μέγιστη** τιμή του. Η τιμή της R μεταβάλλεται μέχρι να ελαττωθεί το σήμα εξόδου (κόμβος 1) στο μισό της τιμής που είχε χωρίς την R . Η τιμή αυτή της R είναι ίση με την αντίσταση εξόδου R_{out} της διάταξης, όπως εύκολα προκύπτει από τον διαιρέτη τάσης των αντιστάσεων R_{out} και R .



Σχήμα 2.12.
Μέτρηση αντίστασης εισόδου R_{in} .

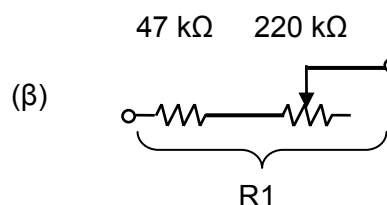
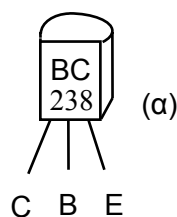


Σχήμα 2.13.
Μέτρηση αντίστασης εξόδου R_{out} .

B. Πειραματικό μέρος.

1. Να κατασκευαστεί το κύκλωμα του **σχήματος 2.9**, χωρίς τον πυκνωτή C_E στον εκπομπό, με $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, πυκνωτές σύζευξης $10 \mu\text{F}$ (προσοχή στην πολικότητα, αν είναι ηλεκτρολυτικοί) και τρανζίστορ BC238 με $\beta=130$, $r_{bb}=50 \Omega$. Στη θέση της αντίστασης R_1 να τοποθετηθεί ο συνδυασμός αντίστασης και ροοστάτη του σχήματος 2.14β. Να ελεγχθεί προσεκτικά η συνδεσμολογία του τρανζίστορ και στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί το κύκλωμα με τάση $V_{CC} = 15 \text{ Volts}$.

2. Να μεταβληθεί η R_1 (ο ροοστάτης), ώστε το σημείο λειτουργίας να είναι στο μέσο της ευθείας φόρτου. Θα πρέπει να ισχύει: $V_{CE} = V_{CC} / 2$. Η μέτρηση της V_{CE} να γίνει με πολύμετρο.



Σχήμα 2.14. (α) Ακροδέκτες τρανζίστορ (β) Συνδυασμός αντίστασης και ροοστάτη στη θέση της αντίστασης R_1 .

3. Να συνδεθεί μιλιαμπερόμετρο στο συλλέκτη (σε σειρά) και να μετρηθεί το ρεύμα I_C . Μετά να τοποθετηθεί μικροαμπερόμετρο σε σειρά στη βάση και να μετρηθεί το ρεύμα I_B . Να υπολογιστεί το β του τρανζίστορ.

4. Να δοθεί στην είσοδο του κυκλώματος ημιτονικό σήμα συχνότητας 1 kHz από τη γεννήτρια. Να μεταβληθεί το πλάτος εισόδου και να μετρηθεί το μέγιστο πλάτος εισόδου και εξόδου ώστε να μην υπάρχει παραμόρφωση στην έξοδο. Να προστεθεί στο κύκλωμα ο πυκνωτής διέλευσης $C_E=100\mu\text{F}$ και να επαναληφθούν οι μετρήσεις. Να υπολογιστεί σε κάθε περίπτωση η ενίσχυση του κυκλώματος.

5. Με το μέγιστο πλάτος να μετρηθούν με τη βοήθεια κιβωτίου αντιστάσεων οι αντιστάσεις εισόδου R_{in} και εξόδου R_{out} του ενισχυτή χωρίς τον πυκνωτή C_E . Για τη μέτρηση της R_{out} να απομακρυνθεί προσωρινά η R_L . Να υπολογιστούν θεωρητικά οι τιμές των αντιστάσεων R_{in} και R_{out} και να συγκριθούν με εκείνες των μετρήσεων. Να προστεθεί στο κύκλωμα ο πυκνωτής διέλευσης C_E και να επαναληφθούν οι μετρήσεις.

6. Να δοθεί στην είσοδο του κυκλώματος (χωρίς τον πυκνωτή C_E) ημιτονικό σήμα πλάτους 100 mV_{p-p} , συχνότητας 1 kHz από τη γεννήτρια. Να μετρηθεί η έξοδος και να υπολογιστεί η ενίσχυση του κυκλώματος. Είναι ίση με εκείνη που υπολογίζεται στο βήμα 4; Να υπολογιστεί θεωρητικά η ενίσχυση (εξίσωση 29) και να συγκριθεί η τιμή της με εκείνη των μετρήσεων. Να προστεθεί στο κύκλωμα ο πυκνωτής διέλευσης C_E και να επαναληφθούν οι μετρήσεις.

7. Να μεταβληθεί η συχνότητα του σήματος εισόδου από 50 Hz μέχρι 1 MHz (με βήματα 50 Hz , 100 Hz , 200 Hz , 500 Hz , κ.λ.π.). Να μετρηθεί το πλάτος εισόδου και εξόδου του ενισχυτή χωρίς τον πυκνωτή C_E και να συμπληρωθεί πίνακας τιμών της ενίσχυσης. Να προστεθεί στο κύκλωμα ο πυκνωτής διέλευσης C_E και να επαναληφθούν οι μετρήσεις.

8. Να γίνει το διάγραμμα συχνотικής απόκρισης του ενισχυτή (σε ημιλογαριθμικό χαρτί μιλιμετρέ) χωρίς τον πυκνωτή C_E και με τον πυκνωτή και να σημειωθούν οι συχνότητες αποκοπής f_L και f_H .

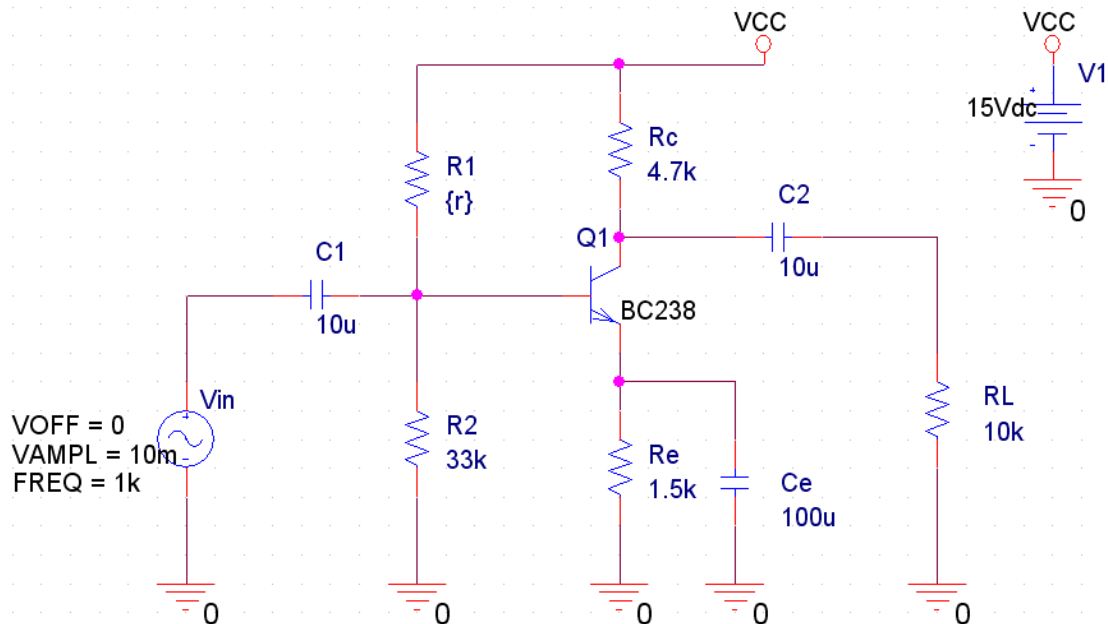
Γ. Θεωρητική ανάλυση και προσομοίωση με τον υπολογιστή (πρόγραμμα PSpice)

9. Να υπολογιστεί θεωρητικά η αναμενόμενη τιμή της αντίστασης R_1 και η ενίσχυση και να συγκριθεί με εκείνη των μετρήσεων.

