



## Class Exercise 1 - Analog Electronic Circuits

Hagit Perets  
Eli Abramov  
Prof. Mor M. Peretz

The Center for Power Electronics and Mixed-Signal IC  
Department of Electrical and Computer Engineering  
Ben-Gurion University of the Negev, ISRAEL

Emails: [hagitpe@bgu.ac.il](mailto:hagitpe@bgu.ac.il)

Website: <http://www.ee.bgu.ac.il/~analog>



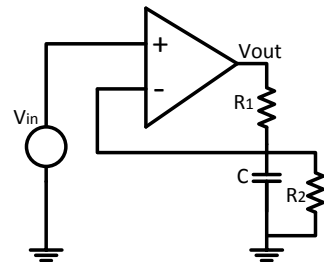
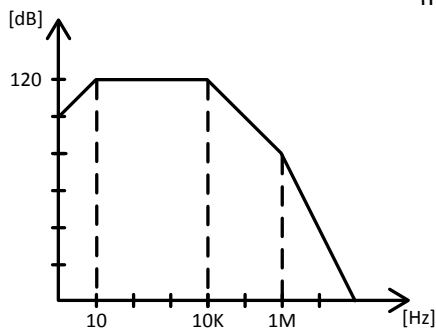
### שאלה 1

נתון המעגל הבא ופונקציית התמסורת  $\frac{V_o}{V_{in}}(f)$  כמשורטט:

א. מצא/י את  $A_{OL}(f)$  ואת ערכי הרכיבים  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C$  הדרושים לביצוע הניסוי.

ב. כעת נתון  $R_1 = 9K\Omega$ ,  $R_2 = 1K\Omega$ ,  $C = 1.77nF$ . חשבו/י את קבל הקיזוז

$C_x$  הדרוש בכדי להבטיח יציבות עבור  $\beta = 20dB$  מינימלית.





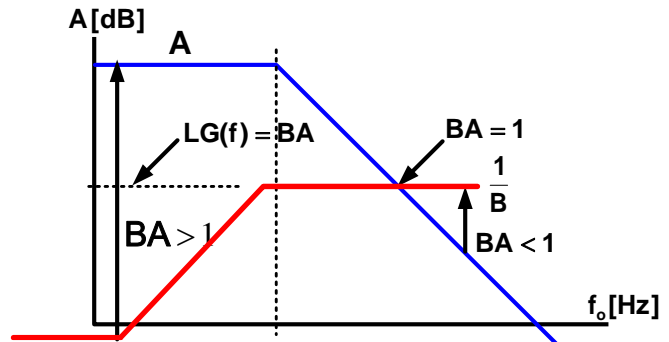
## פיתרון – סעיף א'

תזכורת:

$$A_{CL} = G \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$$

$$A_{CL} \Big|_{\beta A_{OL} \gg 1} = \frac{G}{\beta}$$

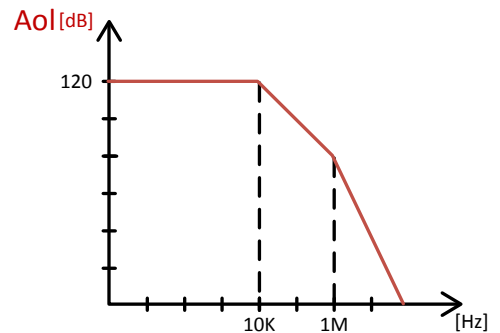
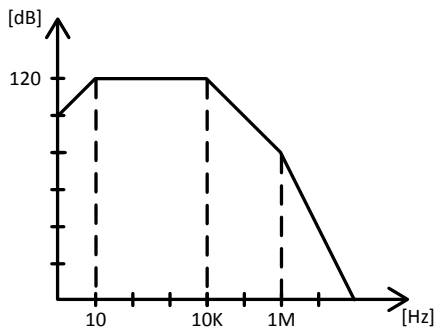
$$A_{CL} \Big|_{\beta A_{OL} \ll 1} = G A_{OL}$$



## פיתרון – סעיף א'

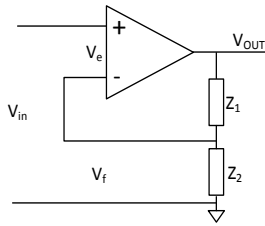
$$A_{OL} = \frac{A}{\left(1 + \frac{f}{f_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{f}{f_2}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 + \frac{f}{f_n}\right)}$$

$$A_{OL} = \frac{10^6}{\left(1 + \frac{f}{10^4}\right) \cdot \left(1 + \frac{f}{10^6}\right)}$$



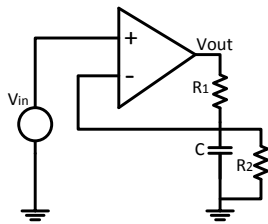


## פיתרון – סעיף א'



$$\beta = -\frac{V_e}{V_{out}} \Big|_{V_{in}=0} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

תזכורת:



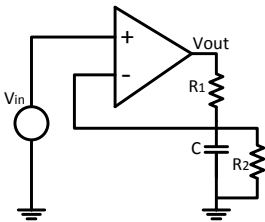
$$\beta = -\frac{V_e}{V_{out}} \Big|_{V_{in}=0} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2) \cdot (1 + sCR_1 \parallel R_2)}$$

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot (1 + sCR_1 \parallel R_2)$$

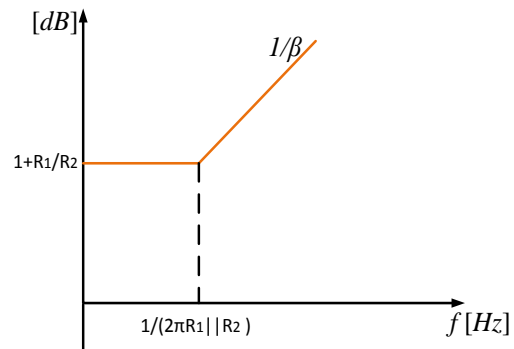
במעגל שלנו:



## פיתרון – סעיף א'

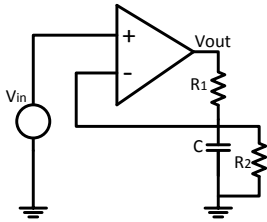


$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot (1 + sCR_1 \parallel R_2)$$





