

ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ

Τσαρναδέλης Αθανάσιος Γρηγόριος

10388, atsarnad@ece.auth.gr

Περιεχόμενα

Αριθμητική Ανάλυση.....	3
MATLAB Script για την θεωρητική ανάλυση.....	5
Προσομοίωση των αρχικών τιμών στο SPICE	8
Tuning.....	11
Επιβεβαίωση των ζητούμενων προδιαγραφών.....	12
Κέρδος Τάσης A – Gain	12
Gain Bandwidth - GB	12
Περιθώριο Φάσης – Phase Margin	13
Slew Rate.....	13
Ισχύς κατανάλωσης P.....	14
Τελικά Αποτελέσματα	14
Θερμοκρασιακή Ανάλυση.....	15
Κέρδος.....	15
Gain Bandwidth.....	15
Περιθώριο Φάσης – Phase Margin	16
Slew Rate.....	16
Ισχύς Κατανάλωσης	17
Τελικά αποτελέσματα	17

Αριθμητική Ανάλυση

Με βάση το ΑΕΜ το $\xi=88$. Άρα οι προδιαγραφές σύμφωνα με την εκφώνηση είναι οι εξής:

Προδιαγραφή	Τιμή
CL	2.88pF
SR	>18.88 V/ μ s
Vdd	2.064V
Vss	-2.064V
GB	>7.88MHz
A	>20.88 dB
P	<50.88mW

Επίσης, από το δοθέν μοντέλο των τρανζίστορ εξάγω τις παρακάτω τιμές:

- $V_{T0p} = -0.9056$ V
- $V_{T0n} = 0.786$ V
- $K'_p = 29.352$ μ A/V²
- $K'_n = 96.379$ μ A/V²

Τέλος, από την εκφώνηση:

- $V_{in_min} = -0.1$ V
- $V_{in_max} = 0.1$ V

Επιλέγω να σχεδιάσω τελεστικό ενισχυτή με είσοδο rmos και με τα παραπάνω νούμερα, προχωρώ στην ανάλυση.

Επιλέγω L τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο της τεχνολογίας (0.35 μ m):

$$L > 2 \cdot 0.35 = 0.7 \mu\text{m}. \text{ Επιλέγω } \mathbf{L=2\mu m}$$

Από τυπολόγιο υπολογίζω:

$$C_C > 0.22 \cdot C_L = 0.6336 \text{pF}. \text{ Επιλέγω } \mathbf{C_C=1pF}$$

Επίσης από τυπολόγιο:

$$I_5 = SR \cdot C_C = 18.88 \mu\text{A}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι έχω είσοδο rmos, παίρνω τους ανάλογους τύπους από το τυπολόγιο:

$$V_{in(min)} = V_{ss} + v(I_5/\beta_3) + V_{T03} + |V_{T01}|$$

$$\beta_3 = K'_3(W/L)_3 = K'_3 S_3$$

$$\Rightarrow S_3 = I_5 / (K'_3) (V_{in(min)} - V_{ss} - V_{T03} + |V_{T01}|)^2$$

$$\Rightarrow S_3 = 18.88 \mu\text{A} / (96.379 \mu\text{A/V}^2) (-0.1 \text{ V} + 2.064 \text{ V} - 0.786 \text{ V} + +0.9056 \text{ V})^2$$

$$\Rightarrow S_3 = 0.0451$$

Το S_3 είναι πολύ μικρότερο του 1. Δεν μου αρέσει και το επιλέγω $S_3=1$

Λόγω καθρέφτη:

$$S_4 = S_3 = 1$$

Ελέγχω αν ο πόλος p_3 είναι μεγαλύτερος από 10GB:

$$C_{ox} = 4.6 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$$

$$C_{gs3} = 2/3 W_3 L C_{ox} = 2/3 S_3 L^2 C_{ox} = 12.2667 \text{ fF}$$

$$g_{m3} = \sqrt{(K'_3 S_3 I_5)} = 42.657 \mu\text{S}$$

$$g_{m3}/2 C_{gs3} = 1.7387 \cdot 10^9 \text{ rad/s}$$

$$\Rightarrow g_{m3}/2 C_{gs3} = 276 \text{ MHz} > 10\text{GB} = 78.5 \text{ MHz}$$

Άρα ο πόλος p_3 είναι OK. Συνεχίζω υπολογίζοντας τις διαστάσεις του 1,2

$$g_{m1} = 2\pi \cdot \text{GB} \cdot C_C = 2\pi \cdot 7.88\text{MHz} \cdot 1\text{pF} = 49 \mu\text{S}$$

$$S_1 = S_2 = g_{m1}^2 / (K'_2 \cdot I_5) = (49 \mu\text{S})^2 / (29.352 \mu\text{A/V}^2 \cdot 18.88 \mu\text{A})$$

$$\Rightarrow S_1 = S_2 = 4.4236$$

Έπειτα υπολογίζω το V_{sd5}

$$\beta_1 = K'_1 \cdot S_1 = 29.352 \mu\text{A/V}^2 \cdot 4.4236 = 129.84 \mu\text{A/V}^2$$

$$V_{sd5} = V_{dd} - \sqrt{I_5/\beta_1} - V_{in_max} - |V_{T01}| = 2.064\text{V} - \sqrt{18.88 \mu\text{A}/129.84 \mu\text{A/V}^2} - 0.1\text{V} - 0.9056\text{V}$$

$$\Rightarrow V_{sd5} = 0.677\text{V} (> 0.1\text{V}, \text{ από τυπολόγιο})$$

Υπολογίζω το μέγεθος του 5:

$$S_5 = 2I_5 / (K'_5 \cdot V_{sd5}^2) = 2 \cdot 18.88 \mu\text{A} / (29.352 \mu\text{A/V}^2 \cdot 0.677\text{V}^2)$$

$$\Rightarrow S_5 = 2.8062$$

Γνωρίζουμε ότι $g_{m6} \geq 10 g_{m1}$. Οριακά παίρνω $g_{m6} = 10 g_{m1} = 490 \mu\text{S}$, και υπολογίζω το μέγεθος του 6

$$g_{m4} = g_{m3} = 42.657 \mu\text{S}$$

$$S_6 = S_4(g_{m6} / g_{m4}) = 1 (490 \mu\text{S} / 42.657 \mu\text{S})$$

$$\Rightarrow S_6 = 11.6068$$

Υπολογίζω το I_6 και στην συνέχεια το μέγεθος του 7:

$$I_6 = g_{m6}^2 / (2 \cdot K'_6 \cdot S_6) = (490 \mu\text{S})^2 / (2 \cdot 96.379 \mu\text{A/V}^2 \cdot 11.6068)$$

$$\Rightarrow I_6 = 109.57 \mu\text{A}$$

$$S_7 = (I_6 / I_5) S_5 = (109.57 \mu\text{A} / 18.88 \mu\text{A}) 2.8062$$

$$\Rightarrow S_7 = 16.2857$$

Τέλος, επιβεβαιώνω τις προδιαγραφές του κέρδους και της κατανάλωσης ισχύος.
Χρησιμοποιώ $\lambda_n=0.05 \text{ 1/V}$, $\lambda_p=0.15 \text{ 1/V}$

$$A_v = 2 g_{m2} g_{m6} / (I_5 (\lambda_2 + \lambda_4) I_6 (\lambda_6 + \lambda_7))$$

$$= 2 \cdot 49 \mu\text{S} \cdot 490 \mu\text{S} / (18.88 \mu\text{A} (0.15 \text{ 1/V} + 0.05 \text{ 1/V}) 109.57 (0.05 \text{ 1/V} + 0.15 \text{ 1/V}))$$

$$\Rightarrow A_v = 592.5 \text{ V/V}$$

$$\Rightarrow A_v = 55 \text{ dB} > 20.88 \text{ dB (από προδιαγραφή)}$$

$$P_{\text{diss}} = (I_5 + I_6)(V_{\text{dd}} + |V_{\text{ss}}|) = (18.88 \mu\text{A} + 109.57 \mu\text{A})(2 \cdot 2.064)$$

$$\Rightarrow P_{\text{diss}} = 0.53 \text{ mW} < 50.88 \text{ mW (από προδιαγραφή)}$$

Άρα για τα παραπάνω νούμερα ικανοποιώ τις προδιαγραφές του κέρδους και της ισχύος.
Τέλος, επιλέγω ιδανική πηγή $I_{\text{ref}}=100\mu\text{A}$ και υπολογίζω το μέγεθος του 8:

$$S_8 = (I_{\text{ref}} / I_5) \cdot S_5 = (100\mu\text{A} / 18.88 \mu\text{A}) \cdot 2.8062$$

$$\Rightarrow S_8 = 14.8634$$

Χρησιμοποιώ τον τύπο $W=S \cdot L$ και υπολογίζω τα W για τα 8 τρανζίστορ, και τα στρογγυλεύω ώστε να έχω ακέραιες τιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Τιμή(μm)
W_1	9
W_2	9
W_3	2
W_4	2
W_5	6
W_6	23
W_7	33
W_8	30

