

## Ηλεκτρονική 3 -Τελεστικός Ενισχυτής-

Αλέξανδρος Πετρίδης

Τελευταία ενημέρωση: 24 Ιουλίου 2021

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Παράμετροι</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Αλγόριθμος</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Matlab Code</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Προσομοίωση PSpice</b>	<b>6</b>
4.1	Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας . . . . .	6
4.2	Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Βελτιστοποιημένη προσομοίωση PSpice</b>	<b>8</b>
5.1	Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας . . . . .	8
5.2	Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου . . . . .	9
5.3	Θερμοκρασιακή ανάλυση . . . . .	9
5.3.1	Στο πεδίο της συχνότητας . . . . .	9
5.3.2	Στο πεδίο του χρόνου . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Καθρέπτης Widlar</b>	<b>11</b>
6.1	Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας . . . . .	11

## 1 Παράμετροι

Παράμετρος	Τιμή
AEM	9288
$\xi$	88
$C_L$	2.88 pF
$S_R$	18.88 $\frac{V}{\mu s}$
$V_{dd}$	2.064 V
$V_{ss}$	-2.064 V
$G_B$	> 7.88 MHz
$A$	> 20.88 dB
$P$	< 50.9 mW

## 2 Αλγόριθμος

1. Το μήκος του καναλιού πρέπει να είναι 1,5 με 2 φορές μεγαλύτερο από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν φαινόμενα καναλιού μικρού μήκους. Επομένως επιλέγεται  $L = 1\mu m$ .
2. Υπολογίζεται η ελάχιστη χωρητικότητα Miller  $C_c$  ώστε το περιθώριο φάσης να είναι  $60^\circ$ . Επομένως  $C_c > 2.2 \cdot C_L = 6.336 pF$ . Άρα  $C_{Cmin} = 6.336 pF$ .
3. Υπολογίζεται το ρεύμα πόλωσης διαφορικού ζεύγους  $I_5 = S_R \cdot C_{Cmin} = 11.962 \mu A$ .
4. Υπολογίζεται από τον τύπο  $S_3 = \frac{W_3}{L_3} = \frac{I_5}{k_3 \cdot [V_{dd} - V_{inmax} - |V_{T3max}| + V_{T1min}]^2}$ . Επομένως  $S_3 = 0.0703$  και πρέπει  $S \geq 1$ . Συνεπώς επιλέγεται  $S_3 = S_4 = 1$ . Έτσι τα transistor ενεργού φορτίου έχουν καθοριστεί.
5. Ελέγχεται αν  $p_3 > 10 \cdot G_B = 78.8 MHz$ , ώστε να μην επηρεάζεται η συχνότητα αποκοπής του τελεστικού. Ισχύει ότι  $|p_3| \approx \frac{g_{m3}}{2 \cdot C_{gs3}} = \frac{\sqrt{2 \cdot k_p \cdot S_3 \cdot \frac{I_5}{2}}}{2 \cdot 0.667 \cdot W_3 \cdot L_3 \cdot C_{ox}} = 7.9709 GHz > 78.8 MHz$ , οπότε η συνθήκη ικανοποιείται.
6. Υπολογίζεται η διαγωγιμότητα των transistor εισόδου  $g_{m1}, g_{m2}$ , καθώς και τα  $S_1, S_2$ , από τους τύπους  $g_{m1} = g_{m2} = G_B \cdot C_c$  και  $S_1 = S_2 = \frac{(g_{m2})^2}{k_n \cdot I_5} = 0.8227$  και όπως και στο βήμα 4 επιλέγεται  $S_1 = S_2 = 1$ .
7. Υπολογίζεται η τάση κόρου της πηγής του διαφορικού ζεύγους και το  $S_5$  από  $V_{DS5sat} = V_{inmin} - V_{ss} - \sqrt{\frac{I_5}{b_1}} - V_{T1max} = 832.1 mV > 100 mV$ , επομένως καλύπτεται η συγκεκριμένη συνθήκη. Οπότε  $S_5 = \frac{2 \cdot I_5}{k_p \cdot V_{DS5sat}^2} = 0.3455$  και επιλέγεται  $S_5 = 1$ .
8. Στην δεύτερη βαθμίδα, υπολογίζεται η διαγωγιμότητα του transistor 6, ελέγχεται αν είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του 1 και κατόπιν υπολογίζονται τα  $S_6, I_6$ . Από τους τύπους  $g_{m6} = 2.2 \cdot g_{m2} \cdot \frac{C_L}{C_c}$ ,  $g_{m4} = \sqrt{2 \cdot k_p \cdot S_4 \cdot \frac{I_5}{2}}$ ,  $S_6 = S_4 \cdot \frac{g_{m6}}{g_{m4}}$ ,  $I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2 \cdot k_p \cdot S_6}$ . Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει  $S_6 = 12.8271$ , οπότε επιλέγεται  $S_6 = 13$ .
9. Υπολογίζεται το  $S_7 = \frac{I_6}{I_5} \cdot S_5 = 6.3282$ , οπότε επιλέγεται  $S_7 = 7$ .
10. Υπολογίζεται το συνολικό κέρδος και η συνολική κατανάλωση ισχύος από τους τύπους  $A_v = 10 \cdot \log_{10}(\frac{2 \cdot g_{m2} \cdot g_{m6}}{I_5 \cdot (I_2 + I_3) \cdot I_6 \cdot (I_6 + I_7)}) = 27.351 dB > 20.88 dB$ ,  $P_{diss} = (I_5 + I_6) \cdot (V_{dd} + |V_{ss}|) = 0.36187 mW < 50.9 mW$ , οπότε θεωρητικά πληρούνται οι παραπάνω συνθήκες.

