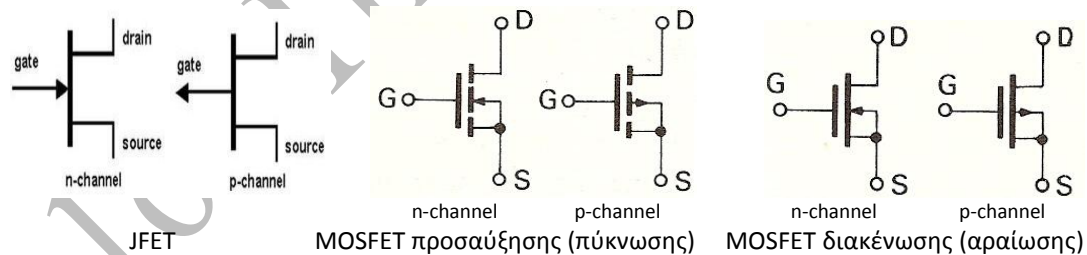


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΜΕ FET ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Σκοπός: Εξέταση λειτουργίας ενός ενισχυτή κοινής πύλης με JFET n-διαύλου και εντοπισμός βλαβών στο κύκλωμα.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

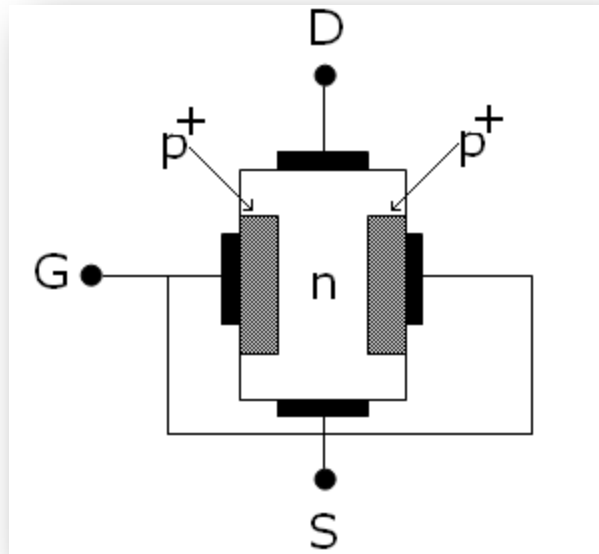
Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ή FET (Field Effect Transistor) είναι και αυτό από τα πιο βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία. Οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος για τα FET είναι μόνο ενός είδους, γιαυτό και χαρακτηρίζονται σαν μονοφυσούς αγωγιμότητας (μονοπολικά), ενώ τα διπολικά τρανζίστορ είναι διφυσούς αγωγιμότητας (διπολικά). Και ενώ τα **τρανζίστορ επαφής** ελέγχονται με το **ρεύμα βάσης**, τα **FET** ελέγχονται με **τάση στην πύλη** και ελάχιστο ρεύμα. Αυτό σημαίνει ότι τα FET έχουν πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου, πράγμα που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα γιαυτό και σε συνδυασμό με τον χαμηλό θόρυβο που παρουσιάζουν, προτιμούνται στα στάδια εισόδου των ενισχυτών ακουστικών συχνοτήτων. Άλλα πλεονεκτήματα των FET είναι ότι κατασκευάζονται πιο εύκολα, καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, έχουν καλή γραμμικότητα (linearity) δίνοντας χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης, έχουν καλή λειτουργία στις υψηλές συχνότητες λόγω της χαμηλής χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων τους, πράγμα που τα καθιστά προτιμητέα στις εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων (radio frequency), είναι λιγότερο ευαίσθητα στο θόρυβο και λειτουργούν θαυμάσια ως διακόπτες. Τα FET διακρίνονται σε FET επαφής τα JFET (Junction FET), και σε FET μονωμένης πύλης IGFET (Insulated-Gate-FET) ή αλλιώς MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-FET). Και οι δύο τύποι των FET μπορεί να είναι n-διαύλου ή p-διαύλου.