MATLAB Script για την θεωρητική ανάλυση

Το script στο MATLAB για την παραπάνω διαδικασία είναι το εξής:

```
aem=88;
```

```
%Specifications
```

```
CL=(2+0.01*aem)*1e-12;
```

```
SR=(18+0.01*aem)*1e6;
```

```
VDD=1.8+0.003*aem;
```

```
VSS=-VDD;
```

```
GB=(7+0.01*aem)*1e6;
```

```
A=(20+0.01*aem); %dB
```

```
P=(50+0.01*aem)*1e-3;
```

```

%Parameters from models
Vtop=-0.9056;
Vton=0.786;
kp=29.352*1e-6;
kn=96.379*1e-6;
Vinmin=-0.1;
Vinmax=0.1;
Cox=4.6e-3;
lambda2=0.15;
lambda7=lambda2;
lambda4=0.05;
lambda6=lambda4;

%Select fixed length L
L=2e-6;

%Width Calculation
Cc=0.22 * CL;
Cc=1e-12 ; %i selected this

I5=SR*Cc;

S3=I5/(kn*(-VSS-Vton+abs(Vtop)+Vinmin)^2) ;
S3=1; %I selected this
S4=S3;

Cgs=2/3*S3*(L^2)*Cox;
gm3=sqrt(kn*S3*I5);
p3=gm3/(2*Cgs);
p3_Hz=p3/(2*pi);

%Check p3
if (p3/(2*pi)>10*GB)
    fprintf("-----P3 OK-----\n");
end

gm1=2*pi*GB*Cc;
gm2=gm1;;
S1=(gm1^2)/(kp*I5);
S2=S1;

b1=kp*S1;
Vsd5=VDD-sqrt(I5/b1)-abs(Vtop)-Vinmax;

%Check Vsd5
if (Vsd5>0.1)
    fprintf("-----Vsd3 OK-----\n");
end

S5=2*I5/(kp*Vsd5^2);

gm6=10*gm1;
gm4=sqrt(kn*S4*I5);
S6=S4*gm6/gm4;

I6=(gm6^2)/(2*kn*S6);

S7=(I6/I5)*S5;

Iref=100e-6; %I selected this
S8=(Iref/I5)*S5;

W1=S1*L*1e6;
W2=S2*L*1e6;

```

```

W3=S3*L*1e6;
W4=S4*L*1e6;
W5=S5*L*1e6;
W6=S6*L*1e6;
W7=S7*L*1e6;
W8=S8*L*1e6;

%Check Gain
Av=2*gm2*gm6/(I5*(lambda2+lambda4)*I6*(lambda6+lambda7));
Av_dB=db(Av);
if (Av_dB>A)
    fprintf("-----Gain OK-----\n")
end

%Check Power
Pdis=(I5+I6)*(VDD+abs(VSS));
if (Pdis<P)
    fprintf("-----Power OK-----\n")
end

```

Το script τυπώνει στο terminal τις προδιαγραφές που πληρώ. Τα αποτελέσματα του script καθώς και η έξοδος στο terminal είναι:

Name ▲	Value		
A	20.8800	S1	4.4236
aem	88	S2	4.4236
ans	1.3027e+09	S3	1
Av	592.5081	S4	1
Av_dB	55.4539	S5	2.8062
b1	1.2984e-04	S6	11.6068
Cc	1.0000e-12	S7	16.2857
Cgs	1.2267e-14	S8	14.8634
CL	2.8800e-12	SR	18880000
Cox	0.0046	VDD	2.0640
GB	7880000	Vinmax	0.1000
gm1	4.9512e-05	Vinmin	-0.1000
gm2	4.9512e-05	Vsd5	0.6771
gm3	4.2657e-05	VSS	-2.0640
gm4	4.2657e-05	Vton	0.7860
gm6	4.9512e-04	Vtop	-0.9056
I5	1.8880e-05	W1	8.8471
I6	1.0957e-04	W2	8.8471
Iref	1.0000e-04	W3	2
kn	9.6379e-05	W4	2
kp	2.9352e-05	W5	5.6124
L	2.0000e-06	W6	23.2137
lambda2	0.1500	W7	32.5713
lambda4	0.0500	W8	29.7269
lambda6	0.0500		
lambda7	0.1500		
P	0.0509		
p3	1.7387e+09		
p3_Hz	2.7673e+08		
Pdis	5.3024e-04		

Figure 1:Αποτελέσματα του script

```
>> opamp_analysis
-----P3 OK-----
-----Vsd3 OK-----
-----Gain OK-----
-----Power OK-----
```

Figure 2: Έξοδος του script στο terminal

Έχοντας μια αρχική εκτίμηση για τις παραπάνω τιμές, προχωρώ στη προσομοίωση.

Προσομοίωση των αρχικών τιμών στο SPICE

Το κύκλωμά μου είναι το εξής:

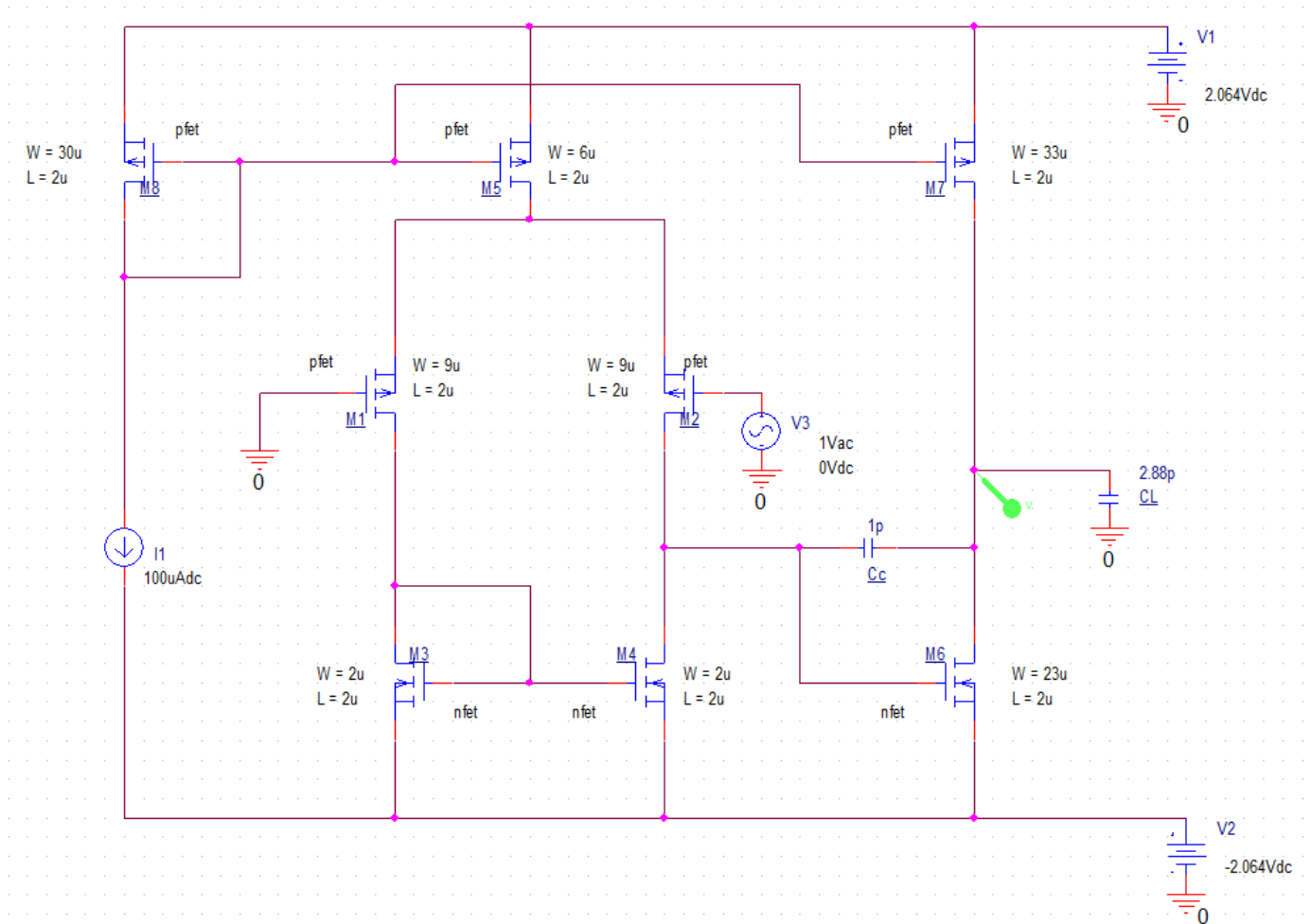


Figure 3: Το κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή με βαθμίδα εισόδου pmos

Βάζω μια πηγή AC με πλάτος 1Vac στην μη αναστρέφουσα (θετική) είσοδο και γειωμένη την αναστρέφουσα (αρνητική) είσοδο. Έπειτα κάνω AC Sweep για τις συχνότητες 1Hz – 10GHz. Οι ρυθμίσεις του AC Sweep είναι:

Simulation Settings - opampsim

General

Analysis

Configuration Files

Options

Data Collection

Probe Window

Analysis Type:

AC Sweep/Noise

Options:

☒ General Settings
 ☐ Monte Carlo/Worst Case
 ☐ Parametric Sweep
 ☐ Temperature (Sweep)
 ☐ Save Bias Point
 ☐ Load Bias Point

AC Sweep Type

☐ Linear
 ☒ Logarithmic

Decade

Start Frequency:

1

End Frequency:

1e+10

Points/Decade:

40

Noise Analysis

☐ Enabled

Output Voltage:

IV Source:

Interval:

Output File Options

☐ Include detailed bias point information for nonlinear controlled sources and semiconductors (.OP)

OK

Cancel

Apply

Reset

Help

Figure 4:Ρυθμίσεις του AC Sweep

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

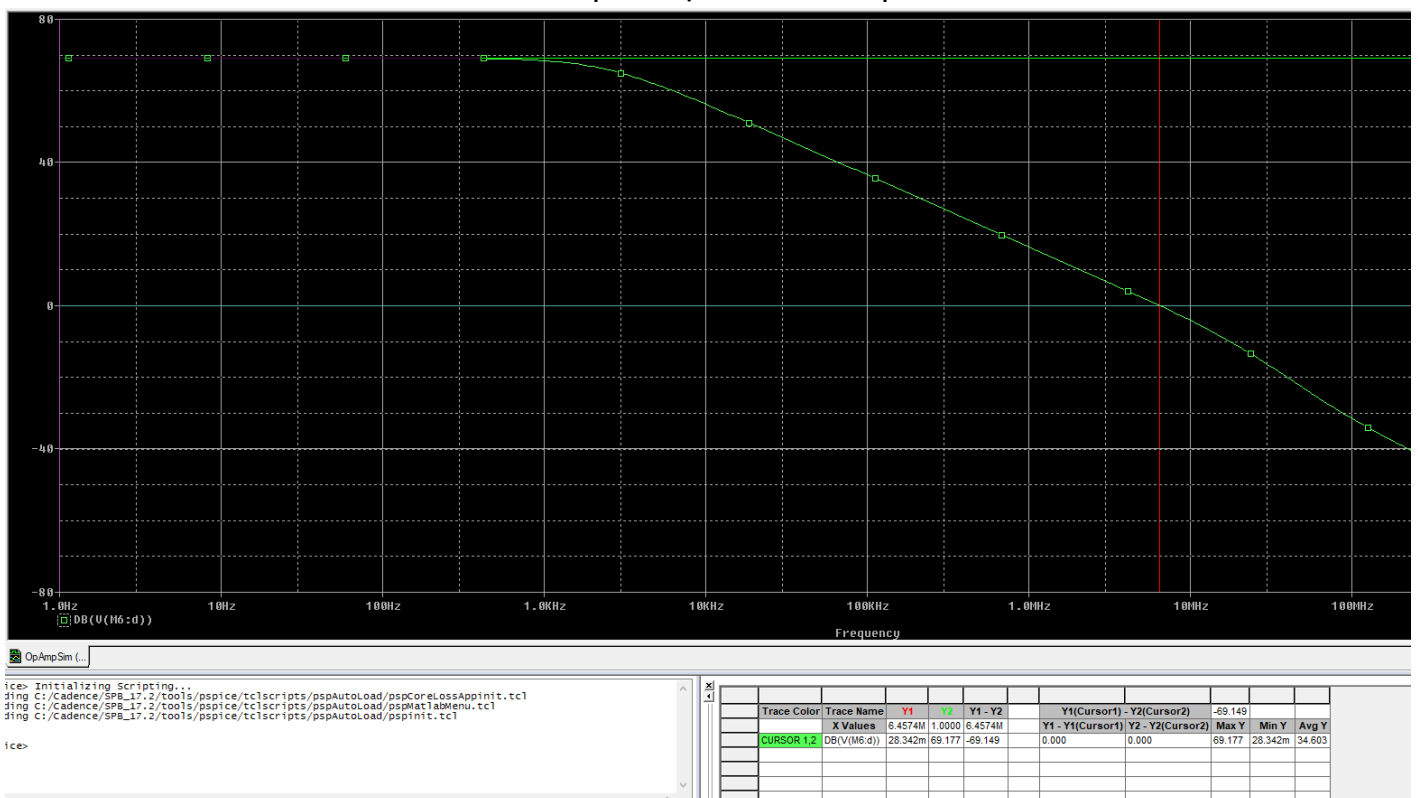


Figure 5:Αποτελέσματα AC Sweep

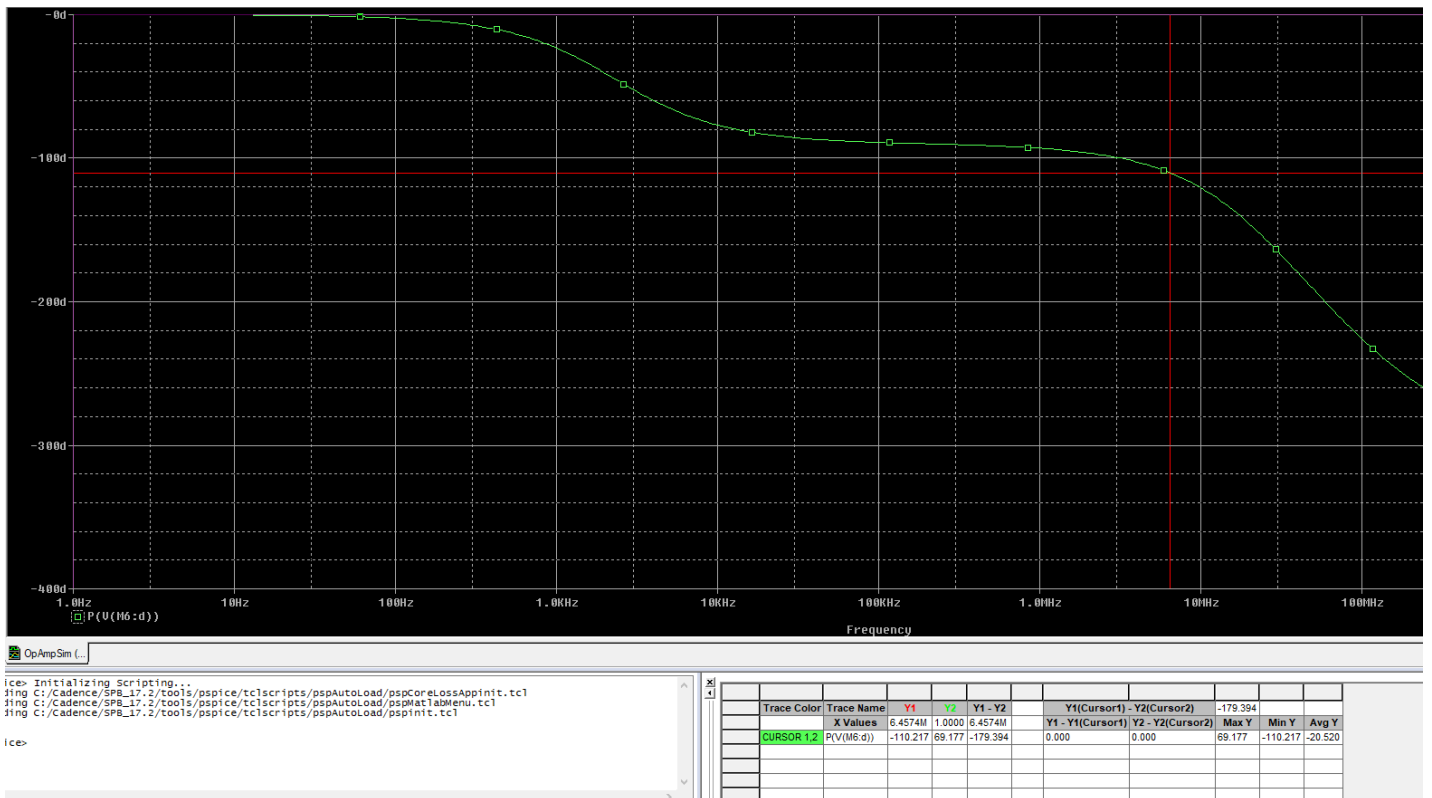


Figure 6:Αποτελέσματα AC Sweep

Από την γραφική παράσταση παραπάνω, παρατηρώ ότι το $GB=6.45\text{MHz}$, που είναι μικρότερο της προδιαγραφής που πρέπει να ικανοποιήσω. Βλέπω επίσης ότι το κέρδος είναι περίπου 70 dB, που ικανοποιεί την προδιαγραφή του κέρδους. Τέλος, τα όρια για το PM από 45 έως 60 μοίρες, και εδώ έχω περίπου 70. Ελέγχω τα ρεύματα I_5 και I_6 :

