

-מעגלי RC-

מעגלי RC

מילות מפתח:

מעגל RC, נגד, קבל, אות ריבועי, פריקת קבל, טעינת קבל, מעגלי גזירה ואינטגרציה, מסננים.

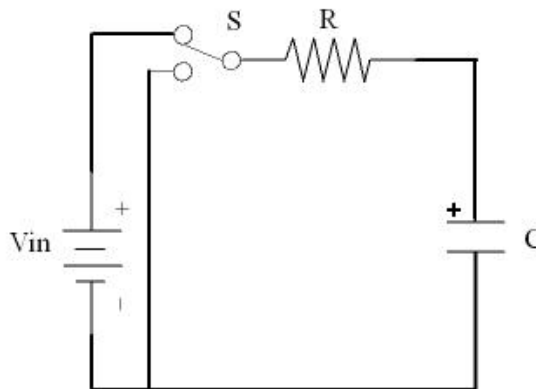
הציוד הדרוש: ממשק פסקו, מחשב כולל תוכנת DATA STUDIO, 2 חישני מתח-פסקו, קופסת חיבורים לניסוי RC, קבל: $1\mu f$, נגדים: 820Ω , 150Ω , SHUNT, $47K\Omega$, מוליכי חשמל.

מטרת הניסוי:

הכרת תכונות של מעגלים חשמליים הכוללים קבלים ונגדים בתהליך טעינה ופריקה.

1. תיאוריה

כאשר מחברים מעגל חשמלי הכולל נגד, קבל ומקור מתח, מתח מקור מתחלק בין הנגד והקבל (איור 1).



איור 1: מעגל חשמלי לטעינה ופריקה של הקבל

הנגד R הינו צרכן אנרגיה הממיר את כל ההספק שמקבל לחום. הקבל C הינו צרכן אנרגיה "ראקטיבי" שממיר את ההספק שנמסר לו לאנרגיה המתבטאת במתח חשמלי בין לוחותיו ולזרם בכיוון נגדי לזרם של מקור המתח.

1.1 טעינת קבל

כאשר סוגרים את המעגל ע"י המפסק S, זורם בתחילה זרם חשמלי אשר טוען את הקבל. בגין המטענים המצטברים על לוחות הקבל, נוצר בין לוחותיו מתח מנוגד למתח המקור והזרם במעגל דועך לאפס, ניתן לכתוב את השוויון:

-מעגלי RC-

$$(1) \quad V_{in} = V_R + V_C$$

כאשר V_{in} הוא מתח ההדקים של מקור המתח, V_R הוא המתח הנופל על הנגד ו- V_C המתח על הקבל.

$$V_R = R \cdot i = R \frac{dq}{dt} \quad \text{המתח על הנגד הוא:}$$

$$V_C = \frac{q}{C} \quad \text{והמתח על הקבל הוא:}$$

ולכן ניתן לכתוב את משוואה 1 בצורה הבאה:

$$(2) \quad V_{in} = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$$

משוואה 2 הינה משוואה דיפרנציאלית, אם נגזור אותה לפי הזמן נקבל:

$$(3) \quad 0 = R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i$$

הפתרון של משוואה 3 הוא:

$$i(t) = I_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{V_{in}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

(4)

כאשר I_{\max} הוא עוצמת הזרם המכסימלי בתחילת הטעינה, בזמן $t=0$.

למכפלה $\tau = RC$ יש יחידות של זמן והיא נקראת **קבוע הזמן** של המעגל, כלומר הזמן

הדרוש על מנת שהזרם יגיע ל- $1/e$ מהערך המכסימלי שלו.

המתח על הנגד הוא:

$$V_R = i(t) \cdot R = (I_{\max} \cdot R) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = V_{in} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

(5)

והמתח על הקבל לפיכך הוא:

$$(6) \quad V_C = V_{in} - V_R = V_{in} (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

המטען המצטבר על הקבל נתון בביטוי:

$$(7) \quad q(t) = C \cdot V_{in} (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

1.2 פריקת קבל

כאשר מעבירים את המפסק באיור 1 למצב השני, מתנתק מקור המתח והקבל הטעון מתפרק ממטענו דרך הנגד R. בתהליך הפריקה מגמת הזרם תהיה הפוכה לכיוון זרם הטעינה. חישוב דומה לזה שנעשה עבור מצב הטעינה מראה ש:

$$(8) \quad i(t) = I_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$(9) \quad V_C = V_{in} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$(10) \quad q(t) = C \cdot V_{in} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

1.3 מעגל RC מחובר למקור מתח חלופין

אם נחבר מעגל החשמלי הכולל נגד ומקור המתח חלופין מהצורה:
 כאשר: $V(t) = V_{\max} \cos(\omega \cdot t)$, $\omega = 2\pi f$ הזרם שיזרום במעגל הוא:

$$(11) \quad i(t) = \frac{V}{R} = \left(\frac{V_{\max}}{R} \right) \cos(\omega \cdot t) = I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

הזרם I והמתח V שניהם פרופורציוניים ל- $\cos(\omega t)$ ולכן הזרם הוא שווה מופע עם המתח. נניח שעכשיו מחברים קבל בעל קיבול C במקום הנגד R בין הדקיו של אותו מקור מתח, המטען הרגעי q שעל הקבל הוא:

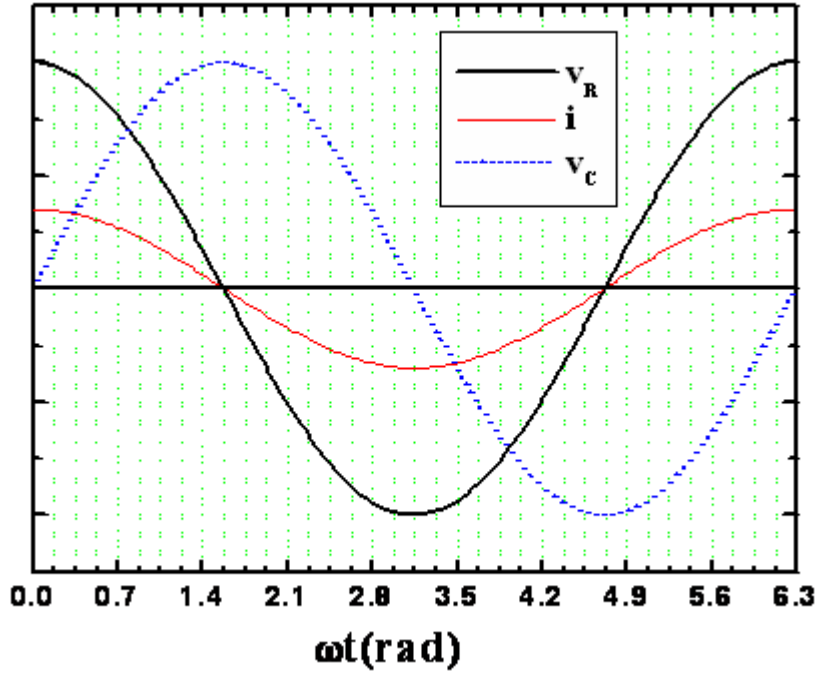
$$(12) \quad q(t) = V(t) \cdot C = C \cdot V_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

והזרם הרגעי הוא:

$$(13) \quad i(t) = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dV}{dt} = -\omega \cdot C \cdot V_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

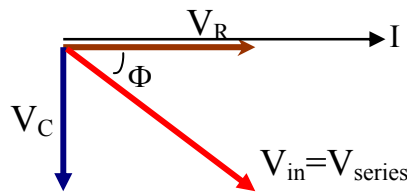
כלומר הזרם משתנה בהתאם לפונקציה $-\sin(\omega t)$ ולכן הזרם מקדים את המתח במופע (פאזה) של $\pi/2$. איור 2 מראה את הגרפים של הזרם והמתח כפונקציה של זמן, בחירת הסקלה של הזרם והמתח הינה יחסית ולכן אין משמעות לאמפליטודות.

-מעגלי RC-



איור 2: הזרם (קו רציף דק), המתח על הנגד (קו רציף עבה) והמתח על הקבל (קו מקוקו) במעגל טורי עם מקור זרם חילופין.

בחיבור טורי של נגד R עם קבל C למקור זרם חילופין, ניתן לתאר המתח על הקבל V_C והמתח על הנגד V_R ומתח הכניסה V_{in} ע"י דיאגרמת מתח פזורית (שבה מיוצגת הפאזה של המתח באמצעות הזווית) כמתואר באיור 3.



איור 3: דיאגרמת מתח פזורית.

מתוך משוואה 13 ניתן לרשום:

$$(14) \quad i(t) = -\omega \cdot C \cdot V_{\max} \sin(\omega t)$$

לכן ערכו המקסימלי של הזרם יהיה:

$$(15) \quad I_{\max} = \omega \cdot C \cdot V_{\max}$$

מעגלי RC-

אם נשווה את הביטוי הזה עם חוק אוהם: $V = i \cdot R$
נוכל לכתוב את הביטוי ל"התנגדות" הקיבולית בזרם חילופין:

$$(16) \quad \frac{V_{\max}}{I_{\max}} = \frac{1}{\omega C}$$

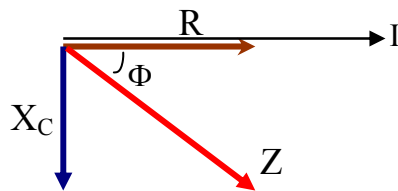
התנגדות זו נקראת "היגב קיבולי".

נסמן את ההיגב הקיבולי ב- X_C ונרשום:

$$(17) \quad X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

כלומר ככל שהתדירות גדלה יורדת התנגדות הקבל.

מאחר והזרם במעגל טורי שווה עבור כל הרכיבים, ניתן לחלק את המתחים בדיאגרמת המתחים באיור 4 בערכו של הזרם ולקבל דיאגרמה עבור ההתנגדויות במעגל:



איור 4: דיאגרמת העקבה.

ההתנגדות הכללית של המעגל נקראת עקבה וערכה יהיה:

$$(18) \quad Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

ולפי חוק אום הזרם במעגל:

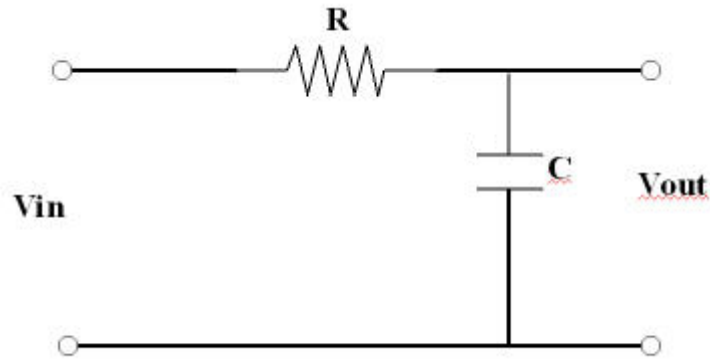
$$(19) \quad I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$$

1.4 שימושים למעגלי RC

1.4.1 מעגלי RC כמעגל אינטגרציה

אחד השימושים שניתן לבצע במעגלי RC הוא גזירה של אות חשמלי או אינטגרציה של אות חשמלי. אם נבנה מעגל כמתואר באיור 5 ונבחר ערכי R ו C מתאימים נוכל לקבל כי אות המוצא V_0 הוא אינטגרל של אות המבוא V_{in} .

