

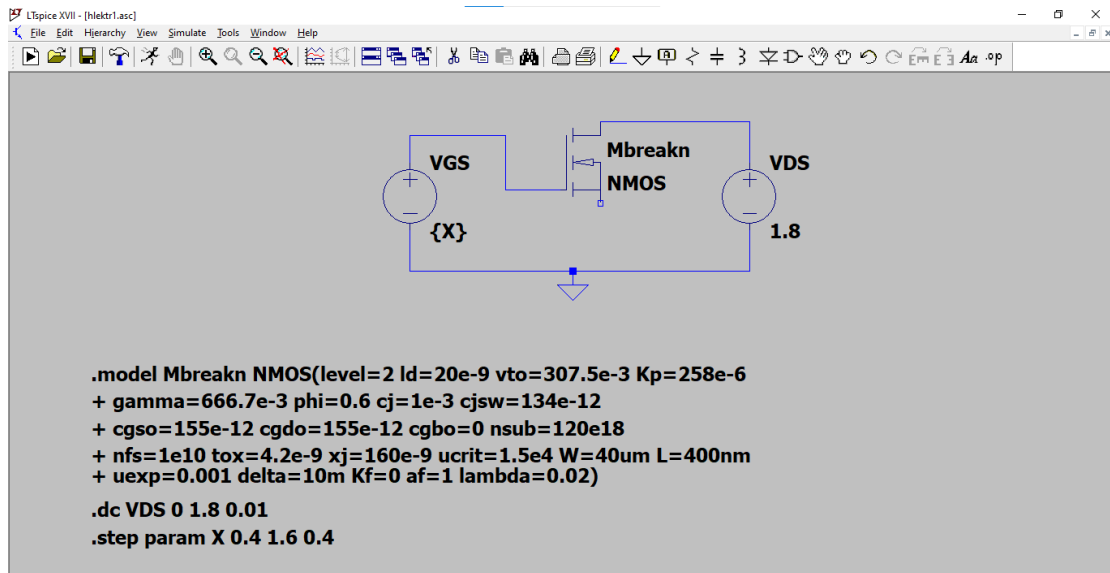
# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ

## 2<sup>Η</sup> ΣΕΙΡΑ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

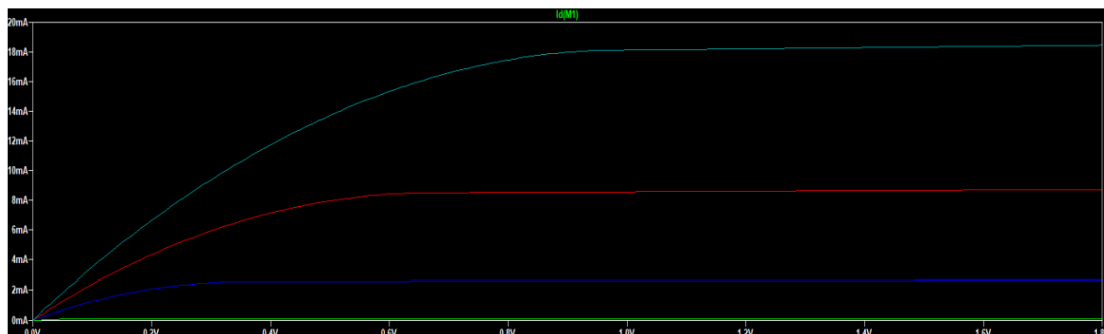
Ιωάννης Μπόσκοβιτς 03119640

### 1. ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MOS ΣΤΟ LTSPICE:

- 1) Το μοντέλο που χρησιμοποίησα φαίνεται παρακάτω μαζί με τις απαιτούμενες εντολές. Έτσι σχεδιάζεται η καμπύλη  $I_D$  ως προς  $V_{DS}$  (από 0 μέχρι 1.8V) και με  $V_{GS}=0.4, 0.8, 1.6V$

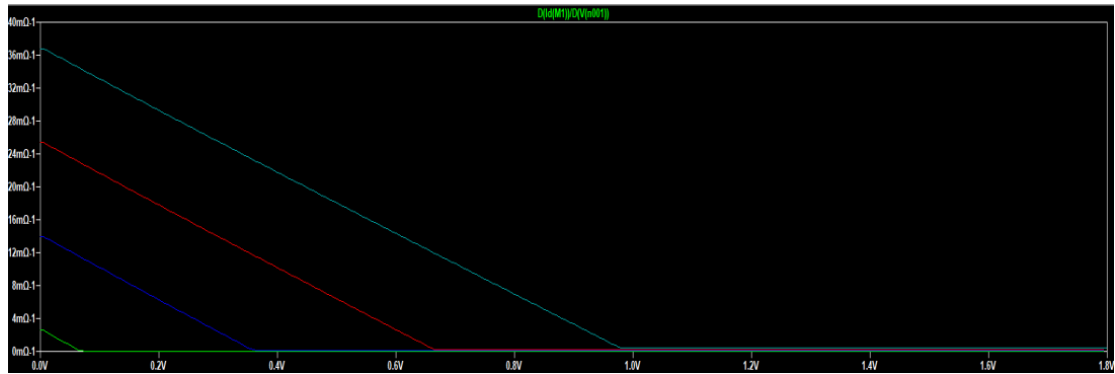


Και οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τα  $V_{GS}$ :

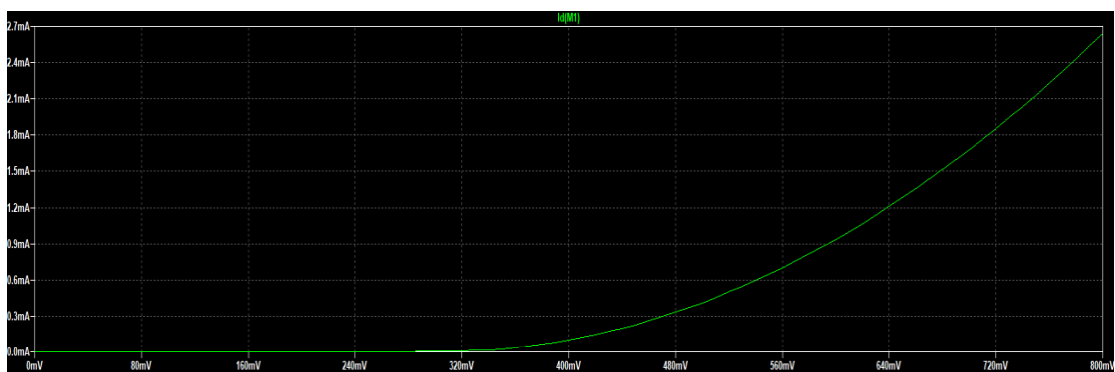


Είναι ευδιάκριτο ότι όσο αυξάνεται η διαφορά δυναμικού  $V_{GS}$  τόσο και το ρεύμα  $I_D$  που περνάει το MOSFET.

