

Ηλεκτρονική 3

Σχεδιασμός Τελεστικού Ενισχυτή

Όνοματεπώνυμο	AEM	E-mail
Κοσέογλου Σωκράτης	8837	sokrkose@ece.auth.gr

Παράμετροι.

Αρχικά, παρακάτω φαίνονται οι προδιαγραφές καθώς και οι τιμές κάποιων στοιχείων του ενισχυτή με βάση τα 2 τελευταία ψηφία του AEM (δηλ. 37).

Παράμετρος	Τιμή
C_L	2.37 pF
SR	18.37 V/ μ s
V_{DD}	1.911 V
V_{SS}	-1.911 V
GB	> 7.37 MHz
A	> 20.37 dB
P	< 50.4 mW

Αλγόριθμος.

1) Το μήκος καναλιού L πρέπει να είναι 1,5 με 2 φορές μεγαλύτερο από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε για να αποφευχθούν φαινόμενα καναλιού μικρού μήκους(short channel effects). Επομένως, **L = 1 μ m**.

2) Υπολογίζουμε την ελάχιστη χωρητικότητα Miller C_c ώστε να έχουμε περιθώριο φάσης 60°.

Επομένως, $C_c > 2.2C_L = \mathbf{5.214 \text{ pF}}$.

Άρα **$C_{cmin} = 5.214 \text{ pF}$** .

3)Υπολογίζουμε το ρεύμα πόλωσης διαφορικού ζεύγους $I_5 = SR * C_{cmin} = \mathbf{95.78118 \mu A}$.

$$S_3 = \left(\frac{W_3}{L_3} \right) = \frac{I_5}{k_3 * [V_{DD} - V_{in(max)} - |V_{T03}|(max) + V_{T1}(min)]^2}$$

4)Επομένως, $S_3 = 0.0704$ και πρέπει $S > 1$. Συνεπώς επιλέγουμε $S_3 = S_4 = 1$. Έτσι, τα transistor ενεργού φορτίου έχουν καθοριστεί.

5) Ελέγχουμε αν $p_3 > 10 * GB = \mathbf{73.7 \text{ MHz}}$, ώστε να μην επηρεάζεται η συχνότητα αποκοπής του τελεστικού.

$$\text{Ισχύει } |p_3| \approx \frac{g_{m3}}{2C_{gs3}} = \frac{\sqrt{2 * k_p * S_3 * \frac{I_5}{2}}}{2 * 0.667 * W_3 * L_3 * C_{ox}} :$$

$p_3 = 12.571 \text{ GHz} > \mathbf{73.7 \text{ MHz}}$, οπότε η συνθήκη ικανοποιείται.

6)Υπολογίζουμε την διαγωγιμότητα των transistor εισόδου g_{m1} , g_{m2} , καθώς και τα S_1, S_2 .

$$g_{m1} = g_{m2} = GB * C_c$$

$$S_1 = S_2 = \frac{g_{m2}^2}{k_n I_5} :$$

Επομένως προκύπτει $S_1 = S_2 = 0.8317$ και όπως στο βήμα 4 επιλέγουμε **$S_1 = S_2 = 1$** .

7)Υπολογίζουμε την τάση κόρου της πηγής του διαφορικού ζεύγους και το S_5 .

$$V_{DS5_sat} = V_{in}(min) - V_{SS} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - V_{T1}(max)$$

Επομένως $V_{DS5_sat} = 836.8 \text{ mV} > 100 \text{ mV}$, και εφόσον καλύπτεται η συγκεκριμένη συνθήκη,

Επομένως, $S_5 = 0.3444$, και επιλέγουμε **$S_5 = 1$** .

$$S_5 = \frac{2I_5}{k_p * V_{DS5_sat}^2} :$$

8-9)Στην δεύτερη βαθμίδα, υπολογίζουμε την διαγωγιμότητα του transistor 6, ελέγχουμε αν είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του transistor 1. Κατόπιν, υπολογίζουμε S_6 και I_6 .

$$g_{m6} = 2.2 * g_{m2} * \frac{C_L}{C_C}$$

$$g_{m4} = \sqrt{\left(2 * k_p * S_4 * \frac{I_5}{2}\right)}$$

$$S_6 = S_4 * \frac{g_{m6}}{g_{m4}}$$

$$I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2 * k_p * S_6}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει $S_6 = 11.7853$, οπότε **$S_6 = 12$** .

10)Υπολογίζουμε το S_7 .

$$S_7 = \frac{I_6}{I_5} * S_5 :$$

Προκύπτει $S_7 = 5.3978$, οπότε **$S_7 = 6$** .

11)Υπολογίζουμε το συνολικό κέρδος και την συνολική κατανάλωση ισχύος.

$$A_v = \frac{2 * g_{m2} * g_{m6}}{I_5 * (l_2 + l_3) * I_6 * (l_6 + l_7)}$$

$$P_{diss} = (I_5 + I_6) * (V_{dd} + |V_{ss}|)$$

Προκύπτει ότι $P_{diss} = 0.3693\text{mW} < P_{max} = 50.4\text{ mW}$ και $A_v = 27.3163\text{ dB} > A_{vmin} = 20.37\text{ dB}$, οπότε θεωρητικά πληρούνται οι παραπάνω συνθήκες.

Οπότε, ξεκινάμε την προσομοίωσή μας με τις παρακάτω τιμές για τα transistor.

Transistor	W (μm)	L (μm)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	12	1
7	6	1
8	1	1

MATLAB Script.

```

AEM=37;

CL = (2+0.01*AEM)*10^(-12);
SRmin = (18+0.01*AEM)*10^(6);
Vdd = 1.8+0.003*AEM;
Vss = -Vdd;
GBmin = (7+0.01*AEM) * 10^(6);
Amin = (20+0.01*AEM);
Pmax = (50+0.01*AEM)*10^(-3);

VTon = 0.7860;
kn = 100*10^(-6);
k1 = kn;
k2 = kn;
k5 = kn;
k7 = kn;
k8 = kn;

VTop = -0.9056;
kp = 50*10^(-6);
k3 = kp;
k4 = kp;

