

## תוכן העניינים:

3	פרק 2
3	טרנזיסטור ביפולרי
3	יסודות הטרנזיסטור הביפולרי:
3	סיכום כללי:
8	שאלות:
10	תשובות סופיות:
11	נקודת עבודה של טרנזיסטור:
11	סיכום כללי:
11	שאלות:
13	תשובות סופיות:
14	מודל אות קטן:
14	סיכום כללי:
18	שאלות:
23	תשובות סופיות:
24	מעגלים לוגים עם טרנזיסטורים:
24	סיכום כללי:
25	שאלות:
26	תשובות סופיות:

## הקדמה כללית:

תלמידים יקרים!

פרק הטרנזיסטור הביפולרי כולל בתוכו את כל החומר הנלמד באופן המותאם אישית למוסד הלימוד שלכם והחוג בו אתם לומדים.

הפרק בנוי מנושאים, שכל אחד פותח בסיכום ולאחריו שאלות תרגול ברמה עולה. את ההסברים לכל תכני הסיכומים ניתן למצוא באתר GOOL.CO.IL בפירוט והרחבה. בחלק מהנושאים בחוברת זו, הסיכום התיאורטי כולל דוגמאות. אלו נפתרות בהרחבה בקורס המתקשב באתר GOOL כחלק מהלימוד התיאורטי.

בהצלחה בלמידה ובבחינות!

צוות האתר גול.

## פרק 2

# טרנזיסטור ביפולרי

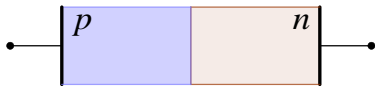
## יסודות הטרנזיסטור הביפולרי:

סיכום כללי:

מוטיבציה כללית:

נרצה למצוא דרך להגביר אותות חשמליים שונים.

תזכורת וחזרה - מצבי פעולה של דיודה לא-אידיאלית:



- ממתח קדמי (מצב הולכה):  
מפל המתח על הדיודה מקיים:  $v_p > v_n + v_D$
- ממתח אחורי (מצב קיטעון):  
מפל המתח על הדיודה מקיים:  $v_p < v_n + v_D$

- זרם בדיודה:  

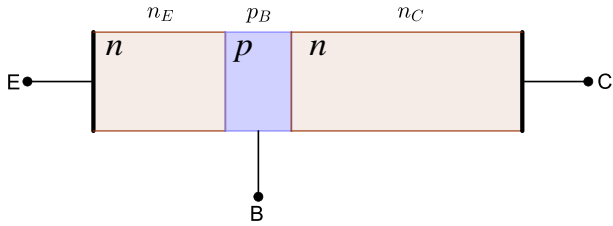
$$I_D = \begin{cases} 0 & U_D \leq v_D \\ \frac{1}{r_D} \cdot (U_D - v_D) & U_D > v_D \end{cases}$$

- זרם בדיודה מעשית בממתח קדמי  $U_D$  נתון:  $I = I_0 \cdot \exp\left\{\frac{U_D}{\eta \cdot v_{TH}}\right\}$

טרנזיסטור בי-פולרי (Bipolar Junction Transistor - BJT):

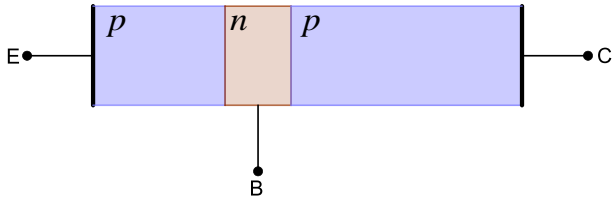
התקן המורכב משלושה אזורי מוליכים למחצה המסוממים לסירוגין כ-NPN או כ-PNP.

**תנאים לקיום פעילות של טרנזיסטור (עבור NPN):**



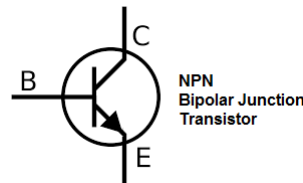
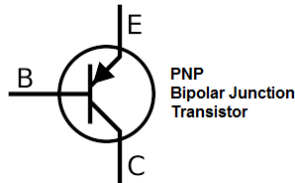
- יחס ריכוזים:  $n_E^+ \gg p_B$ .
- עובי החומר p צריך להיות קטן מספיק.

**סימוני ההדקים (טרמינלים):**

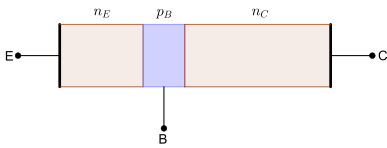


- פולט (Emitter) יסומן ב-E.
- בסיס (Base) יסומן ב-B.
- קולט (Collector) יסומן ב-C.

**סמל חשמלי:**



**זרמים בטרנזיסטור:**



- קשר בין הזרמים:  $I_E = I_B + I_C$ .
- קשר בין הזרם הנכנס לזרם היוצא:  $I_C = \alpha I_E$  כאשר נרצה  $\alpha \rightarrow 1$ .
- הגבר הזרם:  $I_C = \beta I_B$ , כאשר  $\beta$  נקרא מקדם ההגבר או Current Gain.
- מתקיים:  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ .

**מצבי פעולה של טרנזיסטור NPN ותנאים:**

מצב קטעון (Cut-off) - (צומת BE בממתח אחורי וצומת BC בממתח אחורי):  
 $v_{BE} < 0.7V$  -

מצב פעיל-קדמי (Forward Active) - (צומת BE בממתח קדמי וצומת BC בממתח אחורי):  
 $0A < I_B < I_{B,S}$ ,  $v_{BE} \geq 0.7V$  -

מצב רוויה (Saturation) - (צומת BE בממתח קדמי וצומת BC בממתח קדמי):  
 $I_B \geq I_{B,S}$  -

מצב פעיל אחורי (Reverse Active) - (צומת BE בממתח אחורי וצומת BC בממתח קדמי):  
 $v_{CE} < 0V$  -

**מצבי פעולה של טרנזיסטור PNP ותנאים:**

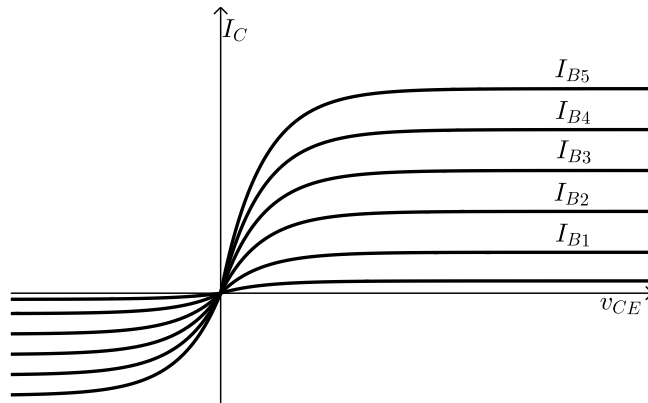
מצב קטעון (Cut-off) - (צומת EB בממתח אחורי וצומת CB בממתח אחורי):  
 $v_{EB} < 0.7V$  -

מצב פעיל-קדמי (Forward Active) - (צומת EB בממתח קדמי וצומת CB בממתח אחורי):  
 $0A < I_B < I_{B,S}$  ,  $v_{EB} > 0.7V$  -

מצב רוויה (Saturation) - (צומת EB בממתח קדמי וצומת CB בממתח קדמי):  
 $I_B \geq I_{B,S}$  -

מצב פעיל אחורי (Reverse Active) - (צומת EB בממתח אחורי וצומת CB בממתח קדמי):  
 $v_{EC} < 0V$  -

**אופיין (עבור NPN):**



**סיכום מצבים עבור NPN ו-PNP:**

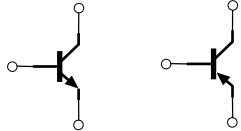
PNP	NPN	צומת BC	צומת BE	קשר בין המתחים
פעיל אחורי	פעיל קדמי	ממתח אחורי	ממתח קדמי	$v_E < v_B < v_C$
קיטעון	רוויה	ממתח קדמי	ממתח קדמי	$v_E < v_B > v_C$
רוויה	קיטעון	ממתח אחורי	ממתח אחורי	$v_E > v_B < v_C$
פעיל קדמי	פעיל אחורי	ממתח קדמי	ממתח אחורי	$v_E > v_B > v_C$

