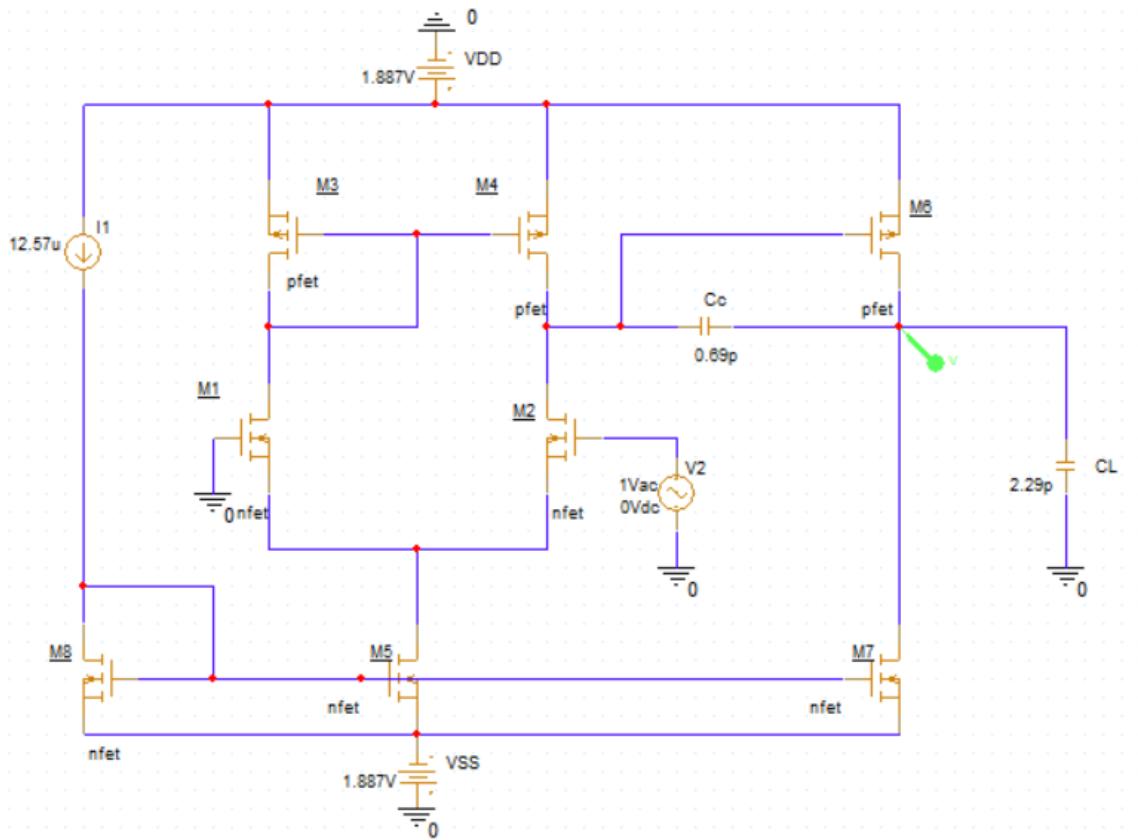


ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

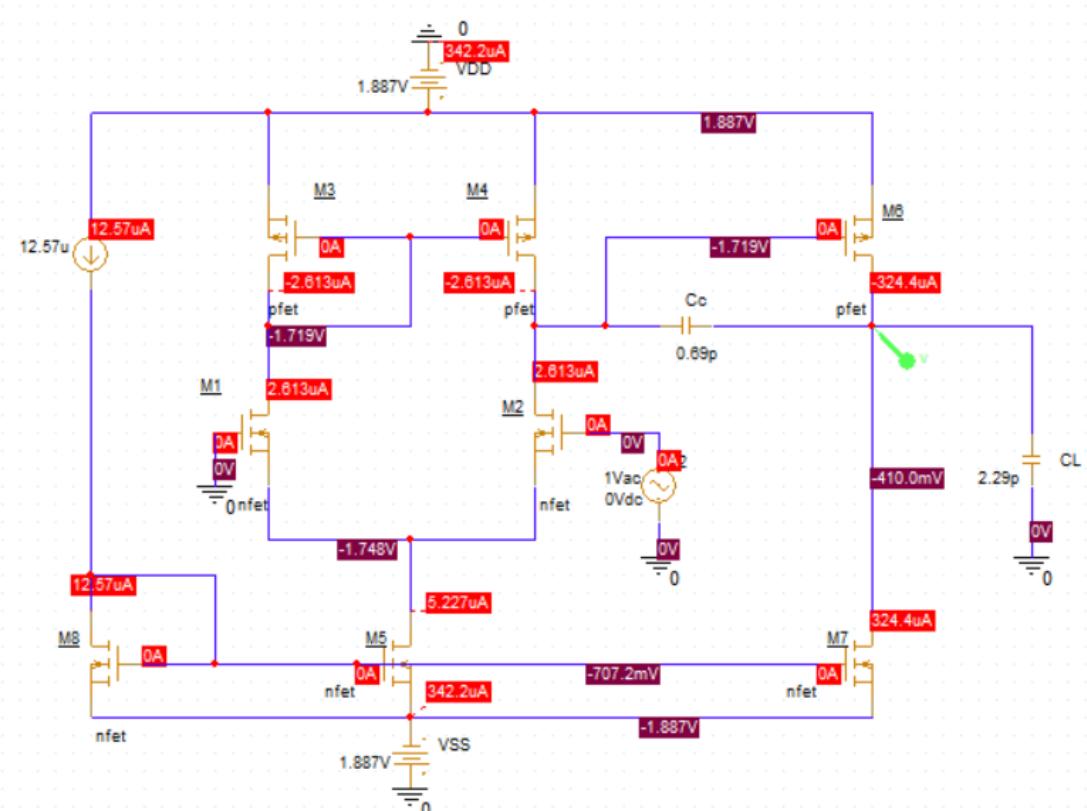
Όνοματεπώνυμο: Αλέξανδρος Γαλαζούλας

Α.Ε.Μ. : 10629

Στην εργασία ζητείται η δημιουργία ενός τελεστικού ενισχυτή, στην προκειμένη επιλέγεται το διαφορικό ζεύγος να είναι Q mosfet, ο οποίος πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες απαιτήσεις. Αυτές για τον συντάκτη, εφόσον $\xi = 29$, διατυπώνονται ως εξής: $C_L = 2.29\text{pF}$, $SR > 18.29\text{V/us}$, $V_{DD} = -V_{SS} = 1.887\text{V}$, $GB > 7.29\text{MHz}$, $A > 20.29 \text{ DB}$ και $P < 50.29\text{mW}$, $V_{in(max)} = -V_{in(min)} = 0.1\text{V}$. Επίσης, επιλέγεται το μήκος των τρανζίστορ ίσο με $1\mu\text{m}$ (για την αρχική ανάλυση) και από τα δοσμένα μοντέλα: $\lambda_n = 0.08\text{V}^{-1}$, $\lambda_p = 0.12\text{ V}^{-1}$ και $K_n = 96.379 \text{ uA / V}$, $K_p = 29.352 \text{ uA / V}$.



Παραπάνω φαίνεται ο ενισχυτής που δημιουργήθηκε στο spice. Θέτοντας τις γνωστές σχέσεις του ενισχυτή στο Matlab, μου προκύπτουν ικανοποιητικές τιμές για την ενίσχυση ($A_v = 832.37 \text{ V/V}$ ή $A_v = 58.4 \text{ dB}$) και για την ισχύ ($P_{diss} = 0.39 \text{ mW}$), έχοντας θεωρήσει, $\text{SR} = 18.3\text{V/us}$, $\text{GB} = 7.3 \text{ MHz}$ και $C_c = 0.5\text{pF}$. Ωστόσο, υλοποιώντας την προσομοίωση με τις θεωρητικές τιμές προκύπτει το εξής:



Διακρίνω ότι, τα I_1 και I_2 δεν είναι ακριβώς $I_5/2$, αλλά έχουν πάρει μικρότερες τιμές και το I_6 δε βρίσκεται σε τιμή ίση με τη θεωρητική του, αλλά είναι λίγο μεγαλύτερο. Ο προφανής λόγος για τον οποίο ισχύει αυτό είναι ότι 6 από τους 8 λόγους των μεγεθών των τρανζίστορ προέκυψαν μικρότεροι της μονάδας. Συγκεκριμένα : $S_1 = S_2 = 0.72$, $S_3 = S_4 = 0.11$ και $S_5 = S_8 = 0.79$ ($S_6 = 4.24$ και $S_7 = 14.72$).

Για αυτόν το λόγο, θέτω στον κώδικα μου όπου έχω λόγο των μεγεθών των τρανζίστορ μικρότερο της μονάδας ίσο με 1. Έτσι, ο κώδικας που λαμβάνω είναι ο παρακάτω (σημειώνεται ότι ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για να προκύψουν τα παραπάνω μεγέθη είναι ο ίδιος με τον παρακάτω, απλά δεν υπάρχουν τα if statements που θέτουν όσα S είναι μικρότερα της μονάδας ίσα με 1):

```

Cl = 2.29 * 10^-12;
SR = 18.3 * 10^6;
Vdd = 1.887;
Vss = -1.887;
GB = 7.3 * 10^6;
Cox = 2.47 * 10^-3; % F/m^2
Kp = 2.9352 * 10^-5; % A/V^2
Kn = 9.6379 * 10^-5; % A/V^2
lamda_n = 0.08; % Theta of the model
lamda_p = 0.12;

```

```

Cc = 0.22 * Cl;
I5 = SR * Cc;
S3 = I5/(Kp*(1.887 - 0.1 -0.9056 + 0.786)^2);
if (S3 < 1)
S3 = 1;
S4 = S3;
end
p3 = (sqrt((2*Kp*S3)*(I5/2)))/(2*0.667*S3*(10^-12)*Cox);
p3_MHz = (p3/2*pi)*10^-6; % MHz
gm1 = GB * Cc * 2*pi;
S1 = (gm1^2)/(Kn*I5);
if (S1 < 1)
S1 = 1;
S2 = S1;
end
Vds5 = -0.1 + 1.887 - sqrt(I5/(Kn*S1)) - 0.85; % Volt