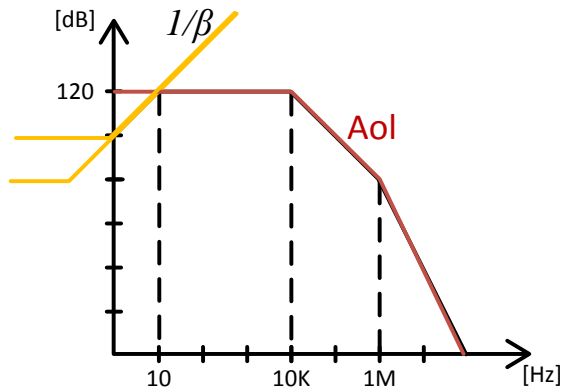
## פיתרון – סעיף א'



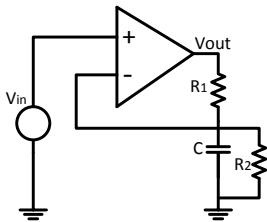
$$10^5 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{2\pi C R_1 \parallel R_2} = 1 \text{ Hz}$$

$$R_2 = 10[\Omega]$$

$$\Rightarrow R_1 = 1M[\Omega] \quad C = 15.9m[F]$$



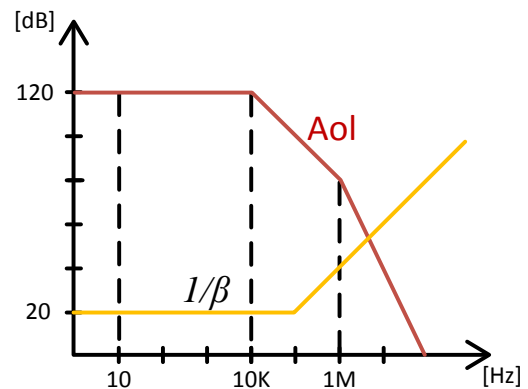
## פיתרון – סעיף ב'



ב. כעת נתון  $R_1 = 9K\Omega$ ,  $R_2 = 1K\Omega$ ,  $C = 1.77nF$ . חשבו את קבל הקיזום  $C_c$  הדרוש בכדי להבטיח יציבות עבור  $\beta = 20dB$  מינימלית.

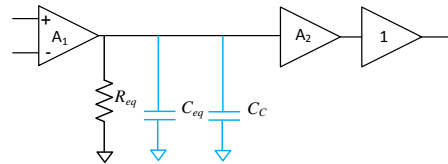
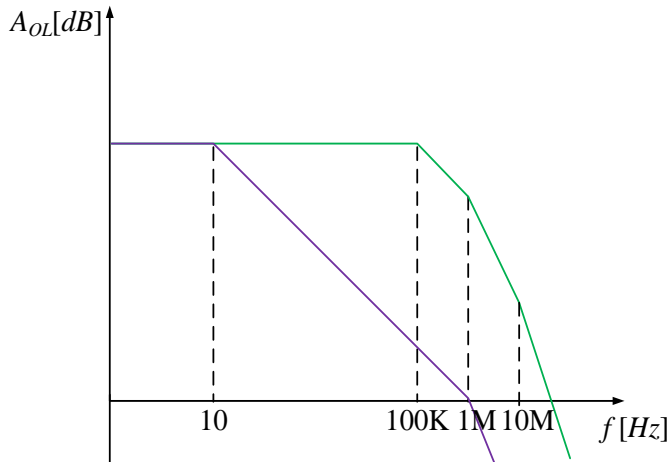
$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot (1 + sCR_1 \parallel R_2)$$

$$\frac{1}{\beta} = 10 \cdot \left(1 + j \frac{f}{100 \cdot 10^3}\right)$$





## תזכורת – קיזוז קוטב דומיננטי



$$C_{eq} = \frac{1}{2\pi R_e \cdot f_{1\text{ old}}}$$

$$C_{eq} + C_c = \frac{1}{2\pi R_e \cdot f_{1\text{ new}}}$$

$$\frac{C_{eq} + C_c}{C_{eq}} = \frac{f_{1\text{ old}}}{f_{1\text{ new}}} \Rightarrow C_c = 1000 \cdot C_{eq}$$



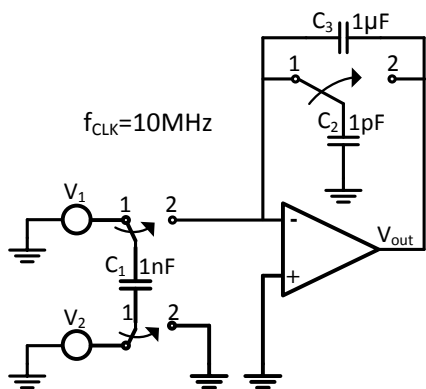
## שאלה 2

נתון ממיר קבילים מתמתגים הבא:

א. בהנחת מגבר אידיאלי שרטט מעגל שקול, וחשב את התמסורת  $\frac{V_o}{V_1 - V_2}(f)$  כולל ערכים.

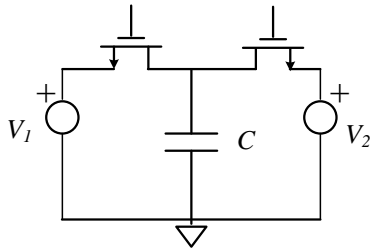
ב. בהנחת הגבר  $A_{OL} = \frac{10^5}{\left(1 + j\frac{f}{10}\right)\left(1 + j\frac{f}{1M}\right)}$  בחן את יציבות המעגל כולל

שרטוט וחשב  $\phi_m$ .





