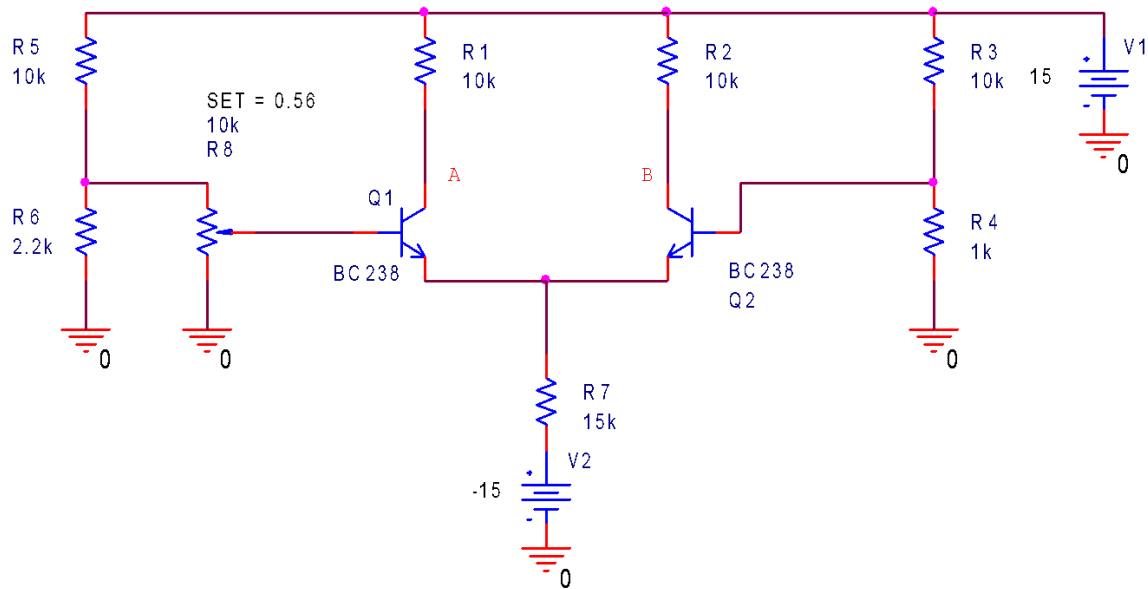


## ΑΣΚΗΣΗ 1

7.



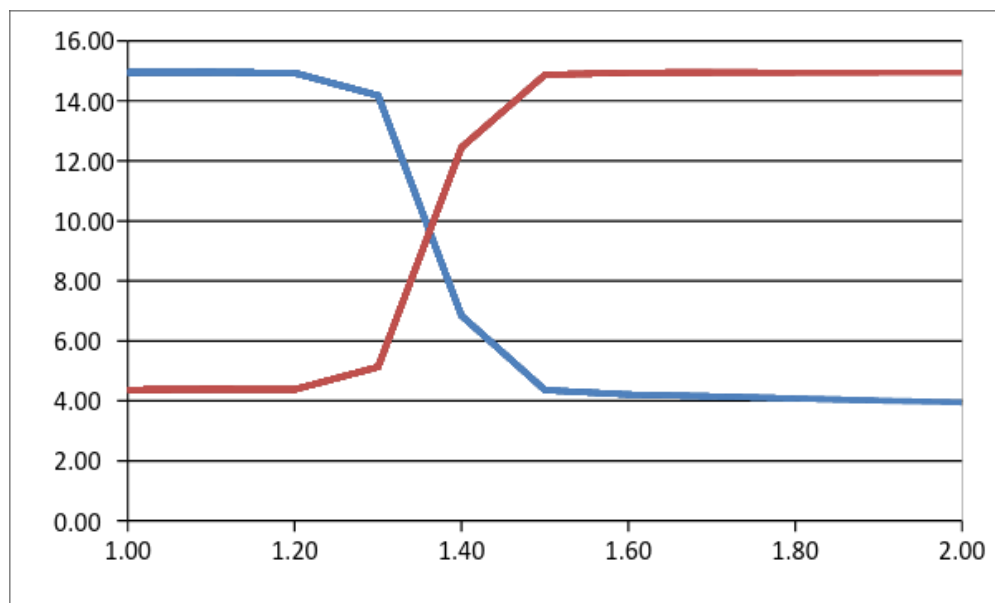
Το πρώτο κύκλωμα που μελετήσαμε φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η μεταβλητή αντίσταση ρυθμίζεται έτσι ώστε τα δυναμικά στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να είναι περίπου ίσα.

α)Χρονική ανάλυση

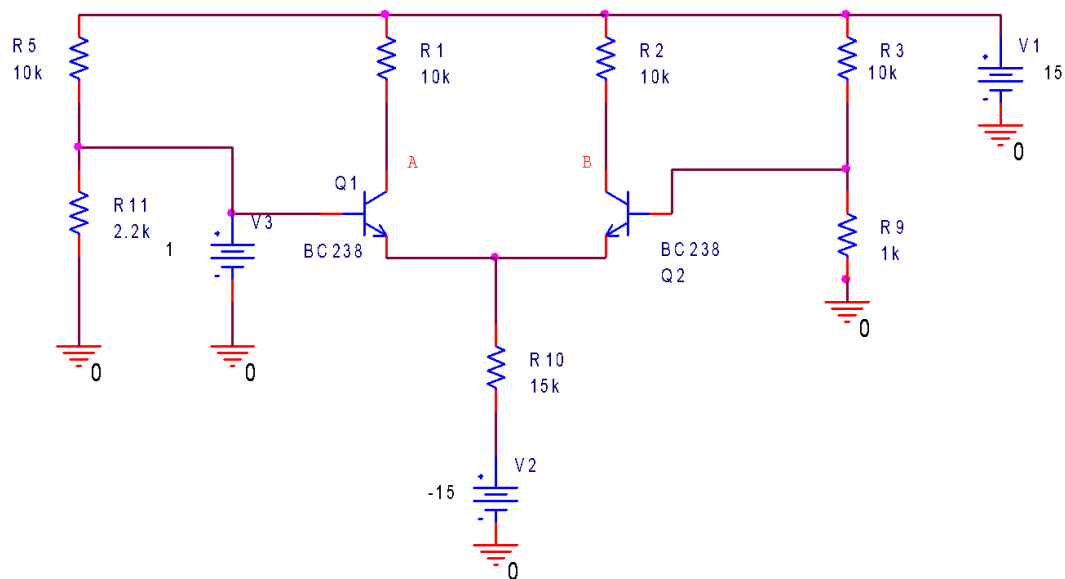
Μεταβάλλοντας με την βοήθεια της μεταβλητής αντίστασης την τάση βάσης του τρανζίστορ Q1 από 1 έως 2 Volt παίρνουμε από το spice τις παρακάτω μετρήσεις για την τάση στα σημεία A και B.

$V_{b1}$	$V_{c1}$	$V_{c2}$	$V_{A-B}$
1,00	15,00	4,57	10,43
1,10	15,00	4,58	10,42
1,20	14,94	4,63	10,31
1,30	13,37	6,20	7,17
1,40	7,79	11,76	-3,97
1,50	4,64	14,84	-10,20
1,60	4,43	14,99	-10,56
1,70	4,34	15,00	-10,66
1,80	4,28	15,00	-10,72
1,90	4,22	15,00	-10,78
2,00	4,13	15,00	-10,87

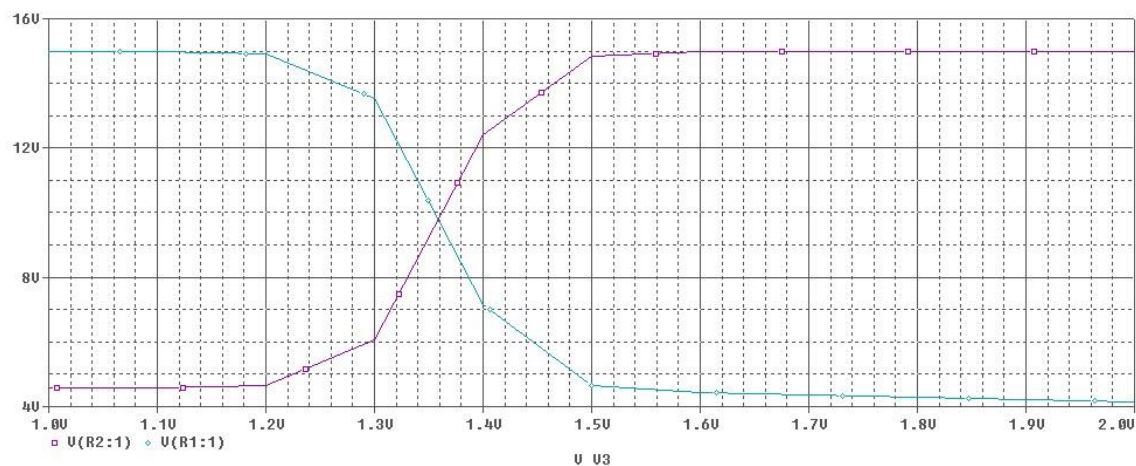
Στο επόμενο διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή της τάσης των συλλεκτών των 2 τρανζίστορ ανάλογα με την τάση βάσης του πρώτου ( $V_{c1}$ :μπλε,  $V_{c2}$ :κόκκινο).



### **β)Ανάλυση DC sweep**



Για την ανάλυση DC sweep αντικαθιστούμε την μεταβλητή αντίσταση με μία πηγή τάσης, η οποία θα πάρει τιμές από 1 έως 2 Volt. Μετράμε πάλι τις συνεχείς τάσεις στους 2 συλλέκτες. Από το spice προκύπτει το επόμενο διάγραμμα. Όπως αναμένουμε, αυτό έχει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο της χρονικής ανάλυσης.



### γ) Θεωρητική Ανάλυση:

Γνωρίζουμε ότι:

$$\beta_1=315 \text{ και } \beta_2=295$$

$$V_{B1}=1.36V \text{ και } V_{B2}=1.37V$$

$$V_{BE1}=0.68V \text{ και } V_{BE2}=0.59V$$

$$V_{CC}=15.76$$

Επίσης:

$$V_{BE1} = V_{B1} - V_{E1}$$

$$V_{E1}=V_{E2}$$

$$V_{B1} = V_{B2} - 0.01$$

Επιπλέον:

$$V_{B1} = V_{BE1} + V_{E1} \Leftrightarrow$$

$$V_{B1} = V_{BE1} + 15 \cdot 10^3 (I_{E1} + I_{E2}) - 15.76 \Leftrightarrow$$

$$I_{E1} + I_{E2} = \frac{V_{B1} + 15.16}{15 \cdot 10^3} A$$

Θα δούμε ποιες είναι οι τιμές των  $V_B$  τα 2 τρανζίστορ βρίσκονται στην ενεργό περιοχή T2:

$$V_{CC} = 10 \cdot 10^3 \cdot I_2 + V_{BE2} + 15 \cdot 10^3 (I_{E1} + I_{E2}) - V_{CC} \Leftrightarrow$$

$$2V_{CC} = 10 \cdot 10^3 \cdot \left( I_{B2} + \frac{V_{B2}}{1} \right) + V_{BE2} + 15 \cdot 10^3 \left( \frac{V_{B1} + 15.16}{15 \cdot 10^3} \right) \Leftrightarrow$$

$$2V_{CC} = 10 \cdot 10^3 \cdot (I_{B2} + V_{B1} + 0.04) + V_{BE2} + V_{B1} + 15.16 \Leftrightarrow$$

$$15.4 = 10 \cdot 10^3 \cdot I_{B2} + 11 \cdot V_{B1} \Leftrightarrow$$

$$I_{B2} = 1.54 \cdot 10^{-3} - 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot V_{B1}$$

