

## מעגלים אנלוגיים משולבים - תרגיל תכנון 3

נדב מליכסון 318653193

טל שבתאי 315904284

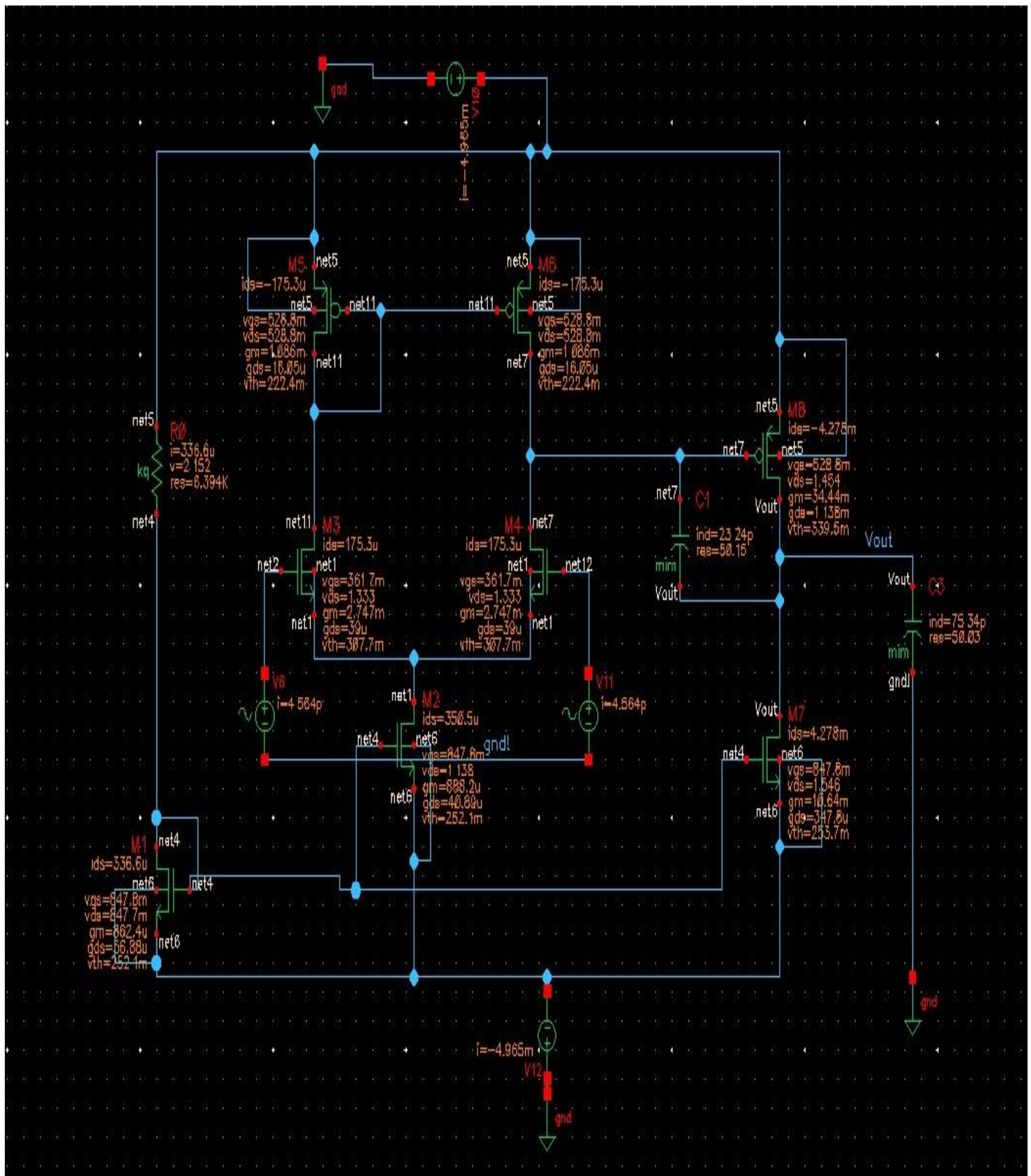
בתרגיל זה נתכנן מגבר דו דגרותי על ידי שימוש ב Miller CMOS OTA. על המגבר לענות את הדרישות הבאות:

Parameter	Value	Physical Units
VDD	1.5	Volts
VSS	-1.5	Volts
Minimum small signal Gain - A0	60	dB
Minimum GBW	100	MHz
Load Capacitance	10	pF
Phase Margin	>45	Degrees
Power Dissipation	Keep as low as possible	Watts
Dynamic range	Keep as high as possible	

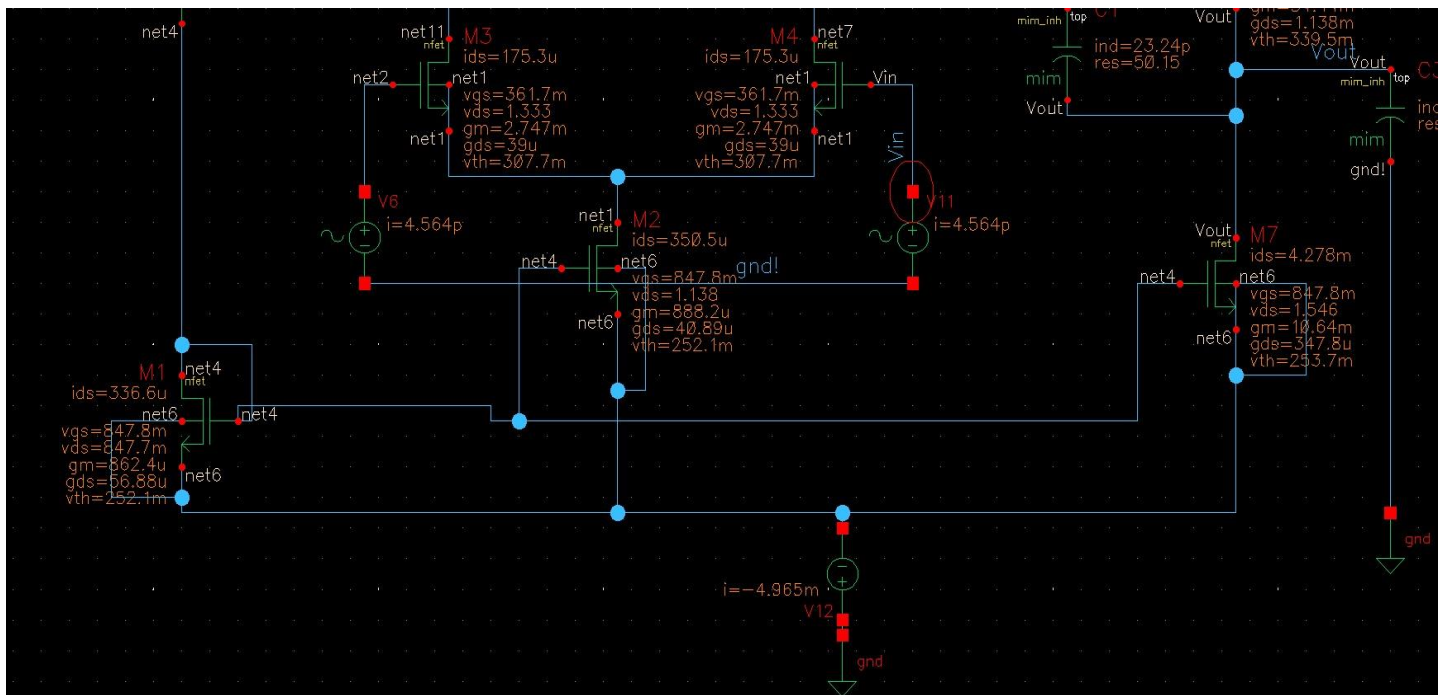
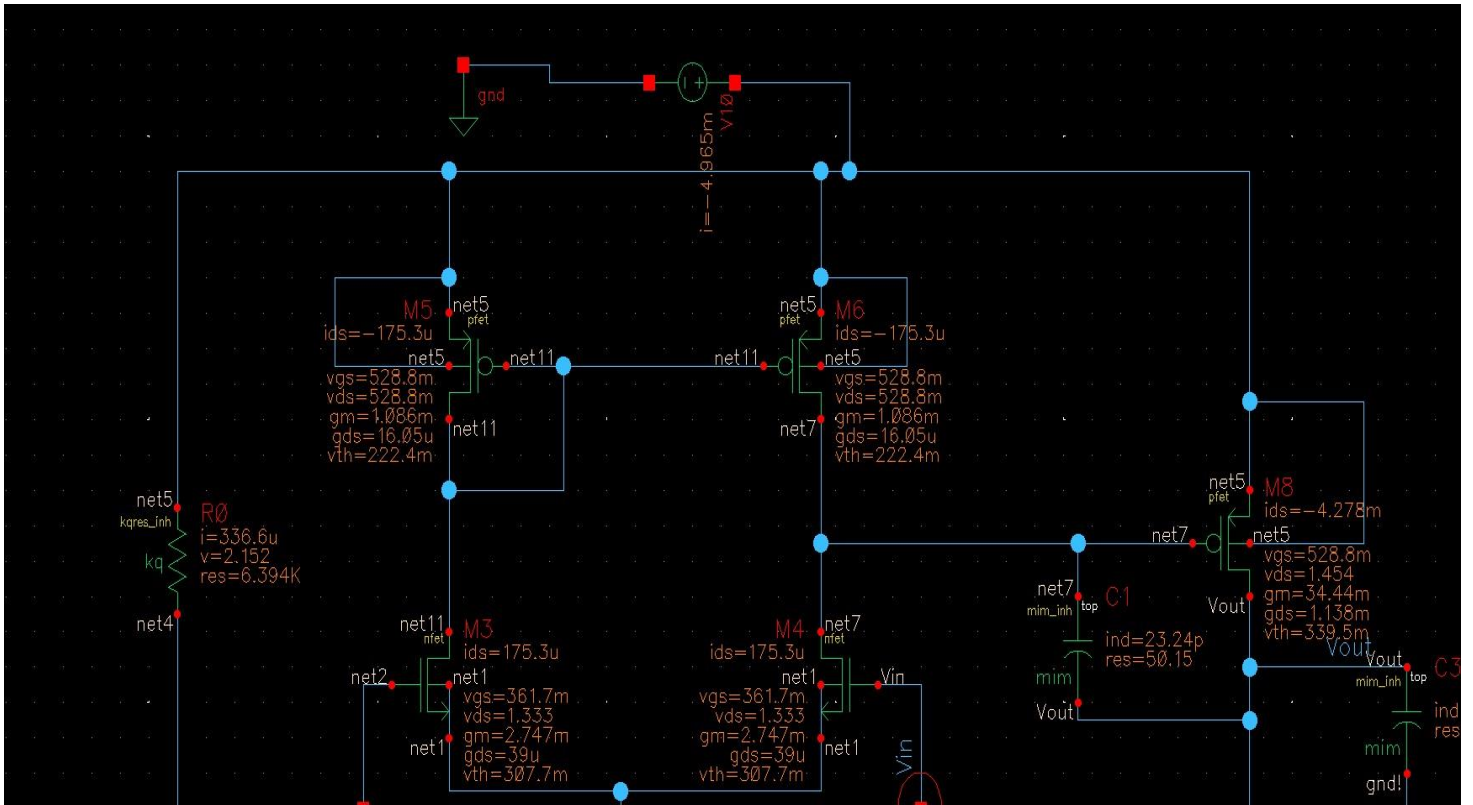
הטבלה הבאה מציגה את גדלי הנגד, את גדלי הטרנזיסטורים וכן את מתחי העבודה של כל אחד מהטרנזיסטורים:

	Total width ( $\mu\text{m}$ )	Length ( $\mu\text{m}$ )	$V_{gs}$ [mv]	$V_{ds}$ [v]	$V_{th}$ [mv]	$g_m$ $\text{m}\Omega^{-1}$	$g_{ds}$ $\mu\Omega^{-1}$	R k $\Omega$	C pF
M1	4	1	847.5	0.8473	252.1	0.862	56.86	-	-
M2	4	1	847.5	1.138	252.1	0.888	40.86	-	-
M3	18.3	0.3	361.7	1.333	307.7	2.746	38.97	-	-
M4	18.3	0.3	361.7	1.333	307.7	2.746	38.97	-	-
M5	250	5	528.7	0.528	222.4	1.086	16.04	-	-
M6	250	5	528.7	0.528	222.4	1.086	16.04	-	-
M7	45	1	847.5	1.545	253.7	10.64	347.8	-	-
M8	270	0.15	528.6	1.455	339.5	34.42	1137	-	-
R	5.92	657.06	-	-	-	-	-	6.4	-
Cc	261.06	6	-	-	-	-	-	-	1.6

# להלן המעגל שתיכננו :



# תמונות נוספות בהן נקודת העבודה נראית בבירור :



### מהלך התכנון :

השלב הראשון בתכנון היה לקבוע את גודל הקבל  $C_c$  וממנו לחלץ את גודל ה-gm של דרגת ה-OTA לפי הקשר :

$$GBW = \frac{gm_4}{2\pi C_c}$$

נדרשנו להגיע ל-GBW של 100MHz אבל בחרנו לקחת מרווח ביטחון של 20MHz נוספים. כפי שנלמד בתרגול נרצה לקבוע את גודל הקבל כך ש :

$$C_{n,d} < C_c < C_l$$

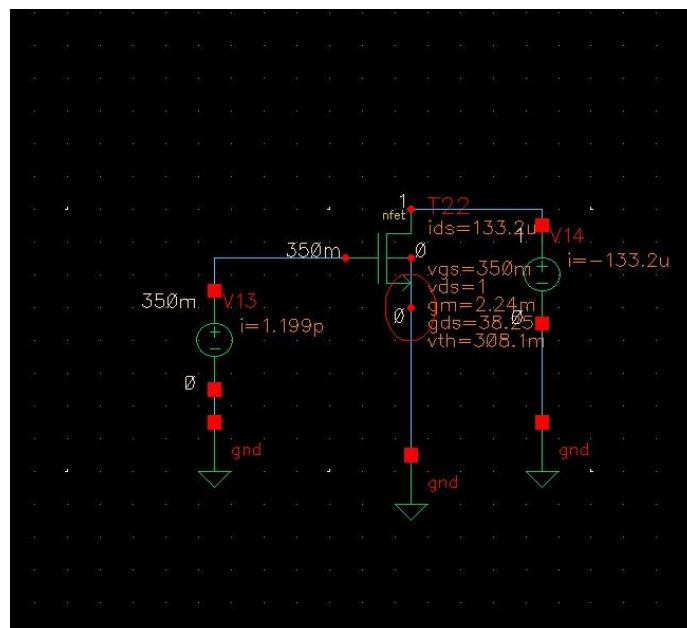
תחילה קבענו את גודל הקבל להיות  $C_c = 3pF$ , ומכאן קיבלנו על סמך הקשר לעיל :

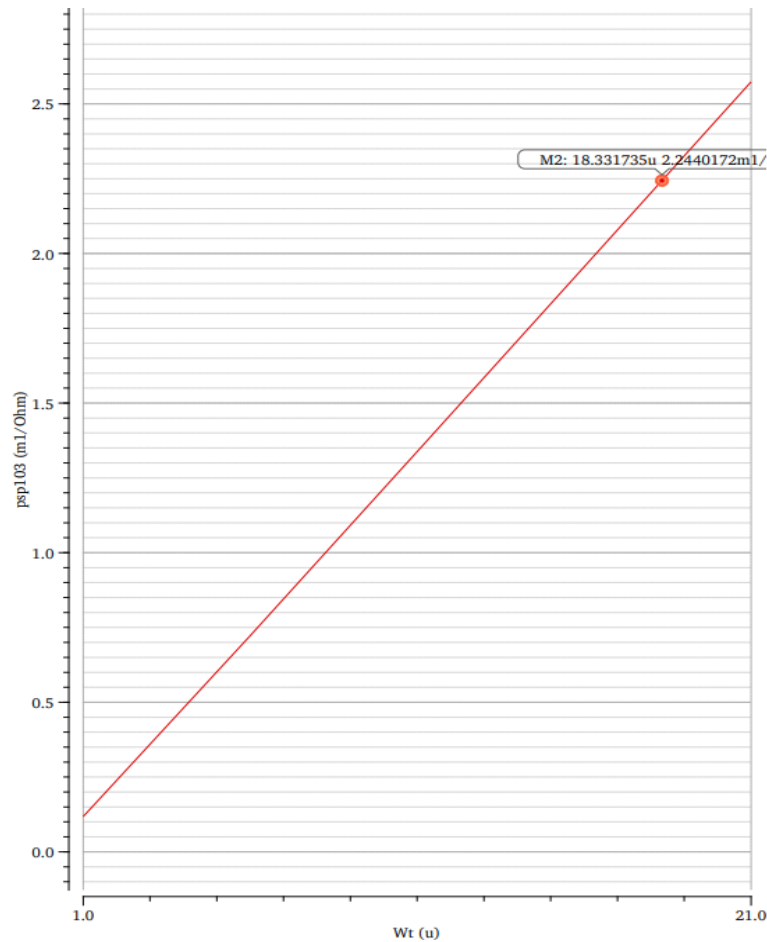
$$gm_4 \approx 2.2 \frac{1}{\Omega}$$

הרכבנו מעגל עזר צידי שתפקידו לדמות את טרנזיסטור M4. הזנו מתחי כניסה של  $V_{gs} = 1V$   $350mV$ , זאת מאחר ואנו יודעים כי  $V_{th}$  של הטכנולוגיה הוא בסביבות  $250mV$  וכי סך כל מתח האספקה בענף זה (3V) אידאלית יתחלק באופן שווה בין כל הטרנזיסטורים בענף. ערכנו סימולציית sweep על רוחב הטרנזיסטור ובעזרת פונקציית המחשבון מצאנו מה רוחב הטרנזיסטור הדרוש על מנת לקבל gm שכזה.

נציין כי תחילה בחרנו שרירותית את  $L_4 = 1\mu m$  וערכנו סימולציית עזר עם אורך זה. במצב זה קיבלנו  $W_4 \approx 45\mu m$ . לאחר שכבר הגענו להגבר ול-GBW הדרושים, גילנו בסימולציית הפאזה כי הגדלים שקבענו אינם מספקים את הדרישה על PM. ההשערה שלנו הייתה שקיימים קיבולים פרוזיטים גדולים שנובעים מהערכים היחסית גדולים שנבחרו לטרנזיסטורי ה-OTA. בשלב זה החלטנו להוריד את אורך טרנזיסטור M4, ובאופן זה גם רוחב הטרנזיסטור יקטן בהתאם – תוך שאיפה להקטין את הקיבול הפרזיטי.

