

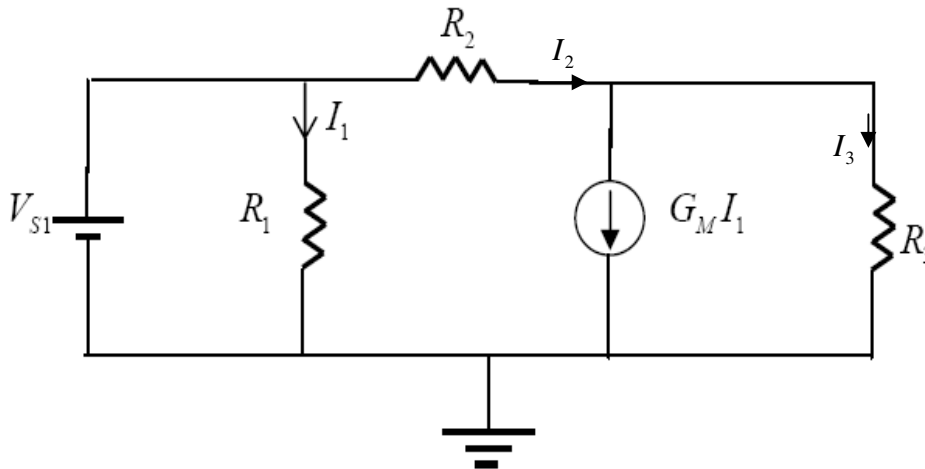
## גליון 1

פתרון לשאלה 1

סעיף א

לא ניתן להשתמש בעקרון הסופרפוזיציה, כי מקור הזרם מבוקר. אם בשליה, ננסה להתשמש בעקרון זה, נקצר את מקור המתח, וכך נגיע לפתרון 0 עבור הזרמים – כלומר מקור הזרם המבוקר לא השפיע כלל.

סעיף ב



נפעיל KCL :

$$I_S = I_1 + I_2$$

$$I_3 = I_2 - G_M I_1$$

נפעיל KVL :

$$V_{S1} = I_1 R_1$$

$$(*) I_1 R_1 = I_2 R_2 + V_{G_M I_1}$$

$$V_{G_M I_1} = I_3 R_3$$

ולכן

$$I_2 = I_3 + G_M I_1 = I_3 + G_M \frac{V_{S1}}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{V_{S1}}{R_1}$$

$$\Rightarrow (*) \frac{V_{S1}}{R_1} R_1 = \left( I_3 + G_M \frac{V_{S1}}{R_1} \right) R_2 + I_3 R_3$$

$$V_{S1} = I_3 R_2 + G_M \frac{V_{S1}}{R_1} R_2 + I_3 R_3$$

$$I_3 = \frac{V_{S1} - G_M \frac{V_{S1}}{R_1} R_2}{R_2 + R_3} = \frac{V_{S1} (R_1 - G_M R_2)}{R_1 (R_2 + R_3)} \Rightarrow V_3 = I_3 R_3 = \frac{V_{S1} R_3 (R_1 - G_M R_2)}{R_1 (R_2 + R_3)}$$

סעיף ג

מאותו טעון של סעיף א', גם כאן שימוש בעקרון הסופרפוזיציה עבור שלוש המקורות יוביל לפתרון שגוי. אך ניתן להשתמש בעקרון זה עבור שני הערעורים הבלתי תלויים בלבד : לפתור פעם אחת רק עם מקור  $V_{S1}$  ופעם שנייה רק עם מקור  $V_{S2}$ , כאשר המקור המבוקר מחובר תמיד.

סעיף ד

אם ערכו של מקור המתח הנוסף יהיה בגודל המתח שחישבנו בסעיף הקודם, לא תהיה השפעה של המקור הנוסף על המעגל. לכן נדרוש

$$V_{S2} = \frac{V_{S1} R_3 (R_1 - G_M R_2)}{R_1 (R_2 + R_3)}$$

לפני ניתוק  $V_{S1}$ , המתח על  $R_2$  הוא  $V_{R2} = V_{S2} - V_{S1}$ , בגלל החיבור המקבילי של  $V_{S2}$ .

לאחר הניתוק של מקור  $V_{S1}$ , המתח על  $R_2$  הוא לפי מחלק מתח בין  $R_1$  ל  $R_2$ , כלומר  $V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{S2}$ .

## פתרון לשאלה 2

סעיף א

עבור  $\omega = 0$ , הקבלים יהיו נתק, ולכן נקבל

$$v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_i$$

ולכן

$$v_o = \frac{R_4}{R_3 + R_4} a_v v = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2}{R_1 + R_2} a_v v_i$$

ולכן פונקציית התמסורת היא

$$A = \frac{\frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2}{R_1 + R_2} a_v v_i}{v_i} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2}{R_1 + R_2} a_v$$

עבור  $\omega \rightarrow \infty$ , הקבלים יהיו קצר, ולכן נקבל

$$v = 0$$

ולכן

$$v_o = 0$$

ולכן פונקציית התמסורת היא

$$A = \frac{0}{v_i} = 0$$

סעיף ב  
ע"פ מחלק מתח,

$$v = \frac{R_2 \parallel C_1}{R_1 + R_2 \parallel C_1} v_i, \quad v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3 \parallel C_2} a_v v$$

ולכן פונקציית התמסורת היא

$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_4}{R_4 + R_3 \parallel C_2} \frac{R_2 \parallel C_1}{R_1 + R_2 \parallel C_1} a_v = \frac{a_v R_4}{R_4 + \left(\frac{1}{R_3} + sC_2\right)^{-1}} \frac{\left(\frac{1}{R_2} + sC_1\right)^{-1}}{R_1 + \left(\frac{1}{R_2} + sC_1\right)^{-1}} = \\ &= \frac{a_v R_4}{R_4 + \left(\frac{1+sC_2R_3}{R_3}\right)^{-1}} \frac{\left(\frac{1+sC_1R_2}{R_2}\right)^{-1}}{R_1 + \left(\frac{1+sC_1R_2}{R_2}\right)^{-1}} = \frac{a_v R_4}{R_4 + \frac{R_3}{1+sC_2R_3}} \frac{\frac{R_2}{1+sC_1R_2}}{R_1 + \frac{R_2}{1+sC_1R_2}} = \\ &= \frac{a_v R_4 (1+sC_2R_3)}{R_4 (1+sC_2R_3) + R_3} \frac{R_2}{R_1 (1+sC_1R_2) + R_2} = \frac{a_v R_4 (1+sC_2R_3)}{R_4 + R_3 + sC_2R_4R_3} \frac{R_2}{R_1 + R_2 + sC_1R_1R_2} \\ &= \frac{a_v R_4 R_2}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \frac{\left(1 + \frac{s}{C_2 R_3}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\frac{R_4 + R_3}{C_2 R_4 R_3}}\right) \left(1 + \frac{s}{\frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2}}\right)} \end{aligned}$$

סעיף ג

מהחישוב הישיר של  $A(s)$  בסעיף הקודם, מתקבל

$$A(j\omega) = \frac{a_v R_4 R_2}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \frac{\left(1 + j \frac{\omega}{1/C_2 R_3}\right)}{\left(1 + j \frac{\omega}{(R_4 + R_3)/C_2 R_4 R_3}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{(R_1 + R_2)/C_1 R_1 R_2}\right)}$$

מקבלים

$$z_1 = \frac{1}{C_2 R_3} = 10, \quad p_1 = \frac{R_4 + R_3}{C_2 R_4 R_3} = 60, \quad p_2 = \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} = 12.5M$$

לחישוב  $20 \log |A_2|$ , נחשב את:

$$20 \log |A(j\omega)| \Big|_{\omega=p_2} = 20 \log \frac{a_v R_4 R_2}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \frac{\left|1 + j \frac{(R_1 + R_2)/C_1 R_1 R_2}{1/C_2 R_3}\right|}{\left|1 + j \frac{(R_1 + R_2)/C_1 R_1 R_2}{(R_4 + R_3)/C_2 R_4 R_3}\right| \sqrt{2}}$$

ולכן

$$A_2 = 20 \log |A(\omega = p_2)| + 3 [dB] = 20 \log \left| \sqrt{2} A(j\omega = p_2) \right|$$

$$= 20 \log \left| \frac{a_v R_4 R_2}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \frac{1 + j \frac{(R_1 + R_2)/C_1 R_1 R_2}{1/C_2 R_3}}{1 + j \frac{(R_1 + R_2)/C_1 R_1 R_2}{(R_4 + R_3)/C_2 R_4 R_3}} \right|$$

ואז, נחשב את  $A_1$  :

$$A_1 = A_2 - 20 \left[ \frac{dB}{dec} \right] \cdot 0.6 [dec]$$

### סעיף ד

1. כאשר  $C_1$  נתקו ו  $C_2$  נתק, ההגבר הוא  $A_1$   $20 \log |A| = A_1$ .
2. כאשר  $C_1$  קצרו ו  $C_2$  נתק, ההגבר הוא  $20 \log |A| = 0$ .
3. כאשר  $C_1$  נתקו ו  $C_2$  קצר, ההגבר הוא  $A_2$   $20 \log |A| = A_2$ .
4. כאשר  $C_1$  קצרו ו  $C_2$  קצר, ההגבר הוא  $20 \log |A| = 0$ .

אם  $C_2$  מנותק, אזי גם  $C_1$  מנותק, כי  $C_1 \ll C_2$ , וגם תדר העירור של שני הקבלים זהה. לכן מצב 2 לא אפשרי. כל שאר המצבים אפשריים.

סיבה נוספת לאי רלוונטיות של מצב 2 :

- כדי להמצא בתחום של נתק עבור  $C_2$ , יש להמצא בתדר  $\omega < p_1$  (הקוטב שמושפע מ  $C_2$  הוא  $p_1$ ).
- כדי להמצא בתחום של קצר עבור  $C_1$ , יש להמצא בתדר  $\omega > p_2$  (הקוטב שמושפע מ  $C_1$  הוא  $p_2$ ).
- ולכן מצב זה לא ייתכן.

### פתרון לשאלה 3

#### סעיף א

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v R_L}{v_s} = -\frac{g_m v_s R_L}{v_s} = -g_m R_L$$

#### סעיף ב

המתח על  $r_\pi$  מקיים :

$$v = g_m v \cdot r_\pi$$

ומכיוון ש  $g_m, r_\pi$  נתונים ולא בהכרח מקיימים  $r_\pi g_m = 1$ , הרי ש  $v = 0$ , ולכן הענף שבו מקור הזרם מנותק, ואז

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{0}{v_s} = 0$$

יש כאן מעגל "פידבק" חיובי (קורלציה חיובית בין  $I_{r_\pi}$  ל  $V_{r_\pi}$ ):

- אם המתח על  $r_\pi$  יגדל במעט, זרם המקור יגדל, וחוזר חלילה וכך הזרם/מתח על הנגד יתבדרו, והמעגל ישרף.
- אם המתח על  $r_\pi$  יקטן במעט, זרם המקור יקטן, וחוזר חלילה וכך הזרם/מתח על הנגד ידעכו, והמעגל ינותק.

סעיף גנסמן ב  $I_1$  את הזרם ב  $r_\pi$ .

$$I_1 = \frac{v}{r_\pi}$$

$$v_s = v + (I_1 + g_m v) R_E = v + \left( \frac{v}{r_\pi} + g_m v \right) R_E \Rightarrow v = \frac{v_s}{1 + g_m R_E + \frac{R_E}{r_\pi}}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v R_L}{v_s} = - \frac{g_m \left( \frac{v_s}{1 + g_m R_E + \frac{R_E}{r_\pi}} \right) R_L}{v_s} = - \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_E + \frac{R_E}{r_\pi}} = - \frac{g_m r_\pi R_L}{r_\pi + g_m r_\pi R_E + R_E}$$

נשים לב שכאשר  $R_E \rightarrow \infty$ , אנו מקבלים את תוצאת סעיף ב'סעיף ד

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v R_L}{v_s} = \frac{g_m \left( v_s \frac{r_\pi}{r_\pi + R_E} \right) R_L}{v_s} = \frac{r_\pi}{r_\pi + R_E} g_m R_L$$

סעיף ה

נדרוש:

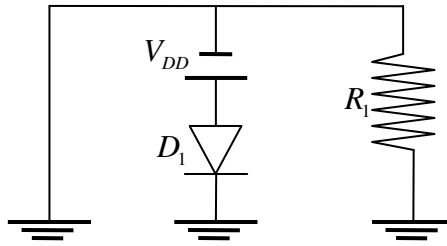
$$\begin{aligned} \frac{g_m r_\pi R_L}{r_\pi + g_m r_\pi R_E + R_E} &= \frac{r_\pi}{r_\pi + \tilde{R}_E} g_m R_L \\ \frac{1}{r_\pi + g_m r_\pi R_E + R_E} &= \frac{1}{r_\pi + \tilde{R}_E} \\ r_\pi + \tilde{R}_E &= r_\pi + g_m r_\pi R_E + R_E \\ \tilde{R}_E &= g_m r_\pi R_E + R_E \\ \tilde{R}_E &= R_E (1 + g_m r_\pi) \end{aligned}$$

## גליון 2

פתרון לשאלה 1

סעיף א

כדי לקבל את זרם ה-DC במעגל, יש להעזר בעקרון הסופרפוזיציה ולפתור רק עבור מקור ה-DC. נקבל את המעגל:



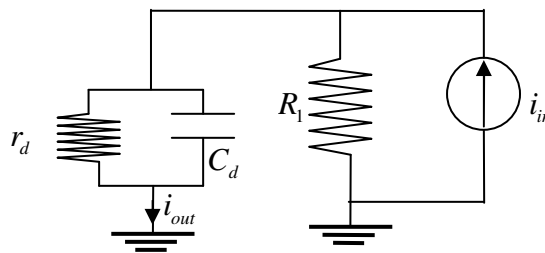
ולכן המתח על הדיודה הוא  $V_D = V_{DD} = 0.6[V]$ . הזרם בדיודה יהיה

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{kT/q}} - 1 \right) = 1.052 \text{mA}$$

על הנגד לא נופל מתח ולא זרם בו זרם.

סעיף ב

הדיודה נמצאת בממתח קדמי, ולכן נקבל את סכמת התמורה לאות קטן הבאה:



ההתנגדות הדינאמית היא

$$r_d = \left( \frac{\partial I}{\partial V} \right)^{-1} \Bigg|_{I=I_D} = \left( \frac{I_0}{\frac{kT}{q}} e^{\frac{V}{kT/q}} \right)^{-1} \Bigg|_{I=I_D} = \frac{kT}{q I_D} = 24.7 [\Omega]$$

ערכו של קיבול הדיפוזיה הוא

$$C_d = \frac{q}{KT} \tau_F I_D = \frac{\tau_F}{\frac{kT}{q}} I_D = 50.6 \text{ nF}$$

סעיף ג

נסמן את הזרם הזורם בנגד  $R_1$  ב- $i_1$ , ולכן

$$i_{out} = i_1 + i_{in}$$

ומשימוש ב-KVL:

$$v_D = -v_{R_1} \Rightarrow i_{out} Z_D = -i_1 R_1 \Rightarrow i_1 = -\frac{Z_D}{R_1} i_{out} = -\frac{C_d \parallel r_d}{R_1} i_{out}$$

ולכן

$$i_{out} = -\frac{C_d \parallel r_d}{R_1} i_{out} + i_{in} \Rightarrow i_{out} = \frac{i_{in}}{1 + \frac{C_d \parallel r_d}{R_1}}$$

ולכן

$$\begin{aligned}
 A_I(s) &= \frac{1}{1 + \frac{C_d \parallel r_d}{R_1}} = \frac{R_1}{R_1 + C_d \parallel r_d} = \frac{R_1}{R_1 + \left(sC + \frac{1}{r_d}\right)^{-1}} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{r_d}{sC + 1}} = \frac{R_1(sCr_d + 1)}{sCR_1r_d + R_1 + r_d} \\
 &= \frac{sCr_d R_1}{sCR_1r_d + R_1 + r_d} + \frac{R_1}{sCR_1r_d + R_1 + r_d}
 \end{aligned}$$

סעיף ד

כניסת האות הקטן למעגל הוא צירוף של אותות עצמיים:

$$i_{in} = 3 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right) = 3 \frac{e^{j\omega_0 t + j\frac{\pi}{4}} + e^{-j\omega_0 t - j\frac{\pi}{4}}}{2} = \frac{3}{2} e^{j\frac{\pi}{4}} e^{j\omega_0 t} + \frac{3}{2} e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-j\omega_0 t}$$

ולכן

$$\begin{aligned}
 i_{out}(t) &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{3}{2} e^{j\frac{\pi}{4}} A_I(s = j\omega_0) e^{j\omega_0 t} + \frac{3}{2} e^{-j\frac{\pi}{4}} A_I(s = -j\omega_0) e^{-j\omega_0 t} \right\} \\
 &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ e^{j\frac{\pi}{4}} \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} e^{j\omega_0 t} - e^{-j\frac{\pi}{4}} \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{-j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} e^{-j\omega_0 t} \right\} \\
 &= \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \operatorname{Re} \left\{ \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} e^{j\omega_0 t} \right\} - \operatorname{Re} \left\{ \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{-j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} e^{-j\omega_0 t} \right\} \right) \\
 &= \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left\{ \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} - \frac{R_1(j\omega_0 Cr_d + 1)}{-j\omega_0 CR_1 r_d + R_1 + r_d} \right\} \cos(\omega_0 t)
 \end{aligned}$$

