

Simulation 3 – Differential to Differential Amp

מגישים:

שחר אדמוני – 206591463

רותם סילם - 206663437

Contents

3.1 – SELECT LOAD: (30 pts).....	2
3.2 – INPUT COMMON MODE (30 pts).....	4
3.3 - EVALUATE A_v (40).....	6
EXPLANATIONS AND DISCUSSION: up to 2 pts bonus for very good and insightful discussion.....	10

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

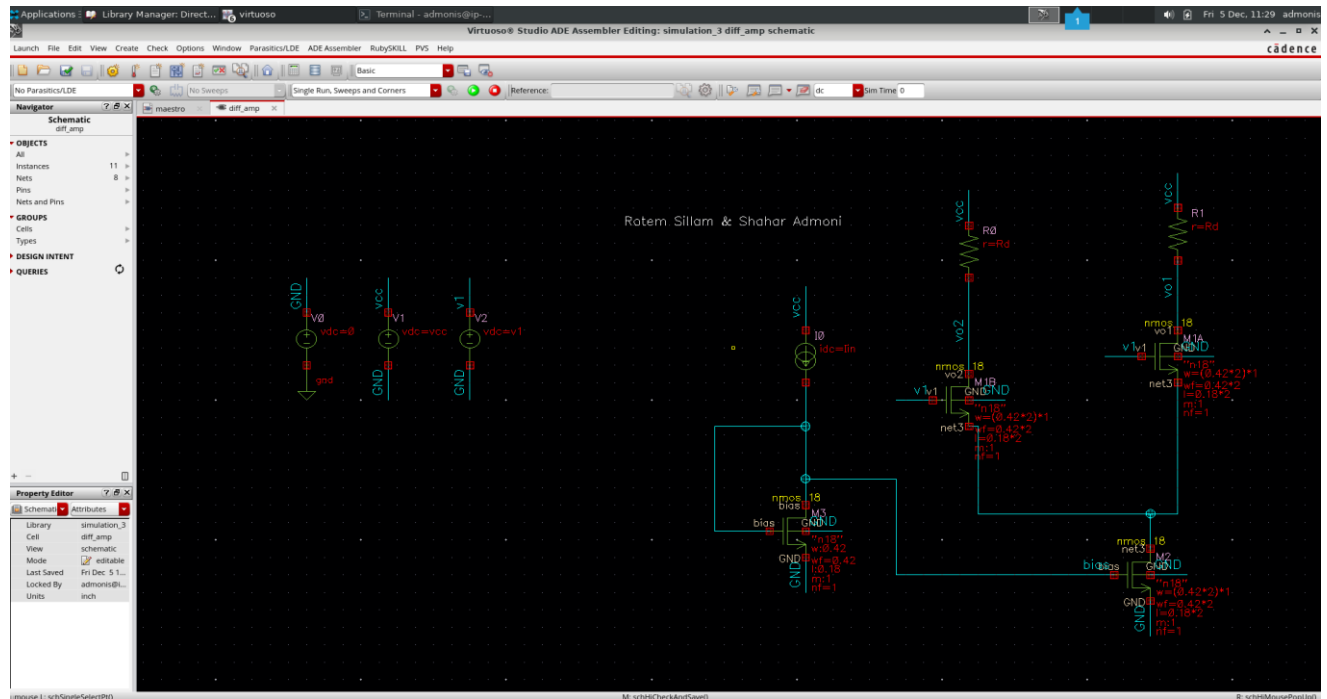
Diff Amp Gm-R Stages

3.1 – SELECT LOAD: (30 pts)

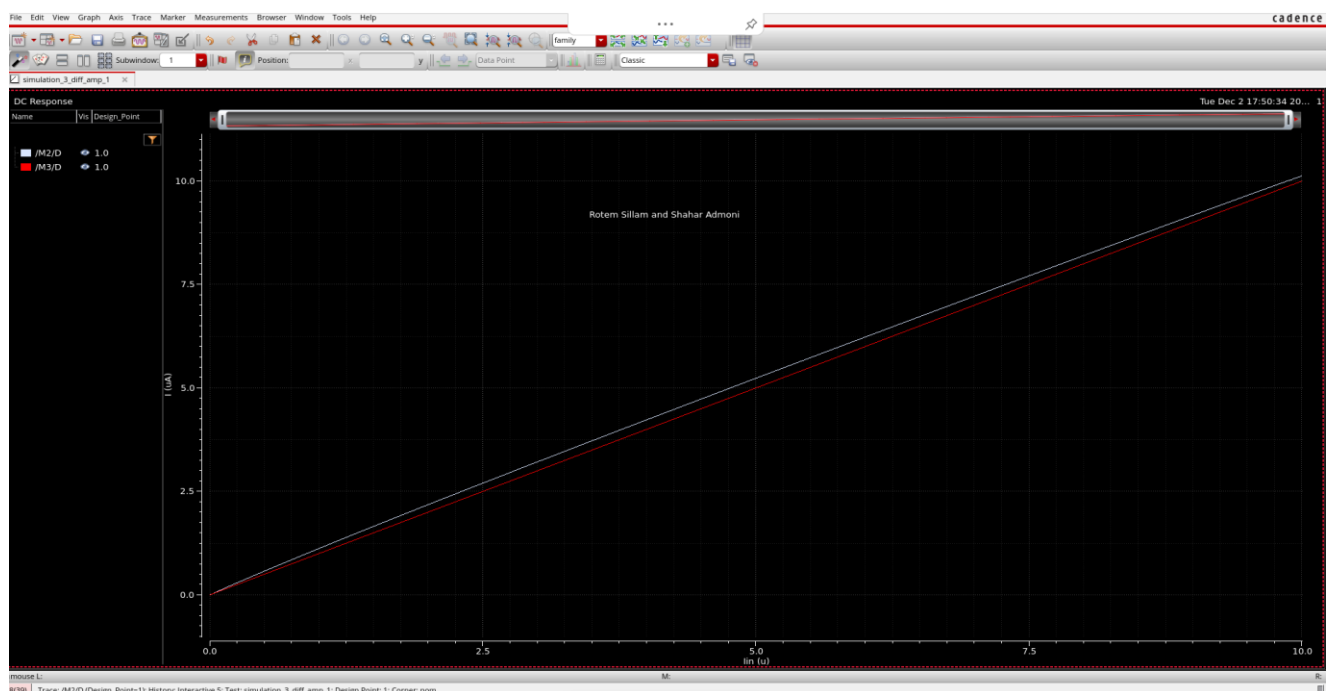
בחלק הראשון בנינו את המעגל כפי שנראה בציור. הגדרנו את החיבורים ואת הגדלים של הרכיבים על פי ההנחיות.

