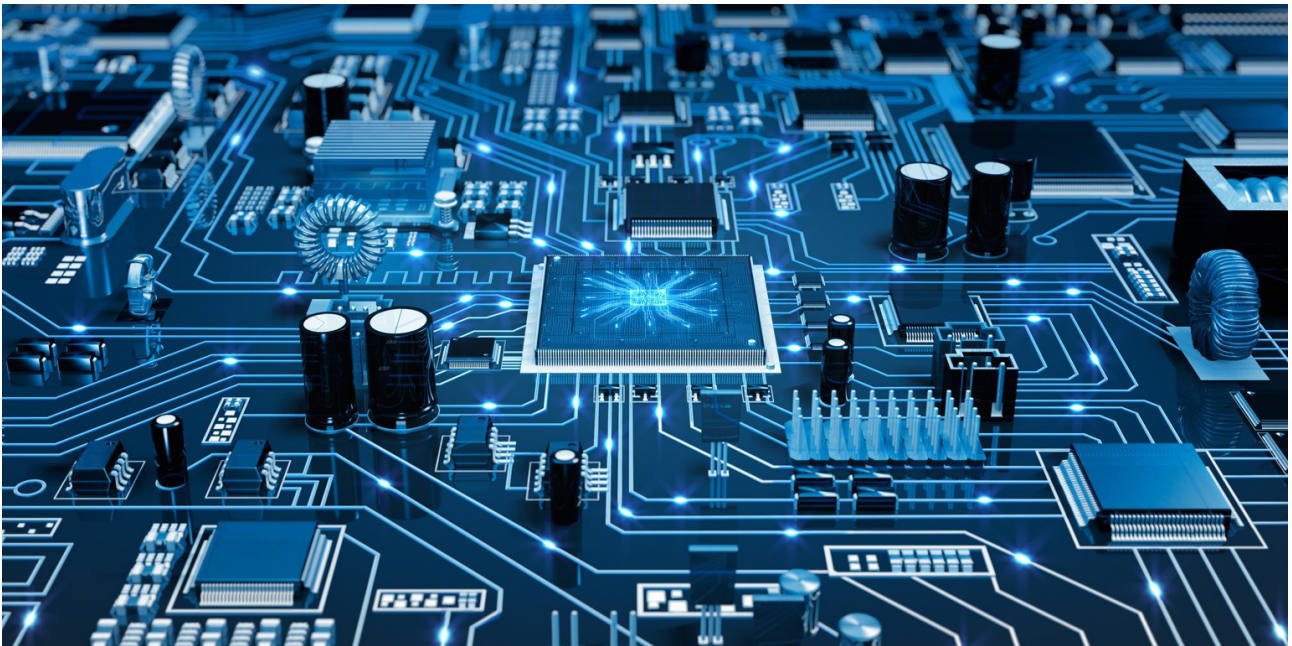


# Ηλεκτρονική 3

## Εργασία Τελεστικού Ενισχυτή



**Ονοματεπώνυμο:** Σιδηρόπουλος Λεωνίδας

**AEM:** 9818

**email:** [leonsidi@ece.auth.gr](mailto:leonsidi@ece.auth.gr)

**Εξάμηνο:** 7ο

**Περίοδος:** Χειμερινό εξάμηνο 2021-2022

## Προδιαγραφές Τελεστικού Ενισχυτή

$$\xi = 18$$

| Προδιαγραφή     | Πράξη                                 | Αποτέλεσμα                     |
|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| CL              | $(2+0,01\xi) \text{ pF}$              | 2,18 pF                        |
| SR              | $>(18+0,01\xi) \text{ V}/\mu\text{s}$ | $>18,18 \text{ V}/\mu\text{s}$ |
| V <sub>dd</sub> | $(1,8+0,003\xi) \text{ V}$            | 1,854 V                        |
| V <sub>ss</sub> | $-(1,8+0,003\xi) \text{ V}$           | -1,854 V                       |
| GB              | $>(7+0,01\xi) \text{ MHz}$            | $>7,18 \text{ MHz}$            |
| A               | $>(20+0,01\xi) \text{ dB}$            | $>20,18 \text{ dB}$            |
| P               | $<(50+0,01\xi) \text{ mW}$            | $<50,18 \text{ mW}$            |

### Βήματα σχεδίασης τελεστικού ενισχυτή

**Βήμα 1:** Για να ορίσουμε το μήκος του καναλιού L λαμβάνουμε υπ' όψιν ότι πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο από την τεχνολογία MOS (0.35). Για τον λόγο αυτόν και για ευκολία στις πράξεις θέτουμε **L = 1μm**.

**Βήμα 2:** Προκειμένου να έχουμε περιθώριο φάσης 60°, υπολογίζουμε την ελάχιστη χωρητικότητα Miller:  $C_c = 0,22CL = 0,22 * 2,18\text{pF} = 0,4796\text{pF}$ . Επομένως, πρέπει  $C_c > 0,4796\text{pF}$ .

**Βήμα 3:** Υπολογίζουμε το ρεύμα  $I_5$  :

$$I_5 = SR * C_c = 18,18 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}} * 0,4796\text{pF} = 8,719128\mu\text{A}$$

**Βήμα 4:** Υπολογίζουμε το λόγο:  $S_3 = \left(\frac{W}{L}\right)_3$

$$S_3 = \left(\frac{W}{L}\right)_3 = \frac{I_5}{k_3 * [V_{dd} - V_{in,max} - |V_{TO3,max}| + V_{T1,min}]^2}$$

$$= \frac{8,719128 * 10^{-6}}{2,9352 * 10^{-5} [1,854 - 0,1 - |-0,9056| - 0,15 + 0,786 - 0,15]^2}$$

$$= 0,1668$$

Παρατηρούμε ότι  $S_3 = 0,1668 < 1$ . Πρέπει  $S_3 \geq 1$ , οπότε θα θεωρήσουμε  $S_3 = 1 = S_4$ .

**Βήμα 5:** Έλεγχος ότι  $p_3 > 10\text{GB} = 10 * 7,18 = 71,8\text{MHz}$

$$p_3 = \frac{g_{m3}}{2C_{gs3}} = \frac{\sqrt{2k_p s_3 \frac{I_5}{2}}}{2 * 0,667 * W_3 L_3 C_{ox}} = \frac{\sqrt{2k_p s_3 \frac{I_5}{2}}}{2 * 0,667 * s_3 L_3^2 \frac{k_p}{u_{op}}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2 * 2,9352 * 10^{-5} * 1 * \frac{8,719128 * 10^{-6}}{2}}}{2 * 0,667 * 1 * 10^{-12} * \frac{2,9352 * 10^{-5}}{180,2 * 10^{-4}}} = 7,362 * 10^9 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$= \frac{7,362}{2\pi} \text{GHz} = 1,1716 \text{GHz}$$

Επομένως  $p_3 > 71,8\text{MHz}$

**Βήμα 6:**

$$g_{m1} = \text{GB} * C_C = 2\pi * 7,18 * 10^6 * 0,4796 * 10^{-12} = 21,63\mu\text{sec}$$

$$S_1 = S_2 = \frac{g_{m1}^2}{k_n I_5} = \frac{(21,63 * 10^{-6})^2}{9,6379 * 10^{-5} * 8,719128 * 10^{-6}} = 0,5567 < 1$$

οπότε θα θεωρήσουμε  $S_1 = S_2 = 1$

$$g_{m2} = g_{m1} = 21,63\mu\text{sec}$$

### Βήμα 7:

$$\begin{aligned} V_{DS5}(\text{sat}) &= V_{in,\min} - V_{SS} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - V_{T1,\max} \\ &= V_{in,\min} - V_{SS} - \sqrt{\frac{I_5}{S_1 * k_n}} - V_{T1,\max} \\ &= -0,1 - (-1,854) - \sqrt{\frac{8,719128 * 10^{-6}}{1 * 9,6379 * 10^{-5}}} - 0,786 - 0,15 = 0,5172V \end{aligned}$$

Το  $S_5$  δίνεται από τον τύπο:

$$S_5 = \frac{2I_5}{k_5 * [V_{DS5}(\text{sat})]^2} = \frac{2 * 8,719128 * 10^{-6}}{9,6379 * 10^{-5} * 0,5172^2} = 0,6764 < 1$$

