

# מעבדה בחשמל

## הנדסה ביורפואית

מגישים:

דן טורצקי

סול אמארה

תאריך:

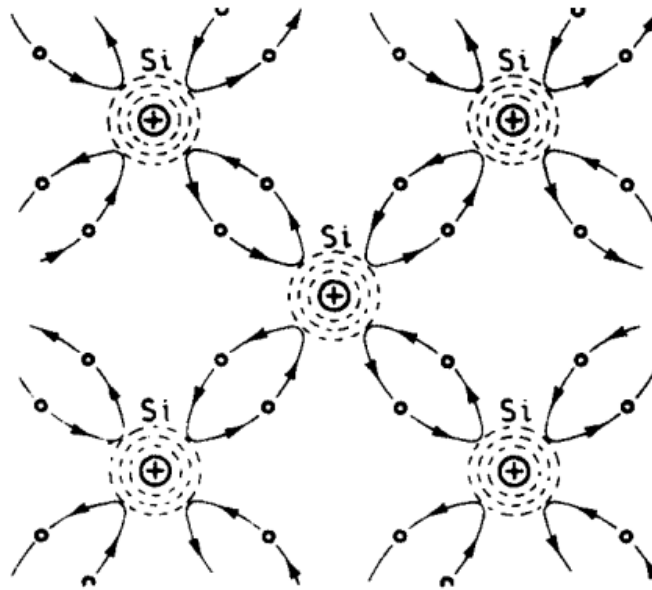
30.12.2021

## תוכן עניינים:

1	רקע תאורטי:	3
2	תשובות לשאלות הכנה:	9
2.1	שאלה 4.1:	9
2.2	שאלה 4.2:	10
2.3	שאלה 4.3:	14
3	מקורות:	16

## 1 רקע תאורטי:

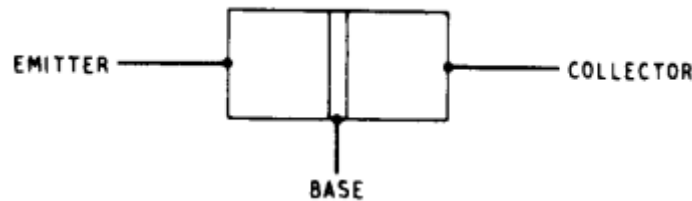
בתחילת שנות ה-50 החלה מהפכה בתחום האלקטרוניקה. מהפכה זו החלה באמצעות המצאת הטרנזיסטור. **טרנזיסטור** הינו רכיב חשמלי המורכב ממוליך למחצה. לטרנזיסטור שלושה הדקים, כך שהטרנזיסטור מתפקד כנגד בין שניים משלושת ההדקים, כך שהמתח בין שני הדקים אלה נשלט ע"י הזרם העובר בהדק השלישי או המתח הנופל עליו. לטרנזיסטור שימושים רבים ביניהם תפקוד כמתג המחובר ומנותק בהתאם לתנאים הרצויים וגם כמגבר. טרנזיסטור הינו רכיב קטן ועמיד, בעל בלאי נמוך, שעם השנים הולך וקטן כך שיעילותו גדלה. כיום כמעט כל מכשיר אלקטרוני מכיל כמות גדולה מאוד של טרנזיסטורים. ישנם מספר סוגי טרנזיסטורים אך בניסוי זה נתמקד ב**טרנזיסטורי (Bipolar junction transistor) BJT מסוג PNP ו-NPN**. כדי להסביר את אופן פעולתו של טרנזיסטור בי-פולרי תחילה נסביר על חומרים מוליכים למחצה. אחד החומרים המרכזיים מהם מורכב מוליך למחצה הינו סיליקון (או חלופה בעלת מאפיינים כימיים דומים). לסיליקון יש ארבעה אלקטרוני ערכיות, ובמצב קריסטלי טהור הוא מוליך גרוע.



איור (1): קריסטל סיליקון טהור [1]

כפי שממוחש באיור, בקריסטל סיליקון טהור אין אלקטרונים חופשיים והוא לא מוליך טוב. בטמפרטורות גבוהות מספיק אלקטרונים מקליפת הערכיות כן יכולים להשתחרר מהגרעין כך שהסיליקון יוליך, כך שלטרנזיסטור יש טווח טמפרטורה בו הוא אפקטיבי. על מנת ליצור חומר שהינו מוליך למחצה, כלומר יש לו תכונות של הולכה, אך אינו מוליך כמו טוב כמו מתכות, מוסיפים לסיליקון חומרים נוספים. ניתן לחלק את המוליכים למחצה לשני סוגים -  $n$  - type ו-  $p$  - type. כאשר מוסיפים לסיליקון חומר בעל חמישה אלקטרוני ערכיות, ארבעה מהם יצרו קשר קוולנטי - כל אחד עם אטום סיליקון יחיד והחמישי יוותר כאלקטרון חופשי. אם כך, כעת ישנו אלקטרון חופשי, לחומר יהיו תכונות הולכה והוא בעל מטען שלילי ולכן נקרא  $n$  - type. באותו אופן, כאשר נוסיף חומר בעל שלושה אלקטרוני ערכיות, כל אחד מהם יצור קשר קוולנטי עם

