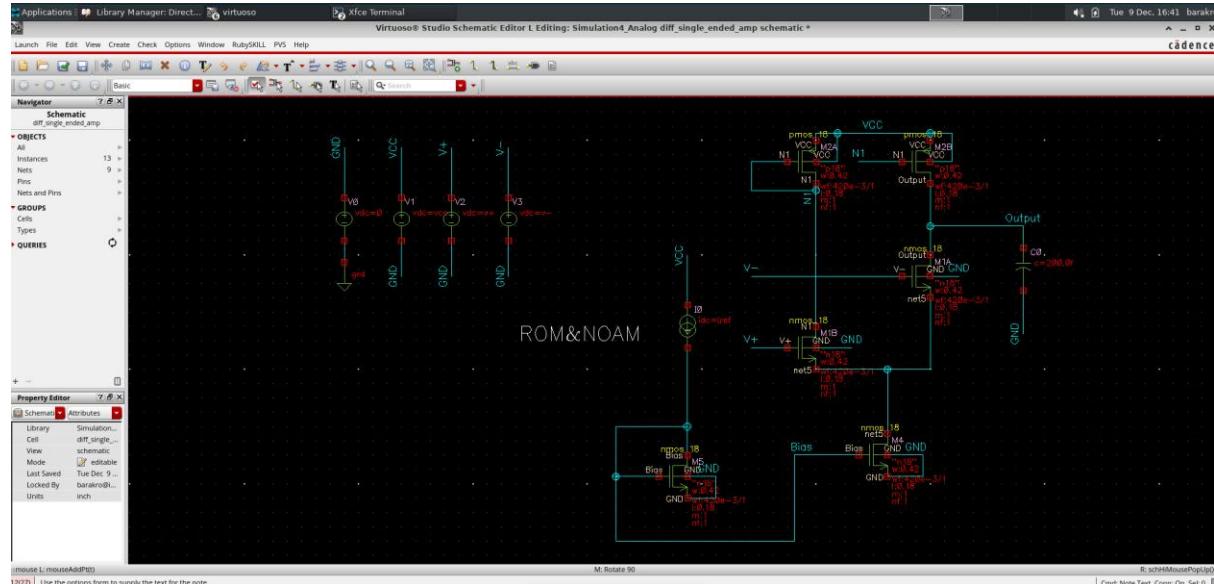


## Simulation #4 Template: Differential to Single Ended Amp (5T)

Please place all schematics, graphs, and explanations under the relevant subsection. It is OK to add some discussion at the end of the sections.

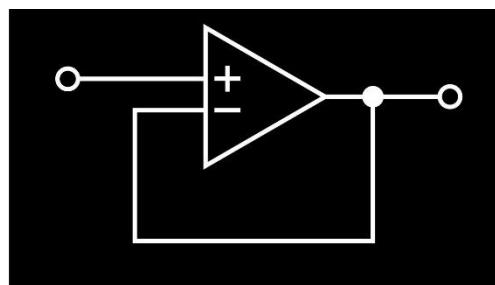
### 4A: Differential to single ended amp

#### 4A.1 – OPAMP SCHEMATIC: (10 pts)

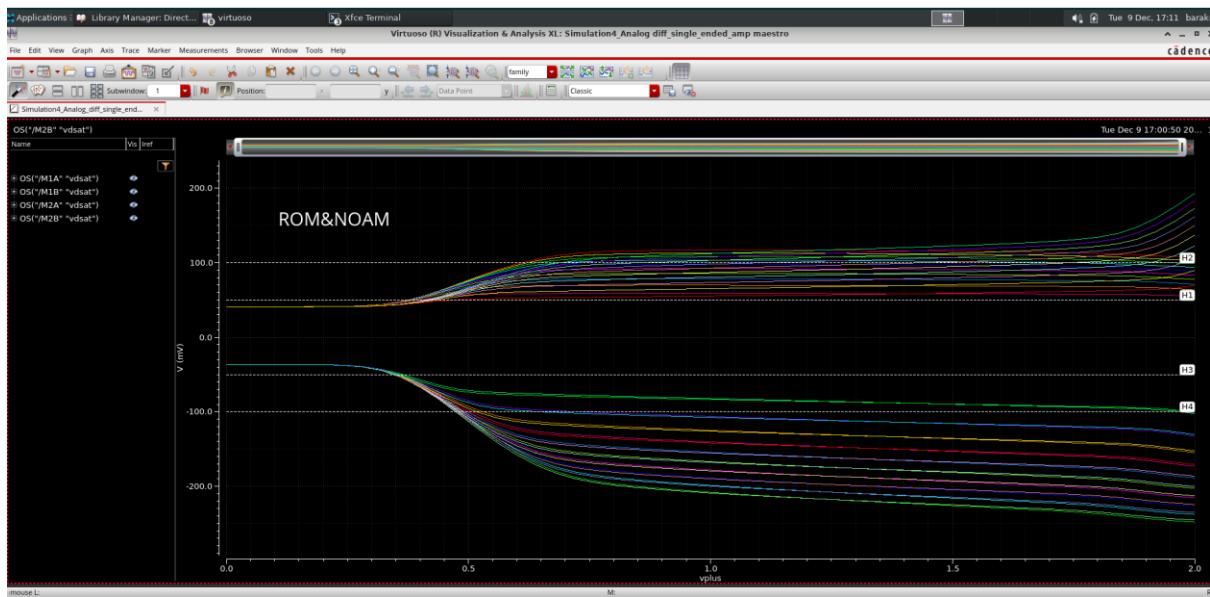


בסעיף זה ייצרו את המעגל המבווקש differential to single ended amp על פי ההוראות, חיבורו מראת זרם לטרנזיסטור התיכון כדי להציג זרם קבוע במעגל, חיבורו לקבל של  $F=0.2$  ביציאה כמבווקש.

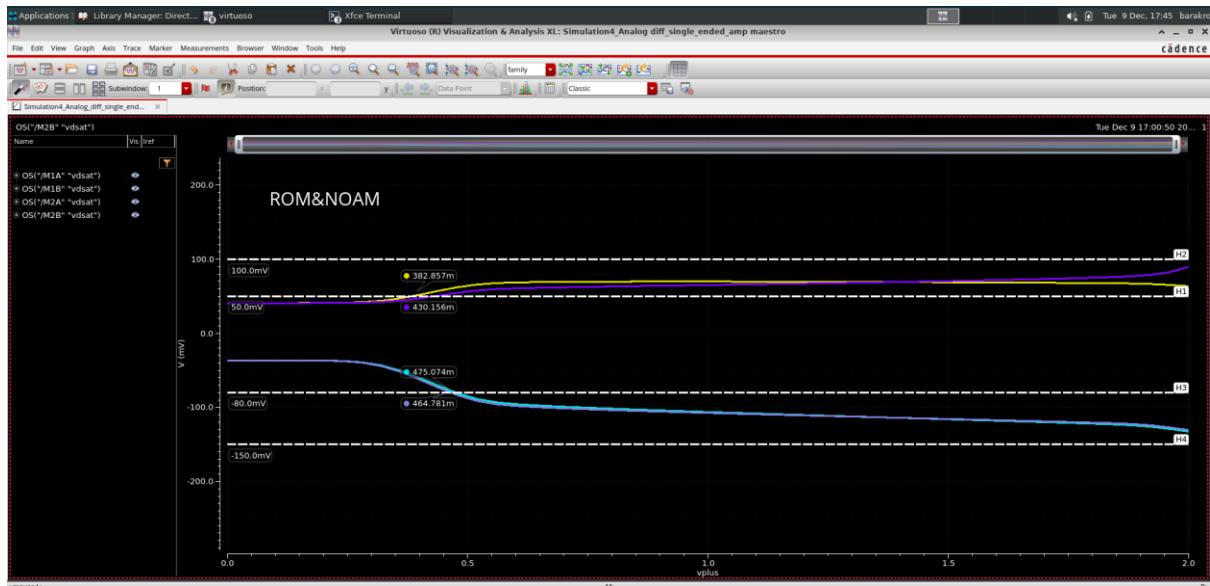
#### 4A.2 – DC SIMULATIONS (10 pts)