```

```

k6 = kp;
Cox = 2.3*10^(-3);
Vinmax = 100*10^(-3);
Vinmin = -100*10^(-3);

L = 1*10^(-6);

Ccmin=0.22*CL;

I5min = Ccmin*SRmin;

S3 = ceil(I5min / (k3*(Vdd - Vinmax - abs(VTop) + VTon)^2));
S4 = S3;

p3=sqrt(kp* S3 * I5min)/(2 * 0.667 * S3 * (L^2) * Cox);

gm1 = 2*pi*GBmin*Ccmin;
gm2=gm1;
S1 = ceil(gm1^2/(k2*I5min));
S2=S1;

b1 = k1*S1;
VT1 = VTon;
VDs5_sat = Vinmin - Vss - sqrt(I5min/b1)-VT1;
S5 = ceil((2*I5min)/(k5*(VDs5_sat)^2));
S8=S5;

gm4 = sqrt(2 * kp * S4 * I5min/2);
gm6 = 2.2*gm2*CL/Ccmin;
S6 = ceil(S4*gm6/gm4);
I6 = gm6^2/(2*k6*S6);

S7 = ceil(S5*I6/I5min);

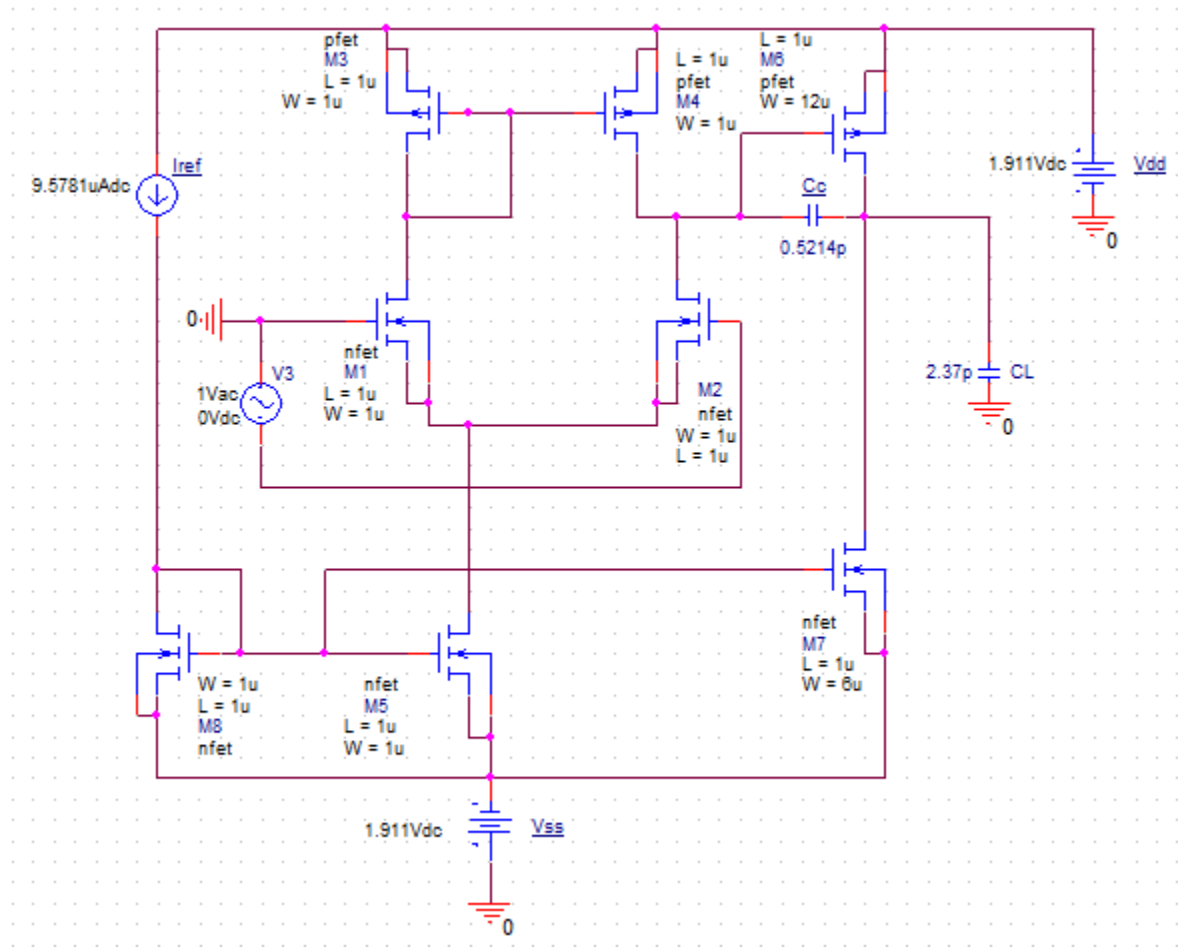
ln = 0.05;
lp = 0.15;
Pdiss = (I5min+I6)*(Vdd + abs(Vss));
Av = 2*gm2*gm6/(I5min*I6*(ln+lp)^2);
Av_dB = 10*log10(Av);

W1 = S1 * L;
W2 = S2 * L;
W3 = S3 * L;
W4 = S4 * L;
W5 = S5 * L;
W6 = S6 * L;
W7 = S7 * L;
W8 = W5;

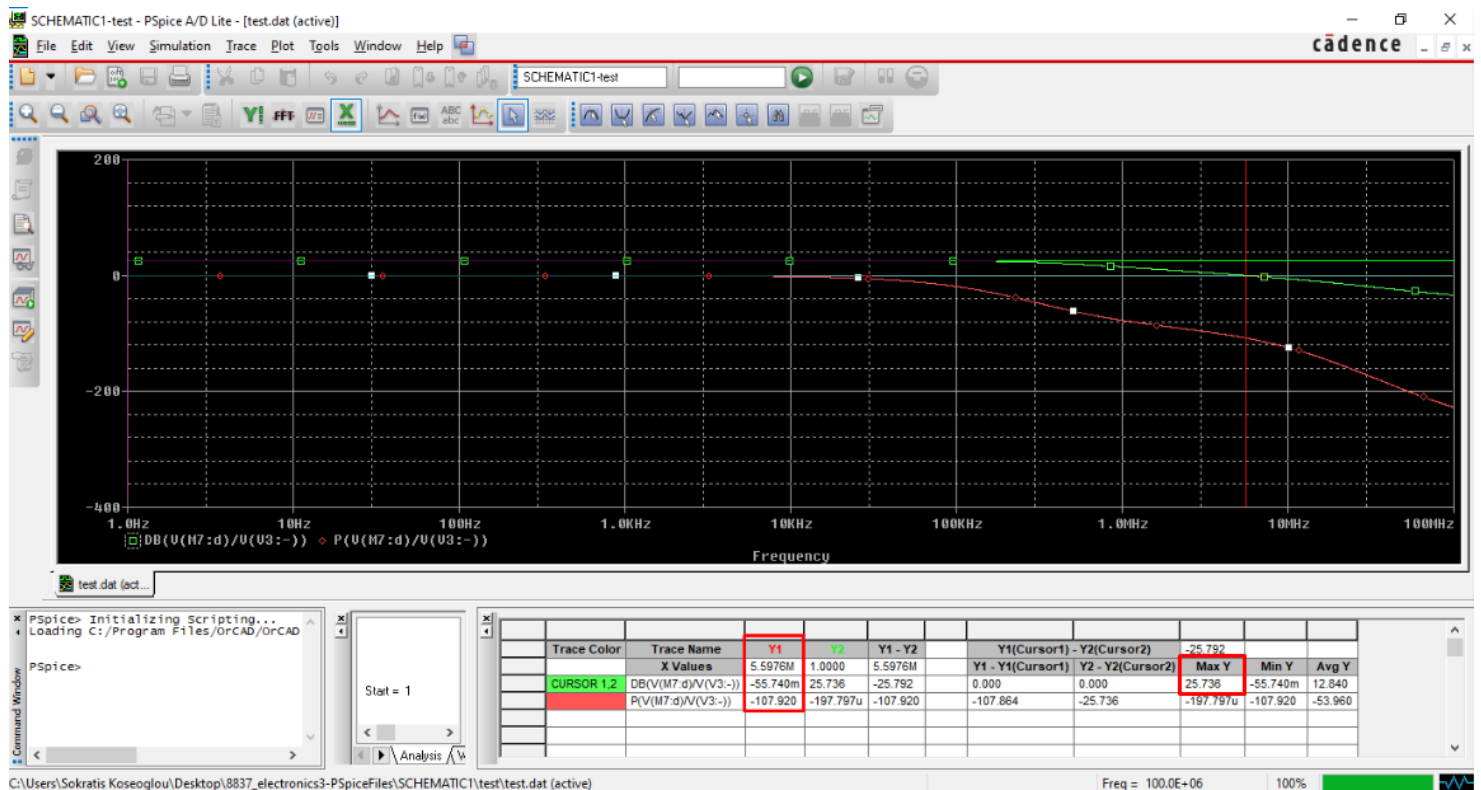
```

