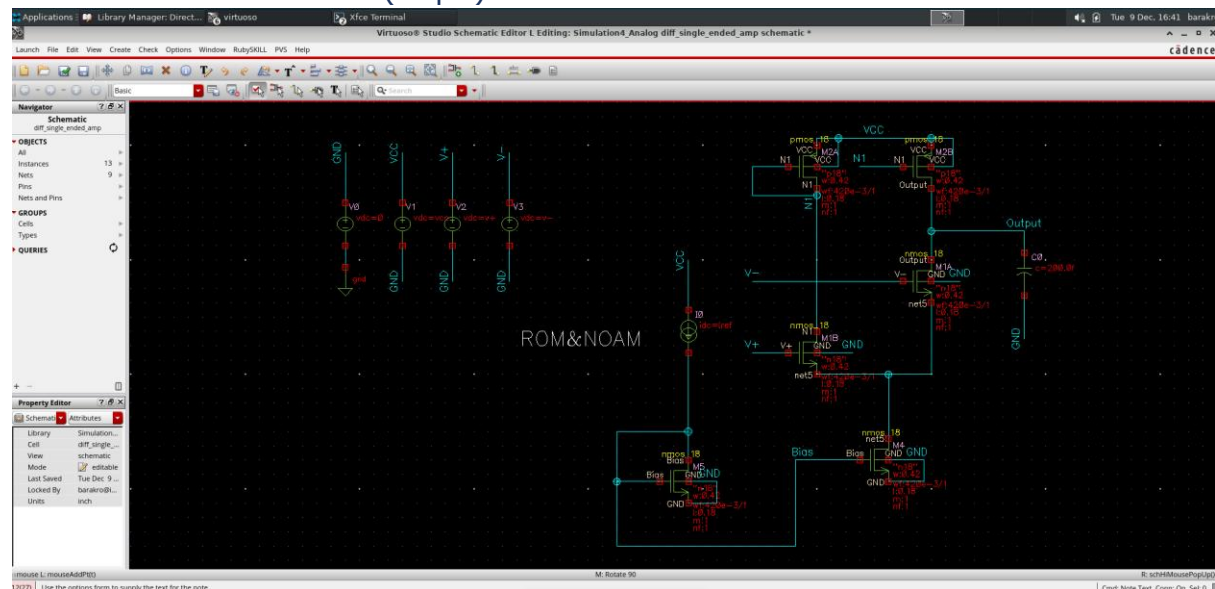


Simulation #4 Template: Differential to Single Ended Amp (5T)

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

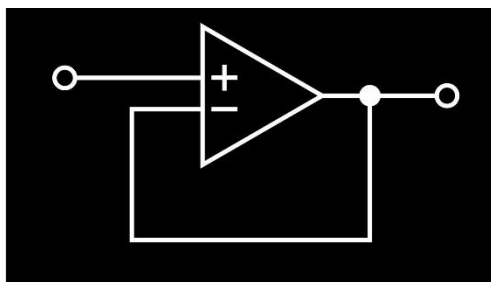
4A: Differential to single ended amp

4A.1 – OPAMP SCHEMATIC: (10 pts)

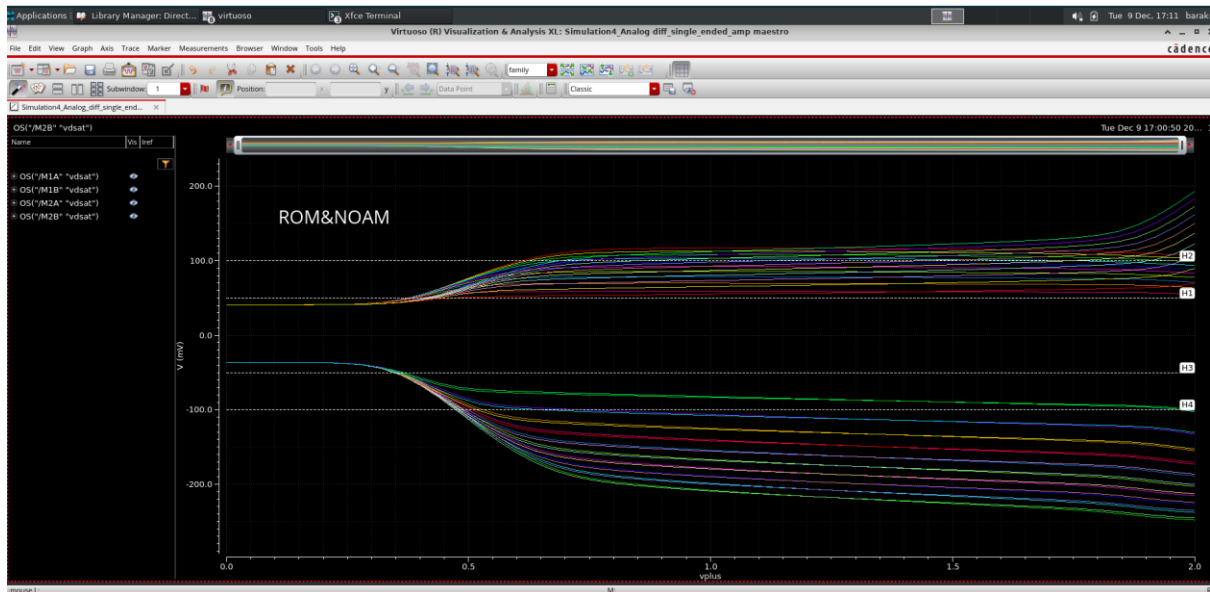


בסעיף זה יצרנו את המעגל המבוקש differential to single ended amp על פי ההוראות, חיברנו מראת זרם לטרנזיסטור התחתון כדי להשיג זרם קבוע במעגל, חיברנו קבל של 0.2pF ביציאה כמבוקש.

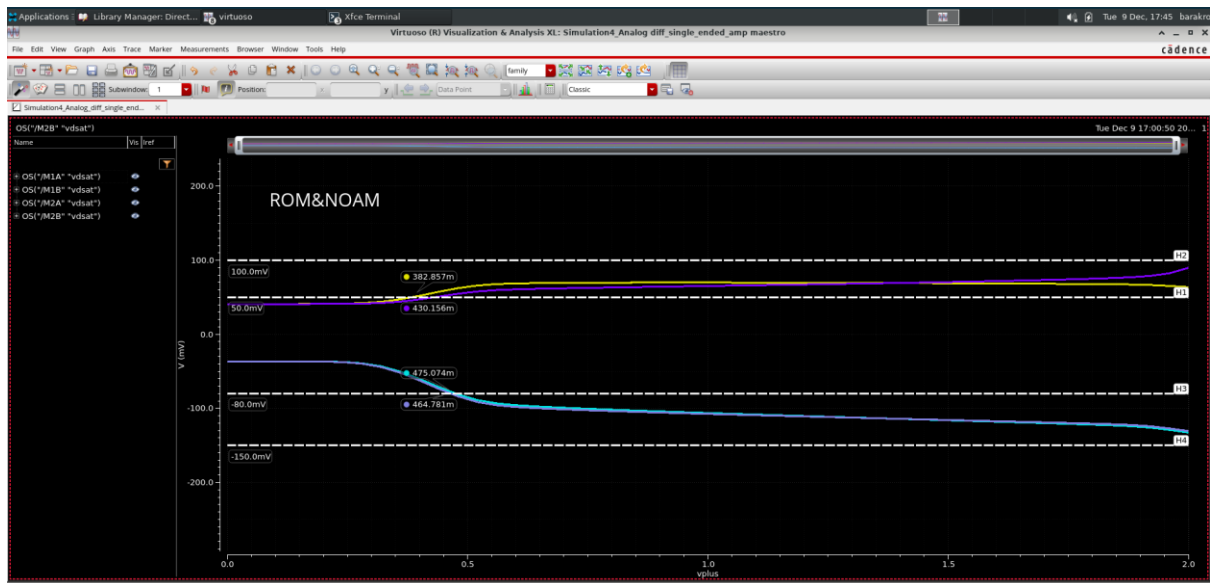
4A.2 – DC SIMULATIONS (10 pts)



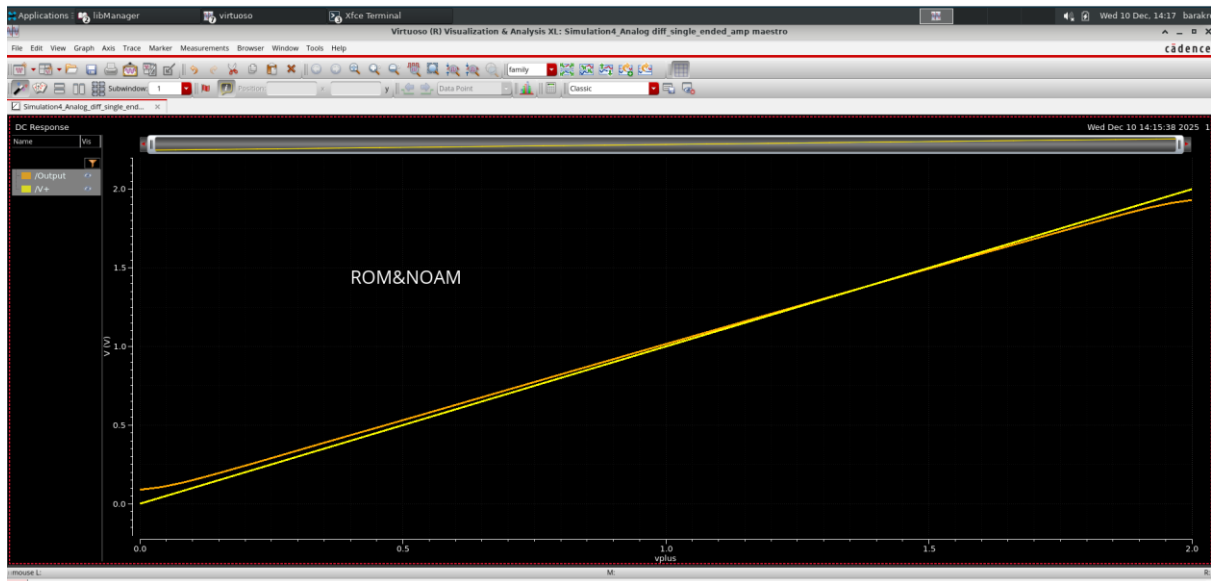
Unity Gain Buffer הוא חיבור כמו המוצג בתמונה, נרצה שהכניסה שהופכת את היציאה היא תהיה כמשוב בחזרה לכניסה ולכן נבדוק מי מהכניסות נמצאת בהיפוך ליציאה. אפשר לראות ישר כי עבור V_{minus} בטרנזיסטור M1A יש היפוך בין הgate (V_{minus}) לבין הdrain (Output) כפי שאנחנו יודעים בNMOS ולכן נחבר אותה כמשוב. בטרנזיסטור M1A יהיה מחובר דיוודית.