Σχήμα 2. Τύποι FET

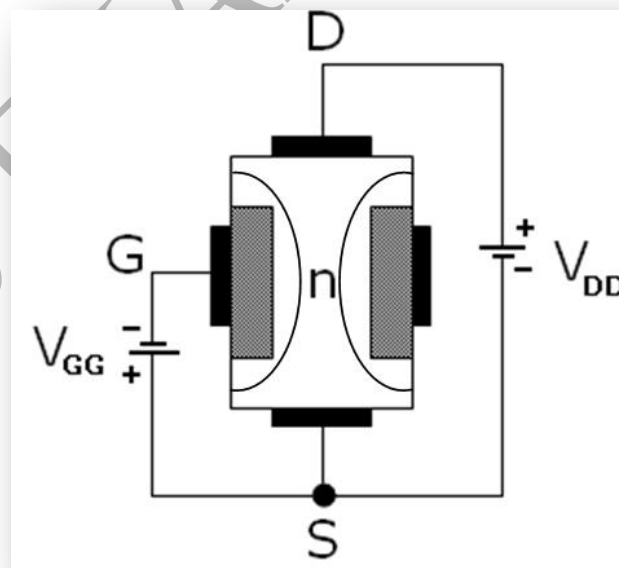
Τα FET επαφής αποτελείται από ένα τεμάχιο κρυστάλλου πυριτίου τύπου n (ή p), στις δύο πλευρές του οποίου υπάρχουν περιοχές p (ή n) μεγάλης συγκέντρωσης που συμβολίζονται με το p^+ (ή n^+). Οι δύο αυτές περιοχές βραχυκυκλώνονται εξωτερικά μεταξύ τους και αποτελούν την **πύλη G** (Gate) του FET. Ο χώρος μεταξύ των δύο περιοχών p^+ αποτελεί το **δίαυλο** ή το **κανάλι (channel)** του FET, ενώ στα άκρα του κρυστάλλου υπάρχουν δύο ακροδέκτες από τους οποίους ο ένας ονομάζεται **πηγή** (Source) και συμβολίζεται με το **S** και ο άλλος ονομάζεται

απαγωγός(Drain) και συμβολίζεται με το **D**. Η δομή του JFET φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Δομή του JFET n-καναλιού

Να αναφέρουμε ότι σε ένα JFET n-καναλιού ο απαγωγός πολώνεται ορθά, δηλαδή έχει θετικό δυναμικό ενώ η πύλη πολώνεται ανάστροφα. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έτσι, κινούνται ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό μέσα από το στενό κανάλι που διαμορφώνεται από τις περιοχές φορτίων χώρου που δημιουργούνται στις επαφές p-n.



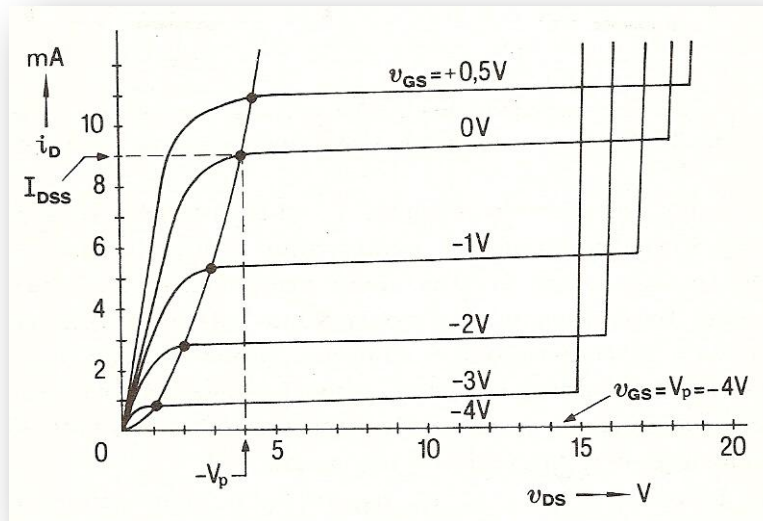
Κανονική πόλωση του JFET n-καναλιού

Το δυναμικό εκφόρευσης ή τάση συμπίεσης ή τάση αποκοπής πύλης-πηγής V_p

Όταν η τάση της πύλης μηδενιστεί, τότε η πύλη και η πηγή βραχυκυκλώνουν, $V_{GS}=0$ και $I_{DS}=I_{DSS}$. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κατάσταση **βραχυκυκλωμένης πύλης**. Η τάση V_p στην οποία ο δίαυλος κλείνει εντελώς και έτσι αποκόπτεται το ρεύμα του απαγωγού ονομάζεται τάση αποκοπής πύλης-πηγής και πολλές φορές στα φύλλα των κατασκευαστών αναφέρεται ως $V_p=V_{GS(off)}$.

Χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος JFET n-καναλιού.

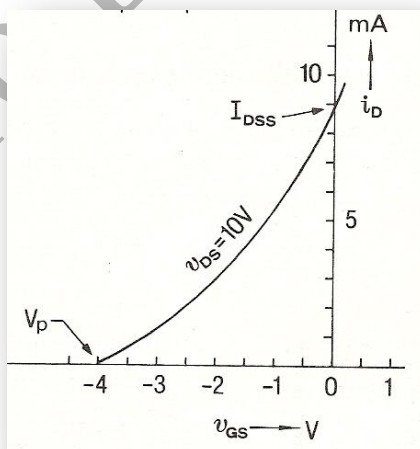
Με $V_{GS}=0$ και θετικό δυναμικό στον απαγωγό παίρνουμε τις χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος του JFET n-καναλιού.



Χαρακτηριστικές JFET n-καναλιού

Η χαρακτηριστική μεταφοράς το JFET n- καναλιού

Αν από τις χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος κάνουμε την καμπύλη $i_D=f(v_{GS})$ παίρνουμε την παρακάτω χαρακτηριστική μεταφοράς (ή διαγωγιμότητας) που είναι ένα τμήμα παραβολής που δίνεται από την εξίσωση.



Χαρακτηριστική μεταφοράς JFET n-καναλιού.

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2$$

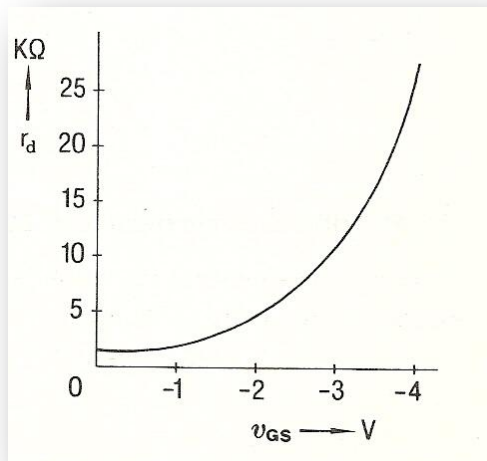
Εξίσωση παραβολής

Η αντίσταση $r_{DS(on)}$ και η αντίσταση r_d

Η αντίσταση $r_{DS(on)}$ είναι η dc αντίσταση στην κατάσταση αγωγιμότητας ή αλλιώς στην κατάσταση on και ορίζεται ως ο λόγος της ολικής τάσης απαγωγού προς το ολικό ρεύμα απαγωγού, όταν το JFET λειτουργεί στην κατάσταση κόρου. Παίρνει τιμές από 0,5 έως 500 Ω.

Μετριέται με το ωμόμετρο αφού βραχυκυκλώσουμε την πύλη με την πηγή και βάλουμε το (+) του οργάνου στον απαγωγό (για JFET τύπου n) και (-) στην πηγή-πύλη πρέπει να πάρουμε μια ένδειξη από 100-500Ω.

Η αντίσταση r_d , δηλαδή η δυναμική αντίσταση του απαγωγού ορίζεται ως $r_d = v_{ds} / i_d$ με V_{GS} σταθερό. Παίρνει τιμές από 100KΩ έως 1MΩ για JFET και 1 έως 100KΩ για MOSFET. Επίσης ισούται με $r_d = 1/g_{os}$ και το υπολογίζουμε από την καμπύλη $g_{os} - i_D$ του κατασκευαστή (εδώ η τελευταία καμπύλη στα φύλλα χαρακτηριστικών του κατασκευαστή).



Χαρακτηριστική r_d του JFET

Παρατηρείστε ότι για $V_{GS}=0$ η r_d είναι της τάξης των Ω, ενώ όσο αρνητικότερη γίνεται η V_{GS} τόσο αυξάνεται η r_d και γίνεται της τάξης των KΩ.