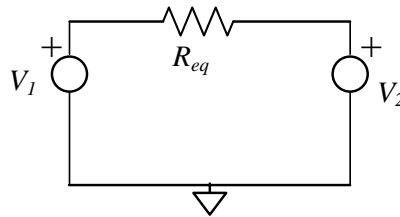
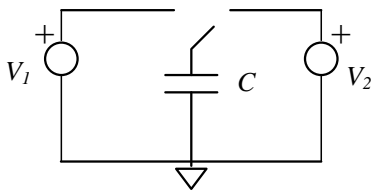
## תזכורת – קבלים מתמתגים



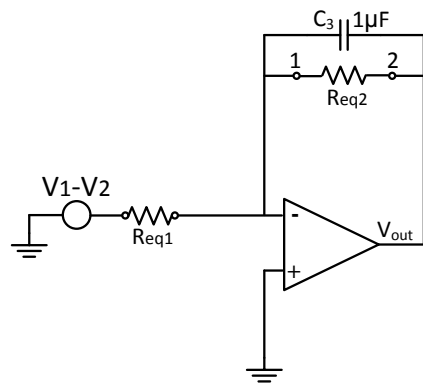
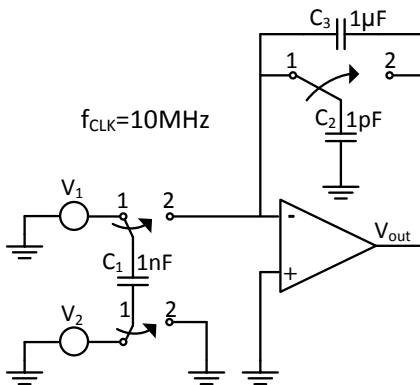
$$I_{avg} = f_{clk} \Delta Q$$

$$I_{avg} = C f_{clk} (V_1 - V_2)$$

$$R_{eq} = \frac{V_1 - V_2}{I_{avg}} = \frac{1}{C f_{clk}}$$



## פיתרון – סעיף א'



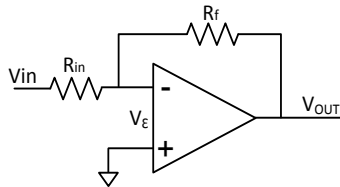
$$R_{eq1} = \frac{1}{1n \cdot 10M} = 100[\Omega]$$

$$R_{eq2} = \frac{1}{1p \cdot 10M} = 100K[\Omega]$$



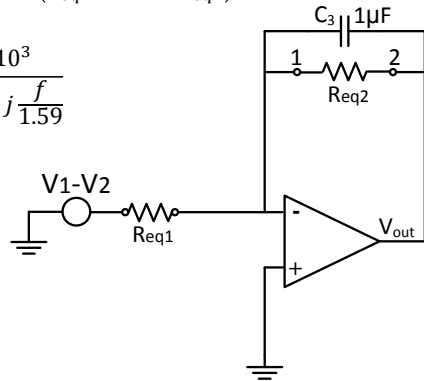
## פיתרון – סעיף א'

$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_f}{R_{in}} \right)$$



$$V_{out} = -(V_1 - V_2) \cdot \left( \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}} \cdot \frac{1}{1 + sCR_{eq2}} \right)$$

$$\frac{V_{out}}{(V_1 - V_2)} = - \frac{10^3}{1 + j \frac{f}{1.59}}$$



## פיתרון – סעיף ב'

ב. בהנחת הגבר  $A_{OL} = \frac{10^5}{\left(1 + j \frac{f}{10}\right) \left(1 + j \frac{f}{1M}\right)}$  בחן את יציבות המעגל כולל שרטוט וחשב  $\phi_m$ .

$$\beta = - \frac{V_e}{V_{out}} \Big|_{V_{in}=0} = \frac{R_{eq1}(1 + sCR_{eq2})}{(R_{eq1} + R_{eq2}) \cdot (1 + sCR_{eq1} \parallel R_{eq2})}$$

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}}\right) \cdot \frac{(1 + sCR_{eq1} \parallel R_{eq2})}{(1 + sCR_{eq2})}$$

$$\frac{1}{\beta} \Big|_{f \rightarrow 0} = 1 + \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}} = 10^3 \quad (60dB)$$

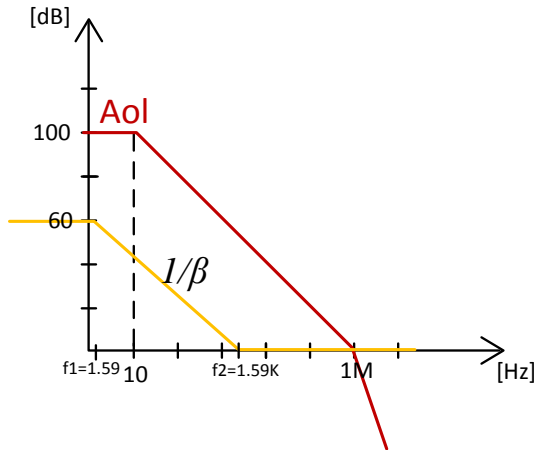
$$f_{pole} = \frac{1}{2\pi CR_{eq2}} = 1.59Hz$$

$$\frac{1}{\beta} \Big|_{f \rightarrow \infty} = \left(1 + \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}}\right) \cdot \frac{R_{eq1}}{R_{eq2}} = 1 \quad (0dB)$$

$$f_{zero} = \frac{1}{2\pi CR_{eq1} \parallel R_{eq2}} = 1.59KHz$$



## פיתרון – סעיף ב'



$$\varphi_m = 45^\circ$$

$$\left. \frac{1}{\beta} \right|_{f \rightarrow 0} = 1 + \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}} = 10^3 \quad (60dB)$$

$$\left. \frac{1}{\beta} \right|_{f \rightarrow \infty} = \left(1 + \frac{R_{eq2}}{R_{eq1}}\right) \cdot \frac{R_{eq1}}{R_{eq2}} = 1 \quad (0dB)$$

$$f_{pole} = \frac{1}{2\pi C R_{eq2}} = 1.59Hz$$

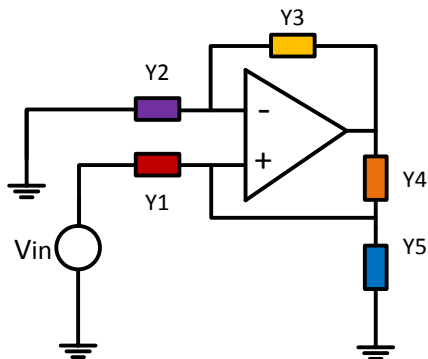
$$f_{zero} = \frac{1}{2\pi C R_{eq1} \parallel R_{eq2}} = 1.59KHz$$

$$A_{OL} = \frac{10^5}{\left(1 + j \frac{f}{10}\right) \left(1 + j \frac{f}{1M}\right)}$$