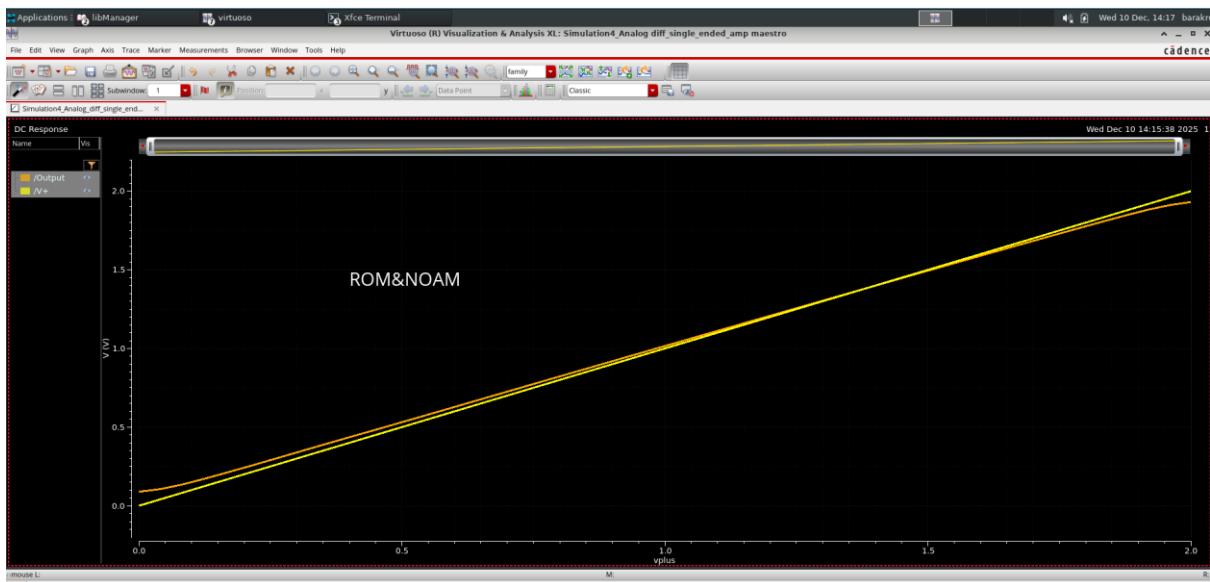
תיריהו כמשוב בחזרה לכינסה ולכן נבדוק מי מהכניות שוחפות את הייצאה היא שיר כי עברו הטעינה  $V_{minus}$  בטרנזיסטור  $M1A$  יש היפוך בין ה( $V_{minus}$ ) gate( $V_{drain}$ ) ל( $V_{drain}$ ) output( $V_{drain}$ ). כפי שאנו יודעimos בסומח ולכן נחבר אותה כמשוב. טרנזיסטור  $M1A$  יהיה מחובר דיודית.



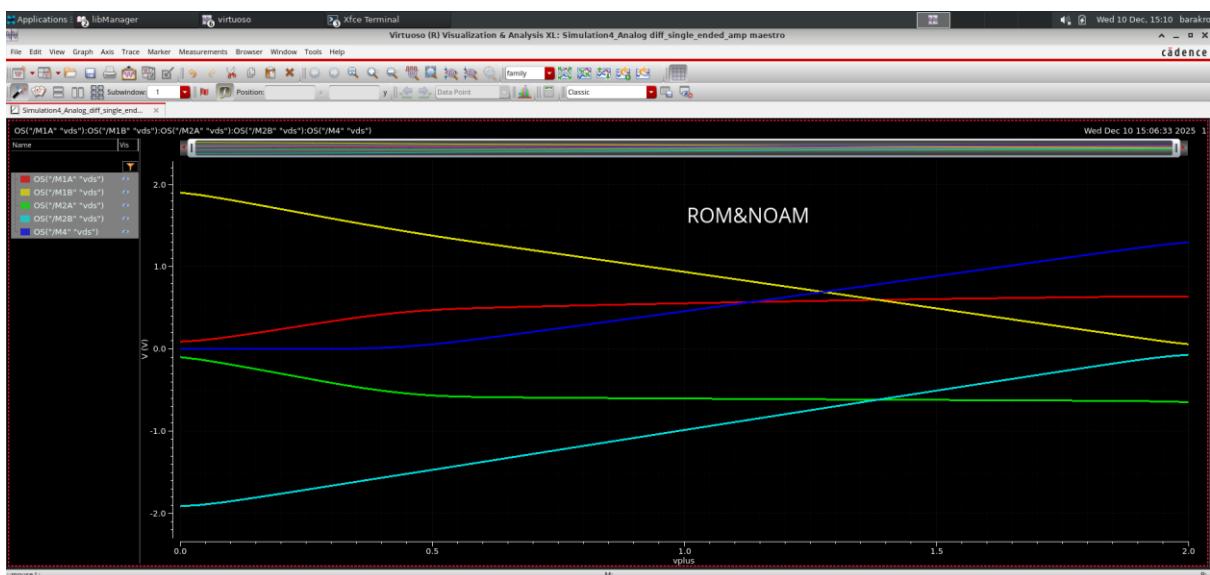
הרצינו סימולציה dc על הכניסה  $V_{\text{plus}}$  מ 0 עד 2 וולט ( $V_{\text{cc}}$ ) ובדקנו על  $I_{\text{ref}}$  (המקור זרם אידיאלי) זרמים מ-1 עד 10 nA בקצבות של 1 ns אמפר כדי לבחור זרם מתאים על מנת לקבל עברור pair diff  $.100 \text{ mV} < V_{\text{DSATs}} < 50 \text{ mV}$  עבור ה *current mirror*  $-150 \text{ mV} < V_{\text{DSATs}} < -80 \text{ mV}$



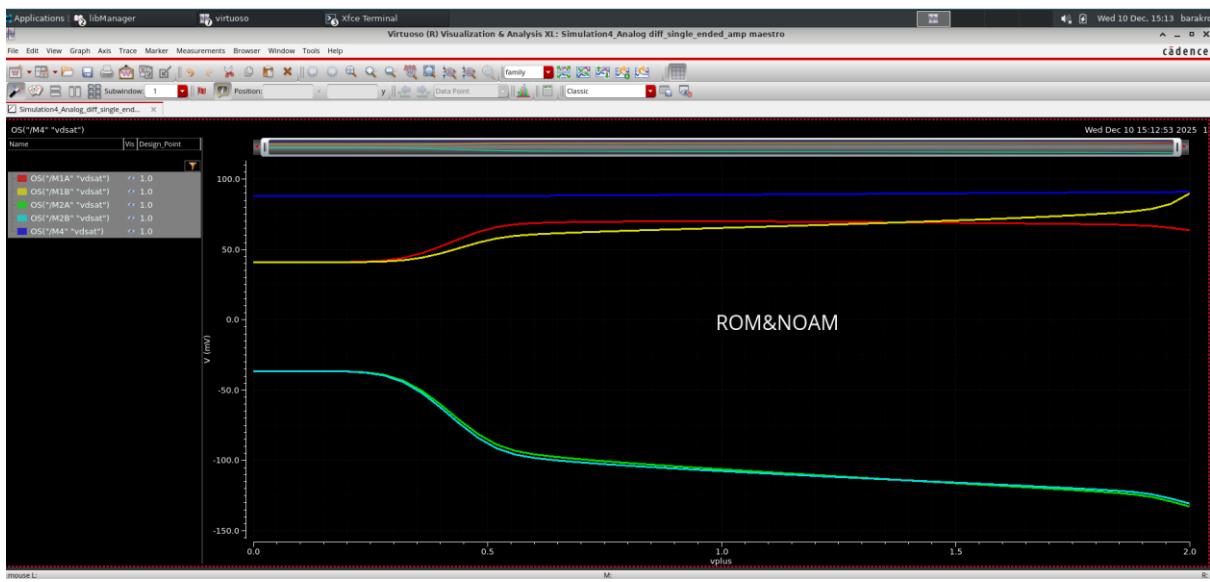
החליטנו ל选取 זרם של 2 nA אמפר שנראה כי נותן את התוצאה האידיאלית ברוב ההרצה על  $V_{\text{plus}}$ , ניתן לראות שאכן קיבלנו טובות תקין עבור המתחים של הטרנזיסטורים החל מבערך  $.475 \text{ mV}$ .  
הסומן הם הגרפים התחתיים (כמעט מתלכדים) והסומן הם הגרפים העליונים.