Επομένως,  $S_5 = 1 = S_8$

### Βήμα 8: Πρέπει $g_{m6} \geq 10g_{m1} \Leftrightarrow g_{m6} \geq 216,3\mu\text{sec}$

$$g_{m6} = 2,2 \frac{C_L}{C_C} g_{m2} = 2,2 \frac{2,18pF}{0,4796pF} 21,63 = 216,3\mu\text{sec}$$

$$\begin{aligned} g_{m4} &= \sqrt{2k_p S_4 I_4} = \sqrt{2k_p S_4 \frac{I_5}{2}} \\ &= \sqrt{2 * 2,9352 * 10^{-5} * 1 * \frac{8,719128 * 10^{-6}}{2}} = 15,99\mu\text{sec} \end{aligned}$$

$$S_6 = S_4 \frac{g_{m6}}{g_{m4}} = 1 \frac{216,3\mu\text{sec}}{15,99\mu\text{sec}} = 13,5272 \simeq 14$$

$$I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2k_p S_6} = \frac{216,3^2 * 10^{-12}}{2 * 2,9352 * 10^{-5} * 13,5272} = 58,9165\mu\text{A}$$

### Βήμα 9:

$$S_7 = S_5 \frac{I_6}{I_5} = 1 \frac{58,9165\mu\text{A}}{8,719128\mu\text{A}} = 6,7571 \simeq 7$$

## Βήμα 10:

$$A_v = \frac{2g_{m2}g_{m6}}{I_5I_6(\lambda_2 + \lambda_3)(\lambda_6 + \lambda_7)} = \frac{2g_{m2}g_{m6}}{I_5I_6(\lambda_n + \lambda_p)(\lambda_n + \lambda_p)}$$

$$= \frac{2 * 21,63 * 216,3 * 10^{-12}}{8,719128 * 58,9165 * 10^{-12}(0,04+0,05)^2} = 2248.7854 \frac{V}{V}$$

ή

$$A_v(\text{dB}) = 20\log(A_v) = 20\log(2248,7854) = 67,03\text{dB} > 20,18\text{dB}$$

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

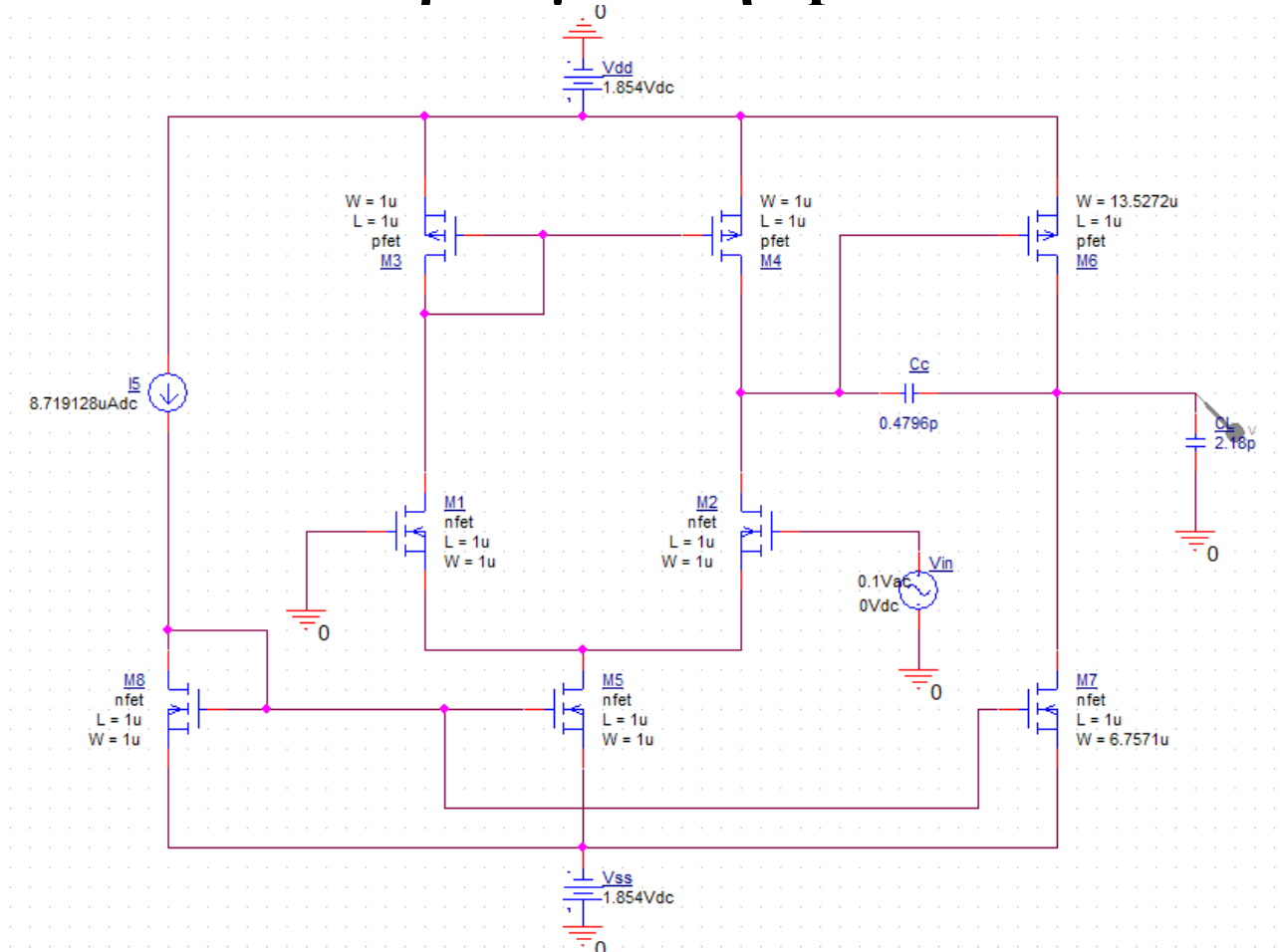
$$= (8,719128\mu\text{A} + 58,9165\mu\text{A}) * (1,854\text{V} + |-1,854\text{V}|)$$

$$= 0,2507\text{mW} < 50,18\text{mW}$$

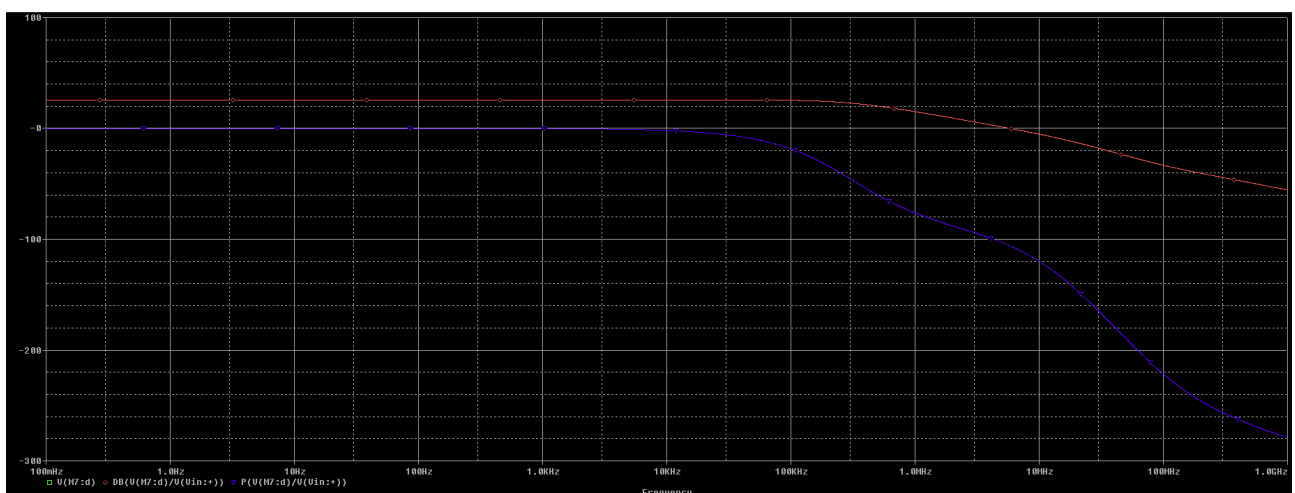
### Αποτελέσματα

|            |            |              |           |
|------------|------------|--------------|-----------|
| <b>L</b>   | 1μm        | <b>gm4</b>   | 15,99μsec |
| <b>Cc</b>  | 0,4796pF   | <b>gm6</b>   | 216,3μsec |
| <b>I5</b>  | 8,719128μA | <b>p3</b>    | 1,1716GHz |
| <b>I6</b>  | 58,9165μA  | <b>Av</b>    | 67,03dB   |
| <b>S1</b>  | 1μm        | <b>Pdiss</b> | 0,2507mW  |
| <b>S2</b>  | 1μm        | <b>W1</b>    | 1μm       |
| <b>S3</b>  | 1μm        | <b>W2</b>    | 1μm       |
| <b>S4</b>  | 1μm        | <b>W3</b>    | 1μm       |
| <b>S5</b>  | 1μm        | <b>W4</b>    | 1μm       |
| <b>S6</b>  | 13,5272μm  | <b>W5</b>    | 1μm       |
| <b>S7</b>  | 6,7571μm   | <b>W6</b>    | 13,5272μm |
| <b>S8</b>  | 1μm        | <b>W7</b>    | 6,7571μm  |
| <b>gm1</b> | 21,63μsec  | <b>W8</b>    | 1μm       |