Οπότε, ξεκινάει η προσομοίωση μας με τις παρακάτω τιμές για τα transistor .

Transistor	$W(\mu m)$	$L(\mu m)$
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	13	1
7	7	1
8	1	1

### 3 Matlab Code

```

1  clear ;
2  AEM = [88 37];
3  j=AEM(2);
4
5  CL = (2+0.01*j)*10^(-12);
6  SRmin = (18+0.01*j)*10^(6);
7  Vdd = 1.8+0.003*j;
8  Vss = -Vdd;
9  GBmin = (7+0.01*j) * 10^(6);
10 Amin = (20+0.01*j);
11 Pmax = (50+0.01*j)*10^(-3);
12
13 VTon = 0.7860;
14 kn = 100*10^(-6);
15 k1 = kn;
16 k2 = kn;
17 k5 = kn;
18 k7 = kn;
19 k8 = kn;
20
21 VTop = -0.9056;
22 kp = 50*10^(-6);
23 k3 = kp;
24 k4 = kp;
25 k6 = kp;
26 Cox = 2.3*10^(-3);
27 Vinmax = 100*10^(-3);
28 Vinmin = -100*10^(-3);
29
30
31 L = 1*10^(-6);
32
33 Ccmin=0.22*CL;
34
35 I5min = Ccmin*SRmin;
36
37 S3 = ceil(I5min / (k3*(Vdd - Vinmax - abs(VTop) + VTon)^2));
38 S4 = S3;
39