שמנו טרנזיסטורים M1A, M1B, M2 והגדרנו על פי $L = 2 \cdot 0.18 = 0.36$, $W = 2 \cdot 0.42 = 0.84$.

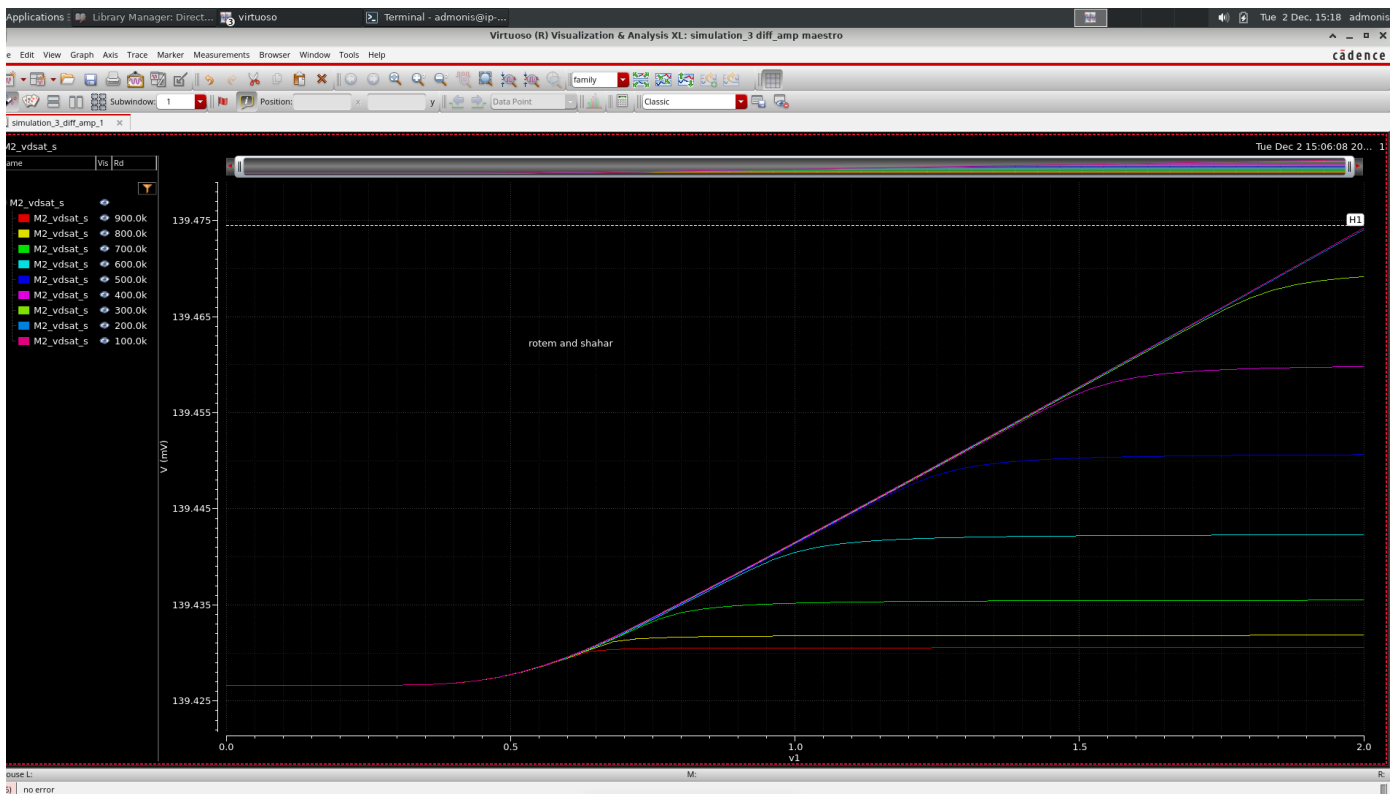
טרנזיסטור M3, של אפקט המראה, הוגדר לפי הדיפולט.



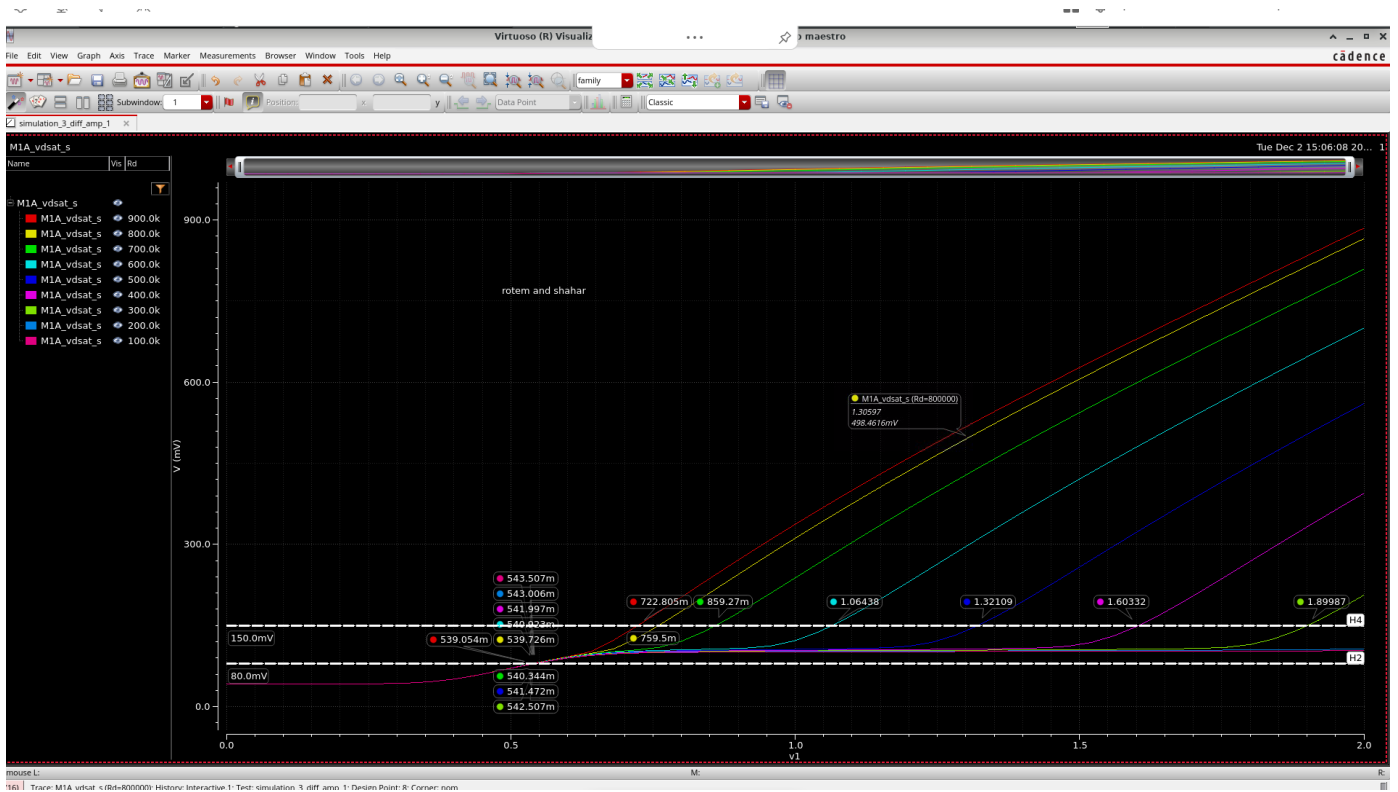
נראה שאפקט המראה עובד:



נגדיר מקור זרם $5\mu A$, נבצע סימולציה DC על מתח הכניסה מ 0 עד VDD. בנוסף נבדוק ערכי נגד עומס בין $100K$ ל $900K$.
 ניתן לראות כי ברכיב $M2$ המתח סף סטורציה שלו הוא בין $80mV$ ל $150mV$ כנדרש – כלומר תמיד בסטורציה עבור מתחים אלו:



נראה תחום מתח סף סטורציה הוא בין $80mV$ ל $150mV$ ברכיב $M1A$:



נראה מתח סף סטורציה בין הוא בין 80mV ל 150mV ברכיב M1B :



3.2 – INPUT COMMON MODE (30 pts)

הסבר על headroom: זהו הטווח שבו כל הטרנזיסטורים בסטורציה.

יש trade-off בין גודל הנגד, לטווח שבו נקבל את כל הטרנזיסטורים בסטורציה. ככל שהנגד יותר גדול, נקבל headroom יותר קטן, נסביר:

ה v_{cc} שמעל הנגד קבוע. הזרם שעובר בכל ענף קבוע -והוא מתפצל לשני הענפים (שהם סימטרים לכן התפצלות סימטרית). במקרה שלנו בחרנו $I=5\mu$, כלומר בכל ענף יזרום זרם של 2.5 μ .

$$I = 2.5\mu = \frac{V_{out} - V_{ds}}{R_d} \Rightarrow V_{out} = 2.5\mu \cdot R_d + V_{ds}$$

נראה (בסטורציה) שעבור R_d גדול יותר נקבל V_{out} קטן יותר - כלומר headroom קטן יותר:

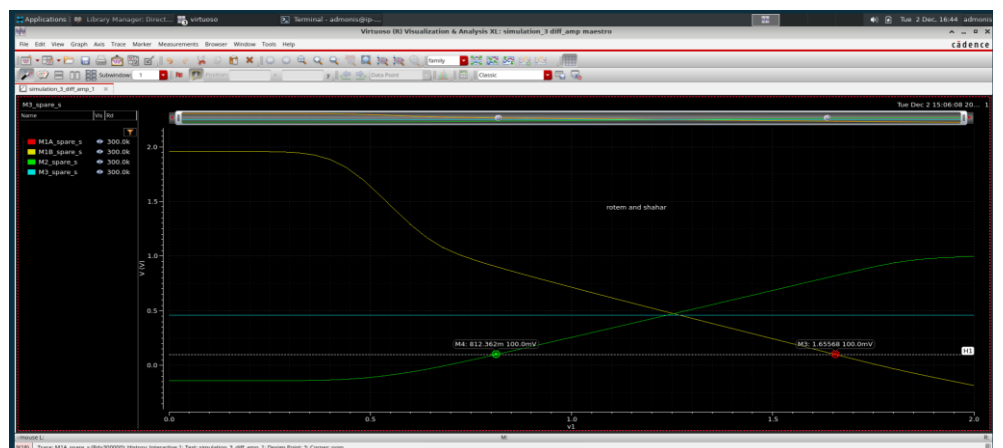
$$V_{ds} > V_{dsat}$$

$$V_{o2} - V_s > V_{gs} - V_t$$

$$V_{o2} > V_{gs} - V_t + V_s$$

כלומר קיבלנו תנאי שכל V_{o2} קטן, הטווח מתחים עבורו נעמוד בסטורציה קטן, כלומר headroom קטן.

בחרנו נגד בגודל 300K, נציג את הטווח שבו כל הטרנזיסטורים נמצאים בסטורציה:



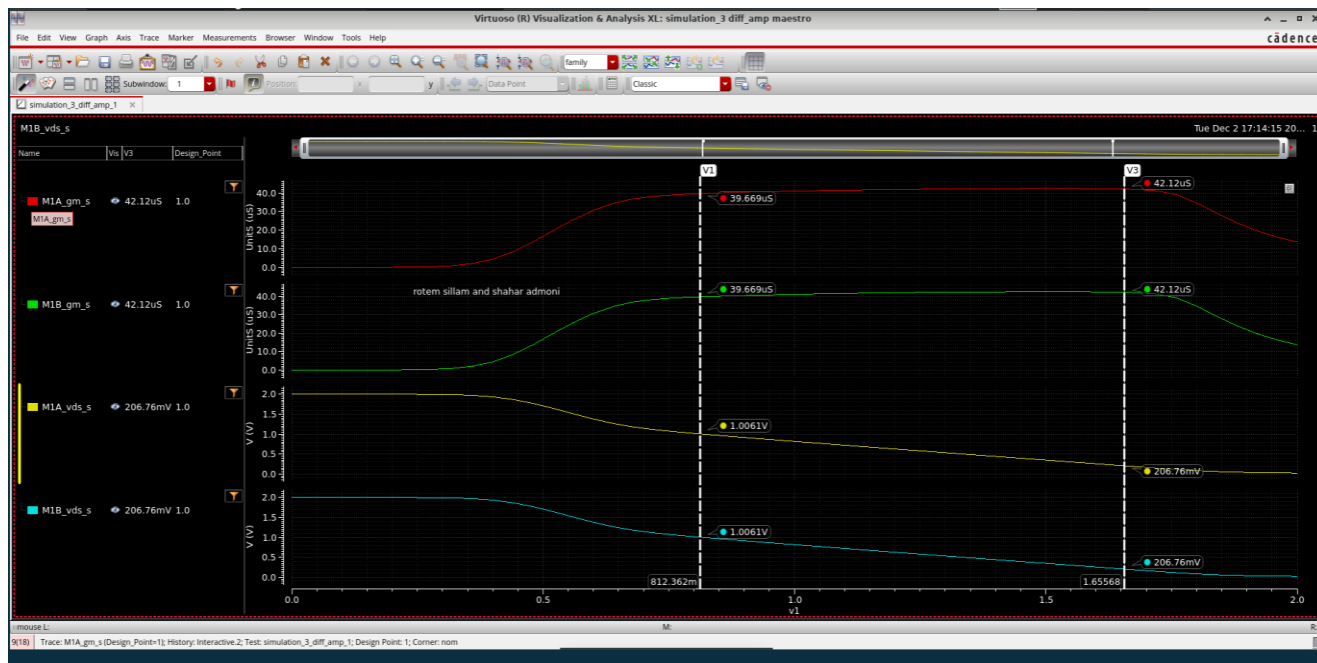
נראה כי כולם בתחום הסאטורציה כאשר התייחסנו לסף של $v_{ds} - v_{dsat} = 100mV$ עבור סאטורציה, דבר התואם לדרישה שהייתה קודם עבור ערך VDSAT.

קיבלנו טווח מתחים עבור headroom: $812.362mV < v1 < 1.655V$.

ניתן לראות כי יש מספיק מרווח עבודה בסאטורציה לטרנזיסטורים.

עלות תועלת של הגבר כאשר הדרישה היא הגבר $15 - 20 dB$: נראה בהמשך שהגדלת הנגד מעלה את ההגבר אך מצמצמת את תחום הסאטורציה (headroom), ולכן מגבילה את מרחב העבודה.

כעת לפי בקשה, נראה את המוליכות gm, vds של רכיב M1A M1B :



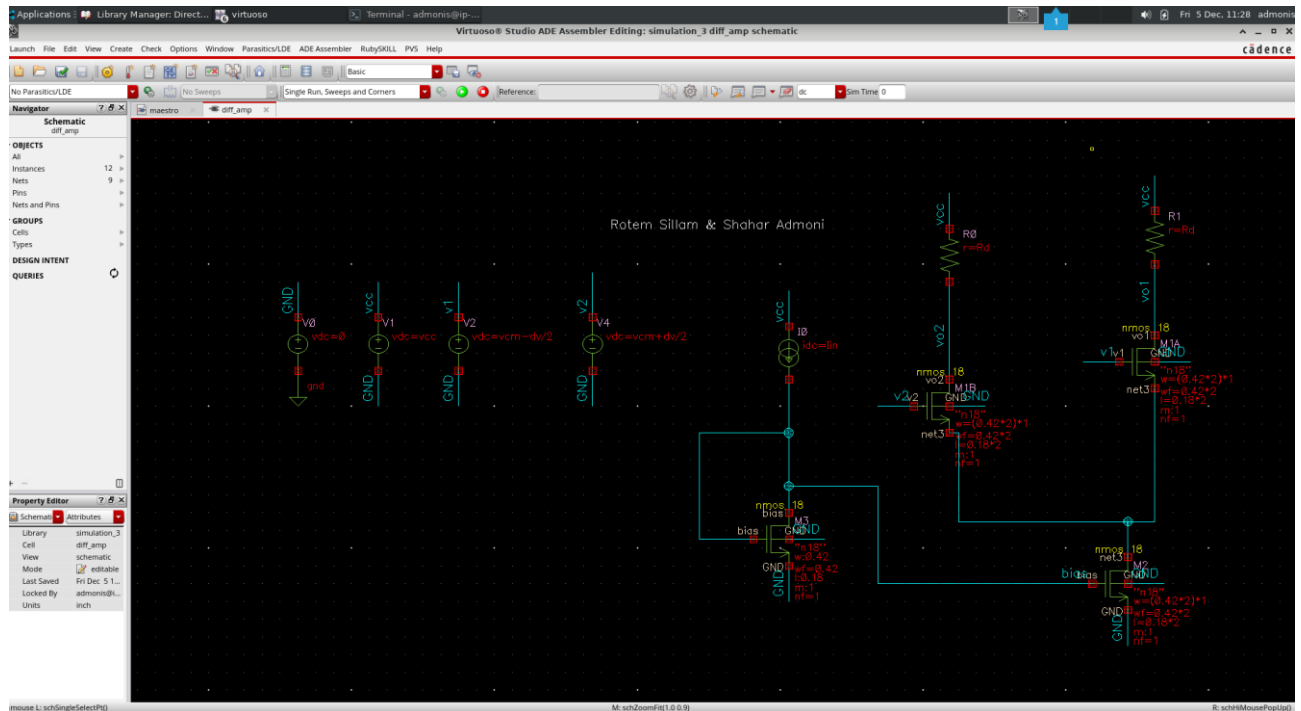
נראה כי בטווח ערכים שהגדרנו קודם לכן, מוליכות הרכיבים בטווח הגבוה ביותר, מה שיוביל להגבר טוב יותר.

כמו כן, ניתן לראות כי VDS של כל רכיב נמצא בירידה, וזאת משום שכלל שנגדיל את מתח הכניסה בשער, נגיע לקצה ה-headroom ועל כן לאחר מכן הרכיב יצא מסטורציה.

ה- $V_{DS} - V_{dsat}$ הינם הגרף שהצגנו קודם לכן. לא שינינו דבר במעגל מלבד הוצאה של נתונים נוספים ולכן אין שינוי במשוואה זו. הדבר תקף גם לגבי VDSAT.

