

# הנדסה ביו רפואית-

## מעבדה בחשמל

מגישים:

דן טורצקי

סול אמרה

תאריך:

09.01.2022

## תוכן עניינים:

1	תקציר:	3
2	ניסויים:	4
2.1	ניסוי 1:	4
2.1.1	היפותזה:	4
2.1.2	מתודולוגיה:	4
2.1.3	תוצאות:	5
2.1.4	מסקנות:	5
2.2	ניסוי 2:	6
2.2.1	היפותזה:	6
2.2.2	מתודולוגיה:	6
2.2.3	תוצאות:	7
2.2.4	מסקנות:	9
2.3	ניסוי 3:	10
2.3.1	היפותזה:	10
2.3.2	מתודולוגיה:	10
2.3.3	תוצאות:	11
2.3.4	מסקנות:	15
3	מסקנות כלליות:	17
4	מקורות:	18
5	נספחים:	19

## 1 תקציר:

בניסוי זה למדנו על שימוש בטרנזיסטור  $BJT$  כשער לוגי וכמגבר. השתמשנו בטרנזיסטור  $NPN$  המאפשר מעבר זרם בכיוון אחד (פרט לזרם זליגה קטן מאוד בכיוון ההפוך) מהדקי הקולט אל הפולט. באמצעות תכונה זו של הטרנזיסטור ע"י סידור של המעגל בצורה מתאימה, בחירת רכיבים בהתאם לתנאי שאנו מעוניינים בו ובחירת המוצא ניתן ליצור שערים לוגיים שונים. שערים לוגיים שימושיים להרבה צרכים וטרנזיסטורים מאפשרים ליישם אותם בקלות רבה. בהמשך הניסוי למדנו על תכונות ההגבר של טרנזיסטור. בניסוי השני ראינו כי על מנת למצוא את הגבר הזרם בין זרם הקולט לזרם הבסיס בצורה מדויקת דרוש למצוא את נקודת העבודה. בניסוי השלישי למדנו כי ניתן בעזרת טרנזיסטור ורכיבים חשמליים סטנדרטיים ליצור הגבר בין מתח הכניסה למתח הטרנזיסטור בסדרי גודל גדולים למשל רק ע"י שינוי של התנגדות אחד הנגדים במעגל. לסיכום, ניתן לומר כי טרנזיסטור מאפשר ליצור בצורה פשוטה יחסית פעולות של שערים לוגיים והגבר שהינן פעולות חשובות ושימושיות מאוד במערכת חשמלית.

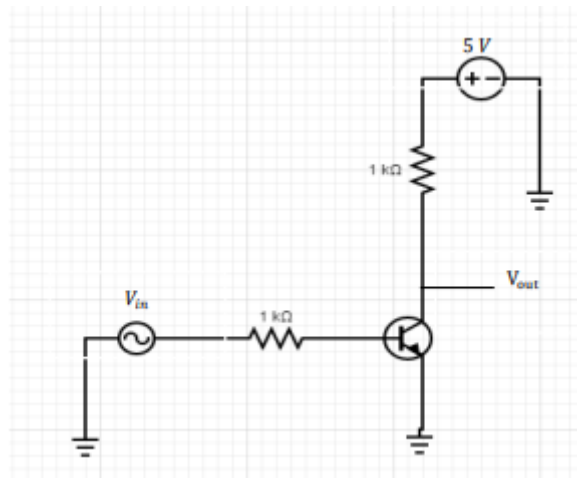
## 2 ניסויים:

### 2.1 ניסוי 1:

#### 2.1.1 היפותזה:

בהתאם לשאלה 4.1 מהדוח המכין מעגל זה מתאר שער NOT : כאשר יש 0V במתח  $V_{in}$  לא יזרום זרם ברכיבי הטרנזיסטור ולכן הוא יהיה נתק ולכן נצפה שמתח היציאה יהיה שווה למתח המקור. כמו כן, כאשר יש 5V הטרנזיסטור יהיה קצר ולכן נצפה שמתח היציאה יהיה שווה ל0V.

#### 2.1.2 מתודולוגיה:

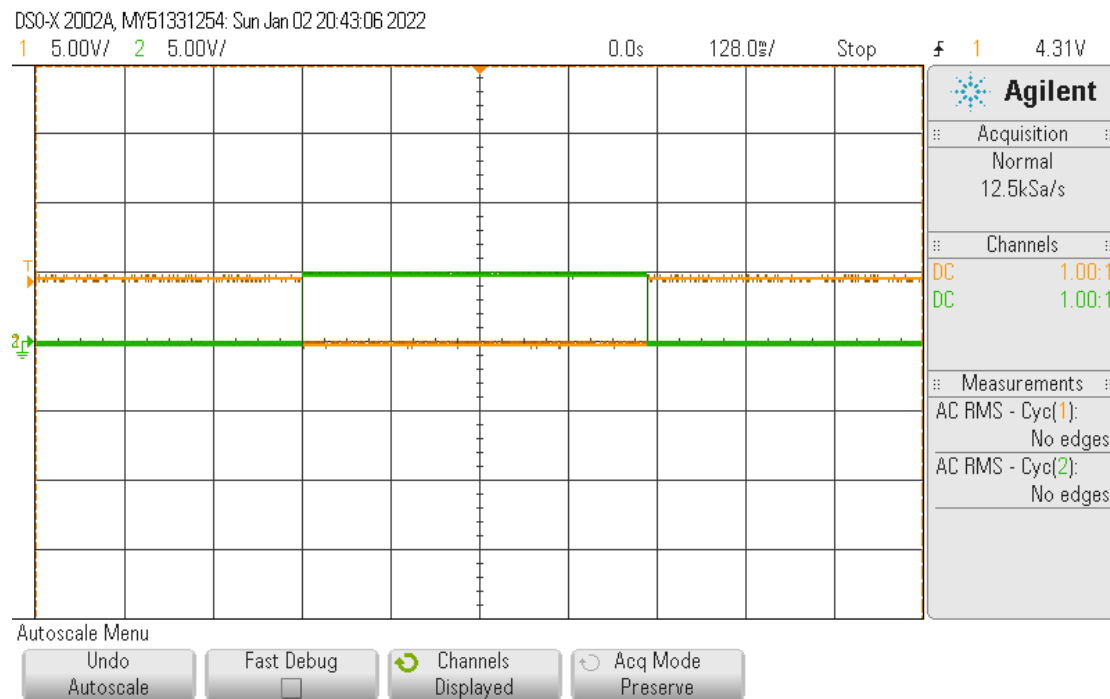


איור (1) : מעגל הניסוי [1]