10. Να σχεδιαστούν οι DC και AC ευθείες φόρτου. Τι κλίση σχηματίζουν με τον άξονα της V_{CE} ; Τέμνονται στο σημείο πόλωσης που βρέθηκε πειραματικά; Ποιά μεγέθη μεταβάλλονται με την προσθήκη στο κύκλωμα του πυκνωτή διέλευσης C_E και πώς; Επηρεάζεται το σημείο πόλωσης και κατά ποιο τρόπο;

11. Δίνεται το κύκλωμα του ενισχυτή κοινού εκπομπού του Σχ. 2.15, με $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_C = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, πυκνωτές σύζευξης $10 \text{ }\mu\text{F}$, πυκνωτή διέλευσης $C_E = 100 \text{ }\mu\text{F}$ και transistor BC238 με περιγραφή μοντέλου:

```
.model BC238 NPN (Bf=130 Rb=50 CJE=13E-12 CJC=4E-12 VJE=0.7)
```



Σχήμα 2.15 Σχεδίαση Ενισχυτή Κοινού Εκπομπού με το πρόγραμμα Capture

Μέσω παραμετρικής ανάλυσης, να βρεθεί η τιμή της αντίστασης R_1 για την οποία ισχύει ότι $V_{CE} = V_{CC} / 2$. Για αυτήν την τιμή της αντίστασης R_1 να γίνουν τα παρακάτω βήματα 12 ως 16.

12. Να απεικονιστούν οι κυματομορφές των τάσεων εισόδου και εξόδου του κυκλώματος για 2 περιόδους, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή $t_0 = 0 \text{ s}$.

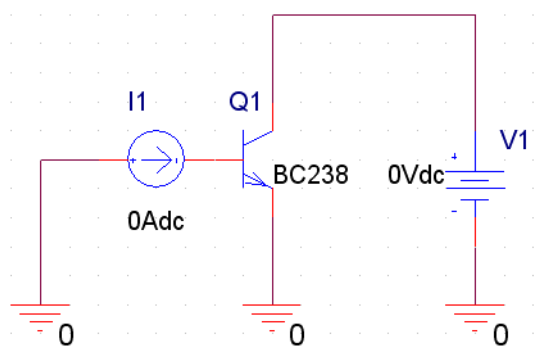
13. Να επαναληφθεί το βήμα 12 για χρονική στιγμή έναρξης της προσομοίωσης $t_0 = 100 \text{ ms}$. Τι παρατηρείτε; Ποια ρύθμιση πρέπει να τροποποιήσετε για τη σωστή απεικόνιση των κυματομορφών;

14. Να βρεθεί η ακριβής τιμή του κέρδους τάσης του κυκλώματος.

15. Να παρασταθεί γραφικά η απόκριση συχνότητας του κυκλώματος σε dB. Σε ποιες συχνότητες το κύκλωμα παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος και πόσο είναι αυτό;

16. Να παρασταθεί γραφικά η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος συναρτήσει της συχνότητας.

17. Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του Σχ. 2.16 και με τη βοήθεια της Συνεχούς Σάρωσης (DC Sweep), να παρασταθεί γραφικά η χαρακτηριστική του transistor.



Σχήμα 2.16 Κύκλωμα για την απεικόνιση της χαρακτηριστικής του διπολικού transistor

ΑΣΚΗΣΗ 2
ΠΟΛΩΣΗ, ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΙΚΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΕΠΩΝΥΜΟ :
 ΟΝΟΜΑ :
 ΑΕΜ :
 Ημερ/νία :
 Ομάδα :

Βήματα 1, 2, 3:

$I_C =$ $I_B =$ $\beta =$

Βήμα 4:

χωρίς τον πυκνωτή C_E : $V_{out-max} =$ $V_{in} =$

με τον πυκνωτή C_E : $V_{out-max} =$ $V_{in} =$

Βήμα 5:

χωρίς τον πυκνωτή C_E : αντίσταση εισόδου $R_{in} =$ αντίσταση εξόδου $R_{out} =$

με τον πυκνωτή C_E : αντίσταση εισόδου $R_{in} =$ αντίσταση εξόδου $R_{out} =$

Βήμα 6:

χωρίς τον πυκνωτή C_E : $V_{out} =$ $V_{in} = 100 \text{ mV}_{p-p}$ $A_u =$

με τον πυκνωτή C_E : $V_{out} =$ $V_{in} = 100 \text{ mV}_{p-p}$ $A_u =$

Βήμα 7:

χωρίς τον πυκνωτή C_E :

f (Hz)	V _{in}	V _{out}
50		
100		
200		
500		
1 k		
5 k		
10 k		
100 k		
500 k		
1 M		

με τον πυκνωτή **C_E** :

f (Hz)	V_{in}	V_{out}
50		
100		
200		
500		
1 k		
5 k		
10 k		
100 k		
500 k		
1 M		

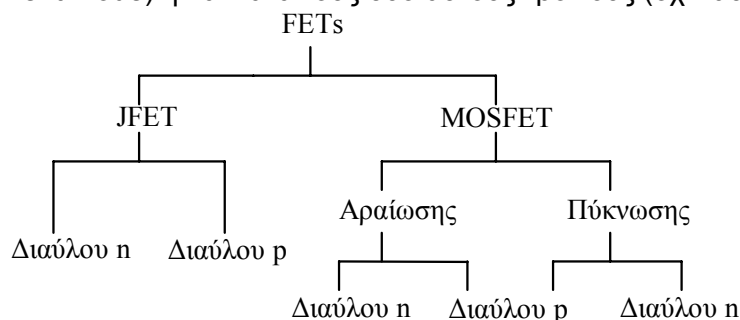
ΑΣΚΗΣΗ 3

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Α. Θεωρητική εισαγωγή.

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor, FET) είναι εξάρτημα με τρεις ακροδέκτες, όπως και το διπολικό τρανζίστορ. Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού στον ακροδέκτη που ονομάζεται **πύλη** (gate, G). Το πεδίο αυτό ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών, της **εκροής** (drain, D) και της **πηγής** (source, S) και επομένως και το ρεύμα που θα διέρχεται από αυτούς. Έτσι, ενώ στα διπολικά τρανζίστορ ο έλεγχος του ρεύματος στην έξοδο γίνεται με το ρεύμα βάσης, στα FETs ο έλεγχος γίνεται με το δυναμικό της πύλης. Επίσης, η αγωγιμότητα γίνεται με ένα τύπο φορέων (οπές ή ηλεκτρόνια) ανάλογα με την πολικότητα τους, οπότε τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται σαν μονοπολικά (unipolar).

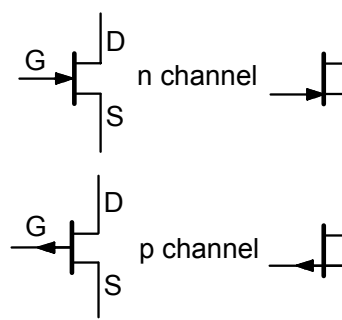
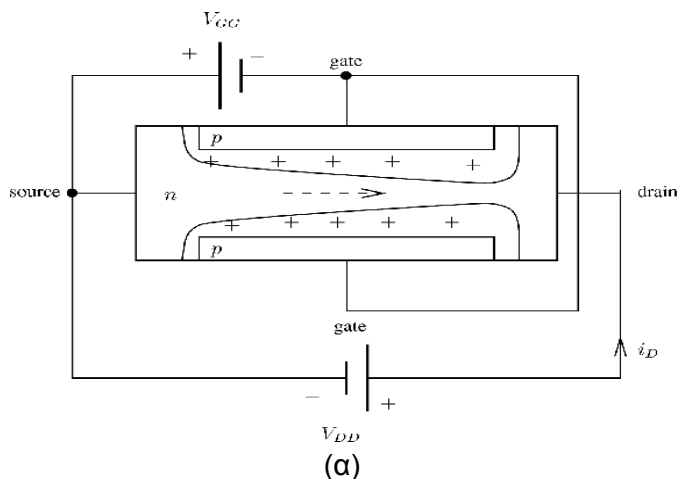
Υπάρχουν δύο τύποι FET που ονομάζονται **FET επαφής**, (Junction FET, JFET) και **FET μονωμένης πύλης** ή μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού, (Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET). Κάθε τύπος μπορεί να κατασκευαστεί με κανάλι αγωγιμότητας ημιαγωγού τύπου n ή τύπου p, οπότε χαρακτηρίζεται αντίστοιχα σαν διάυλου n (n - channel) ή διάυλου p (p - channel). Επιπλέον, τα MOSFETs κατασκευάζονται για να λειτουργούν σαν FET αραιώσης (depletion mode) ή FET πύκνωσης (enhancement mode) ή και κατά τους δύο αυτούς τρόπους (όχι ταυτόχρονα).