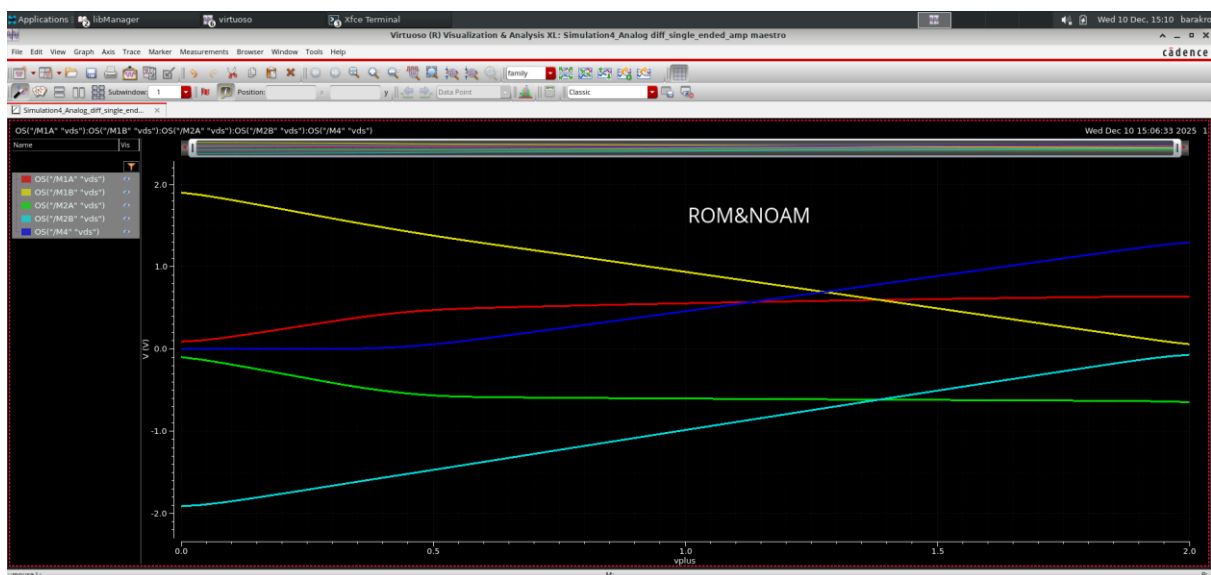
הרצנו סימולציות dc על הכניסה V_{plus} מ-0 עד 2 וולט (V_{CC}) ובדקנו על I_{ref} (המקור זרם אידיאלי) זרמים מ-1 μA עד 10 μA בקפיצות של 1 μA אמפר כדי לבחור זרם מתאים על מנת לקבל עבור הdiff pair $50mV < V_{DSATs} < 100mV$.
עבור הcurrent mirror $-80mV < V_{DSATs} < -150mV$.



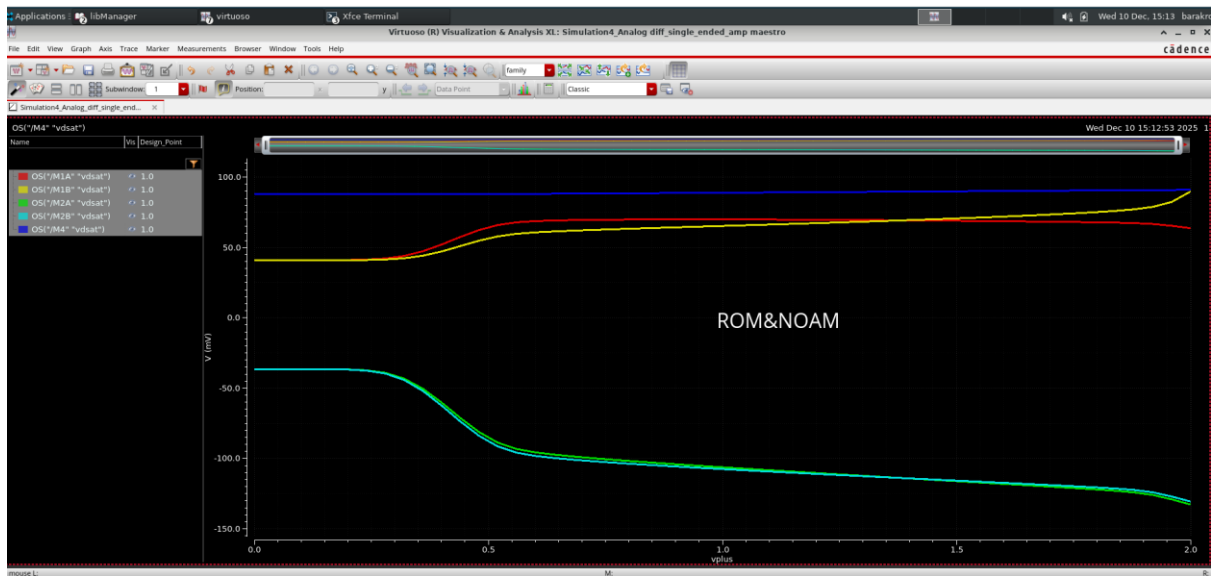
החלטנו לקחת זרם של 2 μA אמפר שניראה כי נותן את התוצאה האידיאלית ברוב ההרצה על V_{plus} , ניתן לראות שאכן קיבלנו טווח תקין עבור המתחים של הטרנזיסטורים החל מבערך 475mV.
הם pmos הם הגרפים התחתונים (כמעט מתלכדים) והם nmos הם הגרפים העליונים.



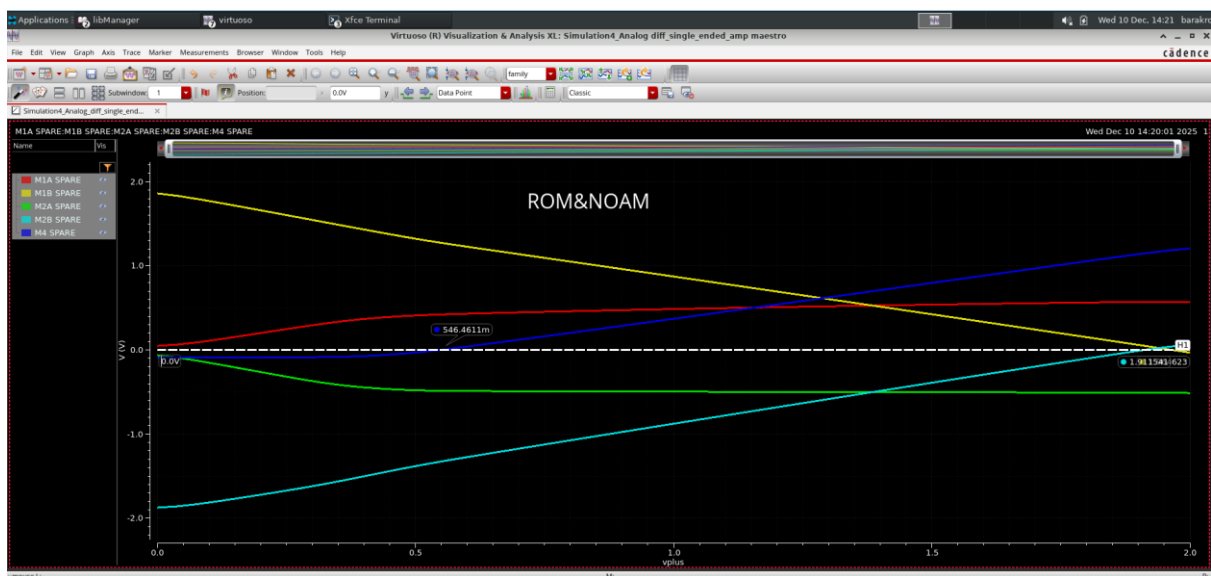
ניתן לראות בגרף שמציג את היציאה והכניסה כתלות ב V_{plus} שאכן המוצא עוקב אחרי הכניסה ובאמצע כמעט ומתלכד איתה לגמרי ולכן נסיק שזהו תחום הסטורציה (כאשר הם מתלכדים).



הצגה של V_{ds} של כל הטרנזיסטורים כמבוקש.