## גליון 3

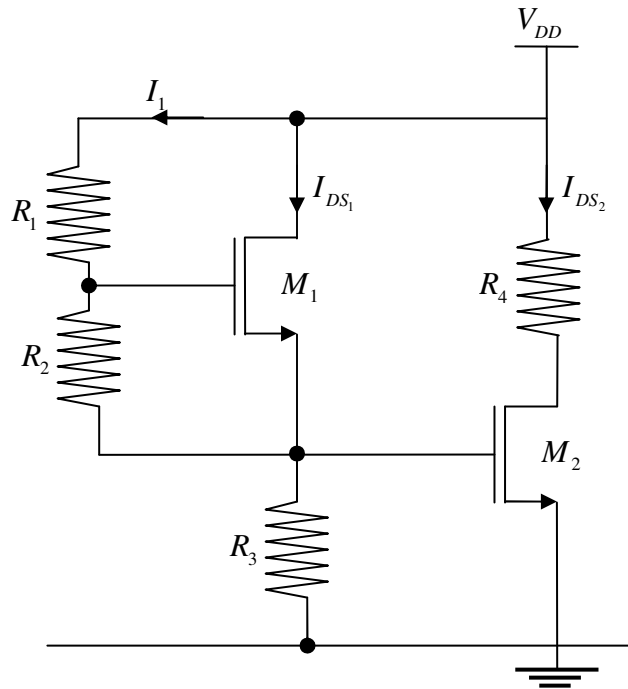
פתרון לשאלה 1

סעיף א

נניח כי שני הטרנזיסטורים ברוויה, ולכן

$$I_{DS_1} = K(V_{GS_1} - 1)^2, \quad I_{DS_2} = K(V_{GS_2} - 1)^2$$

חישוב זרמי הטרנזיסטורים:



$$V_{DD} = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + I_{DS_1})R_3 = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(V_{GS_1} - V_{T_1})^2)R_3$$

$$V_{DD} = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(I_1 R_2 - 1)^2)R_3 = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(I_1^2 R_2^2 - 2I_1 R_2 + 1))R_3$$

$$10 = 7 \cdot 10^3 I_1 + 2 \cdot 10^3 I_1 + I_1^2 4 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^3 I_1 + 1$$

$$\Rightarrow 4 \cdot 10^6 I_1^2 + 5 \cdot 10^3 I_1 - 9 = 0$$

$$\Rightarrow I_1 = 1m[A]$$

ולכן

$$V_{GS_1} = I_1 R_2 = 2[V]$$

$$\Rightarrow I_{DS_1} = K(V_{GS_1} - 1)^2 = 0.5m[A]$$

ולכן

$$V_{GS_2} = (I_1 + I_{DS_1})R_3 = 3[V]$$

$$\Rightarrow I_{DS_2} = K(V_{GS_2} - 1)^2 = 2m[A]$$

חישוב מתחי הטרנזיסטורים:  
ראשית,

$$V_{DS_1} = V_{DD} - V_{R_3} = V_{DD} - V_{GS_2} = 7[V]$$

הזרם על נגד  $R_4$ :

$$I_4 = \frac{V_{DD} - V_{DS_2}}{R_4} = I_{DS_2}$$

ולכן

$$V_{DS_2} = V_{DD} - R_4 I_{DS_2} = 5[V]$$

הטרנזיסטורים אכן ברוויה:



$$V_{GS_1} - V_{T_1} = 1 < 7 = V_{DS_1}$$

$$V_{GS_2} - V_{T_2} = 2 < 5 = V_{DS_2}$$

לסיכום, נקודת העבודה של  $M_1$  היא

$$(I_{DS_1}, V_{DS_1}) = (0.5m[A], 7[V])$$

$$(I_{DS_2}, V_{DS_2}) = (2m[A], 5[V])$$

סעיף ב

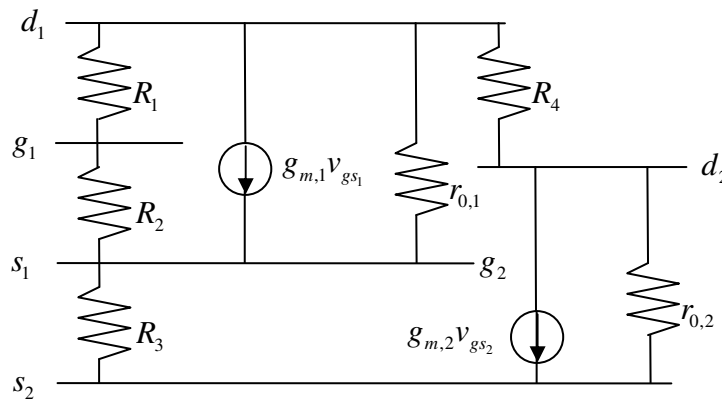
הפרמטרים לאות קטן עבור  $M_1$ :

$$r_{0,1} = \frac{|V_A|}{|I_{DS_1}|} = \frac{50}{0.5m} = 100k[\Omega], \quad g_{m,1} = \frac{2I_{DS_1}}{V_{GS_1} - V_{T_1}} = \frac{2 \cdot 0.5m}{2-1} = 1m[\text{S}]$$

הפרמטרים לאות קטן עבור  $M_2$ :

$$r_{0,2} = \frac{|V_A|}{|I_{DS_2}|} = \frac{50}{2m} = 25k[\Omega], \quad g_{m,2} = \frac{2I_{DS_2}}{V_{GS_2} - V_{T_2}} = \frac{2 \cdot 2m}{3-1} = 2m[\text{S}]$$

סכמת תמורה:



פתרון לשאלה 2

סעיף א

$$V_{GS_2} = V_{DD} \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 2.27[V]$$

$$V_{SG_1} = V_{DD} - V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 3.18[V]$$

נניח ששני הטרנזיסטורים במצב רוויה.

$$I_{DS_1} = I_{DS_2} + \frac{V_{DS_1}}{R_L} \Rightarrow K_p (V_{SG_1} - V_{T_1})^2 = K_n (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 + \frac{V_{DS_2}}{R_L}$$

$$\Rightarrow 50\mu(-3.18+1)^2 = 100\mu(2.27-1)^2 + \frac{V_{DS_2}}{R_L}$$

$$\Rightarrow 50\mu \cdot 4.84 = 100\mu(1.27)^2 + \frac{V_{DS_2}}{100 \cdot 10^3} \Rightarrow 4.84 = 2(1.27)^2 + \frac{V_{DS_2}}{100 \cdot 10^3 \cdot 50\mu}$$

$$\Rightarrow 1.62 = 0.2V_{DS_2} \Rightarrow V_{DS_2} = 8.1[V]$$

ולכן

$$V_{SD_1} = 1.9[V]$$

ומכיוון ששני הטרנזיסטורים ברוויה, נקבל

$$I_{SD_1} = K_p (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = 242\mu[A]$$

$$I_{DS_2} = K_n (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 = 161\mu[A]$$

ולסיכום, נקודות העבודה הן :

$$(I_{SD_1}, V_{SD_1}) = (242\mu[A], 1.9[V])$$

$$(I_{DS_2}, V_{DS_2}) = (161\mu[A], 8.1[V])$$

סעיף ב

אם נקטין את  $R_L$ , נגיע למצב בו  $Q_2$  יגיע למצב ליניארי, ואם נגדיל את  $R_L$ , נגיע למצב בו  $Q_1$  בליניארי. הזרם בנגד קבוע והוא

$$I_{R_L} = I_{SD_1} - I_{DS_2} = 81\mu[A]$$

לכן הערך הנמוך ביותר עבור  $R_L$  יתקבל כאשר

$$V_{GS_2} - V_{T_2} = V_{DS_2} = I_{R_L} R_{L\min} \Rightarrow R_{L\min} = \frac{V_{GS_2} - V_{T_2}}{I_{R_L}} = \frac{2.27 - 1}{81\mu} = 15.7k[\Omega]$$

והערך הכבוע ביותר עבור  $R_L$  יתקבל כאשר

$$V_{SG_1} - V_{T_1} = V_{SD_2} = V_{DD} - I_{R_L} R_{L\max} \Rightarrow R_{L\max} = \frac{10 - (-2.18)}{81\mu} = 150.4k[\Omega]$$

סעיף ג

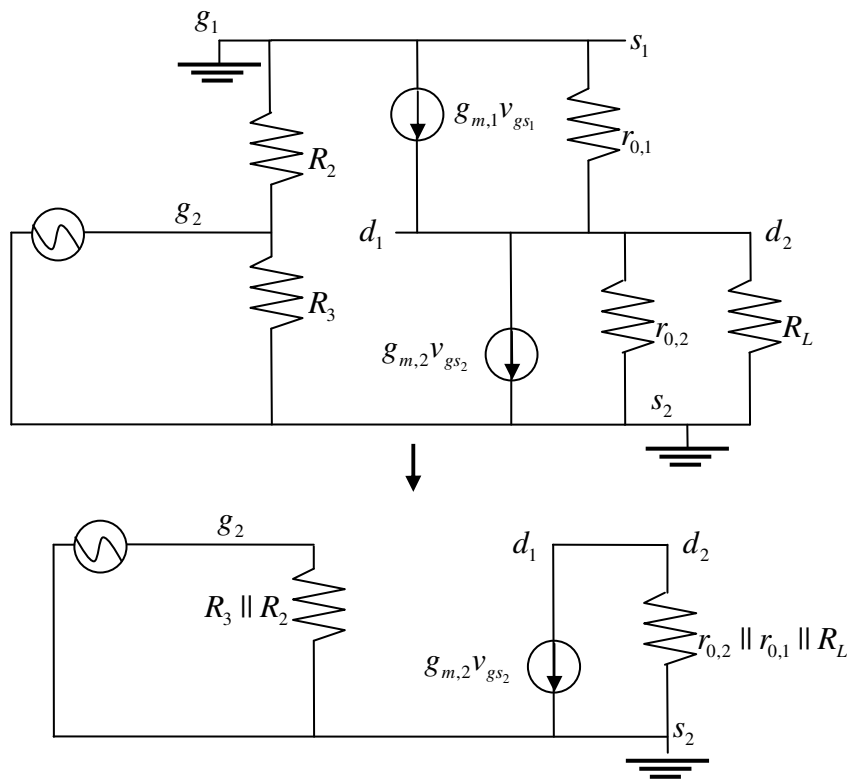
הפרמטרים לאות קטן עבור  $Q_1$  :

$$r_{0,1} = 500k[\Omega], \quad g_{m,1} = \left| \frac{2I_{SD_1}}{V_{GS_1} - V_{T_1}} \right| = \frac{2 \cdot 242\mu}{2.18} = 222\mu[S]$$

הפרמטרים לאות קטן עבור  $Q_2$  :

$$r_{0,2} = 500k[\Omega], \quad g_{m,2} = \frac{2I_{DS_2}}{V_{GS_2} - V_{T_2}} = \frac{2 \cdot 161\mu}{1.27} = 253\mu[S]$$

ומעגל התמורה הוא



## פתרון לשאלה 3

## סעיף א

החלק השמאלי (CMOS) לא מושפע מהרכיב הלא ליניארי.  
נניח כי שני הטרנזיסטורים ברוויה.

$$\begin{aligned} I_{DS_1} = I_{DS_2} &\Rightarrow K(V_{GS_1} - V_{T_1})^2(1 + \lambda V_{DS_1}) = K(V_{GS_2} - V_{T_2})^2(1 + \lambda V_{DS_2}) \\ &\Rightarrow (-5 + 1)^2(1 - 0.02V_{DS_1}) = (5 - 1)^2(1 + 0.02V_{DS_2}) \\ &\Rightarrow 1 - 0.02(V_{DS_2} - 10) = 1 + 0.02V_{DS_2} \\ &\Rightarrow -V_{DS_2} + 10 = V_{DS_2} \Rightarrow V_{DS_2} = 5[V] \end{aligned}$$

ולכן זרמי הטרנזיסטורים הם

$$I_{DS_1} = I_{DS_2} = K(V_{GS_2} - V_{T_2})^2(1 + \lambda V_{DS_2}) = \frac{1}{2}m(5 - 1)^2(1 + 0.02 \cdot 5) = 8.8m[A]$$

ולכן נקודות העבודה הן

$$(I_{DS_1}, V_{DS_1}) = (-8.8m[A], -5[V])$$

$$(I_{DS_2}, V_{DS_2}) = (8.8m[A], 5[V])$$

עבור טרנזיסטור  $M_3$ :

אם  $M_3$  ברוויה, אז

$$I_{DS_3} = I_{NL} = K(V_{GS_3} - V_{T_3})^2$$

$$V_{DD} = V_{DS_3} + V_{NL} = V_{DS_3} + \frac{I_{NL}^3}{b} + aI_{NL} = V_{DS_3} + \frac{K_3^3(V_{GS_3} - V_{T_3})^6}{b} + aK(V_{GS_3} - V_{T_3})^2$$

$$10 = V_{DS_3} + 64 + 4 \cdot 10^{-3}a$$

$$\Rightarrow V_{DS_3} = -54 - 4 \cdot 10^{-3}a$$

כדי ש  $M_3$  יהיה ברוויה, נדרוש

$$V_{DS_3} > V_{GS_3} - V_{T_3} \Rightarrow -54 - 4 \cdot 10^{-3}a > 4 \Rightarrow a < 14.5k[\Omega]$$

סעיף ב  
באופן כללי,

$$r_d = \frac{\partial V}{\partial I}$$

ולכן התנגדות הרכיב הלא ליניארי, באות קטן, היא

$$r_d = \frac{\partial V_{NL}}{\partial I_{NL}} = \frac{\partial}{\partial I_{NL}} \left( \frac{I_{NL}^3}{b} + aI_{NL} \right) = \frac{3}{b}I_{NL}^2 + a$$

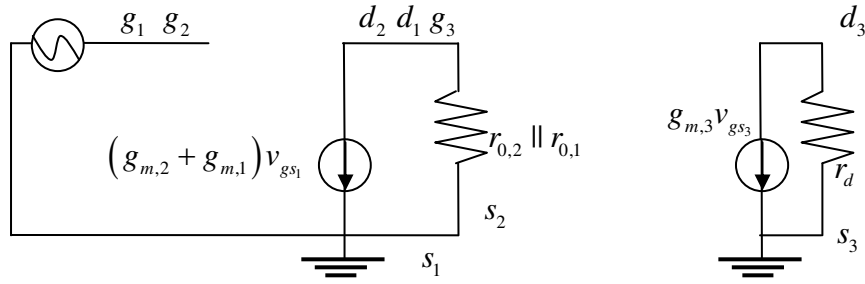
מכיוון ש  $M_3$  ברוויה, נקבל

$$I_{NL} = I_{DS_3} = K(V_{GS_3} - V_{T_3})^2 = 4m[A]$$

ולכן

$$r_d = \frac{3}{b}16 \cdot 10^{-6} + a = (3k + a)[\Omega]$$

סעיף ג



חישובי הפרמטרים :

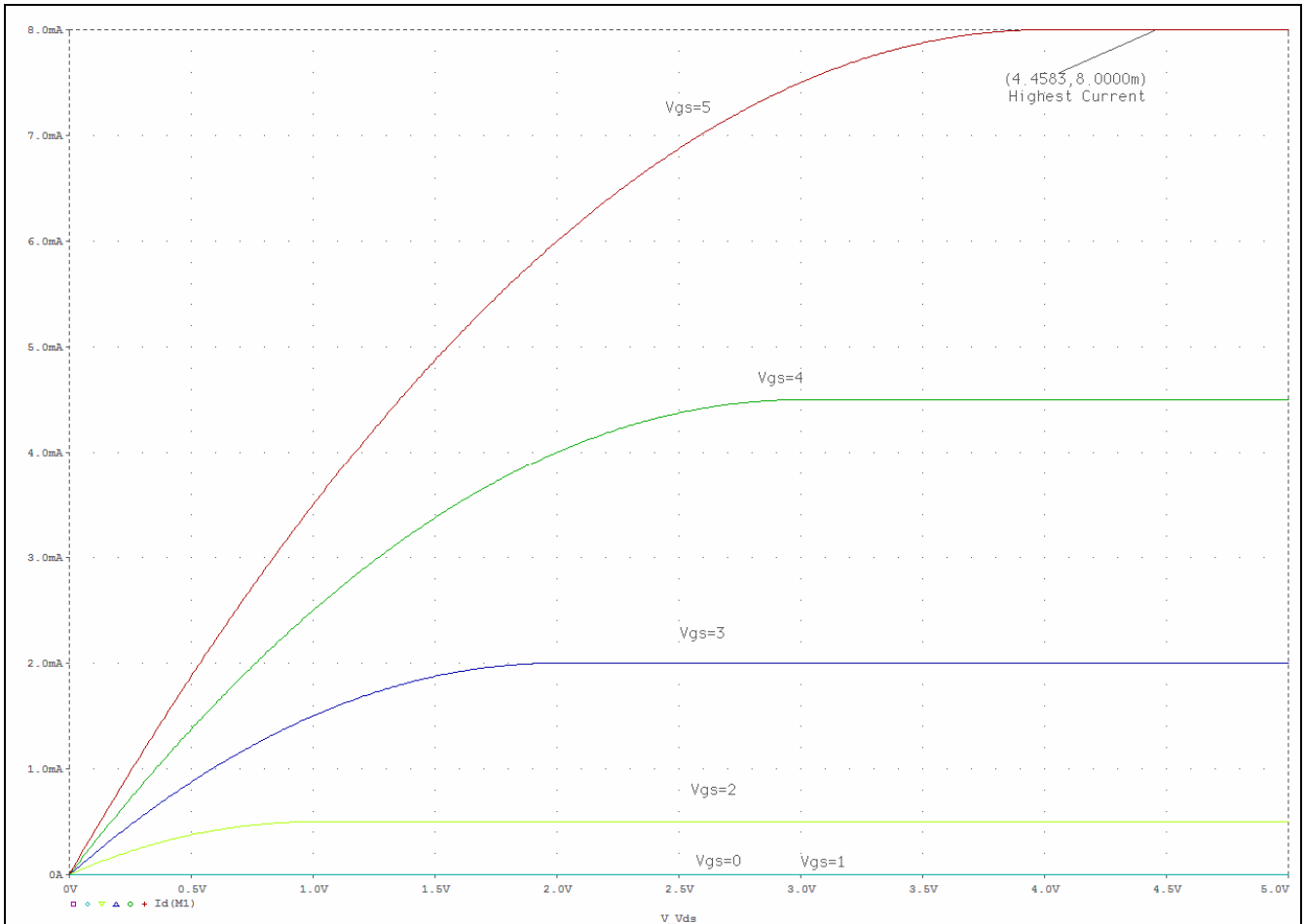
$$r_{0,1} = \frac{1}{\lambda I_{DS1}} = 12.5k [\Omega], \quad r_{0,2} = \frac{1}{\lambda I_{DS2}} = 12.5k [\Omega], \quad r_{0,3} = \infty$$

$$g_{m,1} = \frac{2I_{DS1}}{V_{GS1} - V_{T1}} = 4.4m [\text{S}], \quad g_{m,2} = \frac{2I_{DS2}}{V_{GS2} - V_{T2}} = 4.4m [\text{S}], \quad g_{m,3} = \frac{2I_{DS3}}{V_{GS3} - V_{T3}} = 2m [\text{S}]$$

