בס"ד

מעבדה במבוא למעגלים
דוח 8

Simple Current mirror

שמות המגישים + ת"ז:

רותם סילם | 206663437

עדי גרין | 324965946

תאריך הגשה:

07.06.2025

בס"ד

תוכן עניינים:

סעיף 1 3
סעיף 2 4
סעיף a.3 10
סעיף b.3 12
סעיף 4 13
סעיף a.5 16
סעיף b.5 19

בס"ד

סעיף 1

1.a In this assignment you will be building the following common sources as shown in the figures below:
(a) Common source driving resistor as shown in Fig-7.2 (sections 2-4).
Short explanation: The biasing circuit will create a DC value for Vg in order to mirror I1 current (M0 and M1 are identical transistors). On this value a small signal AC will be placed on Vg through the C1 cap (Vin). This signal passes through a high pass filter created by C1 and R1. This high pass filter should have a pole at relatively low frequency, such that M1 is still capable of amplifying the signal at Vg. The initial values can be 1p for C1, 1k for R1, and 100K for RL.

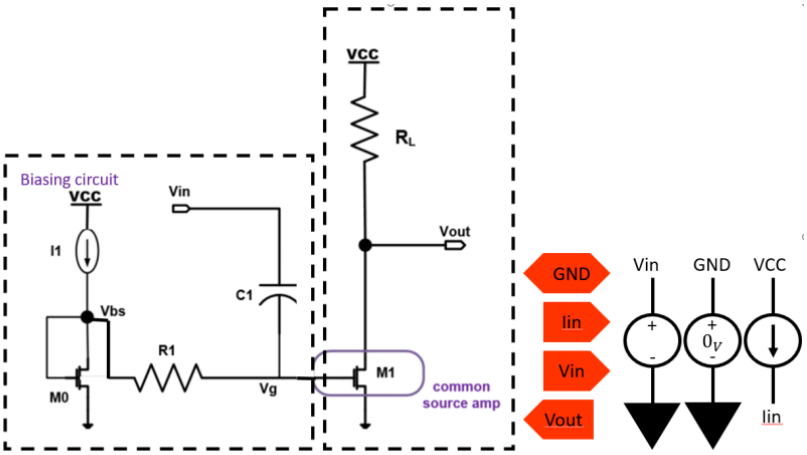
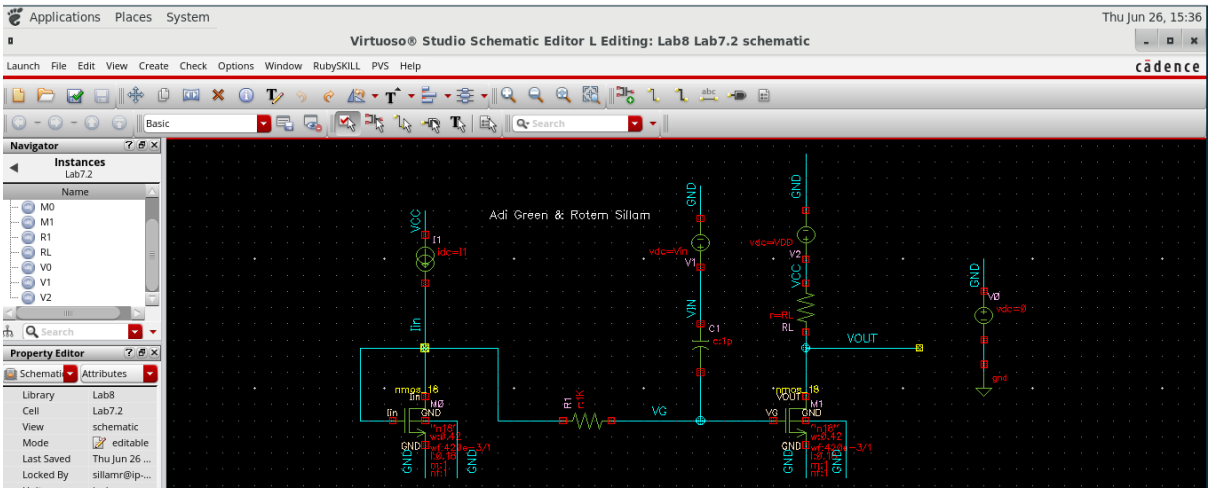


Figure 7.2: common source driving load resistor (RL) schematic



הגדרנו כפי שהתבקשנו את הערכים:
R1=1K
C1=1pF
הנגד RL בתור פרמטר
מקור מתח DC במתח Vin עם משתנה: DC Voltage= Vin
מקור זרם DC שהגדרנו כפרמטר I1

סעיף 2

2. DC simulation (biasing) 7.2 • To find the best biasing conditions run a DC sweep on I1 from 0.1uA < I1 < 3uA. Plot Vout and gm of M1 vs. I1. Explain your results. For saturation conditions plot Vds-Vdsat of M1 with respect to I1. Select RL to give sufficient range to keep M1 saturated and to get an Av of at least 10-20. (Hint: what is the theoretical AV of this circuit?) For further simulation choose I1 that will ensure this high gain and saturation.

הרצנו סימולציה שבה הגדרנו:

VDD=2v
RL=100KΩ
Vin=0

נעשה DC analysis על הזרם I1 - נע בטווח: 0.1uA < I1 < 3uA כנדרש.

המעגל מתחלק ל-2 חלקים- biasing circuit ו-common source.

בזרם DC הקבל הוא נתק, ולכן החלק של ה-biasing circuit מתפקד כזרם מראה, כפי שלמדנו במעבדה 7.

כאשר Vgs>Vth כלומר הטרנזיסטור במצב ON:
תנאי לסאטורציה: Vgs-Vth<Vds
המתח בsource של 0M הוא GND ולכן בסאטורציה יתקיים: Vg-Vth<Vd
חיברנו את הdrain והgate ולכן Vg=Vd, כלומר בסאטורציה יתקיים 0<Vth, כלומר בעזרת חיבור זה נקבל שאנחנו תמיד במצב סאטורציה.

חיברנו לM 0Nmos מקור זרם DC, שיזרים זרם I1. למדנו שהתכונה של הNmos היא לראות איזה זרם נכנס אליו ב drain, ולהתאים מתח Vgs כך שכל הזרם יתפרק לsource אותו חיברנו לאדמה.
נזכיר כי ההתנגדות של הGate אינסופית, ולכן הוא צורך זרם אפסי.

בנוסף ניתן לראות שהGate של 0M והGate של 1M מחוברים. משום שההתנגדות בGate אינסופית, זורם זרם אפסי בחיבור בין הGate-ים. נוכל להבין מכך שהנגד 1R כמעט ולא משפיע. ולכן ניתן להגיד בקירוב ש- Vgs0=Vgs1.
במצב סאטרוציה הזרם הינו : $I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{gs} - V_t\right)^2(1 + \lambda V_{ds})$
במידה שאנו מזניחים את אפקט התקצרות התעלה, כאשר נגדיר שני טרנזיסטורים עם פרמטרים שווים, נקבל שמה שיקבע את הזרם דרך הטרנזיסטור הוא Vgs.
משום שבמקרה שלנו הגדרנו אותם פרמטרים עבור 1M0, M, ובנוסף חיברנו בין הGate-ים שלהם, נקבל שהזרם שעובר דרכם כמעט זהה - וזהו בדיוק המטרה של current mirror.
ולכן הזרם Ids ברכיב 1M הינו שווה ל-I1.

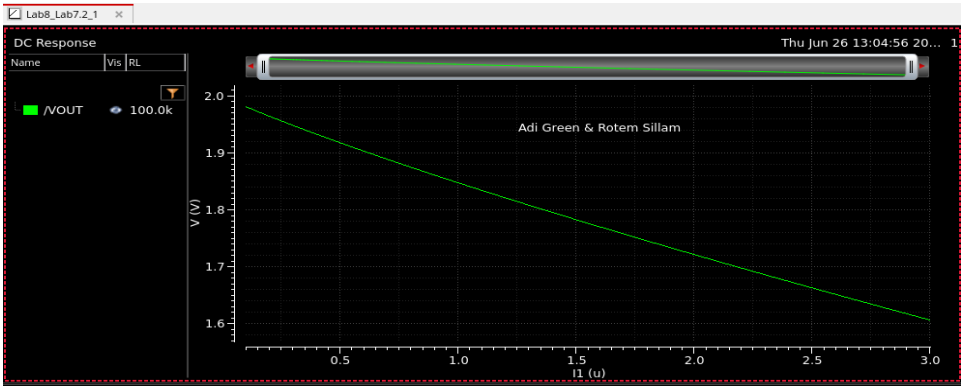
לפי חוק אוהם מתקיים: V=IR

(VDD-Vout)=Ids1*RL
(2-Vout)=Ids1*100k

כאשר נגדיל את I1, הזרם 1Ids יגדל (אנחנו עושים sweep על הזרם) ובעקבות כך לפי המשוואה ניתן לראות ש-Vout יקטן.

בס"ד

גרף של Vout כתלות ב-I1:

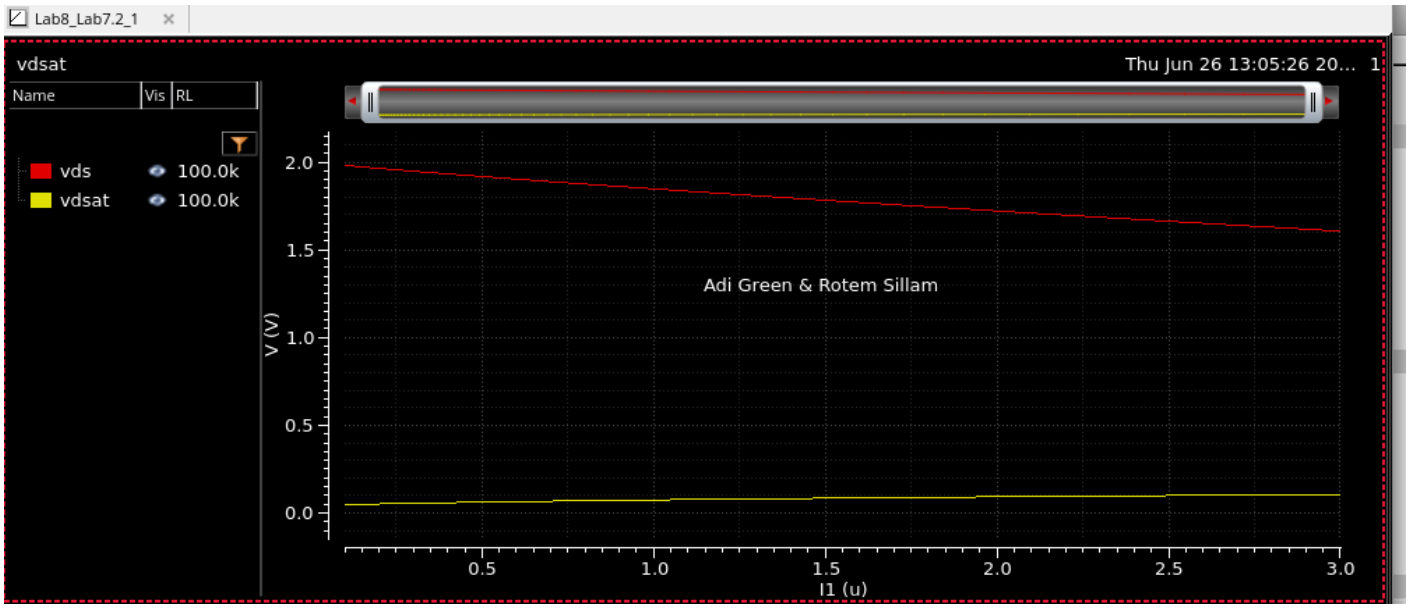


כפי שאמרנו, ניתן לראות שככל שהזרם I1 גדל כך Vout קטן.

בנוסף הרצנו את הסקריפט של שאנון כפי שלמדנו במעבדה קודמת על מנת לקבל במאסטרו ערכים אותם נרצה להריץ. מחקנו את אלו שהיו נראים לנו לא רלוונטים.