אטום אחד של סיליקון, כך שהאטום סיליקון הרביעי יחלוק רק אלקטרון אחד עם האטום שהוספנו כך שישאר "חור" בו ניתן להכניס אלקטרון. אם כך, המטען של החומר יהיה חיובי, לחומר תהיה תכונת הולכה והוא יקרא  $p - type$ . טרנזיסטור בי-פולרי בעל שלושה הדקים ובאופן כללי מורכב כך:



איור (2): טרנזיסטור בי-פולרי [1]

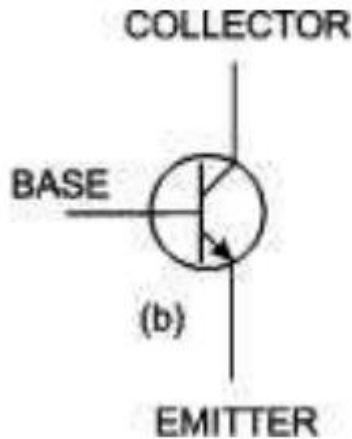
כפי רואים באיור, ישנן שלושה אזורים בטרנזיסטור – כאשר הם  $NPN$  או  $PNP$ , כאשר  $N$  מתייחס לחומר שהינו  $N - type$  ו-  $P$  לחומר מסוג  $P - type$ . השכבה האמצעית אליה מחובר הבסיס הינה שכבה דקה, ושני ההדקים האחרים מחוברים כל אחד לשכבה חיצונית עבה.

הטרנזיסטור מורכב מ-3 רכיבים עיקריים: בסיס, קולט ופולט. **בסיס (Base)** מסומן באות  $B$ . הבסיס נמצא בין שהקולט והפולט, ואלי מחובר מקור מתח משני הקבוע את מצב פעולתו. **קולט (Collector)** מסומן באות  $C$ . רכיב זה קולט אלקטרונים ומעביר את הזרם מהטרנזיסטור החוצה. **פולט (Emitter)** מסומן באות  $E$ . סוג הטרנזיסטור ( $npn$  או  $pnp$ ) קובע את כיוון החץ של רכיב זה. מקור המתח מחובר לפולט המעביר את הזרם לרכיביו האחרים של הטרנזיסטור.

**טרנזיסטור  $NPN$**  כאשר המתח בין הבסיס לפולט (emitter) אותו נסמן  $V_{BE}$  גדול ממחסום הפוטנציאל בצומת ה-  $NP$  שביניהם - שעבור סיליקון פוטנציאל זה הוא לרוב בסביבות  $0.7V$  – אלקטרונים ינועו מהפולט המחובר לאזור  $N$  לכיוון הבסיס המחובר לאזור  $P$ , וחורים ינועו בכיוון ההפוך. שכבת ה-  $N$  גדולה יותר וכן בעלת ריכוז מטענים שליליים גדול יותר מריכוז החורים באזור ה-  $P$  כך שרוב הזרם הוא כתוצאה מתנועת האלקטרונים, אך כיוון ששני סוגי המטען נעים הטרנזיסטור נקרא בי-פולרי. חלק קטן מהאלקטרונים הנעים ינוטרלו ע"י נושאי המטען החיוביים בבסיס אך רובם יעברו. החלק היחסי שעובר מסומן ב-  $\alpha$ . נסמן את הזרמים דרך ההדקים כך – הזרם דרך הפולט הינו  $i_E$ , הזרם דרך הקולט (collector) -  $i_C$  והזרם דרך הבסיס  $i_B$ . מחוקי קירקהוף נקבל:

$$(1) i_E = i_B + i_C$$

כיוון הזרם הינו מהקולט לפולט וכיוון שהזרם דרך הבסיס חיובי, קיבלנו הגבר של הזרם (והמתח) בין ההדקים של הקולט והפולט. כאשר  $V_{BE}$  קטן ממחסום הפוטנציאל שבסיליקון הינו סביב  $0.7V$  לא עובר זרם במעגל. אם כך, הטרנזיסטור משמש גם כמתג תלוי מתח חיצוני וגם כמגבר.

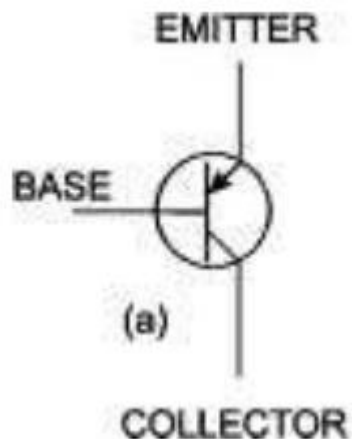


איור (3): סימון מקובל לטרנזיסטור  $NPN$  [1]

זהו הסימון המוסכם לטרנזיסטור  $NPN$  כאשר החץ ממחיש את כיוון הזרם.