**תצורות חיבור של טרנזיסטורים במעגלים חשמליים:**

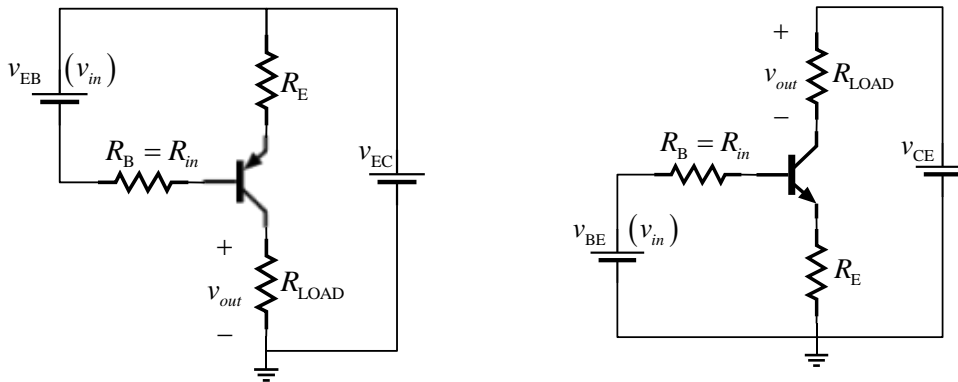
כדי לקבוע את תצורת החיבור יש לראות לאיזה הדק מחובר אות הכניסה (נניח:  $v_{in}$ ) ומאיזה הדק נמדד אות המוצא (נניח:  $v_{out}$ ).

קיימות שלוש תצורות חיבור:

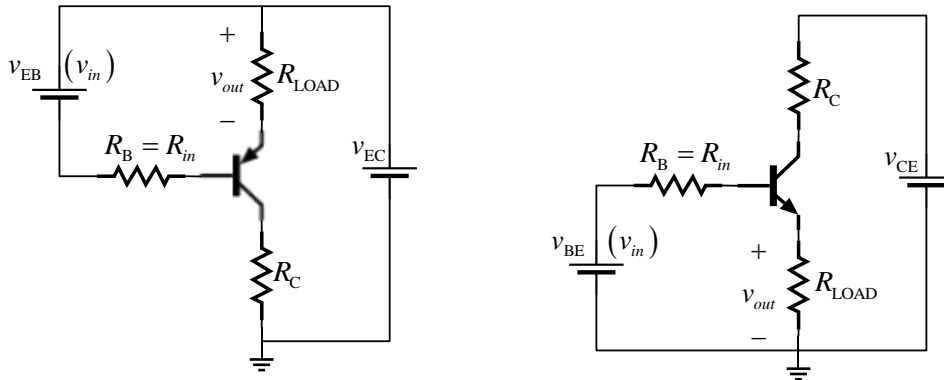
- פולט משותף – Common Emitter (CE).
- בסיס משותף – Common Base (CB).
- קולט משותף – Common Collector (CC).



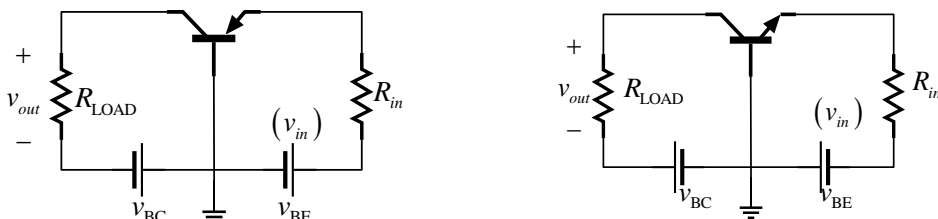
**תצורת חיבור פולט משותף (CE):**



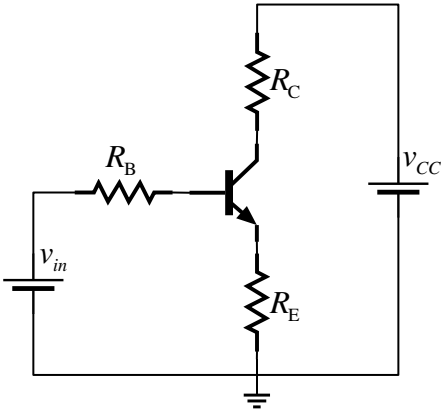
**תצורת חיבור פולט משותף (CC):**



**תצורת חיבור בסיס משותף (CB):**



❖ דוגמא יסודית לכתיבת משוואות מתאימות ופתרון מעגל:



לפניך המעגל הבא ובו נתונים:

$$\beta = 100, v_{CC} = 15V, v_{in} = 0.8V$$

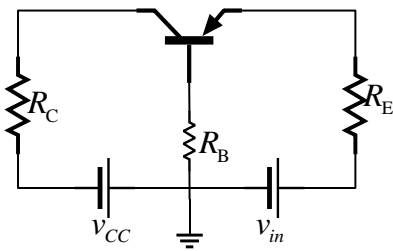
$$R_B = 68k\Omega, R_C = 70k\Omega, R_E = 280\Omega$$

הנח כי:  $v_{BE} = 0.7V$ .

א. מצא את  $I_C$  ואת  $I_E$ .

ב. חשב את  $v_{CE}$ .

❖ דוגמא יסודית לכתיבת משוואות מתאימות ופתרון מעגל:



לפניך המעגל הבא ובו נתונים:

$$\beta = 80, v_{CC} = 12V, v_{in} = 1V$$

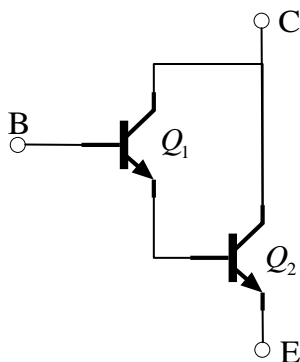
$$R_B = 47k\Omega, R_C = 25k\Omega, R_E = 1k\Omega$$

הנח כי:  $v_{EB} = 0.7V$ .

א. מצא את  $I_C$  ואת  $I_E$ .

ב. חשב את  $v_{EC}$ .

צמד דרלינגטון (Darlington Pair):

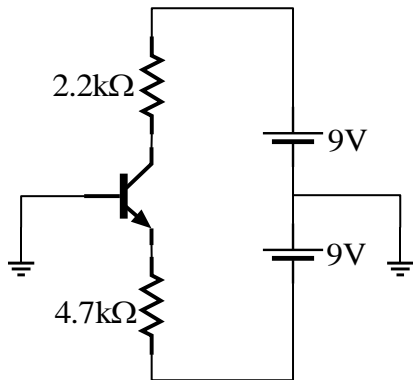


צמד טרנזיסטורים המחוברים בקונפיגורציה הבאה:  
בתצורה זו מקבלים הגבר זרם גדול, הנקרא סופר-ביתא ומקיים:  $\beta_D = \beta_1 \beta_2$  כאשר  $\beta_1$  ו- $\beta_2$  הם בהתאמה הגברי הזרם של כל טרנזיסטור.

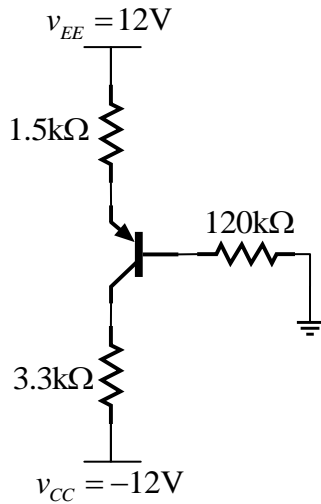
חיסרון מרכזי הוא במתח ההפעלה המקיים:

$$v_{BE_D} = v_{BE_1} + v_{BE_2}$$

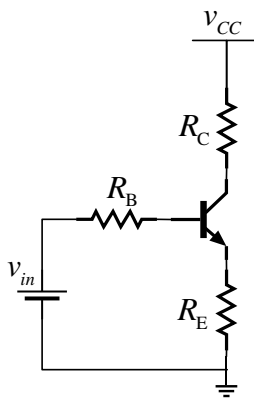
שאלות:



- (1) במעגל שלפניך נתון:  $v_{BE} = 0.7V$  ו-  $\beta = 100$ .  
חשב את הזרמים  $I_E$ ,  $I_C$ ,  $I_B$  ואת המתח  $v_{CE}$ .