ENICSsaveOpPoint("M" list("vdsat" "vds" "gm" "RL") ?spare t ?spec 0.05 ?sweeptype "dc")

לקחנו רק את הערכים של M1.
ניתן לראות שבסימולציה זו תמיד vds>vdsat, כלומר הרכיב M1 בסאטורציה:

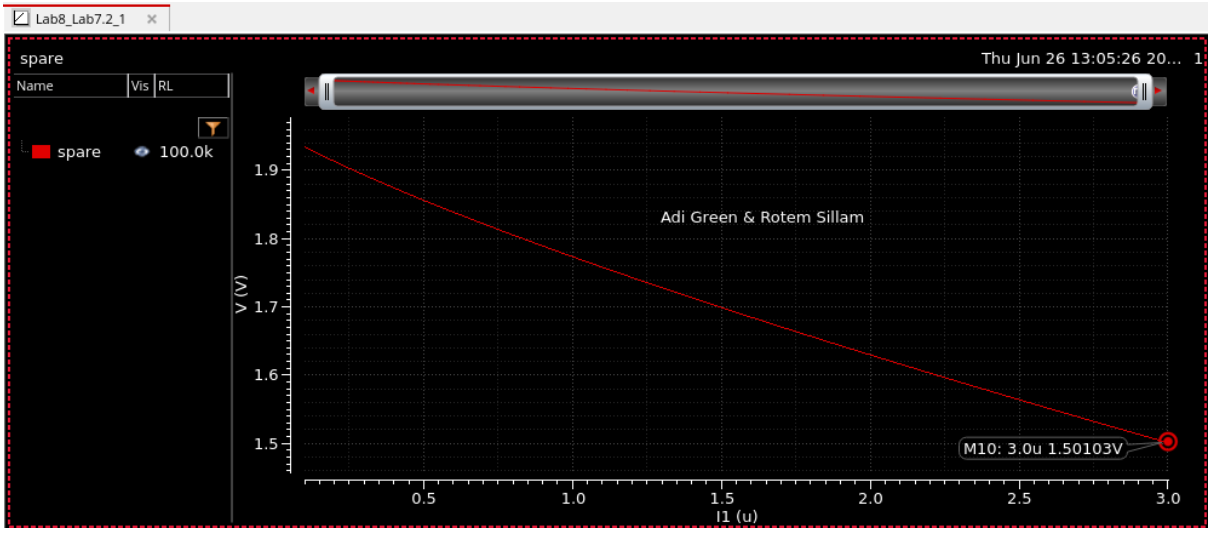


הגרף של vds יורד (vds1=vout) כפי שהסברנו מקודם. הגרף של vdsat עולה כי vdsat=vg-vth, וכפי שהסברנו vg עולה ולכן גם vdsat יעלה.

נראה שאנחנו בסאטורציה לכל אורך הסימולציה גם בגרף של spare ששווה vds-vdsat , כאשר נקבל ערך חיובי אנחנו בסאטורציה, וניתן לראות שקיבלנו ערכים חיוביים לאורך כל סימולציה זו.

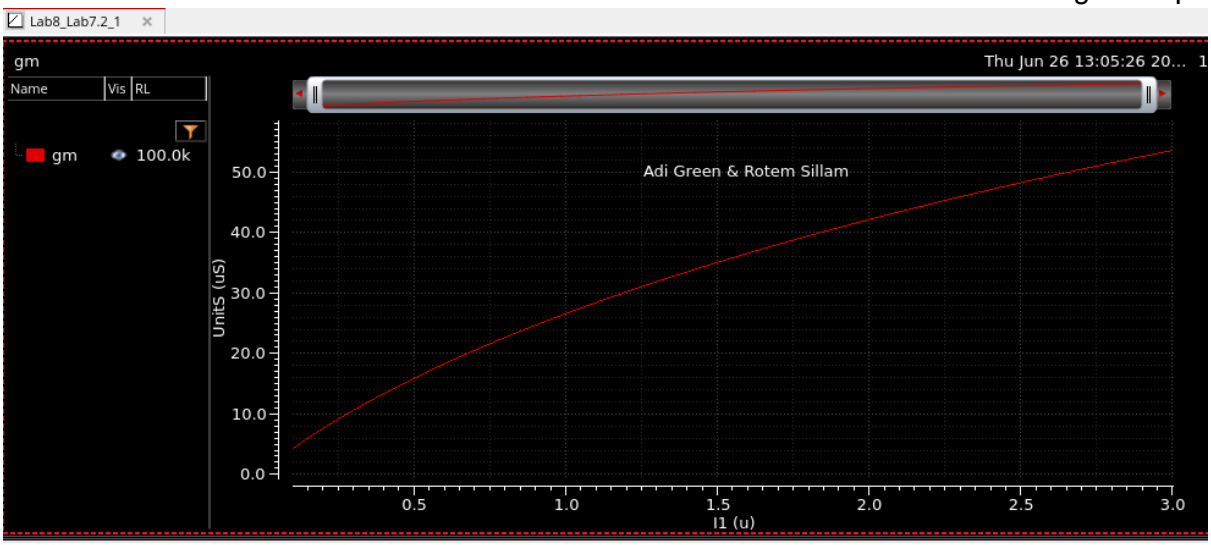
בס"ד

גרף של spare כתלות בl1 :



הגרף של spare יורד מאחר ש- spare=vds-vdsat, ולכן אם vds יורד ו-vdsat עולה, אז spare ירד.

גרף של gm כתלות ב-l1:

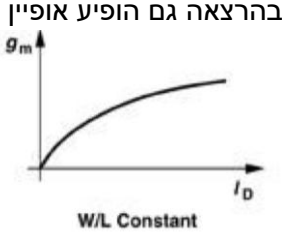


ניתן לראות שככל ש-l1 גדל אז gm גדל.

כפי שהסברנו מקודם המתח Vgs משתנה לפי הזרם Id. בנוסף הסברנו כי מתקיים l1d,M0=l במעגל שלנו. כלומר, בהתאם לשינוי של l0d,M נקבל שינוי של l1, ושל Vgs - שיגדלו ככל שl0d,M יגדל.

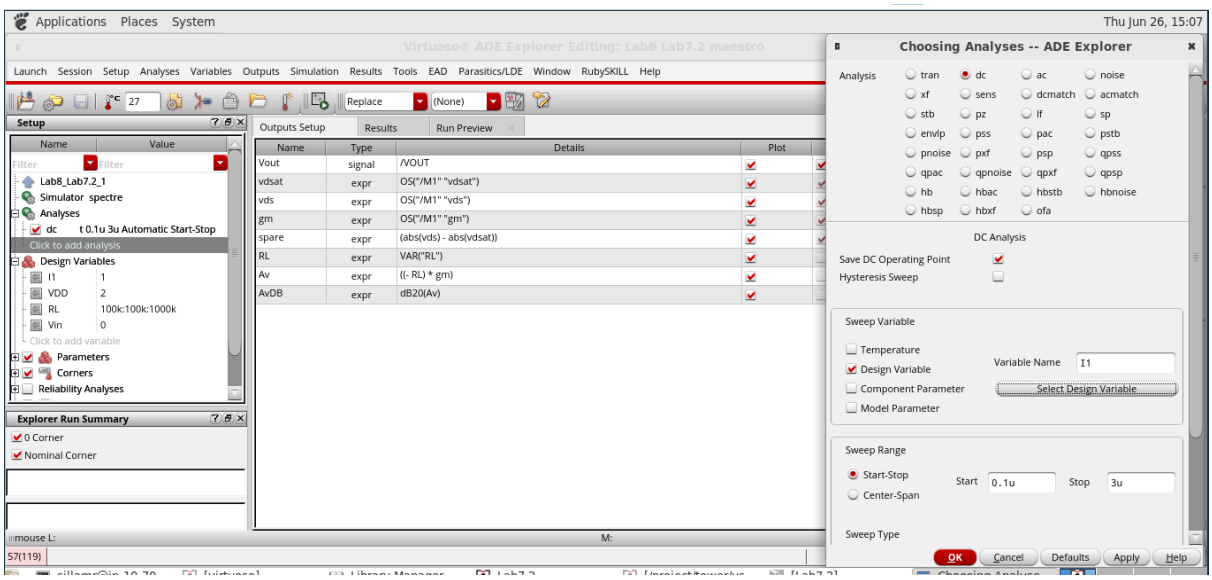
בנוסף לפי הנוסחה $g_m = \sqrt{2\mu C_{ox}\frac{W}{L}I_D}$ שלמדנו בהרצאה ניתן לראות שככל ש l1 יגדל, כך גם gm יגדל:

בהרצאה גם הופיע אופיין gm כתלות בId, וניתן לראות שקיבלנו גרף דומה לו:

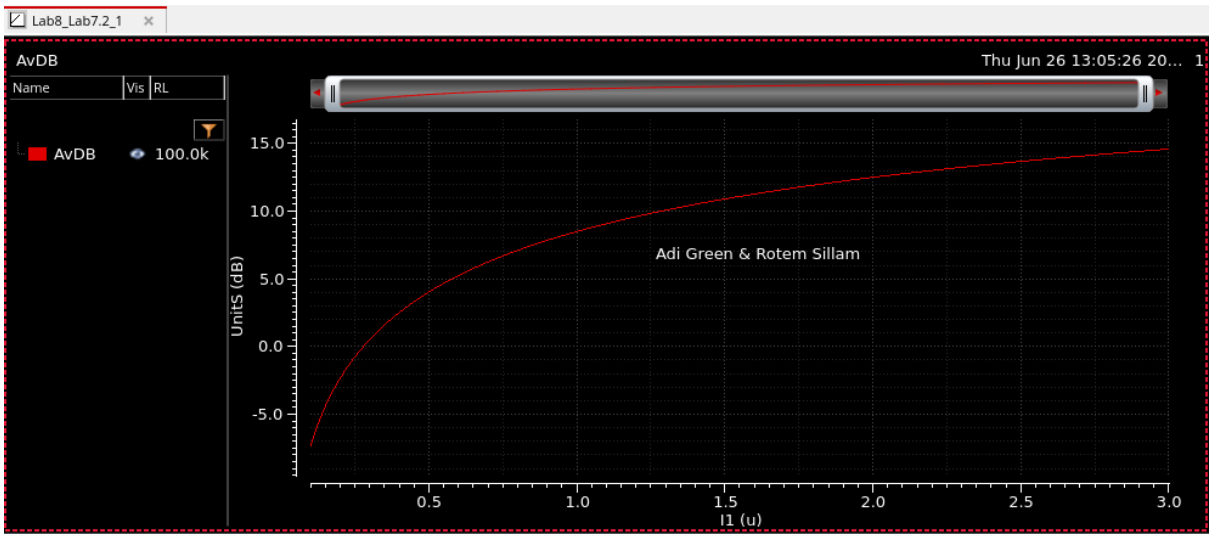


בס"ד

נחשב את ההגבר Av בדציבלים.
למדנו בתרגול כי עבור "common source driving load resistor" ההגבר הינו: Av= -gm*RL
ובדציבלים (נשים ערך מוחלט מאחר שלא ניתן לעשות לוג על מס' שליל): log(|Av|)=20log(gm*RL)=AvDB20

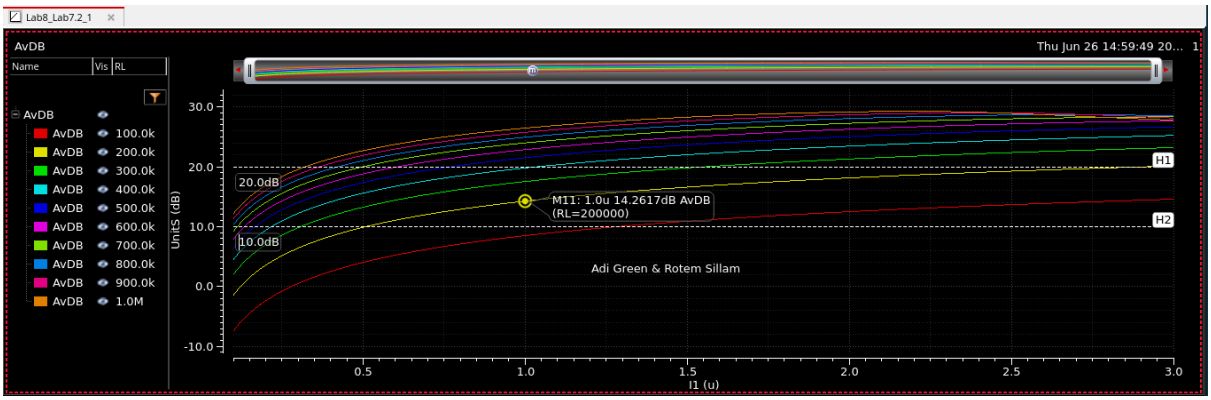


ההגבר עולה ככל שהזרם גדל, מאחר ש-gm גדל ככל שהזרם עולה (והנגד RL קבוע).
ניתן לראות שעבור זרמים גדולים אכן מקבלים את ההגבר בטווח הרצוי שהינו בין 10-20 דציבלים.
נבדוק האם יש ערך אחר של RL אשר מביא טווח יותר מדויק.