לאחר מספר ניסיונות, בחרנו  $L_4 = 0.3\mu m$ . נציג עתה את סימולציית המעגל הצידי שהתקבלה עבור אורך זה :

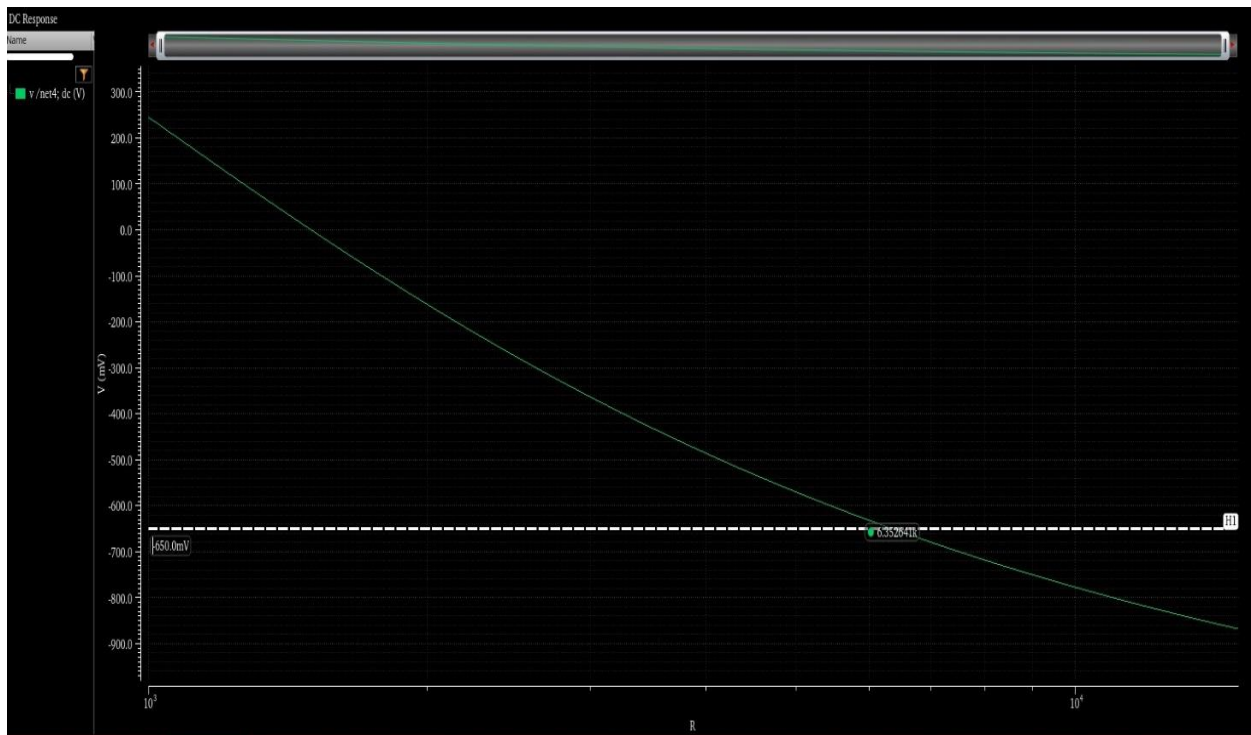




זהו הgm המינימלי שיבטיח לנו את הGBW הנדרש מכל המעגל. לאחר כמה ניסיונות גילנו כי אנו לא עומדים בדרישת ההגבר עם נתונים אלו. ציפינו לתוצאה זו, שהרי הקטנו את  $L_4$ , ובכך גם הקטנו את ההגבר מדרגת הOTA. לכן בחרנו לעלות את הgm של דרגת הOTA ל2.75m. על מנת להגדיל בסופו של דבר את הgm היה עלינו לעלות את הזרם בענף זה. במעגל הצידי הזרם שהתקבל היה 130uA ובכדי לעלות את הgm הגברנו את הזרם יותר מערך זה להיות 175uA.

מאחר ובחרנו את המגבר הדיפרנציאלי להיות סימטרי, אנו יודעים כי הזרם שמוזרם מראי הזרם יתחלק שווה בשווה בין שני ענפי המגבר. על כן רצינו שהזרם שיזרים ראי הזרם יהיה 350uA. בחרנו את  $L_1 = 1\mu m$  ומצאנו על ידי סימולציית dc sweep מהו רוחב הטרנזיסטור המתאים שייתן את הזרם הנדרש. לאחר מכן ערכנו סימולציה נוספת על ערכי הנגד בענף המאלץ. המטרה שלנו הייתה לקבע את המתח בשער של טרנזיסטורים M1 M2 כך שהמתח  $V_{gs}$  יהיה גדול מספיק, כך שהראי יוכל לספק מספיק זרם עבור גודל יחסית קטן של טרנזיסטור. ערכנו סימולציית dc sweep על ערכי הנגד ובדקנו עבור איזה גודל נגד נקבל מתח בשער של בערך 650mv. להלן הסימולציה שערכנו :

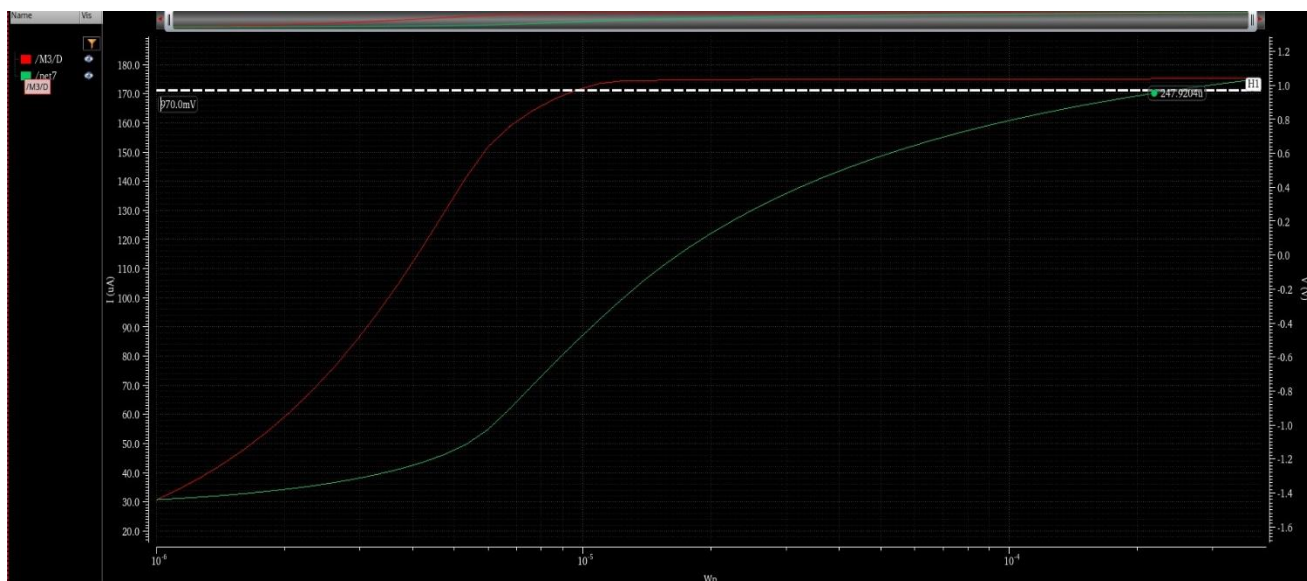




את טרנזיסטורי PMOS שמהווים עומס אקטיבי למגבר, בחרנו עם  $L$  גדול מאוד. הסיבה לכך היא שרצינו להגיע להגבר גבוה מדרגה זו, והרי ההגבר מושפע מ  $r_{ds}$  אשר נקבע על ידי אורך טרנזיסטורי העומס. מאחר ובחרנו  $L$  גדול באופן יחסי, היה עלינו להגדיל את רוחב טרנזיסטורי PMOS מכמה סיבות:

- לאפשר את זרימת הזרם שקבענו במגבר.
- הגדלת  $W$  תגרוור הגדלת מתח ה-DC של ה- $\text{drain}$  בטרנזיסטור M6. מאחר ומתח זה הוא גם מתח ה- $\text{gate}$  של דרגת ה- $\text{common source}$ , שאפנו לעלות את מתח זה על מנת לקבל  $v_{gs}$  קטן ובכך להקטין את ההפרש  $v_t - v_{gs}$ . תוצאה זו רצויה להגדלת ההגבר מדרגת  $\text{common source}$ .

להלן הסימולציה על פיה קבענו את רוחב טרנזיסטור M6:



כעת נעבור לדון בשיקולי התכנון של דרגת המוצא.