Σχήμα 3.1. Ταξινόμηση των FETs.

1. Το FET επαφής (JFET)

Στο σχήμα 3.2 δίνεται μία απλοποιημένη τομή ενός JFET διαύλου n καθώς και τα σύμβολα των JFET (n - channel και p - channel). Η περιοχή αραιώσης φορέων (depletion region) είναι συνάρτηση του δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής V_{GS} . Η αύξηση του αναστροφικού αυτού δυναμικού αυξάνει το εύρος της περιοχής αραιώσης, μειώνει το πλάτος του καναλιού και επομένως μειώνεται και το ρεύμα που διέρχεται από αυτό (μεταξύ εκροής και πηγής). Για σταθερή τάση V_{DS} , η αύξηση της αναστροφικής τάσης V_{GS} θα οδηγήσει κάποια στιγμή στη πλήρη κάλυψη του καναλιού από την περιοχή αραιώσης, οπότε ο διάυλος "κλείνει". Το δυναμικό για το οποίο συμβαίνει η φραγή του καναλιού ονομάζεται δυναμικό φραγής (pinch-off voltage) και συμβολίζεται με V_p .



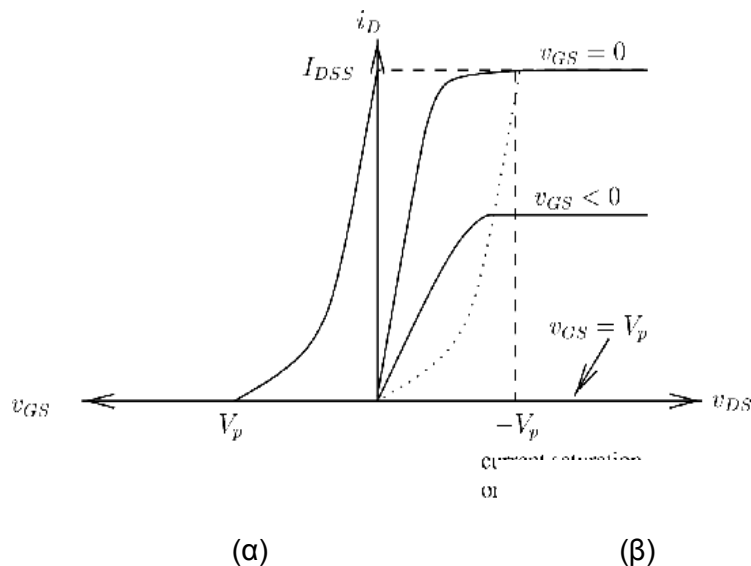
(β)

Σχήμα 3.2. Απλοποιημένη δομή JFET διαύλου n (α) και τα σύμβολα των JFET διαύλου n και p (β).

Στο σχήμα 3.2α παρατηρείται μία διεύρυνση της περιοχής αραίωσης προς την πλευρά της εκροής, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη του δυναμικού V_{DS} . Για σταθερή τάση V_{GS} , η αύξηση της τάσης V_{DS} θα οδηγήσει και πάλι κάποια στιγμή στη πλήρη κάλυψη του καναλιού από την περιοχή αραίωσης, οπότε ο δίαυλος "κλείνει" και οποιαδήποτε παραπάνω αύξηση της V_{DS} θα προκαλέσει ανεπαίσθητη αύξηση στο ρεύμα I_D . Στο σχήμα (3.3β) φαίνεται αυτή η χαρακτηριστική για τάση $V_{GS} = 0$ Volt, οπότε το αντίστοιχο ρεύμα I_D χαρακτηρίζεται σαν ρεύμα κορεσμού I_{DSS} . Για τιμές της V_{DS} μέχρι τη φραγή, το ρεύμα που διέρχεται από το FET μεταβάλλεται σχεδόν με τον νόμο του Ohm (Ωμική περιοχή λειτουργίας). Η αύξηση της V_{DS} πέρα από την περιοχή κορεσμού προκαλεί διάσπαση του FET (φαινόμενο χιονοστιβάδας) και απότομη αύξηση του ρεύματος I_D (δεν εμφανίζεται στο διάγραμμα).

Η ύπαρξη της ανάστροφης τάσης V_{GS} (< 0) μειώνει την τιμή του ρεύματος κορεσμού I_D για δοθείσα V_{DS} . Αυτό φαίνεται στις χαρακτηριστικές του σχήματος (3.3β). Η περιοχή όπου η χαρακτηριστικές είναι σχεδόν οριζόντιες ονομάζεται περιοχή μετά τη φραγή και αντιστοιχεί στη γραμμική περιοχή λειτουργίας. Για $V_{GS} < V_p$ επέρχεται η φραγή του καναλιού οπότε το ρεύμα I_D μηδενίζεται (βλέπε σχήμα 3.3α)

Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι βασικές συνθήκες και οι σχέσεις που ισχύουν για τη λειτουργία των JFET στις δύο περιοχές λειτουργίας τους. Η αντίσταση R_{DS} του διαύλου είναι συνάρτηση του μήκους του L (σε μέτρα), της ενεργού διατομής A (σε m^2), και της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού σ (σε $\Omega^{-1}m^{-1}$). Η σταθερά k εξαρτάται από το FET και υπολογίζεται από την τιμή του I_{DSS} για $V_{GS} = 0$ V.



Σχήμα 3.3. Χαρακτηριστικές μεταφοράς (α) και εξόδου (β) JFET διαύλου n.

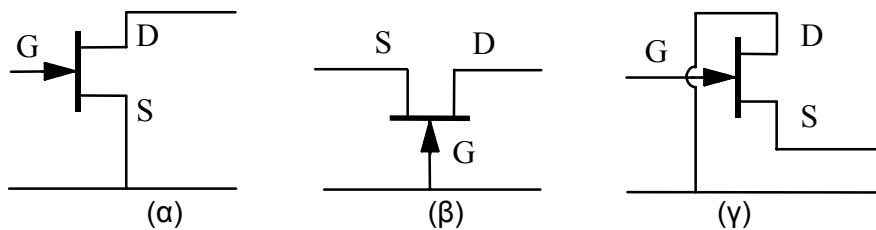
Πίνακας 3.1

Δίαυλος	Ωμική περιοχή	Περιοχή μετά τη φραγή
p	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$ $0 \geq V_{GS} - V_p$	$V_{DS} < V_{GS} - V_p$ $0 > V_{GS} - V_p$
n	$V_{DS} \leq V_{GS} - V_p$ $0 \leq V_{GS} - V_p$	$V_{DS} > V_{GS} - V_p$ $0 < V_{GS} - V_p$
	$R_{SD} = L / \sigma A$ $I_D = k[(V_{GS} - V_p)V_{DS} - V_{DS}^2/2]$	$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_p)^2$ $g_m = -(2I_{DSS}/V_p)(1 - V_{GS}/V_p)$

Η επαφή πύλης-πηγής είναι ανάστροφα πολωμένη, οπότε το ρεύμα που εισέρχεται είναι αμελητέο (nA ή pA). Έτσι η σύνθετη **αντίσταση εισόδου** στα FETs είναι χαρακτηριστικά πολύ μεγάλη. Σε μεγάλες όμως συχνότητες η χωρητικότητα εισόδου γίνεται σημαντική και περιορίζει τις εφαρμογές στις συχνότητες αυτές.