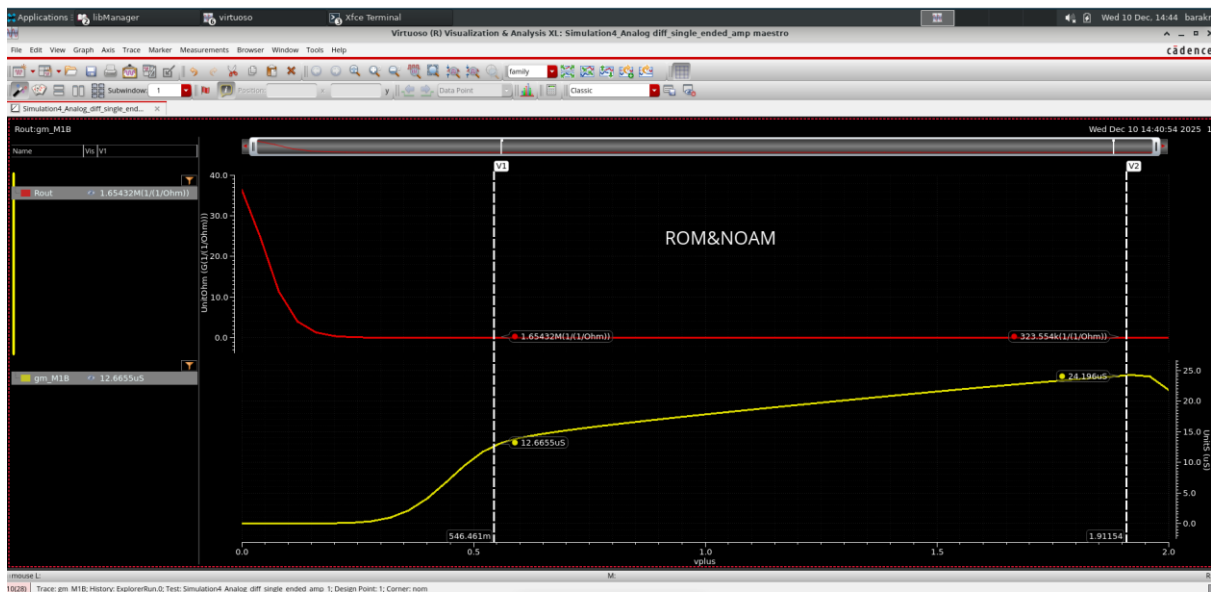


הצגה של כל Vdsat של כל הטרנזיסטורים.

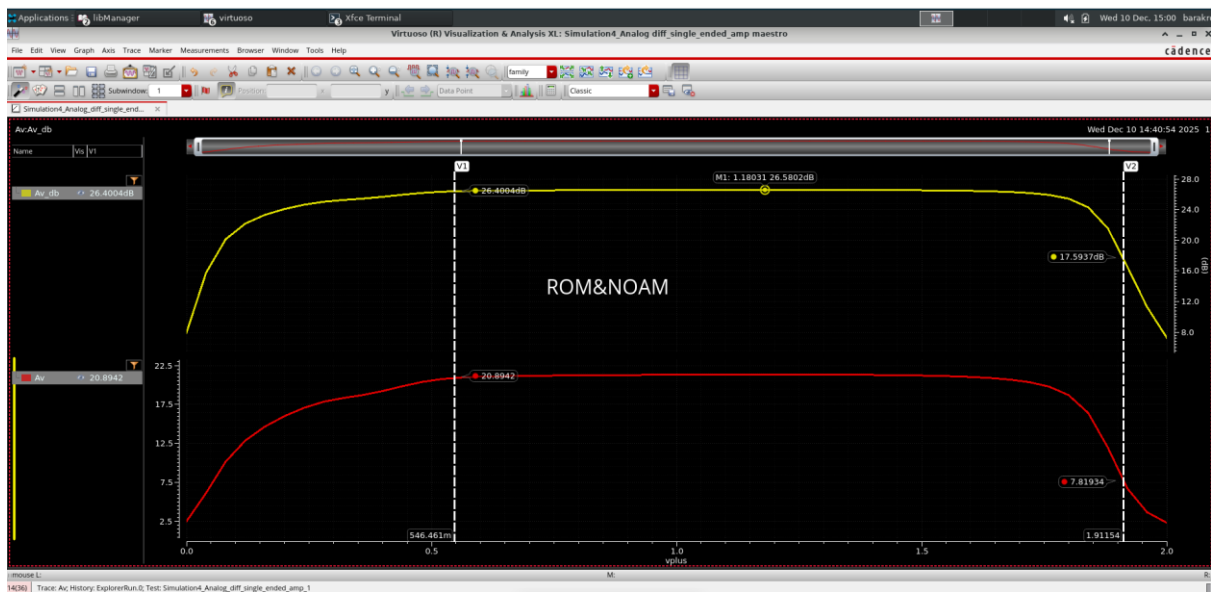


בגרף זה ניתן לראות עבור כל הטרנזיסטורים (M1A,M1B,M2A,M2B,M4) את $V_{ds}-V_{DSAT}$ שלהם.

עבור טרנזיסטורי nmos נבחין בתחום סטורציה כאשר $V_{ds}-V_{DSAT} > 0$ ועבור טרנזיסטורי pmos נבחין בתחום סטורציה כאשר $V_{ds}-V_{DSAT} < 0$. לכן אפשר לראות בתמונה שאכן הגרפים התחתונים מציגים את הטרנזיסטורים (M2A,M2B) והגרפים העליונים מציגים את הטרנזיסטורים (M1A,M1B,M4) ומכאן נוכל לראות את טווח הסטורציה. לשם כך העברנו קו אופקי ב-0 וניתן לראות שמי שחותך אותו הוא טרנזיסטור M4 שנכנס אחרון לסטורציה ולבסוף טרנזיסטור M2B שיוצא ראשון מסטורציה ולכן סה"כ טווח הסטורציה שלנו עבור הערכים שלנו הוא בין 546.4611 מילי וולט לבין 1.911541 וולט.



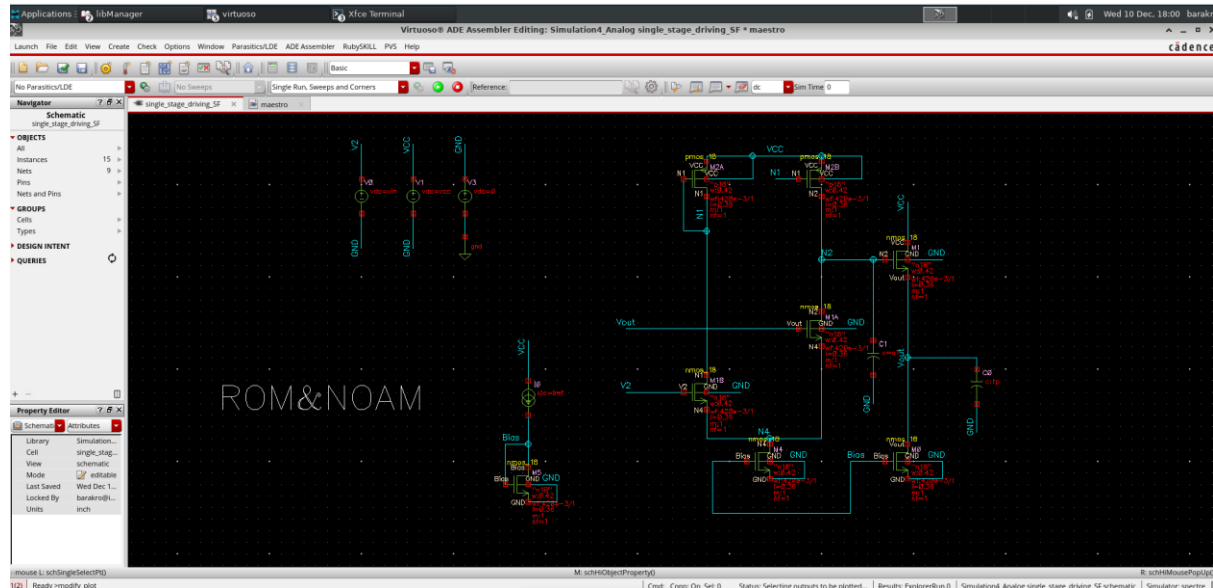
בגרף הנ"ל הצגנו את gm של טרנזיסטור M1B בצהוב כמבוקש ואת הגרף של Rout כמבוקש. כאשר חישבנו את $Rout = \frac{1}{\left(\frac{1}{Rout_{M1A}} + \frac{1}{Rout_{M2B}}\right)}$ כמו שראינו בהרצאה וקיבלנו את הגרפים הבאים. לחישוב ההגבר נשתמש במה שלמדנו בהרצאות ונקבל כי ההגבר הוא $Av = gm_{M1B} * Rout$.



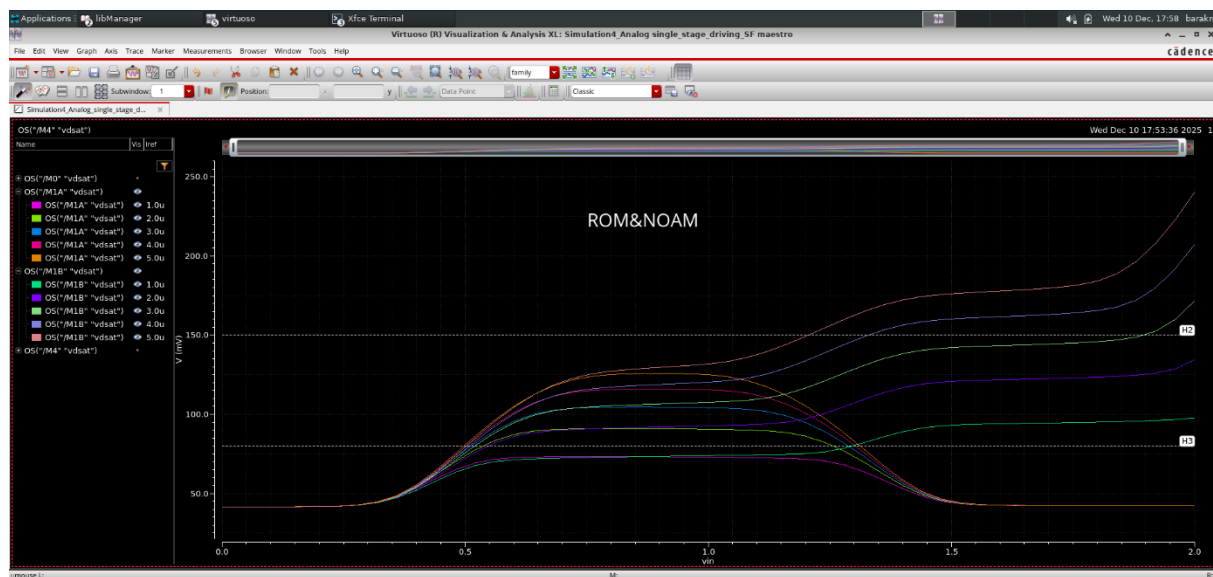
כאן מוצג הגרפים של ההגבר db וכרגיל, ניתן לראות שההגבר db קצת יותר גדול, תחמום את תחום הסטורציה כדי לראות את ההגבר בסטורציה וניתן לראות שמגיעים להגבר מקסימלי של בערך 26db והוא קבוע כמעט לאורך כל תחום הסטורציה ומתחיל לרדת בערך 1.85 וולט עד לערך של 17.6db ביציאה מסטורציה.

