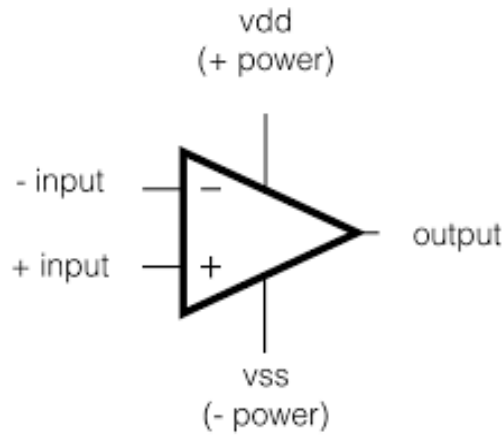


# Εργασία Σχεδίασης Τελεστικού Ενισχυτή

Στα πλαίσια της *Ηλεκτρονικής ΙΙΙ*



Όνομα: **Στασινός Αλκιβιάδης**

**AEM: 9214**

Email: **astasinos@ece.auth.gr**

## Υπολογισμός Παραμέτρων

Με ΑΕΜ 9214 , το  $\xi$  προκύπτει  $\xi=14$  επομένως με βάση την εκφώνηση έχουμε:

$$CL = 2.14 \text{ pF}$$

$$SR > 18.14 \text{ V}/\mu\text{S}$$

$$V_{dd} = 1.842 \text{ V}$$

$$V_{ss} = -1.842 \text{ V}$$

$$GB > 7.14 \text{ MHz}$$

$$A > 20.14 \text{ dB}$$

$$P < 50.14 \text{ mW}$$

## Βήματα Αλγορίθμου

1° . Επιλέγουμε μήκος καναλιού  $L = 1 \mu\text{m}$

2° . Πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε την ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας **Miller Cc**. Γνωρίζουμε πως πρέπει  $C_c > 0.22CL$  , άρα  $C_{cmin} = 0.22CL = 0.4708 \text{ pF}$  . Τελικά επιλέγεται η τιμή  $C_c = 3 \text{ pF}$  που πληροί την παραπάνω προϋπόθεση.

3° . Υπολογίζουμε το ρεύμα πόλωσης  $I_5 = SR * C_c = 54.4 \mu\text{A}$

4° . Αρχικά μας δίνεται πως  $V_{in(max)} = 100 \text{ mV}$  και  $V_{in(min)} = -100 \text{ mV}$ . Επίσης είναι  $V_{t03(max)} = V_{TOP} = -0.9056 \text{ V}$  και  $V_{t01(min)} = V_{TON} = 0.786$ .

Επιπλέον γνωρίζοντας πως τα  $K_p$  και  $K_n$  κυμαίνονται περίπου από 50 εως 150 επί  $10^{-6}$  επιλέγουμε  $K_p = 60 * 10^{-6}$  και  $K_n = 150 * 10^{-6}$ .

Συνεπώς από τον τύπο  $S_3 = I_5 / (K_p * (V_{dd} - V_{in(max)} - |V_{t03}(max)| + V_{t1(min)})^2)$  υπολογίζουμε  $S_3 = 0.344$  .

Ωστόσο αυτή η τιμή δεν είναι αποδεκτή αφού πρέπει  $S_3 \geq 1$ . Επομένως επιλέγουμε  $S_3 = S_4 = 1$ .

5° . Εδώ θα πρέπει να ελέγξουμε την προδιαγραφή  $p_3 > 10GB$ .

Είναι  $p_3 = \frac{\sqrt{(2 * K_p * S_3 * I_3)}}{2 * 0.667 * W_3 * L * C_{ox}}$  όπου  $I_3 = I_5 / 2$  ,  $W_3 = S_3 * L$  και  $C_{ox} = 4.6 * 10^{-3}$ . Άρα  $p_3 = 9.312 * 10^9 \text{ rad/s}$  . Άρα και  $p_3 > 10 * 2\pi * GB = 4.48 * 10^8$

6° . Υπολογίζεται πρώτα το  $gm1 = gm2 = GB * 2\pi * Cc = 1.34 * 10^{-4}$  . Είναι  $S1 = S2 = \frac{gm1^2}{Kn * I5} = 2.219$

7° . Υπολογίζουμε  $\beta1 = Kn * S1 = 3.328 * 10^{-4}$  άρα και  $Vds5(sat) = Vin(min) - Vss - \sqrt{\frac{I5}{\beta1}} -$

$VT0N = 0.551 V$  . Τελικά  $S5 = \frac{2 * I5}{(kn * (Vds5)^2)} = 2.384$

8° και 9° . Είναι  $I4 = I5/2 = 27.2. \mu A$  ,  $gm4 = \sqrt{2 * Kp * S4 * I4} = 5.7142$  ,  $gm6 = 2.2 * gm2 * \frac{CL}{Cc} = 2.1121$  άρα και  $S6 = S4 * \frac{gm6}{gm4} = 3.6962$  ,  $I6 = \frac{gm6^2}{2 * Kp * S6} = 100.5 \mu A$  .

10° . Το  $S7$  υπολογίζεται  $S7 = \frac{I6}{I5} * S5 = 4.4066$

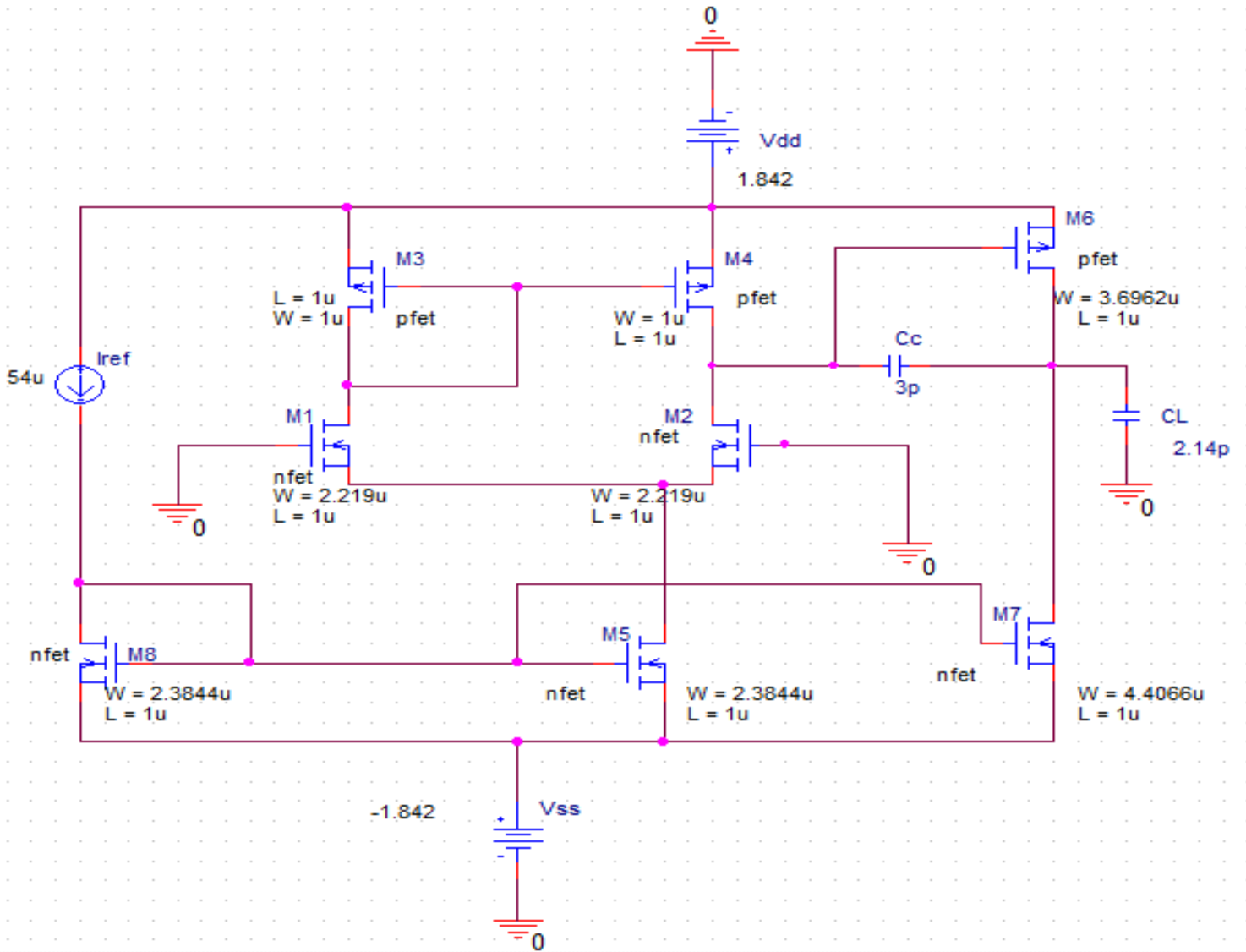
11° . Υπολογίζουμε το κέρδος  $Av = 2 * gm2 * \frac{gm6}{I5} * (\lambda n + \lambda p) * I6 * (\lambda n + \lambda p) = 1282$  , όπου  $\lambda n = 0.04$  και  $\lambda p = 0.05$  . Άρα  $20 \log Av = 62.16 dB > Amin$  που ορίζεται στις προδιαγραφές. Ομοίως  $Pdiss = (I5 + I6) * (Vdd + |Vss|) = 5.71 * 10^{-4} = 0.571 mW < Pmax$  . Τέλος ισχύει επίσης  $W8 = W5$ .

#### Συγκεντρωτικός Πίνακας W

| Transistor | Μήκος Καναλιού L | W                  |
|------------|------------------|--------------------|
| M1         | 1                | $2.219 * 10^{-6}$  |
| M2         | 1                | $2.219 * 10^{-6}$  |
| M3         | 1                | $1.0000 * 10^{-6}$ |
| M4         | 1                | $1.0000 * 10^{-6}$ |
| M5         | 1                | $2.3844 * 10^{-6}$ |
| M6         | 1                | $3.6962 * 10^{-6}$ |
| M7         | 1                | $4.406 * 10^{-6}$  |
| M8         | 1                | $2.3844 * 10^{-6}$ |

Το **MATLAB Script** που δημιουργήθηκε για την υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου βρίσκεται στο Παράρτημα Α αλλά και μέσα στο φάκελο με όνομα **oramp.m** .

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε αρχικά το κύκλωμα στο **Pspice**.



The schematic shows a two-stage CMOS operational amplifier. The first stage is a differential pair consisting of NMOS transistors M1 and M2, and PMOS transistors M3 and M4. The second stage is a common-source amplifier using NMOS transistor M7 and PMOS transistor M6. The circuit includes a tail current source M8, a compensation capacitor Cc, and a load capacitor CL. Simulation results are overlaid on the schematic, showing node voltages and branch currents.