```

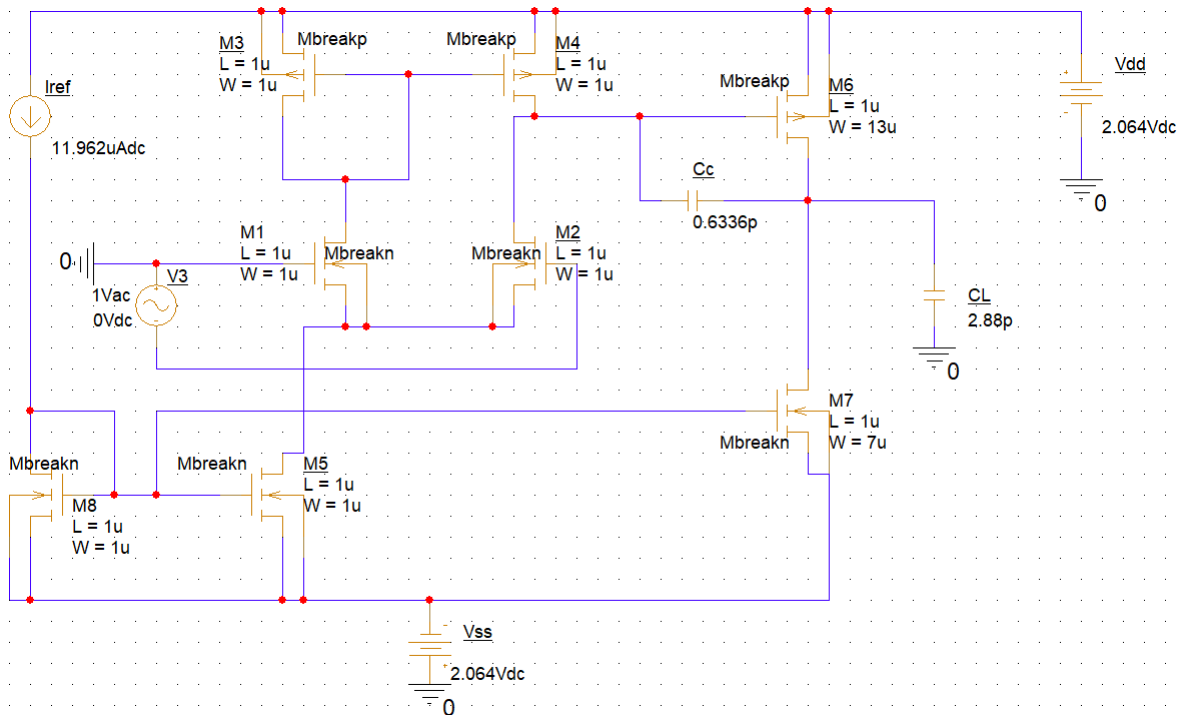
```

40 p3=sqrt(kp* S3 * I5min)/(2 * 0.667 * S3 * (L^2) * Cox);
41
42 gm1 = 2*pi*GBmin*Ccmin;
43 gm2=gm1;
44 S1 = ceil(gm1^2/(k2*I5min));
45 S2=S1;
46
47 b1 = k1*S1;
48 VT1 = VTon;
49 VDs5_sat = Vinmin - Vss - sqrt(I5min/b1)-VT1;
50 S5 = ceil((2*I5min)/(k5*(VDs5_sat)^2));
51 S8=S5;
52
53 gm4 = sqrt(2 * kp * S4 * I5min/2);
54 gm6 = 2.2*gm2*CL/Ccmin;
55 S6 = ceil(S4*gm6/gm4);
56 I6 = gm6^2/(2*k6*S6);
57
58 S7 = ceil(S5*I6/I5min);
59
60 ln = 0.05;
61 lp = 0.15;
62 Pdiss = (I5min+I6)*(Vdd + abs(Vss));
63 Av = 2*gm2*gm6/(I5min*I6*(ln+lp)^2);
64 Av_dB = 10*log10(Av);
65
66 W1 = S1 * L;
67 W2 = S2 * L;
68 W3 = S3 * L;
69 W4 = S4 * L;
70 W5 = S5 * L;
71 W6 = S6 * L;
72 W7 = S7 * L;
73 W8 = W5;

```

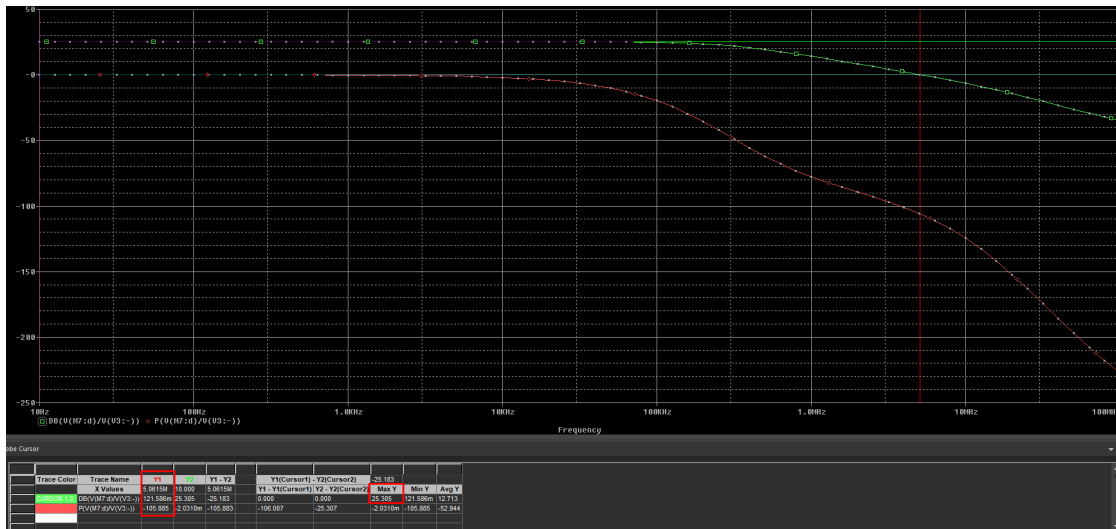
## 4 Προσομοίωση PSpice

Σχεδιάζεται το παρακάτω κύκλωμα με βάση τις τιμές που προέκυψαν από την προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 1: Κύκλωμα τελεστικού