4B: Single stage OPAMP driving source follower

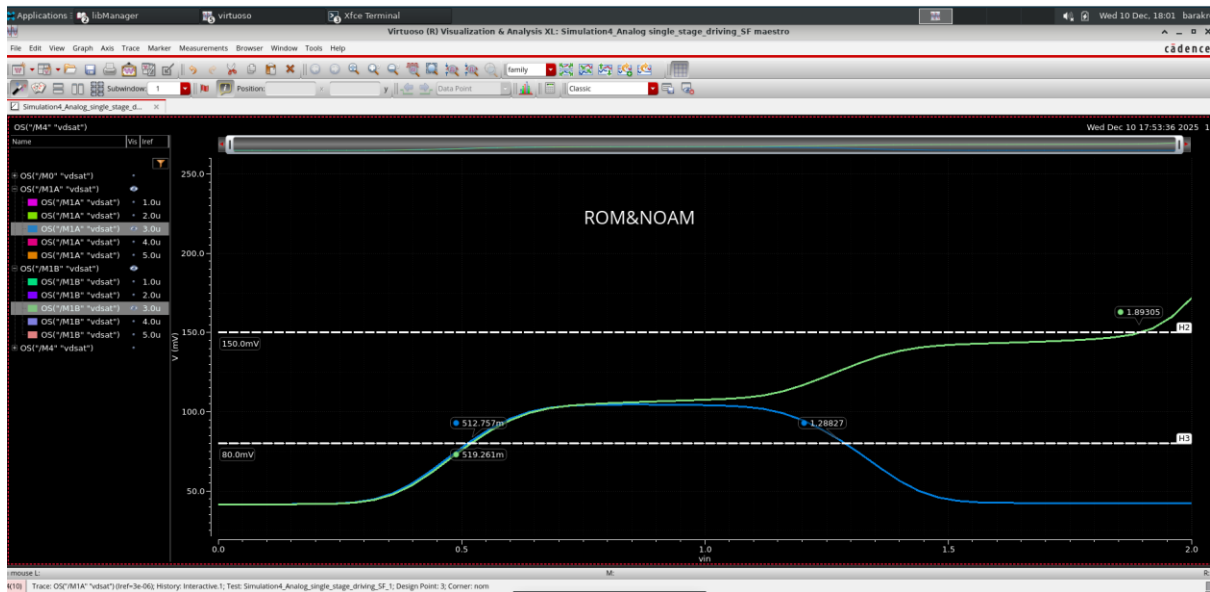
4B.1 – OPAMP SCHEMATIC: (10 pts)



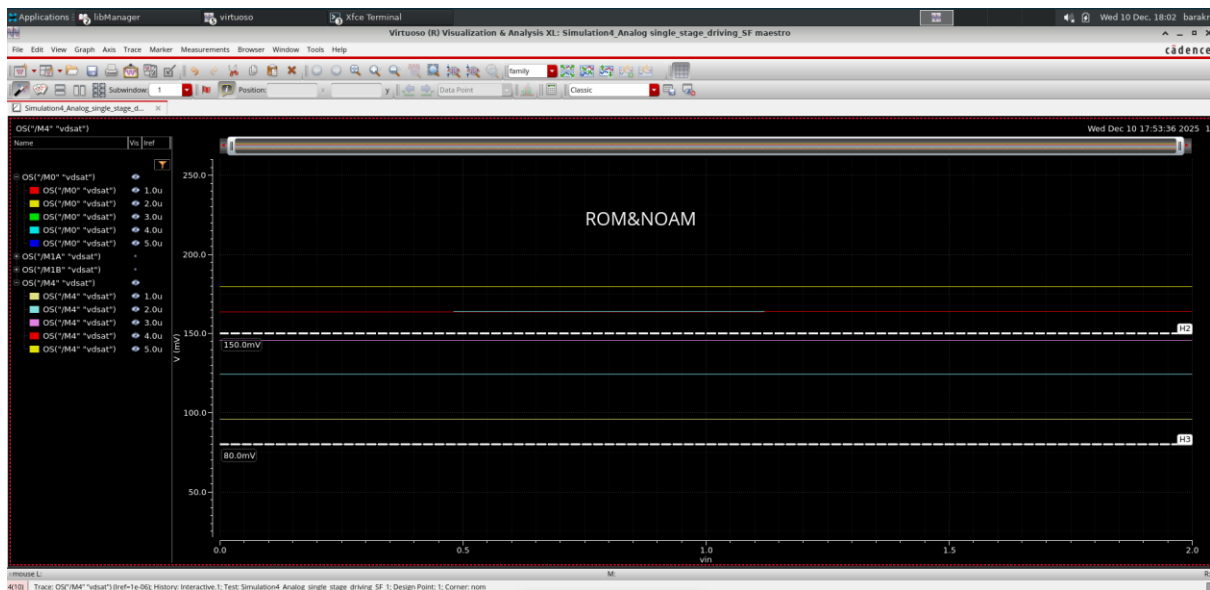
בסעיף זה בנינו את המעגל המבוקש, זה בעצם אותו המעגל מהסעיף הקודם רק שעכשיו היציאה מחוברת לsource follower שאנחנו מכירים. חיברנו מראת זרם גם לטרנזיסטור M4 לטרנזיסטור M0 עם מקור זרם אידיאלי Iref שמחובר למתח ספק VCC שהוא 2 וולט. בנוסף חיברנו קבלים במקומות המבוקשים. שוב חיברנו את הכניסה V1 ליציאה על פי עקרון Unity Gain Buffer מכיוון שהיא והיציאה הפוכות זו לזו כמו שהסברנו בסעיפים הקודמים וכמו שלמדנו בכיתה.



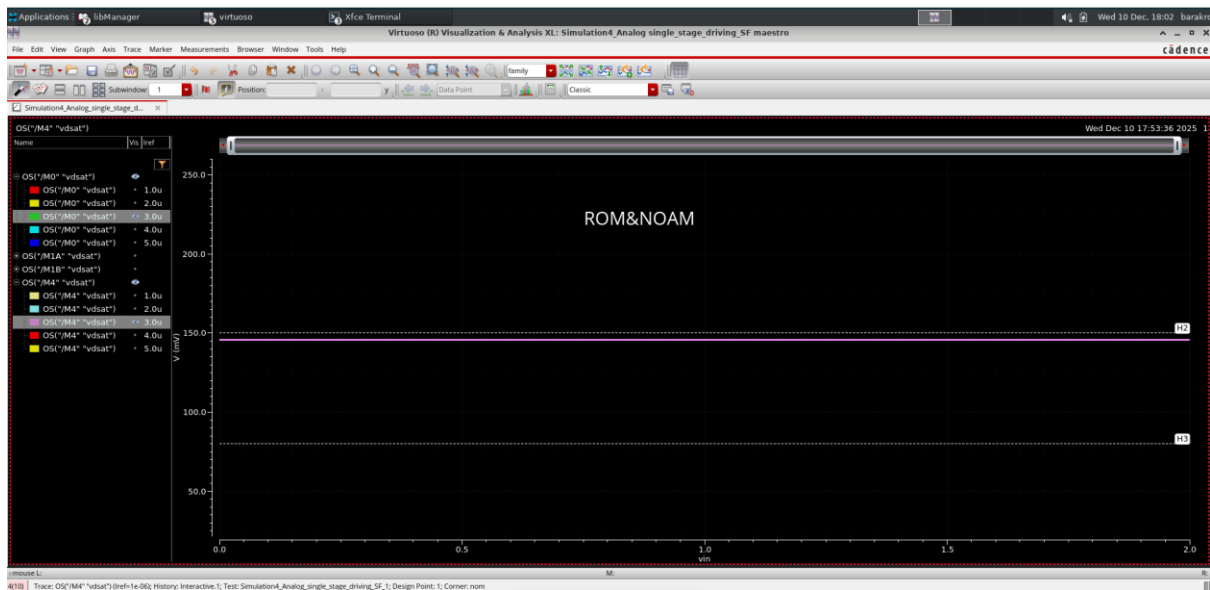
הרצנו סימולציית DC על V2 מ0 עד 2 וולט ורצינו למדוד איזה זרם אנחנו רוצים לקחת בIref כדי לעמוד בתנאים המבוקשים ועדיין לקבל תחום עבודה טוב. לכן בדקנו תחילה את הVDSATs של טרנזיסטורי Diff pair וברקנו עבור זרמים של 1-5u אמפר.



כדי לקבל גם זרם חזק וגם תחום עבודה יחסית טוב החלטנו לקחת $I_{ref}=3\mu$ אמפר. ניתן לראות שעבור זרם בגודל זה אנחנו עומדים בתנאים המבוקשים בטווח שבין 519 עד 1288 מילי וולט.