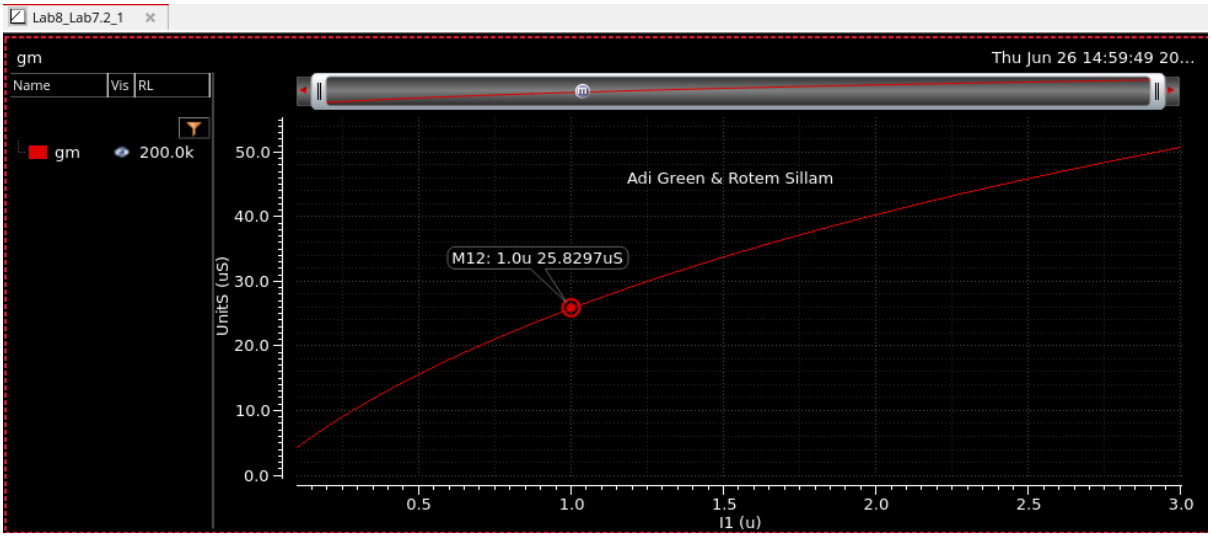


הרצנו את ההגבר Av בדיצבלים על ערכים שונים של RL:

בס"ד



ניתן לראות שהגרף של kΩ200 נמצא בטווח בצורה טובה.
ולכן נבחר עבור המעגל RL=200kΩ, I1=1uA.



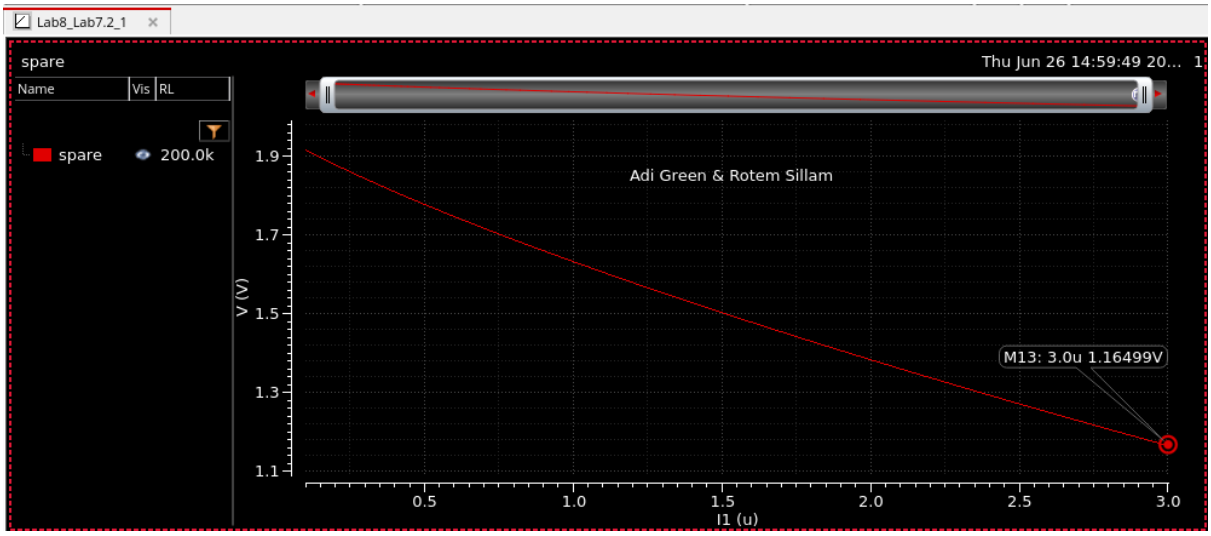
נחשב את gm לפי המשוואות הבאות שלמדנו:

$$14.2617 = 20log(av)$$

$$10^{\frac{14.2617}{20}} = av$$

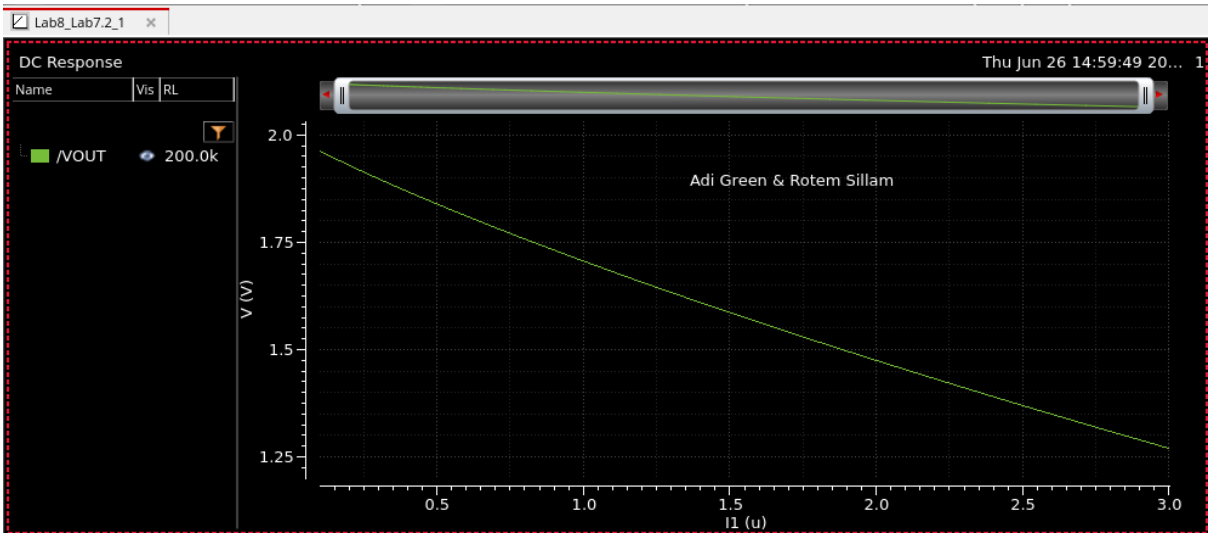
$$=\frac{av}{RL}=\frac{10^{\frac{14.2617}{20}}}{200K}=25.82 * 10^{-6}\ ℧gm$$

ניתן לראות שערך gm בגרף שלנו תואם לחישובים.
כפי שאמרנו, מדובר בערכו המוחלט של gm, ערכו של gm הינו שלילי.



לכן עבור spare גדול מmV50 נהיה בסאטורציה (vds>vdsat) ועבור ערכים קטנים מmV50 נהיה הליניארי.
ולכן ניתן לראות שעבור כל הזרמים בנגד kΩ200 ובפרט בזרם שבחרנו- I1=1u , נהיה בסאטורציה.

הגרף של Vout בנגד kΩ200 כתלות ב-1I:



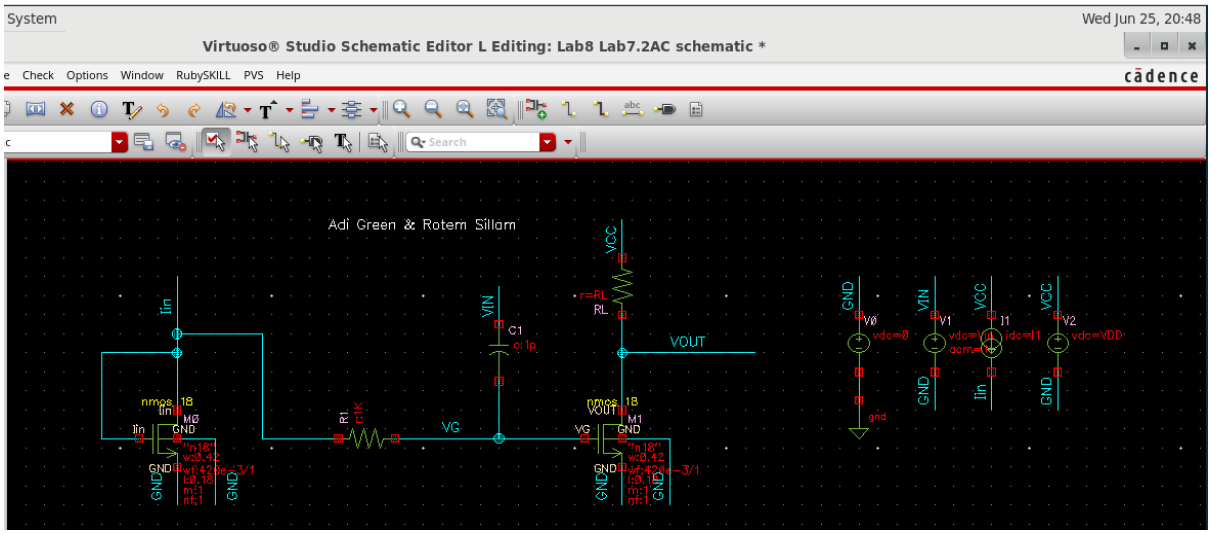
כפי שהסברנו עבור הגרף של Vout בkΩ100, ככל 1I גדל, Vout קטן לפי המשוואה $\mathrm{VDD} - V_{out} = I_{ds1} * R_L$

סעיף a.3

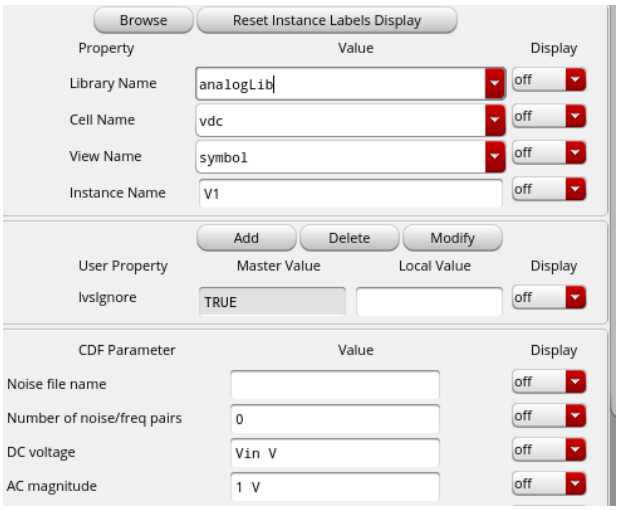
3. AC simulation

(a) Plot Vg vs. Vin for frequencies from 10Hz – 10GHz. (Place Vin supply as described in the general rules, note that the DC value comes from the biasing circuit). R1 and C1 should be selected such that Vg≈Vin above the pole. Please explain the graph.

