הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת חשמל
מעבדה ל-VLSI

מעבדה 2, 3

הכרה של מעגלי VLSI אנלוגיים בסיסים וביצוע מדידות על גבי שבב

מהדורה חדשה - הערות נא לשלוח ל-goel@ee

כל הערה תתקבל בברכה!

עדכון אחרון - 11:51 04/09/2019

http://www.ee.technion.ac.il/vlsi/

מסמך זה כתוב בלשון זכר ע"מ להקל על הכתיבה אך מתייחס לנשים ולגברים כאחד. עמכם הסליחה .

תוכן עניינים

פרק 1 - הקדמה 3

פרק 2 4

2.1 רקע 4

2.2 טרנזיסטורי NMOS ו- PMOS ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.3 נגד אקטיבי ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.4 מקרות זרם 7

2.5 ראי זרם ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.6 מגברים ..... **Error! Bookmark not defined.**

פרק 3 - דוחות הכנה 15

דוח הכנה - ניסוי מס׳ 1 15

3.1. נגד אקטיבי 15

3.2 מחלק מתח 16

3.3 מקור זרם פשוט 17

3.4 מקור זרם עם נגד במשוב 18

דוח הכנה - ניסוי מס׳ 2 19

3.5 מקור זרם : Cascode Current Sink 19

3.6 מגבר אופרטיבי 20

פרק 4 - תיאור של כלי Cadence 21

4.1 שרטוט סכימת המעגל 21

4.2 סימולציה 25

4.3 שרטוט LAYOUT 29

פרק 5 - ביצוע הניסויים 31

ביצוע ניסוי מס׳ 1 32

5.1 נגד אקטיבי 32

5.2 מחלק מתח 32

5.3 מקור זרם 33

5.4 מקור זרם עם נגד במשוב 33

5.5 מקור זרם בעל V_{MIN} נמוך יותר 34

5.6 מגבר אופרטיבי 34

חומר עזר 38

רקע בסיסי למערכת ההפעלה Unix - Solaris 38

מנשק המשתמש של Solaris 38

מערכת הקבצים 38

עורכי טקסט 39

הדפסות 39

פרק 1 - הקדמה

חוברת זו מהווה תדריך והכנה לניסוי במעבדה ל- VLSI אנלוגית. הניסוי מתבצע על גבי תחנות UNIX של חברת SUN עם תוכנת CADENCE לתכנון מעגלי VLSI וגם באמצעות ציוד בדיקה שנתרם ע״י חברת INTEL.

מטרת הניסוי:

1. הכרה של יחידות אנלוגיות בסיסיות ותכן של יחידות מורכבות יותר באמצעותן.
2. הכרה של כלים לתכנון מעגלים אנלוגיים.
3. הכרה של ציוד בדיקה בסיסי הנדרש לביצוע מדידה של התנהגות של מעגל אנלוגי.

מבנה הניסוי:
הניסוי מחולק לשתי פגישות. כל אחת באורך ארבע שעות.
לפני כל ניסוי **חובה** להכין דו״ח מכין, ולהגישו למנחה עם תחילת הניסוי.

ניסוי מס׳ 1 (פגישה ראשונה):
ניתוח תאורטי, סימולציה וביצוע מדידות של:

- נגד אקטיבי
- מחלק מתח
- מקור זרם פשוט
- מקור זרם עם נגד במשוב

ניסוי מס׳ 2 (פגישה שניה):
ניתוח תאורטי, סימולציה וביצוע מדידות של:

- מקור זרם: Cascode Current Sink
- מגבר אופרטיבי

דרישות הניסוי:

- הגשת דוח הכנה לכל ניסוי לפי שאלות מ**Error! Reference source not found.**.
- בוחן הכנה לניסוי.
- ביצוע הניסוי מול המחשב.
- הגשת דוח מסכם כשבועיים לאחר ביצוע ניסוי מס׳ 2.

הדוח המסכם יכלול:

- הדוחות המכינים לשני חלקי הניסוי.
- תדפיסי כל המעגלים, הסימולציות ותוצאות הסימולציות, שהתבצעו במהלך הניסויים.
- הערות בכתב יד לגבי התוצאות שהתקבלו (על גבי התדפיסים).

הערה: תדריך ניסוי זה מנוסח בחלקו בלשון זכר אך מיועד לנשים וגברים כאחד

פרק 2- מבוא

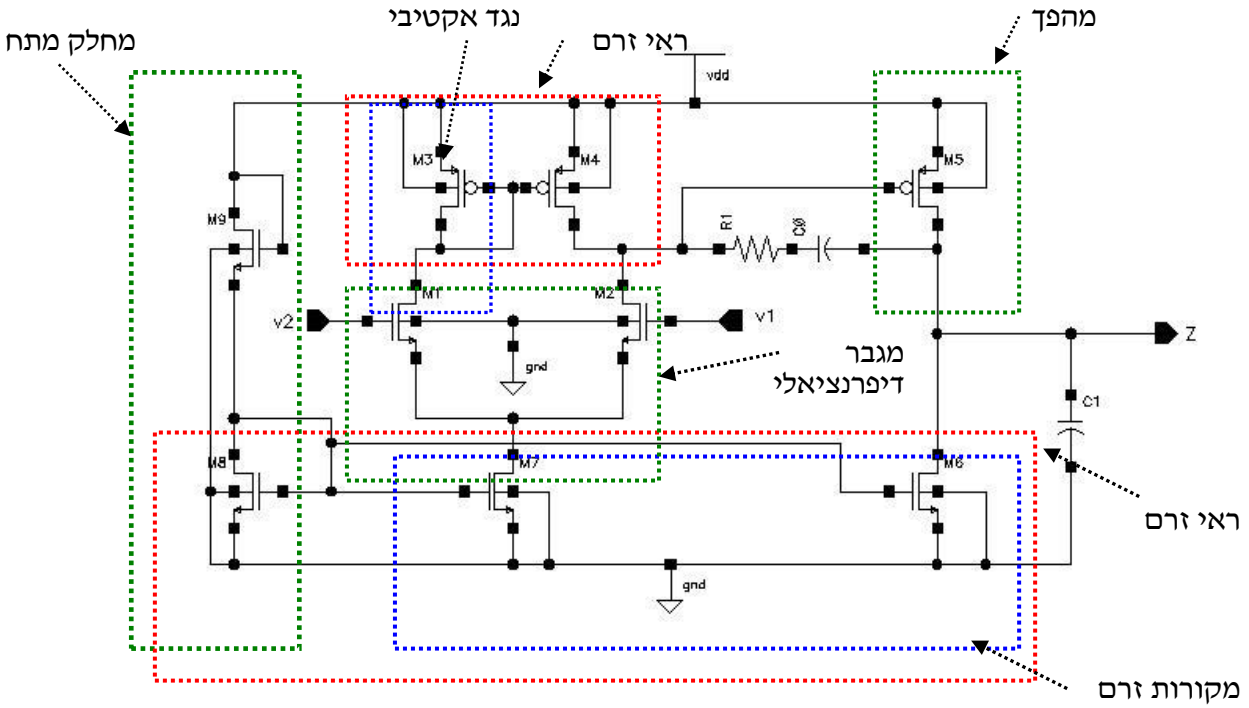
2.1 רקע

כמו במערכות ספרתיות, גם מערכות אנלוגיות מורכבות לרב מיחידות בסיסיות פשוטות. אחת המטרות של ניסוי זה היא להכיר לעומק יחידות אנלוגיות בסיסיות וכיצד ניתן להרכיב באמצעותן מערכות מורכבות יותר.
על מעגלים שיוצרו ב- test chip באופן מיוחד לניסוי זה. טכנולוגית היצור היא CMOS 1.5u.

יחידות בסיסיות אנלוגיות נפוצות הן :

- מתגים
- עומסים אקטיביים
- מקורות מתח וזרם
- ראי זרם
- מגברים מהפכים
- מגברים דיפרנציאליים

אנו נכיר את רוב המעגלים הנ"ל ונממש באמצעותם מגבר אופרטיבי שמופיע באיור מס' 1.



איור מס' 1 : מגבר אופרטיבי

באיור מס' 1 מופיע מגבר אופרטיבי פשוט. באיור ניתן לראות כיצד ניתן להרכיב מערכת מורכבת באמצעות היחידות המוזכרות לעיל. יש לשים לב שלעתים קרובות התקנים מסוימים משמשים ליותר מתפקיד אחד. לדוגמא, M3 מתפקד גם כנגד אקטיבי וגם כחלק מראי הזרם. עובדה זאת מקשה על הגדרת התפקיד של כל התקן במעגל נתון. כאמור, בשלב ראשון אנו נכיר את רוב היחידות הבסיסיות.

כללי :

טכנולוגית היצור של המעגל בניסוי : CMOS 1.5µ 2 Metal 2 Poly.

מספר פרמטרים של התהליך :

$T_{ox} = 3.13\times10^{-8}$ m
$\mu_{oN} = 650$ cm^2/Vsec
$\mu_{oP} = 236$ cm^2/Vsec
$\varepsilon_o = 8.854$ pF/m
$\varepsilon_{SiO_2} = 3.85$
$V_{DD} = 5$ V
$V_{TN} = 0.6$V ו- $V_{TP} = -0.87$V

נחשב ערכים שנצטרך במהלך הניסוי :

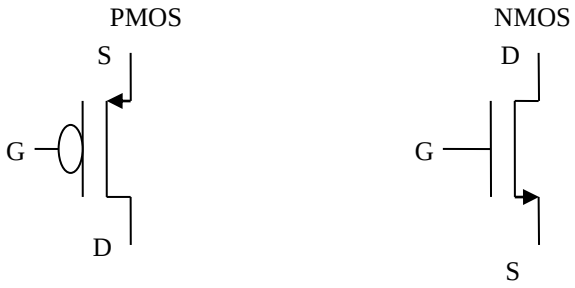
א.

$C_{ox} = \varepsilon_o \varepsilon_{SiO_2} / T_{ox} = 8.854 \times 3.85 \times 10^{-12}/3.13 \times10^{-8} = 109$ nF/cm^2

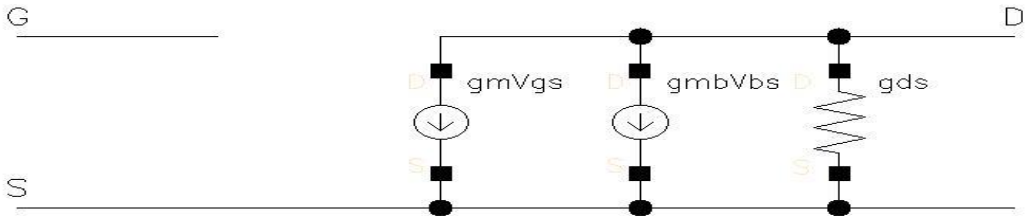
ב.

$K'_N = \mu_{oN} \varepsilon_o \varepsilon_{Si\,O_2}/ T_{ox} = 71$ µA/V^2
$K'_P = \mu_{oP} \varepsilon_o \varepsilon_{Si\,O_2}/ T_{ox} = 26$ µA/V^2

2.2 טרנזיסטורי NMOS ו- PMOS



איור מס׳ 2.1 : טרנזיסטור NMOS ו- PMOS



איור מס׳ 2.2 :סכמת תמורה לאות קטן בתדר נמוך

עבור NMOS :

$I_D = 0$ if $V_{GS} < V_T$; $V_{DS} >= 0$ (קטעון)
$I_D = K'W/L(V_{GS} - V_T - V_{DS}/2) V_{DS}$ if $V_{GS} > V_T$ and $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$ (ליניארי)
$I_D = K'W/2L(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$ if $V_{GS} > V_T$ and $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ (רוויה)

עבור PMOS :

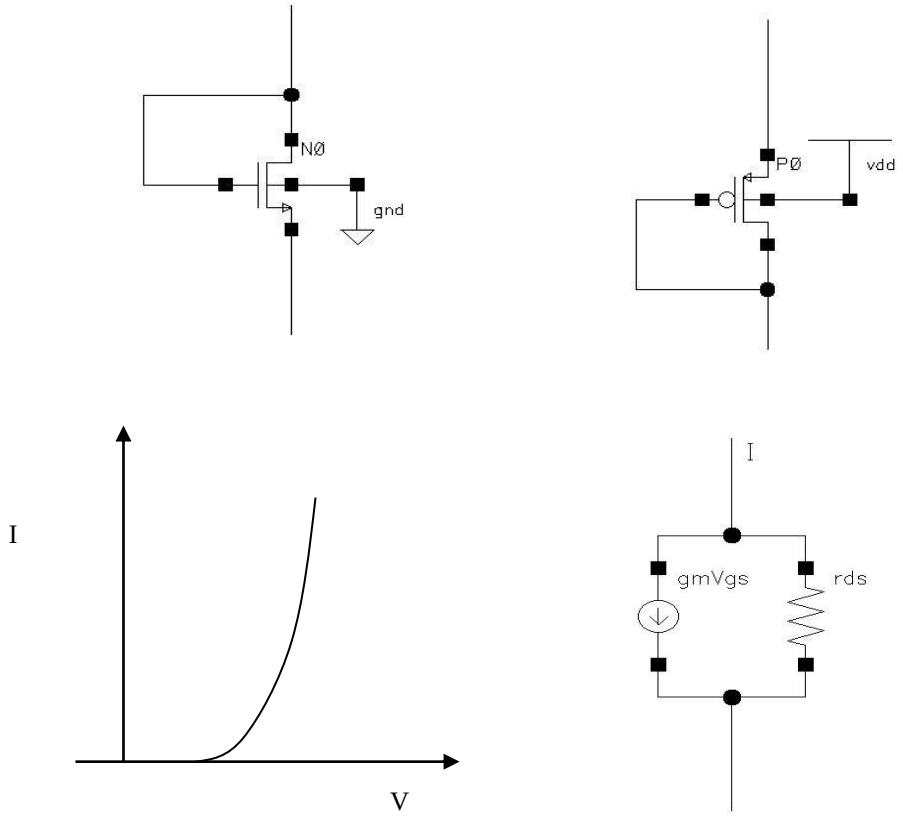
$I_D = 0$	if	$V_{GS} > V_T$; $V_{DS} <= 0$	(קטעון)
$I_D = -K'W/L(V_{GS} - V_T - V_{DS}/2)\ V_{DS}$	if	$V_{GS} < V_T$ and $0 > V_{DS} > V_{GS} - V_T$	(ליניארי)
$I_D = -K'W/2L(V_{GS} - V_T)^2(1 - \lambda\ V_{DS})$	if	$V_{GS} < V_T$ and $V_{DS} < V_{GS} - V_T$	(רוויה)

2.3 נגד אקטיבי

התקנים פסיביים כגון נגדים וקבלים חשובים מאד בעיבוד של אותות אנלוגיים. ניתן לממש קבל באמצעות לוחות מקבילים של מוליך-מבודד-מוליך. בקבל MOS משתמשים בתחמוצת דקה כמבודד והלוחות המוליכים עשויים ממתכת או ממוליך למחצה בעל ריכוז סיגים גבוה. בשיטה זו (כאשר משתמשים בשטחים סבירים) מתקבלים קבלים בגדלים של עד 20pF.

אם נתעלם מהדק המצע, ניתן להפוך טרנזיסטור להתקן בעל שני הדקים ע"י קיצור הדק ה- gate להדק ה- drain (יש לחבר את הדק ה- source למתח השלילי יותר עבור NMOS). מבנה זה ממש נגד לאות קטן בעל תכונות ליניאריות בטווח קטן. למימוש נגד באמצעות טרנזיסטור דרוש שטח קטן בהרבה מהשטח הדרוש למימוש נגד בגודל זה בעזרת פוליסיליקון.

באיור מס' 2.3 ניתן לראות מימוש של נגד אקטיבי גם בעזרת NMOS וגם בעזרת PMOS. בנוסף, מופיע גם מעגל התמורה לאות קטן וגם אופיין מתח-זרם.