-מעגלי RC-



איור 5 : מעגל RC המשמש כמעגל אינטגרציה

ראינו כי לפי קריכהוף סכום מפלי המתחים הוא :

$$(20) \quad V_{in} = V_R + V_C$$

והמתח על הקבל הוא :

$$(21) \quad V_C = V_{in} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

אם נבחר ערכים המקיימים : $\tau \gg T$ (הוא זמן המחזור של מתח החילופין) כלומר בעבור זמנים קצרים, לא מספיק הקבל להיטען דיו וניתן לרשום בקירוב

$$V_{in} \approx V_R \quad : \text{ממשוואה 20}$$

ומאחר $i_c(t) = C \frac{dV_C}{dt}$ נוכל לרשום את ביטוי למתח הקבל :

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

נכפול את המונה והמכנה בהתנגדות ונעזר בעובדה ש $V_{in} \approx V_R$ ונקבל את הביטוי :

$$(22) \quad V_{out} = V_C = \frac{1}{R \cdot C} \int V_{in}(t) dt$$

כלומר : אות המוצא הוא אינטגרל של אות המבוא.

1.4.2 מעגלי RC כמעגל גזירה

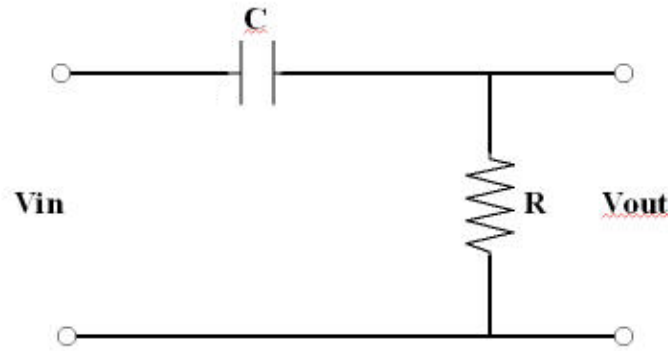
אם נבנה את המעגל המתואר באיור 6 ונבחר ערכי R ו C מתאימים נוכל לקבל כי אות

המוצא V_o הוא נגזרת של אות המבוא V_{in} .

אם נבחר ערכים המקיימים $\tau \ll T$ כלומר הקבל נטען לערך קרוב למתח המבוא כבר מיד עם תחילת כל מחזור.

$$V_{in} \approx V_C \quad : \text{נוכל לרשום כי}$$

-מעגלי RC-



איור 6: מעגל RC המשמש כמעגל גזירה

ומאחר: $i_C(t) = C \cdot \frac{dV_C}{dt}$ ניתן לרשום:

$$(23) \quad V_{out} = V_R = i(t) \cdot R = R \cdot C \cdot \frac{dV_{in}}{dt}$$

כלומר: אות המוצא הוא נגזרת של אות המבוא. במהלך הניסוי נאמת ונבדוק את המעגלים האלה.

1.4.3 מעגלי RC כמסננים

מעגלים מסוג RC שימושיים מאד באלקטרוניקה ואחד השימושים הנפוצים ביותר הם כמעגלי סינון (פילטרים). כלומר מעגל חשמלי המסוגל להעביר תחום תדרים מסוים ולהנחית תחום תדרים אחר. מסננים המעבירים תדרים נמוכים ומנחיתים תדרים גבוהים מערך מסוים נקראים "Low pass filter". מסננים המעבירים תדרים גבוהים ומנחיתים תדרים נמוכים מערך מסוים נקראים "High pass filter". תיאור של המעגל מעביר נמוכים ניתן לראות באיור 5 ומעגל להעברת תדרים גבוהים מופיע באיור 6.

אם נגדיר את היחס בין מתח היציאה לכניסה כ- gain נקבל עבור המעגל באיור 5:

$$(24) \quad g = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I \cdot X_C}{I \cdot Z_{series}} = \frac{1/\omega C}{\sqrt{R^2 + (1/\omega \cdot C)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega \cdot R \cdot C)^2 + 1}}$$

עבור חיבור טורי של קבל ונגד לפי איור 6 נקבל שה- gain

-מעגלי RC-

$$(25) \quad g = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I \cdot R}{I \cdot Z_{series}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (1/\omega \cdot C)^2}} = \frac{\omega RC}{\sqrt{(\omega \cdot R \cdot C)^2 + 1}}$$

עבור התדירות הספיציפית $\omega_C = \frac{1}{RC}$ לפי משוואות 24 ו-25 נקבל כי g שווה ל -

$$g = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{תדירות הקיטעון } f_c \text{ (cut-off) מוגדרת כתדירות שבה היחס}$$

תדירות הקיטעון f_c נתונה במשוואה :