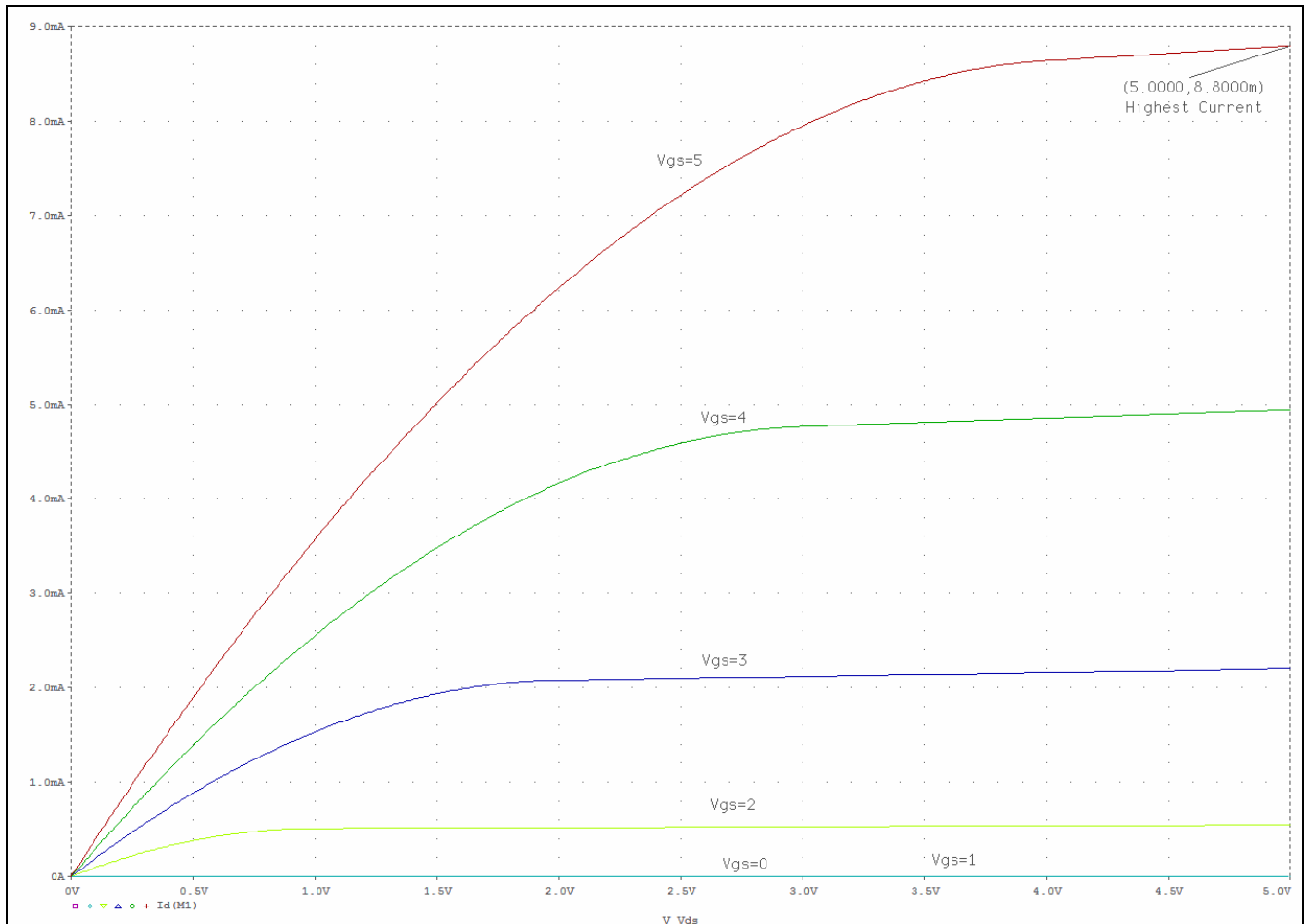
## פתרון לשאלה 4

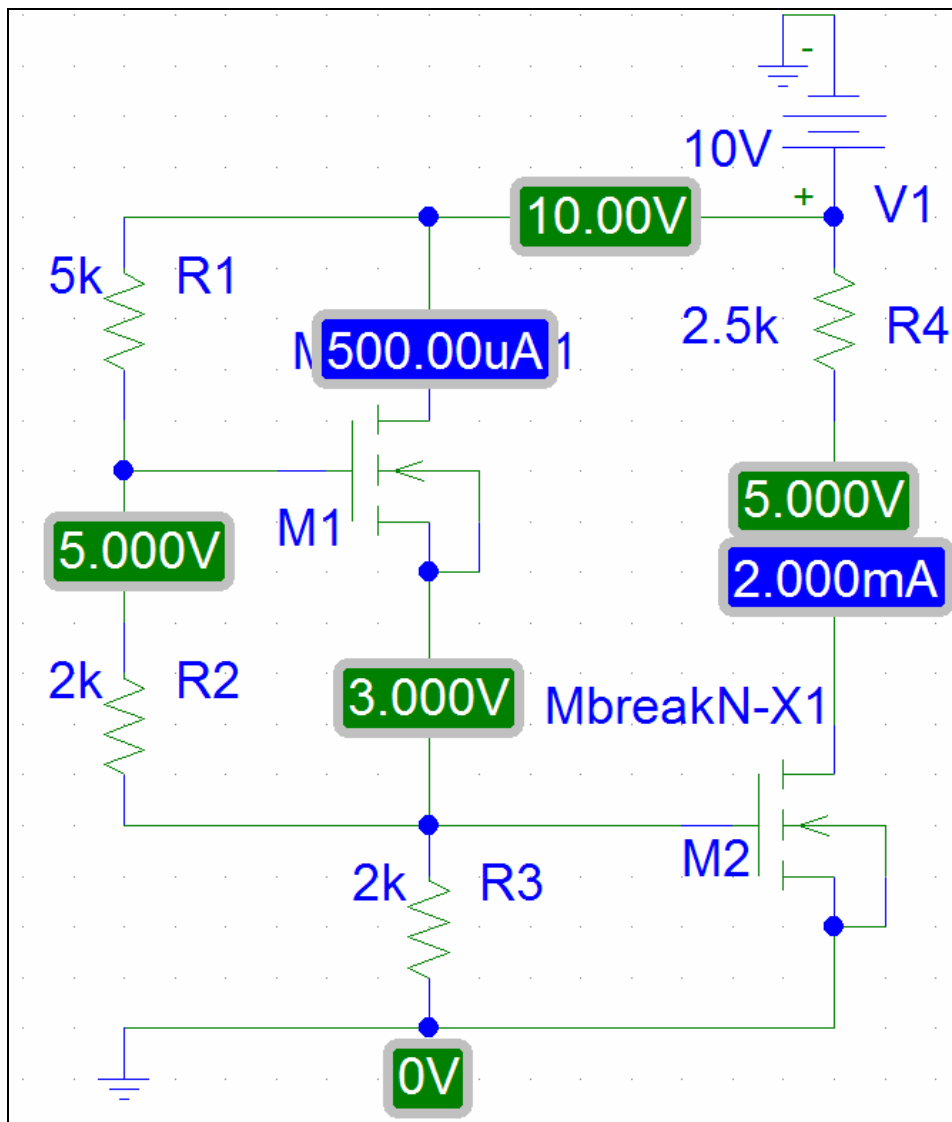
## סעיף א

גרף 1: זרם הטרנזיסטור  $I_{DS}$  כפונקציה של מתח ההדקים  $V_{DS}$ , עבור  $V_{GS} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , ללא אפקט התקצרות התעלה. פרמטרי הטרנזיסטור כבשאלה 1, כלומר  $V_T = 1[V]$ ,  $K = 0.5m \left[ \frac{A}{V^2} \right]$ , ובנוסף  $L = 1\mu[m]$ .



גרף 2: זרם הטרנזיסטור  $I_{DS}$  כפונקציה של מתח ההדקים  $V_{DS}$ , עבור  $V_{GS} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , כולל אפקט התקצרות התעלה. פרמטרי הטרנזיסטור כבשאלה 1, כלומר  $\lambda = 0.02 \left[ \frac{1}{V} \right]$ ,  $V_T = 1[V]$ ,  $K = 0.5m \left[ \frac{A}{V^2} \right]$ , ובנוסף  $L = 1\mu[m]$ .



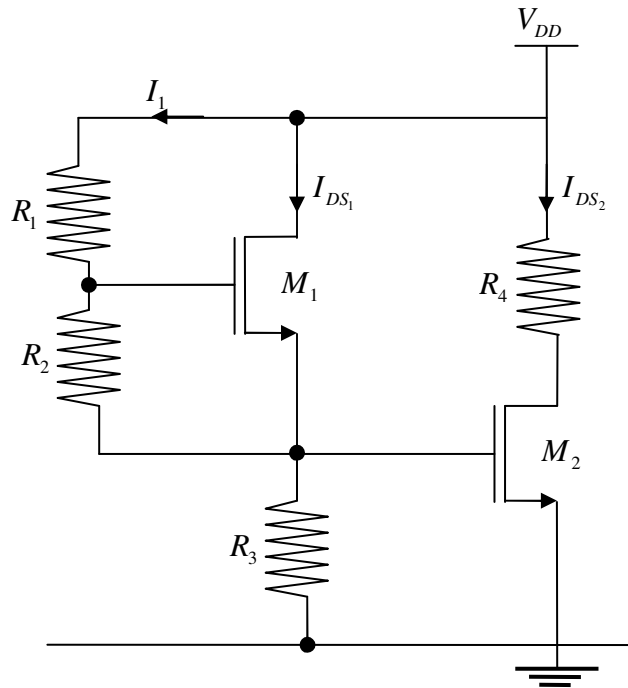


ניתן לראות כי ערכי הזרמים והמתחים זהים לחישובים התיאורטיים בשאלה 1, המובאים להלן:

נניח כי שני הטרנזיסטורים ברוויה, ולכן

$$I_{DS_1} = K(V_{GS_1} - 1)^2, \quad I_{DS_2} = K(V_{GS_2} - 1)^2$$

חישוב זרמי הטרנזיסטורים:



$$V_{DD} = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + I_{DS_1})R_3 = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(V_{GS_1} - V_{T_1})^2)R_3$$

$$V_{DD} = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(I_1 R_2 - 1)^2)R_3 = I_1(R_1 + R_2) + (I_1 + K(I_1^2 R_2^2 - 2I_1 R_2 + 1))R_3$$

$$10 = 7 \cdot 10^3 I_1 + 2 \cdot 10^3 I_1 + I_1^2 4 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^3 I_1 + 1$$

$$\Rightarrow 4 \cdot 10^6 I_1^2 + 5 \cdot 10^3 I_1 - 9 = 0$$

$$\Rightarrow I_1 = 1m[A]$$

ולכן

$$V_{GS_1} = I_1 R_2 = 2[V]$$

$$\Rightarrow I_{DS_1} = K(V_{GS_1} - 1)^2 = 0.5m[A]$$

ולכן

$$V_{GS_2} = (I_1 + I_{DS_1})R_3 = 3[V]$$

$$\Rightarrow I_{DS_2} = K(V_{GS_2} - 1)^2 = 2m[A]$$

חישוב מתחי הטרנזיסטורים:  
ראשית,

$$V_{DS_1} = V_{DD} - V_{R_3} = V_{DD} - V_{GS_2} = 7[V]$$

הזרם על נגד  $R_4$ :

$$I_4 = \frac{V_{DD} - V_{DS_2}}{R_4} = I_{DS_2}$$

ולכן

$$V_{DS_2} = V_{DD} - R_4 I_{DS_2} = 5[V]$$

הטרנזיסטורים אכן ברוויה:



$$V_{GS_1} - V_{T_1} = 1 < 7 = V_{DS_1}$$

$$V_{GS_2} - V_{T_2} = 2 < 5 = V_{DS_2}$$

לסיכום, נקודת העבודה של  $M_1$  היא

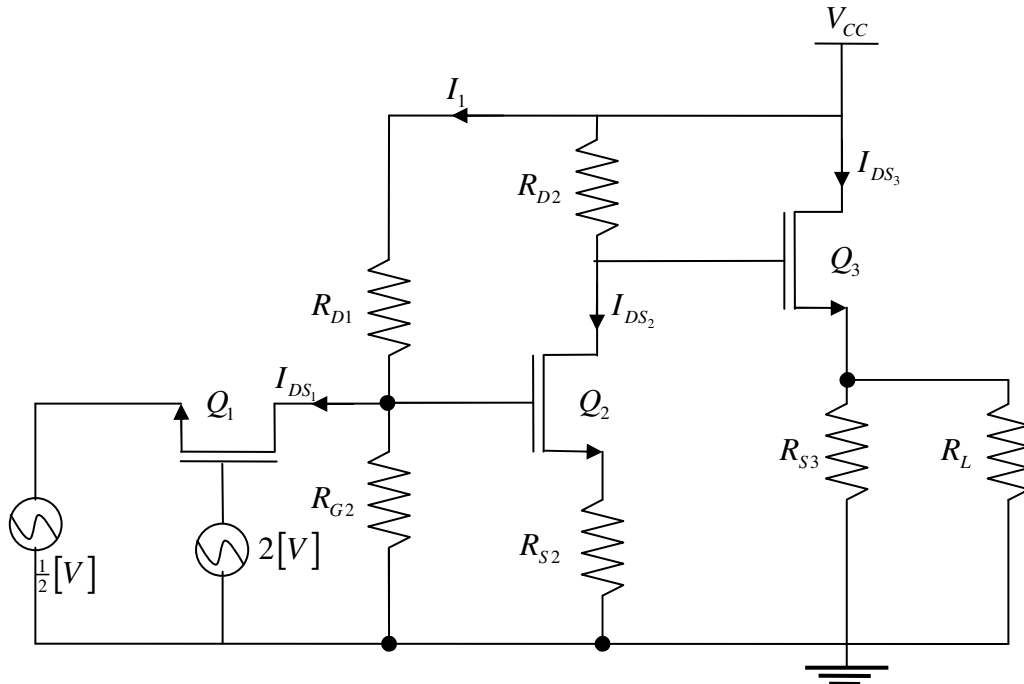
$$(I_{DS_1}, V_{DS_1}) = (0.5m[A], 7[V])$$

$$(I_{DS_2}, V_{DS_2}) = (2m[A], 5[V])$$

## גליון 5

פתרון לשאלה 1

סעיף א

נניח  $Q_1$  ברוייה ולכן

$$I_{DS1} = K(V_{GS1} - V_{T1})^2 = 1m[A]$$

נפעיל את  $KVL$  על המסלול המכיל את הנגדים  $R_{G2}$  ו  $R_{D2}$  :

$$I_1 R_{D1} + (I_1 - I_{DS1}) R_{G2} = V_{CC} \Rightarrow I_1 = \frac{V_{CC} + I_{DS1} R_{G2}}{R_{D1} + R_{G2}} = 1.5m[A]$$

ואז

$$V_{DS1} = (I_1 - I_{DS1}) R_{G2} - \frac{1}{2} = 1.5[V]$$

ולכן, נקודת העבודה של  $Q_1$ , ברוייה :

$$(I_{DS1}, V_{DS1}) = (1m[A], 1.5[V])$$

עבור  $Q_2$ , כאשר נניח כי הוא במצב רווייה, נוכל לכתוב :

$$I_{DS2} = K(V_{GS2} - V_{T2})^2 = K(2 - V_{S2} - 0.5)^2 = K(1.5 - V_{S2})^2 = \frac{V_{S2}}{R_{S2}}$$

$$\Rightarrow 4(2.25 - 3V_{S2} + V_{S2}^2) = V_{S2} \Rightarrow V_{S2} = 1, \cancel{2.25} = 1[V]$$

מתח המקור חייב להיות נמוך ממתח השער, ולכן  $2.25[V]$  נפסל.לסיכום, נקודת העבודה של טרנזיסטור  $Q_2$  היא :

$$(I_{DS2}, V_{DS2}) = (K(V_{GS2} - V_{T2})^2, V_{CC} - I_{DS2}(R_{D2} - R_{S2})) = (0.25m[A], 3.5[V])$$

עבור  $Q_3$  :

$$V_{GD3} = V_{G3} - V_{D3} = V_{D2} - V_{CC} = 2.5 - 5 = -2.5 < V_T$$

ולכן טרנזיסטור זה ברוייה.

$$I_{DS3} = K(V_{GS3} - V_{T3})^2 = K(2.5 - V_{S3} - 0.5)^2 = K(2 - V_{S3})^2 = \frac{V_{S3}}{R_{S3} \parallel R_L}$$

$$\Rightarrow (2 - V_{S3})^2 = V_{S3} \Rightarrow 4 - 4V_{S3} + V_{S3}^2 = V_{S3} \Rightarrow V_{S3} = \cancel{4}, 1 = 1[V]$$