3.3 - EVALUATE Av (40)

עבור חלק זה נרוץ עם הפרמטרים הבאים: $I_{in} = 5\mu A$, $R_d = 300K\Omega$, $V_{cc} = 2V$



על פי הנתונים, נגדיר בכניסות לטרנזיסטורים $V_1 = V_{cm} - \frac{dv}{2}$ ובכניסה $V_2 = V_{cm} + \frac{dv}{2}$. זאת על מנת שכשנגדיר את V_{IN} נקבל ΔV : $V_{IN} = V_2 - V_1 = \left(V_{cm} + \frac{dv}{2}\right) - \left(V_{cm} - \frac{dv}{2}\right) = \Delta V$

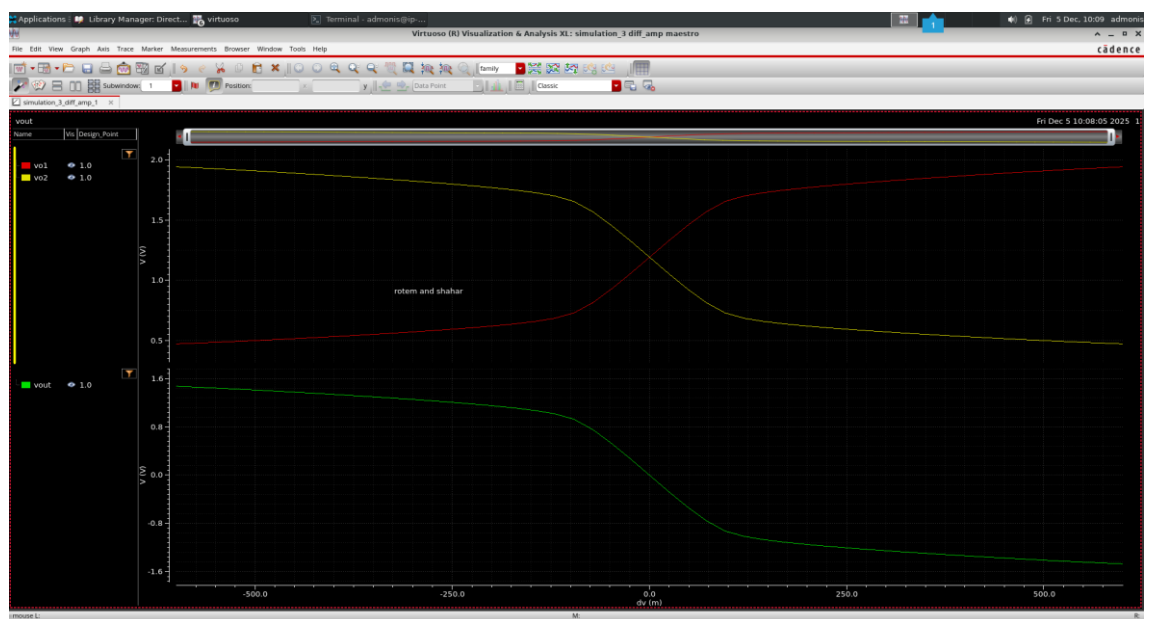
כפי שלמדנו V_{cm} זה מתח *common moden* על מנת שכניסת מתח שעולה ויורדת לא תזוז סביב מתח v_0 כי אז אין למעגל מספיק מתח כדי להיות בסאטורציה. נגדיר אותו כממוצע בין הכניסות V_{IN} שמצאנו קודם לכן (תחילת וסוף האיזור בו

$$V_{cm} = \frac{1.65568 + 812.362}{2} = 1.23V \text{ (בסאטורציה)}$$

מתח ΔV הוא מתח *differential moden* אותו נרצה להגביר.

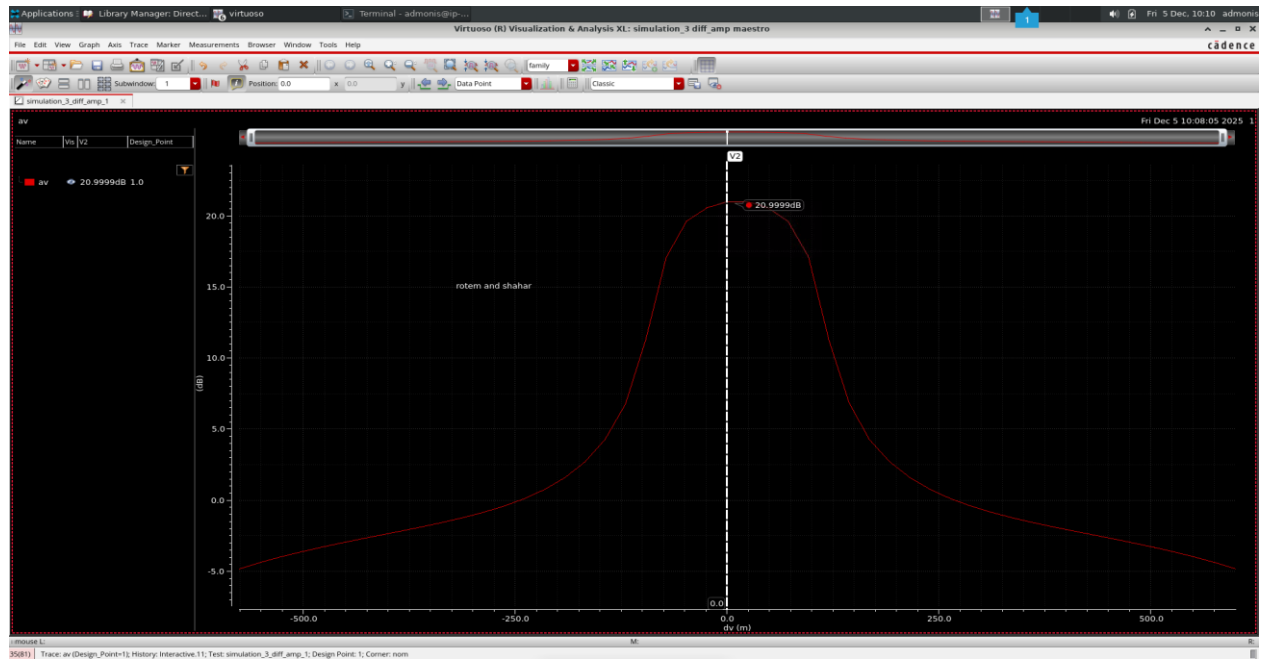
נריך כעת בדיקה למציאת הגבר על ערכי dv בין $-600mV$ ל $600mV$.

- נציג את הגרף של $V_{out} = v_{o2} - v_{o1}$ ואת v_{o2} , v_{o1} בנפרד – ביחס ל ΔV_{in} :



ככל שנגדיל את מתח השער כך הזרם שיזרום דרך הטרנזיסטור יגדל. ככל שהזרם דרך הטרנזיסטור גדל, לפי חוק אוהם $(V_{out} = V_{dd} - R_d * i)$ שנבצע המתח במוצא יקטן. כפי שניתן לראות הגרף תואם לציפיות שלנו.