$$(26) \quad 2\pi \cdot f_C = \omega_C = \frac{1}{R \cdot C}$$

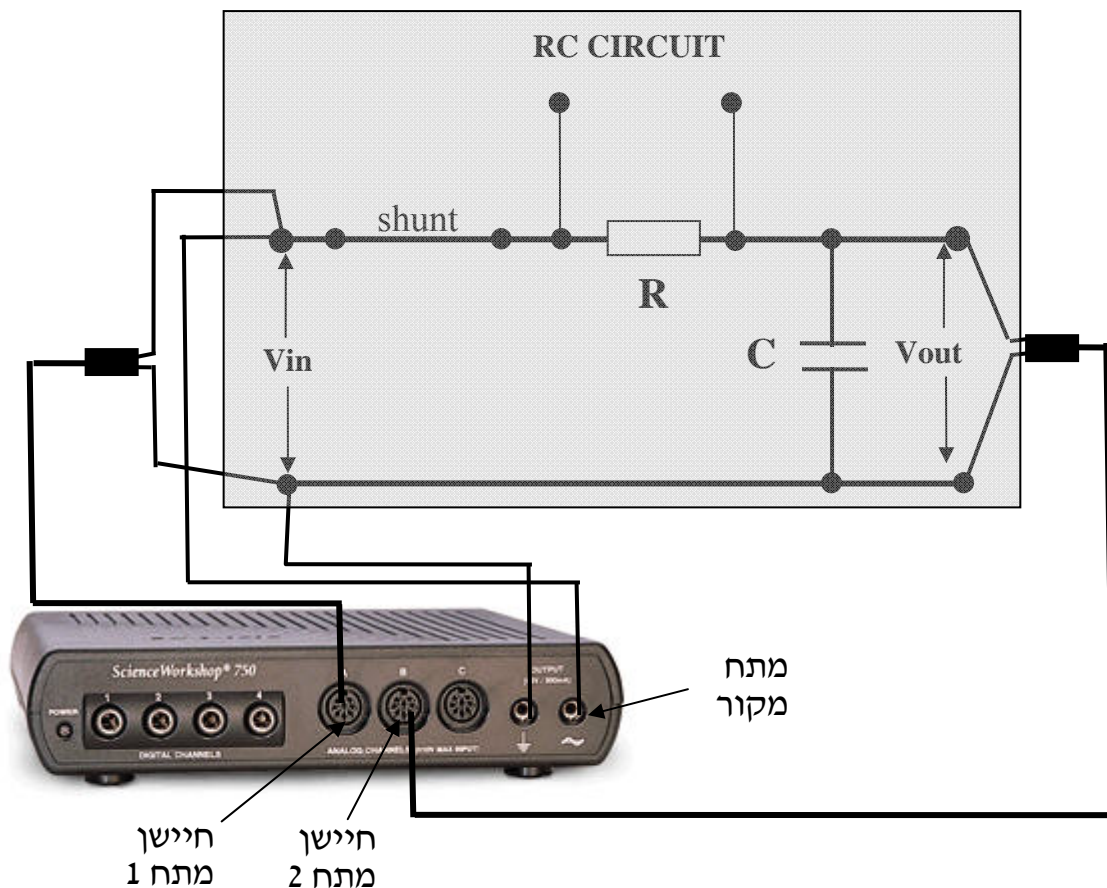
1.5 שאלות הכנה

1. הוכח כי היחידות של τ הם יחידות זמן (sec).
2. במעגל טורי הכולל קבל ונגד, נטען הקבל באמצעות מקור מתח V_0 .
חשב מה יהיה המתח על הקבל כעבור זמן τ ?
3. חשב מה יהיה המתח על הקבל כעבור זמן τ בפריקה (לאחר שהקבל נטען למתח V_0) ?
4. במעגל טורי הכולל קבל $C = 5\mu f$ ונגד $R = 10\Omega$, נטען הקבל באמצעות מקור מתח $V_0 = 24V$. חשב :
מהו המתח על הקבל ועל הנגד מיד עם סגירת המפסק (תחילת הטעינה)?
מהו המתח על הקבל ועל הנגד כעבור זמן רב (אינסופי) ?
לאחר כמה זמן יטען הקבל ל 63% מערכו הסופי?
5. כיצד ניתן ליצור מסנן שיעביר תחום תדרים מוגדר מ- f_1 עד f_2 .

2. מהלך הניסוי

2.1 טעינה ופריקה של קבל


לביצוע הניסוי חבר את המעגל החשמלי המתואר באיור 7. חבר נגד של 820Ω להדקי הנגד וקבל של $1\mu\text{f}$ להדקי הכבל. חבר את מקור המתח מהממשק של פסקו להדקי כניסת ה- INPUT בקופסת חיבורים RC CIRCUIT. חבר את חיישן המתח הראשון במקביל למקור המתח וחיישן מתח נוסף במקביל לקבל וחבר את החיישנים לממשק (ראה איור 7).

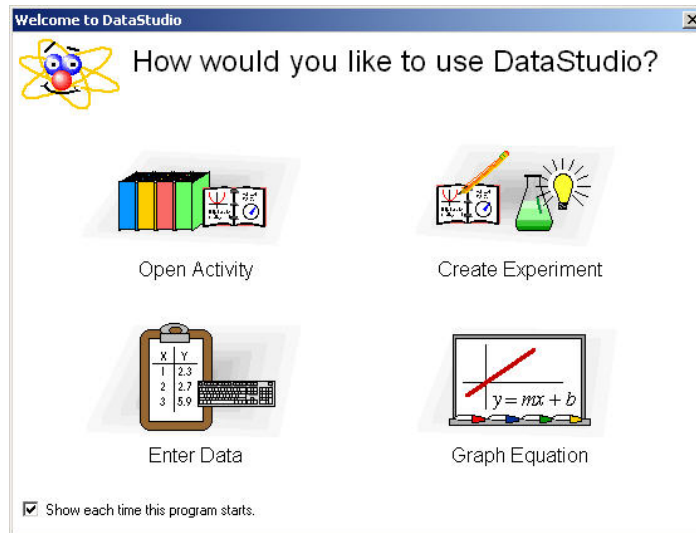


איור 7: המערכת הניסיונית לטעינה ופריקה של קבל

2.2 הפעלת המערכת הניסיונית:

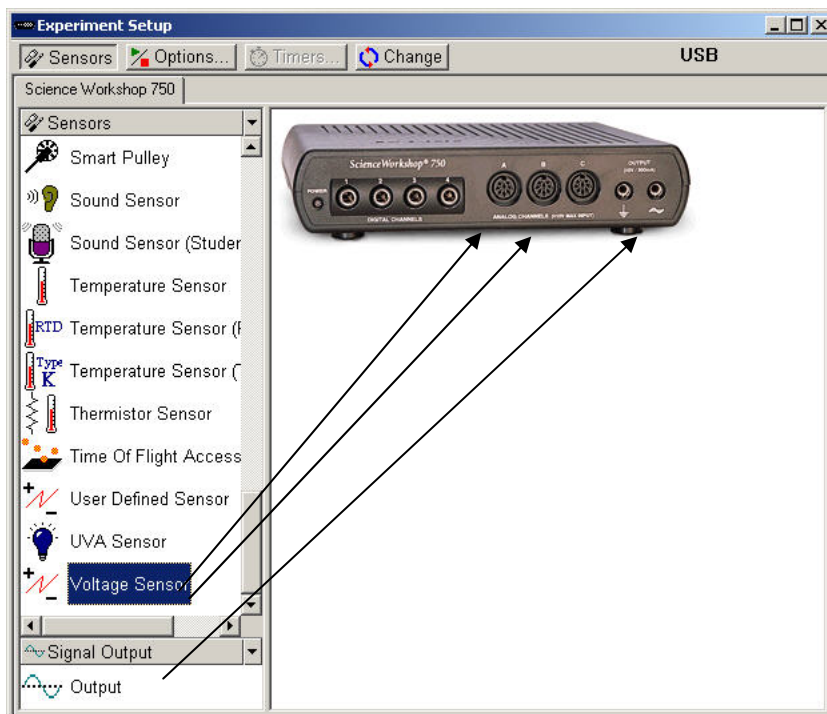
1. הפעל תחילה את ממשק PASCO ואח"כ הדלק את המחשב. פתח את תוכנת

DataStudio (ישנו קיצור על המכתבה) ע"י לחיצה כפולה על  יפתח החלון (ראה איור 8):



איור 8: דף הפתיחה של תוכנת DataStudio

לחץ על "Create Experiment" ותגיע לחלון הבא:



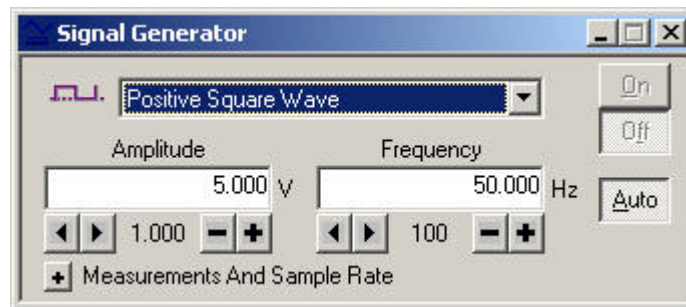
-מעגלי RC-

איור 9 : בחירת החיישנים ומקור המתח

2. בחירת החיישנים ומקור המתח : בחלון זה "Experiment Setup" עליך להגדיר את החיישנים ואת מקור המתח בהם תשתמש לביצוע הניסוי. בצידו השמאלי של החלון מופיעה רשימת של חיישנים, מצא את חיישן המתח "Voltage Sensor" וגרור את החיישן לעבר שקע A של הממשק, גרור חיישן מתח נוסף גם לעבר שקע B. המצב מתואר באיור 9.

לבחירת מתח הכניסה גרור את חלון Output לעבר מקור המתח בממשק (ראה איור 9).

3. הגדרת האות החשמלי בכניסה : על מנת לקבוע את צורת האות החשמלי בכניסה לחץ לחיצה כפולה על Output בחלון ה- Experiment Setup (ראה איור 9 מתחת ל-Sensors). החלון שיפתח יראה כך :