PSpice Simulation.

Σχεδιάζουμε το παρακάτω κύκλωμα με βάση τις τιμές που προέκυψαν από τον αλγόριθμο.

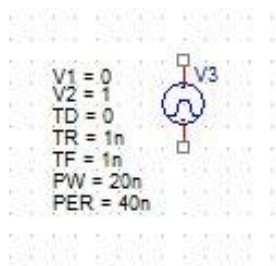


Κάνοντας ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας έχουμε τα παρακάτω Bode Plots.

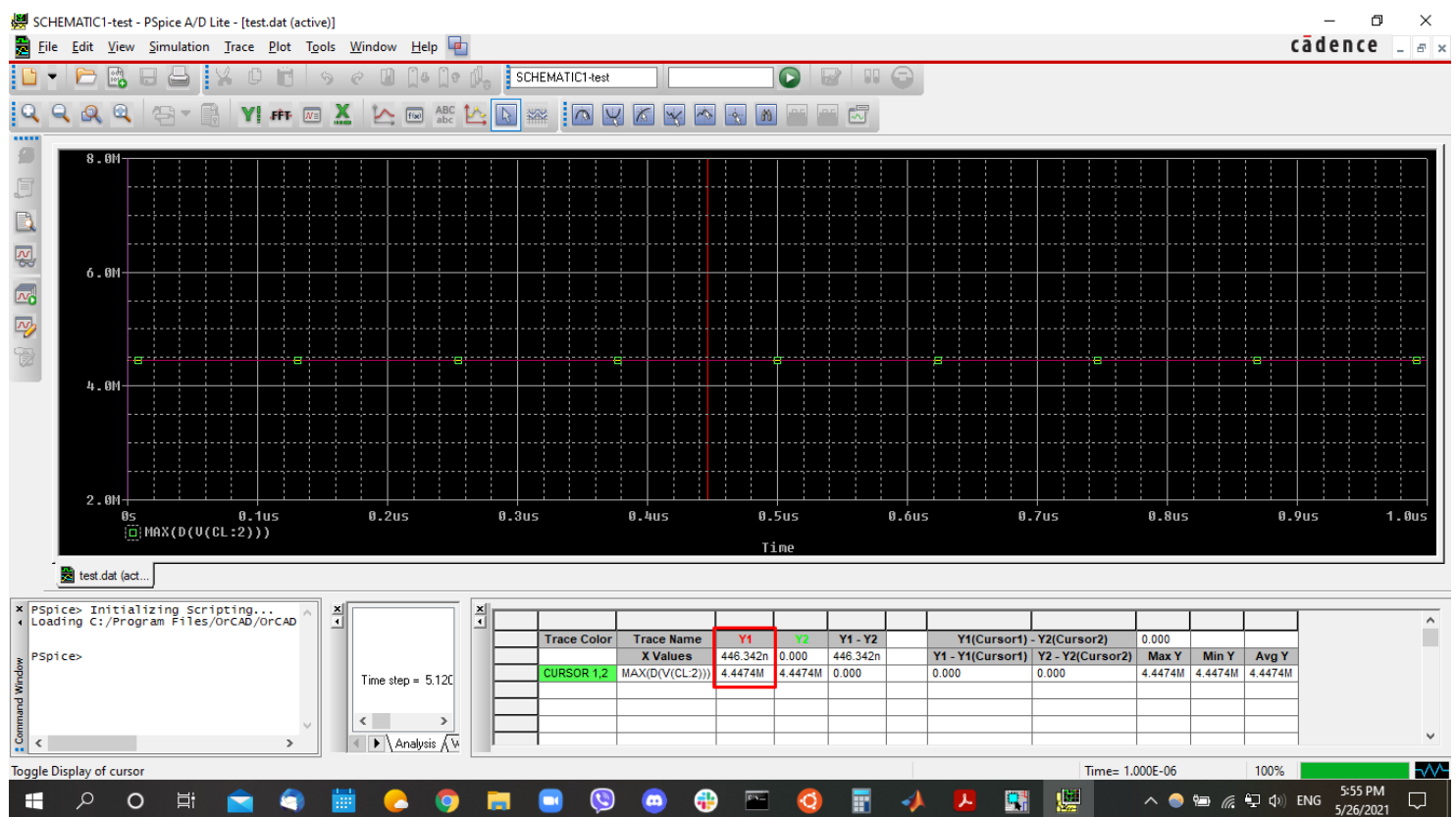


Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι $A_v = 25.736 \text{ dB}$, συνεπώς η προδιαγραφή αυτή ικανοποιείται. Βλέπουμε όμως ότι $GB = 5.59 \text{ MHz}$ και ότι το **περιθώριο φάσης** είναι $180^\circ - 107.92^\circ = 72.08^\circ$. Συνεπώς οι δύο αυτές προδιαγραφές δεν πληρούνται.

Ακόμη, για να υπολογίσουμε το **Slew Rate SR** θα αντικαταστήσουμε την AC πηγή τάσης με μια πηγή παλμών όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Έπειτα, θα κάνουμε ανάλυση το κύκλωμα στο πεδίο του χρόνου και θα βγάλουμε την παρακάτω γραφική παράσταση.

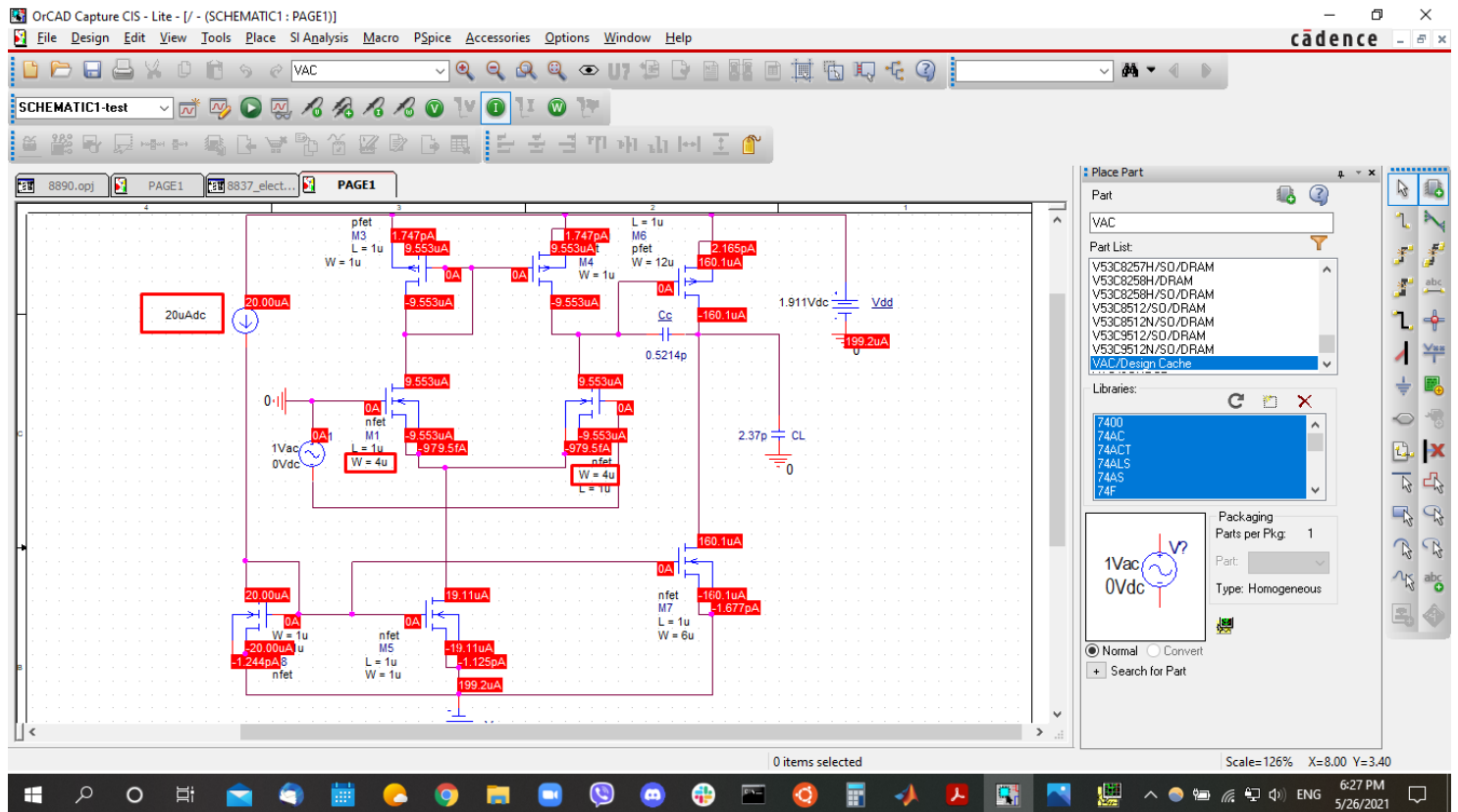


Συνεπώς, βλέπουμε ότι ισχύει $SR = 4.4474 \text{ V}/\mu\text{s}$. Συνεπώς ούτε αυτή η προδιαγραφή δεν πληρείται.