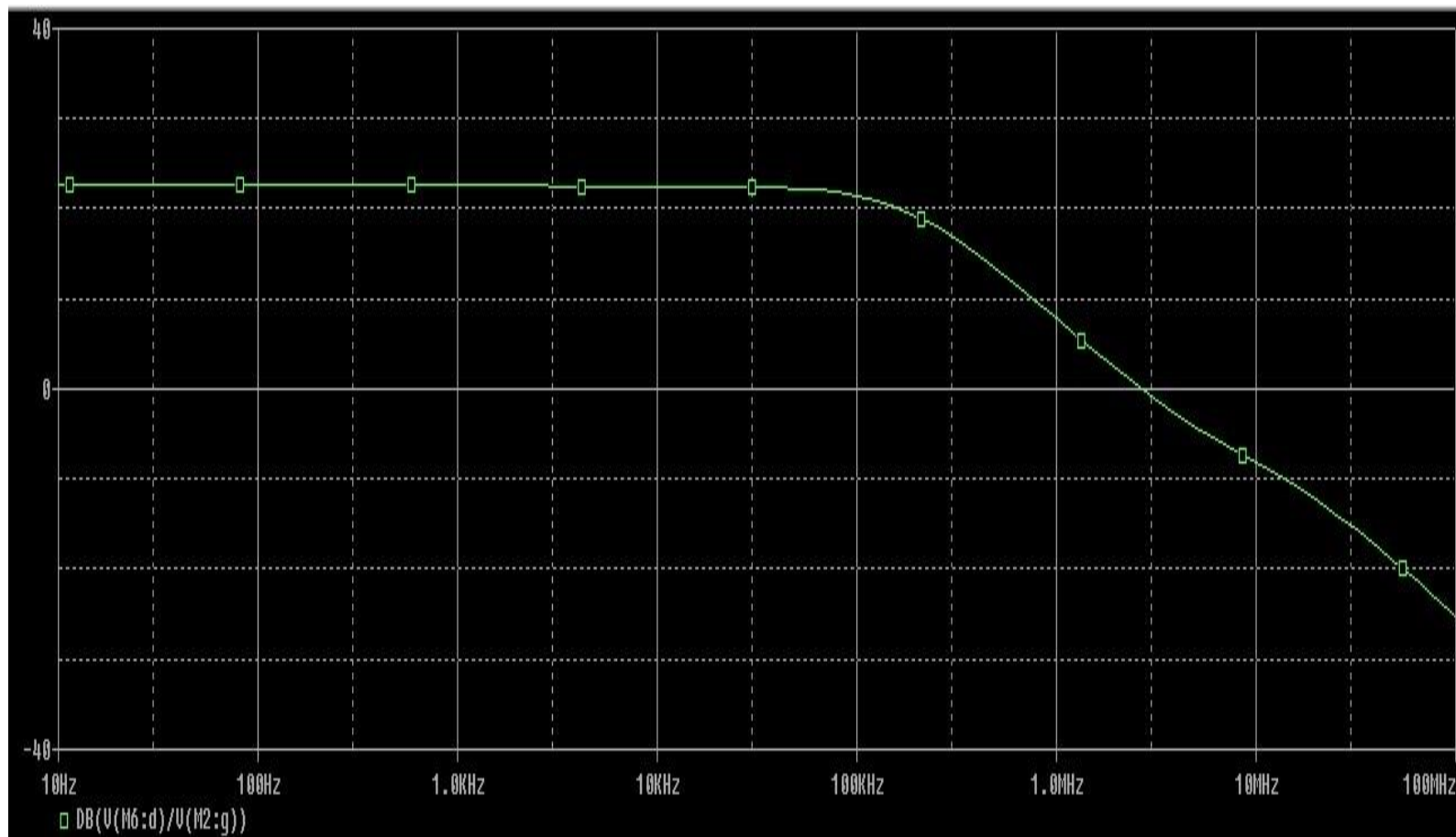
Key simulation results from the image:

- Supply voltages:  $V_{DD} = 1.842V$ ,  $V_{SS} = -1.842V$ .
- Input differential-mode voltage:  $54.00\mu A$  (current source).
- Node voltages:
  - Output 1 (M4/M6 node):  $-417.3mV$
  - Output 2 (M2/M7 node):  $-667.2mV$
  - Common-mode output (M1/M5 node):  $-1.079V$
- Branch currents:
  - M1:  $22.49\mu A$
  - M2:  $22.49\mu A$
  - M3:  $22.49\mu A$
  - M4:  $22.49\mu A$
  - M5:  $44.97\mu A$
  - M6:  $100.3\mu A$
  - M7:  $100.3\mu A$
  - M8:  $54.00\mu A$
- Capacitors:
  - Compensation capacitor  $C_c = 3pF$
  - Load capacitor  $C_L = 2.14pF$
- Transistor parameters:
  - M1, M2, M3, M4:  $L = 1\mu m$ ,  $W = 2.219\mu m$
  - M5, M6, M7, M8:  $L = 1\mu m$ ,  $W = 2.3844\mu m$
  - M6:  $W = 3.6962\mu m$
  - M7:  $W = 4.4066\mu m$

- Για το **Κέρδος** τοποθετήθηκε μια πηγή **AC** στην πύλη του τρανζίστορ **M2** και μετά πραγματοποιήθηκε **AC Sweep** με **Start frequency=1** ,**End frequency=100meg** και **Points/Decade=10**.
- Από το διάγραμμα κέρδους μπορεί επίσης να εξαχθεί η τιμή του **GB** αφού είναι η συχνότητα στην οποία μηδενίζεται το κέρδος

## Σύνδεση Vac

Για το διάγραμμα δόθηκε Trace  $DB(V(M6:d)/V(M2:g))$

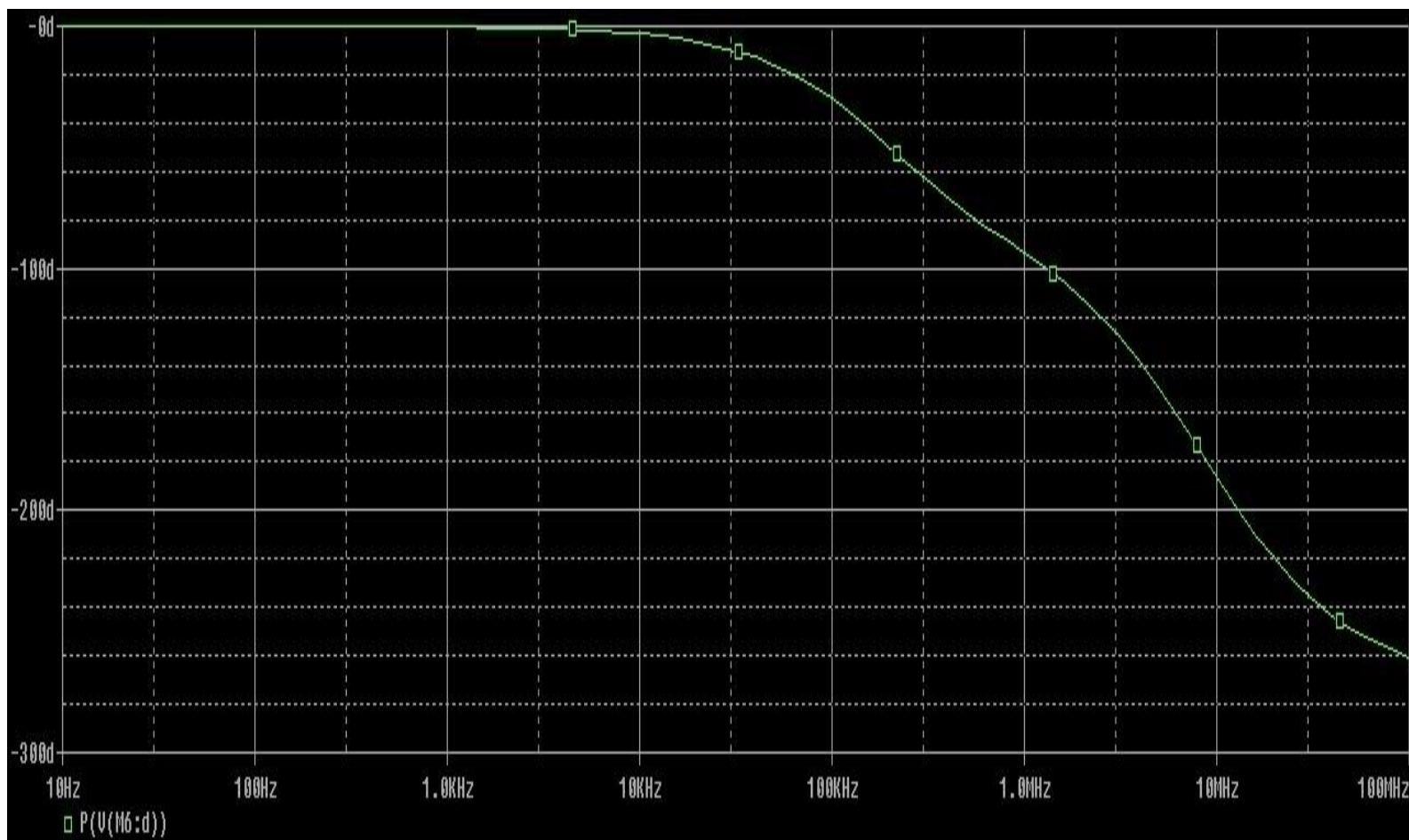


Βλέπουμε από το διάγραμμα πως  $A_v = 22.549 \text{ dB} > A_{min} = 20.14 \text{ dB}$  που ορίζεται στις παραμέτρους επομένως αυτή η παράμετρος ικανοποιείται.

