

Simulation #3

Differential to Differential Amp

מגישות:

עדי גרין 324965946

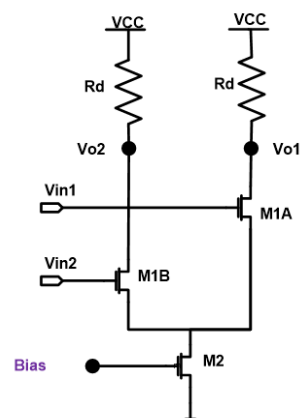
הדס רם 214068843

תאריך הגשה:

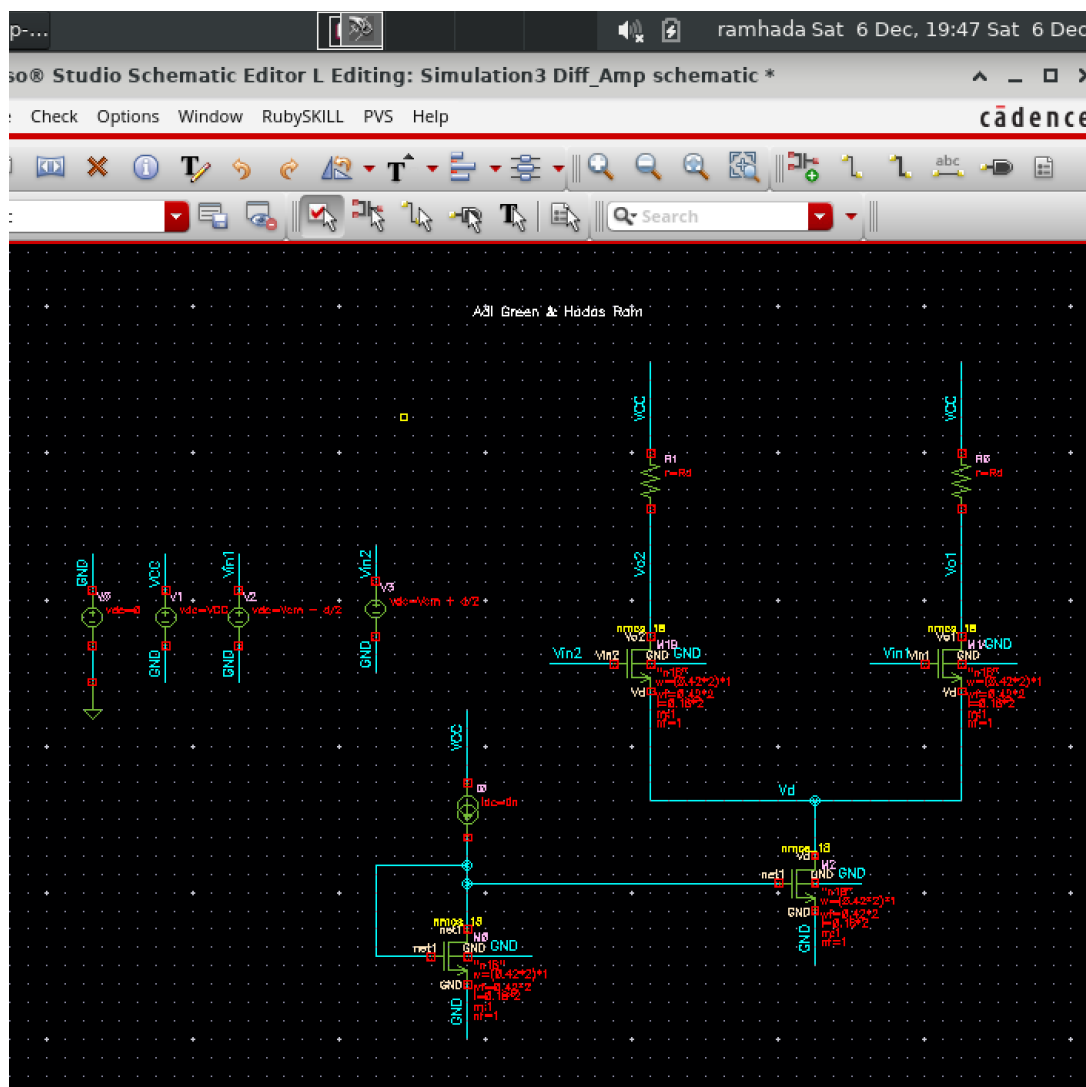
09.12.2025

Diff Amp Gm-R Stages:

התבוננו לבנות את המעגל:

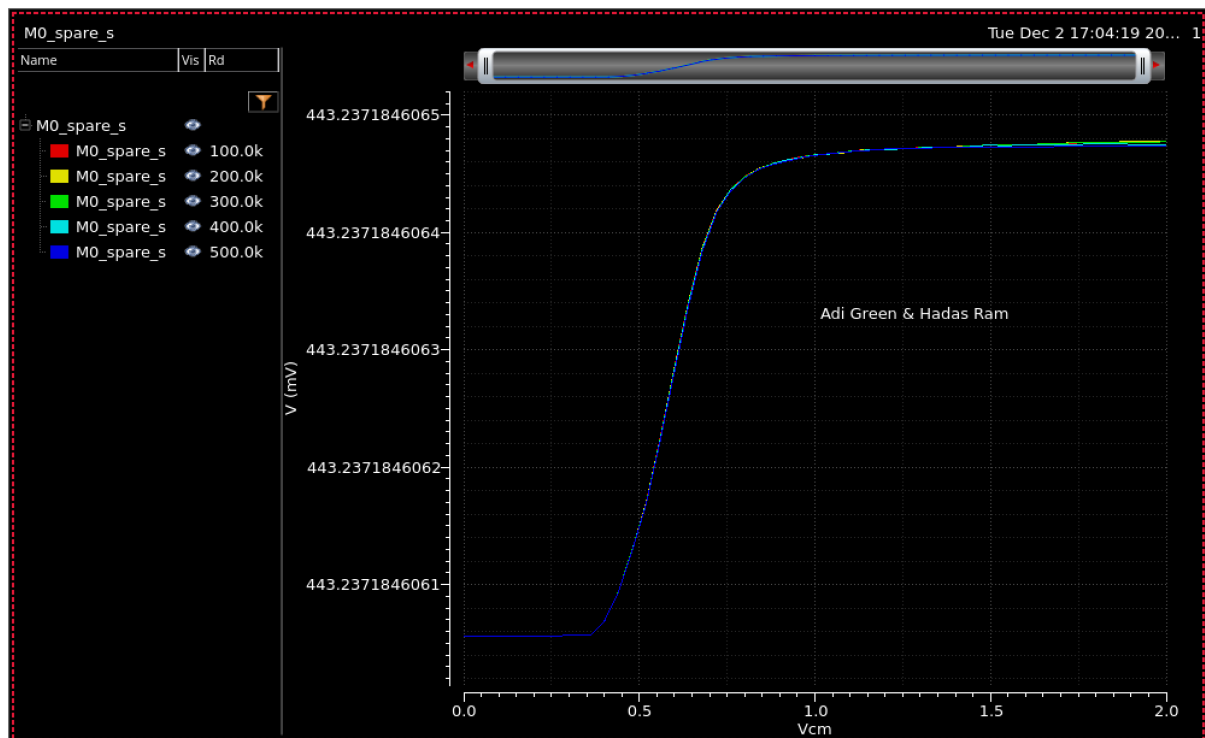


הגדרנו לרכיב 2M את ה-"Current Mirror". הגדרנו מתח V_{cm} למתחים V_{in1} , V_{in2} .
 הגדרנו עבור כל הטרנזיסטורים $W = 2 \cdot 0.42 = 0.84$, $L = 2 \cdot 0.18 = 0.36$.
 בחרנו $I_{bias} = 5\mu A$. המטרה של הCurrent Mirror היא של טרנזיסטור M2 תהיה מראת זרם כלומר זרם של $5\mu A$ (בגלל אפקט התקצרות התעלה הזרם לא מדויק).



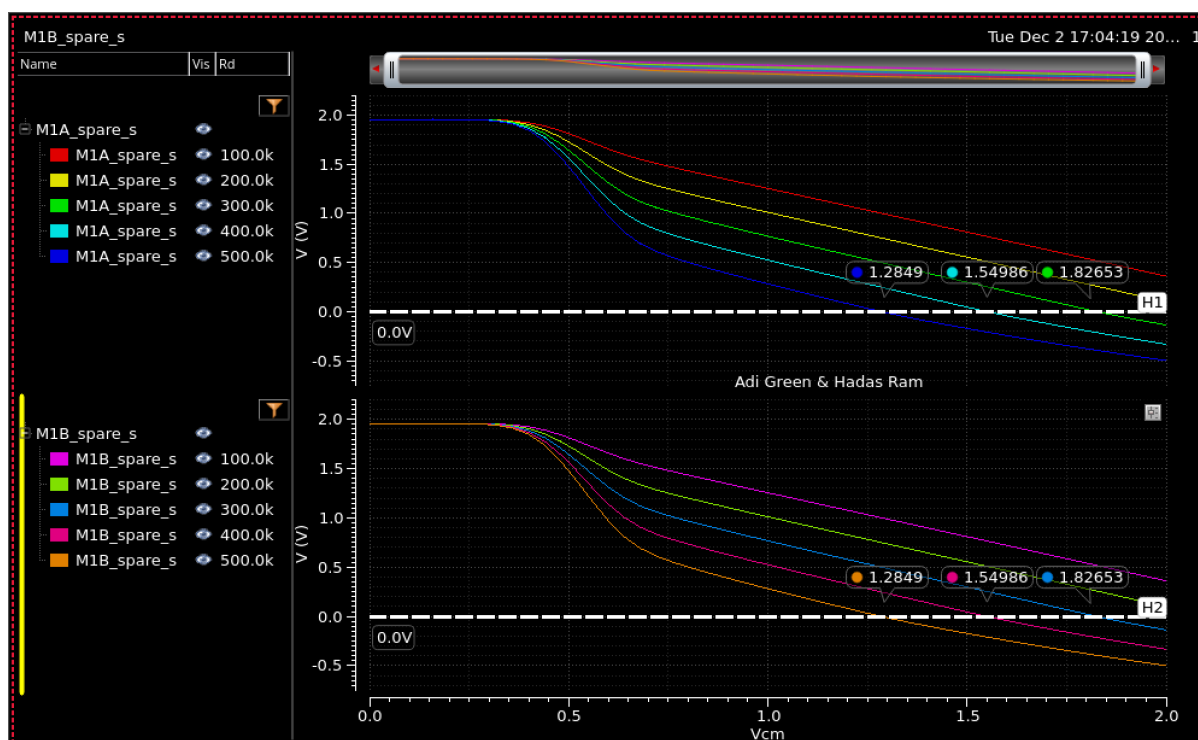
3.1 – SELECT LOAD

גרף ה-spare של רכיב 0M כתלות במתח Vcm:

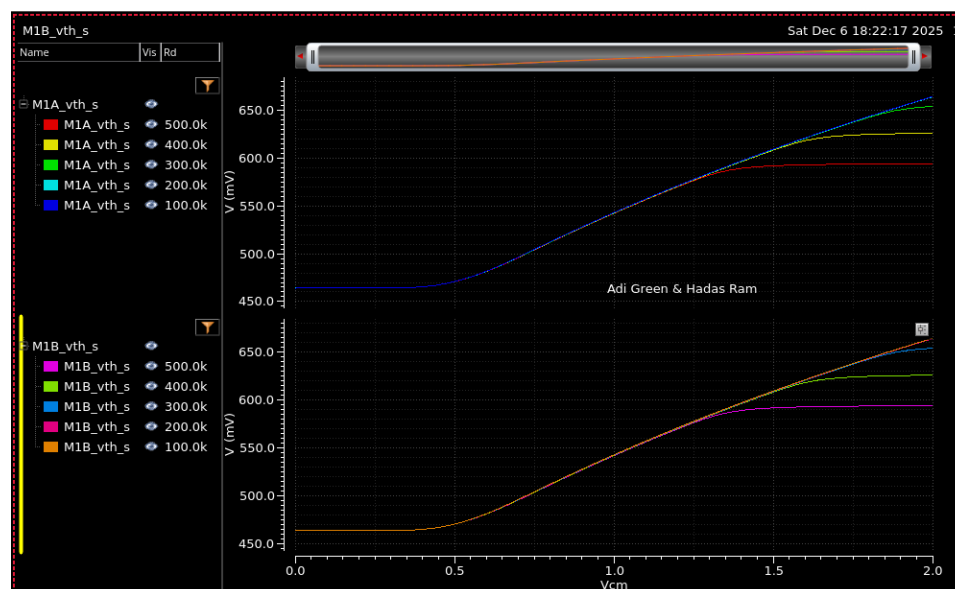


ניתן לראות שעבור כל ההתנגדויות הנ"ל הטרנזיסטור M0 נמצא בסטורציה. רכיב זה בחיבור דיודי ולכן תמיד נמצא בסטורציה.

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

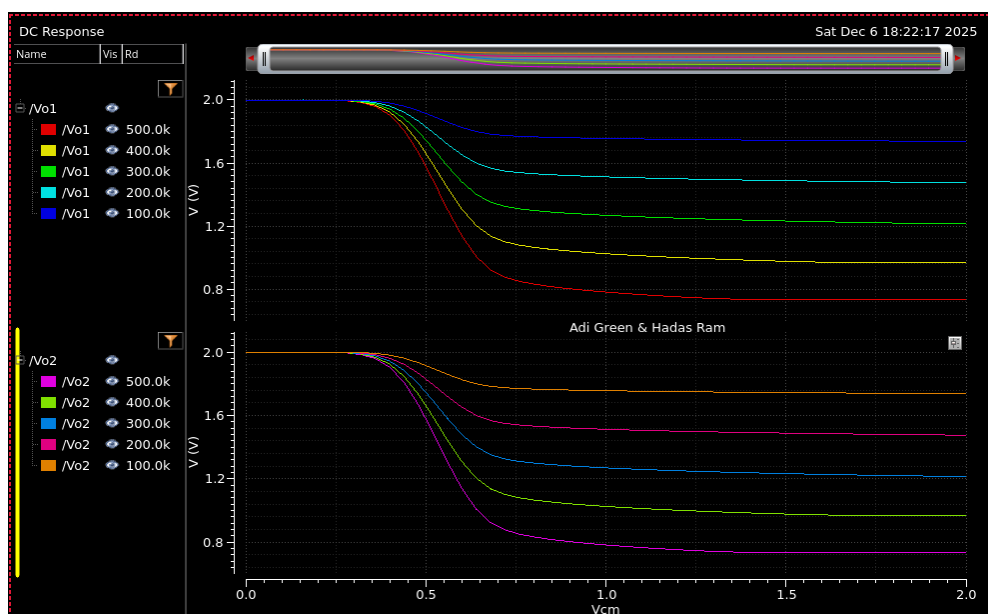


כיוון שכל המעגל סימטרי, ניתן לראות כי גרפי sparen של הרכיבים זהה. ככל שההתנגדות קטנה יותר, יוצאים מסטרוציה עבור ערך V_{cm} גדול יותר, מאחר שפחות מתח נופל על הנגד ולכן V_{out} גדול יותר ולכן V_{ds} של הטרנזיסטורים גדול יותר, אז יש יותר טווח למתח V_{gs} כי עבור סטרוציה מתקיים $V_{ds} > V_{cm} - V_{th}$.
 כמו כן, $s_{pare} = V_{ds} - V_{dsat} = V_{out} - V_d - V_{cm} + V_d - V_{th} = V_{out} - V_{cm} - V_{th}$, כלל V_{cm} -ש גדל אז ה- s_{pare} קטן. לגבי V_{th} הוא משתנה מעט אך לא משמעותי (bulk effect), והמתח V_{out} נשאר קבוע כי אנחנו בסימולציית DC וכאשר כל הטרנזיסטורים בסטרוציה.



ניתן לראות שהשינוי קטן מאוד ב V_{th} .

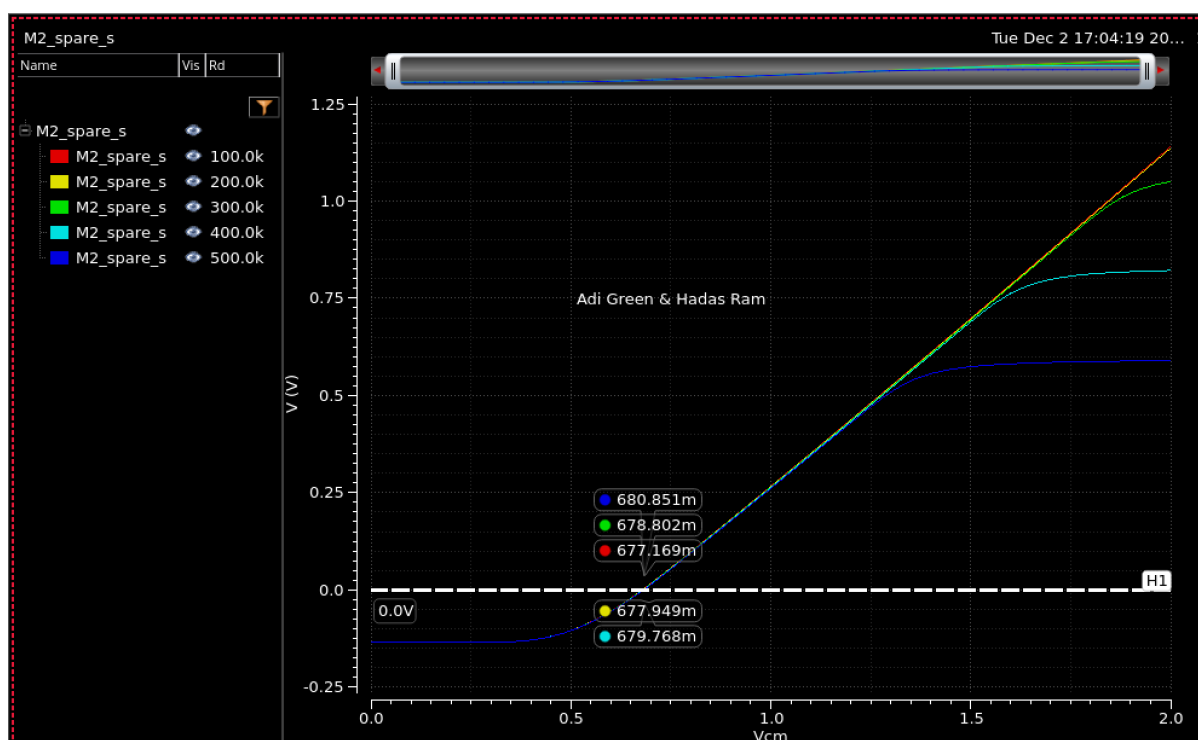
גרף של V_{o1} , V_{o2} כתלות ב V_{cm} :



ניתן לראות שהמתח קבוע כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה (ניתן לראות את הטווחים מהגרפים של spares שהוצאנו).

כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה, נופל זרם של $2.5\mu A$ על כל ענף ולכן לפי חוק אוהם, המתח שנופל על הנגד כאשר הזרם הוא קבוע הוא אותו מתח ולכן V_{o1} V_{o2} קבועים ושווים (כי זו אותה התנגדות ומתחים). בעזרת ה $Current Mirror$ יש זרם של $5\mu A$ על טרנזיסטור M2 (לא מדויק בגלל אפקט התקצרות התעלה), וכיוון שיש שני ענפים והזרמים בהם שווים נקבל $2.5\mu A$.

גרף ה-spare של רכיב M2 כתלות במתח Vcm:



כפי שניתן לראות, ככל שהמתח Vcm עולה אז ה-spare של הרכיב עולה.

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

המתח Vm2g שזהו המתח ב-gate של רכיב 2M לא משתנה, זהו המתח מה-Current Mirror שמושפע מהזרם שאנו מכניסים, Vth נשאר קבוע (אין bulk effect), וב-DC המתח Vd משתנה כאשר אנו משנים את

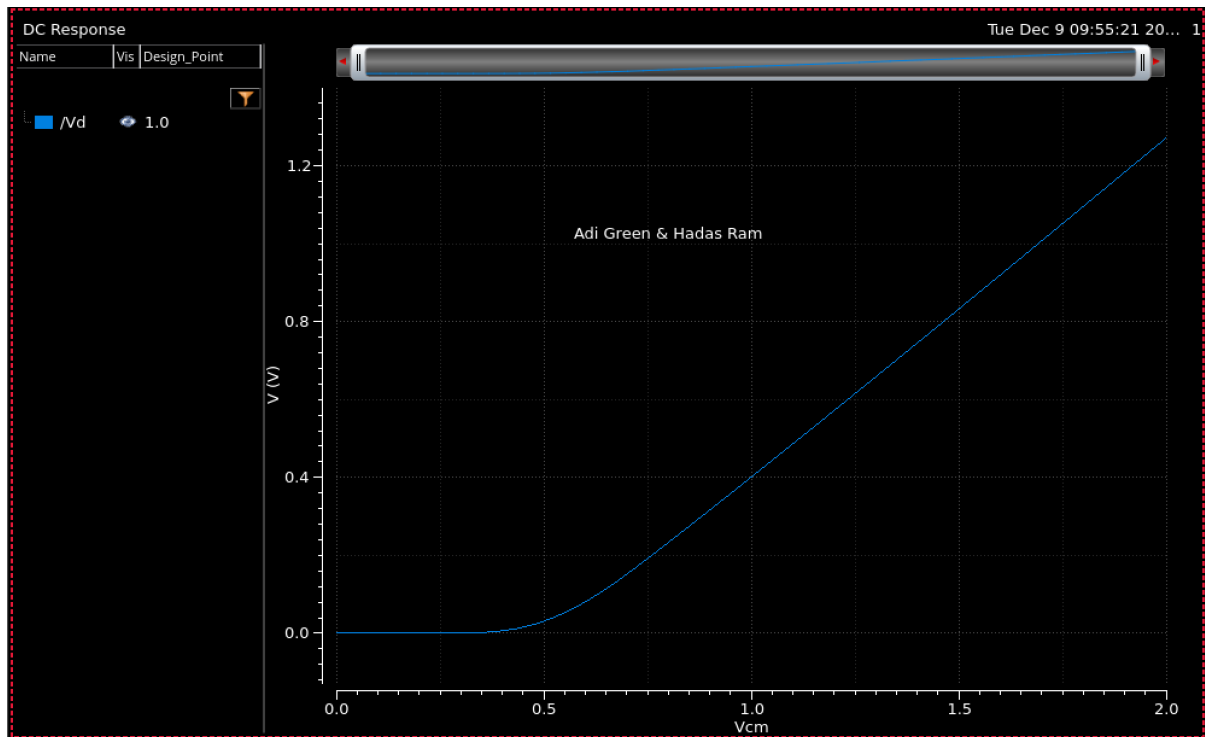
$$I_d = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2$$

המתח Vcm, כי לפי הנוסחה

כפי שאמרנו בסטוציה נופל זרם של 2.5uA על הטרנזיסטורים M1A, M1B, כאשר אנו מגדילים את Vg שהוא Vcm אז גם המתח של ה-Source שהוא Vd חייב לעלות על מנת לשמור על זרם קבוע, ולפי המשוואה למעלה- גם ה-spare חייב לעלות.

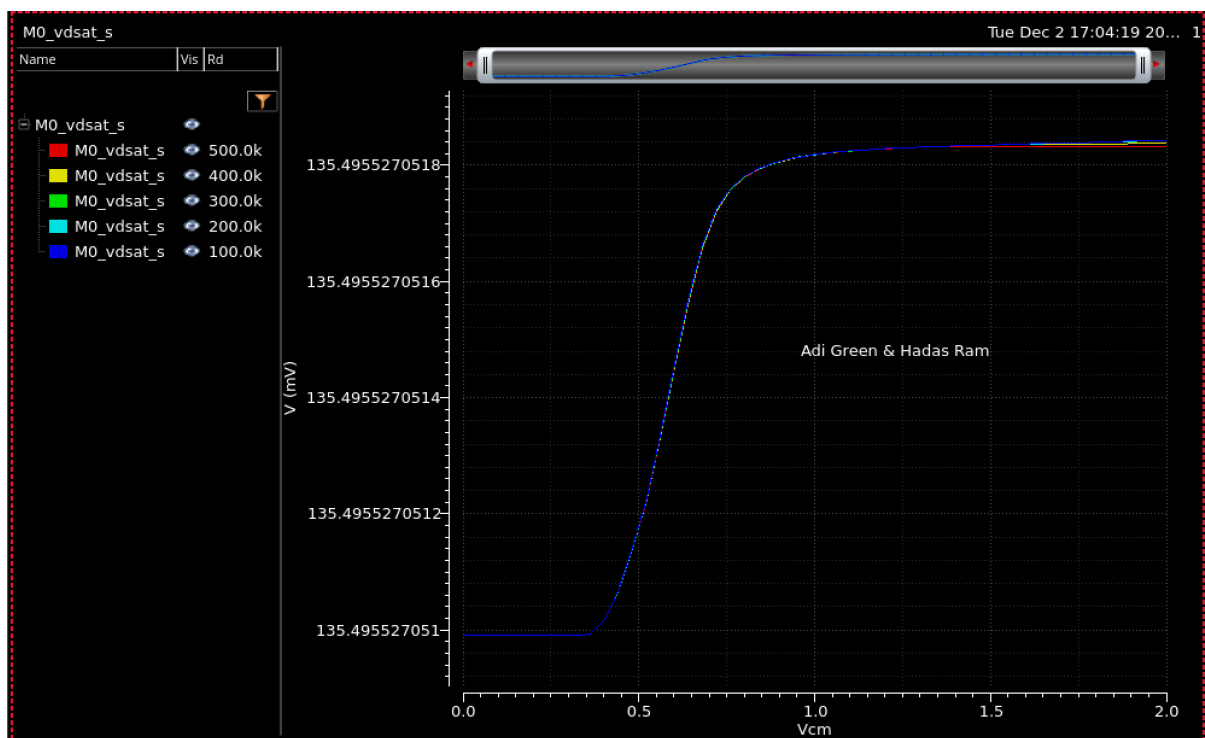
ניתן לראות שבערך ממתח 1.5v ב-Vcm, ההתנהגות בחלק מהנגדים אינה ממשיכה להיות לינארית מכיוון שהטרנזיסטורים M1A, M1B יוצאים מסטוציה כפי שניתן לראות בגרפים של ה-spare שהוצאנו למעלה.

גרף של המתח V_d בתלות ב- V_{cm} :



ניתן לראות שהמתח V_d עולה בצורה ליניארית ביחס ל- V_{cm} כפי שהסברנו.

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

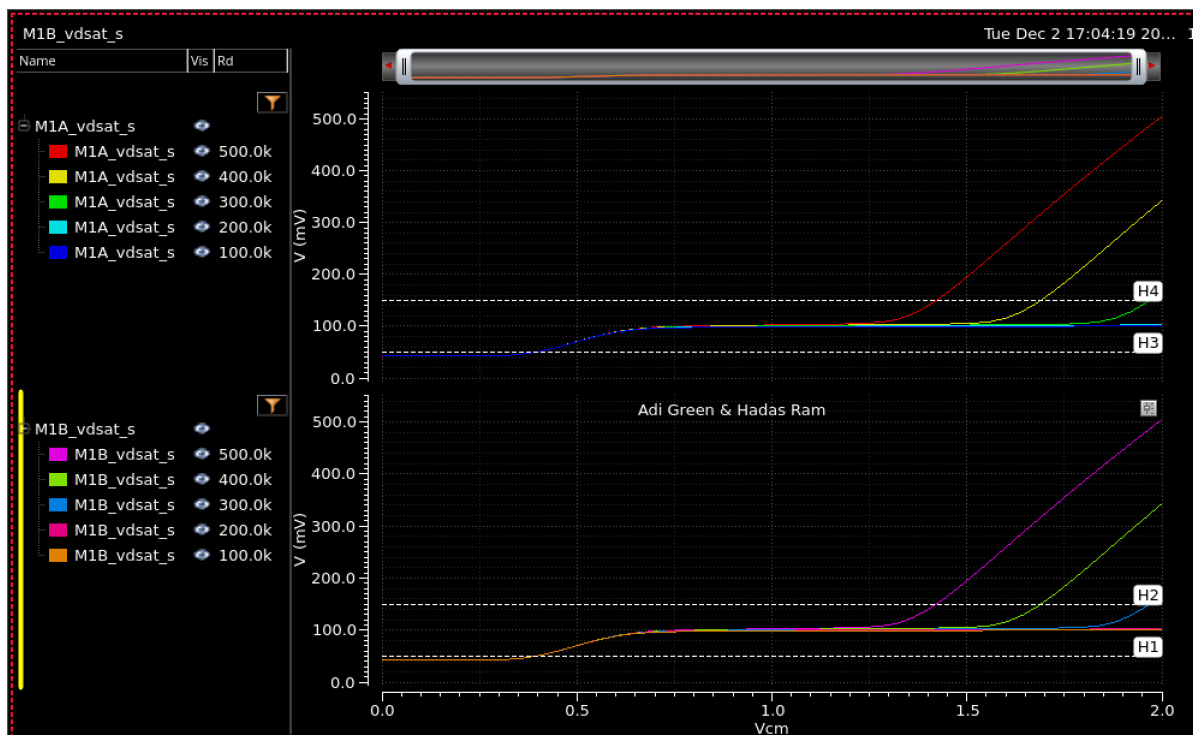


ניתן לראות כי ערכי ה- V_{dsat} נמצאים בטווח בין 80-150mV.