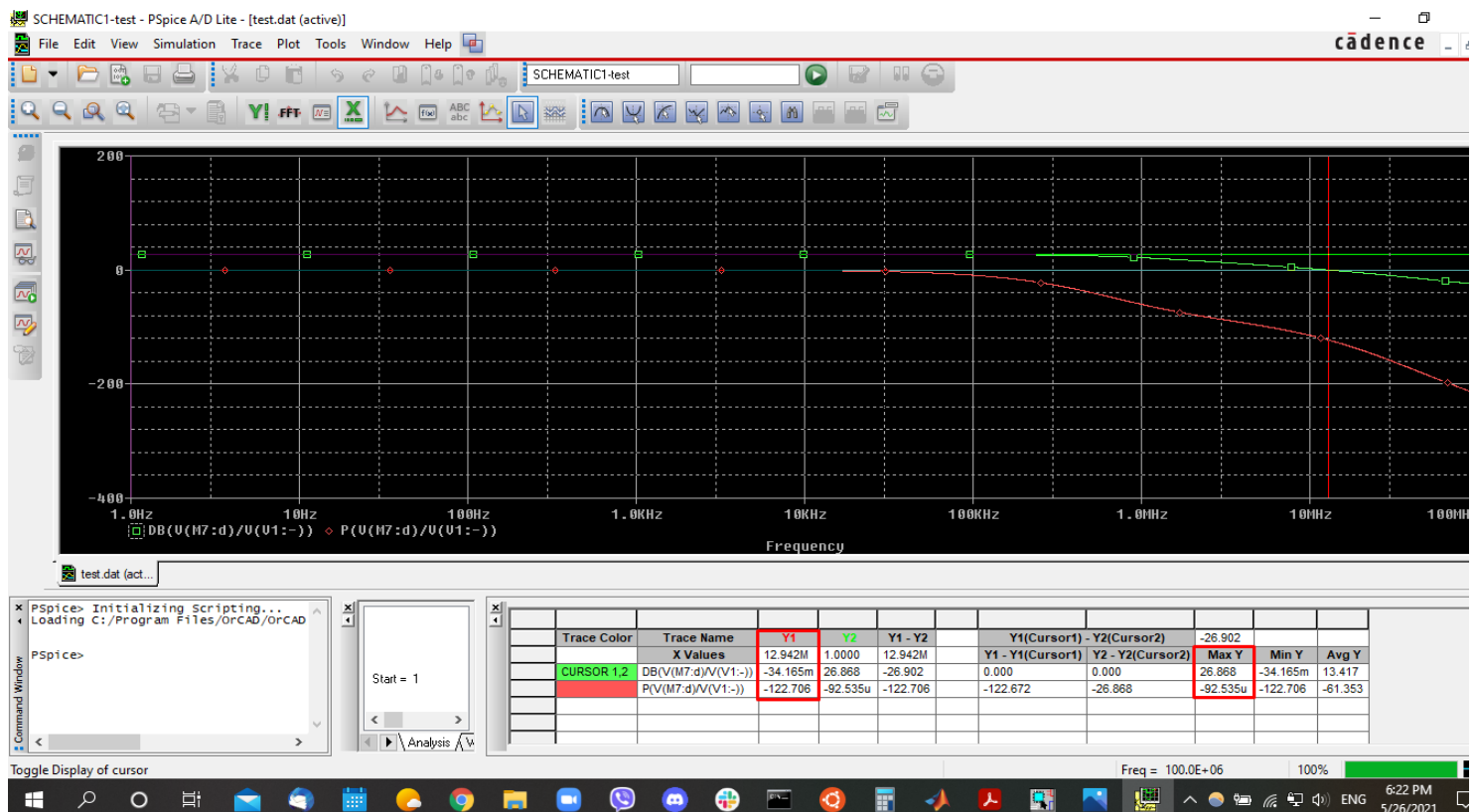
PSpice Tuned Simulation.

Υστερα από tuning διαφόρων παραμέτρων του κυκλώματος, **αυξήθηκαν** το ρεύμα το **I5** καθώς και τα **W1** και **W2**.

Έτσι προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα, με τα εξής ρεύματα.