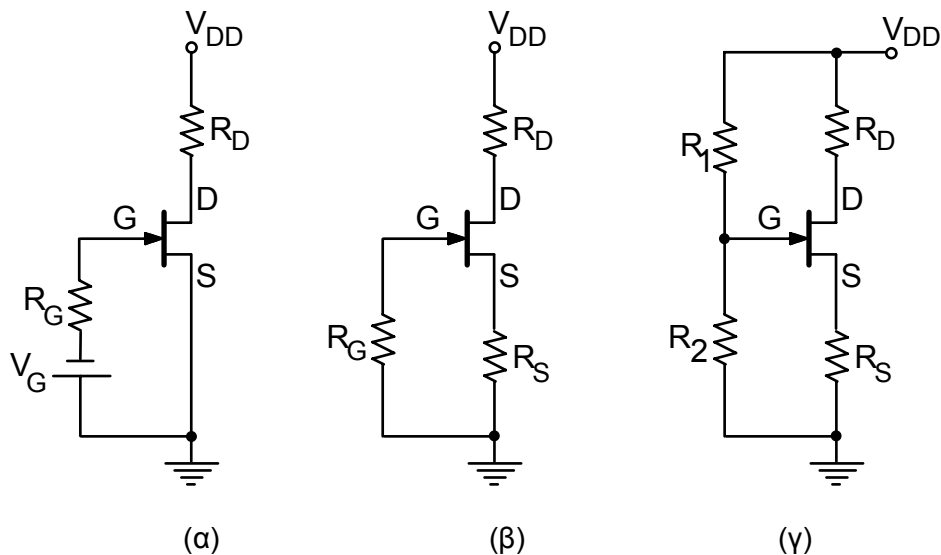
2. Ενισχυτής με JFET

Τα JFET χρησιμοποιούνται σε βασικές ενισχυτικές διατάξεις, όπως και τα διπολικά τρανζίστορ, σε συνδεσμολογίες κοινής πηγής, κοινής πύλης και κοινής εκροής (σχήμα 3.4). Για τη σωστή λειτουργία κάθε ενισχυτή πρέπει να σχεδιαστεί σωστά η πόλωση του FET, έτσι ώστε να προκύπτει γραμμική ενίσχυση του σήματος εισόδου χωρίς παραμόρφωση. Πρακτικά, η ανάστροφη πόλωση μεταξύ πύλης και πηγής πρέπει να διατηρείται για όλες τις τιμές του σήματος εισόδου.



Σχήμα 3.4. Συνδεσμολογίες κοινής πηγής (α), κοινής πύλης (β), και κοινής εκροής (γ).

Για την πόλωση στους ενισχυτές χρησιμοποιούνται δύο βασικές διατάξεις: η πόλωση πύλης με σταθερή πηγή τάσης (σχ. 3.5α) και η αυτοπόλωση (πόλωση πηγής) που είναι και η συνηθέστερη, αφού δεν απαιτείται επιπλέον τροφοδοσία (σχ. 3.5β). Η πόλωση στο κύκλωμα (3.5γ) παρουσιάζει καλύτερη ανεξαρτησία στις μεταβολές των χαρακτηριστικών των διαφόρων FETs.



Σχήμα 3.5. Κυκλώματα πόλωσης των FETs.

Στο κύκλωμα του σχήματος (3.5α) ο ενισχυτής κοινής πηγής JFET n-διαύλου έχει σταθερή πόλωση V_{GS} μέσω της αντίστασης R_G που είναι συνήθως πολύ μεγάλης τιμής (MΩ) διατηρώντας υψηλή την αντίσταση εισόδου. Το σήμα εισόδου μέσω ενός πυκνωτή C_C μεταβάλλει το δυναμικό της πύλης και προκαλεί ανάλογη μεταβολή στο ρεύμα εκροής. Έτσι, μεταβάλλεται η πτώση τάσης στην αντίσταση R_D και εμφανίζεται στην έξοδο (μεταξύ εκροής και πηγής) το σήμα εισόδου ενισχυμένο και με διαφορά φάσης 180° . Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της πόλωσης είναι η απαίτηση επιπλέον τροφοδοσίας και η σημαντική εξάρτηση του σημείου πόλωσης από τα

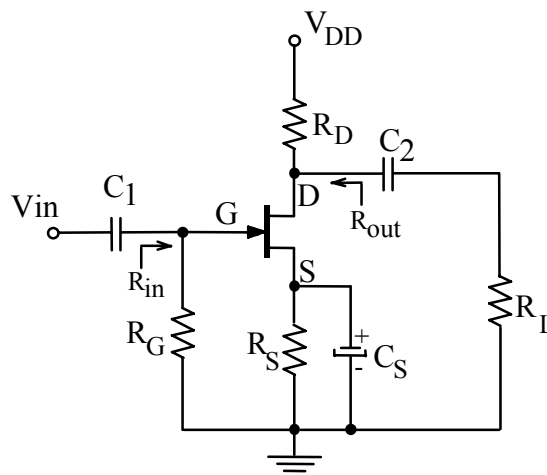
χαρακτηριστικά του JFET.

Στην αυτοπώλωση (σχήμα 3.5β) χρησιμοποιείται μία αντίσταση R_G που γειώνει την πύλη και μια αντίσταση R_S που δημιουργεί το κατάλληλο δυναμικό στην πηγή, έτσι ώστε να εμφανιστεί η απαιτούμενη ανάστροφη τάση V_{GS} . Στη διάταξη αυτή παρατηρείται καλή ανεξαρτησία του σημείου πόλωσης από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου JFET. Αν, για παράδειγμα, το αρχικό JFET αντικατασταθεί από ένα άλλο με μεγαλύτερο ρεύμα εκροής κορεσμού I_{DSS} , το αυξημένο ρεύμα θα προκαλέσει μεγαλύτερη αρνητική τάση V_{GS} . Η αύξηση της V_{GS} συνεπάγεται μείωση του ρεύματος εκροής, αντισταθμίζοντας έτσι τη διαφορά χαρακτηριστικών των FETs. Στα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιείται συνήθως πυκνωτής διέλευσης C_S , ώστε να ελαχιστοποιείται η αρνητική ανάδραση και ελάττωση του κέρδους στο εναλλασσόμενο μέσω της R_S , όπως και στα αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ.

Το κέρδος τάσης A_U στους ενισχυτές κοινής πηγής με JFET με αυτοπώλωση και πυκνωτή διέλευσης στην πηγή (σχήμα 3.6) είναι συνάρτηση της διαγωγιμότητας g_m του FET και του παράλληλου συνδυασμού των αντιστατών R_D και φορτίου R_L , και δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} A_U &= -g_m (R_D // R_L) = \\ &= -g_m (R_D R_L) / (R_D + R_L) \end{aligned} \quad (1)$$

όπου το αρνητικό πρόσημο σημαίνει την αντιστροφή της φάσης του σήματος εισόδου. Η διαγωγιμότητα g_m είναι ο λόγος της μεταβολής του ρεύματος εκροής I_D προς την αντίστοιχη μεταβολή της τάσης V_{GS} για σταθερή τιμή τάσης V_{DS} .



Σχήμα 3.6. Ενισχυτής κοινής πηγής.

$$g_m = \Delta I_D / \Delta V_{GS} \mid_{V_{DS} = \text{σταθερό}} \quad (2)$$

Η αντίσταση εισόδου R_{in} είναι περίπου ίση με την R_G ,

$$R_{in} \cong R_G \quad (3)$$

ενώ η αντίσταση εξόδου R_{out} είναι ίση με την R_D :

$$R_{out} \cong R_D \quad (4)$$

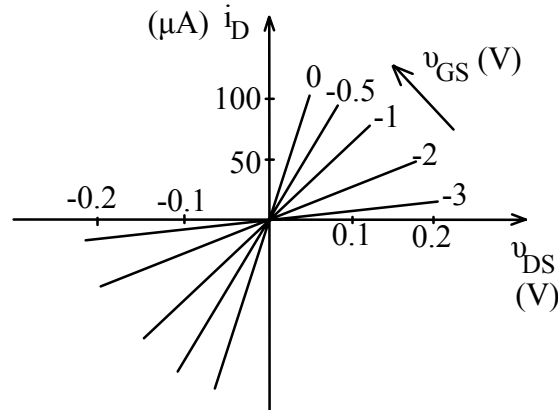
Οι εφαρμογές των ενισχυτών με JFET είναι πολλές, όπως για παράδειγμα, σε προενισχυτές για μικρόφωνα υψηλής αντίστασης εισόδου, σε ενισχυτές χαμηλού θορύβου κ.α.