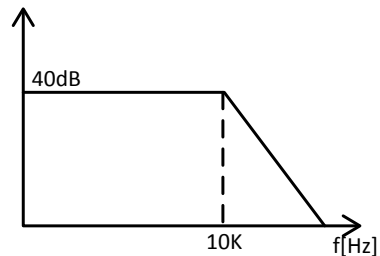
## שאלה 3

נתון המעגל המסונן הבא:



א. בטא/י את התמסורת  $\frac{V_o}{V_{in}}(f)$  כפונקציה של  $Y_1 - Y_5$

ב. מצא/י את אופי וערכי הרכיבים לקבלת המסנן הבא:

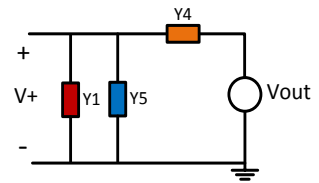
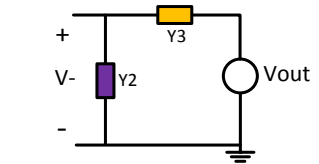
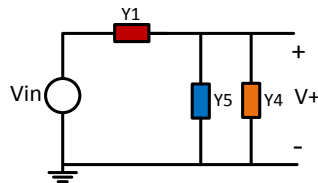
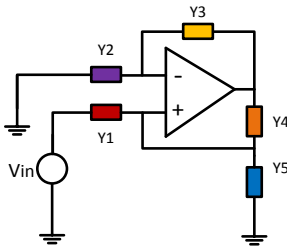




## פתרון – סעיף א'

$$(1) V_- = V_o \cdot \frac{Z_2}{Z_3 + Z_2} = V_o \cdot \frac{Y_3}{Y_3 + Y_2}$$

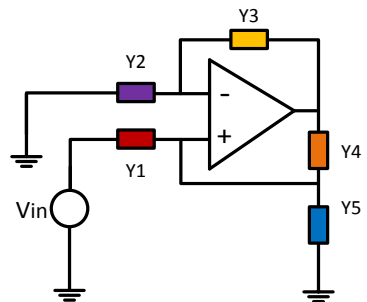
$$(2) V_+ = V_o \cdot \frac{Y_4}{Y_1 + Y_4 + Y_5} + V_{in} \cdot \frac{Y_1}{Y_1 + Y_4 + Y_5}$$



## פתרון – סעיף א'

$$V_- = V_+ \Rightarrow$$

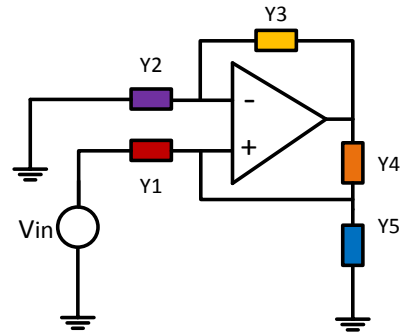
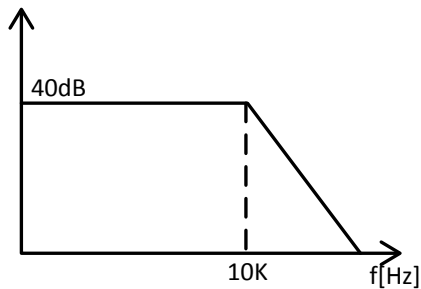
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Y_1 \cdot (Y_2 + Y_3)}{Y_3 \cdot Y_1 + Y_3 \cdot Y_5 - Y_2 \cdot Y_4}$$





## פתרון – סעיף ב'

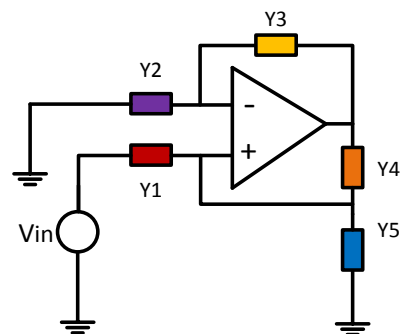
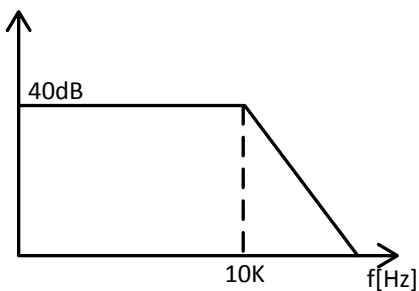
ב. מצא/י את אופי וערכי הרכיבים לקבלת המסנן הבא:



## פתרון – סעיף ב'

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{10^2}{1 + j \frac{f}{10^4}}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Y_1 \cdot (Y_2 + Y_3)}{Y_3 \cdot Y_1 + Y_3 \cdot Y_5 - Y_2 \cdot Y_4}$$





## פתרון – סעיף ב'

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Y_1 \cdot (Y_2 + Y_3)}{Y_3 \cdot Y_1 + Y_3 \cdot Y_5 - Y_2 \cdot Y_4}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Y_1 \cdot (Y_2 + Y_3)}{Y_3 \cdot Y_1 - Y_2 \cdot Y_4} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{2\pi f C_5 Y_3}{Y_3 \cdot Y_1 - Y_2 \cdot Y_4}}$$

$$(1) \quad \frac{Y_1 \cdot (Y_2 + Y_3)}{Y_3 \cdot Y_1 - Y_2 \cdot Y_4} = 100$$

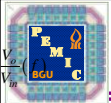
$$(2) \quad \frac{2\pi f C_5 Y_3}{Y_3 \cdot Y_1 - Y_2 \cdot Y_4} = \frac{1}{10^4}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{10^2}{1 + j \frac{f}{10^4}}$$

$$Y_1 = Y_2 = Y_4 = Y, \quad R = 100[\Omega]$$

$$R_3 = 0.98 \cdot R = 98[\Omega]$$

$$C_5 = 3.18n[F]$$



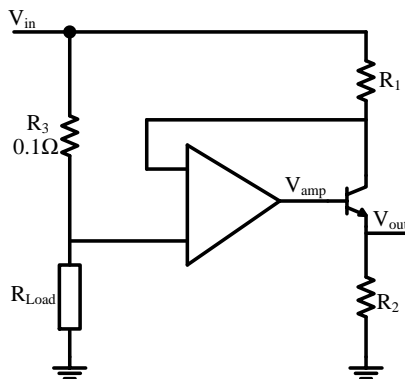
## שאלה 4

נתון המעגל הבא:

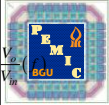
א. סמן את קוטביות המגבר.