לאחר שמצאנו את הערכים עבור ה-large signal, נריץ AC simulation בשביל ה-small signal.
מוסיפים ל Vin מתח AC קטן (נרצה לראות את ההשפעה של שינויים קטנים במתח על המעגל) כלומר אנו נמצאים ב- small signal.
נשים לב כי נשארנו עם הערכים שעבורם רכיב 1M נמצא במצב סאטורציה עם ההגבר הרצוי, כפי שמצאנו בסעיפים הקודמים.



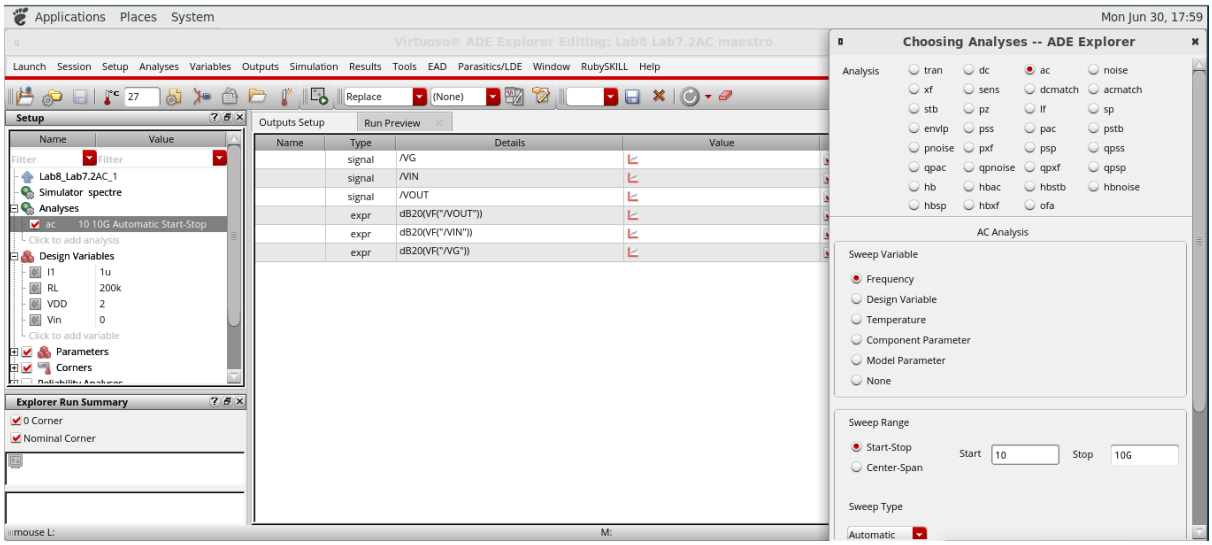
את המתח Vin הגדרנו כך:

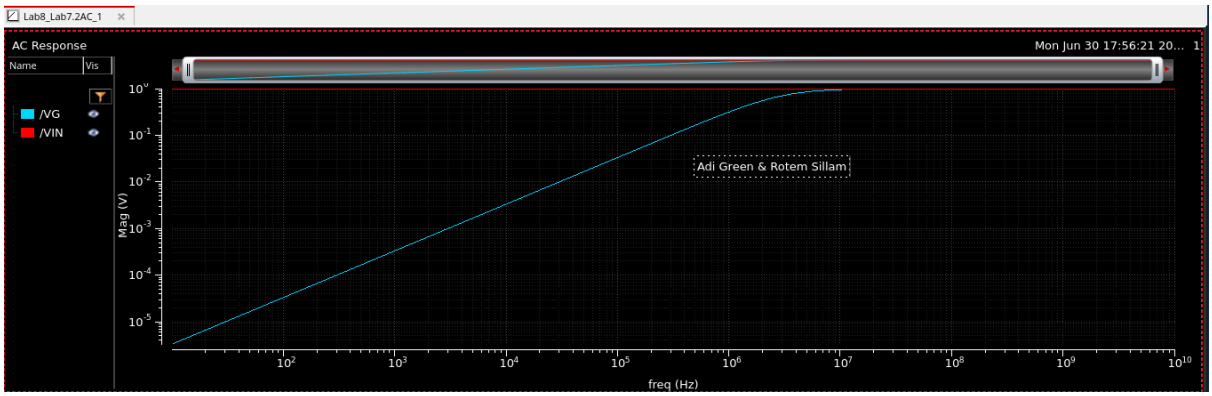


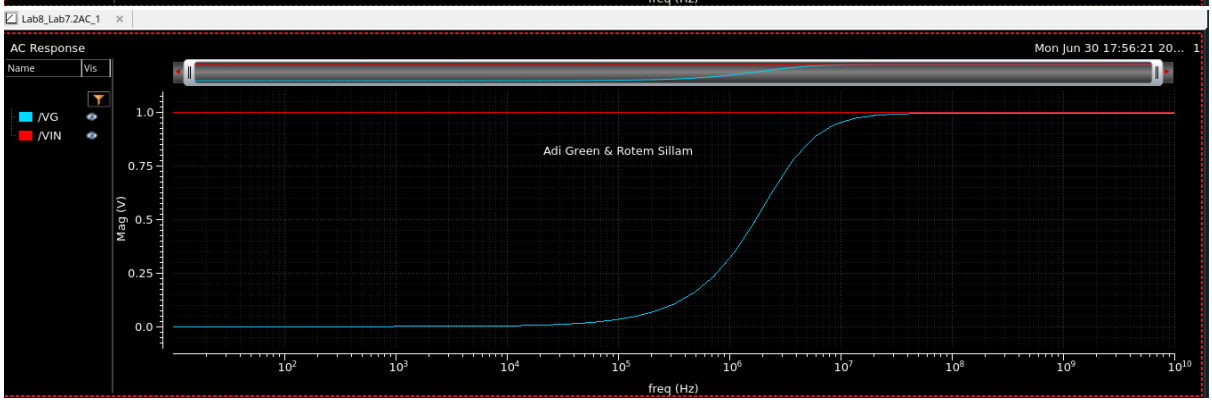
כאשר בסימולציה אנו מגדירים Vin=1v.
בחרנו את הערכים כפי שהסבירו ב-General rules.

בס"ד

הרצנו סימולציית AC:





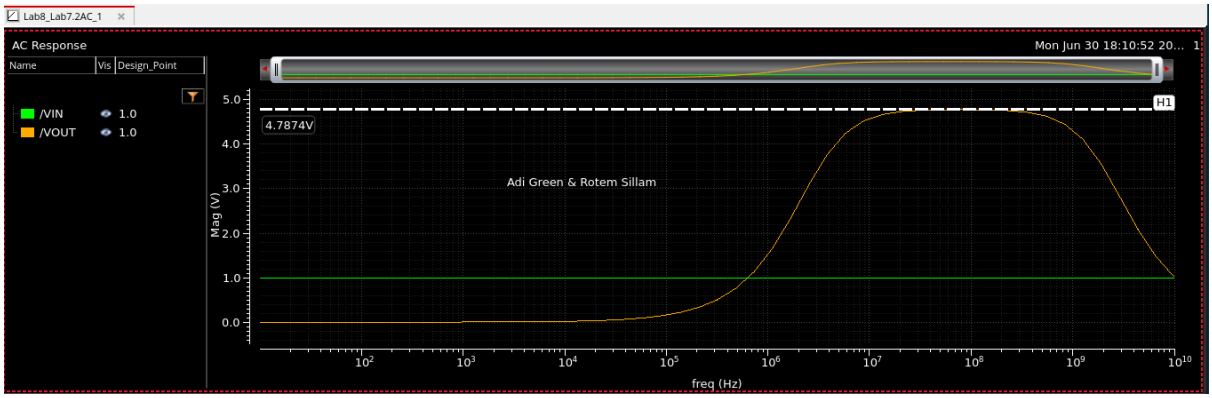


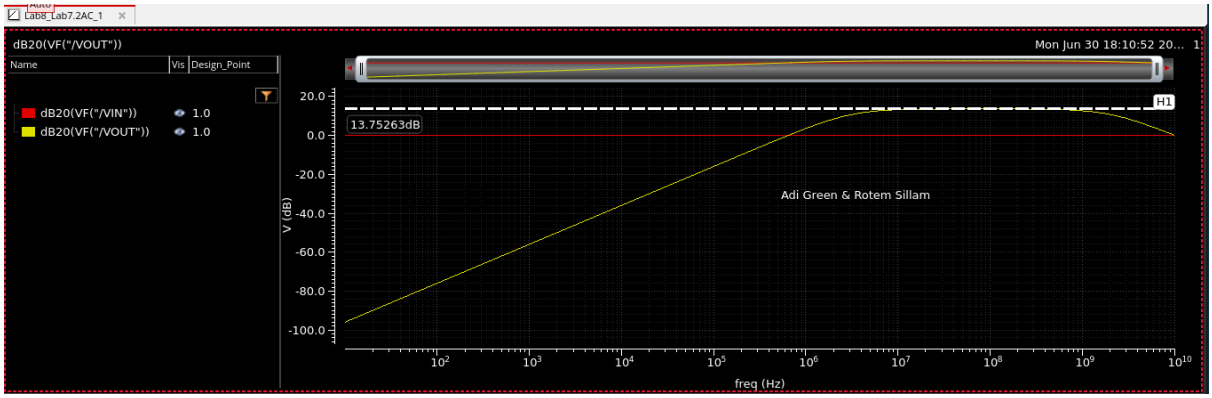
הגרף של Vin נשאר קבוע על 1 וולט מאחר שזוהי האמפליטודה שהגדרנו, ובדציבלים-Vin=0dB.
למדנו כי ב-small signal מתחי DC מתאפסים, ולכן במקרה שלנו הנגד מחובר ל-GND ואנו מקבלים מעגל RC של HPF.
ואכן ניתן לראות בגרף כי עבור תדירויות נמוכות Vg=0v (הקבל נתק ולכן אין זרם במעגל, ניתן לראות זאת לפי העכבה $\frac{1}{jwc}$ כאשר משאיפים את w לתדירויות נמוכות- נקבל התנגדות אינסופית), ועבור תדירויות גבוהות Vg=1v- שזאת האמפליטודה של Vin, וזה קורה מאחר שעבור תדירויות גבוהות הקבל הוא קצר (התנגדות אפסית). ניתן לראות בגרף של הדציבלים שעבור תדירויות גבוהות Vg=0dB (שווה ל-1 וולט).
כפי שפרופסור יוסי שור הסביר בהרצאה, הקוטב נובע כתוצאה מהקיבול של HPF. כפי שניתן לראות אכן נקבלVg≈Vi מעל הקוטב.

פונקציית התמסורת של HPF במקרה זה היא: $H(jw) = \frac{VG(jw)}{VIN(jw)} = \frac{jwR_1C_1}{1 + jwR_1C_1}$

סעיף b.3

(b) Plot Vout vs. Vin from 10Hz − 10GHz. as described in the general rules. Explain the Av observed in this simulation and compare to the expected theoretical Av based on the gm which was obtained in step 2 (DC). Remember the Av should be 10-20dB.





כפי שניתן לראות בגרף, יש 2 קטבים. וזאת מאחר שהסיגנל עובר דרך הקבל של HPF (קוטב אחד), ואז בטרנזיסטור שהוא בעל קבל פרזיטי (קוטב שני שמתקבל מסדר שני).
ניתן לראות כי המקסימום יתקבל סביב התדירות 10^8 Hz.
המקסימום של Vout הוא ההגבר מאחר ש- Av=Vout/Vin, כאשר במקרה זה האמפליטודה של Vin הינה 1 וולט ולכן Av=Vout.
ניתן לראות מהגרף של הדציבלים שקיבלנו: Av=13.75 dB. כפי שחשבנו בשאלה 2 אנו מצפים ל- Av=14.26 dB כלומר קיבלנו בסעיף זה הגבר יותר נמוך, אך ערכו יחסית קרוב (כנראה נובע מאי דיוקים ומרכיבים פיזים במעגל כמו לדוגמה ערך ההתנגדות שנבחר לנגד).