Άρα για  $I_{B2} \geq 0$ , τότε  $V_{B1} \leq 1.4$

T1:

$$I_{E1} + I_{E2} = \frac{V_{B1} + 15.16}{15 \cdot 10^3} \Leftrightarrow$$

$$I_{E1} + (\beta_2 + 1)I_{B2} = \frac{V_{B1} + 15.16}{15 \cdot 10^3} \Leftrightarrow$$

$$I_{E1} + (\beta_2 + 1)(1.54 \cdot 10^{-3} - 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot V_{B1}) = \frac{V_{B1} + 15.16}{15 \cdot 10^3} \Leftrightarrow$$

$$I_{E1} = 0.358 \cdot V_{B1} - 0.5$$

Άρα για  $I_{E1} \geq 0$ , τότε  $V_{B1} \geq 1.397$

Καταλήγουμε στο ότι τα δύο τρανζίστορ βρίσκονται μαζί στην ενεργό περιοχή όταν

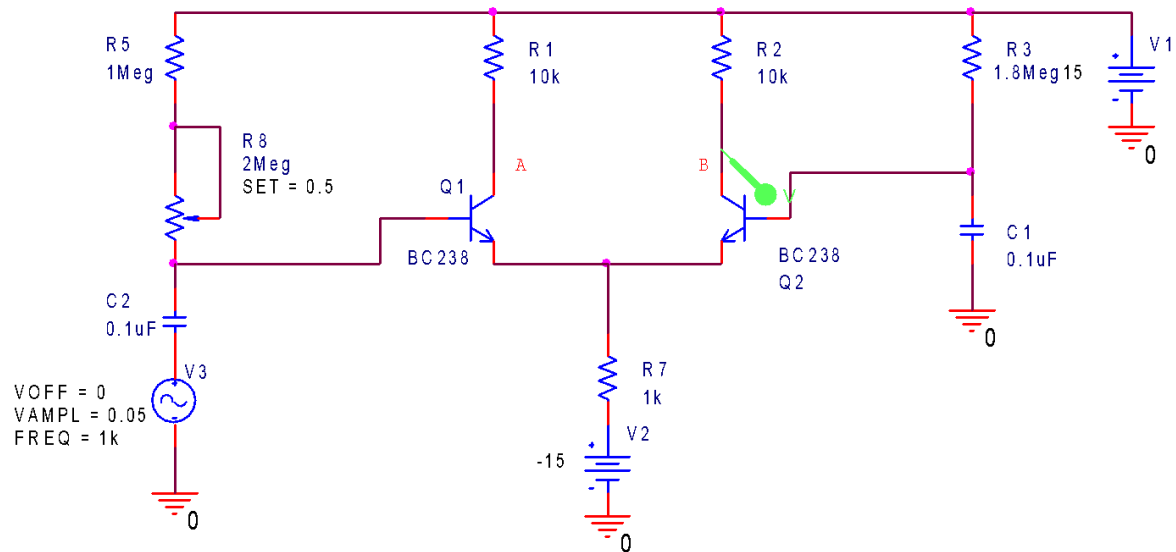
$1.397 \leq V_{B1} \leq 1.4$ . Επειδή στο 2<sup>ο</sup> ερώτημα αυξάνουμε την τάση με βήμα 0.1, διαπιστώνουμε πως ποτέ τα δύο τρανζίστορ δε θα βρίσκονται συγχρόνως στην ενεργό περιοχή. Αν μεταβληθεί το δυναμικό στη βάση του T1 από 1V ως 2V με βήμα 0.1V τότε, από τα παραπάνω

συμπεραίνουμε πως για διάστημα  $1V \leq V_{B1} \leq 1.3V$  το T11 θα βρίσκεται στην αποκοπή, ενώ για

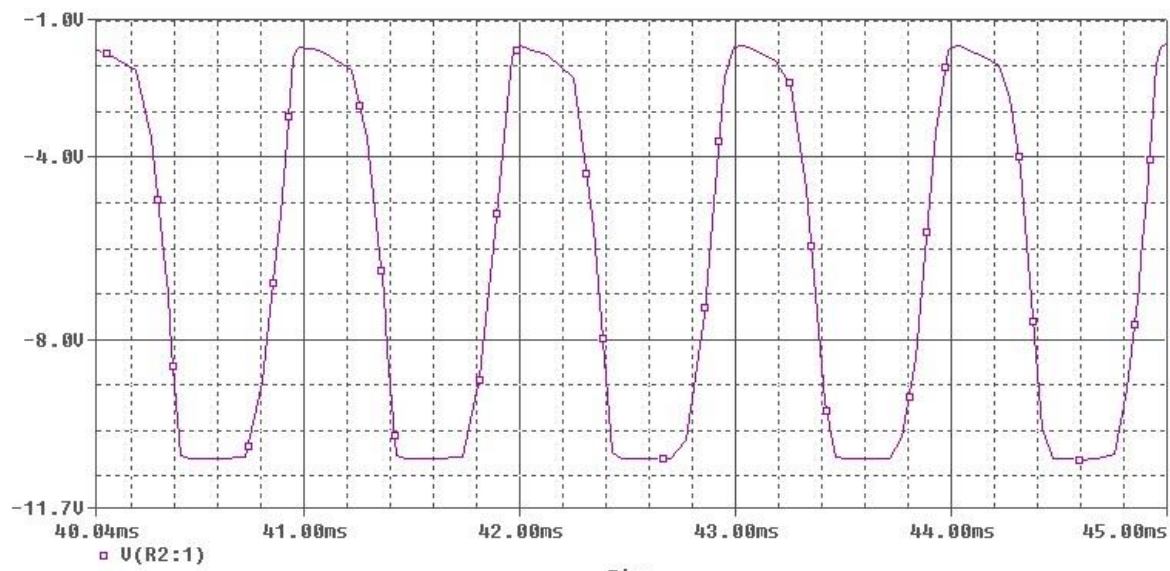
διάστημα  $1.3V \leq V_{B1} \leq 2V$  το T2 θα βρίσκεται στην αποκοπή. Έτσι καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

$V_{b1}$	$V_{A-B}$
1,00	9,80
1,10	9,80
1,20	9,80
1,30	9,80
1,40	-10,40
1,50	-10,40
1,60	-10,40
1,70	-10,40
1,80	-10,40
1,90	-10,40
2,00	-10,40

8.



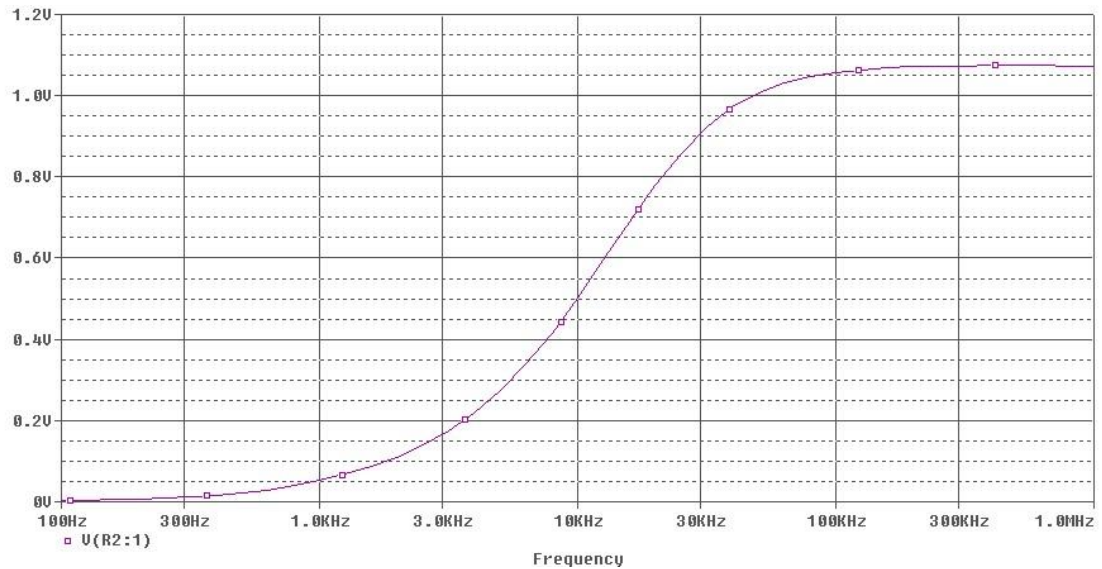
Σε αυτό το κύκλωμα η μεταβλητή αντίσταση ρυθμίζεται πάλι έτσι ώστε τα δυναμικά στους συλλέκτες των δύο τρανζίστορ να είναι περίπου ίσα. Στην συνέχεια εφαρμόζεται η AC τάση. Το παρακάτω διάγραμμα είναι η κυματομορφή στον συλλέκτη του Q2. Παρατηρούμε, όπως και στο εργαστήριο, ότι έχει υποστεί ψαλιδισμό.



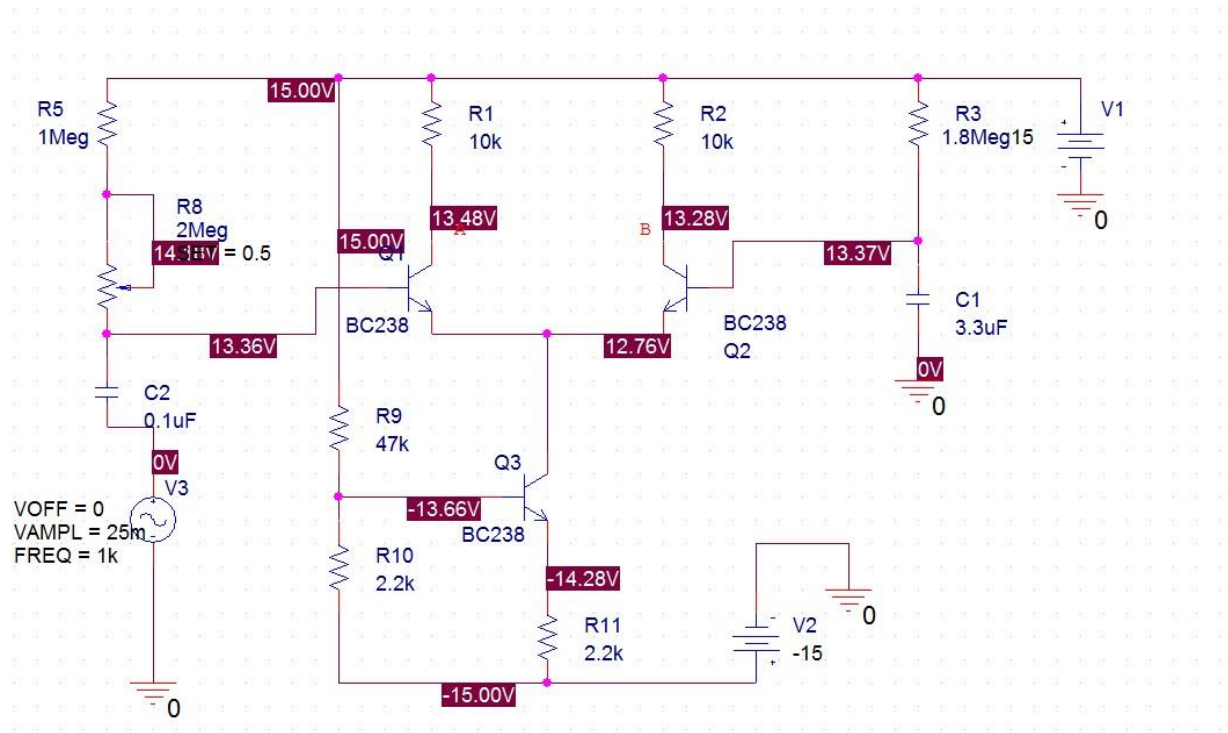
Στο παραπάνω διάγραμμα υπήρχε μεταβατικό φαινόμενο για χρόνο  $< 30\text{ms}$ . Για το λόγο αυτό δείχνουμε μια περιοχή στα 40-45ms, όπου η κυματομορφή είναι πιο σταθερή.

### AC sweep ανάλυση

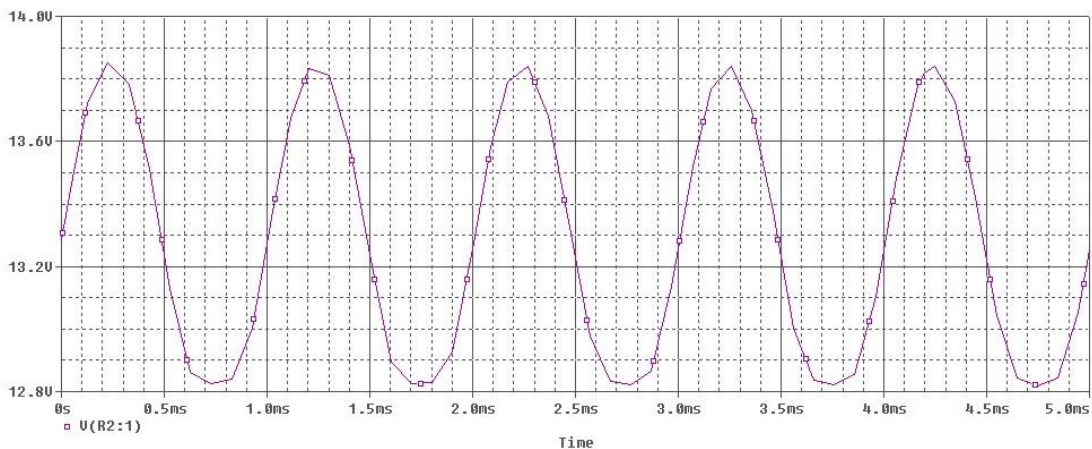
Μεταβάλλοντας τώρα την συχνότητα την εναλλασσόμενης πηγής από 100Hz έως 1MHz προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα για την τάση στο συλλέκτη του Q2.