איור מס' 2.3 : נגד אקטיבי PMOS ו- NMOS, מעגל התמורה ואופיין מתח-זרם

מכיוון ש- $V_{DS} = V_{GS}$ הטרנזיסטור נמצא בתחום הרוויה ולכן :

$$I_D = (K'W/2L)(V_{GS} - V_T)^2$$

$$<= > V_{GS} = V_{DS} = V_T + \sqrt{(2I_DL/K'W)} \qquad K'=\mu_o C_{ox}$$

$$g_m = \delta I/\delta V = (K'W/L)(V_{GS} - V_T) = \sqrt{(2I_DK'W/L)}$$

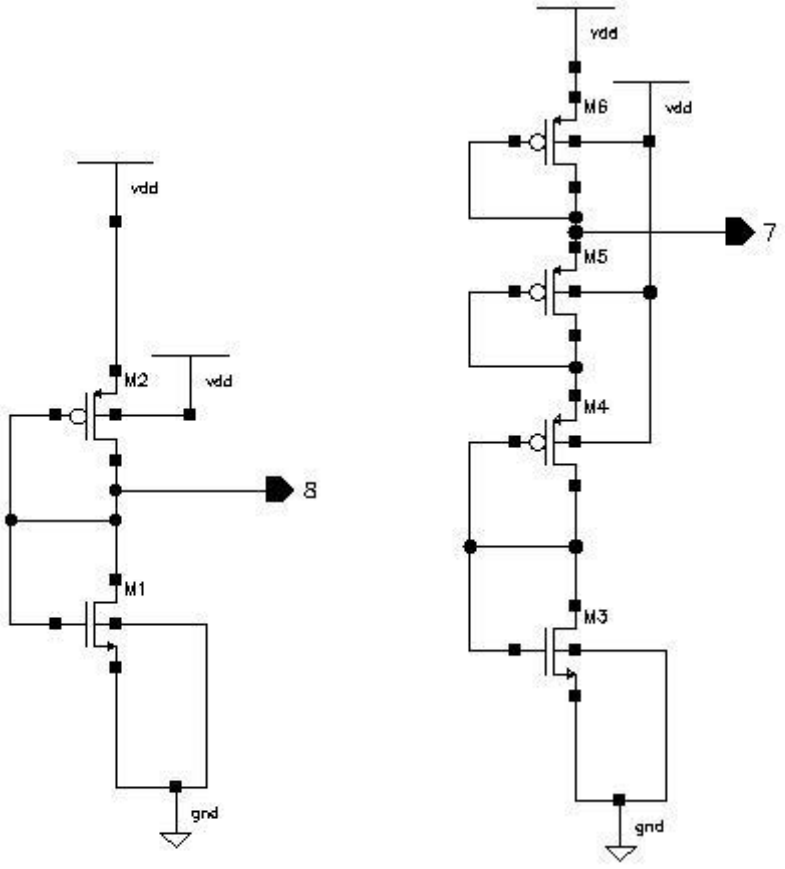
מתוך מעגל התמורה לאות קטן, מתקבל :

$$g = (1+g_m r_{ds})/r_{ds} \approx g_m \qquad (V_{bs} = 0 \text{ : בהנחה ש})$$

מתוך המשוואות, ברור שהנגד הנ"ל אינו ליניארי.

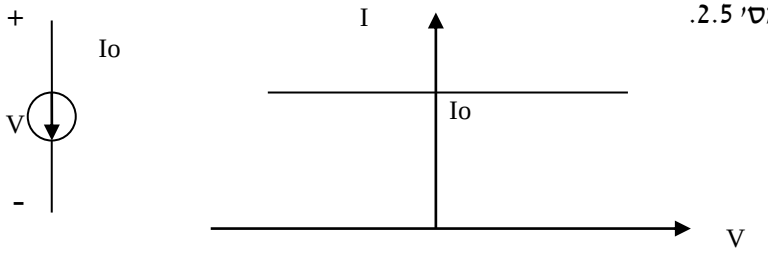
באיור מס' 2.4 מוצגים שני מחלקי מתח ממומשים בעזרת טרנזיסטורי NMOS ו- PMOS. משתמשים במעגלים מסוג זה כאשר יש צורך במקור מתח במעגל. גם כאן, מימוש של מחלק המתח דורש הרבה פחות שטח מאשר מחלק מתח בעל תכונות דומות הממומש בעזרת נגדי פוליסיליקון.

איור מס' 2.4 : מחלקי מתח



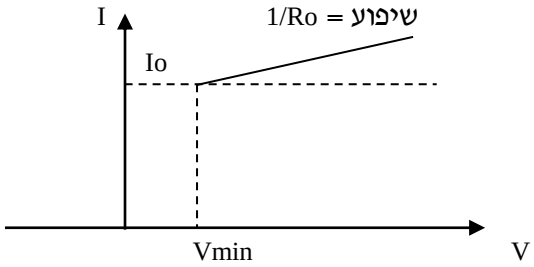
2.4 מקורות זרם

מקור זרם אידיאלי הינו התקן בעל שני הדקים שבו זרם קבוע עבור כל מתח שמופעל עליו. ראה איור מס' 2.5.



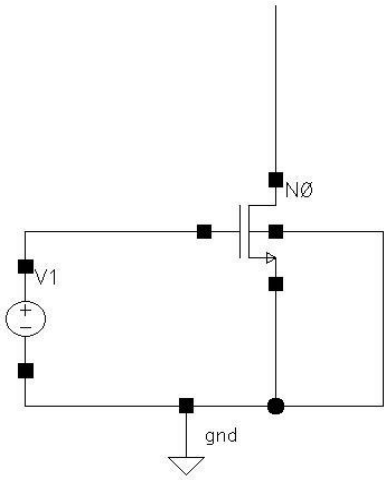
איור מס' 2.5 : מקור זרם אידיאלי

איור מס' 2.6 מציג אופיין מתח-זרם של מקור זרם אמיתי. ניתן לראות שהזרם בערך קבוע עבור תחום מוגבל של מתחים ושהמקור אינו דו כיווני. בנוסף לכך, בתחום שבו הזרם בערך קבוע, השיפוע של הגרף מייצג את המוליכות המקבילית של המקור שבמקרה האידיאלי שווה לאפס.



איור מס' 2.6 : מקור זרם אמיתי

איור מס' 2.7-1 מציג מימוש של מקור זרם הממומש בעזרת טרנזיסטור NMOS:

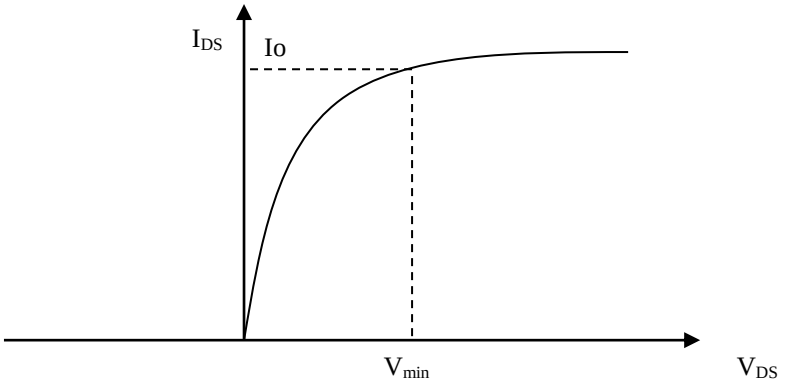


איור מס' 2.7-1 : מקור זרם NMOS

$$I_D = (K'W/2L)(V_{GG} - V_T)^2$$

עבור $V1>V_{MIN}$ ואם נניח ש: $\lambda = 0$

אופיין מתח-זרם של המקור מוצג באיור 2.7-2 :



איור מס' 2.7-2 : אופיין מתח-זרם של המקור

ברור ש :

$$V_{MIN} = V_{DS}\,(sat) = V_{GG} - V_T$$

התנגדות היציאה של המקור בתחום $V>V_{MIN}$ נתון ע"י :

$$R_o = 1/g_{ds} = 1/\lambda|I_D|$$

עבור:

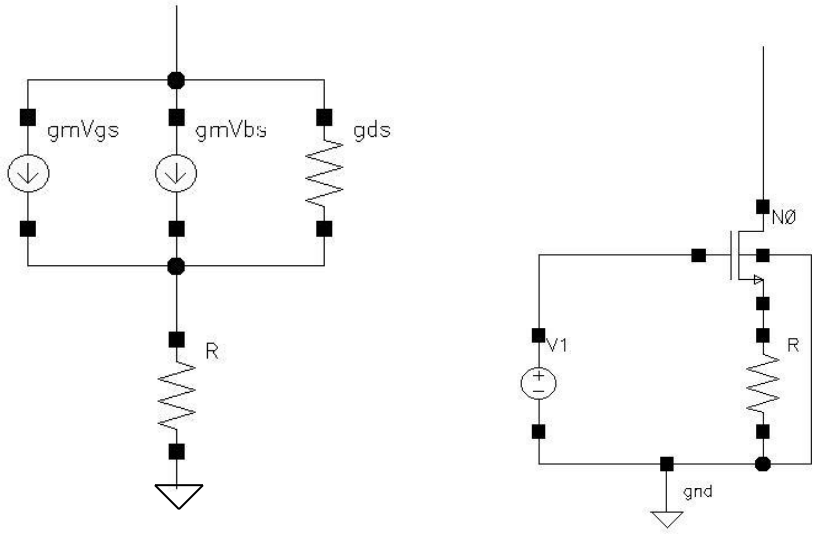
$V_{GG} = 2V$ $W = 50\mu$ $L = 10\mu$ $V_T = 0.6V$
$K'_N = 71\mu A/V^2$ $\lambda = 0.02\ V^{-1}$

מתקבל :

$V_{MIN} = 2 - 0.6 = 1.4\ V$ $I_o = [71x10^{-6}x50\ (2-0.6)^2]\ /20 = 348\mu A$
$R_o = 1/(0.02x348x10\text{-}6) = 144K\Omega$

הגדלת R_0

לעתים קרובות, הערך המתקבל עבור R_o בתצורה זאת אינו גבוה מספיק. ניתן להגדיל את R_o ע"י הקטנת I_o אבל קיימות שיטות יעילות יותר. איור מס' 2.8 מציג כיצד ניתן להגדיל את R_o ע"י שימוש במשוב שלילי.



איור מס' 2.8 : מקור זרם עם נגד במשוב

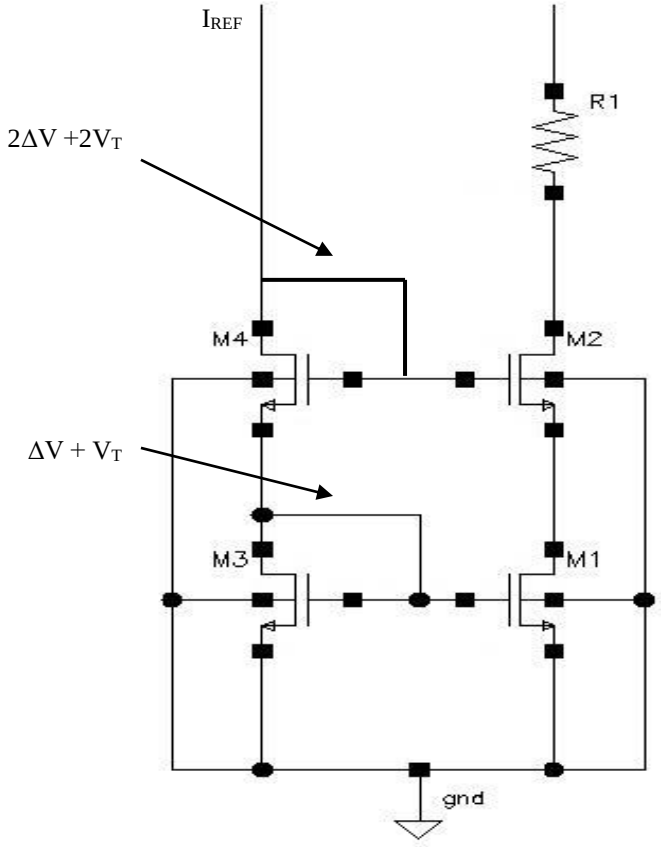
מתוך הסכמה ניתן לרשום :

$$Ro = \Delta V/\Delta I = r_{ds}[1 + (g_m + g_{mb} + g_{ds})R] \approx (1 + g_mR)r_{ds}$$

כאשר : $g_m > g_{mb} > g_{ds}$.
בהמשך נחשב את הערך של Ro במעגל שבו R ממומש כנגד אקטיבי.

הקטנת V_{MIN}

באיור מס' 2.9a מופיע מקור זרם מסוג Cascode Current Sink. נגדיר : $V_{GS} = \Delta V + V_T$. ניתן לומר ש- ΔV : הוא מתח ה- V_{DS} המינימלי הדרוש על מנת לשמור התקן ברוויה (מתח זה זהה עבור כל הטרנזיסטורים בעלי מימים שווים וזרם זהה).



איור מס׳ 2.9a : מקור זרם מסוג Cascode Current Sink

ברוויה, ניתן לרשום :

$$I_D = (K'W/2L)(V_{GS} - V_T)^2 = (K'W/2L)(\Delta V)^2$$

באיור 2.9a, אם M3 זהה ל- M4 ואם נזניח את אפקט המצע, אזי $V_{G4} = 2\Delta V + 2V_T$. כדי ש- M2 יהיה ברוויה, דרוש ש :

או ש : $V_{DS2MIN} = V_{GS2} - V_T$

כלומר : $V_{D2MIN} = V_{G2} - V_T$

$$V_{D2MIN} = 2\Delta V + 2V_T - V_T = 2\Delta V + V_T$$

זהו למעשה ה- V_{MIN} של מקור הזרם. כמובן, צריך לוודא שגם M1 נמצא ברוויה ואם לא צריך לשנות את I_{REF} בהתאם.

באמצעות מקור זרם מסוג Cascode Current Sink דו-דרגתי שמופיע באיור 2.9b, ניתן להקטין את V_{MIN}. במעגל זה, נניח שכל ההתקנים מתואמים ונזניח את אפקט המצע על M6,M4,M2. נתון ש :

$$4W_6/L_6 = W_1/L_1 = W_2/L_2 = W_3/L_3 = W_4/L_4 = W_5/L_5$$

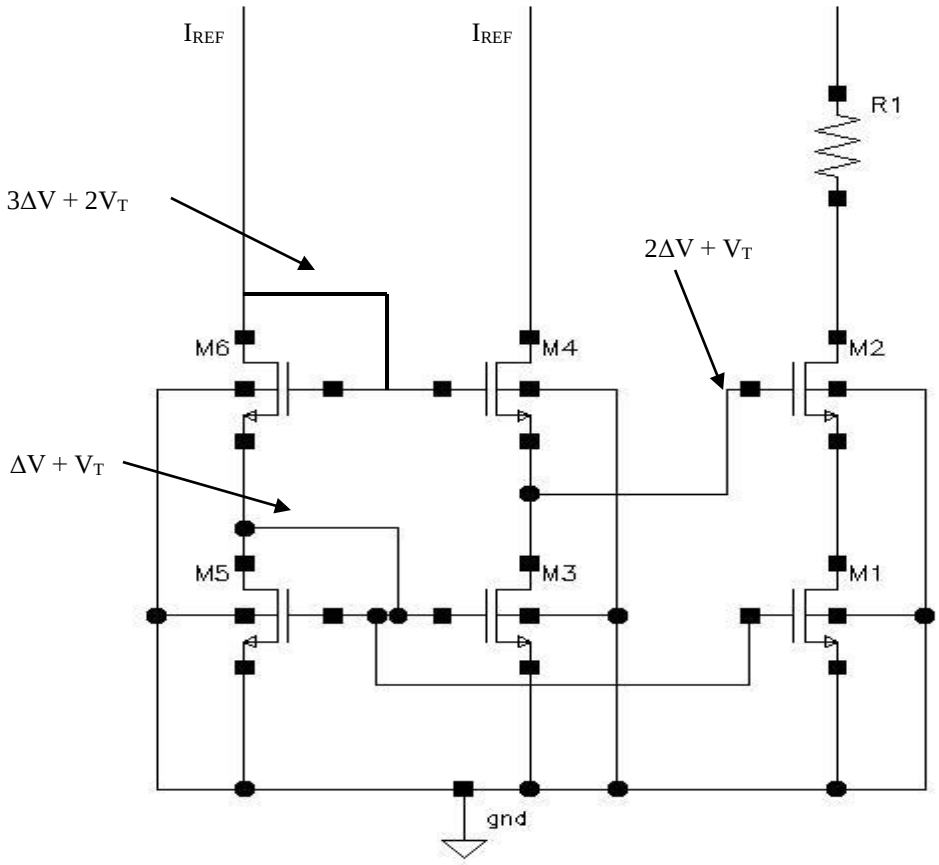
מתוך המשוואה של I_D לעיל, מתקבל ש : $V_{GS6} = V_T + 2\Delta V$ ולכן

$$V_{G6} = V_{G4} = 2V_T + 3\Delta V_T$$

מכיוון ש : $I_{D4} = I_{D3}$ אזי : $V_{GS3} = V_{GS4} = \Delta V + V_T$

ולכן : $V_{G2} = V_{G4} - V_{GS3} = V_T + 2\Delta V$

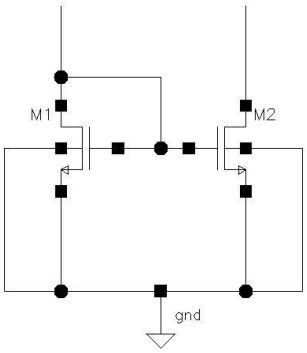
מכאן : $\mathbf{V_{D2MIN} = V_{G2} - V_T = 2\Delta V}$



איור מס׳ 2.9b : מקור זרם בעל V_{MIN} נמוך

2.4 ראי זרם

בסעיף זה נכיר מעגלים דומים לאלה שבסעיף הקודם אלא שבסעיף זה מקורות הזרם מבוקרים ע״י זרם DC ולא ע״י מתח DC כפי שהיה בסעיף הקודם. בנוסף לכך המעגלים כאן נבדלים מהקודמים בזה שהם מסתמכים על עקרון של התקנים מתואמים. מעגלים אלה נקראים ראי זרם.



