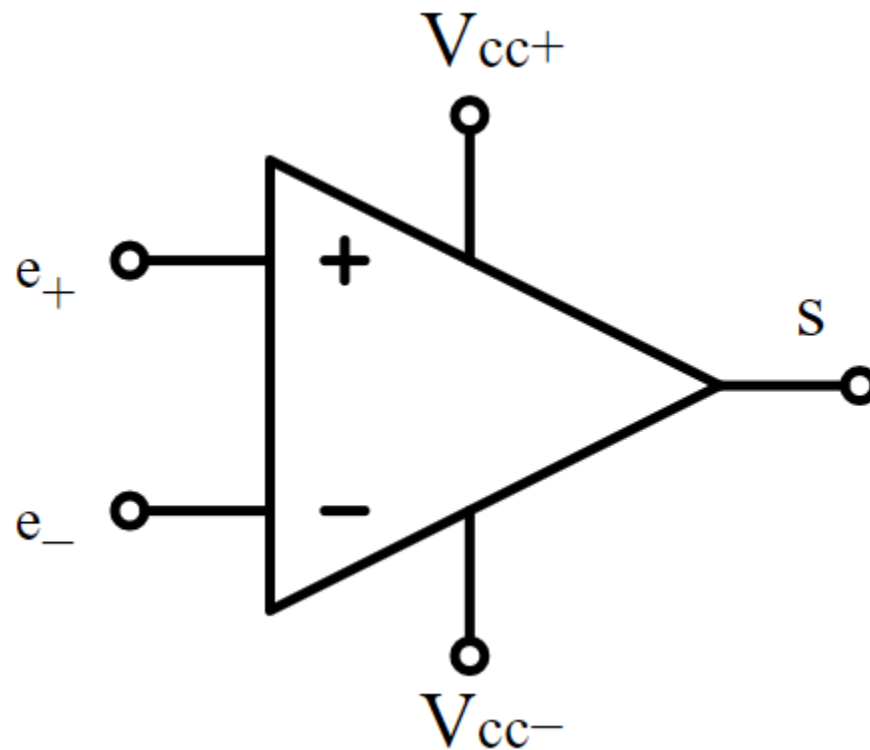


ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ



ΝΑΠΟΛΕΩΝ ΠΑΠΟΥΤΣΑΚΗΣ

ΑΕΜ:9170

E-MAIL: napoleop@ece.auth.gr

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Οι απαιτούμενες προδιαγραφές προέκυψαν με βάση το ΑΕΜ του κάθε φοιτητή. Έτσι με ΑΕΜ: 9170 και $\xi=70$ προέκυψαν οι παρακάτω προδιαγραφές

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	ΤΙΜΗ
CL	2.7 pF
SR	>18.7 V/ μ s
Vdd	2.01 V
Vss	-2.01 V
GB	> 7.7 MHz
A	> 20.7 dB
P	< 50.7 mW

ΒΗΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

1^ο Βήμα: Αρχικά ορίζουμε το μήκος του καναλιού $L=1 \mu\text{m}$.

2^ο Βήμα: Για τον καθορισμό της συχνότητας Miller C_c , λάβαμε υπόψη μας την ανισότητα μεταξύ C_c και CL σύμφωνα με την οποία $C_c > 0.22CL$. Για τα δικά μας δεδομένα η ανισότητα γίνεται $C_c > 0.594\text{pf}$. Έτσι η τιμή C_c τεθηκε ίση με 3pf .

3^ο Βήμα: Το ρεύμα I_5 λαμβάνει τιμή απο τον τύπο $I_5 = SR \cdot C_c = 56.1 \mu\text{A}$

4^ο Βήμα: Ο υπολογισμός του λόγου $(W/L)_3$ γίνεται με χρήση του τύπου $S_3 = (W/L)_3 = I_5 / (K_p \cdot (V_{dd} - V_{in(\text{max})} - |V_{t03}(\text{max}) + V_{t1}(\text{min})|^2))$.

Οι τιμές για $V_{in(\text{max})}$ και $V_{in(\text{min})}$ δίνονται ως 100mV και -100mV αντίστοιχα ,ενω οι τιμές $V_{t03(\text{max})} = V_{TOP} = -0.9056 \text{ V}$ και $V_{t01(\text{min})} = V_{TON} = 0.786$.

Για τα K_p και K_n γνωρίζουμε οτι λαμβάνουν τιμές μεταξύ $50 \cdot 10^{-6}$ και $150 \cdot 10^{-6}$, επομένως επιλέξαμε τις τιμές $K_p = 60 \cdot 10^{-6}$ και $K_n = 150 \cdot 10^{-6}$.

Άρα $S_3 = 0.2917$ αλλα αφού πρέπει $S_3 \geq 1$, τελικά επιλέγεται $S_3 = 1 = S_4$

5^ο Βήμα: Σε αυτό το βήμα ελέγχεται η τιμή του p_3 οπου πρέπει να ισχύει $p_3 > 10\text{GB}$

Ο τύπος υπολογισμού του p_3 είναι $p_3 = \sqrt{2 \cdot K_p \cdot s_3 \cdot I_3} / (2 \cdot 0.667 \cdot W_3 \cdot L \cdot C_{ox})$ όπου

$I_3 = I_5/2$, $W_3 = S_3 * L$ και $C_{ox} = 4,6*10^{-3}$. $p_3 = 9.4546*10^9$ rad/s .Αρα και $p_3 > 10*2\pi*GB = 4.83*10^8$

6^ο Βήμα: Υπολογισμός των $gm_1=gm_2=GB * 2\pi * C_c = 1.4514*10^{-4}$. Είναι $S_1=S_2= gm_1^2/K_n*I_5 = 2.219$

7^ο Βήμα: Υπολογισμός του λόγου $(W/L)_5$. Αρχικά, $\beta_1 = K_n * S_1 = 3.7551*10^{-4}$. Επομένως, $V_{ds5} = V_{INmin} - V_{ss} - \sqrt{I_5/b_1} - V_{toN} = 0.7375$ V. Τελικά , $s_5 = (2*I_5)/(k_n * (V_{ds5})^2) = 1.3753$

8^ο και 9^ο Βήμα: Έχουμε $I_4 = I_5/2=2.8050*10^{-5}$ μA , $gm_4 = \sqrt{2*k_p*s_4*I_4}= 5.8017*10^{-5}$, $gm_6 = 2.2 * gm_2 * (CL/C_c)= 2.8738*10^{-4}$. Αρα προκύπτει $s_6 = s_4*(gm_6/gm_4)= 4.9534$ και $I_6 = (gm_6^2)/(2*k_p*s_6)= 1.3894*10^{-4}$ μA .

10^ο Βήμα: Ο λογος $(W/L)_7$ υπολογίζεται απο τον τύπο $S_7 = (I_6/I_5)*S_5= 3.4062$

11^ο Βήμα: Σε αυτό το βήμα γίνεται ο υπολογισμός του κέρδους $A_v=(2*gm_2*gm_6)/(I_5*(\lambda_n+\lambda_p)*I_6*(\lambda_n+\lambda_p)) = 1.3213*10^3$ με $\lambda_n=0.04$ και $\lambda_p=0.05$. Αρα $20\log A_v= 62.4200$ db> A_{min} που έχουμε ως προδιαγραφή. Για το $P_{diss} = (I_5+I_6)*(V_{dd} + |V_{ss}|)= 7.8407*10^{-4} = 0.784$ mW< P_{max} . Ισχυει ,επίσης $W_5=W_8$.