**מכשור וציוד:** מחולל מתח ישר, מחולל אותות, אוסילוסקופ, טרנזיסטור, 2 נגדים, כבלי BNC-בננה, כבלי בננה-בננה.

**מהלך הניסוי:** בניסוי זה הרכבנו את המעגל המתואר באיור (1), חיברנו את מחולל המתח הישר לנגד בעל התנגדות של  $1\text{ k}\Omega$  והגדרנו את המתח במחולל זה להיות 5V. לאחר מכן חיברנו את הנגד לטרנזיסטור ולנגד נוסף בעל התנגדות של  $1\text{ k}\Omega$  המחובר בטור למחולל אותות. במחולל זה הגדרנו את אות המוצא להיות ריבועי עם אמפליטודה של 5V, הזזה של 2.5V ותדירות 1 Hz. מדדנו בעזרת האוסילוסקופ את אות המתח על הטרנזיסטור ואת מתח הכניסה מתוך המחולל אותות בעל המתח הריבועי. שמרנו תמונה של האותות שנמדדו.

### 2.1.3 תוצאות:



איור (2): המתחים שנמדדו בעזרת האוסילוסקופ

### 2.1.4 מסקנות:

כפי שניתן לראות באיור (2) מתח הכניסה של מחולל האותות מסומן בצהוב והמתח על הטרנזיסטור בירוק. כפי שציפינו קיבלנו אופיין מתח המתאר שער NOT: כאשר מתח הכניסה 5V המתח על הטרנזיסטור מתאפס וכאשר מתח הכניסה 0V המתח על הטרנזיסטור כ-5V. כמו כן, ניתן לראות כי המתח של הטרנזיסטור לא שווה במדויק ל-5V וניתן להסיק כי זה נובע מהזרם זליגה או מאי אידאליות של הרכיבים במעגל.

## 2.2 ניסוי 2:

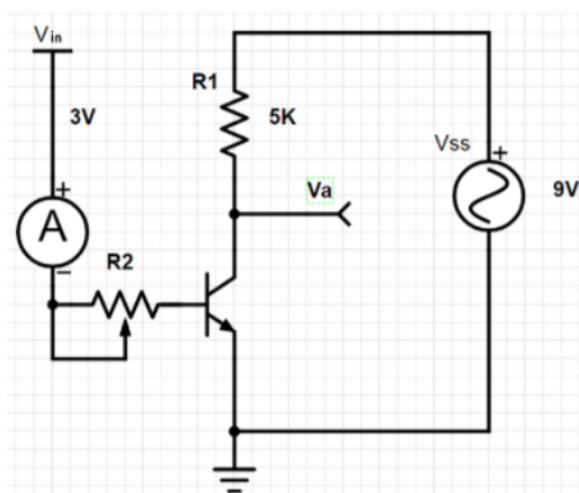
### 2.2.1 היפותזה:

בניסוי זה נשתמש במדידות של מתח טרנזיסטור  $BJT$  וזרם הבסיס כדי להעריך את הגבר הזרם -  $\beta = \frac{i_c}{i_b}$ . לטרנזיסטור ישנו אופיין מתח זרם שאינו ליניארי אך במעגל ישנם רכיבים לינאריים. כאשר נחשב את ההגבר נשתמש במדידות הן על הרכיב הלא ליניארי (מתח הטרנזיסטור) והן מדידות על רכיב ליניארי (זרם הבסיס שעובר דרך נגד ליניארי). אם כך, ההגבר המדויק ביותר יתקבל סביב נקודת העבודה של המעגל. כיוון שאנחנו לא יודעים מה נקודת העבודה, נבצע מדידות בתחום רחב ביחס לסביבת העבודה שיובילו בהכרח לתוצאה לא מדויקת, אך נוכל לבדוק באיזה סביבה המדידה מדויקת ביותר וזו הסביבה של נקודת העבודה כך שנקבל הגבר שתואם לערכים ספרותיים. כל זאת תחת ההנחה שלפחות חלק מהמדידות יתבצעו סביב נקודת העבודה, אחרת נצפה להגבר לא מדויק.

### 2.2.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחולל אותות, מחולל מתח ישר, טרנזיסטור  $BJT$ , נגד, פוטנציומטר, רב מודד, כבלי BNC – בננה, כבלי בננה-בננה.

**מהלך הניסוי:** הרכבנו מעגל כפי שמופיע באיור הבא:



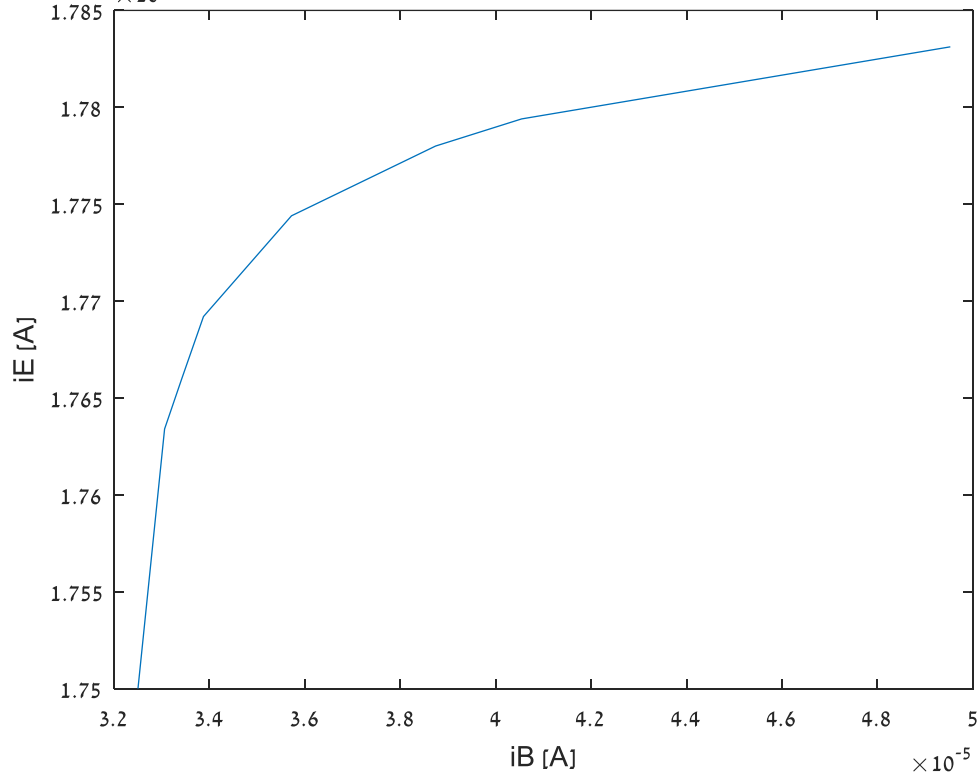
איור (3): מעגל חשמלי עבור ניסוי 2 [1]

