

# מעבדה בחשמל הנדסה

## ביו-רפואית

מגשים:

דן טורצקי

סול אמארה

תאריך:

23.12.2021

## 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:        | 7  |
| 2.2   | ניסוי 2:       | 8  |
| 2.2.1 | היפותזה:       | 8  |
| 2.2.2 | מתודולוגיה:    | 8  |
| 2.2.3 | תוצאות:        | 9  |
| 2.2.4 | מסקנות:        | 11 |
| 2.3   | ניסוי 3:       | 12 |
| 2.3.1 | היפותזה:       | 12 |
| 2.3.2 | מתודולוגיה:    | 12 |
| 2.3.3 | תוצאות:        | 13 |
| 2.3.4 | מסקנות:        | 18 |
| 2.4   | ניסוי 4:       | 19 |
| 2.4.1 | היפותזה:       | 19 |
| 2.4.2 | מתודולוגיה:    | 19 |
| 2.4.3 | תוצאות:        | 20 |
| 2.4.4 | מסקנות:        | 30 |
| 3     | מסקנות כלליות: | 31 |
| 4     | מקורות:        | 32 |
| 5     | נספחים:        | 33 |

## 1 תקציר:

למטרות רבות דרוש כי המתח על העומס יהיה מתח  $DC$ . מעגל בו מקור האנרגיה הינו מקור  $AC$  אך על העומס יש מתח/זרם  $DC$  נקרא מעגל יישור. כשמו כן הוא – מעגל המיישר את מתח הכניסה הסינוסי למתח ישר על המוצא. ישנם סוגים שונים של מעגלי יישור. בניסוי זה נעסוק במיישרים הבאים: מעגל יישור חד-דרכי ללא סינון ועם מסנן קבל, מעגל יישור דו-דרכי בלי מסנן, עם מסנן קבל, עם מסנן השראותי ועם מסנן גם קיבולי וגם השראותי. ע"י שינוי בפרמטר מסוים תוך שמירת שאר הפרמטרים קבועים נלמד איך הפרמטרים השונים משפיעים על המיישרים השונים ואיך המיישרים השונים פועלים. הפרמטרים אותם נשנה הינם כניסת המתח, התנגדות העומס, קיבול והשראות הקבל והסליל המסננים בהתאמה. מהניסוי למדנו כי מעגלי יישור שונים מתאימים למעגלים שונים. למשל, מיישר דו-דרכי עם מסנן קיבולי מתאים לעומס עם התנגדות גבוהה ומסנן דו דרכי עם מסנן השראותי מתאים לעומס עם התנגדות נמוכה. כמו כן, ראינו כי לעומת עבודה תאורטית עם מקור אידאלי ודיודה אידאלית, במעבדה חוסר האידאליות של המקור והדיודה יכולים להשפיע על התוצאות הנמדדות ויש לשים לב להשפעה זו על התוצאות. על פניו נראה כי מיישר דו-דרכי עם מסנן קיבולי והשראותי מאפשר את היישור הטוב ביותר בטווח התנגדויות רחב, אך יש לזכור כי ישנו tradeoff מסוים בין כמה המתח במוצא ישר למתח האפקטיבי שנופל על העומס.

## 2 ניסויים:

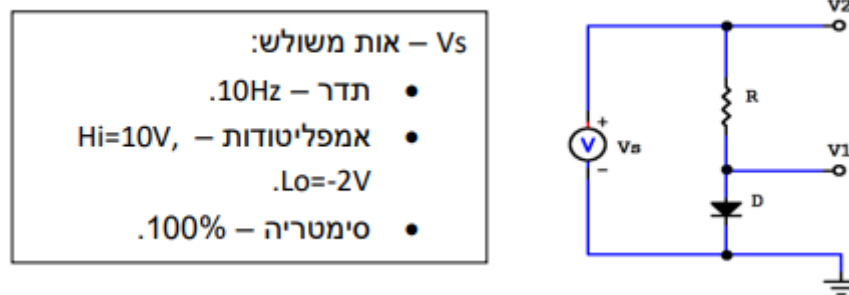
### 2.1 ניסוי 1:

#### 2.1.1 היפותזה:

בניסוי זה נמדוד את מתח הדיודה ומתח המקור במעגל יישור חד דרכי עם מתח מקור של אות משולש. נצפה שכאשר מתח המקור יהיה קטן ממתח הפריצה של דיודה, המתח הנמדד במוצא 1 יהיה שווה למתח המקור כיוון שעבור ערכי מתח אלה הדיודה מתנהגת כנתק ואין זרם במעגל. כמו כן, כאשר מתח המקור יהיה גדול ממתח הפריצה נצפה שהדיודה תשאף להתנהג כקצר ושהמתח שנמדוד במוצא 1 ישאף לאפס.

#### 2.1.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחולל אותות, אוסילוסקופ, נגד, דיודה, 3 כבלי BNC-בננה, 2 כבלי בננה-בננה.  
**מהלך הניסוי:**

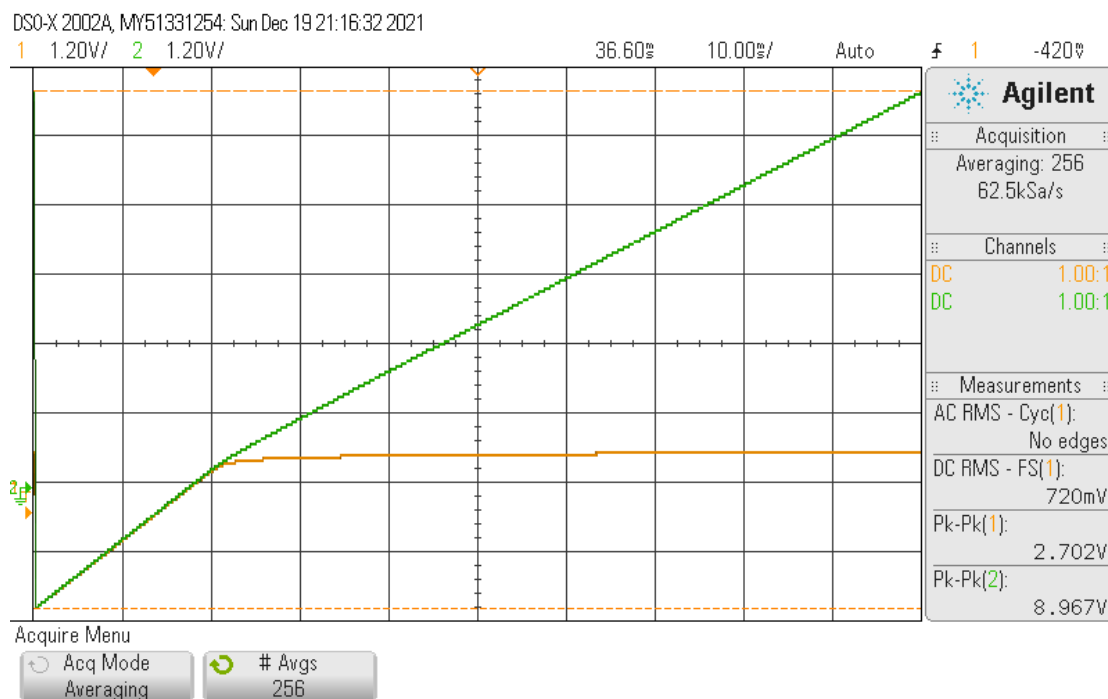


איור (1): מעגל יישור חד-דרכי [1]

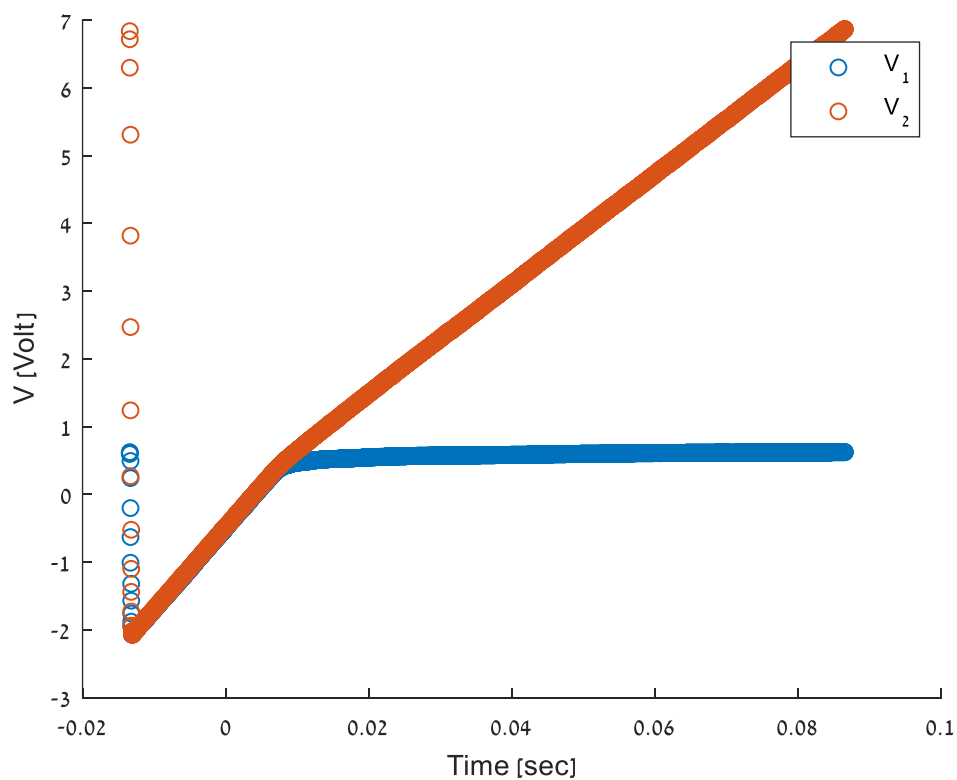
בניסוי זה חיברנו באמצעות כבל BNC-בננה את מחולל האותות (המקור) אל נגד בעל התנגדות של  $100\ \Omega$  ודיודה שמחוברים בטור באמצעות כבל בננה-בננה. הגדרנו את אות המוצא להיות אות משולש בתדר 10 Hz כך שהאמפליטודה המקסימלית שלו היא 10 V והמינימלית 2 V-. בנוסף, חיברנו את האוסילוסקופ באמצעות כבלי BNC-בננה כך שהמוצא הראשון ימדוד את המתח על הדיודה והמוצא השני ימדוד את המתח של המקור. הגדרנו באוסילוסקופ את הטווח כך שהאותות המוצגים יהיו בתצוגה המקסימלית ובאותה סקאלה. רכשנו תמונה של האותות המוצגים כאשר מיצענו מחזור אחד של האותות ושמרנו בקובץ אקסל את ערכיהם כאשר מוגדר Length=5000.