- כעת נציג את הגרף של ההגבר שקיבלנו – הרצנו בסימולציה ($AV = dB20(\text{deriv}(V_{OUT}))$):

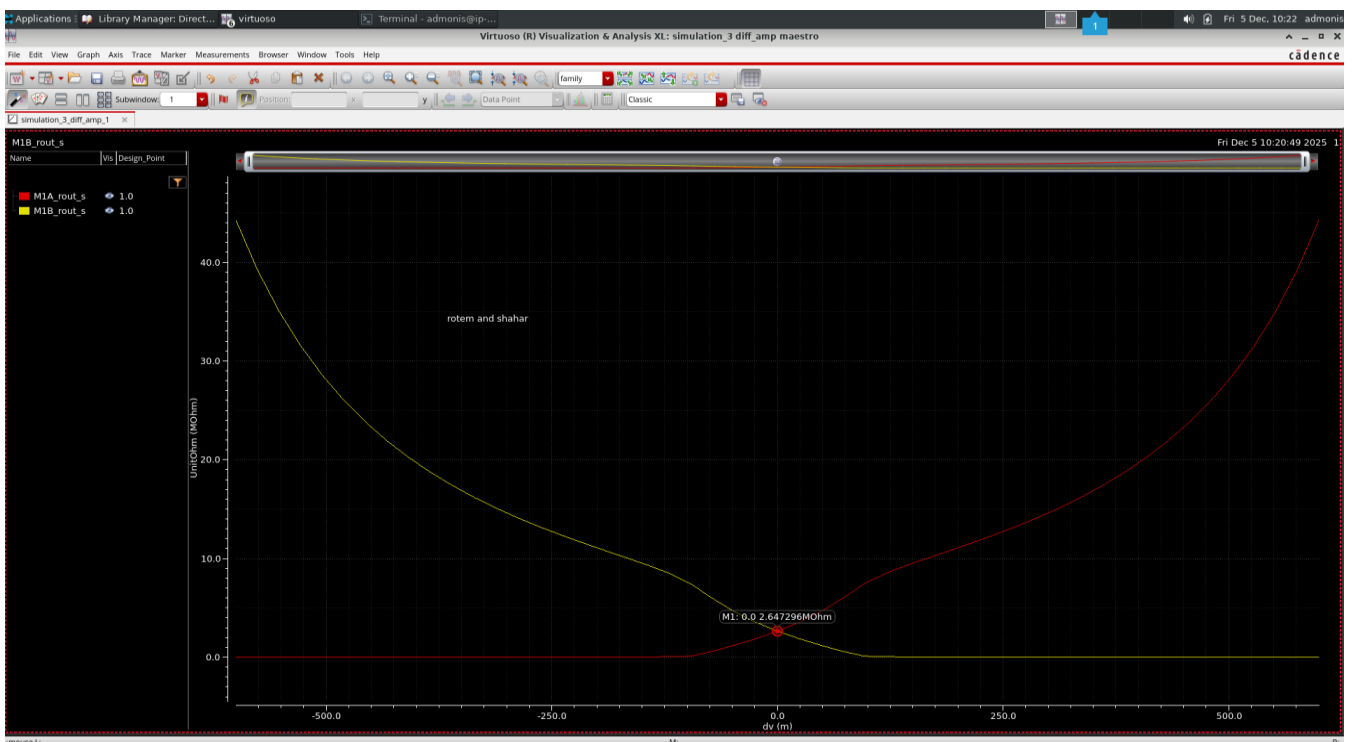


ניתן לראות כי ההגבר הינו בקירוב $21dB$ עבור $\Delta V = 0$ (כנדרש) כלומר במצב שיווי משקל בו הזרמים בשני הענפים שווים.

- כעת נרצה לחשב ידנית את ההגבר על מנת לוודא את התשובה שלנו מהגרף.

נרצה למצוא את ההתנגדות הפנימית של $M1A$ $M1B$. כאשר נמצא את הגודל הנ"ל, נבצע חיבור נגדים במקביל עם נגד העומס שלנו R_d .

במידה (זה מה שנשאף אליו) וההתנגדות הפנימית תהיה גדולה מאוד מהתנגדות נגד העומס, על פי מה שלמדנו, בחיבור מקבילי, ניקח את התנגדות נגד העומס (הנגד הקטן מביניהם).



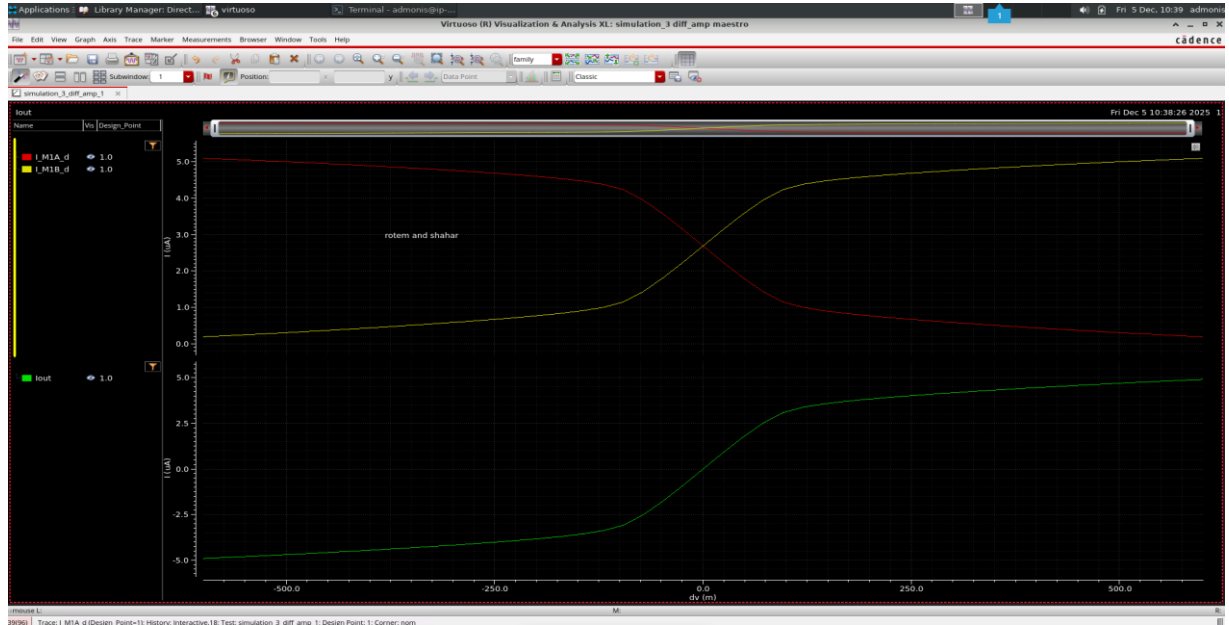
ניתן לראות כי התנגדות פנימית של הרכיבים גדולה בסדר גודל ($2.647M\Omega$) מנגד העומס ($300K\Omega$).

