

Simulation #3

Differential to Differential Amp

מגישות:

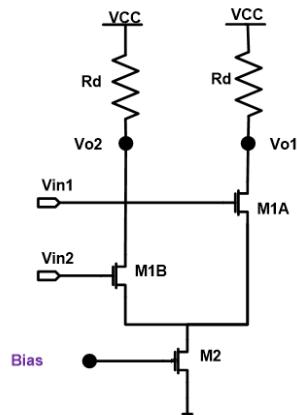
עדן גריין 324965946
הדרם 214068843

תאריך הגשה:

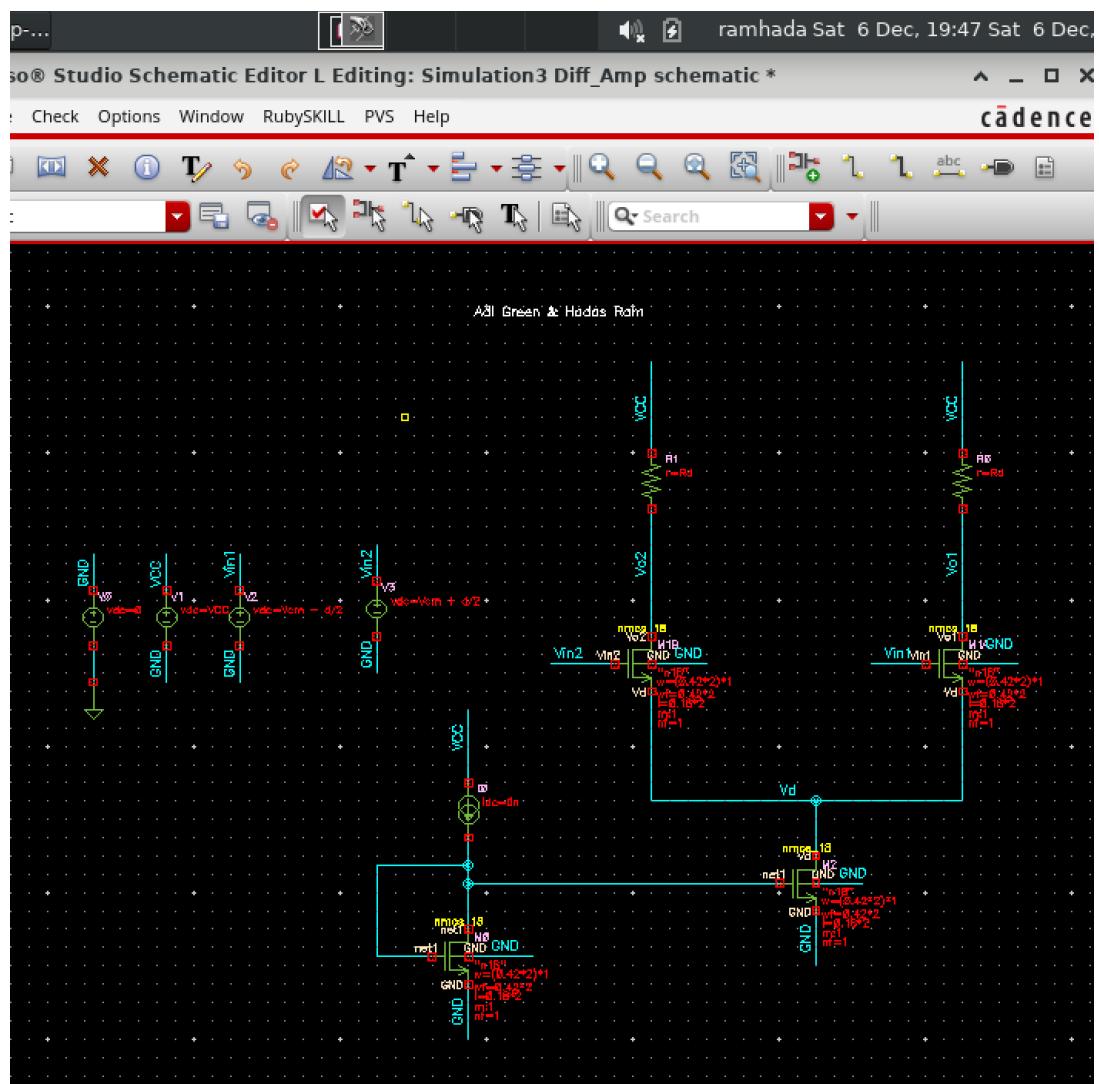
09.12.2025

Diff Amp Gm-R Stages:

התקשו לבנות את המעל:

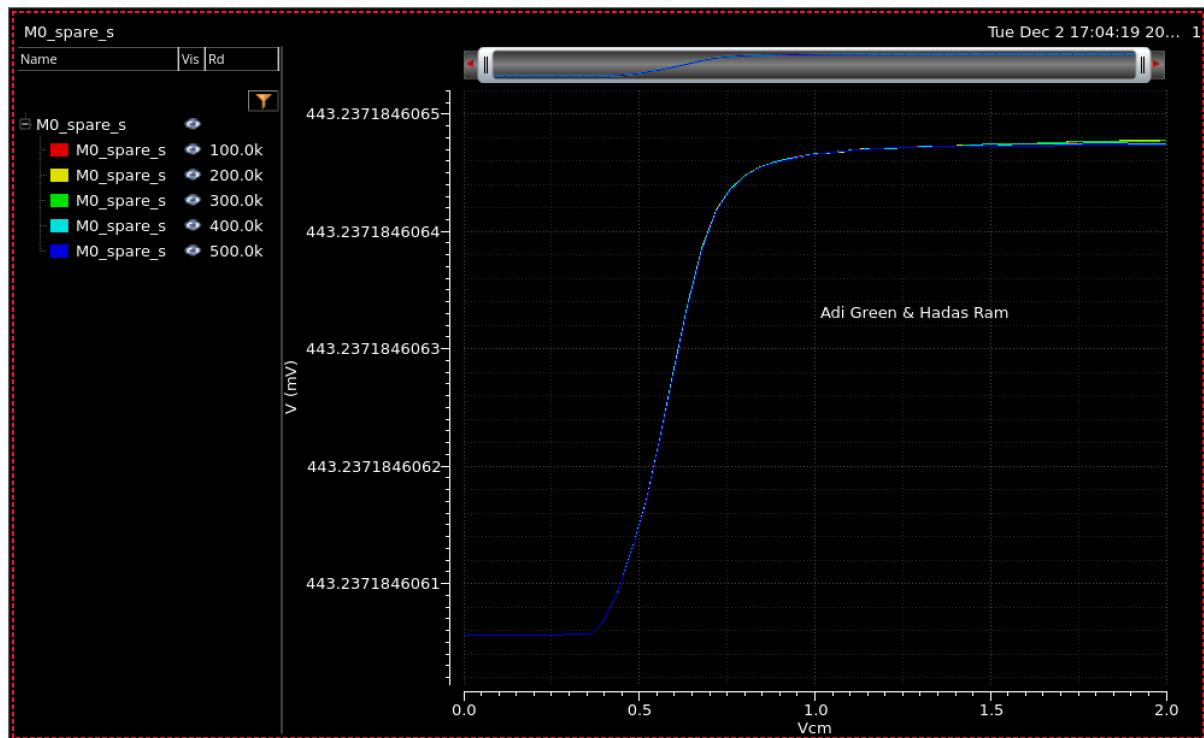


בחרנו ב $A_{in} = 5$. המטרה של Current Mirror היא של טרנזיסטור M2 תהיה מראה זרם כלומר זרם של A_{in} (בגלל אפקט התקוצרות התעללה הזרם לא מדויק).



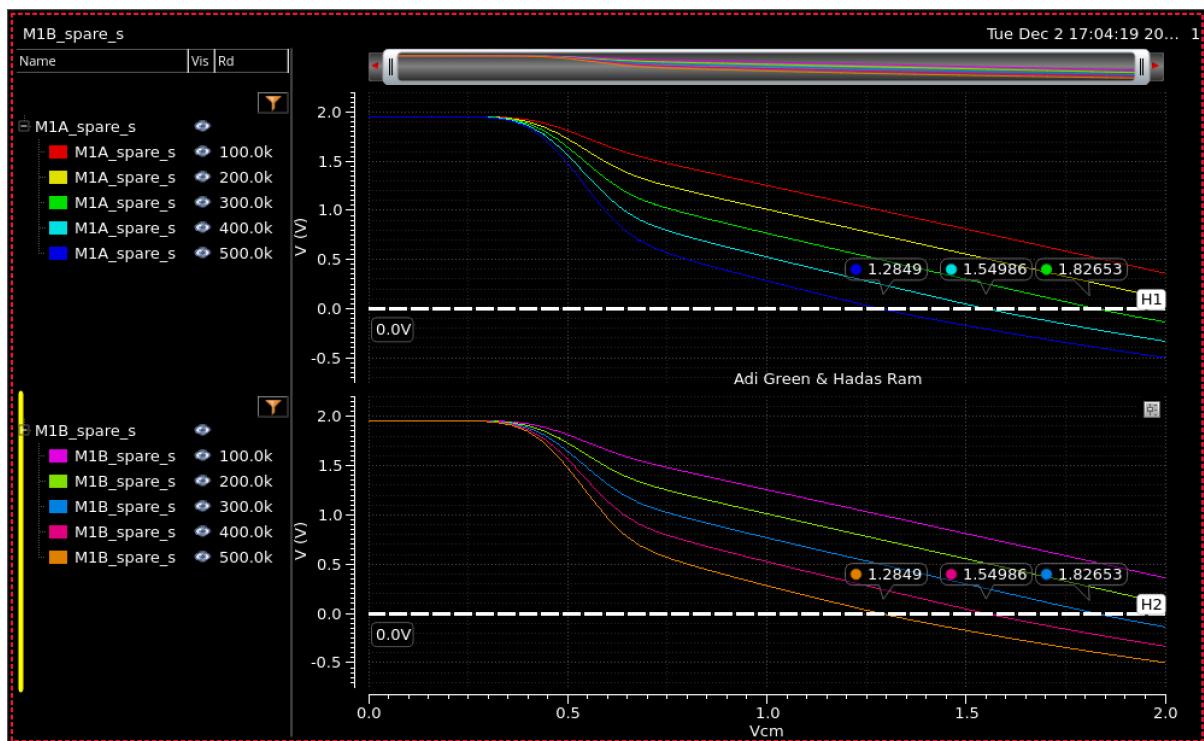
3.1 – SELECT LOAD

גרף ה- i - V של רכיב M0 כתלות במתח V_{cm} :