Ο υπολογισμός των παραπάνων τιμών για κάθε βήμα του αλγορίθμου έγινε μέσω του Matlab και ενός matlab script που δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό και παρατίθεται παρακάτω.

```
%MATLA SCRIPT-SXEDIASI TELESTIKOU ENISXYTI  
%NAPOLEON PAPOUTSAKIS  
%AEM: 9170
```

```
%PRODIAGRAFES
```

```
% CL = 2.7 pF  
% SR > 18.7 V/μs  
% Vdd = 2.01 V  
% vss = -2.01 V  
% GB > 7.7 MHz  
% A > 20.7 dB  
% P < 50.7 mW
```

```
CL = 2.7 * 10^-12  
GBmin = 7.7 * 10^6 % Minimum GB  
Vdd = 2.01  
Vss = -2.01  
minSR = 18.7 * 10^6  
Pmax = 50.7 * 10^-3  
Amin = 20.7
```

```

%1o BHMA
L = 1 * 10^-6

%2o BHMA
Cc = 3 * 10^-12 % pf

%3o BHMA
I5 = minSR * Cc

%4o BHMA
VINmax = 0.1
VINmin = -0.1
VToP = -0.9056
VToN = 0.786
kp = 60 * 10^-6
kn = 150 * 10^-6

s3 = I5/(kp * (Vdd - VINmax -abs(VToP) + VToN)^2)

% s3< 1 ara s3=1
s3 = 1
s4 = s3

%5o BHMA

Cox = 4.6 * 10^-3
ln = 0.04
lp = 0.05
I3 = I5/2
W3 = s3 * L
p3 = sqrt(2*kp*s3*I3)/(2*0.667*W3*L*Cox)
p3 > 10*GBmin * 2 *pi

%6o BHMA
gm1 = GBmin * 2*pi * Cc
gm2 = gm1
s1 = (gm1^2)/(kn*I5)
s2 = s1

%7o BHMA
b1 = kn * s1
Vds5 = VINmin - Vss - sqrt(I5/b1) - VToN
s5 = (2*I5)/(kn * (Vds5)^2)

%8o BHMA
I4 = I5/2
gm4 = sqrt(2*kp*s4*I4)
gm6 = 2.2 * gm2 * (CL/Cc)
s6 = s4 * (gm6/gm4)
I6 = (gm6^2)/(2*kp*s6)

```

%9o BHMA

%10o BHMA

s7 = (I6/I5)*s5

%11o BHMA

Av = (2*gm2*gm6)/(I5*(ln+lp)*I6*(ln+lp))

gain = 20*log10(Av)

gain > Amin

Pdiss = (I5+I6)*(Vdd + abs(Vss))

Pdiss < Pmax

W1 = s1 * L

W2 = s2 * L

W3 = s3 * L

W4 = s4 * L

W5 = s5 * L

W6 = s6 * L

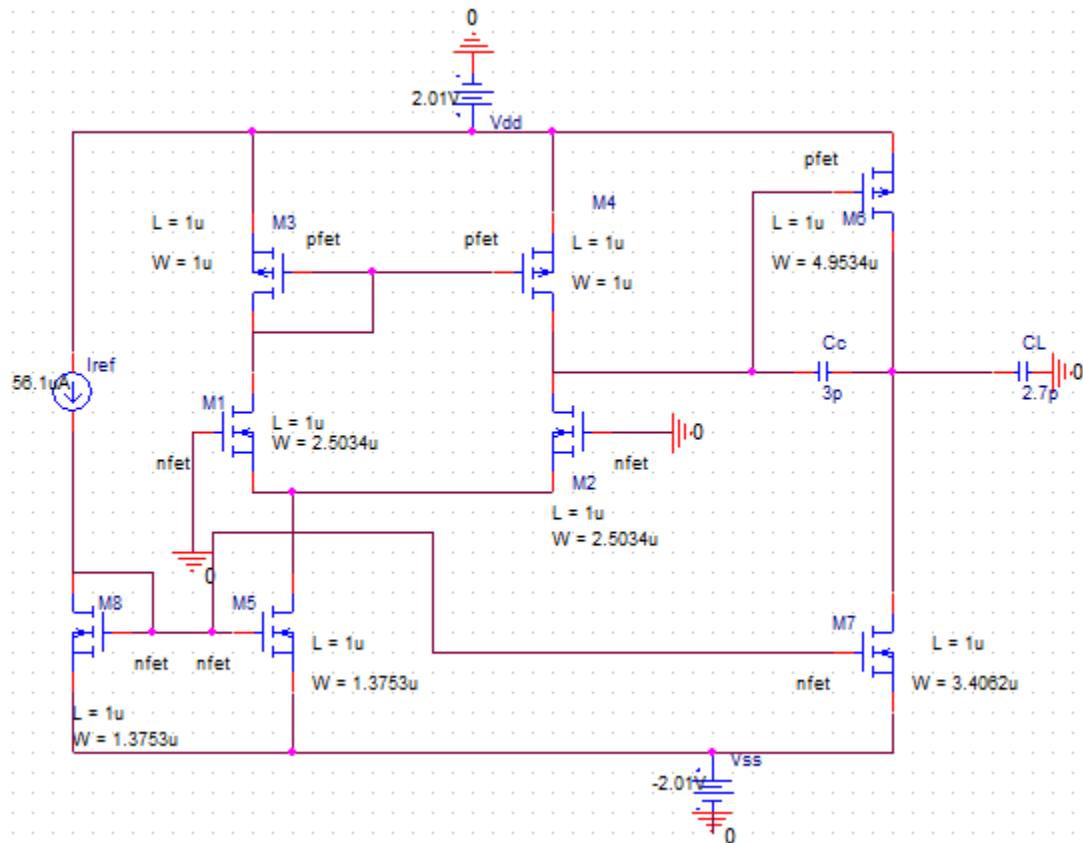
W7 = s7 * L

W8 = W5

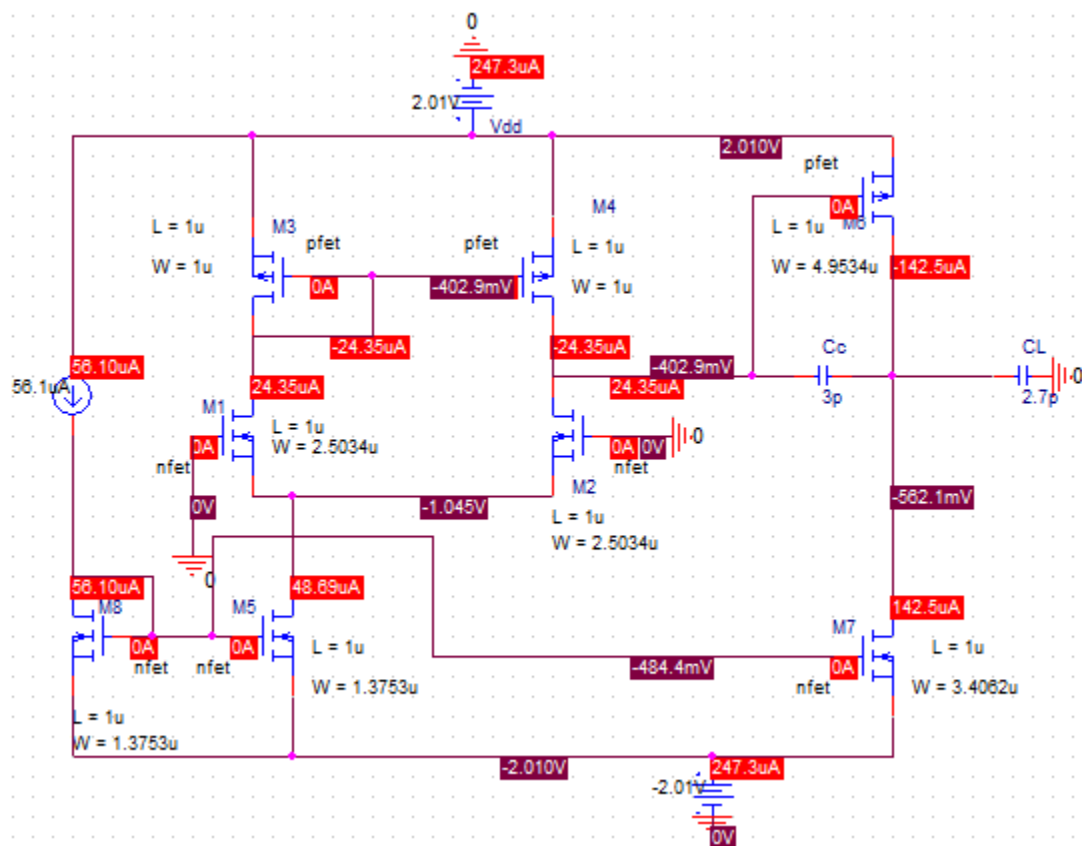
Οι τιμές των W που προέκυψαν παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Transistor	Μήκος καναλιού L(μm)	W(μm)
W1	1	2.5034
W2	1	2.5034
W3	1	1
W4	1	1
W5	1	1.3753
W6	1	4.9534
W7	1	3.4062
W8	1	1.3753

Το αρχικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο Pspice με βάση τα αποτελέσματα του matlab φαίνεται παρακάτω.