```

```

S5 = (2*I5)/((Vds5)^2 * Kn);
if (S5 < 1)
S5 = 1;
S8 = S5;
end

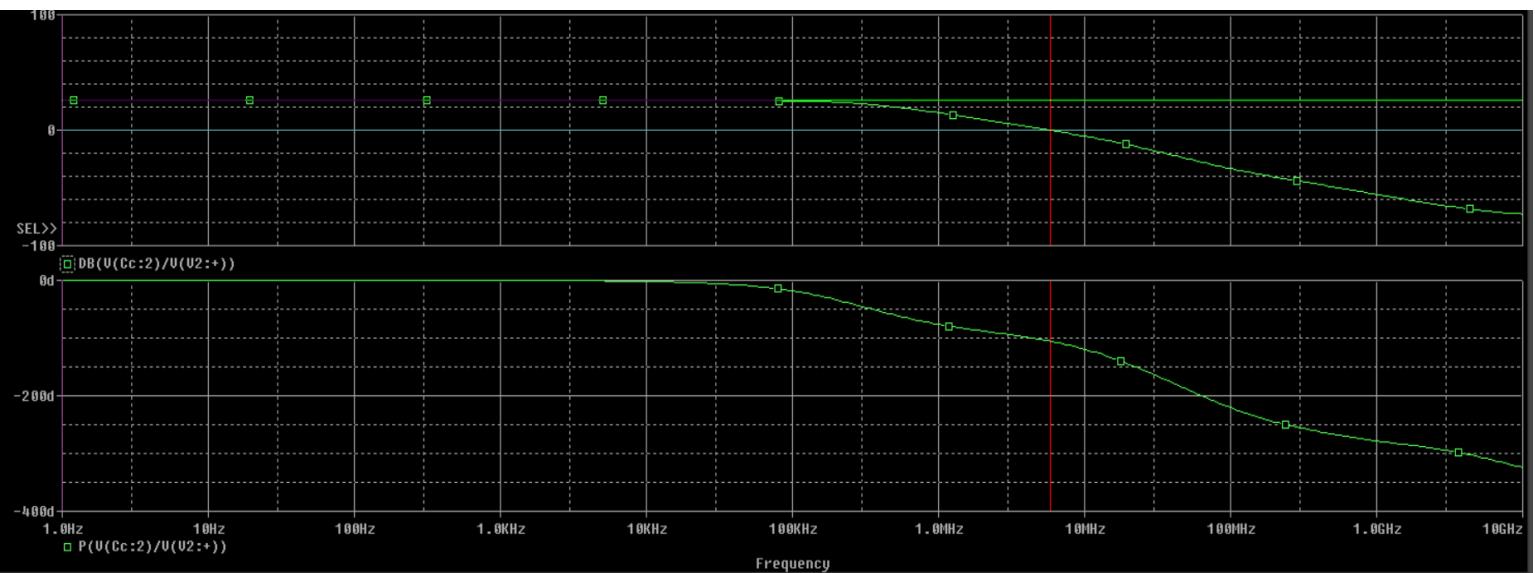
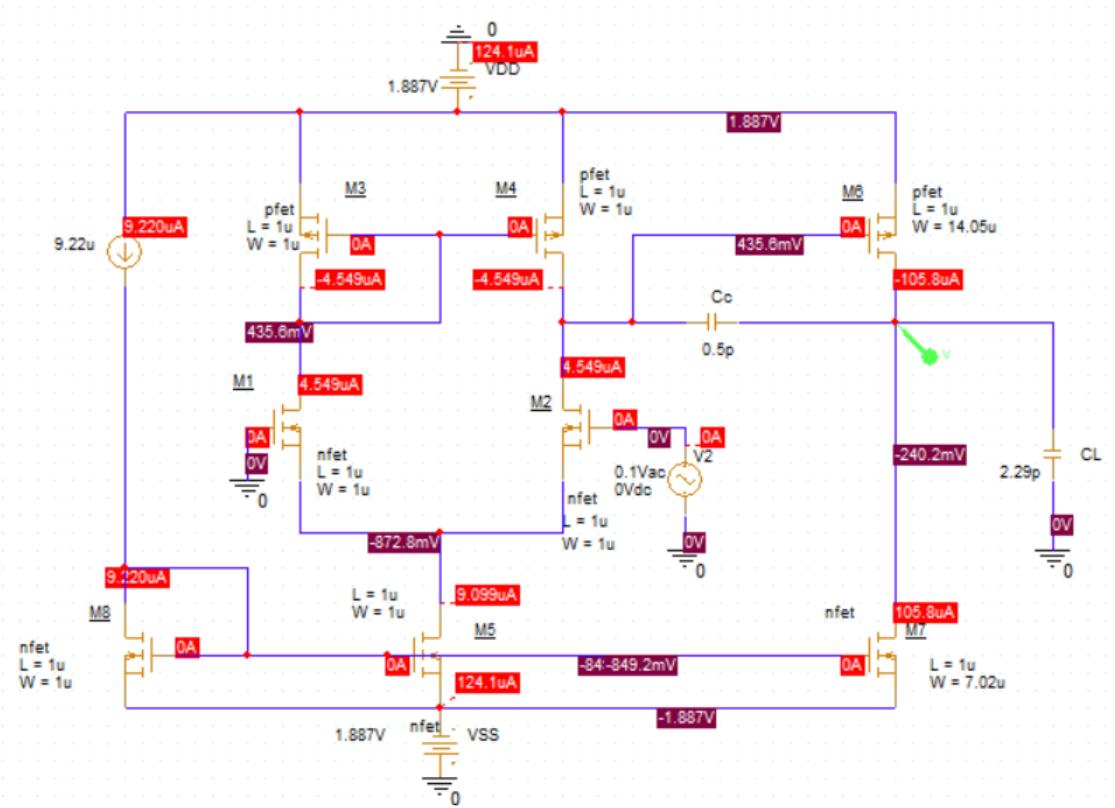
gm6 = 10*gm1;%Siemens
gm4 = sqrt(2*Kp*S4*I5/2); %Siemens
S6 = (S4*gm6)/gm4;
if (S6<1)
S6=1;
end

I6 = (gm6^2)/(2 * Kp * S6); %Ampere
S7 = (I6/I5) * S5;
if (S7<1)
S7=1;
end

Av = (2 * gm1 * gm6)/(I5 * (lamda_p + lamda_n)^2 * I6);
Pdiss = (I5 + I6)*(2 * 1.887);