### 2.1.3 תוצאות:

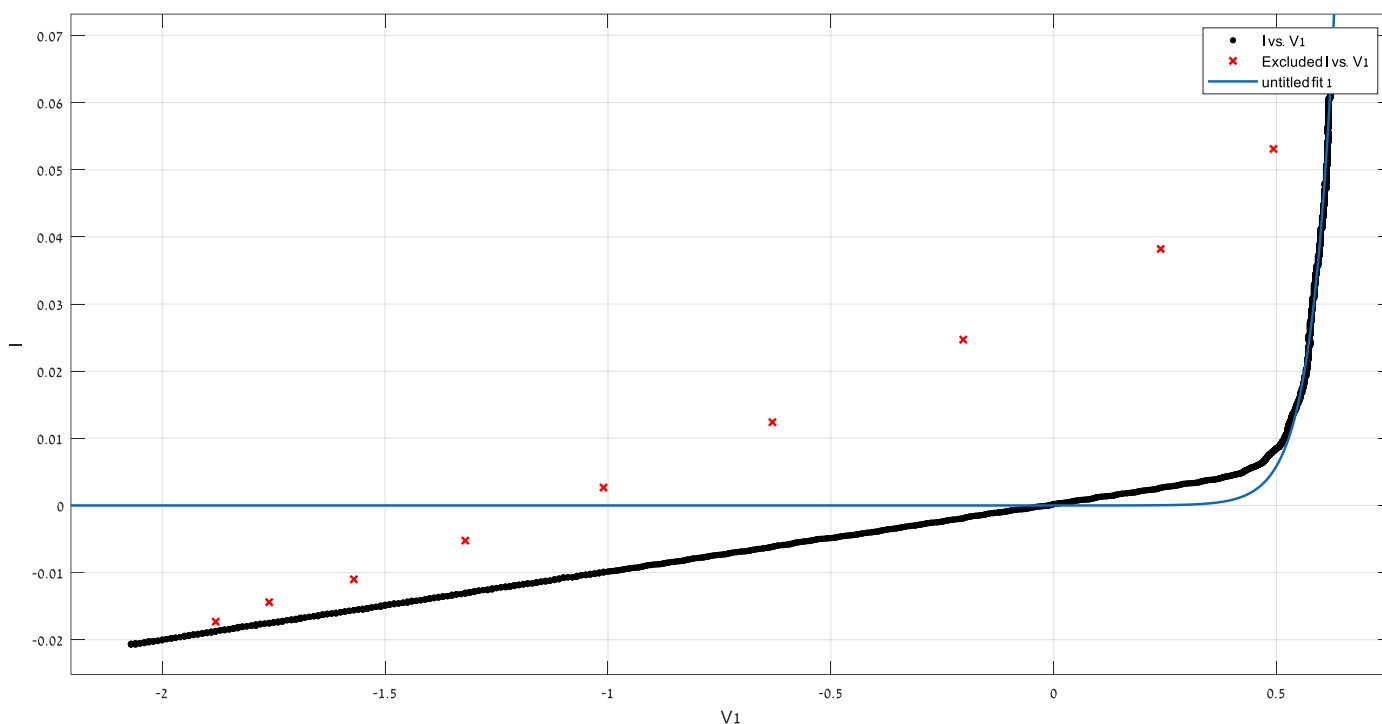
התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות באיור הבא:



איור (2): מתח הדיודה והמקור במעגל



איור (3): מתח הדיודה והמקור במעגל על ידי הנתונים מהאקסל



איור (4): מתח הדיודה כפונקציה של הזרם עליה באמצעות curve fitting

General model:

$$f(x) = a * (\exp((0.26 * x) / b) - 1)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 3.425e-07 \quad (2.896e-07, 3.954e-07)$$

$$b = 0.01333 \quad (0.01315, 0.0135)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.141

R-square: 0.9541

Adjusted R-square: 0.9541

RMSE: 0.005317

איור (5): נתוני התאמת המשוואה באמצעות curve fitting

באמצעות Curve fitting קיבלנו את ההתאמה למשוואת שוקלי :

$$I = 3.425 \cdot 10^{-7} \left( e^{\frac{0.26V}{0.01333}} - 1 \right)$$

בהשוואה למשוואת שוקלי:  $I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$  [2] ניתן להסיק

זרם הזליגה  $I_S = a = 3.425 \cdot 10^{-7} [A]$   $\eta = b = 0.01333$

#### 2.1.4 מסקנות:

מאיורים 2,3 ניתן לראות כי עבור מתח שקטן ממתח המקור הדיודה מתנהגת כנתק כמצופה, והמתח עליה שווה למתח המקור. כאשר מתח המקור גדול ממתח הפריצה של הדיודה היא לא נתק ויש מתח השואף לאפס שנמדד עליה ומכך עולה כי הדיודה איננה אידאלית. בנוסף, ניתן לראות כי קיבלנו עבור מתח המקור גל משולש אך המתח המקסימלי הוא כ  $7V$  ולא  $10V$  כמצופה. ניתן להסיק שהשוני נובע מתוך השפעה של רכיבי המעגל, המקור איננו אידאלי ולכן המתח שהוא מספק נמוך מהמתח המצופה. בדרך כלל השינוי במתח הוא זניח אך בשל כך שהתנגדות הנגד במעגל קטנה וגם התנגדות הדיודה נמוכה ישנה השפעה גדולה יותר להתנגדות הפנימית של המקור. לעומת זאת, המתח המינימלי של המקור הנמדד הינו  $2V$  - כמצופה מכיוון שעבור מתח זה הדיודה מתנהגת כנתק ולכן אין השפעה של רכיבי המעגל על המתח הנמדד. מאיור 5 ניתן לראות כי קיבלנו התאמה גבוה של  $0.9541$  כאשר ככל שערך זה קרוב ל1 ההתאמה טובה יותר. כמו כן, קיבלנו כי זרם הזליגה נמוך מאוד ושואף לאפס  $I_S = 3.425 \cdot 10^{-7} [A]$  כלומר הדיודה שואפת להיות אידאלית (בדיודה אידאלית זרם הזליגה מתאפס). באיור 4 ישנם איקסים אדומים שהם נקודות בהן אין התאמה בין הגרף לנתונים, ניתן לשער שחוסר התאמה נובע מכך שמתח המקור לא רציף.

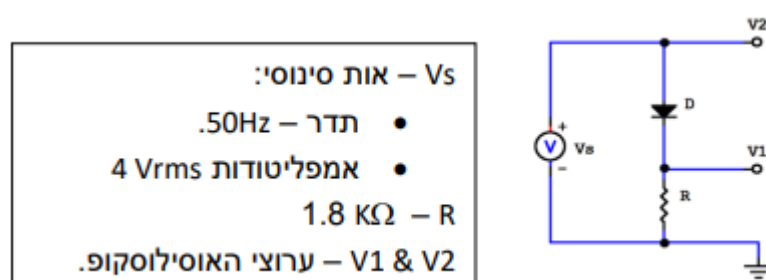
## 2.2 ניסוי 2:

### 2.2.1 היפותזה:

בשאלה זו מתח הכניסה הינו אות סינוסי. נצפה כי כאשר מתח המוצא יהיה שלילי, הדיודה לא מוליכה ולכן תהיה נתק ולא יהיה זרם במעגל, במצב זה נצפה שהמתח שנמדד במוצא הראשון (על הנגד) יהיה אפס. בנוסף, כאשר מתח המוצא יהיה חיובי נצפה שהדיודה תשאף להיות קצר ושממתח הנגד יהיה שווה למתח הכניסה.

### 2.2.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחולל אותות, אוסילוסקופ, נגד, דיודה, 3 כבלי BNC-בננה, 2 כבלי בננה-בננה.  
**מהלך הניסוי:**

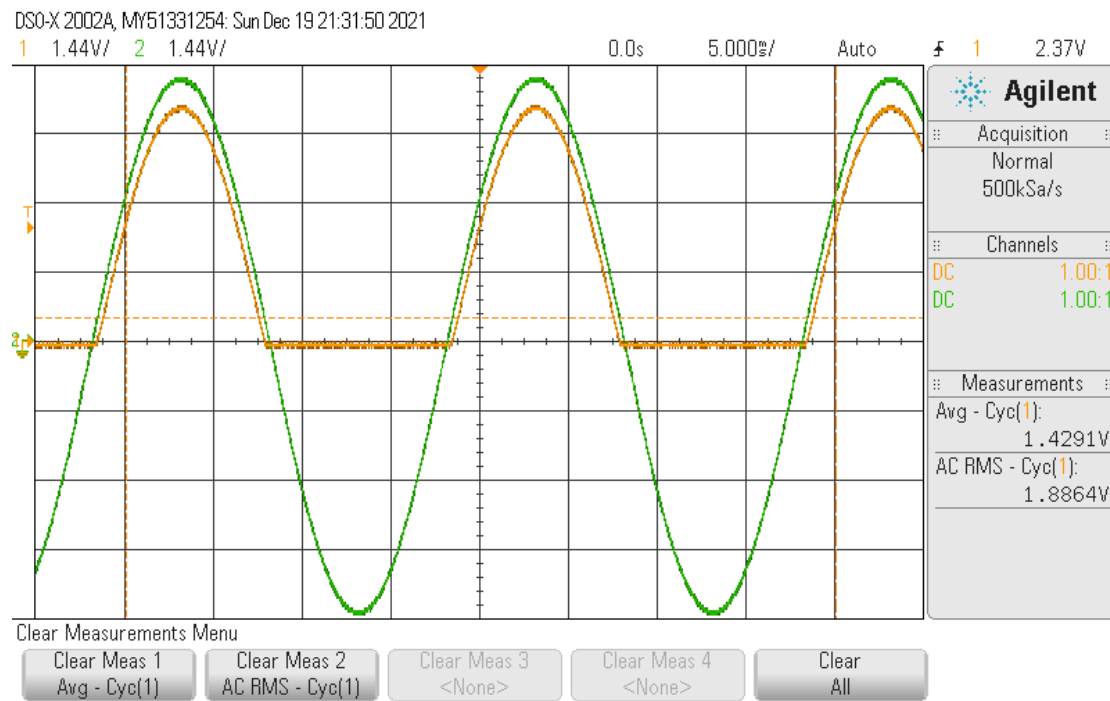


איור (6): מעגל יישור חד-דרכי [1]

בניסוי זה חיברנו באמצעות כבל BNC-בננה את מחולל האותות (המקור) אל נגד בעל התנגדות של  $1.8\text{ k}\Omega$  ודיודה שמחוברים בטור באמצעות כבל בננה-בננה. הגדרנו את אות המוצא להיות אות סינוסי בתדר 50 Hz כך שערך ה rms הינו 4V. בנוסף, חיברנו את האוסילוסקופ באמצעות כבלי BNC-בננה כך שהמוצא הראשון ימדוד את המתח על הנגד והמוצא השני ימדוד את המתח של המקור. הגדרנו באוסילוסקופ את הטווח כך שהאותות המוצגים יהיו בתצוגה המקסימלית ובאותה סקאלה. כמו כן, הוספנו באוסילוסקופ את ערכי ה DC ו AC rms של האותות על מחזור שלם. רכשנו תמונה של האותות המוצגים כאשר מוצגים מספר מחזורים של האותות ושמרנו בקובץ אקסל את ערכיהם כאשר מוגדר Length=5000.



### 2.2.3 תוצאות:



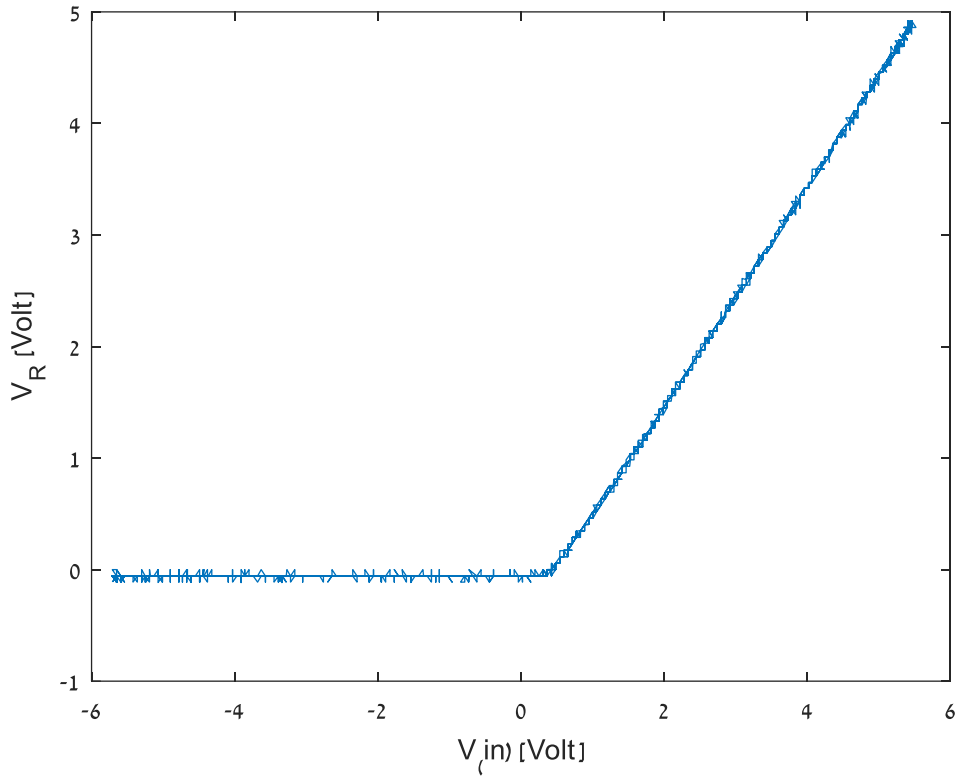
איור (7): מתח הנגד והמקור במעגל

כמו כן, מתח ה DC של הנגד שנמדד הינו  $1.43287 [V]$  ומתח ה  $AC RMS$  של הנגד שנמדד הינו  $1.887 [V]$ . עבור ערכים אלו:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{AC,RMS}^2 + V_{avg}^2} = 2.3694$$

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = 1.654$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = 1.317$$