נניח שנכוון ליחס בין הקבל הפרזיטי (שנובע מגדלי הטרנזיסטורים בOTA) לבין הקבל  $C_c$  להיות:

$$\frac{C_{nd}}{C_c} \approx \frac{1}{3} \rightarrow \beta = 3$$

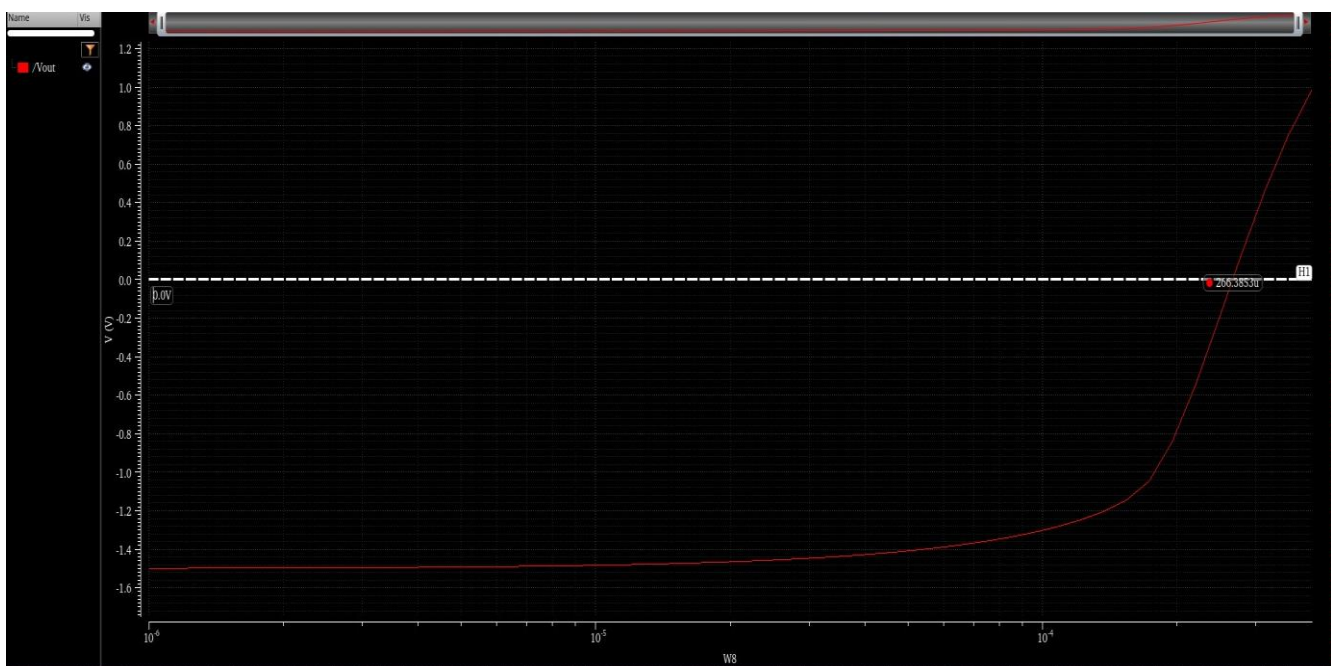
על סמך הקשרים שהוצגו בתרגול, נקבל כי יחס  $gm$  הינו:

$$\frac{gm_8}{gm_4} = \frac{C_L}{C_c} \cdot (\beta + 1) = \frac{C_L}{C_c} \cdot 4 \approx 13$$

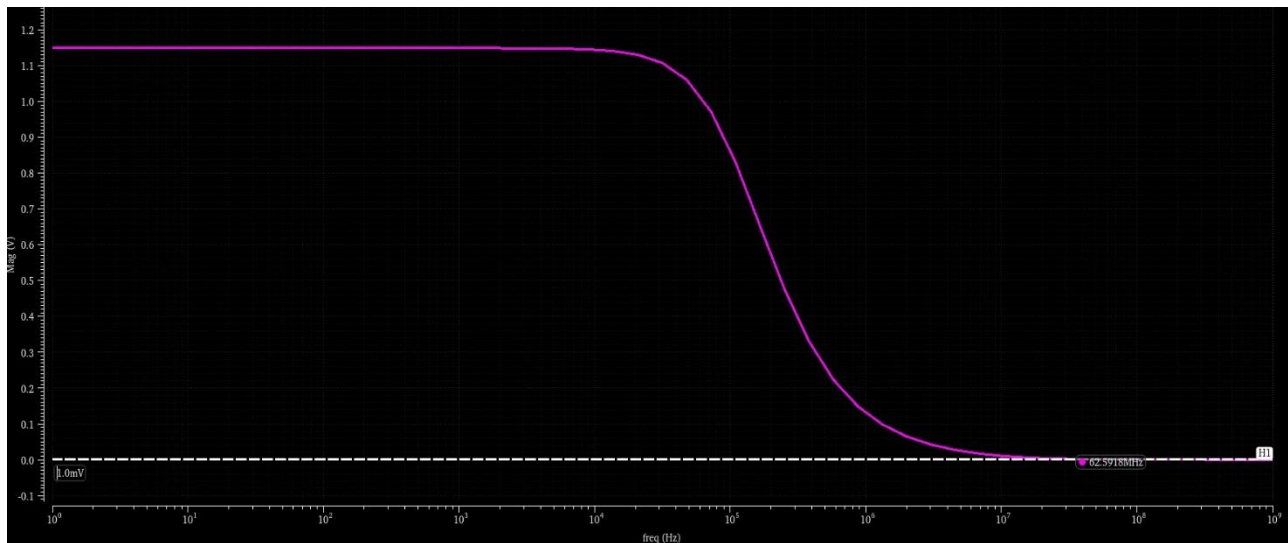
לפיכך נרצה ש  $gm_8 = 35m\frac{1}{\Omega}$ . בשביל לקבל  $gm$  שכזה, כיוונו לזרם גבוה בענף הימני. לפיכך הגדלנו את רוחב טרנזיסטור M7 פי 11, דבר שאפשר לנו ל"העתיק" את הזרם מראי הזרם פי אותו פקטור (בתיאוריה). נציין כי אורך טרנזיסטור זה נקבע להיות זהה לטרנזיסטורי הראי האחרים.

נעבור כעת לפרט על טרנזיסטור M8 המהווה כאמור את דרגת common source. תחילה בחרנו שרירותית את אורך הטרנזיסטור להיות  $1\mu$ . לאחר מספר סימולציות הבנו כי על מנת לעמוד בזרם הגבוה שקבענו עבור ענף זה, עלינו להגדיל משמעותית את היחס  $w/l$  לשם כך, בחרנו דווקא להקטין את אורך הטרנזיסטור ובכך להימנע מערכי  $W$  גדולים מאוד.

ביצענו סימולציית sweep ובעזרתה קבענו את רוחב טרנזיסטור M8. מצאנו את הגודל כך שמתח הdc במוצא יהיה  $0V$ , זאת בכדי לאפשר חלוקה שווה של מתח האספקה עבור 2 הטרנזיסטורים בענף. להלן הסימולציה:

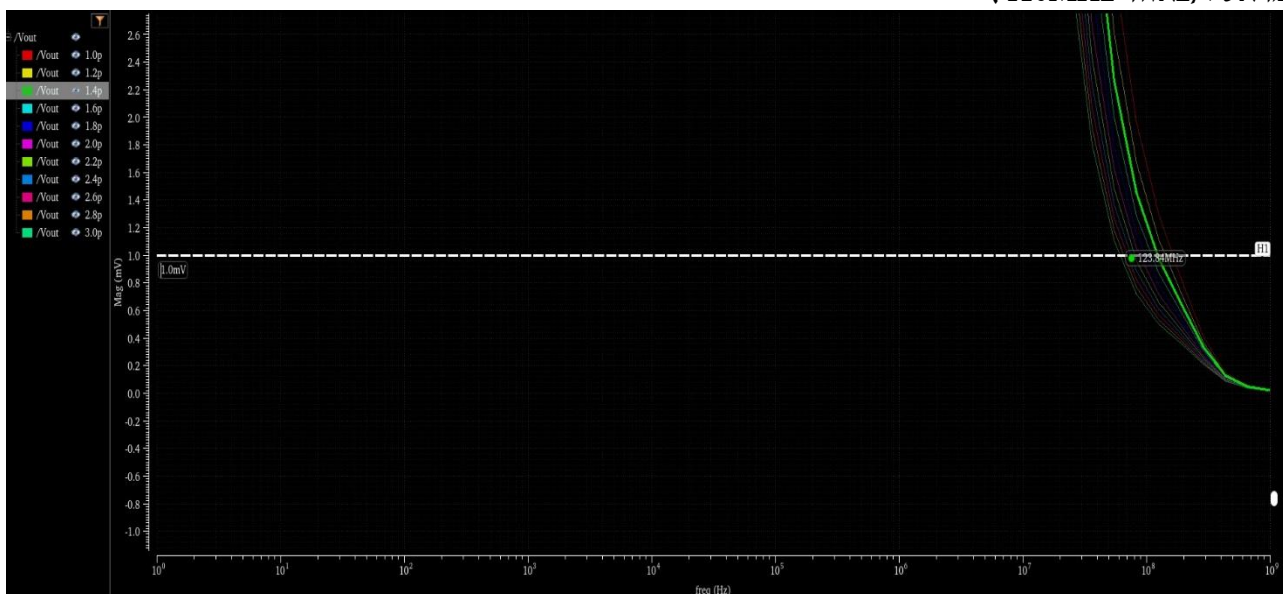


בשלב זה ערכנו סימולציית ac במטרה לבדוק האם אנו עומדים בדרישות התכנון. להלן הסימולציה שהתקבלה :



ניתן לראות כי GBW אינו עומד בדרישות. לשם כך, החלטנו להקטין את הקבל  $C_c$  זאת על פי הנלמד בכיתה ועל פי הגרפים שהוצגו (pole splitting). ככל שקבל זה יהיה קטן יותר כך ה-GBW יעלה. מובן שאנו נפגע כאן ב-PM אבל מסימולציית הפאזה שערכנו, גילנו כי ה-PM שלנו מספיק גדול ונוכל להקטין אותו.