ב. חשב  $\frac{V_o}{V_{in}}(f)$  ובחן את יציבות המעגל

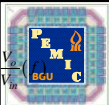
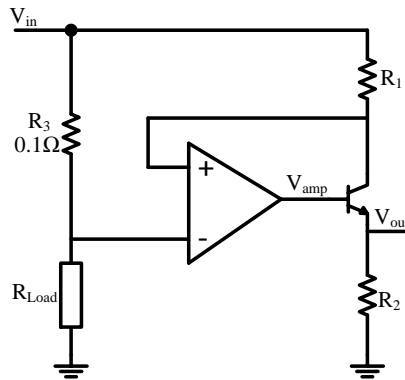
ג. הצע אפשרות ליצוב המערכת



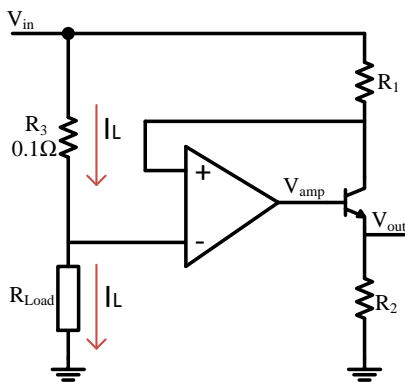
$$A_{OL} = \frac{10^5}{\left(1 + j \frac{f}{10}\right) \left(1 + j \frac{f}{100}\right)}$$



## פיתרון – סעיף א'



## פיתרון – סעיף ב'



$$V_+ = V_- \Rightarrow V_{R1} = V_{R3}$$

$$I_L R_3 = I_{R1} R_1$$

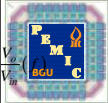
נתבונן בטרנזיסטור BJT:

$$I_E \approx I_C = I_{R1}$$

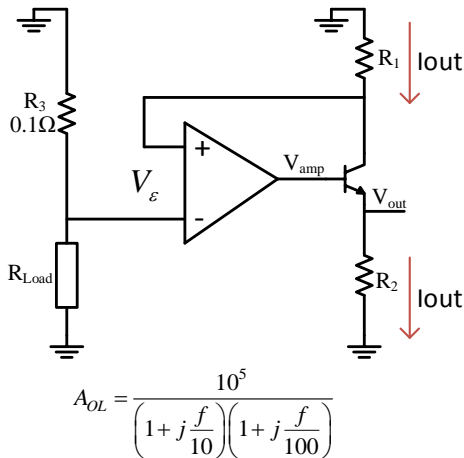
$$V_{out} = I_{R1} R_2 = I_L \frac{R_3}{R_1} R_2 ; I_L = \frac{V_{in}}{R_3 + R_L}$$

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{1}{R_3 + R_L} \right) \frac{R_3 R_2}{R_1}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_3 R_2}{(R_3 + R_L) R_1}$$



## פיתרון – סעיף ב'



$$A_{OL} ; \beta$$

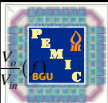
$$\beta = -\frac{V_{\varepsilon}}{V_{amp}} ; S_{in} = 0 \quad \beta = -\frac{V_{\varepsilon}}{V_{amp}} = -\frac{V_{+}}{V_{amp}}$$

למען פשטות הניתוח נזניח את מפל המתח  $V_{BE}$  :

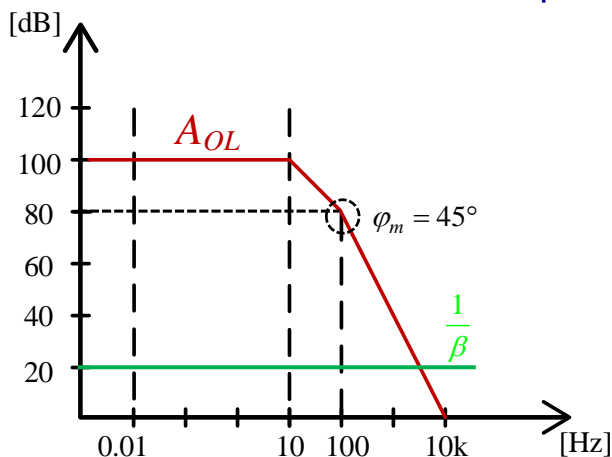
$$V_{out} \approx V_{amp}$$

$$\begin{cases} I_{out} = \frac{V_{amp}}{R_2} \\ I_{out} = I_{R1} = -\frac{V_{R1}}{R_1} = -\frac{V_{\varepsilon}}{R_1} \end{cases} \Rightarrow \frac{V_{\varepsilon}}{V_{amp}} = \frac{R_1}{R_2} = \beta$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{R_2}{R_1}$$



## פיתרון – סעיף ג'



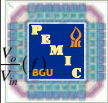
$$A_{OL} = \frac{10^5}{\left(1 + j \frac{f}{10}\right) \left(1 + j \frac{f}{100}\right)}$$

על מנת להמחיש את התמסורת בצורה מספרית, נבחר  
בצורה שרירותית:  $R_1=100\Omega$ ,  $R_2=1k\Omega$