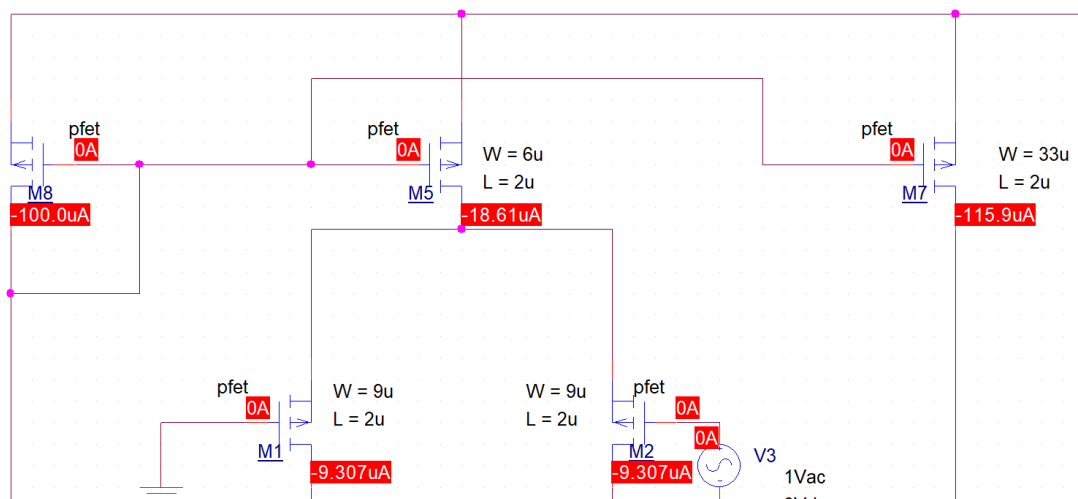


Figure 7:Έλεγχος ρευμάτων I_5 και I_6

Παρατηρώ ότι $I_5=18.6\mu\text{A}$ και $I_6=115.9\mu\text{A}$, που είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά που βρήκα παραπάνω και άρα προχωρώ στην φάση του tuning.

Tuning

Τα μεγέθη που ήταν εκτός προδιαγραφών είναι το GB και το PM. Για να τα βελτιώσω επιλέγω να αυξήσω το W_1 και W_2 , καθώς και να μειώσω το W_8 . Οι αλλαγές βοηθάνε κυρίως στην αύξηση του GB και στην μείωση του PM, ενώ η δεύτερη βοηθάει και στην αύξηση του SR. Αντί να μειώσω το W_8 μπορώ επίσης να αυξήσω τα W_5 , W_7 , ή ακόμα και να αυξήσω το I_{ref} , αλλαγές που οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή στην αύξηση των ρευμάτων I_5 και I_6 . Τελικά το κύκλωμά μου είναι το εξής:

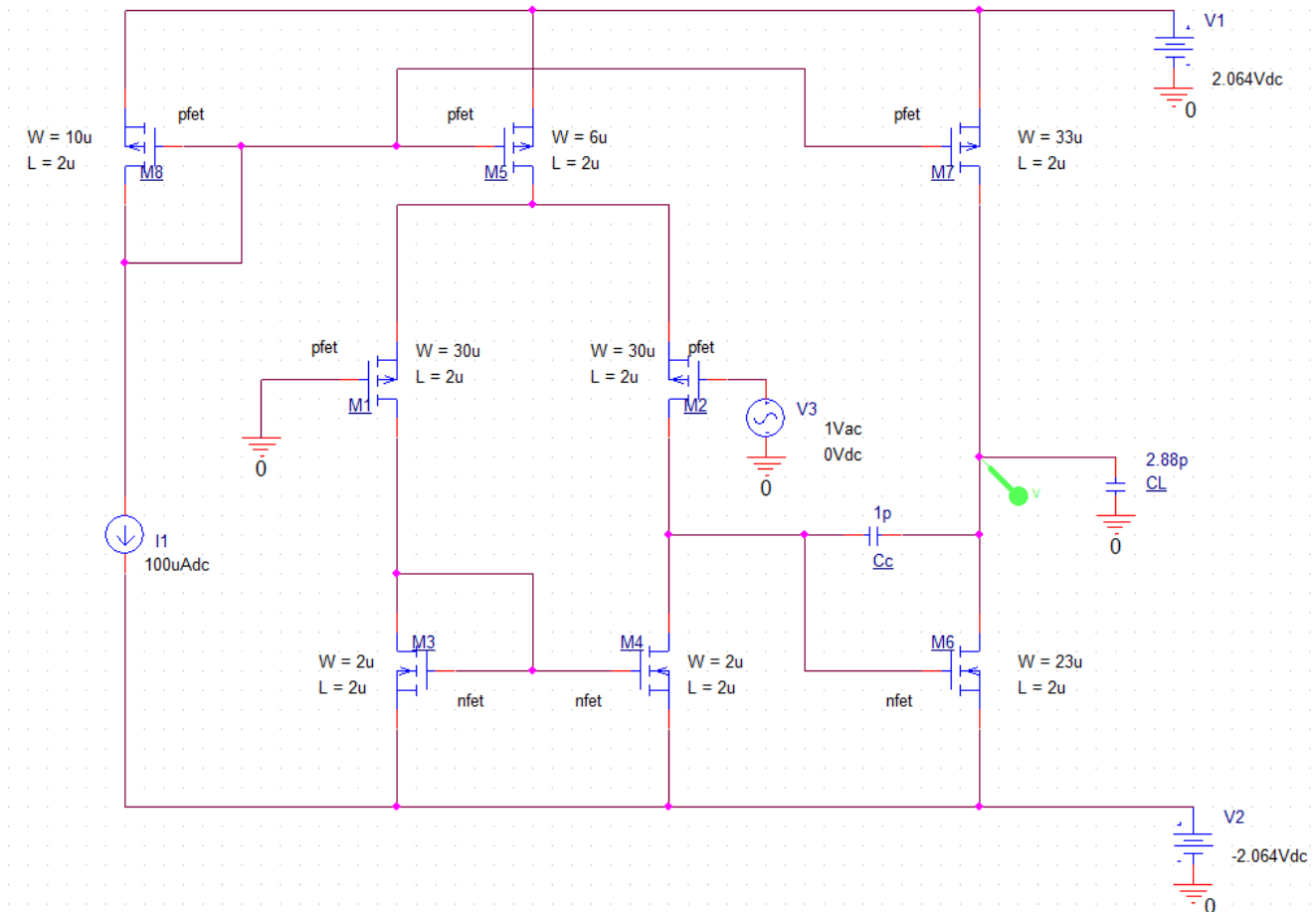


Figure 8: Το τελικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή

Στη συνέχεια, προχωράω στην επιβεβαίωση των ζητούμενων προδιαγραφών.

Επιβεβαίωση των ζητούμενων προδιαγραφών

Κέρδος Τάσης A – Gain

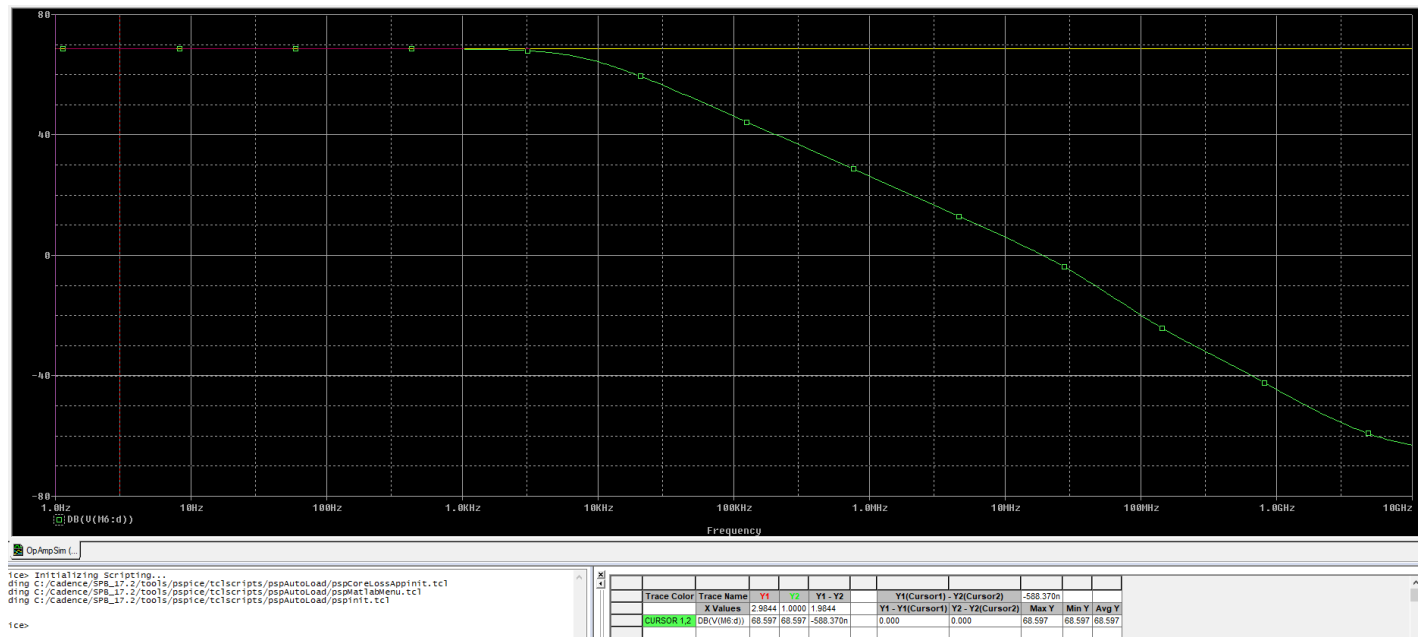


Figure 9:Μέτρηση κέρδους

Μετρώ Κέρδος **A=68.597dB** , το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ζητούμενο (>20.88dB) και προφανώς η προδιαγραφή ικανοποιείται.