הגדרנו את מתח ה-DC להיות 3V, ואת כניסת ה-AC לאות עם אמפליטודה של 20mV והסט DC של 9V. ביצענו מדידות של המתח הממוצע על הטרנזיסטור והזרם בבסיס, כאשר בעזרת הפוטנציומטר שינינו את הזרם בבסיס בטווח -50μA – 32μA.

### 2.2.3 תוצאות:

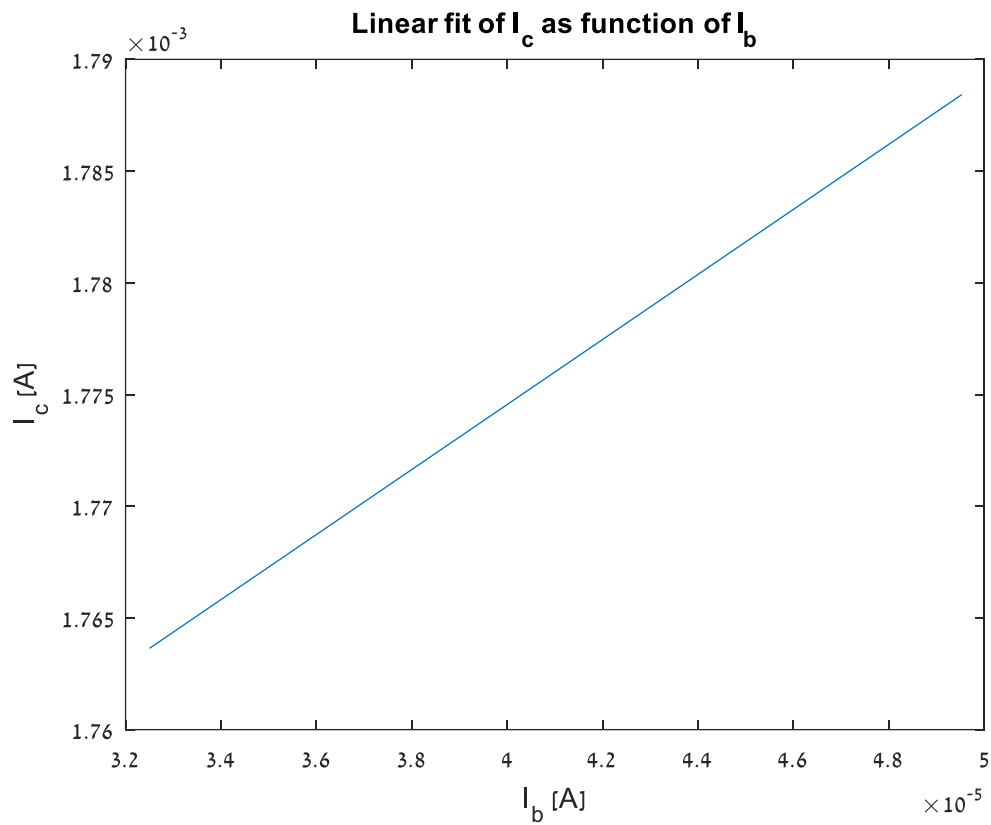
גרף של  $I_c$  כפונקציה של  $I_b$  עבור המדידות שביצענו:

the collector's current as a function of the base current in a NPN BPJ transisto



איור (4): גרף של זרם הקולקטור כפונקציה של זרם הבסיס

התאמה לינארית של  $I_c$  ו-  $I_b$ :



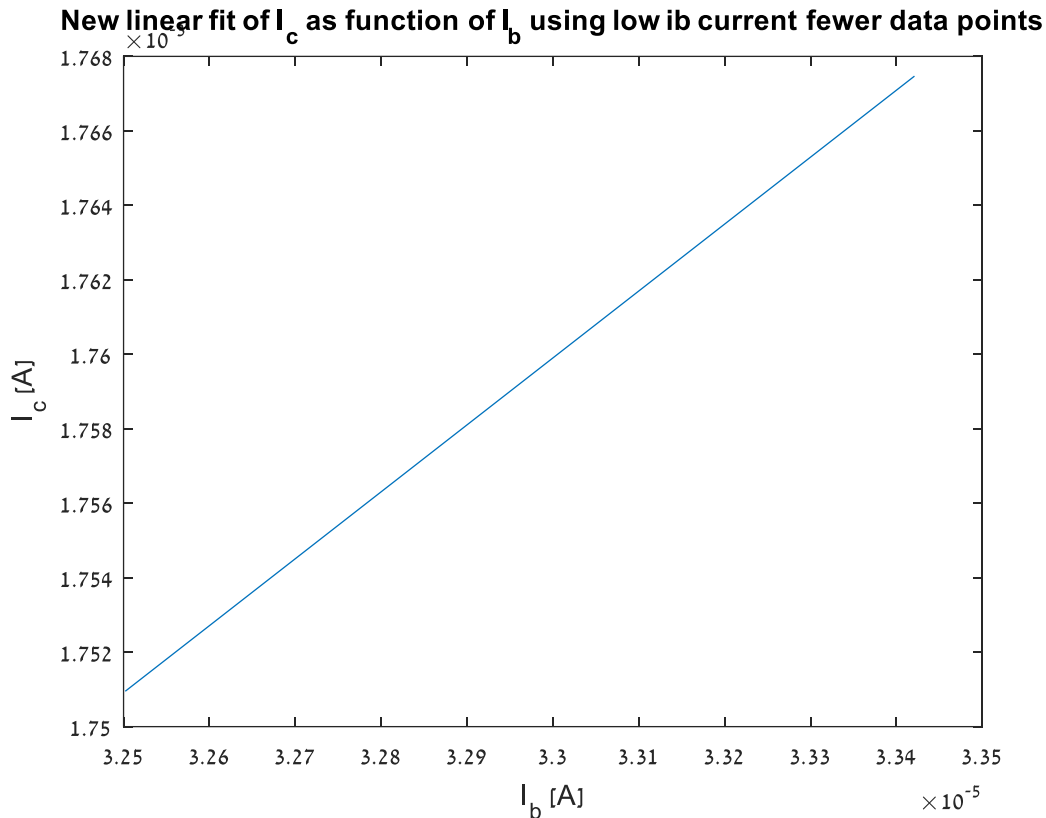
איור (5): גרף התאמה לינארית של זרם הבסיס וזרם הקולקטור