עבור **טרנזיסטור  $PNP$**  העקרון דומה אך התנועה הפוכה. בטרנזיסטור זה דרוש כי  $V_{BE}$  יהיה שלילי וקטן מ-  $-0.7V$  על מנת לעבור את מחסום הפוטנציאל של צומת ה-  $NP$  בין הבסיס לפולט. במקרה זה נושאי המטען החיוביים, החורים, ינועו מהפולט לעבר הבסיס ורובם ימשיכו לעבור הקולט ואלקטרונים ינועו מהבסיס לעבר הפולט אך רוב הזרם מקורו מתנועת החורים. אם כך, הזרם הפעם כיוון הזרם הפוך והינו מהפולט אל הקולט, כאשר הזרם דרך הבסיס לא יוצא לעבר הפולט אלא נכנס מהפולט אל הבסיס. מחוקי קירקהוף מקבלים:

$$(2) I_C = I_E - I_B$$



איור (4): סימון מקובל לטרנזיסטור  $PNP$  [1]

הסימון של החץ בתמונה מצביע על כיוון הזרם מהפולט לקולט. השימוש בטרנזיסטור זה דומה לשימוש בטרנזיסטור  $NPN$  מבחינת פעולת המתג, אך במקרה זה ישנה ירידה בהגבר ביחס לכיוון הזרם, כלומר הזרם הנכנס לטרנזיסטור גדול מהזרם היוצא.

[1]

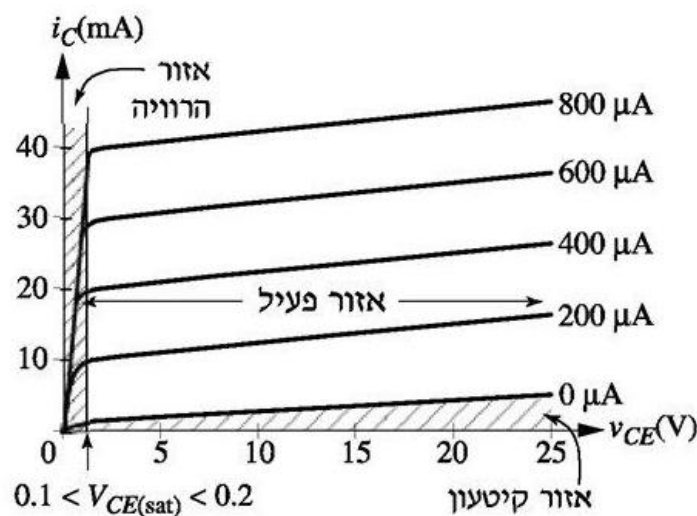
בטרנזיסטור  $\alpha$  מקם, הזרם בפולט,  $i_E$  נוצר מאלקטרונים הנפלטים ממנו לבסיס ולאחר מכן נקלטים בקולט. החלק היחסי בין כמות האלקטרונים שנפלטו לבין כמות האלקטרונים שהגיעה לקולט מסומן ב- $\alpha$ . מקדם זה תלוי ברוחב הבסיס ובכמות המטען החיובי שהוא מכיל. ערך זה נע בין 0 ל-1. בשל כך, נקבל את הנוסחאות הבאות:

$$(3) i_B = (1 - \alpha) \cdot i_E$$

$$(4) i_C = \alpha \cdot i_E$$

מקדם נוסף הוא הגבר הזרם של הטרנזיסטור  $\beta$  המתואר על ידי הנוסחה:  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$  (5). מקדם זה

מציין את היחס בין זרם הקולט לזרם הבסיס  $i_C = \beta \cdot i_B$  (6)



איור (5): מצבי הפעולה של הטרנזיסטור [2]

באיור זה ניתן לראות את שלושת מצבי הפעולה של הטרנזיסטור עבור זרם הקולט כתלות במתח בין הקולט לפולט.

**מצב קיטעון:** גם צומת BE וגם צומת BC בממתח אחורי. מצב קטעון מתרחש כאשר המתח בבסיס נמוך ממתח סף של כ-0.7V, במצב זה האלקטרונים מהפולט לא יעברו לבסיס ולכן בקירוב לא יזרום בקולט זרם:  $i_B = i_E = i_C = 0 [A]$ .

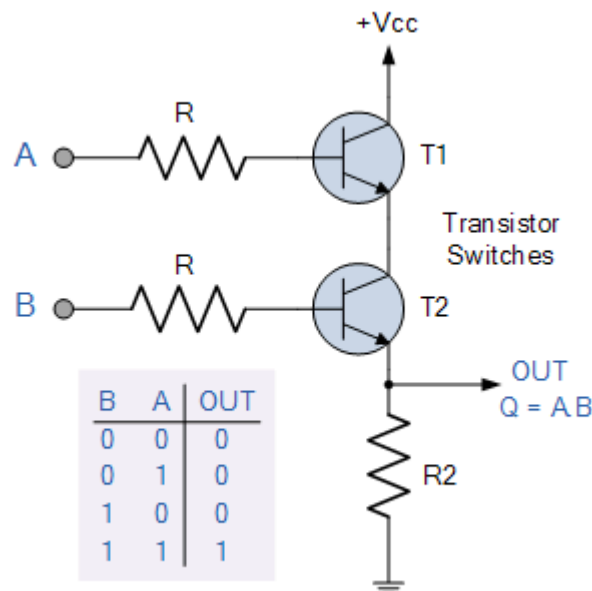
**מצב הפעיל:** צומת BE בממתח קדמי וצומת BC בממתח אחורי. במצב זה מתח הקולט גבוה ממתח הבסיס ויש זרם מהפולט דרך הבסיס לקולט.