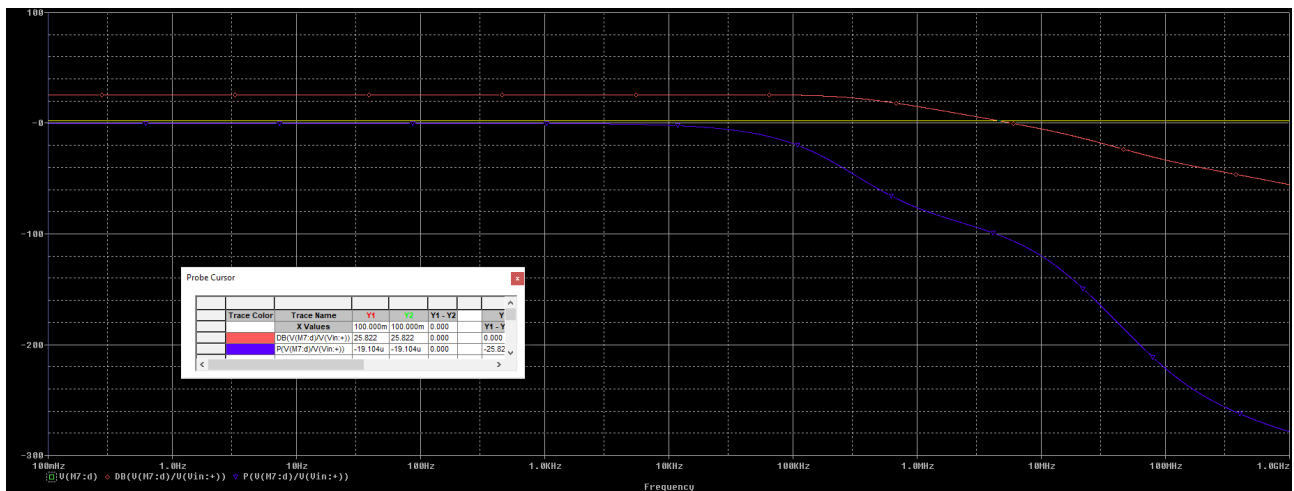
# Προσομοίωση Spice



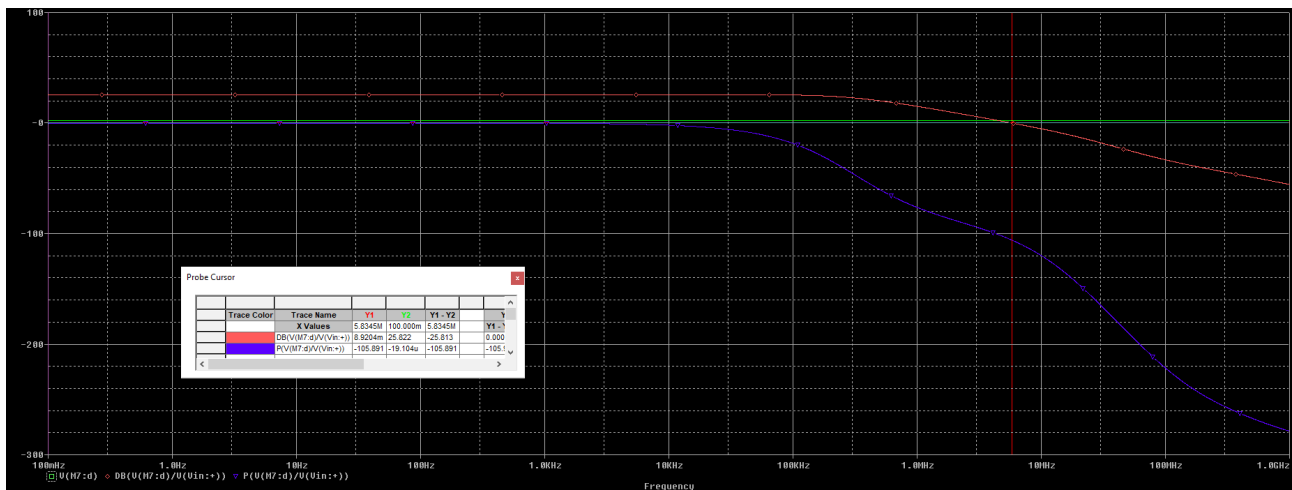
Σχ.1 Προσομοιωμένο κύκλωμα στο Spice



Σχ.2 Κυματομορφές **κέρδους**, **φάσης**



Σχ.3 Cursor για εύρεση κέρδους



Σχ.4 Cursor για εύρεση φάσης

Από τα σχήματα 3 και 4 παρατηρούμε ότι:

$$A = 25,822\text{dB} > 20,18\text{dB}$$

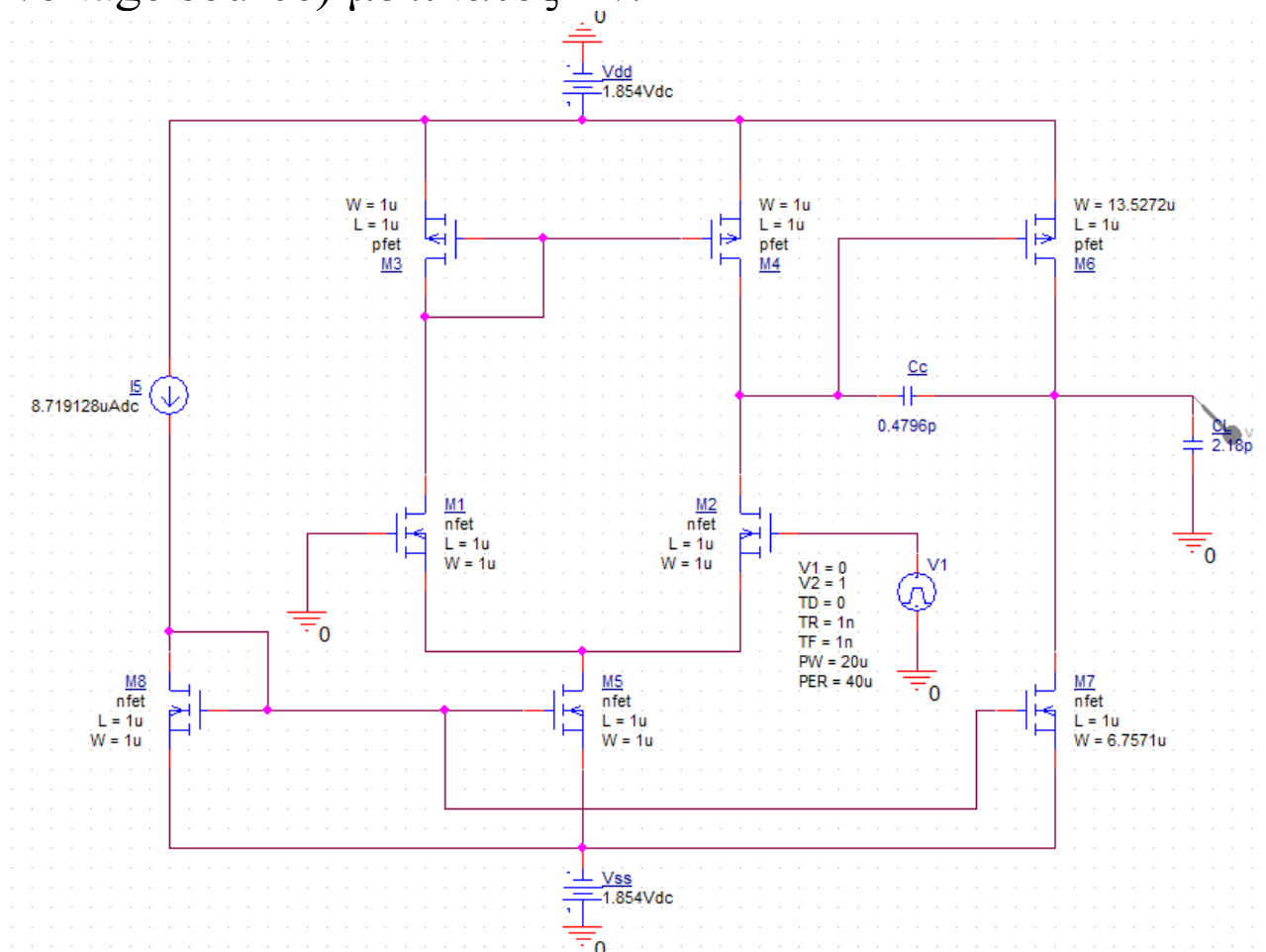
$$GB = 5,8345\text{MHz} < 7,18\text{MHz}$$

$$\text{Περιθώριο φάσης} = 180^\circ - |\varphi| = 180^\circ - |-105,891^\circ| = 74,109^\circ > 60^\circ, \text{ όπου } \varphi \text{ η γωνιά στην οποία ισχύει } A = 0 \text{ dB.}$$