כיוון ש-  $\beta = \frac{I_c}{I_b}$  עבור התאמה לינארית ניתן לחלץ את  $\beta$  באמצעות שיפוע הגרף:

$$\beta_1 = 1.45$$

מאיור (4) – ניתן לראות בגרף כי בזרמים הנמוכים ישנה התנהגות יותר לינארית ועל כן נשתמש במדידות עבור זרמים נמוכים לביצוע התאמה לינארית, ונקבל:





איור (6): גרף התאמה לינארית של זרם הבסיס וזרם הקולקטור ע"י שימוש בשלושת המדידות הראשונות של המתח והזרם

עבור התאמה לינארית זו נקבל כי  $\beta$  הינו:

$$\beta_2 = 17.92$$

אם נשתמש רק במדידה הראשונה שביצענו, כלומר בזרם הבסיס הנמוך ביותר נקבל:

$$\beta = \frac{9 - V_a}{5000 \cdot A} = \frac{9 - 0.25}{5000 \cdot 3.25 \cdot 10^{-5}} = 53.85$$

#### 2.2.4 מסקנות:

באיור (4) ניתן לראות כי עבור זרמי הבסיס הנמוכים ישנה התנהגות לינארית וככל שזרם הגדל בסיס כך זרם הקולקטור מתקרב לרוויה. ככל שהשתמשנו לחישוב הקבוע  $\beta$  במדידות של זרמי בסיס נמוכים יותר כך הקבוע שקיבלנו קרוב יותר לערך הספרותי שהוא בסדרי גודל של 100-50. כיוון שאת הקבוע  $\beta$  חילצנו גם באמצעות המדידות של מתח הטרנזיסטור – שאופיין המתח זרם שלו אינו לינארי וגם באמצעות חוקי קירכהוף הכופים התנהגות לינארית, ככל שנשתמש במדידה הקרובה יותר לנקודת העבודה של המערכת כך נקבל תוצאה מדויקת יותר. אם כך, ניתן להסיק כי נקודת העבודה של המעגל שהרכבנו מתקבלת בזרמי בסיס נמוכים, אך אין זה אומר כי בצורה אופיינית קבוע  $\beta$  מדויק יותר עבור מדידות בעזרת זרמים נמוכים או כי נקודת העבודה תתקבל עבור זרמי בסיס נמוכים.

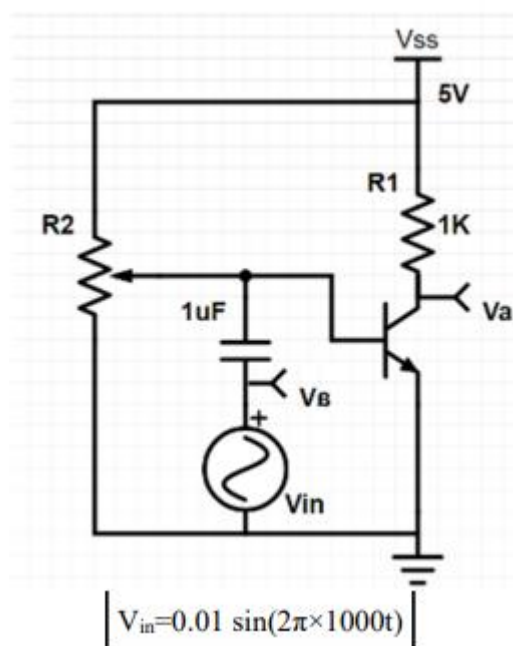
## 2.3 ניסוי 3:

### 2.3.1 היפותזה:

בדוח המכים קיבלנו את הנוסחה הבאה עבור ההגבר:  $A = \frac{5 - i_c \cdot R_1}{0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)}$ . בשל כך נצפה

שככל שהתנגדות הנגד  $R_1$  תגדל ההגבר יקטן.

### 2.3.2 מתודולוגיה:



איור (7): מעגל הניסוי [1]