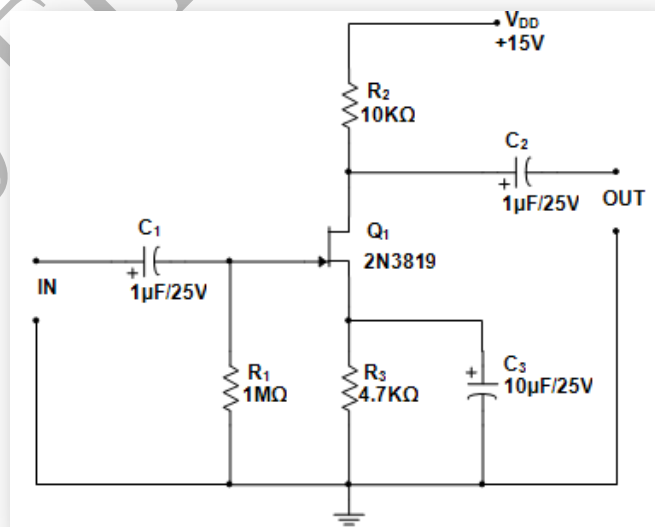
Έλεγχος ενός JFET

Μπορούμε να ελέγξουμε την dc αντίσταση $r_{DS(on)}$ με το ωμόμετρο ως εξής. Συνδέουμε την πύλη με την πηγή ώστε $V_{GS}=0$. Τότε το ωμόμετρο πρέπει να δείξει μια τιμή από 100 έως 500Ω, μεταξύ του απαγωγού και της βραχυκυκλωμένης πύλης και πηγής, αλλιώς είναι προβληματικό.

Χαρακτηριστικά μεγέθη ενισχυτή κοινής πηγής με πυκνωτή C_s στην πηγή και αυτοπόλωση	
Απολαβή τάσης	$A_v = \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{V_{ds}}{V_{gs}} \right)$ $A_v = -(r_d // R_d) \cdot g_m$ <p><i>εαυ</i> $R_d \cong r_d$ <i>τότε</i> $A_v \cong -R_d \cdot g_m$</p>
Αντίσταση εισόδου	$R_i \cong R_g$
Αντίσταση εξόδου	$R_o = r_d$ και $R_o' = R_d // r_d$
Συντελεστής ενίσχυσης μ	$\mu = r_d \cdot g_m$ <p>r_d δυναμική αντίσταση απαγωγού g_m διαγωγιμότητα του FET</p>
Διαγωγιμότητα g_m	$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$ <p>μονάδες Siemens ή mho και $g_m = g_{fs}$</p>
Δυναμική αντίσταση απαγωγού r_d	$r_d = \left. \frac{V_{ds}}{I_d} \right _{V_{GS}}$ <p>με τιμές 0,1 έως 1MΩ (φύλλα εταιρείας)</p>

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το κύκλωμα του ενισχυτή κοινής πηγής που θα κατασκευάσουμε δίνεται παρακάτω. Όπως θα παρατηρήσετε είναι ένα κύκλωμα με αυτοπόλωση.



Ο ενισχυτής κοινής πηγής

Για να πραγματοποιηθεί το εργαστήριο απαιτούνται τα παρακάτω εξαρτήματα:

ΥΛΙΚΑ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Q ₁	2N3819	1
R ₁ (R _g)	1MΩ	1
R ₂ (R _d)	10KΩ	1
R ₃ (R _s)	4.7KΩ	1
C ₁ ,C ₂	1μF/25V	2
C ₃	10μF/25V	1

Να μετρηθεί η αντίσταση $r_{DS(on)}$ =

1ο Βήμα

Για το κύκλωμα του παραπάνω ενισχυτή κοινής πύλης να μετρηθούν τα δυναμικά:

Δυναμικά	
V _D	
V _S	
V _G	
V _{DS}	

Είναι το δυναμικό της πύλης αρνητικό σε σχέση με αυτό της πηγής;

.....

Πρέπει να συμβαίνει αυτό; γιατί;

.....