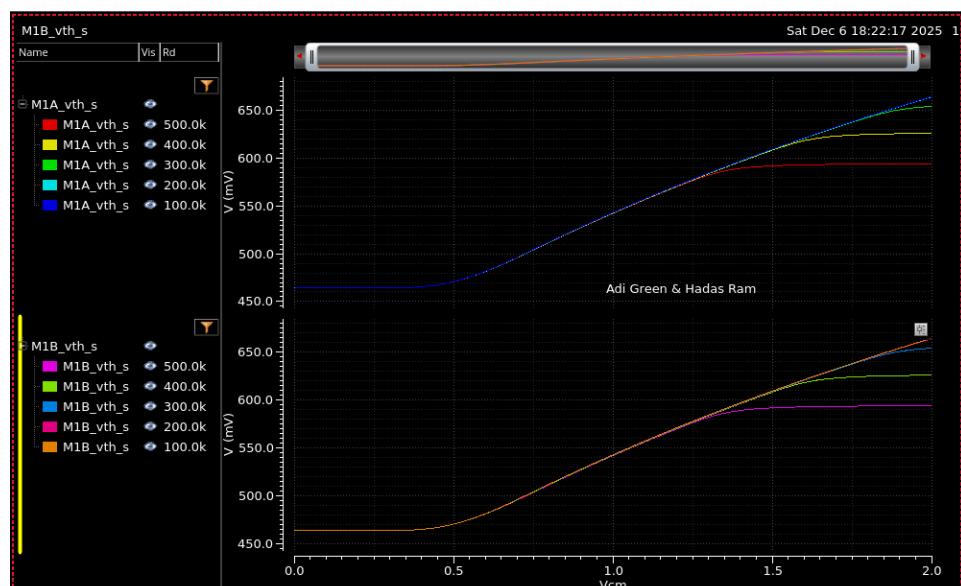
ניתן לראות שעבור כל התחנגולות הנ"ל הטרנזיסטור M0 נמצא בסטורציה.
רכיב זה בחיבור דיוד ולכן תמיד נמצא בסטורציה.

גרף ה-*h*-spare של רכיבי M1A, M1B כתלות במתח V_{cm} :



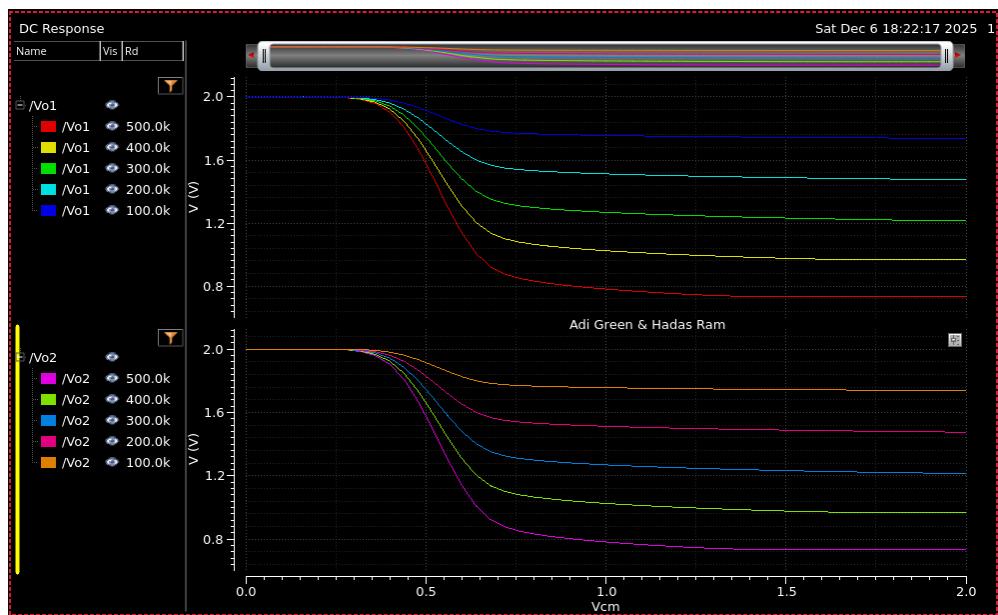
כיוון שכל המוגל סימטרי, ניתן לראות כי גרפי *h*-spare של הרכיבים זהה. ככל שההתנגדות קטנה יותר, יוצאים מסטרוציה עבור ערך V_{cm} גדול יותר, לאחר שפחות מתח נופל על הנגד וכן V_{out} גדול יותר וכן V_{ds} של הטרנזיסטורים גדול יותר, אך יש יותר טווח למתח V_{gs} כי עבור סטרוציה מתאימים $V_{th} < V_{ds} - V_{cm}$.

כמו כן, V_{th} הוא משתנה מעט אך לא משמעותי (bulk effect), והמתח V_{out} נשאר קבוע כי אין חילוקי DC ואנשאר כל הטרנזיסטורים בסטרוציה.



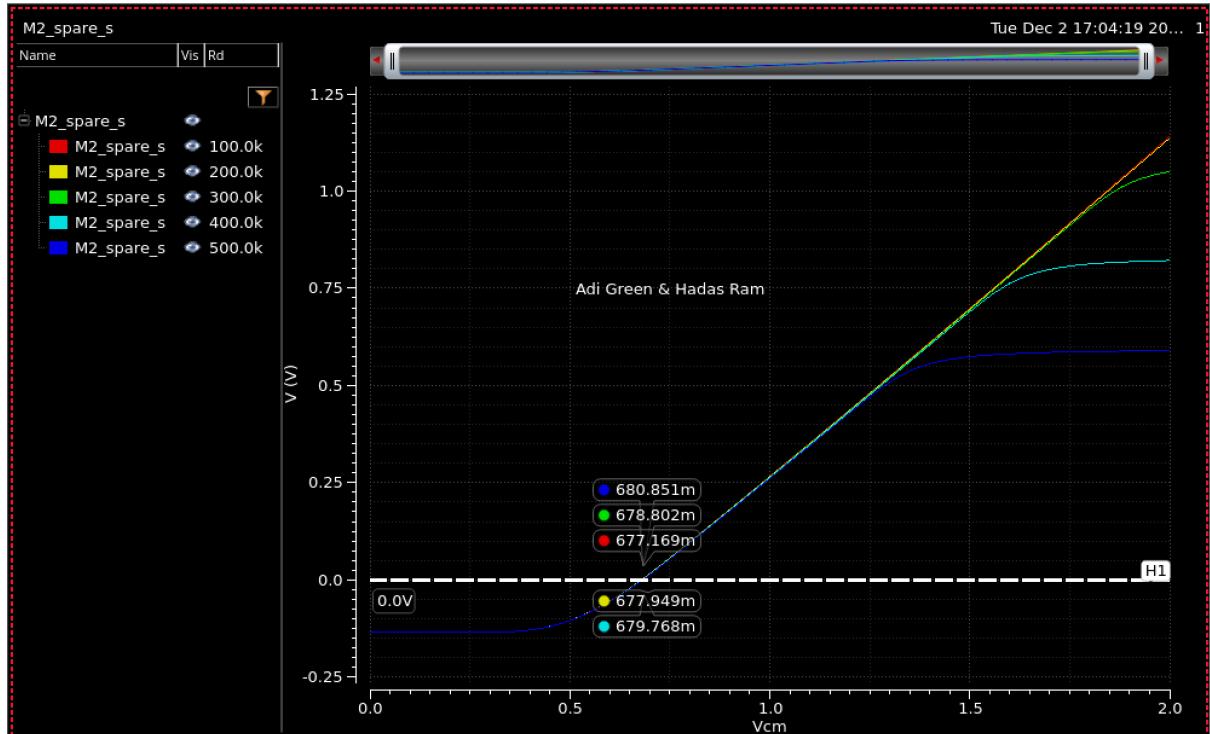
ניתן לראות שהשינויי קטן מאוד ב- V_{th} .

גרף של V_{o2} , V_{o1} כתלות ב- V_{cm} :



ניתן לראות שהמתח קבוע כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה (ניתן לראות את הטווחים מהגרפים של הספקדים שהזקנו).
 כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה, נופל זרם של $A_{nA} 2.5$ על כל ענף ולכן חוק אוהם, המתח שנופל על הנגד כאשר הזרם הוא קבוע הוא אותו מתח ולין V_{o2} ו- V_{o1} קבועים ושוויים (כי זו אותה התנגדות ומתחים).
 בעזרת הלמיסטרור Current Mirror M2 (לא מדויק בגלל אפקט התקוצרות התעללה),
 וכיון שיש שני ענפים והזרמים בהם שווים קיבל $A_{nA} 2.5$.

גרף ה-*spare* של רכיב M2 כתלות במתח V_{cm} :



כפי שניתן לראות, ככל שהמתח V_{cm} עולה אז ה-*spare* של הרכיב עולה.

$$\text{spare} = V_{ds} - V_{gs} - V_{th} = V_d - V_{m2g} - V_{th}$$

המתח V_{m2g} זהה המתח ב-*gate* של רכיב M2 לא משתנה, זהו המתח מה-*Current Mirror* שמוספע מהזרם שאנו מכנים, V_{th} נשאר קבוע (אין DC bulk effect), וב-*DC* המתח V_d משתנה כאשר אנו מגדילים את V_{cm} .