Gain Bandwidth - GB

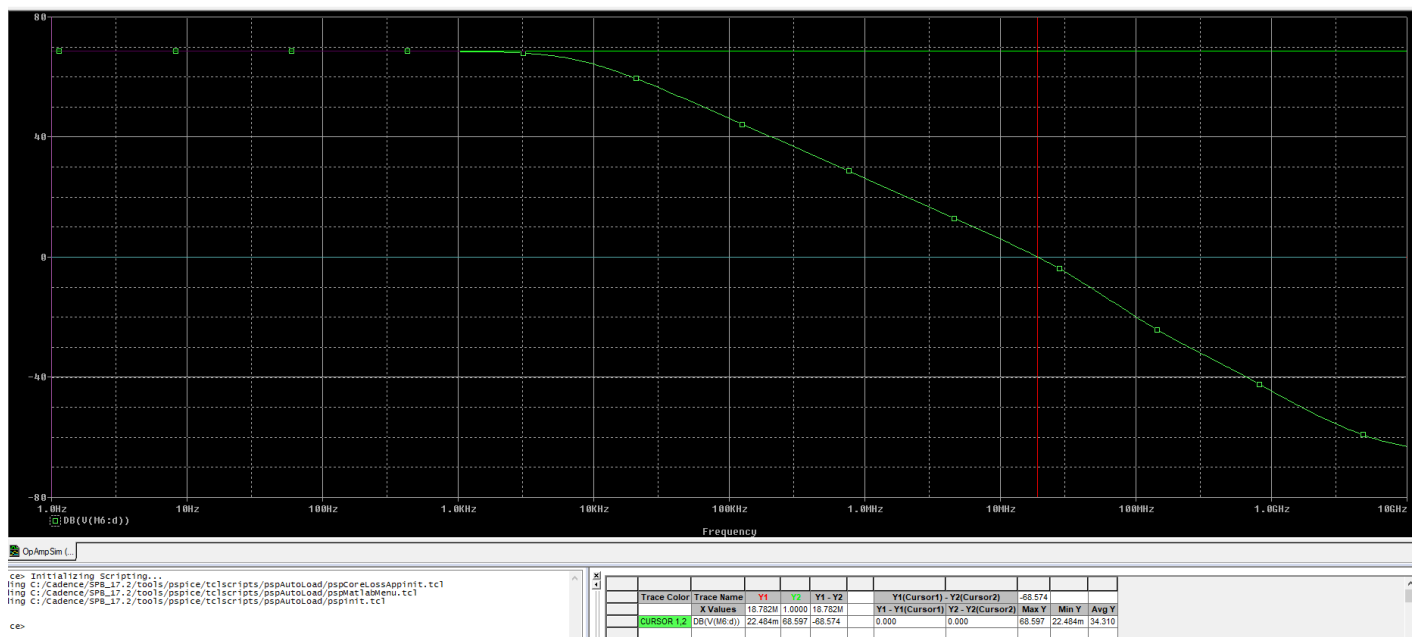


Figure 10:Μέτρηση Gain Bandwidth

Όταν το κέρδος είναι σχεδόν μηδέν, μετρώ την συχνότητα. Αυτό είναι το **GB=18.78MHz**, που είναι μεγαλύτερο του ζητούμενου (>7.88MHz) και ικανοποιείται η προδιαγραφή.

Περιθώριο Φάσης – Phase Margin

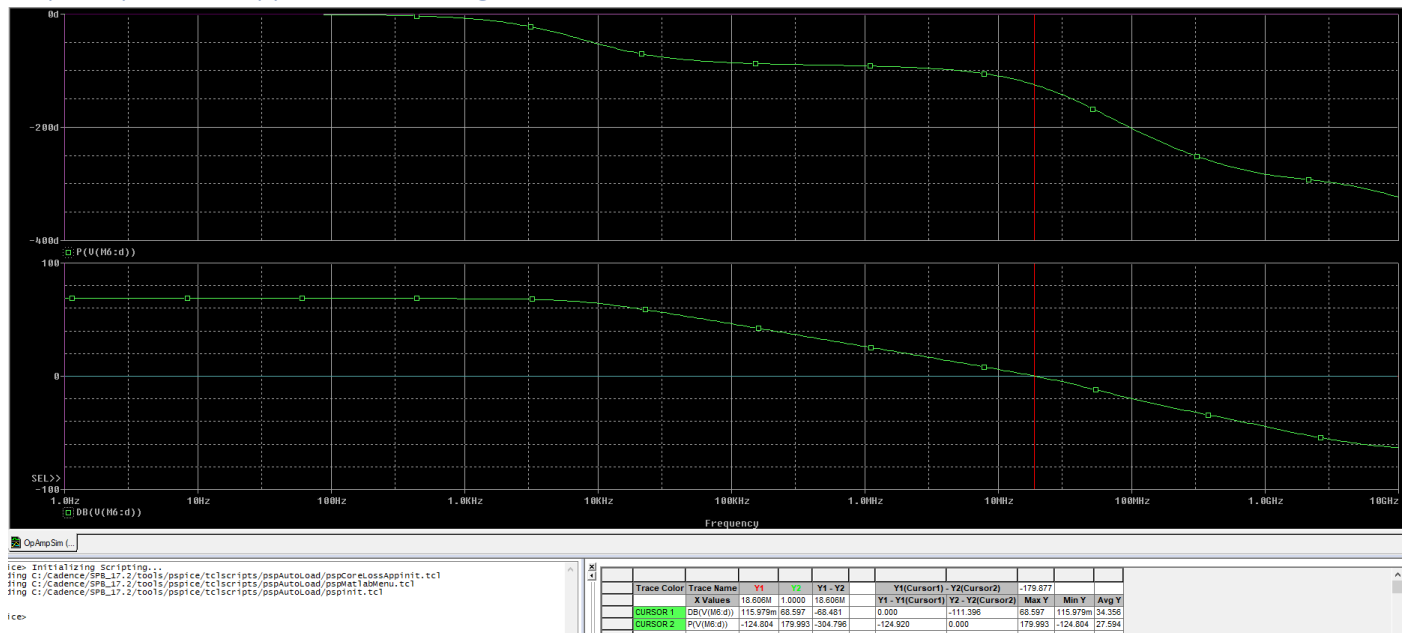


Figure 11: Μέτρηση περιθωρίου φάσης

Μετρώ το περιθώριο φάσης το οποίο είναι $PM = 180 - 124.8 \Rightarrow \mathbf{PM = 55.2^\circ}$, το οποίο είναι εντός των ορίων που θέλω το PM ($45^\circ < PM < 60^\circ$), και έτσι ικανοποιείται και αυτή η προδιαγραφή.

Slew Rate

Για να μετρήσω το Slew Rate αντικαθιστώ την AC πηγή στην είσοδο με μια πηγή παλμών (pulse) ως εξής:

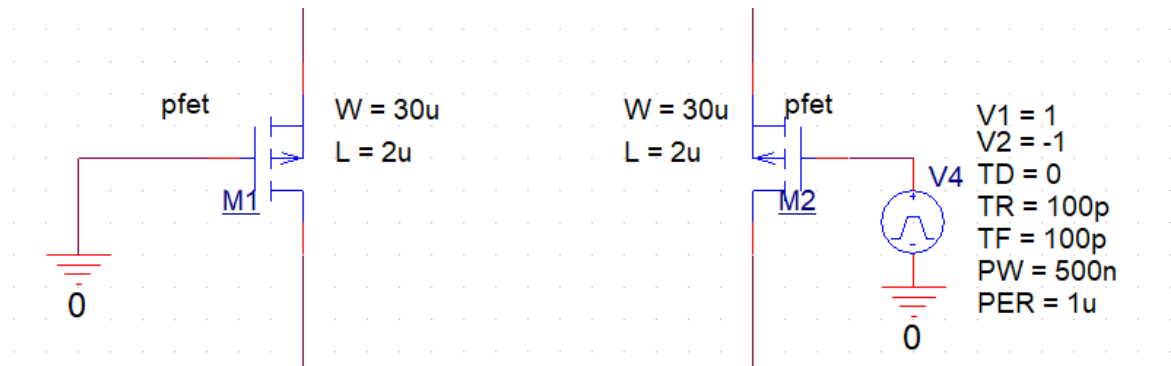


Figure 12: Πηγή pulse για μέτρηση Slew Rate

Επίσης, αλλάζω το είδος της προσομοίωσης από AC Sweep σε Time Domain ως εξής:

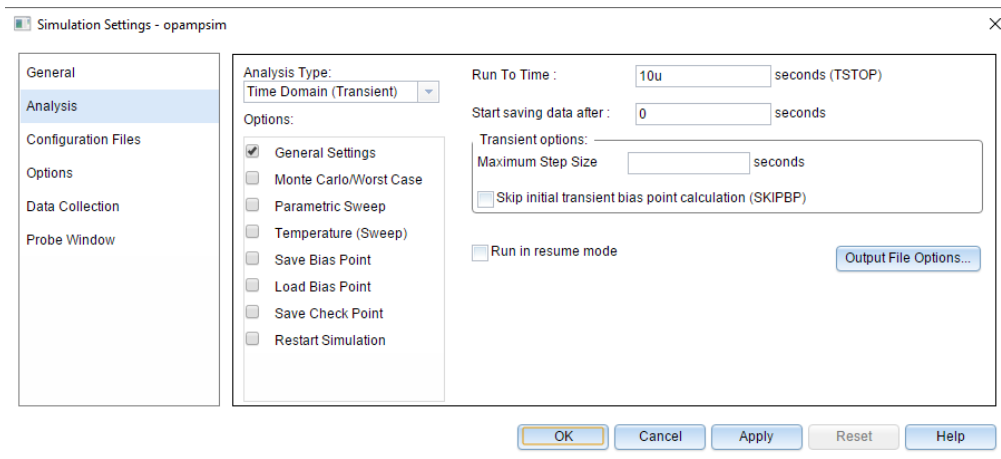


Figure 13: Προσωμοίωση Time Domain για μέτρηση Slew Rate

Προχωρώ στην προσομοίωση, και σύμφωνα με την εκφώνηση, για να μετρήσω το SR υπολογίζω το MAX(D(OUT)), όπως φαίνεται παρακάτω:

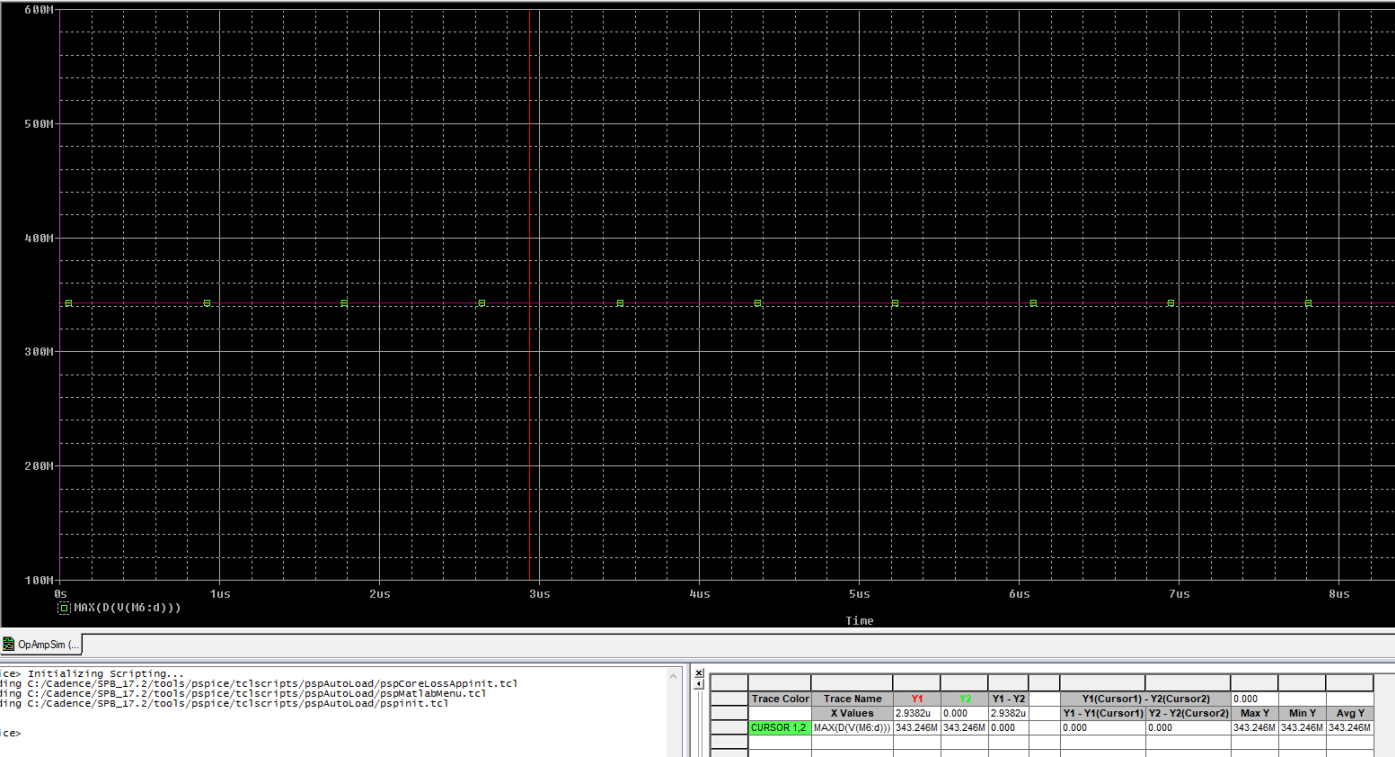


Figure 14:Μέτρηση Slew Rate

Μετρώ **SR=343.24 V/μs**, το οποίο είναι μεγαλύτερο του ζητούμενου (>18.88 V/μs), και άρα η προδιαγραφή ικανοποιείται.

Ισχύς κατανάλωσης P

Η ισχύς που καταναλώνει το κύκλωμά μου είναι η ισχύς που προσφέρουν οι δύο DC πηγές. Όπως βλέπω και στις φωτογραφίες παρακάτω $P=(488.5\mu A \cdot 2.064V) + (488.5\mu A \cdot |-2.064V|)$ => **P=2.016mW**, που ικανοποιεί την προδιαγραφή (<50.88mW). Χρησιμοποιώ και τους markers ισχύος για να επιβεβαιώσω το αποτέλεσμα.

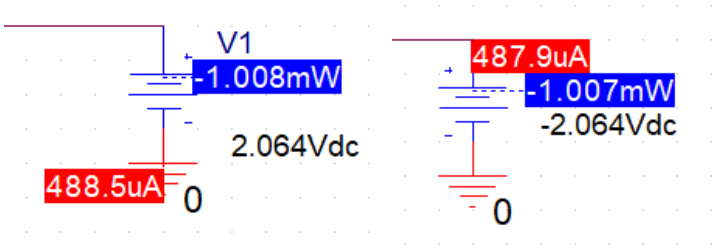


Figure 15: DC πηγές με markers ισχύος

Τελικά Αποτελέσματα

Μέγεθος	Τιμή από προσομοίωση	Ζητούμενα όρια
Κέρδος	68.597dB	> 20.88dB
Gain Bandwidth	18.78MHz	>7.88MHz
Phase Margin	55.2°	45°- 60°
Slew Rate	343.24 V/μs	>18.88 V/μs
Καταναλισκόμενη Ισχύς	2.016mW	<50.88 mW

Θερμοκρασιακή Ανάλυση

Κάνω παραμετρική ανάλυση σε τρεις θερμοκρασίες: -40, 20, 85 °C και μετρώ τις παραπάνω τιμές στις τρεις θερμοκρασίες.