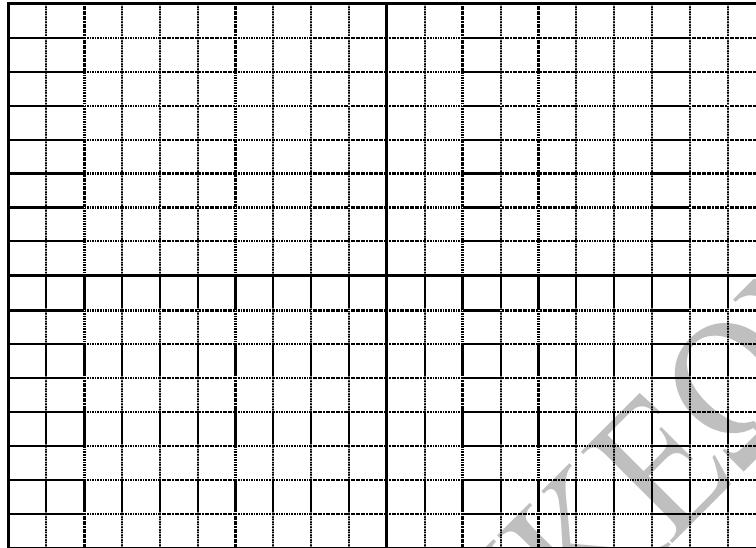
Με τη χρήση του δυναμικού V_{DS} προσδιορίστε το σημείο λειτουργίας Q του ενισχυτή (V_{DSQ}, I_{DQ}).

.....

2ο Βήμα

Να συνδεθεί η γεννήτρια στην είσοδο του ενισχυτή κοινής πηγής. Να δώσετε ημιτονικό σήμα πλάτους V_{p-p}=100mV και συχνότητας f=1KHz. Να συνδεθεί ο παλμογράφος στην είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος και να σχεδιαστούν οι κυματομορφές εισόδου – εξόδου σε χρονικό συσχετισμό. Αφού μετρηθεί για κάθε σήμα το πλάτος του να υπολογισθεί **πειραματικά** η απολαβή του κυκλώματος και το μέγιστο πλάτος του σήματος εισόδου για το οποίο το σήμα στην έξοδο είναι απαραμόρφωτο. Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας

A_v	Πειραματικά
$V_{in(max)}$	



Σχεδίαση σημάτων Εισόδου - Εξόδου

Τι παρατηρείτε για τα σήματα εισόδου – εξόδου;

.....

.....

.....

.....

3^ο Βήμα

Συνδέστε μια μεταβλητή αντίσταση 10KΩ(ή και 1KΩ, στην μέγιστη τιμή της) στην έξοδο του ενισχυτή και ρυθμίστε την έτσι ώστε το σήμα στην έξοδο να γίνει το μισό (στην οθόνη του παλμογράφου). Τότε εκείνη η τιμή της μεταβλητής αντίστασης είναι η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή.

R_o	
-------	--

Πίνακας

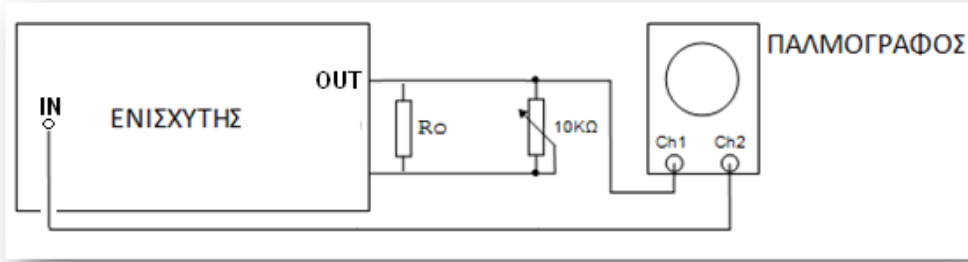
Ισχύει $R_o \approx r_d // R_d$;

.....

.....

.....

.....



4^ο Βήμα

Δώστε από τη γεννήτρια ημιτονικό σήμα σταθερού πλάτους $100\text{mV}_{\text{p-p}}$ και μεταβάλλετε τη συχνότητα όπως φαίνεται στον πίνακα 1.5 και συμπληρώστε τον. Μετά σχεδιάστε την καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή σε ημιλογαριθμικό χαρτί.