### 4.1 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας



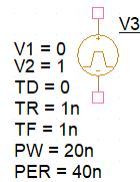
Σχήμα 2: Bode Plot

Αναλύοντας στο πεδίο της συχνότητας δημιουργείται το παραπάνω Bode διάγραμμα, από το οποίο παρατηρείται πως  $A = 25.305\text{dB} > 20.88\text{dB}$ , συνεπώς η προδιαγραφή ικανοποιείται. Ακόμα παρατηρείτε πως  $G_B = 5.0615\text{MHz} <$

$7.88MHz$ , συνεπώς δεν ικανοποιείται αυτή η προδιαγραφή και τέλος το περιθώριο φάσης είναι  $180^\circ - 105.885^\circ = 74.115^\circ > 60^\circ$ , οπότε ούτε και αυτή η προδιαγραφή ικανοποιείται.

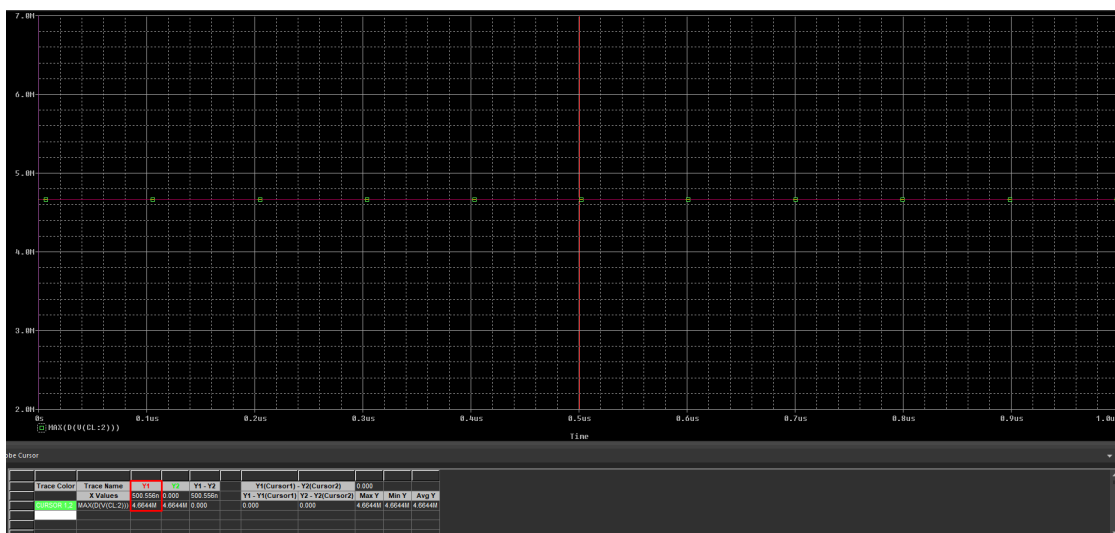
## 4.2 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Για να υπολογιστεί το Slew Rate SR θα αντικαταστήθει η AC πηγή τάσης με μια πηγή παλμών όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3: Πηγή παλμών

Στη συνέχεια θα αναλυθεί το κύκλωμα στο πεδίο του χρόνου και θα προκύψει η παρακάτω γραφική παράσταση.