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

ברכיב 0M המתח V_{th} קבוע (אין bulk effect), ובנוסף המתח V_{gs} לא משתנה מאחר שהוא נקבע ע"י המקור זרם שהכנסנו, ואכן ניתן לראות כי V_{dsat} לא משתנה, (השינוי הוא ברמת המספר ה-9 אחרי הנקודה העשרונית).

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

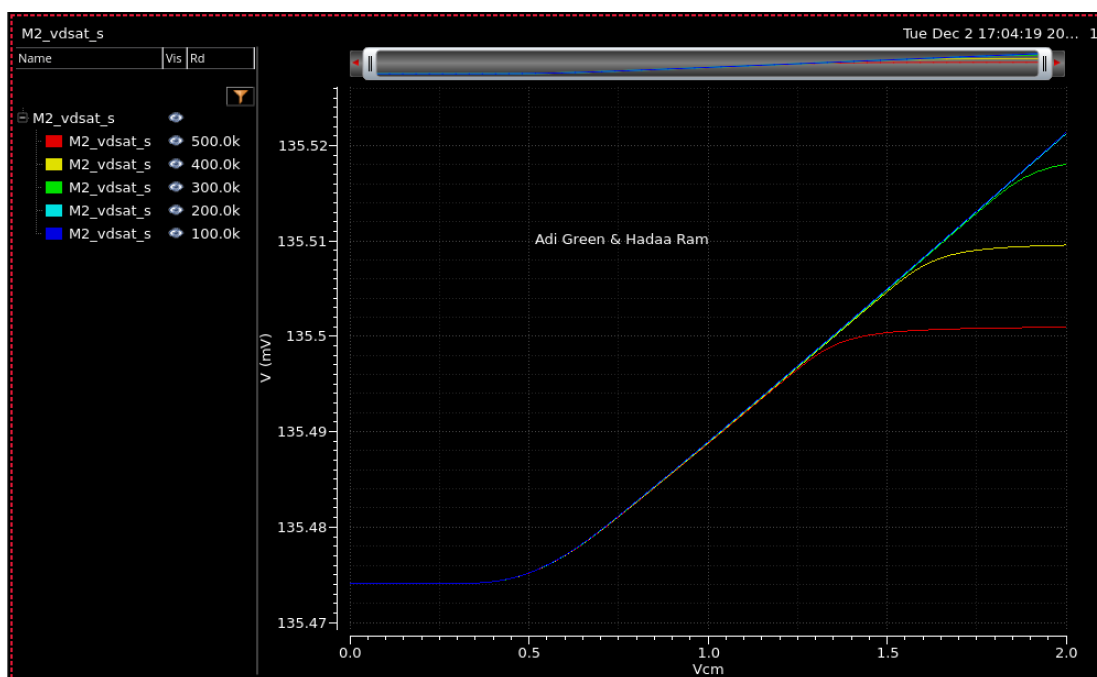


סימנו את הטווח הרצוי 80-150mV.

כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה אז הזרם לפי הנוסחה $I_d \sim (V_{dsat})^2$ כפי שאמרנו, הזרם קבוע ולכן גם V_{dsat} קבוע בתחום זה.

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

גרף ה-Vdsat של M2 כתלות במתח Vcm:



ניתן לראות כי ערכי ה-Vdsat נמצאים בטווח בין 80-150mV.

כאשר כל הטרנזיסטורים בסטורציה אז הזרם לפי הנוסחה $I_d \sim (V_{dsat})^2$ כפי שאמרנו, הזרם קבוע ולכן גם Vdsat 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 שההגבר גדול יותר מאחר שהנוסחה שלמדנו להגבר היא $A_v = -g_m \cdot R$.

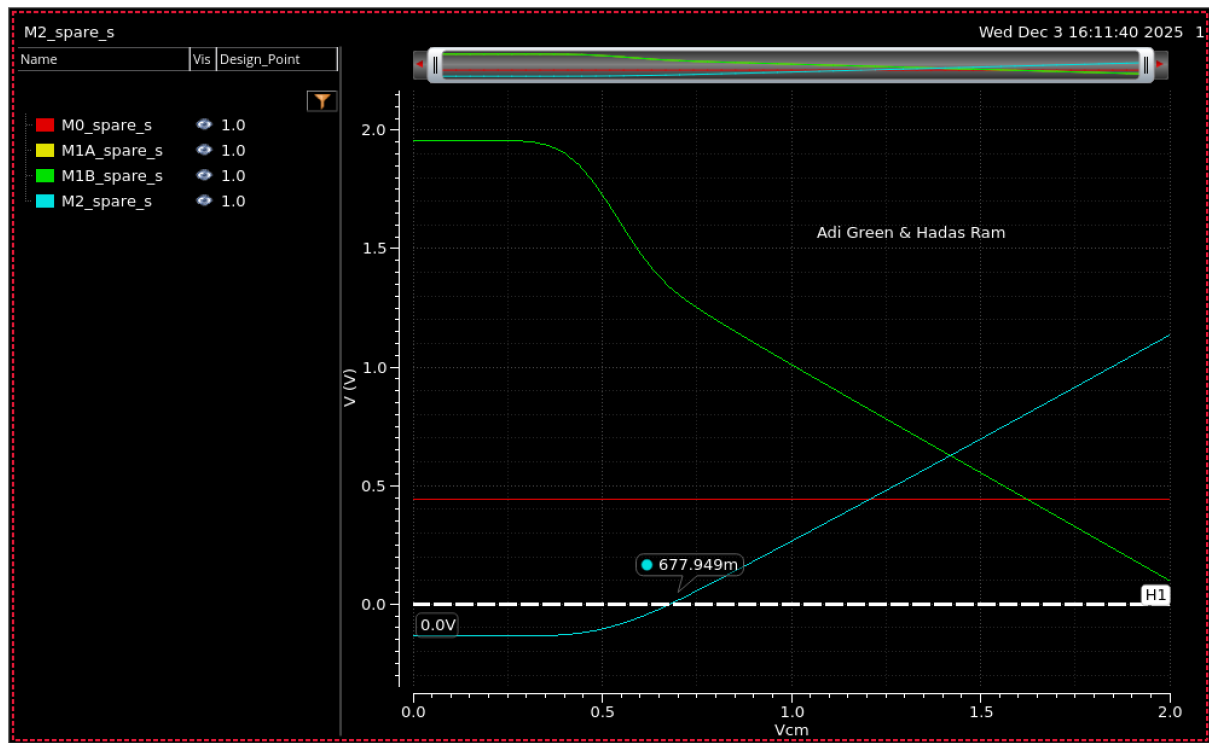
אבל כפי שראינו, ככל שההתנגדות גדולה כך ה-headroom קטן יותר, ניתן לראות לפי הגרפים של ה-spare.

ולכן בחרנו את ההתנגדות 200kOhm.

3.2 – INPUT COMMON MODE

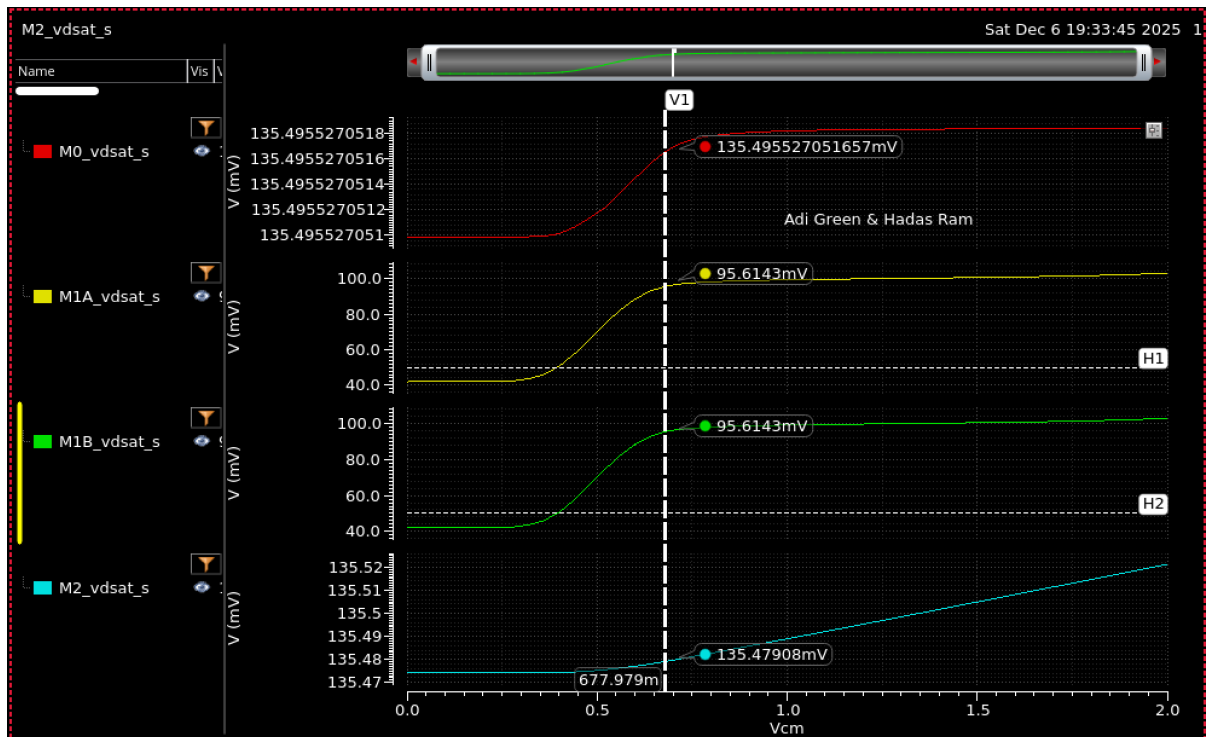
נראה את הגרפים שכבר הוצאנו, אך עבור $200k\Omega$ בלבד.