איור (8): מתח הנגד כתלות במתח הכניסה על ידי הנתונים מהאקסל

$$V_{R,avg} = \frac{1}{T} \cdot \left( \int_0^{\frac{T}{2}} (V_{in} - V_\gamma) dt + \int_0^{\frac{T}{2}} 0 dt \right) = 50 \cdot \int_0^{\frac{1}{100}} (V_{max} \cdot \sin(100\pi \cdot t) - V_\gamma) dt$$

$$V_{R,avg} = \frac{V_{max}}{\pi} - \frac{V_\gamma}{2}$$

$$V_{R,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left( \int_0^{\frac{T}{2}} (V_{in} - V_\gamma)^2 dt + \int_0^{\frac{T}{2}} 0^2 dt \right)}$$

$$= \sqrt{50 \cdot \left( \int_0^{\frac{1}{100}} (V_{max} \cdot \sin(100\pi \cdot t) - V_\gamma)^2 dt \right)}$$

$$= \sqrt{50 \cdot \left( \int_0^{\frac{1}{100}} V_{max}^2 \sin^2(100\pi t) - 2V_{max}V_\gamma \sin(100\pi t) + V_\gamma^2 dt \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{V_{max}^2}{4} - \frac{2}{\pi} V_{max}V_\gamma + \frac{V_\gamma^2}{2}}$$

$$V_{ACrms} = \sqrt{V_{R,RMS}^2 - V_{Ravg}^2}$$

$$FF = \frac{V_{R,RMS}}{V_{R,avg}} \quad RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

באמצעות המטלאב נקבל:

$$V_{DC} = 1.5146 [V], V_{AC,rms} = 1.9331 [V] \quad FF = 1.6214 \quad RF = 1.2763$$

נחשב את השגיאה בין ערכים אלו לערכים שקיבלנו מהאוסילוסקופ:

$$\frac{1.5146 - 1.43287}{1.43287} \cdot 100\% = 5.704\%$$

$$\frac{1.9331 - 1.887}{1.887} \cdot 100\% = 2.443\%$$

$$\frac{|1.6214 - 1.654|}{1.654} \cdot 100\% = 1.971\%$$

$$\frac{|1.2763 - 1.317|}{1.317} \cdot 100\% = 3.090\%$$

#### 2.2.4 מסקנות:

מאור 7 ניתן לראות כי כפי שציפינו כאשר מתח המקור שלילי המתח על הנגד מתאפס וכאשר מתח המקור חיובי המתח על הנגד שואף להיות שווה למתח הכניסה אך נמוך ממנו. הפרש זה הוא המתח שיש על הדיודה. בדיודה אידאלית היינו מצפים שהפרש זה יתאפס ולכן ניתן להסיק כי הדיודה בה השתמשנו איננה אידאלית. כמו כן, ניתן לראות כי ככל שהמתח של המקור גדל ההפרש גדל, כלומר קיימת התנגדות פנימית לדיודה המשפיעה על המתח שקיים עליה. מאור 8 ניתן לראות אופיין של מתח הנגד כפונקציה של מתח הכניסה. כפי שראינו באור 7 מתח הנגד מתאפס כאשר מתח המקור שלילי. כמו כן, כאשר מתח המקור חיובי מתקבל גרף לינארי עם שיפוע חיובי (קטן מ1) הנובע ממחלק המתח בין הנגד לבין ההתנגדות הפנימית של הדיודה. מהשוואה בין מתחי ה AC RMS , DC שנמדדו באוסילוסקופ לעומת הערכים שחישבנו במטלאב קיבלנו אחוזי שגיאה נמוכים של 5.704% ו2.443% בהתאמה. בנוסף, עבור מקדם צורת הגל ומקדם הגליות קיבלנו אחוזי שגיאה נמוכים של 1.971% ו3.090%.

## 2.3 ניסוי 3:

### 2.3.1 היפותזה:

בניסוי זה נבחן את ההשפעה של קיבול שונה במעגל יישור חד-דרכי עם עומס של נגד וקבל. בדוח

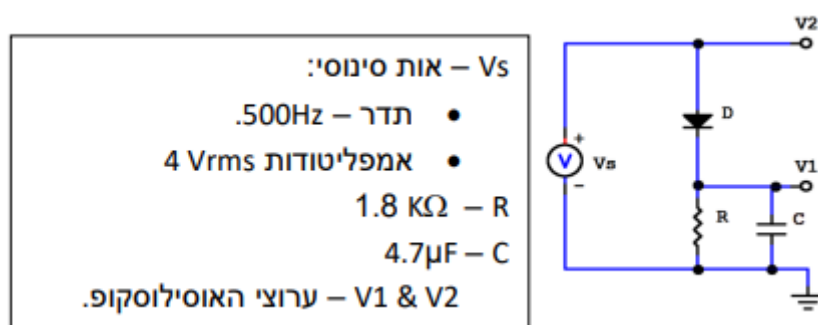
המכין ראינו כי  $FF = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}fCR_L}\right)^2 + 1}$ ,  $RF = \frac{1}{2\sqrt{3}fCR_L}$  ולכן נצפה שככל שהקיבול יגדל

מקדם הגליות ומקדם צורת הגל יגדלו. כמו כן, נצפה כי כאשר מתח המקור חיובי ובעל נגזרת חיובית הקבל יטען (המתח עליו יגדל) וכאשר מתח המקור שלילי או שנגזרתו שלילית הקבל יפרק (המתח עליו יקטן).

### 2.3.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחולל אותות, אוסילוסקופ, נגד, דיודה, 3 כבלי BNC-בננה, 2 כבלי בננה-בננה.

**מהלך הניסוי:**



איור (9): מעגל יישור חד-דרכי עם עומס של קבל ונגד [1]

בניסוי זה חיברנו באמצעות כבלי בננה-בננה נגד בעל התנגדות של  $1.8 k\Omega$  וקבל בעל קיבול של

$4.7 \mu F$  במקביל. את הקבל והנגד חיברנו בטור אל דיודה ואתל מחולל האותות (המקור)

באמצעות כבל BNC-בננה. הגדרנו את אות המוצא להיות אות סינוסי בתדר 500 Hz כך שערך

ה rms הינו 4V. בנוסף, חיברנו את האוסילוסקופ באמצעות כבלי BNC- בננה כך שהמוצא

הראשון ימדוד את המתח על הנגד והקבל והמוצא השני ימדוד את המתח של המקור. כמו כן,

הוספנו באוסילוסקופ את ערכי ה DC ו AC rms של האותות על מחזור שלם. רכשנו תמונה של

האותות המוצגים כאשר מוצגים מספר מחזורים של האותות באותם יחידות תצוגה ושמרנו

בקובץ אקסל את ערכיהם כאשר מוגדר Length=5000. לאחר מכן, שינינו את הקיבול של הקבל

עבור הערכים:  $C = 10 \mu F, 2 \mu F, 1 \mu F, 500 nF, 200 nF, 100 pF$  ושמרנו עבור כל קיבול תמונה

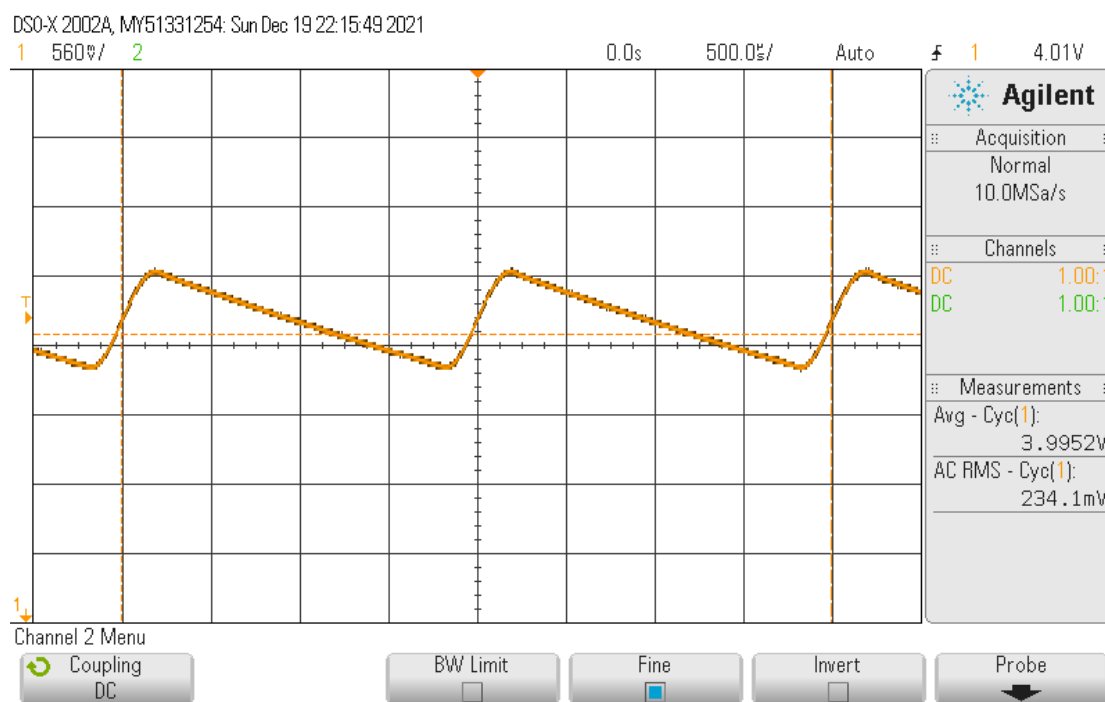
וקובץ אקסל.

### 2.3.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלה הבאה:

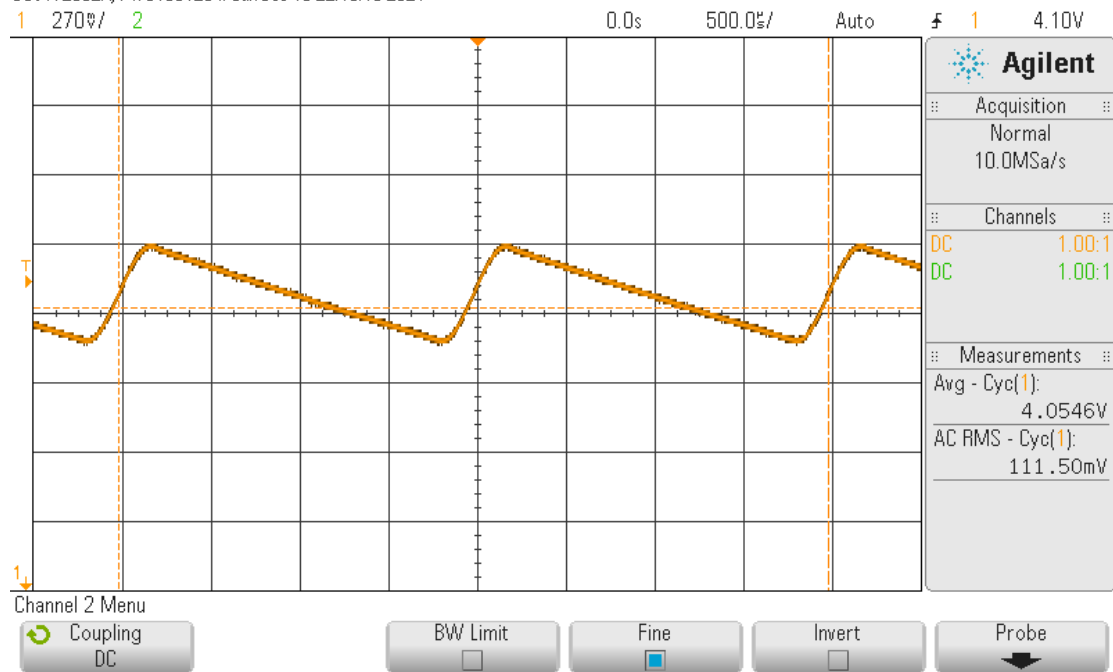
טבלה (1): מתח AC ו-DC שנמדדו עבור ערכי קיבול שונים

| ACrms N cycles<br>נגד וקבל<br>[V] | DC average<br>נגד וקבל<br>[V] | קיבול |   |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------|---|
| 0.234                             | 3.9966                        | 4.7μF | 1 |
| 0.1117                            | 4.0546                        | 10μF  | 2 |
| 0.517                             | 3.783                         | 2μF   | 3 |
| 0.873                             | 3.31                          | 1μF   | 4 |
| 1.28                              | 2.563                         | 500nF | 5 |
| 1.681                             | 1.794                         | 200nF | 6 |
| 1.8917                            | 1.402                         | 100pF | 7 |