הפתרון  $V_{S3} = 4[V]$  לא מתאים לטרנזיסטור מוליך, ולכן

ולסיכום, נקודת העבודה של טרנזיסטור  $Q_3$  היא

$$(I_{DS_3}, V_{DS_3}) = (K(V_{GS_3} - V_{T_3})^2, V_{CC} - V_{S_3}) = (1m(2.5 - 1 - 0.5)^2, 5 - 1) = (1m[A], 4[V])$$

סעיף ב

- $Q_1$  מחובר בצורת *Common Gate*
- $Q_2$  מחובר בצורת *Common Source*
- $Q_3$  מחובר בצורת *Common Drain*

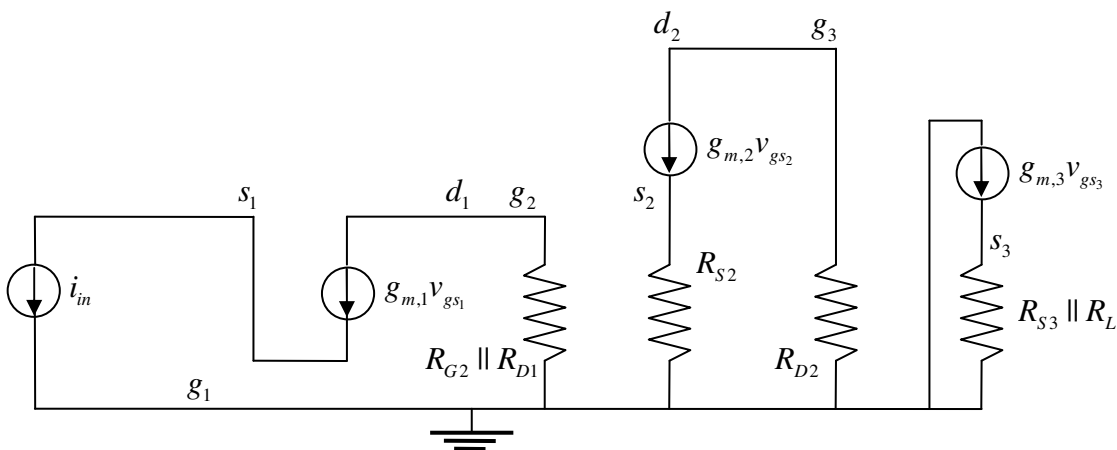
סעיף ג

ראשית נתון כי  $r_0 \rightarrow \infty$ .  
ואז:

$$g_{m,1} = \frac{2I_{DS_1}}{V_{GS_1} - V_{T_1}} = \frac{2m}{1.5 - 0.5} = 2m[\text{S}]$$

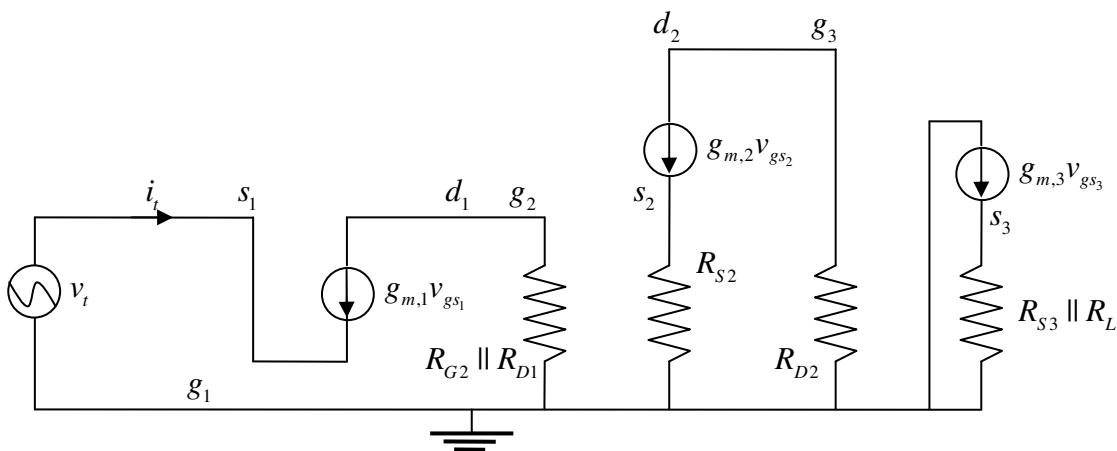
$$g_{m,2} = \frac{2I_{DS_2}}{V_{GS_2} - V_{T_2}} = \frac{0.5m}{2 - 1 - 0.5} = 1m[\text{S}]$$

$$g_{m,3} = \frac{2I_{DS_3}}{V_{GS_3} - V_{T_3}} = \frac{2m}{2.5 - 1 - 0.5} = 2m[\text{S}]$$



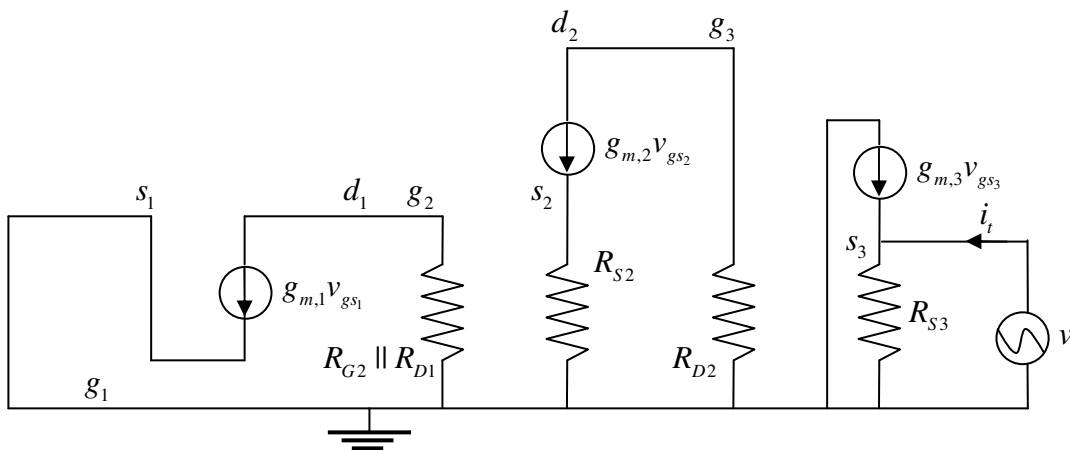
סעיף ד

לחישוב  $R_{in}$ :



$$R_{in} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{v_t}{g_{m,1}v_{gs1}} = \frac{v_t}{g_{m,1}v_t} = \frac{1}{g_{m,1}} = 500[\Omega]$$

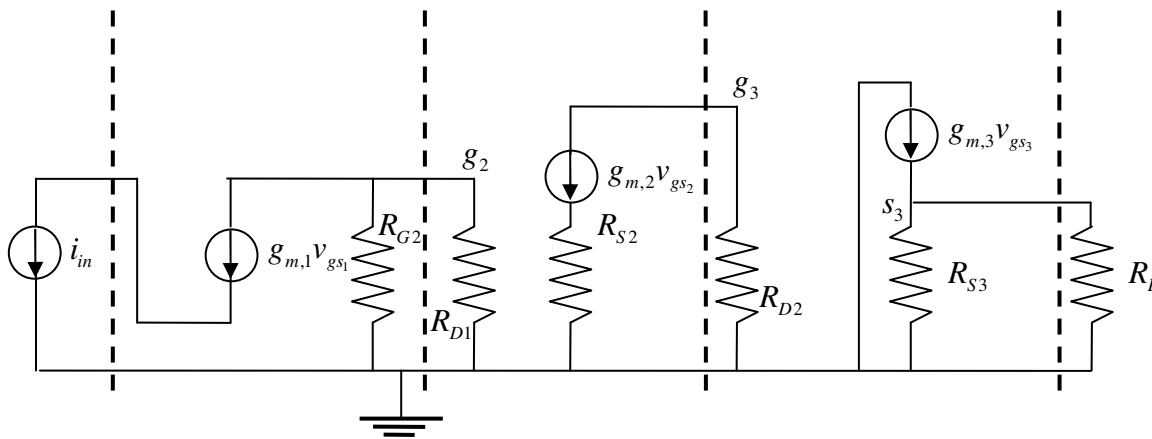
לחישוב  $R_{out}$  :



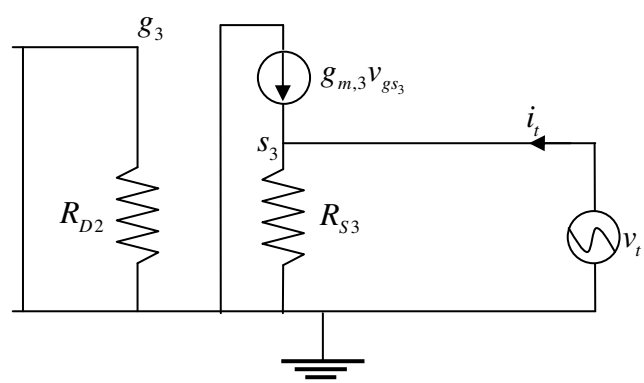
$v_{gs1} = 0$  ולכן גם הטרנזיסטור של רמה 2 קטוע, וכך גם רמה 3, ולכן

$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{v_t}{\frac{v_t}{R_{S3}} - g_{m,3}v_{gs,3}} = \frac{v_t}{\frac{v_t}{R_{S3}} - g_{m,3}(-v_t)} = \frac{R_{S3}}{1 + g_{m,3}R_{S3}} = \frac{1.25k}{1 + 2m \cdot 1.25k} = 375 [\Omega]$$

סעיף ה



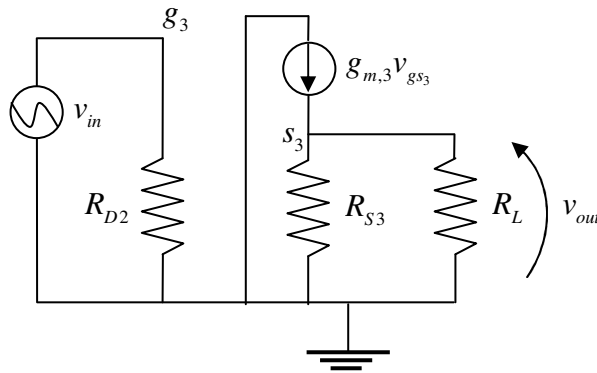
הפרמטרים לגבי הדרגה השלישית :



$$r_{in,3} = R_{D2}$$

$$r_{out,3} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{v_t}{\frac{v_t}{R_{S3}} - g_{m,3}v_{gs,3}} = \frac{v_t}{\frac{v_t}{R_{S3}} - g_{m,3}(-v_t)} = \frac{R_{S3}}{1 + R_{S3}g_{m,3}}$$

נחשב את הגבר הדרגה השלישית :

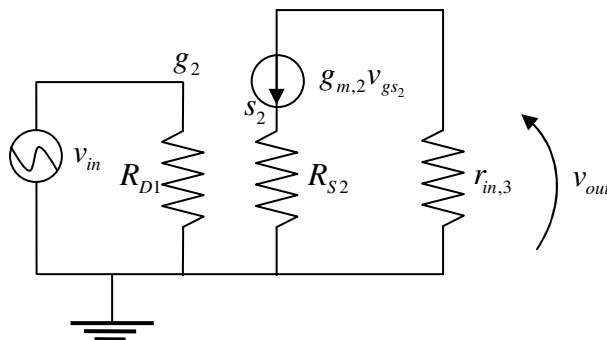


$$\begin{cases} v_{gs,3} = v_{in} - v_{out} \\ v_{out} = g_{m,3} v_{gs,3} (R_{S3} \parallel R_L) \end{cases} \Rightarrow v_{out} = g_{m,3} (v_{in} - v_{out}) (R_{S3} \parallel R_L)$$

$$\Rightarrow v_{out} = \frac{g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}{1 + g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)} v_{in}$$

$$\Rightarrow A_{v,3} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}{1 + g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}$$

כעת נוכל לחשב את הגבר הדרגה השנייה :



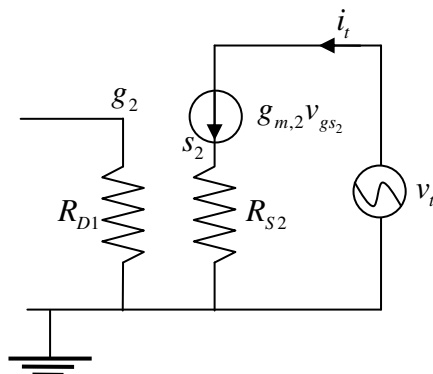
$$v_{gs,2} = v_{in} - g_{m,2} v_{gs,2} R_{S2} \Rightarrow v_{gs,2} = \frac{v_{in}}{1 + g_{m,2} R_{S2}}$$

$$A_{v,2} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m,2} v_{gs,2} r_{in,3}}{v_{in}} = \frac{g_{m,2} \frac{v_{in}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} r_{in,3}}{v_{in}} = \frac{g_{m,2} r_{in,3}}{1 + g_{m,2} R_{S2}}$$

נחשב את  $r_{in,2}$  :

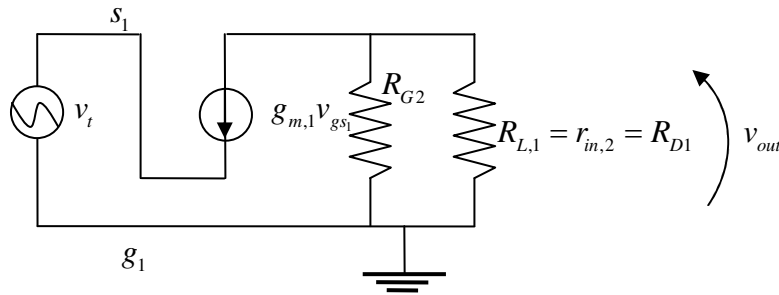
$$r_{in,2} = R_{D1}$$

נחשב את  $r_{out,2}$  :



$$v_{gs,2} = g_{m,2} v_{gs,2} R_{S2} \Rightarrow v_{gs,2} = 0 \Rightarrow r_{out,2} = \infty$$

קעת נוכל לחשב את ההגבר של הדרגה הראשנה :



$$A_{v,1} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m,1} v_{gs,1} (r_{in,2} \parallel R_{G2})}{v_t} = -\frac{g_{m,1} (-v_t) (R_{D2} \parallel R_{G2})}{v_t} = g_{m,1} (R_{D2} \parallel R_{G2})$$

והפרמטרים הנוספים לגבי הדרגה הראשנה :

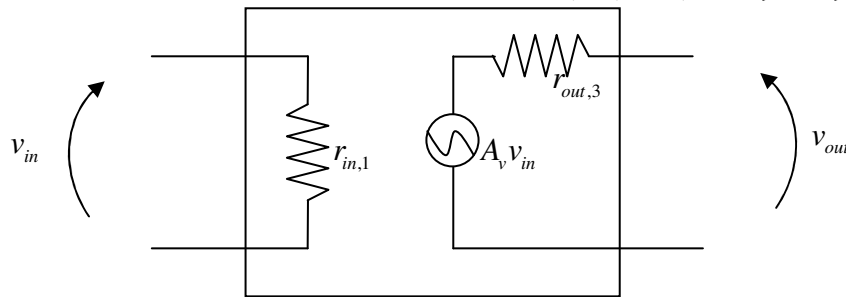
$$r_{in,1} = \frac{v_t}{i_i} = \frac{v_t}{-g_{m,1} v_{gs,1}} = \frac{v_t}{-g_{m,1} (-v_t)} = \frac{1}{g_{m,1}}$$

$$r_{out,1} = R_{D2} \parallel R_{G2}$$

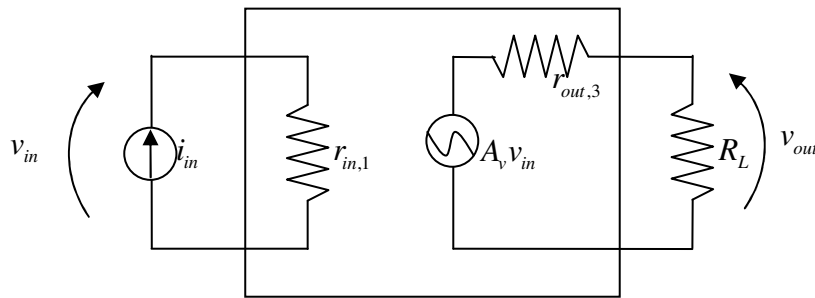
ולכן ההגבר הכולל הוא

$$A_v = A_{v,1} \cdot A_{v,2} \cdot A_{v,3} = g_{m,1} (R_{D2} \parallel R_{G2}) \cdot \frac{g_{m,2} r_{in,3}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} \cdot \frac{g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}{1 + g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}$$

כלומר, ניתן להסתכל על המעגל בתור מגבר יחיד :



ואם נעמיס אותו בעומס המקורי, נוכל לחשב את הטרנס-אימפדנס :