Δίνοντας στο παραπάνω διάγραμμα την εντολή  $sfl e(0)$  βρίσκουμε ότι  $GB = 2.667 \text{ MHz} < GB_{min} = 7.14 \text{ MHz}$

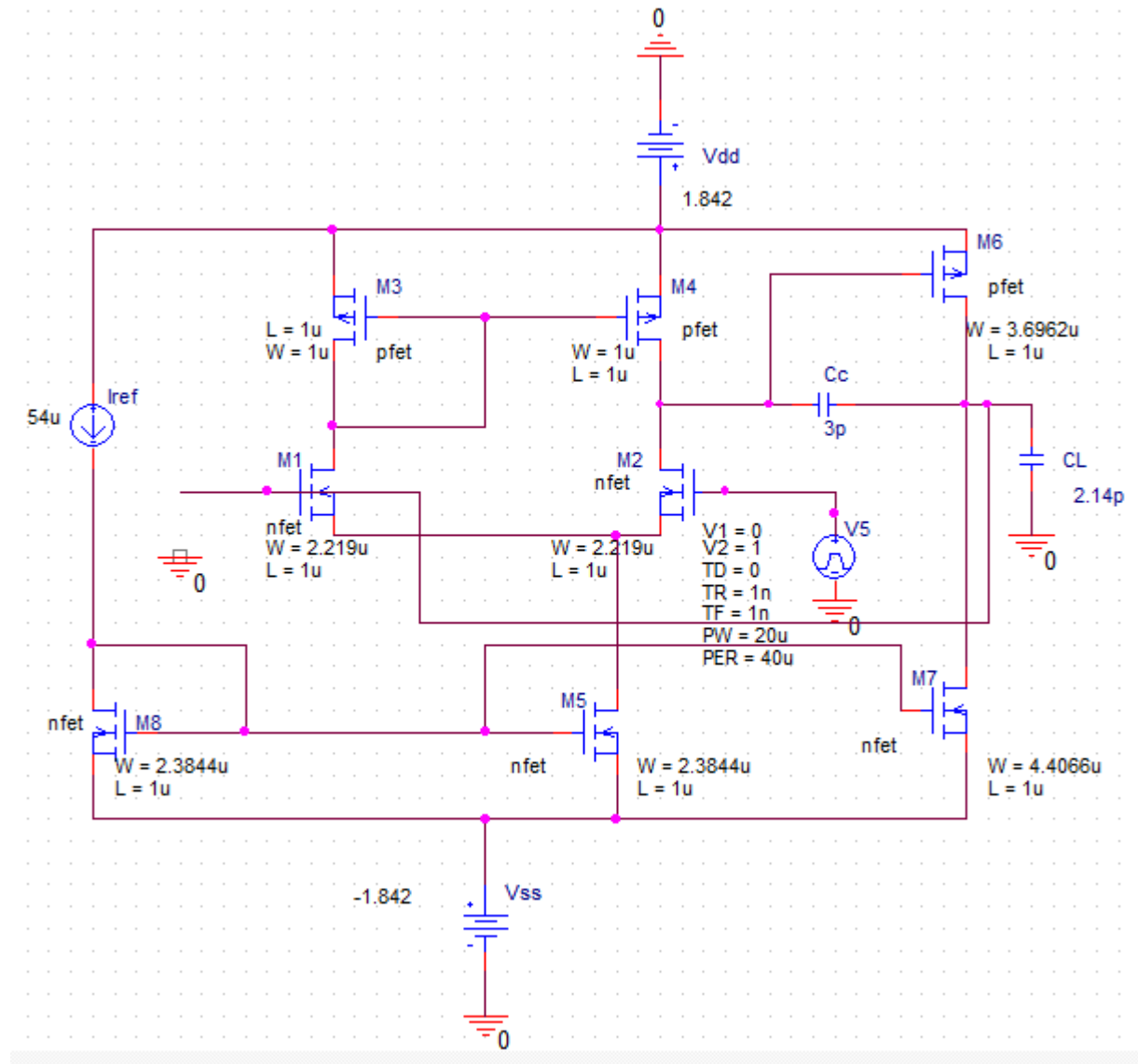
Επομένως η προδιαγραφή για το **GB** δεν πληρείται.

- Για τον υπολογισμό του περιθωρίου φάσης δόθηκε Trace P(V(M6:d))



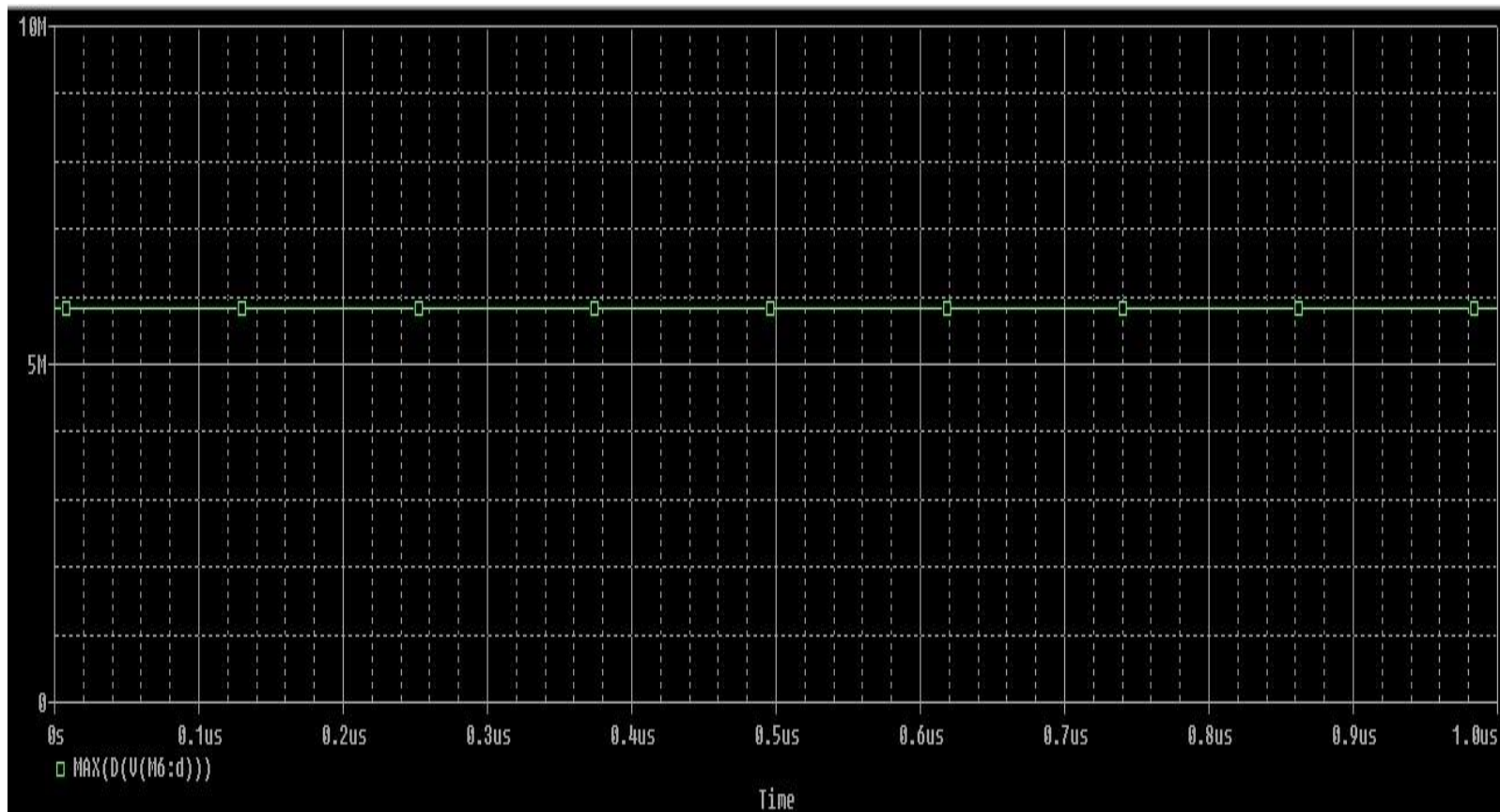
Υπολογίζοντας την τιμή του διαγράμματος στη συχνότητα **GB= 2.667 MHz** έχουμε περιθώριο φάσης  $180 - 122.3 = 57.7^\circ$  δηλαδή **μέσα** στα επιτρεπτά όρια **45 – 60 μοίρες**.

- Για τον υπολογισμό του **SR** αλλάζουμε την πηγή **Vac** με παλμική πηγή **Vpulse** και κάνουμε **Transient Analysis ( Time Domain )**. Θέτουμε τον τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία μοναδιαίου κέρδους (unity-gain) και εφαρμόζουμε στην είσοδο τετραγωνικό παλμό πλάτους 1V και πολύ μικρής χρονικής διάρκειας όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα.





Έτσι τρέχοντας την προσομοίωση και δίνοντας **Trace MAX(D(V(M6:d)))** προκύπτει το διάγραμμα :



Δηλαδή  **$SR = 5.818 \text{ V}/\mu\text{S} < SR_{min} = 18.14 \text{ V}/\mu\text{S}$**  . Συνεπώς η προδιαγραφή αυτή **δε** πληρείται.

Τέλος η ισχύς προκύπτει  **$P = (I5+I6) \cdot (Vdd + |Vss|) = 0.57 \text{ mW} < P_{max}$**

Όπως γίνεται αντιληπτό θα χρειαστεί να καταφύγουμε στο κατάλληλο **tuning** του κυκλώματος μας ώστε να μπορέσουμε να <<πιάσουμε>> **όλες** τις προδιαγραφές.

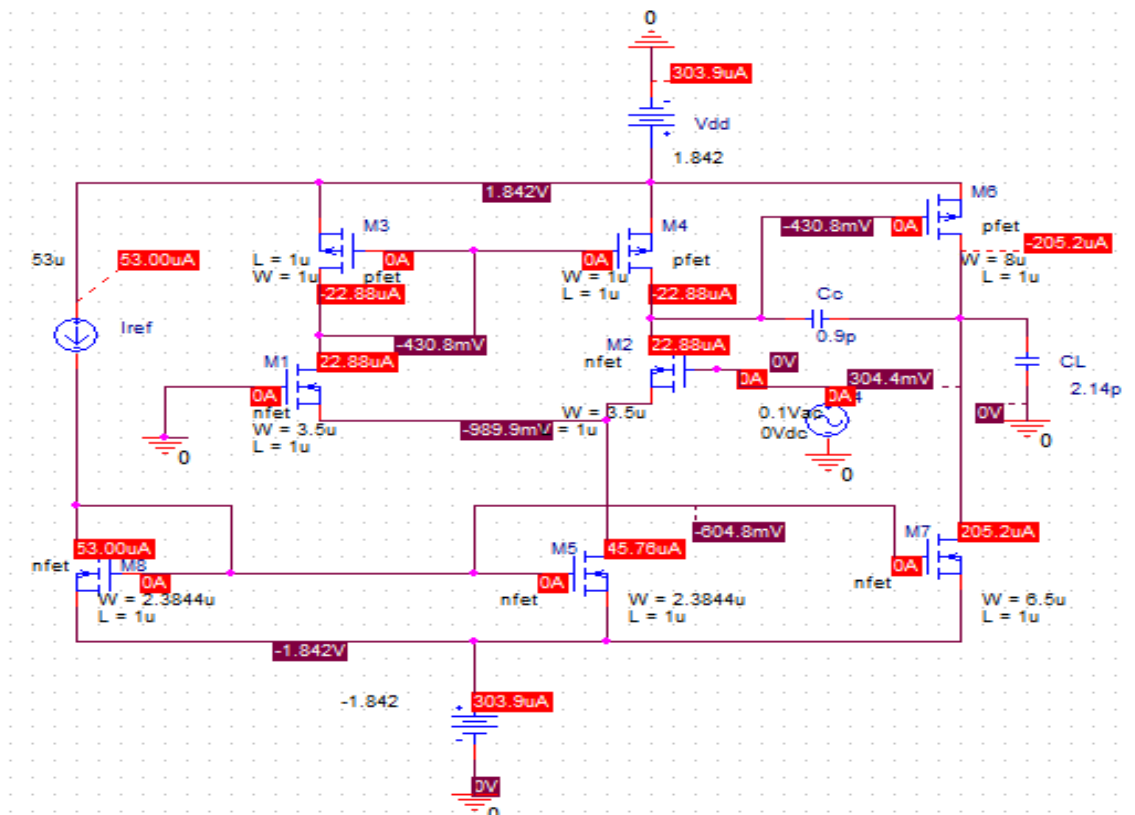
## Tuning

Όπως φαίνεται θα πρέπει να φέρουμε το **SR** και το **GB** στις κατάλληλες τιμές ώστε να πληρούνται όλες οι προδιαγραφές.