Παρατηρούμε ότι μόνο το κέρδος A ικανοποιεί την προδιαγραφή μας, ενώ το GB και περιθώριο κέρδους δεν τις ικανοποιούν.

## Εύρεση του SR

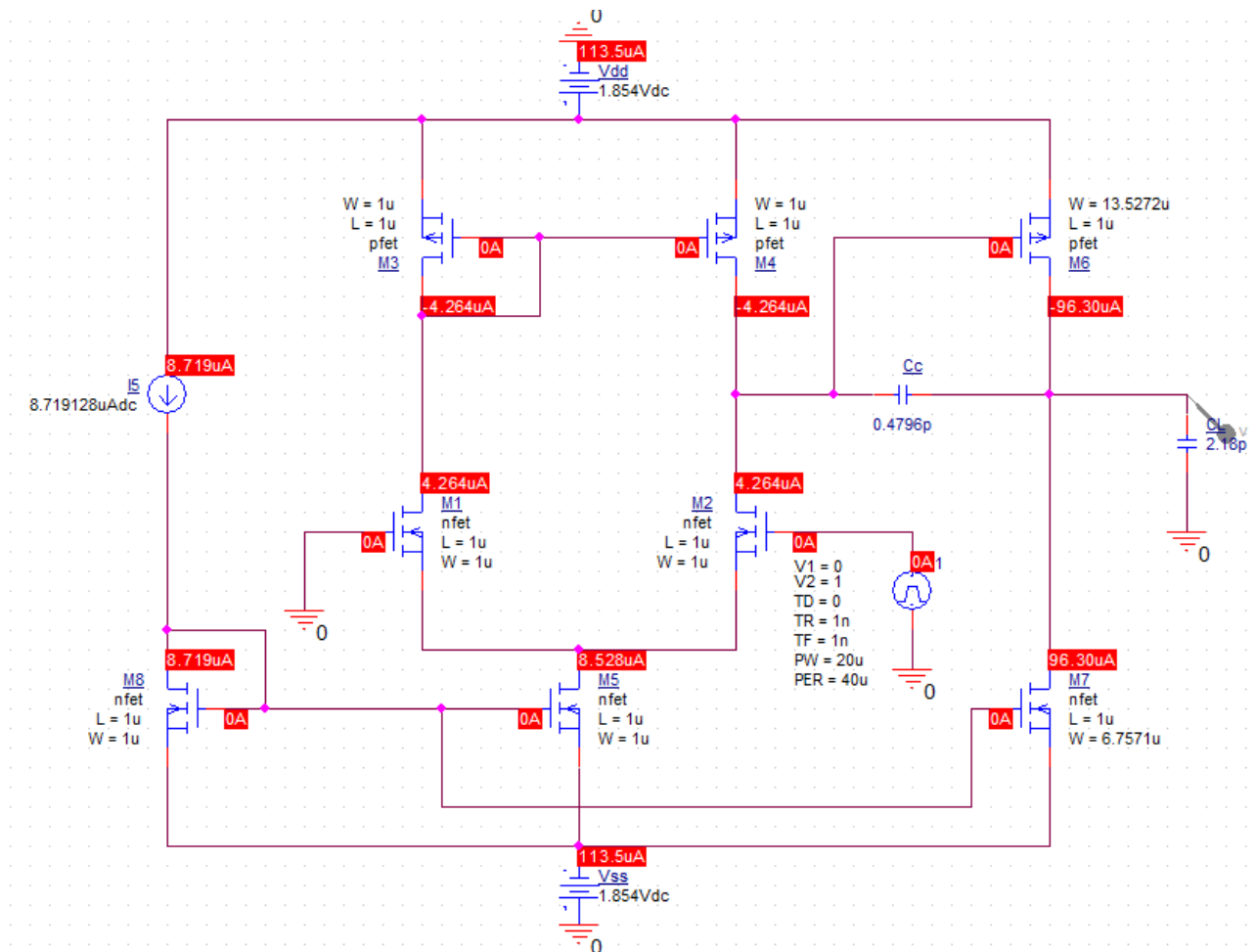
Για να πάρουμε τη κυματομορφή του SR, κάνουμε την εξής μετατροπή στο κύκλωμά μας: αφαιρούμε την AC πηγή  $V_{in}$  και στη θέση της βάζουμε μια βηματική πηγή  $V1$  (Pulse Voltage source) με πλάτος 1V.



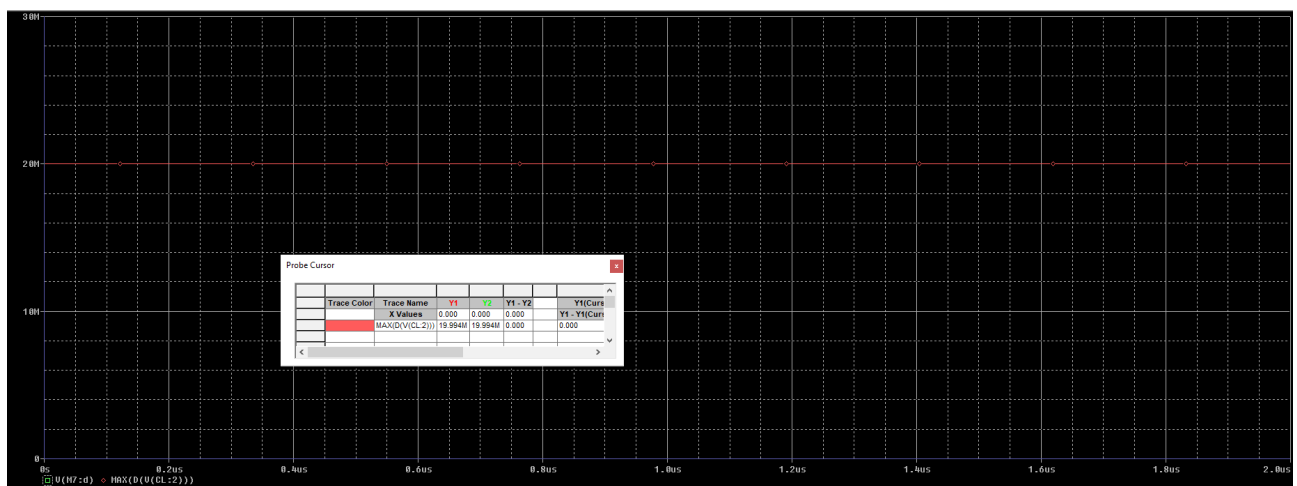
Σχ.5 Προσομοιωμένο κύκλωμα *Spice* για εύρεση SR

Στη συνέχεια, ακολουθεί το ίδιο κύκλωμα απλά με εμφάνιση των ρευμάτων στους κλάδους, καθώς και η κυματομορφή του SR, η οποία υπολογίστηκε κάνοντας Time Domain (transient) ανάλυση για 2μs.