3. Το FET σε εφαρμογές αντίστασης ελεγχόμενης από τάση.

Στην περιοχή ωμικής λειτουργίας του FET η αντίσταση του διαύλου δίνεται από τη σχέση (βλέπε πίνακα 3.1):

$$R_{DS} = L / \sigma A \quad (5)$$

όπου A είναι η ενεργός διατομή του διαύλου που εξαρτάται από τις τάσεις u_{DS} και u_{GS} . Στο σχήμα 3.7 φαίνεται μια ομάδα χαρακτηριστικών i_D-u_{DS} που ουσιαστικά αποτελούν λεπτομερέστερη απεικόνιση των χαρακτηριστικών του σχήματος 3.3β στην περιοχή του μηδενός. Οι χαρακτηριστικές αυτές για μικρές τιμές της τάσης u_{DS} είναι ευθείες και η κλίση κάθε μιας αντιπροσωπεύει την αντίσταση του καναλιού για την αντίστοιχη τιμή u_{GS} .



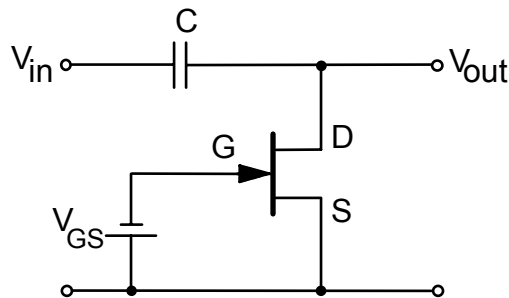
Σχήμα 3.7. Λεπτομέρεια χαρακτηριστικών JFET στην περιοχή του μηδενός.

Φίλτρο ελεγχόμενο από τάση.

Στο κύκλωμα του σχήματος 3.8 δίνεται ένα απλό κύκλωμα RC, όπου στη θέση της αντίστασης R υπάρχει ένα JFET. Είναι γνωστό ότι το κύκλωμα αυτό είναι ένα υπερπαραπέρα φίλτρο και η διαφορά φάσης της εξόδου από την είσοδο για ημιτονικό σήμα συχνότητας ω δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\phi = \tan^{-1}(1/RC\omega) \quad (6)$$

Η τιμή της αντίστασης R μπορεί να ελεγχθεί από την τάση πόλωσης u_{GS} , οπότε ελέγχεται έτσι και η συμπεριφορά του φίλτρου. Βέβαια, το σήμα εισόδου πρέπει να είναι μικρό, ώστε να παραμένει μικρή η τάση u_{DS} .



Σχήμα 3.8. Κύκλωμα φίλτρου ελεγχόμενου από τάση.

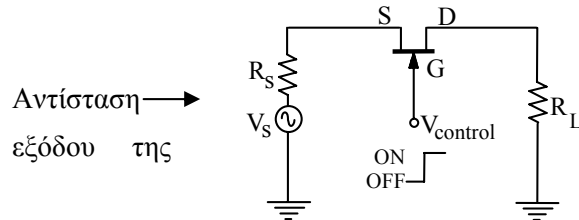
4. Το FET σε λειτουργία διακόπτη.

Το διπολικό τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί σαν διακόπτης όταν λειτουργεί εναλλάξ στις καταστάσεις αποκοπής και κόρου. Οι σημαντικότεροι περιορισμοί στις εφαρμογές του τίθενται από τη μέγιστη ανάστροφη τάση διάσπασης, από τη μονή κατεύθυνση του ρεύματος, από τη σημαντική απόκλιση τάσης $V_{CE(SAT)}$ και από τη μικρή ταχύτητα διακοπής (ύπαρξη χωρητικότητας). Τα FET πλεονεκτούν σε σχέση με τα διπολικά τρανζίστορ σε λειτουργία διακόπτη: α) έχουν πολύ μεγάλο λόγο αντιστάσεων στις καταστάσεις ON και OFF ($R_{OFF}/R_{ON} > 10^9$), β) έχουν απλό παθητικό ισοδύναμο στην κατάσταση αγωγιμότητας και διπλής κατεύθυνσης αγωγή ρεύματος, γ) γρήγορη μετάβαση ON-OFF, δ) ελέγχονται με πολύ μικρή ισχύ, ε) έχουν αμελητέα απόκλιση της τάσης $V_{DS(ON)}$.

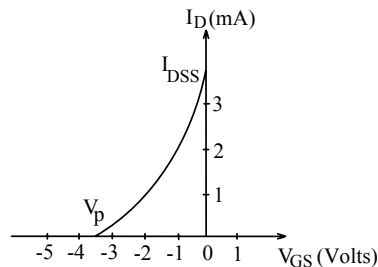
Στο σχήμα 3.9 δίνεται ένα απλό κύκλωμα διακόπτη σειράς με JFET. Όταν το δυναμικό ελέγχου $V_C \equiv V_G$ είναι αρνητικότερο από την τάση V_S με διαφορά τουλάχιστον ίση με την τάση

φραγής V_p , τότε το JFET είναι σε αποκοπή (OFF). Αυτό φαίνεται και από τη χαρακτηριστική μεταφοράς του JFET διαύλου η του σχήματος 3.10. Ο διακόπτης γίνεται αγωγίμος (ON) όταν ισχύει ότι $V_{GS} = 0$. Η αντίσταση που παρουσιάζει σημειώνεται σαν R_{ON} και για το κύκλωμα του σχήματος 3.9 προφανώς ισχύει:

$$\frac{V_{out}}{V_S} = \frac{R_L}{R_S + R_{ON} + R_L} \quad (7)$$



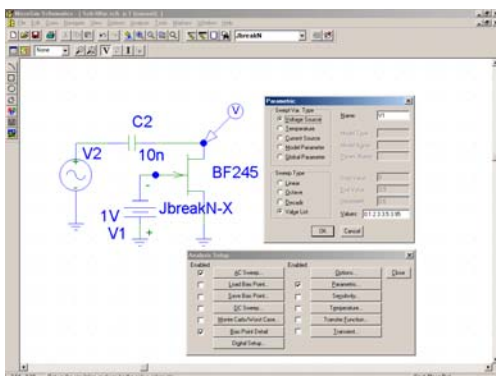
Σχήμα 3.9. Κύκλωμα διακόπτη με JFET.



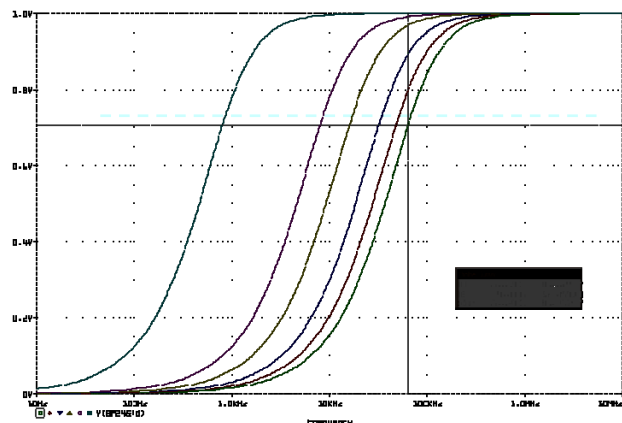
Σχήμα 3.10. Χαρακτηριστική μεταφοράς JFET διαύλου n.

5. Ανάλυση και προσομοίωση με τον υπολογιστή (πρόγραμμα SPICE).

Στο σχήμα 3.11α δίνεται η σχεδίαση στο SPICE του φίλτρου RC με JFET στη θέση της αντίστασης R (σχ. 3.8). Στο κύκλωμα εφαρμόζεται παραμετρική ανάλυση (για AC sweep) για μεταβολή της τάσης V_{GS} (V1 στο σχέδιο) από 0 V μέχρι 3.95 V με τιμές 0, 1V, 2V, 3V, 3.5V, 3.95V. Όπως φαίνεται από το σχ. 3.11β, η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου μεταβάλλεται από 0.8 kHz (για $V_1 = 3.95$ V) μέχρι 64 kHz περίπου (για $V_1 = 0$ V).