- Αρχικά για το **GB** μειώνουμε την χωρητικότητα **Miller** σε  **$C_c = 1.1\text{pF}$**  , αυξάνουμε το κέρδος των τρανζίστορ **M1** και **M2** σε  **$W1 = W2 = 3.5 * 10^{-6}$**  και το ρεύμα **I5** σε  **$I5 = 60\mu\text{A}$** .

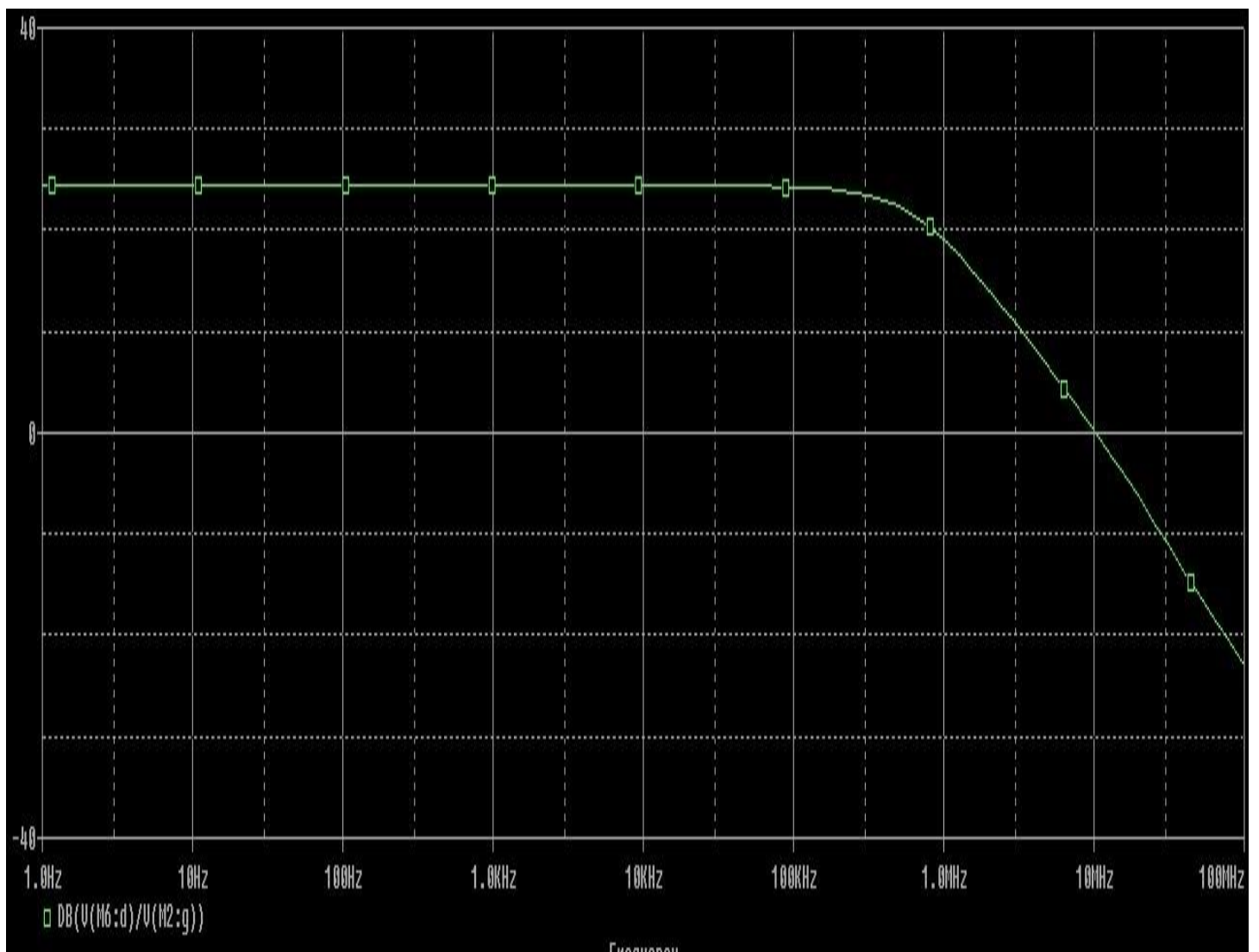
Με τις αλλαγές αυτές το κέρδος έγινε  **$A_u = 22.861\text{ dB}$**  το **GB** προσεγγιστικά **8 MHz** , το περιθώριο φάσης **42 μοίρες** και το **SR** =  **$5.519\text{ V}/\mu\text{S}$**  . Είναι φανερό πως οι προδιαγραφές για το περιθώριο φάσης και το **SR** δε πληρούνται επομένως στη συνέχεια αυξάνουμε το κέρδος του τρανζίστορ **M6** σε  **$W6 = 8 * 10^{-6}$**  και συνεχίζουμε να μειώνουμε το **Cc** σε **0.9 pF** . Τέλος αυξάνουμε και το κέρδος του τρανζίστορ **M7** σε  **$W7 = 6.5 * 10^{-6}$**  και επαναφέρουμε το ρεύμα **I5** κοντά στην αρχική τιμή στα **53μA** .

Με αυτές τις τελευταίες αλλαγές το **SR** προκύπτει  **$SR = 22.835\text{ V}/\mu\text{S} > SR_{min}$**  το  **$A_u = 24.386\text{ dB} > A_{min}$**  το **GB** = **10.272 MHz** > **GBmin**. Το περιθώριο φάσης μεταβλήθηκε και έγινε **180 – 121.15 = 58.85 μοίρες** δηλαδή μέσα στα αποδεκτά όρια **45-60** , ενώ έχουμε ισχύ  **$P = 0.95\text{ mW} < P_{max}$** . Επομένως πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις. Παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα προσομοιώσεων καθώς και η εικόνα το κυκλώματος μετά από το **tuning**.

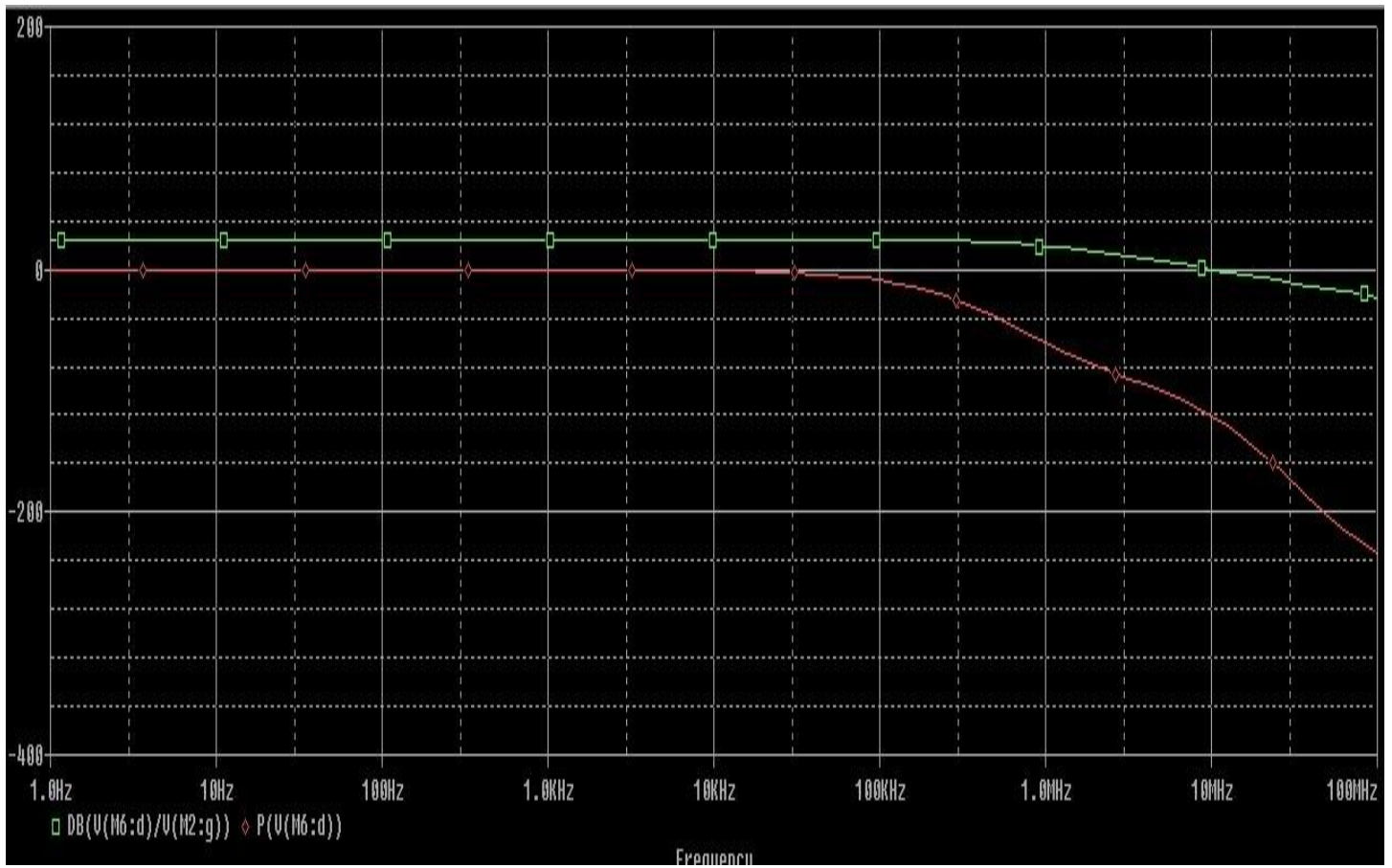


| Transistor | Μήκος καναλιού L | W                  |
|------------|------------------|--------------------|
| M1         | 1μm              | $3.5 * 10^{-6}$    |
| M2         | 1μm              | $3.5 * 10^{-6}$    |
| M3         | 1μm              | $1 * 10^{-6}$      |
| M4         | 1μm              | $1 * 10^{-6}$      |
| M5         | 1μm              | $2.3844 * 10^{-6}$ |
| M6         | 1μm              | $8 * 10^{-6}$      |
| M7         | 1μm              | $6.5 * 10^{-6}$    |
| M8         | 1μm              | $2.3844 * 10^{-6}$ |