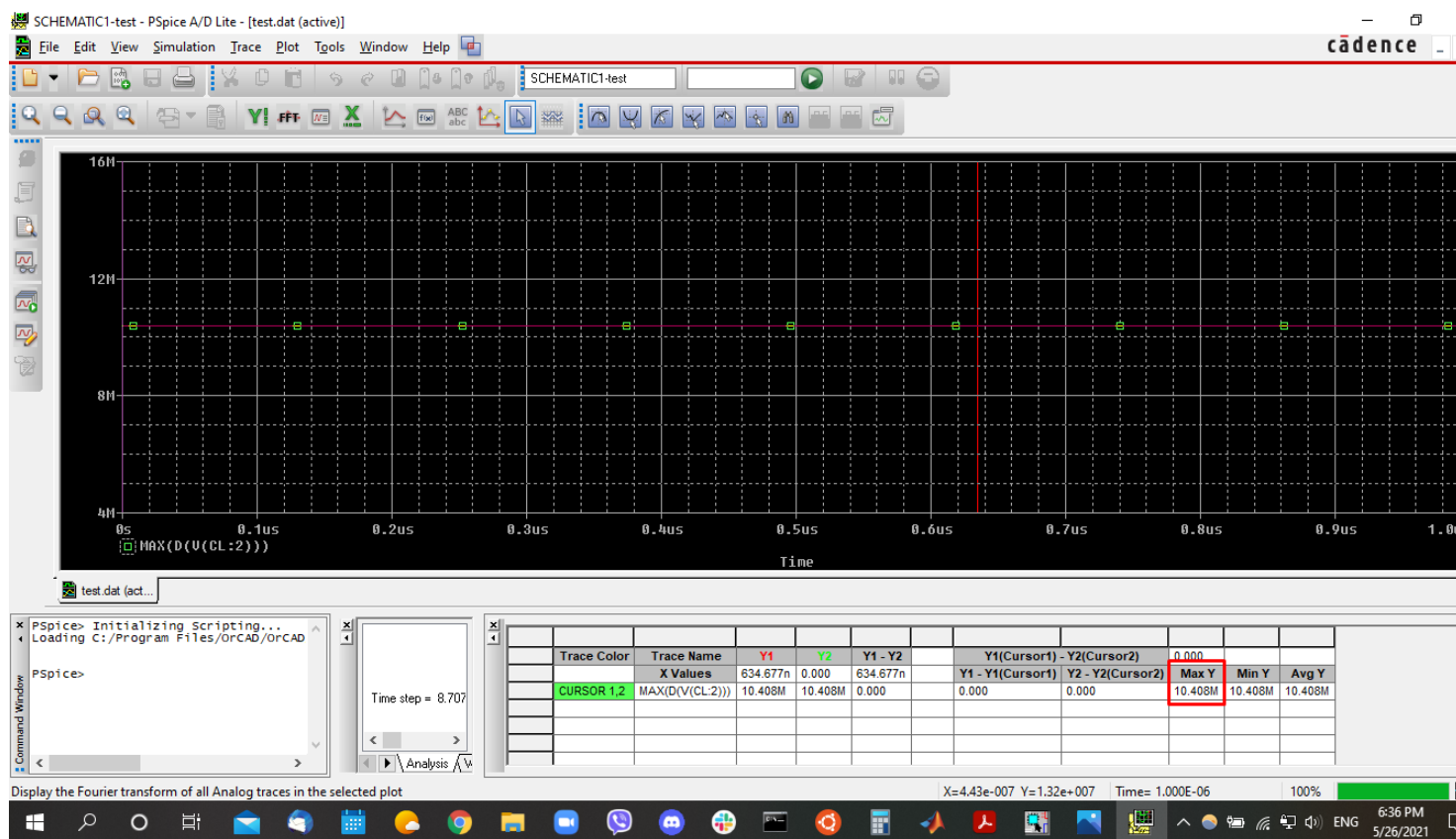


Στην συνέχεια, όπως και προηγουμένως κάνουμε ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας και έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι $A_v = 26.868 \text{ dB}$, ότι $GB = 12.942 \text{ MHz}$ και ότι το **περιθώριο φάσης** είναι $180^\circ - 122.706^\circ = 