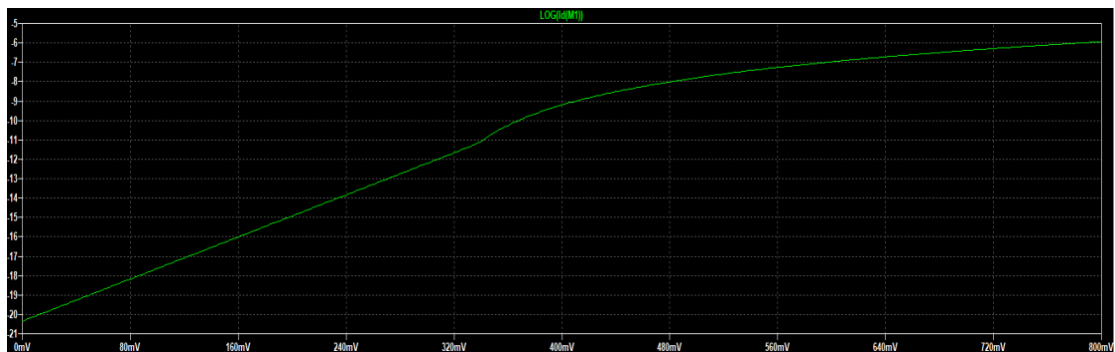
- 2) Με αλλαγή της παραπάνω επικεφαλίδας ( $I_D(M1)$  σε  $D(I_D(M1))/D(V(n001))$ ) καθώς και  $g_d=dI_D/dV_{DS}$  και με τα ίδια δεδομένα



3) Θέτοντας  $V_{DS}=1.8V$  και βάζοντας την εντολή **.dc VGS 0 0.8 0.01** έχουμε την εξής γραφική:

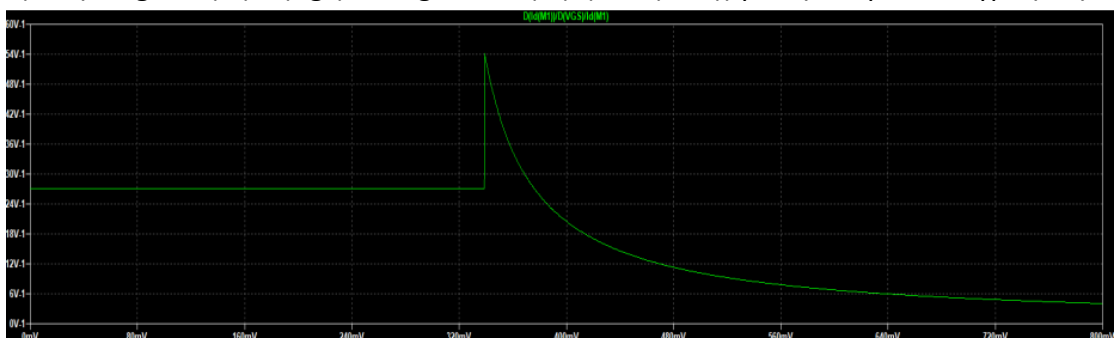


Με μετατροπή της επικεφαλίδας από  $I_d(M1)$  σε  $\text{LOG}(I_d(M1))$  για να έχουμε το  $\log(I_d(V_{GS}))$  παίρνουμε την εξής γραφική:

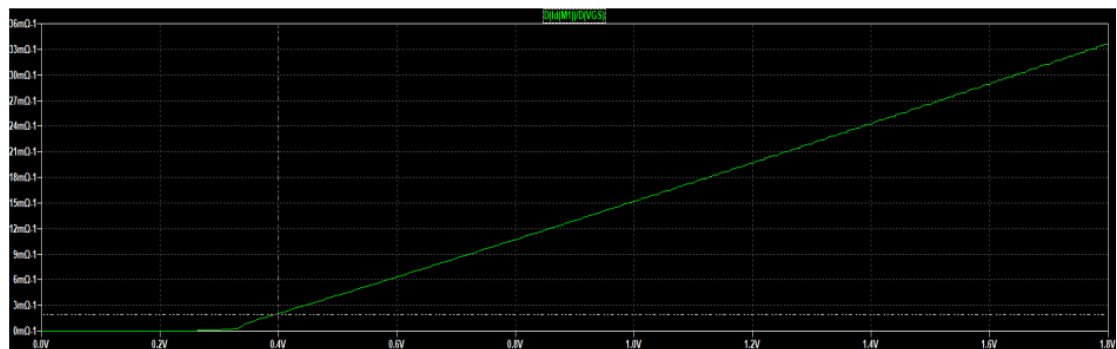


Είναι ευδιάκριτο ότι για  $V < V_t$  έχουμε γραμμική εξάρτηση του  $\log(I_d)$  και  $V_{GS}$

4) Αφού  $g_m = d(I_d)/d(V_{GS})$  τότε  $g_m/I_d = d(I_d)/(I_d * d(V_{GS}))$  με την παρακάτω γραφική:

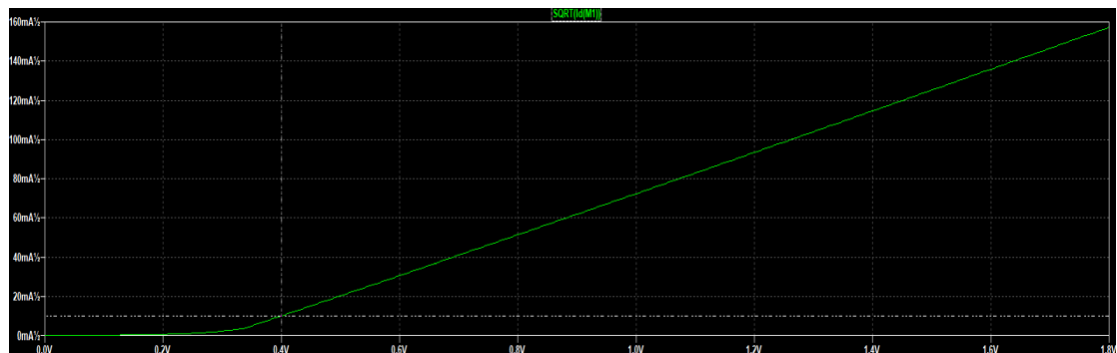


5) Με τις απαιτούμενες αλλαγές και με  $gm=d(I_d)/d(V_{GS})$  παίρνουμε:



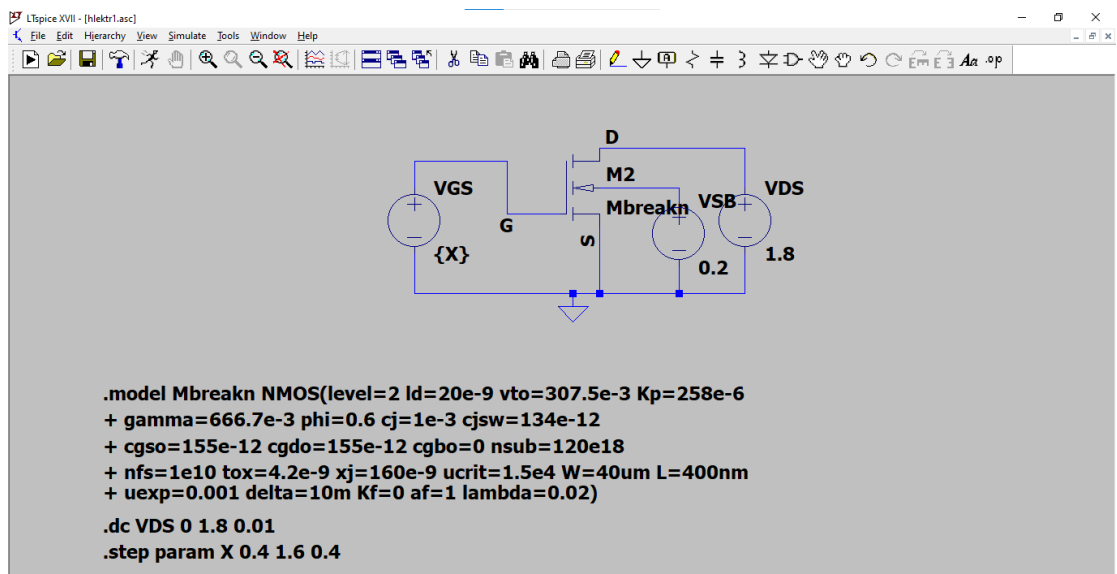
Φαίνεται ότι για  $V_{GS} > V_t$  υπάρχει γραμμικότητα ανάμεσα σε  $gm$  και  $V_{GS}$ .