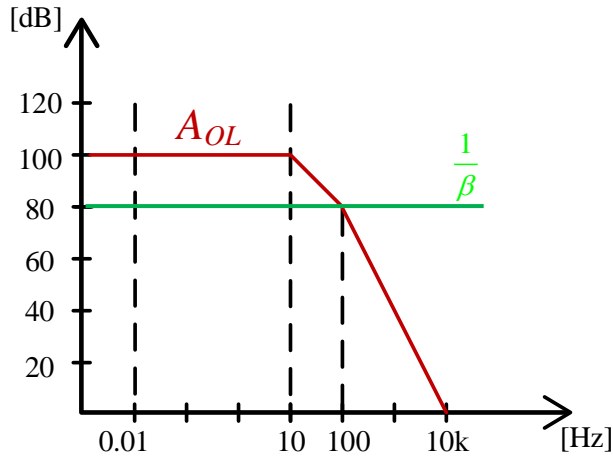
$$\frac{1}{\beta} = 20dB$$

$$\frac{R_2}{R_1} < 80dB$$

$$ROC = 40dB/dec$$

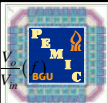


## פיתרון – סעיף ג'

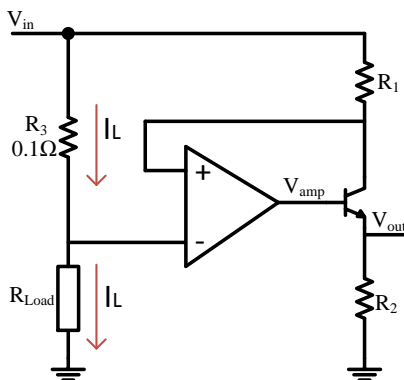


$$\begin{cases} \frac{R_2}{R_1} \geq 80dB \geq 10,000 \\ R_2 \geq 10k \cdot R_1 \end{cases}$$

$$R_1 = 10\Omega \rightarrow R_2 = 100k\Omega$$



## פיתרון – שימוש פרקטי במבנה המעגל

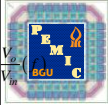


$$\begin{cases} V_{out} = V_{in} \left( \frac{1}{R_3 + R_L} \right) \frac{R_3 R_2}{R_1} \\ I_L = V_{in} \frac{1}{R_3 + R_L} \end{cases} \quad \frac{1}{\beta} = \frac{R_2}{R_1}$$

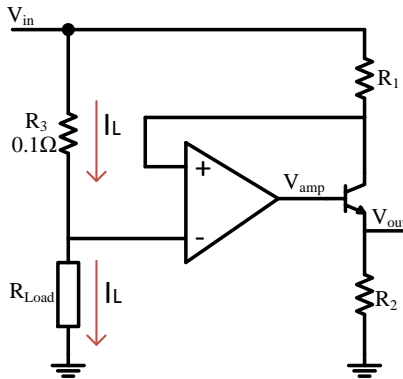
$$V_{out} = I_{R1} R_2 = I_L \frac{R_3}{R_1} R_2$$

למעשה קיבלנו תלות של תמסורת זרם-למתח, כלומר ניתן למדוד זרם, ולגרום למערכת להגיב בהתאם.

**במילים אחרות קיבלנו חיישן זרם**



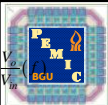
## פיתרון – שימוש פרקטי במבנה המעגל



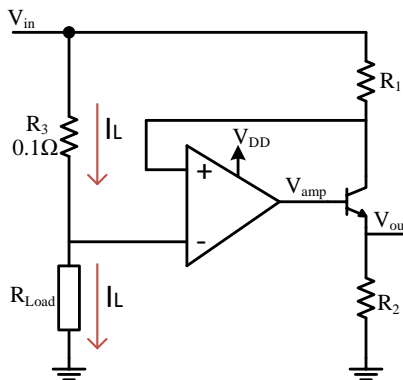
$$\begin{cases} V_{out} = V_{in} \left( \frac{1}{R_3 + R_L} \right) \frac{R_3 R_2}{R_1} \\ I_L = V_{in} \frac{1}{R_3 + R_L} \end{cases} \quad \frac{1}{\beta} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_{out} = I_{R1} R_2 = I_L \frac{R_3}{R_1} R_2$$

למעשה קיבלנו תמסורת של זרם-למתח, כלומר ניתן למדוד זרם, ולגרום למערכת להגיב בהתאם.  
**במילים אחרות קיבלנו חיישן זרם**



## פיתרון – התחום דינאמי של המערכת



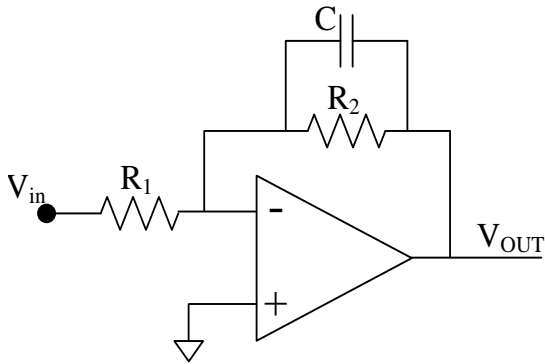
1. ראינו את המגבלה של סגירת החוג בהינתן ה- $A_{OL}$
2. מתח מוצא המגבר מוגבל – מגבר טיפוסי עם הזנה של 5V אז בהתחשב במפל מתחים על רכיבים בתוך המגבר (Vth, Vsat)  $V_{DD} - 1.5V$
3. טרנז' BJT צורך עוד 0.7 וולט בערך כלומר, התחום הסופי במוצא הוא

$$V_{amp} = V_{DD} - 1.5 - 0.7 = 2.8V$$

4. בהנחה שR3 ביחס ל- $R_{load}$  אז המתח במוצא הוא ביחס ישיר לזרם הנמדד, כלומר הזרם המקסימלי שניתן למדוד הוא 2.8A
5. כלומר, המתח שמתפתח באזור החישה לא יעלה על 2.8V
6. בלי קשר לחישה, יש תחום מוגדר של מתחי כניסה סופיים למגבר כדי לא לשרוף אותו



## שאלה 5



נתון המעגל הבא:

$C=160\text{pF}$  ;  $R1=R2=10\text{k}\Omega$   
 המגבר שרת בעל  $\text{Slew-Rate}=0.5\text{V}/\mu\text{s}$ , וכול שאר המאפיינים  
 הינם כשל מגבר אידיאלי

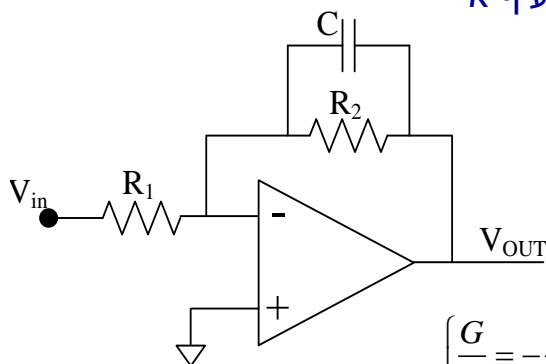
א. חשב ושרטט את אות המוצא עבור כניסת מדרגה של  $10\text{mV}$  ו-  
 $10\text{V}$