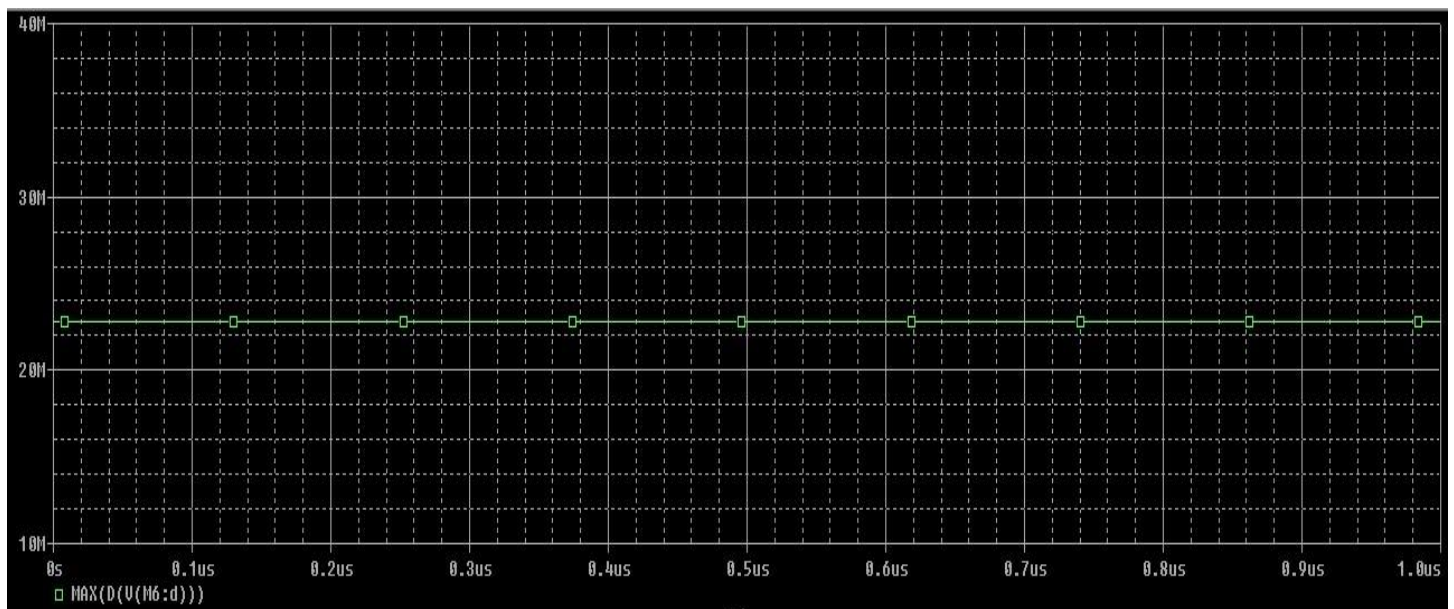
### Κέρδος και GB



## Περιθώριο Φάσης



## SR

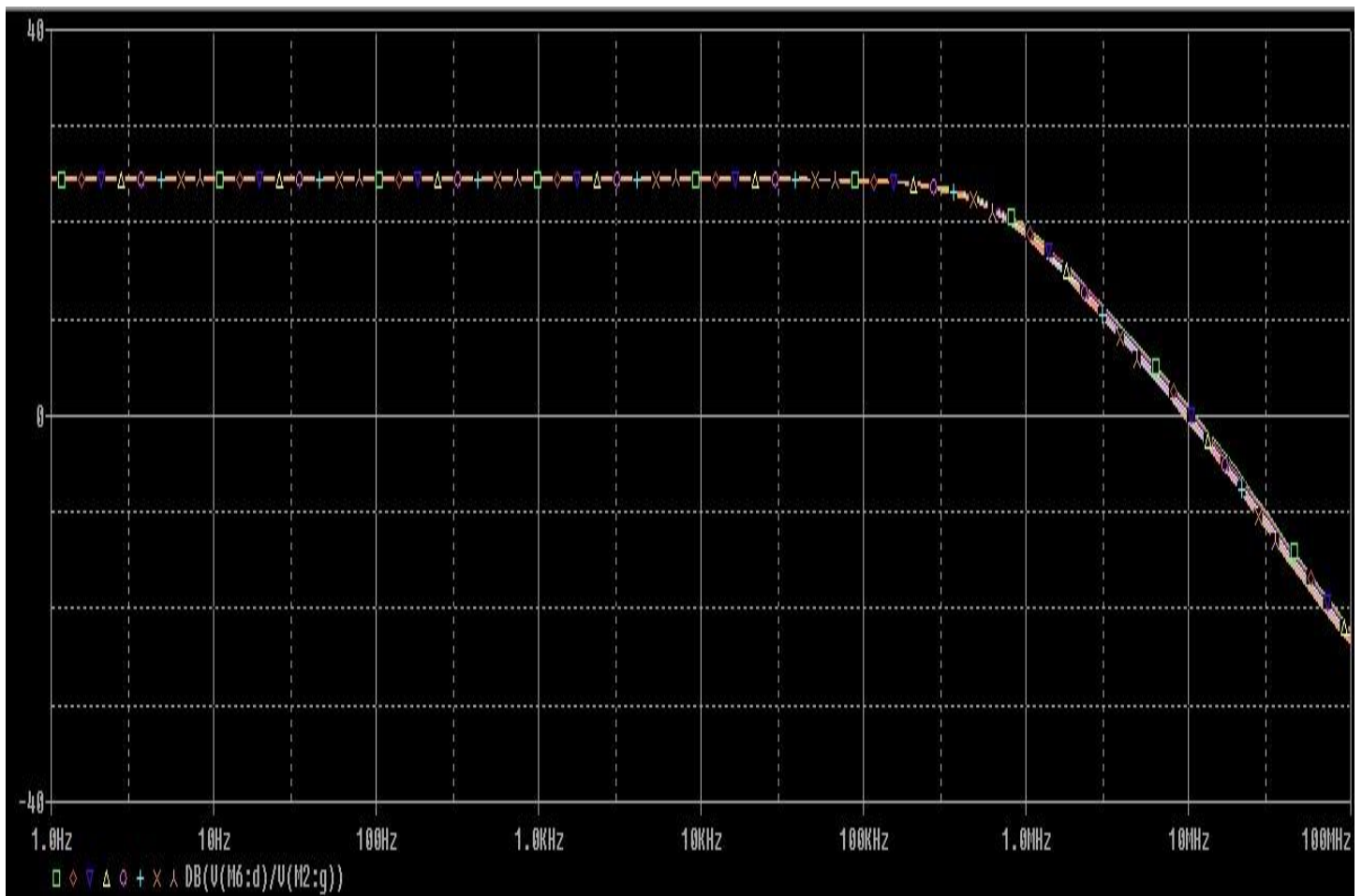


## Θερμοκρασιακή Ανάλυση

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε θερμοκρασιακή ανάλυση των προδιαγραφών του τελεστικού ενισχυτή για θερμοκρασίες **0 – 70 °C**.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται τόσο στα διαγράμματα που ακολουθούν ,όσο και συγκεντρωμένα σε πίνακα στο τέλος της ανάλυσης.

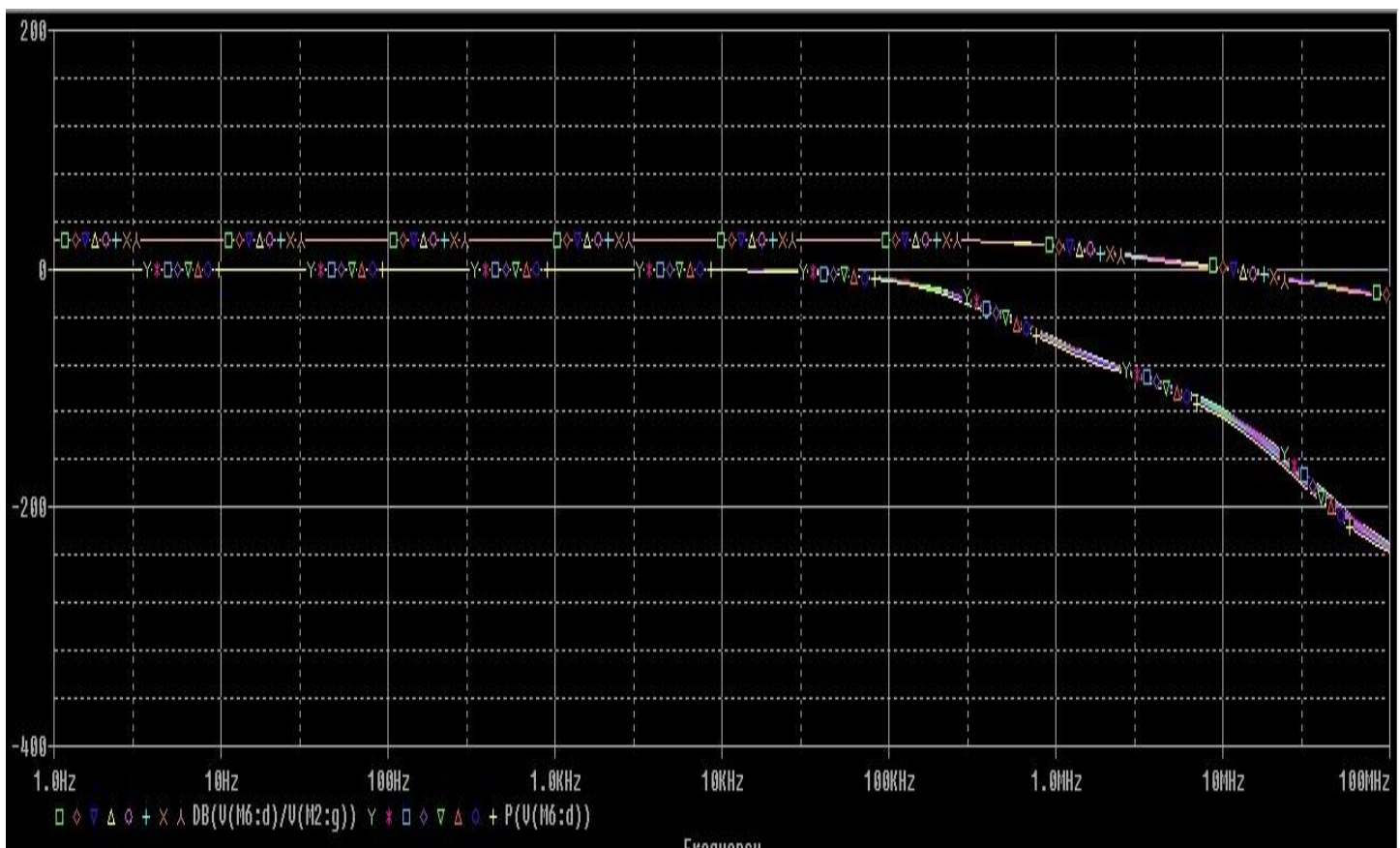
### Κέρδος και GB



Όπως φαίνεται το κέρδος πληροί πάντα τις προδιαγραφές ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία.