גרפי ה-spare של הרכיבים כתלות במתח V_{cm} , מגרף זה נוציא את ה-headroom:

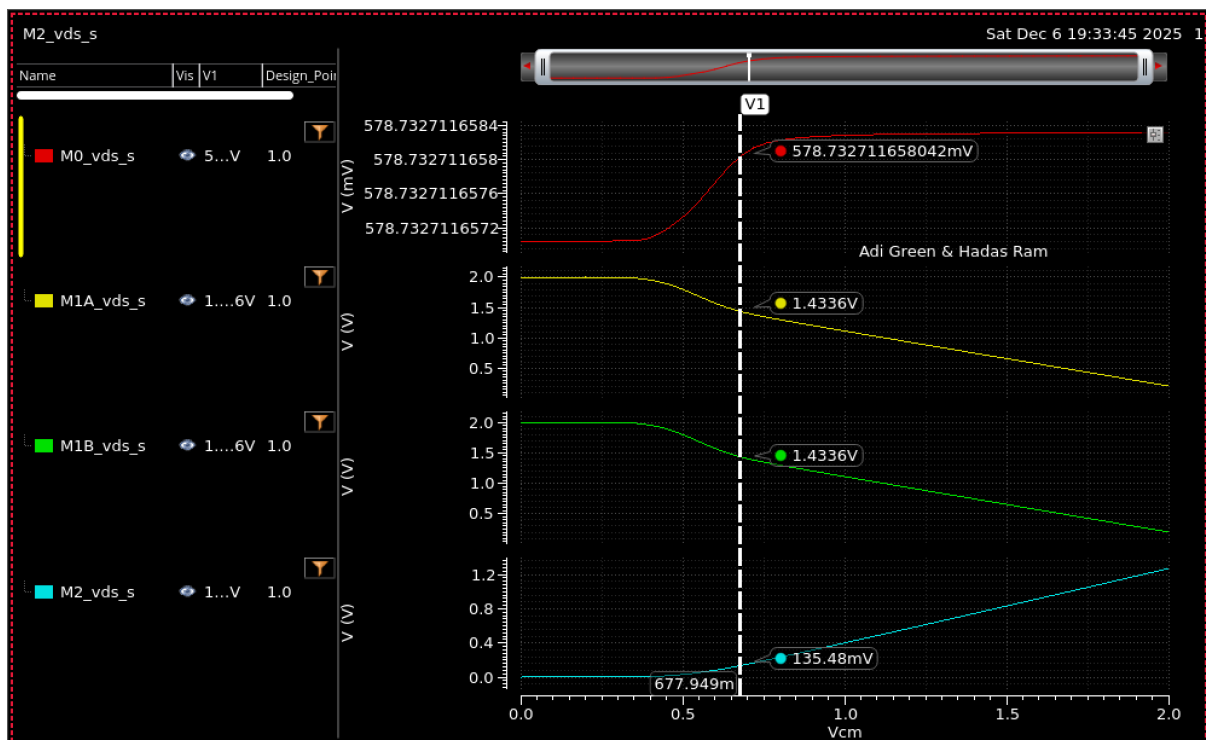


ה- headroom הוא מ- $V_{cm} = 677.949mV$ עד סוף הריצה- המתח 2V.

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

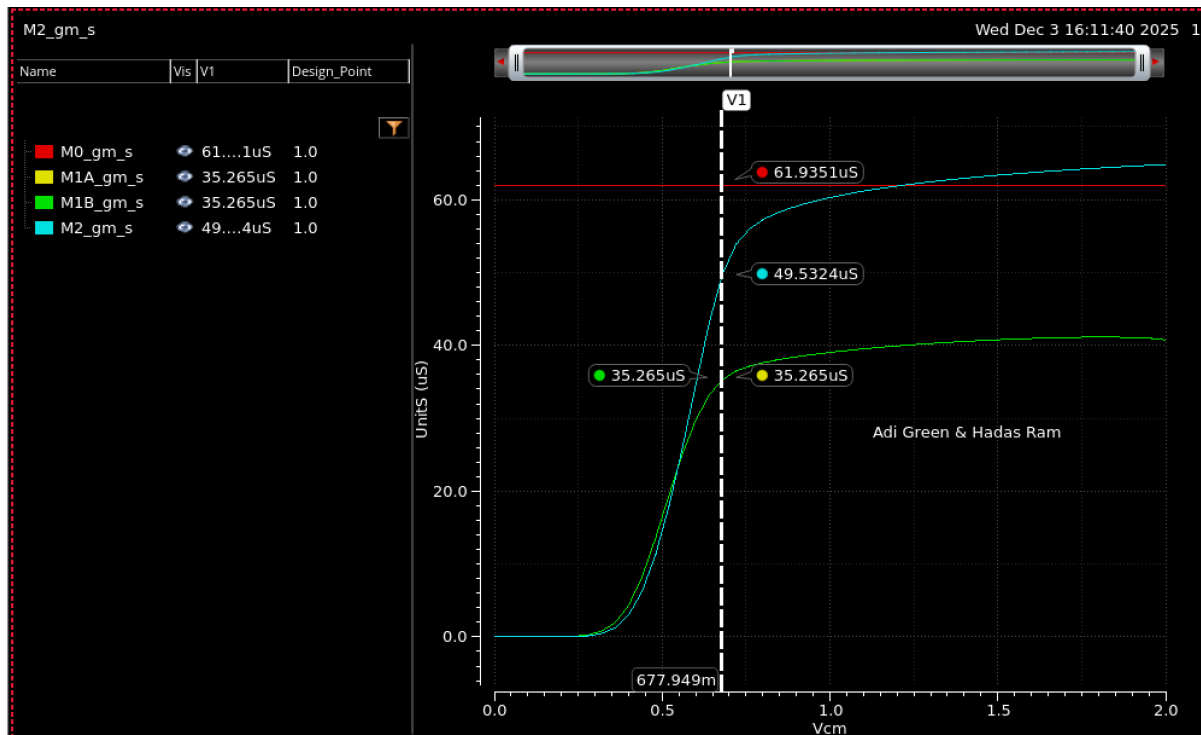


הגרפים של V_{ds} של הרכיבים כתלות במתח V_{cm} :



סימנו את הגבול של ה headroom שמצאנו.

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



סימנו את הגבול של headroom שמצאנו.

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

הזרם קבוע על $2.5\mu A$ לכן 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 ב $V_{cm}=1.3V$.

3.3 - EVALUATE A_v

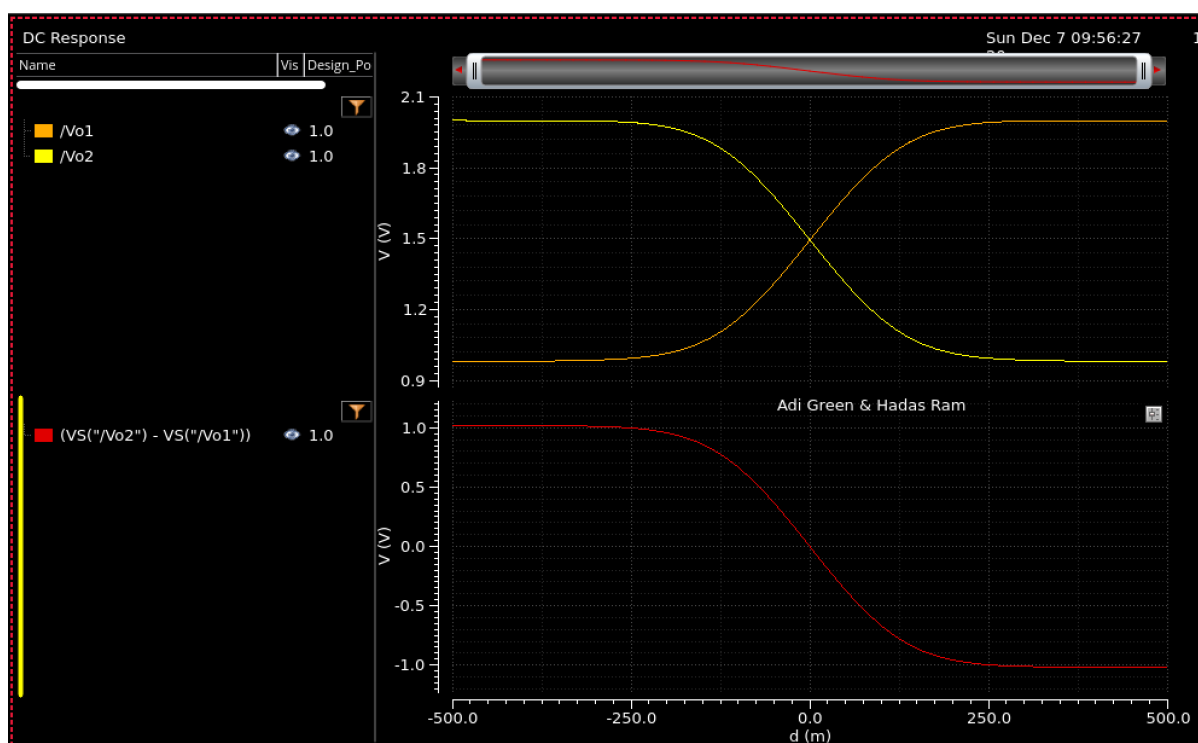
כפי שאמרנו, בחרנו $V_{cm}=1.3V$.