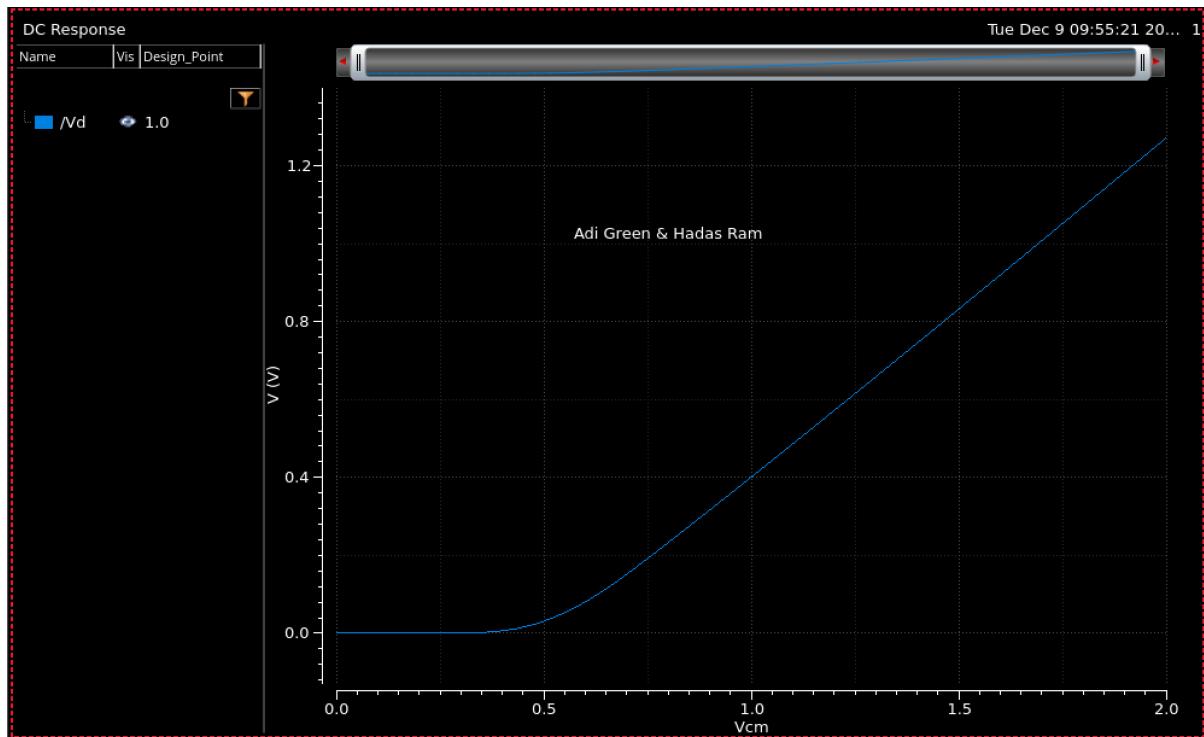
$$I_d = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} W (V_{gs} - V_{th})^2$$

המתח V_{cm} , כי לפי הנוסחה

כפי שאמרנו בסטוציה נופל זרם של $A = 2.5 \mu A$ על הטרנזיסטורים M, M1A, M1B, כאשר אנו מגדילים את V_{gs} אז גם המתח של ה-*Source* V_d חייב לעלות על מנת לשמור על זרם קבוע, ולפי המשוואה לעילו- *spare* גם ה-*spare* חייב לעלות.

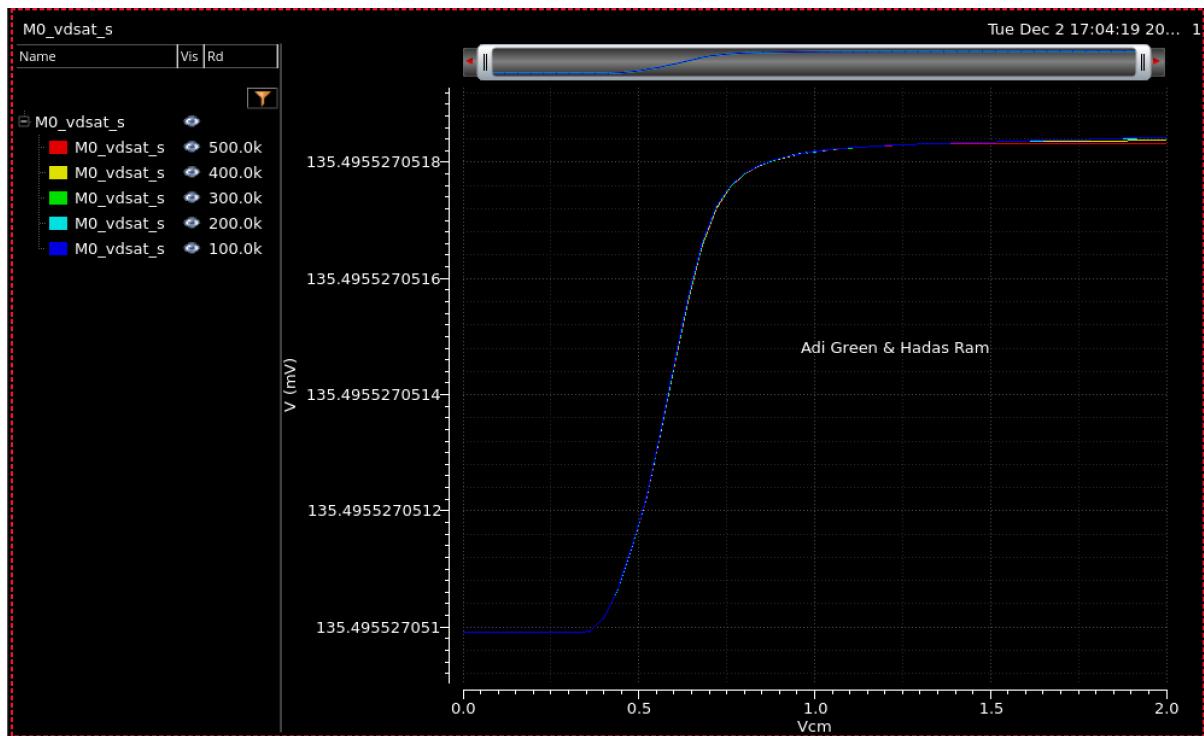
ניתן לראות שבערך מתח $V_{cm} = 1.5$ ב- V_{cm} , ההתנגדות בחלק מהנגדים אינה ממשיכה להיות לינארית מכיוון שהטרנזיסטורים M1A, M1B יוצאים מסטרוציה כפי שניתן לראות בגרפים של ה-*spare* שהוצאו לעילו.

גרף של המתח V_d כתלות ב- V_{cm} :



ניתן לראות שהמתח V_d עולה בצורה לאニアרית ביחס ל- V_{cm} כפי שהסבירנו.

גרף ה- V_{dsat} של רכיב M0 כתלות ב- V_{cm} :

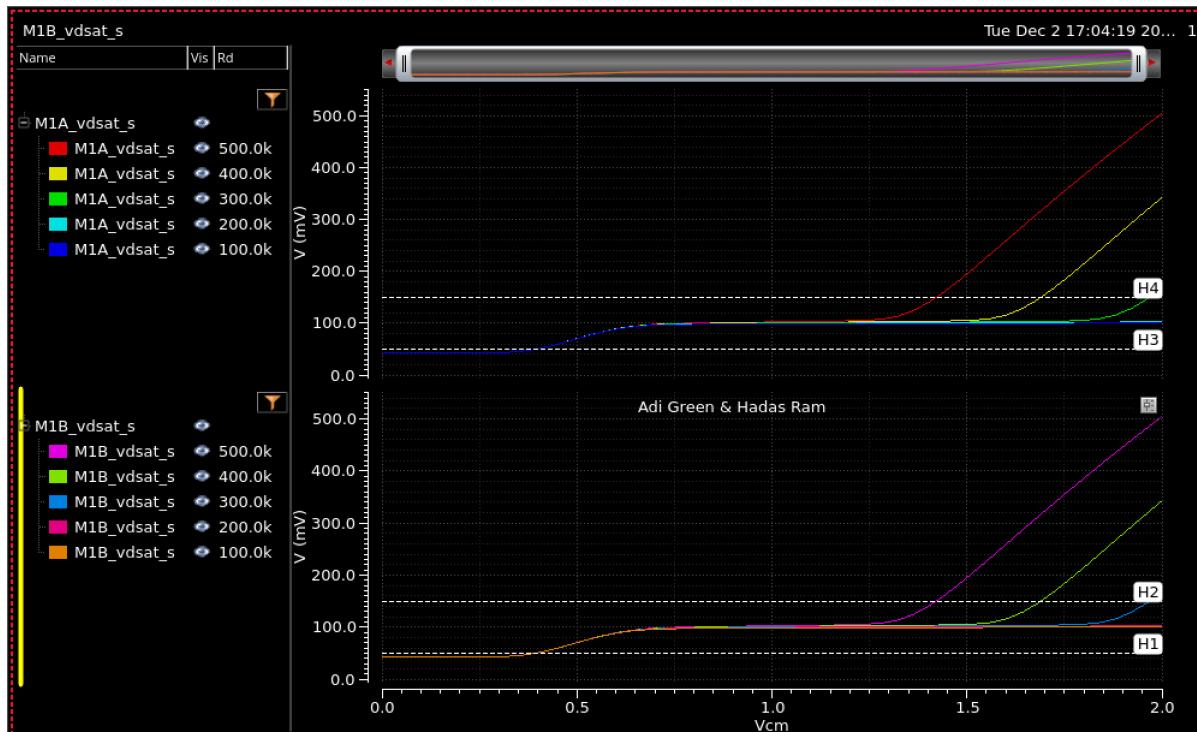


ניתן לראות כי ערכי V_{dsat} נמצאים בתחום בין 150-180mV.