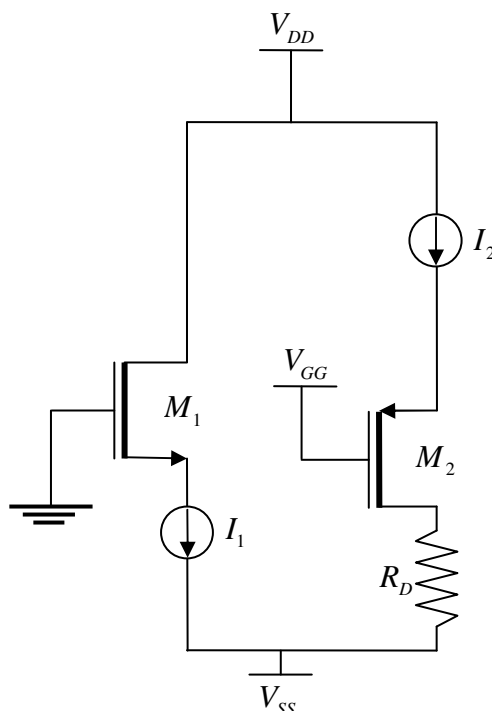


$$\begin{aligned}
Z_T = \frac{v_{out}}{i_{in}} &= \frac{A_v v_{in} \frac{R_L}{R_L + r_{out,3}}}{i_{in}} = \frac{A_v i_{in} r_{in,1} \frac{R_L}{R_L + r_{out,3}}}{i_{in}} = A_v r_{in,1} \frac{R_L}{R_L + r_{out,3}} \\
&= g_{m,1} (R_{D2} \parallel R_{G2}) \cdot \frac{g_{m,2} R_{D2}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} \cdot \frac{g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}{1 + g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)} \frac{1}{g_{m,1}} \frac{R_L}{R_L + \frac{R_{S3}}{1 + R_{S3} g_{m,3}}} \\
&= (R_{D2} \parallel R_{G2}) \cdot \frac{g_{m,2} R_{D2}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} \cdot \frac{g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)}{1 + g_{m,3} (R_{S3} \parallel R_L)} \frac{R_L}{R_L + \frac{R_{S3}}{1 + R_{S3} g_{m,3}}} \\
&= \frac{40}{14} k \cdot \frac{1m \cdot 10k}{1 + 1m \cdot 4k} \cdot \frac{2m \cdot 1k}{1 + 2m \cdot 1k} \frac{5k}{5k + \frac{1.25k}{1 + 1.25k \cdot 2m}} = \\
&= \frac{40}{14} \cdot \frac{10}{1 + 4} \cdot \frac{2}{1 + 2} \cdot \frac{5}{5 + \frac{1.25}{1 + 2.5}} k = \frac{4000}{900} k = 4.44k
\end{aligned}$$

פתרון לשאלה 2

סעיף א

נשרטט את המעגל ב DC :



מהנתון כי  $I_1 = I_2$  וכי הטרנזיסטורים ברוויה, ומהדרישה ש  $V_{S_1} = V_{S_2}$ , נקבל

$$K(V_{G_1} - V_{S_1} - V_{T_1})^2 = K(V_{G_2} - V_{S_2} - V_{T_2})^2$$

$$\Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} - V_{T_1} = V_{G_2} - V_{S_2} - V_{T_2}$$

$$\Rightarrow -V_{T_1} = V_{G_2} - V_{T_2} \Rightarrow -0.9 = V_{G_2} + 0.9 \Rightarrow V_{G_2} = -1.8[V]$$

בנוסף, נקבל

$$V_{GS,1} = \sqrt{\frac{K}{I}} + V_{T,1} = 0.9[V]$$

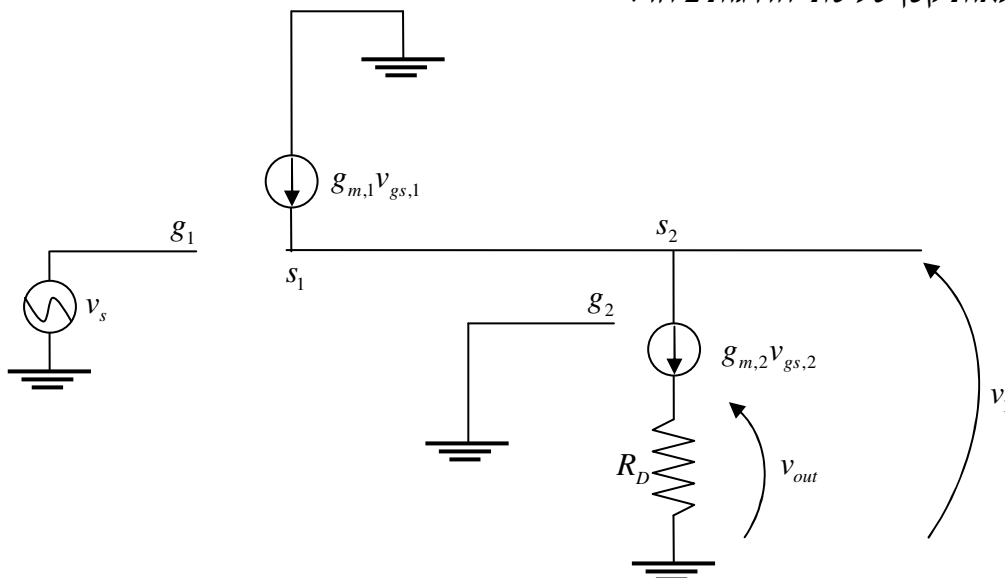
סעיף ב

פרמטרי הטרנזיסטורים לאות קטן :

$$g_{m,1} = 2K|V_{GS} - V_T| = 2 \cdot 100m \cdot |0.9 - 0.8| = \frac{1}{50}[\Omega]$$

$$g_{m,2} = 2K|V_{GS} - V_T| = 2 \cdot 100m \cdot |-1.8 + 0.9 + 0.8| = \frac{1}{50}[\Omega]$$

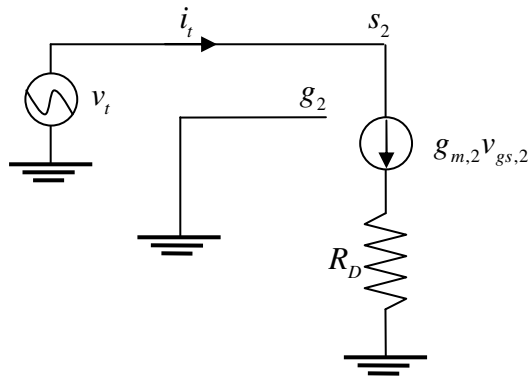
סכמת תמורה לאות קטן של שתי הדרגות ביחד :





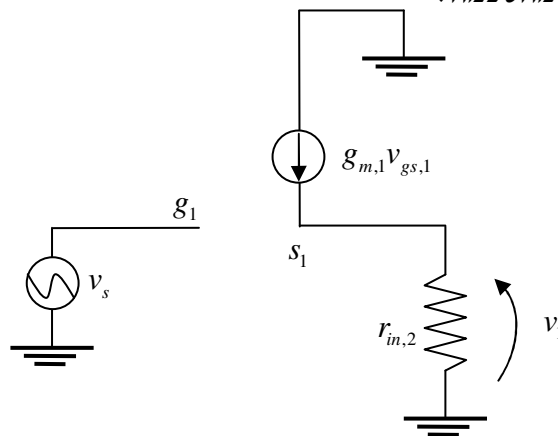
נחשב את התנגדות הכניסה של הדרגה השנייה.

סכמת תמורה לאות קטן של הדרגה השנייה, והכנסת מקור בוחן  $v_t$  :



$$r_{in,2} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{v_t}{g_{m,2}v_{gs,2}} = \left| \frac{v_t}{g_{m,2}(-v_t)} \right| = \frac{1}{g_{m,2}} = 50[\Omega]$$

ולכן הגבר הדרגה הראשונה יחושב מהסכמה :



נקבל :

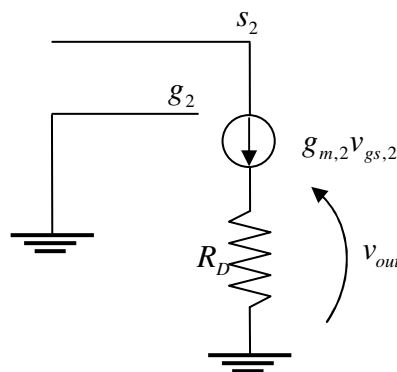
$$A_{v,1} = \frac{v_1}{v_s} = \frac{g_{m,1}v_{gs,1}r_{in,2}}{v_s} = \frac{g_{m,1}(v_s - v_1)r_{in,2}}{v_s} = g_{m,1}r_{in,2} - g_{m,1}r_{in,2} \frac{v_1}{v_s} = 1 - \frac{v_1}{v_s} = 1 - A_{v,1}$$

$$\Rightarrow A_{v,1} = \frac{1}{2}$$

סעיף ג

כבר חישבנו את הגבר הדרגה הראשונה, ולכן נחשב את הגבר הדרגה השנייה  $A_{v,2}$  וההגבר הכולל יהיה

$$A_v = A_{v,1} \cdot A_{v,2}$$



ולענייננו, ההגבר של הדרגה השנייה :

$$A_{v,2} = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{R_D g_{m,2} v_{gs,2}}{v_{gs,2}} = R_D g_{m,2} = 3k \cdot \frac{1}{50} = 60$$

ולסיכום

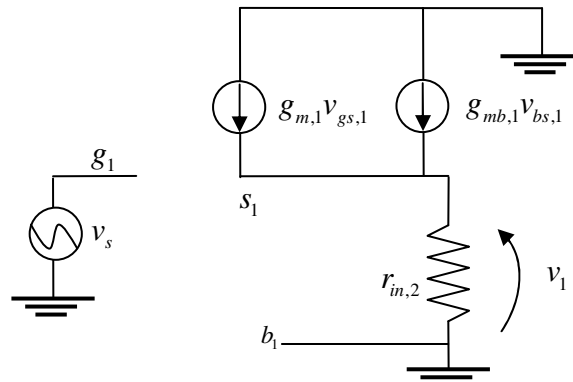
$$A_v = A_{v,1} \cdot A_{v,2} = \frac{1}{2} \cdot 60 = 30$$

### סעיף ד

קיצור הקבל וניתוק מקורות הזרם יגרמו למתחי מקור זהים עבור שני הטרנזיסטורים וזרמים זהים בטרנזיסטורים. אבל – אלו אותם תנאים שהיו עוד לפני השינוי, מכיוון שמקורות הזרם המקוריים היו זהים, וכמו כן מתחי המקור של שני הטרנזיסטורים היו שווים. לכן הפתרון לאחר השינוי זהה לפתרון שלפני השינוי, כלומר  $A_v = 60$  גם בסעיף זה.

### סעיף ה

אפקט המצע ישפיע כאמור רק על הדרגה הראשונה. השינוי יבוא לידי ביטוי עייי תוספת של מקור זרם  $g_{mb,1}v_{bs,1}$  במקביל למקור הזרם המקורי  $g_{m,1}v_{gs,1}$ . מכיוון שלא נאמר אחרת, נניח כי המצע של טרנזיסטור 1 מחובר להארקה. הדרגה השנייה לא מושפעת, ולכן התנגדות הכניסה שלה קבועה. לכן, כדי לחשב את ההגבר החדש  $A'_{v,1}$  של הדרגה הראשונה, יש להתככל על הסכמה הבאה:



$$v_1 = (g_{m,1}v_{gs,1} + g_{mb,1}v_{bs,1})r_{in,2} = ((v_s - v_1) - v_1)g_{m,1}r_{in,2} = (v_s - 2v_1)g_{m,1}r_{in,2} = v_s g_{m,1}r_{in,2} - 2v_1 g_{m,1}r_{in,2}$$

$$\Rightarrow v_1 = \frac{v_s g_{m,1}r_{in,2}}{1 + 2g_{m,1}r_{in,2}}$$

$$\Rightarrow A'_{v,1} = \frac{v_1}{v_s} = \frac{1 + 2g_{m,1}r_{in,2}}{v_s} = \frac{g_{m,1}r_{in,2}}{1 + 2g_{m,1}r_{in,2}} = \frac{1}{50} \cdot 50 = \frac{1}{3}$$

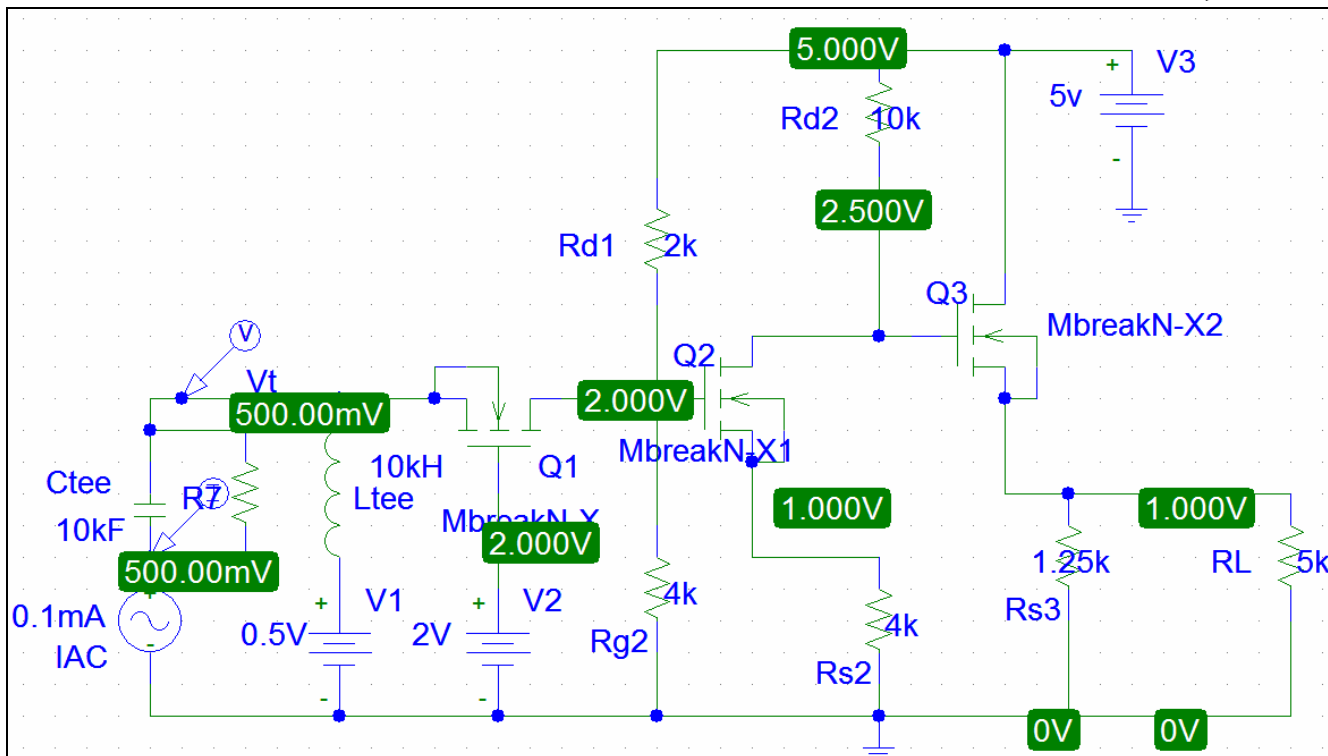
ואז

$$A_v = A'_{v,1} \cdot A_{v,2} = \frac{1}{3} \cdot 60 = 20$$

פתרון לשאלה 3 – תרגיל Spice

סעיף א

תדפיס המעגל:



החלק הרלוונטי בקובץ ה Output עבור נקודות העבודה:

```
***** 19:15:05 12/18/106 ****NT Evaluation PSpice (July 1997***** (
*D:\MSimEv_8\Projects\044142\HW5\HW5_Q3_2.sch
*** OPERATING POINT INFORMATION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
```

\*\*\*MOSFETS

NAME	M_Q2	M_Q1	M_Q3
MODEL	MbreakN-X1	MbreakN-X	MbreakN-X2
ID	2.50E-04	1.00E-03	1.00E-03
VDS	1.50E+00	1.50E+00	4.00E+00

סעיף ב

החלק הרלוונטי בקובץ ה Output עבור פרמטרי אות קטן:

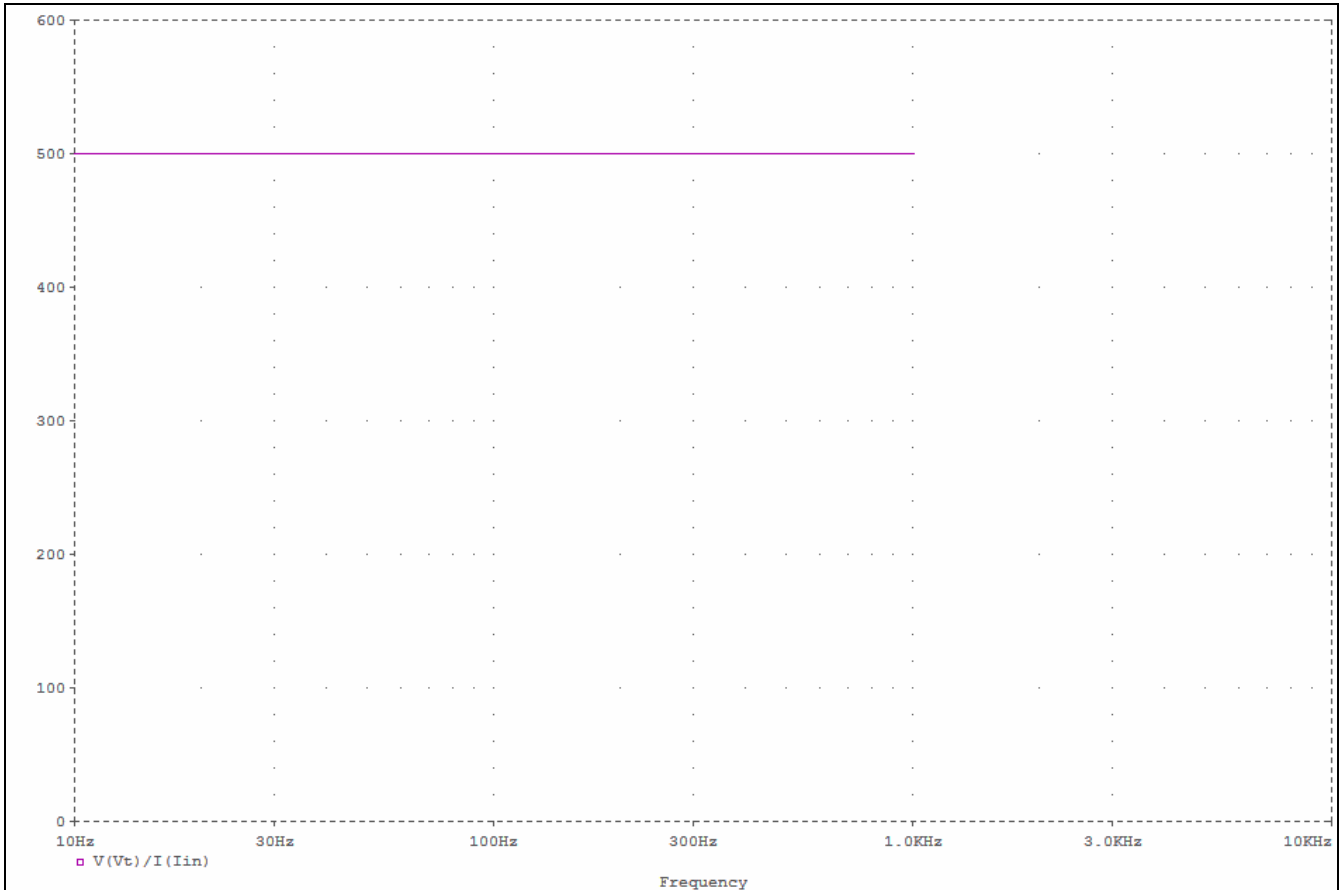
```
***** 10:03:29 12/19/106 ****NT Evaluation PSpice (July 1997***** (
*D:\MSimEv_8\Projects\044142\HW5\HW5_Q3_2.sch
*** OPERATING POINT INFORMATION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
```