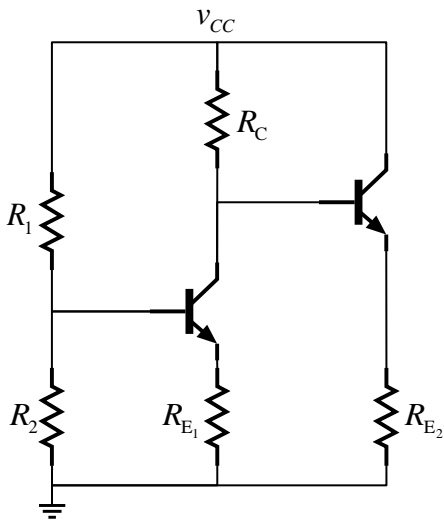


- (2) במעגל שלפניך נתון:  $v_{BE} = 0.7V$  ו-  $\beta = 90$ .  
חשב את הזרמים  $I_E$ ,  $I_C$ ,  $I_B$  ואת המתח  $v_{CE}$ .



- (3) במעגל שלפניך נתון טרנזיסטור מסוג NPN  
שבו:  $v_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 95$ .  
ידוע כי:  $R_B = 40k\Omega$ ,  $R_C = 50k\Omega$ ,  $R_E = 1k\Omega$ .  
וכן:  $v_{CC} = 13V$ ,  $v_{in} = 0.85V$ .
- חשב את הזרם  $I_C$  ואת המתח  $v_{CE}$ .
  - מחברים נגד  $R_L$  מהקולקטור לאדמה.  
הוסף את הנגד בתרשים וענה על השאלות הבאות:
    - כתוב ביטוי למפל המתח על הטרנזיסטור  $v_{CE}$  כתלות בנגד  $R_L$ .
    - הסבר את משמעות הביטוי עבור  $R_L \rightarrow \infty$  ועבור  $R_L \rightarrow 0\Omega$ .
    - מצא את ערכו של  $R_L$  עבורו הטרנזיסטור יהיה ברוויה אם ידוע כי  $v_{CE,sat} = 0.2V$ .
    - האם קיים ערך עבור  $R_L$  שבו הטרנזיסטור יהיה בקטעון? נמק.





4) במעגל שלפניך שני טרנזיסטורים זהים

עם ערכים:  $v_{BE} = 0.7V$  ו-  $\beta = 80$ .

נתונים ערכי הנגדים:

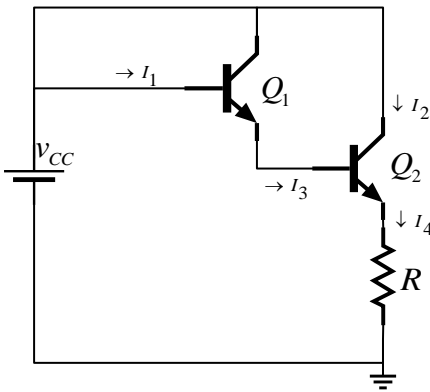
$$R_1 = 147k\Omega, R_2 = 56k\Omega, R_C = 3.3k\Omega$$

$$R_{E1} = 1.2k\Omega, R_{E2} = 5.8k\Omega$$

ומתח האספקה הוא  $v_{CC} = 14V$ .

חשב את הזרמים:  $I_{B1}, I_{C1}, I_{E2}, I_{B2}, I_{C2}, I_{E2}$

ואת המתחים:  $v_{B1}, v_{C1}, v_{E1}, v_{E2}$  (ביחס לאדמה).



5) במעגל שלפניך נתונים הטרנזיסטורים  $Q_1$  ו-  $Q_2$ .

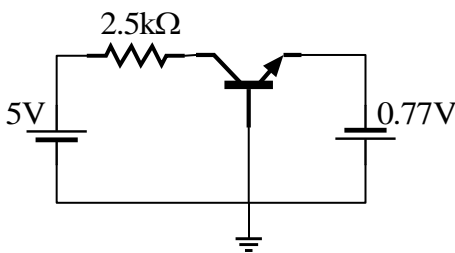
ידוע כי:  $v_{CC} = 24V, R = 4.7k\Omega, \beta_2 = 40, \beta_1 = 85$ .

כמו כן:  $v_{BE1} = v_{BE2} = 0.7V$ .

חשב את הזרמים:  $I_1, I_2, I_3, I_4$ .

6) נתון טרנזיסטור NPN העשוי מגרמניום כמתואר בתרשים.

ידוע כי:  $\beta = 100, I_S = 10^{-16}A, v_{CE,sat} = 0.1V$ .



א. זהה את מצב הפעולה

(פעיל קדמי, קיטעון, רוויה או פעיל אחורי).

ב. מהו הזרם בקולט  $I_C$ ?

ג. מהו הזרם בבסיס  $I_B$ ?

ד. מהו המתח בין הקולקטור לאמיטר  $v_{CE}$ ?

ה. סרטט גרף של זרם הקולקטור כפונקציה של זרם הבסיס והמתח בין

הקולקטור לאמיטר עבור ערך הפעלה של  $I_B$  שחישבת.

**תשובות סופיות:**

(1)  $I_B = 17.48 \mu A ; I_C = 1.748 mA ; I_E = 1.766 mA ; v_{CE} = 5.85 V$

(2)  $I_B = 44 \mu A ; I_C = 3.96 mA ; I_E = 4 mA ; v_{EC} = 4.9 V$

(3) א.  $I_C = 104.78 \mu A , v_{CE} = 7.656 V$

ב. i. כאשר \* מתייחס לערכים מהסעיף הקודם.  $v_{CE} = \frac{R_L}{R_L + R_C} v_{CE}^* - \frac{R_E R_C}{R_L + R_C} I_E^*$

ii. כאשר  $R_L \rightarrow \infty$  נקבל  $v_{CE} = v_{CE}^*$  וכאשר  $R_L \rightarrow 0 \Omega$  נקבל  $v_{CE} = -R_E I_E^*$  שכן סך המתחים על הטרנזיסטור ועל הנגד  $R_E$  צריך להתאפס עקב קיצור הנגד.

iii.  $R_L < 2050 \Omega$

iv. לא כי קיים זרם  $I_B$  אשר אינו תלוי ב- $R_L$  (הסבר אחר: הצומת BE אינו בממתח אחורי).

(4)  $I_{B_1} = 22.94 \mu A , I_{C_1} = 1.83 mA , I_{E_1} = 1.86 mA , I_{B_2} = 15.3 \mu A , I_{C_2} = 1.224 mA$

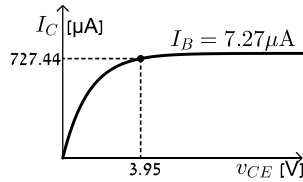
$I_{E_2} = 1.24 mA , v_{B_1} = 2.1 V , v_{C_1} = 7.91 V , v_{E_1} = 2.23 V , v_{E_2} = 27.187 V$

(5)  $I_4 = 4.8 mA , I_3 = 117.28 \mu A , I_2 = 4.69 mA , I_1 = 1.363 \mu A$

(6) א. מצב פעיל קדמי. ב.  $I_C = 727.44 \mu A$ . ג.  $I_B = 7.27 \mu A$ .

ד.  $v_{CE} = 3.95 V$  (שימו לב:  $v_{CE} > v_{CE,sat}$  ומכאן מצב פעיל קדמי).

ה. להלן סרטוט:



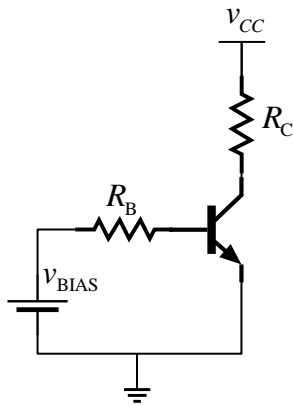
## נקודת עבודה של טרנזיסטור:

סיכום כללי:

הגדרה:

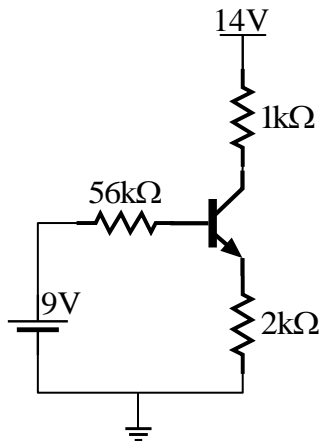
נקודת עבודה DC של טרנזיסטור BJT מוגדרת בתור הזוג  $(v_{CE}, I_C)$  עבור NPN ו- $(v_{EC}, I_C)$  עבור PNP, על עקום הפעלה של זרם  $I_B$ .