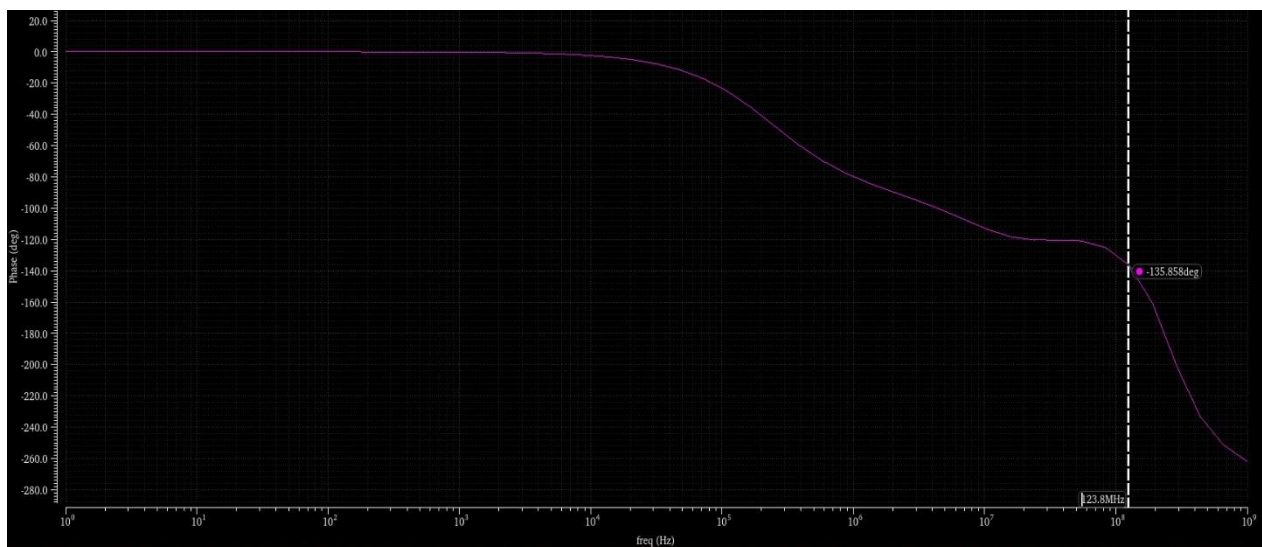
ערכנו סימולציה עבור ערכי הקבל ומצאנו מהו הגודל המתאים כך שנקבל את ה-GBW שתכננו מראש : (באזור 120MHz)



הקבל כאן ירד מערך התחלתי של 3pF לערך של 1.4pF .



לאחר מכן, ערכנו בדיקה ל-PM וגילנו כי כעת מרוב שהקטנו את הקבל אנו לא עומדים בדרישה :



הבנו שאנו צריכים למצוא את ערך הקבל שיספק מענה ל- trade off בין GBW לבין PM. לאחר מספר ניסיונות בחרנו את הקבל להיות במקום

לכן בסופו של דבר הגדלנו במעט את הקבל - מערך של 1.4pF לערך של 1.6pF ובכך ענינו על דרישת PM וגם קיבלנו את ה-GBW הנדרש.

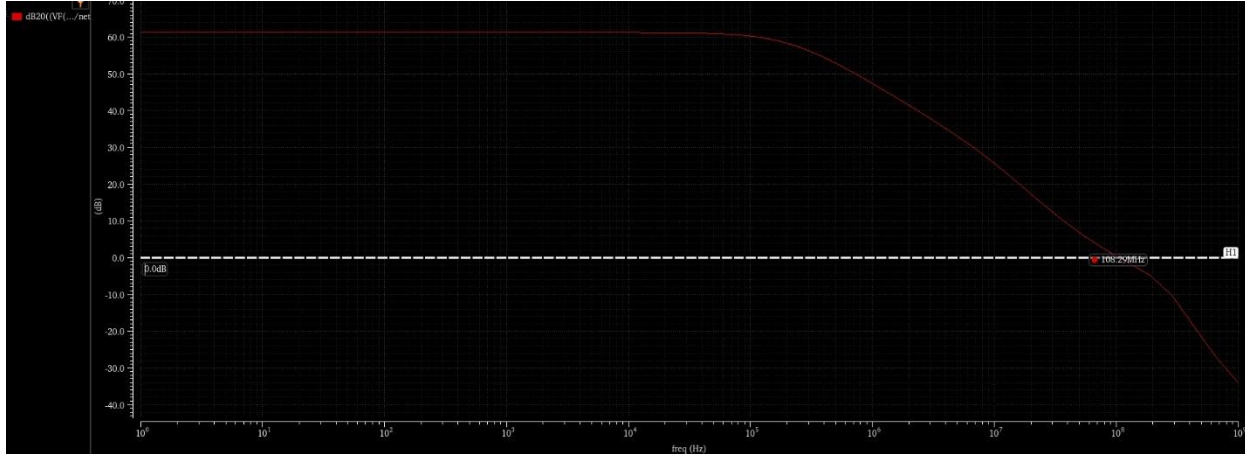
### צריכת הספק:

ניתן לראות כי הזרם הכולל במעגל הינו בערך 5mA, על כן

$$P = 5_{mA} \cdot 3_V = 15mW$$

ההספק הכולל שהתקבל במעגל הינו :

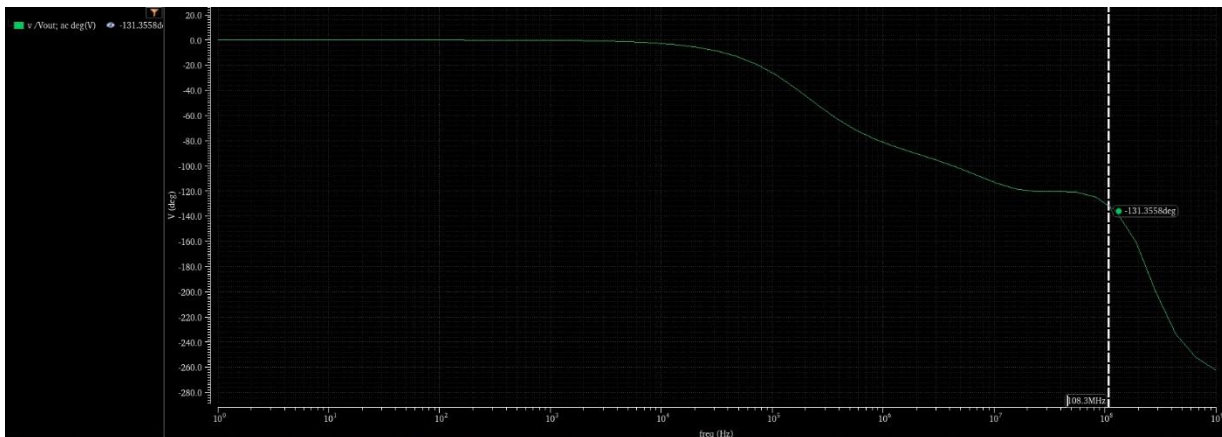
### :GBW



קיבלנו  $GBW = 108.29MHz$  ואכן עומדים בדרישה על GBW מינימום 100MHz.

### :PM

למידת הPM, הצגנו את גרף הפאזה של המוצא, ובדקנו מהי הפאזה בתדר של GBW. לאחר מכן הוספנו 180 מעלות לקבלת הPM:

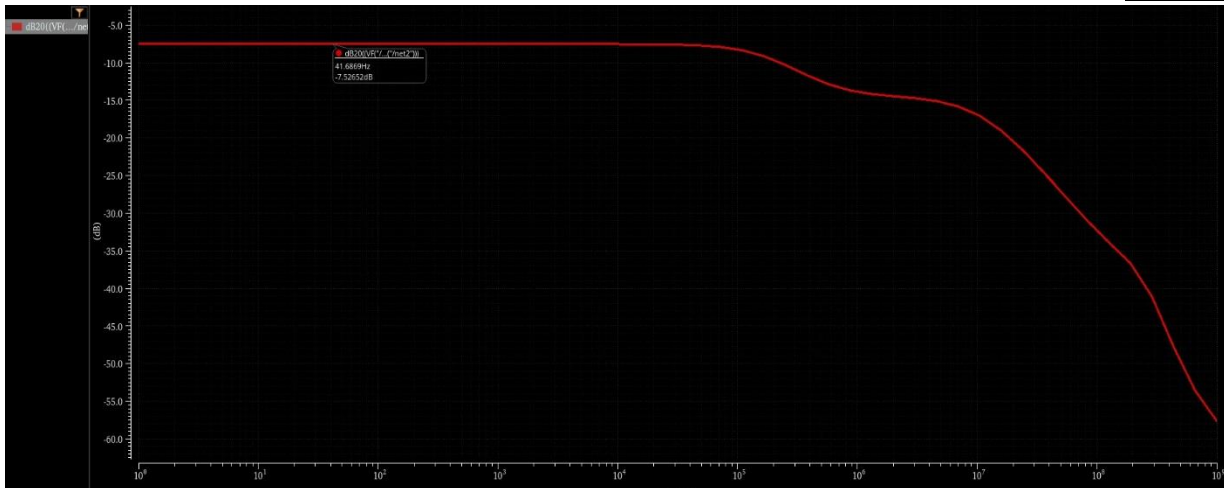


$$PM = -131.35 + 180 = 48.65^\circ$$

בהקשר של יציבות המעגל, מטרתנו היא למנוע חציית פאזה של 180 מעלות (כל עוד יש הגבר) זאת משום שבמצב זה תמסורת המגבר תחליף סימן ואנו עשויים לקבל משוב חיובי.

PM מייצג עד כמה אנו רחוקים מירידת פאזה של 180 מעלות, ואכן ניתן לראות אני התקבל PM בטווח הרצוי העומד בדרישה על יציבות.