57.294^\circ$. Συνεπώς όλες οι προδιαγραφές **πληρούνται**.

Έπειτα, κάνουμε και πάλι ανάλυση στο πεδίο του χρόνου,



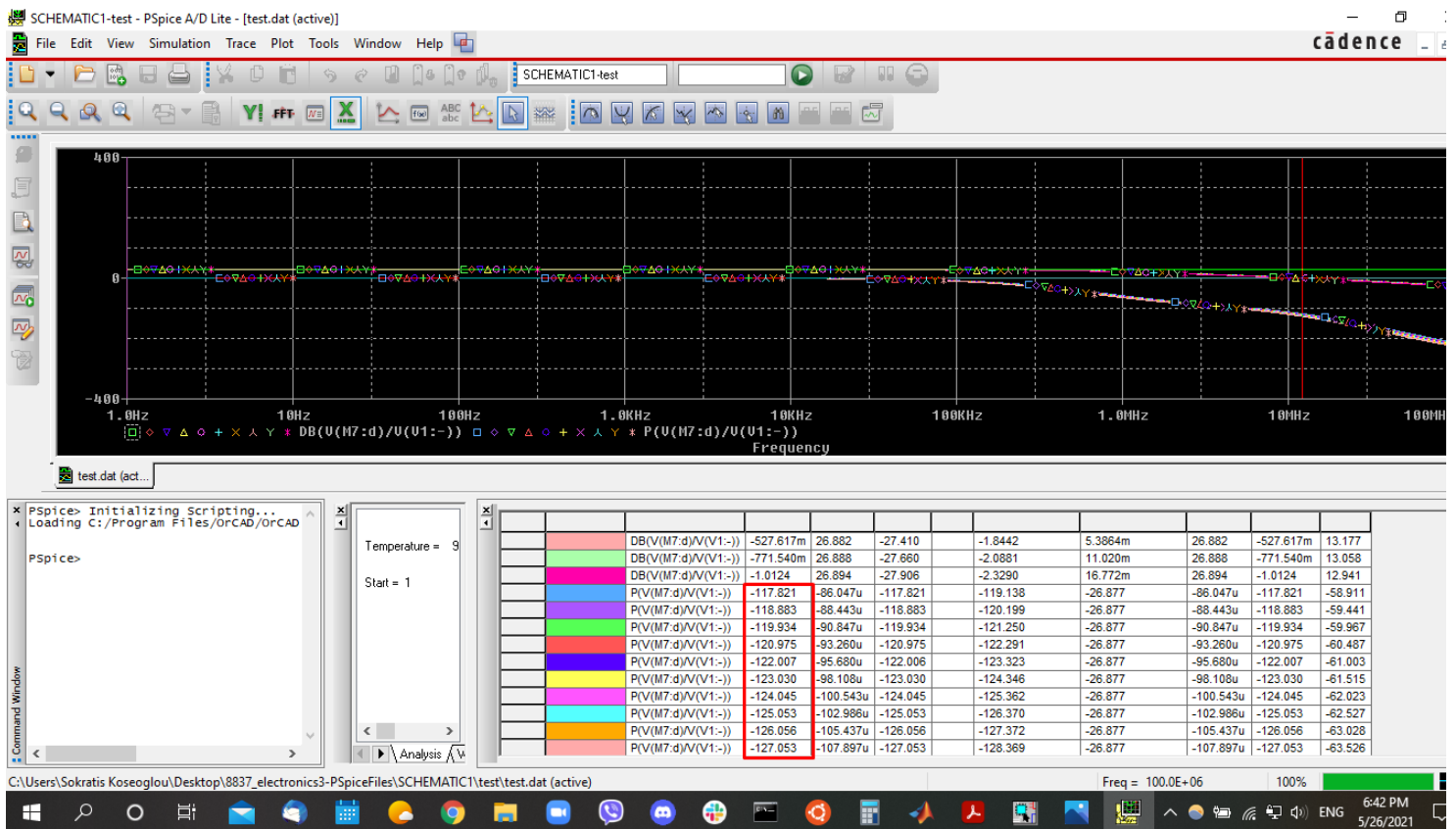
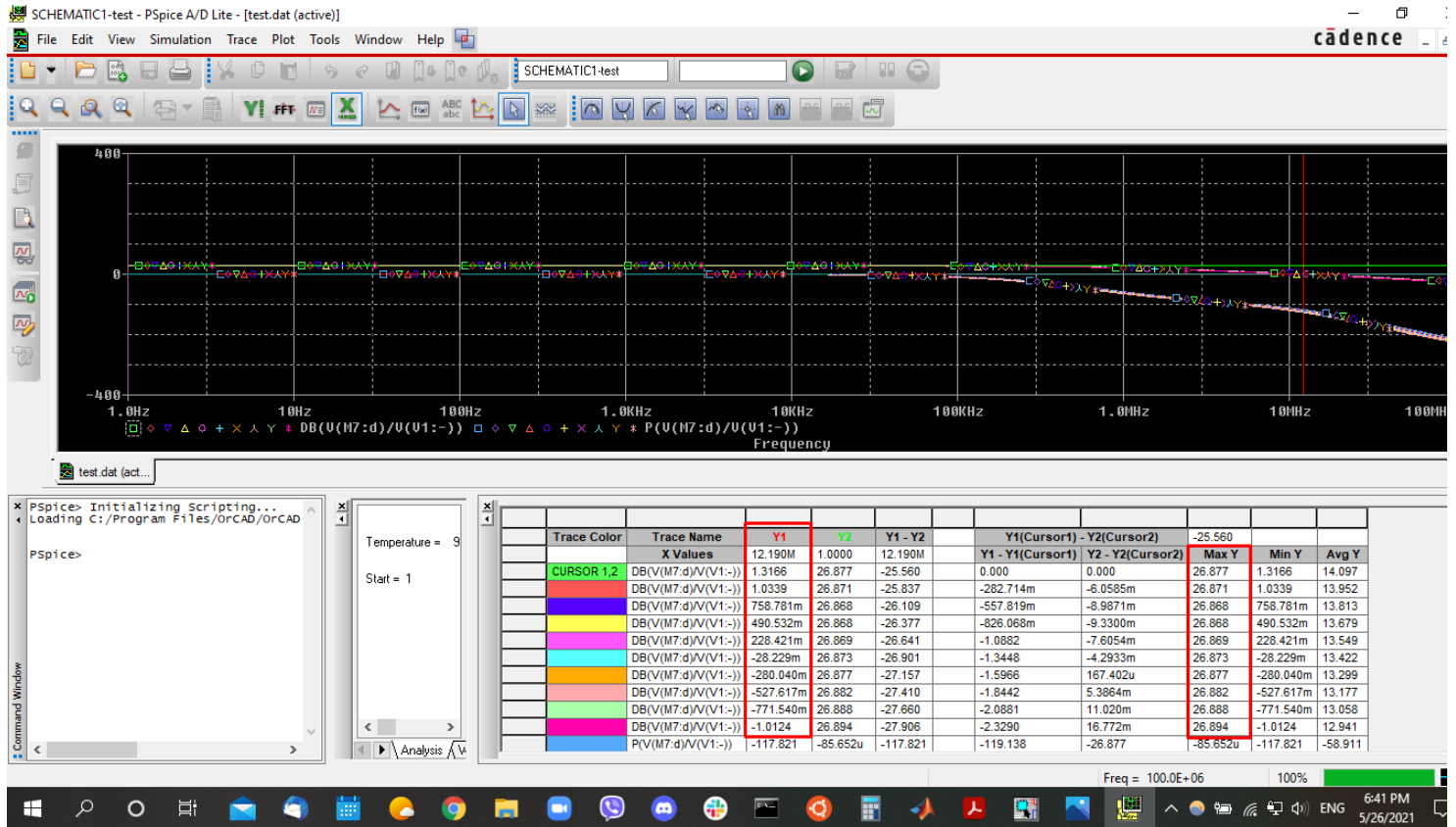
Βλέπουμε, ότι έχει αυξηθεί το Slew Rate σε $SR = 10.408 \text{ V}/\mu\text{s}$. Παρ' όλα αυτά, η προδιαγραφή δεν καλύπτεται.