❖ דוגמא למציאת נקודת עבודה במספר תנאים (מובא בסרטון):

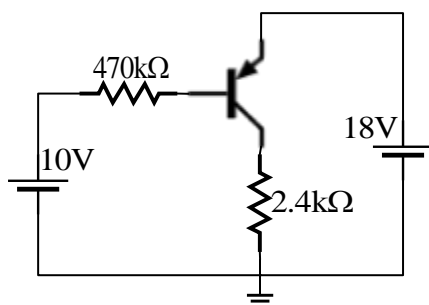


נתון כי:  $\beta = 100$ ,  $R_C = 15k\Omega$ ,  $R_B = 10k\Omega$   
 וכן:  $v_{CC} = 20V$ ,  $v_{BIAS} = 0.8V$ .  
 מצא את נקודה העבודה של הטרנזיסטור.

שאלות:

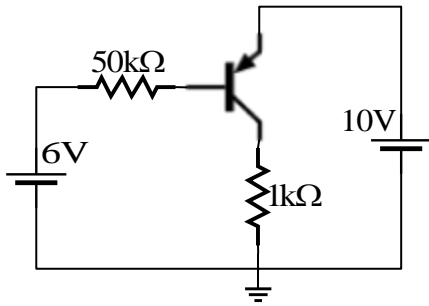


1) במעגל שלפניך נתון:  $\beta = 120$  ו- $v_D = 0.7V$ .  
 מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.  
 (מצא את מצב הפעולה המתאים תחילה).

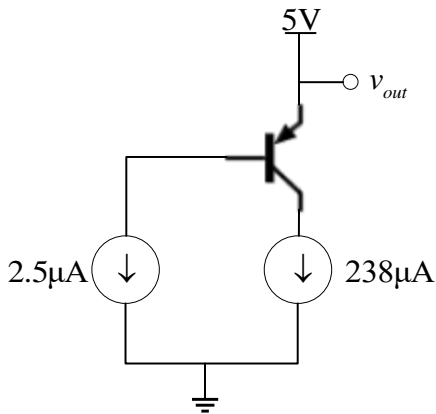


2) מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.  
 נתון:  $\beta = 100$  ו- $v_{EB} = 0.7V$ .

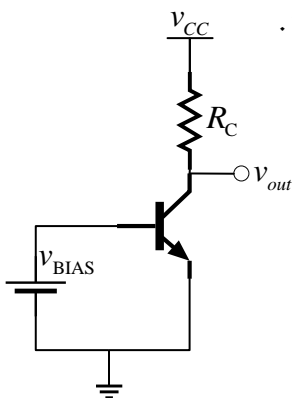
- 3 מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.  
נתון:  $\beta = 100$  ו-  $v_D = 0.7V$ .  
(מצא את מצב הפעולה תחילה).



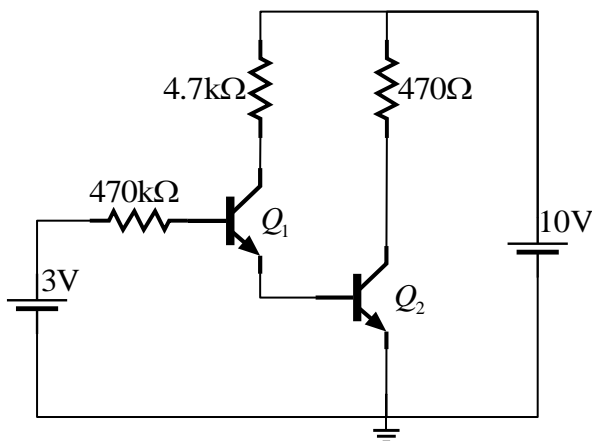
- 4 נתון המעגל הבא ובו טרנזיסטור PNP עם  $I_S = 10^{-16} A$ .  
א. מהו אזור הפעולה של הטרנזיסטור?  
ב. מהו  $v_{EB}$  בנקודת העבודה שלו?



- 5 במעגל הבא מעוניינים להגדיר נקודת עבודה ב-  $v_{out} = 0.5v_{CC}$ .  
נתון:  $R_C = 10k\Omega$ ,  $I_S = 10^{-16} A$ ,  $v_{CC} = 5V$ .  
א. מהי תצורת החיבור של הטרנזיסטור?  
ב. מהו הזרם בקולט  $I_C$ ?  
ג. מהו המתח  $v_{BE}$  הדרוש?



- 6 במעגל שלפניך נתונים הטרנזיסטורים  $Q_1$  ו-  $Q_2$ .  
ידוע כי  $\beta_1 = 100$  וכי  $\beta_2 = 50$ .  
מצא את מצב הפעולה ונקודת העבודה של כל טרנזיסטור.



**תשובות סופיות:**

(1)  $I_C = 3.34\text{mA}$  ,  $v_{CE} = 3.92\text{V}$

(2)  $I_C = 1.553\text{mA}$  ,  $v_{EC} = 14.27\text{V}$

(3)  $I_C = 6.6\text{mA}$  ,  $v_{EC} = 3.4\text{V}$

(4) א. פעיל קדמי. ב.  $v_{EB} = 0.73\text{V}$

(5) א. תצורת CE (Common Emitter). ב.  $I_C = 250\mu\text{A}$  . ג.  $v_{BE} = v_{BIAS} = 0.74\text{V}$

(6)  $I_{C_1} = 0.34\text{mA}$  ,  $v_{CE_1} = 7.7\text{V}$  ;  $I_{C_2} = 17.2\text{mA}$  ,  $v_{CE_2} = 1.94\text{V}$

## מודל אות קטן:

**סיכום כללי:**

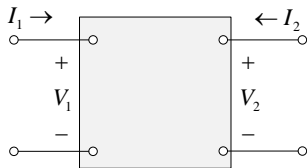
**מודל אות גדול:**

מודל המתאר התקן לא ליניארי (כגון דיודה או טרנזיסטור) המוזן מאות בעל מתחי כניסה שעשויים לשנות את נקודת העבודה ואזור הפעולה של ההתקן. כאשר אות גדול נכנס למעגל, אות המוצא עשוי לעבור קטימה כתוצאה מכך וכתוצאה ממתחי האספקה של המעגל.

**מודל אות קטן:**

מודל אשר עושה 'ליניאריזציה' למעגל תוך הנחה כי נקודה העבודה לא משתנה ולכן אזור הפעולה של ההתקנים הלא-ליניארים שבמעגל הוא קבוע.

**רשתות זוגיים (Two port networks):**



מודל זוגיים (Two port network) ניתן לתיאור ע"י מעגל בעל שני הדקי כניסה ושני הדקי מוצא באופן הבא:

**סידור משתנים:**

לרשת 4 משתנים והם:

- מתח כניסה (קרי: מתח המבוא) ומסומן:  $V_1$ .
- מתח מוצא ומסומן:  $V_2$ .
- זרם כניסה (קרי: זרם המבוא) ומסומן:  $I_1$ .
- זרם מוצא ומסומן:  $I_2$ .

ניתן לסדר את המשתנים ב-2 משוואות כך ששני משתנים יהיו תלויים ושניים יהיו בלתי תלויים (יש 6 דרכים לבצע זאת).

**מטריצת האימפדנסים:**

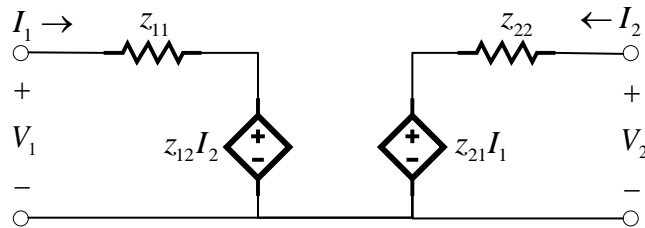
המשתנים החופשיים הם הזרמים והמשתנים התלויים הם המתחים:

$$\begin{cases} V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \rightarrow \underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$$

חישוב ערכי המקדמים של מטריצת האימפדנסים:

$$z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad [\Omega] ; \quad z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad [\Omega] ; \quad z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad [\Omega] ; \quad z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad [\Omega]$$

מודל זוגיים של מטריצת האימפדנסים:



**מטריצת האדמיטנסים:**

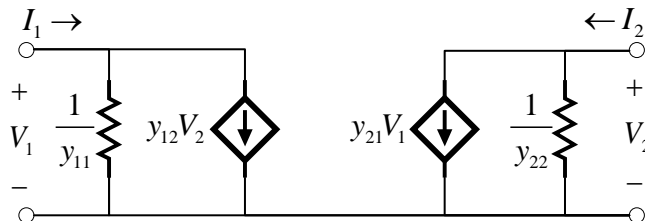
המשתנים החופשיים הם המתחים והמשתנים התלויים הם הזרמים:

$$\begin{cases} I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \rightarrow \underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{V}$$