Συχνότητα f	V_i	V_o	$A_v = \frac{V_o}{V_i}$	$\text{dB} = 20 \cdot \log A_v$
10 Hz	$100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$			
50 Hz	100 mV_p			
100 Hz	100 mV_p			
500 Hz	100 mV_p			
700 Hz	100 mV_p			
1 KHz	100 mV_p			
3 KHz	100 mV_p			
4 KHz	100 mV_p			
5 KHz	100 mV_p			
8 KHz	100 mV_p			
9 KHz	100 mV_p			
10 KHz	100 mV_p			
15 KHz	100 mV_p			
20 KHz	100 mV_p			
30 KHz	100 mV_p			
50 KHz	100 mV_p			
100 KHz	100 mV_p			
300 KHz	100 mV_p			
500 KHz	100 mV_p			
1 MHz	100 mV_p			
1.5 MHz	100 mV_p			
2 MHz	100 mV_p			

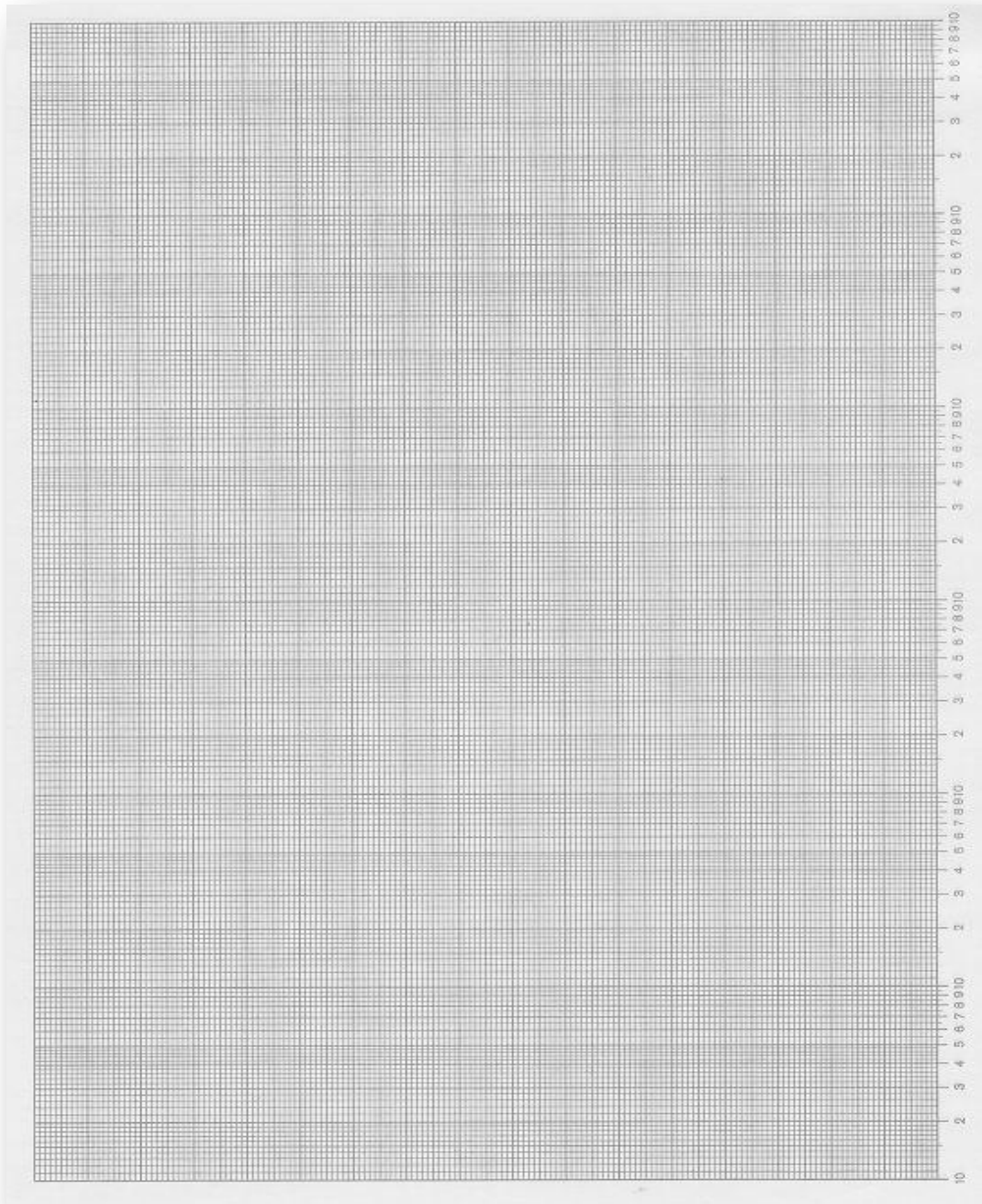
Υπενθύμιση: Οι συχνότητες θλάσεως (f_c) είναι στα $0,707V_o$ ή $-3dB$.