```

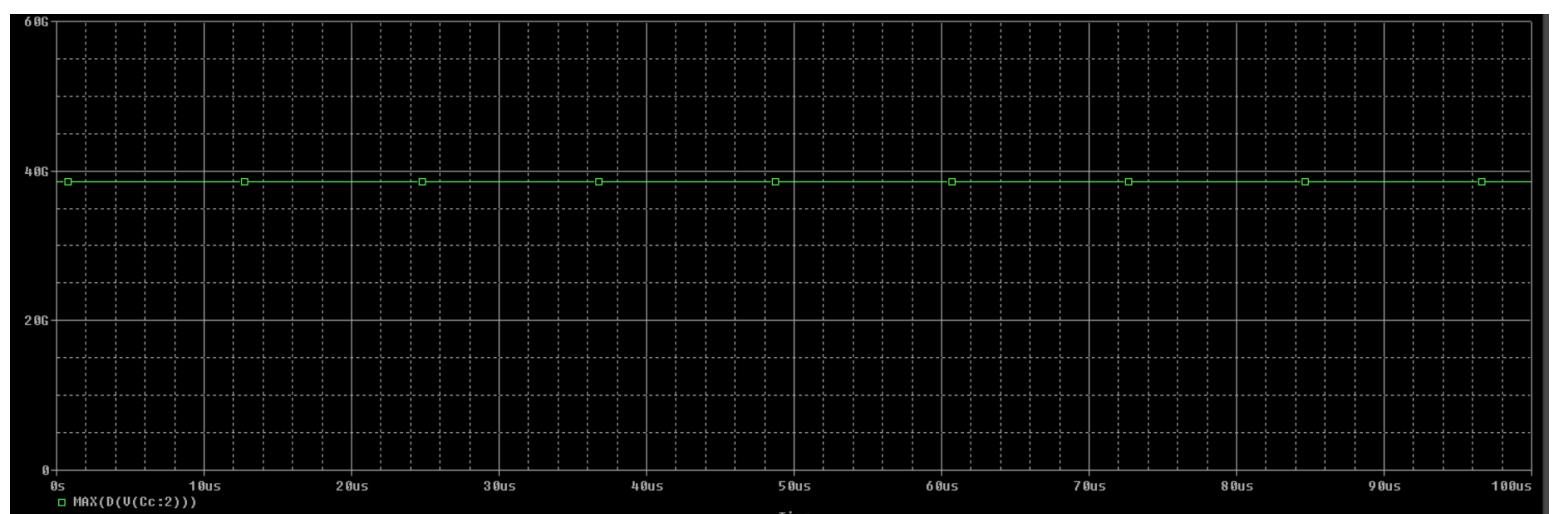
Αυτός ο κώδικας θα μου δώσει θεωρητικές τιμές: $Av = 447.21 \text{ V/V}$ ή $Av = 53.01 \text{ DB}$ και $Pdiss = 0.279 \text{ mW}$. Επίσης, διαπιστώνω ότι $p3 = 7842 \text{ MHz} >> 10 * GB = 73 \text{ MHz}$. Συνεπώς ικανοποιεί τις συνθήκες. Υλοποιώντας τον ωστόσο παρατηρώ ότι ενώ το κύκλωμα φαίνεται σωστά υλοποιήσιμο δεν ικανοποιεί τις συνθήκες του PM και του GB.
Συγκεκριμένα:



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	-25.897			
X Values	5.8339M	1.0000	5.8339M	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y	
	P(V(Cc:2)/V(V2:+))	-105.741	-191.159u	-105.741	-105.616	-25.772	-191.159u	-105.741	-52.871
CURSOR 1,2	DB(V(Cc:2)/V(V2:+))	-124.584m	25.772	-25.897	0.000	25.772	-124.584m	12.824	

Παρατηρώ δηλαδή ότι ενώ επιτυγχάνω να πετύχω $A_v = 25.77 \text{ dB} > 20.29 \text{ dB}$, διακρίνω πως $\text{GB} = 5.84 \text{ MHz} < 7.29 \text{ MHz}$ και $\text{PM} = 180 - 105 = 75 > 60$ μοιρών που είναι το επιθυμητό αφού έχει επιλεγεί $C_c = 0.22 \text{ pF}$.