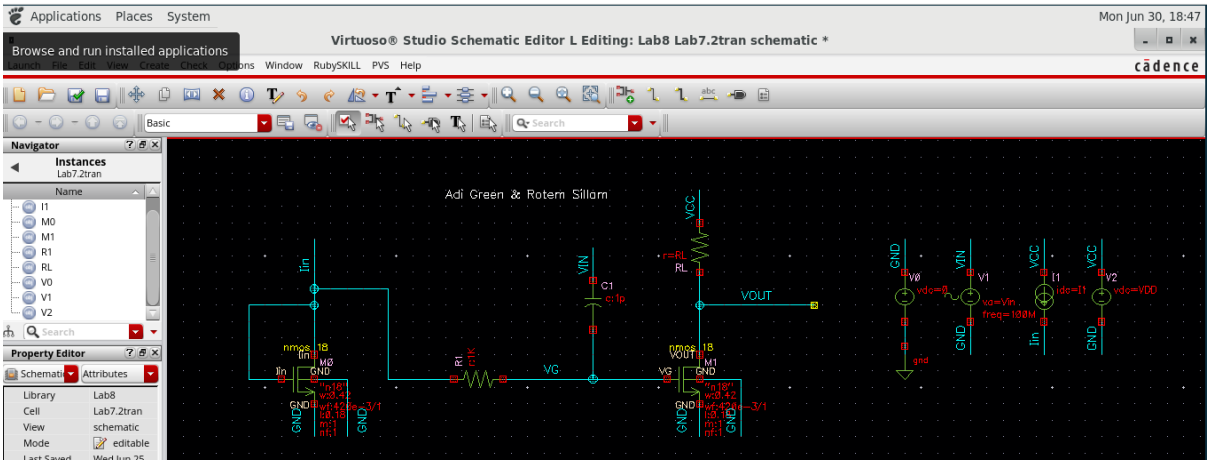
בס"ד

סעיף 4

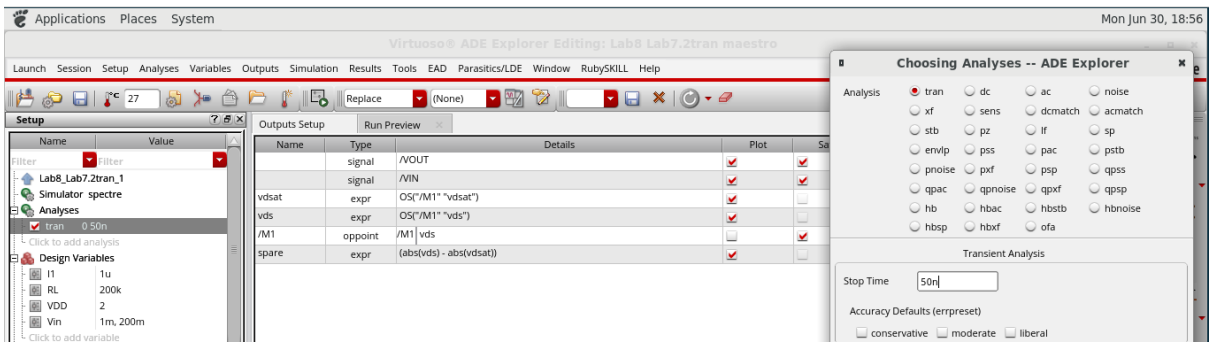
4. Transient simulation • Place a Vin=1mV sin wave (vsin) at a frequency where the Av is maximized and measure Vout. Is M1 saturated at all points? What happens if the sin amplitude is 200mV?

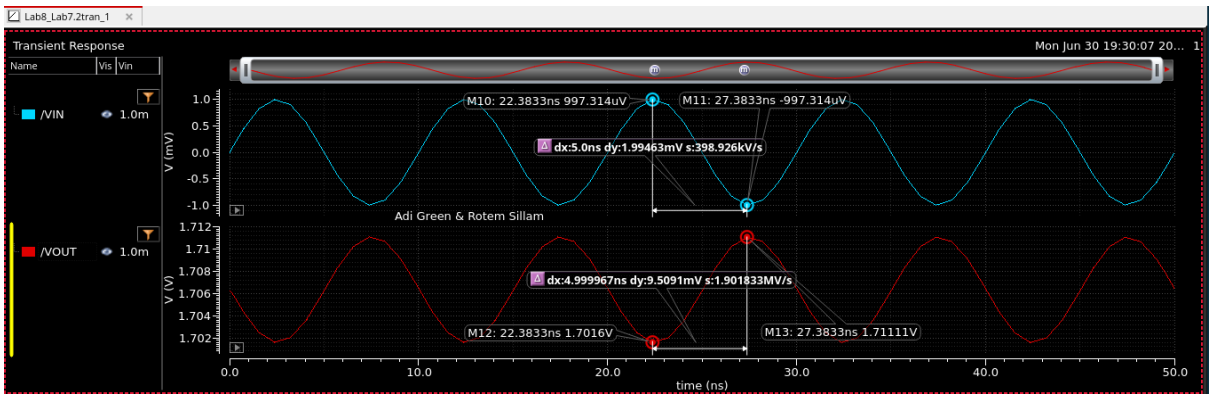
בסעיף הקודם קיבלנו כי ההגבר המקסימלי הוא בתדירות M100=10^8 הרץ.
ולכן שינינו למקור מתח vsin כאשר הגדרנו באמפליטודה פרמטר Vin כנדרש, עם תדירות של M100 הרץ.

נריץ גם את הסקריפט של שאנון בהתאם לסימולציית tran:
ENICSsaveOpPoint("M" list("vdsat" "vds" "gm" "RL") ?spare t ?spec 0.05 ?sweeptype "tran")



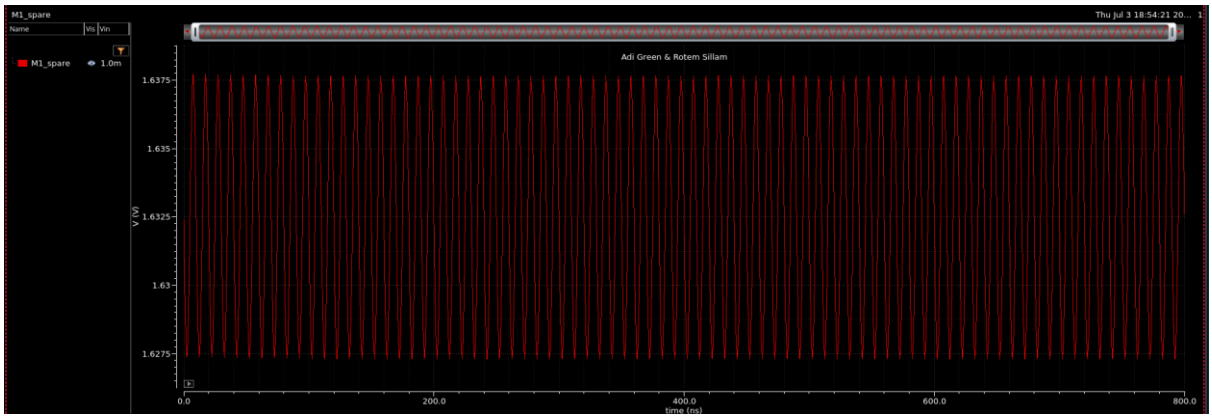
הגדרנו את הפרמטרים כנדרש:





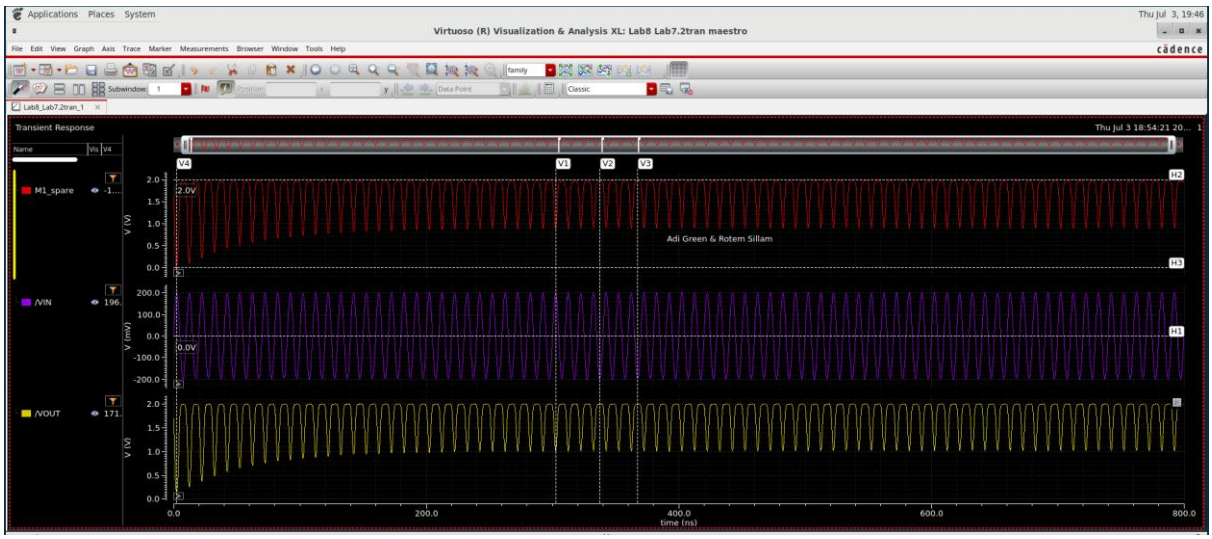
בס"ד

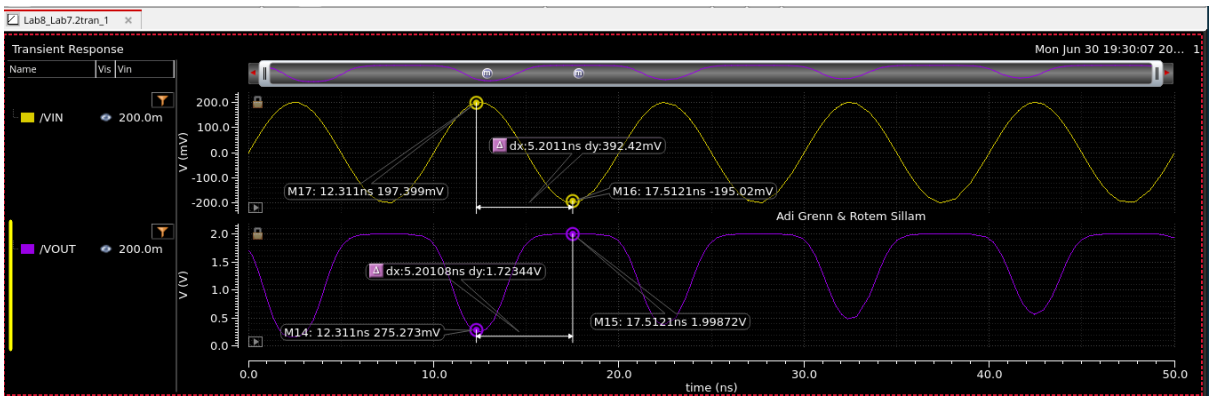
נחשב את ההגבר- Av=Vout/Vin, ע"י 2 הפרש של 2 נקודות מאחר שמדובר בגל סינוס.
קיבלנו: Av=Vout/Vin=9.5091m/1.99463m=4.7673v, וזהו בדיוק ההגבר שקיבלנו בשאלה 3.
בנוסף, ניתן לראות שיש היפוך בין הכניסה ליציאה- כאשר נקבל מקסימום בכניסה נקבל מינימום במוצא, וכאשר נקבל מינימום בכניסה נקבל מקסימום במוצא. כלומר, יש הפרש פאזה של 180 מעלות.
ניתן לראות שהאמפליטודה של Vin הינה 1 וולט כפי שהגדרנו.
גרף של ה-spare:



ניתן לראות שעבור כניסה Vin=1mV נקבל שאנחנו תמיד בסאטורציה (spare=vds-vdsat>0v).