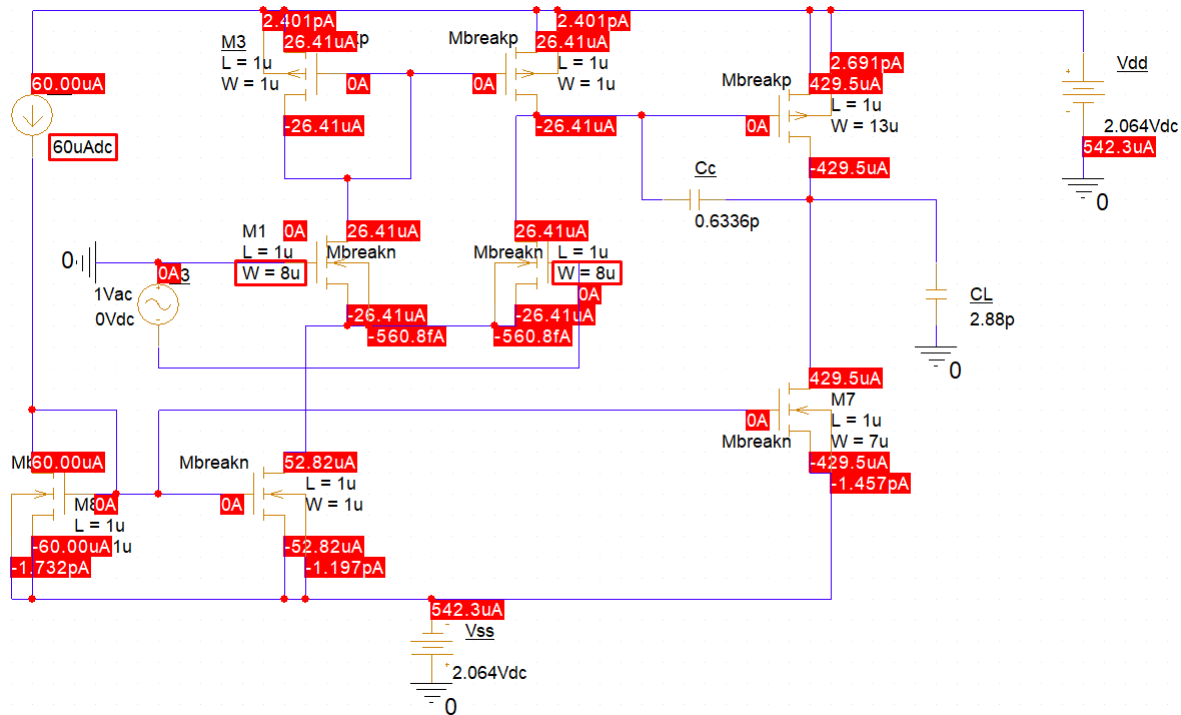


Σχήμα 4: Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Από την γραφική παράσταση παρατηρείται ότι ισχύει  $S_R = 4.6644 \frac{V}{\mu s} \neq 18.88 \frac{V}{\mu s}$ . Συνεπώς ούτε αυτή η προδιαγραφή πληρείται.

## 5 Βελτιστοποιημένη προσομοίωση PSpice

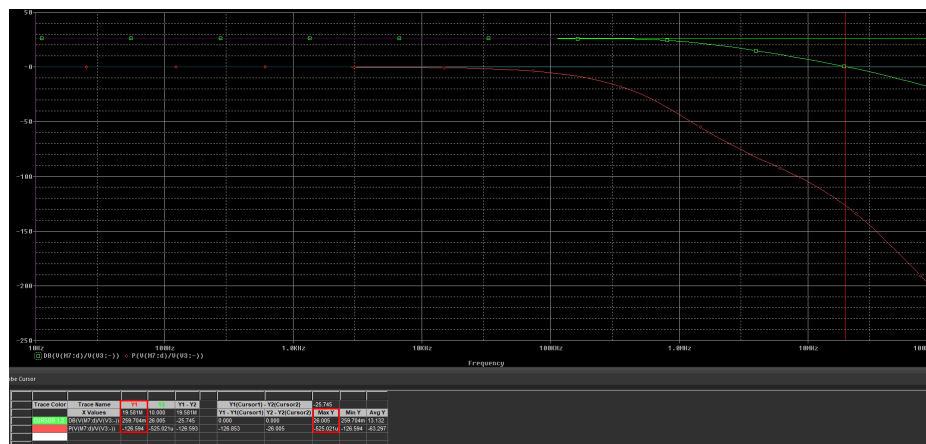
Ύστερα από βελτίωση διαφόρων παραμέτρων του κυκλώματος, αυξήθηκαν το ρεύμα  $I_5$  στα 60μΑ, καθώς και τα  $W_1, W_2$  στα 8μm. Έτσι προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα, με τα εξής ρεύματα.



Σχήμα 5: Βελτιστοποιημένο κύκλωμα με τα ρεύματά του

Στη συνέχεια, όπως και στις προηγούμενες ενότητες γίνονται οι παρακάτω αναλύσεις.