איור מס׳ 2.10 : ראי זרם MOS פשוט

איור מס׳ 2.10 מציג ראי זרם MOS פשוט. אם $V_{DS1} > V_{T1}$, M1 יהיה תמיד ברוויה. אם נניח ש :
$V_{DS2} > V_{GS2} - V_{T2}$ אז ניתן להשתמש במודל הרוויה עבור שני התקנים :

$$I_D = K'W/2L(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$$
$$\Rightarrow V_{GS1} - V_{T1} = \sqrt{[2L_1 I_{D1}/K'_N W_1(1 + \lambda V_{DS1})]}$$
$$\Rightarrow V_{GS2} - V_{T2} = \sqrt{[2L_2 I_{D2}/K'_N W_2 (1 + \lambda V_{DS2})]}$$

מכיוון שמתחי המצע של M1 ושל M2 זהים, אזי $V_{T1} = V_{T2}$ ומתקבלת התוצאה הבאה:

$I_{out}/I_{in} = I_{DS2}/I_{DS1} = K_{N2}'W_2L_1(1 + \lambda_2 V_{DS2}) / K_{N1}'W_1L_2(1 + \lambda_1 V_{DS1})$
$R_{out} = V_{out}/I_{out} = r_{ds2} = 1/\lambda\, I_{D2} = 1/\lambda I_{out}$

עבור:

$V_T = 0.6V$; $K_N' = 71\mu A/V^2$

נבחר $I = 25\mu A$ מתקבל:

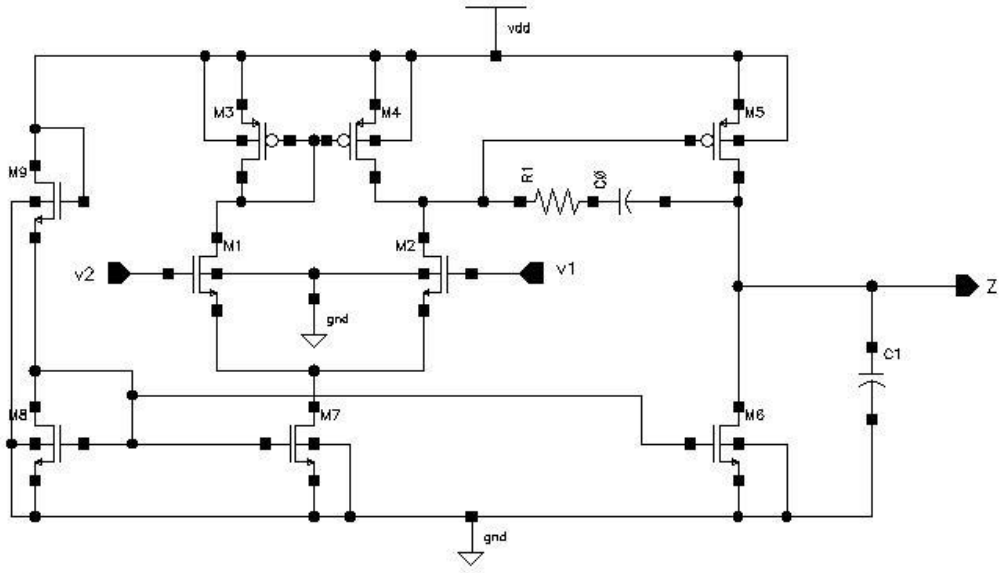
$R_{out} = 1/(0.02x25x10^{-6}) = 2M\Omega$;

אם נתון ש- $W/L = 1/4$ עבור שני הטרנזיסטורים. נחשב את V_{GS} בנקודה בה הטרנזיסטור עובר מהתחום האוהמי לתחום הרוויה:

$I_D = K_N'W/2L(V_{GS} - V_T)^2 \Leftrightarrow 25 = 71\,(V_{GS} - 0.6)^2 / 8$
$\Rightarrow V_{GS} = 2.3V$
$\Rightarrow V_{MIN} = 2.3 - 0.6 = 1.7V$

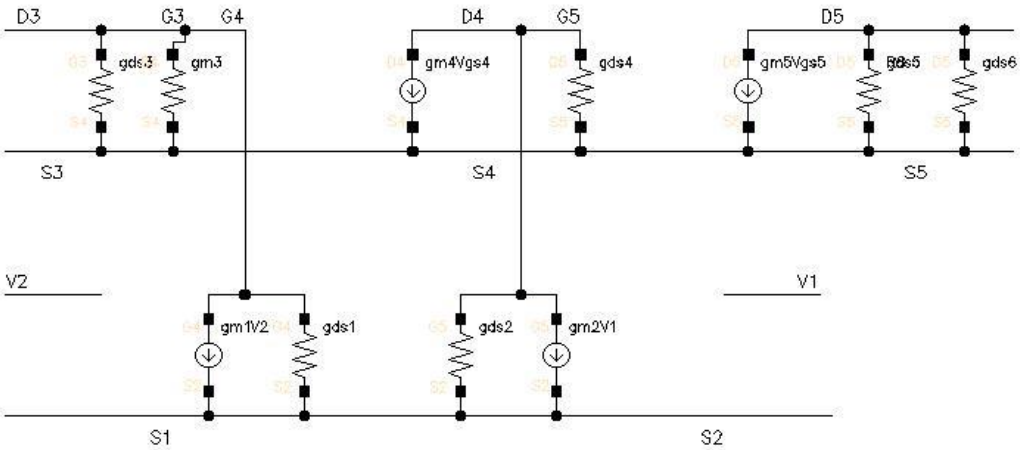
2.6 מגברים

ניתן לראות שהמגבר האופרטיבי שבאיור מס' 2.11 ממומש באמצעות היחידות הבסיסיות : נגד אקטיבי, מקור זרם, ראי זרם, מגבר דיפרנציאלי ומגבר מהפך (ראה עמ' 4). עד כה לא נותחו המגבר הדיפרנציאלי והמגבר המהפך. למרות זאת עדיין אפשר להבין את הניתוח של המגבר האופרטיבי.

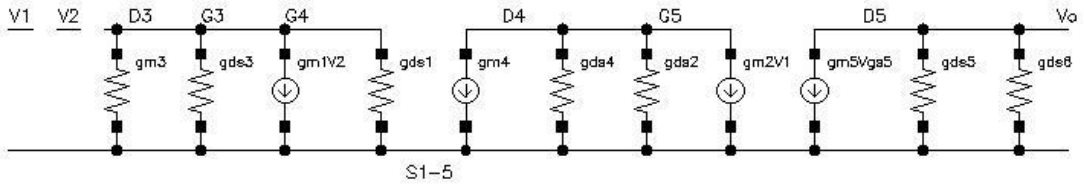


איור מס' 2.11 : מגבר אופרטיבי

ראשית נצייר את סכמת התמורה לאות קטן של המגבר (ללא הנגד R והקבל C) עבור תדרים נמוכים. הסכמה מופיע באיור מס' 2.12. לאחר סידור הרכיבים בצורה נוחה יותר מתקבלת הסכמה שבאיור מס' 2.13.



איור מס' 2.12 : סכמת התמורה לאות קטן של המגבר



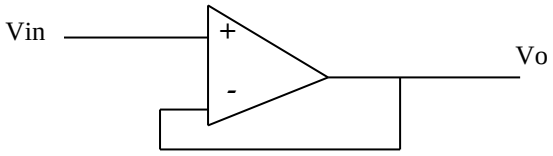
איור מס׳ 2.13 : סכמת התמורה לאות קטן של המגבר לאחר סידור הרכיבים

נבצע ניתוח עבור המוד הדיפרנציאלי כלומר V1 = -V2. מתוך סימטריה, ידוע ש :
VS1 = VS2 קבוע, לכן ניתן לחשב ש- V_o/V_{in} יהיה מהצורה :

$$A_0 = V_o/V_{in} = V_o/(V_1-V_2) = g_{m2}g_{m5}R_IR_{II}$$

יציבות המגבר :

בניסוי זה נחבר את המגבר כעוקב מתח :



$$V_o = A(s)[V_{in} - V_o] \Rightarrow V_o/V_{in} = A(s)/[1+A(s)]$$

כאשר A(s) הוא ההגבר בחוג פתוח. במערכת עם משוב מסוג זה, המערכת תהיה יציבה אם הערך המוחלט של הגבר החוג $|A(j\omega)B(j\omega)|$ קטן מאחד כאשר הפאזה שווה ל- 180^O (במקרה זה $B(j\omega)= 1$). מסתבר שהמגבר שלנו אינו יציב מכיוון שההגבר גדול מאחד בזמן שהפאזה מתהפכת (כלומר מגיעה ל- 180^o). בכדי להבטיח יציבות טובה למגבר, עלינו להשיג phase margin מספיק גבוה, ומבחינת ערכים כדאי לעבוד לפחות ב-45^o , ולרוב מומלץ אפילו 60^o.
נשתמש בשיטה הנקראת קומפנסצית מילר, לפיה נוסיף קבל C_C (בתחילה ללא הנגד R) בין שתי דרגות המגבר. תגובת התדר של המגבר תהיה מהצורה :

$$V_o(s)/V_2(s) = A_0 (1 - s/z) / (1 - s/p_1) (1 - s/p_2)$$

כאשר האפס הוא בחצי המישור הימני, ושני הקטבים הם בחצי המישור השמאלי, ומתקיים :

$$GB \approx g_{m1} / C_C \quad \text{-ו-} \quad z \approx g_{m5} / C_C$$

והקטבים :

$$p_1 \approx -(g_{m5}R_IR_{II}C_C)^{-1} \quad \text{-ו-} \quad p_2 \approx -g_{m5} / Cout$$

ניתן להראות, כי בהנתן $z > 10GB$, מספיק שיתקיים $|p_2| > 1.22\ GB$ על מנת שלמגבר יהיה phase margin של למעלה מ-45^o .

בטרנזיסטור MOS הפרמטר gm לא מספיק גדול, ולכן עבור קיבול מוצא שקרוב בערכו לקיבול הקומפנסציה, נקבל $z \approx |p_2|$ ולא תתקיים הדרישה שציינו, וכתוצאה מזה לא מתקבל phase margin גדול מספיק כדי להבטיח יציבות. הוספת נגד R בטור לקבל תזיז את האפס ל- 'z כאשר:

$$z' = 1/[C_C(1/g_{m2} - R)] >> z$$

כתוצאה מכך ה- phase margin גדל ומייצב את המגבר.

פרק 3 - דוח"ות הכנה

דו"ח מכין - ניסוי מס' 1

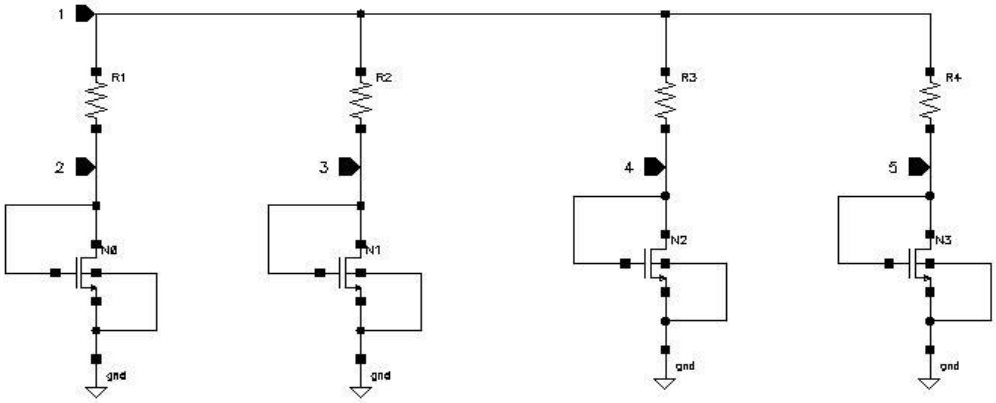
3.1. טרנזיסטור PMOS

צייר גרף של הזרם כפונקציה של המתח של טרנזיסטור PMOS (בעל W/L = 60/4) עבור שני המקרים הבאים :

א. I_{DS} כפונקציה של V_{GS} כאשר V_{DS} שווה ל- 5V- ו- V_{GS} משנה מ-0 ל- 5V-.
ב. I_{DS} כפונקציה של V_{DS} כאשר V_{GS} משתנה מ- 0 ל - 5V- בקפיצות של 1V.

3.2. נגד אקטיבי

א. איור מס' 3.2 מציג מימוש של ארבעה נגדים אקטיביים בעזרת טרנזיסטורי NMOS כפי שמומשו ב- test chip. הנגדים R1 עד R4 (שערכם 1.3Kohm) נוספו למעגל על מנת שניתן יהיה למדוד את הזרם הזורם דרך הטרנזיסטורים עם הסקופ' בצורה נוחה.



איור מס' 3.2 : מימוש ארבעה נגדים אקטיביים בעזרת טרנזיסטורי NMOS.

נתון ש - $V_{TN} = 0.6V$. הנח ש- $\lambda=0$.

3.2.1 רשום את המשוואה שמתארת את הקשר בין I_D למתח הכניסה. בעזרת excel (או תוכנה אחרת) חשב את I_D עבור $V_{DD} = 0,1,2,3,4,5V$ אם נתון ש :

i. $W/L = 4\mu/2\mu$
ii. $W/L = 20\mu/10\mu$
iii. $W/L = 60\mu/10\mu$
iv. $W/L = 120\mu/10\mu$

ניתן להציג את התוצאות בטבלה או בגרף.

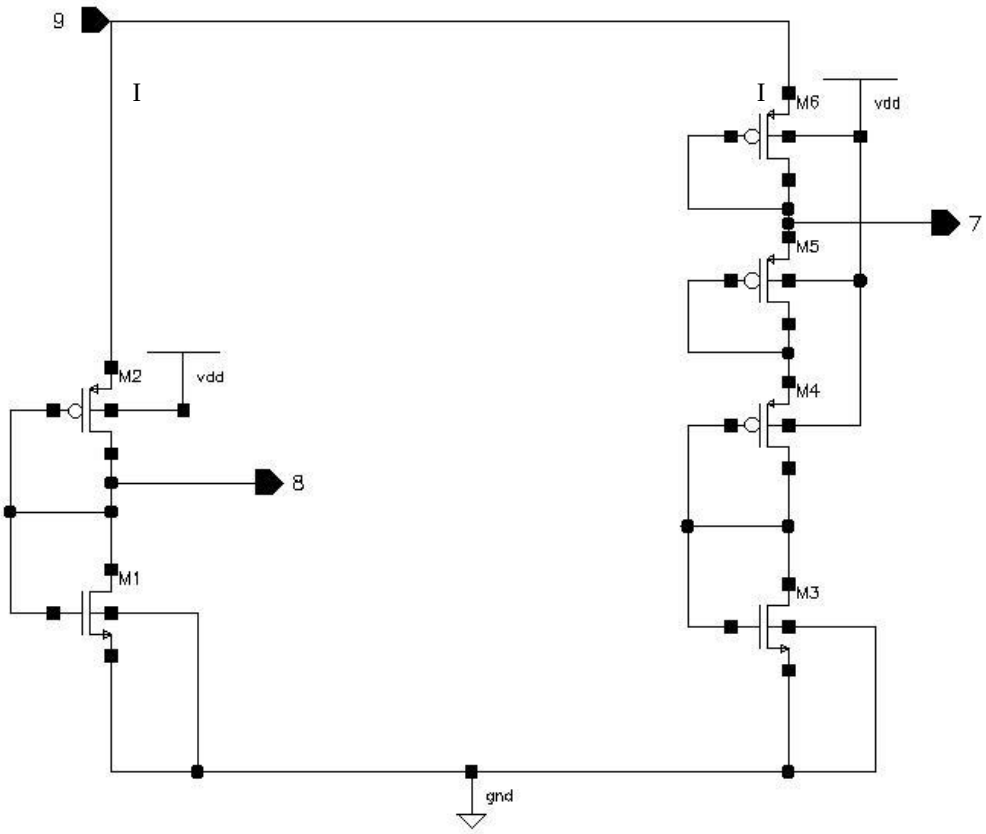
3.2.2 חשב את gm עבור $V_{DS} = 3V$ כאשר :

i. $W/L = 20\mu/10\mu$
ii. $W/L = 120\mu/10\mu$

3.2.3 מה ההתנגדות של שני הנגדים של סעיף 3.2.2 כאשר $V_{DS} = 3V$?