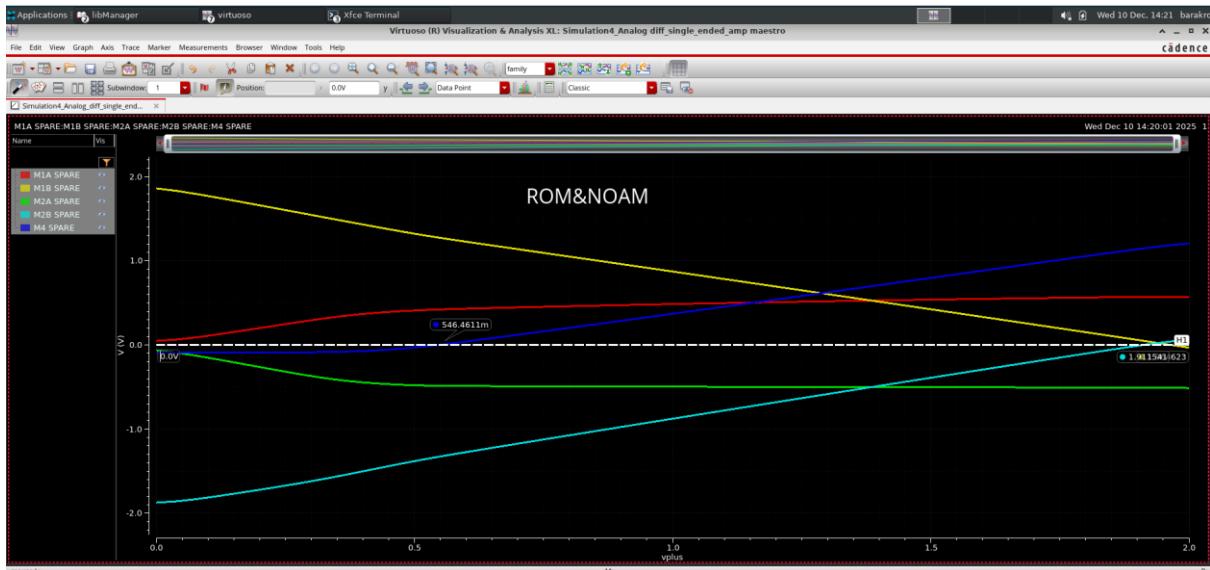
ניתן לראות בגרף שמציג את היציאה והכניסה כתלות ב $V_{ds}$  שאכן המוצא עוקב אחר הכניסה ובאמצעו כמעט מתלכד איתה למגמי ולכן נסיק שהוא בתחום הסטורציה (כאשר הם מתלכדים).



הצגה של  $S_{ds}$  של כל הטרנזיסטורים כUMBOKש.

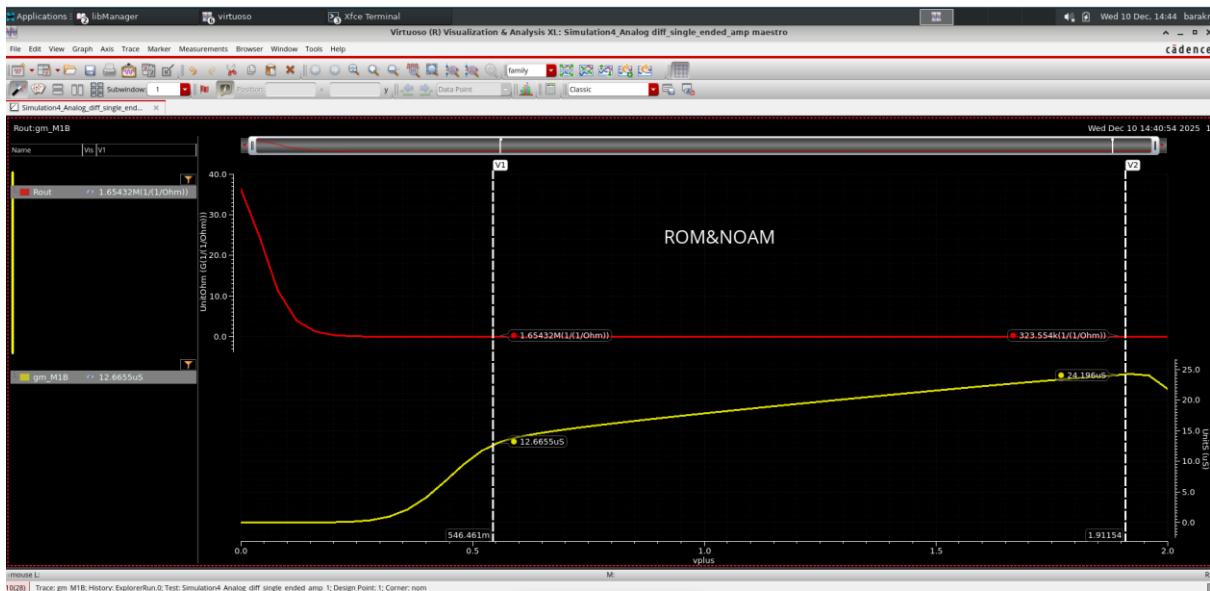


הצגה של כל  $V_{dsat}$  של כל הטרנזיסטורים.



בגרף זה ניתן לראות עבור כל הטרנזיסטורים (M1A,M1B,M2A,M2B,M4) את ה $V_{ds}$ -VDSAT (M1A,M1B,M2A,M2B,M4) שליהם.

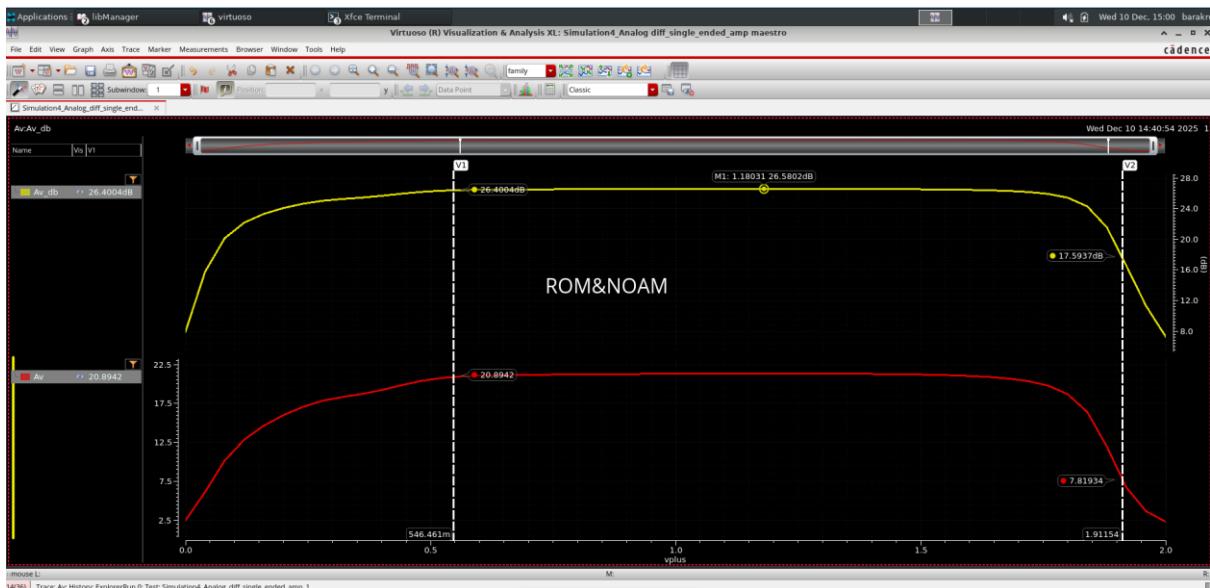
עבור טרנזיסטורי mos נבחן בתחום סטורציה כאשר  $0 < V_{ds}$ -VDSAT ועבור טרנזיסטורי mosk נבחן בתחום סטורציה כאשר  $0 > V_{ds}$ -VDSAT . לכן אפשר לראות בתמונה שאכן הגрафים התוחתונים מציגים את mosk (M2A,M2B) והגרפים העליוניים מציגים את mos (M1A,M1B,M4) ומכאן נוכל לראות את טווח הסטורציה. לשם כך העברנו קו אופקי ב-0 וניתן לראות שני שחותר אותו הוא טרנזיסטור M4 שנכנס אחרון לסטורציה ולבסוף טרנזיסטור M2B שיצא ראשון מסטורציה ולכן סה"כ טווח הסטורציה שלנו בمعالג עבור הערכים שלנו הוא בין 546.4611 מיליוולט לבין 1.911541 וולט.