Σχ.6 Προσομοιωμένο κύκλωμα *Spice* για εύρεση *SR* με *bias current display enabled*



Σχ.7 Κυματομορφή *SR*

Από τα σχήματα 6 και 7 παρατηρούμε ότι:

$$I_6 = 96,3\mu\text{A}$$

$$\text{SR} = 19,994\text{V}/\mu\text{s} > 18,18\text{V}/\mu\text{s}$$

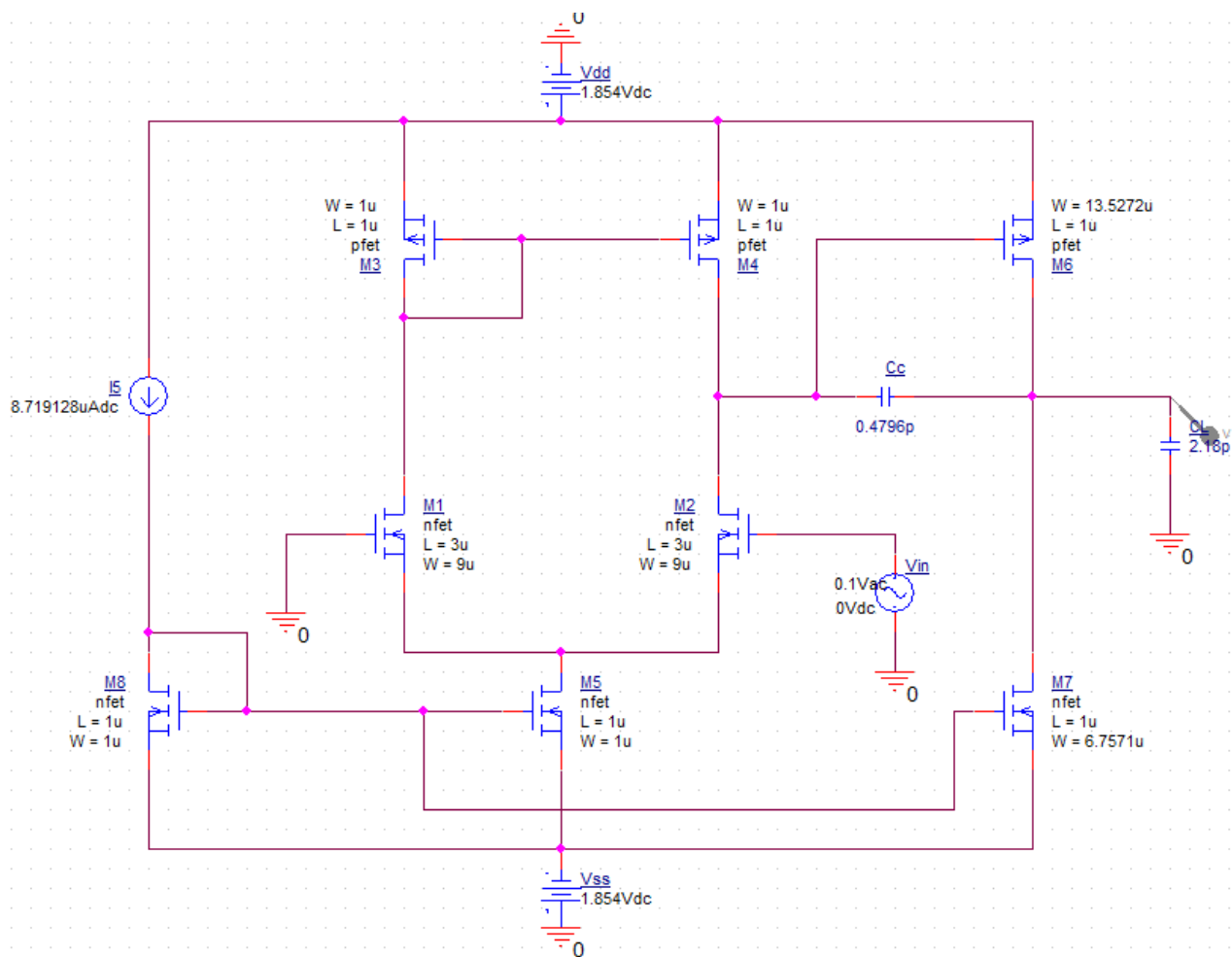
Τέλος, υπολογίζουμε το  $P_{\text{diss}}$  από τον τύπο:

$$\begin{aligned} P_{\text{diss}} &= (I_5 + I_6)(V_{\text{dd}} + |V_{\text{ss}}|) \\ &= (8,719128\mu\text{A} + 96,3\mu\text{A})(1,854\text{V} + 1,854\text{V}) \\ &= 0,389\text{mW} < 50,18\text{mW} \end{aligned}$$

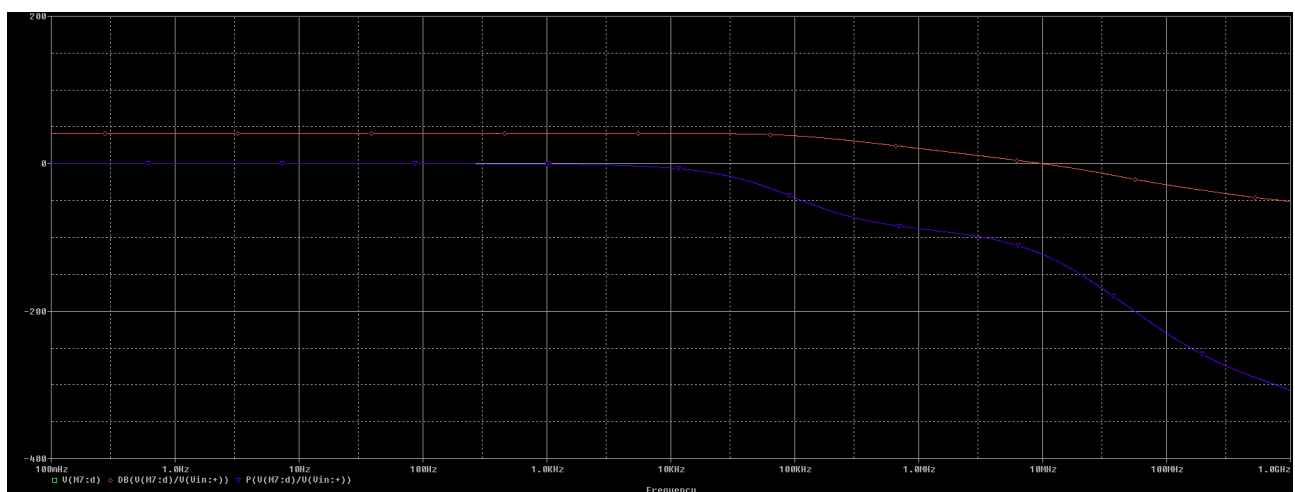
Παρατηρούμε ότι όλες οι προδιαγραφές μας πληρούνται, εκτός από εκείνες για το GB και το περιθώριο φάσης. Οπότε συνεχίζουμε εφαρμόζοντας τη διαδικασία tuning.

## **Tuning**

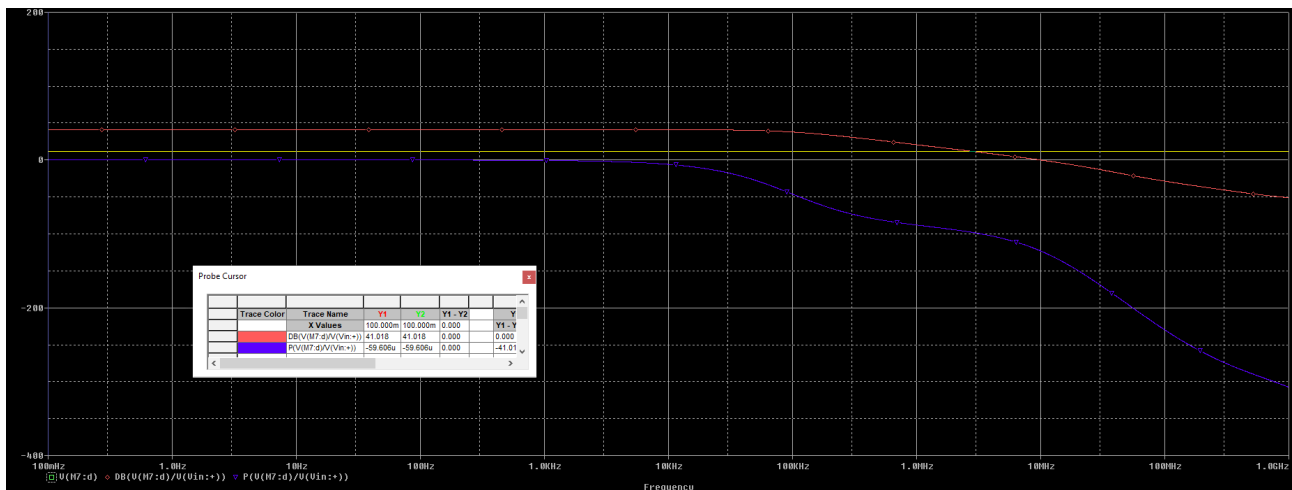
Στα τρανζίστορ M1 και M2 εφαρμόζουμε τις εξής αλλαγές:  $L1 = L2 = 3\mu\text{m}$ ,  $W1 = W2 = 9\mu\text{m}$  και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία. Παρακάτω παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των κυκλωμάτων και των κυματομορφών για τη διαδικασία tuning:



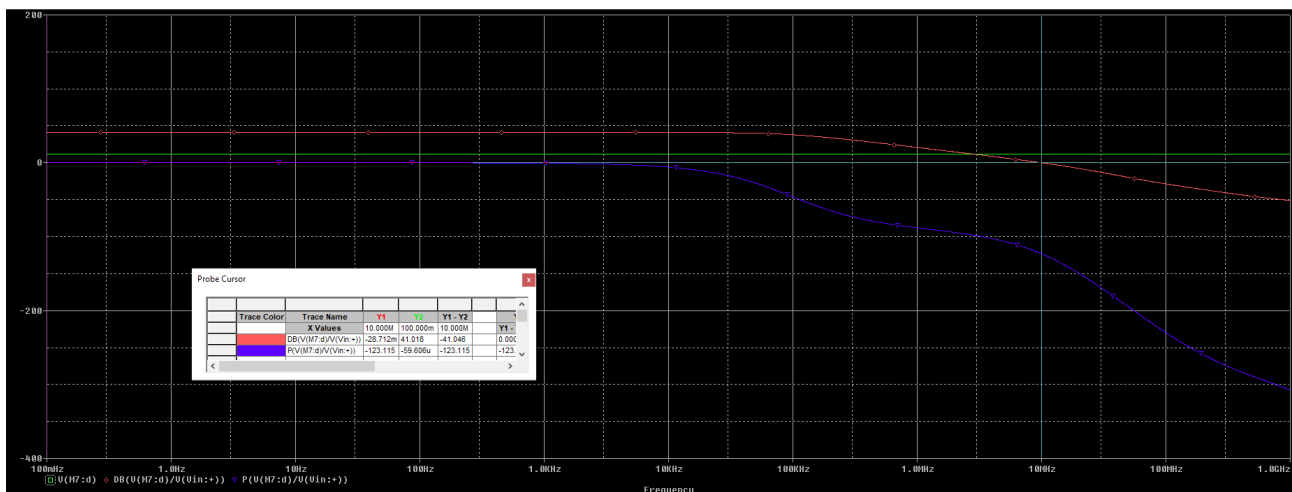
Σχ.8 Προσομοιωμένο κύκλωμα στο *Spice(tuning)*



Σχ.9 Κυματομορφές **κέρδους**, **φάσης**(*tuning*)



Σχ.10 Cursor για εύρεση κέρδους(tuning)



Σχ.11 Cursor για εύρεση φάσης(tuning)

Από τα σχήματα 10 και 11 παρατηρούμε ότι:

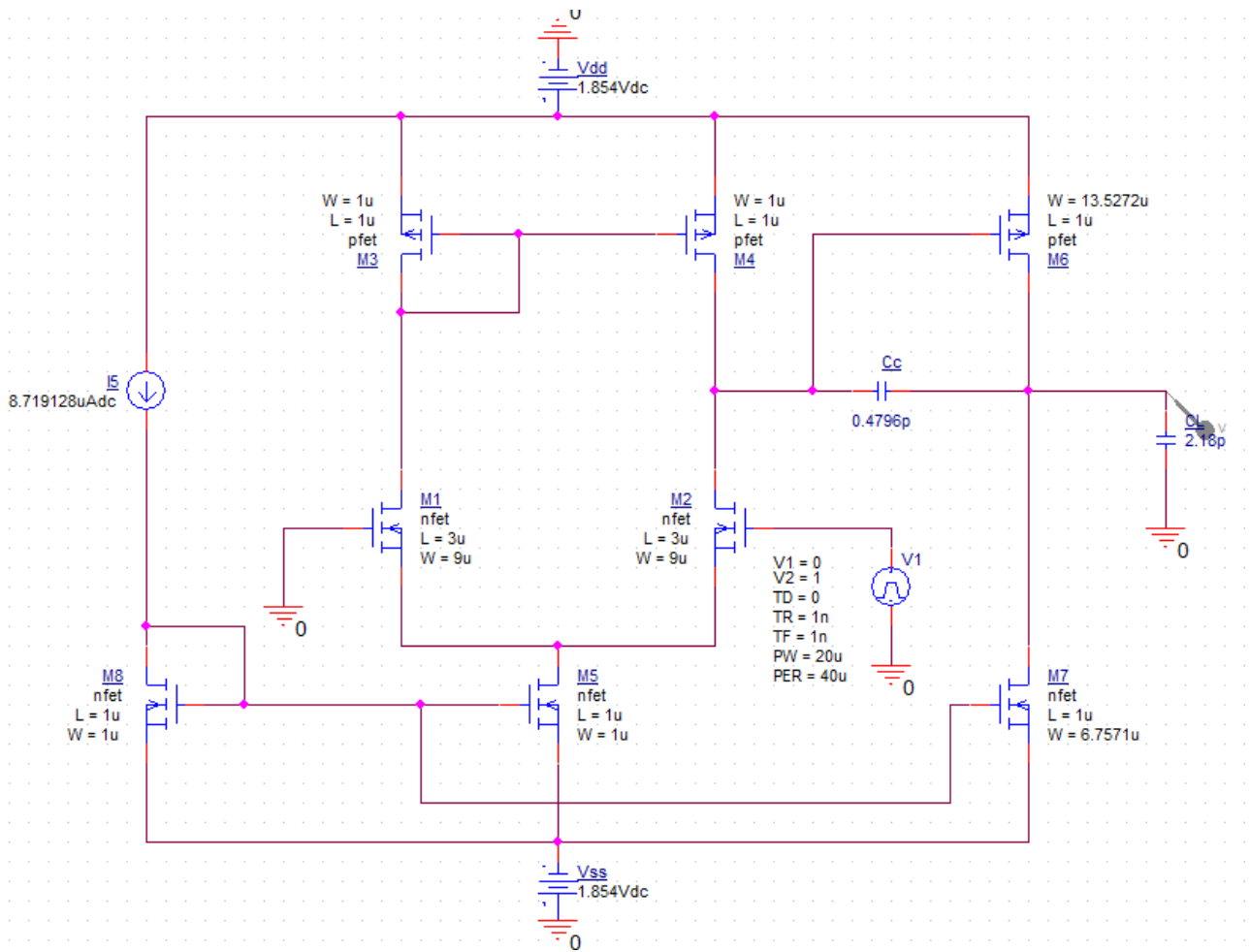
$$A = 41,018\text{dB} > 20,18\text{dB}$$

$$GB = 10,0\text{MHz} > 7,18\text{MHz}$$

$$\text{Περιθώριο φάσης} = 180^\circ - |\varphi| = 180^\circ - |-123,115^\circ| = 56,885^\circ < 60^\circ, \text{ όπου } \varphi \text{ η γωνιά στην οποία ισχύει } A = 0 \text{ dB.}$$