**מכשור וציוד:** מחולל מתח ישר, מחולל אותות, אוסילוסקופ, טרנזיסטור, נגד, פוטנציומטר, קבל, כבלי BNC-בננה, כבלי בננה-בננה.

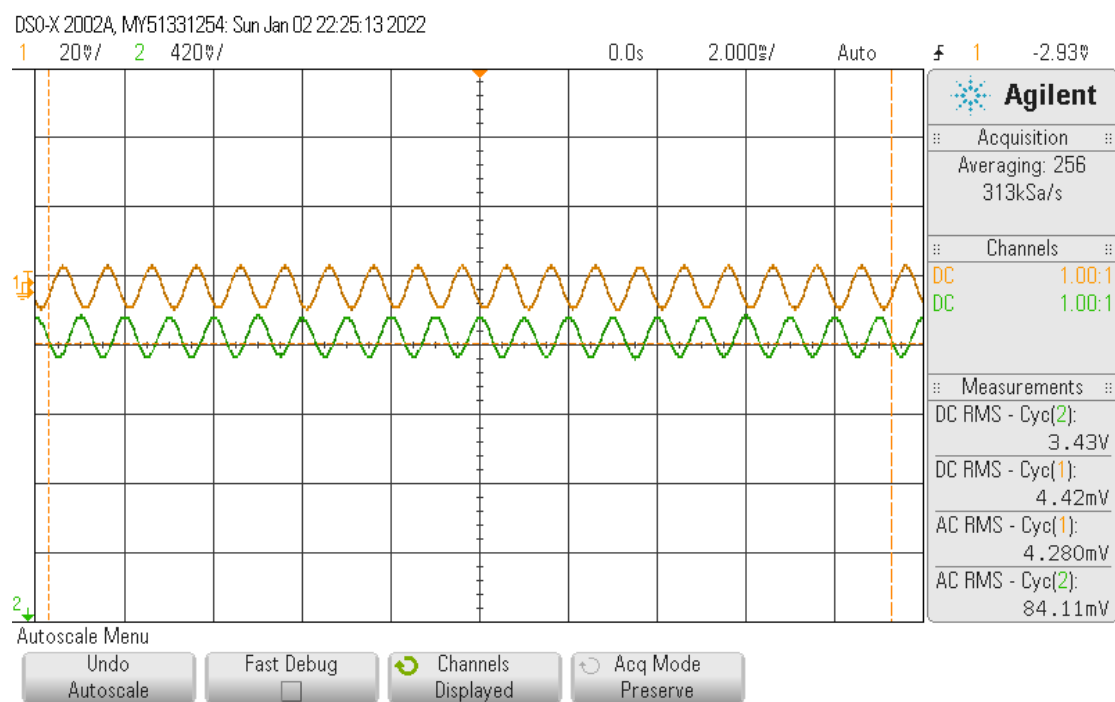
**מהלך הניסוי:** חיברנו את המעגל המתואר באיור (7) כאשר  $V_{ss}$  הינו המחולל מתח ישר בו הגדרנו מתח של 5V. את מחולל המתח הישר חיברנו אל נגד בעל ערך התנגדות של  $1 k\Omega$  ואל הפוטנציומטר. את הנגד חיברנו לטרנזיסטור ואת בסיס הטרנזיסטור חיברנו במקביל לפוטנציומטר ולקבל שמחובר בטור למחולל אותות. הגדרנו במחולל אותות את המתח כניסה להיות סינוסדיאלי עם אמפליטודה של  $0.01V$  ותדירות  $1000 Hz$ . לאחר מכן, חיברנו את האוסילוסקופ כך שמוצא 1 ימדוד את המתח של מחולל האותות ומוצא 2 ימדוד את המתח על הטרנזיסטור. שמרנו תמונה ואת ערכי ה  $AC$  ו  $DC$  של המתחים. לאחר מכן חזרנו על פעולות אלו עבור ערכי התנגדות שונים  $100 \Omega, 10 k\Omega, 100 k\Omega$ . כמו כן, עבור התנגדות של  $1 k\Omega$  שינינו את התדירות של מתח הכניסה  $10 Hz$  ושמרנו את התמונה שהציג האוסילוסקופ.

### 2.3.3 תוצאות:

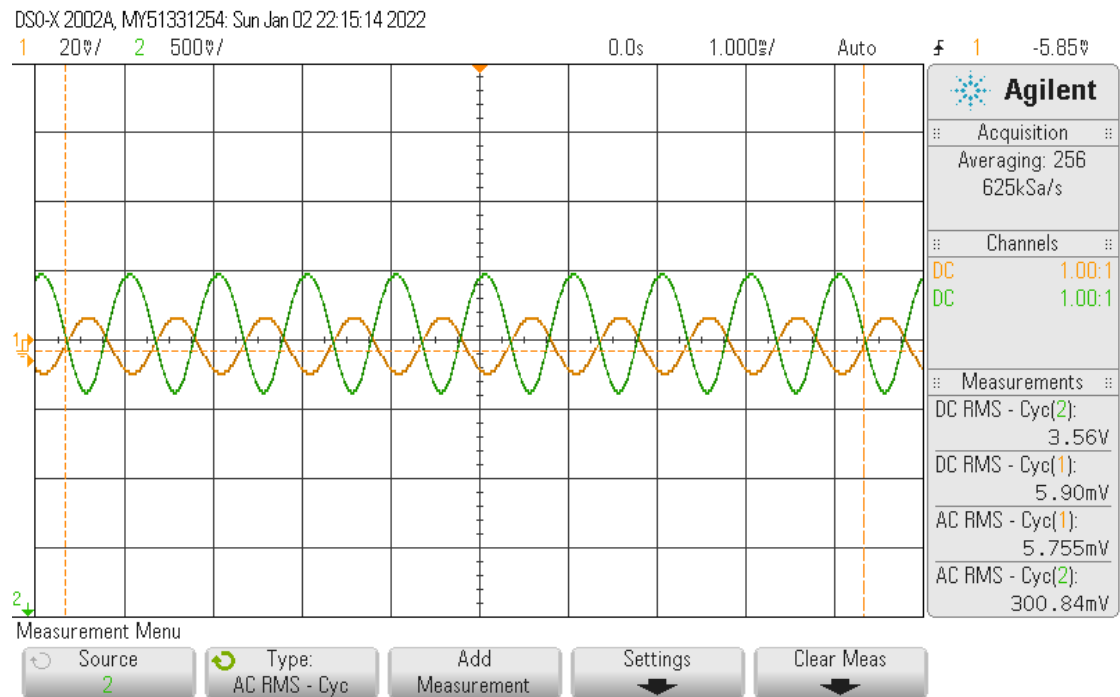
התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלה הבאה:

טבלה (1): מדידות המתחים שקיבלנו עבור ערכי התנגדויות שונים

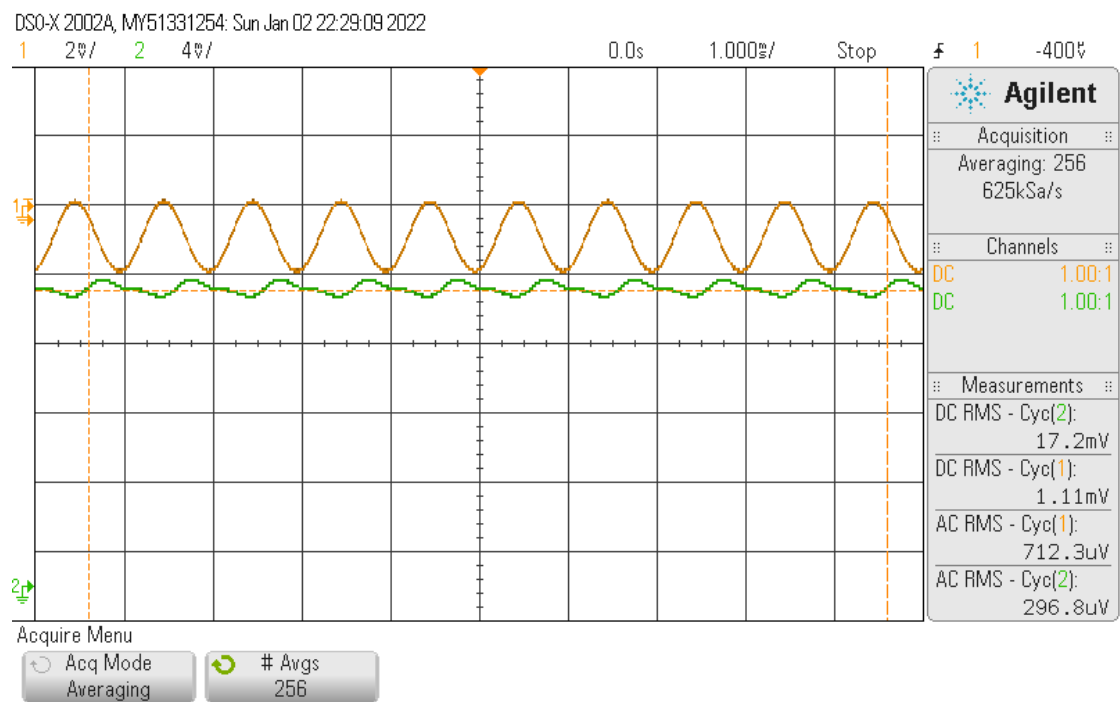
$V_{out,DC}$ [V]	$V_{in,DC}$ [V]	$V_{out,AC}$ [V]	$V_{in,AC}$ [V]	התנגדות R1[Ohm]
3.41	$4.71 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^{-1}$	$4.46 \cdot 10^{-3}$	100
3.57	$5.88 \cdot 10^{-3}$	$2.91 \cdot 10^{-1}$	$5.74 \cdot 10^{-3}$	1k
$1.72 \cdot 10^{-2}$	$1.11 \cdot 10^{-3}$	$2.97 \cdot 10^{-4}$	$7.12 \cdot 10^{-4}$	10k
$5.37 \cdot 10^{-6}$	$2.09 \cdot 10^{-3}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$	$2.12 \cdot 10^{-3}$	100k



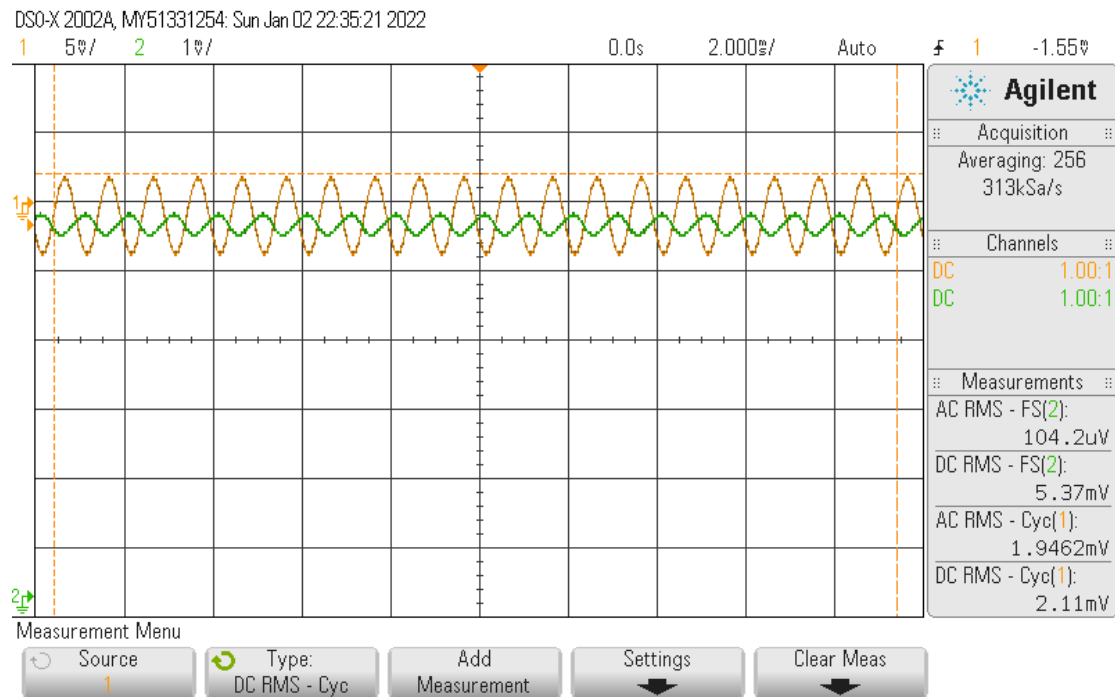
איור (8): מתח המוצא והכניסה שהציג האוסילוסקופ עבור גוד בעל התנגדות של  $100 \Omega$



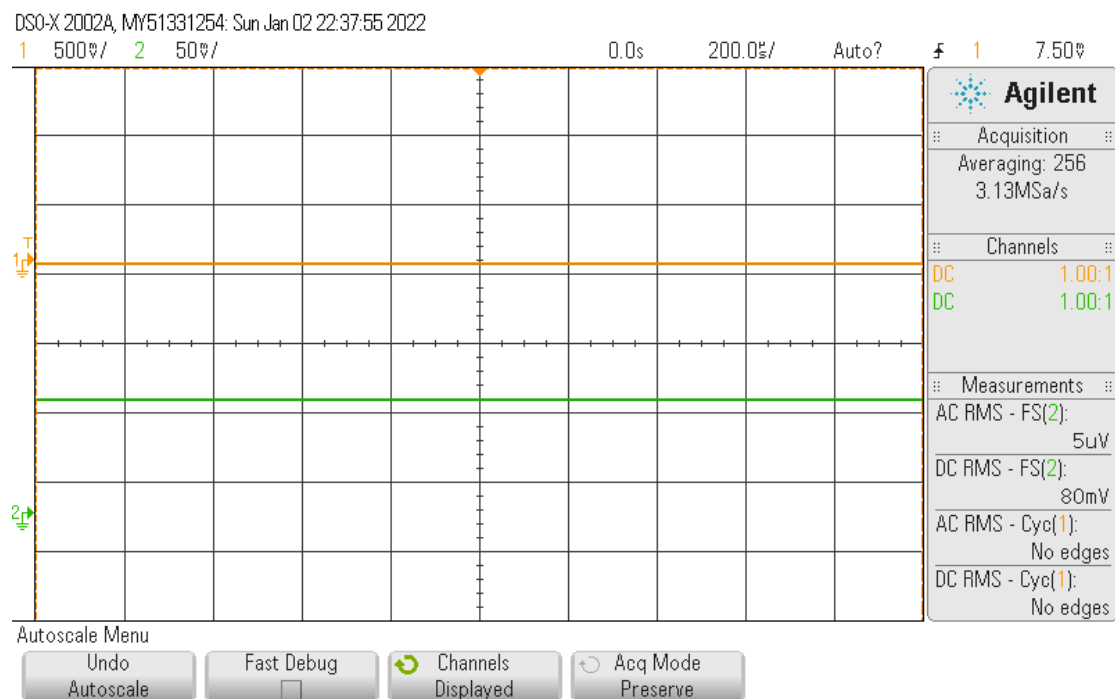
איור (9): מתח המוצא והכניסה שהציג האוסילוסקופ עבור נגד בעל התנגדות של  $1\text{ k}\Omega$