לכן נשתמש בנוסחה של $Av = GM \cdot R_{out}$ ב $R_{out} = R_d = 300K\Omega$

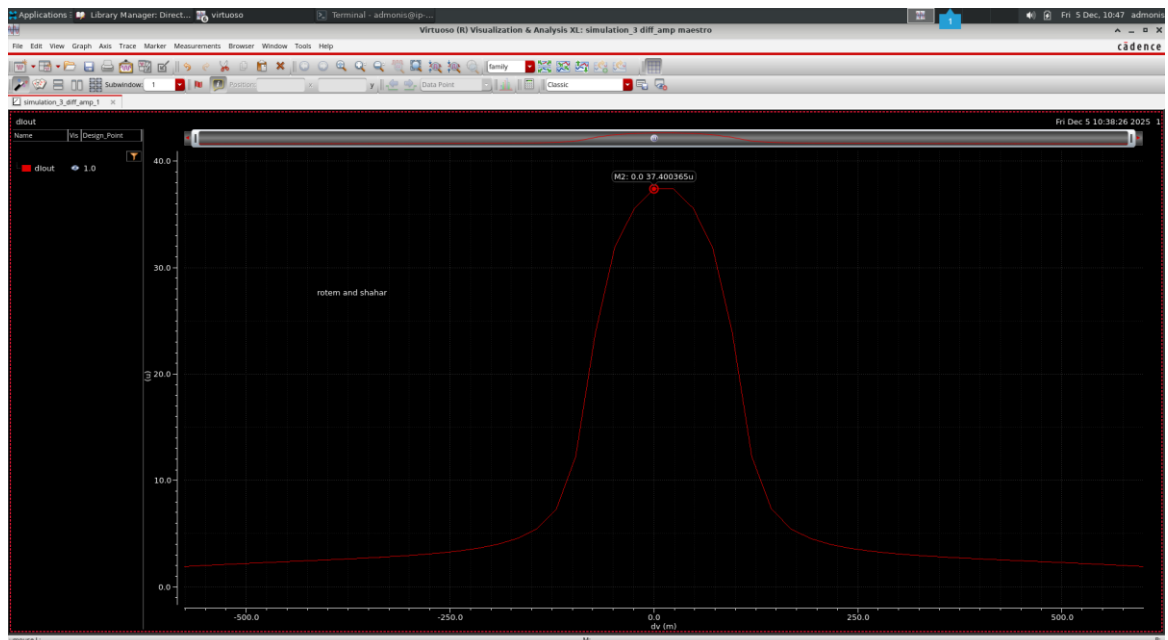
- על מנת להשלים את החישוב על פי הנוסחה של ההגבר, נרצה למצוא את GM של המעגל.

נזכור כי בסימולציה זו כל הטרנזיסטורים בסאטורציה, אך חלוקת הזרמים בכל ענף שונה בעקבות מתח שער שונה בכל טרנזיסטור. נצפה לקבל זרמים הופכיים כיוון שיש שינוי במתח השער על כל אחד מהם באופן הופכי ($V_{cm} + \Delta V_{in}$) כלומר מתח שער של $M1B$ עולה, ומתח שער של $M1A$ יורד בהתאם.

ראשית נחשב את הזרם של המעגל על פי מה שראינו בהרצאה, כאשר $I_{out} = I_{M1B} - I_{M1A}$. ניתן לראות שבגלל שהזרם בטרנזיסטור $M1B$ עולה, וב $M1A$ יורד ככל ש ΔV גדל (בהתאם למתח שער שהכנסנו), נקבל באמת עליה בזרם I_{out} .



- כעת נרצה לחשב את $GM = \frac{dI_{out}}{dV}$, לכן נציג גרף של נגזרת הזרם שחישובו:



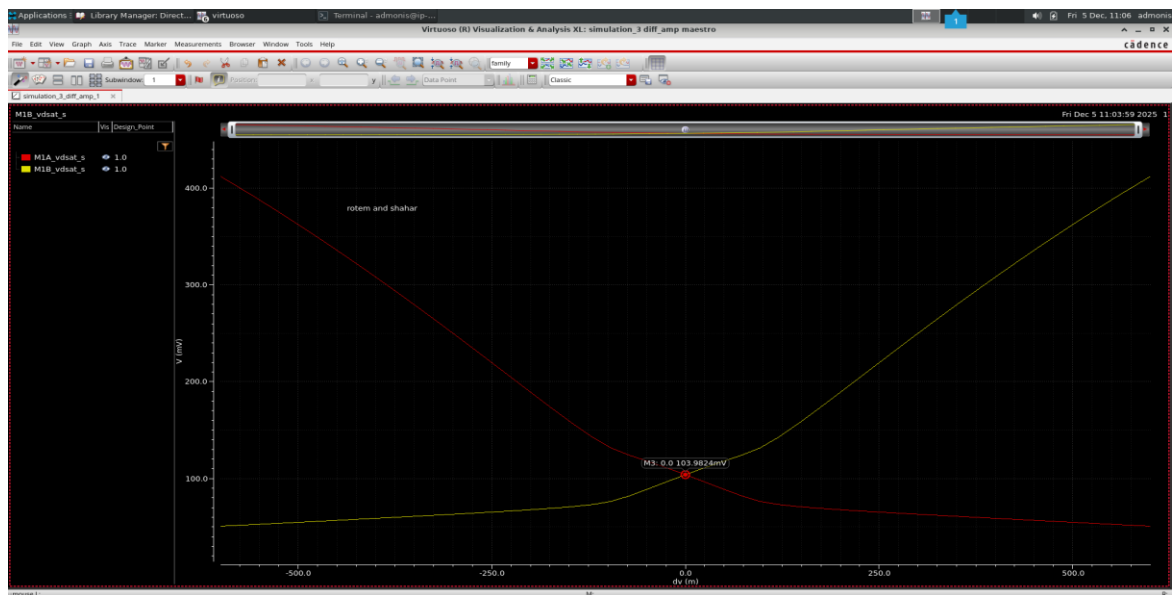
ניתן לראות כי בנקודה של $dv = 0V$ (מצב שיווי משקל בו הזרמים בשני הענפים שווים) - נקבל $GM = 37.4us$.