\*\*\*MOSFETS

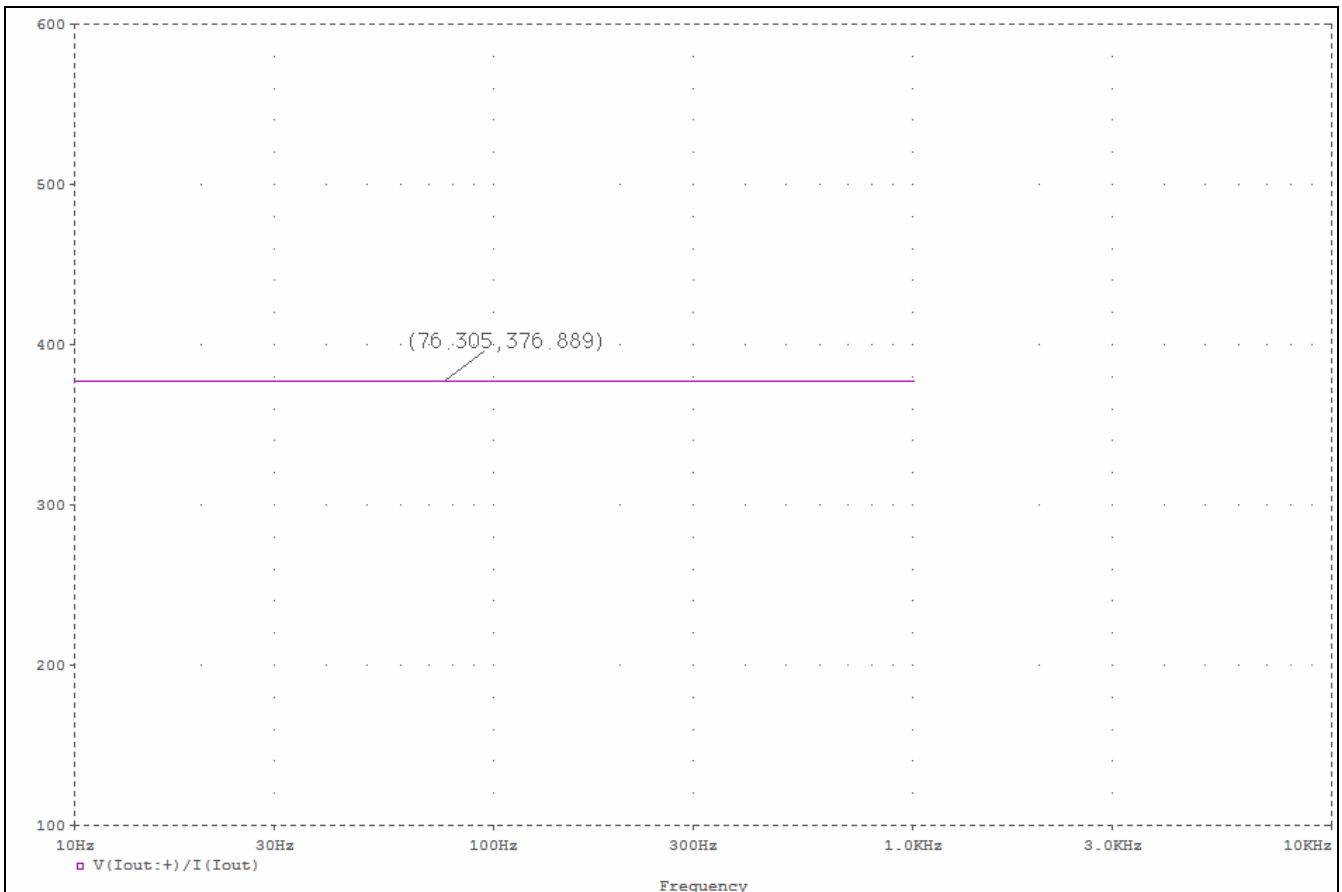
NAME	M_Q1	M_Q2	M_Q3
MODEL	MbreakN-X	MbreakN-X1	MbreakN-X2
ID	1.00E-03	2.50E-04	1.00E-03
VGS	1.50E+00	1.00E+00	1.50E+00
VDS	1.50E+00	1.50E+00	4.00E+00
VBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VTH	5.00E-01	5.00E-01	5.00E-01
VDSAT	1.00E+00	5.00E-01	1.00E+00
GM	2.00E-03	1.00E-03	2.00E-03
GDS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
GMB	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGSOV	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CGDOV	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

**סעיף ג**

בעזרת סימולצית AC Sweep, ניתן לראות כי התנגדות הכניסה היא אכן  $0.5k[\Omega]$  :

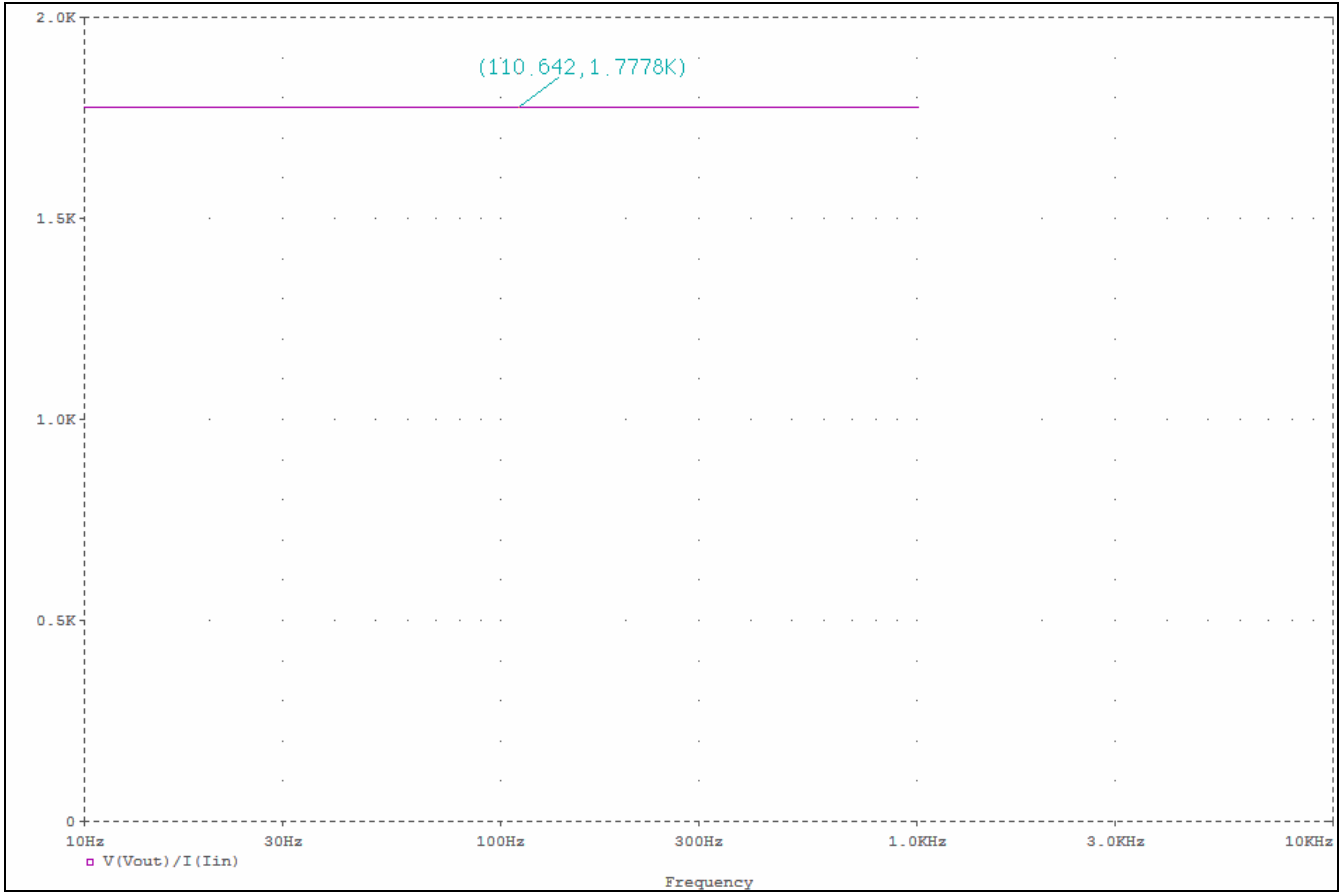


ואכן התנגדות היציאה היא  $R_{out} = 375[\Omega]$  :



**סעיף ד**

הגרף הבא מתאר את  $Z_T = \frac{v_{out}}{i_{in}}$  :

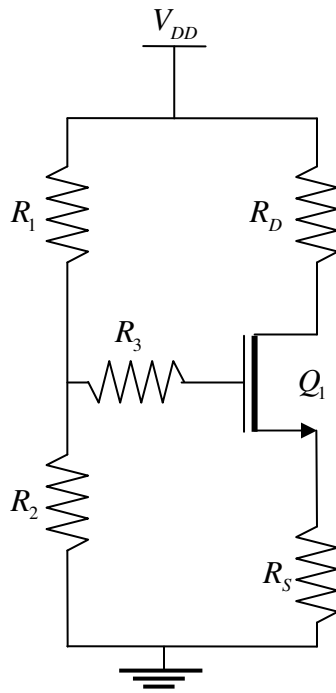


## גליון 7

## פתרון לשאלה 1

סעיף א

למציאת נקודת העבודה, נביט במעגל בערור DC :

נניח כי  $Q_1$  ברוויה. בשער לא זורם זרם, ולכן

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2 = K \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_S - V_T \right)^2 = \frac{V_S}{R_S}$$

## גליון 7

פתרון לשאלה 1

### סעיף א

עבור  $V_{GS}$  נתון, נרצה להשאיר בתחום הרוויה. כדי להשאיר בתחום הרוויה צריך להתקיים

$$V_{GS} - V_T < V_{DS}$$

כלומר

$$V_G - V_T < V_D$$

$$V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T < V_{DD} - I_D R_D$$

$$\Rightarrow R_D < \frac{V_{DD} - V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_T}{I_D}$$

וברוויה נוכל לקבל ביטוי ל  $I_D$  :

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 = K \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_D R_S - V_T \right)^2$$

$$I_D = K \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T - I_D R_S \right)^2 = K \left( \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T \right)^2 - 2I_D R_S \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T \right) + I_D^2 R_S^2 \right)$$

$$I_D = \frac{2KR_S \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T \right) + 1 \pm \sqrt{\left( 2KR_S \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T \right) + 1 \right)^2 - 4K^2 R_S^2 \left( V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_T \right)^2}}{2KR_S^2}$$

### סעיף ב

המעגל שלנו הוא בעצם מגבר  $CS$ , עם שיפוף קטן – תוספת של  $R_3$  בטור להתנגדות הכניסה  $R_1 \parallel R_2$ , כלומר במעגל שלנו מתקיים

$$A_v = -g_m (r_o \parallel R_D)$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 + R_3$$

$$R_{out} = r_o \parallel R_D$$

- כדי לקבל הגבר מתח מקסימלי נבחר  $R_D$  מקסימלי, כלומר  $R_D = 200k [\Omega]$
- כדי לקבל התנגדות כניסה לאות קטן מקסימלית נבחר  $R_1 = R_2 = R_3 = 200k [\Omega]$
- כדי לקבל התנגדות מוצא לאות קטן מינימלית, נבחר  $R_D = 0$ .

### סעיף ג

אכן קיבלנו סתירה, בין הדרישה ל  $R_D$  מקסימלי לקבלת הגבר מתח מקסימלי ובין הדרישה ל  $R_D$  מינימלי לקבל התנגדות מוצא לאות קטן מינימלית.

### סעיף ה

עבור  $R_{in} = R_1 = R_2 = R_3$  נוכל לבחור את אותם הנגדים, כלומר

בעזרת מחלקי מתח נוכל למצוא את הביטוי להגבר במעגל החדש (כאשר  $r_o \rightarrow \infty$ ):

$$A_{v,2} = \frac{R_3 + R_1 \parallel R_2}{r_s + R_3 + R_1 \parallel R_2} \frac{g_{m,1} R_D}{1 + g_{m,1} R_S} \frac{g_{m,2} R_{S2}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} \frac{R_L}{R_L + R_{S2} \parallel \frac{1}{g_{m,2}}}$$

אם נבחר נקודת עבודה מספיק טובה, נקבל

$$\frac{g_{m,2} R_{S2}}{1 + g_{m,2} R_{S2}} \sim 1, \quad \frac{R_L}{R_L + R_{S2} \parallel \frac{1}{g_{m,2}}} \sim 1$$

ולכן

$$A_{v,2} \sim \frac{R_3 + R_1 \parallel R_2}{r_s + R_3 + R_1 \parallel R_2} \frac{g_{m,1} R_D}{1 + g_{m,1} R_S}$$

נותר כעת רק לשנות את  $R_S$ .

### סעיף 1

- כעת אין את הסתירה שקיבלנו בסעיף ג'. נרצה ל הגדיל את  $R_D$  כדי לקבל הגבר גבוהה בדרגה הראשונה, אך דבר זה יזיק ל  $g_{m,2}$ .
- את נגד  $R_S$  נרצה להקטין כדי לקבל  $V_{GS,2}$  גבוה וכך  $g_{m,2}$  גבוה.
- עבור התנגדות הכניסה, אין מה לשנות.

## פתרון לשאלה 2

### סעיף א

הזרם:

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{DD} - V_{BE,on}}{R_B} = 1m [A]$$

כדי לקבל טמפליטודת AC נרצה  $R_C$  מקסימלי (כי עליו נמדד מתח המוצא) מכיוון ש

$$I_C = \frac{V_{DD} - V_{CE}}{R_C} \Rightarrow R_C = \frac{V_{DD} - V_{CE}}{I_C}$$

הדרישה ל  $\max R_C$  שקולה לדרישה  $\min V_{CE}$ , כלומר נבחר  $V_{CE} = V_{CE,sat}$  ונקבל:

$$R_C = R_{C,max} = \frac{V_{DD} - V_{CE,sat}}{I_C} = \frac{10 - 0.2}{1m} = 9.8k [\Omega]$$

### סעיף ב

מציאת נקודת העבודה נעשתה כבר בסעיף הקודם:

$$(I_C, V_{CE}) = (1m [A], 0.2 [V])$$

### סעיף ג

נניח מצב פעיל ונקבל

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{DD} - V_{BE,on}}{R_B} = 150 \frac{10 - 0.7}{930k} = 1.5m [A]$$

ואז

$$V_{CE} = V_{DD} - I_C R_C = 10 - 1.5m \cdot 9.8k = -4.7 < V_{CE,sat}$$

ולכן הטרנזיסטור לא במצב פעיל אלא במצב רוויה, ואז אין הגבר של אות כניסה, כי מתח המוצא קבוע על ערך  $V_{CE,sat}$ . במצב זה

$$I_C = \frac{V_{DD} - V_{CE,sat}}{R_C} = 1m [A]$$

וקיבלנו שאין שינוי בנקודת העבודה.

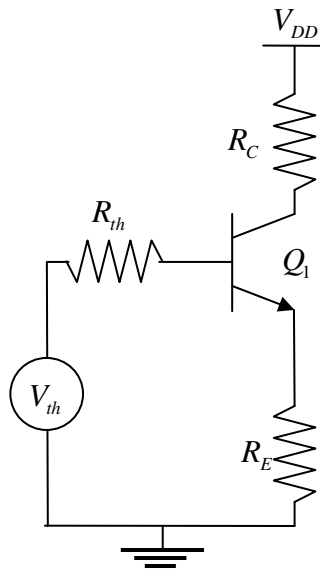
החסרון הוא שאיבדנו את ההגבר, כאשר  $\beta$  השתנה, ולכן המעגל לא יתפקד כראוי.