9.



Μετασχηματίζουμε το τελευταίο κύκλωμα σε αυτό του παραπάνω σχήματος. Στο διάγραμμα έχουμε πάλι την τάση του συλλέκτη του Q2.

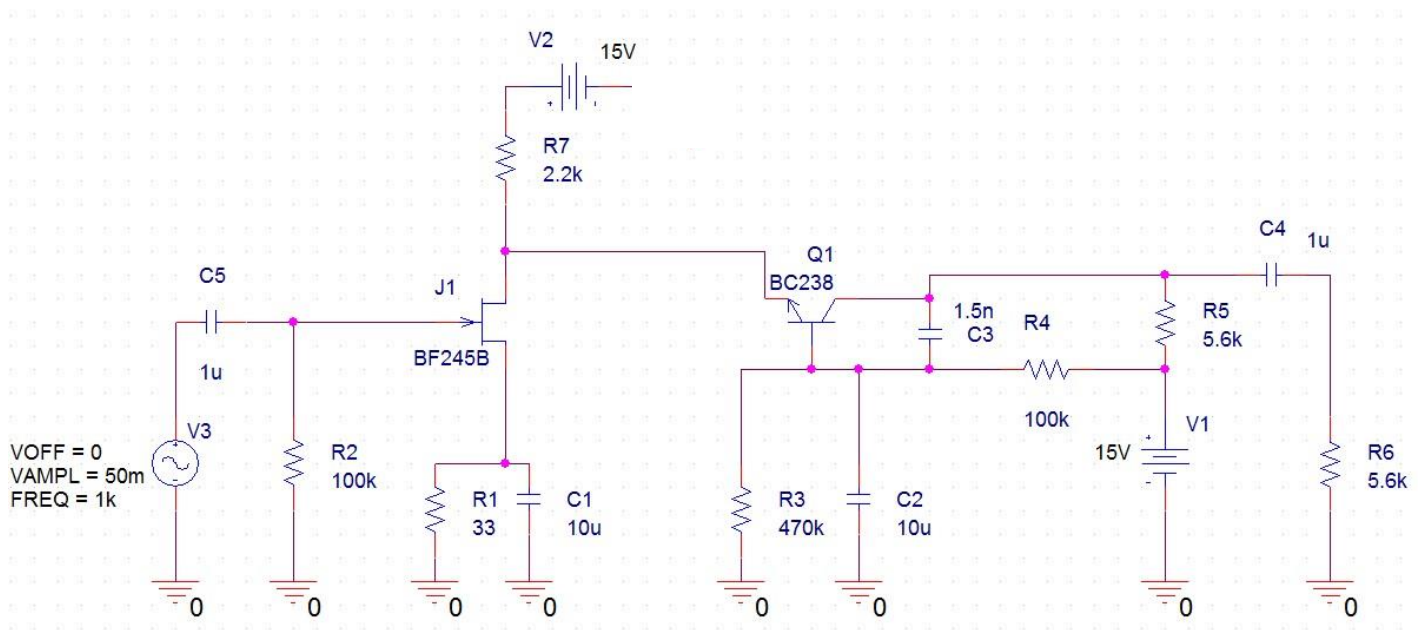




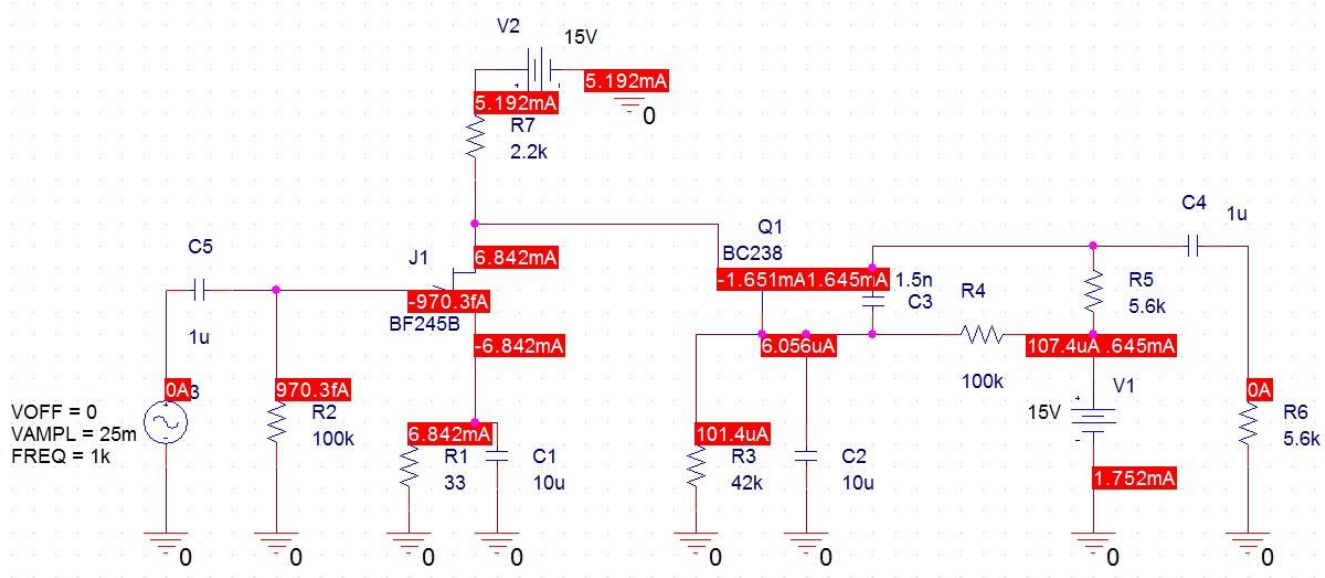
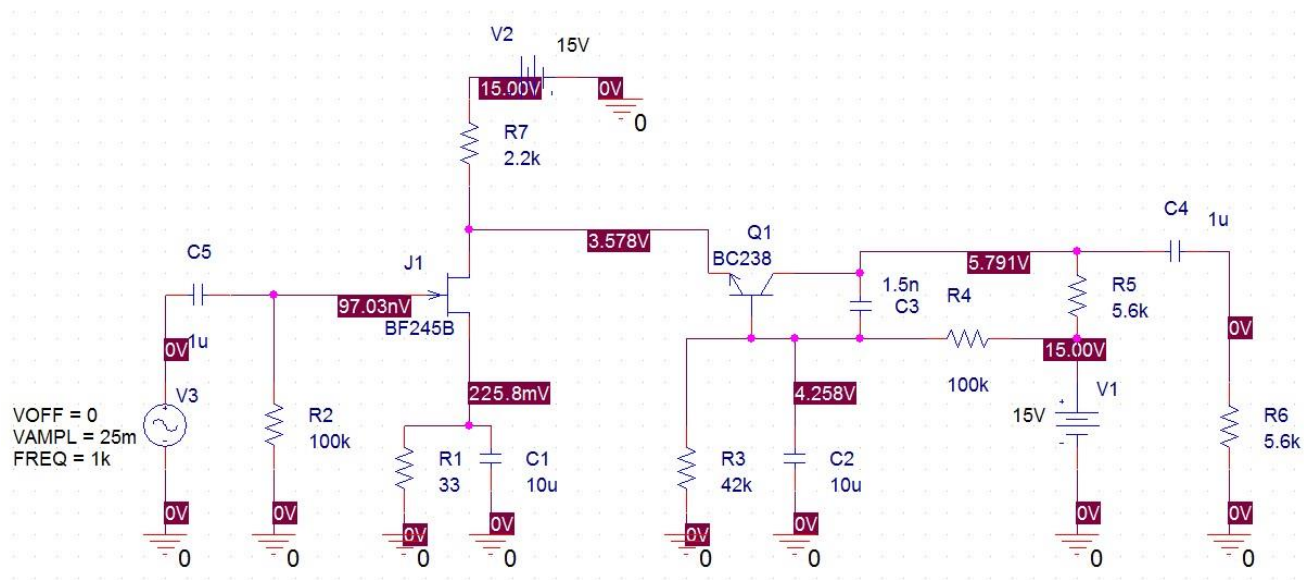
Παρατηρούμε ότι η dc συνιστώσα είναι 13,28 Volt, ενώ το πλάτος peak-to-peak της ac είναι περίπου 1 Volt. Άρα, η ενίσχυση σε αυτή τη περίπτωση προκύπτει:

$$A_v = 1/0.05=20$$

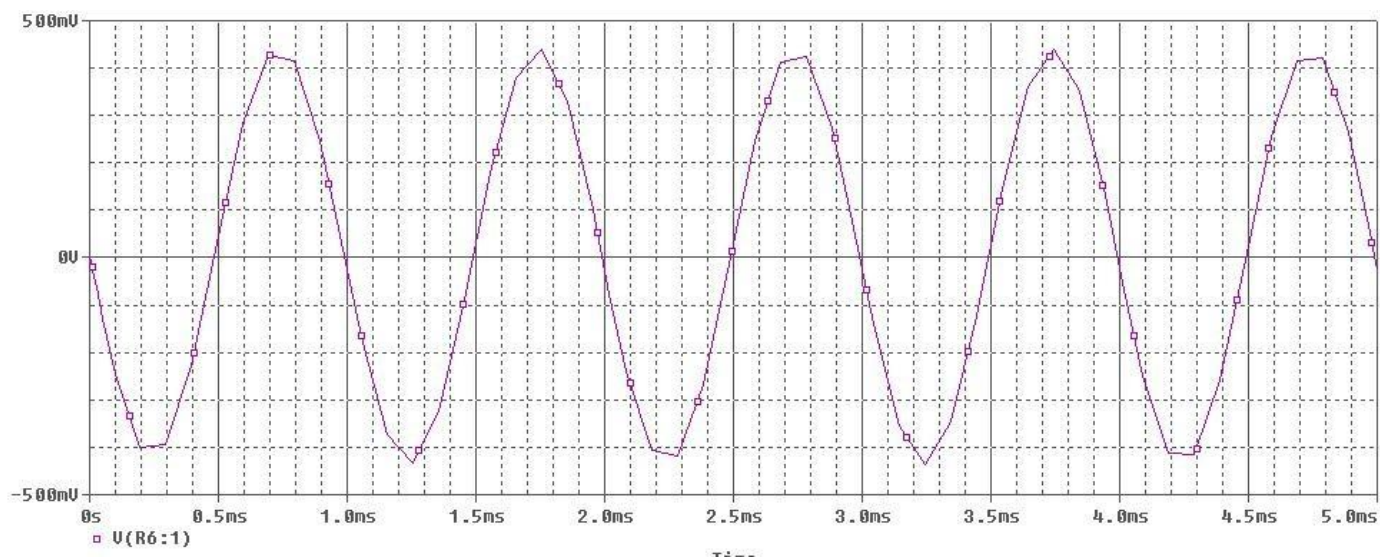
## ΑΣΚΗΣΗ 2



### A) DC Ανάλυση



## Β)Χρονική Ανάλυση

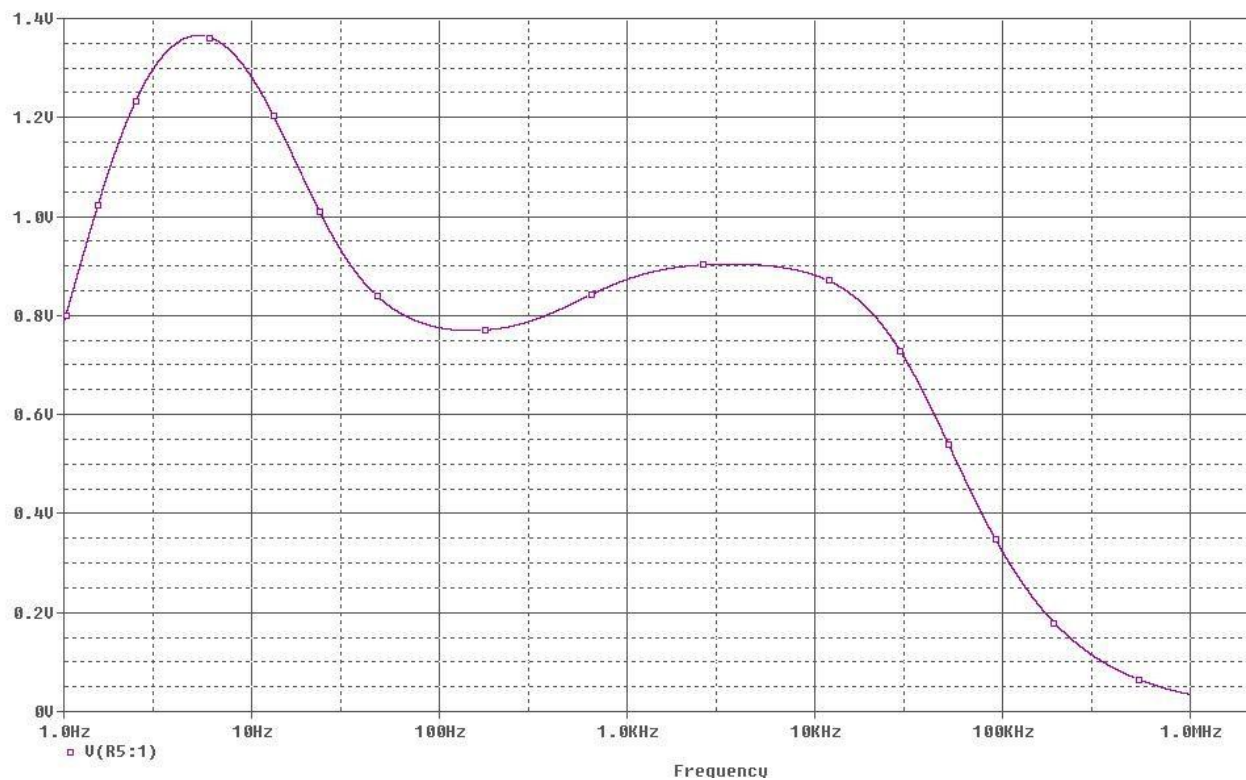


Στο σχήμα φαίνεται η τάση εξόδου για είσοδο  $V_{in} = 50mV_{p-p}$ . Το κέρδος τάσης προκύπτει:

$$G = 840/50 = 16,8$$

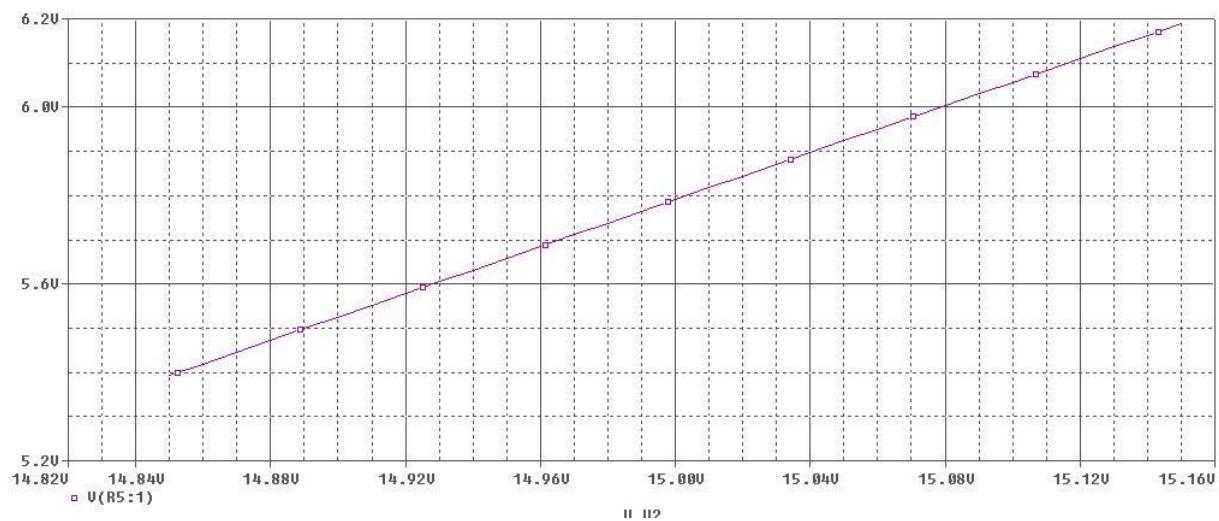
### Γ) AC Sweep

Στο παρόντω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της τάσης του συλλέκτη  $V_c$  συναρτήσει της συχνότητας



### Δ)DC Sweep

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της τάσης του συλλέκτη Vc για μεταβολές τις Vdd για  $\pm 1\%$ .



## Θεωρητική ανάλυση

### DC ανάλυση:

$$V_{GS} + R_S \cdot I_D = 0, I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Έχουμε  $I_{DSS}=5\text{mA}$ ,  $V_P=-2\text{V}$ ,  $R_S=33\Omega$ . Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές προκύπτει η εξίσωση  $I_D^2 - 642I_D + 3846 = 0$

Επομένως  $I_{D1}=6,05\text{mA}$  και  $I_{D2}=635,95\text{mA}$

Η δεύτερη απορρίπτεται διότι δεν ικανοποιείται η συνθήκη  $V_{DS} > V_{GS} - V_P$ .

Οπότε  $I_D=6,05\text{mA}$ .

Για το JFET ισχύει :

$$g_{m0} = 2I_{DSS}/V_P = 5\text{mA/V} \text{ και } g_{m1} = g_{m0}(1 - V_{GS}/V_P) = 4,5\text{mA/V} \text{ Από}$$

το ισοδύναμο Thevenin στη βάση του T2 έχουμε:

$$E_{th} = R_{th} \frac{I_E}{\beta + 1} + V_{BE} + V_{DD} - I_{RD} R_D$$

$$\text{Όπου } r_{bb'} = 10\Omega, n=1,3, \beta=478, V_{BE}=0.78\text{V}$$

$$V_{DD}=15\text{V}, V_{CC}=15\text{V}, E_{th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}, R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$R_1=100\text{k}\Omega, R_2=60\text{k}\Omega, R_D=2.2\text{k}\Omega \text{ και } I_{RD}=I_D - I_E.$$

$$\text{Προκύπτει } I_E = (E_{th} + I_D R_D - V_{DD} - V_{BE}) / (R_{th} / (\beta + 1) + R_D)$$

$$\text{Αρα } I_E = 1,38\text{mA}, I_{RD} = 4,67\text{mA}, I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = 2.88\mu\text{A} \text{ Και}$$

$$I_C = \beta I_B = 1.377\text{mA}$$

$$V_E = V_D = V_{DD} - I_{RD} R_D = V \Rightarrow V_E = 4,726\text{V}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 11.04V \Rightarrow V_C = 7.2888V$$

$$V_B = V_{B_E} + V_{D_D} = 6.19V \Rightarrow V_B = 5.506V$$

$$V_S = R_S \cdot I_D = 0.16V \Rightarrow V_S = 0.199V$$

Για το διπολικό τρανζίστορ ισχύει **AC ανάλυση**:

$$g_{m2} = (\beta / (\beta + 1)) \cdot r_D = (\beta / (\beta + 1)) \cdot (n k T / q I_E) \Rightarrow g_{m2} = 24.44 \text{ mA/V}$$

Οι αντιστάσεις εισόδου του και εξόδου του JFET είναι:

$$R_{in1} = R_G = 100k\Omega$$

$$R_{out} = R_C = 5.6k\Omega$$

$$\text{Για το διπολικό τρανζίστορ ισχύει } r_{in2} = r_{bb'} + (\beta + 1) \cdot r_D = 11.742 \text{ K}\Omega \text{ και } R_{in2} = r_{in2} \parallel 1/g_{m2} = 39.8\Omega \text{ Η}$$

ενίσχυση είναι:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A_1 A_2 \frac{R_{in1}}{R_{in1} + R_S} \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{out1}} \frac{R_L}{R_L + R_{out2}}$$

Όπου:

$$A_1 = -g_{m1} \cdot R_D = -9.9$$

$$A_2 = \frac{\beta R_C}{r_{bb'} + (\beta + 1)r_d} = 227.96$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές παίρνουμε:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 20.13$$

Παρατηρούμε ότι στη θεωρητική ανάλυση, όπου δε λαμβάνουμε υπόψιν τις χωρητικότητες που εμφανίζονται εξωτερικά αλλά και εσωτερικά του τρανζίστορ, η ενίσχυση προκύπτει ανεξάρτητη της συχνότητας. Στην πραγματικότητα αυτή η ενίσχυση είναι η ενίσχυση μέσω των συχνοτήτων. Και στα πειραματικά και υπολογιστικά (spice) αποτελέσματα στις μέσες συχνότητες το κέρδος διατηρούταν περίπου σταθερό. Στα πειραματικά το κέρδος

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ στις μέσες συχνότητες ήταν } \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1,3}{0,05} = 26 \quad C_B = C_S \text{ και } 10\mu F \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1,08}{0,05} = 21,6$$

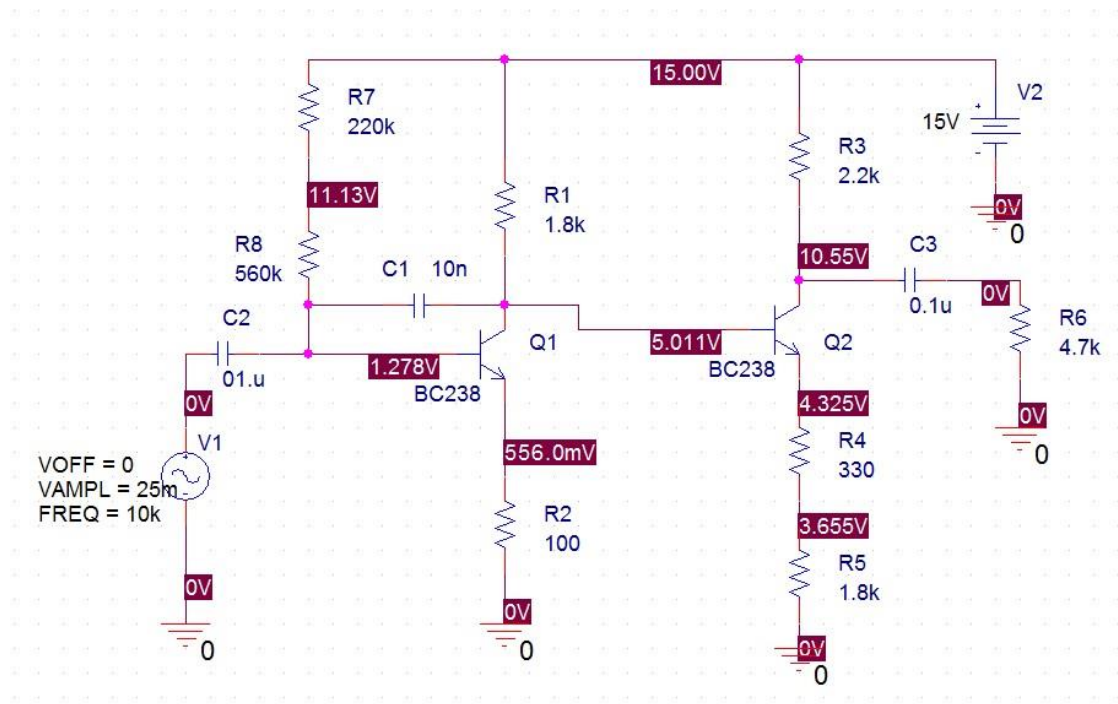
για  $C_B = C_S = 0,1\mu F$

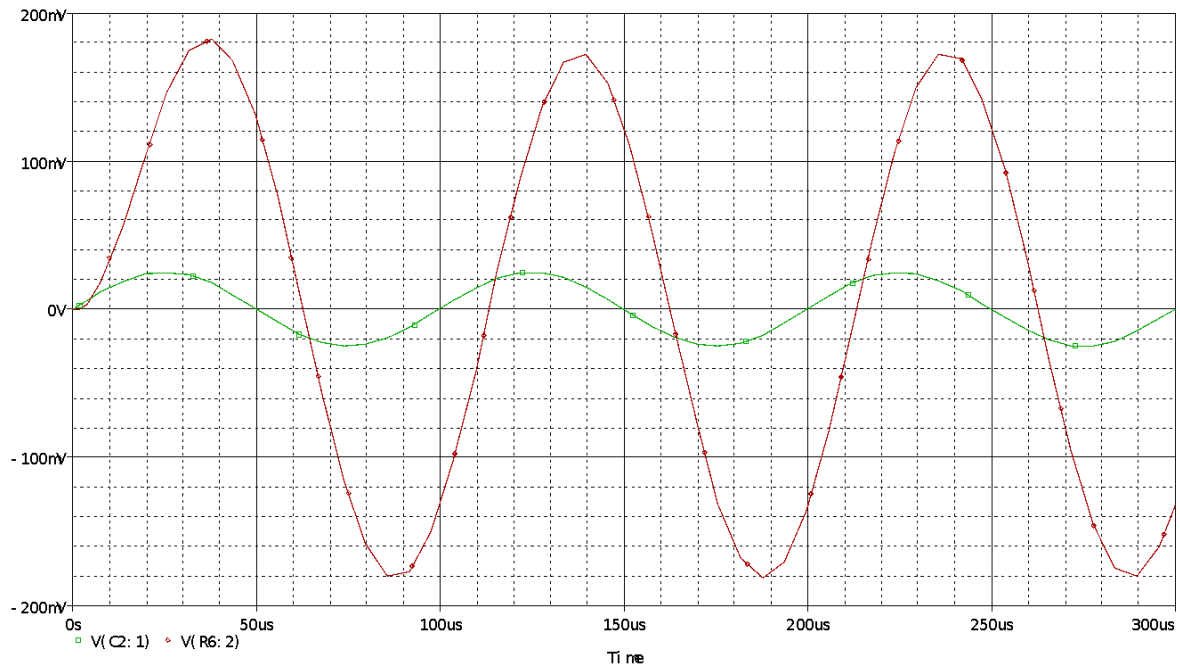
Υπολογιστικά τα κέρδη αυτά ήταν αντίστοιχα 10 και 8,5 αντίστοιχα όπως φαίνεται από τα γραφήματα των AC sweep αναλύσεων.