Ακόμη, όσον αφορά την ισχύ έχουμε: $P_{diss} = (I_5 + I_6) * (V_{dd} + |V_{SS}|) = (20\mu + 160.1\mu) * 2 * 1.911 = 688.34\mu\text{W}$

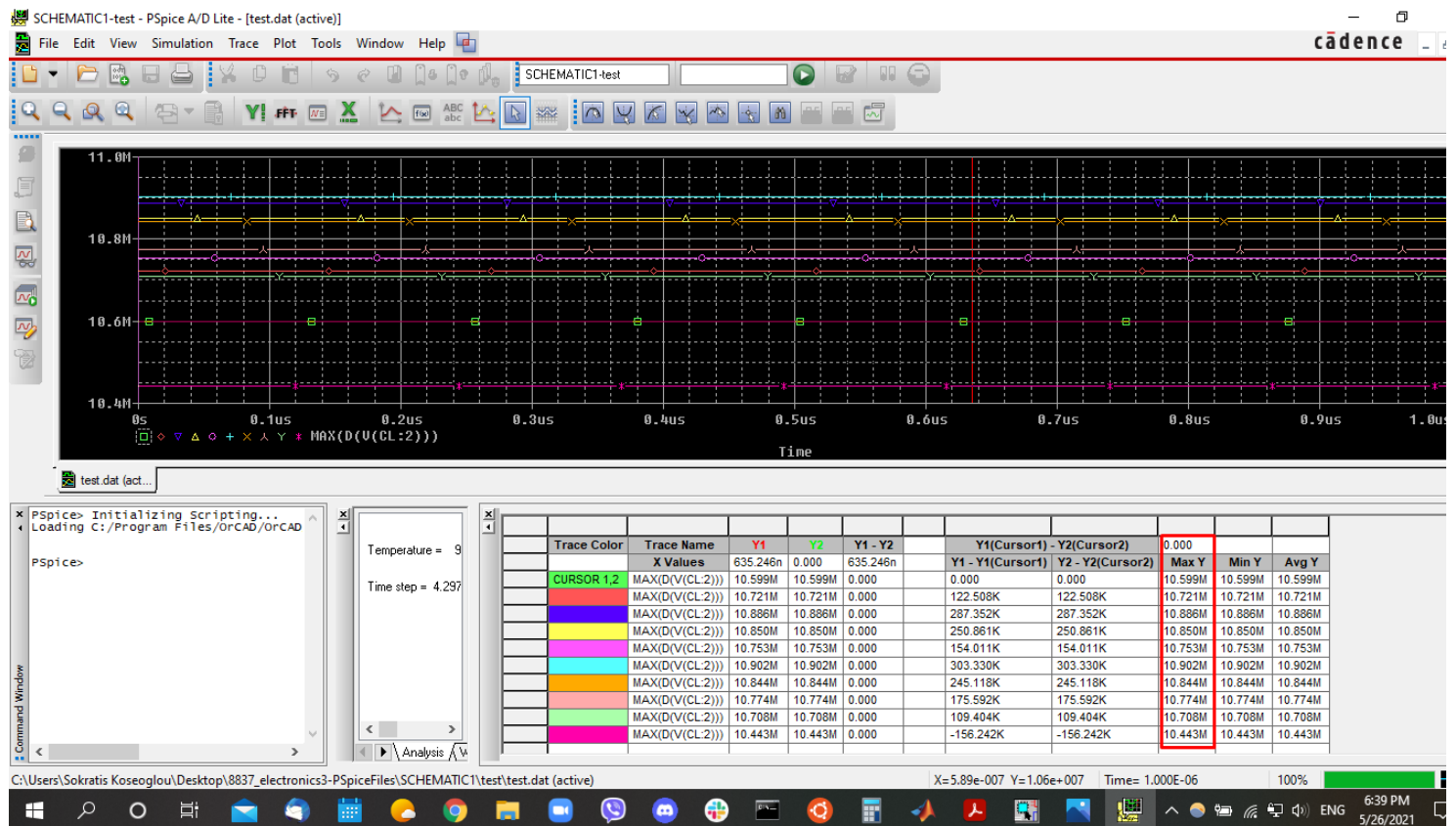
Συνεπώς, πληρείται η προδιαγραφή της ισχύος αφού $P_{diss} = 688.34\mu\text{W} < 50.4\text{mW}$