**מצב רוויה:** גם צומת BE וגם צומת BC בממתח קדמי. במצב זה המתח בין הקולט לפולט שואף להשאר קבוע כ-0.2V ולא תלוי בזרם הבסיס.

[2]

כאשר במעגל ישנו רכיב לא לינארי המחובר לרכיב לינארי נרצה למצוא את הנקודה בה גם משוואת האופיין של הרכיב הלא לינארי וגם הקשר בין הרכיבים ע"י חוקי קירכהוף מתקיים. לשם כך נמתח על גבי גרף אופיין מתח זרם של הרכיב הלא לינארי **קו העבודה** (Load Line) כאשר קו זה מתאר את הקשר בין המתח לזרם של החלק הלינארי לפי חוקי קירכהוף. קו זה לרוב קו ישר (לינארי). נקודות החיתוך בין הגרפים הינן נקודות העבודה האפשריות של המעגל בו מתקיימים גם הקשר הלא לינארי בין מתח לזרם וגם הקשר הלינארי. [2] כפי שהצגנו, ניתן להשתמש בטרנזיסטורים כמתג – מעבירים זרם תחת תנאים מסוימים ולא מעבירים תחת תנאים אחרים. ישנם מצבים בהם נרצה לקבוע תנאי לוגי יותר מורכב למעבר זרם באזור מסוים במעגל. נתייחס לשלושה תנאים לוגיים אפשריים:

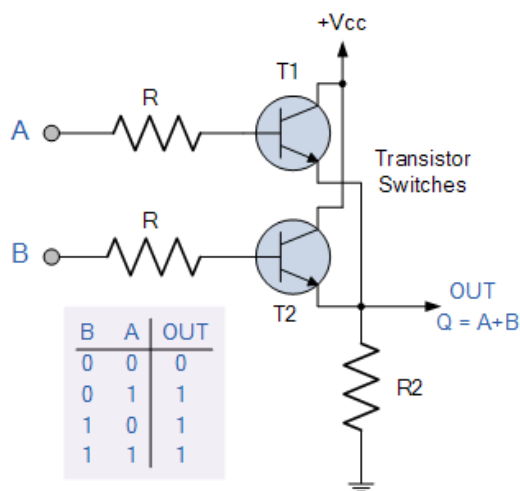
**AND** – עבור שני אירועים  $A$  ו-  $B$  אשר להם מצב בינארי 1 או 0, אמת או שקר, כאשר נרצה שפעולה תתקיים רק כאשר גם  $A$  וגם  $B$  במצב 1 נגדיר זאת  $A \& B$ . ניתן ליישם זאת באמצעות טרנזיסטור במעגל הבא:



איור (6): שער לוגי AND באמצעות טרנזיסטורים [3]

כפי שרואים בתמונה, כאשר נחבר שני טרנזיסטורי NPN בטור, רק כאשר גם  $A$  וגם  $B$  מייצרים זרם דרך הבסיס יהיה זרם במוצא. [3]

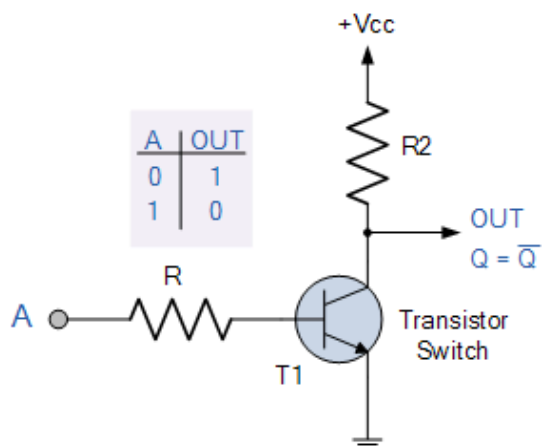
**OR** – כאשר מספיק שאחד מהמצבים הינו 1 (מכיל גם את שניהם יחד 1) נקרא לכך  $A \text{ or } B$ . כלומר, כל עוד לא מתקיים שגם  $A$  וגם  $B$  במצב 0 האירוע יתרחש. ניתן ליישם זאת במעגל עם טרנזיסטורים כך:



איור (7): שער לוגי OR באמצעות שני טרנזיסטורים [4]

כאשר נחבר שני טרנזיסטורים במקביל, דרוש כי רק אחד מהם יהיה במצב 1, כלומר מייצר זרם בבסיס וכך יהיה זרם במוצא. [4]