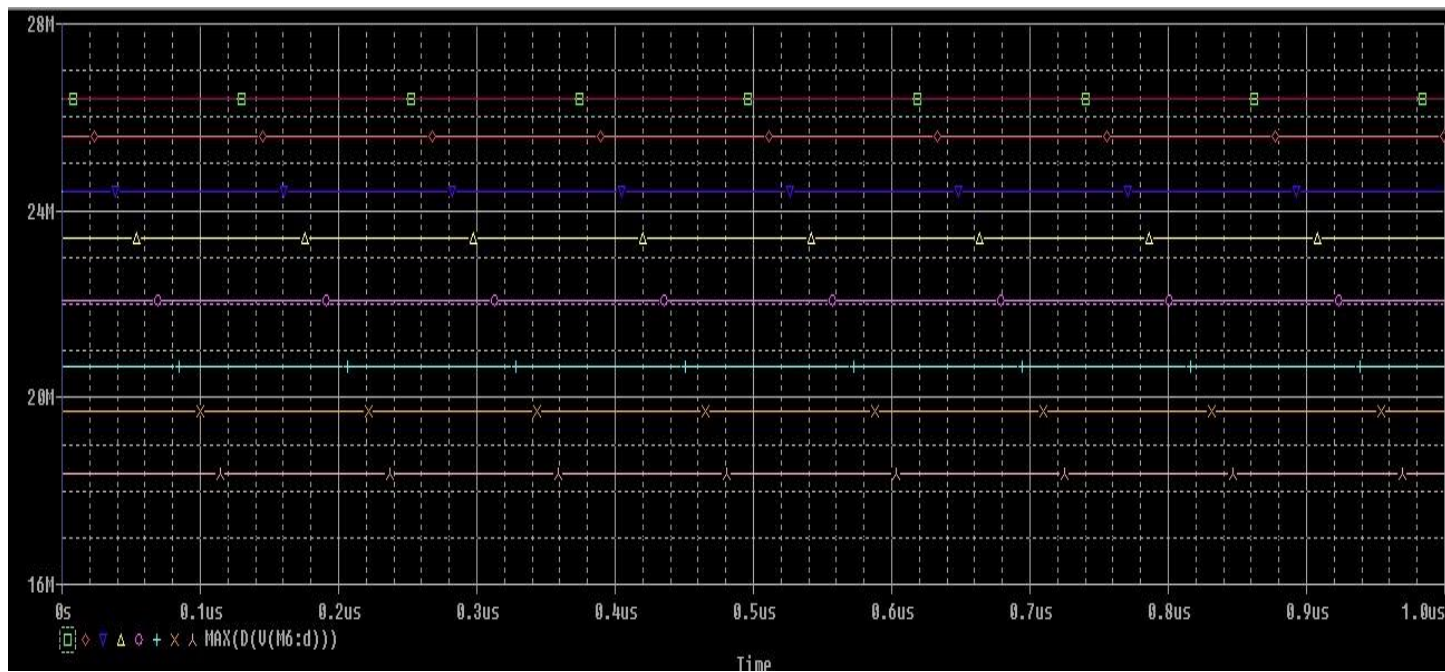
Στο διάγραμμα αυτό βρέθηκαν και όλες οι συχνότητες μηδενισμού του πλάτους άρα το GB δίνοντας την εντολή ***sfle(0)*** και αντιστοιχίζοντας την τιμή αυτή στο διάγραμμα της φάσης βρέθηκε το αντίστοιχο περιθώριο. Όλες οι προδιαγραφές ήταν εντός ορίων και παρουσιάζονται και σε πινακάκι στο τέλος της προσομοίωσης.

### Περιθώριο φάσης





## SR



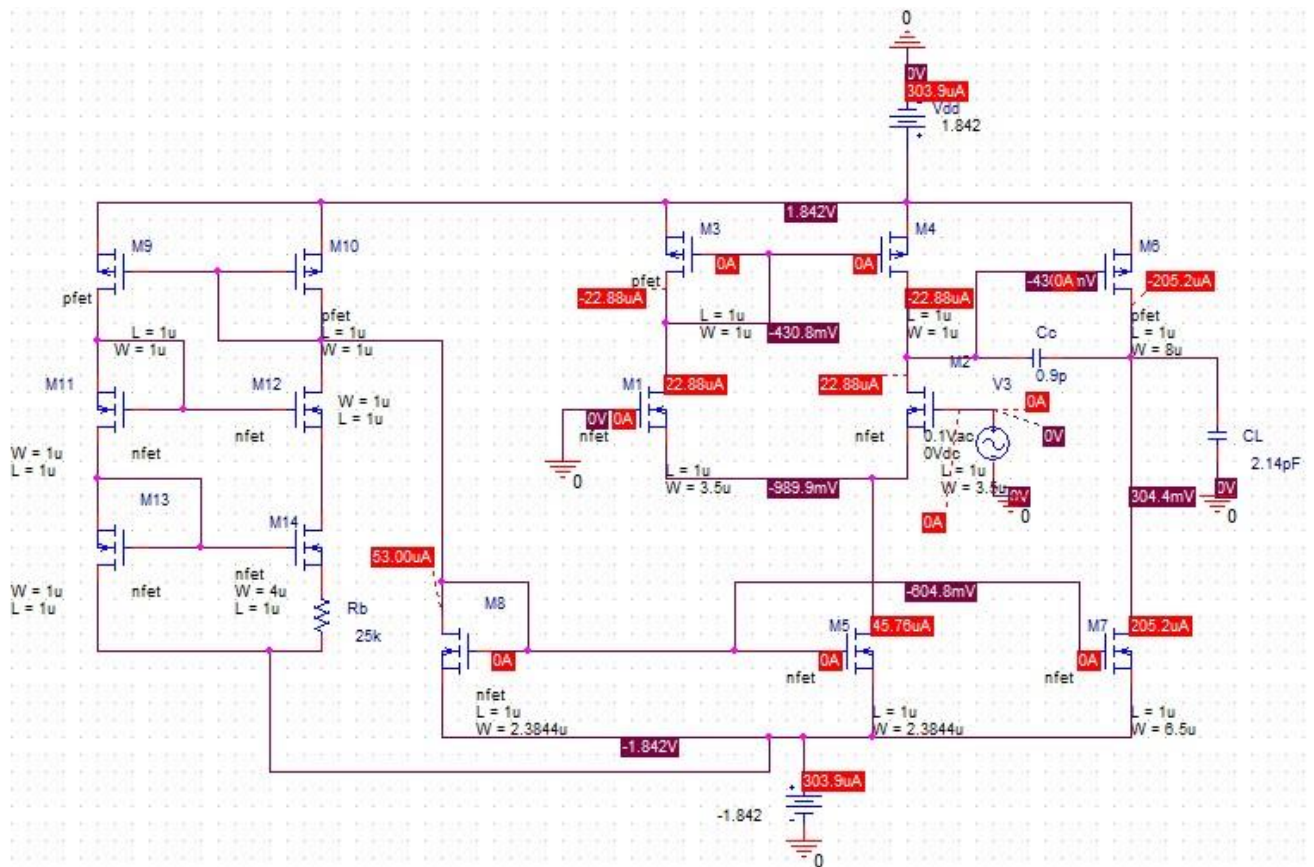
Τα αποτελέσματα φαίνονται συνολικά στον παρακάτω πίνακα και **πιστοποιούν την καλή λειτουργία του Τελεστικού Ενισχυτή.**

| Temperature | SR          | Κέρδος | GB         | Περιθώριο Φάσης |
|-------------|-------------|--------|------------|-----------------|
| 0           | 26.411 V/μS | 24.409 | 11.085 MHz | 59.03           |
| 10          | 25.610 V/μS | 24.397 | 10.774 MHz | 59              |
| 20          | 24.399 V/μS | 24.389 | 10.475 MHz | 59.03           |
| 30          | 23.416 V/μS | 24.384 | 10.187 MHz | 58.53           |
| 40          | 22.062 V/μS | 24.382 | 9.926 MHz  | 58.56           |
| 50          | 20.671 V/μS | 24.381 | 9.703 MHz  | 58.56           |
| 60          | 19.689 V/μS | 24.381 | 9.4857 MHz | 58.06           |
| 70          | 18.358 V/μS | 24.608 | 9.3281 MHz | 57.612          |

### Σχεδίαση κυκλώματος πόλωσης με πηγή Widlar

Για την ολοκλήρωση της σχεδίασης θα πρέπει να σχεδιάσουμε μία πηγή **Widlar** ώστε να αντικαταστήσουμε την ιδανική πηγή που φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες . Μετά τη σχεδίαση επαληθεύτηκε η λειτουργία του ενισχυτή πραγματοποιώντας πάλι όλες τις προσομοιώσεις των προδιαγραφών.

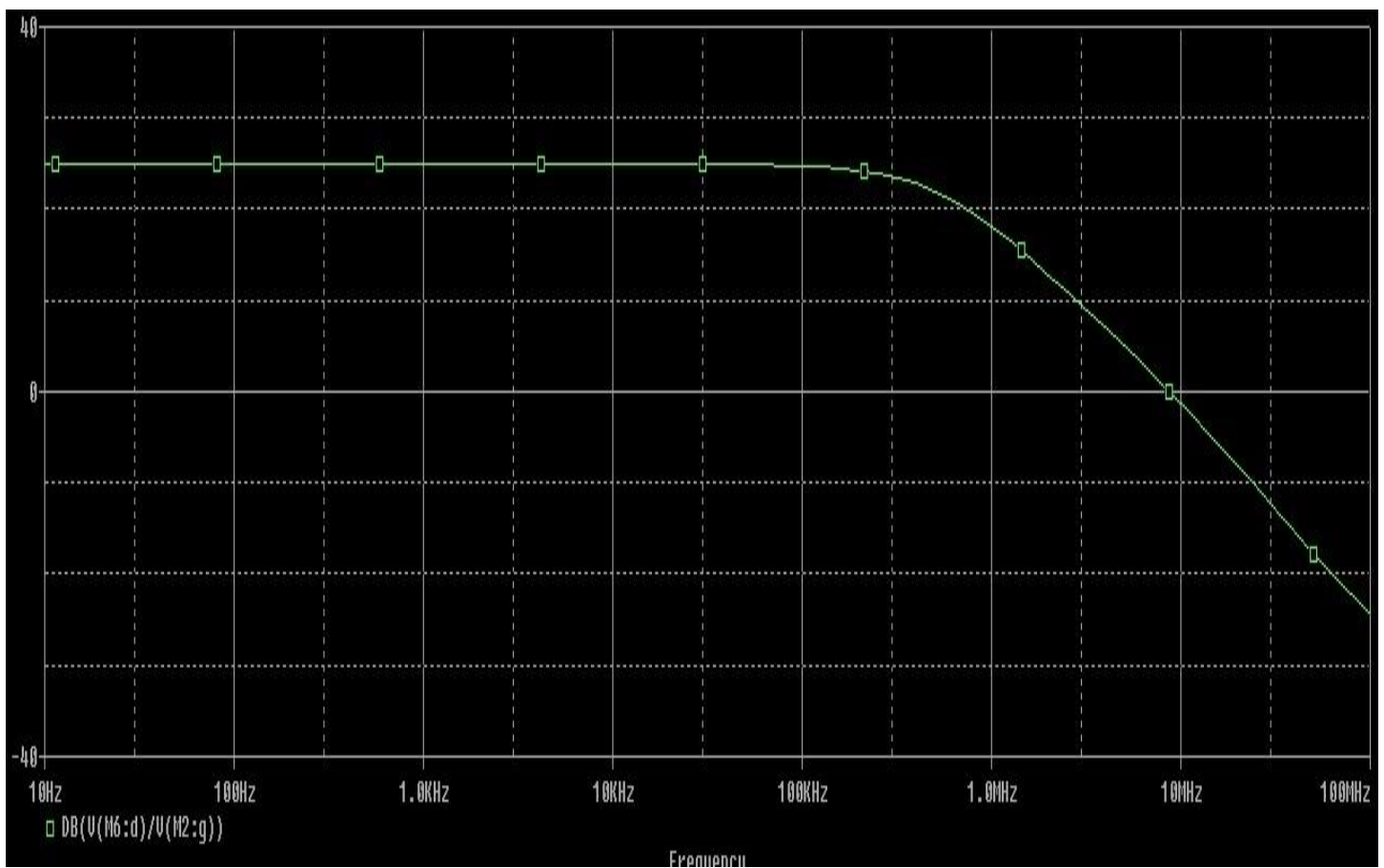
Σχηματικό σχεδίασης:





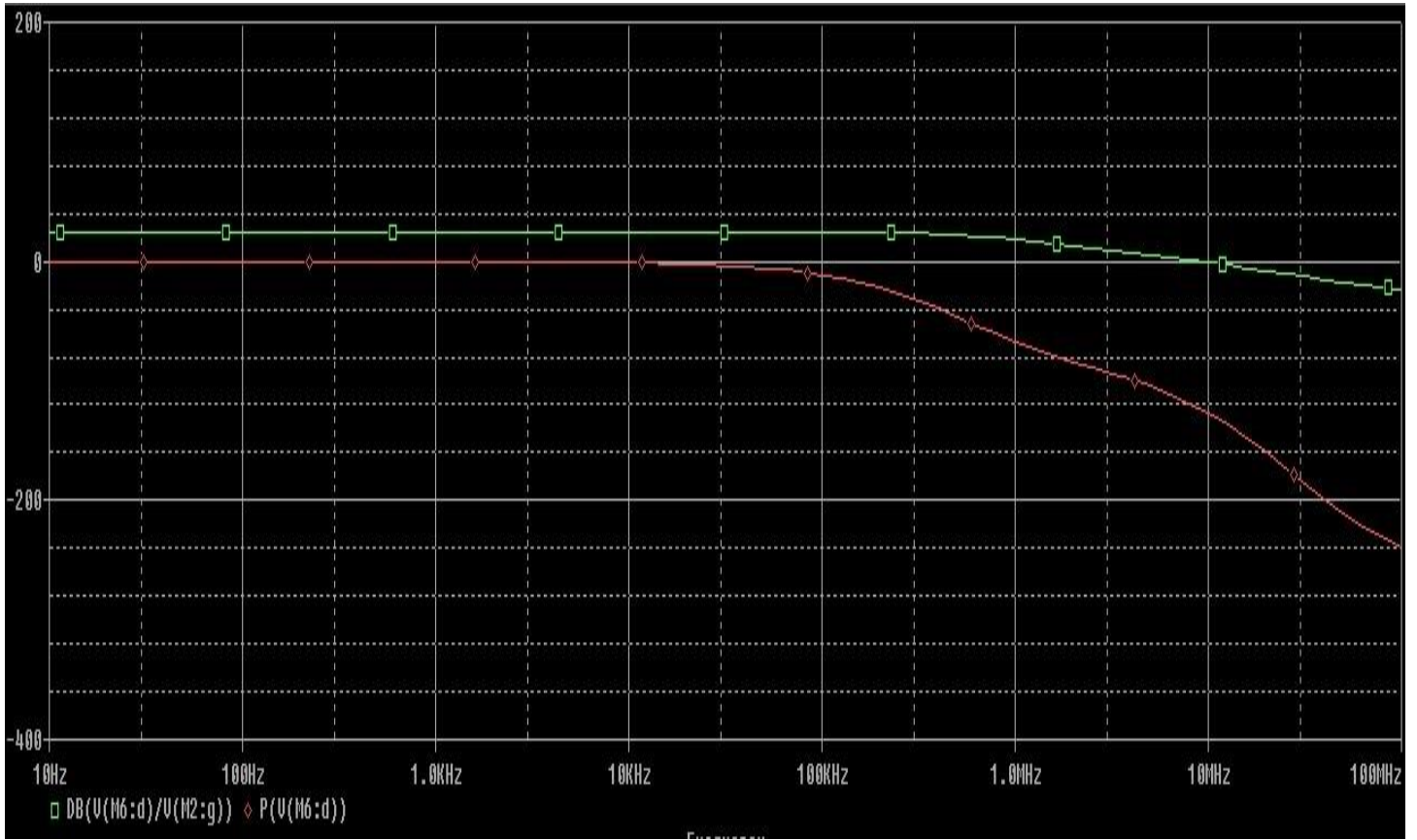
| Transistor | Μήκος καναλιού L | W                    |
|------------|------------------|----------------------|
| M9         | 1 $\mu$ m        | 1 * 10 <sup>-6</sup> |
| M10        | 1 $\mu$ m        | 1 * 10 <sup>-6</sup> |
| M11        | 1 $\mu$ m        | 1 * 10 <sup>-6</sup> |
| M12        | 1 $\mu$ m        | 1 * 10 <sup>-6</sup> |
| M13        | 1 $\mu$ m        | 1 * 10 <sup>-6</sup> |
| M14        | 1 $\mu$ m        | 4 * 10 <sup>-6</sup> |

### Κέρδος και GB



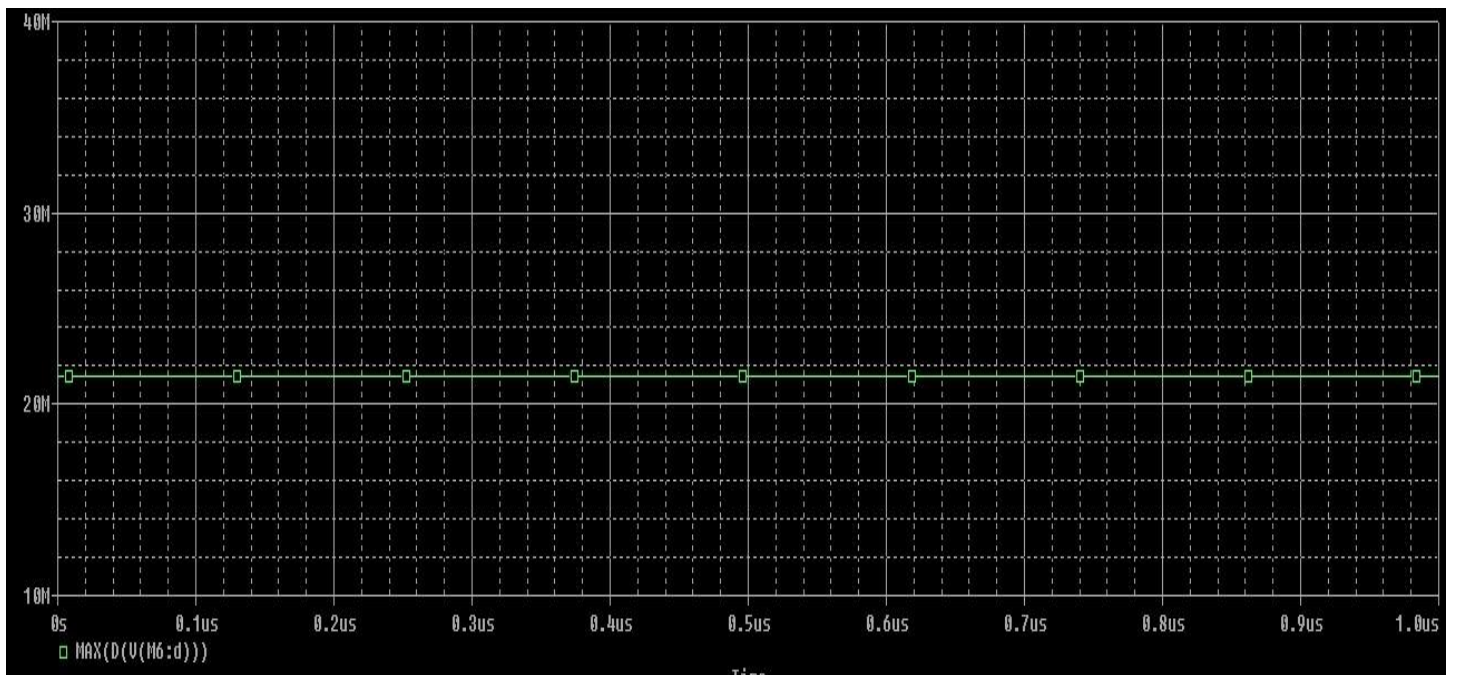
Το κέρδος **Au** του ενισχυτή είναι τώρα **24.906 > Amin** και το **GB = 8.7635 MHz > GBmin**. Οι τιμές αυτές βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια.

## Περιθώριο φάσης



Το περιθώριο φάσης προκύπτει  $180^\circ - 121.447^\circ = 58.553^\circ$ , μέσα στα επιτρεπτά όρια.