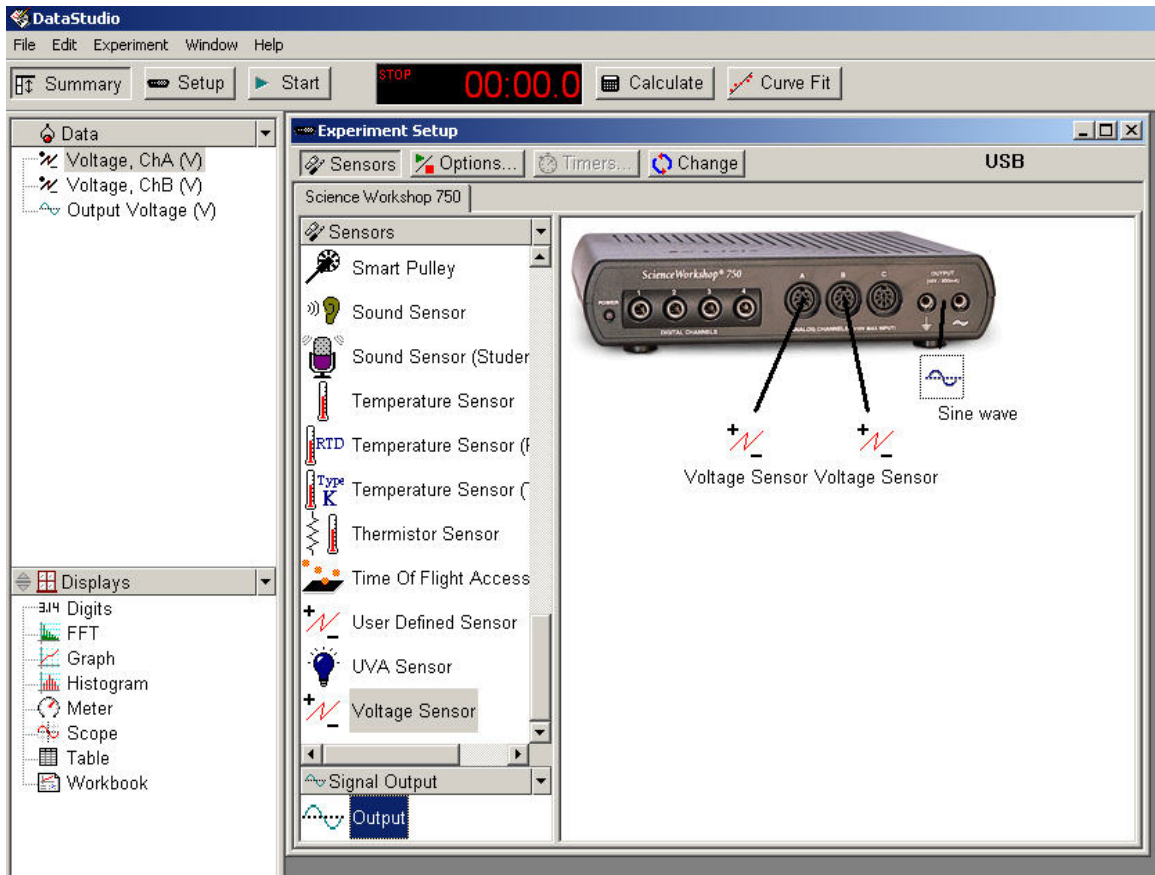
איור 10 : בחירת מקור המתח

4. קבלת הנתונים למחשב : בחר את אות הכניסה כגל ריבועי חיובי המופיע תחת השם "Positive Square Wave". קבע את אמפליטודת האות ל- 5 Volts ואת תדירותו ל- 50 Hz וסגור את החלון. במצב זה המעגל מוכן לביצוע המדידות.

4. קבלת הנתונים למחשב :

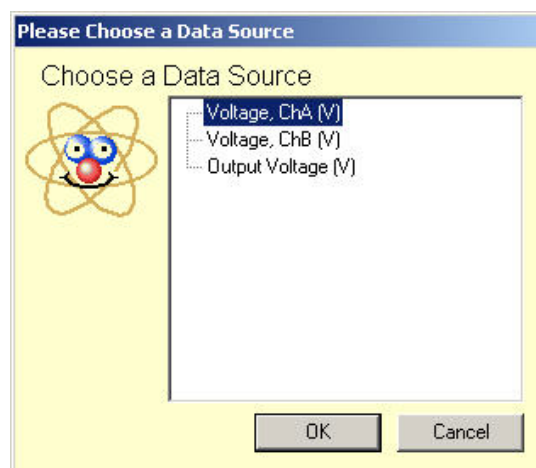
בחלקו השמאלי של חלון העבודה ישנם עוד שני חלונות, העליון Data והתחתון Displays. החלון העליון נכון למצב הנוכחי מראה את הנתונים המתקבלים משני החיישנים ואת מקור המתח שהגדרנו קודם. (ראה איור 11, כרגע מופיעים מתח המקור בחיישן Voltage ch A, והמתח על הקבל Voltage ch B ומתח הכניסה למעגל Output Voltage).

-מעגלי RC-



איור 11 : שולחן העבודה בתוכנת DataStudio

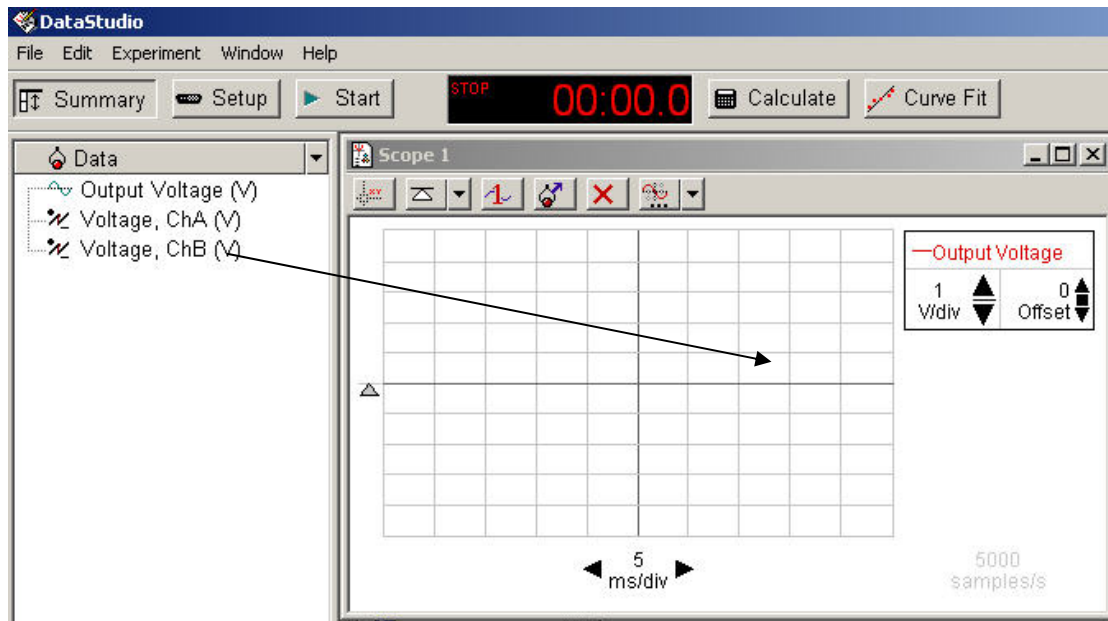
5. אנו נבצע את המדידה במצב של סקופ. לחץ על Scope בחלון Displays החלון שיופיע:



איור 12 : בחירת המקור לסקופ בתוכנת DataStudio

מעגלי RC-

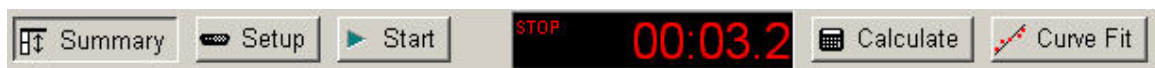
בחר את ChA (V) ולחץ OK. יפתח חלון המתאר את ערוץ A בסקופ כמתואר באיור 13.