Κέρδος

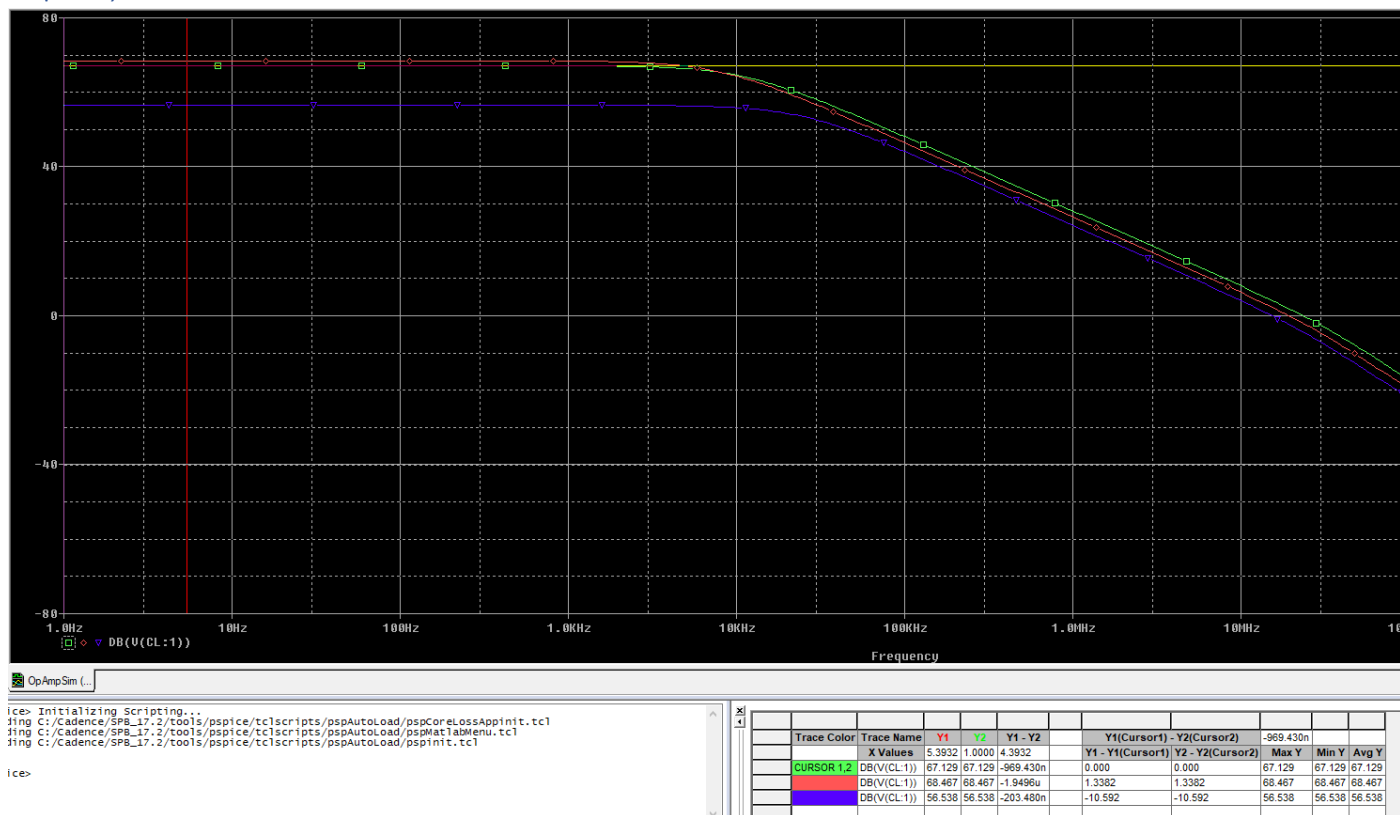


Figure 16:Μέτρηση κέρδους σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πράσινο -40, Κόκκινο 20, Μπλέ 85 βαθμοί Κελσίου

Παρατηρώ ότι και τα τρία κέρδη είναι μεγαλύτερα από την προδιαγραφή που έχω να ικανοποιήσω.

Gain Bandwidth

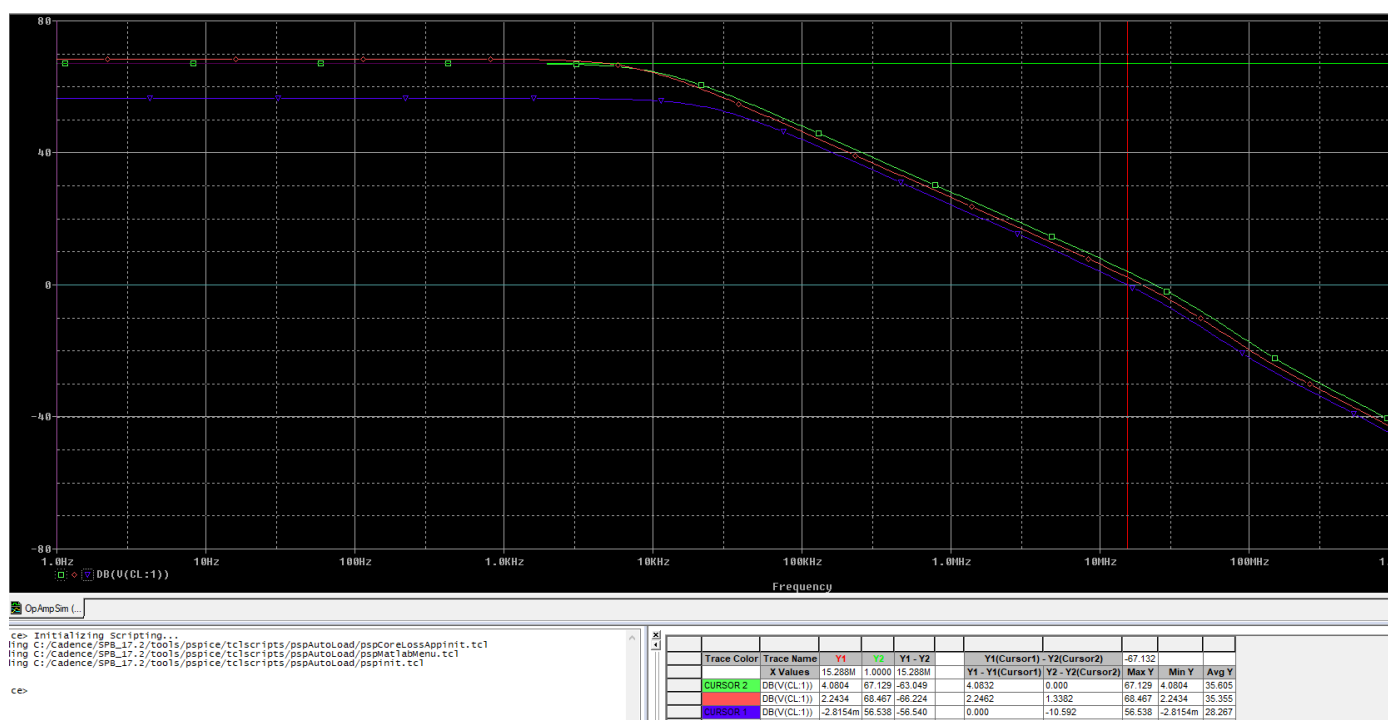


Figure 17:Μέτρηση GB.Πράσινο -40, Κόκκινο 20, Μπλέ 85 βαθμοί Κελσίου

Παρατηρώ ότι το GB είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας, δηλαδή το μικρότερο GB είναι στους 85°C και είναι 15.28MHz, και ακολουθούν στους 20°C με 19.27MHz και στους -40°C με 23.37MHz. Όλες οι τιμές είναι πάνω από το ζητούμενο όριο των 7.88MHz.

Περιθώριο Φάσης – Phase Margin

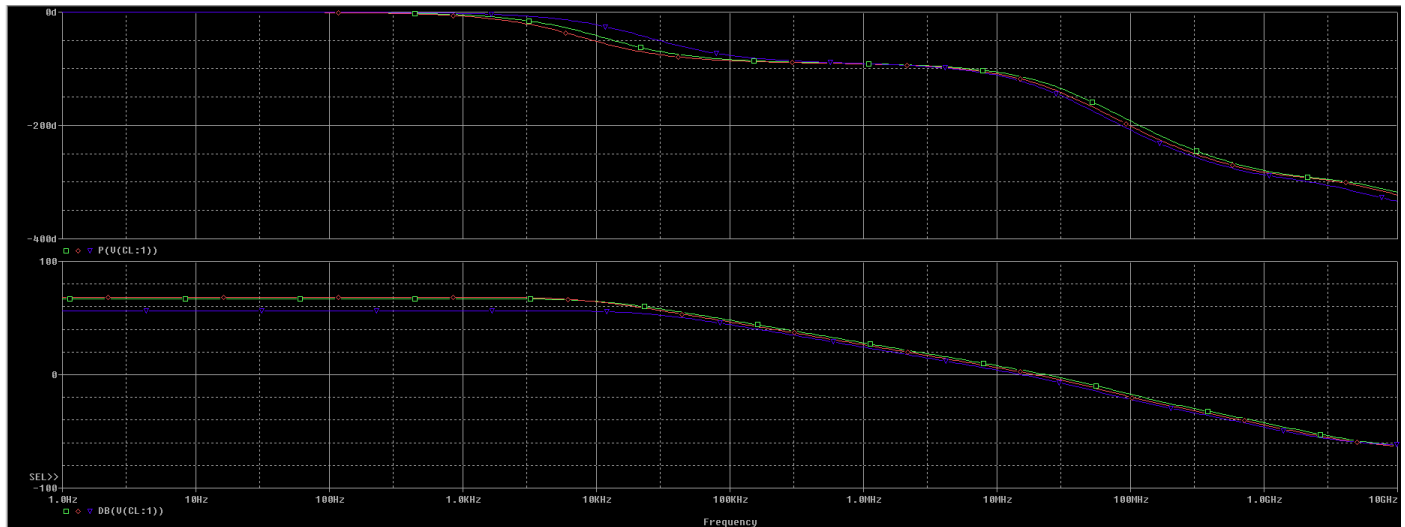


Figure 18: Μέτρηση PM για τις τρεις θερμοκρασίες

Από μέτρηση προκύπτει ότι στους -40°C έχω PM 54.3°, στους 20°C έχω 54.9° και στους 85°C έχω 57.5°. Για όλες τις θερμοκρασίες λοιπόν είμαι εντός των ορίων που δίνονται από την εκφώνηση.