6) Με αλλαγή της επικεφαλίδας σε  $SQRT(I_d(V_{GS}))$  έχω την ακόλουθη γραφική:



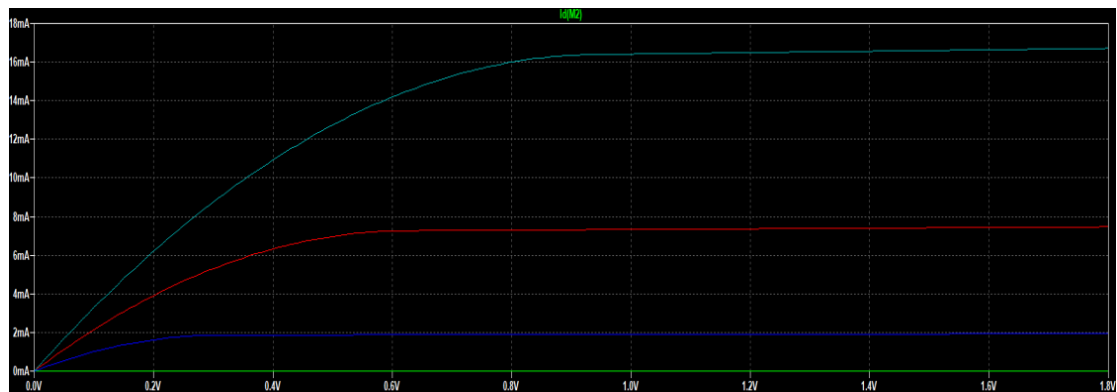
Ξανά για  $V_{GS} > V_t$  υπάρχει γραμμικότητα ανάμεσα σε  $(I_d)^{1/2}$  και  $V_{GS}$ .

7) Με προσθήκη NMOS με ακροδέκτη B και τάση  $V_{SB}$  για την διαφορά δυναμικού έχω το παρακάτω κύκλωμα:

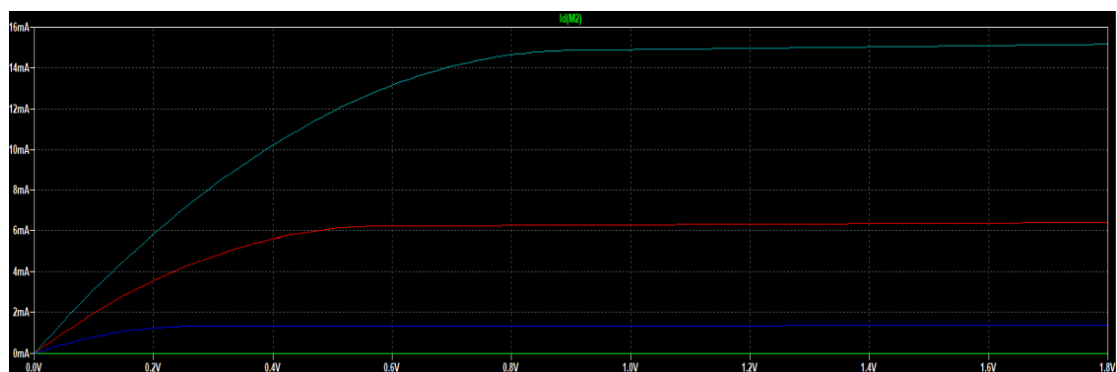


Το οποίο μας δίνει την εξής γραφική :

Για  $V_{SB}=0.2V$ :



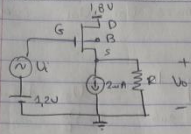
Για  $V_{SB}=0.4V$ :



Παρατηρώ ότι σε σύγκριση με το ερώτημα 1 και τα αποτελέσματα του οι γραφικές  $I_D(V_{DS})$  φτάνουν σε μικρότερο ρεύμα κορεσμού και με αύξηση της  $V_{DS}$  επιτυγχάνεται και αύξηση στο ρεύμα κορεσμού. Αυτό γίνεται λόγω ότι αυξάνεται η  $V_t$  και η  $I_D$  μικραίνει για ίδιες τιμές της  $V_{DS}$ . Με αύξηση της  $V_{GS}$  έχουμε αύξηση της  $I_D$  ενώ με αύξηση του φαινομένου σώματος γίνεται το αντίθετο.

## 2. ΑΚΟΛΟΥΘΟΣ ΠΗΓΗΣ:

Agenda 2 Analisis BJT NPN



DC analysis:

$$\frac{W}{L} = 100 \Rightarrow W = 100L = 49 \mu\text{m}$$

$$k_n' = 258 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}} \cdot V_t' = 0.3075 \text{ V}$$

$$I_D = 2 \mu\text{A} + \frac{V_o}{R} \quad \text{or} \quad I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t')^2$$

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_G - V_o - V_t')^2 = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_G - V_o - V_t')^2$$

a)  $R \rightarrow \infty \Rightarrow V_{SB} = 0 \Rightarrow I_D = 2 \mu\text{A}$

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_G - V_o - V_t')^2$$

$V_o = 500 \text{ mV}$  or  $V_o = 1.28 \text{ V}$  or  $\infty$

b)  $V_{SB} = V_o \quad R \rightarrow \infty \Rightarrow R(I_D - 2 \cdot 10^{-3}) = 0 \Rightarrow I_D = 2 \mu\text{A}$

Apa  $\gamma = 66.6, 7 \cdot 10^{-3} \quad \phi = 0.6 \quad I_D = 2 \cdot 10^{-3}$

Terse  $V_o = 383 \text{ mV}$

c)  $R = 10 \text{ k}\Omega \quad I_D = 2 \cdot 10^{-3} + \frac{V_o}{R}$

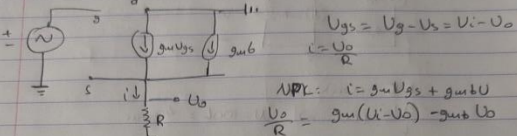
Apa  $V_o = 386 \text{ mV}$

d)  $R = 1 \text{ k}\Omega \quad \text{Apa} \quad I_D = 2 \cdot 10^{-3} + \frac{V_o}{R}$

Apa  $V_o = 361 \text{ mV}$

Untuk transistor Early BJT dan dua transistor  
DC analisis onate  $V_{oi}' = V_{oi}$  ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )

AC analysis:



$$V_{GS} = V_G - V_S = V_i - V_o$$

$$r = \frac{V_o}{R}$$

$$\text{NPL: } i = g_m V_{GS} + g_{mb} U$$

$$\frac{V_o}{R} = g_m (U_i - V_o) - g_{mb} V_o$$

$$V_o \left( \frac{1}{R} + g_m + g_{mb} \right) = g_m U_i \Rightarrow \frac{V_o}{U_i} = \frac{g_m}{\frac{1}{R} + g_m + g_{mb}}$$

a)  $R \rightarrow \infty \quad V_{SB} = 0 \quad g_{mb} \neq 0$

$$\frac{V_o}{U_i} = 1$$

b)  $R \rightarrow \infty \quad V_{SB} = V_o = 500 \text{ mV}$

$$g_m = \frac{2 I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{2 I_D}{0.7 - 0.3075} = 10.19 \text{ mA/V}$$

$$g_{mb} = \frac{\gamma g_m}{2 V_{SB} + \phi} = \frac{7 \cdot 10^{-3} \cdot 10.19}{2 \cdot 0.5 + 0.6} = 2.29 \text{ mA/V}$$

$$\frac{V_o}{U_i} = \frac{g_m}{g_m + g_{mb}} = 0.82$$

c)  $R = 10 \text{ k}\Omega \quad V_o = 0.386 \text{ V} \quad I_D = 2 \mu\text{A} \quad V_{SB} = V_o$

$$g_m = \frac{2 I_D}{V_{GS} - V_t} \quad V_t = V_t' + \gamma \left( \sqrt{2 + V_{SB}} - \sqrt{2\phi} \right)$$

$$V_t = 0.417 \text{ V} \quad \text{Apa} \quad g_m = 10.07 \text{ mA/V}$$

$$g_{mb} = \frac{\gamma g_m}{2 V_{SB} + \phi} = 2.67 \text{ mA/V}$$

Apa  $\frac{V_o}{U_i} = 0.79$

$$\begin{aligned}
 \delta) \quad R &= 1\text{k}\Omega \quad V_{SB} = V_D = 361\text{mV} \quad I_D = 2,96\text{mA} \\
 g_m &= \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} \\
 V_t &= 0,41\text{V} \quad \text{Αρα } g_m = 1\text{mA/V} \\
 g_{mb} &= \frac{g_m}{2} = 0,5\text{mA/V} \\
 \frac{V_o}{V_i} &= \frac{g_m}{\frac{1}{R} + g_m + g_{mb}} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 0,99
 \end{aligned}$$