$V_{dsat} = V_{gs} - V_{th}$.

ברכיב M0 המתח V_{th} קבוע (ain't effect), ובנוסף המתח V_{gs} לא משתנה לאחר שהוא קבוע ע"י המקור זרם שהכנונו, ואכן ניתן לראות כי V_{dsat} לא משתנה, (השני הוא בرمת המספר ה-9 אחרי הנקודה העשורתונית).

גרף ה- V_{dsat} של M1A,M1B כתלות במתח V_{cm} :



סימנו את הטווח הרצוי V_{cm} 80-150mV.

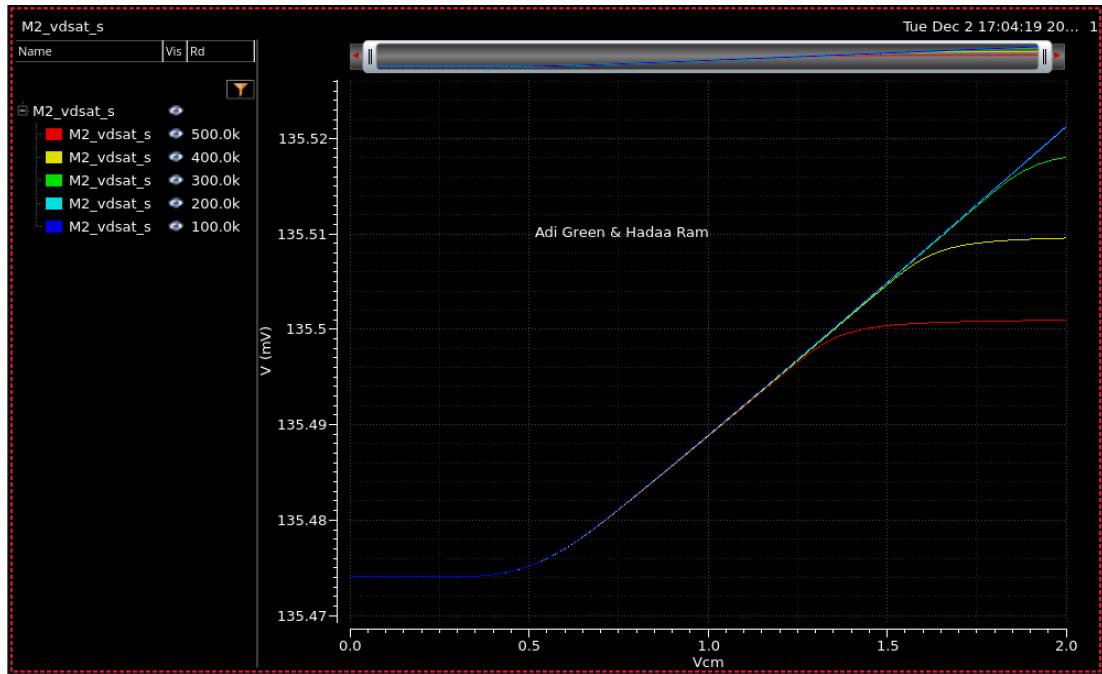
$$I_d \sim (V_{dsat})^2$$

כאשר כל הטרנזיסטורים בסטוריציה אז זרם לפי הנוסחה

כפי שאמרנו, זרם קבוע ולכון גם V_{dsat} קבוע בתחום זה.

נקבל עלייה בתחום עד 0.5V כי הטרנזיסטור M2 לא בסטוריציה, ונקבל עלייה בערך מעל 1.5V כי הטרנזיסטורים M1A, M1B יוצאים מסטוריציה.

גרף ה- V_{dsat} של M2 כתלות במתה V_{cm} :



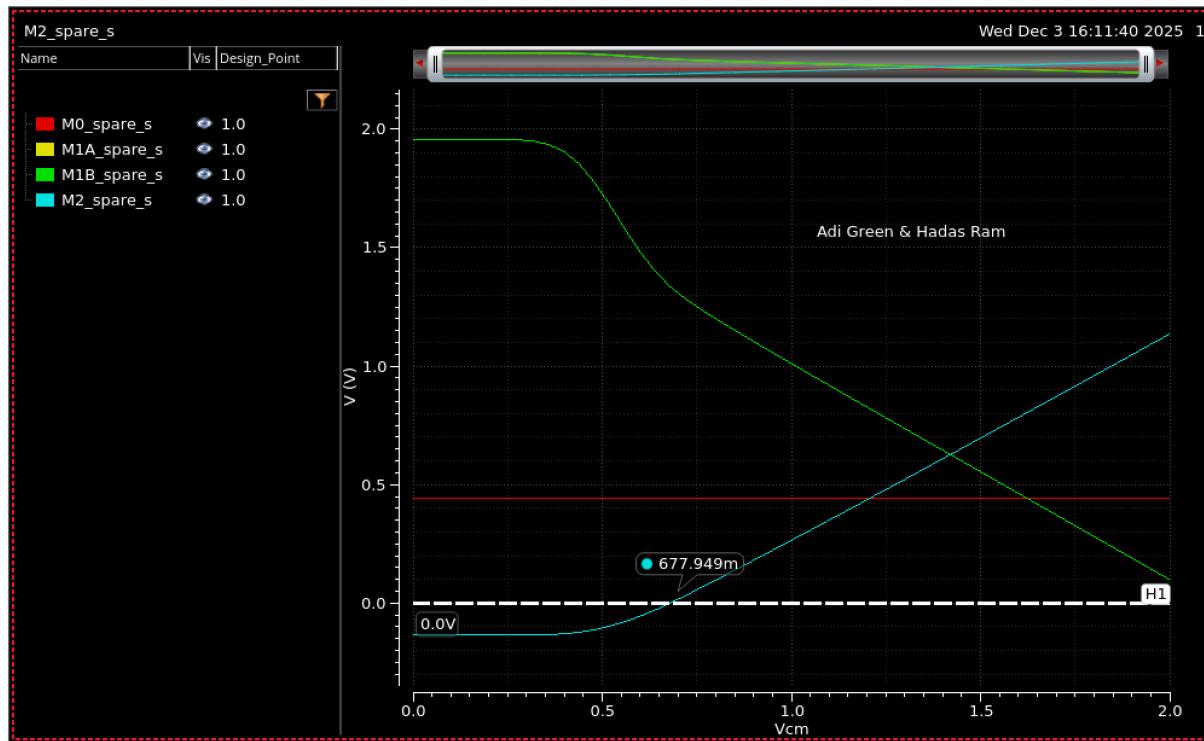
ניתן לראות כי ערכי V_{dsat} נמצאים בתחום בין $150mV$ - $180mV$ כאשר כל הטרנזיסטורים בסטוריצה איז זרם לפי הנוסחה $I_d \sim (V_{dsat})^2$.
כפי שאמרנו, זרם קבוע וכן גם V_{dsat} קבוע בתחום זה, ניתן לראות כי הערכים כמעט זהים.

התבקשנו לבחור נגד שיתן הגבר גדול אבל מצד שני יהיה טווח **headroom** הגיוני.
יש פה trade off - ככל שההתנגדות גדולה יותר, כך שהגבר גדול יותר מאשר שהנוסחה שלמדנו להגבר
היא $A_v = -gm \cdot R$.
אבל כפי שראינו, ככל שההתנגדות גדולה כך ה-**headroom** קטן יותר, ניתן לראות לפי הגרפים של ה-
spares.
ולכן בחרנו את ההתנגדות $200k\Omega$.

3.2 – INPUT COMMON MODE

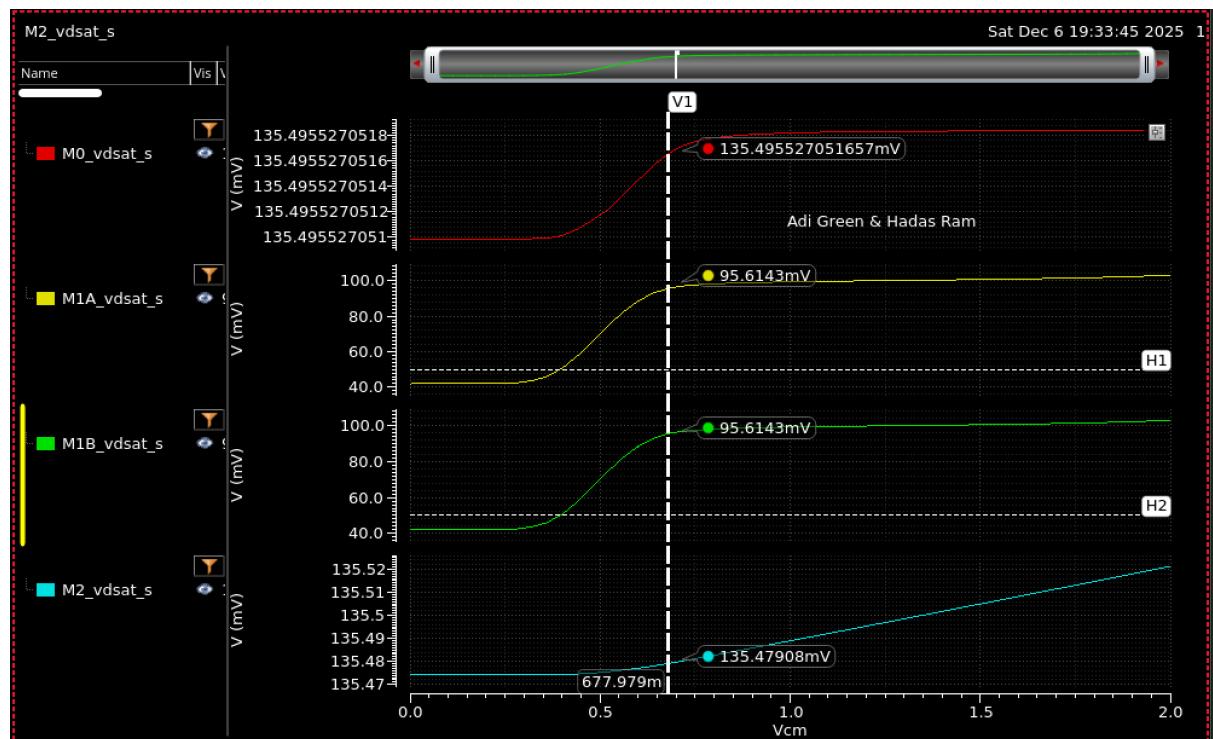
נראה את הגрафים שכבר הוציאנו, אך עבר $200\text{k}\Omega$ בלבד.