3.3 מחלק מתח

א. איור מס' 3.3 מציג מימוש של שני מחלקי מתח בעזרת טרנזיסטורי NMOS ו- PMOS כפי שמומשו ב- test chip. תפקיד הנגדים הוא כפי שהוסבר בסעיף 3.2.



איור מס' 3.3 : מימוש שני מחלקי מתח בעזרת טרנזיסטורי MOS.

נתון ש : $V_{TN} = 0.6V$ ו- $V_{TP} = -0.87V$

3.3.1 נתון ש : $W_N/L_N = W_P/L_P = 20\mu/10\mu$ עבור ההתקנים של המחלק השמאלי באיור.
חשב את הערך של V_8 .

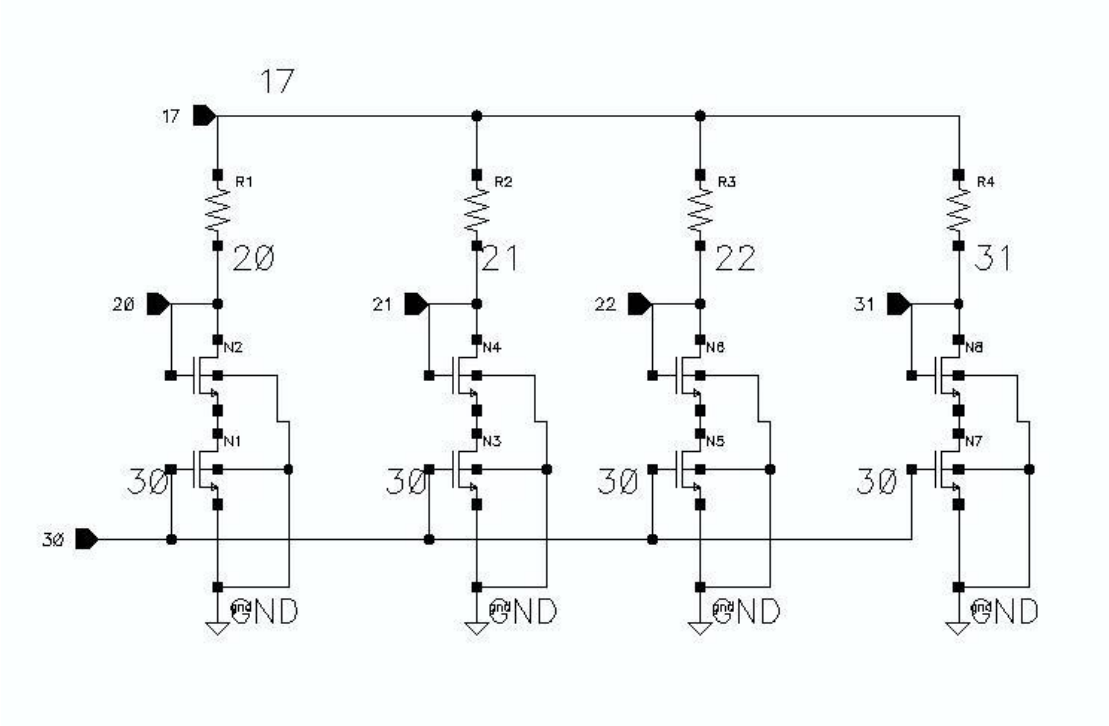
3.3.2 עבור איזה יחס של W_N/W_P יתקבל ש- $V_8=2.5V$ אם נתון ש- $L_N = L_P$?

3.3.3 נתון ש : $W_N/L_N = W_P/L_P = 20\mu/10\mu$ עבור כל ההתקנים במחלק הימני. חשב את ערכם של V_1 V_2 V_3 (כאשר V_1 מציין את המתח ב- drain של M3, V2 מציין את המתח ב- drain של M5, ו-V3 מציין את המתח ב- drain של M6). על מנת להקל על החישובים, נזניח את אפקט המצע.

3.3.4 נתון שההתנגדות המשטחית של פוליסיליקון שווה ל- 20 Ω/□. חשב את מספר הריבועים של פוליסיליקון הדרושים למימוש מחלק מתח בו זורם זרם כמו שזורם במעגל שבאיור הימני.

3.4 מקור זרם פשוט

א. איור מס' 3.4 מציג מימוש של ארבעה מקורות זרם בעזרת טרנזיסטורי NMOS כפי שמומשו ב- test chip. תפקיד הנגדים הוא כפי שהוסבר בסעיף 3.2. הטרנזיסטור העליון מהווה עומס אקטיבי למקור זרם.



איור מס' 3.4 : מימוש של ארבעה מקורות זרם בעזרת טרנזיסטורי NMOS

נתון ש : $V_{TN} = 0.6V$.

3.4.1 בהנחה שהטרנזיסטורים פועלים בתחום הרוויה, רשום ביטוי של I (בתחום הרוויה) עבור המקרים הבאים :

i. $W_2/L_2 = W_1/L_1 = 20\mu /4\mu$

ii. $W_2/L_2 = 40\mu/10\mu$ $W_1/L_1 = 20\mu /4\mu$

iii $W_2/L_2 = 80\mu/10\mu$ $W_1/L_1 = 20\mu /4\mu$

iv $W_2/L_2 = 40\mu/10\mu$ $W_1/L_1 = 80\mu /4\mu$

הערה : W_1/L_1 מתייחס לטרנזיסטור התחתון ו- W_2/L_2 לעליון.

3.4.2 עבור כל המקרים של הסעיף הקודם חשב את הערך של I אם נתון ש : $V_{GG} = 1.5V$ (צומת 30). בסעיף זה עליך להזניח את λ.

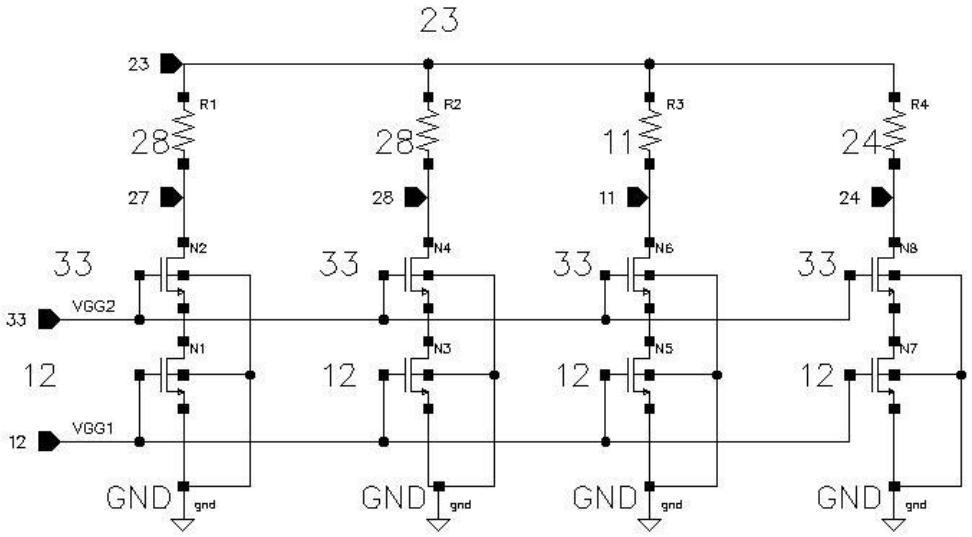
3.4.3 אם נתון ש : $\lambda = 0.02\ V^{-1}$, חשב את התנגדות המקור Ro עבור כל המקרים.

3.4.4 מה ה- V_{MIN} הצפוי עבור כל אחד מהמקרים הנ"ל ? על מנת להקל על החישובים, נזניח את אפקט המצע.

סעיף	I_{DO}	Ro
i		
ii		
iii		
iv		

3.5 מקור זרם עם נגד במשוב

מקורות הזרם שמופיעים באיור מס' 3.5 טוב יותר מהמקורות שבסעיף הקודם בכך שהוא בעל התנגדות R_o גבוה יותר. הטרנזיסטור התחתון ממשמש נגד R כפי שמופיע באיור 2.8. תפקיד הנגדים הוא כפי שהוסבר בסעיף 3.2.



איור מס' 3.5 : מקורות זרם בעלי R_o משופר

נתון ש : V_{TN} =0.6V ו- $\lambda = 0.02$.

3.5.1 בהנחה שהטרנזיסטורים פועלים בתחום הרוויה, רשום ביטוי של I (הזרם של כל מקור) עבור המקרים הבאים :

i . $W_1/L_1 = W_2/L_2 = 20\mu /4\mu$

ii. $W_1/L_1 = 80\mu/4\mu$ $W_2/L_2 = 20\mu /4\mu$

iii. $W_1/L_1 = 20\mu/4\mu$ $W_2/L_2 = 80\mu /4\mu$

iv. $W_1/L_1 = 80\mu/4\mu$ $W_2/L_2 = 80\mu /4\mu$

הערה : W_1/L_1 מתייחס לטרנזיסטור התחתון ו- W_2/L_2 לעליון. (בסעיף זה, הזנח את אפקט המצע ואת λ).

3.5.2 עבור כל המקרים של הסעיף הקודם חשב את הערך של I בהינתן $V_{GG1} = 1.5V$. בסעיף זה עליך להזניח את λ.

3.5.3 חשב את הערך המינימלי של V_{GG2} כפונקציה של V_{GG1}, V_{T1} ו- V_{T2}.

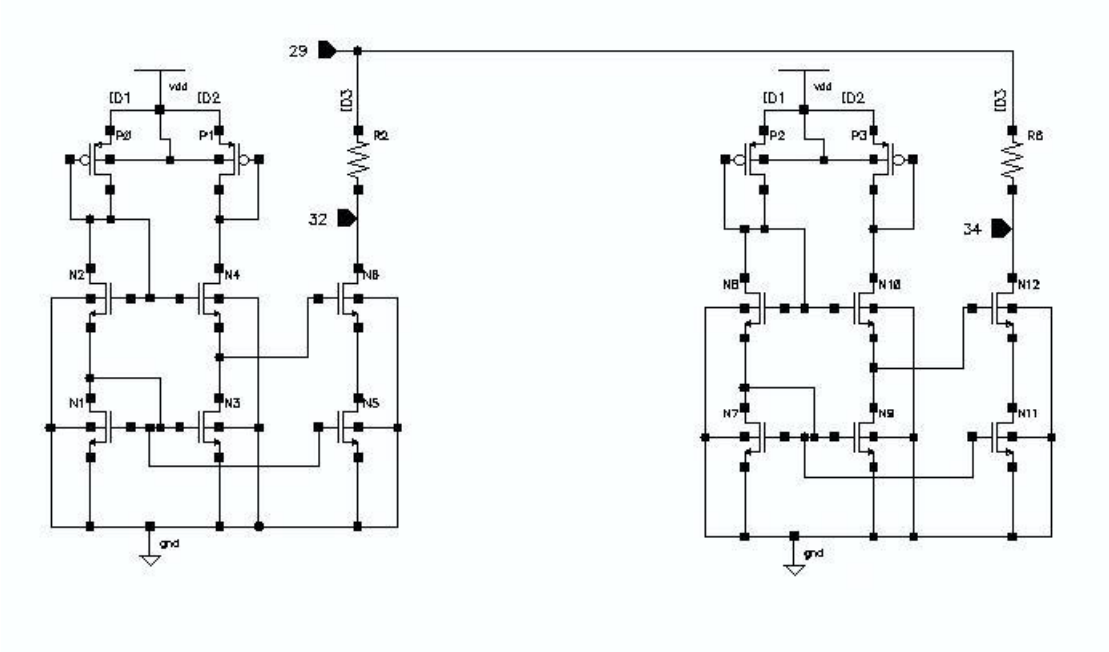
3.5.4 עבור כל המקרים של הסעיף 3.5.1 רשום ביטוי עבור V_{MIN} וחשבו את ערכו.

3.5.5 אם נתון ש : $\lambda = 0.02\ V^{-1}$, חשב את התנגדות המקור Ro עבור כל המקרים.

סעיף	I_{DO}	Ro	V_{MIN}
i			
ii			
iii			
iv			

3.6 מקור זרם : Cascode Current Sink

מקורות הזרם שמופיעים באיור מס' 3.6 הם בעלי V_{MIN} נמוך יחסית למקורות בצורת Cascode. תפקיד הנגדים הוא כפי שהוסבר בסעיף 3.2.



איור מס' 3.6 : מקור זרם Cascode Current Sink

נתון ש: $V_{TN} = 0.6V$ ו- $V_{TP} = -0.87V$ ו- $\lambda = 0.02$.

3.6.1 בהנחה שהטרנזיסטורים פועלים בתחום הרוויה, חשב את I_{D1} I_{D2} I_{D3} כאשר נתון ש: $W/L = 80\mu/4\mu$ עבור כל טרנזיסטור ה- N (חוץ מ- N2) ו- $W/L = 80\mu/4\mu$ עבור טרנזיסטורי ה- PMOS. עבור N2 $W/L = 20\mu/4\mu$. בסעיף זה עליך להזניח את λ. מימדי כל הטרנזיסטורים כפי שמתואר בסעיף 2.4 (עמ' 10). על מנת להקל על החישובים ראשית חשב את I_{D1} והזנח את אפקט המצע.

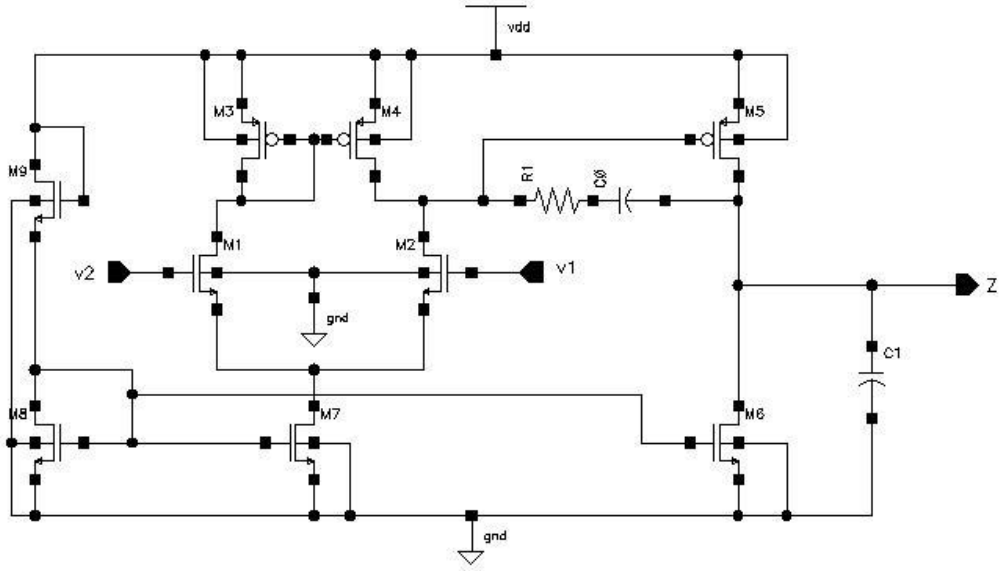
3.6.2 בהנחה שהטרנזיסטורים פועלים בתחום הרוויה, חשב את I_{D1} I_{D2} I_{D3} כאשר נתון ש: $W/L = 120\mu/4\mu$ עבור כל טרנזיסטור ה- N (חוץ מ- N8) ו- $W/L = 120\mu/4\mu$ עבור טרנזיסטורי ה- PMOS. עבור N8 $W/L = 30\mu/4\mu$. בסעיף זה עליך להזניח את λ. מימדי כל הטרנזיסטורים כפי שמתואר בסעיף 2.4 (עמ' 10). על מנת להקל על החישובים ראשית חשב את I_{D1} והזנח את אפקט המצע.

3.6.3 עבור שני הסעיפים הקודמים, חשב את הערך של התנגדות המקור Ro. נתון ש- Ro חולץ מסכמת התמורה והוא שווה ל- $g_{m6}r_{ds6}r_{ds5}$.

3.6.4 חשב את V_{MIN} של שני המעגלים.

3.7 מגבר אופרטיבי

באיור מס' 3.7 מופיע מגבר אופרטיבי.



איור מס' 3.7 : מגבר אופרטיבי.

נתון ש: $V_{TN} = 0.6V$ ודרוש ש: $I_{D8}= I_{D5}=80\mu A$,$I_{D1}=8\mu A$,$A_0=33200$ ו- $GB=10Mhz$ (מכפלת הגבר רוחב סרט).

3.7.1 בעזרת סכמת התמורה שמופיע באיור 2.13, הוכח את נכונות הביטוי ל- A_0 בעמ' מס' 12. מה הערכים של R_I ו- R_{II} ?

3.7.2 אם נתון ש- $W_8/L_8 = 10\mu/10\mu$,$V_{T9}=1.25V$ (בשל אפקט מצע), $L_9=10\mu$ חשב את W_9.

3.7.3 מתוך דרישות הזרם, חשבו את W_6/L_6 ואת W_7/L_7.