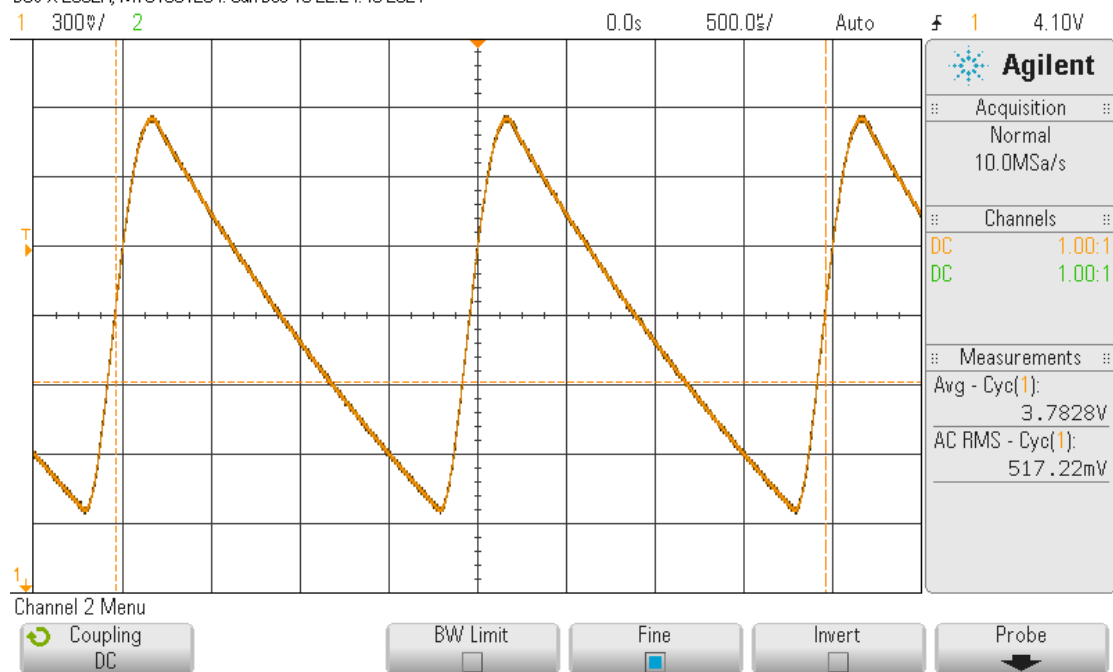
איור (10): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 4.7 \mu F$

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Dec 19 22:18:15 2021

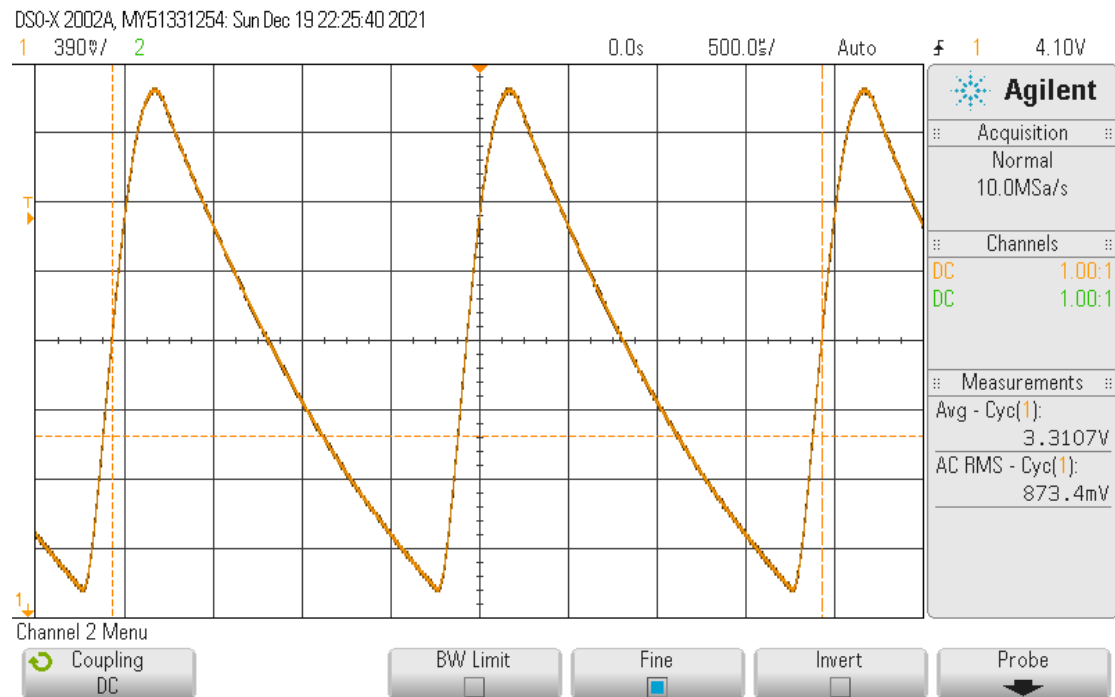


איור (11): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 10 \mu F$

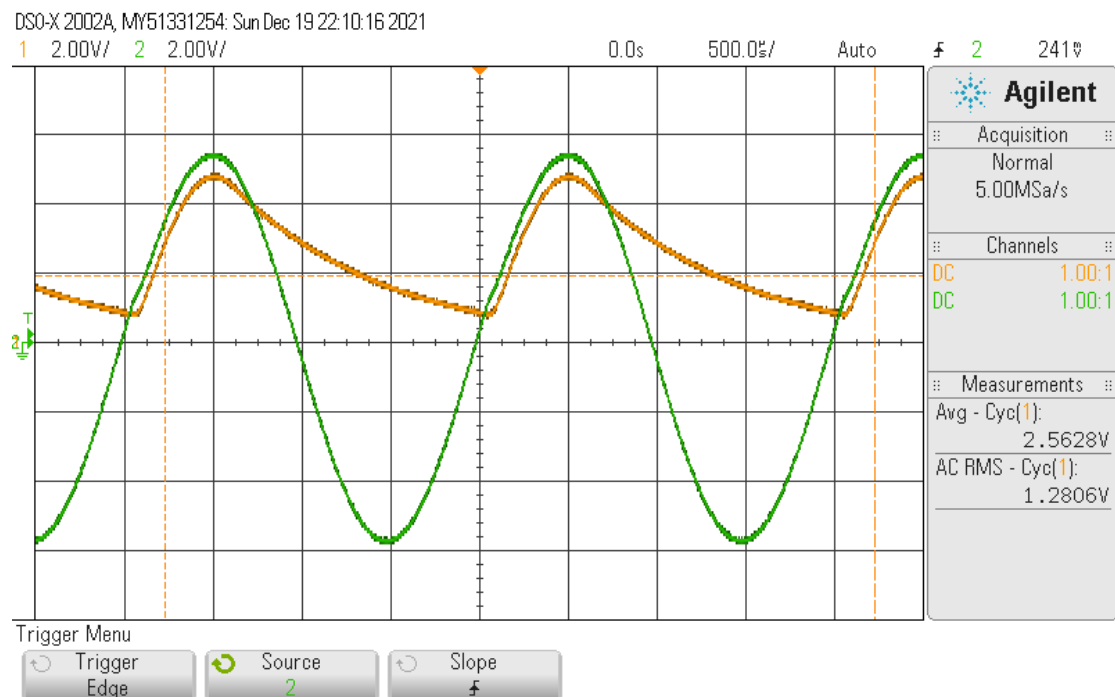
DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Dec 19 22:24:45 2021



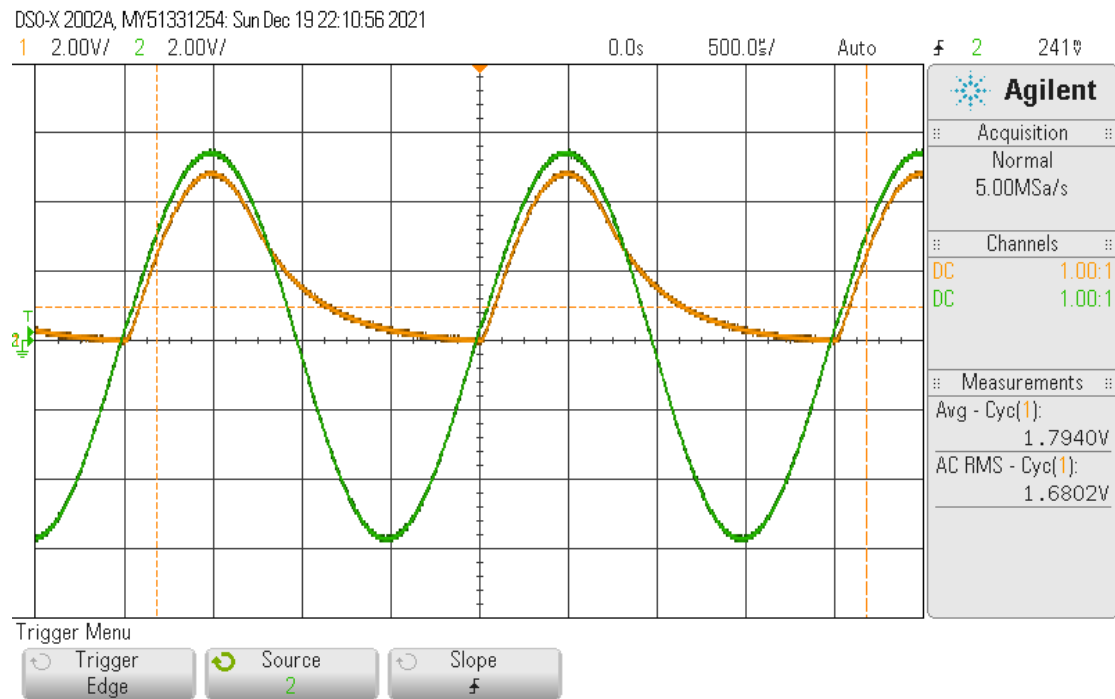
איור (12): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 2 \mu F$



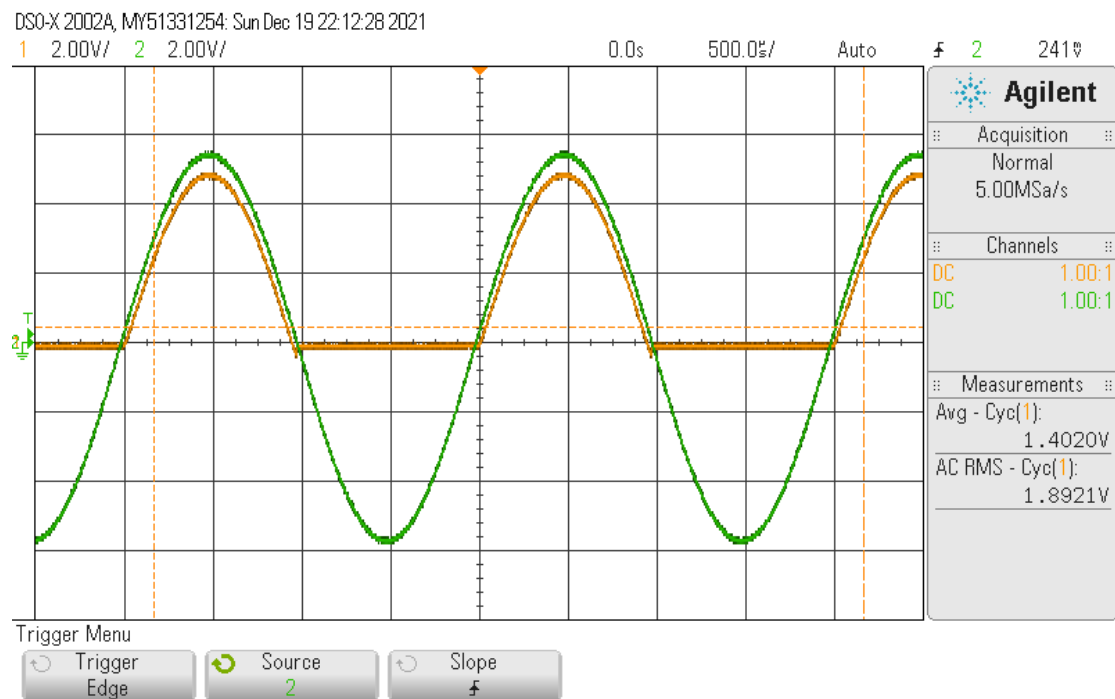
איור (13): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 1 \mu F$