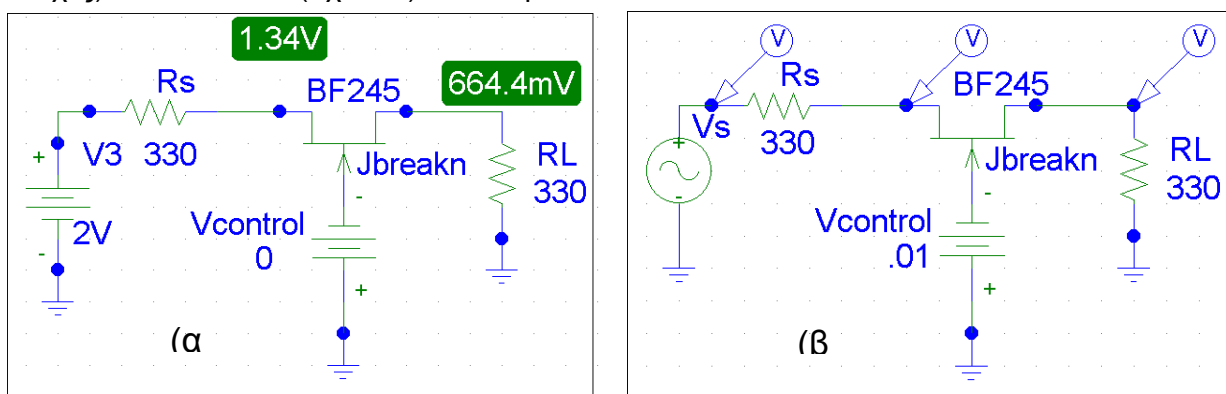
(α)



(β)

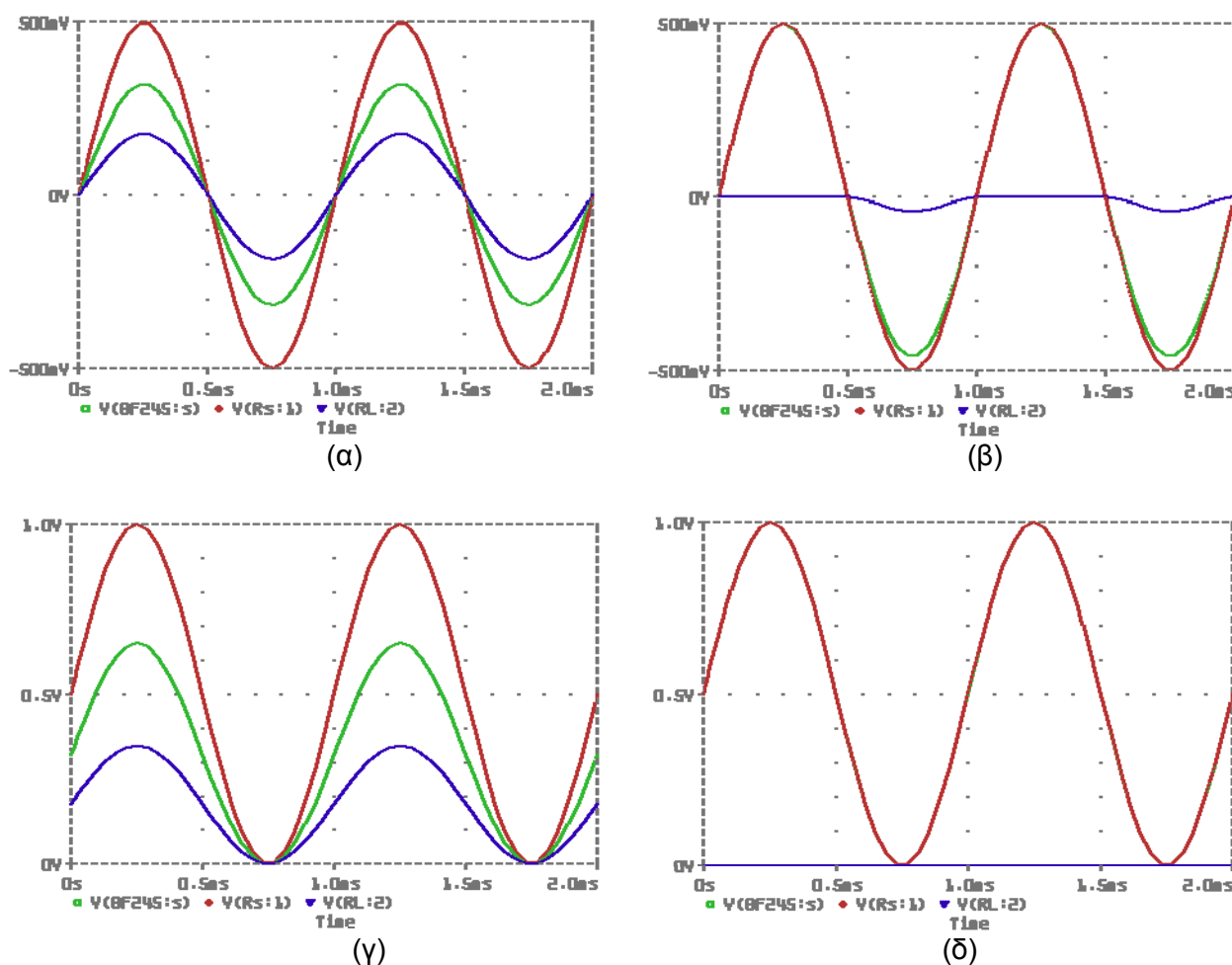
Σχήμα 3.11. Σχεδίαση στο SPICE του φίλτρου RC με JFET (α) και αποκρίσεις συχνότητας για τιμές V_1 από 0 V μέχρι 3.95 V (β).

Στο σχήμα 3.12 (α,β) δίνεται το απλό κύκλωμα διακόπτη σειράς με JFET όπως σχεδιάζεται στο SPICE. Από την dc ανάλυση προκύπτει ότι το ρεύμα διαρροής όταν το FET είναι κοντά στην αποκοπή (V_{GS} κοντά στα 4 V) είναι περίπου 5 μA ή και μικρότερο, ενώ η αντίσταση του (στο συνεχές) όταν είναι ON (σχ. 12α) είναι περίπου 330 Ω .



Σχήμα 3.12. Κύκλωμα διακόπτη σειράς με JFET στο SPICE.

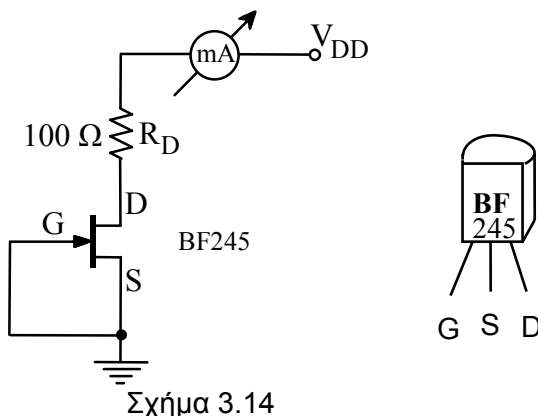
Στο σχήμα 3.13 δίνονται οι αποκρίσεις του διακόπτη (σχ. 3.12β) με JFET : α) διακόπτης ON, σήμα εισόδου 1V_{p-p} ($\pm 500mV$), 1kHz, σήμα στην έξοδο 0.35V_{p-p}· οπότε προκύπτει $R_{ON} = 285 \Omega$ περίπου. β) διακόπτης OFF αλλά άγει όταν είναι αρνητική η είσοδος. γ) διακόπτης ON, σήμα εισόδου 1V_{p-p} (0 -1V, dc offset 500mV), 1kHz, σήμα στην έξοδο 0.4V_{p-p} δ) διακόπτης OFF σε όλη την περίοδο της εισόδου.



Σχήμα 3.13. Αποκρίσεις του διακόπτη με JFET.

B. Πειραματικό μέρος.

1. Να συνδεθεί το κύκλωμα του σχήματος 3.14, με $V_{DD} = 0 \text{ V}$.



2. Να αυξηθεί η τάση V_{DD} μέχρις ότου η V_{DS} γίνει 0.5 Volts. Να σημειωθεί το αντίστοιχο ρεύμα I_D .