3.7.4 נתון ש- $GB = g_{m1}/C_C$. עבור $C_C=7pF$ חשב את W_1/L_1. (שים לב כי מטעמי סימטריה $W_1/L_1=W_2/L_2$).

3.7.5 נתון ש: $\lambda = 0.01$ עבור כל הטרנזיסטורים. כידוע, $g_{ds} = \lambda \cdot I_D$, מתוך הדרישה עבור A_0, חשב את W_5/L_5.

3.7.6 נאלץ V_{GS3} להיות שווה ל- V_{GS5} ע"י קיום התנאי **$W_3/L_3 = W_5I_3/L_5I_5$.**
ידוע ש: $I_6 = I_5$ וש- $I_4 = I_3$. בנוסף לכך, מטעמי סימטריה $W_3/L_3=W_4/L_4$ ולכן ניתן לרשום את התנאי הנ"ל בצורה: **$W_4/L_4 = W_5I_4/L_5I_6$.**
ידוע גם ש- $I_7 = 0.5\ I_4$, $I_6 = I_8$, **$I_7/I_8 = (W_7/L_7)/(W_8/L_8)$.**
ולכן- **$W_4/L_4 = 0.5(W_5/L_5)(I_7/I_6) = 0.5(W_5/L_5)(W_7L_6/W_6L_7)$.**
מכן חשב את W_4/L_4 ואת W_3/L_3 .

3.7.7 בעזרת התוצאות הנ"ל, מלא את הטבלה הבאה:

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
W								10µ	
L	10µ	10µ	25µ	25µ	10µ	10µ	50µ	10µ	10µ

פרק 4 - תיאור של כלי Cadence

במהלך הניסוי, נבצע סימולציות אנלוגיות בעזרת כלי Cadence. למרות שאין צורך לצייר סכמות או layout, מובא כאן הסבר קצר גם על כלי אלה.

להפעלת כלי cadence יש להריץ :

virtuoso

4.1 שרטוט סכימת המעגל

- על מנת לבנות סכמה חדשה עליך ללחוץ על File->New->Cellview .

library : cadence

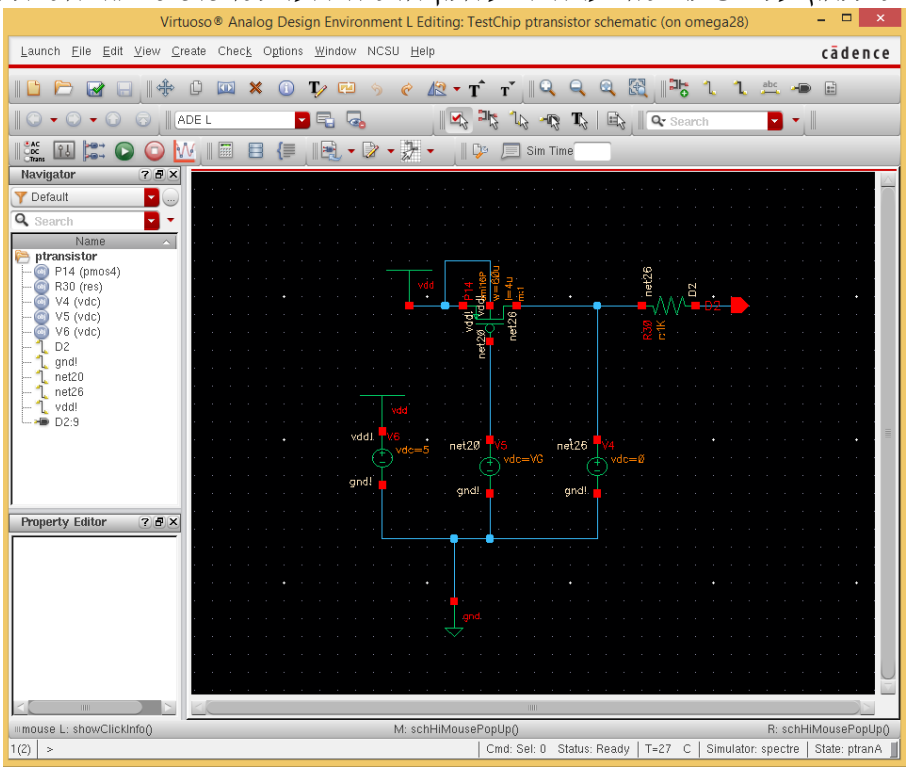
cell name : שם של התא החדש.

view name : schematic

tool : composer - schematic

יפתח חלון שבאמצעותו תוכל לצייר את המעגל שלך.

יש ללחוץ על OK לאישור. עתה יופיע חלון חדש המיועד לשרטוט סכמות חשמליות :



בשלב הבא 'נצייר' את המעגל המכיל מספר אלמנטים.

בכדי להוסיף רכיבים חדשים למעגל, יש להשתמש בפקודה add → component (או icon מתאים).

בחלון שמתקבל לחץ על browser.

בחלון שנפתח בחר בספרית NCSU_Analog_Parts. בתוך ספריה זו ניתן למצוא את כל הרכיבים האנלוגיים וכן מקורות מתח למיניהם.

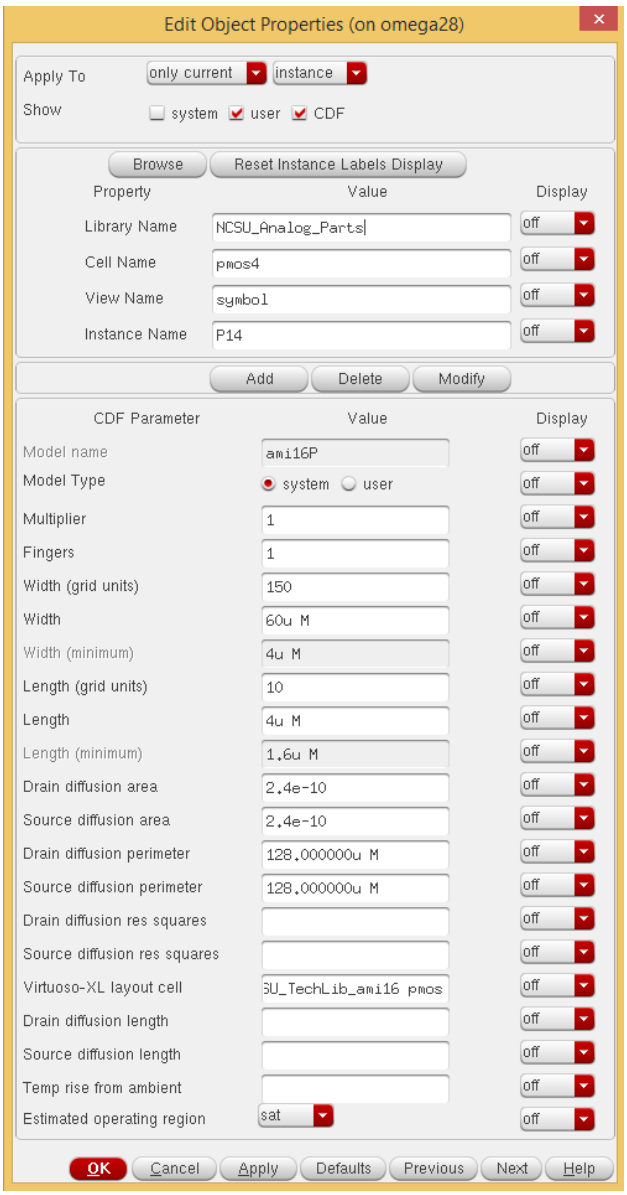
הרכיבים הרלוונטיים למעגל הם :

טרנזיסטור pmos בעל 4 הדקי חיבור	pmos4
טרנזיסטור nmos בעל 4 הדקי חיבור	nmos4
מקור DC ל- Vdd	vdc
חיבור לאדמה	gnd
קבל	cap

- לאחר הבחירה יש לעבור לחלון ה- schematics ולגרור את החלק למקום הרצוי, ובאורינטציה הרצויה (sideways , upside down , rotate), לחץ על F3 על מנת לקבל אפשרויות אלה.
- בעזרת הכפתור השמאלי ניתן למקם את הרכיב.
- בכדי לעבור לפקודה הבאה יש ללחוץ על Esc .

בכדי לחבר בין הרכיבים יש להשתמש בפקודה add → wire (או icon מתאים), לחיצה ראשונה על הכפתור השמאלי ממקמים את הנקודה הראשונה של הקו, יש 'לגרור' את הקו ללא לחיצה על כפתורי העכבר עד למקום הרצוי לסיום הקו. לחיצה כפולה על הכפתור השמאלי, תסיים את הקו.

לאחר שרטוט המעגל כולו יש לקבוע/לשנות את ערכי הפרמטרים של כל הרכיבים המשורטטים (ערכי המתחים, גדלי הטרנזיסטורים, וערך הקבל), בחר ב- object → properties → edit , סמן את האלמנט הרצוי ולחץ על הכפתור השמאלי.דוגמא לחלון properties של טרנזיסטור pmos:



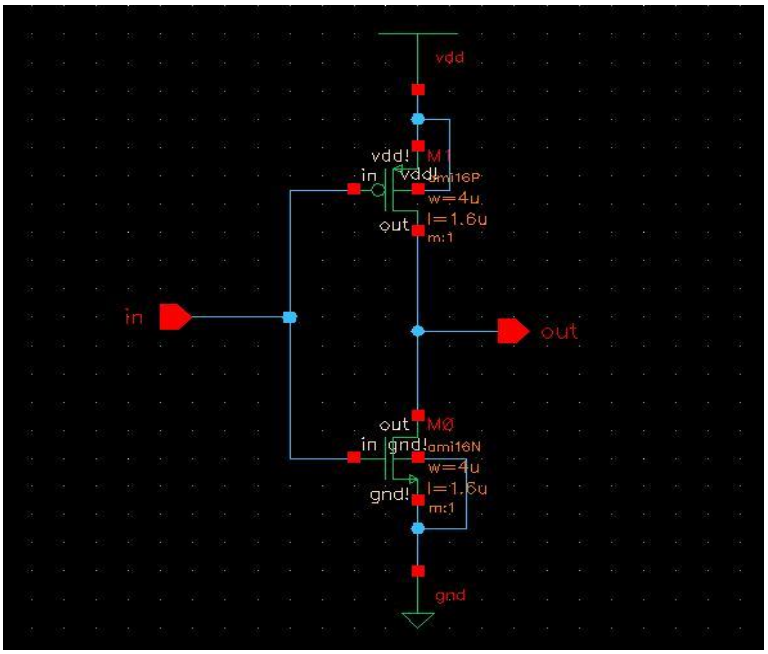
לאחר עדכון כל ערכי הרכיבים יש לבצע שמירה של המעגל ע"י File → check & save.

הערה חשובה: את הטרנזיסטורים יש למקם כך שהכיוון ה- source שלהם יהיה נכון! (הסימולטור אינו רואה את הטרנזיסטור כסימטרי).

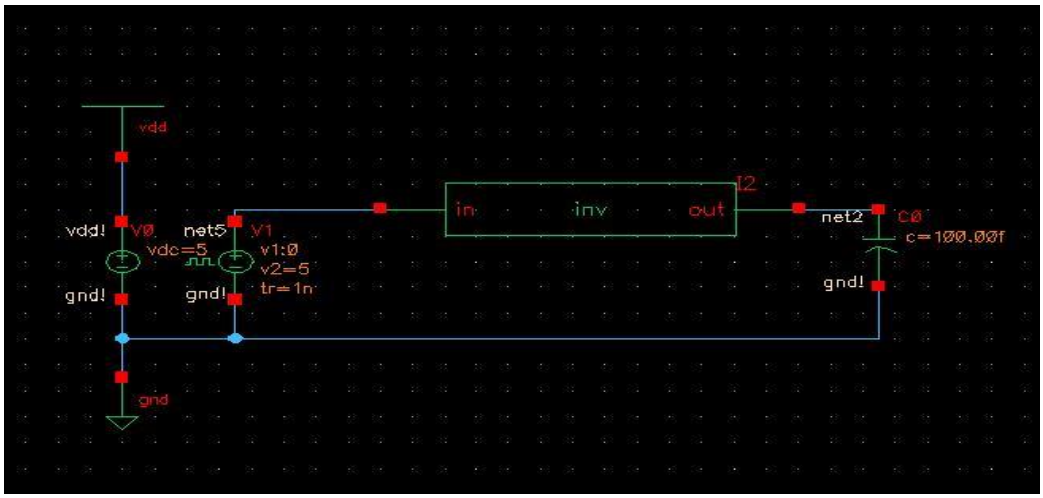
על הסכמה שלך להכיל רק את האלמנטים שבמעגל, כלומר טרנזיסטורים, נגדים, קבלים וחיבורים ל- vdd ול- gnd. יש להוסיף pin עבור כל כניסה ויציאה של המעגל.
הוספת pin - בחר ב- Create->Pin. בחלון שנפתח רשום שם ה- pin, בחר את כיוונו וסובב אותו במידת הצורך. הבא את הסמן למקום שבו אתה רוצה למקם את ה- pin ולחץ על כפתור העכבר. מקורות שדרושים בביצוע סימולציות נוסיף בהמשך. כעת נבנה symbol למעגל.
בנית Symbol - כדי שאפשר יהיה להשתמש במעגל כתא בסכמה ברמת היררכיה גבוהה יותר צריך לבנות למעגל Symbol. ניתן לעשות זאת בעזרת Create-> Cellview->From Cellview. בחלון שנפתח, בקש את הכניסות ואת היציאות על הצלעות הרצויות ולחץ על OK.

רצוי מאד להפריד בין האלמנטים של המעגל לאלמנטים שנחוצים להרצת הסימולציות. לכן, על מנת לסמלץ את המעגל שציירת, בונים סכמה חדשה שמכילה את ה- symbol של המעגל שבנית ואת כל המקורות הנחוצות לסימולציה. חייב להופיע גם מקור בשם vdc שאליו מחוברים ה- symbols : vdd ו- gnd. בעזרת מקור זה קובעים את מתח ההספקה של המעגל.

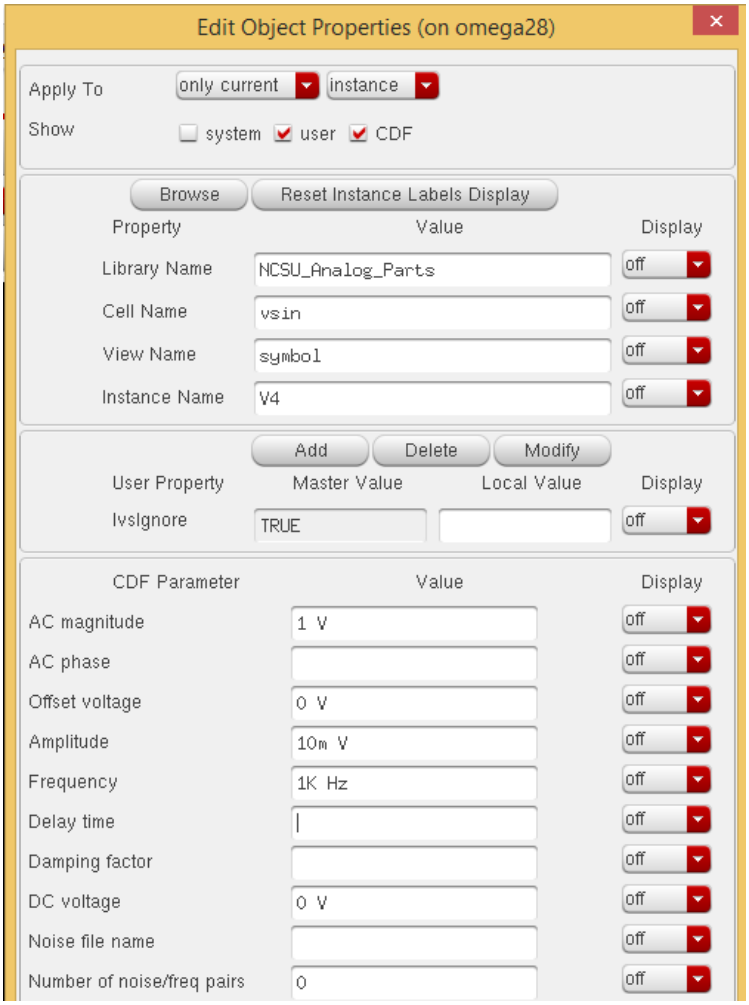
דוגמא של מעגל (ללא מקורות) :



דוגמא למעגל מיועד לסימולציה :



דוגמא לפרמטרי מקור מתח AC:



4.2 סימולציה

Cadence מספקת מספר תוכניות לסימולציות אנלוגיות. בניסוי זה נשתמש ב- spectre.
ניתן לבצע מספר סוגי סימולציה:

1. סימולצית DC Sweep (שינוי מקור מתח כניסת ה-DC למעגל).
2. סימולציה בזמן - Transient.
3. סימולציה בתדר - AC.