איור (14): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 500 nF$

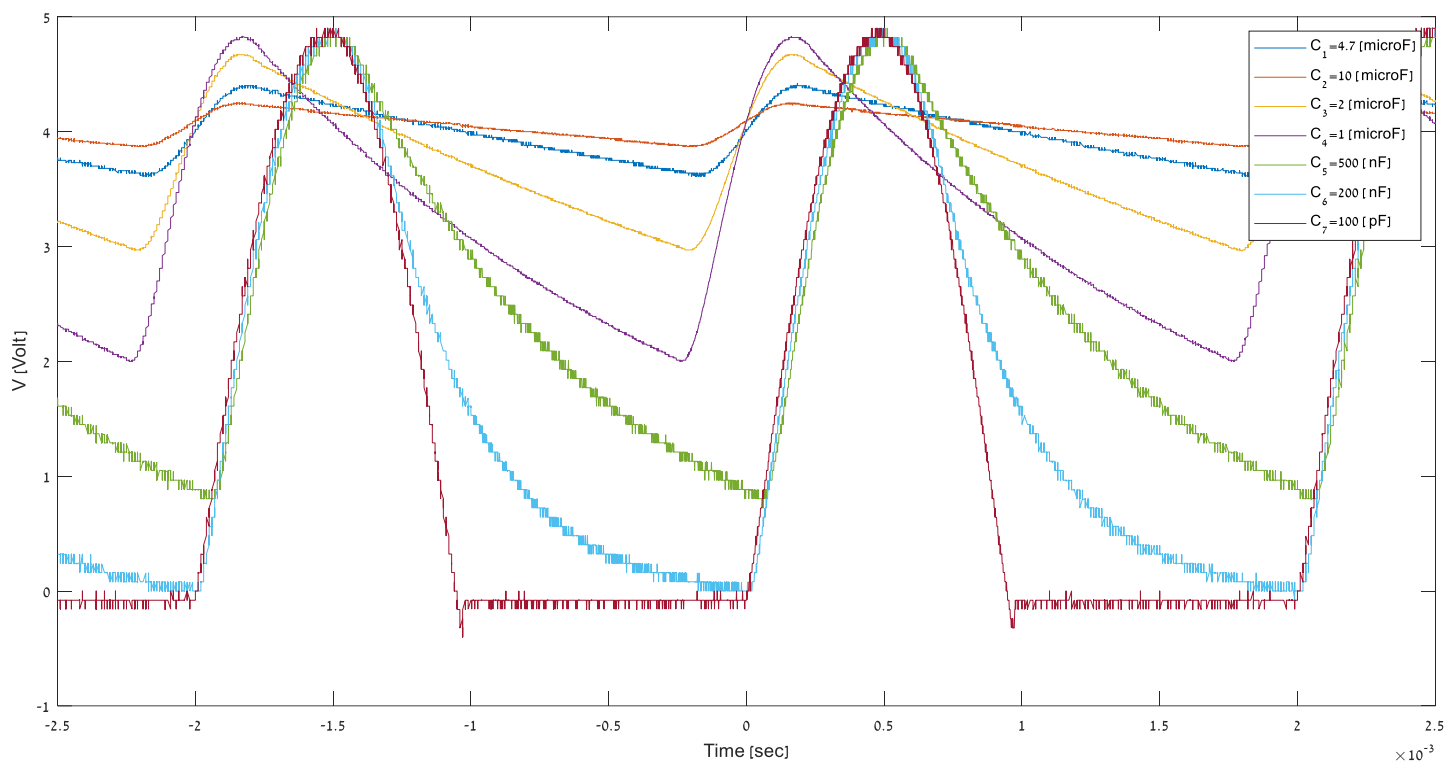


איור (15): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 200 \text{ nF}$



איור (16): מתח הקבל והנגד עבור קיבול  $C = 100 \text{ pF}$





איור (17): המתח כפונקציה של הזמן עבור ערכי קיבול שונים מתוך הנתונים באקסל

באמצעות הנתונים מטבלה (1) נחשב את מקדם הגליות ומקדם צורת הגל עבור ערכי הקיבול השונים:

טבלה (2): חישוב מקדם צורת הגל עבור ערכי קיבול שונים

| שגיאה יחסית<br>$\frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$ | חישוב תאורטי:<br>$FF = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}fCR_L}\right)^2 + 1}$<br>$= \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{3} \cdot 500 \cdot C \cdot 1800}\right)^2 + 1}$ | $FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}}$   | $V_{ms} = \sqrt{V_{AC,RMS}^2 + V_{Ravg}^2}$<br>[V] | קיבול |   |
|---|--|----------------------------------|--|-------|---|
| 0.073%  | 1.00233  | $\frac{4.003}{3.9966} = 1.00160$ | 4.003  | 4.7μF | 1 |
| 0.016%  | 1.00051  | $\frac{4.056}{4.0546} = 1.00035$ | 4.056  | 10μF  | 2 |
| 0.349%  | 1.01278  | $\frac{3.818}{3.783} = 1.00925$  | 3.818  | 2μF   | 3 |
| 1.527%  | 1.05018  | $\frac{3.423}{3.31} = 1.03414$   | 3.423  | 1μF   | 4 |
| 5.912%  | 1.18807  | $\frac{2.865}{2.563} = 1.11783$  | 2.865  | 500nF | 5 |
| 27.506%   | 1.88998  | $\frac{2.458}{1.794} = 1.37012$  | 2.458  | 200nF | 6 |
|   | 3207.5   | $\frac{2.355}{1.402} = 1.67974$  | 2.355  | 100pF | 7 |

טבלה(3) : חישוב מקדם הגליות עבור ערכי קיבול שונים

| שגיאה יחסית<br>$\frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$ | חישוב תאורטי<br>$RF = \frac{1}{2\sqrt{3}fCR_L}$<br>$= \frac{1}{2\sqrt{3} \cdot 500 \cdot C \cdot 1800}$ | $RF = \sqrt{FF^2 - 1}$ | $V_{ms} = \sqrt{V_{AC,RMS}^2 + V_{Ravg}^2}$<br>[V] | קיבול |   |
|---|---|------------------------|--|-------|---|
| 17.057%   | 0.06824   | 0.0566                 | 4.003  | 4.7μF | 1 |
| 17.992%   | 0.03207   | 0.0263                 | 4.056  | 10μF  | 2 |
| 15.014%   | 0.16038   | 0.1363                 | 3.818  | 2μF   | 3 |
| 17.857%   | 0.32078   | 0.2635                 | 3.423  | 1μF   | 4 |
| 22.136%   | 0.64150   | 0.4995                 | 2.865  | 500nF | 5 |
| 41.599%   | 1.60375   | 0.9366                 | 2.458  | 200nF | 6 |
|   | 3207.5  | 1.3496                 | 2.355  | 100pF | 7 |

#### 2.3.4 מסקנות:

מאיורים 10-15 ניתן לראות כי קיבלנו גרפים כמצופה- כאשר מתח המקור חיובי והנגזרת שלו חיובית הקבל נטען כלומר יש מתח על הקבל והנגד שעולה. כמו כן, כאשר מתח המקור שלילי או נגזרתו שלילית קיבלנו כי הקבל נפרק- המתח על הקבל והנגד יורד בצורה אקספוננציאלית. בניגוד למיישר חד דרכי עם עומס של נגד בלבד, תמיד יש מתח חיובי על הקבל והנגד.

במיישר אידאלי נרצה ש  $FF$  יהיה 1 ו  $RF$  יהיה אפס [2], ניתן לראות כי ככל שערך הקיבול עלה קיבלנו שמקדם צורת הגל היה קרוב יותר ל 1 ומקדם צורת הגל התקרב לאפס. כלומר ניתן להסיק שהמיישר החד דרכי עם עומס של קבל ונגד מתנהג בצורה אידאלית עבור ערכי קיבול גדולים.

בנוסף, ניתן לראות כי עבור קבל בעל ערך קיבול של  $100 \text{ pF}$  קיבלנו סטייה משמעותית בין הערכים, ומאיור 17 ניתן לראות כי המתח על הקבל בעל קיבול זה מתנהג כמו אופיין של מיישר חד דרכי בעל עומס התנגדותי בלבד כלומר עבור ערכי קיבול קטנים משמעותית ניתן להזניח את הקבל.

## 2.4 ניסוי 4:

### 2.4.1 היפותזה:

בניסוי זה נשתמש במיישר דו-דרכי באמצעות גשר דיודות. גשר הדיודות מורכב בצורה כך שזורם דרך העומס זרם גם כשמקור המתח חיובי וגם כשהוא שלילי. אם כך, כאשר לא יתבצע סינון נצפה כי יהיה מתח חיובי על הנגד בכל נקודת זמן כך שהזרם בכיוון אחד אך לא יתבצע יישור של המתח לאמפליטודה קבוע. כאשר נשתמש במסנן קבל ומסנן השראותי נצפה כי כתלות במאפייני הרכיבים – גודל ההתנגדות הנגד, קיבול הקבל והשראות הסליל, תושפע איכות היישור. נצפה כי באמצעות מעגלים אלה ניתן להגיע ליישור טוב כך שהמתח במוצא ישר עד כדי מתח שניתן להתייחס אליו באופן פרקטי כ-DC.

### 2.4.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** : מדגם 531, ערכת נגד, אוסילוסקופ, שני כבלי BNC – בננה.

#### מהלך הניסוי:

א. מעגל יישור דו דרכי ללא סינון: כיוונו את תצורת מדגם 531 כך שיתקבל מעגל יישור דו-דרכי ללא סינון בעל עומס  $1.8k\Omega$ . חיברנו את האוסילוסקופ כך שימדוד את מתח הנגד. מדדנו את ערכי ה-DC וערכי ה- $RMS$  ורכשנו תמונה.

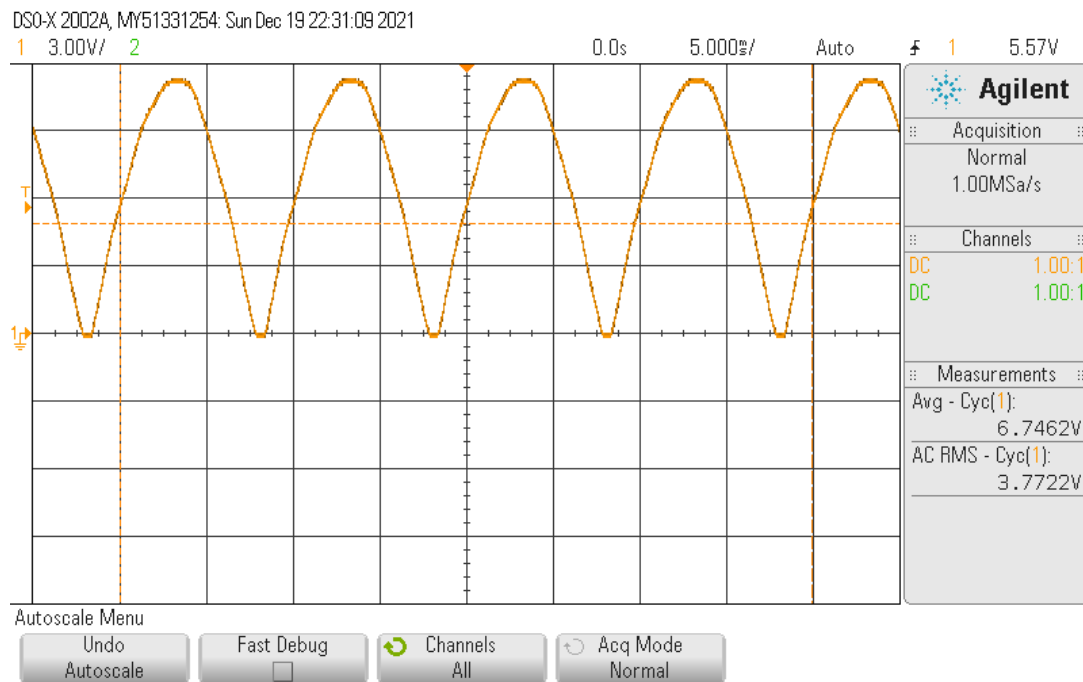
ב. מעגל יישור דו דרכי עם סינון קבל: כעת שינינו את תצורת המדגם כך שיתקבל מעגל סינון דו דרכי עם סינון קבל. מדדנו את ערכי ה-DC וערכי ה- $RMS$  כאשר ערכי הנגד היו – אין סוף (נתק),  $100\Omega$ ,  $1.8k\Omega$ . רכשנו תמונה עבור על ערך התנגדות.

ג. מעגל יישור דו דרכי בעל סינון השראותי: שינינו את תצורת המדגם כך שיתקבל מעגל סינון דו דרכי עם סינון השראותי. הוספנו חיבור לאוסילוסקופ המודד את מתח הסליל. חזרנו על המדידות שביצענו בסעיף ב'.