Με χρήση του spice :

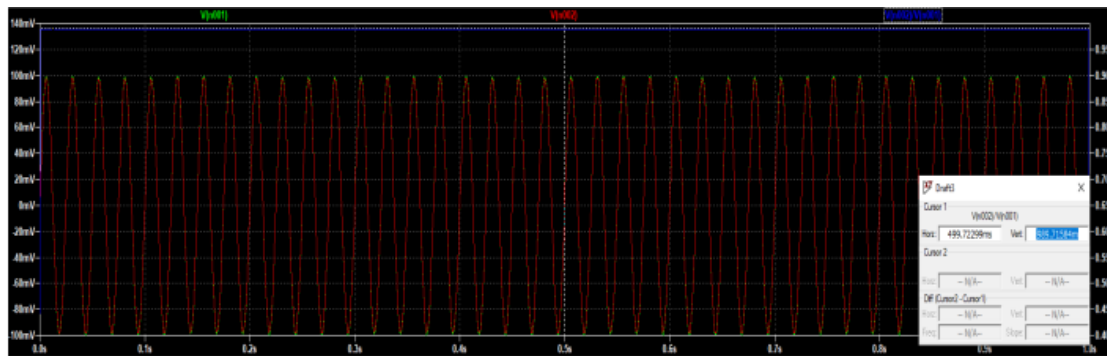
α) Χωρίς επίδραση σώματος και με  $R \rightarrow \infty$

Για  $\lambda=0$ :

Για την άπειρη αντίσταση βάζω μια αντίσταση  $1\text{G}\Omega$ , έπειτα μηδενίζω την  $V_{in}$  και μετράω την DC έξοδο  $V_o$  περίπου  $531\text{mV}$ .

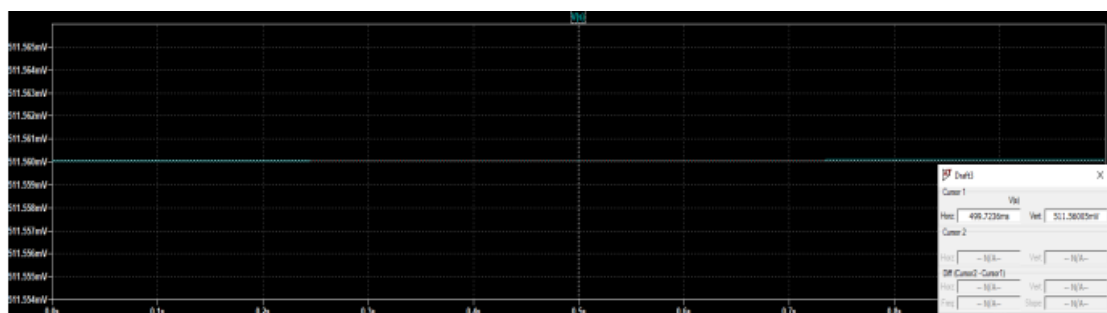


Για το κέρδος κάνω αλλαγή επικεφαλίδας σε  $V(n002)/V(n001)$  που είναι οι έξοδοι μετά τους πυκνωτές και παίρνω ότι  $u_o/u_i = 0.99\text{V/V}$ .

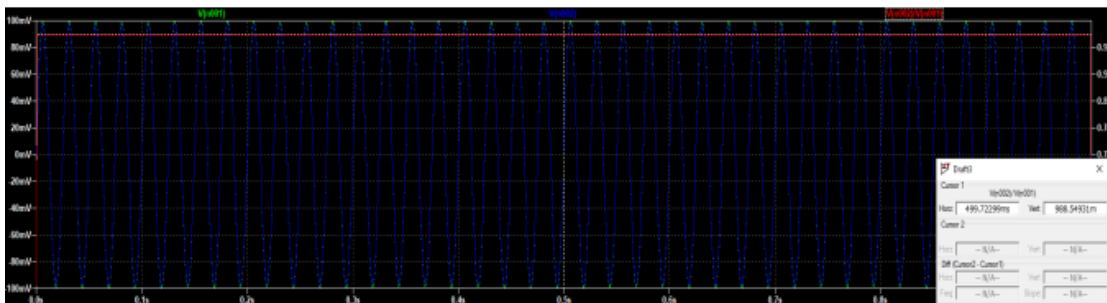


Για  $\lambda=0.02$ :

$V_o=511.6\text{mV}$



Και  $u_o/u_i=0.989\text{V/V}$

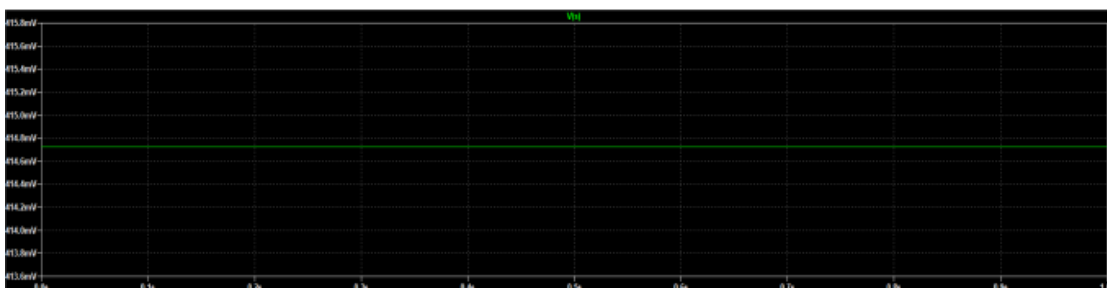


b) Με επίδραση σώματος και  $R \rightarrow \infty$

Για  $\lambda=0$ :

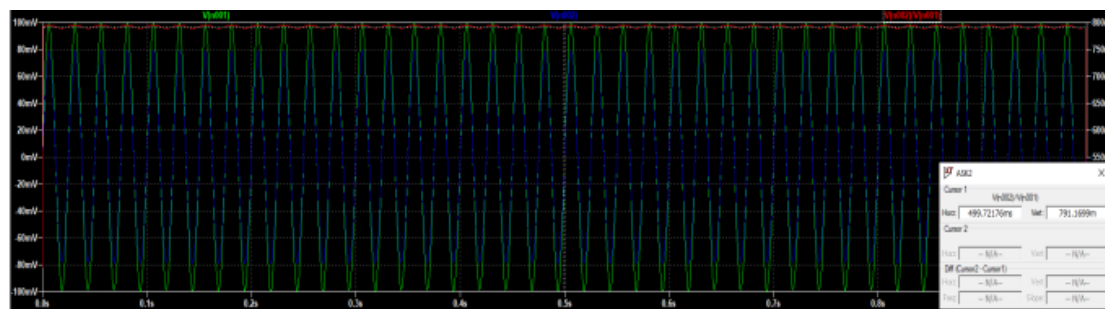
Απλά βραχυκυκλώνω το σώμα με την γείωση ώστε  $V_{SB} \neq 0\text{V}$  και έχω ότι

$V_o=414.7\text{mV}$





Ενώ  $u_o/u_i=0.91V/V$



Για  $\lambda=0.02$ :

$V_o=400mV$



Και  $u_o/u_i=0.79V/V$

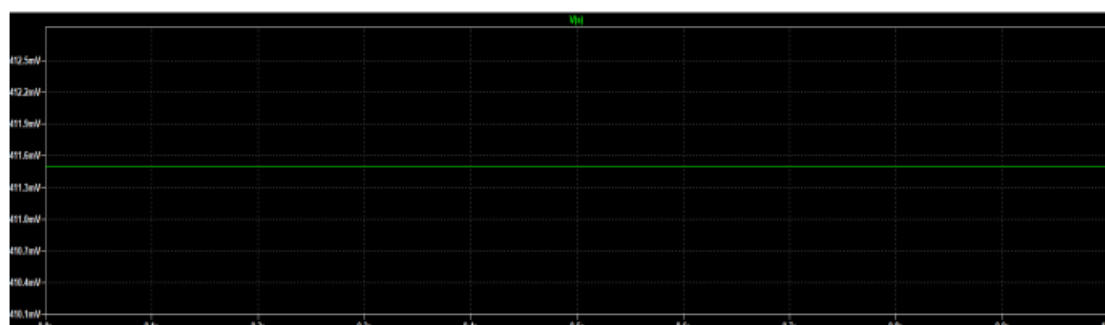


c) Με επίδραση σώματος και  $R=10k\Omega$ :