## סעיף ד

נתמיר את המעגל שמזין את הטרנזיסטור ע"י תבנית:

$$V_{th} = V_{DD} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad R_{th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$



נניח מצב פעיל.

$$\begin{cases} I_B = \frac{V_{th} - (I_E R_E + V_{BE,on})}{R_{th}} \\ I_C = \beta I_B \\ I_E = I_C + I_B \end{cases} \Rightarrow \frac{I_C}{\beta} = \frac{V_{th} - \left( I_C \frac{\beta+1}{\beta} R_E + V_{BE,on} \right)}{R_{th}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\beta} I_C R_{th} = V_{th} - I_C \frac{\beta+1}{\beta} R_E - V_{BE,on}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_{th} + (\beta+1) R_E}$$

ואז

$$V_{CE} = V_{DD} - I_C R_C - I_E R_E = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{1}{\alpha} R_E \right) = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{\beta+1}{\beta} R_E \right)$$

הזרם בנקודת העבודה הוא

$$I_C = \beta \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_{th} + (\beta+1) R_E}$$

וכאשר  $\beta \gg 1$  וגם  $R_{th} \ll (\beta+1) R_E$ , נקבל

$$I_C \sim \frac{\beta}{\beta+1} \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_E} \sim \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_E}$$

וגם

$$V_{CE} = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{\beta+1}{\beta} R_E \right) \sim V_{DD} - I_C (R_C + R_E)$$

כלומר, כאשר  $\beta \gg 1$ , המתח  $V_{CE}$  והזרם  $I_C$  לא מושפע מ  $\beta$ .

כדי לקבוע את נקודת העבודה בדומה לסעיף ב', נדרוש:

$$I_C = \beta \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} = 1m[A]$$

$$\Rightarrow 100 \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_{th} + 101k} = 1m \Rightarrow V_{th} - 0.7 = (R_{th} + 101k)10\mu = 10\mu R_{th} + 1.01$$

$$\Rightarrow V_{th} = R_{th}10\mu + 1.71$$

$$\Rightarrow V_{DD} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}10\mu + 1.71$$

$$\Rightarrow \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}\mu + 0.171$$

נקבע  $R_{B2} = 1[\Omega]$   
ונקבל

$$\frac{1}{R_{B1} + 1} = \frac{\mu R_{B1}}{R_{B1} + 1} + 0.171$$

$$\Rightarrow 1 = \mu R_{B1} + 0.171(R_{B1} + 1) \sim 0.171R_{B1} + 0.171$$

$$\Rightarrow R_{B1} = \frac{1 - 0.171}{0.171} = 4.85[\Omega]$$

$$\Rightarrow V_{th} = V_{DD} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 1.79[V], \quad R_{th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 0.179[\Omega]$$

כדי למצוא את  $R_C$ , נדרוש

$$V_{CE} = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{1}{\alpha} R_E \right) = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E \right) = 0.2[V]$$

$$\Rightarrow 9.8 = I_C \left( R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E \right) \Rightarrow \frac{9.8}{I_C} = R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E$$

$$\Rightarrow R_C = \frac{9.8}{I_C} - \frac{\beta + 1}{\beta} R_E = \frac{9.8}{1m} - \frac{101}{100} k = 8.79k[\Omega]$$

סעיף ה

נניח כי הטרנזיסטור עדיין במצב פעיל, ובעזרת פיתוחים קודמים:

$$I_C = \beta \frac{V_{th} - V_{BE,on}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} = 150 \frac{1.79 - 0.7}{0.179 + 151k} \sim 1.08mA$$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{DD} - I_C \left( R_C + \frac{\beta + 1}{\beta} R_E \right) = 10 - 1.08m \left( 8.79k + \frac{151}{100} k \right) = -0.5[V] < 0.2[V] = V_{CE,sat}$$

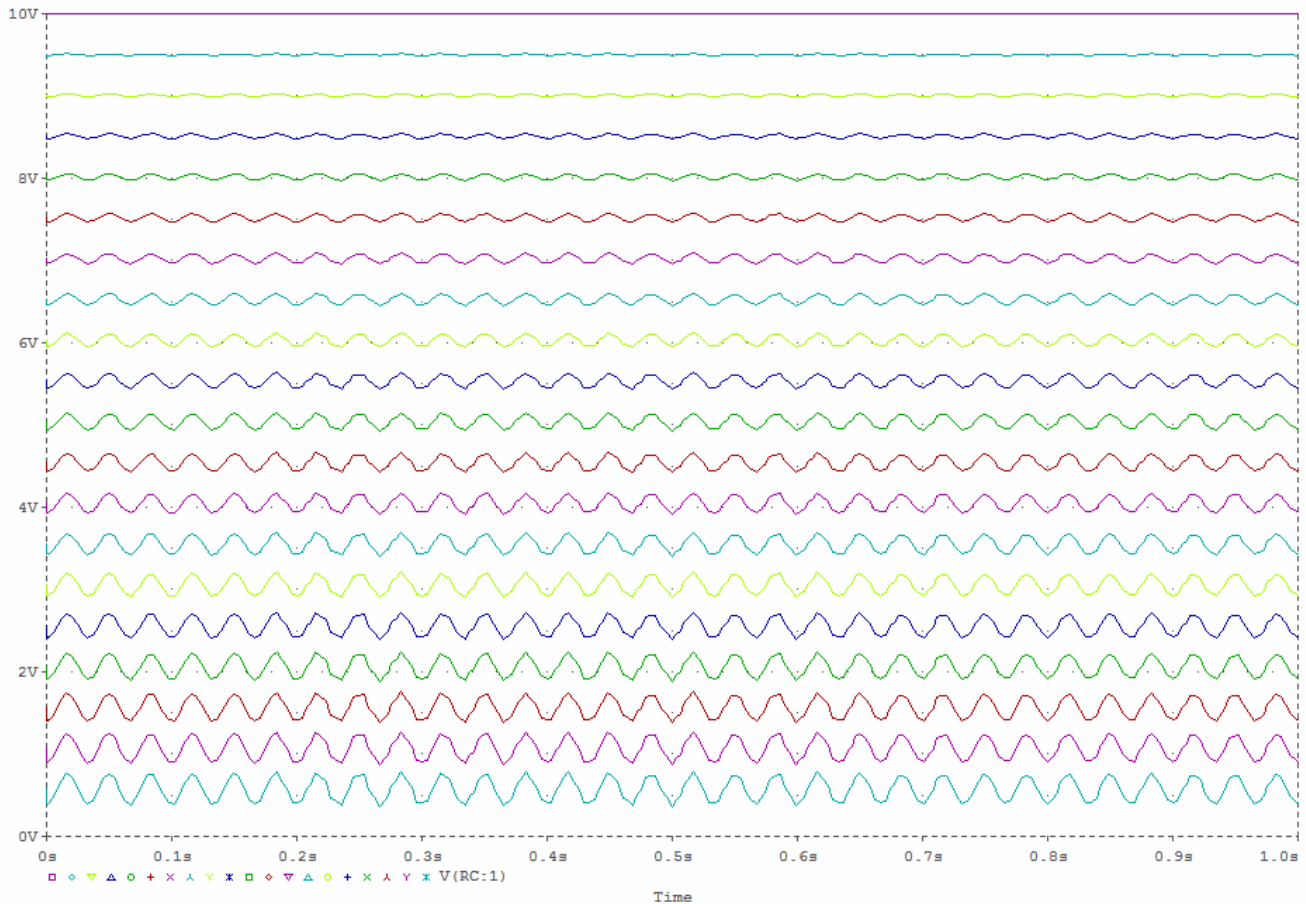
לכן הטרנזיסטור ברוויה.

בכל מקרה, אם היינו בוחרים  $V_{CE} = 0.3$  בתור נקודת עבודה, היינו משפרים את המעגל כך שלא יכנס לרוויה כאשר  $\beta$  משתנה.

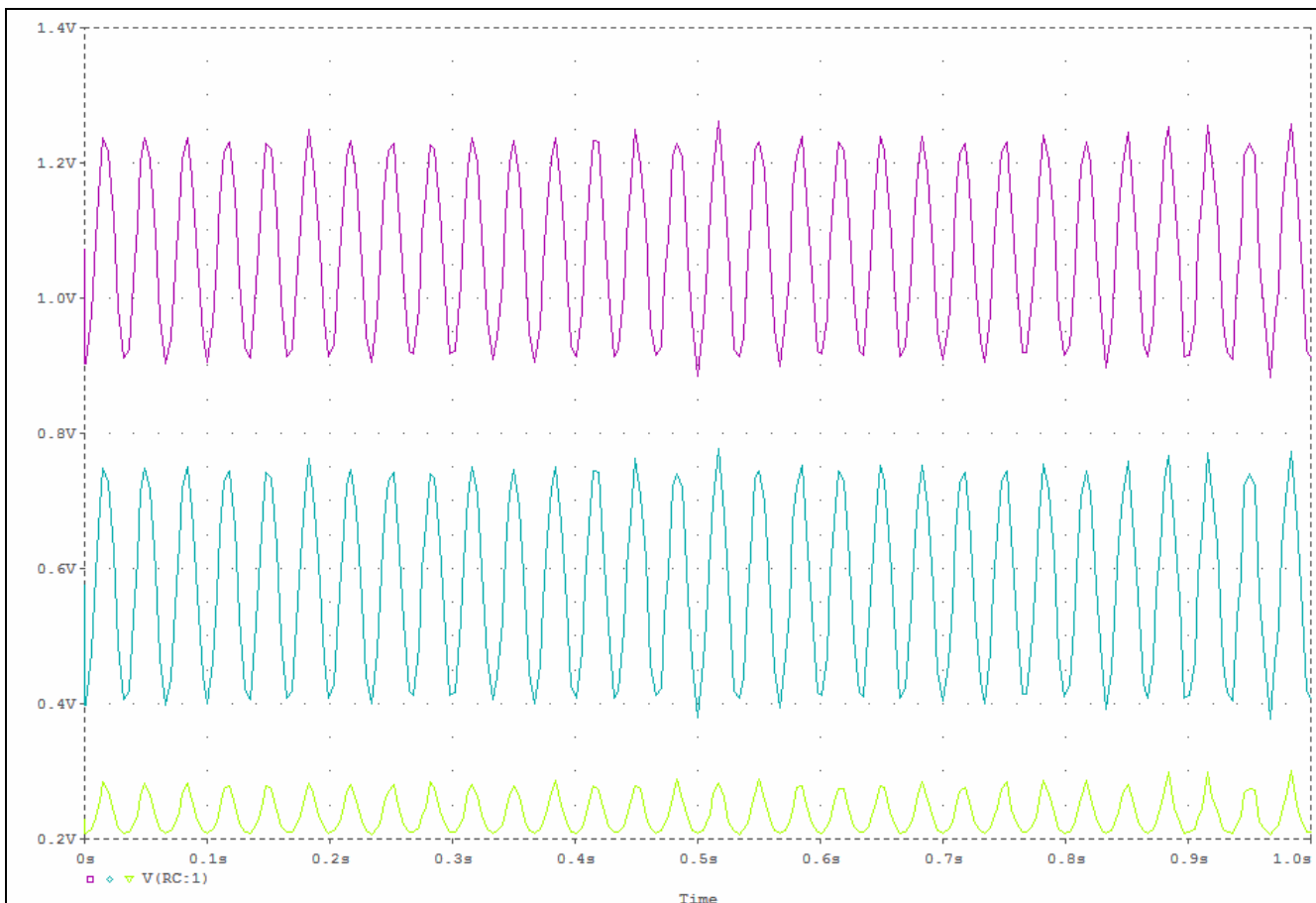
## פתרון לשאלה 3

סעיף א  
 המעגל:

תוצאות הסימולציה, עבור  $R_C = \{0, 0.5, 1, \dots, 10\} \cdot k[\Omega]$

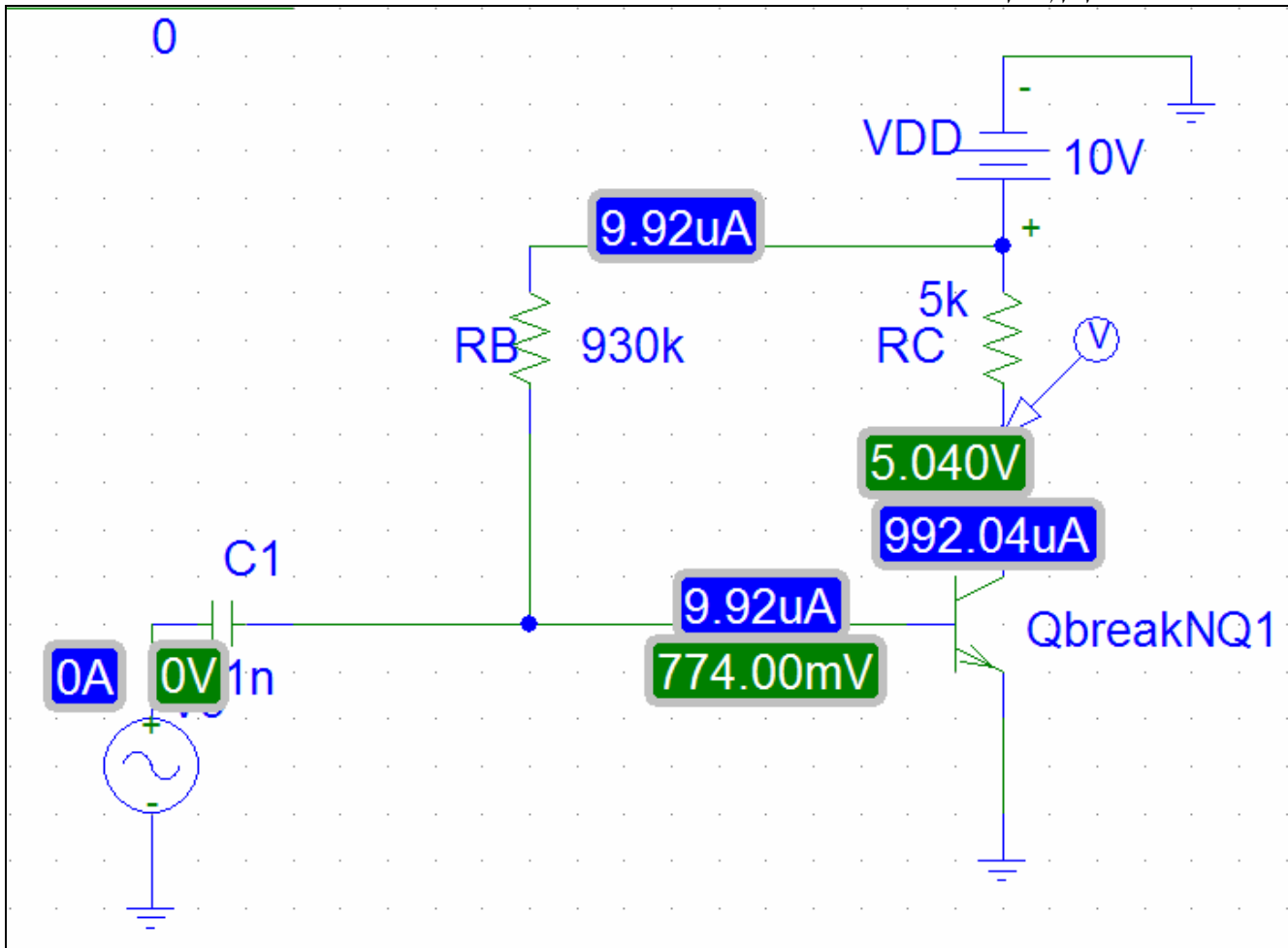


אנו רואים שהאמפליטודה הולכת ועולה עד  $R_C = 9.5k[\Omega]$ , ואז מייד דועכת עבור  $R_C = 10k[\Omega]$ , לכן התשובה המקורבת הראשונה היא  $R_C = 9.5k[\Omega]$ , שרחוקה  $0.3k$  מהפתרון האנליטי. תקריב עבור שלושת הסימולציות האחרונות:



ניתן לראות בבירור כי עבור  $R_C = 9.5k[\Omega]$  האמפליטודה גדולה בכ  $0.1[V]$  מאשר עבור  $R_C = 9k[\Omega]$ .