### ΑΣΚΗΣΗ 3

#### Ερώτημα 10

#### Κύκλωμα 1

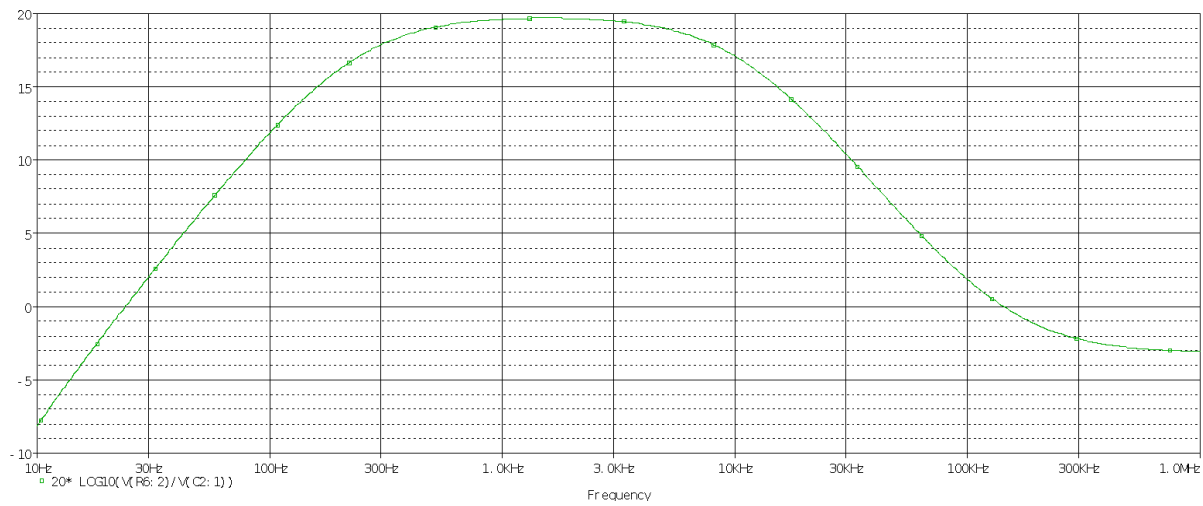




Είσοδος: 50mV p-p

Έξοδος: 360mV p-p

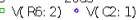
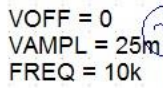
Κέρδος: 7,2



$20 \log(V_{out}/V_{in})$  σε dB

Κύκλωμα 2

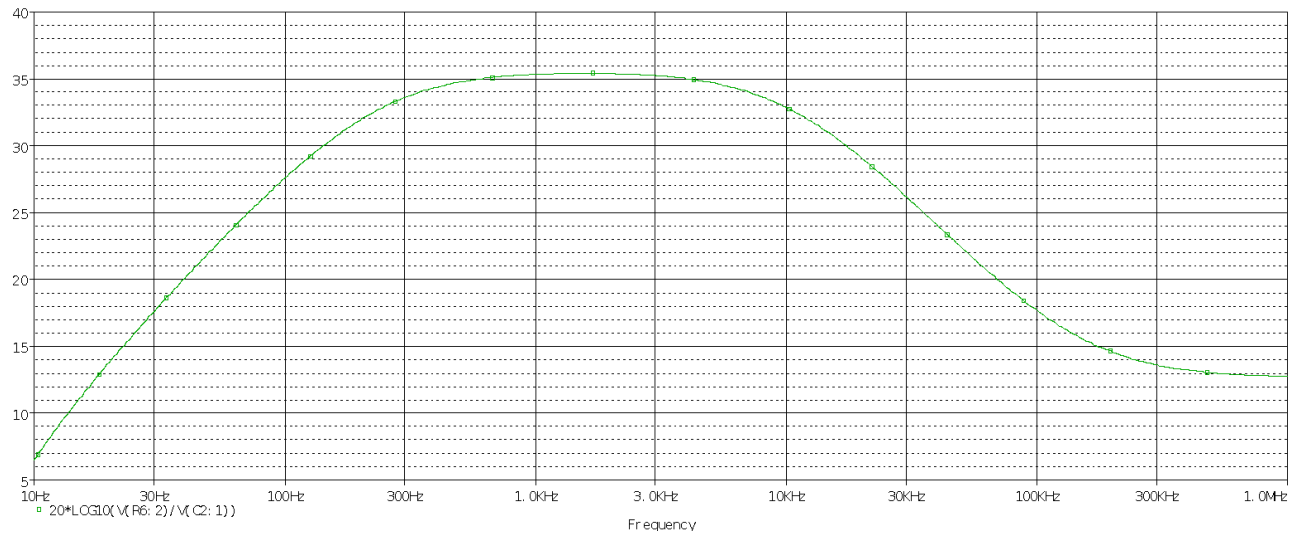




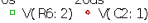
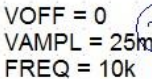
Είσοδος: 50mV p-p

Έξοδος: 2.2V p-p

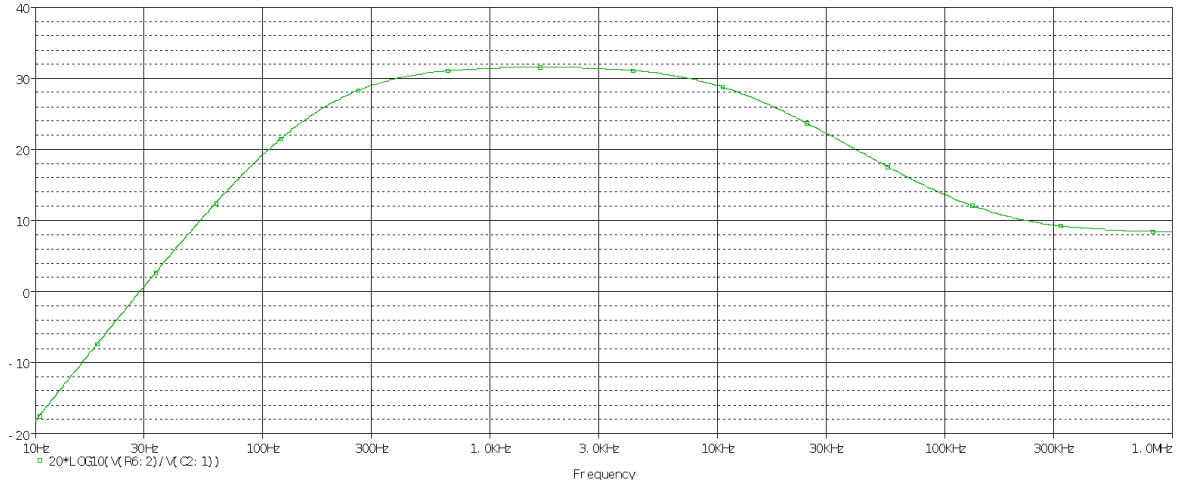
Κέρδος: 44



$20 \log(V_{out}/V_{in})$  σε dB



Κέρδος: 28



20 log(Vout/Vin) σε dB

## Ερώτημα 11

### Κύκλωμα 1

Στο T1:

$$V_{CC} = R_B I_{B1} + V_{BE} + (\beta + 1) I_{B1} R_{E1}$$

όπου  $R_{E1} = 0,1k\Omega$ ,  $R_B = 998k\Omega$   $\beta = 444,5$   $V_{BE} = 0.7V$

Άρα:

$$I_{B1} = 0,013mA, I_{C1} = \beta I_{B1} = 5,778mA, I_{E1} = (\beta + 1) I_{B1} = 5,791mA \text{ Στο}$$

T2:

$$V_{CC}=R_{C1}(I_{C1}+I_{B2})+V_{BE}+(\beta+1)I_{B2}R_{E2} \cdot \text{όπου}$$

$$R_{E2}=0,33 \text{ k}\Omega, R_{C1}=1,8 \text{ k}\Omega \text{ Άρα:}$$

$$I_{B2}=0,02 \text{ mA}, I_{C2}=\beta I_{B2}=8,89 \text{ mA}, I_{E2}=(\beta+1) I_{B2}=8,91 \text{ mA} \text{ Οι}$$

τάσεις είναι:

$$V_{B1}=V_{BE}+I_{E1}R_{E1}=1,279\text{V} \quad V_{B2}=V_{C1}=$$

$$V_{CC}-(I_{C1}+I_{B2})R_{C1}=4,2\text{V} \quad V_{C2}=$$

$$V_{CC}-I_{C2}R_{C2}=7,5\text{V}$$

$$V_{E1}=I_{E1}R_{E1}=0,57\text{V}$$

$$V_{E2}=I_{E2}R_{E2}=2,94\text{V}$$

Η ενίσχυση δίνεται:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A_1 A_2 = \frac{R_{in1}}{R_{in1} + R_S} \cdot \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{out1}} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{out2}} \cdot$$

$$r_{d1}=26 \cdot 1,3/I_{E1}=0,006\text{k}\Omega$$

$$r_{d2}=26 \cdot 1,3/I_{E2}=0,004\text{k}\Omega$$

$$r_{in1}=(\beta+1)(r_{d1}+R_{E1})=50,1\text{k}\Omega$$

$$r_{in2}=(\beta+1)(r_{d2}+R_{E2})=0,5\text{k}\Omega$$

$$A_1 = \frac{-\beta R_{C1}}{r_{in1}} = -15,9, A_2 = \frac{-\beta R_{C2}}{r_{in2}} = -1,95$$

$$R_{in2} = r_{in2}$$

$$R_{out1} = R_{C1} = 1,8\text{k}\Omega$$

$$R_{out2} = R_{C2} = 2,2 \text{ k}\Omega \text{ Έτσι}$$

η ενίσχυση περίπου:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 18$$

## Κύκλωμα 2

Για την ενίσχυση έχουμε

$$F = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_F} = 0.641$$

Η ισοδύναμη αντίσταση στον εκπομπό του  $T_1$  είναι:

$$R'_{E1} = R_{E1} // (R_F + R_L // R_{C2}) = 0.09 \text{ k}\Omega$$

$$r_{in1} = (\beta + 1)(r_{d1} + R'_{E1}) = 46.4 \text{ k}\Omega$$

$$r_{in2} = (\beta + 1)(r_{d2} + R_{E21}) = 162.6 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{C2} = R_{C2} // R_L // (R_F + R_{E1}) = 0.14 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{C1} = R_{C1} // R_{in2} = 1.78 \text{ k}\Omega$$

$$A_1 = \frac{-\beta R'_{C1}}{r_{in1}} = -17.8$$

$$A_2 = \frac{-\beta R'_{C2}}{r_{in2}} = -0.40$$

Και η συνολική ενίσχυση είναι:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_1 A_2}{1 + |A_1 A_2|} = 1.281$$