Αλλάζω την  $R$  σε  $10K\Omega$

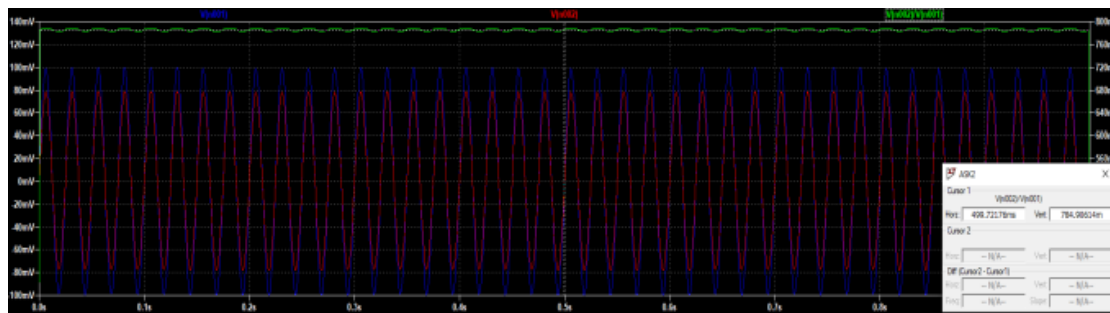
Για  $\lambda=0$ :

$V_o=411.5mV$





Και  $u_o/u_i=0.785V/V$

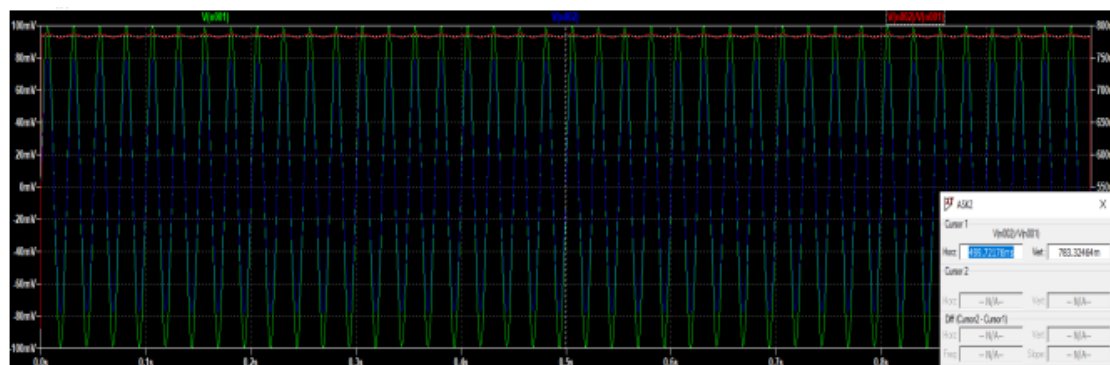


Για  $\lambda=0.02$ :

$V_o=396mV$



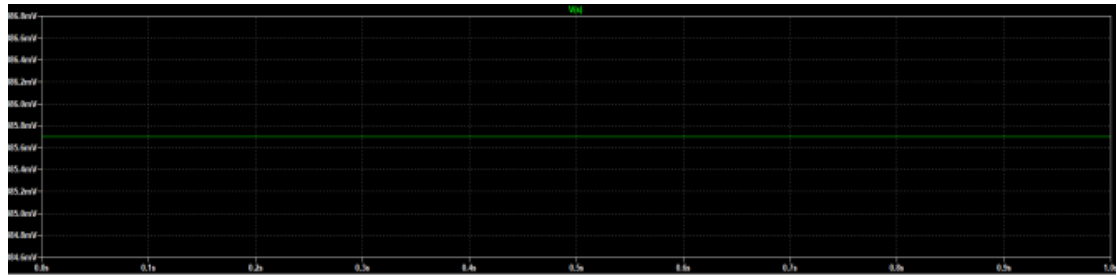
Και  $u_o/u_i=0.783V/V$



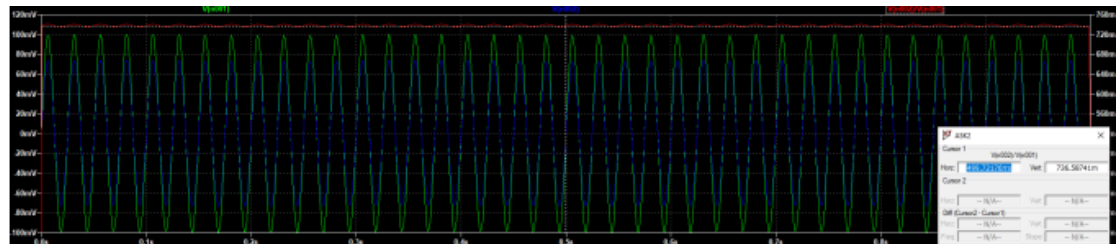
d) Με επίδραση σώματος και  $R=1K\Omega$

Για  $\lambda=0$ :

$V_o=385mV$

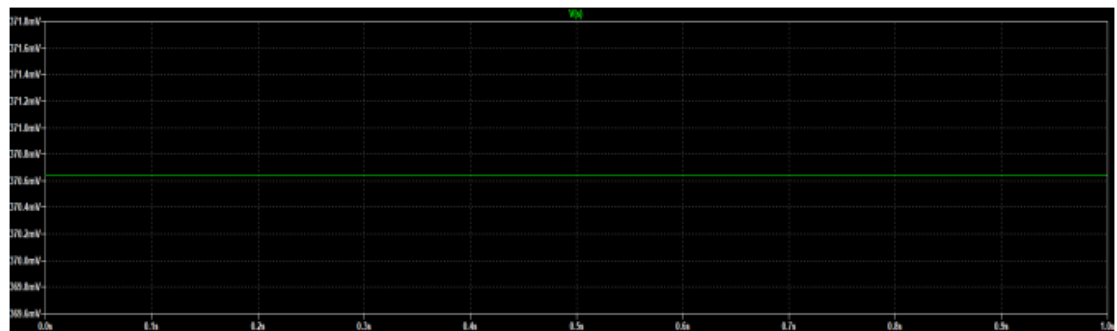


Και  $u_o/u_i=0.736V/V$

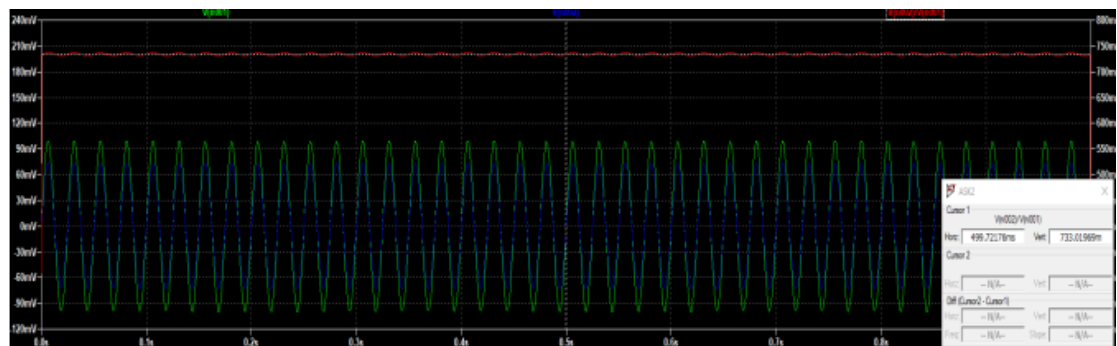


Για  $\lambda=0.02$ :