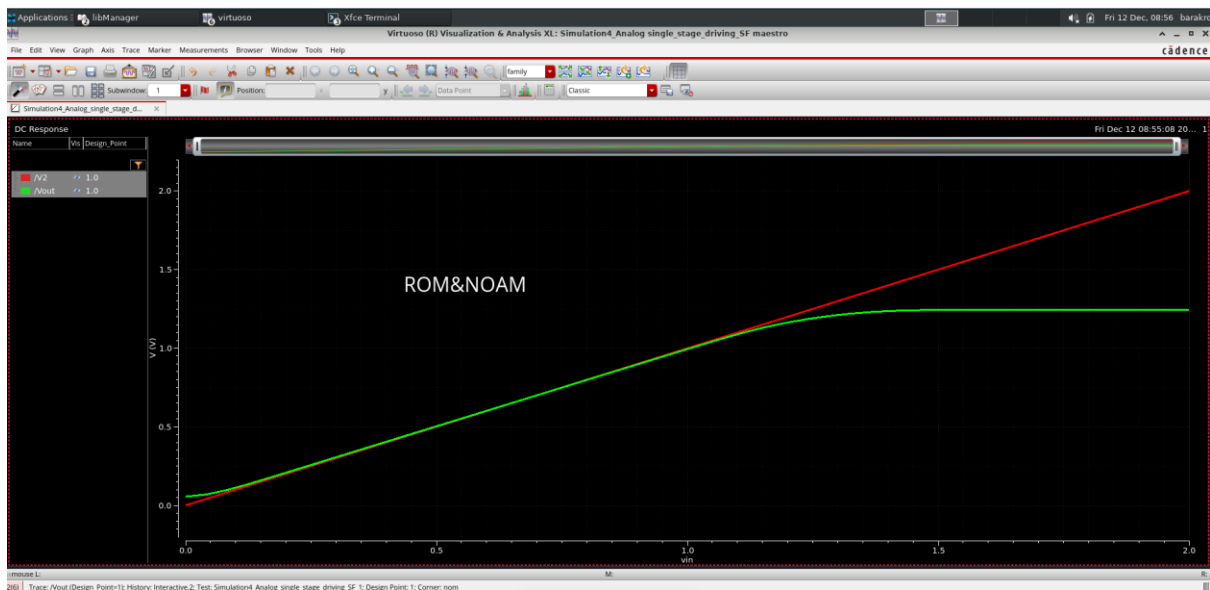
כאן בדקנו את השפעת גודל הזרם על V_{dsat} של טרנזיסטורי Current source ניתן לראות שעבור כל הזרמים הגרפים שלהם מתלכדים וזה הגיוני כי חיברנו להם את אותו המתח V_{GS} . בחרנו מקודם זרם של 3μ אמפר ולכן נבדוק האם עבור זרם זה אנחנו עומדים בתנאי המבוקש.



ניתן לראות שאכן עבור הזרם של 3μ אמפר גם VDSATs של טרנזיסטורי Current sourcen עומדים בתנאי ונמצאים בטווח המבוקש לאורך כל הסימולציה. הם מתלכדים ושווים כמו שציפינו והגרף לא משתנה כי אין שינוי בVGS.

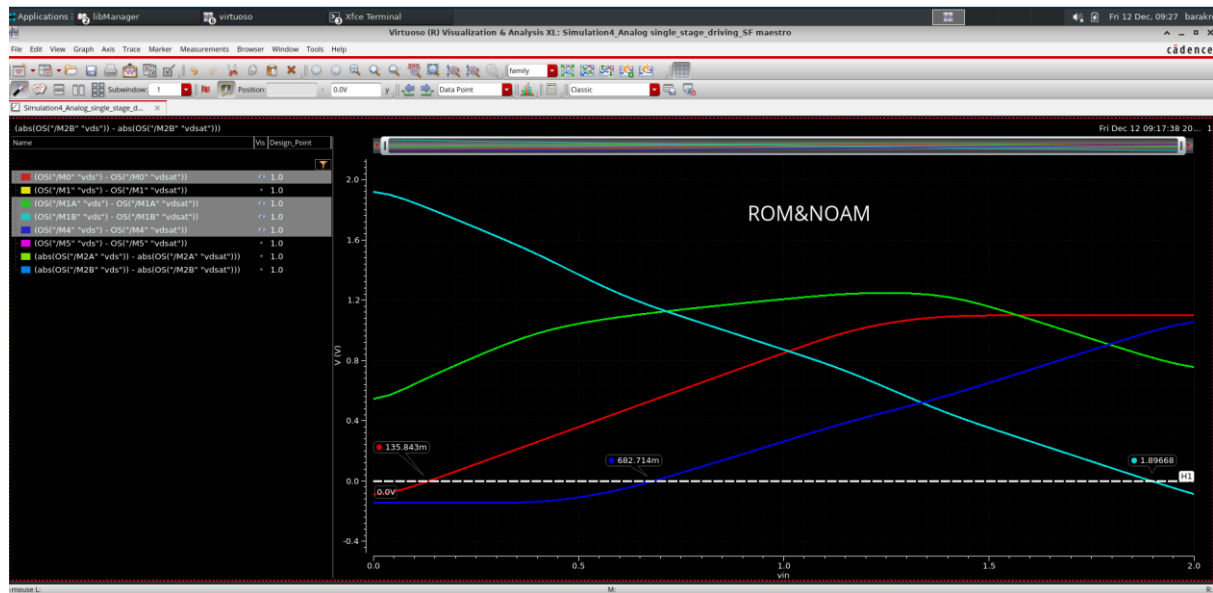
4B.2 – DC SWEEP (20 pts)

a)

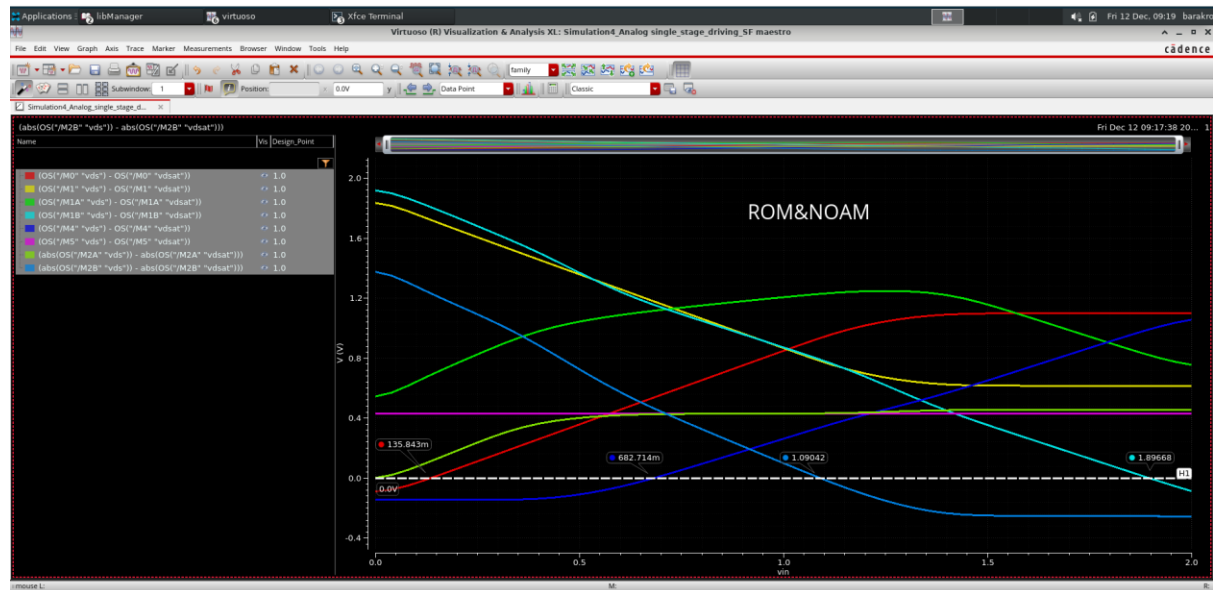


בגרף זה בדקנו את מתח היציאה כתלות במתח הכניסה שרץ מ0 עד VDD שהוא 2 וולט. ניתן לראות שעד בערך 1 וולט אכן מתח היציאה עוקב אחרי מתח הכניסה ובשלב מסוים מפסיק לעקוב אחריו, נסיק שזה כי יצאנו מסטורציה ובבדוק האם זה נכון בגרף הבא ע"י בדיקה של סטורציה עבור כל הטרנזיסטורים במעגל.

b)

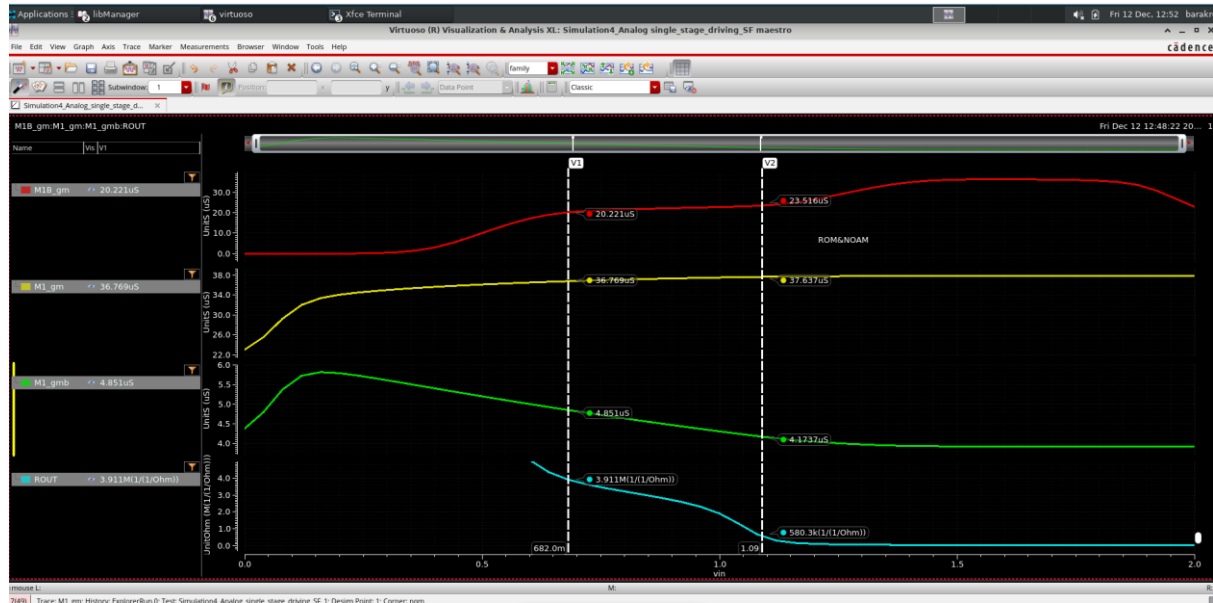


בגרף זה מוצגים תחומי הסטורציה עבור הטרנזיסטורים שדיברנו עליהם בסעיף הקודם, ניתן לראות שטווח הסטורציה הוא בין 682 מילי וולט לבין 1.89 וולט. בגרף הבא נציג את כל הטרנזיסטורים במעגל וניראה מהו טווח הסטורציה האמיתי.