בגרף הנ"ל הצגנו את gm של טרנזיסטור M1 בצד ימין כמボוקש ואת הגרפ' של Rout כמבוקש.

$$\text{כasher chishbenu at } Rout = \frac{1}{\left(\frac{1}{Rout_{M1A}} + \frac{1}{Rout_{M2B}}\right)}$$

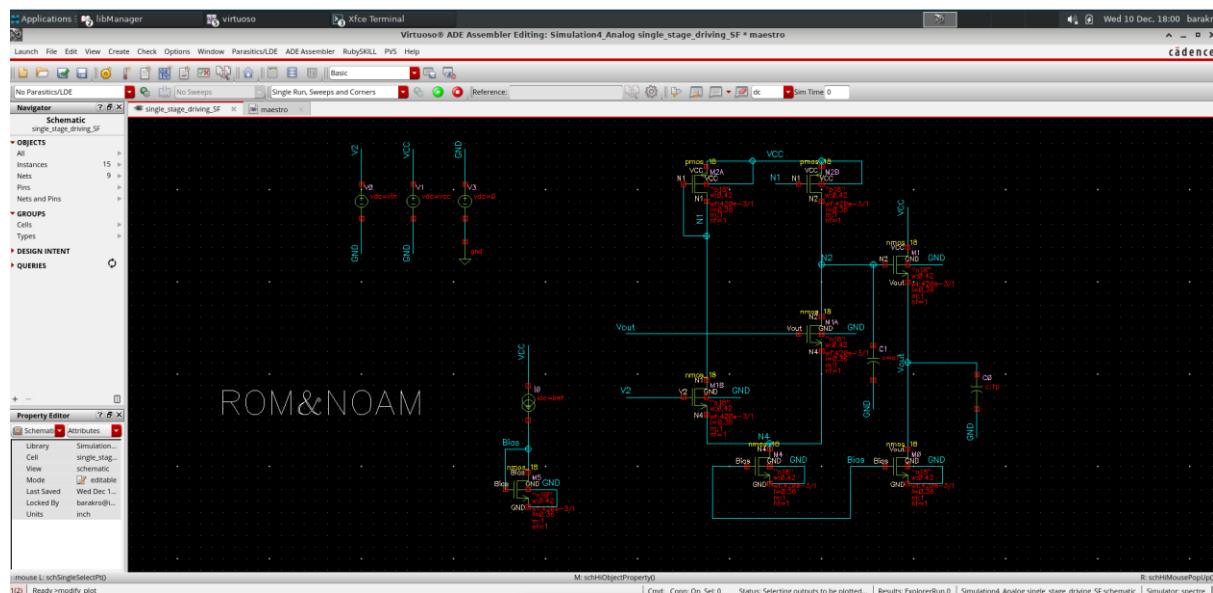
הבאים. לחישוב ההגבר נשתמש بما שלמדנו בהרצאות ונקבל כי ההגבר הוא  $Av = gm_{M1B} * Rout$ .



כאן מוצג הגראפים של ההגבר  $Av$  וכrangle, ניתן לראות שההגבר  $db$  קצר יותר גדול, תחמננו את תחום הסטורציה כדי לראות את ההגבר בסטורציה וניתן לראות שמשמעותם להגבר מקסימלי של בערך  $26db$  והוא קבוע כמעט לאורך כל תחום הסטורציה ומתחיל לרדת בערך 1.85 וולט עד לערך של  $17.6db$  ביציאה מסטורציה.

## **4B: Single stage OPAMP driving source follower**

#### 4B.1 – OPAMP SCHEMATIC: (10 pts)



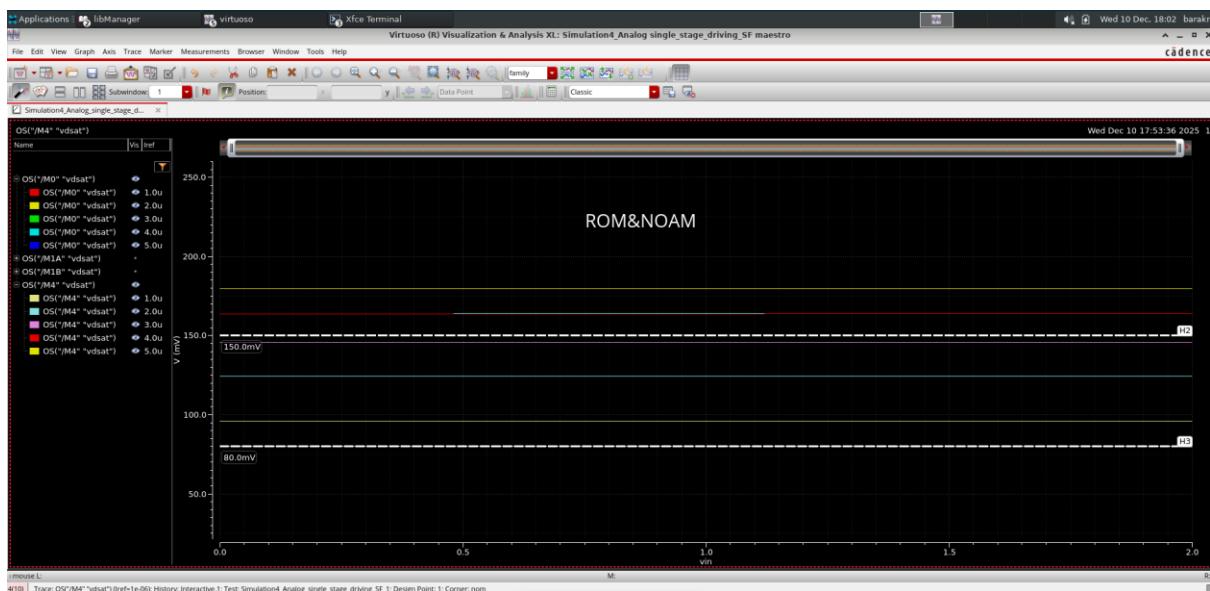
בסעיף זה בנוינו את המעגל המבוקש, זה בעצם אותו המעגל מהסעיף הקודם הקודם רק שעכשיו היציאה מחוברת לfollower source Iref שאנחנו מכירים. חיבורנו מראת זרם גם לטרניזיטור M4 וגם לטרניזיטור M0 עם מקור זרם אידיאלי Iref שמחובר למתח ספק VCC שהוא 2 וולט. בנוסף חיבורנו קבלים במקומות המבוקשים.שוב חיבורנו את הcninya V1 ליציאה על פי עקרון Unity Gain Buffer מכיוון שהיא והיציאה הפוכות זו לאו כמו שהסבירנו בסעיפים הקודמים וכמו שלמדנו בכיתה.



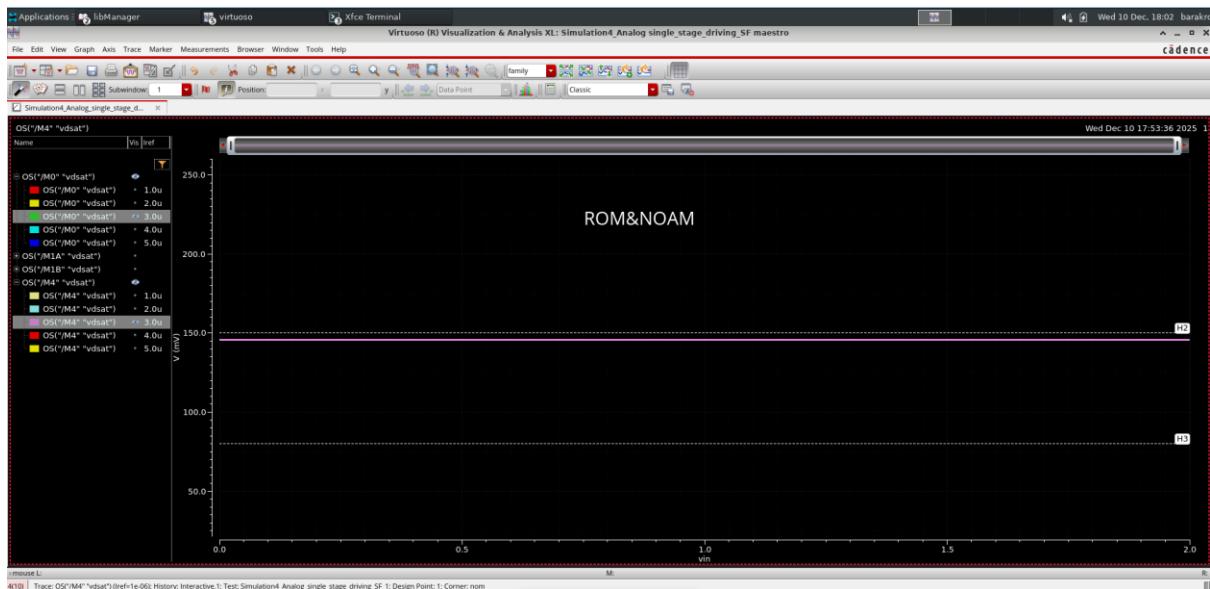
הרצינו סימולציה DC על V<sub>2</sub> מ-0 עד 2 וולט ורצינו למדוד איזה זרם אנחנו רוצים לקחת ב-*Iref* כדי לעמוד בתנאים המבוקשים וудין לקבל תחום עבודה טוב. לכן בדקנו תחילת את ה-*VDSATs* של טרנזיסטורי *Diff pair* ובדקנו עבור זרמים של  $5 \mu A$ -1 אמפר.



כדי לקבל גם זרם חזק וגם תחום עבודה ייחסי טוב החלטנו לנקת  $u_n$  Amper. ניתן לראות שעבור זרם בגודל זה אנחנו עומדים בתנאים המבוקשים בטוח שבן 519 עד ל-1288 מיליו וולט.