Στην επόμενη φωτογραφία φαίνονται ακόμα οι τάσεις και τα ρεύματα του κυκλώματος:



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΑΡΧΙΚΟΥ

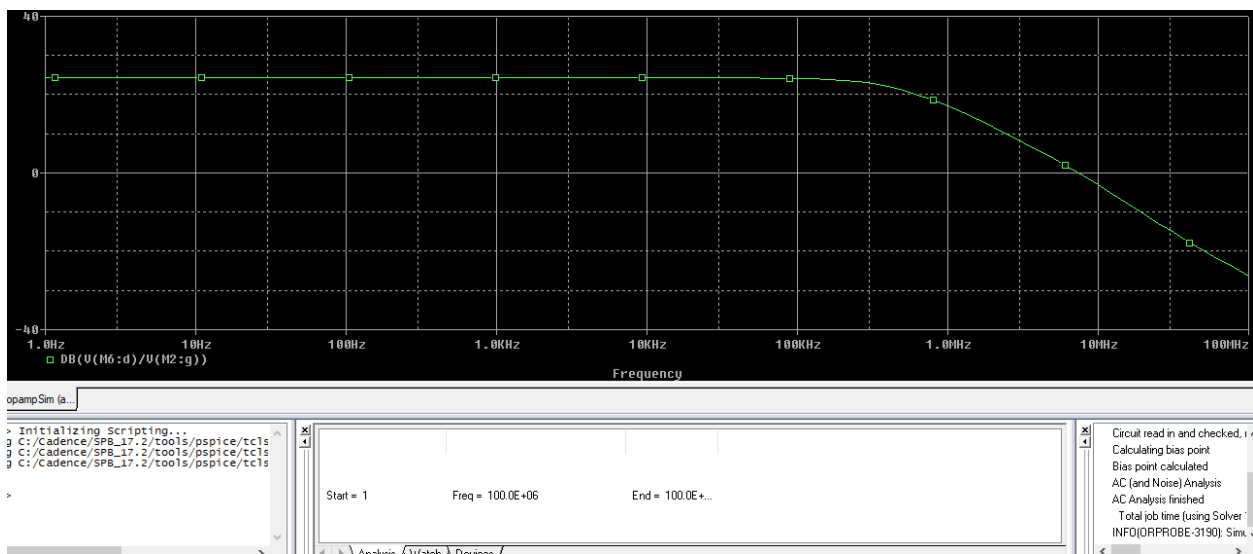
ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για τον υπολογισμό του κέρδους Αν αρχικά τοποθετήθηκε μια AC πηγή στην πύλη του τρανζίστορ M2 και στη συνέχεια έγινε AC sweep με τις παρακάτω ρυθμίσεις:

Start Frequency = 1, End Frequency = 100 meg, Points/Dec=10

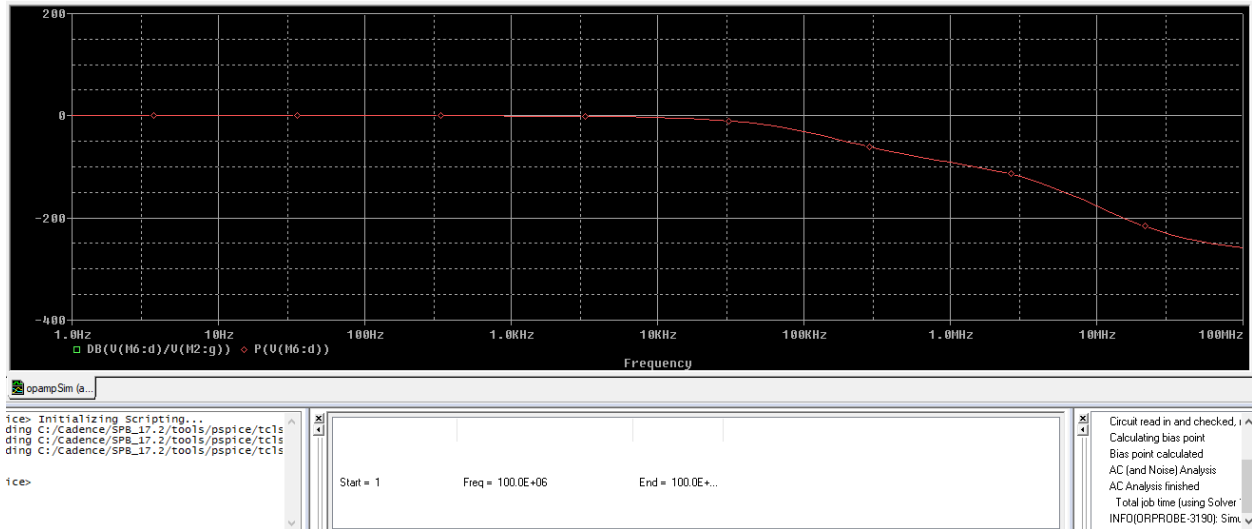
Έπειτα, κάναμε add trace και θέσαμε $DB(V(M6:d)/V(M2:g))$ στο αναδυόμενο παράθυρο.

Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται η γραφική παράσταση του κέρδους που δημιουργήθηκε:



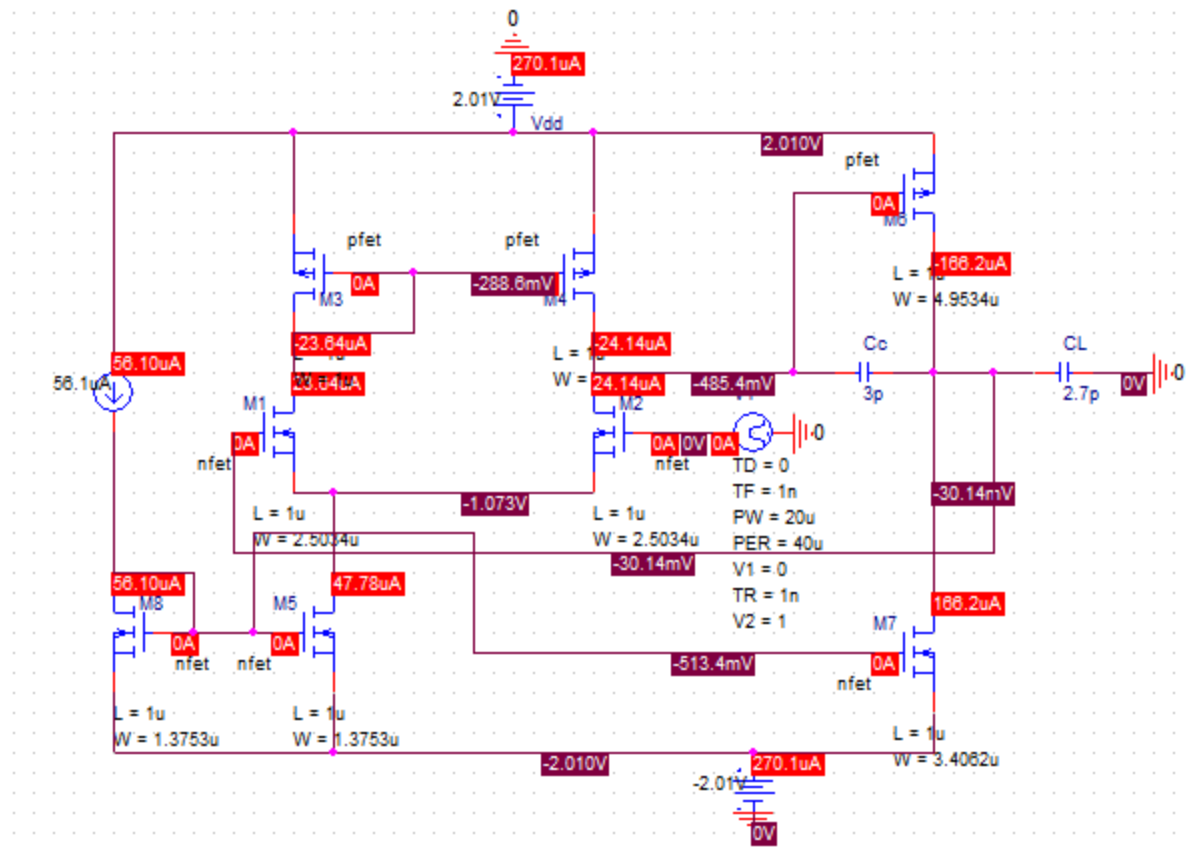
Η τιμή του κέρδους της εικόνας $A_v=24.3 \text{ dB} > A_{min}$ το οποίο έχει τιμή 20.7 dB, που σημαίνει ότι η πρώτη προδιαγραφή ικανοποιείται. Για την εύρεση της τιμής του GB ψάχνουμε το σημείο στο οποίο η γραφική παράσταση τέμνει τον άξονα X (οπου δηλαδή έχουμε κέρδος 0dB) το οποίο είναι $GB=2.9 \text{ MHz} < GB_{min}=7.7 \text{ MHz}$ με την προδιαγραφή αυτή να μην ικανοποιείται.