## : CMRR



על מנת למדוד CMRR, הכנסנו לשתי הכניסות הסינוס מתח של 1mV, ומדדנו את ההגבר המשותף. בסימולציה ניתן לראות כי ההגבר הקומונלי שהתקבל הינו קטן מאוד, כפי שציפינו :

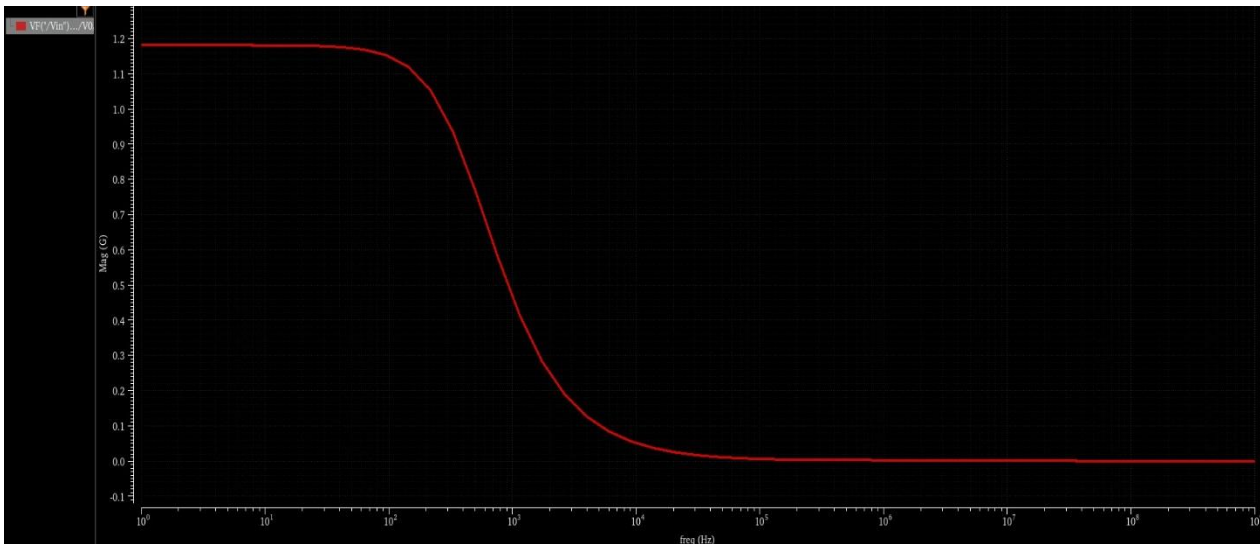
$$A_{cm} = -7.5dB$$

מכאן ניתן לחשב את יחס דחיית אות משותף :

$$CMRR = 20 \cdot \log \left( \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| \right)$$

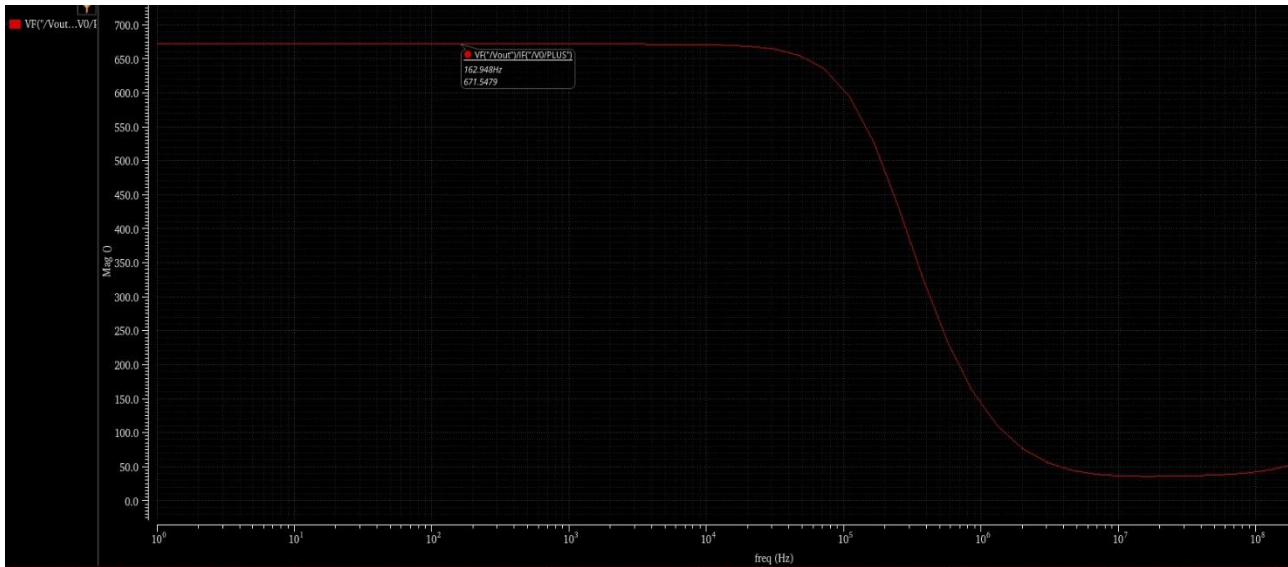
$$CMRR = 61.2 - (-7.5) = 68.7dB$$

## : אימפדנס כניסה



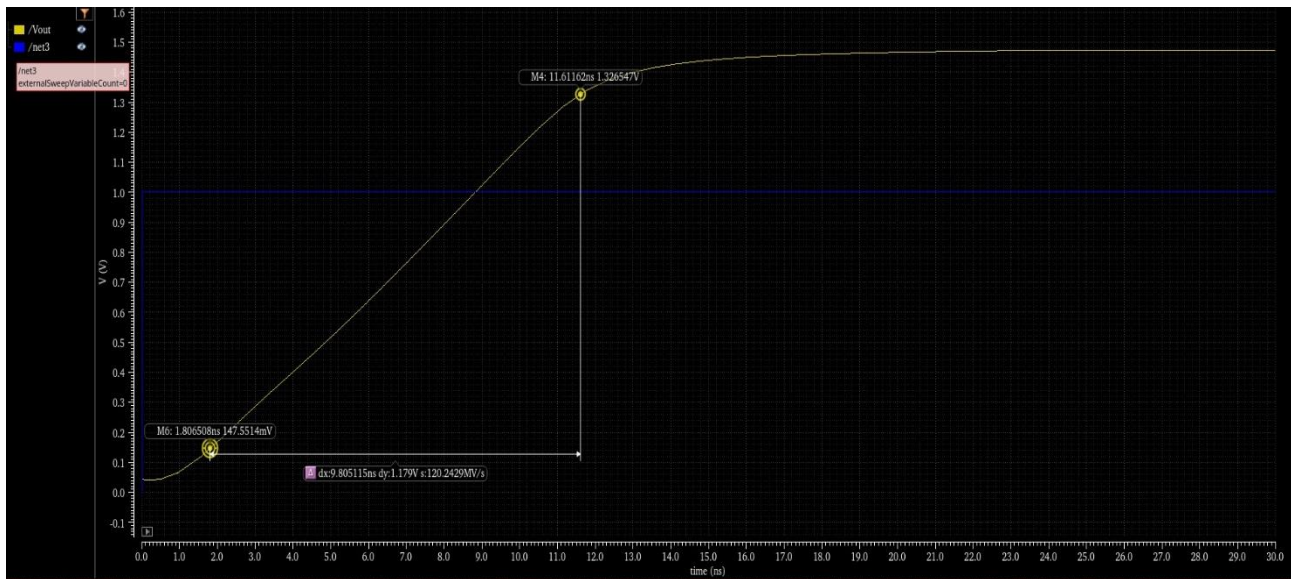
ניתן לראות כי קיבלנו אימפדנס כניסה גדול מאוד של  $z_{in} \approx 1.2G\Omega$ . תוצאה זו הגיונית שהרי אנו נכנסים לתוך שער טרנזיסטור NMOS. בנוסף מאחר וזהו מגבר כניסת מתח, נשאף להתנגדות כניסה גדולה כך שמרבית המתח ייפול על המגבר. כמו כן, ניתן לראות כי ככל שהתדירות יורדת כל גם האימפדנס יורד.

## אימפדנס מוצא



קיבלנו אימפדנס מוצא של  $z_{in} \approx 671\Omega$ . ציפינו לקבל התנגדות מוצא נמוכה שהרי ההתנגדות המוצא היא בערך  $r_{ds,7} \parallel r_{ds,8}$  ובאמצעות שימוש בפונקציית המחשבון מצאנו כי  $r_{ds,7} = 2875\Omega$  וכי  $r_{ds,8} = 880\Omega$  ואכן:  $2875 \parallel 880 = 673\Omega$ . בנוסף ניתן לראות כי ככל שהתדר עולה האימפדנס יורד, זאת מאחר והקבל  $C_c$  הולך ומתקצר עם עליית התדר.