אופן עבודת הסימולטור:
גם אם לא נבחר באף אחת שלשת האפשרויות הנ"ל של סימולציה, ונבצע הרצה של הסימולטור, יבוצעו מיד שתי הפעולות הבאות:

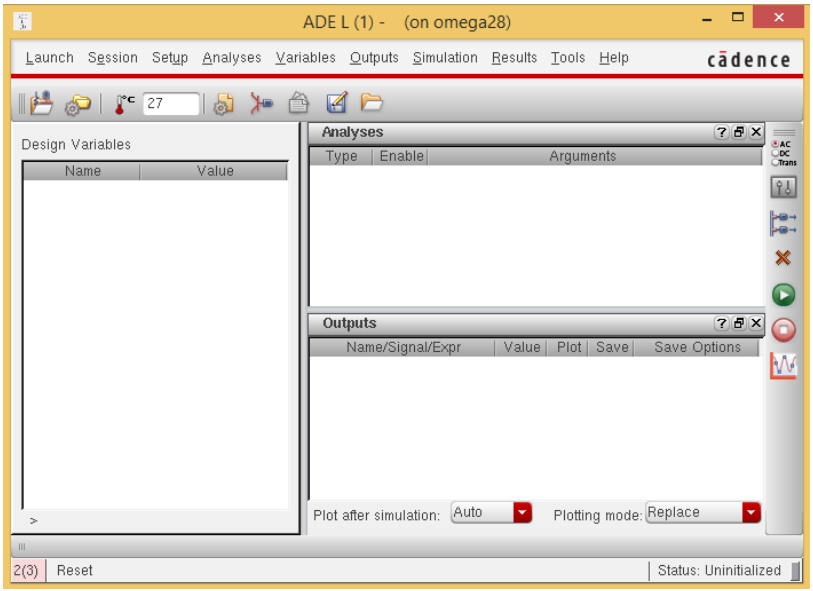
א. יצירת netlist של המעגל (קובץ spice המתאר את פרמטרי הרכיבים במעגל והחיבוריות ביניהם).

ב. ביצוע אנליזת 'DC' לקביעת נקודות העבודה במעגל.

כדי לפתוח את הסימולטור יש לבצע את המהלך הבא:

Launch → ADE L

יפתח החלון הבא:



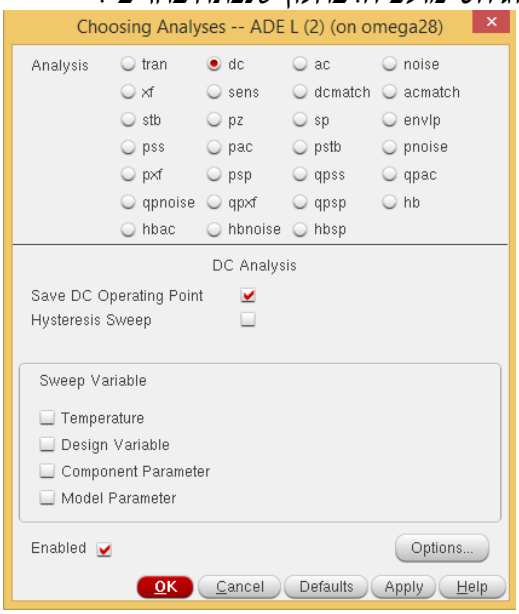
כדי להפנות את הסימולטור למודלים הרצויים של הטרנזיסטורים יש לבצע:

Setup → Model Libraries ולהגדיר את מיקום קבצי המודלים.

אנליזת נקודות עבודה DC:

לחץ על

לבחירת סוג הסימולציה. בחלון שנפתח בחר ב:



יש לבצע בחלון הסימולטור:

Simulate → Run

כדי להציג את תוצאות הסימולציה על גבי הסכימה יש לבצע:

Results → annotate → DC operating points

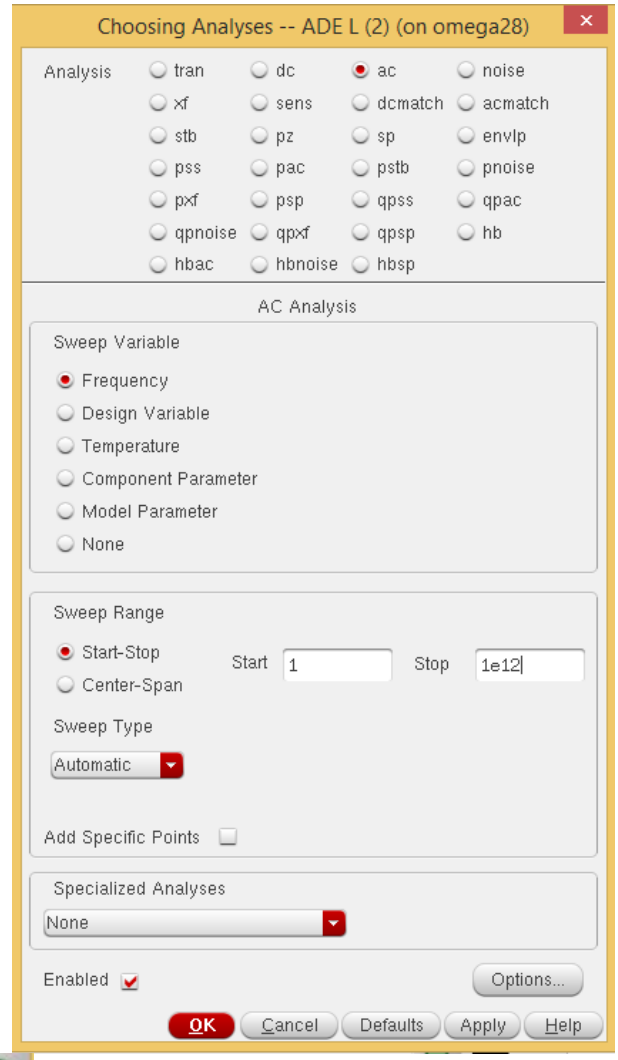
(כדי לחזור להצגת ערכי הטרנזיסטורים - Results → annotate → Restore defaults)

לביצוע אנליזת AC:

לחץ על

או לבצע בתפריט הסימולטור: Analyses → choose

יש לבחור ב- AC ולמלא את תחום התדרים הרצוי לצורך הסימולציה:



לאחר מילוי הפרטים יש ללחוץ O.K לאישור, ובחלון הסימולטור לחץ על או לבצע:

Simulation → Run

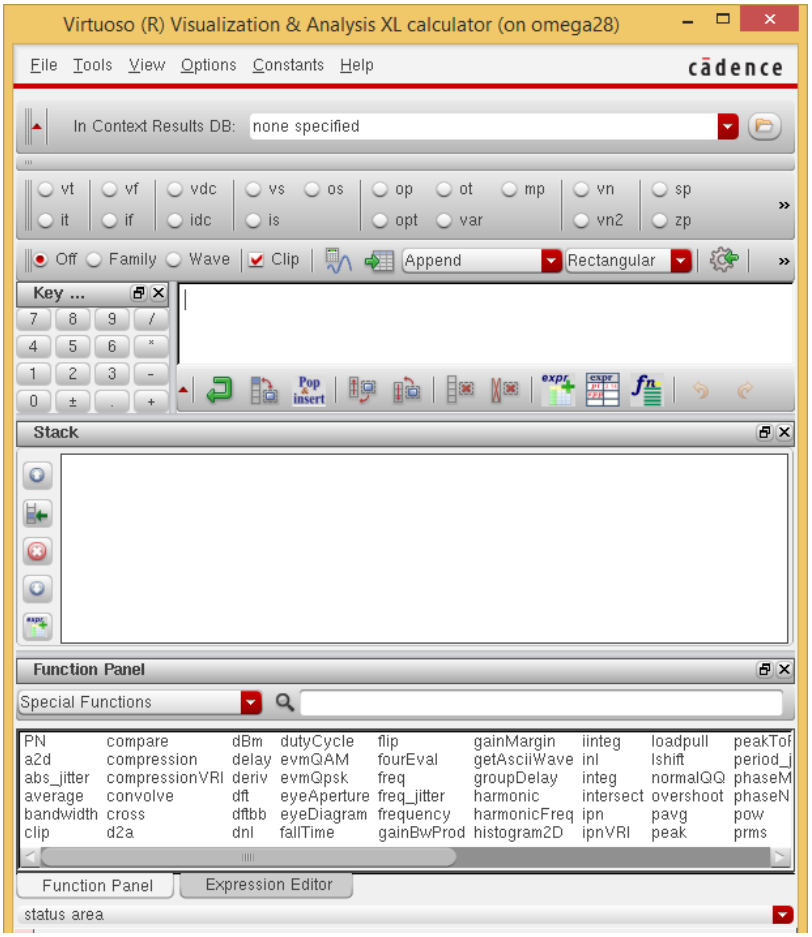
(באופן דומה ניתן לבצע אנליזת Transient כאשר הפעם יש למלא את הערך התחתון והעליון של סקלת הזמן וכן את אינטרוול הזמן לדגימת התוצאה.)

הצגת תוצאות:

בחלון הסימולטור יש לבצע

Tools → calculator

יפתח החלון הבא:



להצגת תוצאות אנליזת DC sweep:

בחר ב- vs עבור מתח או is עבור זרם, לאחר מכן את הצומת הרצוי ולבסוף לחץ על .

להצגת תוצאות אנליזת AC:

בחר ב- vf עבור מתח או if עבור זרם, לאחר מכן את הצומת הרצוי (יציאה) ובחר 20db או phase בהתאם לצורך, לבסוף לחץ על . כעת יפתח חלון waveform ובו הגרף המבוקש. (כדאי מאד להציג את הצירים בסקלה לוגריתמית בחלון ה- waveform יש לבצע: axis → x axis → log , וכנ"ל עבור ציר y).

להצגת תוצאות אנליזת Transient:

בחר ב- vt עבור מתח או it עבור זרם, לאחר מכן את הצומת הרצוי ולבסוף לחץ על .

Save and Load State

ניתן לשמור את מצב הסימולטור ב- state בעזרת הפקודה session → save state. במהלך הניסוי, במקום להגדיר את ה- model path ואת סוג האנליזה, כל פעם מחדש, אנו נטען את הנתונים לסימולטור בעזרת הפקודה session → load state.

מציאת ה- gm של הטרנזיסטור מתוך הסימולציה

לאחר הרצה הסימולציה בחר ב- Tool→ Results Browser. בחלון שנפתח בחר ב- opBegin-info. בחר בטרנזיסטור (או בבלוק שמכיל את הטרנזיסטור עד שתגיע לטרנזיסטור). יופיעו כל הפרמטרים של הטרנזיסטור. להצגת הערך בחר בפרמטר, לחץ על הכפתור הימני ובחר ב- Table.

הערות מקדימות:

- בספריה הוכנו מראש קבצים עבור מרבית הרכיבים הנדרשים.
- **לפני עזיבת המעבדה, יש להראות את התוצאות למנחה.**

הדו"ח הסופי:

עבור הדו"ח הסופי יש להדפיס:

- כל הסכמות, גרפים של הסימולציה ושל המדידות.
- צורות גל של הסימולציות.

לכך יש להוסיף:

- דוחות מכינים.
- תשובות בעברית לכל השאלות הנשאלות בחוברת, במהלך הניסויים, וכן הסברים נדרשים.
- הדגשות והסברים על התדפיסים, במידה ואלו נראים כנדרשים.

את הדוח הסופי יש להגיש בתוך **שבועיים** ממועד המעבדה האחרונה, כשהוא ערוך, מסודר וכרוך בצורה סבירה ונוחה לקריאה.

סדר הדוח:

- דוח מכין לניסוי 1.
- דוח מכין לניסוי 2.
- דפי תשובות והסברים לגבי ניסוי 1.
- דפי תשובות והסברים לגבי ניסוי 2.
- תדפיסים מניסוי 1, בהתאם לסדר חלקי הניסוי.
- תדפיסים מניסוי 2, בהתאם לסדר חלקי הניסוי.

ביצוע ניסוי מס' 1

הערה : במהלך הניסוי עליך להיעזר בהסברים על הסימולציות אנלוגיות.

הפעלת המכשירים

רב מודד (DVM) : הדלק את המכשיר. לחץ על כפתור ה- DC על מנת שנוכל למדוד מתח DC.

מחולל אותות : הדלק את המחולל. עבור רוב הסעיפים דרוש אות מחזורי בצורת משור. לחץ על הכפתור עם ציור של משור (ramp).
- יש ללחוץ על כפתור ה- output (להדליק אותו) על מנת להפעיל את הדק הפלט.
- לחץ על כפתור ה- utility ואז על הכפתור שמתחת ל- output/setup. וודא שהוא מכוון ל- HighZ ולחץ על Done.
- תדר : לחץ על כפתור על freq/period לקביעת התדר וודא שהוא נמצא במצב freq (לחיצה נוספת על הכפתור מעבירה מצב). הקלד 10 ולחץ על הכפתור מעל היחידות KHZ.
- אמפליטודה : לחץ על הכפתור שמתחת amp/hilevel ודא שהוא נמצא על מצב hilevel. הקלד 5 ובחר ביחידות V.
- offset : לחץ על כפתור offset/lolevel וודא שהוא נמצא במצב lolevel. לחץ על "0 ובחר ב-V. לחץ כעת על כפתור ה- output. ודא שהוא דלוק, אחרת לא יתקבל אות ביציאה.

אוסילוסקופ' : הדלק את הסקופ'. חבר את יציאת המחולל לכניסת ה- X. לחץ על הכפתור auto scale. פעולה זאת מציגה את האות בסקלה הנכונה על המסך. וודא שמתקבל אות משור בעל אמפליטודה 5V, תדר של 10KHz ו- offset של 2.5V.
שמירת גרף : הכנס disk on key למקומו במכשיר, לחץ על Save/Recall ואז לחץ על Save. כמובן נין לשלוט על שם הקובץ ופורמט השמירה.
ביצוע מדידות על גרף : לחץ על Quick Measure, ואז על הכפתור שמתחת ל- Select. בחר המדידה שהינך צריך לבצע ולחץ על הכפתור שמתחת ל- Measure.

ספק : הדלק את המכשיר. בחר ביציאה מס' 3 בעזרת הכפתור output select (יש ללחוץ על כפתור זה עד שהחץ מעל המספרים מגיע לספק שברצונך לבחור). לחץ על VSET לקביעת מתח הספק. הקלד 10 ולחץ על enter. הכרטיס מקבל מתח של 10V. מתח זה מגיע לווסת שהופך אותו ל- 5V. לחץ על ISET הקלד 0.015 ולחץ על enter לקביעת זרם מרבי של 15mA. חבר את הספק ל- DVM וודא שמתח היציאה אכן שווה ל- 10V ושמתח ביציאת הוסת שווה ל- 5V.

חשוב: בכל סעיף וודא שמקור שמתח (עם הגבלת הזרם) מחובר לכרטיס.

1. טרנזיסטור PMOS

א. DC Sweep Analysis - I_{DS} כפונקציה של V_{GS}

- פתח את המעגל ptransistor.
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L –
- העלה את ה- state בשם ptranA של ptransistor בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V_{GS} משתנה מ- 0 ל- 5V-. סגור את החלון.
- לחץ על simulation->run (או הרמזור הירוק) לביצוע האנליזה.
כאמור, סימולציה זאת מבצעת sweep analysis כלומר, משנה את מתח המקור מ- 5V ל- 0 ומציגה את הזרם כפונקציה של המתח.

- פתח חלון ה- calculator בעזרת Tools->Calculator.
- לחץ על is בחלון ה- calculator ובחר בהדק ה- drain של הטרנזיסטור בסכמה.

G111. להדפסת הגרף, לחץ על בחלון ה- calculator. הוסף את הגרף לדו״ח.

Q111. באיזה תחום נמצא הטרנזיסטור ?

Q112. השווה את התוצאה עם החישוב התאורטי. הסבר.

- סגור את חלונות הסימולציה.

ב. I_{DS} - DC Sweep Analysis כפונקציה של V_{DS}

- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם ptranB של ptransistor בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V_{DS} משתנה מ- 0 ל- 5V-. סגור את החלון.
- לחץ על Tools->Parametric Analysis. בשדה Variable Name בחר ב- VG. ב- From רשום 0 וב- To רשום 5. ב- Total Steps רשום 6. לחץ על Analysis->Start All. הכלי יריץ 6 סימולציות עם V_G שונה עבור כ״א.
- פתח חלון ה- calculator בעזרת Tools->Calculator.
- לחץ על is בחלון ה- calculator. בחר בהדק ה- drain של הטרנזיסטור.

G121. להדפסת הגרף, לחץ על בחלון ה- calculator. הוסף את הגרף לדו״ח.

Q121. השווה את התוצאה עם החישוב התאורטי.

- סגור את חלונות הסימולציה.