Ο υπολογισμός του περιθωρίου φάσης έγινε με add trace και την εντολή $P(V(M6:d))$ όπου προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα .

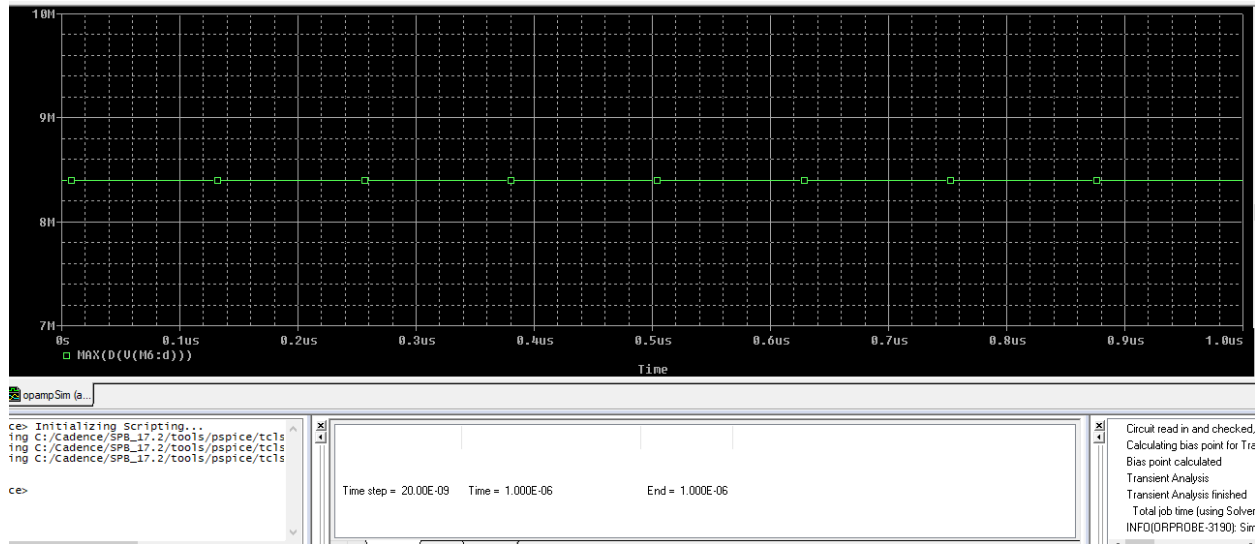


Για τον υπολογισμό του περιθωρίου φάσης βρίσκουμε την τιμή της γραφικής παράστασης για την συχνότητα $GB=2.9\text{MHz}$. Έτσι το περιθώριο φάσης είναι ίσο με $180-118.6=61.4^\circ$, τιμή που δεν είναι μέσα στα επιθυμητά όρια ($45^\circ - 60^\circ$).

Το SR υπολογίστηκε με αλλαγή της πηγής Vac με μια πηγή παλμών Vpulse και κάνοντας Transient Analysis (Time Domain). Ο τελεστικός ενισχυτής τέθηκε σε συνδεσμολογία μοναδιαίου κέρδους (unity-gain) και εφαρόστηκε τετραγωνικός παλμός πλάτους 1V και μικρής χρονικής διάρκειας όπως στο σχήμα που ακολουθεί.



Η προσομοίωση με Add Trace και την εντολή MAX(D(V(M6:d))) δημιούργησε το παρακάτω γράφημα:



Έτσι το $SR=8.4 \text{ V}/\mu\text{S} < SR_{\min} = 18.7 \text{ V}/\mu\text{S}$ γεγονός που σημαίνει ότι ούτε αυτή η προδιαγραφή πληρείται.

Τελευταία προδιαγραφή που μένει να ελεγχθεί είναι αυτή της ισχύος που υπολογίζεται με βάση τον τύπο $P_{\text{diss}} = (I_5 + I_6) \cdot (V_{\text{dd}} + |V_{\text{ss}}|) = (56.1 + 142.5) \cdot (2.01 + 2.01) = 0.798 \text{ mW} < P_{\text{max}}$, τιμή αποδεκτή με βάση τους αρχικούς περιορισμούς.

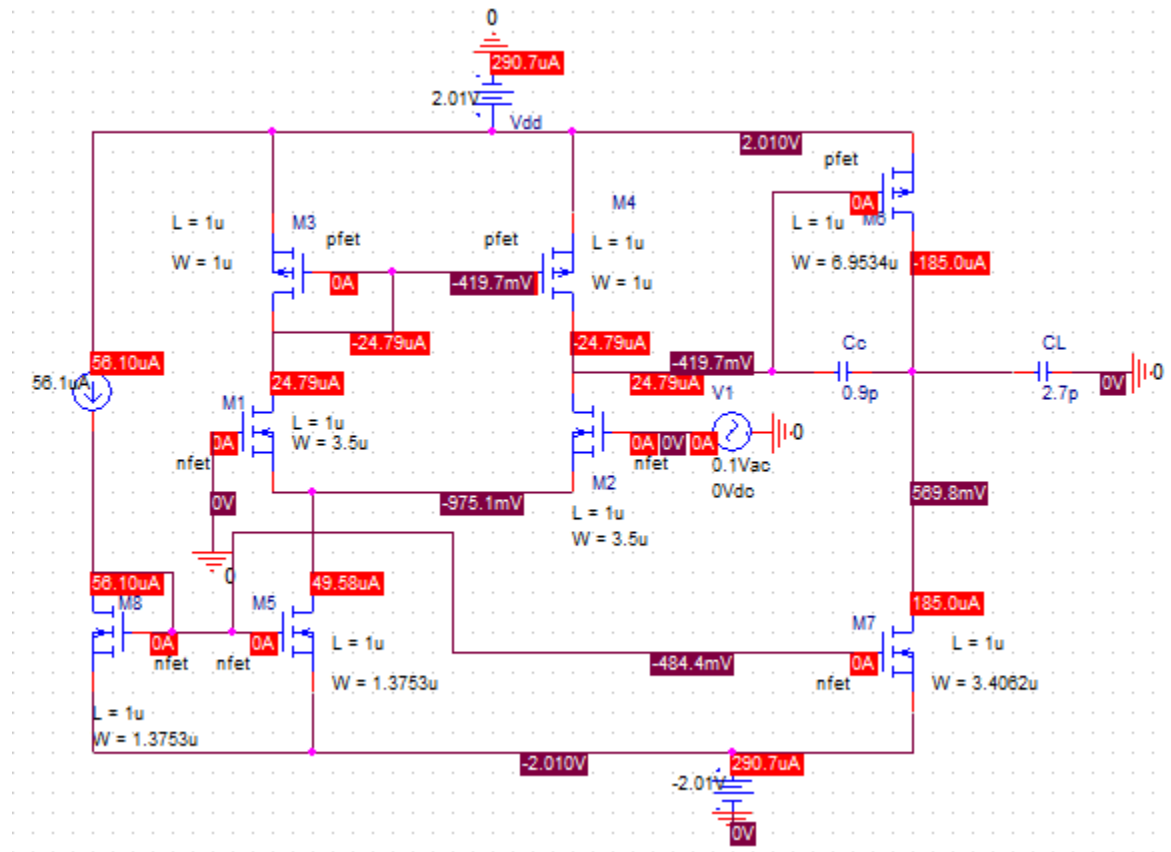
Λόγω του γεγονότος ότι κάποιες από τις προδιαγραφές δεν έχουν ικανοποιηθεί υπήρξε ανάγκη για ανάλογο tuning ώστε ο παραπάνω σκοπός να επιτευχθεί.