Να υπολογιστεί το εύρος ζώνης απόκρισης συχνοτήτων (bandwidth) του ενισχυτή

$$BW = f_{c2} - f_{c1}.$$

.....
.....

BW	
----	--



Ημιλόγαριθμικό χαρτί

5^ο Βήμα

Μετρήστε τις τιμές των V_d , V_s και V_g για κάθε μια από τις βλάβες του παρακάτω πίνακα και σημειώστε τις παρατηρήσεις σας. Δηλαδή λειτουργεί ο ενισχυτής, βρίσκεται στον κόρο ή στην αποκοπή το FET; Δείτε το παράδειγμα.

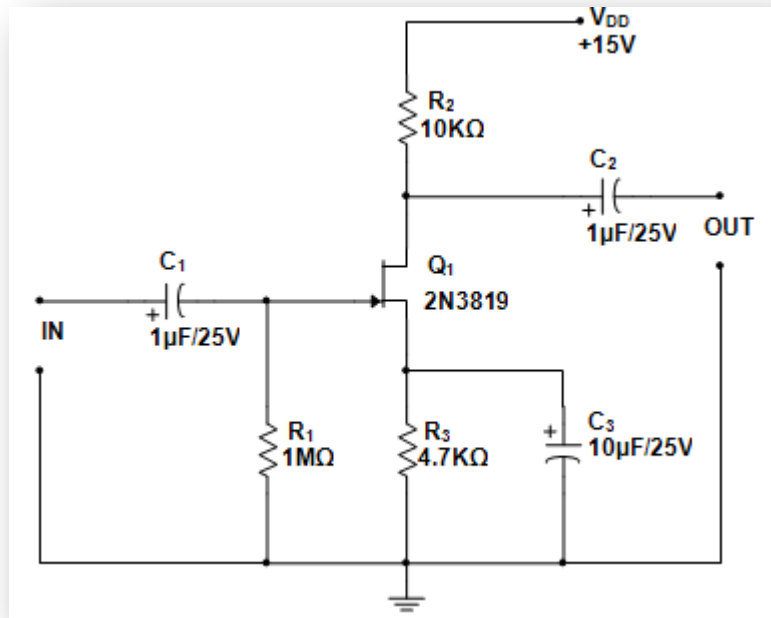
Βλάβη	Μετρούμενη τιμή σε Volt			Παρατηρήσεις
	V_d	V_s	V_g	
Ανοικτή R_1				
Ανοικτή R_2				
Ανοικτή R_3				Τότε $I_D=0$, το FET είναι σε αποκοπή (cut off) και $V_D=V_{DD}=+15V$
Βραχυκυκλωμένη R_1				
Βραχυκυκλωμένη R_2				
Βραχυκυκλωμένη R_3				
Ανοικτός C_1				
Ανοικτός C_2				
Ανοικτός C_3				

Πίνακας Βλαβών

ΠΡΟΣΟΧΗ : Εάν κατά την δημιουργία κάποιας βλάβης διαπιστώσετε υπερθέρμανση του FET τότε σταματήστε την άσκηση, για να μην κάψετε το FET.

7^ο Βήμα

Να σχεδιαστεί το κύκλωμα του ενισχυτή στο Multisim, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Στη συνέχεια να ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις και να συμπληρωθεί ο πίνακας 2.7. Για τις αντιστάσεις ορίστε ανοχή 5%.