### 5.1 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας



Σχήμα 6: Bode Plot Βελτιστοποιημένου κυκλώματος

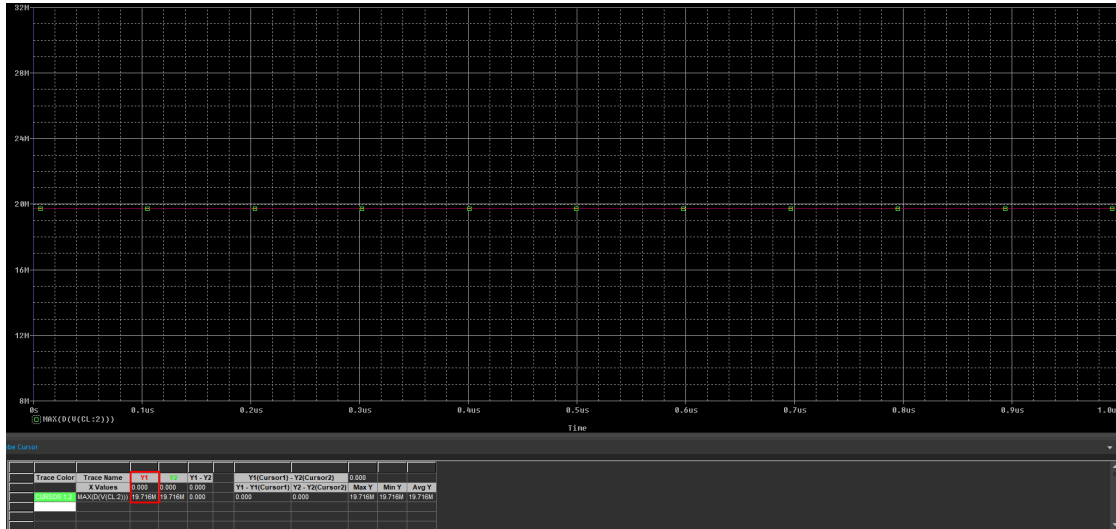
Παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα ότι  $A = 26.005dB > 20.88dB$ ,  $G_B = 19.581MHz > 7.88MHz$  και το περιθώριο φάσης είναι  $180^\circ - 126.594^\circ = 53.406^\circ < 60^\circ$ . Συνεπώς όλες οι προδιαγραφές πληρούνται.



## 5.2 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Όπως και παραπάνω, για να υπολογιστεί το Slew Rate αντικαθίσταται η AC πηγή τάσης με την πηγή παλμών του Σχήματος 3.

Στη συνέχεια αναλύεται το κύκλωμα στο πεδίο του χρόνου και προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση.

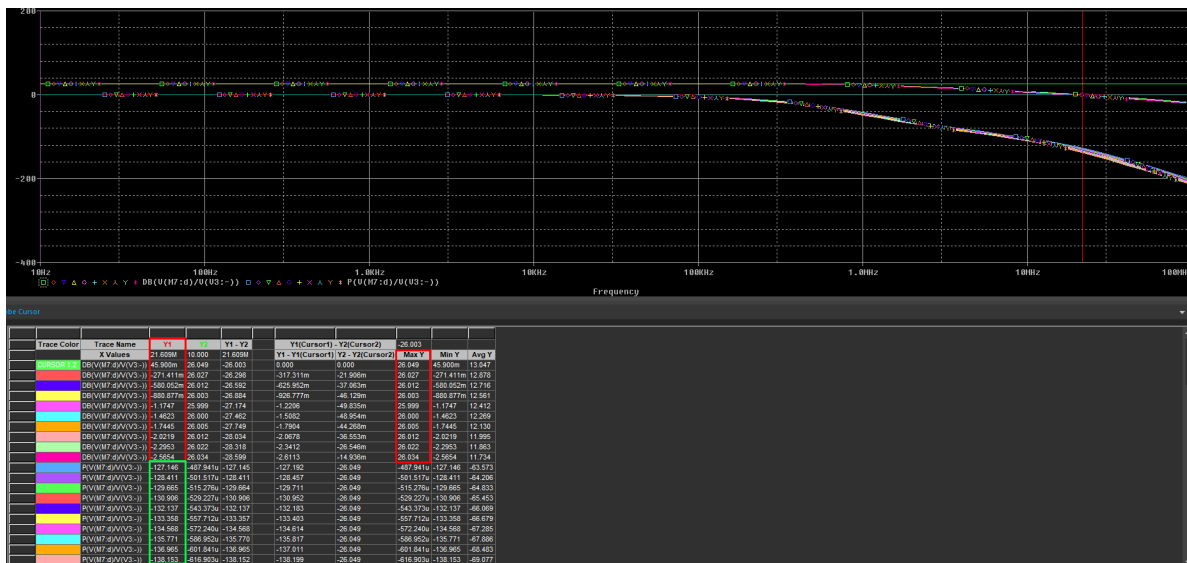


Σχήμα 7: Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου του βελτιστοποιημένου κυκλώματος

Παρατηρείται από την παραπάνω ανάλυση πως  $S_R = 19.716 \frac{V}{\mu s} \approx 18.88 \frac{V}{\mu s}$ , συνεπώς καλύπτεται αυτή η προδιαγραφή. Τέλος, όσον αφορά την ισχύ:  $P_{diss} = (I_5 + I_6) \cdot (V_{dd} + |V_{SS}|) = (60\mu + 429.5\mu) \cdot 2 \cdot 2.064 = 2.020mW < 50.9mW$ , συνεπώς πληρείται και η προδιαγραφή της ισχύος.