ב. מצא את האמפליטודה המקסימלית בכניסה שעבורה אות סינוסי  
 בתדר של  $1\text{kHz}$  יוגבר ללא עיוותים

ג. מצא את האמפליטודה המקסימלית בכניסה שעבורה אות סינוסי  
 בתדר של  $100\text{kHz}$  יוגבר ללא עיוותים



## שאלה 5- פתרון סעיף א'



משוב שלילי לכן:

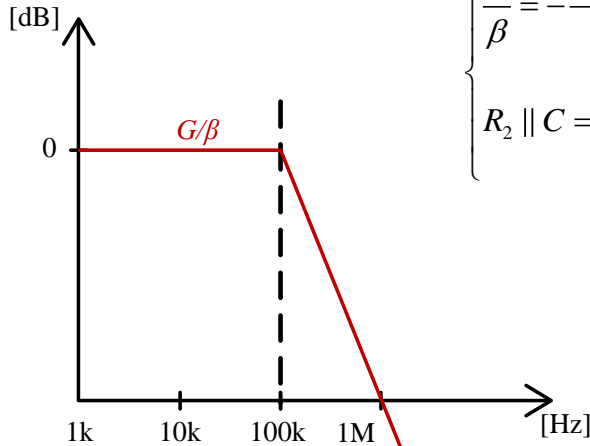
$$A_{OL} = \infty$$

$$A_{CL} = \frac{G}{\beta}$$

$$\begin{cases} \frac{G}{\beta} = -\frac{R_2 \parallel C}{R_1} \\ R_2 \parallel C = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{sC}}{R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{R_2}{1 + sCR_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{G}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1}{1 + sCR_2} \right)$$



## שאלה 5- פתרון סעיף א'



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G}{\beta} = -\frac{R_2 \parallel C}{R_1} \\ R_2 \parallel C = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{sC}}{R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{R_2}{1 + sCR_2} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{G}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1}{1 + sCR_2} \right)$$

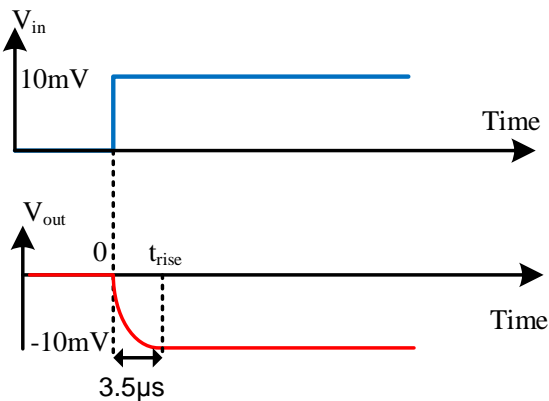
בתדרים הנמוכים -

$$\frac{G}{\beta} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 20 \log \left( \frac{10k\Omega}{10k\Omega} \right) = 0dB$$

$$\frac{G}{\beta} = \frac{-1}{1 + j\omega R_2 C} = \frac{-1}{1 + \frac{f}{2\pi R_2 C}} = \frac{-1}{1 + \frac{f}{10^5}}$$



## שאלה 5- פתרון סעיף א'



$$V_{\max} = \frac{S \cdot R}{\omega} = \frac{S \cdot R}{2\pi f}$$

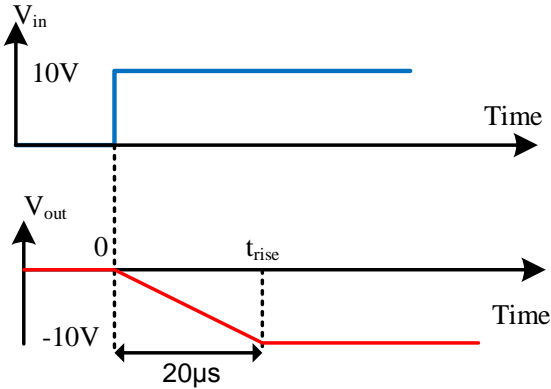
$$\Delta V_{\max} = S \cdot R \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta V_{\max}}{S \cdot R}$$

$$\Delta t = \frac{10mV}{0.5V / \mu s} = 20ns$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{out}(t) = \Delta V_{out} \left( 1 - e^{-t(2\pi f_0)} \right) \\ t_{rise} = \frac{0.35}{f_0} \end{array} \right. \Rightarrow t_{rise} = 3.5 \mu s$$



## שאלה 5- פתרון סעיף ב'



$$\Delta V_{\max} = S.R \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta V_{\max}}{S.R}$$

$$\Delta t = \frac{10V}{0.5V / \mu s} = 20\mu s$$

כלומר השיפוע במהלך השינוי הוא  $0.5V/\mu s$



## שאלה 5- פתרון סעיף ג'

$$\begin{cases} V_{out} = V_{\max} \sin \omega t \\ \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = V_{\max} \cos \omega t \end{cases}$$



$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = V_{\max} \cos \omega t \quad ; \quad t=0$$

$$V_{\max} = \frac{S.R}{\omega} = \frac{S.R}{2\pi f}$$

$$f = 1kHz$$

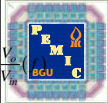
$$V_{\max} = \frac{0.5 \cdot 10^6 V / s}{2\pi \cdot 1kHz} \approx 80V > V_{DD}$$

קיבלנו אות גדול מאוד, ולכן עבור המתים של סעיפים א' ו-ב' אין בעיה, אבל ברור לנו שהמגבלה נובעת ממתח ספק המגבר ולכן ניתן באמת לעשות שינויים של 80 וולט

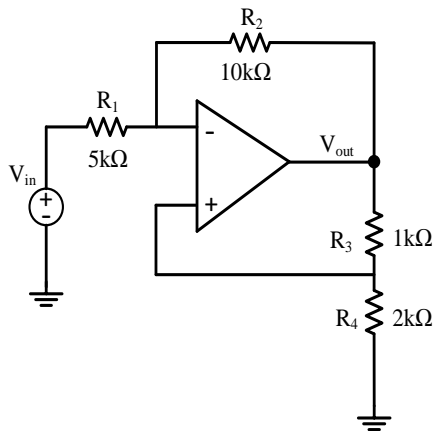
$$f = 100kHz$$

$$V_{\max} = \frac{0.5 \cdot 10^6 V / s}{2\pi \cdot 100kHz} \approx 0.8V$$

קיבלנו מגבלה של אמפליטודה מקסימלית של 0.8 וולט



## שאלה 6

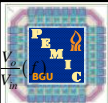


נתון המעגל הבא:

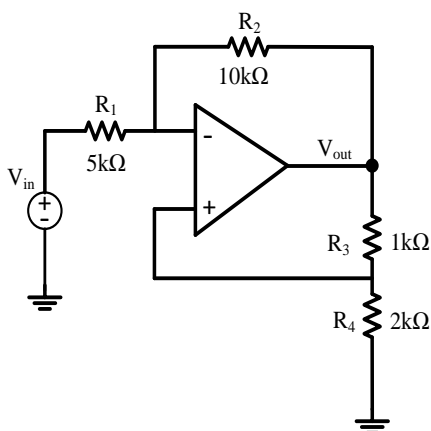
$$\text{א. חשב } \frac{V_o}{V_{in}}$$

ב. חשב את שגיאת ה-DC בגין זרמי ה-Bias כאשר  $I_{B^-} = I_{B^+} = 10\mu\text{A}$

ג. מה היתרון של מבנה המגבר עם רשת המשוב?



## שאלה 6 – פתרון סעיף א'



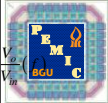
$$(1) V^+ = \frac{V_{out} R_4}{R_3 + R_4}$$

$$(2) I_{R1} = I_{R2} \Rightarrow \frac{V_{in} - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_{out}}{R_2}$$

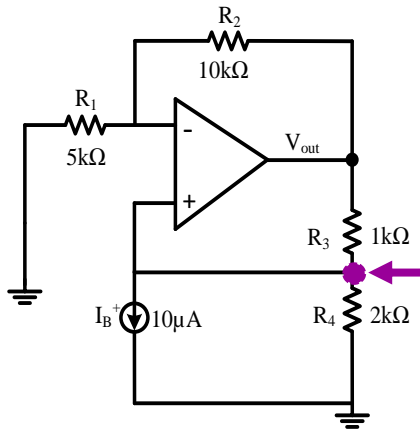
מאחר ויש משוב אז  $V^+ = V^-$   
נציב את (1) ב-(2):

$$\frac{V_{in} - V_{out} \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{R_1} = \frac{V_{out} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - V_{out}}{R_2}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_2 R_4 - R_1 R_3} = \frac{30k\Omega}{15k\Omega} = 2$$



## שאלה 6 – פתרון סעיף ב'



$$V^+ \equiv V^- = V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

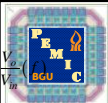
KCL בצומת של R3 ו-R4

$$I_B^+ = -(I_{R3} + I_{R4}) = -\frac{V^+ - V_{out}}{R_3} - \frac{V^+}{R_4} =$$

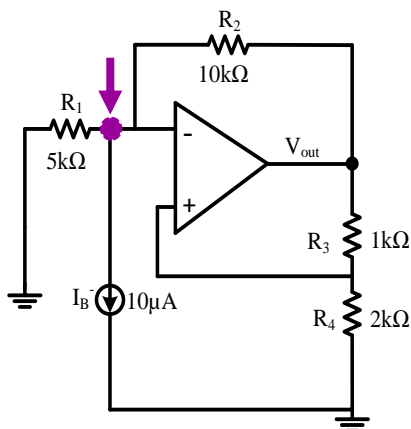
$$= -V_{out} \left( \frac{R_1}{R_4(R_1 + R_2)} + \frac{R_1}{R_3(R_1 + R_2)} - \frac{R_1}{R_3} \right) =$$

$$I_B^+ = -V_{out} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_3 R_4 (R_1 + R_2)}$$

$$\Rightarrow V_{out}(I_B^+) = \frac{R_3 R_4 (R_1 + R_2)}{R_1 R_3 - R_2 R_4} I_B^+ = 2000 I_B^+ = 20mV$$



## שאלה 6 – פתרון סעיף ב'



$$V^+ \equiv V^- = V_{out} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

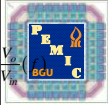
עבור  $I_B^-$  המעגל השקול הוא כפי שמצויר, נבצע KCL בצומת של R1 ו-R2:

$$I_B^- = -(I_{R1} + I_{R2}) = -\frac{V^-}{R_1} - \frac{V^- - V_{out}}{R_2} =$$

$$= -V_{out} \left( \frac{R_4}{R_1(R_3 + R_4)} + \frac{R_4}{R_2(R_3 + R_4)} - \frac{1}{R_2} \right) =$$

$$I_B^- = -V_{out} \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4)}$$

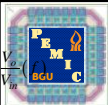
$$\Rightarrow V_{out}(I_B^-) = -\frac{R_1 R_2 (R_3 + R_4)}{R_2 R_4 - R_1 R_3} I_B^- = 10^4 I_B^- = -100mV$$



## שאלה 6 – פתרון סעיף ב'

מכאן, אם נסכום את ההשפעה של  $I_B^+$  ו- $I_B^-$  נקבל את סך שגיאת ה-DC בגין זרמי ההיסט:

$$V_{out}(I_B) = V_{out}(I_B^+) + V_{out}(I_B^-) = 20mV - 100mV = 80mV$$



## שאלה 6 – פתרון סעיף ג'

- ניתן לראות שהמערכת בנויה משני משוברים למעשה
- במהלך הניתוח של זרמי ההיסט ראינו קשר הדוק בין R3 ו-R4, ומנגד בין R1 ו-R2
- לכן:
- אם התנאי הבא מתקיים – אז המגבר מתפקד **כמגבר לא מהפך**, מאחר והחוג הדומיננטי הוא בין R3 ו-R4

$$\frac{R_4}{R_3} > \frac{R_1}{R_2}$$

- אם התנאי לא מתקיים – אז המגבר מתפקד **כמגבר מהפך**, מאחר והחוג הדומיננטי הוא בין R1 ו-R2
- קיימת דרגת חופש בין מבנה המשוברים לבין קיזוז סה"כ זרמי ההיסט במערכת