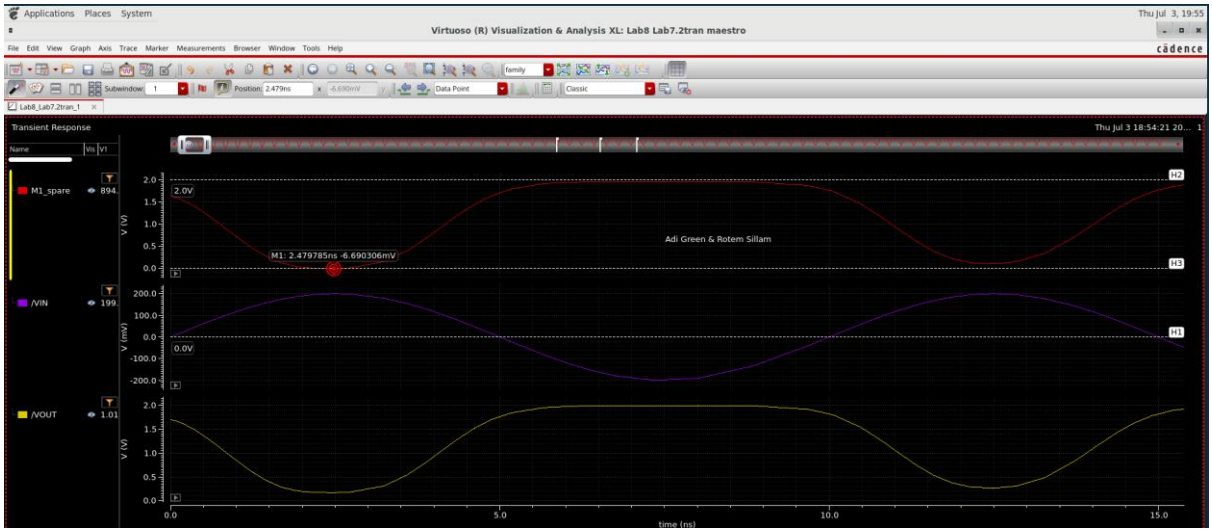
הגרפים עבור הכניסה Vin=200mV:





ניתן לראות כי ההתנהגות של Vout לאורך הסימולציה אינה זהה, ולכן אין ערך הגבר אחיד (ההגבר הינו Av=Vout/Vin).

נראה מהגרף של ה-spare שהרכיב לא נמצא לכל אורך הסימולציה בסאטורציה:



במקרה זה, הגדלנו את Vin בצורה כזאת כך שהרכיב יוצא מסאטרוציה, כלומר לא מתקיימת המשוואה- Vds>Vgs-Vth, מאחר שלא לאורך כל הסימולציה מתקיים כי spare>50mv.

בנוסף ניתן לראות כי הvout מגיע לערך מקסימלי, כלומר ישנו תחום מסויים בו הוא מתיישר (קטום).
זה קורה משום שאנחנו מכניסים בVin מתח מאוד גדול למעגל שלנו. נסביר:
הגדרנו VCC= 2v, שזהו מקור המתח הנופל על צד אחד של הנגד RL. מצד שני של הנגד, יש לנו את המתח Vout.
כאשר אנחנו מגדילים את המתח Vin ל200mv, אז נקבל שההגבר יתן Vout יותר גדול בהתאם.
הערך של Vout כאשר מתח הכניסה הינו 200mv-, נקבל את הערך המקסימלי של Vout, אבל מאחר שמתח זה גדול מ-VCC שהינו V supply, זה לא ייתכן ולכן הערך המקסימלי של Vout הוא 2v , ולכן נקבל עבור זמן יותר גדול ערכים במתח זה. זה מה שאנחנו רואים כאות קטום.

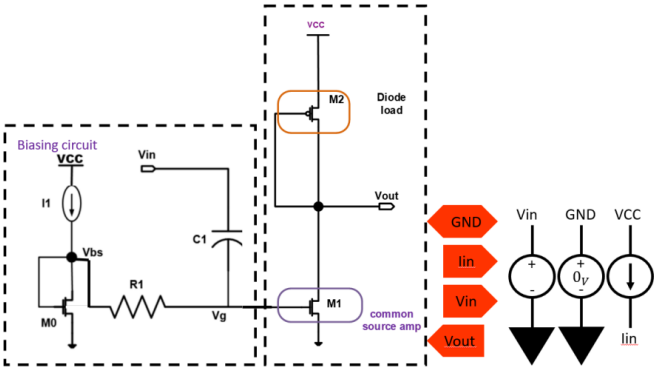
נשים לב כי ניתן לראות שעבור Vin=200mv (הערך המקסימלי שהכנסנו), נקבל בvout ערך מינימלי.
עבור Vin=-200mv (הערך המינימלי שהכנסנו) ניתן לראות שנקבל בVout ערך מקסמילי.
זה קורה משום שיש מעבר אחד מgate לdrain בטרנזיסטור 1M, ולמדנו שכתוצאה מכך נוצר היפוך (הפרש פאזה של 180 מעלות). לכן נקבל התנהגות כפי שמוצגת בגרף.

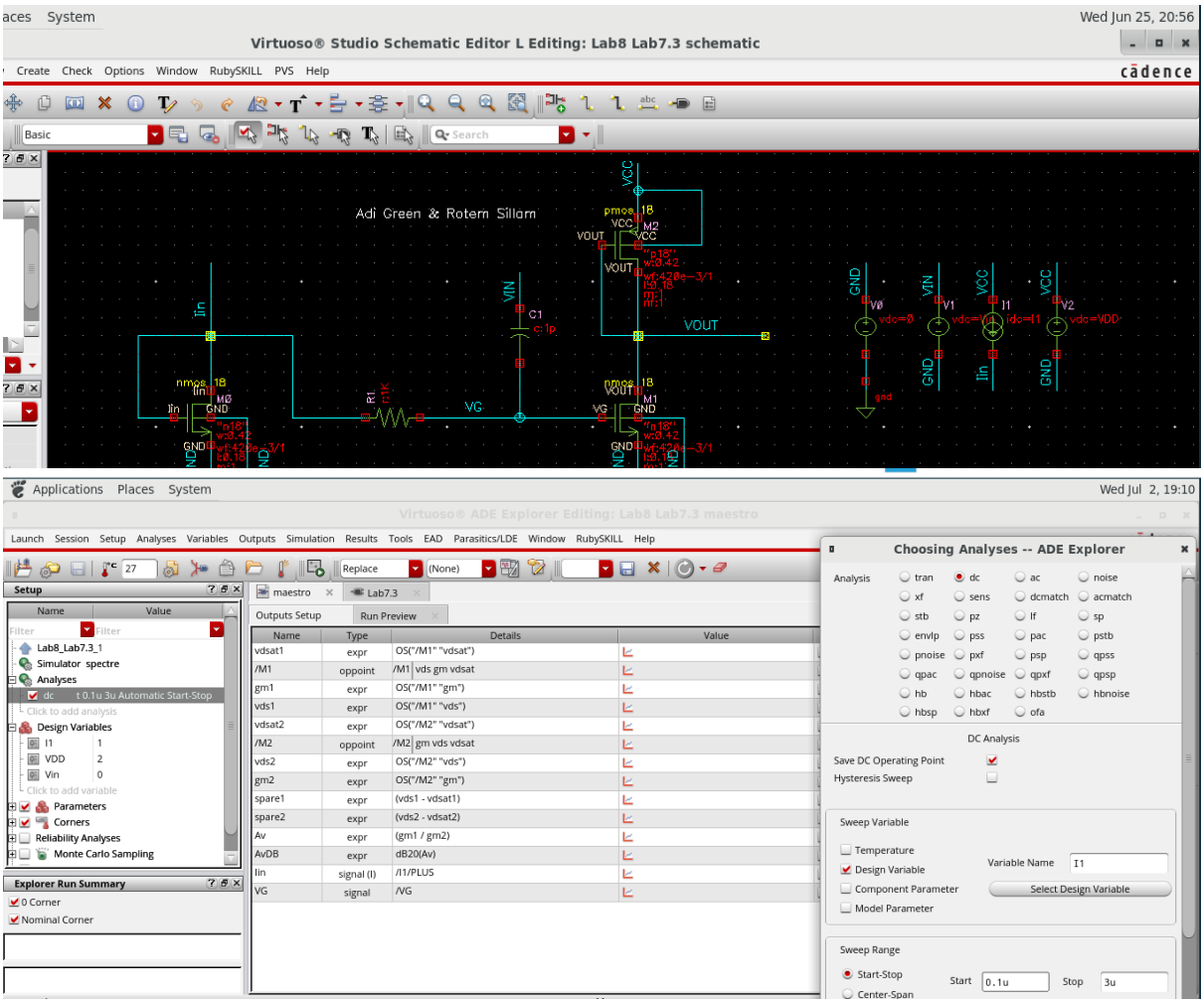
סעיף a.5

5. Diode connected load - DC + AC 7.3

(a) Replace RL with a diode connected PMOS (lower figure). Run a DC simulation (as in step 2) to ensure M1 is saturated, and extract gm1 and gm2.

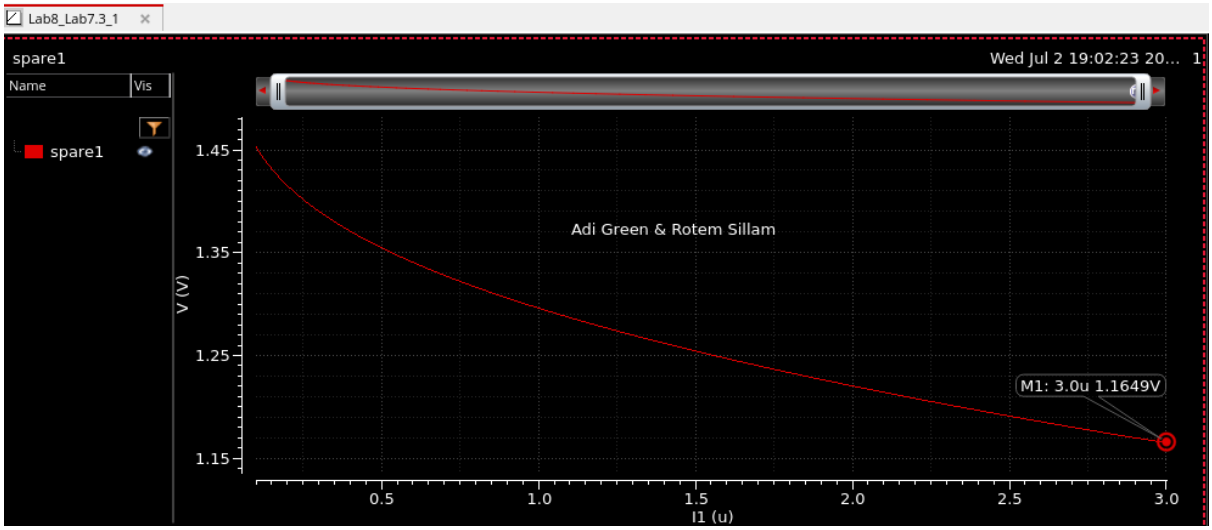
התבקשנו להחליף את הנגד לpmos כפי שמוצג בתמונה עם מקור מתח DC, על מנת לקבל - common source driving diode:





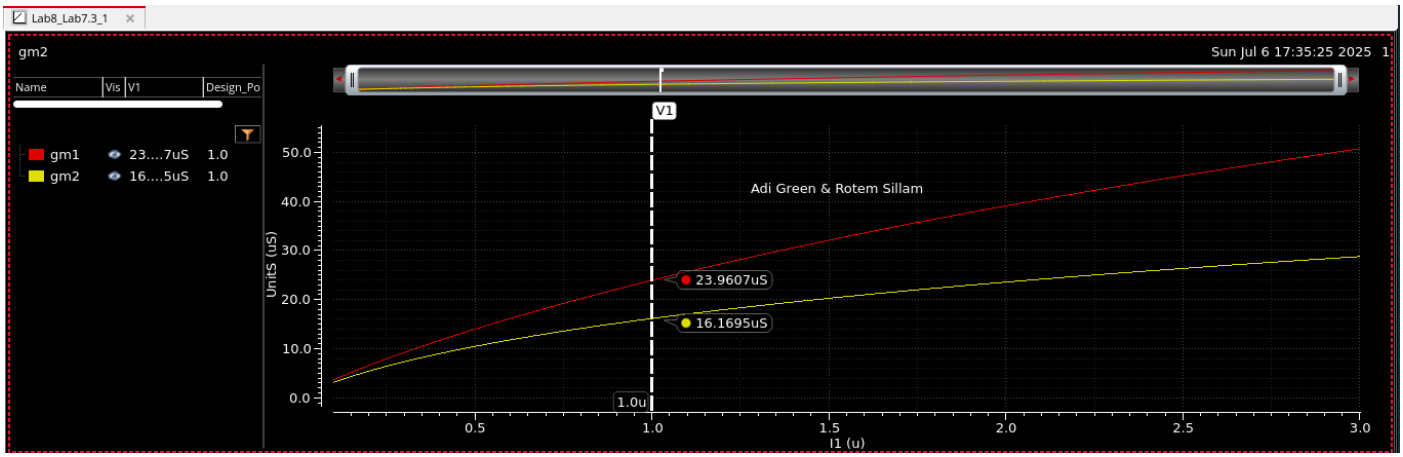
בס"ד

גרף של spare כתלות ב- I1:



ניתן לראות כי הרכיב 1M נמצא עבור הערכים ששמנו בסאטורציה. לכל אורך הסימולציה spare>0.05v.
בסאטורציה מתקיים vds>vdsat כלומר 0<vds-vdsat וזה גם מה שקורה פה.
בנוסף, רכיב 2M תמיד בסאטרוציה, מאחר שמדובר ב-PMOS בחיבור דיודי, כלומר מתקיים: |vds|=|vgs|, ולכן
Vdsat= |Vgs|-|Vt| = |Vds| - |Vt| < |Vds|
כלומר הPmos תמיד בסאטורציה.

הגרפים של 2gm1, gm כתלות ב-I1:



כפי שאמרנו, כאשר I1 גדל -Vg גדל ואז Ids גדל (לפי הנוסחה של הזרם בסאטורציה).

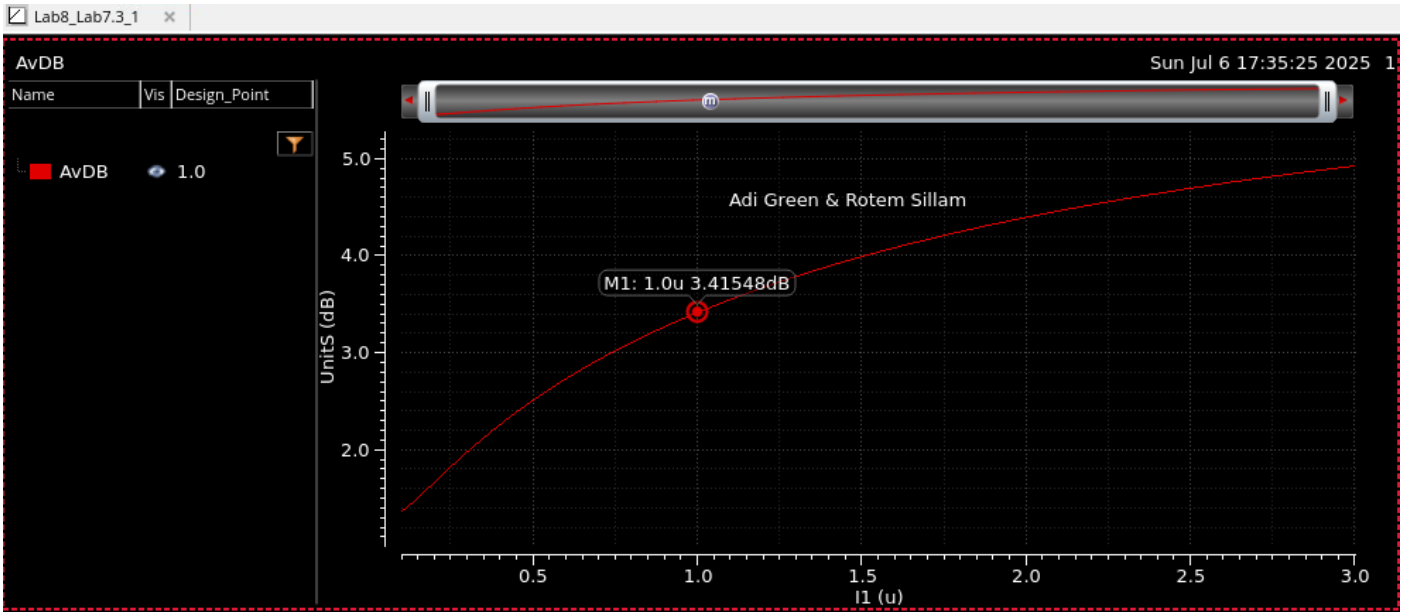
לפי הנוסחה: $g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}I_D}$ ניתן לראות שכאשר Ids גדל אז gm גדל אף הוא.

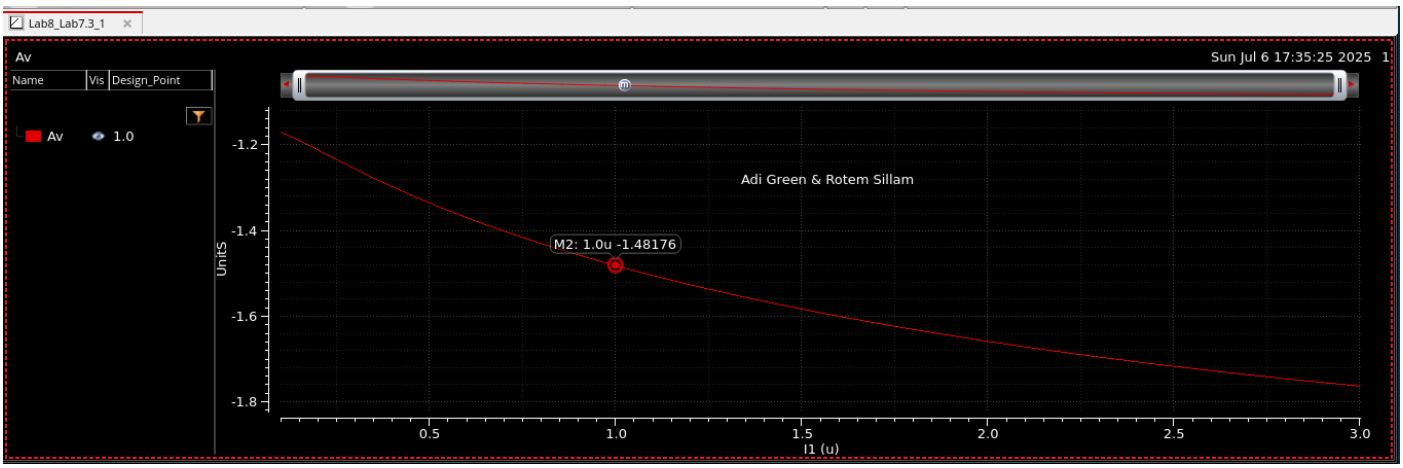
למדנו שעבור חיבור זה- חיבור דיודי של pmos, ההגבר הוא $Av = \frac{-gm1}{gm2}$.
באמצעות נוסחה זו, הוצאנו את הגרפים של Av.

כמו כן, בחרנו את ההגבר עבור I1=1uA (כפי שבחרנו בשאלות הקודמות).

גרף AV בדציבלים - עשינו $20\log\frac{gm1}{gm2} = 20\log\left|\frac{-gm1}{gm2}\right|$ על מנת להוציא את הגרף:

- ניתן לראות שעבור זרם 1uA נקבל הגבר שווה 3.41dB.



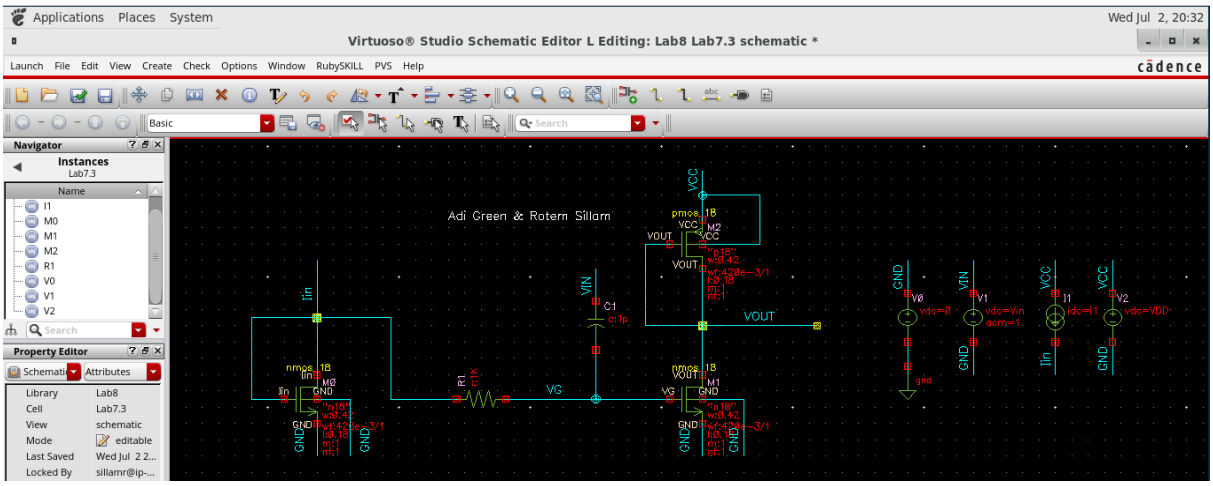


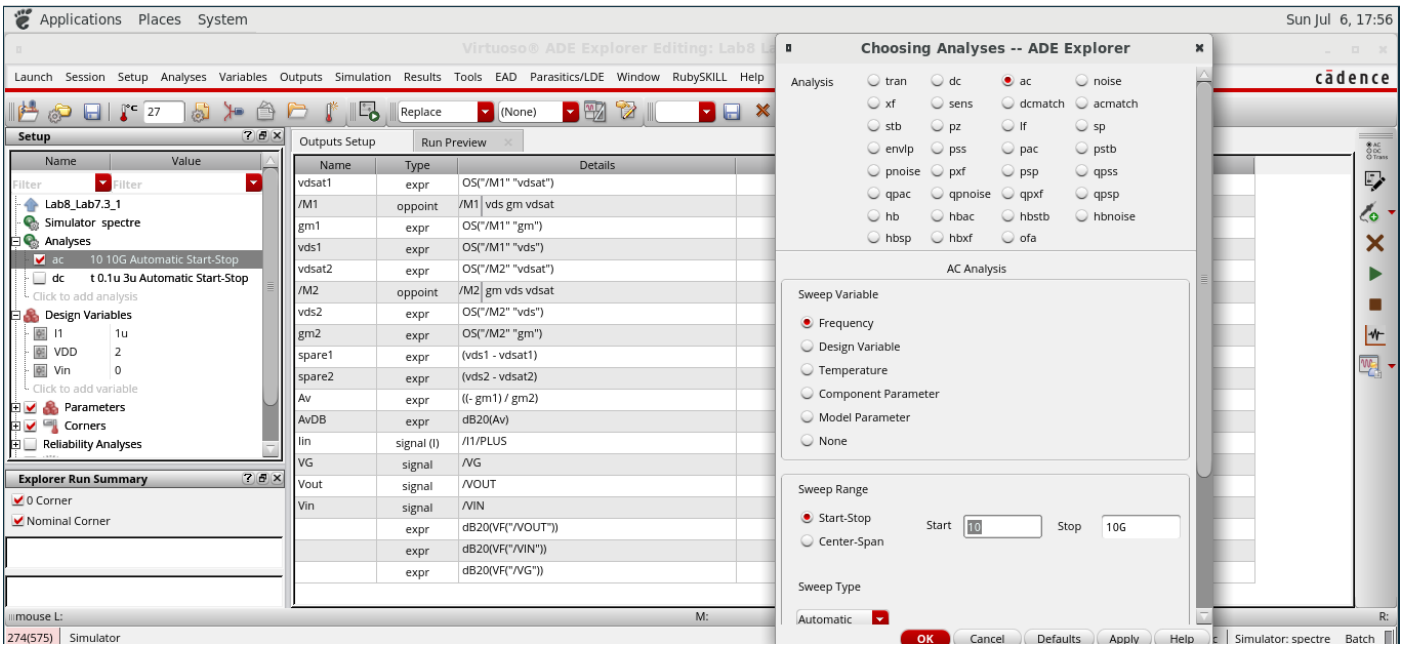
ניתן לראות כי נקבל הגבר של: $Av = \frac{-gm1}{gm2} = -1.48176$