$V_o=370mV$



Και  $u_o/u_i=0.733V/V$



### 3. ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑΣ CMOS:

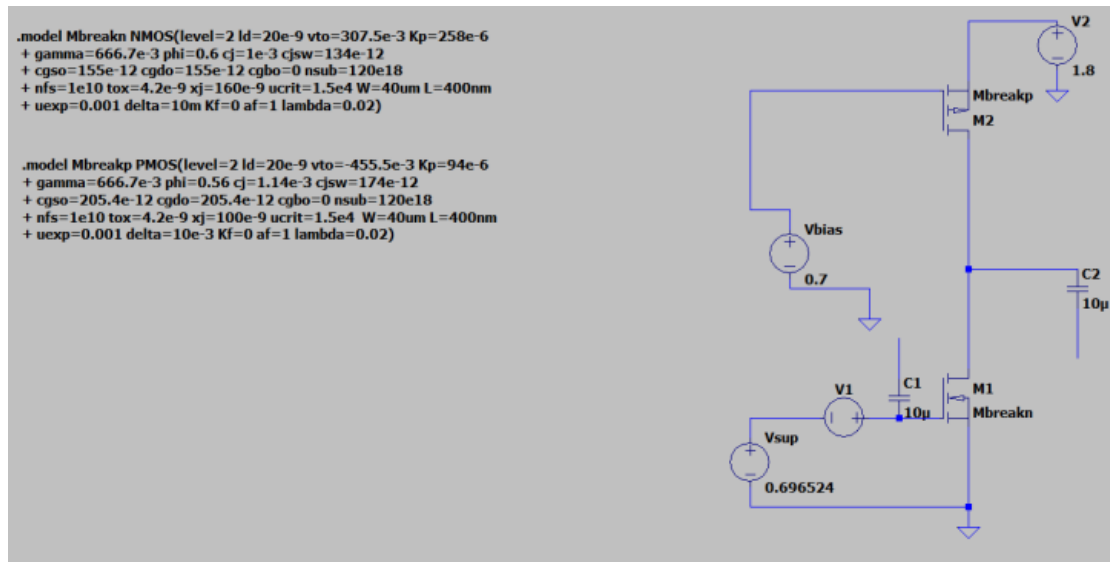
Άσκηση 3

$I = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} p \left( \frac{W}{L} \right)_p \left[ V_{DD} - (V_{tp} - V_{bias}) \right]^2$   
 Επιλέγω  $V_{bias} = 1V$   $\left( \frac{W}{L} \right)_p = 100 \Rightarrow W_p = 40\mu m$  και  $L_p = 400nm$   
 $V_{tp} = -0.4555V$   $\mu_p C_{ox} p = 94 \mu A/V$   
 Άρα  $I = \frac{1}{2} 94 \cdot 10^{-6} [1.8 - 0.4555]^2 = 1.9522 mA$   
 Θεωρώ ότι  $I_0 \approx I$   
 $V_{A1} = \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{0.02} = 50V$   $\Rightarrow r_{O1} = \frac{V_{A1}}{I} = 30733 \Omega$   
 Άρα  $r_{O1} \approx 30k\Omega$   
 Για Q2:  
 $I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} n \left( \frac{W}{L} \right)_n (V_G - V_{tn})^2$   
 Με  $100500 \mu A$  και  $1k\Omega$ :

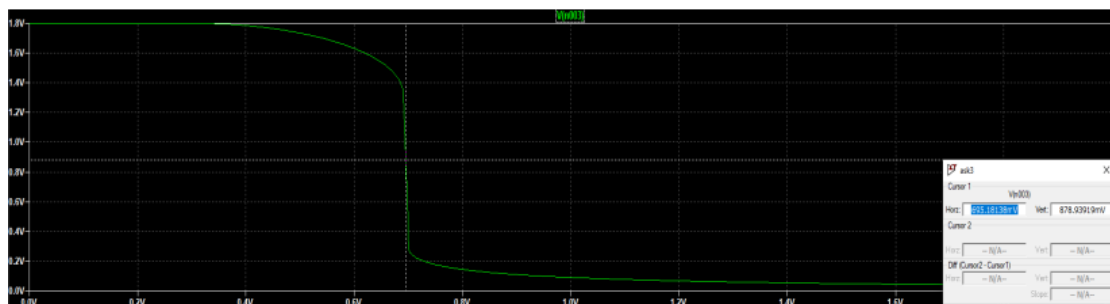
$V_{A2} = \frac{V_{A1}}{I}$   $V_{A2} = \frac{1}{\lambda_n} = 50V$   
 Άρα  $r_{O2} = r_{O1} \approx 30k\Omega$   
 $i_1 = \frac{V_0 - 0}{r_{O1}}$   $i_2 = \frac{V_0 - 0}{r_{O2}}$   
 ΝΡΚ G & D:  
 $g_{m2} V_{GS} + (i_2 + i_1) = 0 \Rightarrow$   
 $g_{m2} V_{GS} = -V_0 \left( \frac{1}{r_{O1}} + \frac{1}{r_{O2}} \right) \Rightarrow g_{m2} V_{GS} = -V_0 \frac{r_{O1} + r_{O2}}{r_{O1} r_{O2}}$   
 $\frac{V_0}{V_{GS}} = -g_{m2} \frac{r_{O1} r_{O2}}{r_{O1} + r_{O2}}$   
 Θεωρώ το κέρδος  $\geq 1 \Rightarrow \left| \frac{V_0}{V_{GS}} \right| \geq 1 \Rightarrow g_{m2} \geq \frac{r_{O1} + r_{O2}}{r_{O1} r_{O2}}$   
 $g_{m2} \geq \frac{2}{r_{O1}} = \frac{2}{30k\Omega} \Rightarrow g_{m2} \geq 0.0667 \mu S^{-1}$   
 Άρα  $\sqrt{2 \mu_n C_{ox} n \left( \frac{W}{L} \right)_n I} \geq 0.0667$   
 Με  $\mu_n C_{ox} n = 258 \mu A/V$  και  $I = 1.9522 mA$   
 Έκω στί  
 $\left( \frac{W}{L} \right)_n \geq 0.004416$   $\text{Επιλέγω } \left( \frac{W}{L} \right)_n = 100$   
 Άρα  $W_n = 40\mu m$  και  $L_n = 400nm$   
 Άρα  $I = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} n \left( \frac{W}{L} \right)_n (V_G - V_{tn})^2 \Rightarrow$   
 $V_G = 0.6965V$  ή  $V_G = -0.08152V$  ανεπ.  
 Άρα  $V_G = 0.6965V$   
 και το κέρδος:

$\frac{V_0}{V_{GS}} = -g_{m2} \frac{r_{O1}}{2} = 300$

Έχω το παρακάτω κύκλωμα στο spice, με τους πυκνωτές να έχουν προστεθεί για την μέτρηση του AC σήματος. Για την DC τάση χρησιμοποιήθηκε η εντολή .dc Vsup 0 2 0.001



Η τάση εξόδου είναι η ακόλουθη:

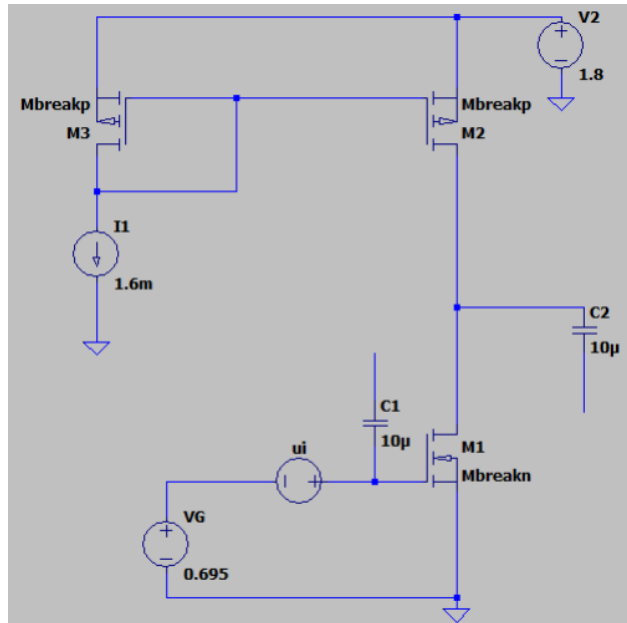


Παρατηρώ ότι η τάση ισορροπίας είναι  $V_o=879\text{mV}$  και  $V_{bias}=700\text{mV}$ , που έχουν ελάχιστη απόσταση από το θεωρητικό υπολογισμό.