כעת אנחנו מוסיפים את המתח הדיפרנציאלי, ולכן נגדיר $V_{in2} = V_{cm} + d$, $V_{in1} = V_{cm} - d/2$.

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

על מנת שכאשר נחפש את ΔV_{in} , כאשר d זהו המתח הדיפרנציאלי שעליו נרוץ בסימולציה מ $-0.5V$ עד $0.5V$, כך שבערכים השליליים אנחנו מגדילים את המתח V_{in1} ומקטינים את המתח V_{in2} , ובערכים החיוביים מגדילים את המתח V_{in2} ומקטינים את המתח V_{in1} .

גרף של ΔV_{out} , V_{out1} , V_{out2} כתלות ב- d :



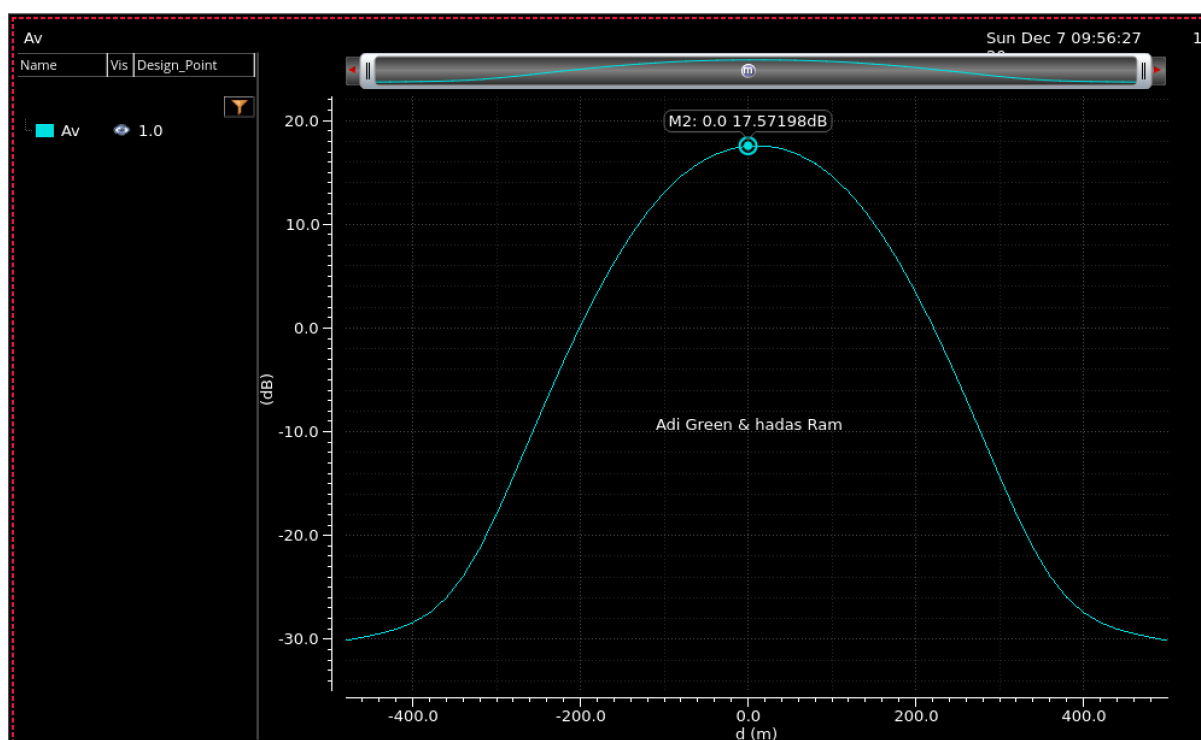
ניתן לראות שכאשר נגדיל את V_{in} נקבל ש- V_{gs} על אותו טרנזיסטור יגדל ולכן הזרם באותו ענף יגדל גם הוא ולכן המתח V_{out} יקטן לפי חוק אוהם, $V_{out} = V_{DD} - R_d \cdot I$.
ואכן בערכים שליליים שבהם V_{in1} גדל אז V_{out1} קטן ו- V_{in2} קטן אז V_{out2} גדל, ובערכים חיוביים- להיפך.
בגרף של ההפרש של V_{out} , ניתן לראות כי בקצוות ההפרש הינו מקסימלי, וב- $d=0$ ההפרש הינו אפס כי זורם אותו מתח ב- V_{in} ולכן גם V_{out} הוא סימטרי.

$$A_v = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \quad \text{את } A_v \text{ מצאנו ע"י הנוסחה, והמרנו ל} 20\text{dB},$$

ולכן ב-calculator חשבנו ע"י:

A_v	expr	$\text{dB20}(\text{deriv}((V_S("/Vo2") - V_S("/Vo1"))))$
-------	------	--

גרף של A_v כתלות ב- d :



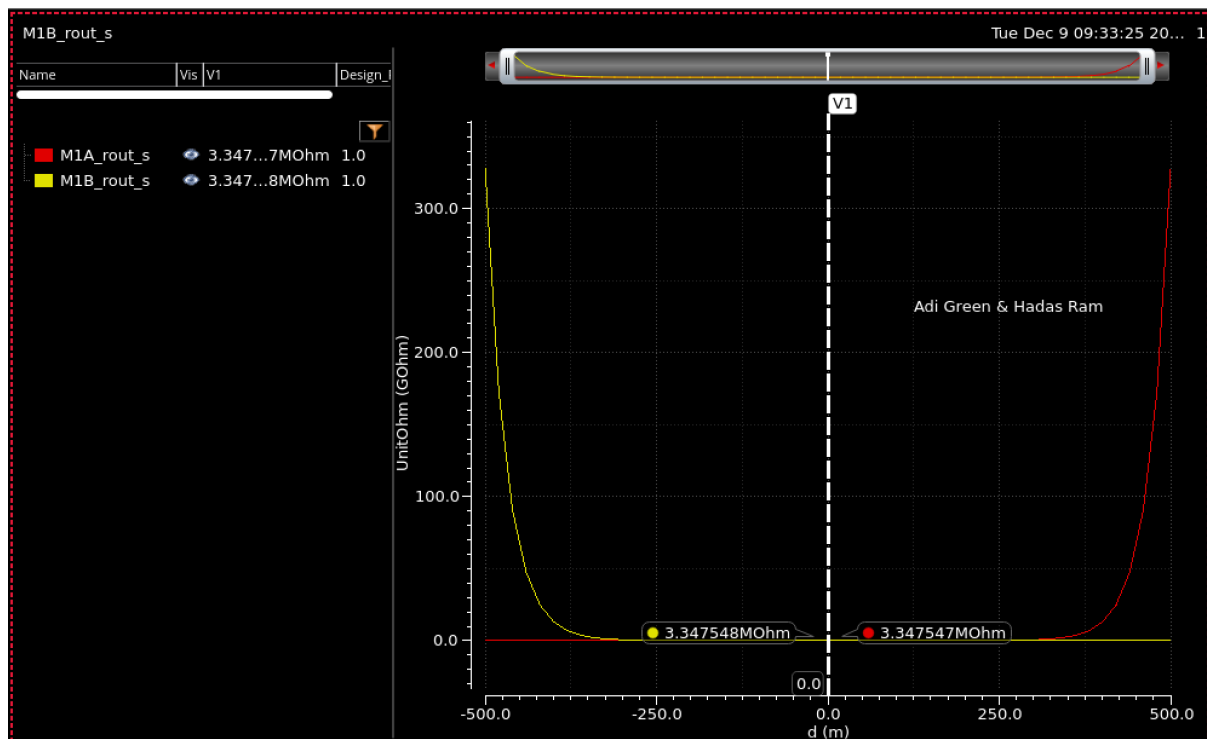
ההגבר המקסימלי שקבלנו הוא $A_v = 17.57198\text{dB}$.
 נקבל את ההגבר המקסימלי ב- $d = 0$ מאחר שבערך זה 2 הכניסות שוות ולכן הזרמים שווים (וניתן לבצע קיפול למעגל).
 כאשר יש גניבת זרם מהגבר לא מתנהג כמגבר דיפרנציאלי ולכן לא נקבל הגבר מקסימלי.
 ובנוסף, ככל שהפרש הכניסה גדל (d גדל בערך מוחלט) אז ההגבר יורד.

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

כעת, אנחנו רוצים לחשב את A_v לפי הנוסחה שלמדנו בהרצאה:

נראה את ההתנגדות של הטרנזיסטורים במעגל גדולה בכמה סדרי גודל R_{dm} וכיוון שהם מחוברים במקביל ניתן להזניח את התנגדות הטרנזיסטורים.