## Κύκλωμα 3

$$V_{CC}=R_{C1}(I_{C1}+I_{B2})+V_{BE}+R_{E2}(I_{E2}-I_{B1})$$

$$V_{CC}=R_{C1}(I_{C1}+I_{B2})+V_{BE}+R_F I_{B1}+V_{BE}+I_{E1} R_{E1}$$

όπου  $R_{C1}=1,8k\Omega$ ,  $R_F=18 k\Omega$ ,  $R_{E1}=0,1 k\Omega$ ,  $R_{E2}=0,56 k\Omega$ .

$$I_{B1}=0,015mA, I_{B2}=0,006 mA$$

$$I_{E1}=(\beta+1) I_{B1}=6,9mA \quad I_{E2}=(\beta+1)$$

$$I_{B2}=2,8 mA \quad I_{C1}=\beta I_{B1}=6,9 mA$$

$$I_{C2}=\beta I_{B2}=2,7 mA$$

Οι τάσεις είναι:

$$V_{E1}=I_{E1} R_{E1}=0,699V, \quad V_{E2}=(I_{E2}-I_{B1})R_{E2}=1,557V, \quad V_{B1}=V_{BE}+V_{E1}=1,479V$$

$$V_{B2}=V_{C1}=V_{CC}-R_{C1}(I_{C1}+I_{B2})=2,434V, \quad V_{C2}=V_{CC}-R_{C2}I_{C2}=8,862V$$

Οι δυναμικές αντιστάσεις και οι αντιστάσεις εισόδου των τρανζίστορ και οι ισοδύναμες αντιστάσεις στους εκπομπούς και τους συλλέκτες είναι:

$$r_{d1}=0,004k\Omega, \quad r_{d2}=0,01 k\Omega, \quad r_{in1}=(\beta+1)(r_{d1}+R_{E1})=48,8k\Omega, \quad R_{in1}=r_{in1}/(R_F+R_{E2})=13,4 k\Omega$$

$$r_{in2}=(\beta+1)(r_{d2}+R'_{E2})=155,3 k\Omega, \quad R_{in2}=r_{in2}=155,3k\Omega, \quad R'_{E2}=R_{E2}/(R_F+r_{in1}/R_S)=0,54 k\Omega$$

$$R'_{C2}=R_{C2}/R_L=1,49k\Omega, \quad R'_{C1}=R_{C1}/R_{in2}=1.77 k\Omega$$

Επομένως έχουμε:

$$A_1 = \frac{-\beta R'_{C1}}{r_{in1}} = -16,93, \quad A_2 = \frac{-\beta R'_{C2}}{r_{in2}} = -4,4$$

και

$$A_0 = A_1 A_2 = 75,94$$

Το κέρδος τάσης στον εκπομπό του T2 είναι :

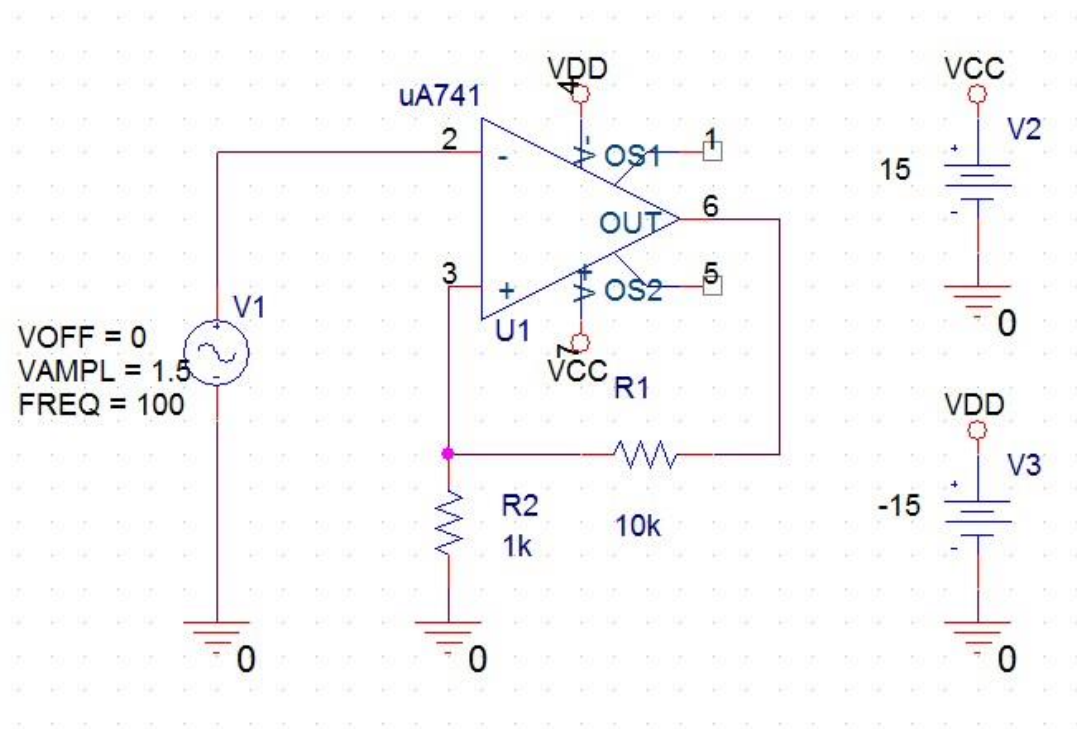
$$A_x \approx (A_1 * (\beta + 1) * R'_{E2}) / ((\beta + 1) * (R'_{E2} + r_{d2})) = 16,5$$

Επειδή  $R_5 = 0$  έχουμε

$$A_F = A_0 = 75,94$$

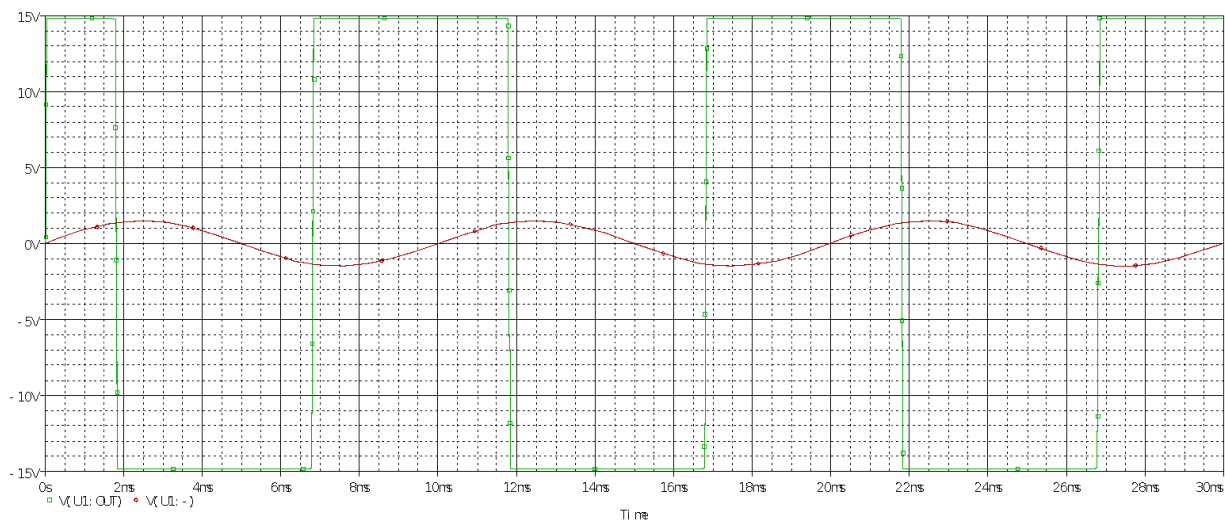
## ΑΣΚΗΣΕΙΣ 4 ΚΑΙ 5

### Κύκλωμα 1



Διάγραμμα εισόδου - εξόδου

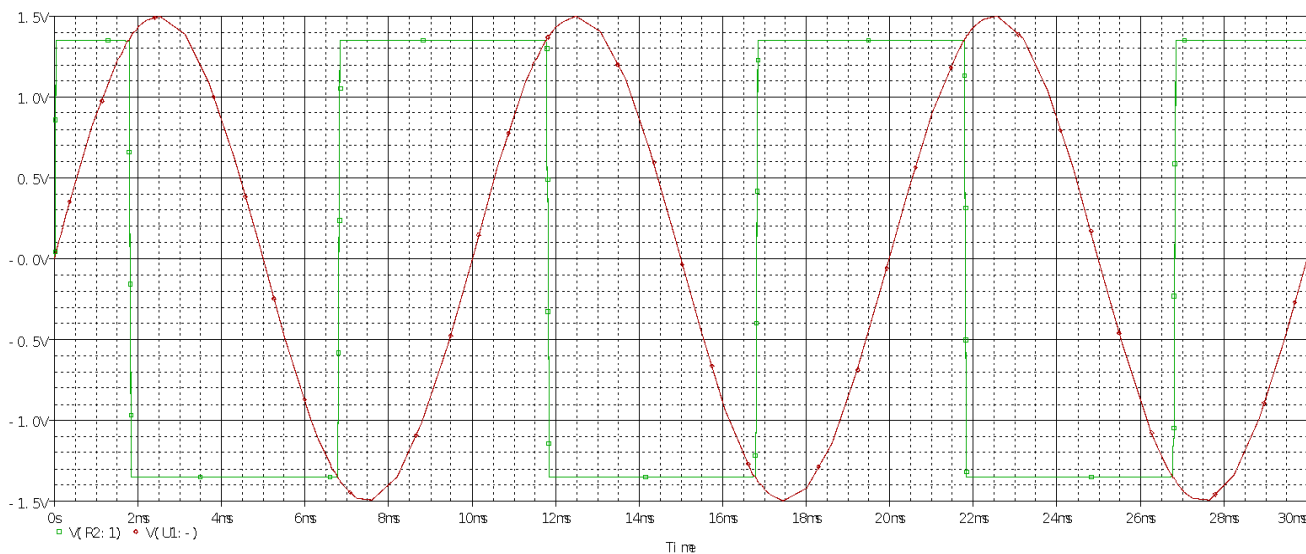




Πράσινο χρώμα : έξοδος

Κόκκινο χρώμα : είσοδος

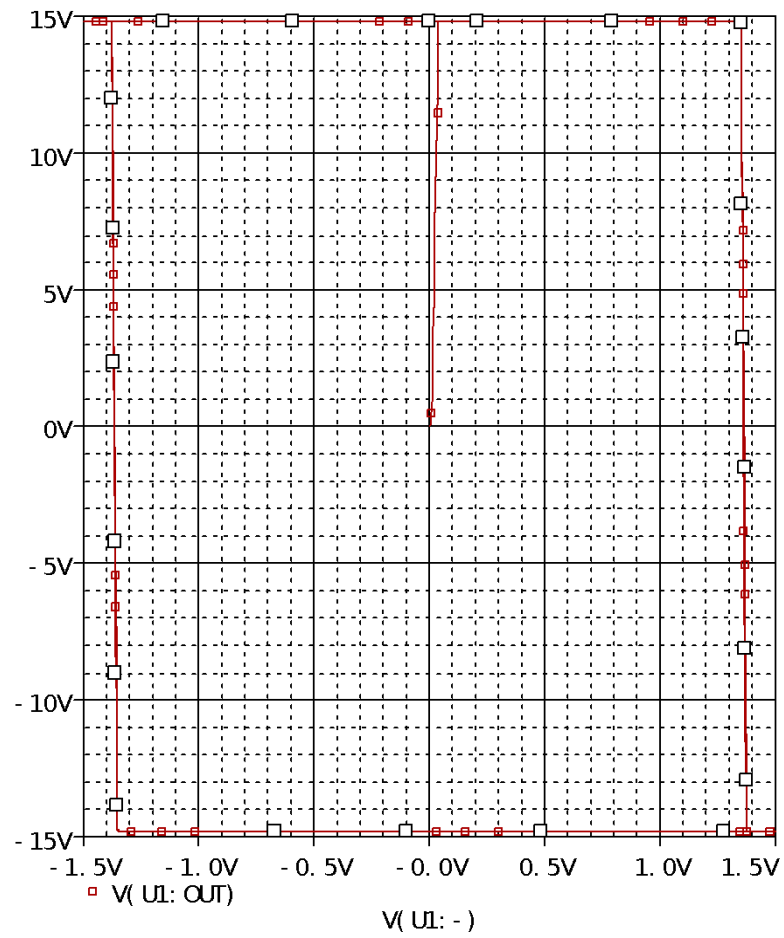
Διάγραμμα τάσης στο κοινό σημείο των  $R_1, R_2$