## : Slew Rate



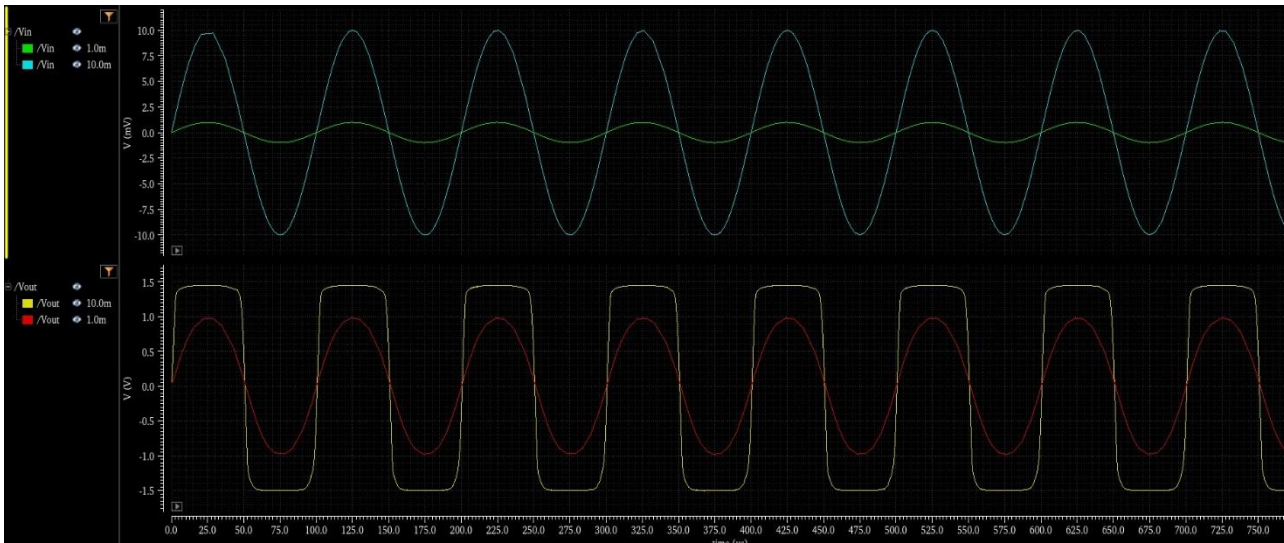
במטרה למדוד את ה-slew rate הכנסנו אות מדרגה בכניסה וערכנו סימולציית זמן. בחנו את קצב השינוי של מוצא המעגל על ידי לקיחת שני נקודות -90% ממתח המוצא ו10% ממתח המוצא וחישבנו את השיפוע:

$$SR = \frac{dy}{dx} = \frac{1.179[v]}{9.805115[nsec]} = 0.12 \frac{v}{nsec} = 120 \frac{v}{\mu sec}$$

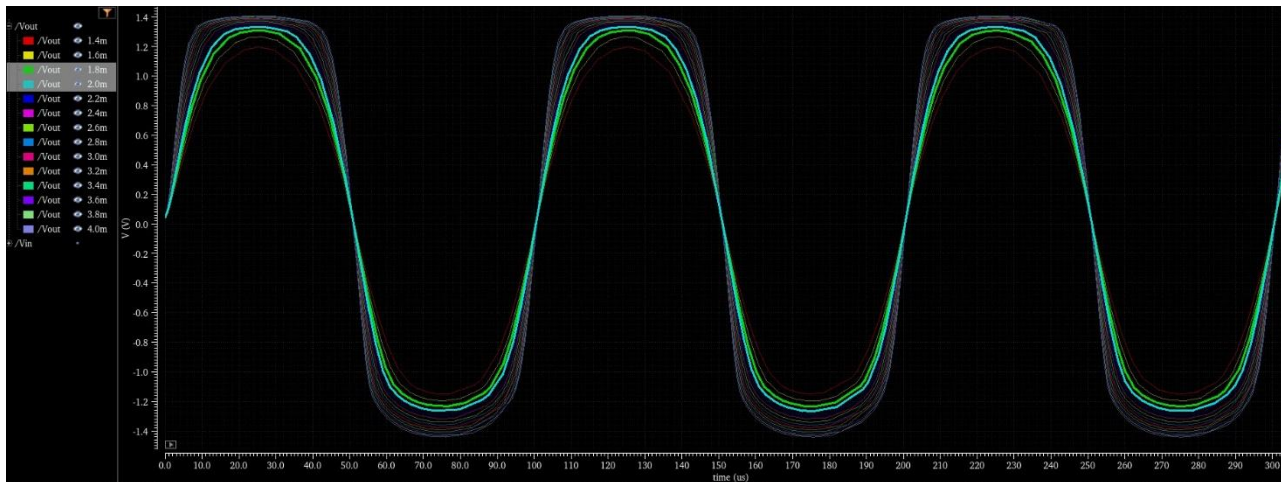


## : Voltage swing

בהתחלה הכנסנו שתי כניסות :  $v_{in} = 1\text{mV}$  ,  $10\text{mV}$ .



ניתן לראות כי עבור  $v_{in} = 1\text{mV}$  האות שהתקבל במוצא הינו סינוסי כמצופה. לעומת זאת, עבור  $v_{in} = 10\text{mV}$  נבחין כי האות שהתקבל במוצא קטום. לאחר מכן ערכנו סימולציה נוספת עם טווחי כניסה של  $1\text{mV} - 4\text{mV}$  ובדקנו מתי האות המוצא מתקבל לא כצפוי.

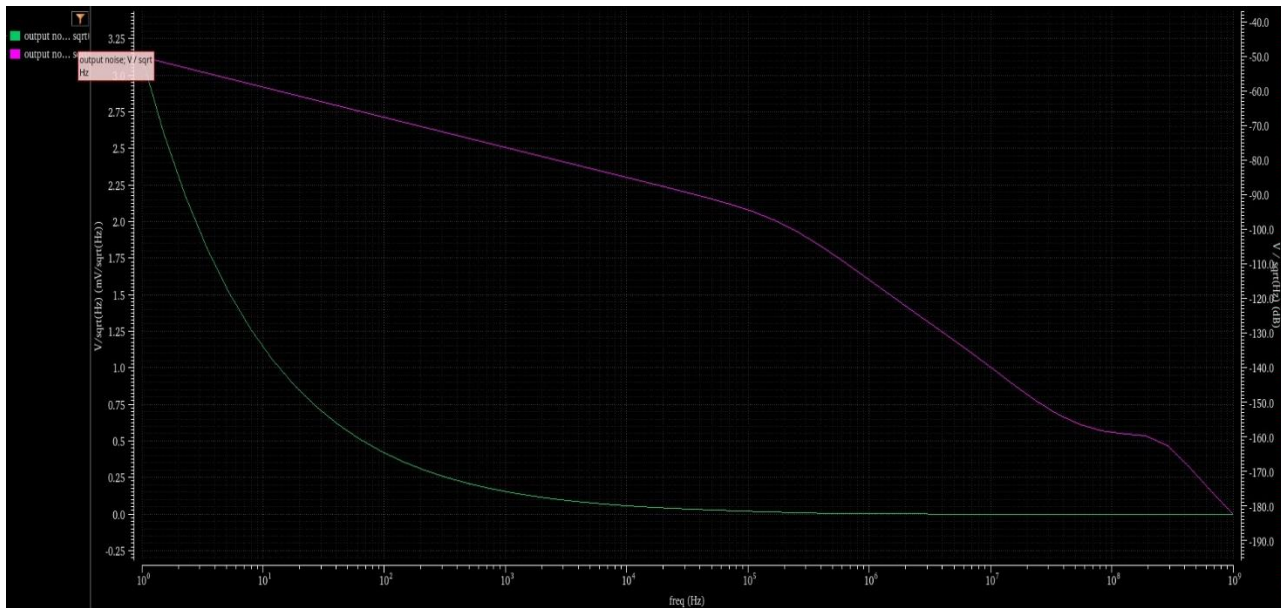


ניתן לראות כי האמפליטודה המקסימלית עברה את המוצא ויתקבל תקין הינה בערך  $1.8\text{mV}$ . עבור אמפליטודה גדולה יותר של אות הסינוס ניתן לראות קטימה במוצא.



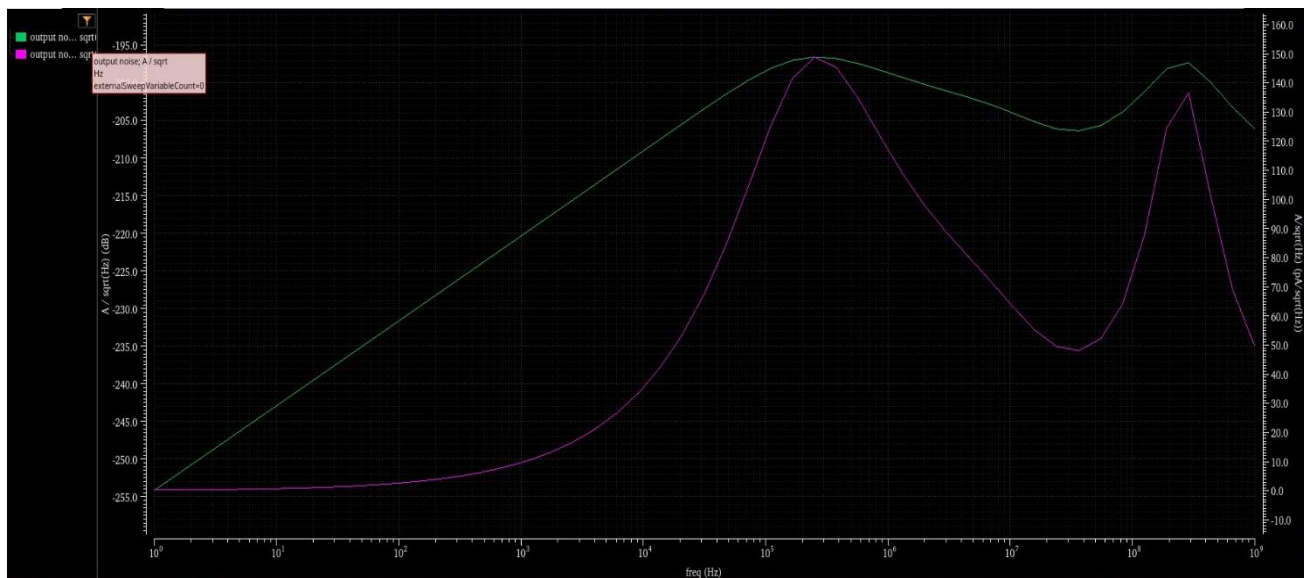
## סימולציות רעש למוצא

### רעש מתח :



בגרף לעיל ניתן לראות את הרעש בלינארי וגם בdB. נבחין כי בתדירויות קטנות (לפני ההגעה לקוטב) רעש המתח הוא גבוה ודומיננטי. ככל שהתדירות עולה כך גם רעש המתח קטן, דבר שעולה בקנה אחד עם כך שההגבר יורד לאחר תדר ברך.