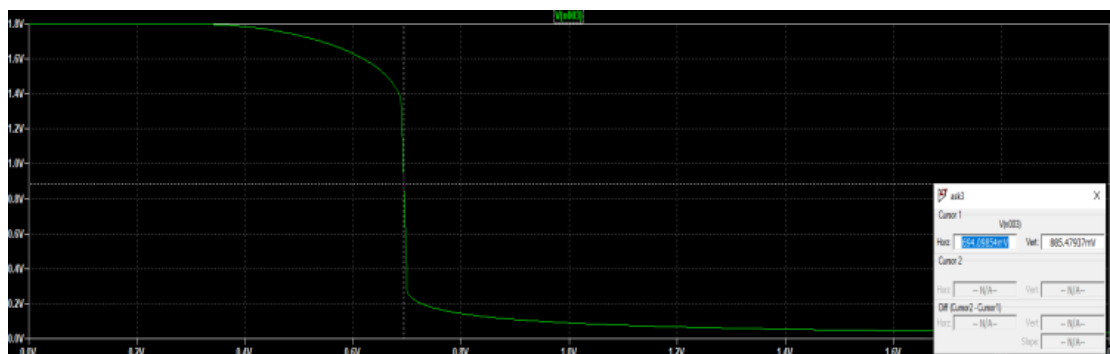
Με την προσθήκη δοκιμαστικού σήματος  $1\text{mV}$   $40\text{Hz}$  παίρνω την ακόλουθη γραφική κέρδους  $u_o/u_i$ .



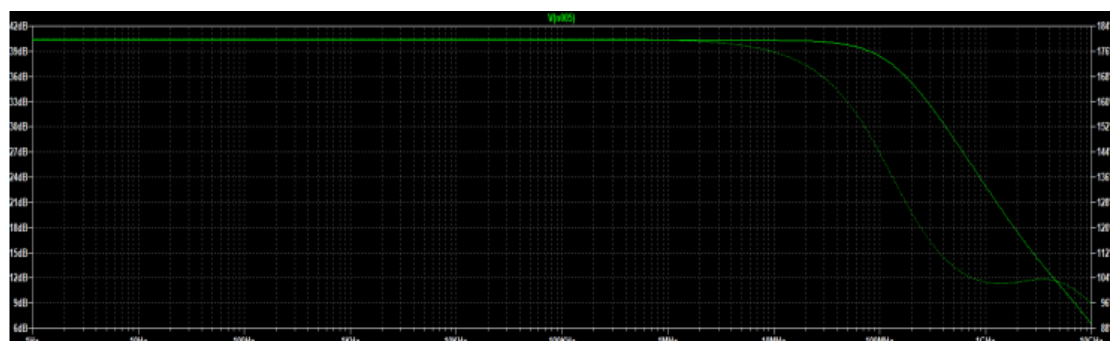
Λόγω της τάσης εξόδου είναι δύσκολη η διατήρηση της τάσεως ισορροπίας, έτσι χρησιμοποιώ έναν καθρέπτη ρεύματος, με  $I_{ref}=1.6\text{mA}$  (αφού  $I_d=1.6\text{mA}$ ) και  $V_g=695\text{mV}$ . Έχω το ακόλουθο κύκλωμα:



Για την DC τάση εξόδου κάνω DC sweep στην Vg (.dc VG 0 2 0.001). Ισχύει ότι η τάση ισορροπίας είναι 694mV και  $gm1 = -8.28m\Omega^{-1}$  και  $A = -256V/V$  όπου έχουν υπολογισθεί γραπτώς.



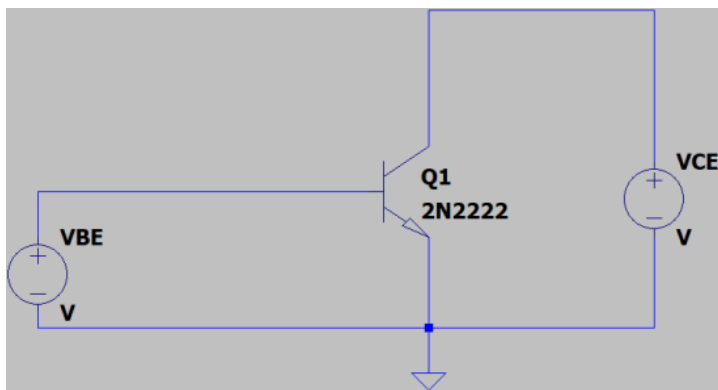
Για το διάγραμμα Bode χρησιμοποιήθηκε η .ac dec 100 1 10G με την ακόλουθη γραφική:



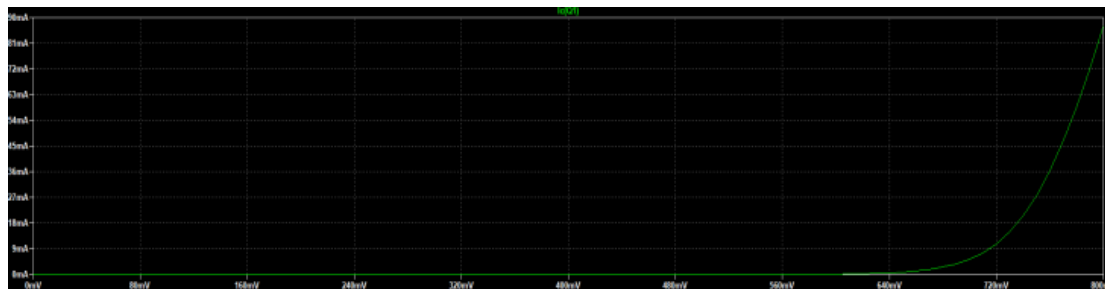
## II. BJT ΣΤΟ LTSPICE

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BJT - ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ

1.

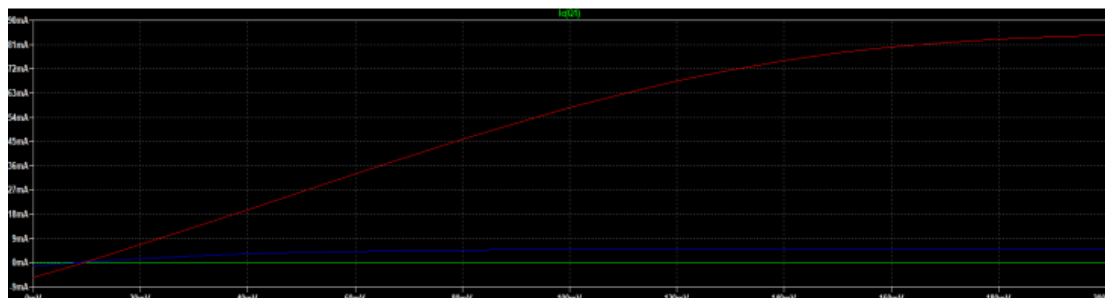


a) Για  $V_{ce}=2V$  και με .dc VBE 0 0.8 0.01 έχω :

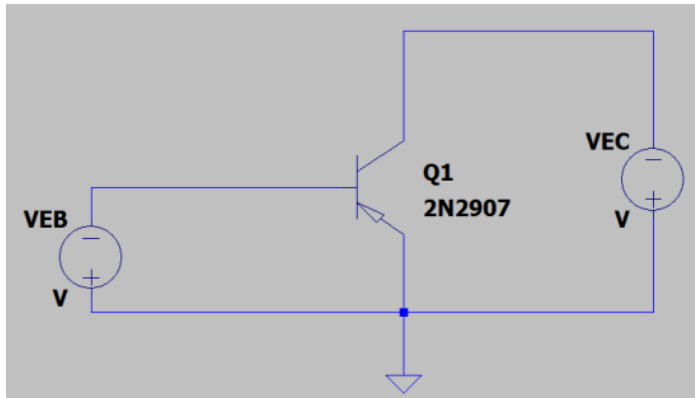


Φαίνεται για τάση  $V_{be} < 640mV$  το ρεύμα είναι 0 ενώ αυξάνεται εκθετικά για  $V_{be} > 0.64V$  (εκθετικός νόμος).