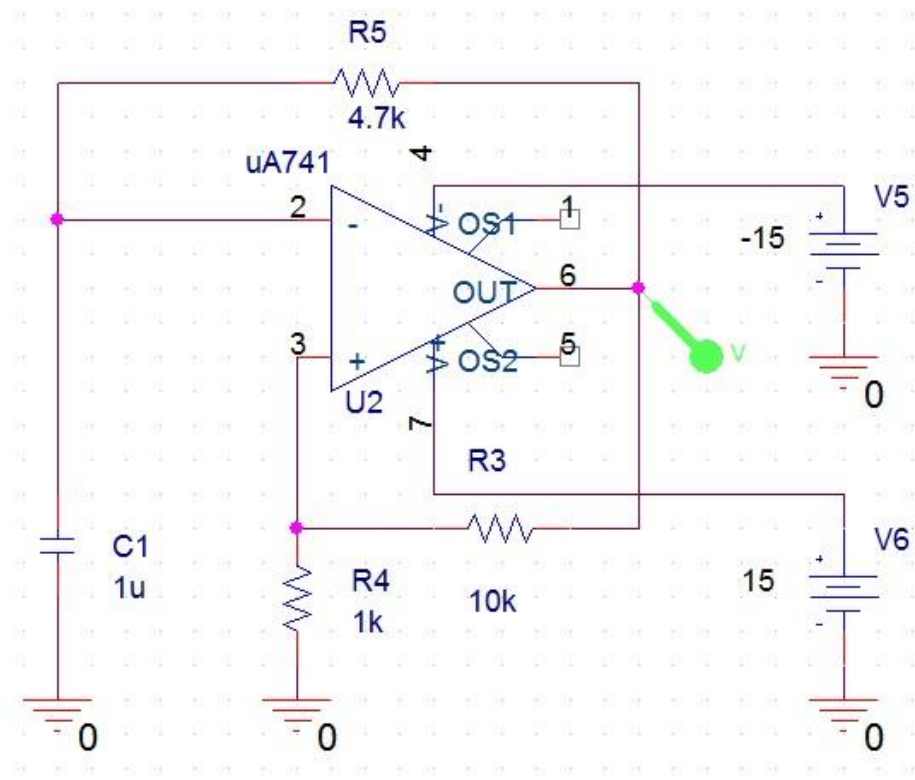
Πράσινο χρώμα : κοινό σημείο  $R_1, R_2$

Κόκκινο χρώμα : είσοδος

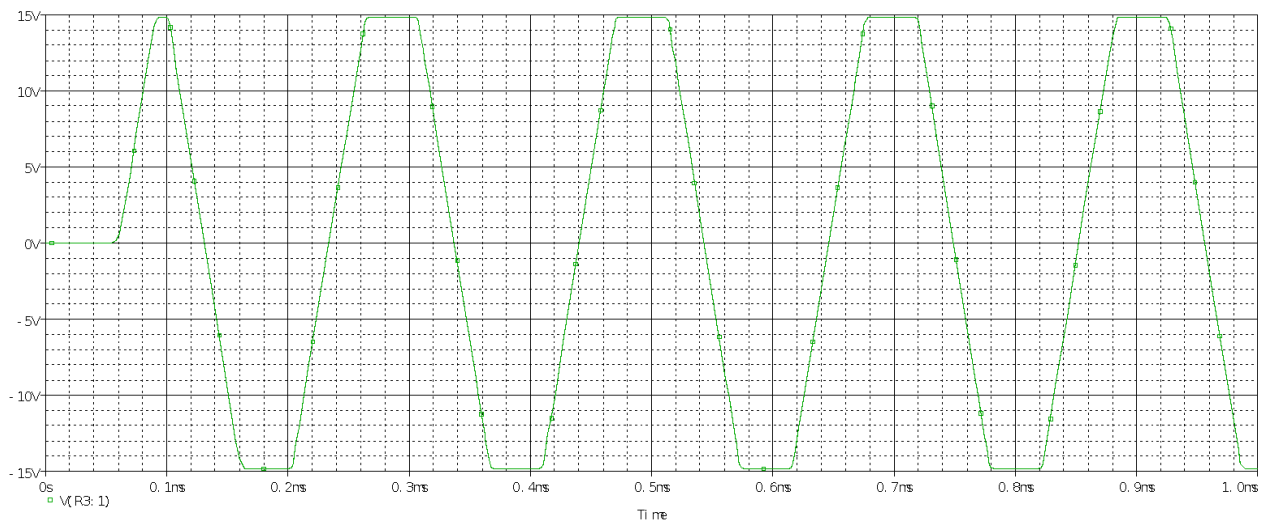
Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου του κυκλώματος