## 5.3 Θερμοκρασιακή ανάλυση

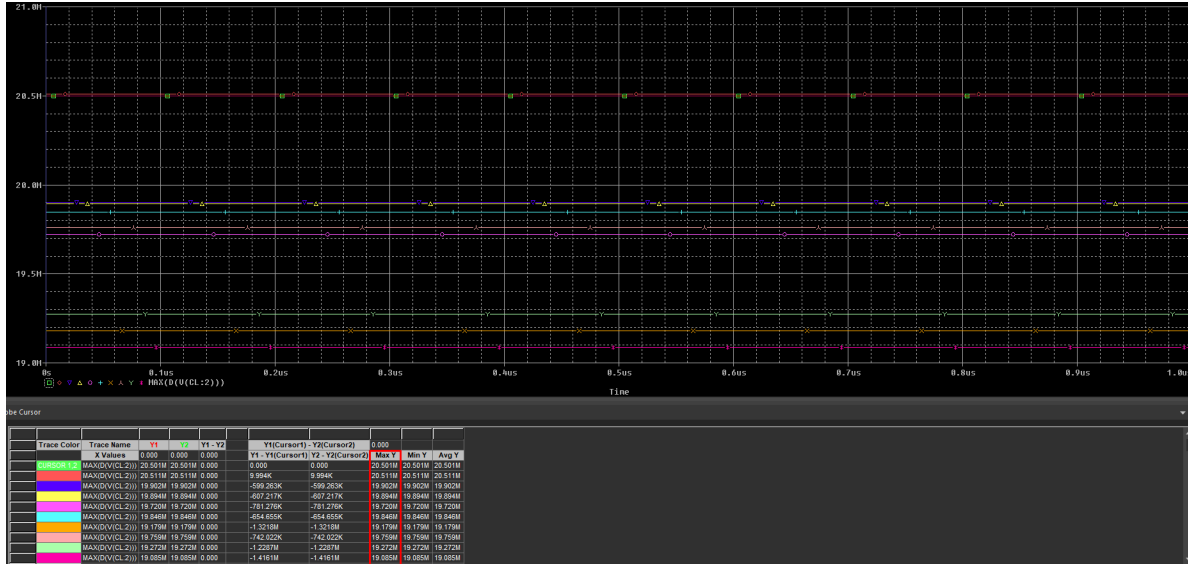
### 5.3.1 Στο πεδίο της συχνότητας



Σχήμα 8: Θερμοκρασιακή ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

Παρατηρείται από το διάγραμμα πως το κέρδος παραμένει σταθερό με μικρές αποκλίσεις της τάξης του  $10^{-2}$  δηλαδή  $A \approx 26dB > 20.88dB$ , το  $G_B = 21.609MHz > 7.88MHz$  και το περιθώριο φάσης κυμαίνεται στις τιμές  $[41.847^\circ, 52.854^\circ]$ . Συνεπώς όλες οι προδιαγραφές πληρούνται για τις θερμοκρασίες από  $0^\circ C$  μέχρι και  $90^\circ C$