חשוב מאד : בכל סעיף של ביצוע מדידות יש לחבר את מתחי ההספקה לכרטיס. קבע את המתח ואת הזרם המרבי של הספק (כפי שהוסבר בסעיף ״הפעלת המכשירים״) לפני שאתה מחבר את הספק לכרטיס!!

ג. מדידות I_{DS} כפונקציה של V_{GS}

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 10KHz להדק מס׳ 18 (gate) על הכרטיס.
- חבר את הגששים של הסקופ׳ להדקים מס׳ 19 ו-6 (drain).
- חבר מתח של 0V להדק מס׳ 19 (קצה שני של הנגד).
- לחץ על כפתור auto scale על הסקופ׳. ערוץ X מציג את מתח המקור, וערוץ Y את המתח בהדק השני של הנגד. ההפרש ביניהם חלקי ערך הנגד (כ- 1.3 KΩ) מהווה את הזרם בטרנזיסטור.
- הצג את זרם כפונקציה של הזמן ע״י חישוב ההפרש המתח על שני הערוצים. ראשית לחץ על הכפתור math ובחר באפשרות X-Y. כעת ניתן לכבות את ערוצים X ו- Y. ידוע שהמתח עולה בצורה ליניארית עם הזמן ולכן ניתן להסתכל על הגרף שמתקבל כגרף של זרם כפונקציה של מתח. ניתן לכוון את הסקלה האופקי כל שכל משבצת (10us) מייצגת 1V.

הערה : אם צורת הגל רועדת, לחץ על הכפתור single בצד ימין של הסקופ׳ .

G131. הוסף את הגרף לדו״ח.

Q131. השוואה עם הגרפים של הסעיף הסימולציות וחישובים התיאורטיות. ניתן לדעת מה הערכים המדויקים של הגרף X-Y על הצגת סמן ע״י לחיצה על כפתור ה- cursor שניתן להזיז באמצעות הכפתור הסמוך.

ד. מדידות I_{DS} כפונקציה של V_{DS}

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 10KHz להדק מס׳ 19 (קצה של הנגד) על הכרטיס.
- חבר את שני הערוצים של הסקופ׳ להדקים מס׳ 19 ו-6.

- חבר מתח של 0V להדק מס' 18 (gate).
- לחץ על כפתור auto scale על הסקופ'. ערוץ אחד מציג את מתח המקור, והערוץ השני את המתח בהדק השני של הנגד. הצג בסקופ' את חיסור בין שני הערוצים. גרף זה מייצג את הזרם דרך הנגד עד כדי חלוקה בהתנגדות שלו.

G141. צרף את הגרף לדו"ח.

G145 – G142. חזור על הפעולה עבור המתחים 1,2,3,4,5V (על צומת 18).

Q141. השוואה עם הגרפים של הסעיף הסימולציות וחישובים התיאורטיות.

2. נגד אקטיבי

א. DC Sweep Analysis

- פתח את המעגל actres
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L –
- העלה את ה- state בשם actres של actres בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analysis->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V0 עולה מ- 0 ל- 5V. סגור את החלון.
- לחץ ע"י simulation->run (או ללחוץ על) לביצוע האנליזה.

כאמור, סימולציה זאת מבצעת dc-sweep analysis כלומר, משנה את מתח המקור מ- 0 ל- 5V ומציגה את הזרם כפונקציה של המתח.

- פתח חלון ה- calculator בעזרת Tools->Calculator.
- לחץ על is בחלון ה- calculator. בחר בהדק ה- drain של כל הטרנזיסטור.

G211. להדפסת הגרף, לחץ על בחלון ה- calculator. הוסף את הגרף לדו"ח. צרף את הגרף לדו"ח.

G212 - G214. חזור לחלון הסכמה. בחר בטרנזיסטור. בחר ב- Edit->Properties->Objects (או לחץ על "q"). בחלון שנפתח ניתן לשנות את מימדי הטרנזיסטור. שנה את גודל הטרנזיסטור חזור על הפעולות הנ"ל עבור כל יתר המקרים שבדו"ח ההכנה.

Q211. השווה את התוצאות עם החישובים התאורטיים.

- כעת יש למצוא את הערך של g_m עבור שני המקרים שבהם W=20µ ו- W=60µ כאשר V_{DS}=3V. הכלי נותן את הערך של g_m כאשר תנאי המעגל נקבעים ע"י מתח ה- dc של המקור שבמקרה שלנו הוא 5V. על מנת למצוא את הערך של g_m עבור V_{DS}=3V, יש לבצע סימולציית DC **(עם שמירת נקודות העבודה)** עם מתח dc של המקור שיגורם שמתח ה- V_{DS} על הטרנזיסטור יהיה 3V.

Q212. בעזרת הגרפים של הזרם שקיבלת בסעיף הקודם, מצא איזה מתח dc יגרום לכך שמתח ה-V_{DS} יהיה כ- 3V עבור שני המקרים (כלומר עבור המקרים ש- W=20µ ו- W=60µ). הסבר כיצד מצאת את מתח ה- dc?

שנה את מתח ה- dc של המקור בהתאם והרץ שוב את שתי הסימולציות. ראשית תקן את מימדי הטרנזיסטורים בעזרת Edit->Properties. שנית בחר את מקור המתח ושוב לחץ על ב- Edit->Properties ושנה את המתח ל- למתח שמצאת במקום 5V. הרץ את הסימולציה. **(ה- g_m מחושב בניתוח ה- dc של המעגל)**.

Q213. רשום את ה- g_m שהתקבל בשני המקרים (לקבלת ה- g_m לחץ על ה- Tools->Results Browser, בחר ב- dcOpInfo-info ובו- N0 ומצא את הערך של g_m בין כל הנתונים.

ב. ביצוע מדידות של הזרמים

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 10KHz להדק מס' 1 על הכרטיס.
- חבר את הגששים של הסקופ' להדקים מס' 1 ו-2.
- לחץ על כפתור auto scale על הסקופ'. כוון את הסקלה האופקי כל שכל משבצת (10us) מייצגת 1V.

G221. צרף את הגרף לדו"ח.

ניתן למצוא מה הערכים המדויקים של הגרף X-Y על הצגת סמן ע"י לחיצה על כפתור ה- cursor שניתן להזיז באמצעות הכפתור הסמוך.

G222 - G224. חזור על הפעולות האלה עבור כל ארבעת המקרים שבדו"ח ההכנה. שים לב שההדקים עבור יתר המקרים הם כפי שמופיע באיור 3.2 (כלומר צמתים 3, 4 ו- 5 במקום 2). צרף את הגרפים לדו"ח.

Q221. השוואה עם הגרפים של הסעיף הסימולציות וחישובים התיאורטיות.

Q222. האם הזרמים עבור W/L = 4µ/2µ ועבור W/L=20µ /10µ זהים ? הסבר.

- סגור את חלונות הסכמה והסימולציה.

3. מחלק מתח

א. DC Analysis

- פתח את המעגל voldiv_sim. שים לב שהפעם המעגל מוגדר כתא נפרד voldiv והמקורות מופיעים בהררכיה שמעל. לחץ על "X" ובחר בתא voldiv ולחץ על OK. פעולות זאת מציגה את התוכן של התא voldiv. לחץ על "B" כדי לחזור לרמה הקודמת.

- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L

- העלה את ה- state בשם voldiv_sim של voldiv_sim בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.

- בחר ב- Analyses->Choose. בחר ב- tran וכבה את הכפתור Enabled (אם הוא לחוץ) לחץ על OK.

- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC. סגור את החלון. קיימת הגדרה של סימולציה נוספת (ראה סעיף הבא).

- בחר במקור V4, ולחץ על edit-properties. שנה Voltage1 ל- 5V, ועל OK.

- בצע File->Check and Save.

- לחץ על simulation->run (או ללחוץ על) בחלון הסימולציה לביצוע האנליזה.

- בחר ב- Results->Annotate->DC node voltages. פעולה זאת רושמת את המתחים של הצמתים על הסכמה. ניתן לרדת לתוך המעגל ע"י בחירת Design->Hierarchy->Descend Edit בחירת ה- voldiv ולחיצה על OK. (חוזרים למעלה עם Design->Hierarchy->Return).

Q311. מה המתחים V1,V0, V2 ו- V3 והזרמים בשני ענפי המעגל ?

- כעת נשנה את מתח הכניסה מ- 0 ל- 5V. בחר ב- Analyses->Choose. לחץ על dc ואז על component parameter. לחץ על Select Component, בחר ברכיב V4 ואז בחר ב- dc ו- OK וגם OK בחלון של ה- Analyses->Choose.

- בצע אנליזת dc sweep בעזרת simulation->run.

- פתח חלון ה- calculator ולחץ על כפתור ה- vs. כעת בחר בחוט המחובר ל V0 ולחץ על בחלון ה- calculator. באותו אופן הצג את הגרף גם של V1, V2 ו- V3.

G311. צרף את הגרפים לדו"ח.

Q312. האם המתחים משתנים באופן ליניארי ?

Q313. מה הזרם בשני הענפים ?

ב. Transient Analysis

בסעיף הקודם ביצענו dc sweep analysis, כלומר שינינו את המתח מ- 0 עד 5 ועבור על ערך של מתח חושב הזרם עבורו. הפעם נשנה את המתח מ- 0 עד 5V **כפונקציה של הזמן** כדי להשוואות עם הריצה של dc_sweep. בסיום נדפיס גרף של הזרם כפונקציה של הזמן:

- בחר ב- Analyses->Choose. בחר ב- tran ולחץ על הכפתור Enabled. לחץ על OK.

- בחר במקור V4 בסכמה. בחר ב- Edit->Properties->Objects. שנה את הערך של Voltage1 מ- 5 ל- 0. לחץ על OK.

- פעולה זאת מגדירה צורת גל של המתח שעולה מ- 0 עד ל- 5V ב- 10ms.

- בצע File->Check and Save
- בצע אנליזת transient בעזרת simulation->run.

- פתח חלון ה- calculator ולחץ על כפתור ה- vt. כעת בחר בחוט המחובר ל- V0 ולחץ על בחלון ה- calculator. באותו אופן הצג את הגרף גם של V1, V2 ו- V3.

G321. צרף את הגרפים לדו"ח.

Q321. השווה את התוצאה עם הגרף שבסעיף הקודם. הסבר.

- סגור את חלונות הסכמה והסימולציה.

ג. ביצוע מדידות של המתחים

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של **100Hz** להדק מס' 9 על הכרטיס.
- חבר את הערוצים של הסקופ' להדקים מס' 7 ו-8. לחץ על auto scale.

G331. צרף את הגרפים לדו"ח.

Q331. השוואה את הגרפים עם הגרפים של סעיף הסימולציות והחישוב התיאורטי .

4. מקור זרם

א. Sweep Analysis

- פתח את המעגל source
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם source של התא source בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V4 עולה מ- 0 ל- 5V. סגור את החלון.
- לחץ על simulation->run לביצוע האנליזה.
- פתח חלון ה- calculator
- לחץ על כפתור ה- is בחלון ה- calculator ואז לחץ על הדק ה- drain של הטרנזיסטור N0.
- לחץ על בחלון ה- calculator והדפס גרף של הזרם כפונקציה של המתח.

G411. צרף את הגרף לדו"ח.

- אם נניח שהמשוואה של הזרם בתחום הרוויה נתונה ע"י :

$$I_D = I_{D0}(1 + \lambda V_o)$$

Q411. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע.

(במקרה זה λ מהווה למעשה את מקדם התקצרות התעלה, שכן $V=V_{DS}$). מתוך הגרף, מצא את V_{MIN}. בעזרת הערכים שמצאת, חשב את Ro.

G412 - G414. בצע סימולציות כפי שהוסבר לעיל עבור יתר המקרים שבדו"ח ההכנה. צרף את הגרפים לדו"ח.

Q412 - Q414. מתוך הגרפים, מצא את I_{D0}, V_{MIN} , λ ו- Ro עבור יתר המקרים שבדו"ח ההכנה.

ב. ביצוע מדידות

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 10KHz להדק מס' 17 על הכרטיס.
- כוון מקור מס' 2 ל- 1.5V וזרם מרבי של 10mA. חבר את המקור להדק מס' 30 על הכרטיס.
- חבר את הערוצים של הסקופ' להדקים מס' 17 ו-20.
- הצג את עקום המתח-זרם כפי שעשית בסעיף 1.

G421. צרף את הגרף לדו"ח.

Q421. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מצא גם את V_{MIN} ואת Ro.

- חזור על הפעולות האלה עבור כל המקרים שבדו״ח ההכנה. שים לב שההדקים עבור יתר המקרים הם כפי שמופיע באיור 3.3 כלומר הדקים 21, 22 ו- 31 במקום 20.

G422 - G424. צרף את הגרפים לדו״ח.

Q422 - Q424. מצא את V_{MIN}, I_{D0} , λ , ואת Ro.

Q425. השווה בין החישוב התיאורטי הגרפים של סעיף הסימולציות ושל המדידות.

5. מקור זרם עם נגד במשוב

א. Sweep Analysis

- פתח את המעגל source2
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם source2 של התא source2 בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V4 עולה מ- 0 ל- 5V. סגור את החלון.
- לחץ על simulation->run לביצוע האנליזה.
- פתח חלון ה- calculator
- לחץ על כפתור ה- is בחלון ה- calculator ואז לחץ על הדק ה- drain של הטרנזיסטור N0.
- לחץ על בחלון ה- calculator והדפס גרף של הזרם כפונקציה של המתח.

G511. צרף את הגרף לדו״ח.

- אם נניח שהמשוואה של הזרם בתחום הרוויה נתונה ע״י :

$$I_D = I_{D0}(1 + \lambda V_o)$$

- תזכורת : השיפוע = $\lambda * I_{D0}$ ו- $R_0 = 1/ \lambda * I_{D0}$

Q511. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מתוך הגרף, מצא את V_{MIN}. בעזרת הערכים שמצאת, חשב את Ro. שים לב לשיפור בערכים אלה.

G512 – G514. בצע סימולציות כפי שהוסבר לעיל עבור יתר המקרים שבדו״ח ההכנה. צרף את הגרפים לדו״ח.

Q512 - Q514. מתוך הגרפים, מצא את I_{D0}, V_{MIN} , λ ו- Ro עבור יתר המקרים שבדו״ח ההכנה.

ב. ביצוע מדידות

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 10KHz להדק מס׳ 23 על הכרטיס.
- כוון מקור מס׳ 2 ל- 1.5V וזרם מרבי של 10mA . חבר את המקור להדק מס׳ 12 על הכרטיס.
- כוון מקור מס׳ 1 ל- 3.3V וזרם מרבי של 10mA . חבר את המקור להדק מס׳ 33 על הכרטיס.
- חבר את הערוצים של הסקופ להדקים מס׳ 23 ו-27.
- הצג את עקום המתח-זרם כפי שעשית בסעיף 1.

G521. צרף את הגרף לדו״ח.

Q521. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מצא גם את V_{MIN} ואת Ro.

- חזור על הפעולות האלה עבור כל המקרים שבדו״ח ההכנה. שים לב שההדקים עבור יתר המקרים הם כפי שמופיע באיור 3.4 כלומר הדקים 28, 11 ו- 24 במקום 27.

G522 - G524. צרף את הגרפים לדו״ח.

Q522 - Q524. מצא את V_{MIN} ואת Ro.

Q525. השווה בין החישוב התיאורטי הגרפים של סעיף הסימולציות ושל המדידות.

חשוב מאד : בכל סעיף של ביצוע מדידות יש לחבר את מתחי האספקה לכרטיס. קבע את המתח ואת הזרם המרבי של הספק (כפי שהוסבר בסעיף ״הפעלת המכשירים״) לפני שאתה מחבר את הספק לכרטיס!!

6. מקור זרם Cascode בעל V_{MIN} משופר

א. Sweep Analysis

- פתח את המעגל source3a
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם source3a של התא source3a בעזרת session->load state בחלון הסימולציה.
- לחץ על Analyses->Choose ואז על כפתור ה- dc. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית DC כאשר המתח של V1 עולה מ- 0 ל- 5V. סגור את החלון.
- לחץ על simulation->run לביצוע האנליזה
- פתח חלון ה- calculator
- בעזרת ה- calculator הדפס גרף של הזרם (של ה- drain של הטרנזיסטור הימני העליון) כפונקציה של המתח.

G611. צרף את הגרף לדו״ח.

- אם נניח שהמשוואה של הזרם בתחום הרוויה נתונה ע״י :

$$I_D = I_{D0}(1 + \lambda V_o)$$

Q611. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מתוך הגרף, מצא את V_{MIN} ואת Ro. שים לב לשיפור הנוסף בערכים אלה!

- חזור על הפעולות הנ״ל עבור המעגל source3b.

G612. צרף את הגרף לדו״ח.

Q613. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מצא גם את V_{MIN} ואת Ro.