איור (10): מתח המוצא והכניסה שהציג האוסילוסקופ עבור נגד בעל התנגדות של  $10\text{ k}\Omega$



איור (11): מתח המוצא והכניסה שהציג האוסילוסקופ עבור נגד בעל התנגדות של  $100\text{ k}\Omega$



איור (12): מתח המוצא והכניסה שהציג האוסילוסקופ עבור נגד בעל התנגדות של  $1\text{ k}\Omega$  ותדירות  $10\text{ Hz}$

מתוך טבלה (1) נחשב את ערך ההגבר:

$$V = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{V_{AC}^2 + V_{DC}^2}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\sqrt{V_{out,AC}^2 + V_{out,DC}^2}}{\sqrt{V_{in,AC}^2 + V_{in,DC}^2}}$$

טבלה (2): חישובי ההגבר והשוואה לתוצאות מניסוי 2.2

התנגדות	$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\sqrt{V_{out,AC}^2 + V_{out,DC}^2}}{\sqrt{V_{in,AC}^2 + V_{in,DC}^2}}$
100 $\Omega$	$\frac{\sqrt{(1.24 \cdot 10^{-1})^2 + (3.41)^2}}{\sqrt{(4.46 \cdot 10^{-3})^2 + (4.71 \cdot 10^{-3})^2}} = 526.05$
1 k $\Omega$	$\frac{\sqrt{(2.91 \cdot 10^{-1})^2 + (3.57)^2}}{\sqrt{(5.74 \cdot 10^{-3})^2 + (5.88 \cdot 10^{-3})^2}} = 435.90$
10 k $\Omega$	$\frac{\sqrt{(2.97 \cdot 10^{-4})^2 + (1.72 \cdot 10^{-2})^2}}{\sqrt{(7.12 \cdot 10^{-4})^2 + (1.11 \cdot 10^{-3})^2}} = 13.05$
100 k $\Omega$	$\frac{\sqrt{(1.20 \cdot 10^{-4})^2 + (5.37 \cdot 10^{-6})^2}}{\sqrt{(2.12 \cdot 10^{-3})^2 + (2.09 \cdot 10^{-3})^2}} = 0.04$

נחשב את ערך  $\alpha$  עבור ערך  $\beta$  שמצאנו בניסוי 2.2:  $\beta = 53.85$  ועבור הערכים הבאים:

$$R_2 = 7 \text{ k}\Omega, \cos(2\pi \cdot 1000t) \cong \frac{1}{\sqrt{2}}, \sin(2\pi \cdot 1000t) \cong \frac{1}{\sqrt{2}}$$

באמצעות הנוסחה שמצאנו בדוח המכין:

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

$$= \frac{5 - 53.85 \cdot \left( \frac{4.4 \cdot 10^3}{\alpha \cdot 7000} - \frac{0.6 \cdot 10^3}{(1 - \alpha) \cdot 7000} + 2 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)}{0.01 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}} =$$

$$= \frac{5 - 53.85 \cdot \left( \frac{22}{35\alpha} - \frac{3}{(1 - \alpha) \cdot 35} + 0.04443 \right)}{0.01 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}}$$

נשווה ביטוי זה לערך ההגבה שמצאנו עבור נגד בעל התנגדות של 1 k $\Omega$

$$435.90 = \frac{5 - 53.85 \cdot \left( \frac{22}{35\alpha} - \frac{3}{(1-\alpha) \cdot 35} + 0.04443 \right)}{0.01 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}}$$

$$-0.3086 = \frac{22}{\alpha} - \frac{3}{(1-\alpha)} \rightarrow \alpha_1 = 0.8813 \quad \alpha_2 = -80.8878$$

ראינו כי ערכי  $\alpha$  הינם בין 0 ל-1 ולכן:  $\alpha_1 = 0.8813$ .

### 2.3.4 מסקנות:

מטבלה (2) ניתן לראות כי ככל שההתנגדות גדלה קיבלנו הגבר נמוך יותר. בדומה למסקנה מהחישוב התאורטי בדוח המכין ככל שההתנגדות גדלה מתח המוצא יקטן ולכן גם ההגבר. כלומר על ידי שינוי ערכי ההתנגדות של נגד זה ניתן להשפיע על ההגבר על ידי שליטה במתח הקולקטור. מאיור (12) ניתן לראות כי עבור תדירות של  $10 \text{ Hz}$  קיבלנו גרף לינארי כיוון שערך תדירות זה נמוך מאוד ובאוסילוסקופ לא ניתן להבחין בתנודות הקטנות האלו. כמו כן, ניתן להבחין כי הזרם שנכנס לבסיס תלוי בקבל כך:  $i_{C1} = C \cdot \dot{V}_C = C \cdot \frac{\partial}{\partial t} (V_{in} - 0.6)$ . בדוח המכין קיבלנו את הנוסחאות הבאות:

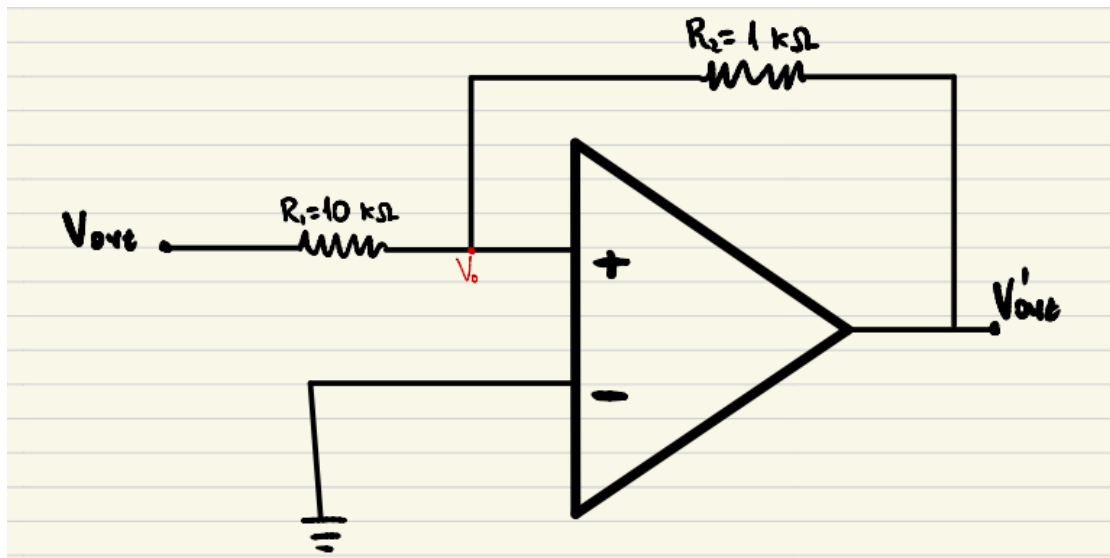
$$i_B = i_L + i_{C1} = \frac{i_C}{\beta} \rightarrow i_C = \beta(i_L + C \cdot \dot{V}_C)$$

$$A = \frac{V_{ss} - i_C \cdot R_1}{V_{in}} = \frac{V_{ss} - R_1 \cdot \beta(i_L + C \cdot \dot{V}_C)}{V_{in}}$$

ומנוסחה זו ניתן לראות כי הקבל משפיע גם על הגבר המעגל.

עבור כניסה נמוכה פי 10,  $A = \frac{V_{ss} - i_C \cdot R_1}{\frac{V_{in}}{10}} = 10 \cdot \frac{V_{ss} - i_C \cdot R_1}{V_{in}}$ . על מנת לשמור על ההגבר נציע להוסיף

מגבר שרת כך ש  $V_{out}$  הינו מוצא המעגל.



איור (13) : מגבר שרת

נסמן את המתח בכניסה למגבר ב  $V_0$  עבור מגבר אידאלי המתח בכניסה החיובית שווה למתח

בכניסה השלילית ולכן  $V_0 = 0\text{ V}$  והזרם דרך הגוד  $R_1$  שווה לזרם דרך הגוד  $R_2$  :

$$\frac{V_{out} - 0}{R_1} = \frac{0 - V_{out}'}{R_2} \rightarrow V_{out}' = -V_{out} \cdot \frac{R_2}{R_1} = -\frac{V_{out}}{10}$$

$$A = \frac{V_{out}'}{V_{in}} = 10 \cdot \frac{V_{out}'}{V_{in}} = \frac{10 \cdot -\frac{V_{out}}{10}}{V_{in}} = -\frac{V_{out}}{V_{in}}$$

כלומר קיבלנו הגבר זהה.



בניסוי זה למדנו על טרנזיסטורי  $BJT$  ובפרט על טרנזיסטור  $NPN$ . למדנו כיצד ניתן להשתמש בטרנזיסטור כשער לוגי וכמגבר. בניסוי 1 הרכבנו מעגל כך שביחס למוצא שהגדרנו המעגל מהווה שער לוגי  $NOT$ , ע"י שימוש בתכונת טרנזיסטור  $NPN$  שמאפשר זרם (פרט לזרם זליגה נמוך מאוד) רק מכיוון הקולט לפולט. הצורה הפשוטה בה ניתן לייצר שער לוגי באמצעות טרנזיסטור (או מספר טרנזיסטורים), בשילוב רכיבי מעגל בסיסיים הינה שימושית מאוד. בניסוי 2 ו-3 למדנו על איך טרנזיסטור יוצר הגבר. בניסוי 2 למדנו על פקטור ההגבר  $\beta = \frac{i_c}{i_b}$ , כלומר ההגבר בין זרם הקולקטור לזרם הבסיס. ראינו שכאשר אנחנו רוצים לחשב את הגבר זה, עלינו לבחור בטווח ערכים מסוים מתוך המדידות. טווח זה הינו סביבת העבודה של המעגל – כיוון שבמעגל יש רכיבים לא לינאריים וגם לינאריים, כאשר נרצה להשתמש במידע שנובע הן ממדידות של רכיבים לא לינאריים והן של רכיבים לינאריים נצטרך למצוא את הסביבה בה מתקיימים שני ההקשרים שהינה סביבת העבודה. במעגל שהשתמשנו בו בניסוי זה סביבת העבודה התקבלה בתחום הלינארי של אופיין ההגבר אך לדעתנו לא ניתן להסיק מכך שנקודת העבודה בהכרח מתקבלת בתחום זה בכל מעגל בעל הרכב דומה. בניסוי 3 ראינו שבעזרת שליטה ברכיבי המעגל, ובמקרה שלנו בנגד ניתן לשלוט בהגבר כך שההגבר גדול או קטן במספר סדרי גודל. במעגל שבו השתמשנו ככל שההתנגדות הנגד  $R_1$  גדלה בין  $100\Omega$  ל  $100k\Omega$  ההגבר השתנה מלהיות גדול בשלושה סדרי גודל לקטן בשלושה סדרי גודל.

“פרוטוקול מעבדת חשמל הנדסה ביורפואית 2” [1]

```

%%
%2.a
data = readtable('current.xlsx');
va = data.Va;
ib = data.Ib;
CurrentGain(ib,va);

%%
%2.b
ic = (9-va)/5000;
fit = polyfit(ib,ic,1);
ic_lin = polyval(fit,ib);
figure
plot(ib,ic_lin)
xlabel('I_b [A]')
ylabel('I_c [A]')
title('Linear fit of I_c as function of I_b')

%new linear fits using low ib current data
ic_new = ic([1 2 3]);
ib_new = ib([1 2 3]);
fit2 = polyfit(ib_new,ic_new,1);
ic_n_lin = polyval(fit2,ib_new);
figure
plot(ib_new,ic_n_lin)
xlabel('I_b [A]')
ylabel('I_c [A]')
title('New linear fit of I_c as function of I_b using low ib current
fewer data points')

```