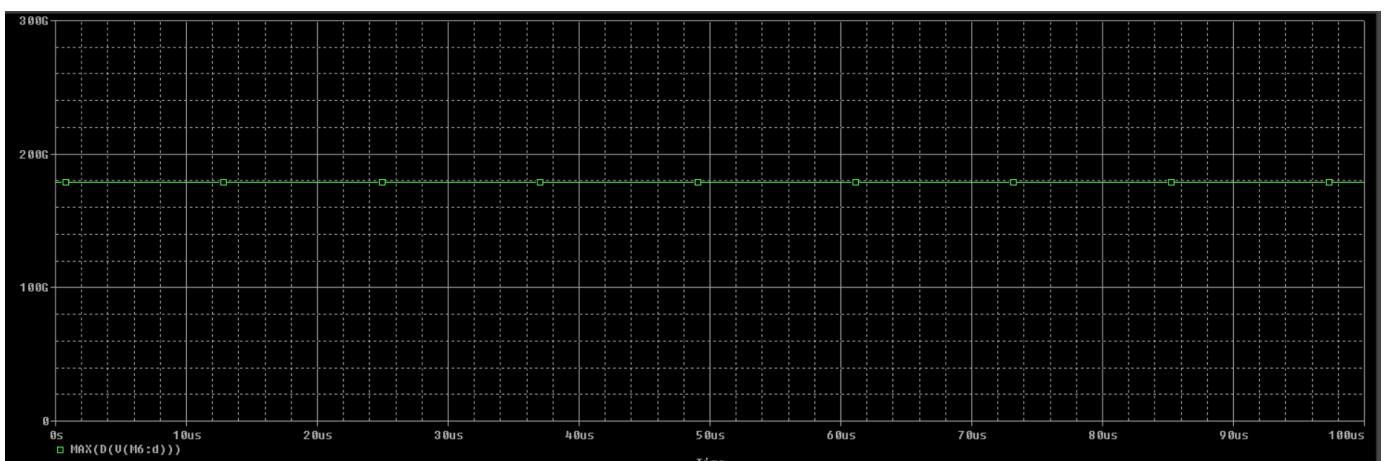
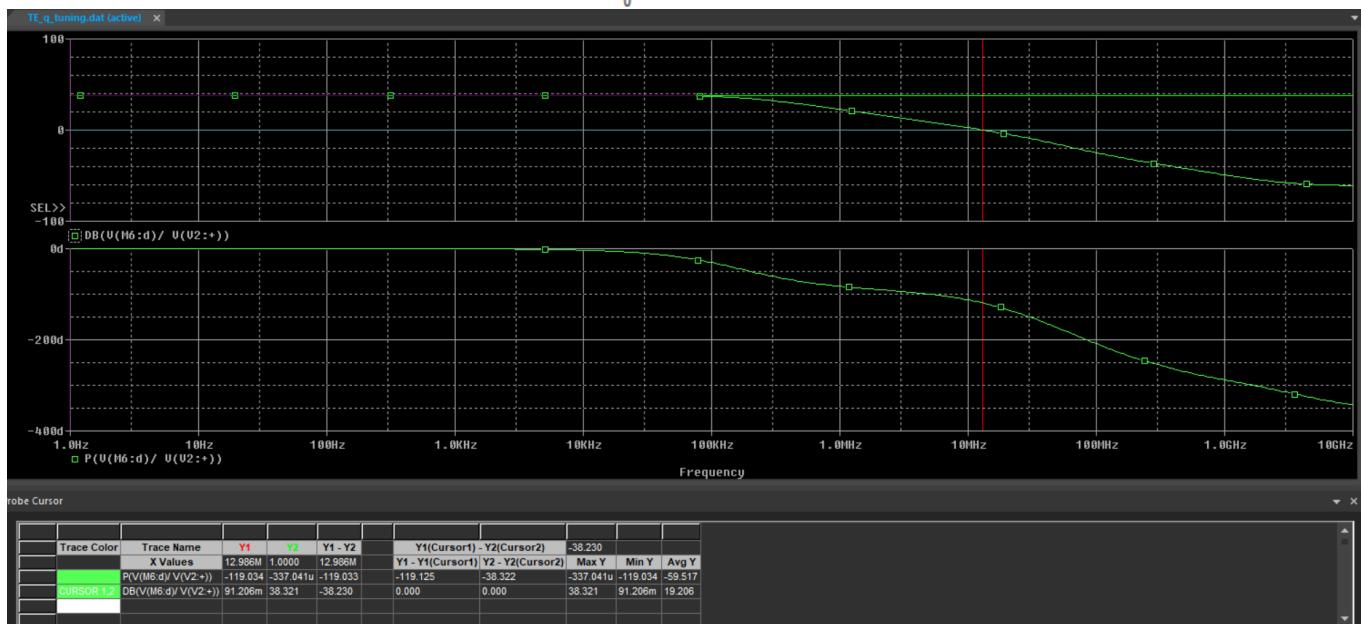
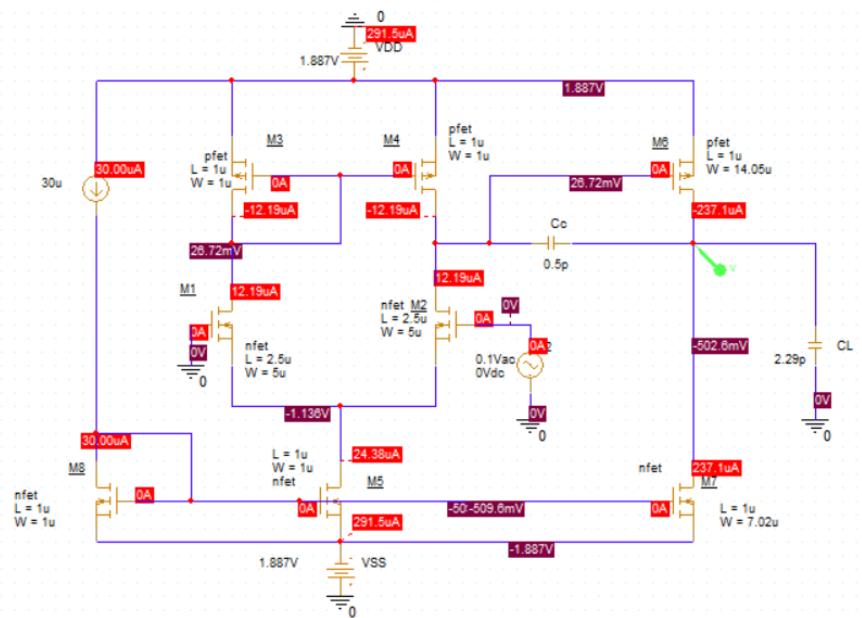
Επίσης, όσον αφορά το SR πετυχαίνω την προδιαγραφή αφού όπως προκύπτει από το διάγραμμα η μέγιστη τιμή της παραγώγου της τάσης εξόδου, έχοντας βάλει ως είσοδο μία Vpulse με max τιμή 0.1V και min - 0.1 (λόγω εκφώνησης) είναι $38600 \text{ V/us} >> 18.29 \text{ V/us}$



Οι παραπάνω προδιαγραφές που δεν τηρούνται θα διορθωθούν με τη διαδικασία των μικρορυθμίσεων (tuning).