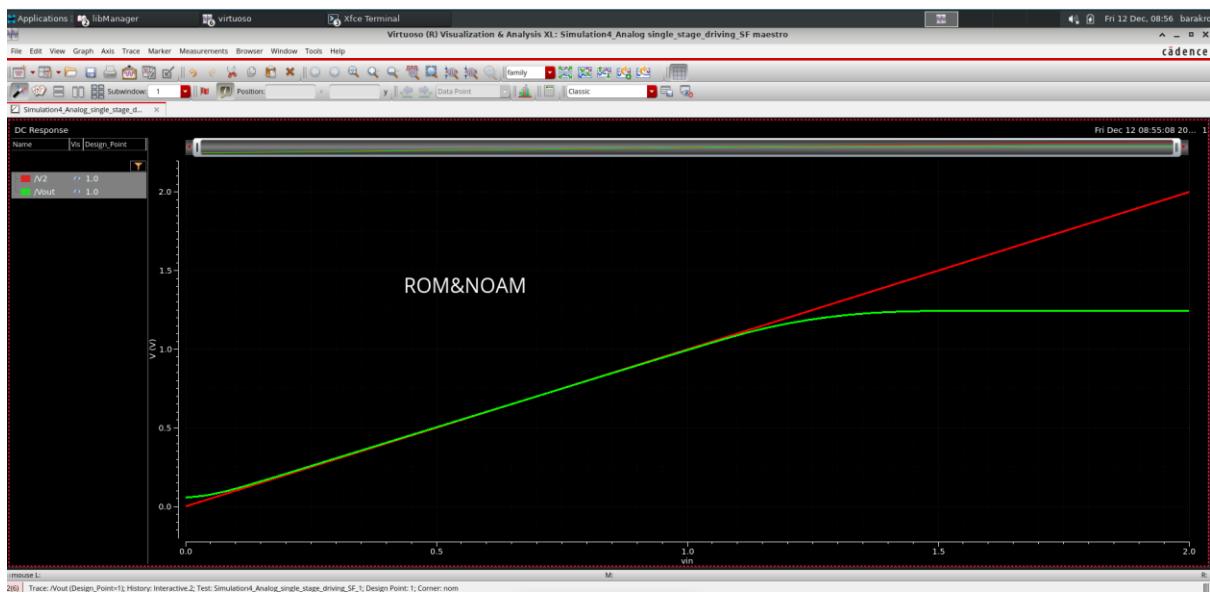
כאן בדקנו את השפעת גודל הזרם על VDSAT של טרנזיסטורי Current source. ניתן לראות שעבור כל הזרמים הגרפים שלהם מתלכדים וזה הגיוני כי חיברנו להם את אותו המתח VGS. בחרנו מקודם זרם של 3 Amper ולכן נבדוק האם עבור זרם זה אנחנו עומדים בתנאי המבוקש.



ניתן לראות שacon עبور הזרם של 3 אמפר גם VDSATs של טרנזיסטוריים המבוקש לאורך כל הסימולציה. הם מתלכדים ושוויים כמו שציפינו והגרף לא משתנה כי אין שינוי ב-VGS.

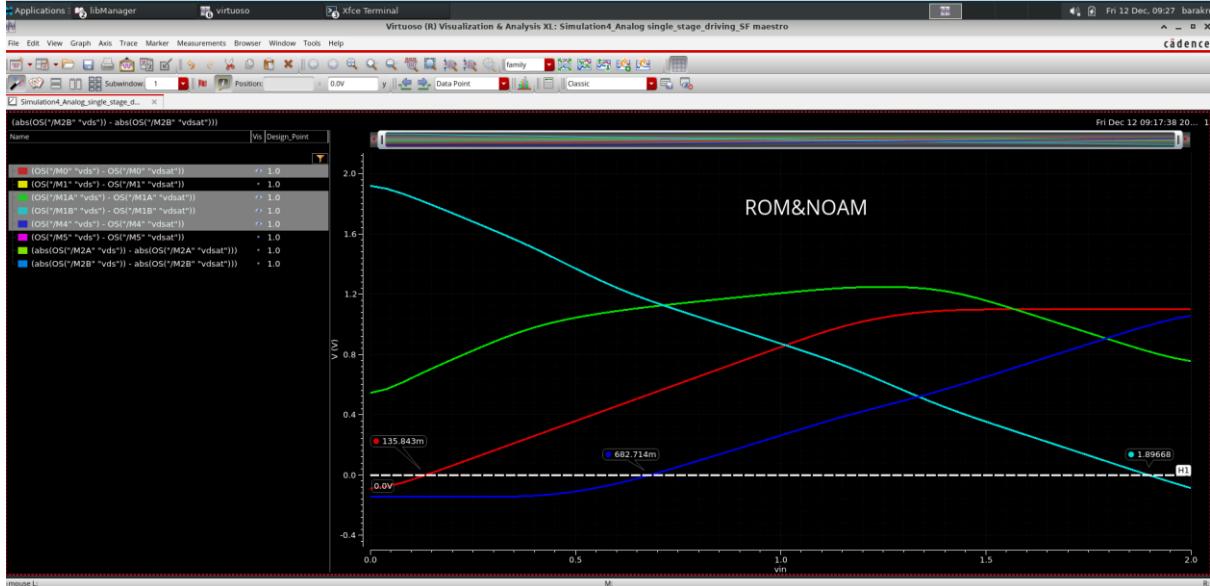
#### 4B.2 – DC SWEEP (20 pts)

a)

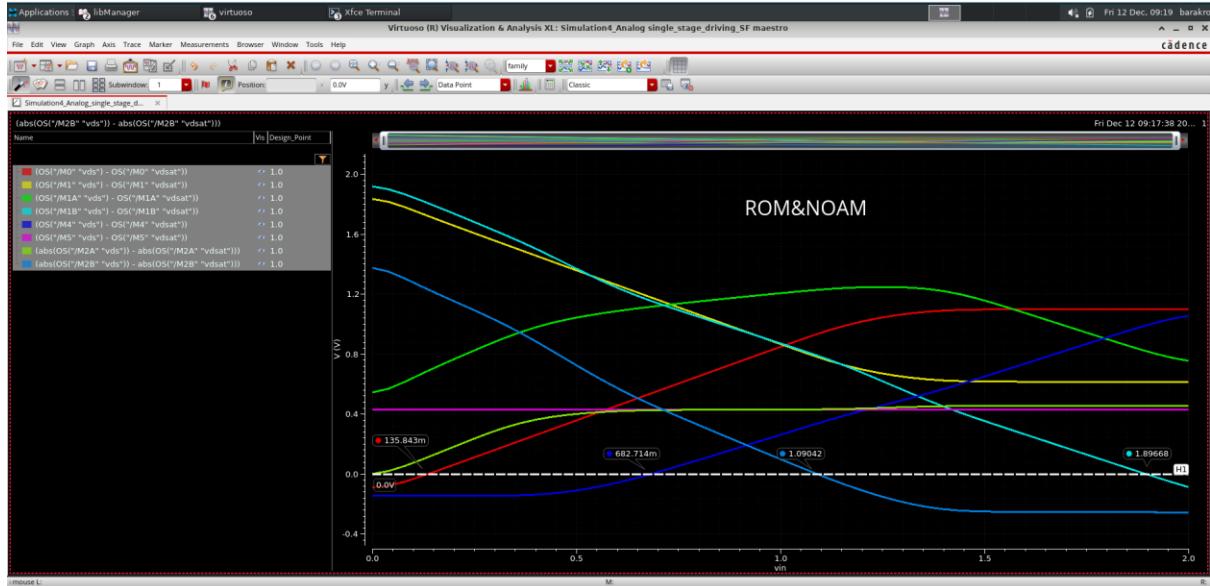


בגרף זה בדקנו את מתח היציאה כתלות במתוך הכניסה שרצץ מ-0 עד VDD שהוא 2 וולט. ניתן לראות שעדי בערך 1 וולט אכן מתח היציאה עוקב אחריו מתח הכניסה ובשלב מסוים מפסיק לעקב אחריו, נסיק שהוא כיו יצאנו מסטורציה ונבדוק האם זה נכון בגרף הבא ע"י בדיקה של סטורציה עبور כל הטרנזיסטורים במעגל.

b)