חישוב ערכי המקדמים של מטריצת האימפדנסים:

$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} \quad [S] ; \quad y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} \quad [S] ; \quad y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0} \quad [S] ; \quad y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0} \quad [S]$$

מודל זוגיים של מטריצת האדמיטנסים:



**מטריצה היברידיית (H matrix):**

זרם המבוא ומתח המוצא הם המשתנים החופשיים וזרם המוצא ומתח המבוא הם המשתנים התלויים:

$$\begin{cases} V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

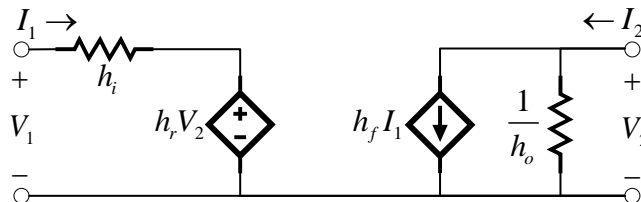
חישוב ערכי המקדמים של המטריצה ההיברידיית:

$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} ; h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2=0} ; h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} ; h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

מינוחים:

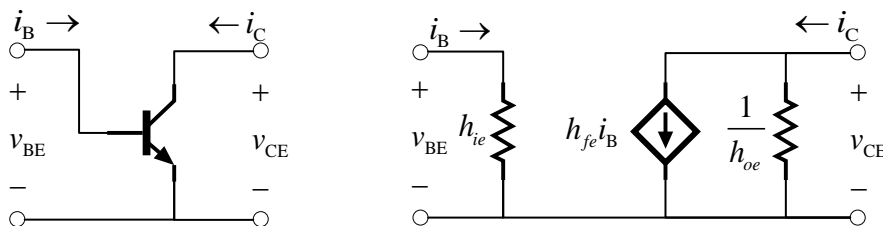
- $h_{11}$  נקרא **התנגדות המבוא של הרשת ויסומן**:  $h_i$  (מלשון: Input).
- $h_{21}$  נקרא **הגבר הזרם הקדמי של הרשת ויסומן**:  $h_f$  (מלשון: Forward).
- $h_{12}$  נקרא **הגבר מתח אחורי (הפוך) של הרשת ויסומן**:  $h_r$  (מלשון: Reverse).
- $h_{22}$  נקרא **אדמיטנס (מוליכות) המוצא של המערכת ויסומן**:  $h_o$  (מלשון: Output).

מודל זוגיים של מטריצת האדמיטנסים:



**מודל Hibrid-Pi של טרנזיסטור:**

ניתן למדל עובר ניתוח אות קטן באופן הבא:

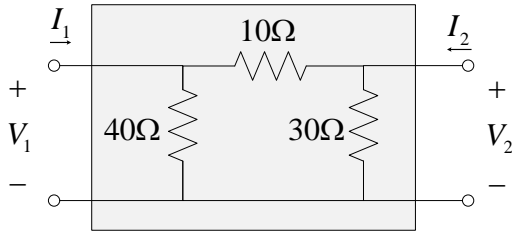


כאשר:  $h_{ie} = \frac{\beta \cdot v_T}{i_C}$  ;  $h_{re} = 0$  ;  $h_{fe} = \beta$  ;  $h_{oe} = \frac{i_C}{v_A}$



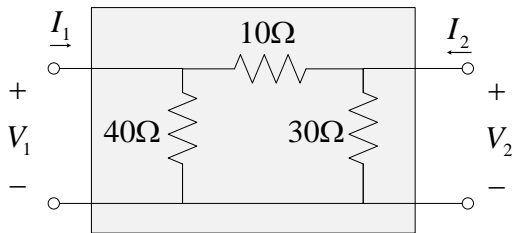
❖ דוגמא למציאת פרמטרי Z של מעגל יסודי:

מצא את פרמטרי-Z של המעגל הבא:



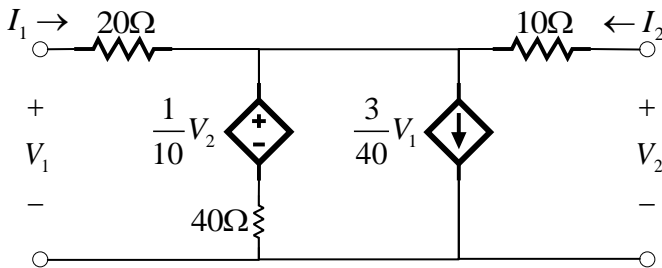
❖ דוגמא למציאת פרמטרי Y של מעגל יסודי:

מצא את פרמטרי-Y של המעגל הבא:



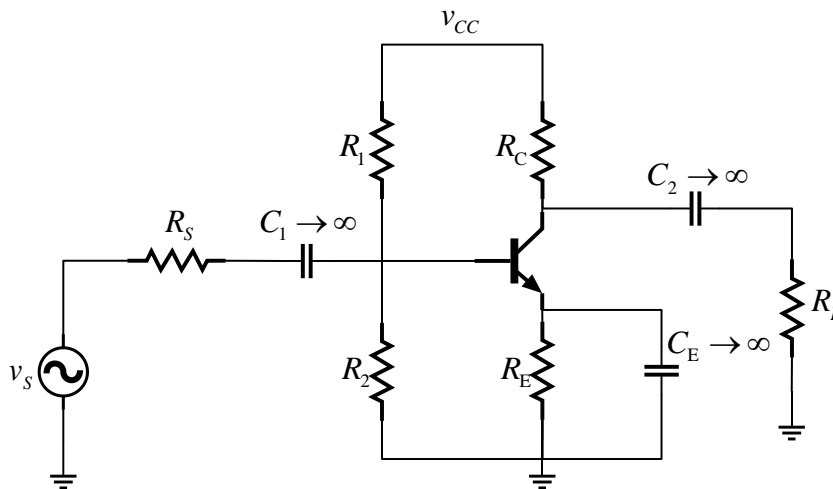
❖ דוגמא למציאת פרמטרי H של מעגל:

מצא את פרמטרי-H של המעגל הבא:



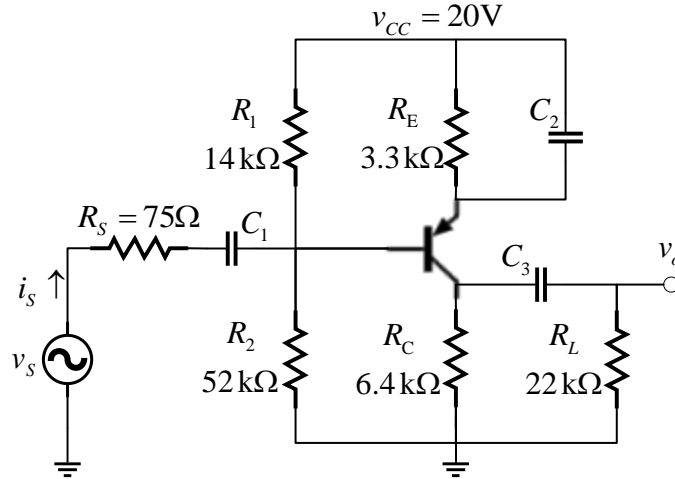
❖ דוגמא לניתוח מלא של מעגל הגבר:

נתח את המעגל הבא ומצא את ההגבר שלו, התנגדות כניסה והתנגדות מוצא:



שאלות:

1 נתון המעגל הבא ובו:  $v_{EB} = 0.7V$ ,  $\beta = 100$ . הנח כי:  $h_{re} = 0$ ,  $h_{oe} = 0$ .



א. מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.

ב. חשב את ההגברים הבאים:

i. הגבר המתח  $A_{v_i} = \frac{v_{out}}{v_i}$  (כאשר  $v_i$  מוגדר בתור מתח הכניסה לדרגת ההגבר).

ii. הגבר מתח  $A_{v_s} = \frac{v_{out}}{v_s}$ .

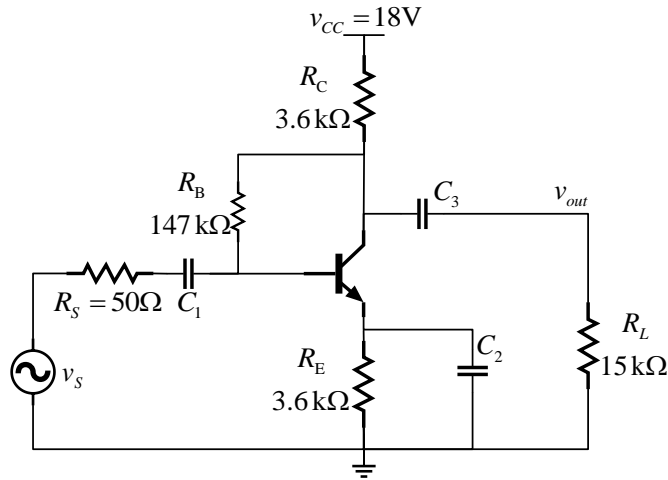
iii. הגבר הזרם  $A_I = \frac{i_{out}}{i_s}$ .