TUNING

Όπως είδαμε παραπάνω οι προδιαγραφές που δεν πληρούνται είναι το SR και GB , έτσι με στοχευμένες αλλαγές στα τρανζίστορ $M1$, $M2$ και $M6$ καθώς επίσης και στον πυκνωτή C_c προσπαθήσαμε να βρούμε τον συνδυασμό που θα μας δώσει τις σωστές τιμές στις προδιαγραφές μας. Έτσι αυξήσαμε την παράμετρο W των προαναφερθέντων τρανζίστορ και μειώσαμε την τιμή του C_c (από 3 pf σε 0.9 pf) καταλήγοντας στις τιμές W που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

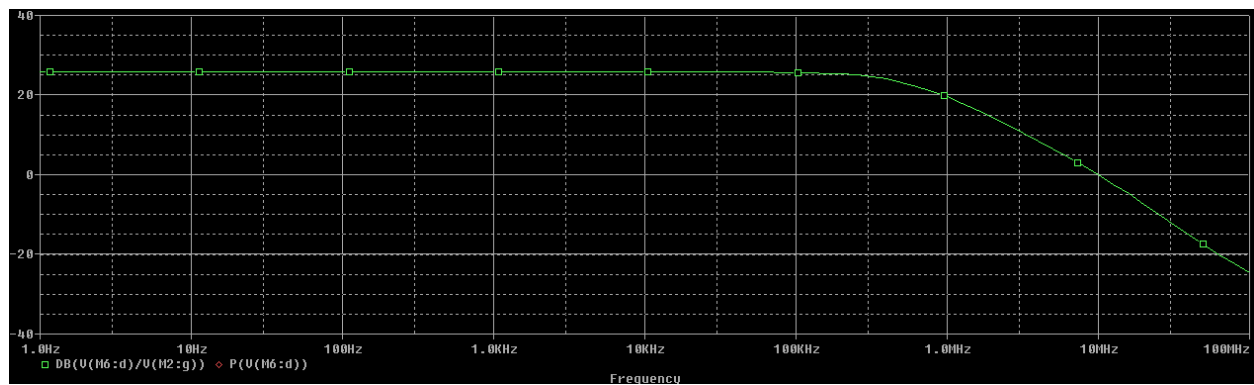
Transistor	Μήκος καναλιού $L(\mu\text{m})$	$W(\mu\text{m})$
W1	1	3.5
W2	1	3.5
W3	1	1
W4	1	1
W5	1	1.3753
W6	1	6.9534
W7	1	3.4062
W8	1	1.3753

Παρατίθεται επίσης το τελικό κύκλωμα μετά και το tuning.

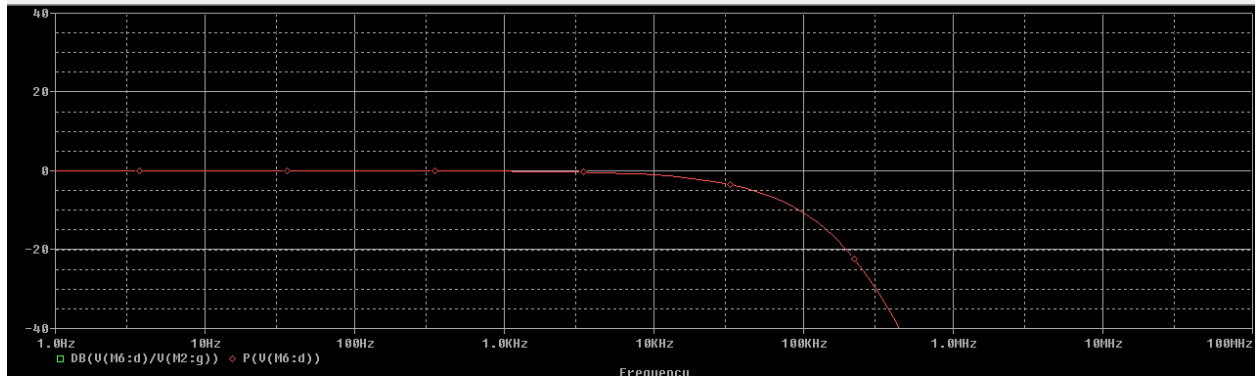


Τα παρακάτω διαγράμματα που προέκυψαν από ανάλογες με πρίν προσομοιώσεις αποδεικνύουν το σωστό tuning.

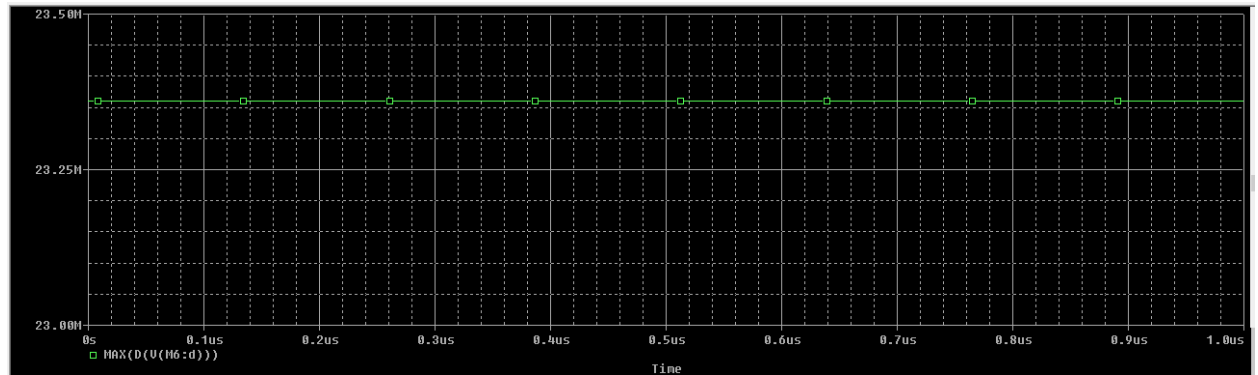
Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται το κέρδος A_v με τιμή $A_v = 25.79\text{ db}$ ενώ το $GB = 9.978\text{MHz}$ με τιμές που είναι σαφώς πάνω από 20.7 db και 7.7MHz αντίστοιχα.



Το περιθώριο φάσης που εικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα προκύπτει ότι είναι $180^\circ - 130^\circ = 50^\circ$ τιμή αποδεκτή καθώς είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια ($45^\circ - 60^\circ$).



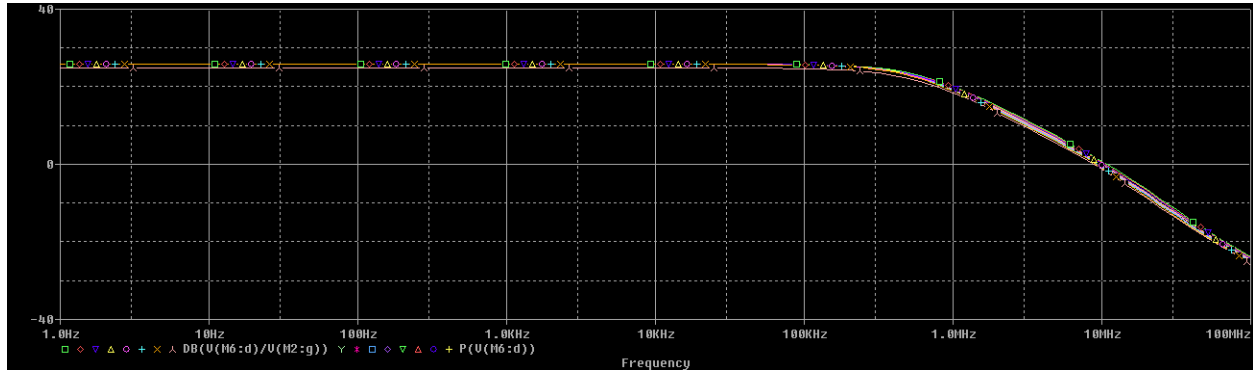
Η προσομοίωση για το SR μας έδωσε διάγραμμα που ακολουθεί, όπου το $SR = 23.36 \text{ V}/\mu\text{s} > SR_{\min} = 18.7 \text{ V}/\mu\text{s}$.