איור 13 : ערוץ A בסקופ בתוכנת DataStudio

להוספת ערוץ נוסף גרור את ערוץ B לתוך הסקופ ראה חץ באיור 13.

6. על מנת להתחיל במדידה לחץ על כפתור Start ומיד לאחר קבלת הגרפים לחץ Stop.
(ראה איור 14 תרשים החלונות של התוכנה)

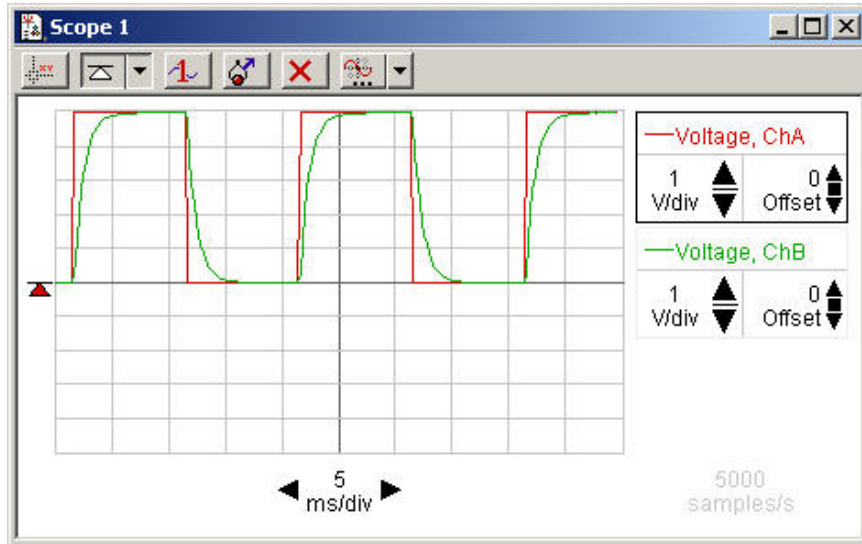


איור 14 : לחצני הפעולה בתוכנת DataStudio

7. מיד עם לחיצה על כפתור Stop על המסך תתקבל התוצאה המתוארת באיור 15.

ערוץ A מתאר את המתח הכניסה למעגל וערוץ B מתאר את המתח על הקבל.

-מעגלי RC-

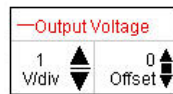


איור 15 : התוצאה המתקבלת בסיום המדידה בסקופ בתוכנת DataStudio

8. הכנת גרף של המתח כניסה והמתח הקבל כפונקציה של זמן :

על מנת שנוכל לטפל בנתונים שהתקבלו יש להעבירם מתוך הסקופ לגרף. סמן תחילה

את ערוץ הראשון בסקופ (על ידי לחיצה בעכבר) ואז לחץ על הכפתור



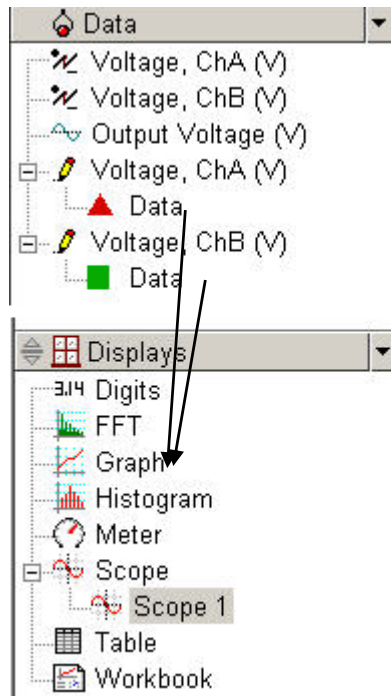
להעברת הנתונים מהערוץ הראשון. בצע זאת שוב עבור הערוץ השני. הנתונים יופיעו בציודו השמאלי של המסך כמתואר באיור 16.

9. גרור מחלון ה Data את Voltage chA (מסומן במשולש באיור 16) לתוך המילה Graph והרפה. באותו אופן גרור את Voltage chB (מסומן בריבוע באיור 16) לתוך המילה Graph והרפה (ראה חיצים באיור 16).