ג. חשב את התנגדות המבוא  $R_{in}$ , את התנגדויות המוצא של דרגת ההגבר  $R_{out}$

ושל המעגל כולו  $R'_{out}$  (כלומר כולל העומס).

(2) במעגל שלפניך נתון:  $\frac{1}{h_{oe}} = 64k\Omega$ ,  $v_{BE} = 0.7V$ ,  $h_{fe} = 100$ .

הנח כי  $h_{re} = 0$  וענה על הסעיפים הבאים:



א. מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.

ב. חשב את ההגברים הבאים:  $A_i = \frac{v_{out}}{v_i}$ ,  $A_{v_s} = \frac{i_{out}}{i_s}$ ,  $A_l = \frac{v_{out}}{v_i}$ .

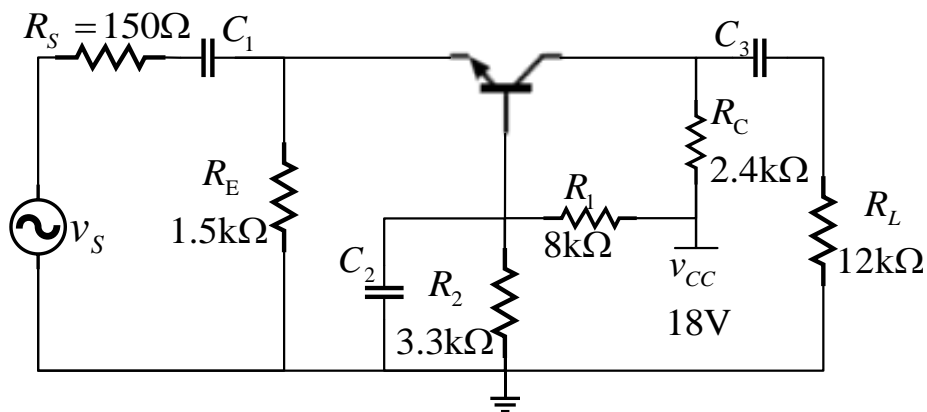
(כאשר  $v_i$  מוגדר בתור מתח הכניסה לדרגת ההגבר).

ג. חשב את התנגדות המבוא  $R_{in}$ , את התנגדויות המוצא של דרגת ההגבר  $R_{out}$  ושל המעגל כולו  $R'_{out}$  (כלומר כולל העומס).

(3) במעגל שלפניך נתון:  $v_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 110$ .

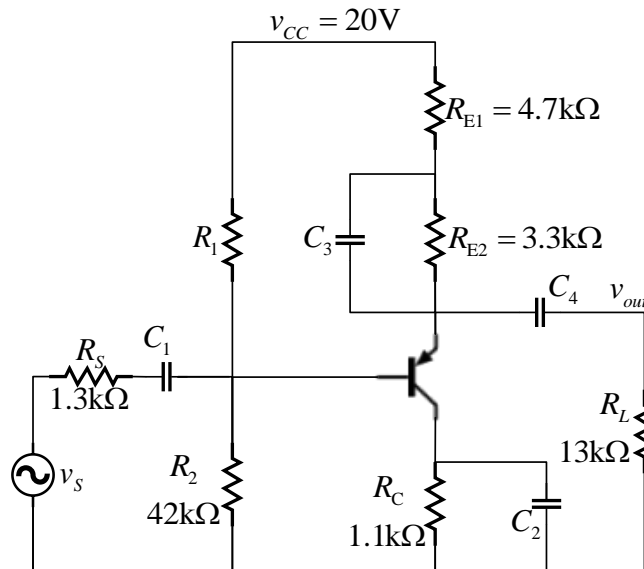
שאר נתוני הרכיבים מופיעים בתרשים.

הנח כי:  $h_{re} = 0$ ,  $h_{oe} = 0\Omega$ .



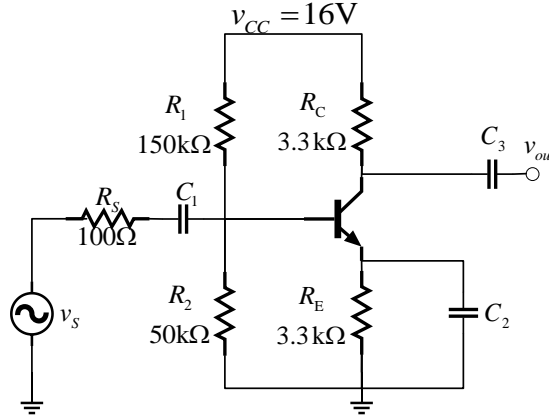
- א. מצא את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.  
 ב. מהי תצורת החיבור של הטרנזיסטור?  
 האם ניתן להשתמש בפרמטרי H עבורו כפי שנתונים בדפי היצרן?  
 אם כן – נמק. אם לא – הבע את ערכי הפרמטרים עבור חיבור זה.  
 ג. חשב הגברים:  $A_I = \frac{i_{out}}{i_S}$ ,  $A_{v_S} = \frac{v_{out}}{v_S}$ ,  $A_{v_i} = \frac{v_{out}}{v_i}$ .  
 ד. חשב התנגדות מבוא  $R_{in}$ , התנגדות מוצא של מעגל ההגבר  $R_{out}$  ושל המעגל כולו  $R'_{out}$ .

4 במעגל שלפניך נתון:  $v_{EB} = 0.7V$ ,  $\beta = 90$ . הנח כי:  $h_{re} = 0$ ,  $h_{oe} = 0$ .

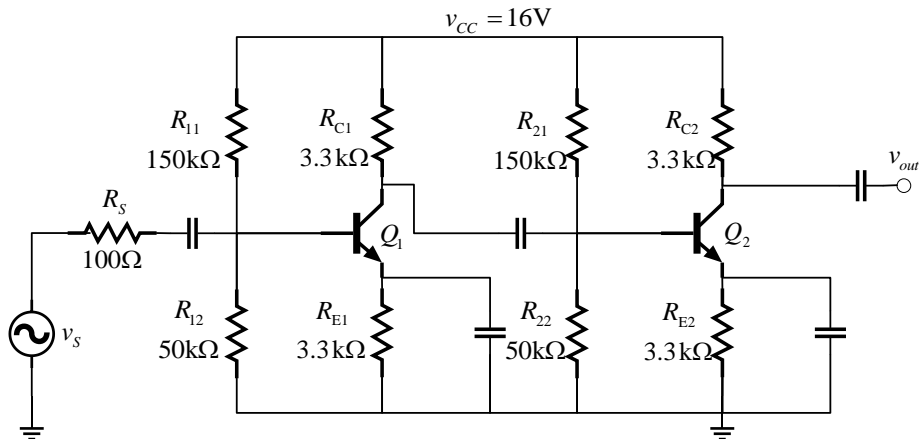


- א. מצא את ערכו של הנגד  $R_1$  לקבלת זרם  $I_C = 2\text{mA}$ .  
 ב. מהי תצורת החיבור של הטרנזיסטור?  
 האם ניתן להשתמש בפרמטרי H עבורו כפי שנתונים בדפי היצרן?  
 אם כן – נמק. אם לא – הבע את ערכי הפרמטרים עבור חיבור זה.  
 ג. חשב הגברים:  $A_I = \frac{i_{out}}{i_S}$ ,  $A_{v_S} = \frac{v_{out}}{v_S}$ ,  $A_{v_i} = \frac{v_{out}}{v_i}$ .  
 ד. חשב התנגדות מבוא  $R_{in}$ , התנגדות מוצא של מעגל ההגבר  $R_{out}$  ושל המעגל כולו  $R'_{out}$ .

- 5) לפניך המעגל הבא ובו  $v_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 100$ .  
 לשם הפשטות הנח כי  $h_{re} = 0$ ,  $h_{oe} = 0$  וכי הקיבולים שואפים לאינסוף.