גרפי ה- h -param של הרכיבים כתלות במתח V_{cm} , מgraf זה נזיה את ה- h -param headroom:

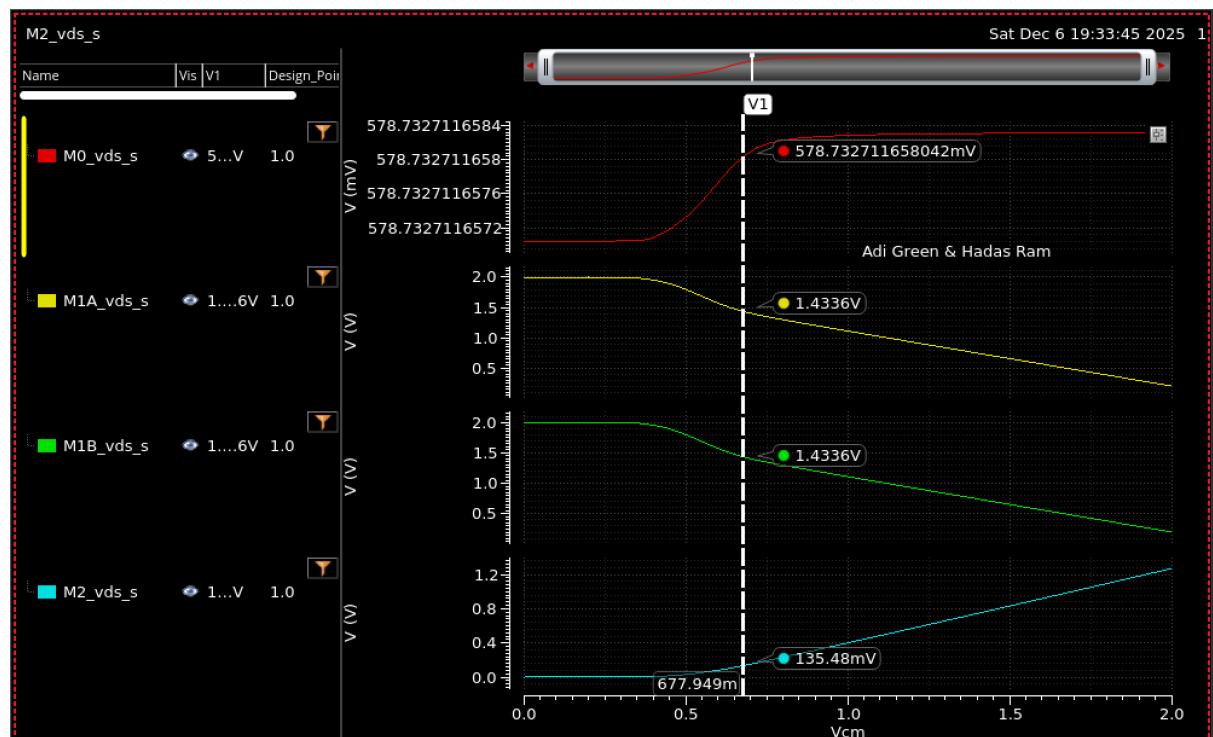


ה- h -param הוא 677.949mV עד סוף הריצה- המתח $\text{V}_{\text{cm}} = 677.949\text{mV}$ headroom.

הגרפים של V_{dsat} של הרכיבים כתלות במתה V_{cm} :

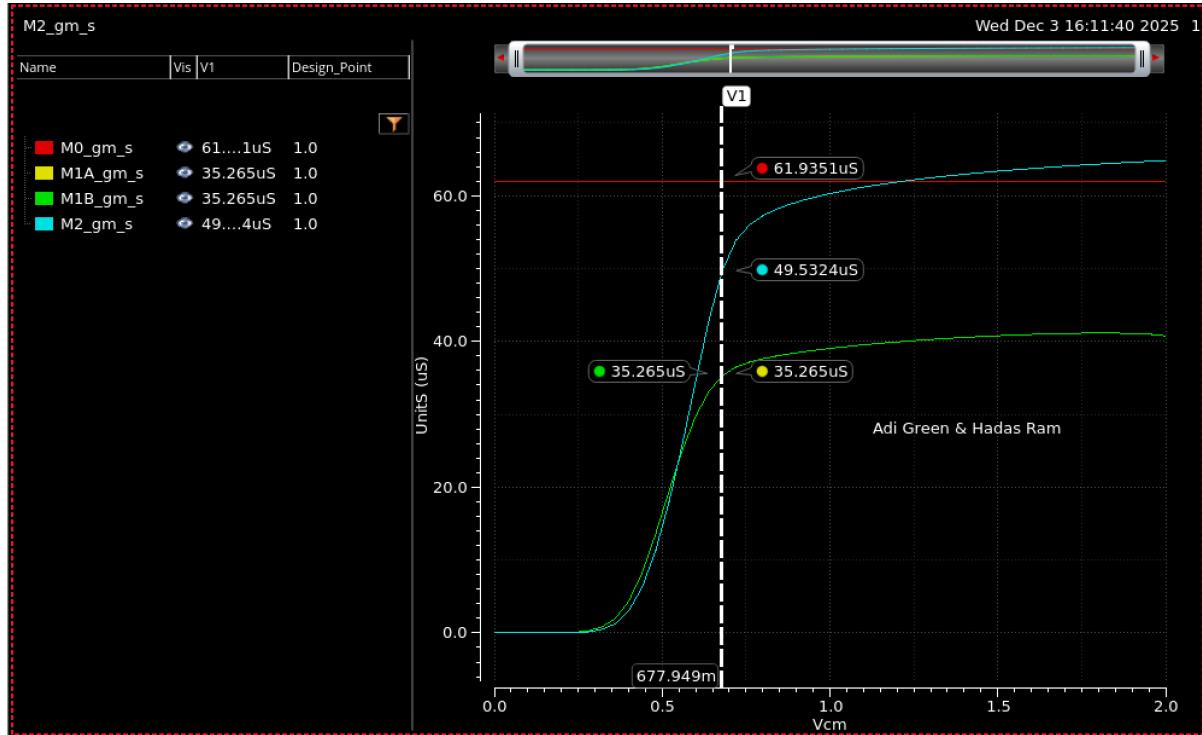


הגרפים של V_{ds} של הרכיבים כתלות במתה V_{cm} :



סימנו את הגבול של ה headroom שמצאנו.

גרפי ה- gm של הרכיבים כתלות במתה V_{cm} :



סימנו את הגבול של המרחב headroom שמצאנו.

כפי שלמדנו, כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה איז $gm \sim \sqrt{I}$

הזרם קבוע על $A \cdot 2.5uA$ لكن gm קבוע.

עבור הטרנזיסטורים M1A, M1B ניתן לראות כי gm זהה כי הם סימטריים.

רכיב M0 תמיד בסטורציה עם זרם קבוע ממקור הזרם ולכן gm קבוע על אותו ערך לכל אורך ההרצה.

נבחר $Vcm = 1.3V$.

3.3 - EVALUATE Av

כפי שאמרנו, בחרנו ב- $V_{cm} = 1.3V$

כעת אנחנו מוסיפים את המתח הדיפרנציאלי, וכן נגדיר d , וכך נקבל:

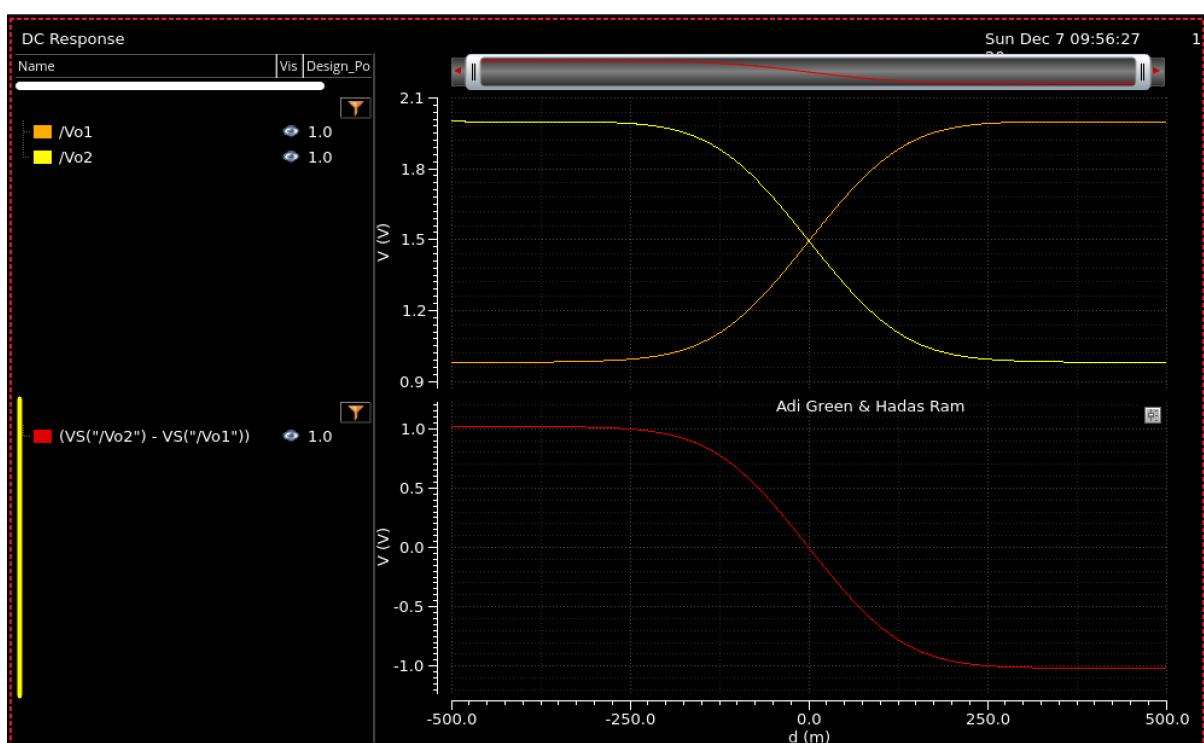
$$.2/V_{in1} = V_{cm} - d/2, V_{in2} = V_{cm} + d/2$$

$$\Delta V_{in} = V_{in2} - V_{in1} = V_{cm} + \frac{d}{2} - \left(V_{cm} - \frac{d}{2} \right) = d$$