**NOT** – כאשר נרצה שפעולה תתקיים בתנאי ש-  $A$  במצב 0 נקרא לכך  $\text{not } A$ . ניתן ליישם זאת בעזרת טרנזיסטורים ע"י למשל:



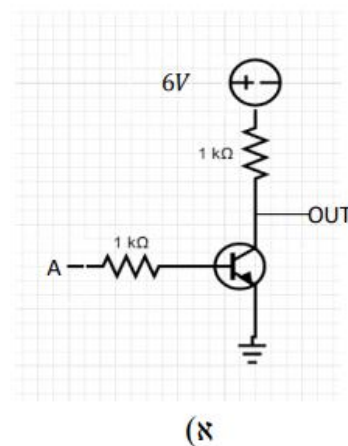
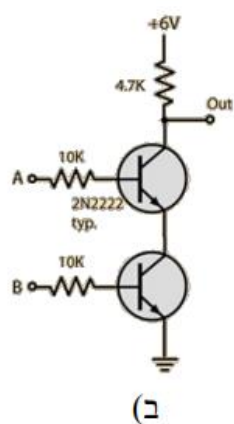
איור (8): שער לוגי NOT באמצעות טרנזיסטור [5]

כאשר  $A = 0$  לא יזרום זרם דרך הטרנזיסטור ולכן הזרם ממקור המתח  $V_{cc}$  יעבור רק דרך המוצא המסומן. כאשר המתח ב-  $A$  כן ייצור זרם בבסיס, הזרם יעבור דרך הטרנזיסטור. [5]



## 2 תשובות לשאלות הכנה:

### 2.1 שאלה 4.1:



איור (9): טרנזיסטורים במעגל חשמלי

טבלה (1): המתח שיתקבל במעגל א'

A	
0	6V
5	0V

מעגל זה מתאר שער NOT: כאשר יש 0V הטרנזיסטור לא יזרום זרם ברכיבי הטרנזיסטור ולכן הוא יהיה נתק ולכן מתח היציאה יהיה שווה למתח המקור כלומר ל6V. כמו כן, כאשר יש 5V הטרנזיסטור יהיה קצר ולכן מתח היציאה יהיה מחובר לאדמה כלומר שווה ל0V.

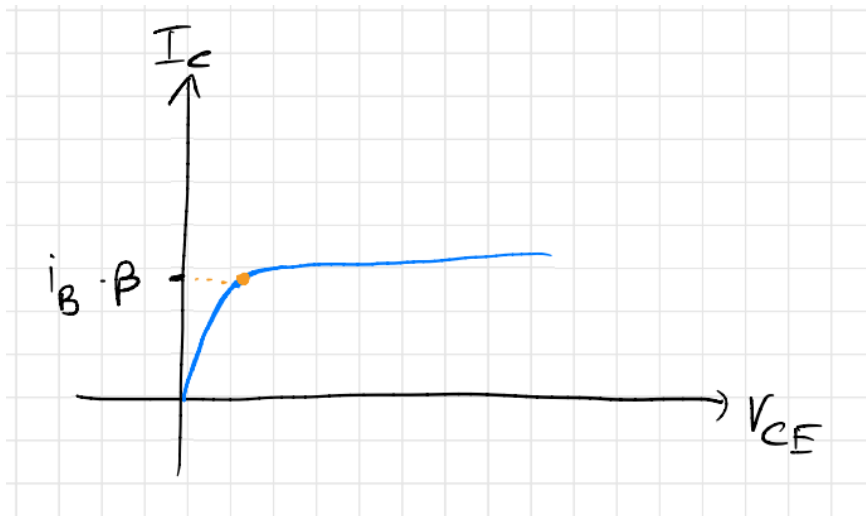
טבלה (2): המתח שיתקבל במעגל ב'