3. Αυξάνοντας την V_{DD} , για τιμές της $V_{DS} = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15$ και 20 Volts, να σημειωθούν τα αντίστοιχα ρεύματα I_D (πίνακας 3.1). Με τα παραπάνω δεδομένα να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική $I_D - V_{DS}$ σε βαθμολογημένους άξονες (mA - V). Στην καμπύλη αυτή να σημειωθεί το δυναμικό φραγής V_p και το ρεύμα κορεσμού I_{DSS} .

4. Να συνδεθεί το κύκλωμα **του ενισχυτή** του σχήματος 3.6 με $V_{DD} = 15 \text{ V}$, τρανζίστορ BF245, $R_D = 2,2 \text{ k}\Omega$, $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $R_S = 220 \Omega$, $R_L = 4.7 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10 \mu\text{F}$, **χωρίς** τον πυκνωτή διέλευσης C_S .

5. Να μετρηθούν οι συνεχείς τάσεις στην εκροή V_D , στην πηγή V_S και στην πύλη V_G (ως προς τη γείωση) και να υπολογιστούν οι διαφορές δυναμικού V_{GS} και V_{DS} .

6. Να τεθεί στην είσοδο του ενισχυτή ημιτονικό σήμα πλάτους 100 mV_{p-p}, συχνότητας 1 kHz, από τη γεννήτρια και να μετρηθούν με τη βοήθεια του κιβωτίου αντιστάσεων οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του ενισχυτή. Είναι σωστή η μέτρηση της αντίστασης εισόδου που γίνεται και γιατί; Εάν το σήμα στην έξοδο δεν είναι ημιτονικό, αλλά έχει παραμόρφωση (ψαλιδισμό), τότε να ελαττωθεί το πλάτος εισόδου.

7. Να δοθεί στην είσοδο ημιτονικό σήμα από τη γεννήτρια, πλάτους 100 mV_{p-p}, συχνότητας 1 kHz. Να μετρηθεί το πλάτος της εισόδου e_i και της εξόδου e_o και να σχεδιαστούν σε κοινό διάγραμμα η είσοδος και η έξοδος του ενισχυτή καθώς και η κυματομορφή στην πηγή. Υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τους; Εάν το σήμα στην έξοδο δεν είναι ημιτονικό, αλλά έχει παραμόρφωση (ψαλιδισμό), τότε να ελαττωθεί και πάλι το πλάτος εισόδου. Να υπολογιστεί το κέρδος τάσης A_U .

8. **Να συνδεθεί ο πυκνωτής διέλευσης $C_S = 100 \mu\text{F}$** (προσοχή στην πολικότητα) και να επαναληφθεί το βήμα 7. Να υπολογιστεί πάλι το κέρδος τάσης A_U . Είναι μεγαλύτερο από εκείνο του βήματος 7;

9. Να μεταβληθεί η συχνότητα του σήματος εισόδου από 50 Hz μέχρι 1 MHz (με βήματα 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, κ.λ.π.). Να μετρηθεί το πλάτος εισόδου και εξόδου του ενισχυτή για κάθε συχνότητα και να υπολογιστεί η ενίσχυση. Να γίνει το διάγραμμα απόκρισης συχνότητας σε ημιλογαριθμικό χαρτί και να σημειωθούν οι συχνότητες αποκοπής f_L και f_H .

10. **(Προαιρετικό)** Να κατασκευαστεί το **κύκλωμα φίλτρου** του σχήματος 3.8 με τρανζίστορ BF245 και $C = 10 \text{ nF}$. Με ημιτονική είσοδο (1V_{p-p}, 1kHz) να γίνουν μετρήσεις διαφοράς φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου για διάφορες τιμές V_{GS} . (0, -0.5V, -1.5V, -2.5V, -3.5V, -4.5V). Να υπολογιστεί από τη σχέση 6 η αντίστοιχη τιμή R_{DS} και να σχεδιαστούν οι καμπύλες μεταβολής της φάσης και της αντίστασης R_{DS} με την τάση V_{GS} .

11. **(Προαιρετικό)** Με τετραγωνική είσοδο να σχεδιαστεί η έξοδος για δύο τιμές της τάσης V_{GS} (-0.2V, -4.5V).

12. Να κατασκευαστεί το **κύκλωμα διακόπτη με FET** του σχήματος 3.9 με τρανζίστορ BF245. Με ημιτονική είσοδο $V_{in} = 1 \text{ V}$, 1 kHz να μετρηθεί η αντίσταση εξόδου της πηγής και η τάση

στην έξοδο V_{out} , όταν ο "διακόπτης" είναι ON. Από τη σχέση 7 να βρεθεί η αντίσταση R_{ON} του FET.

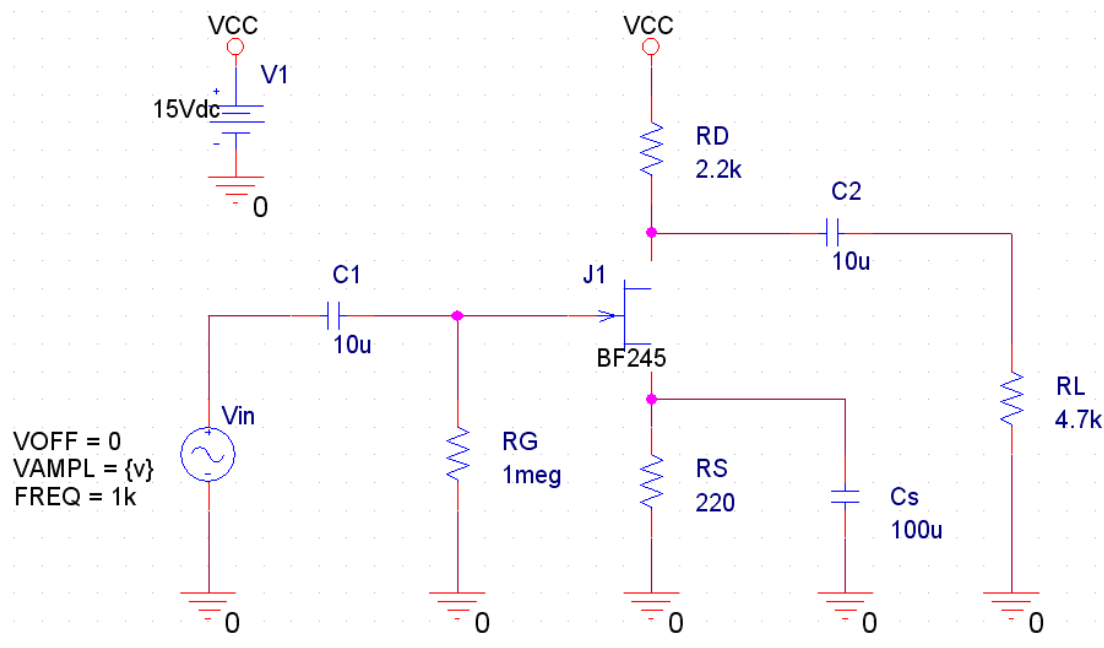
13. Με ημιτονική είσοδο $V_{in} = 1V$, 1 kHz να μετρηθεί η τάση στην έξοδο V_{out} όταν ο "διακόπτης" είναι OFF και να υπολογιστεί το ρεύμα διαρροής του FET.

Γ. Θεωρητική ανάλυση και προσομοίωση με τον υπολογιστή (πρόγραμμα PSpice)

14. Αν θεωρηθεί ότι η διαγωγιμότητα του JFET είναι $0.0028 \Omega^{-1}$, να υπολογιστεί θεωρητικά το κέρδος τάσης A_U χωρίς και με τον πυκνωτή διέλευσης C_S και να συγκριθεί με εκείνο του βήματος 7 και 8.