על מנת שכאשר נחפש את ΔV_{in} , אז

כאשר d זהו המתח הדיפרנציאלי, עליו נורץ בסימולציה מ-0.5V עד 0.5V, כך שבמערכות השילוקים אנחנו מגדילים את המתח V_{in1} ומקטינים את המתח V_{in2} , ובמערכות החיבויים מגדילים את המתח V_{out2} ומקטינים את המתח V_{out1} .

גרף של ΔV_{out} כתלות ב- d :



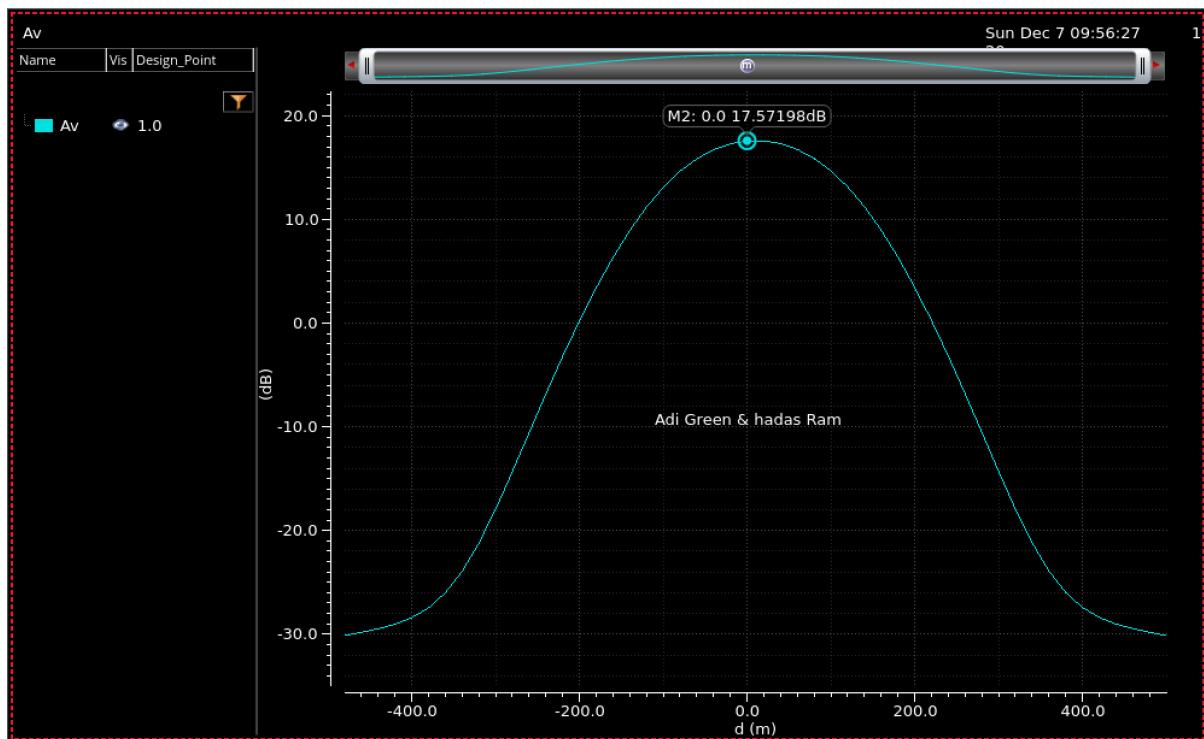
ניתן לראות שכאשר נגדיל את V_{in} נקבל ש- V_{out1} יקטן ו- V_{out2} יגדל, וכך הזרם באוטו ענף יגדל גם הוא. וכך הפתיחה ב- V_{out2} יקטן לפי חוק א Ohm, $I = V_{out2} / R_d$.
 וכן במערכות שליליות שבهم V_{in1} גדל אז V_{out1} קטן ו- V_{in2} קטן אז V_{out2} גדל, ובמערכות חיוביות - להיפך. בגרף של ההפרש של V_{out} , ניתן לראות כי בקצוות ההפרש הינו מקסימלי, ובו $d=0$ ההפרש הינו אפס כי זורם אותו מתח ב- V_{in} וכן גם V_{out} הוא סימטרי.

את Av מצאנו ע"י הנוסחה $Av = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}$, והמրנו ל-20dB.

ולכן ב-calculator חשבנו ע"י:

Av	expr	dB20(deriv((VS("/V_o2") - VS("/V_o1"))))

גרף של A_v כתלות ב- d :



ההגבר המקסימלי שקבלנו הוא $A_v = 17.57198 \text{dB}$.
נקבל את ההגבר המקסימלי ב $d = 0$ מאחר שבערך זה 2 הכניסות שוות ולקן הזרמים שוויים (וניתן לבצע קיפול למעגל).

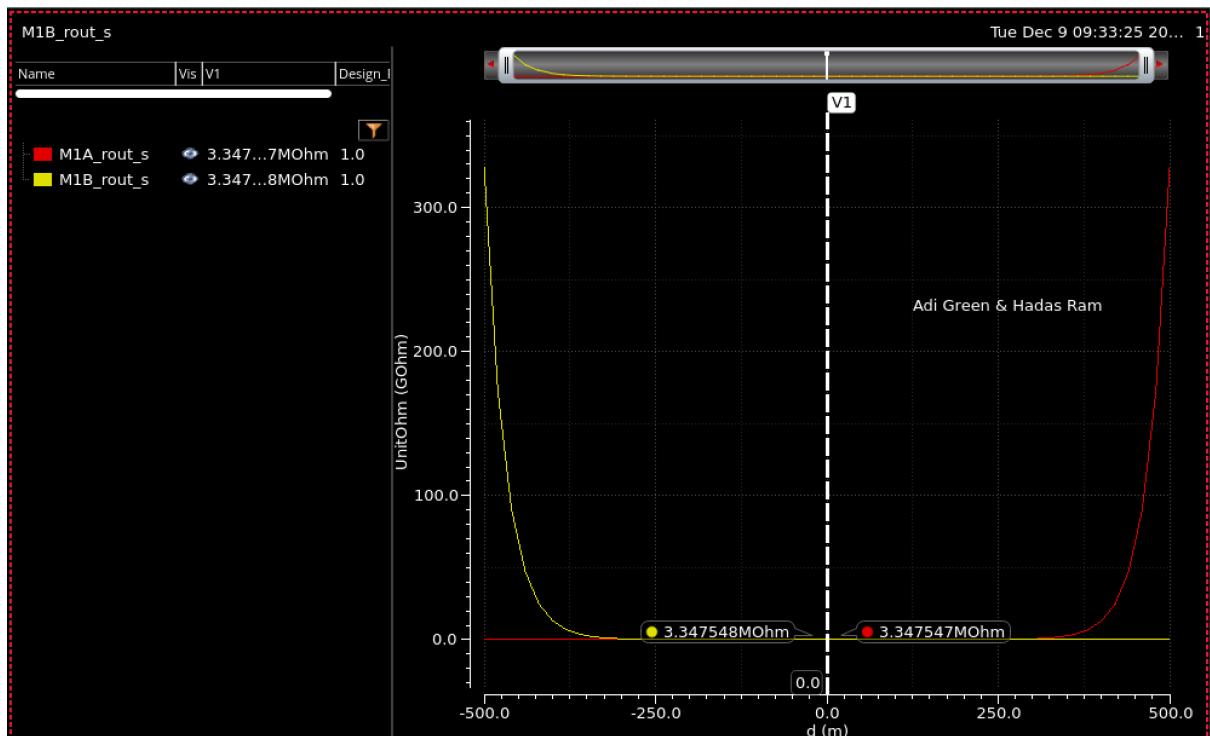
כאשר יש גניבת זרם המגבר לא מתנהג כמגבר דיפרנציאלי ולקן לא נקבל הגבר מקסימלי.
ובנוסף, ככל שהפרש הכניסה גדול (d גדול בערך מוחלט) אז הגבר יורד.

$$|A_V| = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = G_{m,\max} R_D$$

כעת, אנחנו רוצים לחשב את A_V לפי הנוסחה שלמדו בהרצאה:

נראה את התנודות של הטרנזיסטורים בمعالג גדול במידה סדרי גודל R_D וכיון שהם מחוברים במקביל ניתן להזניח את התנודות הטרנזיסטורים.