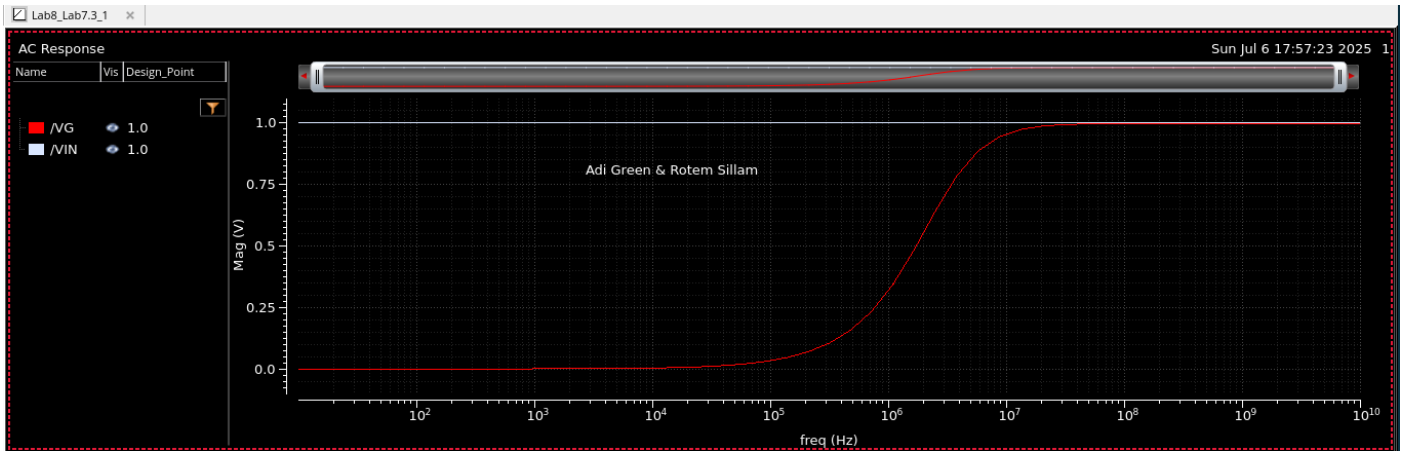
סעיף b.5

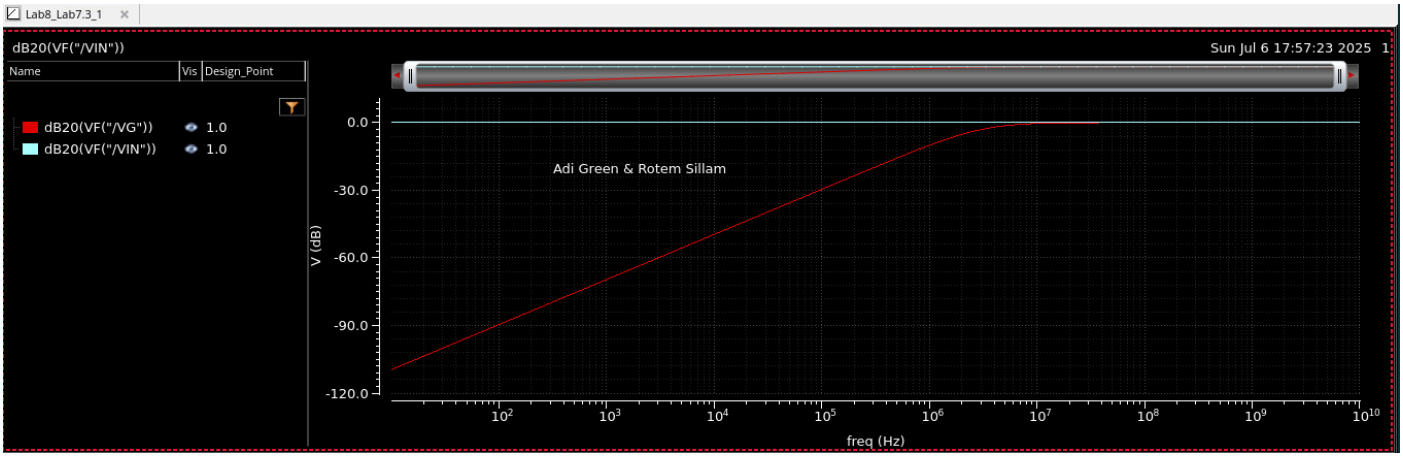
(b) Repeat step 3 (AC simulation). does the AV coincide with the expected theoretical DC gain (gm1 and gm2)?

הוספנו למתח DC של Vin מגניטודה של AC, לפי ההסבר של ה-General Rules.
כפי שעשינו בשאלה 3, הגדרנו את האמפליטודה של AC להיות 1 וולט.



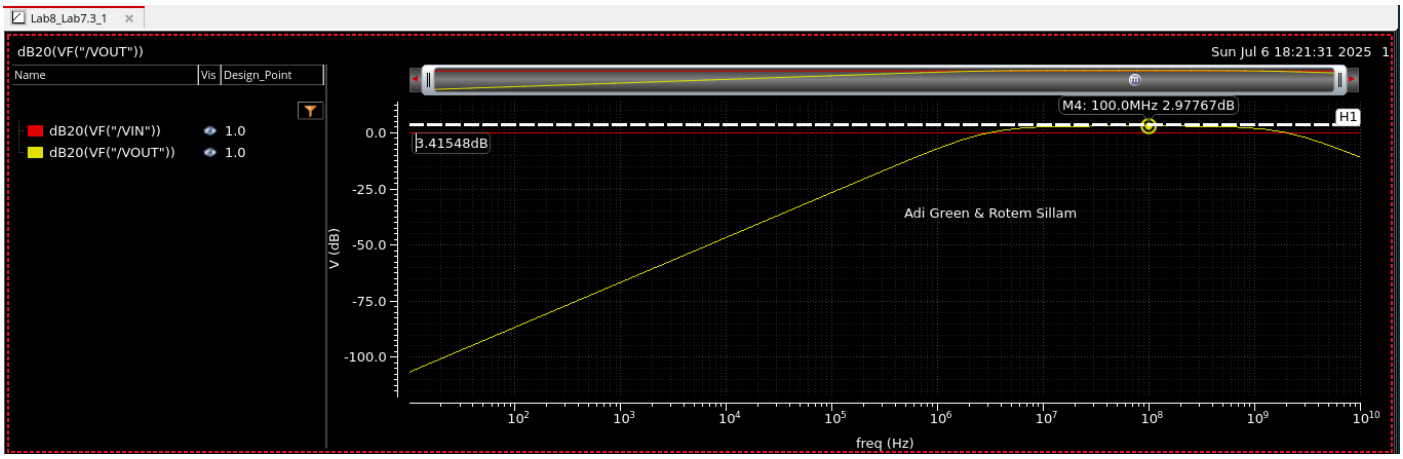


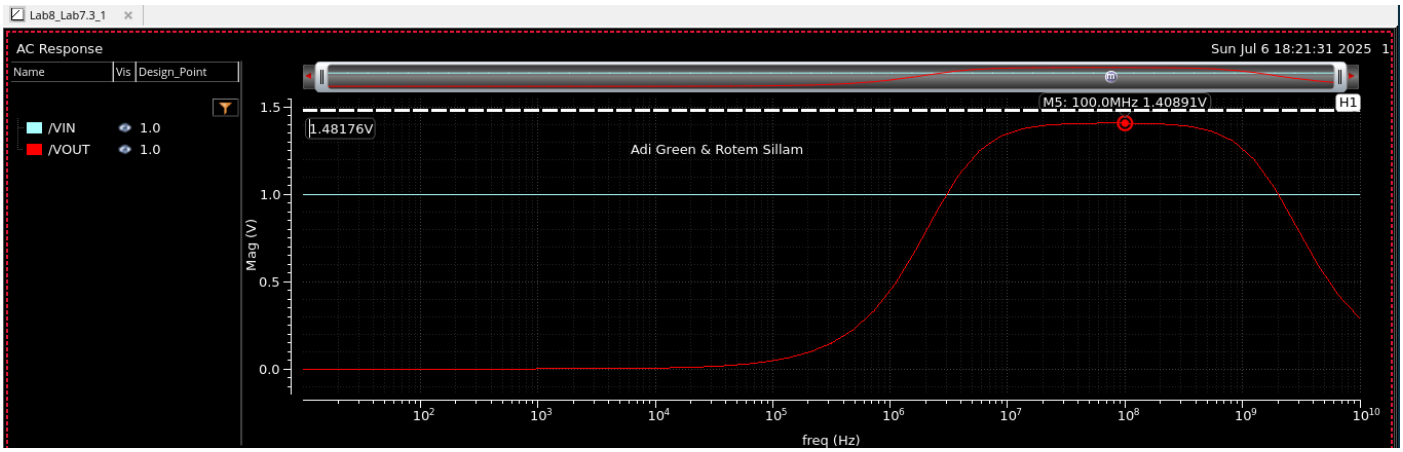




בדומה להסבר בשאלה 3, הגרף של Vin נשאר קבוע על 1 וולט מאחר שזוהי האמפליטודה שהגדרנו, ובדציבלים-Vin=0dB.
ונקבל מעגל RC של HPF. עבור תדירויות נמוכות Vg=0v (הקבל נתק), ועבור תדירויות גבוהות Vg=1v=0dB (הקבל קצר).

פונקציית התמסורת של HPF במקרה זה היא: $H(jw) = \frac{VG(jw)}{VIN(jw)} = \frac{jwR_1C_1}{1 + jwR_1C_1}$





ניתן לראות כי המקסימום תקבל סביב התדירות $10^8 Hz$.
המקסימום של Vout הוא ההגבר מאחר ש- Av=Vout/Vin, כאשר במקרה זה האמפליטודה של Vin הינה 1 וולט ולכן Av=Vout.

עבור גרף AV בדציבלים קיבלנו בסעיף קודם (dc analysis) הגבר של 3.41548dB, ובסעיף זה (ac analysis) קיבלנו 2.97767dB
עבור גרף AV קיבלנו בסעיף קודם (dc analysis) הגבר של 1.48176- (חסר יחידות) ובסעיף זה (ac analysis) קיבלנו 1.40891 (בערך מוחלט).
ניתן לראות שקיבלנו ערכים מאוד קרובים עבור שתי הסימולציות, כלומר קיבלנו עבור הנוסחה התיאורטית (סעיף קודם) ערך מאוד קרוב לערך שקיבלנו בסימולציית ac. נשים לב שבסעיף זה קיבלנו הגבר יותר נמוך (כנראה נובע מאי דיוקים ומרכיבים פיזים במעגל כמו לדוגמה ערך ההתנגדות שנבחר לנגד).

ניתן לראות כי עבור זרם I1 זהה וערכי רכיבים זהים, נקבל שהגבר בשאלה 5 של PMOS בחיבור דיודי יותר קטן מההגבר של מגבר דוחף נגד בשאלות 2-3. דבר זה נובע מאחר שכפי שלמדנו בהרצאה: Rout של שאלה 5 הינו $\frac{1}{gm2}$, ובשאלות 2-3 הוא RL. ככל ש-Rout יותר גדול כך ההגבר יותר גדול, מאחר שמתקיים: Av=-gm*Rout.
בנוסף למדנו בהרצאה כי מתקיים, Rext>>1/gm, ולכן נקבל הגבר יותר גדול במגבר דוחף נגד.