ד. מעגל יישור דו דרכי בעל סינון קבל והשראותי: שינינו את תצורת המדגם כך שיתקבל מעגל סינון דו דרכי עם סינון קבל וסינון השראותי. חזרנו על המדידות שביצענו בסעיף ב'.

### 2.4.3 תוצאות:

מתח הנגד במעגל יישור דו דרכי ללא סינון :



איור (18) : מתח הנגד במעגל יישור דו דרכי ללא סינון

מתח ממוצע:  $V_{avg} = 6.7462[V]$

מתח אפקטיבי:  $V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{3.77^2 + 6.746^2} = 7.73[V]$

מקדם צורת הגל:  $FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{7.73}{6.7462} = 1.14$

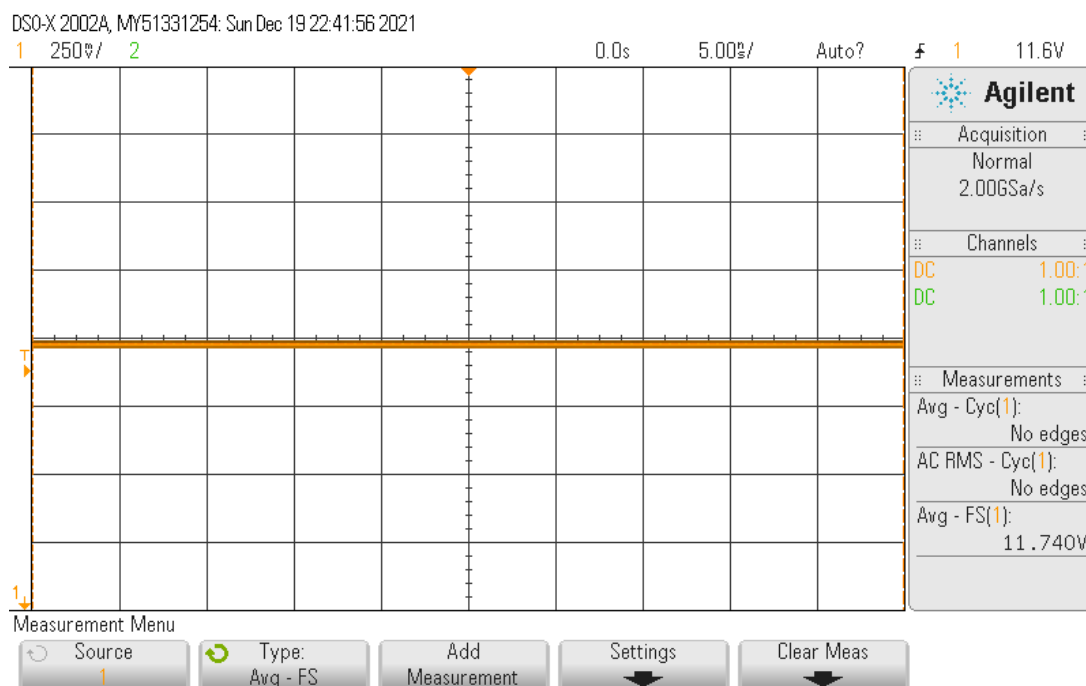
מקדם הגליות:  $RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.14^2 - 1} = 0.54$

השגיאה היחסית בין מקדמי צורת הגל ומקדם הגליות שהתקבלו מהניסוי לאלה שהתקבלו בדו"ח המכין :

$$\frac{|FF_{theoretical} - FF_{experiment}|}{FF_{theoretical}} = \frac{|1.11 - 1.14|}{1.11} = 2.7\%$$

$$\frac{|RF_{theoretical} - RF_{experiment}|}{RF_{theoretical}} = \frac{|0.483 - 0.54|}{0.483} = 11.8\%$$

מתח הנגד עם מסנן קבל עבור התנגדות  $\infty [\Omega]$  (נתק):



איור (19): מתח הנגד במעגל יישור דו דרכי עם סינון קבל עבור  $R = \infty [\Omega]$  (נתק)

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 11.74[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{11.74^2 + 0^2} = 11.74[V]$$

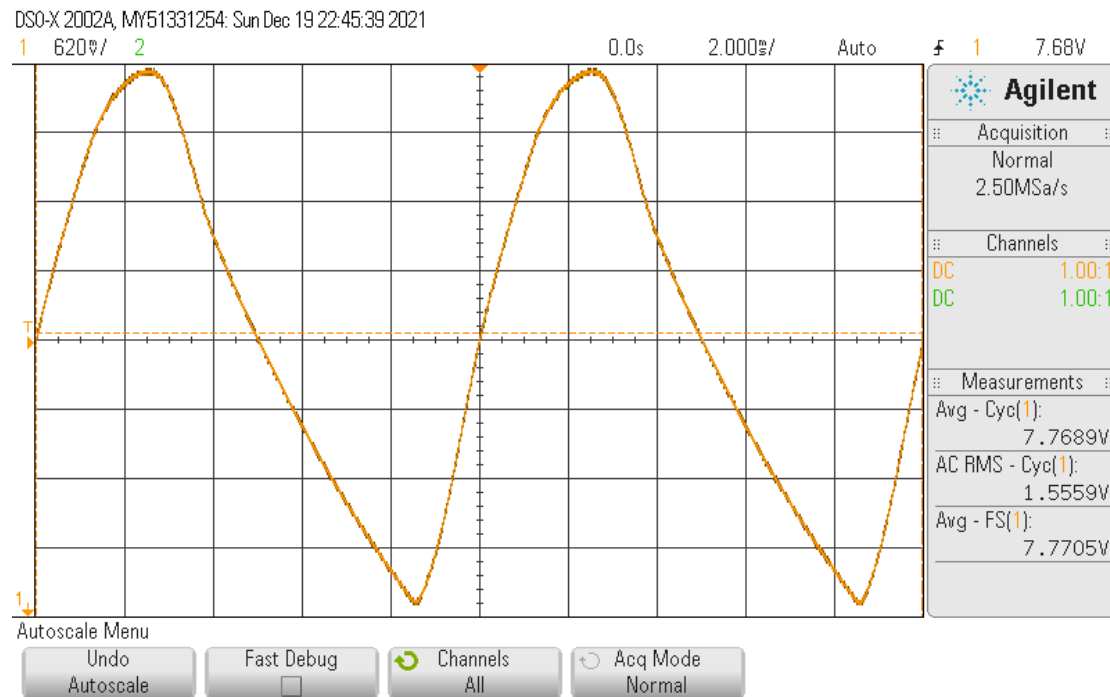
מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{11.74}{11.74} = 1$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1^2 - 1} = 0$$

מתח הנגד עם מסנן קבל עבור התנגדות  $100\Omega$  :



איור (20): מתח הנגד במעגל יישור דו דרכי עם סינון קבל עבור  $R = 100[\Omega]$

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 7.7689[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{1.55^2 + 7.7689^2} = 7.92[V]$$

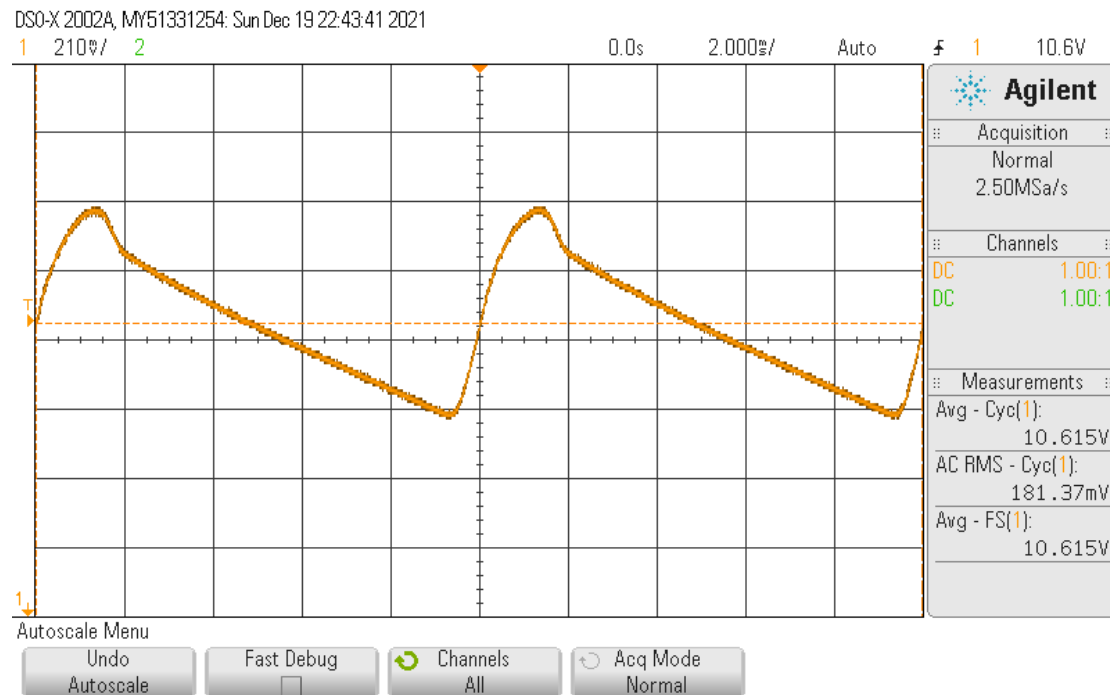
מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{7.92}{7.7689} = 1.02$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.02^2 - 1} = 0.2$$

מתח הנגד עם מסנן קבל עבור התנגדות  $1.8k\Omega$  :



איור (21): מתח הנגד במעגל יישור דו דרכי עם סינון קבל עבור  $R = 1.8k[\Omega]$

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 10.615[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{0.181^2 + 10.615^2} = 10.616[V]$$

מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{10.616}{10.615} = 1.001$$

מקדם הגליות:

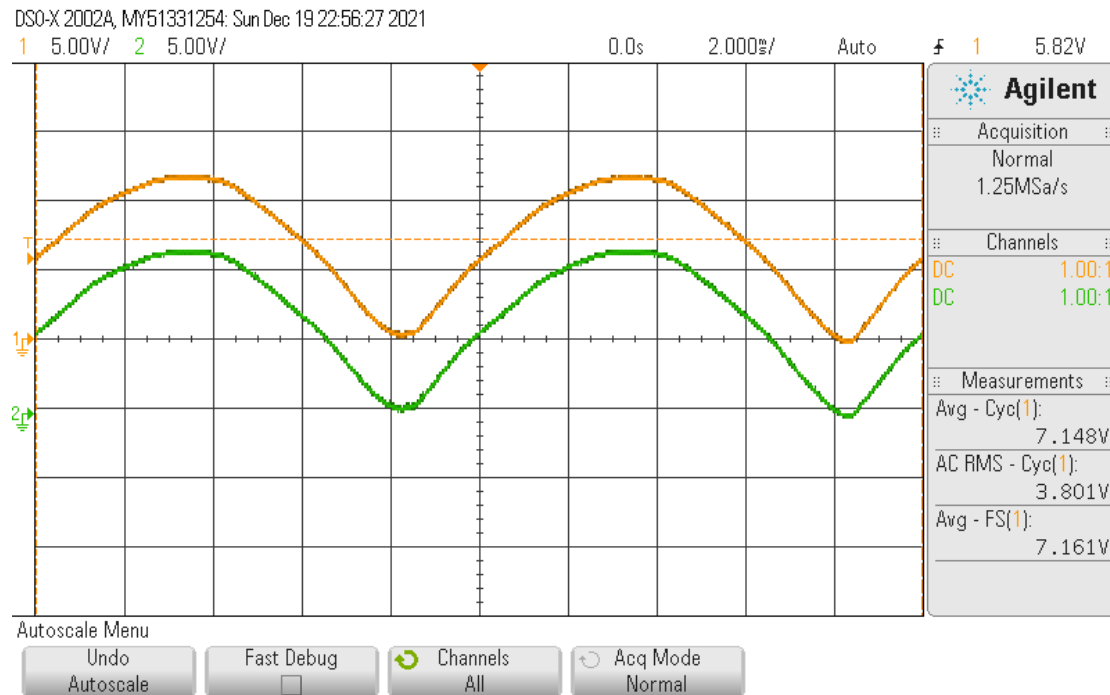
$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.001^2 - 1} = 0.044$$

השגיאה היחסית בין מקדמי צורת הגל ומקדם הגליות שהתקבלו מהניסוי לאלה שהתקבלו בדו"ח המכין:

$$\frac{|FF_{theoretical} - FF_{experiment}|}{FF_{theoretical}} = \frac{|1.0006 - 1.001|}{1.0006} = 0.04\%$$

$$\frac{|RF_{theoretical} - RF_{experiment}|}{RF_{theoretical}} = \frac{|0.034 - 0.044|}{0.034} = 29.4\%$$