Θερμοκρασιακή Ανάλυση.

Έπειτα εκτελούμε τις ίδιες προσομοιώσεις για διάφορες θερμοκρασίες. Από 0° έως και 90° .



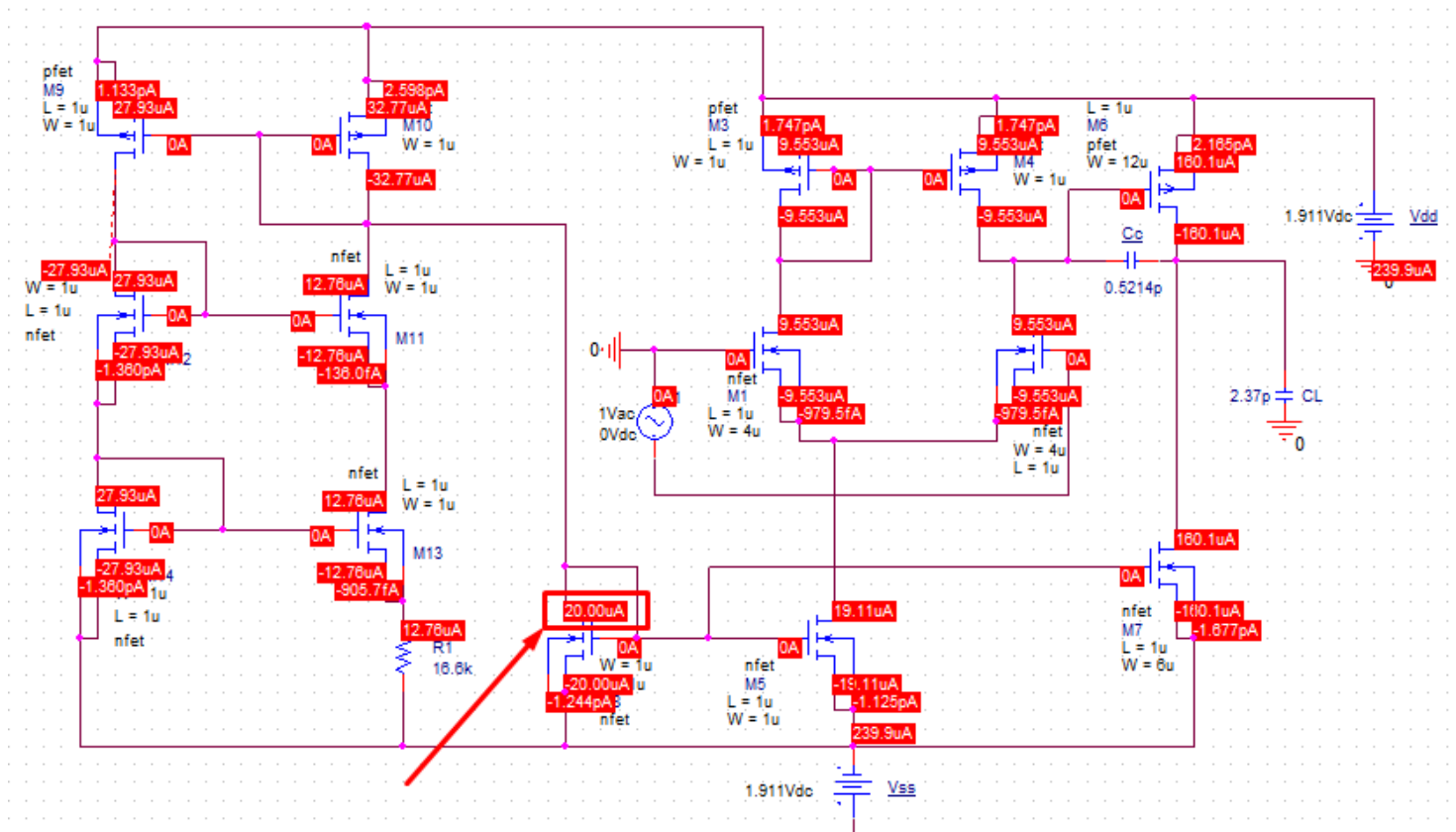
Παρατηρούμε ότι το κέρδος μένει σταθερό, ενώ για GB στους 70° που είναι η πιο αριστερή καμπύλη πληρείται η προδιαγραφή. Ενώ για το περιθώριο φάσης βλέπουμε ότι ακόμα βρισκόμαστε στα επιθυμητά όρια. $[45^\circ, 60^\circ]$.



Τέλος παρατηρούμε ότι είναι αδύνατο το SR να είναι μεγαλύτερο από $18.37 \text{ V}/\mu\text{s}$ για οποιαδήποτε θερμοκρασία.

Καθρέπτης Widlar.

Στην συνέχεια, αντικαθιστούμε την πηγή ρεύματος με ένα καθρέπτη ρεύματος Widlar και προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα.



Ρυθμίζοντας κατάλληλα την αντίσταση R1 δημιουργούμε το καθρεπτισμένο ρεύμα I_5 ίσο με $20\mu A$ που ήταν και προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα η τελική τιμή της αντίστασης είναι **$R1 = 16.6k\Omega$** .

Έτσι, με την συγκεκριμένη αντίσταση έχουμε το ίδιο κύκλωμα με το πιο πάνω κύκλωμα με την πηγή ρεύματος. Συνεπώς, οι προδιαγραφές πληρούνται πάλι.