ב. ביצוע מדידות

- חבר אות מחזורי העולה באופן ליניארי מ- 0 עד 5V בעל תדר של 1KHz להדק מס׳ 29 על הכרטיס.
- חבר את הערוצים של הסקופ׳ להדקים מס׳ 29 ו-34. הצג את עקום המתח-זרם כפי שעשית בסעיף 1.

G621. צרף את הגרף לדו״ח.

Q621. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מצא גם את V_{MIN} ואת Ro.

חשוב : המתחים על שני הערוצים כמעט זהים ולכן ההפרש ביניהם קטן מאד. על מנת לקבל אות הפרש נוח יותר למדידה, יש להגדיל את הרגישות של שני הערוצים עד ל- 500mV/sq. העלאת הרגישות תגרום לכך שחלק מצורת הגל יגלוש מעבר למסך, ולכן יש להוריד את מיקום הגל למינימום האפשרי על מנת לקבל מקסימום צורת גל בתוך המסך. לאחר השינויים האלה, יש ללחוץ על single כדי שהסקופ׳ יצייר את צורות הגל מחדש.

- חזור על הפעולות האלה עבור המעגל השני שבדו״ח ההכנה. שים לב שההדק עבור המקרה השני הוא כפי שמופיע באיור 3.5 כלומר הדק 32 במקום 34.

G622. צרף את הגרף לדו״ח.

Q622. בצע אקסטרפולציה של הגרף כדי למצוא את I_{D0} ומצא את λ מתוך השיפוע. מצא גם את V_{MIN} ואת Ro כפי שעשית בסעיף הסימולציות.

Q623. השווה בין החישוב התיאורטי הגרפים של סעיף הסימולציות ושל המדידות.

7. מגבר אופרטיבי

א. Ac Analysis – ללא קומפנסציה

- פתח את המעגל opamp1_sim_ac (המגבר ללא הרכיבים R ו-C).
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת Launch-> ADE L

- העלה את ה- state בשם opamp1_sim_ac של התא opamp1_sim_ac. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית נקודת עבודת ה- DC וסריקת ac מ- 1Hz ל- 1GHz. סגור את החלון.
- לחץ על simulation->run לביצוע האנליזת ac של המגבר. פתח חלון ה- calculator.
- וודא שבתחתית החלון נבחרה האופציה all (במקום Special Functions) עבור ה- Function Panel.
- בחלון ה- calculator לחץ על ac ואז על vf . כעת לחץ על צומת V_{out} (בסכמה), ואז על V1 ו- V2. לחץ על "-" כדי לקבל V1-V2. כעת לחץ על "/" על מנת לקבל את מתח היציאה חלקי V1-V2. כעת בחר בפונקצית abs (ערך מוחלט) ואז בחר ב- 20db. לחץ על בחלון ה- calculator והדפס גרף של ההגבר כפונקציה של תדר.

G711. צרף את הגרף לדו"ח.

G712. לחץ על vf . כעת לחץ על צומת V_{out} (בסכמה), אבל הפעם בחר ב- phase (במקום abs ו- 20db) על מנת לקבל את הגרף של הפאזה. צרף את הגרף לדו"ח.

Q711. מהו ה- phase margin ?האם המגבר יציב ? הסבר.

ב. Ac Analysis - עם קבל ונגד קומפנסציה

- פתח את המעגל opamp2_sim_ac (המגבר עם הרכיבים R ו-C).
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת - Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם opamp2_sim_ac של התא opamp2_sim_ac.
- חזור על הפעולות של סעיף א'.

G721 - G722. צרף את הגרפים לדו"ח.

Q721. מהו ה- phase margin ? האם המגבר יציב ? הסבר ? כיצד הושגה היציבות?

ג. מציאת מתח ה- offset

- במגבר אידיאל, אם אין סיגנל ac בכניסה אזי לא יהיה סיגנל ביציאה. במגבר אמיתי, אם אין סיגנל בכניסה, לא תמיד היציאה מאופסת. המתח בכניסה הדרוש על מנת לאפס את היציאה נקרא מתח ה- offset. העדר סיגנל בכניסה משמעו שקיים רק אות ה- dc כלומר 2.5V במקרה שלנו. מתח ה- offset יהיה הסטייה מ- 2.5V הדרושה לקבלת 2.5V ביציאה.
- פתח את המעגל opamp2_sim_off. לכניסת ה: "-" של המגבר נחבר מתח של 2.5V ולכנסת ה: "+", מתח עולה מ- 2.4V עד ל- 2.6V. נדרוש 1000 נקודות ביניים למען הדיוק.
- הפעל את הכלי סימולציה בעזרת - Launch-> ADE L
- העלה את ה- state בשם opamp2_sim_off. ניתן לראות שה- state הגדיר ביצוע של סימולצית dc_sweep כאשר המתח של V0 עולה מ- 2.4V ל- 2.6V ו- 1000 נקודות. סגור את החלון.
- לחץ על run לביצוע האנליזת dc sweep של המגבר עם הרכיבים R ו-C.
- פתח חלון ה- calculator.
- בחלון ה- calculator לחץ על vs ובחר את צומת היציאה. לחץ על . לחץ על vs ובחר את צומת הכניסה, לחץ שוב על . מצא את מתח ה- offset כלומר **מה מתח הכניסה כאשר מתח היציאה שווה ל- 2.5V** (צריך לבצע zoom in קרוב מאד לאיזור של 2.5V).

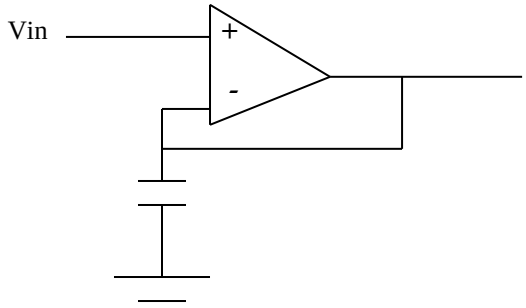
G731. הדפס וצרף את הגרף לדו"ח.

Q731. רשום מהו מתח ה- offset של המגבר.

ד. מציאת ה- slew rate וה- settling time

- מחברים לכניסה אות ריבועי מחזורי. ביציאה גם מתקבלת אות מחזורי ריבועי אבל לא "אידיאלי". נגדיר:
- slew rate+ : שיפוע של אות היציאה בזמן שהאות עולה.
- slew rate- : שיפוע של אות היציאה בזמן שהאות יורד.

- settling time : הזמן הדרוש לאות היציאה להגיע בטווח של 1% של ערכו במצב יציב.
- פתח את המעגל opamp2_sim_sr המכיל סכמה כפי שמופיע באיור 7.1.



איור מס׳ 7.1

- שים לב שהכניסה הינו אות ריבועי בעל :
מתח עליון = 2.6V, מתח תחתון = 2.4V, זמן עליה וירידה =10ns, זמן השהייה = 2µs ורוחב פולס= 20µs.
- העלה את ה- state בשם opamp2_sim_sr של התא opamp2_sim_sr. ה- state מגדיר transient analysis למשך 50 µs.
- לחץ על simulation->run לביצוע ה- transient analysis.
- בחלון ה- calculator לחץ על vt ובחר את צומת היציאה. לחץ על . לחץ על vs ובחר את צומת הכניסה, לחץ שוב על .
G741. צרף את הגרף לדו״ח.
Q741. מתוך הגרף מצא את ה- slew rate (בעליה ובירידה) וה- settling time.

ה. מציאת ה- input common mode range

- בסעיף זה, נמצא מהו ה- input common mode range V_{ICMR}, כלומר עבור איזה תחום של מתחי $V_c=(V^+ - V^-)/2$ ממשיך המגבר לעבוד בצורה הנכונה. על מנת לעשות זאת, נבצע סימולציה מ-0 ל- 5V של מתח הכניסה של המעגל בסעיף הקודם. עבור סימולציה זאת, יש להשתמש באותה סכמה של הסעיף הקודם.
- מכיוון שהמגבר מחובר בתצורה של עוקב מתח, ה- V_{ICMR} יהיה תחום המתחים שעוברו היציאה עוקבת אחרי הכניסה.
- באותו חלון ADE של הסעיף הקודם, העלה את ה- state בשם opamp2_sim_icmr של התא opamp2_sim_sr.
- לחץ על simulation->run לביצוע dc_sweep כפי שמוגדר ב- opamp2_sim_icmr.
- בחלון ה- calculator לחץ על vs ובחר את צומת היציאה. לחץ על . לחץ על vs ובחר את צומת הכניסה, לחץ שוב על .

G751. הדפס וצרף את הגרף לדו״ח.
Q751. מתוך הגרף מצא את ה- V_{ICMR} כלומר טווח המתחים שמתח היציאה עוקבת אחרי מתח הכניסה באון מדויק.

הערה חשובה: סימולציית ה- dc_sweep נותן למעגל אין סוף זמן להגיע למצב מתמיד. לכן, מציאת ה- V_{ICMR} בדרך זאת נותנת רק הערכה גסה של ה- V_{ICMR}. ניתן למצוא את ה- V_{ICMR} המדויק יותר ע״י הרצת סימולציות transient מתאימות.

ו. סימולצית ac בחוג סגור

גם בסעיף זה מריצים באותו חלון ADE של הסעיף הקודם. העלה את ה- state בשם opamp2_sim_ac של התא opamp2_sim_sr.

- לחץ על simulation->run לביצוע סימולצית ה- ac כפי שמוגדר ב- opamp2_sim_ac.
- בחלון ה- calculator לחץ על vf ובחר את צומת היציאה. לחץ על . לחץ על vs ובחר את צומת הכניסה, לחץ שוב על .

G761. הדפס וצרף את הגרף לדו״ח.

Q761. באיזה תדר יורד ההגבר ב- 3db ?

Layout

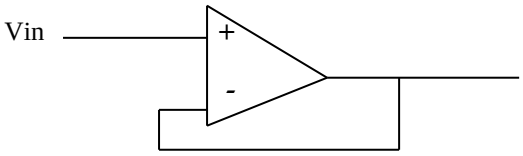
פתח את התא Chip-layout. לחץ על shift F. בצע zoom לחלקים השנים של התא ועיין ב- layout של השבב.

8. ביצוע מדידות

הערה : קשה מאד לבצע מדידות על המגבר בחוג פתוח. ההגבר הגבוה במצב זה מיד מכניס את המגבר לרוויה. לכן כל המדידות בניסוי תבצענה בחוג סגור.

א. מדידת ההגבר של המגבר ללא RC

- חבר את המגבר ללא נגד וקבל הקומפנסציה כפי שמתואר שאיור מס׳ 8.1



אויר מס׳ 8.1

- הדק ה- ״+״ של המגבר הוא הדק 14 על הכרטיס, והדק ה- ״-״ הוא מספר 13. הדק היציאה הוא מס׳ 15. חבר חוט המקצר בין היציאה (15) ל "-" (13).
- להדק הכניסה 14 חבר אות סינוסי בעל תדר 10KHz ואמפליטודה 0.05V ורמת DC של 2.5V (lolevel=2.475V ו- hilevel=2.525V).
- חבר את ערוצי הסקופ׳ לכניסה 14 וליציאה 15. לחץ על auto-scale.

G811. הדפס וצרף את הגרף לדו״ח.

Q811. הסבר מה רואים בגרף.

ב. מדידת ההגבר של המגבר עם RC לתיקון ה- phase margin

- חבר את המגבר עם נגד וקבל הקומפנסציה כפי שמתואר שאיור מס׳ 8.1
- להדק הכניסה 16 חבר אות סינוסי בעל תדר 10KHz ואמפליטודה 0.05V ורמת DC של 2.5V. חבר חוט המקצר בין היציאה (26) ל "-" (25).
- חבר את ערוצי הסקופ׳ לכניסה 16 וליציאה 26. לחץ על auto-scale.

G821. הדפס וצרף את הגרף לדו״ח.

Q821. מה ההגבר ? מה הפאזה של היציאה לעומת הכניסה ?

- חזור על מדידת ההגבר ופאזה עבור התדרים :

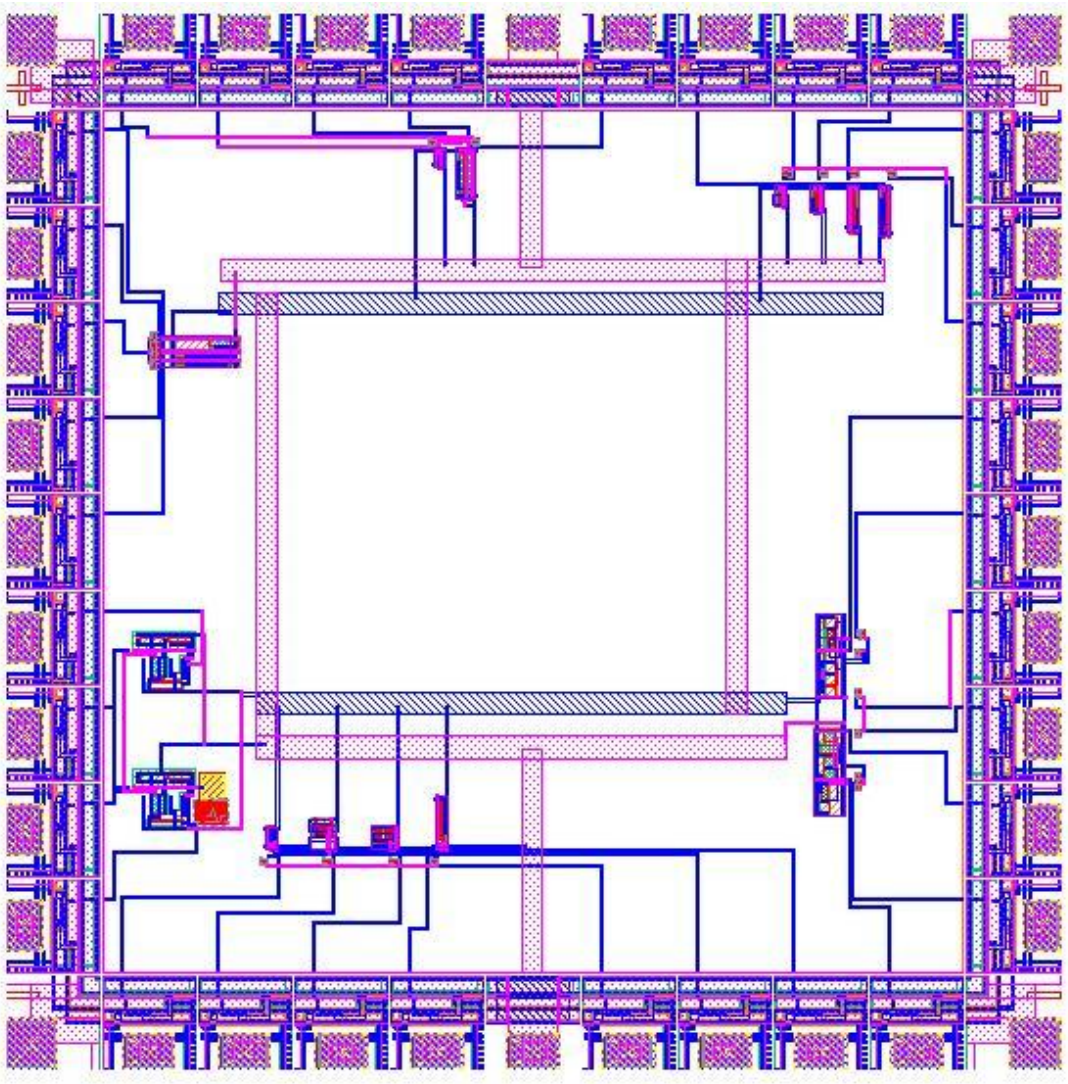
10MHz, 5MHz, 1Mhz, 800KHz, 500Khz, 300KHz, 100Khz, 10KHz, 1KHz.

Q822. רשום את ההגבר והפאזה עבור כל אחד מהתדרים הנ״ל ?

Q823. צייר גרף bode של ההגבר ושל הפאזה. באיזה תדר יורד ההגבר ב- 3db ? האם הגרפים דומים לתוצאות הסימולציה ?

ג. - מדידת ה- slew rate וה- settling time - עם RC

- חבר את המגבר עם נגד וקבל הקומפנסציה כפי שמתואר באיור מס' 8.1
- חבר מקור dc של 10V בעל מגבלת זרם של 15mA להדק ה- Vdd.
- להדק הכניסה 16 חבר אות ריבועי בעל תדר 10KHz ואמפליטודה 0.2V עם dc offset של 2.5V. חבר את גשש הסקופ' ליציאה 26.
- **G831.** הדפס וצרף את הגרף לדו"ח.
- **Q831.** מתוך הגרף מצא את ה- slew rate (בעליה ובירידה).
- בשלב זה לא נמדוד את ה- settling time כי צריך להוסיף קבל מתאים לכרטיס.



איור 7.3 : ה- layout של ה- test chip

לפני עזיבת המעבדה, יש להראות את התוצאות למנחה!!