### רעש זרם:



: Top 10 noise contribution in 100MHz

Device	Param	Noise Contribution	% Of Total
/M8	Rgatenoise	7.85871e-17	56.11
/M6	Sthd	1.39652e-17	9.97
/M1	Sthd	1.04492e-17	7.46
/M2	Sthd	7.02729e-18	5.02
/M4	Sthd	6.90675e-18	4.93
/M3	Sthd	6.71055e-18	4.79
/M4	Rgatenoise	3.03249e-18	2.17
/M3	Rgatenoise	2.90245e-18	2.07
/R0	rn	1.5034e-18	1.07
/M6	Rgatenoise	1.22316e-18	0.87

Spot Noise Summary (in V<sup>2</sup>/Hz) at 100M Hz Sorted By Noise Contributors

Total Summarized Noise = 1.40059e-16

No input referred noise available

The above noise summary info is for noise data

## : Output integrated Noise (entire BW)

Device	Param	Noise Contribution	% Of Total	/M7	Djnoise	1.94022e-14	0.00
/M4	Sf1	9.48413e-05	47.78	/M1	Rdrainnoise	6.97422e-15	0.00
/M3	Sf1	9.47716e-05	47.75	/M7	Rjundnoise	6.87985e-15	0.00
/M4	Sthd	2.33899e-06	1.18	/M8	Djnoise	5.84548e-15	0.00
/M3	Sthd	2.33707e-06	1.18	/M8	Rdrainnoise	5.66831e-15	0.00
/M4	Rgatenoise	1.01959e-06	0.51	/M7	Shotgs	5.61881e-15	0.00
/M3	Rgatenoise	1.0187e-06	0.51	/M5	Shotgd	4.94788e-15	0.00
/M6	Sthd	8.3867e-07	0.42	/M2	Rdrainnoise	4.47107e-15	0.00
/M5	Sthd	7.45745e-07	0.38	/M7	Shotgd	3.94814e-15	0.00
/M6	Rgatenoise	1.36962e-07	0.07	/M4	Rjundnoise	3.57179e-15	0.00
/M5	Rgatenoise	1.23873e-07	0.06	/M3	Rjundnoise	3.4526e-15	0.00
/M6	Sf1	9.13676e-08	0.05	/M1	Rjundnoise	3.14328e-15	0.00
/M5	Sf1	8.26196e-08	0.04	/M5	Rjunsnoise	2.81973e-15	0.00
/M8	Rgatenoise	3.75132e-08	0.02	/M6	Rdrainnoise	2.54041e-15	0.00
/M2	Sf1	2.32861e-08	0.01	/M5	Rdrainnoise	1.4131e-15	0.00
/M4	Rwellnoise	8.77613e-09	0.00	/M2	Shotgd	1.16629e-15	0.00
/M4	Rbulknoise	8.77613e-09	0.00	/M4	Shotgs	7.92589e-16	0.00
/M3	Rwellnoise	8.76909e-09	0.00	/M3	Shotgs	5.91728e-16	0.00
/M3	Rbulknoise	8.76909e-09	0.00	/M2	Shotgs	5.26648e-16	0.00
/M2	Sthd	8.28483e-09	0.00	/M1	Shotgs	4.20555e-16	0.00
/M8	Sf1	7.51345e-09	0.00	/M2	Djnoise	3.75482e-16	0.00
/M1	Sthd	6.4897e-09	0.00	/M2	Rjundnoise	3.57835e-16	0.00
/M1	Sf1	3.27031e-09	0.00	/M7	Rdrainnoise	2.82169e-16	0.00
/M6	Rwellnoise	2.28297e-09	0.00	/M7	Rjunsnoise	1.00485e-16	0.00
/M6	Rbulknoise	2.24717e-09	0.00	/M4	Rjunsnoise	3.71852e-18	0.00
/M5	Rwellnoise	1.942e-09	0.00	/M3	Rjunsnoise	3.61346e-18	0.00
/M5	Rbulknoise	1.93774e-09	0.00	/M1	Shotgd	8.91897e-19	0.00
/M7	Sf1	9.87181e-10	0.00	/M6	Djnoise	7.28347e-19	0.00
/R0	rn	9.33715e-10	0.00	/M5	Djnoise	6.47579e-19	0.00
/M4	Rsourcenoise	7.81692e-10	0.00	/M1	Rjunsnoise	2.50703e-19	0.00
/M3	Rsourcenoise	7.81027e-10	0.00	/M2	Rjunsnoise	3.50345e-20	0.00
/M8	Sthd	7.41747e-10	0.00	/M1	Djnoise	5.01564e-21	0.00
/M2	Rgatenoise	3.82075e-10	0.00	/M4	Sjnoise	2.42121e-26	0.00
/M7	Sthd	3.77375e-10	0.00	/M3	Sjnoise	2.41927e-26	0.00
/M1	Rgatenoise	2.97593e-10	0.00				

Device	Param	Noise Contribution	% Of Total	Device	Param	Noise Contribution	% Of Total
/M7	Sthd	3.77375e-10	0.00	/M1	Shotgd	8.91897e-19	0.00
/M1	Rgatenoise	2.97593e-10	0.00	/M6	Djnoise	7.28347e-19	0.00
/M7	Rgatenoise	2.47286e-10	0.00	/M5	Djnoise	6.47579e-19	0.00
/M8	Rbulknoise	1.01337e-10	0.00	/M1	Rjunsnoise	2.50703e-19	0.00
/M8	Rwellnoise	1.00545e-10	0.00	/M2	Rjunsnoise	3.50345e-20	0.00
/M4	Djnoise	5.91904e-11	0.00	/M1	Djnoise	5.01564e-21	0.00
/M3	Djnoise	5.91431e-11	0.00	/M4	Sjnoise	2.42121e-26	0.00
/M6	Rsourcenoise	1.00172e-11	0.00	/M3	Sjnoise	2.41927e-26	0.00
/M5	Rsourcenoise	9.01657e-12	0.00	/M8	Sjnoise	3.27999e-27	0.00
/M2	Rwellnoise	5.90492e-12	0.00	/M6	Sjnoise	3.09518e-27	0.00
/M2	Rbulknoise	5.90454e-12	0.00	/M5	Sjnoise	2.6331e-27	0.00
/M6	Rjundnoise	4.82503e-12	0.00	/M7	Sjnoise	2.2182e-28	0.00
/M1	Rwellnoise	4.57975e-12	0.00	/M2	Sjnoise	3.87491e-29	0.00
/M1	Rbulknoise	4.57349e-12	0.00	/M1	Sjnoise	2.89166e-29	0.00
/M7	Rbulknoise	3.40161e-12	0.00	/T22	Sthd	0	0.00
/M7	Rwellnoise	3.39973e-12	0.00	/T22	Djnoise	0	0.00
/M2	Rsourcenoise	2.90876e-12	0.00	/T22	Shotgd	0	0.00
/M1	Rsourcenoise	2.33875e-12	0.00	/T22	Shotgs	0	0.00
/M6	Shotgd	1.52106e-12	0.00	/T22	Sf1	0	0.00
/M8	Shotgd	6.99189e-13	0.00	/T22	Sjnoise	0	0.00
/M6	Shotgs	5.77183e-13	0.00	/T22	Rsourcenoise	0	0.00
/M8	Rjundnoise	4.10342e-13	0.00	/T22	Rgatenoise	0	0.00
/M5	Rjundnoise	4.0562e-13	0.00	/T22	Rbulknoise	0	0.00
/M5	Shotgs	3.46051e-13	0.00	/T22	Rjunsnoise	0	0.00
/M4	Shotgd	1.86685e-13	0.00	/T22	Rdrainnoise	0	0.00
/M3	Shotgd	1.71429e-13	0.00	/T22	Rjundnoise	0	0.00
/M8	Shotgs	1.40099e-13	0.00	/T22	Rwellnoise	0	0.00
/M4	Rdrainnoise	1.15096e-13	0.00				
/M3	Rdrainnoise	1.15033e-13	0.00				
/M8	Rsourcenoise	1.15028e-13	0.00				
/M7	Rsourcenoise	1.03749e-13	0.00				
/M8	Rjunsnoise	1.0337e-13	0.00				
/M6	Rjunsnoise	4.54204e-14	0.00				
/M7	Djnoise	1.94022e-14	0.00				

Integrated Noise Summary (in V<sup>2</sup>) Sorted By Noise Contributors  
Total Summarized Noise = 0.000198482  
No input referred noise available  
The above noise summary info is for noise data