גרף של r_{out1} , r_{out2} כתלות ב- p :

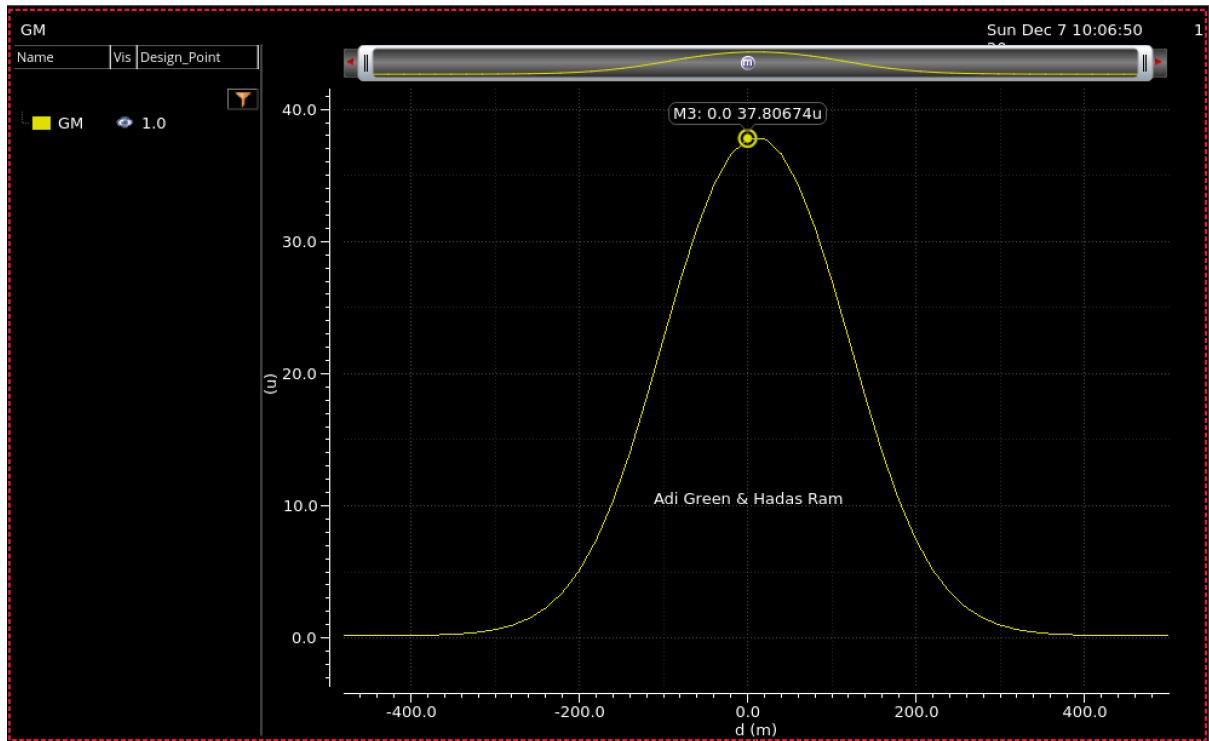


ניתן לראות התנודות יוצאות גדולות בסדר גודל של מגה-גיגה אומ.ם.

נמצא את GM :
 $GM = \frac{dI_{out}}{dV_{in}}$

GM	expr	deriv((IS("/M1B/D") - IS("/M1A/D"))))
----	------	---------------------------------------

גרף של GM כתלות ב-d:



נ קיבל מקסימום של $GM = p$, לאחר שזאת הנקודה בה קיבל את השיפוע המקסימלי של הפרש הזרמים (ניתן לראות זאת בגרף בהמשך), וכן כפי שאמרנו זאת הנקודה שבה קיבל את ההגבר המקסימלי. נחשב את ההגבר שהתקבל בנקודה זו:

$$GM = 37.80674u$$

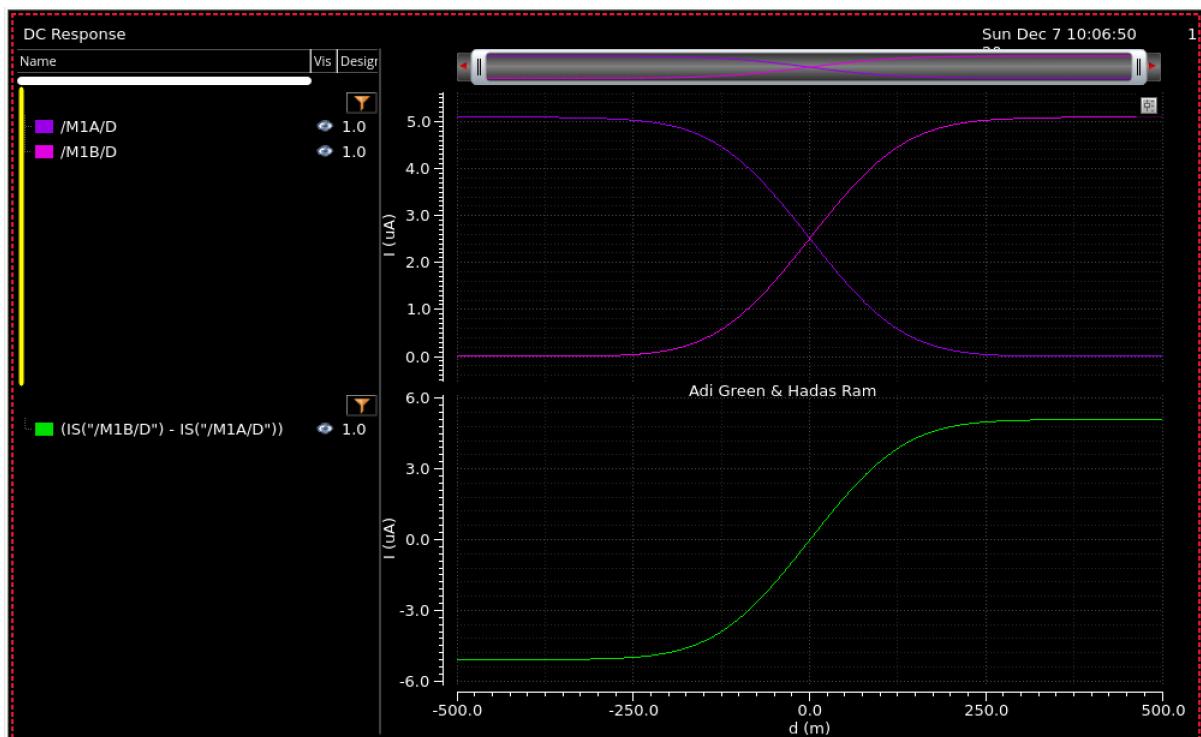
$$Av = -GM * Rout = -37.80674u * 200k = -7.561$$

$$|Av| = 7.561$$

$$20\log(|Av|) = 20 \log(7.561) = 17.571$$

ניתן לראות שהוא אותו הגבר שקיבלנו קודם דרך הנוסחה של Av .

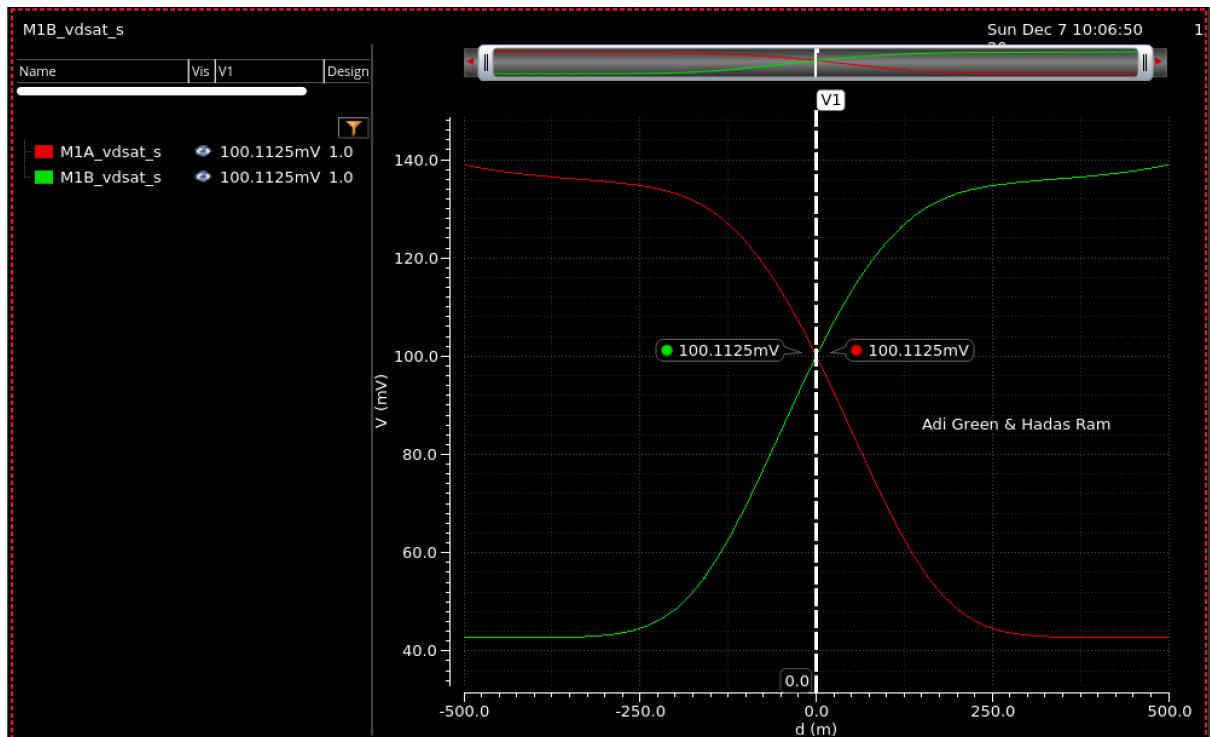
גרף של זרמים בכל ענף וההפרש ביניהם כתלות בפ:



ניתן לראות כי מתרחשת גניבת זרם.