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στη συνέχεια έγινε θερμοκρασιακή ανάλυση με Temperature Sweep για θερμοκρασίες 0 - 70° βαθμούς για να διαπιστωθεί ότι οι προδιαγραφές πληρούνται και σε άλλες θερμοκρασιακές συνθήκες. Παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές τις προσομοιώσεις για κάθε προδιαγραφή.

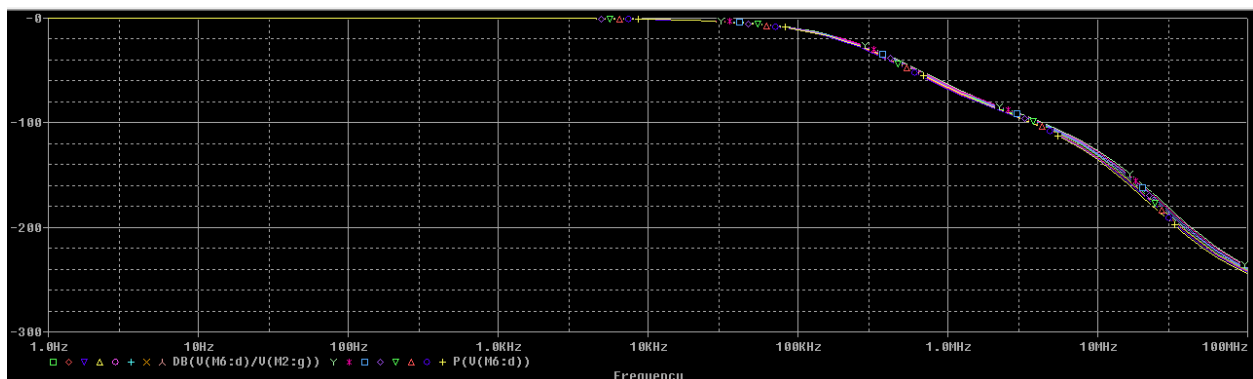
Διάγραμμα Κέρδους



Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν όλες οι τιμές του κέρδους καθώς και του GB όπου φαίνεται ότι και οι δυο προδιαγραφές ικανοποιούνται για όλες τις θερμοκρασίες που μελετήθηκαν.

Θερμοκρασία	Κέρδος(Αν σε db)	GB(MHz)
0	25.842	8.7856
10°	25.821	10.499
20°	25.804	10.186
30°	25.790	9.904
40°	25.781	9.661
50°	25.774	9.4256
60°	25.769	9.1977
70°	24.800	8.7856

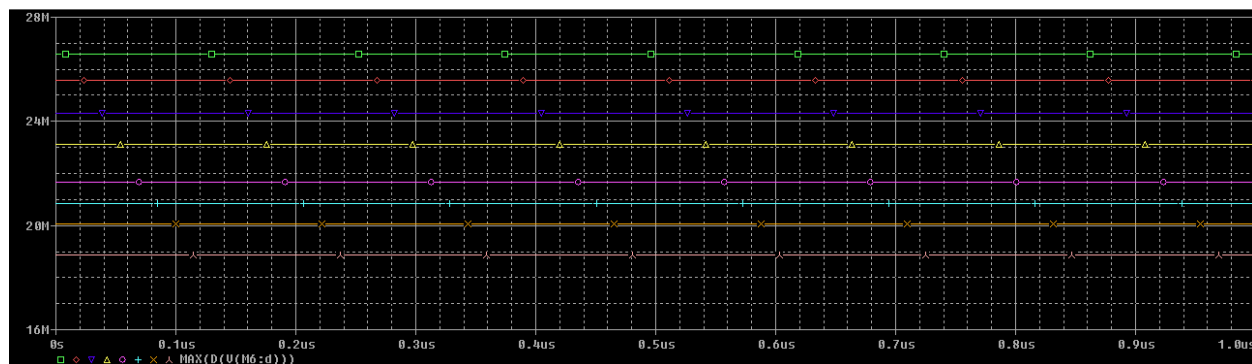
Διάγραμμα περιθωρίου φάσης



Οι τιμες του πίνακα που ακολουθεί πιστοποιούν την εκπλήρωση και αυτής της προδιαγραφής που θέλει το περιθώριο φάσης μεταξύ 45° και 60° .

Θερμοκρασία	Περιθώριο φάσης
0	59°
10°	51°
20°	50.3°
30°	50.2°
40°	50°
50°	49.8°
60°	49.7°
70°	50.4°

Διάγραμμα SR

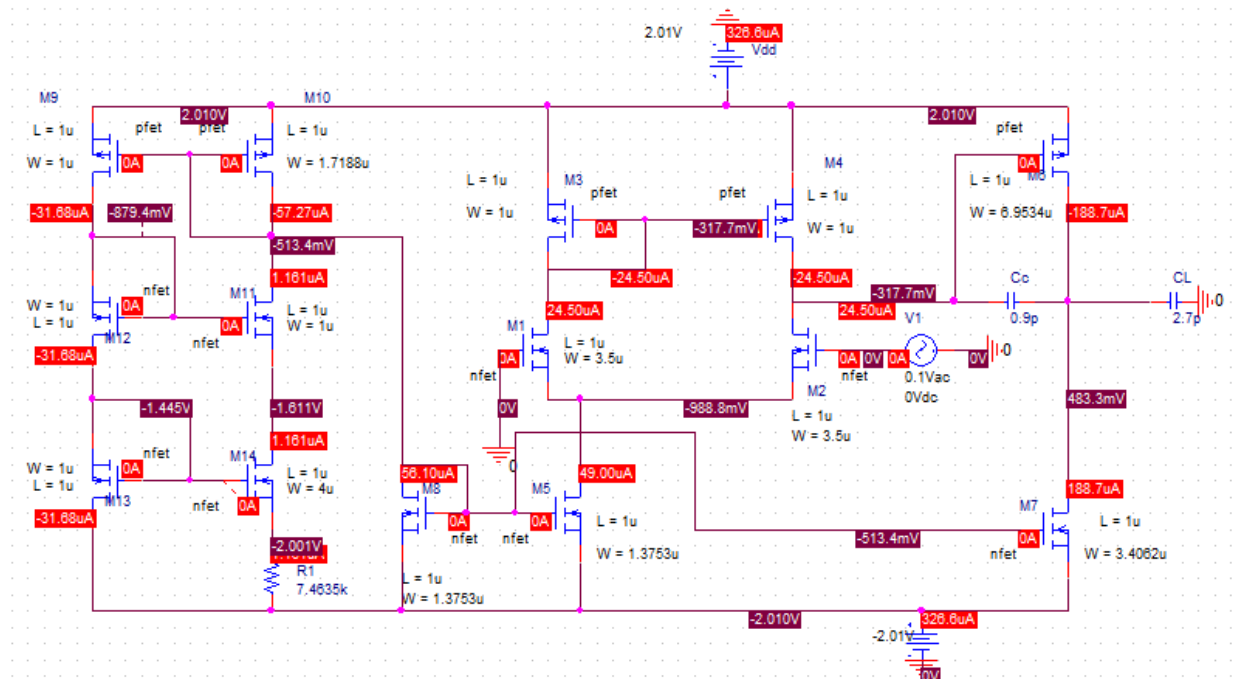


Για κάθε θερμοκρασία απο 0 εως 70-με βήμα 10- διαπιστώθηκε ότι και η τιμή του SR ήταν άνω του $SR_{min}=18.7 \text{ V}/\mu\text{s}$ κάτι που φαίνεται απο τις τιμές του παρακάτω πίνακα.