ניתן לראות כאן את V_{ds} - V_{DSAT} של כל הטרנזיסטורים במעגל. לקחנו את הפונקציה של p_{mos} בערך מוחלט והעברנו קו אופקי ב0 כדי לראות מתי כל הטרנזיסטורים נמצאים יחד בסטורציה ואכן קיבלנו כי בטווח בין 682 לבין 1090 מילי וולט בערך אנחנו נמצאים בסטורציה כי כל הגרפים מעל ה0.

c)



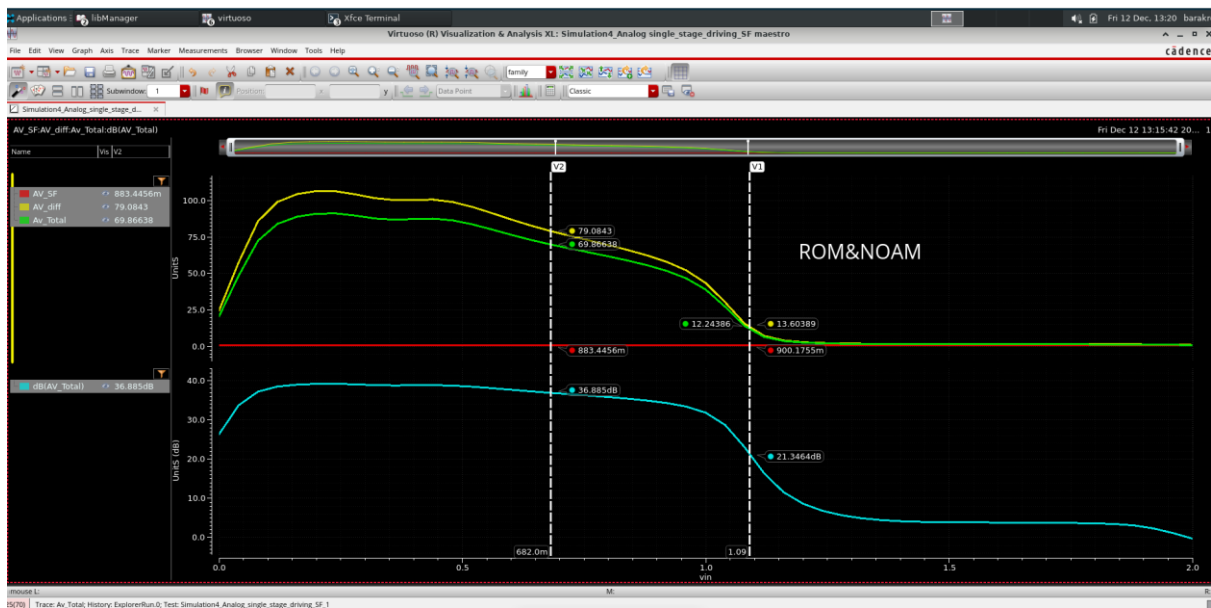
בסעיף זה התבקשנו למצוא את ה gm ואת ה r_{out} שאנחנו משתמשים בהם כדי למצוא את ההגבר בלולאה הפתוחה. כמו שאנחנו יודעים כאשר אנחנו משרשרים 2 מעגלים זה לזה אז ההגבר הכולל של שניהם יהיה $Av_1 * Av_2$. אנחנו יודעים את ההגבר של המגבר הדיפרנציאלי מהסעיפים הקודמים ואנחנו יודעים את ההגבר של source follower ולכן אנחנו נשתמש בנוסחאות הבאות :

$$R_{out} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{out_{M1A}}} + \frac{1}{R_{out_{M2B}}}\right)}$$

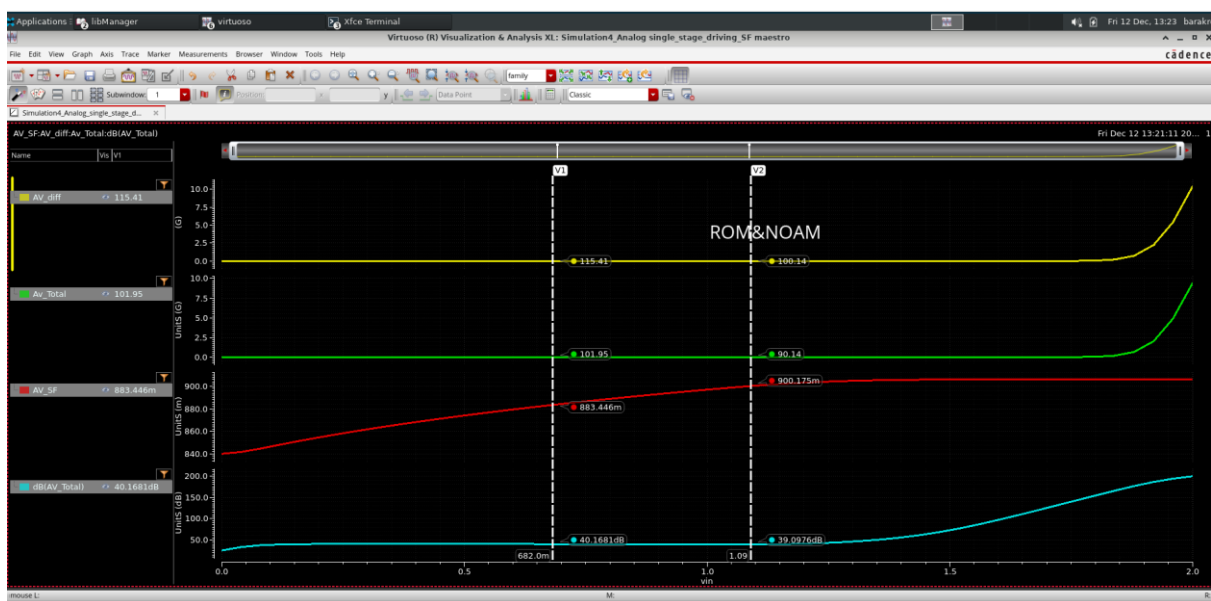
$$Av_{diff} = gm_{M1B} * R_{out}$$

$$Av_{source_follower} = \frac{gm_{M1}}{(gm_{M1} + gmb_{M1})}$$

והצגנו את הגרפים של הגורמים המבוקשים בתחום הסטורציה שלנו.



ניתן לראות שאכן הגענו להגבר שציפינו לו, בתחום הסטורציה ההגבר המקסימלי שלנו מגיע לכמעט $37db$
 ניתן לראות גם את ההגברים של המגבר הדיפרנציאלי ושל *common source* בהשוואה להגבר של כל המעגל יחד.