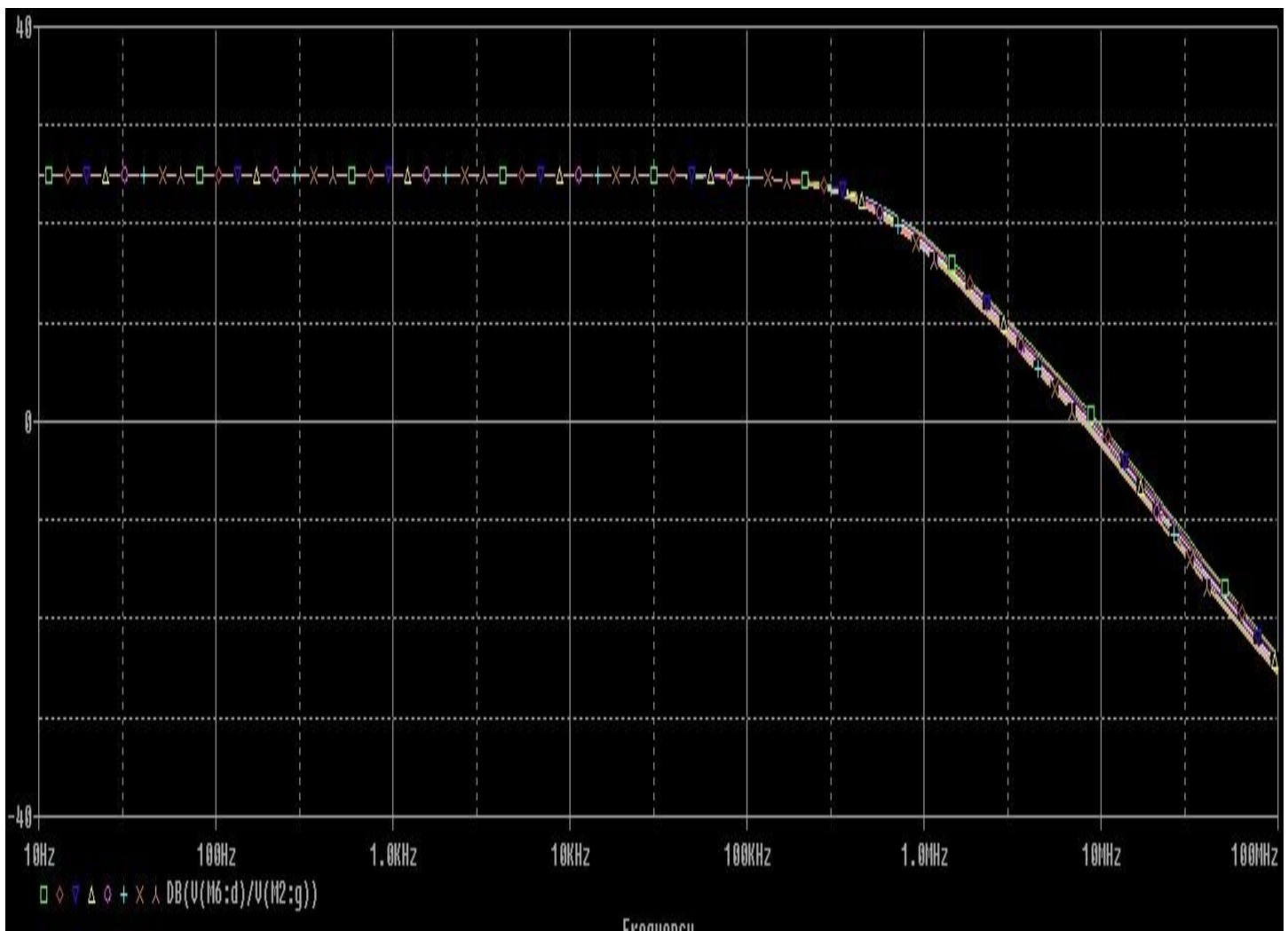
## SR



## Θερμοκρασιακή Ανάλυση

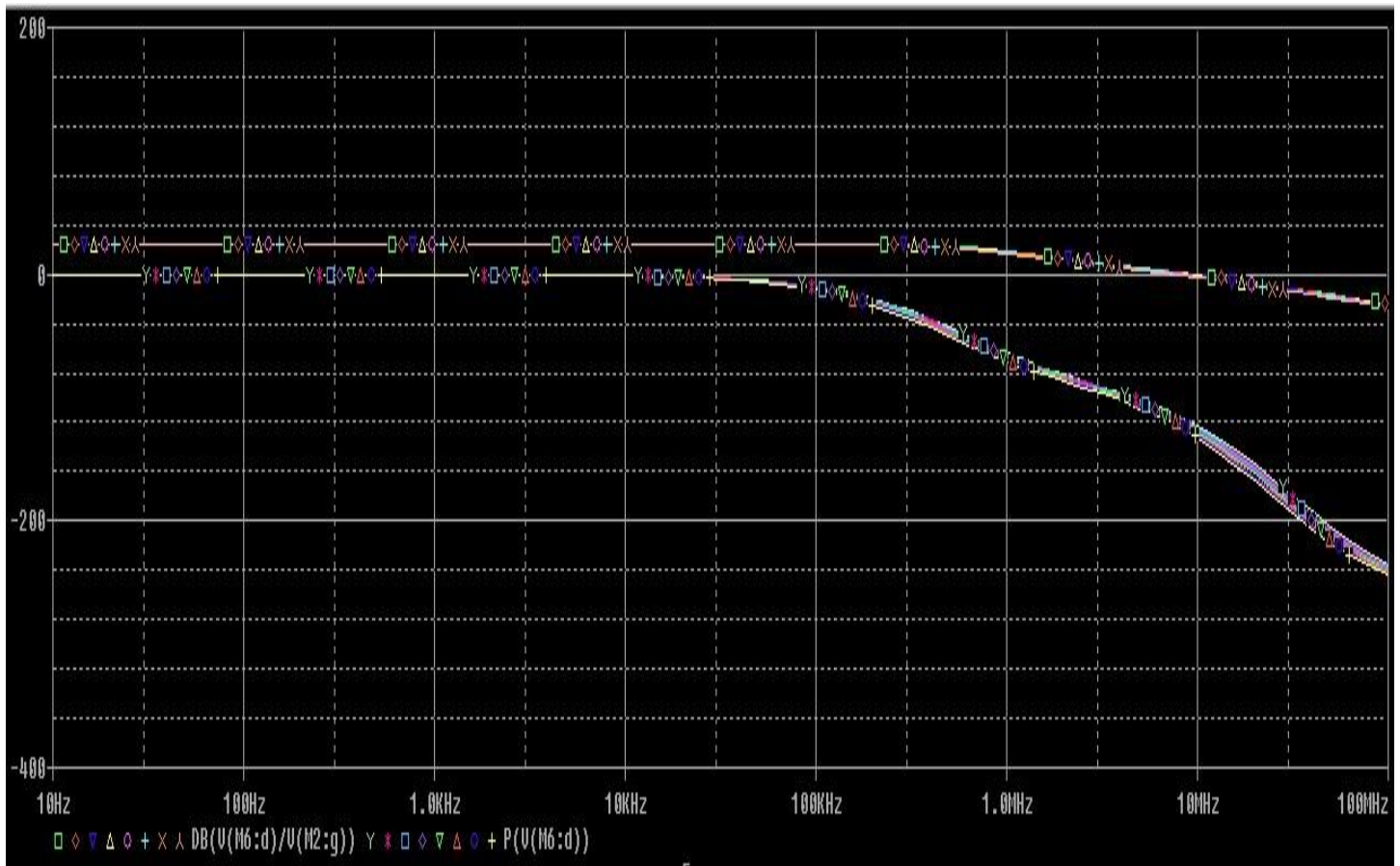
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται τόσο στα διαγράμματα που ακολουθούν, όσο και συγκεντρωμένα σε πίνακα στο τέλος της ανάλυσης.

### Κέρδος και GB



Σε όλες τις θερμοκρασίες το **κέρδος** και το **GB** είναι πάνω από το ελάχιστο απαιτούμενο.

## Περιθώριο φάσης



Το περιθώριο φάσης βρίσκεται μέσα στα όρια.

## SR



Τα αποτελέσματα φαίνονται συνολικά στον παρακάτω πίνακα και πιστοποιούν την καλή λειτουργία του Τελεστικού Ενισχυτή.

| Temperature | SR                | Κέρδος | GB         | Περιθώριο Φάσης |
|-------------|-------------------|--------|------------|-----------------|
| 0           | 23.864 V/ $\mu$ S | 24.865 | 9.6 MHz    | 59.049          |
| 10          | 22.555 V/ $\mu$ S | 24.879 | 9.27 MHz   | 58.863          |
| 20          | 22.158 V/ $\mu$ S | 24.895 | 8.97 MHz   | 59.581          |
| 30          | 22.045 V/ $\mu$ S | 24.911 | 8.67 MHz   | 59.335          |
| 40          | 20.518 V/ $\mu$ S | 24.929 | 8.3941 MHz | 59.152          |
| 50          | 19.863 V/ $\mu$ S | 24.946 | 8.1228 MHz | 59.006          |
| 60          | 19.196 V/ $\mu$ S | 24.964 | 7.8765 MHz | 58.786          |
| 70          | 18.941 V/ $\mu$ S | 24.981 | 7.6705 MHz | 58.607          |

## Παράρτημα – Αλγόριθμος σε MATLAB

```
% SXEDIASI TELESTIKOU ENISXITI 2019-2020
% ONOMA : STASINOS ALKIVIADIS
% AEM : 9214
```

```
% PARAMETROI
```

```
% CL = 2.14 pF
% SR > 18.14 V/ $\mu$ s
% Vdd = 1.842 V
% vss = -1.842 V
% GB > 7.14 MHz
% A > 20.14 dB
% P < 50.14 mW
```

```
CL = 2.14 * 10^-12
GBmin = 7.14 * 10^6 % Minimum GB
Vdd = 1.842
Vss = -Vdd
minSR = 18.14 * 10^6
Pmax = 50.14 * 10^-3
Amin = 20.14
```

```
% Algorithm Steps
```

```
% 1st step
L = 1 * 10^-6
```

```
% 2nd step
% Cc > 0.22 * CL
Cc = 3 * 10^-12 % Set at 3 pF
```

```
% 3rd step
I5 = minSR * Cc
```

```
% 4th step
```

```

VINmax = 0.1
VINmin = -0.1
VToP = -0.9056
VToN = 0.786
kp = 60 * 10^-6
kn = 150 * 10^-6
s3 = I5/(kp * (Vdd - VINmax -abs(VToP) + VToN)^2)

```

```

% s3 was 0.344 < 1 so it was set to s3=1
s3 = 1
s4 = s3

```

```

% 5th step
% Checking if p3 > 10GB
Cox = 4.6 * 10^-3
ln = 0.04
lp = 0.05
I3 = I5/2
W3 = s3 * L
p3 = sqrt(2*kp*s3*I3)/(2*0.667*W3*L*Cox)
p3 > 10*GBmin * 2 *pi

```

```

% 6th step
gm1 = GBmin * 2*pi * Cc
gm2 = gm1
s1 = (gm1^2)/(kn*I5)
s2 = s1

```

```

% 7th step

betal = kn * s1
Vds5 = VINmin - Vss - sqrt(I5/betal) - VToN
s5 = (2*I5)/(kn * (Vds5)^2)

```

```

% 8th-9th step
I4 = I5/2
gm4 = sqrt(2*kp*s4*I4)
gm6 = 2.2 * gm2 * (CL/Cc)
s6 = s4 * (gm6/gm4)
I6 = (gm6^2)/(2*kp*s6)

```

```

% 10th step
s7 = (I6/I5)*s5

```

```

% 11th step

Av = (2*gm2*gm6)/(I5*(ln+lp)*I6*(ln+lp))
gain = 20*log10(Av)
% Check gain
gain > Amin

```

```

Pdis = (I5+I6)*(Vdd + abs(Vss))
% Check Pdis < Pmax
Pdis < Pmax

```

```

% W

```

```

W1 = s1 * L
W2 = s2 * L
W3 = s3 * L
W4 = s4 * L
W5 = s5 * L
W6 = s6 * L
W7 = s7 * L
W8 = W5

```