- כעת נרצה לחשב את ההגבר בצורה ידנית כשיש לנו את כל הפרמטרים:
 $AV = -GM * Rout = -37.4u * 300K = 11.22 \rightarrow 20\log(11.22) = 20.999dB$

בדיוק כמו ההגבר AV בגרף שהראנו קודם לכן לפי הנגזרת של V_{out} .

- נרצה להראות מתי מתרחשת גניבת זרם.

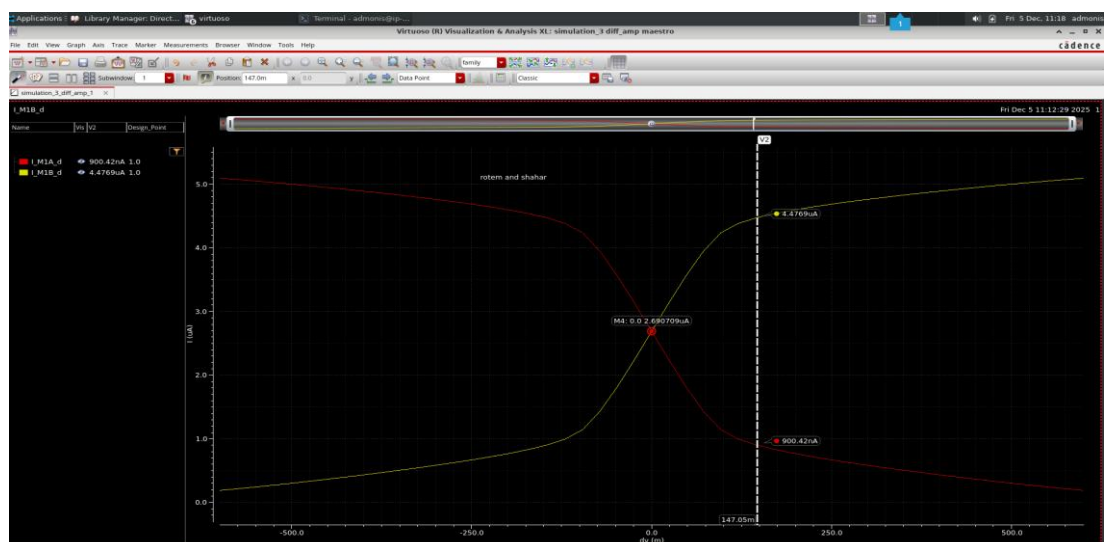
עבור $\Delta V_{in} = 0$ (שיווי משקל) נקבל שהזרם מתפצל חצי חצי בשני הענפים כלומר בכל ענף זרם $\frac{I_{ss}}{2}$. אנו יודעים שהחל מהנקודה בה מתח כניסה זהה בשער לכל אחד מהרכיבים, מתחילה גניבת הזרם כלומר עבור $V_{dsat} = 103.9824mV$.



כפי שלמדנו בהרצאה נקבל: $(V_{GS} - V_{TH})_{1,2} = V_{dsat_{1,2}} = \sqrt{\frac{I_{ss}}{2k' \cdot \frac{W}{L}}}$

עבור מקסימום overdrive נקבל: $V_{dsat_{1,2}} = \frac{\Delta V_{in}}{\sqrt{2}}$ כאשר $\Delta V_{in} = \sqrt{\frac{I_{ss}}{k' \cdot \frac{W}{L}}}$

כלומר: $\Delta V_{in} = \sqrt{2} \cdot 103.9824m = 147.05mV$ ובמקרה שלנו נקבל $\sqrt{2}V_{dsat_{1,2}} = \Delta V_{in}$



הזרם המקסימלי שהכנסנו היה $5\mu A$.

ניתן לראות כי הזרם ב $M1B$ הינו $4.4769\mu A$ כלומר אם נחשב מה אחוז היחסי של הערך הזה מ $5\mu A$ נקבל בערך 89%. כלומר, 89% מסך הזרם שאפשרנו למעגל עבר בענף של $M1B$ - כלומר התרחשה "גניבת זרם" של טרנזיסטור זה.

הדבר הגיוני, שכן ככל שנעלה את ערך dv , כך המתח בשער של $M1B$ עולה, ובהתאם לזאת המתח בשער של $M1A$ קטן.

אנו יודעים כי ככל שנגדיל את מתח השער של טרנזיסטור במצב סאטורציה, כך גודל הזרם שהוא יכול להעביר גדול יותר. כמו כן, סך הזרם צריך להיות $5\mu A$ (במקרה שלנו) ולכן במידה וגודל הזרם עולה בענף אחד, מן הסתם שהוא יקטן בענף השני.

EXPLANATIONS AND DISCUSSION: up to 2 pts bonus for very good and insightful discussion

במעבדה הודגמו עקרונות המפתח של מגבר דיפרנציאלי ב CMOS. נמצא כי בחירת נגד העומס קובעת איזון בין הגבר גבוה לבין שמירת טווח headroom. הגדלת הנגד מעלה את ההגבר אך מצמצמת את תחום הסאטורציה, ולכן מגבילה את מרחב העבודה. ניתוח ה- common-mode הראה כי נדרש מתח בינוני בשערי הטרנזיסטורים כדי לשמור על שני הענפים בסאטורציה ולמקסם את g_m . מדידות ההגבר תאמו היטב את החישוב הידני, מה שמאשר כי r_o גדול משמעותית מ- R_D , ולכן העומס הוא שקובע את ההתנגדות במוצא (חיבור במקביל של נגדים).

בנוסף, נצפתה תופעת "גניבת הזרם": ככל ש Δv גדל, הזרם מתרכז בענף אחד, דבר שמדגיש את תחום העבודה האפשרי של שני הטרנזיסטורים (ששניהם בסאטורציה), כלומר של המעגל הדיפרנציאלי.

בסך הכול, יש התאמה מלאה בין המודל התיאורטי, הסימולציות והניתוח המעשיים.