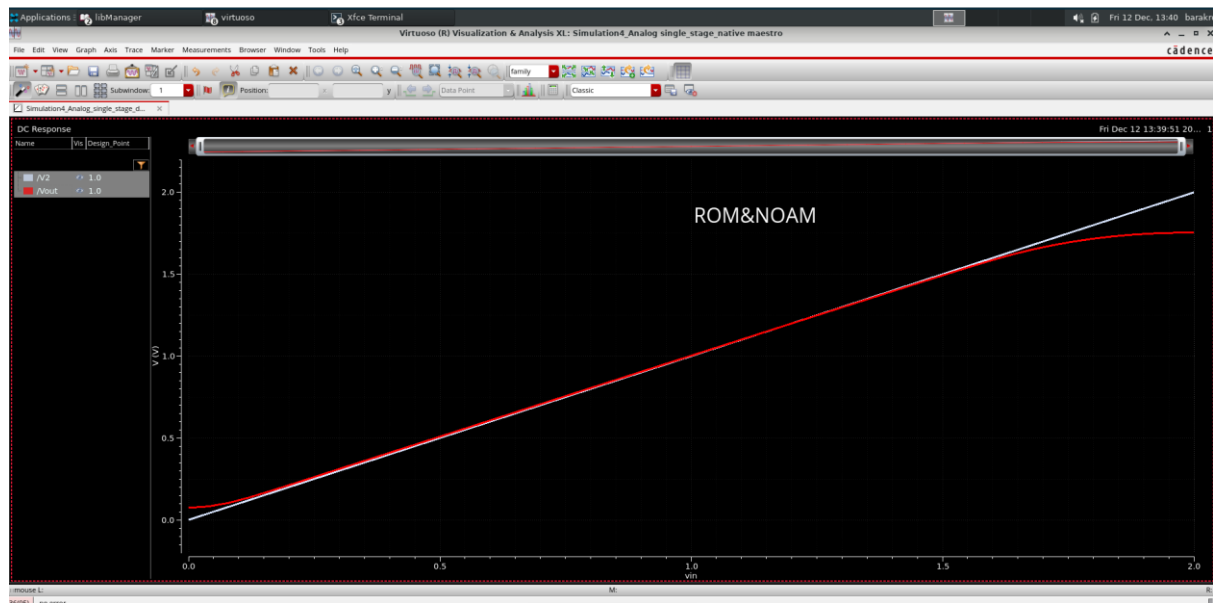


בגרף זה השתמשנו בקירוב של

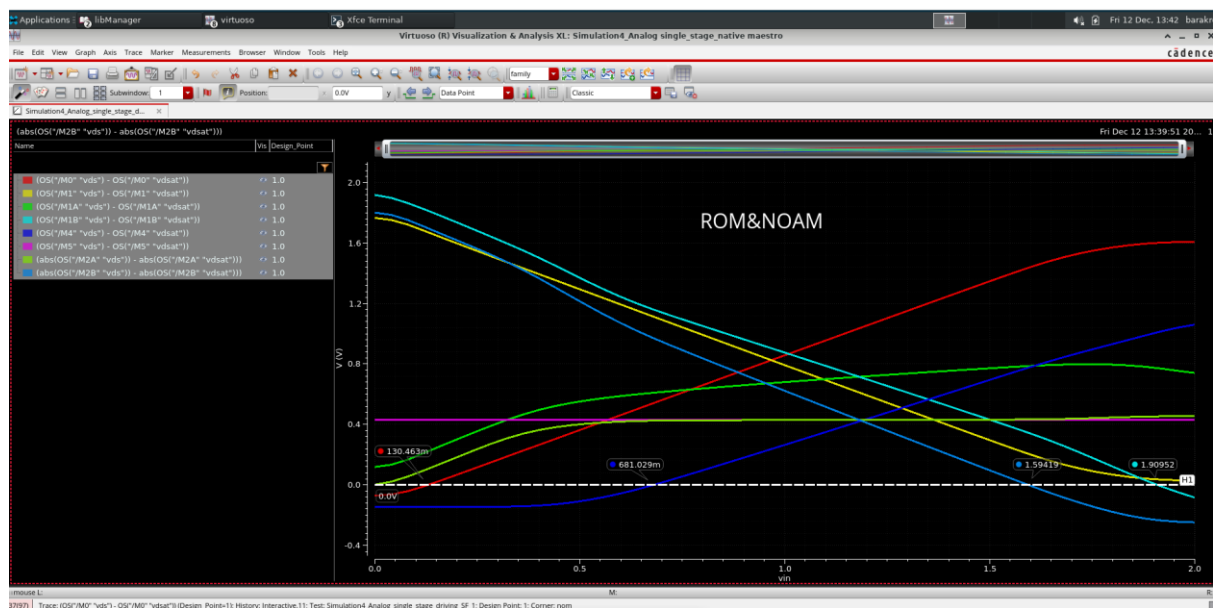
$$R_{out} = \frac{R_{out_{M1A}}}{2}$$

ואפשר לראות שיצא לנו תוצאות מאוד קרובות כאשר בהגבר התיאורטי והמדויק קיבלנו $37 db$
 וכאן קיבלנו $40 db$ כלומר סטייה של בערך 10% .

d)



בסעיף זה החלפנו את טרנזיסטור M1 לטרנזיסטור native כמבוקש. טרנזיסטור מסוג זה בעל V_{th} מאוד נמוך. בהשוואת מתח הכניסה למתח היציאה ניתן לראות שההשפעה של החלפת הטרנזיסטור גרמה ליציאה לעקוב טוב יותר אחרי הכניסה ולמשך תחום רחב יותר של מתחים.



ניתן לראות שהפעם תחום הסטורציה גדל משמעותית ועכשיו הוא בין 681 לבין 1590 מילי וולט.

התחום מלמטה לא השתנה אבל כעת אנחנו מגיעים עד לכמעט 1.6 וולט. בהרצאה הוכחנו שעל מנת שהמגבר הדיפרנציאלי יהיה בסטורציה נצטרך לדרוש:

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

עבור ה source follower נדרוש:

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

כעת נקבל את האי שוויון הבא:

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

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

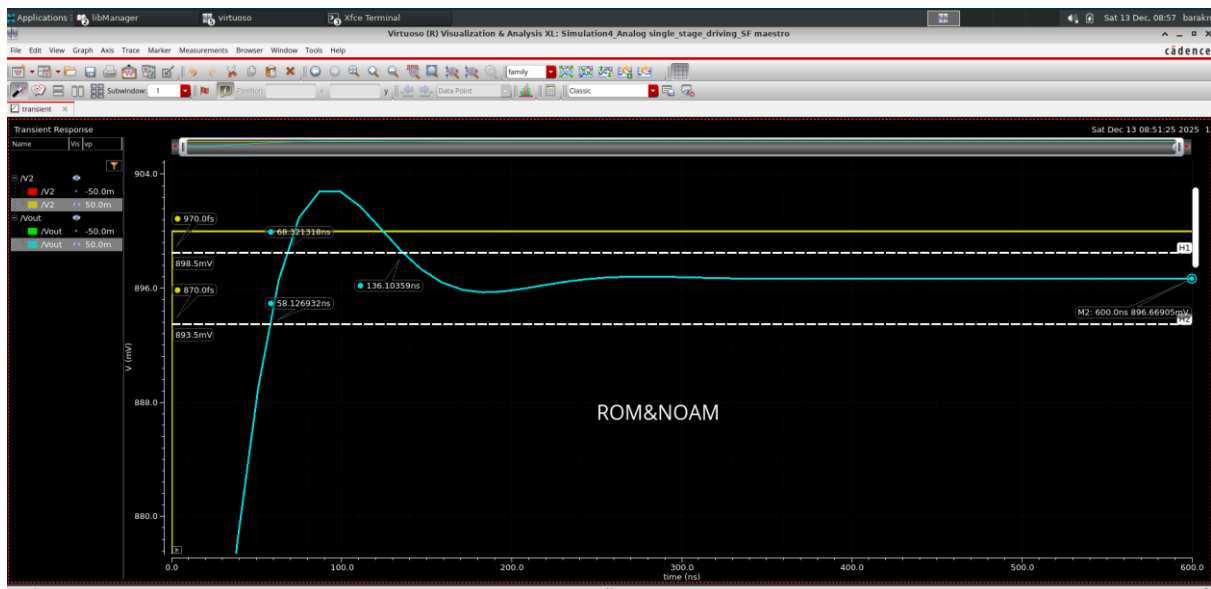
4B.3 – Transient Step response (for stability) (20 pts)

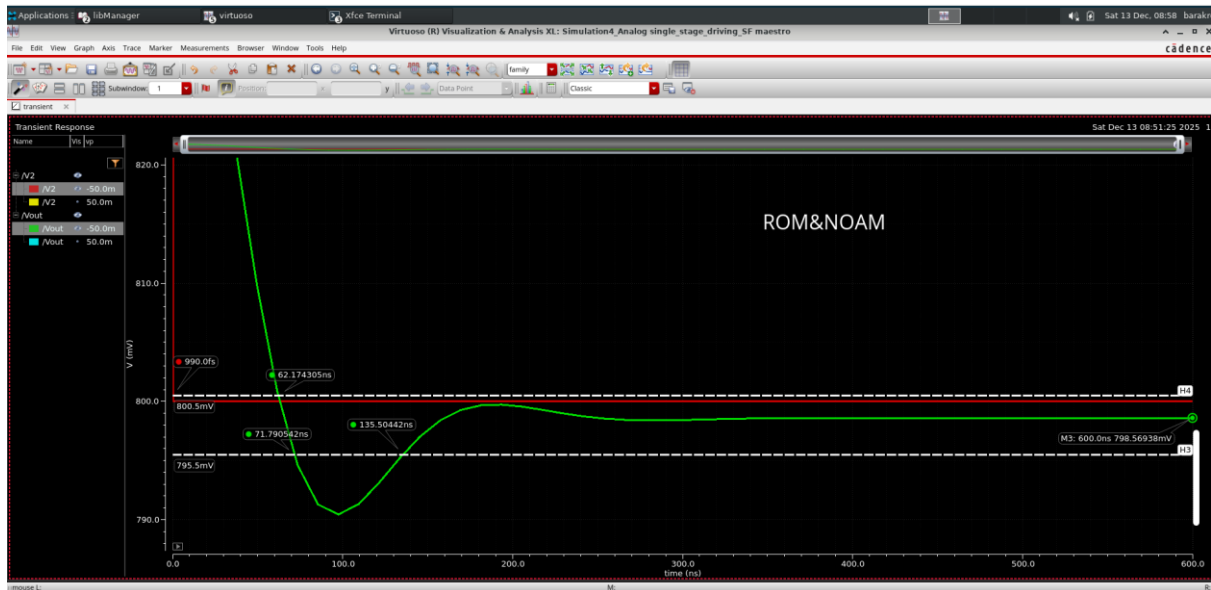
בסעיף זה רצינו לבדוק את זמן ההתייצבות של המערכת שלנו ואת רוחב הפס כמבוקש, לשם כך הכנסנו מתח מדרגה של פלוס ומינוס 50 מילי וולט כמבוקש כאשר הגדרנו $rise/fall$ time של 1 פיקו שניות. בחרנו מתח כניסה של 850 מילי וולט כדי לעבוד עמוק בתחום הסטורציה בו היציאה עוקבת אחרי הכניסה הכי טוב.

הרצנו סימולציית transient של 600 ננו שניות וקיבלנו את הגרף הבא עבור הסימולציה:



ובקירוב:





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

ואת הגבול התחתון כ $896 - 0.5 * 50 = 893.5$

זמן ההתייצבות מוגדר להיות הזמן בו היציאה מתייצבת בין הטווח שהגדרנו וניתן לראות בגרף שזה קורה כאשר $t = 136.1 \text{ ns}$.

עבור מדרגה של 50- מילי וולט הערך הסופי הוא 798 מילי וולט ולכן הגדרנו טווח של פלוס מינוס 5% כאשר הכנסנו מתח של 850 מילי וולט ומדרגה של 50- מילי וולט ולכן : הגדרנו את התחום העליון כ

$800.5 = 798 + 0.05 * 50$ וולט.

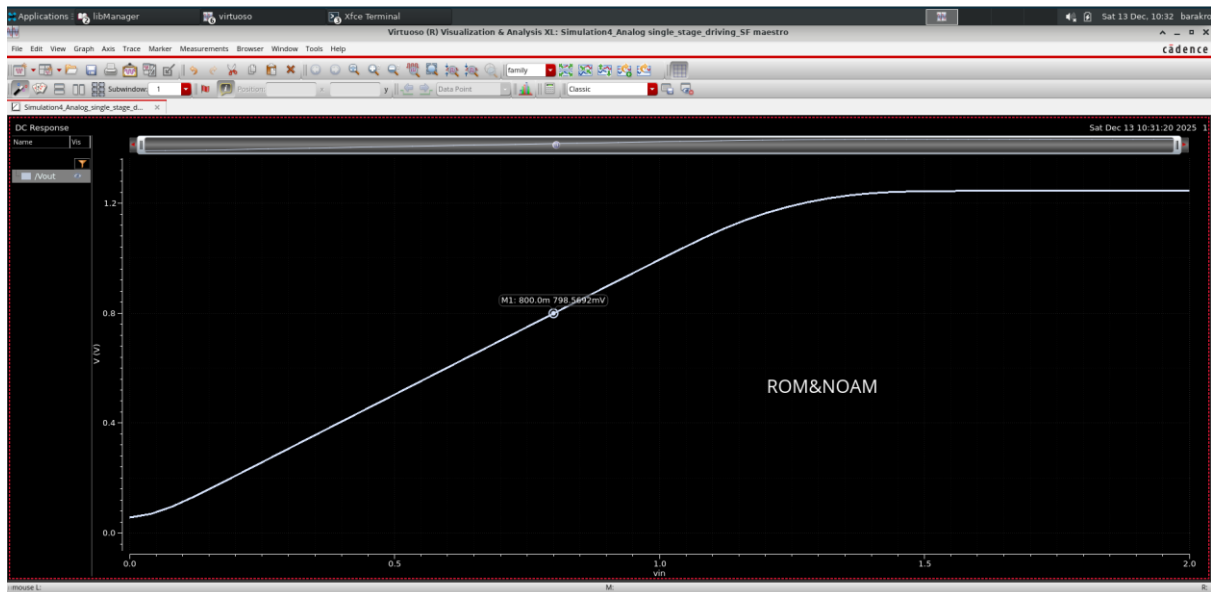
ואת הגבול התחתון כ $795.5 = 798 - 0.5 * 50$ וולט.