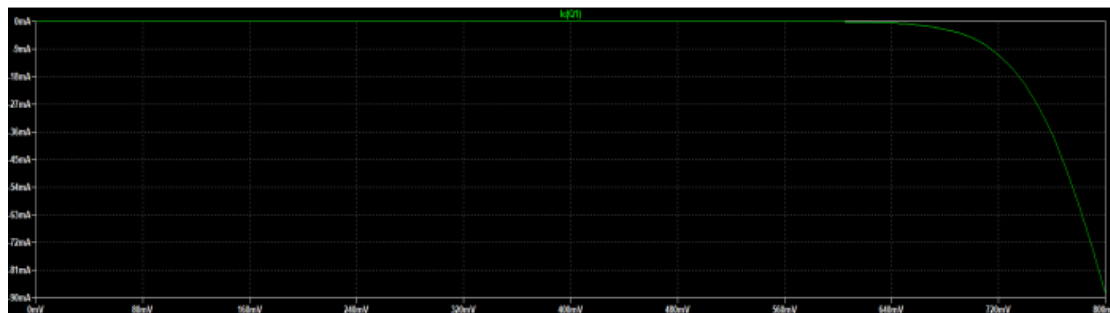
b) Με τις .dc VCE 0 2 0.01 και .step param X 0.6 0.8 0.1 ( $X=V_{be}$ ) παίρνω τις ακόλουθες γραφικές όπου βλέπω ότι και στις 3 γραφικές με το πέρας μιας τιμής της  $V_{ce}$  η  $I_c$  παραμένει σταθερή, περιοχή κορεσμού. Για μεγαλύτερες τιμές της  $V_{be}$  έχω μεγαλύτερο  $I_c$  (με ίδιο  $V_{ce}$ ) καθώς και ότι πριν τον κορεσμό έχω γραμμική σχέση μεταξύ  $I_c-V_{be}$ .



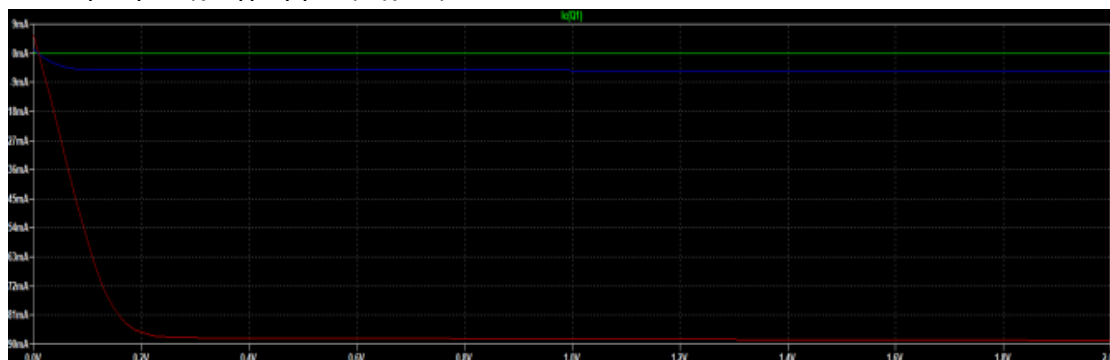
2.



- a) Με .dc VEB 0 0.8 0.01 και αφού  $V_{ce}=2V$ , βλέπω ότι με την το ρεύμα συλλέκτη είναι 0 για  $V_{ec}<640mV$  ενώ για  $V_{ec}>640mV$  και όσο αυξάνεται έχω ότι αυξάνεται και το ρεύμα συλλέκτη με εκθετικό τρόπο και με απόλυτη τιμή.

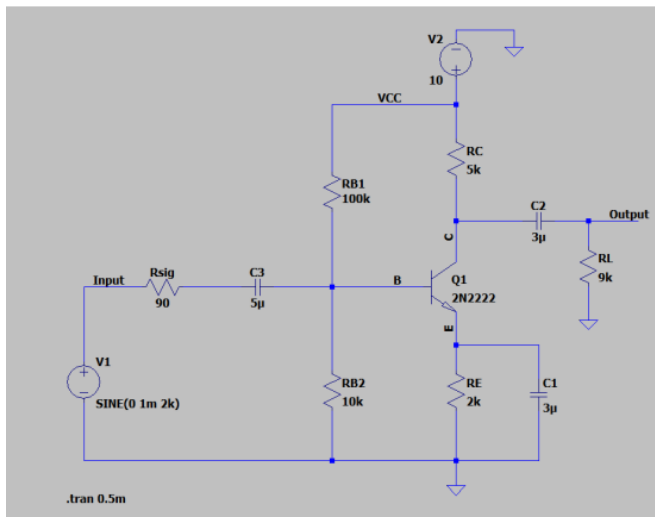


- b) Με .dc VEC 0 2 0.01 και .step param X 0.6 0.8 1 ( $X=V_{eb}$ ) και με run, παρατηρώ ότι και στις 3 γραφικές ισχύει ότι στη περιοχή κορεσμού δηλαδή από μια τιμή της  $V_{ec}$  και μετά το  $I_c$  παραμένει σταθερό καθώς επίσης ότι μεγαλύτερες τιμές της  $V_{eb}$  αυξάνουν κατά απόλυτη τιμή τη  $I_c$  ( $V_{ec}$ =σταθερό) και τέλος ότι πριν το κορεσμό έχω γραμμική σχέση  $I_c-V_{ec}$ .



3. Για την διάταξη του ενισχυτή κοινού εκπομπού οι αντιστάσεις  $R_{B1}, R_{B2}$  έχουν τις εξής τιμές ώστε:  $R_{BB}=100/11k\Omega=(R_{B1}*R_{B2})/(R_{B1}+R_{B2})$ . Επειδή επιλέγω  $R_{B2}=10k\Omega$  προκύπτει ότι  $R_{B1}=100k\Omega$ . Επίσης  $R_L=R_{BB}=9k\Omega$   $R_{sig}=R_L/100=90\Omega$ . Με την χρήση της .op έχω τα DC αποτελέσματα:





--- Operating Point ---		
V(c) :	9.25587	voltage
V(b) :	0.902845	voltage
V(e) :	0.299025	voltage
V(vcc) :	10	voltage
V(output) :	2.49909e-13	voltage
V(n001) :	4.0628e-16	voltage
V(input) :	0	voltage
Ic(Q1) :	0.000148825	device_current
Ib(Q1) :	6.87068e-07	device_current
Ie(Q1) :	-0.000149512	device_current
I(C3) :	4.51422e-18	device_current
I(C2) :	-2.77676e-17	device_current
I(C1) :	8.97074e-19	device_current
I(RL) :	2.77676e-17	device_current
I(Rsig) :	4.51422e-18	device_current
I(Rc) :	0.000148825	device_current
I(Rb1) :	9.09716e-05	device_current
I(Rb2) :	9.02845e-05	device_current
I(Re) :	0.000149512	device_current
I(V2) :	-0.000239797	device_current
I(V1) :	4.51422e-18	device_current

Για το διάγραμμα Bode με την `.ac dec 100 1 10G` έχουμε ac πηγή και το ακόλουθο διάγραμμα με εύρος ζώνης [1kHz 1MHz] και κέρδος 25dB.