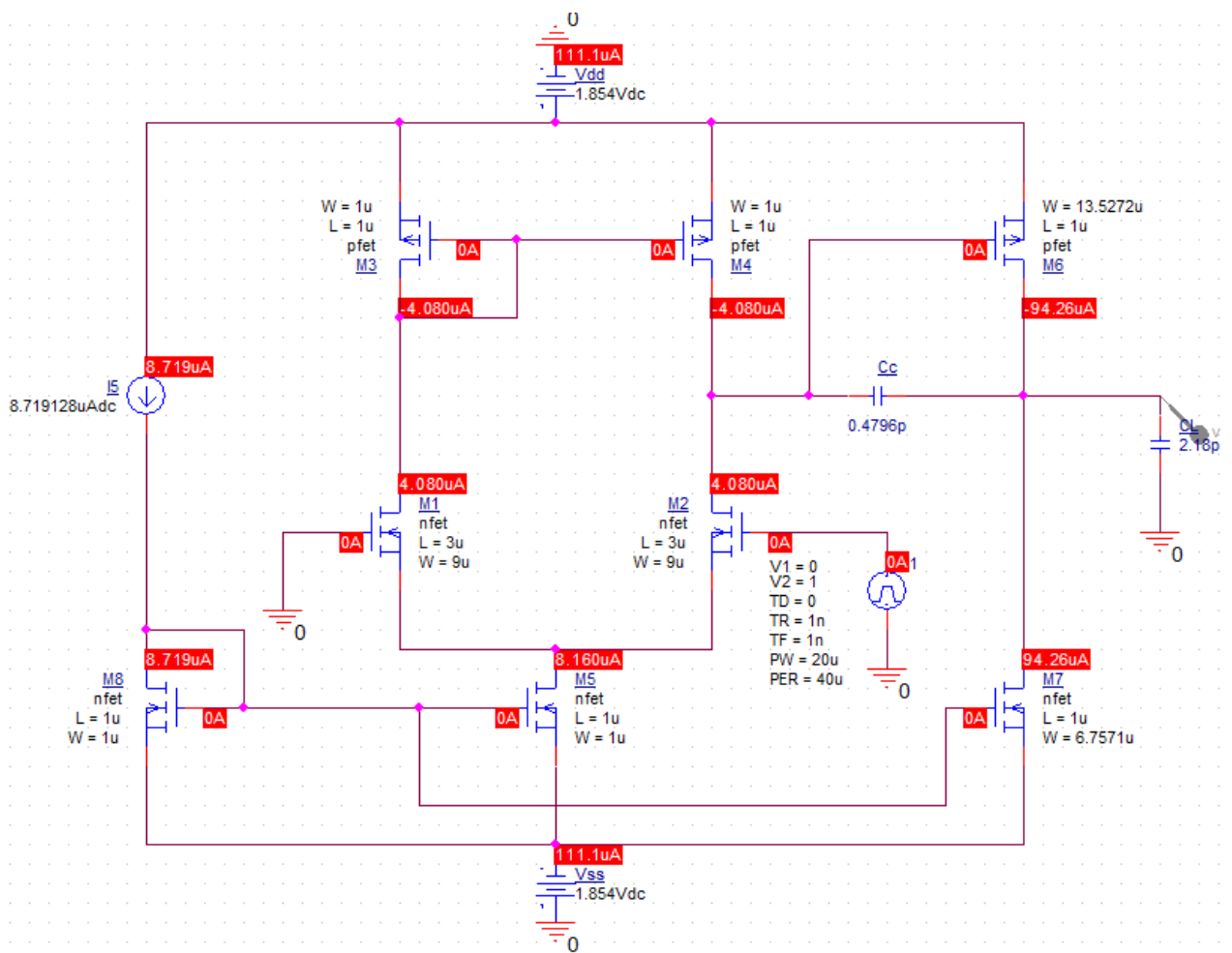
Παρατηρούμε ότι όλες οι προδιαγραφές μας μέχρι στιγμής πληρούνται και ισχύει:  $45^\circ < \text{περιθώριο φάσης} < 60^\circ$

Συνεχίζουμε με την εύρεση του νέου SR:

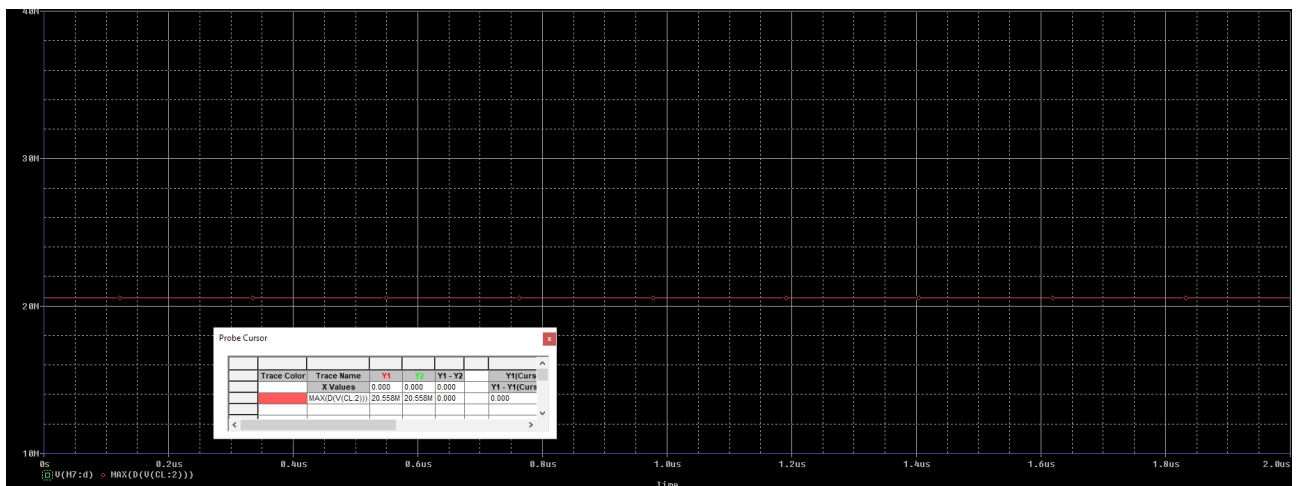


Σχ.12 Προσομοιωμένο κύκλωμα *Spice* για εύρεση  $SR(tuning)$

Στη συνέχεια, ακολουθεί το ίδιο κύκλωμα απλά με εμφάνιση των ρευμάτων στους κλάδους, καθώς και η κυματομορφή του SR, η οποία υπολογίστηκε κάνοντας Time Domain (transient) ανάλυση για  $2\mu s$ .



Σχ.13 Προσομοιωμένο κύκλωμα *Spice* για εύρεση *SR* με *bias current display enabled(tuning)*



Σχ.14 Κυματομορφή *SR*

Από τα σχήματα 13 και 14 παρατηρούμε ότι:

$$I_6 = 94,26\mu\text{A}$$

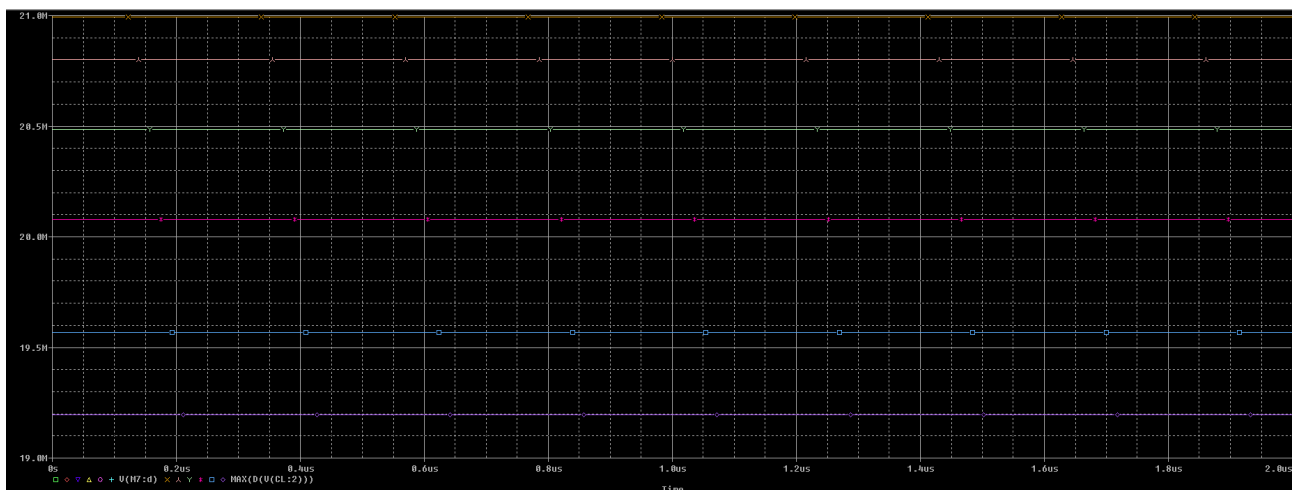
$$\text{SR} = 20,558\text{V}/\mu\text{s} > 18,18\text{V}/\mu\text{s}$$

Τέλος, υπολογίζουμε το  $P_{\text{diss}}$  από τον τύπο:

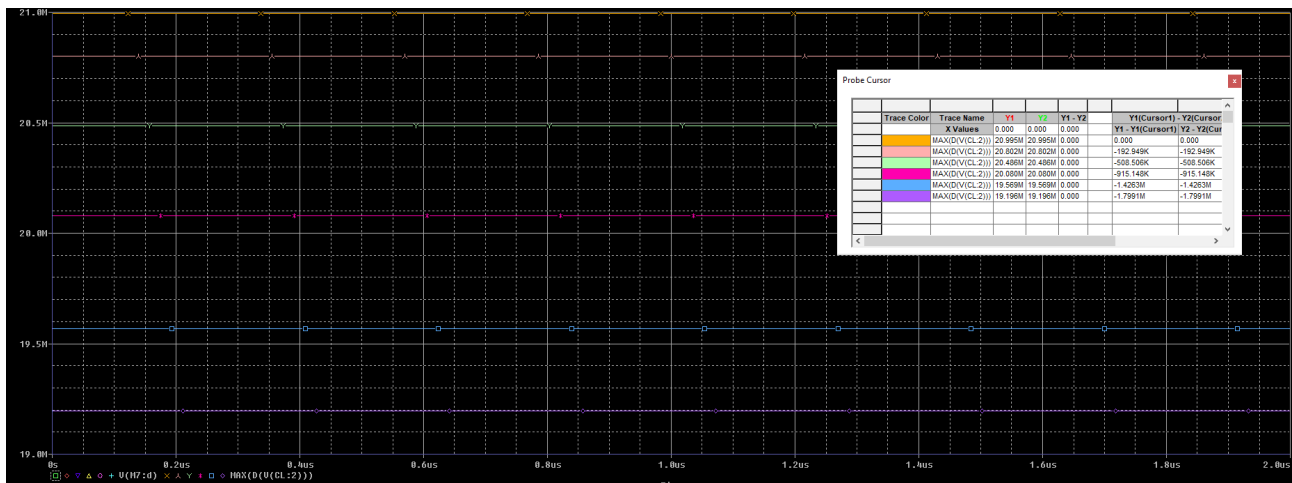
$$\begin{aligned} P_{\text{diss}} &= (I_5 + I_6)(V_{\text{dd}} + |V_{\text{ss}}|) \\ &= (8,719128\mu\text{A} + 94,26\mu\text{A})(1,854\text{V} + 1,854\text{V}) \\ &= 0,381\text{mW} < 50,18\text{mW} \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι όλες οι προδιαγραφές μας πληρούνται.

Παρ' όλα αυτά πρέπει να κάνουμε και ένα temperature sweep για να δούμε αν ικανοποιείται η προδιαγραφή για το SR και σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχ.15 Temperature sweep για: 0°C, 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C



Σχ.16 Temperature sweep (cursor) για: 0°C, 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C

Παρατηρούμε ότι για όλες τις θερμοκρασίες που έγινε η προσομοίωση ισχύει η προδιαγραφή:  $SR > 18,18V/\mu s$

| Τελικές τιμές των W, L (σε $\mu m$ ) |    |    |    |    |         |        |    |
|--------------------------------------|----|----|----|----|---------|--------|----|
| W1                                   | W2 | W3 | W4 | W5 | W6      | W7     | W8 |
| 9                                    | 9  | 1  | 1  | 1  | 13.5272 | 6.7571 | 1  |
| L1                                   | L2 | L3 | L4 | L5 | L6      | L7     | L8 |
| 3                                    | 3  | 1  | 1  | 1  | 1       | 1      | 1  |

## Σημειώσεις:

- 1) Η προσέγγιση του  $A = 0dB$  για την εύρεση του περιθόριου φάσης έγινε στο περίπου, με τον κέρσορα όσο πιο κοντά στο μηδέν γινόταν.
- 2) Οι όποιες μικροδιαφορές υπάρχουν στα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς της αναφοράς με αυτά του κώδικα της MATLAB, οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις.

Ακολουθεί ο κώδικας MATLAB για τις προδιαγραφές.



# MATLAB Script

```
%AEM = 9818 so i = 18
i = 18;

%=====
%==Constants==
%=====
L = 10^(-6);
Vop = 180.2 * 10^(-4);
Kp = 2.9352 * 10^(-5);
Kn = 9.6379 * 10^(-5);
Cox = Kp / Vop;
lp = 0.05;
ln = 0.04;
Vin_MAX = 0.1;
Vin_MIN = -0.1;
Vtop = -0.9056;
Vton = 0.786;

%=====
%==Values depending on i==
%=====
CL = (2 + 0.01*i) * 10^(-12);
SR = (18 + 0.01*i) * 10^6;
Vdd = 1.8 + 0.003*i;
Vss = -(1.8 + 0.003*i);
GB = (7 + 0.01*i) * 10^6;
A = (20 + 0.01*i);
P = (50 + 0.01*i) * 10^(-3);

%=====
%==Calculations==
%=====
Cc = 0.22 * CL;
I5 = Cc * SR;
S3 = I5 / (Kp * (Vdd - Vin_MAX - abs(Vtop) - 0.15 + Vton - 0.15)^2);
fprintf('Current S3 = %f\n', S3);

if S3 < 1
    fprintf('S3 < 1 so S3 = 1\n');
    S3 = 1;
end

S4 = S3;
p3 = sqrt(2 * Kp * S3 * I5/2) / (2 * 0.667 * S3 * (L^2) * Cox);
gm1 = 2 * pi * GB * Cc;
gm2 = gm1;
S1 = gm1^2 / (Kn * I5);
fprintf('Current S1 = %f\n', S1);

if S1 < 1
    fprintf('S1 < 1 so S1 = 1\n');
    S1 = 1;
end

S2 = S1;
Vds5 = Vin_MIN - Vss - sqrt(I5 / (S1*Kn)) - Vton - 0.15;
S5 = 2 * I5 / (Kn * Vds5^2);
fprintf('Current S5 = %f\n', S5);

if S5 < 1
```

```

    fprintf('S5 < 1 so S5 = 1\n');
    S5 = 1;
end

S8 = S5;
gm6 = 2.2 * gm2 * CL/Cc;
gm4 = sqrt(2 * Kp * S4 * I5/2);
S6 = S4 * gm6 / gm4;
fprintf('Current S6 = %f\n', S6);

if S6 < 1
    fprintf('S6 < 1 so S6 = 1\n');
    S6 = 1;
end

I6 = gm6^2 / (2 * Kp * S6);
S7 = I6 * S5 / I5;
fprintf('Current S7 = %f\n', S7);

if S7 < 1
    fprintf('S7 < 1 so S7 = 1\n');
    S7 = 1;
end

Av = 2 * gm2 * gm6 / (I5 * (ln + lp) * I6 * (ln + lp));
Pdis = (I5 + I6) * (Vdd + abs(Vss));

%=====
%==Find each W==
%=====
W1 = S1 * L;
W2 = S2 * L;
W3 = S3 * L;
W4 = S4 * L;
W5 = S5 * L;
W6 = S6 * L;
W7 = S7 * L;
W8 = S8 * L;

%=====
%==Print the results==
%=====
fprintf('=====\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('Final Results:\n');
fprintf('CL = %fpF\n', CL*10^(12));
fprintf('SR = %fV/microsec\n', SR*10^(-6));
fprintf('Vdd = %fV\n', Vdd);
fprintf('Vss = %fV\n', Vss);
fprintf('GB = %fMHz\n', GB*10^(-6));
fprintf('A = %fdB\n', A);
fprintf('P = %fmW\n', P*10^(3));
fprintf('=====\n');
fprintf('Cc = %.20f\n', Cc);
fprintf('I5 = %.20f\n', I5);
fprintf('S3 = %f\n', S3);
fprintf('S4 = %f\n', S4);
fprintf('p3 = %f rad/sec or %fHz\n', p3, p3/(2*pi));
fprintf('gm1 = %.20f\n', gm1);
fprintf('gm2 = %.20f\n', gm2);
fprintf('S1 = %f\n', S1);
fprintf('S2 = %f\n', S2);
fprintf('Vds5 = %f\n', Vds5);
fprintf('S5 = %f\n', S5);

```

```
fprintf('S8 = %f\n', S5);
fprintf('gm6 = %.20f\n', gm6);
fprintf('gm4 = %.20f\n', gm4);
fprintf('S6 = %f\n', S6);
fprintf('I6 = %.20f\n', I6);
fprintf('S7 = %f\n', S7);
fprintf('Av = %f V/V or %fdB\n', Av, 20*log10(Av));
fprintf('Pdis = %f\n', Pdis);
fprintf('W1 = %.20f\n', W1);
fprintf('W2 = %.20f\n', W2);
fprintf('W3 = %.20f\n', W3);
fprintf('W4 = %.20f\n', W4);
fprintf('W5 = %.20f\n', W5);
fprintf('W6 = %.20f\n', W6);
fprintf('W7 = %.20f\n', W7);
fprintf('W8 = %.20f\n', W8);
fprintf('=====');
```