זמן ההתייצבות מוגדר להיות הזמן בו היציאה מתייצבת בין הטווח שהגדרנו וניתן לראות בגרף שזה קורה כאשר $t = 135.5 \text{ ns}$.

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

4B.4 – BODE PLOT (30 pts)

בסעיף זה ביקשו מאיתנו לחשב על הלולאה הפתוחה ולכן ננתק את V1 מהציאה.
המתח על V1 כאשר V2 הוא 800 מילי וולט הוא המתח על הציאה במתח זה ולכן נבדוק
וניראה כי המתח V1 שווה ל-798.5 מילי וולט וזה מה שנציב בו.

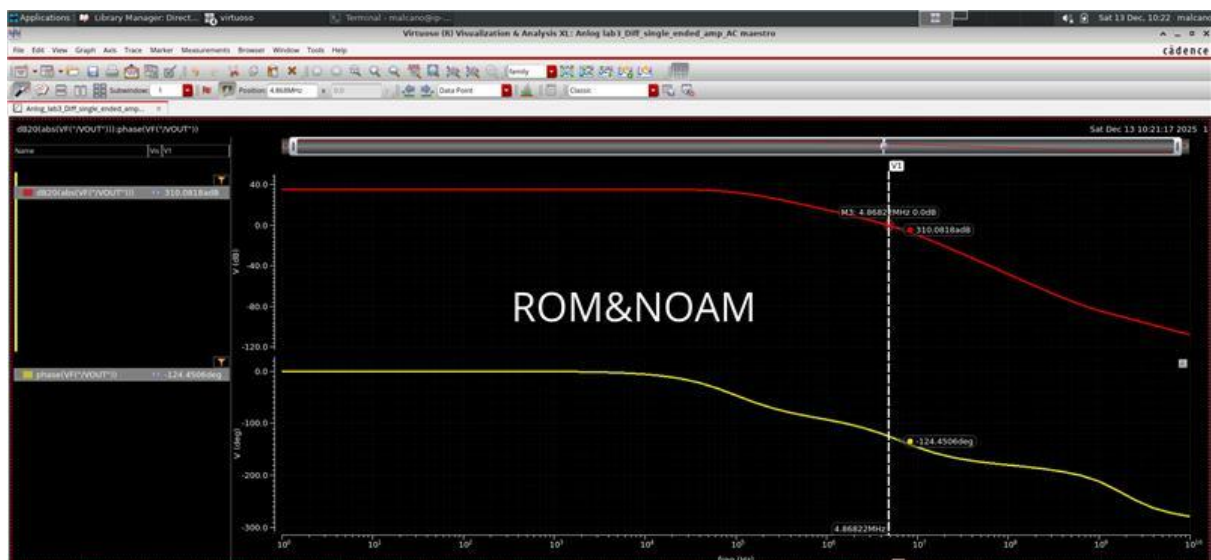


כדי לשרטט את הדיאגרמת בודה נצטרך פאזה ואמפליטודה ונגדיר אותן במחשבון בצורה הבאה:

$$dB20\left(\text{abs}\left(VF\left(\frac{V}{V_{out}}\right)\right)\right)$$

$$\text{phase}\left(VF\left(\frac{V}{V_{out}}\right)\right)$$

הצבנו מתח ac בכניסה במגניטודה של 1 וולט והרצנו סימולציית ac מ 0 עד 10GHz וקיבלנו את הדיאגרמת בודה הנ"ל:

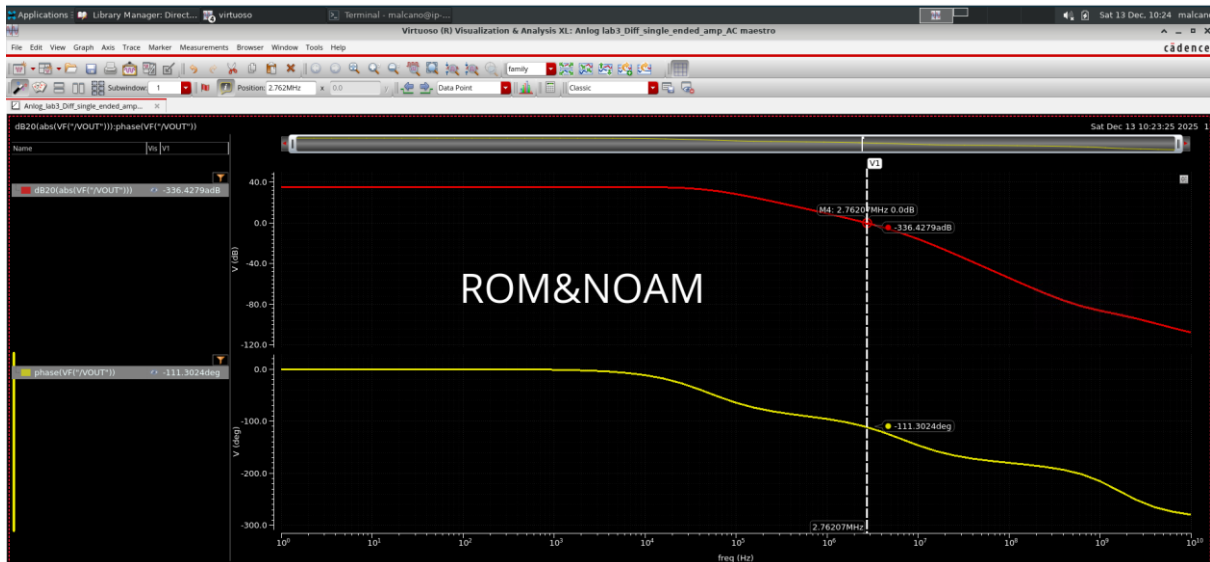


כדי לבדוק phase margin בדקנו מתי המגניטודה מתאפסת ומתחנו קו אנכי וניתן לראות שזה קורה כאשר הזווית היא -124.45 מעלות. נקבל PM של בערך 55 מעלות. אבל זה לא מספיק

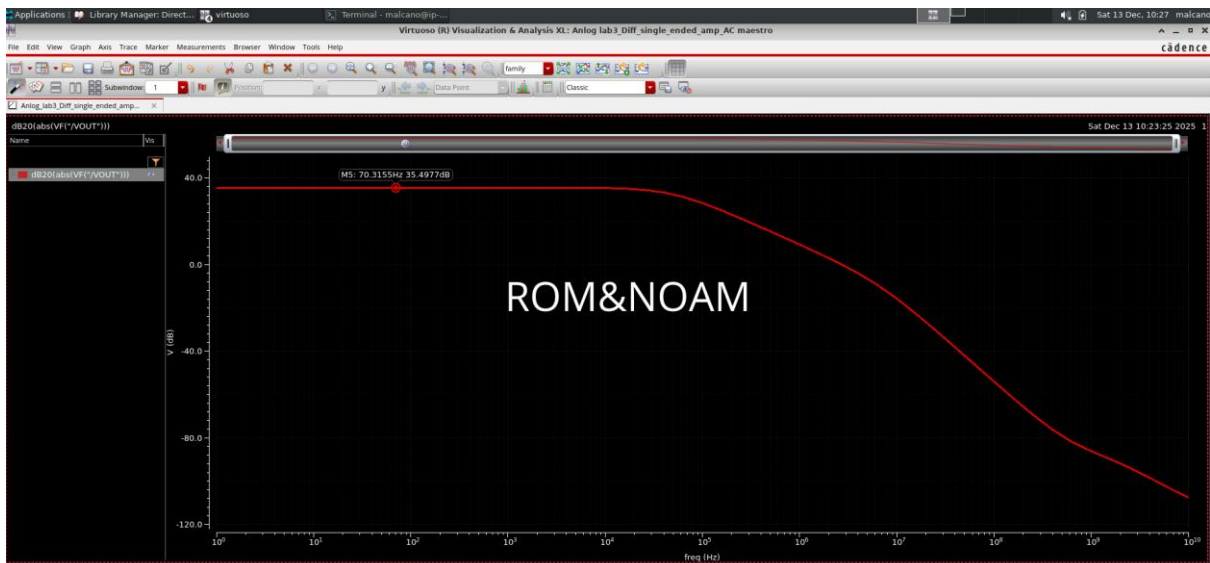
כי אנחנו רוצים להגיע ל PM של לפחות 60 מעלות. נשים לב שיש קבל של 0.5 פיקו בצומת N2 ובבדוק מה קורה אם נגדיל אותו, אנחנו יודעים שהגדלת קיבול מורידה את מהירות התגובה של המערכת וזה יכול לגרום ל PM שלנו לגדול.

$$PM = phase + 180$$

נציג בקבל 1 פיקו ונקבל את הגרף הנ"ל:



ועכשיו הגענו ל PM של 69 מעלות כדרוש.



ניתן לראות שההגבר שלנו הוא 35.5dB לעומת כמעט 37dB שקיבלנו כאשר חישבנו את ההגבר במדויק בסעיף הקודם שזה יחסית קרוב.