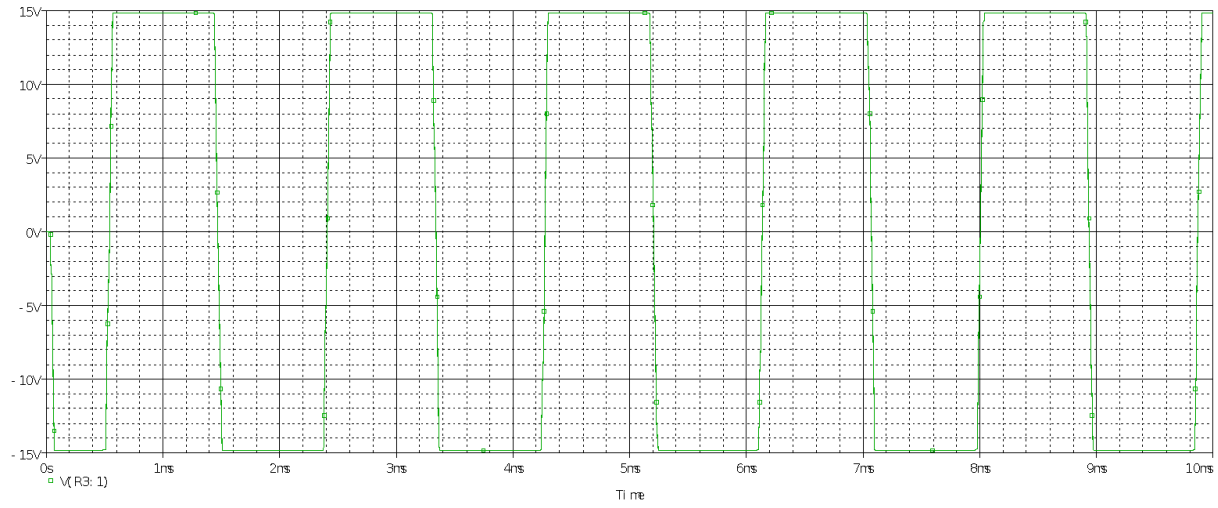
Κύκλωμα 2



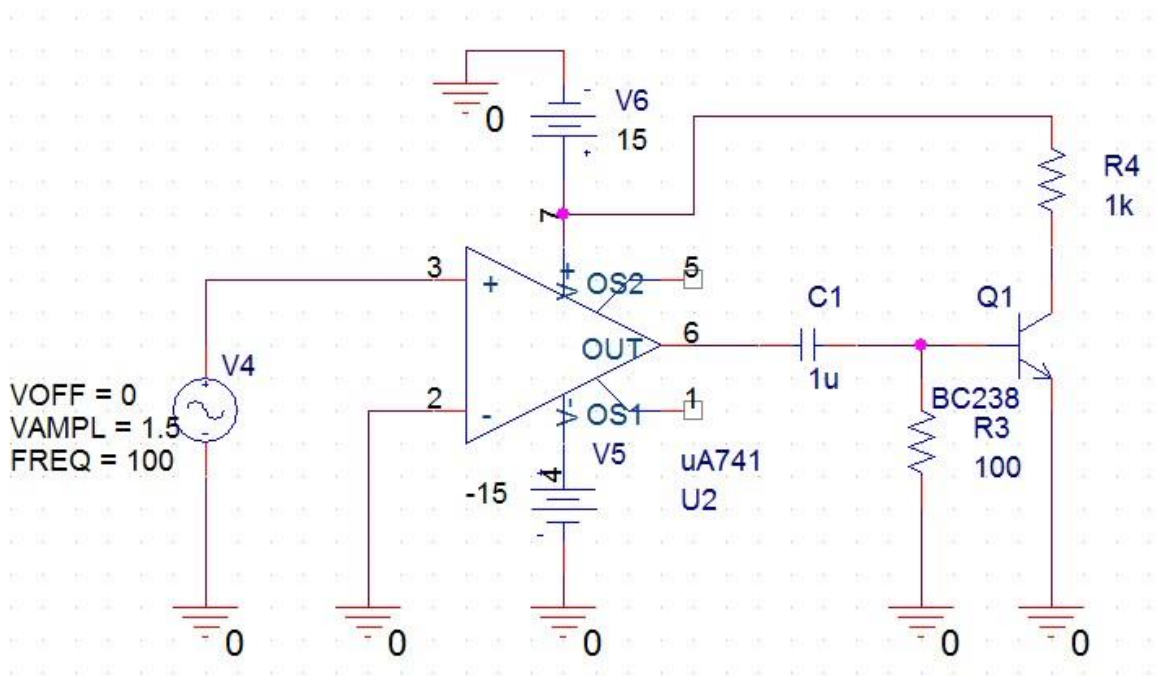
Έξοδος για  $C = 47\text{nF}$



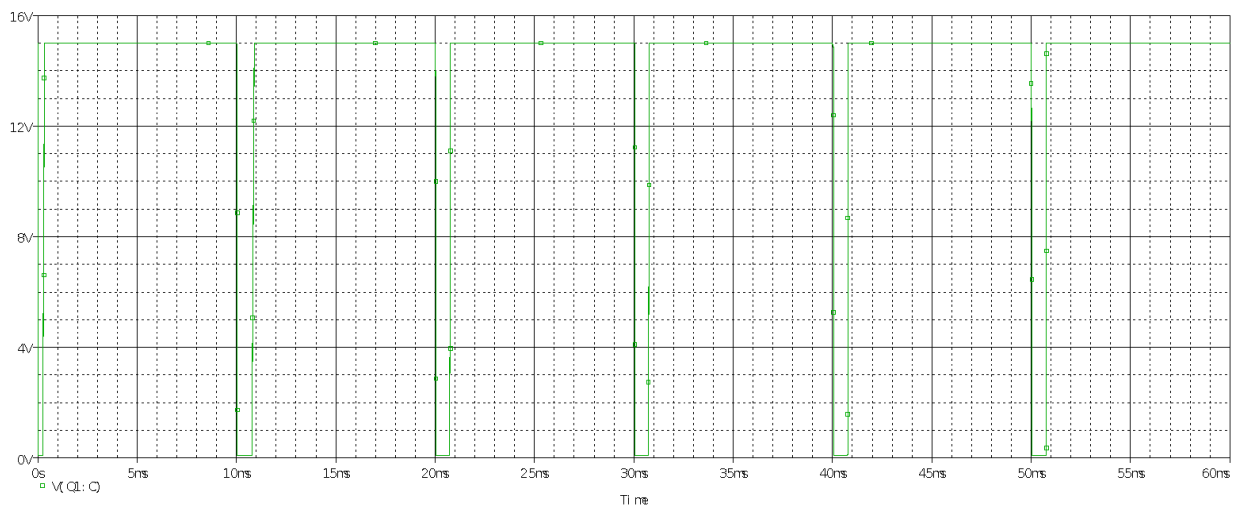
Έξοδος για  $C = 1\mu\text{F}$



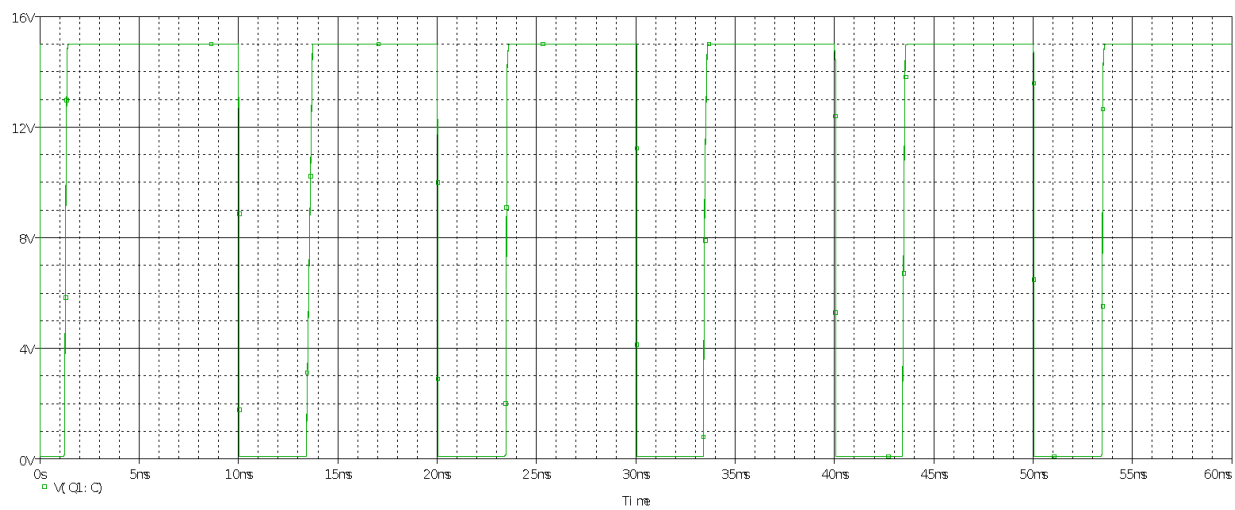
Κύκλωμα 3



Έξοδος για C = 1μF

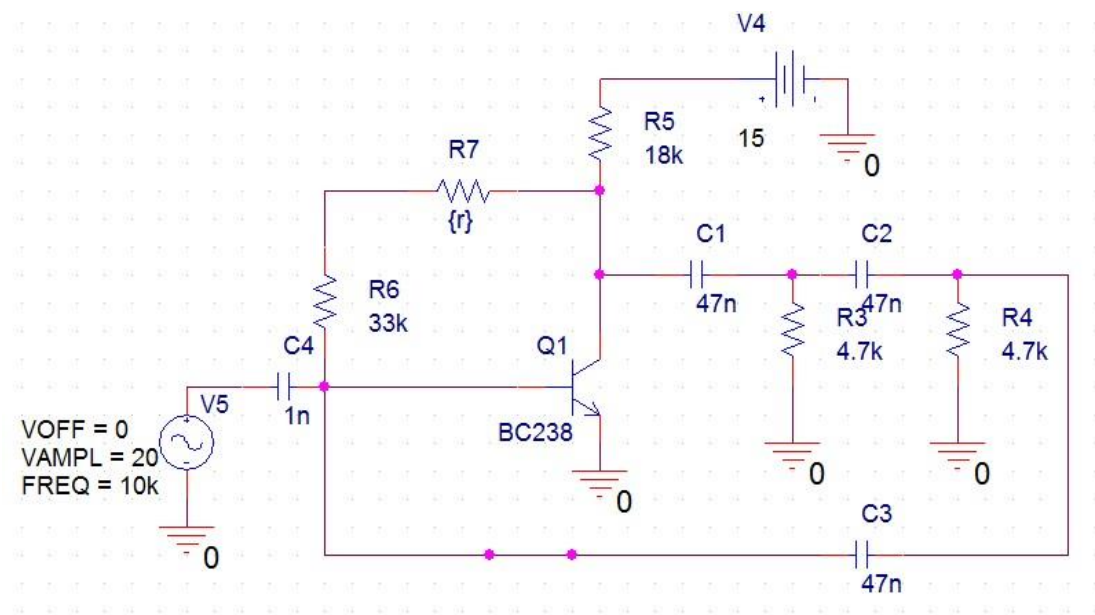


Έξοδος για  $C = 4,7\mu F$

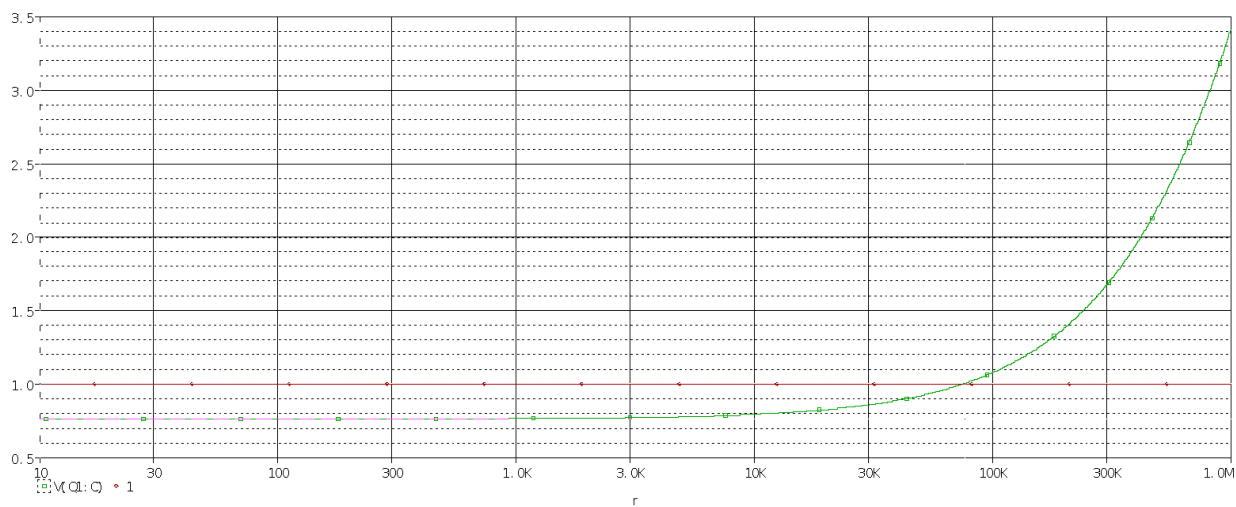


ΑΣΚΗΣΗ 5

Κύκλωμα 1

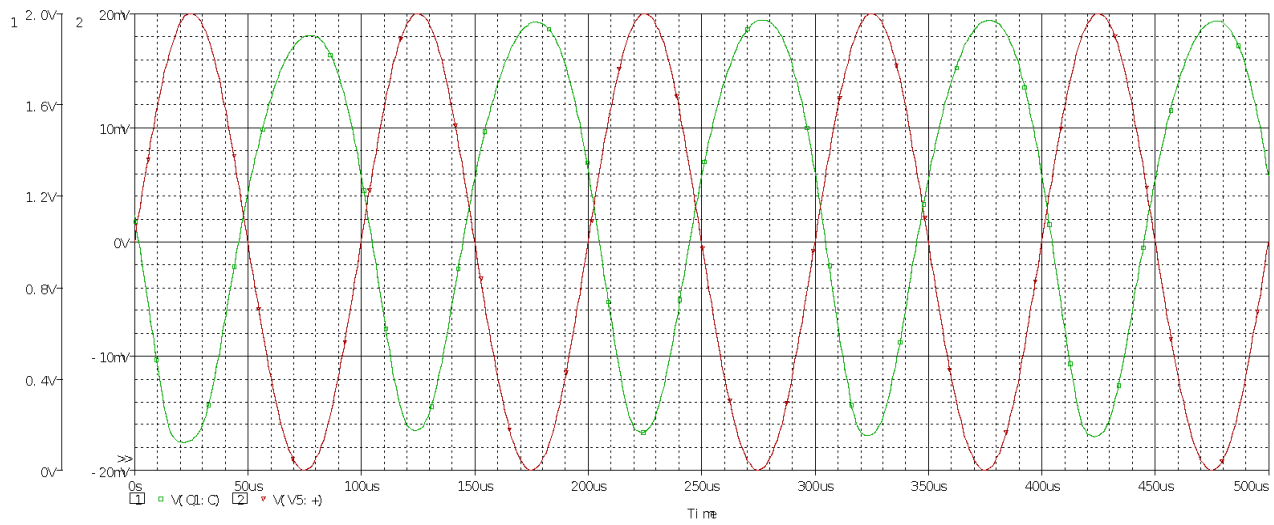


Παραμετρική ανάλυση για να βρεθεί η τιμή της  $R_7$  ώστε  $V_c = 1V$

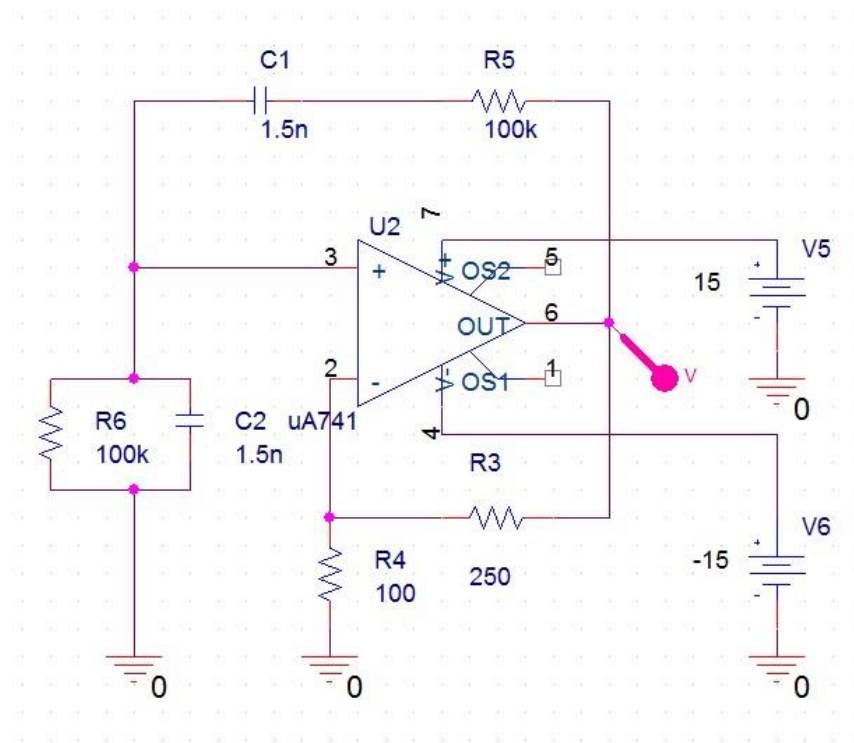


$R_7 = 75k \text{ Ohm}$

## Διάγραμμα εισόδου - εξόδου

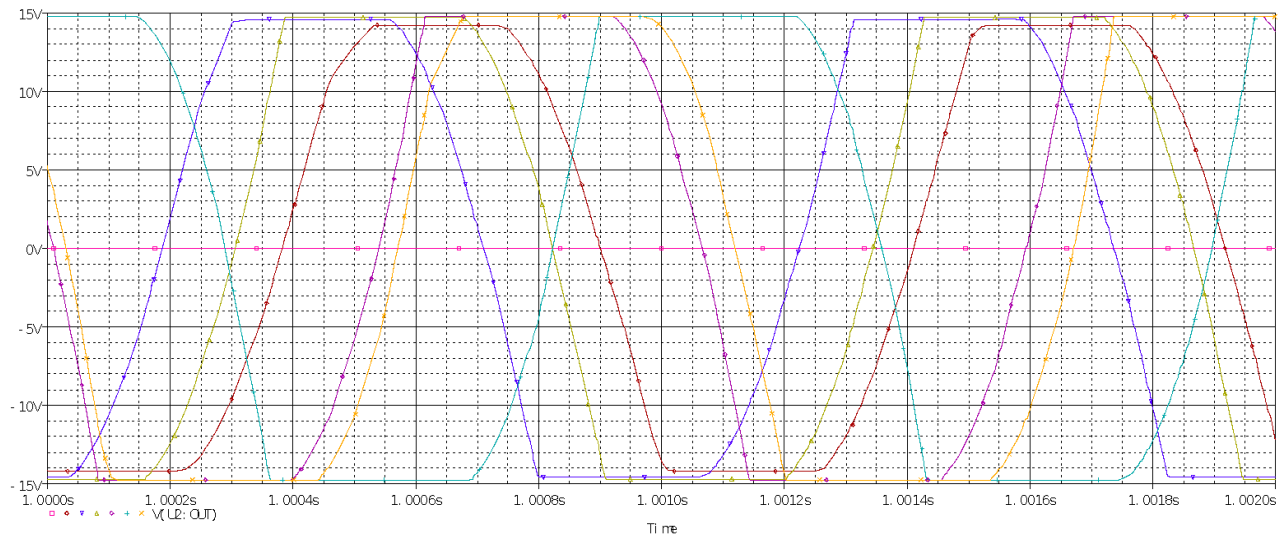


## Κύκλωμα 2





Παραμετρική ανάλυση για να βρεθεί η τιμή της  $R_3$  ώστε να αρχίσουν να παράγονται ταλαντώσεις σταθερού πλάτους



Αποτέλεσμα :  $R_{\min} = 250 \, \Omega$

Διάγραμμα εξόδου