- א. חשב את נקודת העבודה של הטרנזיסטור.  
 ב. הנח כי מחובר עומס של  $R_L = 1k\Omega$  וחשב:  
 i. הגברים:  $A_I = \frac{i_{out}}{i_S}$ ,  $A_{v_S} = \frac{v_{out}}{v_S}$ .  
 ii. התנגדות מבוא  $R_{in}$  והתנגדות מוצא של מעגל ההגבר  $R_{out}$ .  
 ג. מחברים שתי דרגות זהות בקסקדה זו אחר זו.

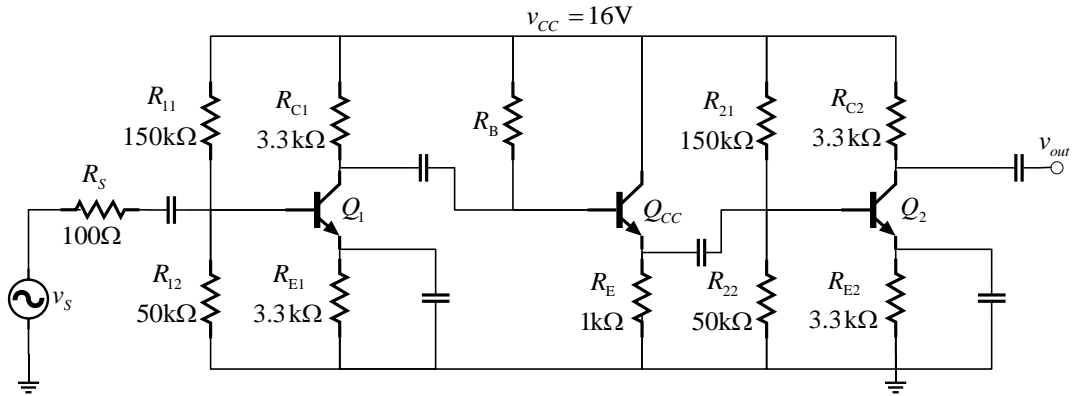


- i. מבלי לחשב, האם נכון לומר כי ההגבר הכולל שווה למכפלת ההגברים?  
 נמק באופן איכותי בלבד.  
 ii. חשב הגברים  $A_I = \frac{i_{out}}{i_S}$ ,  $A_{v_S} = \frac{v_{out}}{v_S}$  והתנגדויות  $R_{in}$ ,  $R_{out}$  ואשש את טענתך.

ד. על מנת למנוע העמסה שבין הדרגות, מחליטים להפריד ע"י הוספת מעגל עוקב-אמיתר (מעגל CC) כמתואר:

i. מה צריך להיות ערכו של  $R_B$  עבורו נקודת העבודה תהיה זהה בכל הדרגות?

ii. חשב הגברים:  $A_{v_s} = \frac{v_{out}}{v_s}$ ,  $A_I = \frac{i_{out}}{i_s}$  והתנגדויות  $R_{in}$ ,  $R_{out}$ .



**תשובות סופיות:**

- (1) א.  $I_C = 1.028 \text{ mA}$  ,  $v_{EC} = 9.98 \text{ V}$  . ב. i.  $A_{v_i} = -198 \text{ V/V}$  .  
 ב. ii.  $A_{v_s} = -191 \text{ V/V}$  .  
 ג.  $R_{in} = 2.03 \text{ k}\Omega$  ;  $R_{out} = 6.4 \text{ k}\Omega$  ;  $R'_{out} = 4.95 \text{ k}\Omega$  .  
 א. (2)  $I_C = 1.978 \text{ mA}$  ;  $v_{CE} = 3.6 \text{ V}$  .  
 ב.  $A_{v_i} = -217.7 \text{ V/V}$  ;  $A_{v_s} = -195.7 \text{ V/V}$  ;  $A_I = -6.39 \text{ A/A}$  .  
 ג.  $R_{in} = 545.8 \Omega$  ;  $R_{out} = 3.08 \text{ k}\Omega$  ;  $R'_{out} = 2.554 \text{ k}\Omega$  .  
 א. (3)  $I_C = 2.96 \text{ mA}$  ;  $v_{CE} = 6.39 \text{ V}$  .  
 ב. תצורת CB. להלן קשרים בין הפרמטרים:  

$$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}} = 0 \text{ S} , h_{rb} = h_{re} = 0 , h_{fb} = \frac{h_{fe}}{h_{fe}+1} = 0.99 , h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} = \frac{v_T}{I_E} = 8.69 \Omega$$
 ג.  $A_{v_i} = 227.81 \text{ V/V}$  ,  $A_{v_s} = 12.366 \text{ V/V}$  ,  $A_I = 0.16 \text{ A/A}$  .  
 ד.  $R_{in} = 8.61 \Omega$  ,  $R_{out} = 2.4 \text{ k}\Omega$  ,  $R'_{out} = 2 \text{ k}\Omega$  .  
 א. (4)  $R_1 = 323.86 \text{ k}\Omega$  .  
 ב. תצורת CC. ניתן להשתמש בפרמטרי H שבדפי היצרן עבור CE.  
 ג.  $A_{v_i} = 0.99 \text{ V/V}$  ,  $A_{v_s} = 0.961 \text{ V/V}$  ,  $A_I = 2.56 \text{ A/A}$  .  
 ד.  $R_{in} = 33.23 \text{ k}\Omega$  ,  $R_{out} = 10.97 \Omega$  ,  $R'_{out} = 10.97 \Omega$  .  
 א. (5)  $I_C = 889.9 \mu\text{A}$  ,  $v_{CE} = 10.09 \text{ V}$  .  
 ב. i.  $A_{v_i} = 12254.7 \text{ V/V}$  ,  $A_{v_s} = 12230.2 \text{ V/V}$  ,  $A_I = 33633 \text{ A/A}$  .  
 ב. ii.  $R_{out} = 3.3 \text{ k}\Omega$  ,  $R_{in} = 2.65 \text{ k}\Omega$  .  
 ג. i. לא. ההגבר יהיה נמוך יותר כי העומס מהדרגה הראשונה, אשר מתבטא כהתנגדות  $R_s$  לדרגה השנייה גדול (הוא הרי  $R_{out} = R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$  ולא  $100 \Omega$  כפי שיש בכניסה לדרגה הראשונה). הדבר גורר ירידה ביכולת ההגבר של  $A_{v_s}$  ומכאן שלא ניתן יהיה לומר כי ההגבר שווה למכפלתם.  
 ג. ii.  $R_{in} = 2.65 \text{ k}\Omega$  ,  $R_{out} = 3.3 \text{ k}\Omega$  ,  $A_{v_s} = 5925.8 \text{ V/V}$  ,  $A_I = 16296 \text{ A/A}$  .  
 ד. i.  $R_B = 1.61 \text{ M}\Omega$  .  
 ד. ii.  $R_{in} = 2.65 \text{ k}\Omega$  ,  $R_{out} = 3.3 \text{ k}\Omega$  ,  $A_{v_s} = 12230.2 \text{ V/V}$  ,  $A_I = 33633 \text{ A/A}$  .

## מעגלים לוגיים עם טרנזיסטורים:

### סיכום כללי:

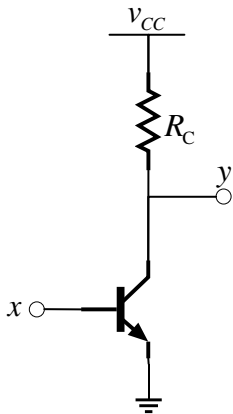
#### סוגי מעגלים לוגיים:

.Resistor Transistor Logic - RTL

.Diode Transistor Logic - DTL

.Transistor Transistor Logic - TTL

#### ❖ דוגמא יסודית לניתוח מעגל לוגי:



במעגל שלפניך נתון:

$$v_{CC} = 3.3V, \beta = 100, v_{CE,sat} = 0.2V, v_D = 0.7V$$

ערך הנגד  $R_C$  הוא  $5.6k\Omega$ .

מסמנים את מתח הכניסה ב- $x$  ואת מתח המוצא ב- $y$ .

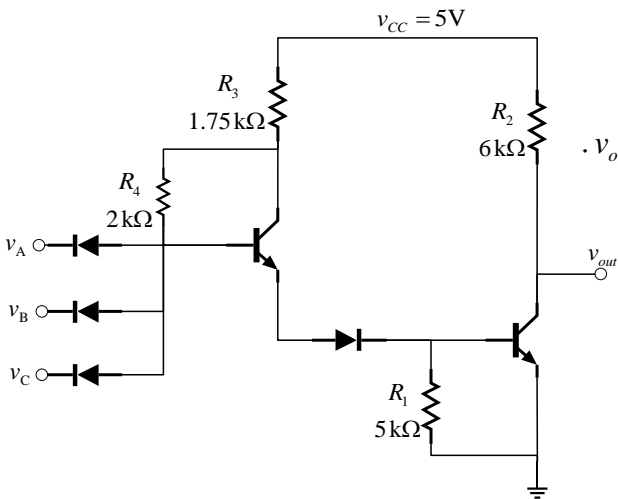
מהי הפעולה הלוגית שהמעגל מבצע?