בקצוות הגרף - טרנזיסטור אחד בעל הזרם המקסימלי של A_{n5} ולטרנזיסטור השני אין זרם בכלל. כפי שאמרנו, בערכים השליליים V_{in1} גדול ולכן ניתן לראות כי הזרם של M1A גדול, V_{in2} קטן ולכן ניתן לראות כי הזרם של M1B קטן עד אףו ויש גניבת זרם מלאה. בערכים חיוביים - קורה ההיפר. בהפרש הזרמים ניתן לראות כי ההפרש המקסימלי (בערך מוחלט) הוא A_{n5} בקצוות, ובו $I=0$ אין גניבת זרם בכלל, הזרמים שווים ולכן ההפרש הינו אףו. גרף ההפרש עולה כי הגדרנו אותו כ- $-I_2 - I_1$, כפי שאמרנו - ככל ש- I_2 גדל אז הזרם I_1 קטן.

גרף של V_{dsat} של M1A,M1B כתלות ב-d:



כפי שלמדנו בהרצאה, כאשר $V=0$ אזי זרם של כל טרנזיסטור הוא $I_{SS}/2$ ולכן מתקיים:

$$(V_{GS} - V_{TH})_{1,2} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{2 * k' \frac{W}{L}}}$$

$$\Delta V_{in1} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{k' \frac{W}{L}}}$$

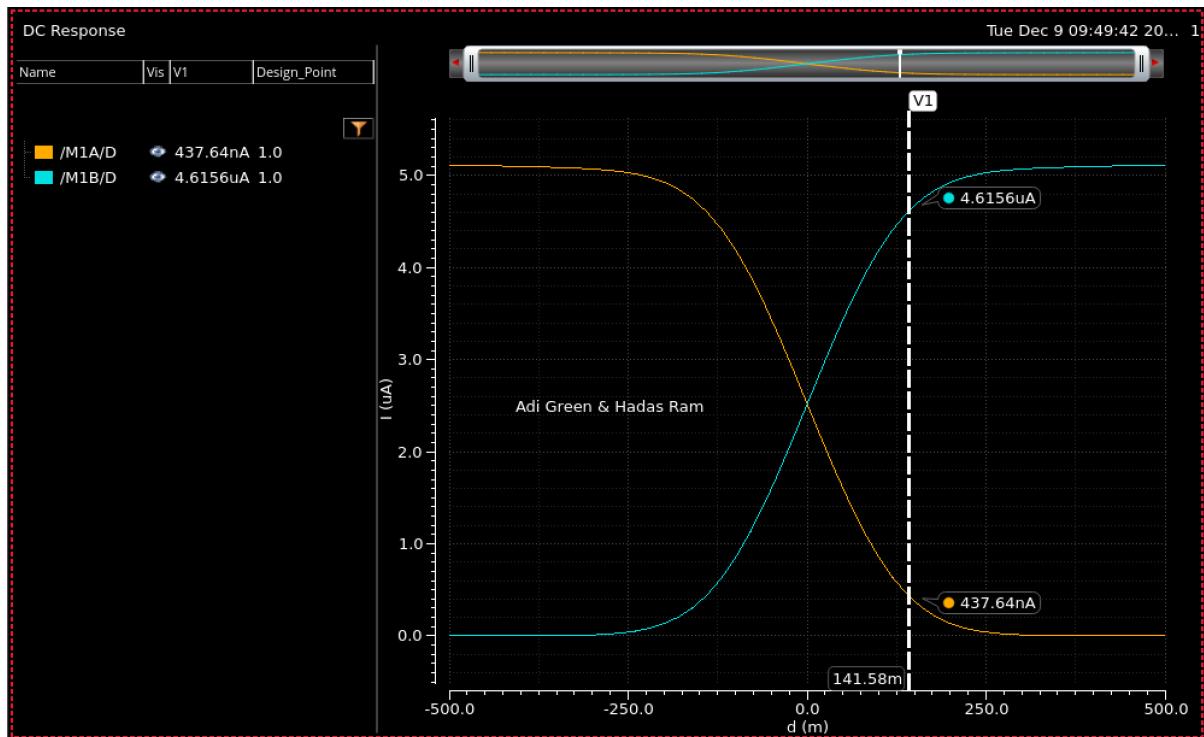
-זהו מתח הכניסה הדיפרנציאלי שבו לטרנזיסטור אחד יש את הזרם I_{SS}

ולטרנזיסטור השני אין זרם.

$$(V_{GS} - V_{TH})_{1,2} = \frac{\Delta V_{in1}}{\sqrt{2}}$$

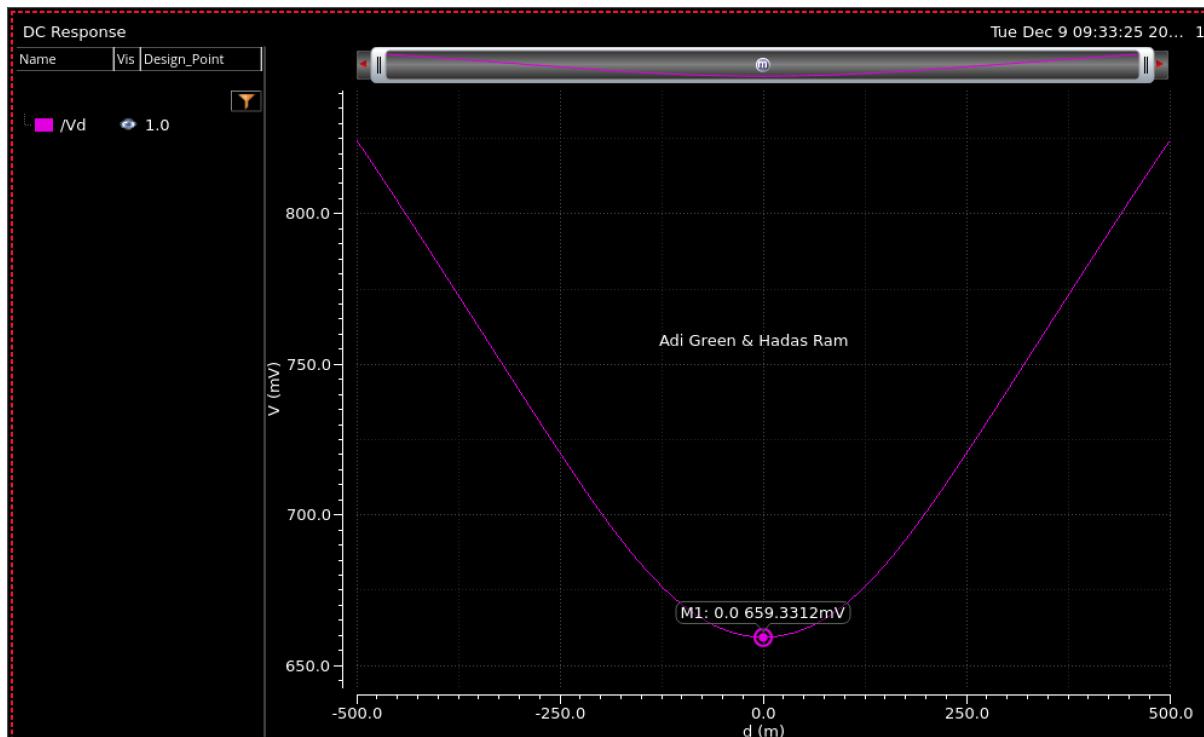
ואז נקבל שהיחס הוא $100.1125mV$ הינו V_{dsat} מתח Ci בנקודת $d=0$, המתח V_{dsat} הינו $\Delta V_{in} = \sqrt{2} * V_{DSAT} = \sqrt{2} * 100.1125mV = 141.58mV$ ולכן:

גרף הזרמים בשני הענפים כתלות ב-d:



קיבלנו שעבור $V = 1.0$, הזרם בטרנזיסטור M1B הוא 4.6156nA והזרם בטרנזיסטור M1A הוא 437.64nA , כלומר מתרחשת גיבוב זרם של 87.58% .

גרף של V_d (המתח מעל טרנזיסטור M2, נקודה ק בהרצאה) כתלות ב-d:



מתוך זה שומר על טרנזיסטור M2 שייהי בזרם קבוע אז. מתוך זה אינו אמור להשתנות וכפי שניתן לראות בגרף השני הוא קטן ונמצא בלח. השינוי הקטן נובע מאפקט התקוצרות התעללה. כיוון שהמתה בנקודה זו נחשב קבוע אז במודל אותו קטן בנקודה זו נקלט אדמה וירטואלית.

EXPLANATIONS AND DISCUSSION:

במעבדה זו למדנו על מעגל Differential Amplifier המטרה של המעגל היא שה Common Mode ניתן לנז סטורייה בטרנזיסטורים ונוכל להכניס כניסה דיפרנציאלית קטנה כדי שבחזקה Small Signal נקלט הגבר ביציאה. כאשר נכנסים למעגל רעשיהם ובמידה והם סימטריים בזקנות ΔV_{in} הם מבטלים אחד את השני.

נאלונו לבחור במתה V_{cm} , בבחירה זו יש trade-off בין הגבר גובה Av (בעזרת בחירת R_d גובה), לבין בחירת headroom טוב (ע"י R_d נמוך). חישבנו את הגבר וקיבלונו בטוווח הרצוי. במעבדה ראיינו כי אכן ההתנגדות הפנימית של הטרנזיסטורים מאד גדולה ולכן בחיבור במקביל ניתן להזניח אותה יחסית ל R_d והגבר נקבע לפיו. כאשר הוספנו את המתה הדיפרנציאלי ראיינו כי מתרחשת גניבת זרם והגבר משתנה כתלות בפ. קיבלונו הגבר מקסימלי ב- $-0=p$ ככלומר נקלט הגבר מקסימלי כאשר הזרמים בשני הענפים שוים כי הכניסות זהות. מצאנו מאייזה מתה מתרחשת גניבת זרם לפי הנוסחאות של V_{dsat} של מדרנו וחישבנו אותן.