15. Δίνεται το κύκλωμα του ενισχυτή κοινής πηγής (Σχ. 3.6) με $V_{DD}=15V$, $R_D=2.2k\Omega$, $R_G=1M\Omega$, $R_S=220\Omega$, $R_L=4.7k\Omega$, $C_1=C_2=10\mu F$, πυκνωτή διέλευσης $C_S=100\mu F$ και transistor BF245 με περιγραφή μοντέλου:

```
.model BF245 NJF(Beta=550u Rs=1 Rd=1 Betatce=-.5 Lambda=10m Vto=-3.44
+ Vtotc=0 Cgd=5p M=.3333 Pb=1 Fc=.5 Cgs=5p Isr=1p Nr=2 Is=100f
+ N=1 Xti=3 Alpha=10u Vk=100 Kf=1E-18 Af=1)
```



Σχήμα 3.15 Σχεδίαση Ενισχυτή Κοινής Πηγής με το πρόγραμμα Capture

Μέσω παραμετρικής ανάλυσης, να βρεθεί το μέγιστο πλάτος εισόδου, για το οποίο δεν εμφανίζεται παραμόρφωση του σήματος στην έξοδο. Για την τιμή αυτή του πλάτους να γίνουν τα βήματα 16 ως 20.

16. Να απεικονιστούν οι κυματομορφές των τάσεων εισόδου και εξόδου του κυκλώματος για 2 περιόδους, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή $t_0 = 0s$.

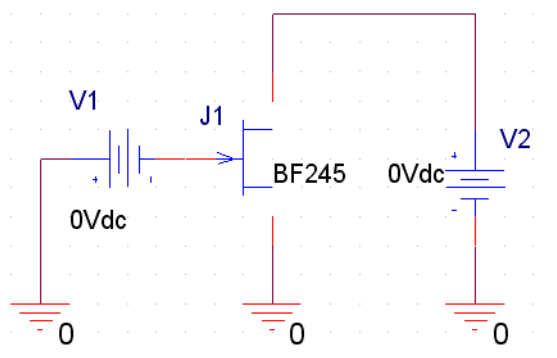
17. Να επαναληφθεί το βήμα 16 για χρονική στιγμή έναρξης της προσομοίωσης $t_0 = 100ms$. Τι παρατηρείτε; Ποια ρύθμιση πρέπει να τροποποιήσετε για τη σωστή απεικόνιση των κυματομορφών;

18. Να βρεθεί η ακριβής τιμή του κέρδους τάσης του κυκλώματος.

19. Να παρασταθεί γραφικά η απόκριση συχνότητας του κυκλώματος σε dB. Σε ποιες συχνότητες το κύκλωμα παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος και πόσο είναι αυτό;

20. Να παρασταθεί γραφικά η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος συναρτήσει της συχνότητας.

21. Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του Σχ. 3.16 και με τη βοήθεια της Συνεχούς Σάρωσης (DC Sweep), να παρασταθεί γραφικά η χαρακτηριστική του transistor.



Σχήμα 3.16. Κύκλωμα για την απεικόνιση της χαρακτηριστικής του JFET transistor

ΑΣΚΗΣΗ 3
ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

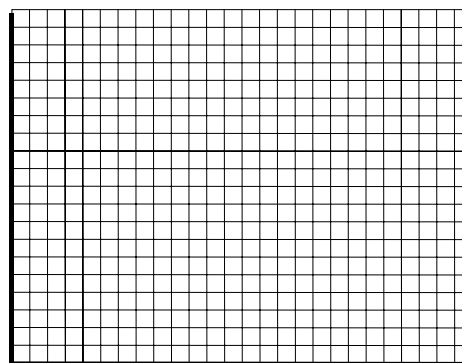
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΕΠΩΝΥΜΟ :
 ΟΝΟΜΑ :
 ΑΕΜ :
 Ημερ/νία :
 Ομάδα :

Βήματα 1, 2 και 3:

Πίνακας 1.

$V_{DS}(\text{volts})$	$I_D (\text{mA})$
0.5	
1	
1.5	
2	
2.5	
3	
3.5	
4	
5	
6	
7	
8	
10	
15	
20	



$V_p =$

$I_{DSS} =$

Βήμα 5:

$V_D =$

$V_S =$

$V_G =$

$V_{DS} =$

$V_{GS} =$

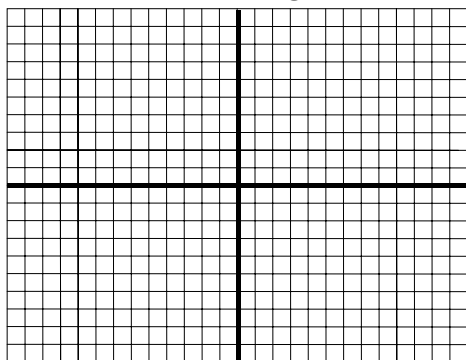
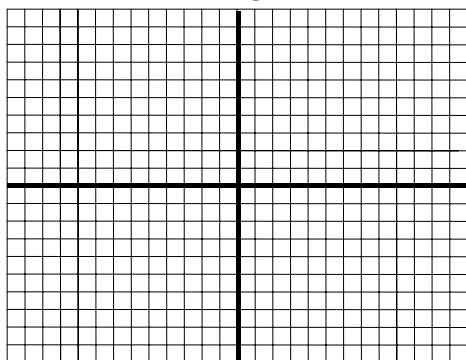
Βήμα 6:

χωρίς τον πυκνωτή C_S : αντίσταση εισόδου $R_{in} =$

αντίσταση εξόδου $R_{out} =$

Σωστή μέτρηση;

Γιατί;

Βήμα 7:χωρίς τον πυκνωτή C_S : $A_u =$ **Βήμα 8:**Με τον πυκνωτή C_S : $A_u =$ **Βήμα 9:**

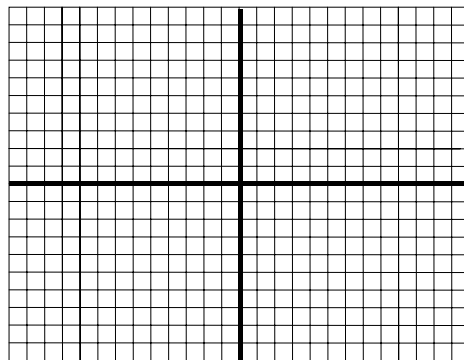
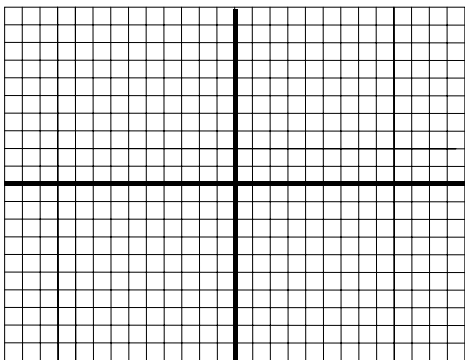
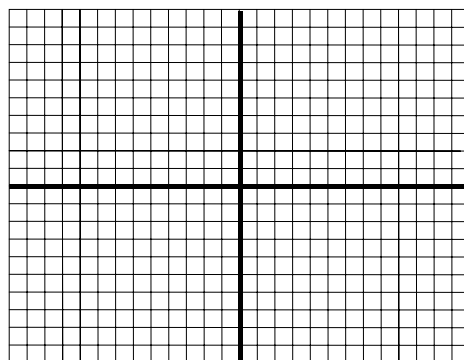
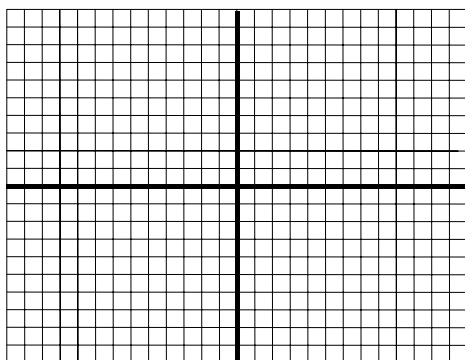
Πίνακας 2.

$f(\text{Hz})$	$e_i (\text{V})$	$e_{\text{out}}(\text{V})$	A_u
50			
100			
200			
500			
1000			
2000			
10 k			
100 k			
200 k			
500 k			
1 M			

 $f_L =$ $f_H =$

Βήμα 10: (Προαιρετικό)**Πίνακας 3.**

$V_{GS}(\text{volts})$	φ°	R_{DS}
0		
-0.5		
-1.5		
-2.5		
-3.5		
-4.5		

**Βήμα 11: (Προαιρετικό)****Βήμα 12:**αντίσταση εξόδου πηγής $R_S =$ $V_{out} =$ αντίσταση $R_{ON} =$ **Βήμα 13:** $V_{out} =$ $I_{OFF} =$