A			
B		0	5
	0	6V	6V
	5	6V	0V

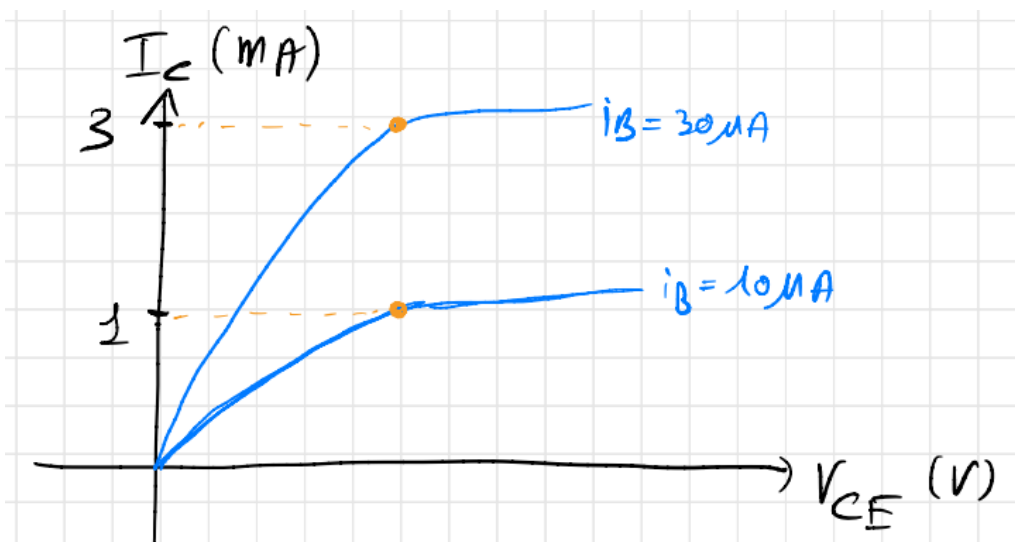
מעגל זה מתאר שער NAND: הטרנזיסטורים מחוברים בטור ולכן כאשר לפחות אחת הכניסות היא 0V הזרם מתאפס ולכן הטרנזיסטורים יהיו נתק- מתח היציאה יהיה שווה למתח המקור 6V. כמו כן, כאשר שתי הכניסות יהיו 5V נקבל כי שני הטרנזיסטורים הם קצר ולכן מתח היציאה יהיה 0V.

## 2.2 שאלה 4.2:

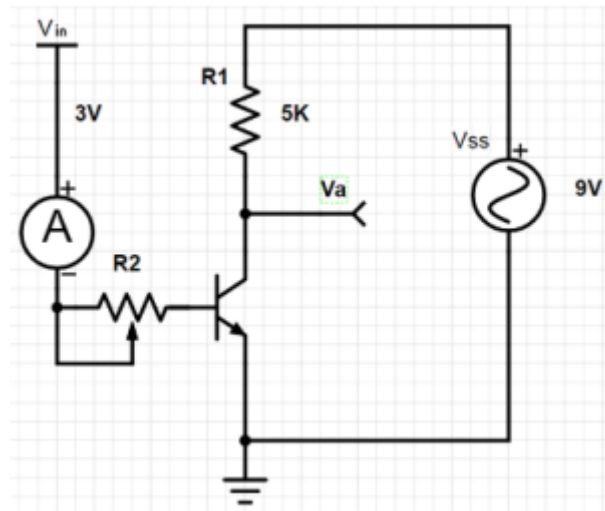
סעיף א.



סעיף ב.  $\beta = 100$ . עבור  $i_B = 100\mu A$  ו-  $i_B = 500\mu A$ :



סעיף ג. נחשב את הקשר הלינארי בין  $V_{CE}$  ל-  $i_C$ :



איור (10): מעגל התרגיל [6]