הנח רמות מתח הבאות:

$$1' \text{ לוגי: } [2.8:3.3] V$$

$$0' \text{ לוגי: } [0:1.2] V$$

#### ❖ דוגמא מסכמת לניתוח מעגל DTL:



המעגל שלפניך מבצע פעולה לוגית כלשהי בין

ערכי המתחים שבכניסות:  $v_A, v_B, v_C$  והמוצא  $v_{out}$ .

נתון:  $\beta = 100$  עבור שני הטרנזיסטורים,

וכן:  $v_{BE1} = v_{BE2} = 0.7V$  במצב פעיל קדמי.

הנח כי הדיודות המחוברות לכניסות

הן אידיאליות וכי הדיודה המחוברת בין

הטרנזיסטורים היא מעשית עם  $v_D = 0.7V$ .

$$\text{הנח גם כי } v_{CE1,sat} = v_{CE2,sat} = 0.2V$$

א. מצא את הפעולה הלוגית שהמעגל מבצע.

ב. הסבר את תפקידי הדיודה והנגד שמחוברים בין הטרנזיסטורים.

ג. כיצד יש לשנות את ערכו של הנגד  $R_2$  במידה ובמקום 3 כניסות תהיינה 5 כניסות?

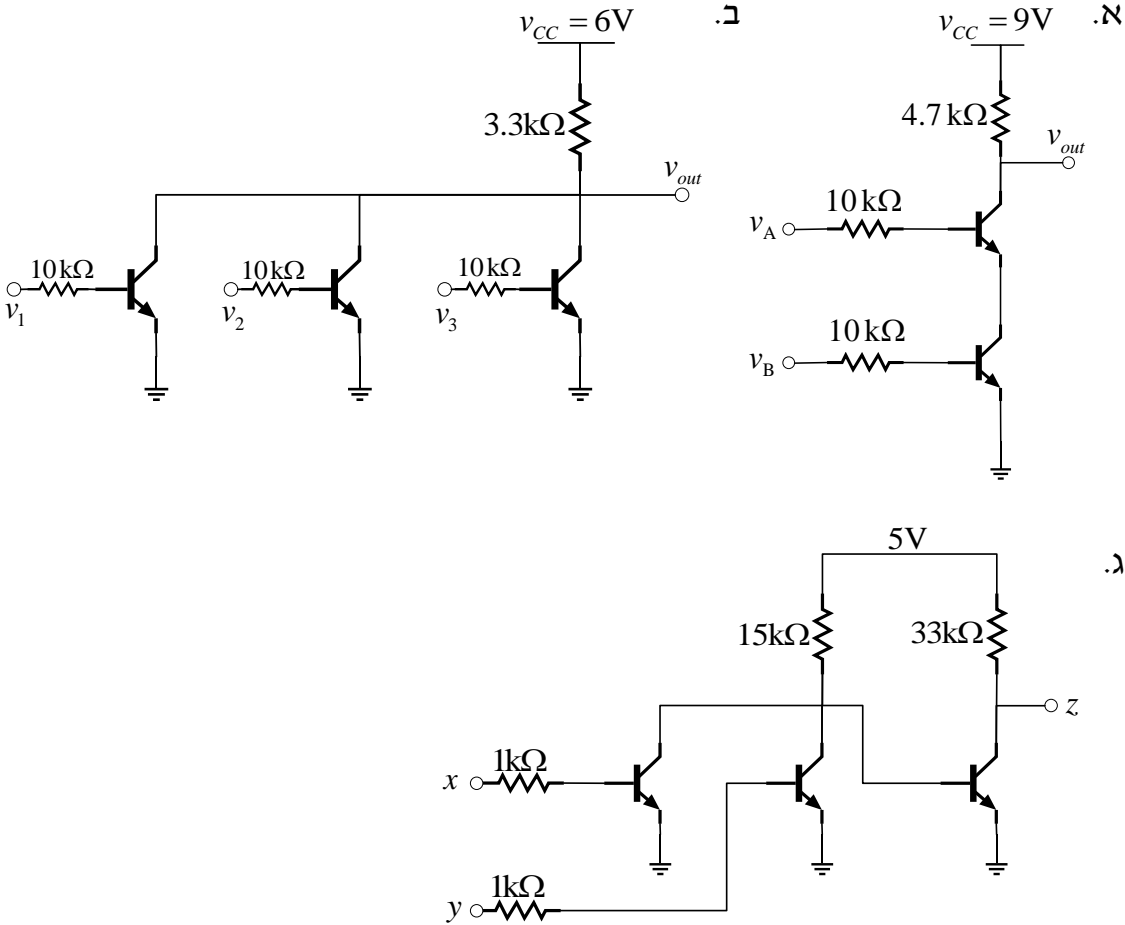
בהסברך התייחס לדיודות הכניסה כאל מעשיות והעזר בכך שנופל עליהן מפל מתח.

תן תשובה איכותית, אין צורך בחישובים מדויקים.

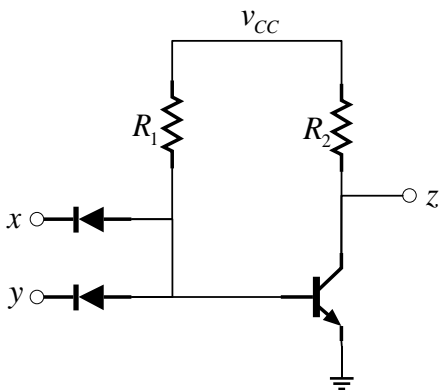


שאלות:

1) מהי הפעולה הלוגית שמבצע כל אחד מהמעגלים הבאים?



2) המעגל שלפניך מורכב מטרנזיסטור NPN ושתי דיודות אידיאליות. ערכי הנגדים  $R_1$  ו- $R_2$  נתונים.



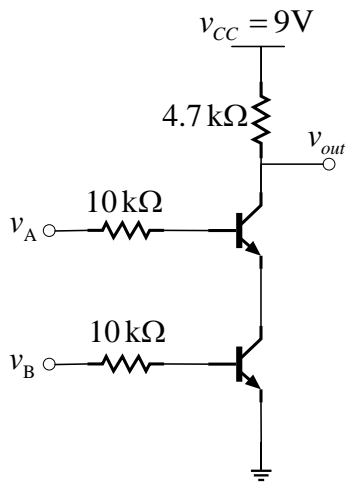
- מה היא הפעולה הלוגית שהמעגל מבצע?
- מחליפים את הכיוון של אחת הדיודות. האם הפעולה הלוגית של המעגל השתנתה? האם המעגל תקין בתצורה זו? כתוב טבלת אמת שתתמוך בהסברך.
- מחליפים את הכיוון של שתי הדיודות (ביחס לאיור המקורי).

ידוע כי  $v_{CC} = 5V$ ,  $\beta = 120$  ו- $v_{BE} = 0.7V$  במצב פעיל קדמי.

מצא את היחס  $\frac{R_2}{R_1}$  עבורו המעגל יקיים:  $z = \text{NOR}(x, y)$ .

הנח כי 1 לוגי מתאים למתחים  $4V < v_z < 5V$  וכי 0 לוגי מתאים

למתחים  $0V < v_z < 1V$ .



3 נתון המעגל הבא :

א. מהי הפעולה הלוגית שהמעגל מבצע?

ב. כיצד יש לחבר LED למעגל כך שהוא

ידלק כאשר המעגל יבצע פעולת AND

כלומר:  $v_{LED} = \text{AND}(v_A, v_B)$  ?

### תשובות סופיות:

1 א.  $v_{out} = \text{NAND}(v_A, v_B)$

ג.  $v_{out} = \text{OR}(x, y)$

2 א.  $z = \text{NAND}(x, y)$

3 א.  $v_{out} = \text{NAND}(v_A, v_B)$

ב.  $v_{out} = \text{NOR}(v_1, v_2, v_3)$

ב. המעגל לא תקין.

ב. עיין בסרטון הוידאו.

ג.  $\frac{R_2}{R_1} < \frac{1}{516}$