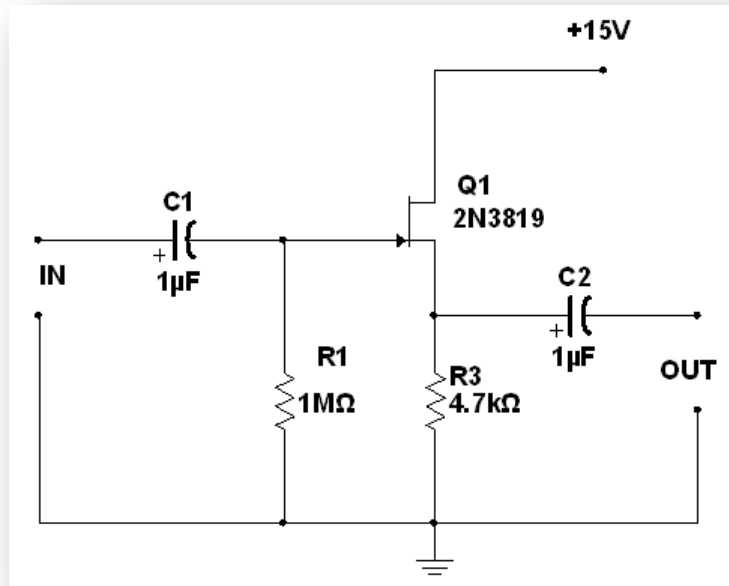
Το κύκλωμα ενισχυτή στο Multisim

Μέγεθος	Multisim
V_g	
V_s	
V_d	
V_{ds}	
A_v	
R_o	
R_i	
f_{c1}	Δεν δίνει ακριβείς μετρήσεις
f_{c2}	Δεν δίνει ακριβείς μετρήσεις
$BW = f_{c2} - f_{c1}$	Δεν δίνει ακριβείς μετρήσεις

Πίνακας μετρήσεων στο Multisim

8^ο Βήμα

Κατασκευάστε τώρα στο ράστερ τον παρακάτω ενισχυτή κοινού απαγωγού (ακολουθητής τάσης).



Κύκλωμα ενισχυτή κοινού απαγωγού στο ράστερ

9^ο Βήμα

Μετρήστε την DC τάση μεταξύ της πηγής και της γης. Αυτή θα είναι η τάση πόλωσης πύλης-πηγής

V_{GS}	
----------	--

10^ο Βήμα

Δώστε από την γεννήτρια ημιτονικό σήμα $1V_{p-p}$ και συχνότητας 1KHz. Με τη χρήση του παλμογράφου μετρήστε το σήμα στην έξοδο και υπολογίστε την απολαβή A_v .

V_i	
V_o	
A_v	

11^ο Βήμα

Πόση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου;

$\Delta\phi$	
--------------	--

12^ο Βήμα

Δώστε από την γεννήτρια ημιτονικό σήμα $1V_{p-p}$ και συχνότητας 1KHz και βρείτε την συχνοτική απόκριση του ενισχυτή

Συχνότητα f	V_i	V_o	$A_v = \frac{V_o}{V_i}$	$dB = 20 \cdot \log A_v$
10 Hz	$1 V_{p-p}$			
20 Hz	$1 V_p$			
50 Hz	$1 V_p$			
100 Hz	$1 V_p$			
500 Hz	$1 V_p$			
700 Hz	$1 V_p$			
1 KHz	$1 V_p$			
2 KHz	$1 V_p$			
3 KHz	$1 V_p$			
4 KHz	$1 V_p$			
5 KHz	$1 V_p$			
8 KHz	$1 V_p$			
9 KHz	$1 V_p$			
10 KHz	$1 V_p$			
15 KHz	$1 V_p$			
20 KHz	$1 V_p$			
40 KHz	$1 V_p$			
50 KHz	$1 V_p$			
80 KHz	$1 V_p$			
100 KHz	$1 V_p$			
300 KHz	$1 V_p$			
500 KHz	$1 V_p$			
1 MHz	$1 V_p$			
1.5 MHz	$1 V_p$			
2 MHz	$1 V_p$			

$f_{c1} = \dots\dots\dots$ $f_{c2} = \dots\dots\dots$ και $BW = f_{c1} - f_{c2} = \dots\dots\dots$