גרף של r_{out1} , r_{out2} כתלות ב*d*:



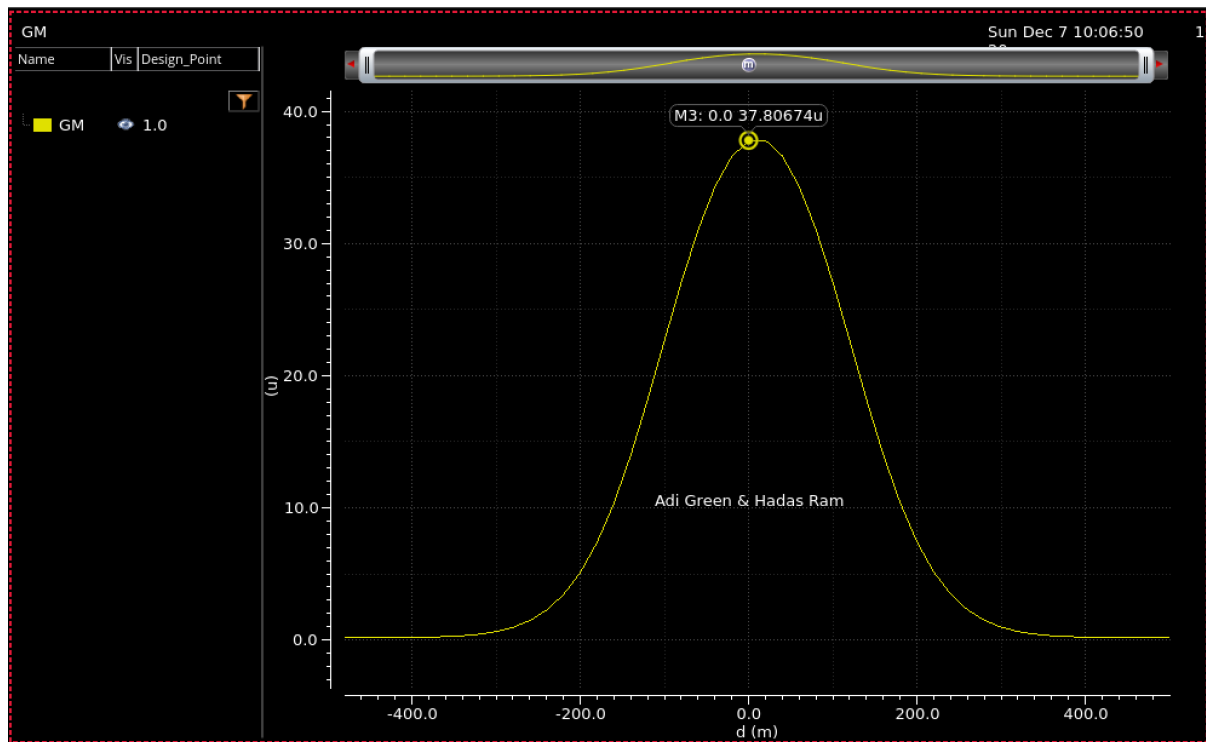
ניתן לראות התנגדויות יוצאות גדולות בסדר גודל של מגה-גיגה אוהם.

נמצא את GM :

נוסחה של $GM = dI_{out}/dV_{in}$.

GM	expr	deriv((I5("/M1B/D") - I5("/M1A/D")))
----	------	--------------------------------------

גרף של GM כתלות ב-d:



נקבל מקסימום של GM כאשר $d = 0$, מאחר שזאת הנקודה בה נקבל את השיפוע המקסימלי של הפרש הזרמים (ניתן לראות זאת בגרף בהמשך), ולכן כפי שאמרנו זאת הנקודה שבה נקבל את ההגבר המקסימלי. נחשב את ההגבר שהתקבל בנקודה זו:

$$GM = 37.80674u$$

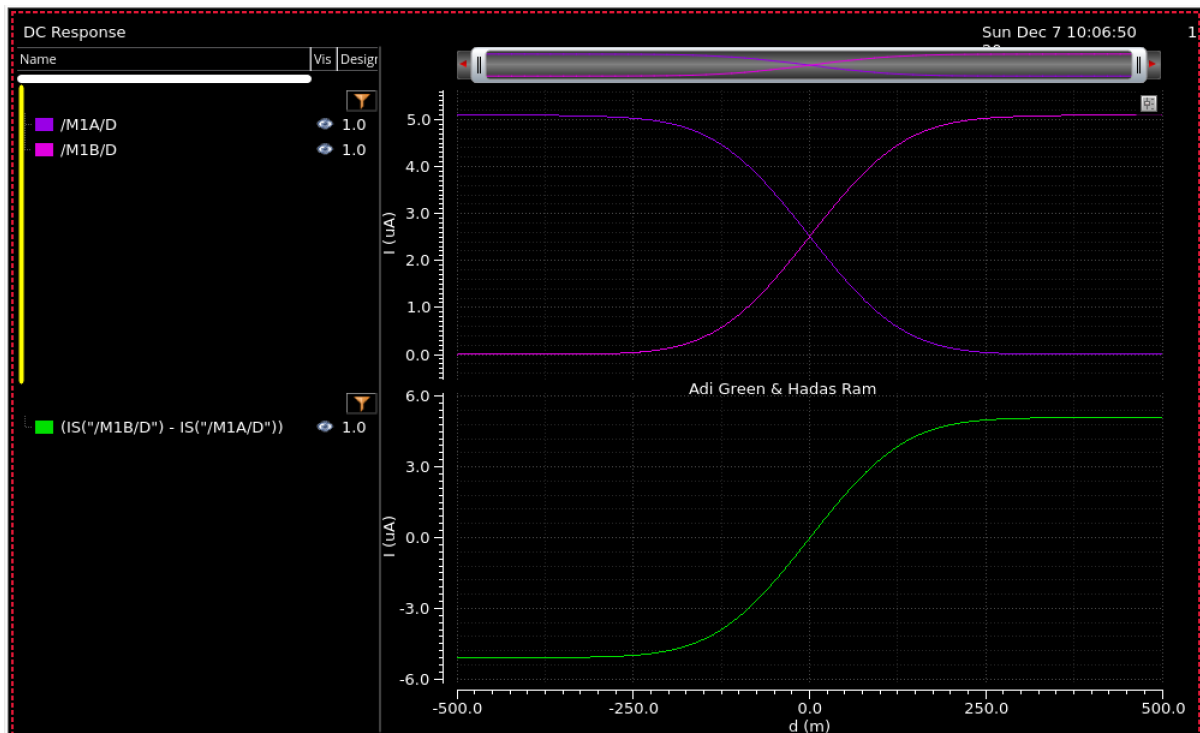
$$Av = -GM * Rout = -37.80674u * 200k = -7.561$$

$$|Av| = 7.561$$

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

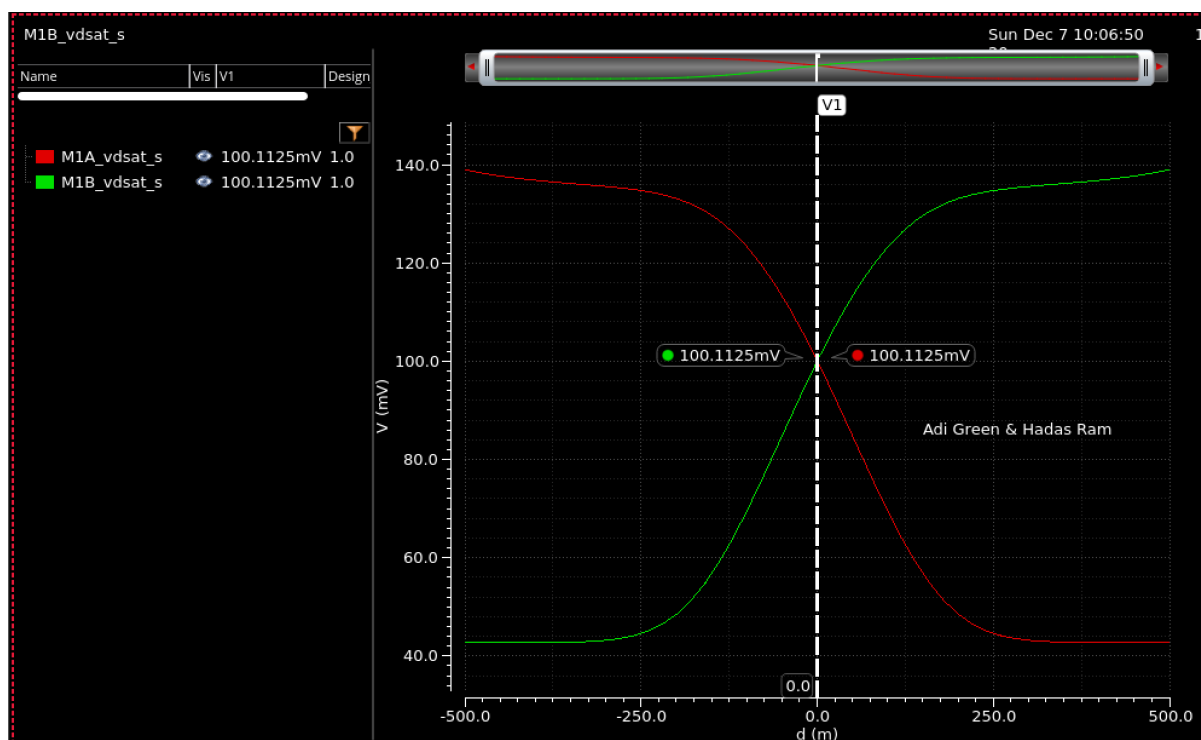
ניתן לראות שזה אותו הגבר שקיבלנו קודם דרך הנוסחה של Av .