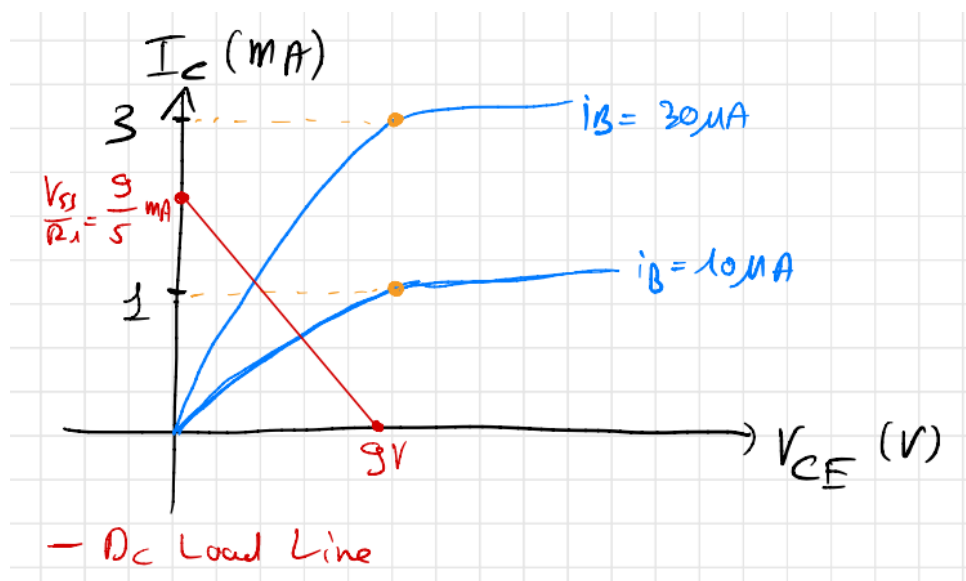
$$V_{CE} = V_a$$

$$i_C = \frac{V_{SS} - V_{CE}}{R_1} = \frac{9 - V_{CE}}{5000}$$

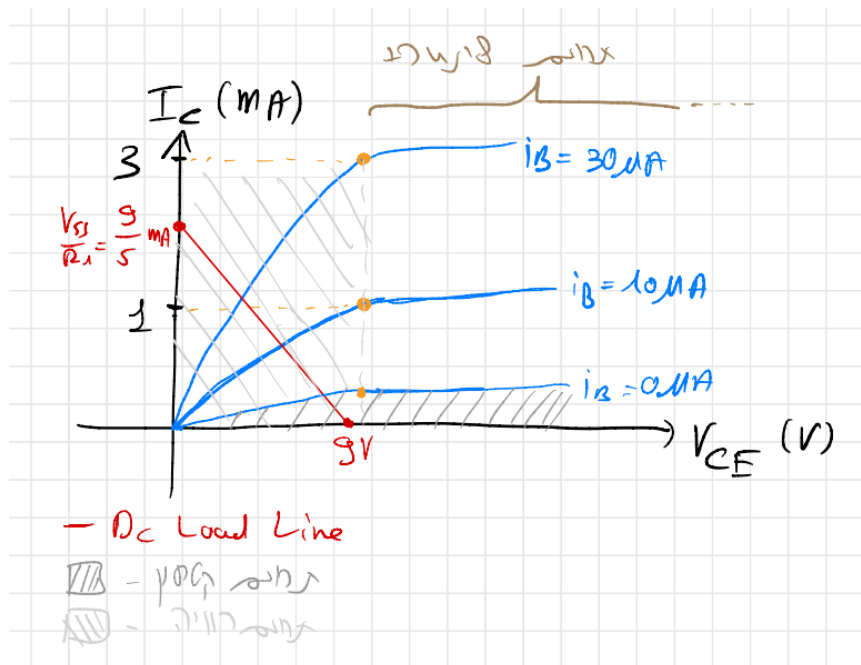
אם כך:

$$i_{C|V_{EC}=0} = \frac{9 - 0}{5000} [mA]$$

$$i_C = 0 \rightarrow \frac{9 - V_{CE}}{5000} = 0 \rightarrow V_{CE} = 9[V]$$



**סעיף ד.** בתחום הקטעון זרם הבסיס הינו 0 לכן הזרם במעגל יהיה נמוך מאוד. תחום הרוויה הינו התחום בו יש עליה לא לינארית של הזרם ביחס למתח עד שמגיעים לתחום הלינארי בו יש רוויה והזרם שם קבוע ותלוי בזרם הבסיס ובהגבר  $\beta$  כפי שציירנו בסעיף א'.



סעיף ה.

$$V_a = V_{CE}$$

$$A = i_B$$

ולכן:

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} = \frac{9 - V_a}{5000 \cdot A}$$

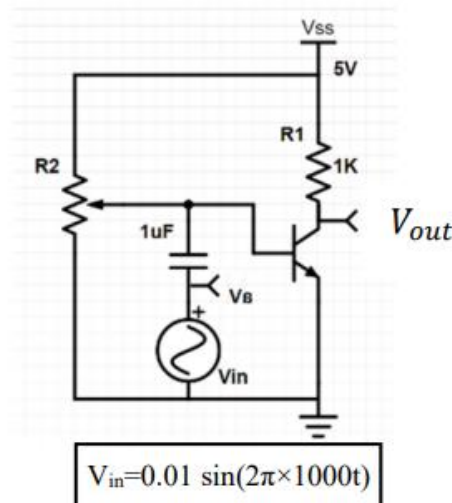
**סעיף ו.** אם נכניס זרם קטן מדי החיתוך של ה- *DC load line* עם האופיין יהיה בתחום הקטעון של האופיין שבו הזרם במוצא קטן מאוד ולא לינארי, כך שלא נוכל למצוא את נקודת העבודה. עבור זרם גדול מדי, החיתוך של קו העבודה עם האופיין יהיה בתחום הרוויה, כלומר התחום הלא לינארי של האופיין כך שגם במקרה זה לא נוכל למצוא את נקודת העבודה.

סעיף ז.

הפונקציה:

```
function [] = CurrentGain (A,Va)
% This function plots the iE - emitter current as a
function of iB - the base
% current
% Input: iB assigned as A - it's ampermeter measurement,
V_CE - the voltage
% on the collector's terminal assigned as Va - it's
voltmeter measurement
% Outplot: the plot

%circuit parameters
R1 = 5000; %[ohm]
Vss = 9; %[V]
%i_C = iE
i_C = (Vss-Va)/R1;
figure
plot(A,i_C)
xlabel('iB [A]')
ylabel('iE [A]')
title('the collector's current as a function of the base
current in a NPN BJT transistor')
```



איור (11): המעגל החשמלי

סעיף א.

$$i_c = \frac{V_{ss} - V_{out}}{R_1}$$

$$V_{out} = V_{ss} - i_c \cdot R_1$$

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{ss} - i_c \cdot R_1}{V_{in}} = \frac{5 - i_c \cdot R_1}{0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)}$$

סעיף ב.

$$i_B = (1 - \alpha) \cdot i_E, \quad i_C = \alpha \cdot i_E \rightarrow i_B = \frac{(1 - \alpha)}{\alpha} \cdot i_C = \frac{i_C}{\beta}$$