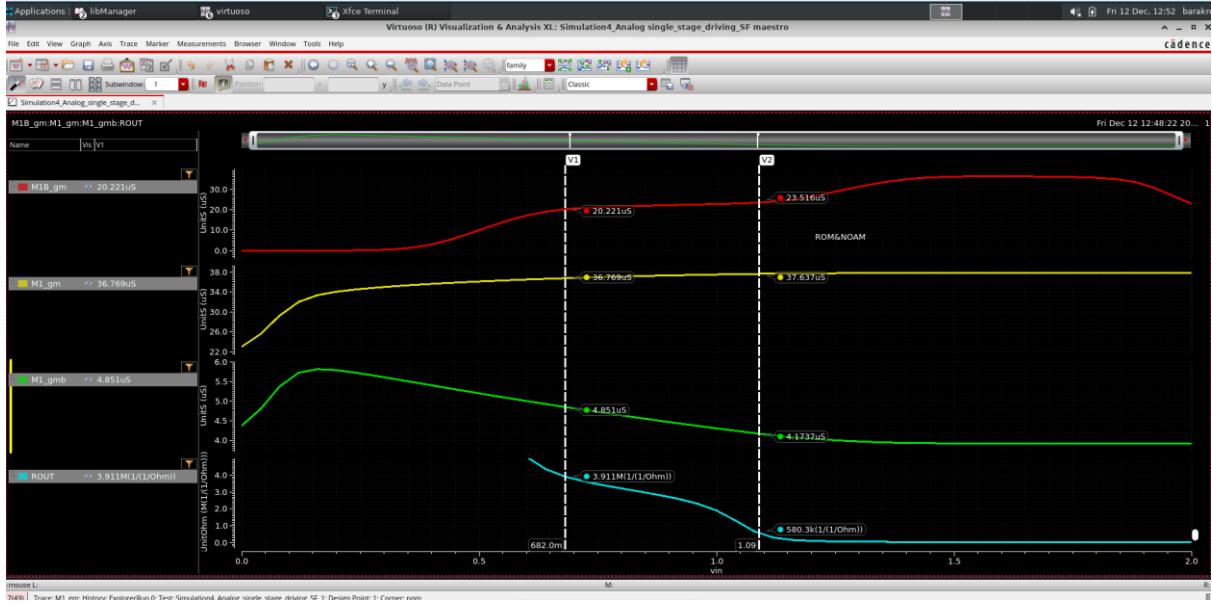


בגרף זה מוצגים תחומי הסטורציה עבור הטרנזיסטורים שדיברנו עליהם בסעיף הקודם, ניתן לראות שתוחום הסטורציה הוא בין 682 מיili וולט לבין 1.89 וולט. בגרף הבא נציג את כל הטרנזיסטורים במעגל וניראה מהו טווח הסטורציה האמיתית.



ניתן לראות כאן את AT Vds-VDSAT של כל הטרנזיסטורים במעגל. לקחנו את הפונקציה של הסוסקן בערך מוחלט והעבכנו קו אופקי ב-0 כדי לראות متى כל הטרנזיסטורים נמצאים יחד בסטורציה ובין קיבלו Ci בטוחה בין 682 ל-1090 מיili וולט. בערך אנחנו נמצאים בסטורציה Ci כל הגראפים מעל ה-0.

c)



בסעיף זה התרבקשנו למצוא את ה  $gm$  ואת  $rout$  שאנו מושתמשים בהם כדי למצוא את ההגבר בולולאה הפתוחה. כמו שאנו יודעים כאשר אנחנו מושתמשים 2 מושגים זה זה או ההגבר הכולל של שניהם יהיה  $A_{v1} * A_{v2}$ . אנחנו יודעים את ההגבר של המגבר הדיפרנציאלי מהסעיפים הקודמים ואנו יודעים את ההגבר של source follower ולכן אנחנו משתמש בנוסחאות הבאות :

$$Rout = \frac{1}{\left(\frac{1}{Rout_{M1A}} + \frac{1}{Rout_{M2B}}\right)}$$

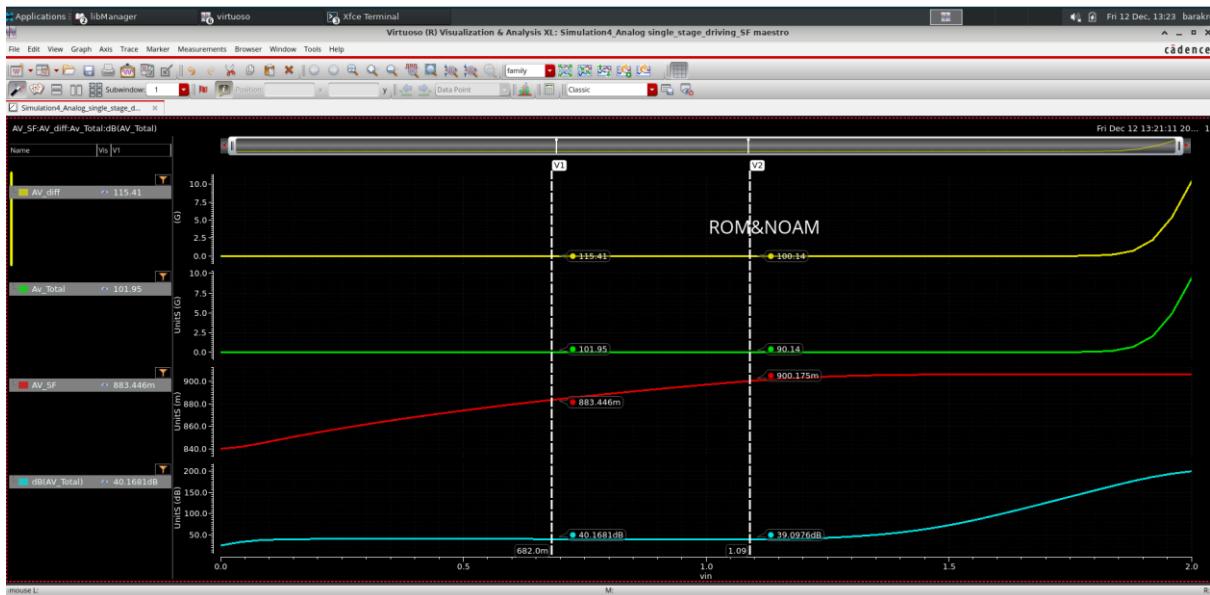
$$Av\_diff = gm_{M1B} * Rout$$

$$Av\_source\_follower = \frac{gm_{M1}}{(gm_{M1} + gmb_{M1})}$$

והציגנו את הגרפים של הגורמים המבוקשים בתחום הסטורציה שלנו.



ניתן לראות שאכן הגענו להגבר שציפינו לו, בתחום הסטורציה הגבר המקסימלי שלנו מגע לכמעט **37db**.  
 ניתן לראות גם את הגברים של המגבר הדיפרנציאלי ושל **common source** בהשוואה להגבר של כל המודול ייחד.