גרף של הזרמים בכל ענף וההפרש בניהם כתלות ב*d*:



ניתן לראות כי מתרחשת גניבת זרם.
 בקצוות הגרף - טרנזיסטור אחד בעל הזרם המקסימלי של 5uA ולטרנזיסטור השני אין זרם בכלל.
 כפי שאמרנו, בערכים השליליים Vin1 גדל ולכן ניתן לראות כי הזרם של M1A גדל, וVin2 קטן ולכן ניתן לראות כי הזרם של M1B קטן עד אפס ויש גניבת זרם מלאה. בערכים חיוביים- קורה ההיפך.
 בהפרש הזרמים ניתן לראות כי ההפרש המקסימלי (בערך מוחלט) הוא 5uA בקצוות, וב*d*=0 אין גניבת זרם בכלל, הזרמים שווים ולכן ההפרש הינו אפס.
 גרף ההפרש עולה כי הגדרנו אותו כ- $I_2 - I_1$, וכפי שאמרנו- ככל ש-*d* גדל אז הזרם I_2 גדל ו- I_1 קטן.

גרף של Vdsat של M1A,M1B כתלות ב-d:



כפי שלמדנו בהרצאה, כאשר $\Delta V_{in} = 0$ אז הזרם של כל טרנזיסטור הוא $I_{SS}/2$ ולכן מתקיים:

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

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

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

ולטרנזיסטור השני אין זרם.

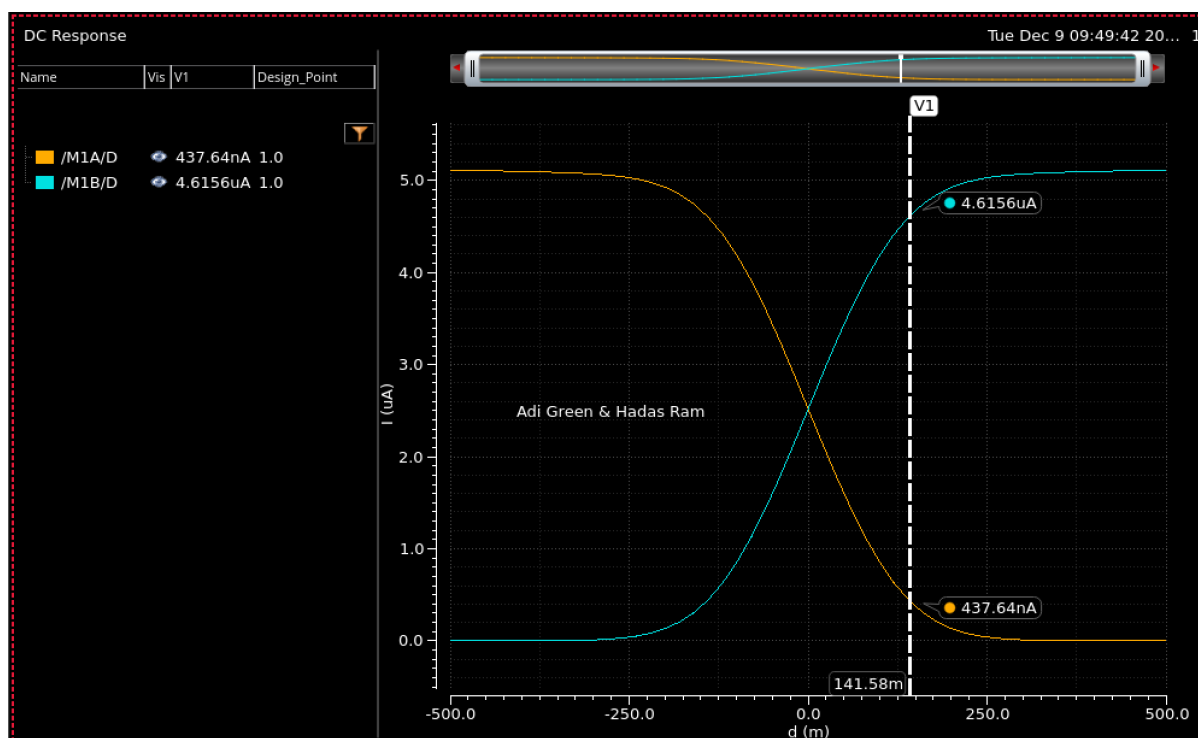
$$(V_{GS} - V_{TH})_{1,2} = \frac{\Delta V_{in1}}{\sqrt{2}}$$

ואז נקבל שהיחס הוא

מצאנו כי בנקודה $d=0$, המתח Vdsat הינו 100.1125mV.

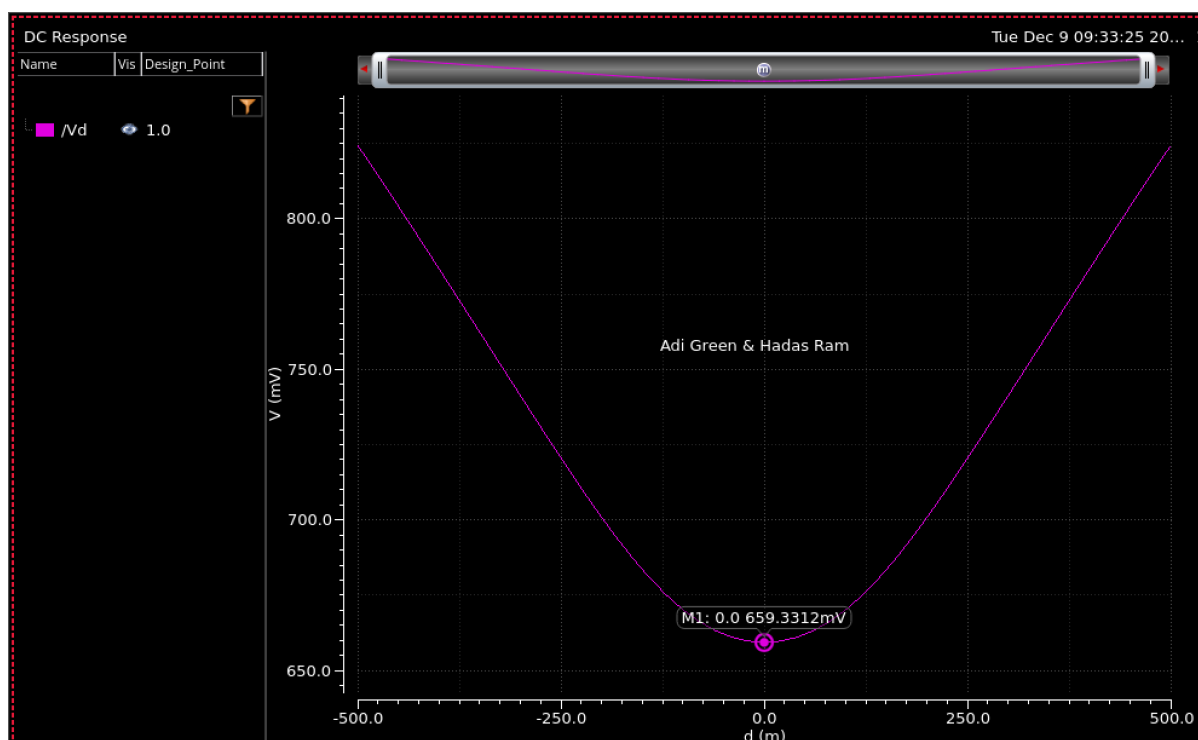
$$\Delta V_{in} = \sqrt{2} * V_{DSAT} = \sqrt{2} * 100.1125mV = 141.58mV \text{ ולכן:}$$

גרף הזרמים בשני הענפים כתלות ב-d:



קיבלנו שעבור $d=141.48\text{mV}$, הזרם בטרנזיסטור M1B הוא 4.6156uA והזרם בטרנזיסטור M1B הוא 437.64nA , כלומר מתרחשת גניבת זרם של 87.58% .

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



מתח זה שומר על טרנזיסטור M2 שיהיה בזרם קבוע I_{SS} . מתח זה אינו אמור להשתנות וכפי שניתן לראות בגרף השינוי הוא קטן ונמצא ב V_m . השינוי הקטן נובע מאפקט התקצרות התעלה. כיוון שהמתח בנקודה זו נחשב כקבוע אזי במודל אות קטן בנקודה זו נקבל אדמה וירטואלית.

EXPLANATIONS AND DISCUSSION:

במעבדה זו למדנו על מעגל $Differential Amplifier$. המטרה של המעגל היא שה $Common Mode$ יתן לנו סטורציה בטרנזיסטורים ונוכל להכניס כניסה דיפרנציאלית קטנה כדי ש $Small Signal$ נקבל הגבר ביציאה. כאשר נכנסים למעגל רעשים ובמידה והם סימטריים בזכות ΔV_{in} הם מבטלים אחד את השני. נאלצנו לבחור במתח V_{cm} , בבחירה זו יש $trade-off$ בין הגבר גבוה A_v (בעזרת בחירת R_d גבוה), לבין בחירת $headroom$ טוב (ע"י R_d נמוך). חישבנו את ההגבר וקיבלנו בטווח הרצוי. במעבדה ראינו כי אכן ההתנגדות הפנימית של הטרנזיסטורים מאוד גדולה ולכן בחיבור במקביל ניתן להזניח אותה יחסית ל R_d והגבר נקבע לפיו. כאשר הוספנו את המתח הדיפרנציאלי ראינו כי מתרחשת גניבת זרם והגבר משתנה כתלות ב d . קיבלנו הגבר מקסימלי ב- $d=0$ כלומר נקבל הגבר מקסימלי כאשר הזרמים בשני הענפים שווים כי הכניסות זהות. מצאנו מאיזה מתח מתרחשת גניבת זרם לפי הנוסחאות של V_{dsat} שלמדנו וחישבנו אותו.