### 5.3.2 Στο πεδίο του χρόνου

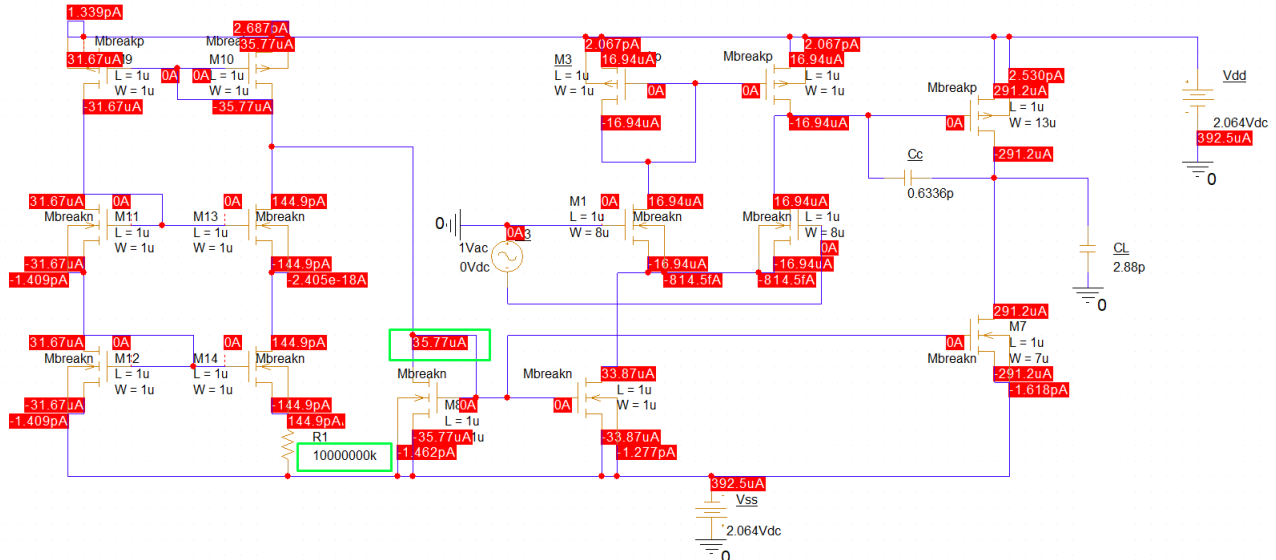


Σχήμα 9: Θερμοκρασιακή ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Τέλος παρατηρείται πως δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις του  $S_R$  το οποίο κυμαίνεται στις τιμές  $[19.085 \frac{V}{\mu s}, 20.501 \frac{V}{\mu s}]$  για τις θερμοκρασίες από  $0^\circ C$  μέχρι και  $90^\circ C$ .

## 6 Καθρέπτης Widlar

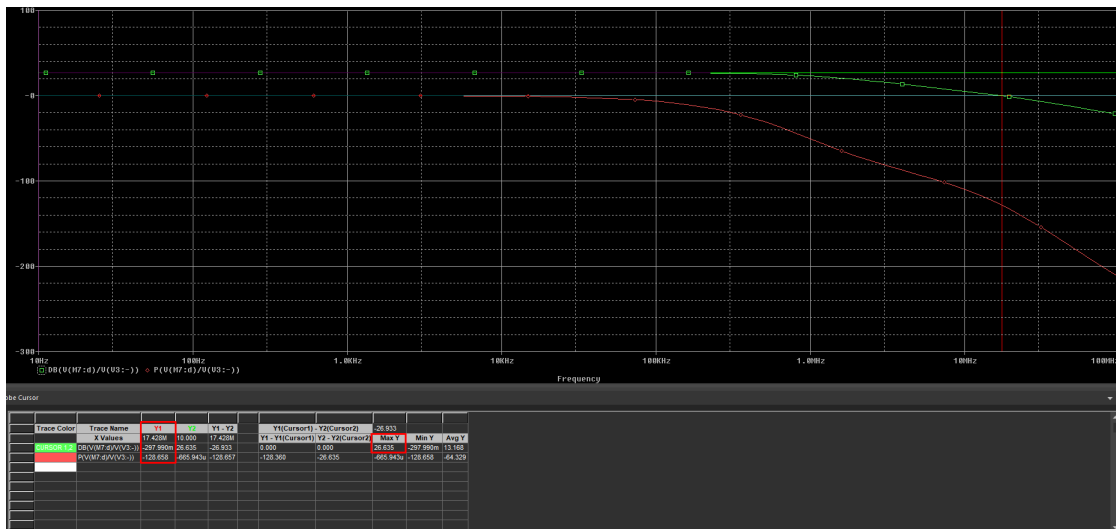
Στην τελευταία ενότητα της εργασίας, αντικαθίσταται η πηγή ρεύματος με ένα καθρέπτη ρεύματος Widlar και προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα. Προσπαθώντας να ρυθμιστεί κατάλληλα η αντίσταση  $R_1$  παρατηρήθηκε πως δεν μπορεί να πιάσει



Σχήμα 10: Τελεστικός με καθρέπτη ρεύματος Widlar

το καθρεπτισμένο ρεύμα την τιμή  $60\mu A$  το οποίο πιάνει ένα όριο των  $35.77\mu A$ .

### 6.1 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας



Σχήμα 11: Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας στο κύκλωμα με τον καθρέπτη Widlar

Όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα  $A = 26.635db > 20.88db$ ,  $G_B = 17.428MHz > 7.88MHz$  και το περιθώριο φάσης  $180^\circ - 128.683^\circ = 51.317^\circ < 60^\circ$ . Συνεπώς όλες οι προδιαγραφές πληρούνται.