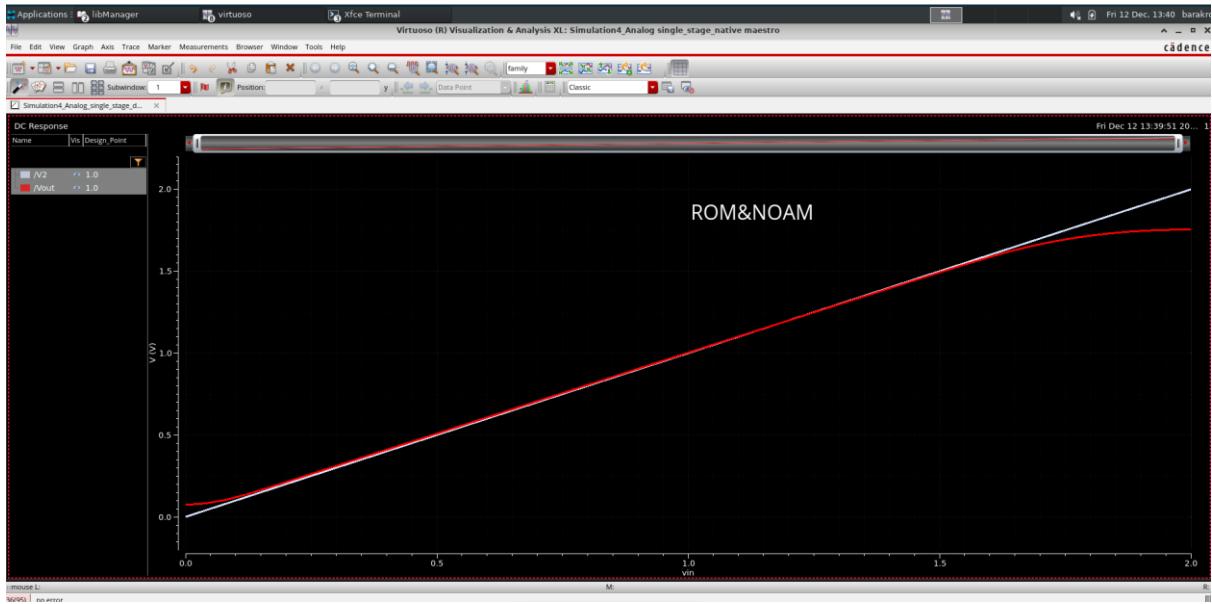


בגרף זה השתמשנו בקירוב של

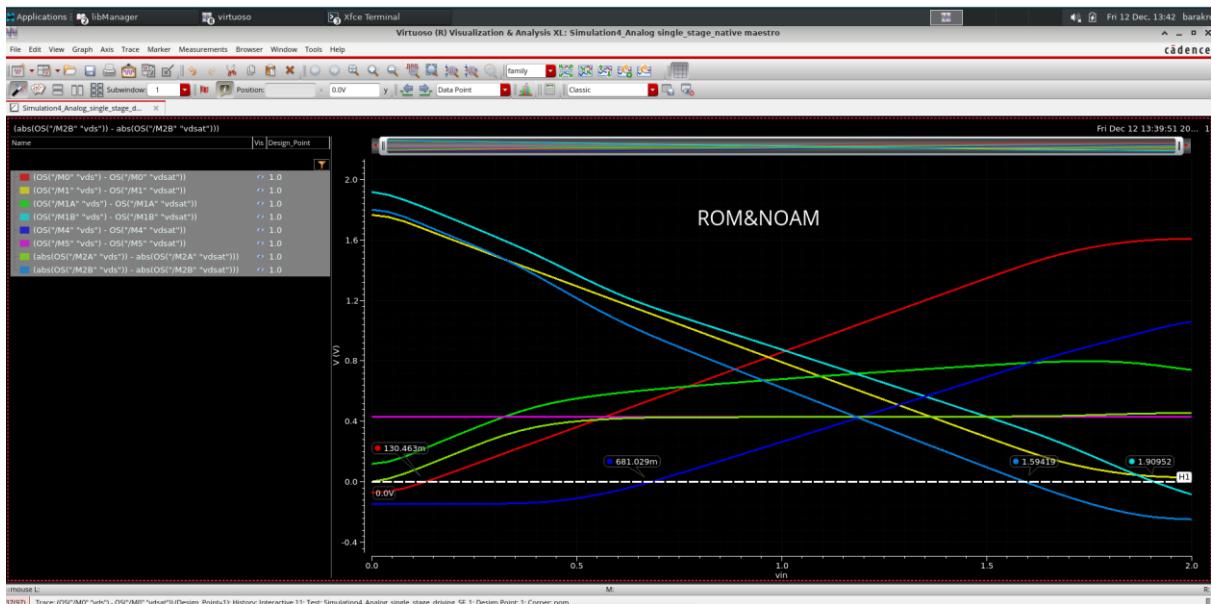
$$R_{out} = \frac{R_{out,M1A}}{2}$$

ואפשר לראות שיצא לנו תוצאות מאד קרובות כאשר בהגבר התיאורטי והמדויק קיבלנו **37 db** וכן קיבלנו **40 db** כລונר סטיה של בערך 10%.

d)



בשער זה החלפנו את טרנזיסטור M1 לטרנזיסטור native מבוקש. טרנזיסטור מסוג זה בעל  $V_{th}$  מאד נמוך. בהשוואה מתח הכניסה למתח היציאה ניתן לראות שההשפעה של החלפת הטרנזיסטור גרמה ליציאה לעקבות טוב יותר אחרי הכניסה ולמשר תחום רחב יותר של מתחים.



ניתן לראות שהפעם תחום הסטורציה גדול משמעותית ועכשו הוא בין 1590 ל-681 מיליו וולט.

התחומים מלמטה לא השתנה אבל כעת אנחנו מגיעים עד לכמעט 1.6 וולט. בהערכתה הוכחנו שעל מנת שהמגבר הדיפרנציאלי יהיה בסטורציה נוצרך לדרוש:

$$V(N2) < VDD - V_{dsat}(M2B)$$

עבור ה source follower נדרוש:

$$V_{gd}(M1) > V_t(M1) \Rightarrow V(N2) - V_{out} > V_t(M1) \Rightarrow V_{out} < V(N2) - V_t(M1)$$

cut נקבל את הא שווין הבא:

$$V_{OUT} < VDD - V_{dsat}(M2B) - V_t(M1)$$

אבל כעת לאחר שההחלפנוmos ,  $V_t(M1)$  נמוך יותר ולכן החסם העליון על  $V_{OUT}$  גובה יותר.

#### 4B.3 – Transient Step response (for stability) (20 pts)

בסעיף זה רצינו לבדוק את זמן ההתייצבות של המערכת שלנו ואת רוחב הפס ממוקש, לשם כך הכנסנו מתח מדרגה של פולוס ומינוס 50 מייל וולט מבוקש כאשר הגדרנו  $rise/fall time$  של 1 פיקו שניות. בחרנו מתח כניסה של 850 מייל וולט כדי לetest עמוק בתחום הסטורציה בו היציאה עוקבת אחרי הכניסה הכל טוב.

הרצינו סימולציה transient של 600 ננו שניות וקיבלונו את הגרף הבא עבור הסימולציה:



ובקירוב:





כדי לנתח את זמן ההתיצבות, בדקנו מה הערך הסופי, עבור מדרגה של 50+ מיili וולט הערך הסופי הוא 896 מיili וולט ולכן הגדרנו טווח של פלוס מינוס 5% כאשר הכנסנו מתח של 850 מיili וולט ומדרגה של 50 מיili וולט ולכן : הגדרנו את התחום העליון כ  $= 896 + 0.05 * 50 = 898.5$

ואת הגבול התיכון כ  $= 893.5 = 50 - 0.05 * 50$   
זמן להתיצבות מוגדר להיות הזמן בו היציאה מתיצבת בין הטווח שהגדרנו וניתן לראות בגרף שזה קורה כאשר  $t = 136.1$ .

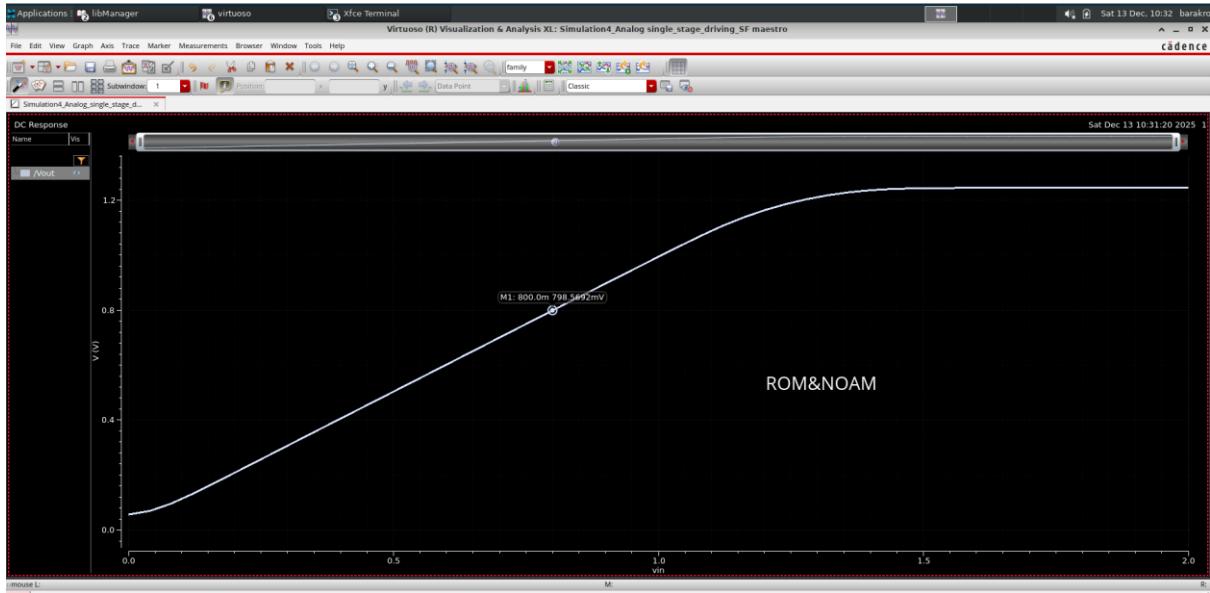
עבור מדרגה של -50 מיili וולט הערך הסופי הוא 798 מיili וולט ולכן הגדרנו טווח של פלוס מינוס 5% כאשר הכנסנו מתח של 850 מיili וולט ומדרגה של -50 מיili וולט ולכן : הגדרנו את התחום העליון כ  $= 800.5 = 50 + 0.05 * 50 = 800.5$  וולט.

ואת הגבול התיכון כ  $= 795.5 = 50 - 0.05 * 50 = 798$  וולט.  
זמן להתיצבות מוגדר להיות הזמן בו היצאה מתיצבת בין הטווח שהגדרנו וניתן לראות בגרף שזה קורה כאשר  $t = 135.5$ .

אנחנו זוכרים כי  $bandwidth$  הולך כמו  $\frac{1}{t_{settling}}$ . בנוסף ככל שזמן ההתיצבות קצר יותר => רוחב הפס גדול יותר => המערכת מהירה יותר. ונקבל בערך רוחב פס של  $7.35MHz$ .