Θερμοκρασία	SR(V/μs)
0	26.6
10°	25.5
20°	24.3
30°	23.1
40°	21.6
50°	20.8
60°	20
70°	18.8

Σχεδίαση κυκλώματος πόλωσης με πηγή Widlar

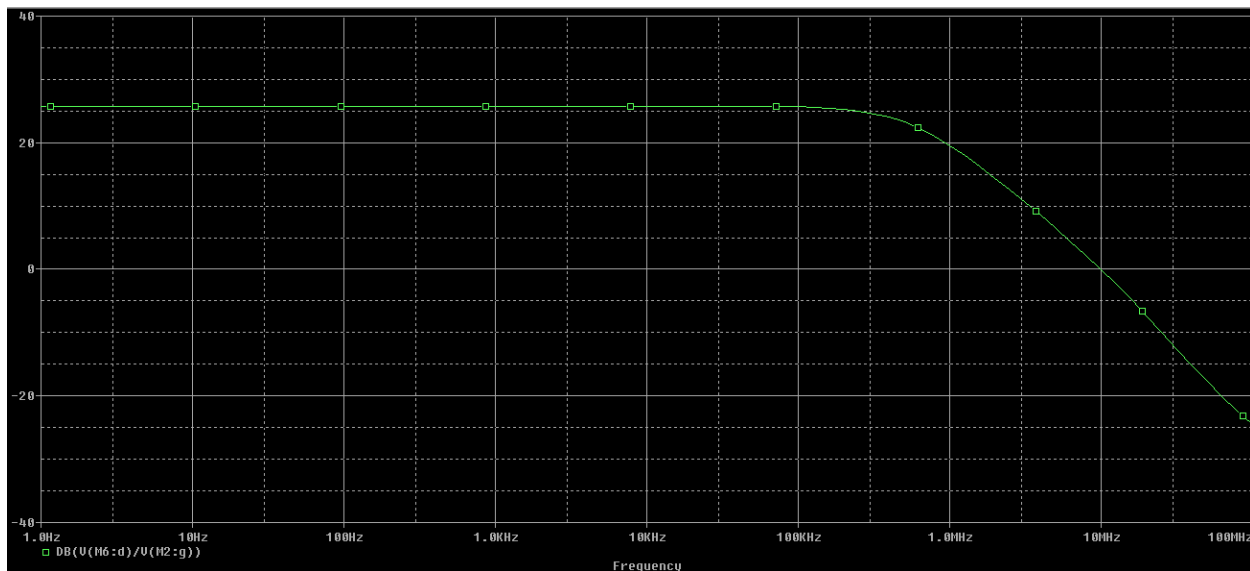
Η πηγή ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στις παραπάνω προσομοιώσεις ήταν ιδανική, έτσι για γίνει μια ρεαλιστικότερη προσέγγιση του σχεδιασμού η πηγή αυτή αντικαταστάθηκε απο μια πηγή Widlar που δίνει το ίδιο ρεύμα με την ιδανική με το κύκλωμα που δημιουργήθηκε να παρατίθεται στη φωτογραφία. Τα παρακάτω διαγράμματα που εξήχθησαν απο προσομοιώσεις αντίστοιχες με τις παραπάνω επαληθεύουν τη σωστή λειτουργία του ενισχυτή οσον αφορά τις απαιτούμενες προδιαγραφές.



Transistor	Μήκος καναλιού L(μm)	W(μm)
W9	1	1
W10	1	1.7188
W11	1	1
W12	1	1
W13	1	1
W14	1	4

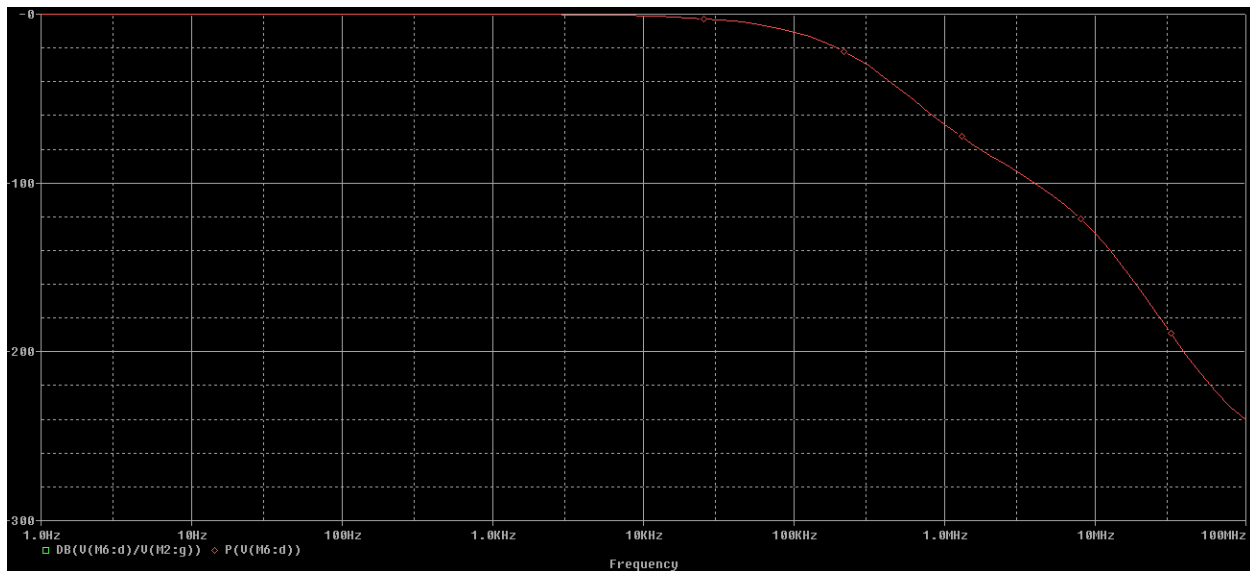
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΕΡΔΟΥΣ

Απο το διάγραμμα φαίνεται οτι το κέρδος παραμένει μεγαλύτερο απο το A_{vmin} αφού $A_v = 25.794 \text{ db} > 20.7 = A_{vmin}$. Η τιμή του GB είναι ίση με 9.979MHz που πληρεί επίσης τον αρχικό περιορισμό.



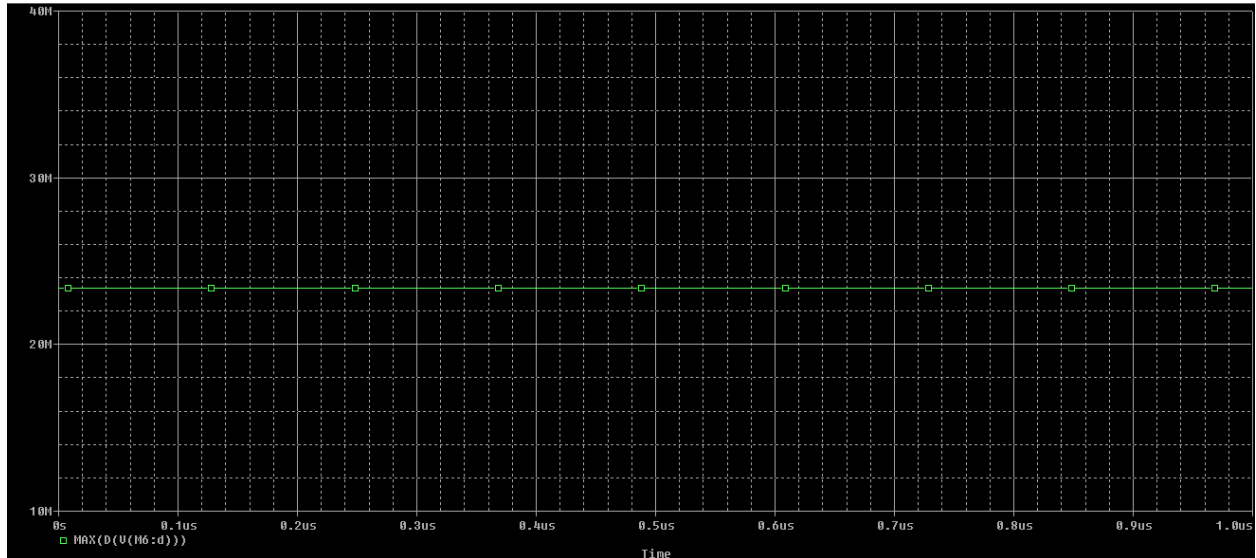
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΑΣΗΣ

Το περιθώριο φάσης έχει τιμή $180 - 129.827 = 50.173^\circ$, τιμή μέσα στα επιτρεπτά ορια $45^\circ - 60^\circ$.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SR