מתח הגנד ומתח הסליל עם מסנן השראותי עבור התנגדות  $\infty [\Omega]$  (נתק):



איור (22): מתח הגנד (צהוב) ומתח הסליל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון השראותי עבור  $R = \infty [\Omega]$  (נתק)

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 7.148[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{3.801^2 + 7.148^2} = 8.1[V]$$

מקדם צורת הגל:

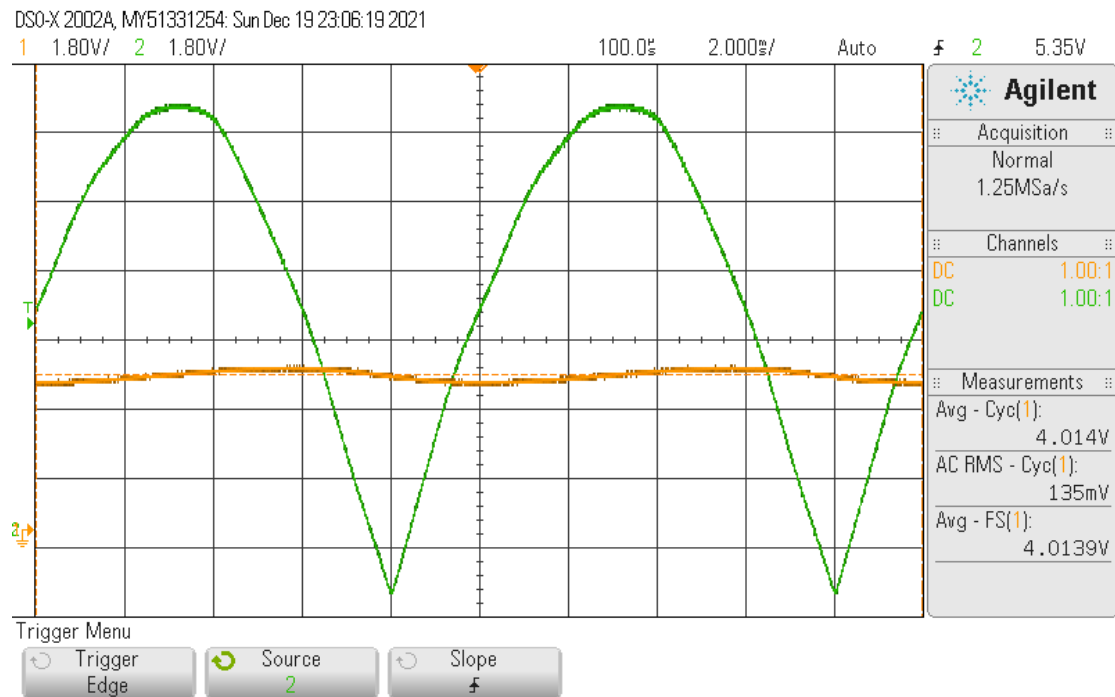
$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{8.1}{7.148} = 1.13$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.13^2 - 1} = 0.53$$



מתח הנגד ומתח הסליל עם מסנן השראותי עבור התנגדות  $100[\Omega]$  :



איור (23): מתח הנגד (צהוב) ומתח הסליל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון השראותי עבור  $R = 100[\Omega]$

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 4.01[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{0.135^2 + 4.01^2} = 4.01[V]$$

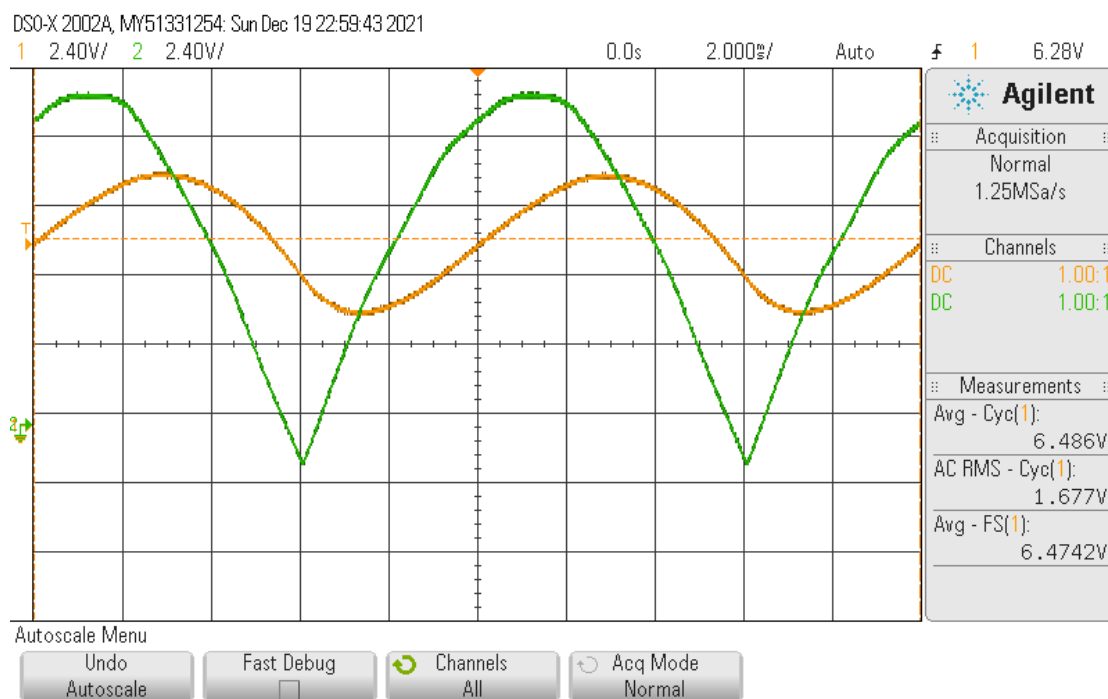
מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{4.01}{4.01} = 1$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1^2 - 1} = 0$$

מתח הנגד ומתח הסליל עם מסנן השראותי עבור התנגדות  $1.8k[\Omega]$  :



איור (24): מתח הנגד (צהוב) ומתח הסליל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון השראותי עבור  $R = 1.8k[\Omega]$

מתח ממוצע :

$$V_{avg} = 6.486[V]$$

מתח אפקטיבי :

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{1.68^2 + 6.486^2} = 6.7[V]$$

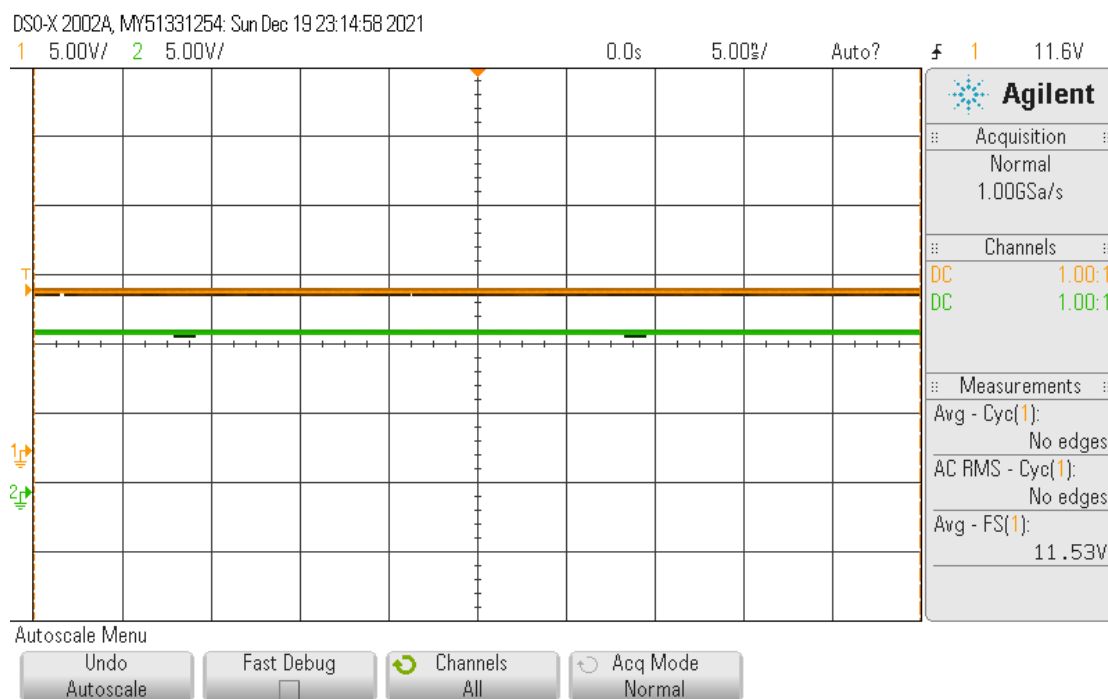
מקדם צורת הגל :

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{6.7}{6.486} = 1.03$$

מקדם הגליות :

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.03^2 - 1} = 0.26$$

מתח הנגד ומתח הסליל עם מסנן השראותי וקיבולי עבור התנגדות  $\infty [\Omega]$  (נתק):



איור (25): מתח הנגד (צהוב) והמתח על הסליל והקבל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון קיבולי והשראותי עבור  $R = \infty [\Omega]$  (נתק)

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 11.53[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{11.53^2 + 0^2} = 11.53[V]$$

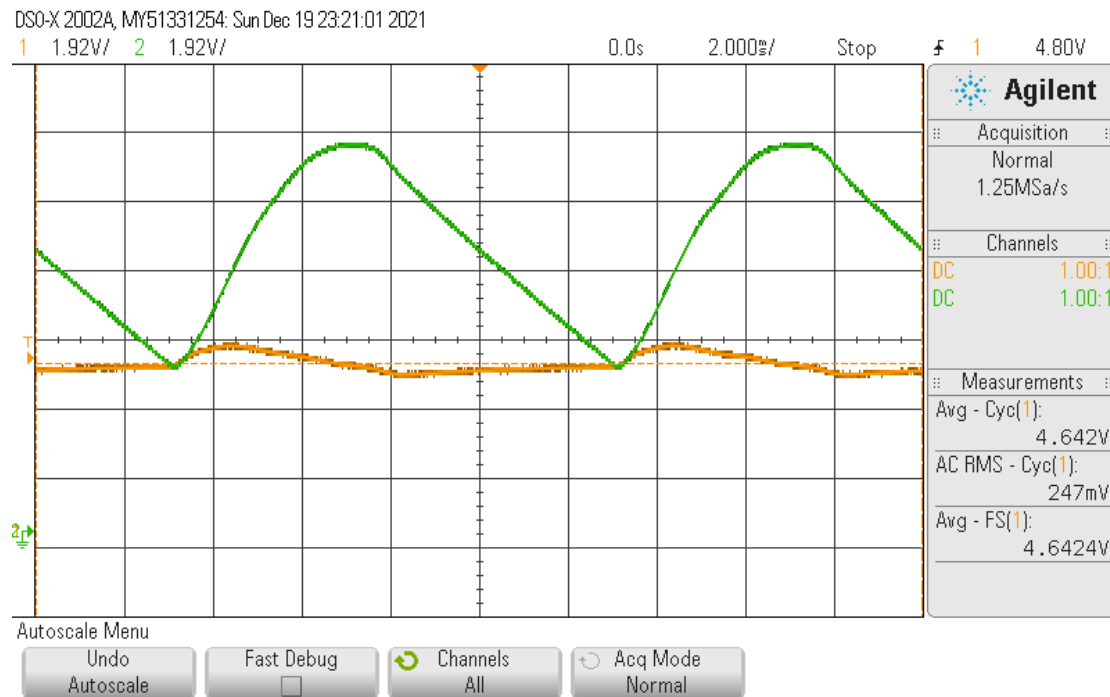
מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{11.53}{11.53} = 1$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1^2 - 1} = 0$$

מתח הנגד ומתח הסליל עם מסנן השראותי וקיבולי עבור התנגדות  $100[\Omega]$  :



איור (26) : מתח הנגד (צהוב) והמתח הסליל והקבל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון קיבולי והשראותי עבור

$$R = 100[\Omega]$$

מתח ממוצע :

$$V_{avg} = 4.642[V]$$

מתח אפקטיבי :

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{0.247^2 + 4.642^2} = 4.648[V]$$