Slew Rate

Ακολουθώ την ίδια διαδικασία με πριν, αλλάζοντας την πηγή και κάνοντας transient προσομοίωση και έχω:

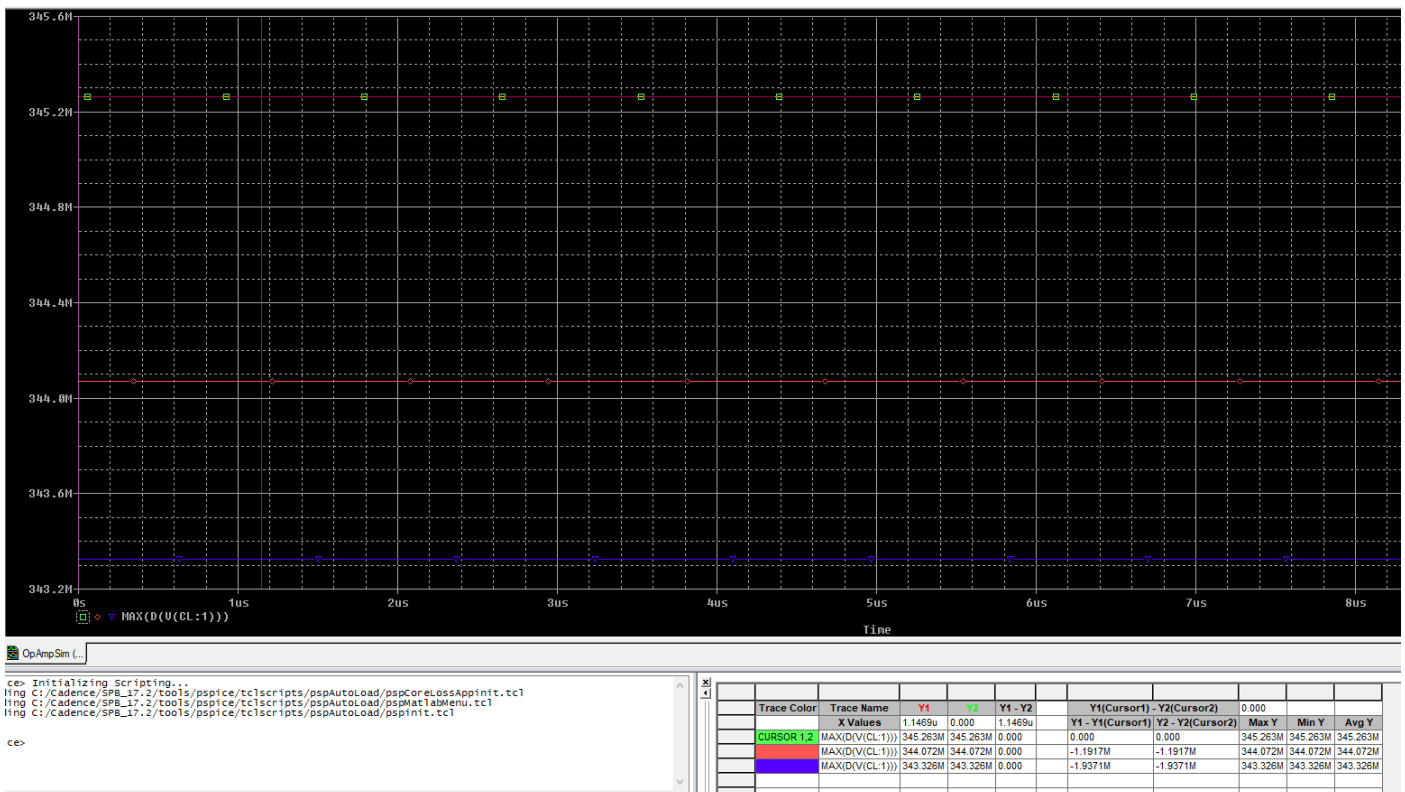


Figure 19: Μέτρηση Slew Rate. Πράσινο -40, Κόκκινο 20, Μπλέ 85 βαθμοί Κελσίου

Μετράω το Slew Rate, και στους -40°C έχω 345 V/μs, στους 20°C έχω 344 V/μs και στους 85°C έχω 343 V/μs. Παρατηρώ πως έχω Slew Rate σχεδόν σταθερό και μεγαλύτερο του ορίου που πρέπει να ικανοποιήσω και για τις τρεις θερμοκρασίες.

Ισχύς Κατανάλωσης

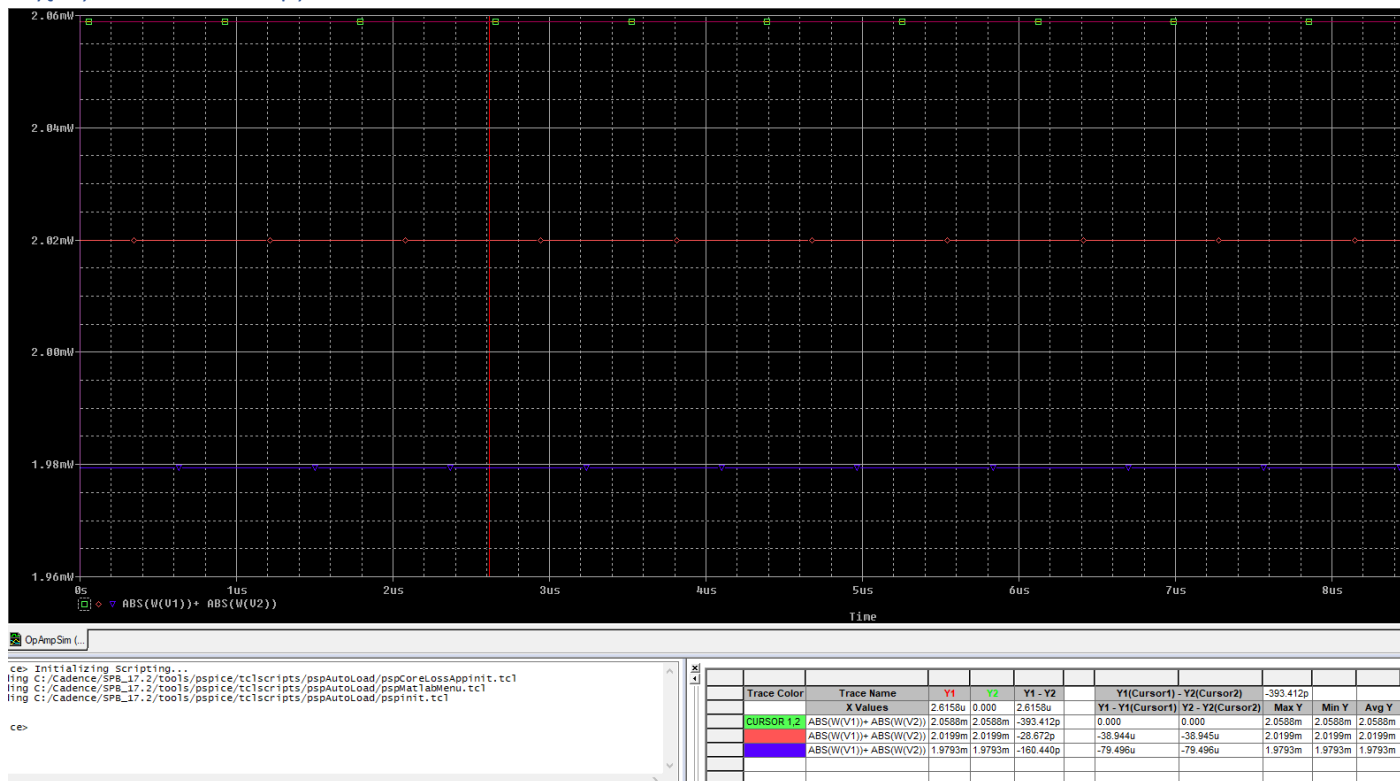


Figure 20:Μέτρηση ισχύος. Πράσινο -40, Κόκκινο 20, Μπλέ 85 βαθμοί Κελσίου

Μετράω τις ισχύς, και παρατηρώ πως είναι περίπου σταθερές γύρω από τα 2mW, πολύ μικρότερα του ορίου 50.88mW.

Τελικά αποτελέσματα

Μέγεθος\Θερμοκρασία	-40°C	20°C	85°C
Κέρδος	67dB	68dB	56dB
Gain Bandwidth	23.37MHz	19.27MHz	15.28MHz
Phase Margin	54.3°	54.9°	57.5°
Slew Rate	345V/μs	344V/μs	343V/μs
Καταναλισκόμενη Ισχύς	2.05mW	2.01mW	1.97mW

Παρατηρώ ότι έχω αρκετά καλή συμπεριφορά σε μεγάλο εύρος μεταβολής της θερμοκρασίας, και οι μετρούμενες τιμές παραμένουν σχετικά σταθερές. Το σημαντικό είναι πως και για τις τρεις θερμοκρασίες παραπάνω, ικανοποιώ τις προδιαγραφές σε κάθε περίπτωση.