נמצא את המתח בבסיס של הטרנזיסטור בתחום העבודה הלינארי:

$$V_{BE} = 0.6 \text{ V}, V_E = 0 \text{ V} \rightarrow V_B = 0.6 \text{ V}$$

נניח שהפוטנציאומטר מחולק כך שהחלק העליון הוא בעל התנגדות  $\alpha R_2$  והחלק התחתון בעל התנגדות  $(1 - \alpha) R_2$ . בנוסף נסמן את הזרם שיוצא מהצומת של הפוטנציאומטר לבסיס ב  $i_L$ . נמצא את הזרם על הנגדים:

$$i_{\alpha R_2} = \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} \quad i_{(1-\alpha)R_2} = \frac{0.6 - 0}{(1 - \alpha) R_2}$$

$$i_{\alpha R_2} = i_{(1-\alpha)R_2} + i_L \rightarrow \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} = \frac{0.6}{(1 - \alpha) R_2} + i_L$$

$$i_L = \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} - \frac{0.6}{(1 - \alpha) R_2}$$

כמו כן, ניתן לראות כי המתח על הקבל הוא מתח המקור פחות המתח בבסיס של הטרנזיסטור ולכן:

$$i_{C_1} = C \cdot \dot{V}_C = C \cdot \frac{\partial}{\partial t} (V_{in} - 0.6) = 10^{-6} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t) - 0.6)$$

$$= 10^{-6} \cdot 0.01 \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) \cdot 2000\pi = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t)$$

סך הזרם שנכנס לבסיס הינו הזרם מצומת הפוטנציומטר והזרם מהקבל ולכן:

$$i_B = i_L + i_{C_1} = \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} - \frac{0.6}{(1 - \alpha)R_2} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) = \frac{i_c}{\beta}$$

$$i_c = \beta \cdot \left( \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} - \frac{0.6}{(1 - \alpha)R_2} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) \right)$$

נציב בנוסחה מסעיף א':

$$A = \frac{V_{ss} - i_c \cdot R_1}{V_{in}}$$

$$= \frac{V_{ss} - \beta \cdot \left( \frac{V_{ss} - 0.6}{\alpha R_2} - \frac{0.6}{(1 - \alpha)R_2} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) \right) \cdot R_1}{V_{in}}$$

$$= \frac{5 - \beta \cdot \left( \frac{5 - 0.6}{\alpha R_2} - \frac{0.6}{(1 - \alpha)R_2} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) \right) \cdot 1000}{0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)}$$

$$= \frac{5 - \beta \cdot \left( \frac{4.4 \cdot 10^3}{\alpha R_2} - \frac{0.6 \cdot 10^3}{(1 - \alpha)R_2} + 2 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot 1000t) \right)}{0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)}$$

**סעיף ג.** כאשר נצא מהתחום הלינארי הטרנזיסטור יהיה ברוויה, במצב זה לזרם הבסיס אין השפעה על הטרנזיסטור והמתח בין הקולט לפולט יהיה נמוך מאוד. [2] בשל כך, ההגבר יהיה אפס.

**סעיף ד.** מהנוסחה שקיבלנו בסעיף א':  $A = \frac{5 - i_c \cdot R_1}{0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)}$  באמצעות הנגד  $R_1$  ניתן לשלוט

על ההגבר ולהקטין או להגדיל את מתח המוצא – ככל שהתנגדותו גדלה מתח המוצא יקטן ולכן גם ההגבר. הוא משפיע על ההגבר על ידי שליטה במתח הקולקטור.

**סעיף ה.** מהנוסחה שקיבלנו בסעיף ב' ניתן לראות כי גם הנגד  $R_2$  משפיע על זרם הבסיס, ככל שהתנגדותו תגדל זרם הבסיס יקטן, בכך ניתן לקבל ערכי הגבר כרצוננו.

- [1] M. James, "Principles of Transistor Circuits: introduction to the design of amplifiers, receivers, and digital circuits / © S.W. Amos, M.R. James." Newnes, © 2000, 2000.
- [2] "קראו בבוטלר - אלקטרוניקה תקבילית וספרתית."  
<https://school.kotar.cet.ac.il/KotarApp/Viewer.aspx?nBookID=92920580#68.8471.6.default> (accessed Dec. 27, 2021).
- [3] "Logic AND Gate Tutorial with the Logic AND Gate Truth Table," *Basic Electronics Tutorials*, Aug. 20, 2013. [https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_2.html) (accessed Dec. 29, 2021).
- [4] "Logic OR Gate Tutorial with Logic OR Gate Truth Table," *Basic Electronics Tutorials*, Aug. 20, 2013. [https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic\\_3.html](https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_3.html) (accessed Dec. 29, 2021).
- [5] "Logic NOT Gate Tutorial with Logic NOT Gate Truth Table," *Basic Electronics Tutorials*, Aug. 20, 2013. [https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic\\_4.html](https://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_4.html) (accessed Dec. 29, 2021).
- [6] "פרוטוקול מעבדת חשמל הנדסה ביורפואית 2."