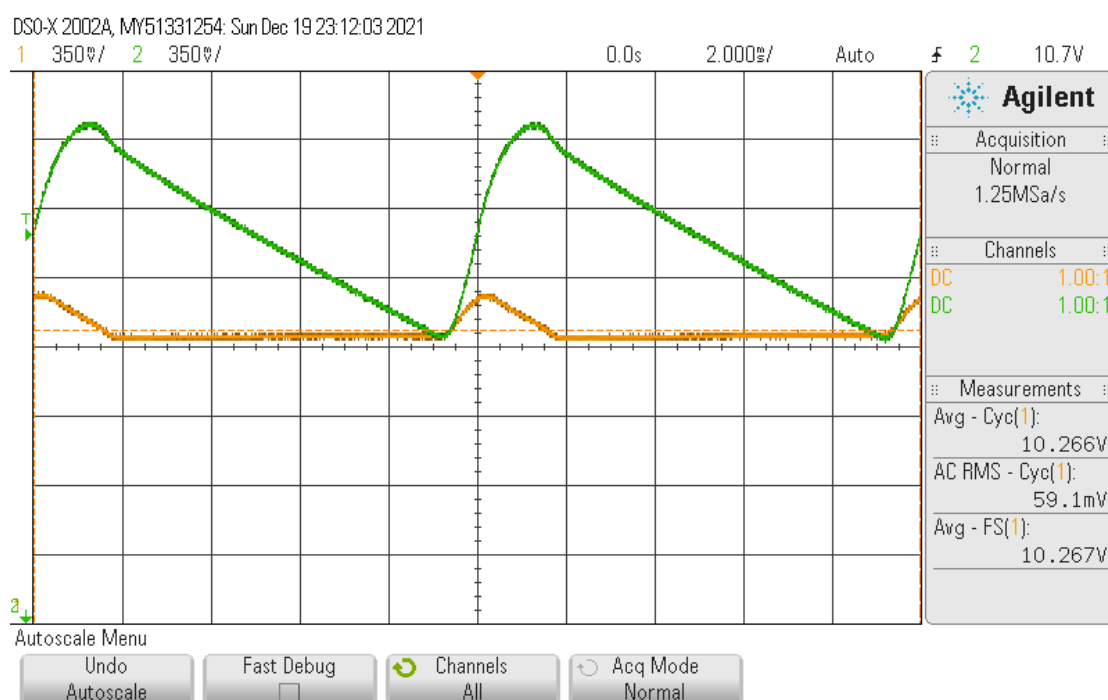
מקדם צורת הגל :

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{4.648}{4.642} = 1.0014$$

מקדם הגליות :

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.0014^2 - 1} = 0.053$$

מתח הנגד ומתח הסליל עם מסנן השראותי וקיבולי עבור התנגדות  $1.8k[\Omega]$ :



איור (27): מתח הנגד (צהוב) והמתח על הסליל והקבל (ירוק) במעגל יישור דו דרכי עם סינון קיבולי והשראותי עבור  $R = 1.8k[\Omega]$

מתח ממוצע:

$$V_{avg} = 10.266[V]$$

מתח אפקטיבי:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{ac}^2 + V_{avg}^2} = \sqrt{0.059^2 + 10.266^2} = 10.2661[V]$$

מקדם צורת הגל:

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{avg}} = \frac{10.2661}{10.266} = 1$$

מקדם הגליות:

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1^2 - 1} = 0$$

#### 2.4.4 מסקנות:

**במעגל יישור דו-דרכי ללא סינון** התוצאות שהתקבלו קרובות למצב התאורטי. ההבדלים בין מקדמי הצורה והגל התאורטיים ואלו שקיבלנו נובעים מהבדלים בין המתח הממוצע והאפקטיבי שהתקבלו בניסוי לתאורטיים. הסיבה להבדלים אלו יכולה להיות כתוצאה מהמתח שנופל על המקור ומחוסר האידאליזם של הדיודה שגורם לכך שהיא אינה מהווה קצר עבור מתחים חיוביים אלא ישנו עומס על ההתנגדות הפנימית של הדיודה שמפחית מהעומס על הנגד. **במעגל יישור דו דרכי עם מסנן קבל ככל שההתנגדות יותר גדולה כך היישור טוב יותר.** כאשר המתח אין סופי (נתק) המתח על הנגד הינו המתח על הקבל. כיוון שההתנגדות גדולה, הקבל נטען כמעט מיידית, והוא אינו יכול להיפרק, כך שהמתח עליו כמעט קבוע. ישנה שגיאה קטנה בין הערכים התאורטיים לאלו שהתקבלו בניסוי. הסבר אפשרי להבדל בין התוצאות לערכים התאורטיים הוא שהדיודה אינה אידאליזם - מתח הפריצה שלה אינו אפס, המעבר שלה לקצר אינו מידי ונופל עליה מתח קטן בגלל ההתנגדות פנימית. **במעגל יישור דו-דרכי עם מסנן השראותי ככל שההתנגדות יותר קטנה כך היישור יותר טוב.** כאשר ההתנגדות הולכת לאין סוף ויש נתק מתח הנגד הינו מתח הסליל. כיוון שסליל אינו אוגר מתח אלא נוטה לאגור זרם, בהינתן כניסת מתח AC למעגל, המתח על הסליל וכתוצאה מכך המתח על הנגד יהיה בעל אוסילציות, כלומר אין יישור יעיל של המתח. ככל שההתנגדות קטנה קבוע הזמן של המעגל גדל ומתח הנגד יותר ישר. **במעגל יישור דו-דרכי עם מסנן קבל והשראותי** היישור המתקבל טוב גם עבור התנגדויות נמוכות וגם עבור גבוהות. רכיב הקבל גורם ליישור טוב כאשר ההתנגדות גבוהה והסליל מיישר טוב כאשר ההתנגדות נמוכה. אם כך, במעגל יישור דו-דרכי ללא סינון המתח האפקטיבי גבוה אך היישור אינו טוב, ע"י הוספת קבל ניתן ליישר מתח כאשר ההתנגדות גבוהה, ע"י הוספת סליל ניתן לקבל יישור טוב עבור התנגדות נמוכה, ואם משתמשים גם בסליל וגם בקבל המעגל מיישר את המתח בצורה טובה עבור טווח גדול של התנגדויות. במעגלים עם מסננים היישור טוב אך יש ירידה במתח האפקטיבי הנופל על הנגד לעומת מעגל מיישר ללא סינון, כאשר בקבל ישנה ירידה פחות גדולה במתח האפקטיבי מאשר עבור סליל.

בניסוי זה למדנו את אופן פעולתם ומאפיינים של מעגלי יישור שונים. בניסוי 1 למדנו על מעגל יישור חד-דרכי עם עומס של נגד. ראינו כי במעגל עם דיודה מעשית, שאינה אידאלית, מתח הפריצה אינו אפס ולא יעבור זרם על הנגד עד שמתח הכניסה יהיה גדול ממתח הפריצה. כמו כן, בתנאים מעשיים למקור יש התנגדות פנימית וגם לדיודה יש התנגדות פנימית, כך שבעבודה עם עומס בעל התנגדות קטנה מספיק המתח שנופל על המקור ועל הדיודה אינם זניחים ביחס למתח שנופל על העומס כך שיש להתחשב בהם בניתוח התוצאות המתקבלות. בניסוי 2 ראינו המשכנו את ניתוח המיישר מניסוי 1, כאשר ראינו כי המתח על הנגד בתחום בו מתח הכניסה חיובי הוא כמעט מתח הכניסה, וכאשר מתח המקור שלילי מתח הנגד הינו אפס, אך בניגוד למעגל תאורטי עם דיודה אידאלית, על הדיודה נופל מתח כך שהמתח על הנגד קטן ממתח המקור באזורים בו מתח הנגד לא מתאפס. בניסוי 3 למדנו על מעגל יישור חד-דרכי עם מסנן קבל. במעגל זה המתח על הנגד אינו מתאפס גם כאשר מתח הכניסה שלילי. כאשר מתח הכניסה חיובי הקבל נטען ועל הנגד ישנו זרם שמגיע מהמקור, וכאשר מתח הכניסה שלילי הקבל נפרק כך שעובר זרם ממנו דרך הנגד. תהליך זה ממשיך עד שמתח הכניסה בשנית חיובי ובעל נגזרת חיובית כך שהקבל נטען בשנית וחוזר חלילה. ע"י שינוי ערך הקיבול של הקבל ומדידת ההשפעה הראנו כי ככל שהקיבול יותר גבוה כך הקבל יטען יותר בפרק הזמן בו הוא נטען, וכן השינוי בזרם שהוא יעביר במהלך פריקתו יהיה יותר קטן, כלומר יותר קרוב לזרם  $DC$  כך שהיישור יהיה יותר טוב. בניסוי 4 למדנו על מעגלי יישור דו-דרכיים באמצעות גשר דיודות. במעגל יישור דו דרכי ללא סינון המתח על הנגד חיובי גם כאשר מתח הכניסה שלילי. במעגל דו-דרכי עם מסנן קבל, ככל שהתנגדות העומס גבוהה יותר כך היישור טוב יותר. במעגל דו-דרכי עם מסנן השראותי ככל שההתנגדות קטנה יותר כך היישור טוב יותר וכאשר משתמשים במסנן שהוא גם השראותי וגם קיבולי היישור טוב לטווח גדול של התנגדויות. אף על פי כן, ניתן להסיק מהניסוי כי ישנו tradeoff מסוים בין היכולת ליישר את המתח למתח האפקטיבי שנופל על הנגד. ככל שהיישור ביצענו היה יותר טוב עבור כניסה מסוימת המתח האפקטיבי שנפל עליו קטן כלומר ההספק שניתן להפיק ממנו קטן. אם כך, בבחירת מעגל יישור עלינו להתבונן במספר פרמטרים – הן טווח התנגדויות העומס שאנו עובדים איתן, מה רמת היישור שאנו זקוקים לה למטרתנו, ומה המתח האפקטיבי שאנו רוצים להעביר ביחס למקור האנרגיה בו נשתמש.

- [1] "פרוטוקול מעבדת חשמל הנדסה ביורפואית 2"
- [2] "קראו בכותר - אלקטרוניקת הספק : חלק א" <https://kotar-cet-ac-il.elib.openu.ac.il/KotarApp/Viewer.aspx?nBookID=102627714#23.321.6.default> (accessed Dec. 11, 2021).



```

%% Exp4Post4C
% 6.1:
R=100; % [ohm]

table6_1=readtable('scope_2.csv');
time=table6_1.second;
V1=table6_1.Volt; % the voltage on the diode
V2=table6_1.Volt_1; %V_in

figure
scatter(time,V1);
hold on
scatter(time,V2);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('V [Volt]');
legend('V_1', 'V_2');

I=V2/R;
cftool

%% 6.2:
R=1800; % [ohm]

table6_2=readtable('scope_3.csv');
time=table6_2.second;
V1=table6_2.Volt; % the voltage on R
V2=table6_2.Volt_1; %V_in

figure
plot(V2,V1);
hold on
xlabel('V_(in) [Volt]');
ylabel('V_R [Volt]');

i=min(find(V1>0));
Vp=V2(i);
V_MAX=max(V2);
Vavg=V_MAX/pi-Vp/2;
Vrms=sqrt((V_MAX^2)/4-(2*V_MAX*Vp)/pi+(Vp^2)/2);
V_acrms=sqrt(Vrms^2-Vavg^2);
FF=Vrms/Vavg;
RF=sqrt(FF^2-1);

%% 6.3:
table6_3_1=readtable('scope_13.csv');
t1=table6_3_1.second;
V1=table6_3_1.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_2=readtable('scope_16.csv');
t2=table6_3_2.second;
V2=table6_3_2.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_3=readtable('scope_18.csv');
t3=table6_3_3.second;

```

```

V3=table6_3_3.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_4=readtable('scope_20.csv');
t4=table6_3_4.second;
V4=table6_3_4.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_5=readtable('scope_5.csv');
t5=table6_3_5.second;
V5=table6_3_5.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_6=readtable('scope_8.csv');
t6=table6_3_6.second;
V6=table6_3_6.Volt; % the voltage on C and R

table6_3_7=readtable('scope_9.csv');
t7=table6_3_7.second;
V7=table6_3_7.Volt; % the voltage on C and R

figure
plot(t1,V1);
hold on
plot(t2,V2);
plot(t3,V3);
plot(t4,V4);
plot(t5,V5);
plot(t6,V6);
plot(t7,V7);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('V [Volt]');
legend('C_1=4.7 [microF]', 'C_2=10 [microF]', 'C_3=2 [microF]', 'C_4=1
[microF]', 'C_5=500 [nF]', 'C_6=200 [nF]', 'C_7=100 [pF]');

```