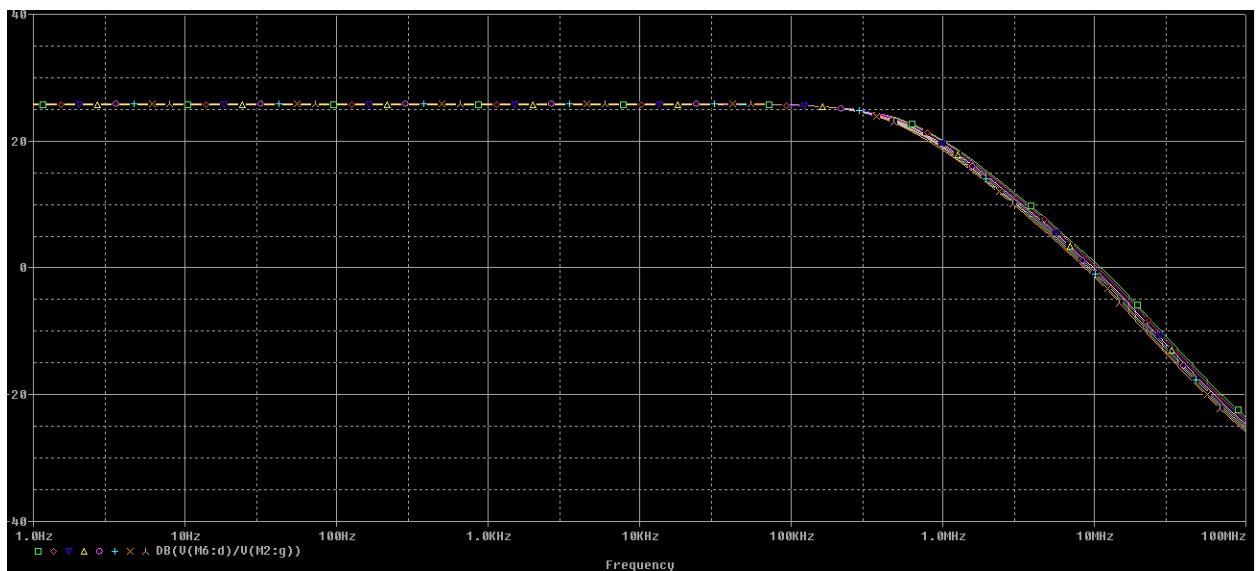
Η τιμή του SR είναι $23.388 \text{ V}/\mu\text{s} > 18.7 \text{ V}/\mu\text{s} = \text{SRmin}$, άρα και αυτή η προδιαγραφή ικανοποιείται μετά την αντικατάσταση της ιδανικής πηγής ρεύματος με την πηγή Widlar.



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των προδιαγραφών για τις διάφορες θερμοκρασίες (0-70°) φαίνονται στους παρακάτω πίνακες, με την ορθότητα της λειτουργίας του ενισχυτή να διατηρείται.

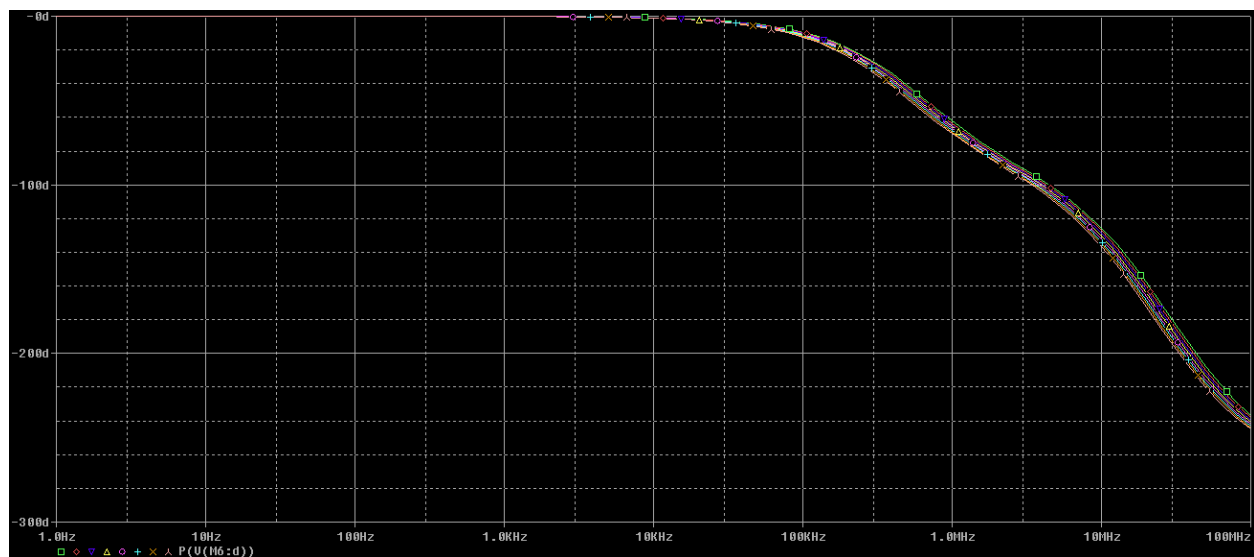
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΕΡΔΟΥΣ



Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν όλες οι τιμές του κέρδους καθώς και του GB όπου φαίνεται ότι και οι δυο προδιαγραφές ικανοποιούνται για όλες τις θερμοκρασίες που μελετήθηκαν.

Θερμοκρασία	Κέρδος(Αν σε db)	GB(MHz)
0	25.774	11.078
10°	25.761	10.654
20°	25.780	10.248
30°	25.800	9.884
40°	25.822	9.574
50°	25.845	9.2736
60°	25.869	8.9845
70°	24.894	8.7055

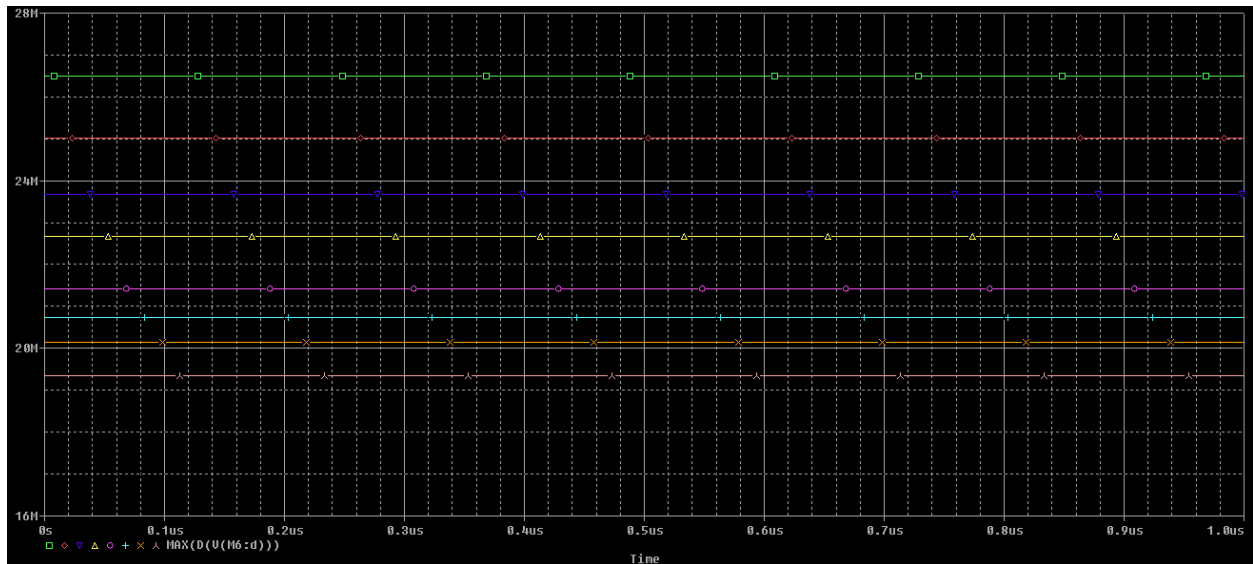
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΑΣΗΣ



Οι τιμές του πίνακα που ακολουθεί πιστοποιούν την εκπλήρωση και αυτής της προδιαγραφής που θέλει το περιθώριο φάσης μεταξύ 45° και 60° .

Θερμοκρασία	Περιθώριο φάσης
0	51.4°
10°	50.4°
20°	50.3°
30°	50.2°
40°	50°
50°	49.8°
60°	49.6°
70°	49.5°

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SR



Για κάθε θερμοκρασία απο 0 εως 70-με βήμα 10- διαπιστώθηκε ότι και η τιμή του SR ήταν άνω του $SR_{min}=18.7$ V/μs κάτι που φαίνεται απο τις τιμές του παρακάτω πίνακα.

Θερμοκρασία	SR(V/μs)
0	26.4
10°	25
20°	23.6
30°	22.6
40°	21.4
50°	20.7
60°	20.1
70°	19.3