TUNING

Αλλάζοντας τα μεγέθη των τρανζίστορ του διαφορικού ζεύγους (κάνοντας τα $W = 5 \text{ um}$ και τα $L = 2.5 \text{ um}$) όπως επίσης και αυξάνοντας το ρεύμα $I_{ref} = I_5 = I_8 (30 \text{ uA})$ επιτυγχάνω να πετύχω όλες τις ζητούμενες προδιαγραφές. Όπως απεικονίζεται παρακάτω έχω πλέον $\text{PM} = 61$ μοίρες και $\text{GB} = 13 \text{ MHz}$, με το κέρδος μου να μειώνεται στα 38.321 dB όπως και το SR στα 178664 V/us . Επίσης, επισυνάπτεται και ο TE με τις καινούριες τιμές:



Όσον αφορά την ισχύ κατανάλωσης, διακρίνω από το σχήμα ότι: $I_5 = 30 \text{ uA}$, $I_6 = 237.1 \text{ uA}$ και $V_{DD} = -V_{SS} = 1.887\text{V}$. Άρα, $P_{diss} = (I_5 + I_6) * (V_{DD} + |V_{SS}|) = 1.008 \text{ mW} < 50 \text{ mW}$.

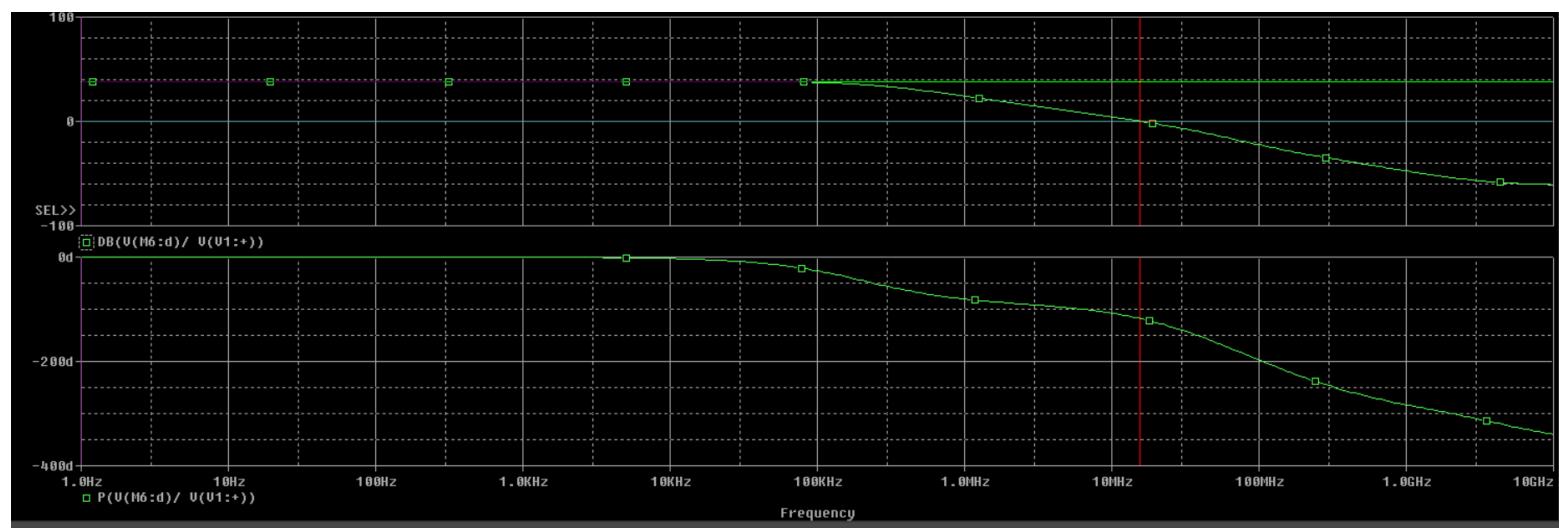
Συνεπώς με τη διαδικασία του tuning έχω επιτύχει όλες τις προδιαγραφές που ζητήθηκαν για τον τελεστικό ενισχυτή.

Θερμοκρασιακή Ανάλυση

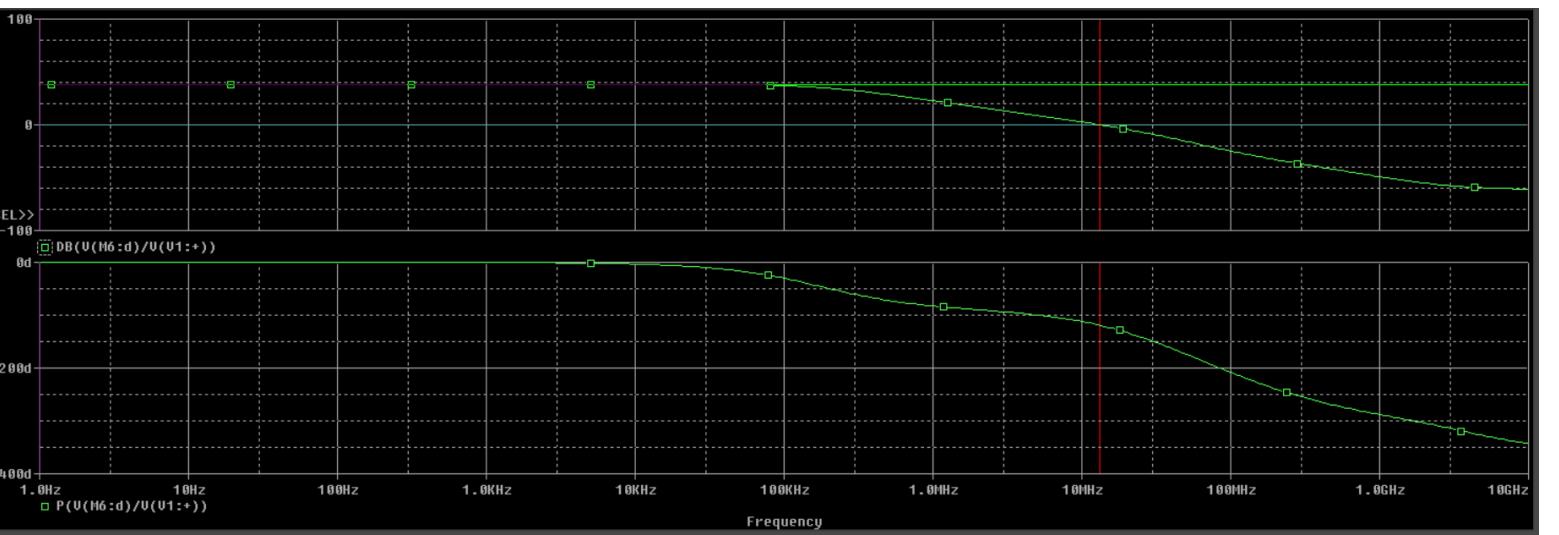
Ξανατρέχω την προσομοίωση στις θερμοκρασίες -40, 25 και 100 βαθμών Κελσίου με σκοπό να ανακαλύψω τι συμβαίνει με το κέρδος, το SR, το GB και το PM σε 2 ακραίες θερμοκρασίες και σε μία τυπική (κοντά στους 25 βαθμούς μπορεί να θεωρηθεί η μέχρι τώρα ανάλυση). Δηλαδή θέλω να βρω ποια θερμοκρασία είναι η ιδανική για λειτουργήσει το συγκεκριμένο κύκλωμα. Παρατηρώ ότι:

- Το κέρδος στους 100°C αυξάνεται ελάχιστα σε σχέση μου τους -40°C , το οποίο με τη σειρά του αυξάνεται ελάχιστα από τους 25°C . Δηλαδή έχω $A_{100^\circ\text{C}} = 38.411 \text{ dB} > A_{40^\circ\text{C}} = 38.342 \text{ dB} > A_{25^\circ\text{C}} = 38.32 \text{ dB}$.
- Το περιθώριο φάσης των 25°C είναι πιο κοντά στις 60° από αυτό των 100°C , το οποίο είναι πιο κοντά σε αυτές από ότι το PM των -40°C . Συγκεκριμένα: $PM_{-40^\circ\text{C}} = 62.313^\circ$, $PM_{25^\circ\text{C}} = 60.682^\circ$, $PM_{100^\circ\text{C}} = 59.288^\circ$.
- Το γινόμενο κέρδους εύρους ζώνης (GB) μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Δηλαδή: $GB_{-40^\circ\text{C}} = 15.54 \text{ MHz} > GB_{25^\circ\text{C}} = 13.20 \text{ MHz} > GB_{100^\circ\text{C}} = 11.21 \text{ MHz}$.
- Τέλος, το Slew Rate της χαμηλότερης θερμοκρασίας υπερτερεί έναντι το αντίστοιχο της υψηλότερης θερμοκρασίας το οποίο είναι μεγαλύτερο από το SR της μέσης θερμοκρασίας (αξίζει να σημειωθεί ότι η διάταξη των 2 τελευταίων αλλάζει για μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες -κατά απόλυτη τιμή- τιμές του παλμού στην είσοδο). Είναι: $SR_{-40^\circ\text{C}} = 181616 \text{ V/us} > SR_{100^\circ\text{C}} = 179076 \text{ V/us} > SR_{25^\circ\text{C}} = 178848 \text{ V/us}$

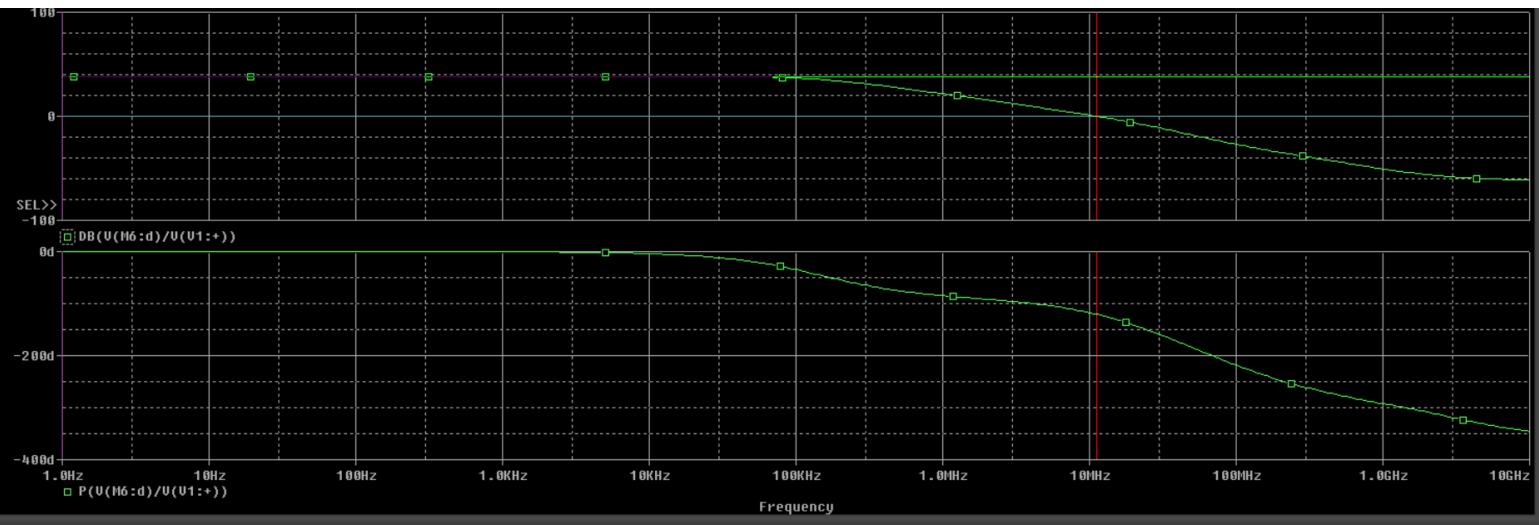
Παραθέτονται με σειρά τα διαγράμματα Bode (μέτρου και φάσης) των θερμοκρασιών σε αύξουσα σειρά και στο τέλος το διάγραμμα που απεικονίζει το SR για όλες τις θερμοκρασίες:



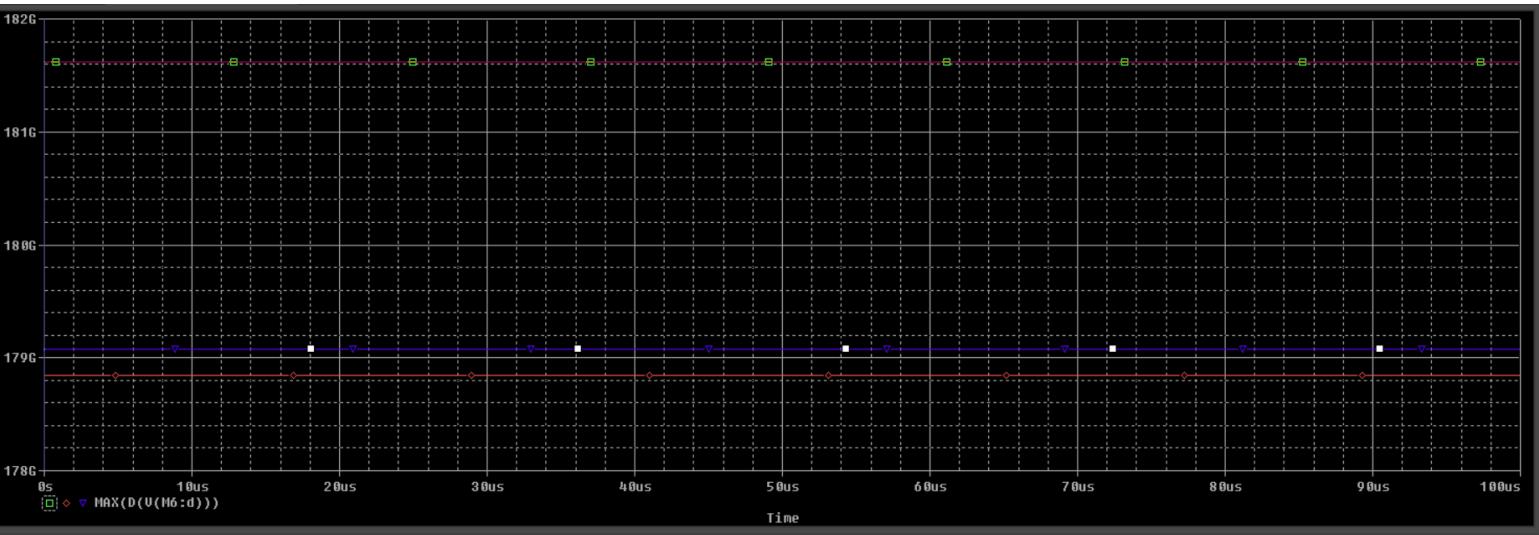
Probe Cursor									
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	Y1 - Y1(Cursor1) Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
X Values	P(V(M6:d)/V(V1:+))	15.541M	1.0000	15.541M	-117.687	-282.617u	-117.686	-117.820	-38.342
CURSOR 1,2	DB(V(M6:d)/V(V1:+))	132.996m	38.342	-38.209	0.000	0.000	38.342	132.996m	19.238



Probe Cursor									
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	Y1 - Y1(Cursor1) Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
X Values	P(V(M6:d)/V(V1:+))	13.200M	1.0000	13.200M	-119.318	-335.389u	-119.318	-119.297	-38.320
CURSOR 1,2	DB(V(M6:d)/V(V1:+))	21.200m	38.320	-38.341	0.000	0.000	38.320	-21.200m	19.149



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1 - Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	-38.478		
X Values		11.211M	1.0000	11.211M	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y
Green	$P(U(M6:d)/U(U1:+))$	-120.712	-398.483u	-120.712	-120.645	-38.411	-398.483u	-120.712
CURSOR 1,2	$DB(V(M6:d)/V(U1:+))$	-67.073m	38.411	-38.478	0.000	0.000	38.411	-67.073m



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1 - Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	0.000		
X Values		0.000	0.000	0.000	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y
Green	$MAX(D(U(M6:d)))$	181.616G	181.616G	0.000	0.000	0.000	181.616G	181.616G
CURSOR 1,2	$MAX(D(V(M6:d)))$	181.616G	181.616G	0.000	0.000	0.000	181.616G	181.616G
Red	$MAX(D(V(M6:d)))$	178.848G	178.848G	0.000	-2.7680G	-2.7680G	178.848G	178.848G
Blue	$MAX(D(V(M6:d)))$	179.076G	179.076G	0.000	-2.5395G	-2.5395G	179.076G	179.076G

Συμπαιρένω ότι ενώ οι -40°C θα ήταν ιδανικότεροι για να λειτουργήσει ένας τέτοιος ενισχυτή, καθώς όλα τα σημαντικά του μεγέθη αυξάνονται, πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν τέτοιες συνθήκες λειτουργίας και το trade off που γίνεται σε σχέση με τους 25°C είναι ανεκτό. Έτσι, η θερμοκρασία δωματίου είναι αυτή που επιλέγεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων (ίσως και με μία μικρή της πτώση για ελάχιστη βελτίωση).