#### 4B.4 – BODE PLOT (30 pts)

בסעיף זה ביקשו מאייתנו לחשב על הלוואה הפתוחה ולכון ננטק את V1 מהיציאה. המתח על V1 כאשר V2 הוא 800 מיליוולט הוא המתח על היציאה במתח זה ולכון נבדק וניראה כי המתח V1 שווה ל-798.5 מיליוולט וזה מה שנמצא בו.

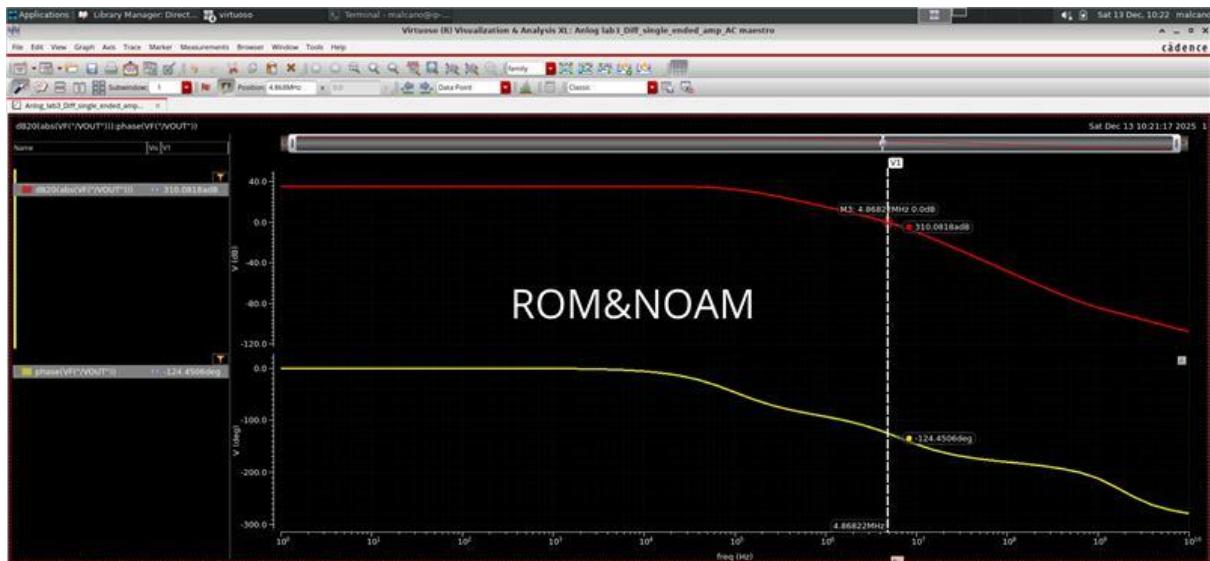


כדי לשרטט את הדיאגרמת בودה נצטרך פאזה וAMPLITUDE ונגדיר אותן במחשבון בצורה הבאה:

$$dB20 \left( abs(VF(/Vout)) \right)$$

$$phase(VF("/Vout"))$$

הציבנו מתח ac בכניסה במגניטודה של 1 וולט והרצינו סימולציה ac מ0 עד 10GHz וקיבלנו את הדיאגרמת בודה הנ"ל:

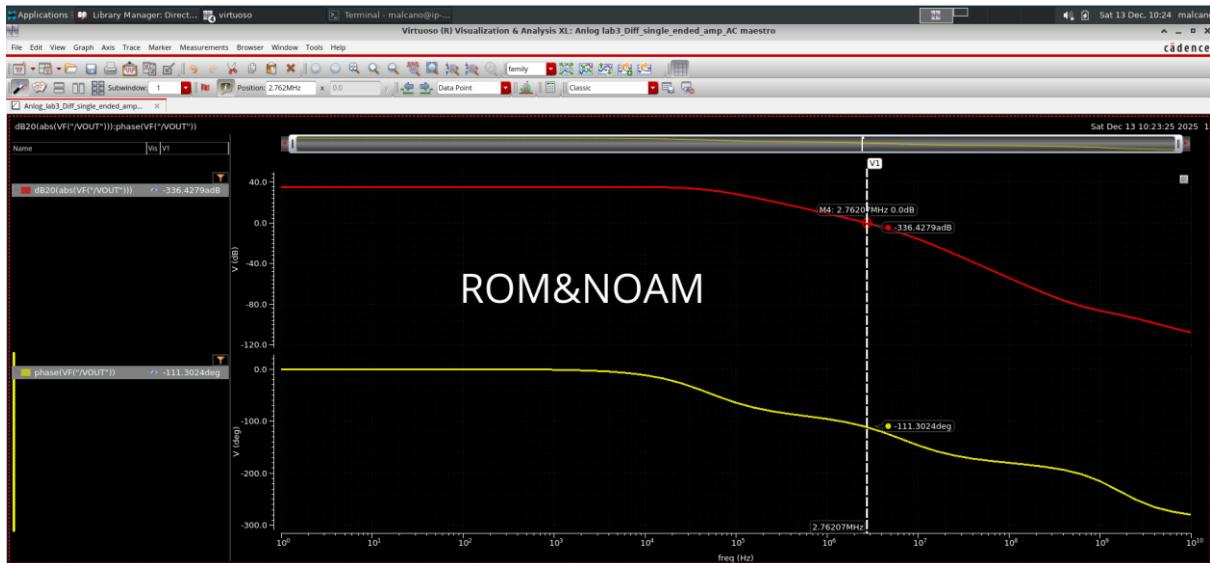


כדי לבדוק phase margin בדקנו מתי המagnitude מתאפסת ומתחנו קו אנכי וניתן לראות שהוא כורחה כאשר האוזית היא -124.45- מעלות. ונקבל PM של בערך 55 מעלות. אבל זה לא מספיק

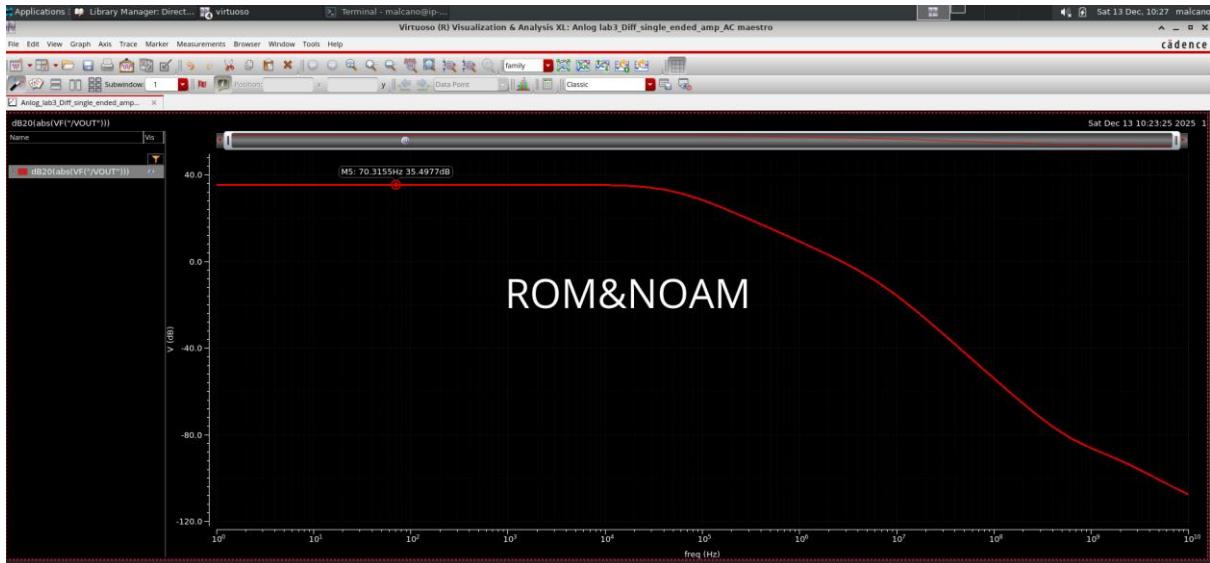
כǐ אנחנו רוצים להגיע לPM של לפחות 60 מעלות. נשים לב שיש לקבל של 0.5 פיקו בזומת N ובודק מה קורה אם גודיל אותו, אנחנו יודעים שהגדלת קיבול מורידה את מהירות התגובה של המערכת זה יכול לגרום לPM שלנו לא גדול.

$$PM = phase + 180$$

נציג בקבל 1 פיקו ונקבל את הגרף הנ"ל:



ועכשיו הגענו לPM של 69 מעלות כדרישת.



ניתן לראות שההגבר שלנו הוא 35.5dB לעומת 37 שקיבלנו כאשר חישבנו את ההגבר במדד בסעיף הקודם שהוא יחסית קרוב.