סעיף ב  
הפרמטרים לאות קטן, ונקודת העבודה:



קובץ out :

```

****BJT MODEL PARAMETERS
*****
      QbreakN
      NPN
      IS 100.000000E-18
      BF 100
      NF 1
      BR 1
      NR 1
      ***OPERATING POINT INFORMATION   TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

****BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME      Q_Q1
MODEL     QbreakN
IB        9.92E-06
IC        9.92E-04
VBE       7.74E-01
VBC       -4.27E+00
VCE       5.04E+00
BETADC    1.00E+02
GM        3.84E-02
RPI       2.61E+03
RX        0.00E+00
RO        1.00E+12
CBE       0.00E+00
CBC       0.00E+00
CJS       0.00E+00
BETAAC    1.00E+02
CBX       0.00E+00
FT        6.10E+17
    
```

סעיף ג

עבור  $\beta = 150$  מקבלים :

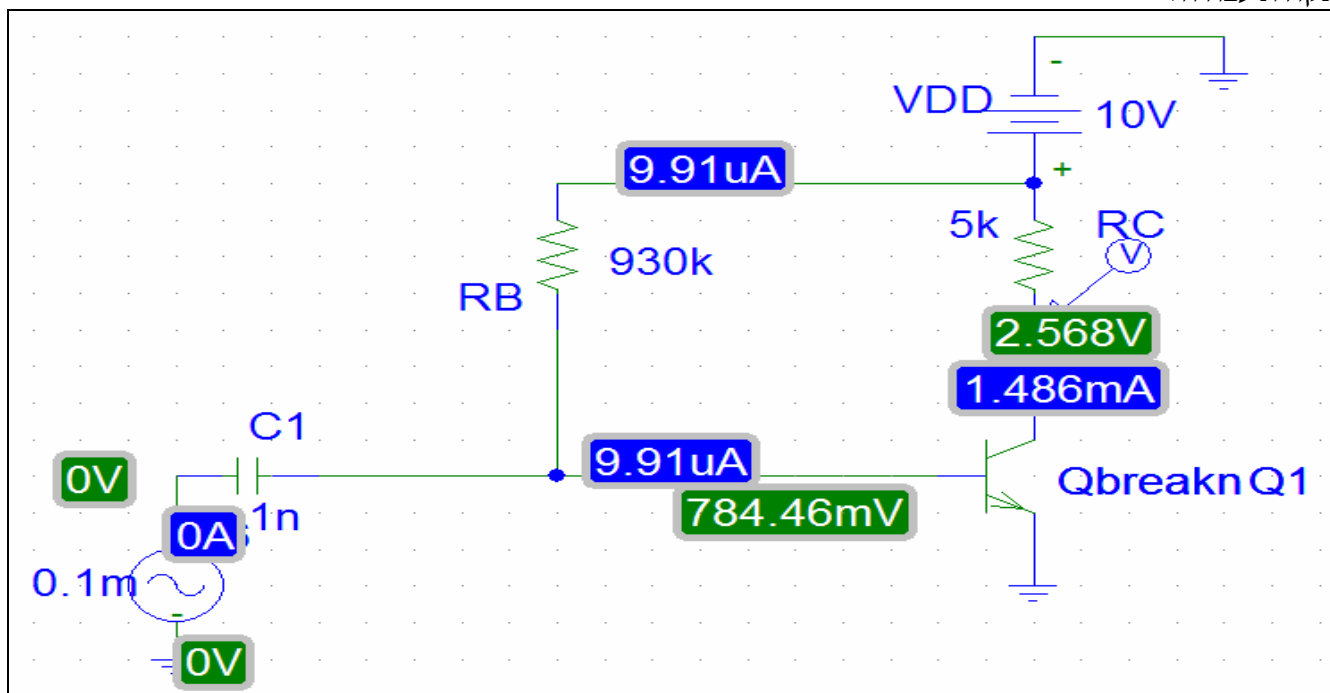
```

**** BJT MODEL PARAMETERS
*****
      Qbreakn
      NPN
      IS 100.000000E-18
      BF 150
      NF 1
      BR 1
      NR 1
      ***OPERATING POINT INFORMATION   TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

****BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME      Q_Q1
MODEL     Qbreakn
IB        9.91E-06
IC        1.49E-03
VBE       7.84E-01
VBC       -1.78E+00
VCE       2.57E+00
BETADC    1.50E+02
GM        5.75E-02
RPI       2.61E+03
RX        0.00E+00
RO        1.00E+12
CBE       0.00E+00
CBC       0.00E+00
CJS       0.00E+00
BETAAC    1.50E+02
CBX       0.00E+00
FT        9.15E+17
    
```

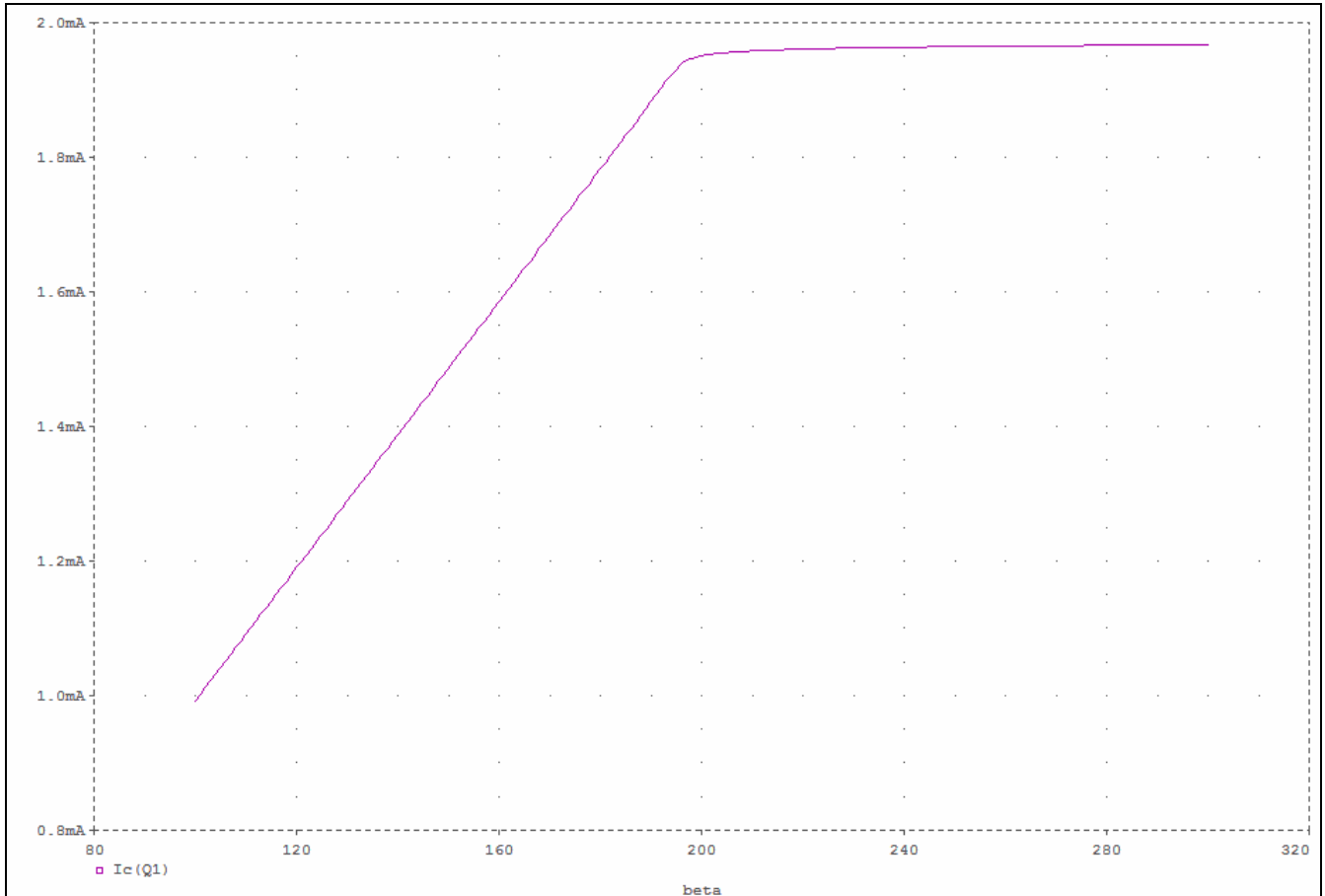
ונקודת עבודה :



אנו רואים כי החיסרון הוא הרגישות הגבוהה של  $I_C$  ל  $\beta$ , וזוהיא תכונה לא רצוייה ממגבר.

### סעיף ד

הגרף הבא מציג את  $I_C$  כפונקציה של  $\beta$ . אנו רואים כי החל מ  $\beta \sim 200$ , הטרנזיסטור נכנס לרוויה, והזרם קבוע.



השארנו את  $R_C = 5k[\Omega]$ , מכיוון שראינו שבסימולציה  $V_{BE,on}$  אינו  $0.7[V]$ , ולכן כניראה גם  $V_{CE,sat}$  שונה מ  $0.2[V]$ , ולכן  $R_C = 9.8k[\Omega]$  לא יתן לנו את התוצאה שקיבלנו באופן אנליטי (בה באיזור  $\beta = 100$  הטרנזיסטור נכנס לרוויה)

## גליון 9

פתרון לשאלה 1

סעיף א

נניח כי הטרנזיסטור ברוייה ונמצא את נקודת העבודה.

$$V_{GS} = V_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 2[V]$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 1m(2-1)^2 = 1m[A]$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 10 - 1m \cdot 3k = 7[V]$$

ואנו אכן במצב רווייה:

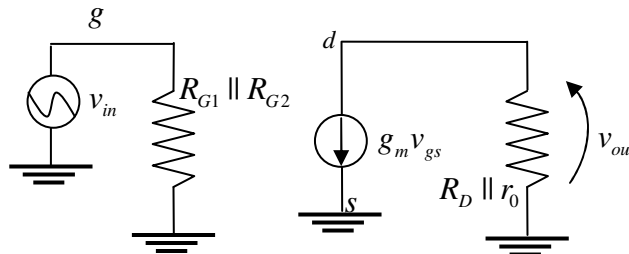
$$V_{GS} - V_T = 2 - 1 = 1 < 7 = V_{DS}$$

פרמטרי אות קטן:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = \frac{2 \cdot 1m}{2-1} = 2m[\text{S}]$$

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{2m} = 50k[\Omega]$$

סכמת התמורה לאות קטן:



חישוב הפרמטרים:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_m v_{gs} (R_D \parallel r_0)}{v_{in}} = -\frac{g_m v_{in} (R_D \parallel r_0)}{v_{in}} = -g_m (R_D \parallel r_0) \sim -g_m r_0$$

$$r_{out} = (R_D \parallel r_0)$$

$$r_{in} = R_{G1} \parallel R_{G2}$$

סעיף ב

מכיוון ש  $V_{GD,2} = 0$ , טרנזיסטור  $M_2$  יכול להיות רק במצב קטעון או רווייה. נניח כי הוא ברוייה, כמו גם  $M_1$ .

$$I_{D1} = I_{D2}$$

$$K(V_{GS1} - V_{T1})^2 = K(V_{GS2} - V_{T2})^2$$

$$V_{GS1} = V_{GS2}$$

$$V_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = V_{DD} - V_{S2}$$

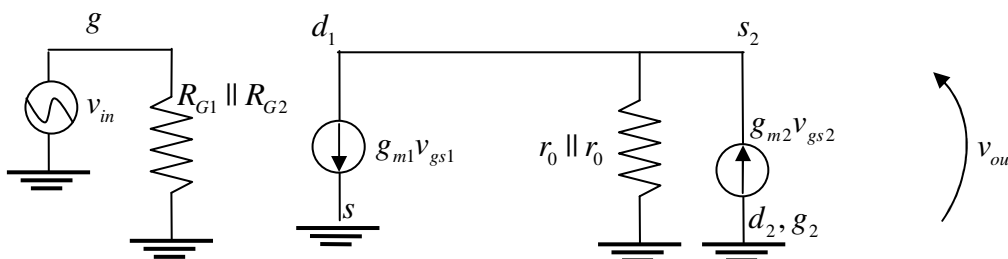
$$\Rightarrow V_{S2} = 10 - 2 = 8[V]$$

הזרם ישאר זהה למקרה הקודם, מכיוון ש  $V_{GS1}$  זהה:

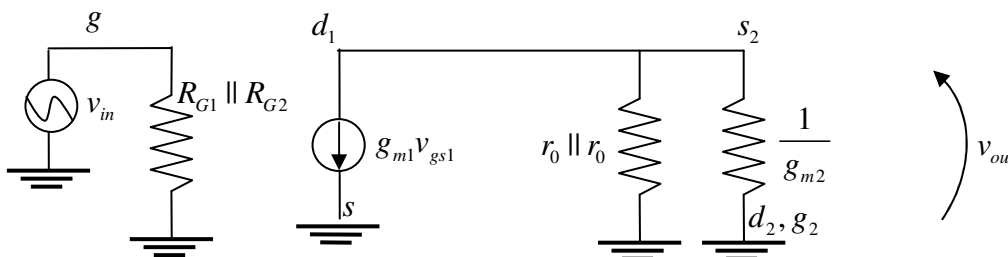
$$I_D = 1m[A]$$

זרם זה מאולץ גם על  $M_2$  ולכן  $M_2$  מוליך, ולכן  $M_2$  ברוייה.

סכמת התמורה לאות קטן :



ובאופן שקול



חישוב הפרמטרים :

$$\begin{cases} v_{gs1} = v_{in} \\ v_{out} = (g_{m2}v_{gs2} - g_{m1}v_{gs1})(r_0 \parallel r_0) = (-g_{m2}v_{out} - g_{m1}v_{gs1})(r_0 \parallel r_0) \\ \Rightarrow v_{out} = -\frac{g_{m1}v_{gs1}(r_0 \parallel r_0)}{1 + g_{m2}(r_0 \parallel r_0)} = -\frac{g_{m1}v_{in}(r_0 \parallel r_0)}{1 + g_{m2}(r_0 \parallel r_0)} \\ \Rightarrow A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{g_{m1}(r_0 \parallel r_0)}{1 + g_{m2}(r_0 \parallel r_0)} = -g_{m1} \frac{\frac{1}{g_{m2}}(r_0 \parallel r_0)}{\frac{1}{g_{m2}} + (r_0 \parallel r_0)} \sim -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -1 \\ r_{out} = \left(\frac{1}{g_{m2}} \parallel r_0 \parallel r_0\right) \end{cases}$$

סעיף ג

$M_2$  תמיד יוליד מכיוון ש  $V_{GS} = 0 > V_T$ .  
ניח כי שני הטרנזיסטורים ברוויה :

$$\begin{aligned} I_{D1} &= I_{D2} \\ K(V_{GS1} - V_{T1})^2(1 + \lambda V_{DS1}) &= K(V_{GS2} - V_{T2})^2(1 + \lambda V_{DS2}) \\ (2-1)^2(1 + \lambda V_{DS1}) &= (0 - (-1))^2(1 + \lambda V_{DS2}) \\ (1 + \lambda V_{DS1}) &= (1 + \lambda V_{DS2}) \\ V_{DS1} &= V_{DS2} \end{aligned}$$

וכך נחשב את נקודת העבודה :

$$V_{DS1} = V_{DS2} = \frac{V_{DD}}{2} = 5[V]$$

$$I_{D1} = I_{D2} = K(V_{GS2} - V_{T2})^2(1 + \lambda V_{DS2}) = 1m \cdot 1 \cdot (1 + 0.01 \cdot 5) = 1.05m[A]$$

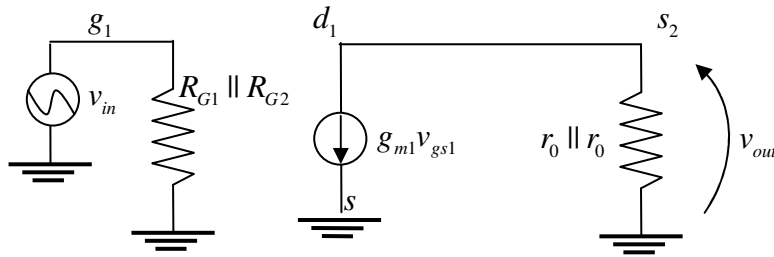
הפרמטרים לאות קטן :

$$g_{m1} = g_{m2} = \frac{2I_{DS}}{V_{GS} - V_T} = \frac{2 \cdot 1.05m}{1} = 2.1m[\text{S}]$$

$$r_{o1} = r_{o2} = r_0 = \frac{V_A}{I_D} = 95.23k[\Omega]$$



סכמת התמורה לאות קטן :



ולכן

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1} v_{gs} (r_0 \parallel r_0)}{v_{in}} = \frac{-g_{m1} v_{in} (r_0 \parallel r_0)}{v_{in}} = -g_{m1} (r_0 \parallel r_0) = -95m [\text{V}]$$

$$r_{out} = (r_0 \parallel r_0) = 47.5k [\Omega]$$

### סעיף ד

נניח כי קיים מתח ספק  $V_{DD}$  כמופיע בסעיפים הקודמים, המחובר ל  $Source$  של טרנזיסטורים  $M_2, M_3$ , למרות שלא שורטט כך בסעיף זה.

נחשב את הזרם בטרנזיסטור  $M_3$  :

$$I_{D3} = K_3 (V_{GS3} - V_{T3})^2 = K_3 (V_{D3} - V_{DD} - V_{T3})^2 = 0.2m (I_{D3} R_{REF} - 10 - (-1))^2$$

$$\Rightarrow I_D = 1m [A]$$

כאשר אנו מניחים מצבי רוויה בכל הטרנזיסטורים, ומכיוון ש  $V_{GS2} = V_{GS3}$ , הרי שכל הזרמים בכל הטרנזיסטורים שווים ל  $1m [A]$ .

חישוב  $V_{D2}$  :

$$I_{D2} = I_{D1}$$

$$K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 (1 + \lambda_2 V_{DS2}) = K_2 (V_{GS1} - V_{T1})^2 (1 + \lambda_1 V_{DS1})$$

$$0.2m (V_{DS3} - (-1))^2 (1 - 0.01 V_{DS2}) = 1m (2 - 1)^2 (1 + 0.01 V_{D1})$$

$$0.2m (-3.3 + 1)^2 (1 - 0.01 V_{D2}) = 1m (2 - 1)^2 (1 + 0.01 V_{D2})$$

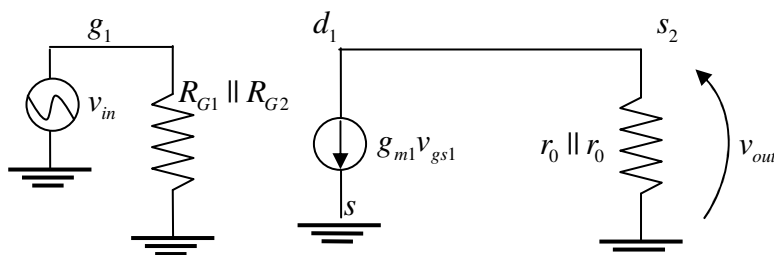
$$\Rightarrow V_{D2} = -1.62 [V]$$

הפרמטרים לאות קטן :

$$g_{m1} = g_{m2} = 2K_1 |V_{GS1} - V_{T1}| = 2m [\text{S}]$$

$$r_{01} = r_{02} = r_0 = \frac{V_A}{I_D} = 95.23k [\Omega]$$

באות קטן, מתחי השער של  $M_2, M_3$  הם אפס ולכן נקבל את הסכמה המוכרת :



ואז החישובים זהים לסעיף הקודם :

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1} v_{gs} (r_0 \parallel r_0)}{v_{in}} = \frac{-g_{m1} v_{in} (r_0 \parallel r_0)}{v_{in}} = -g_{m1} (r_0 \parallel r_0) = -95m [\text{V}]$$

$$r_{out} = (r_0 \parallel r_0) = 47.5k [\Omega]$$