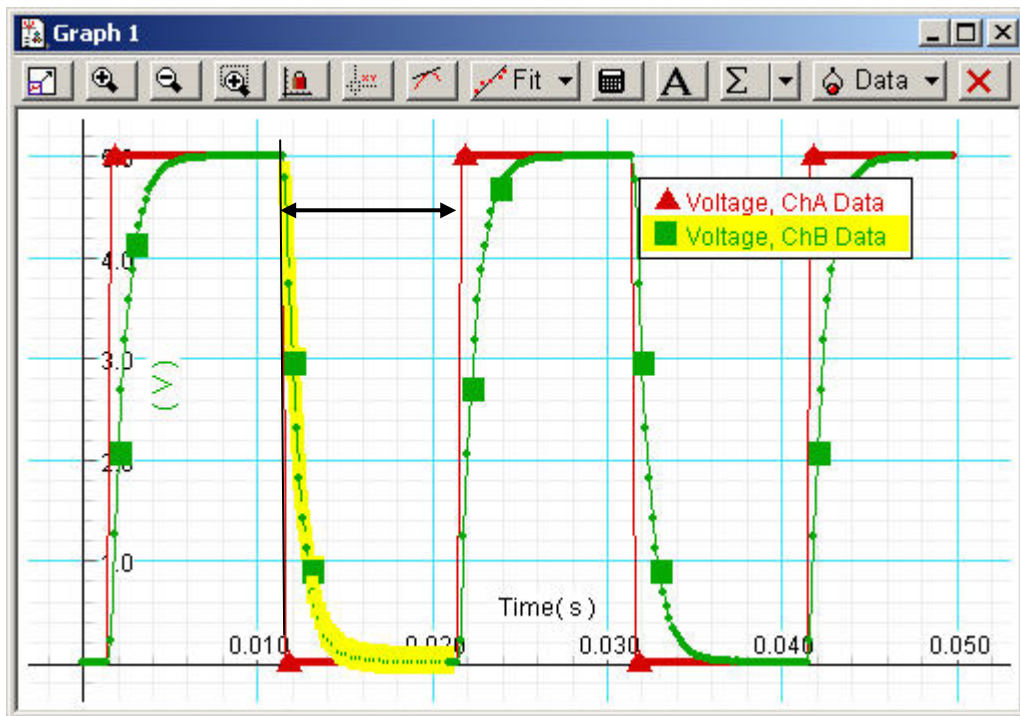
הערה : במידה וצריך למחוק מדידה מסוימת על מנת לחזור עליה ניתן לסמנה וללחוץ על מקש Delete. ניתן למחוק את כל ההרצות הקודמות גם על ידי לחיצה על חלון Experiment ולבחור את האפשרות Delete all data run.

הגרף המתקבל בסיום העברת הגרפים מתואר באיור 17.

מעגלי RC-



איור 16 : התוצאה המתקבלת לאחר מעבר הנתונים מהסקופ בתוכנת DataStudio

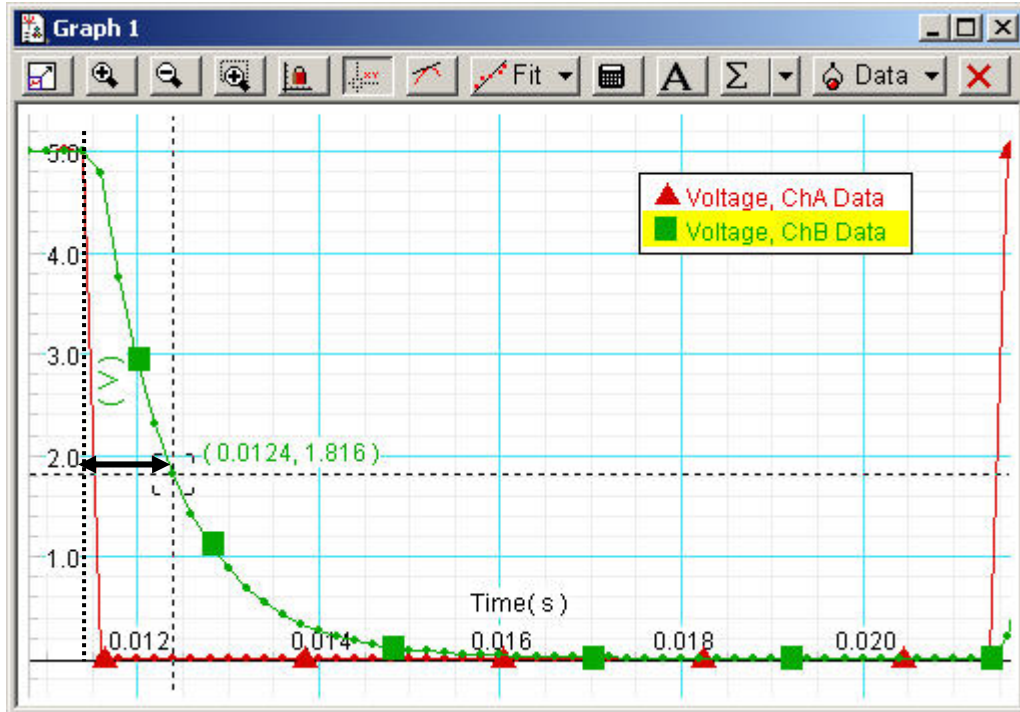


איור 17 : המתח על הקבל (ריבוע) ומתח הכניסה למעגל (משולש). Input voltage משולש).

-מעגלי RC-


10. לחץ על Voltage chB (מסומן בריבוע באיור 17) וסמן באמצעות גרירת העכבר את תהליך הפריקה של הקבל (ראה איזור המסומן בחץ באיור 17). להגדלת איזור הבחירה

לחץ על כפתור . התוצאה מופיעה באיור 18.



איור 18 : מיקוד גרף פריקת הקבל (מתח הקבל -ריבוע), ומתח הכניסה למעגל (משולש).

מאחר וכעבור זמן $t = \tau$ המתח על הקבל הוא - $0.37 \cdot V_0$ (הוכח זאת! ראה שאלות הכנה). כאשר V_0 הוא מתח הכניסה (בניסוי שלנו 5 V).

מצא בעזרת הכפתור  מתי מגיע הקבל למתח של 1.85 ומצא מתי היה הערך האחרון של 5V. כלומר חשב את הפרש הזמנים Δt (מופיע בחץ רוחבי באיור 18). ערך זה הוא τ .

חשב את τ גם לפי הערכים הנקובים של הנגד וקבל, הסבר את הגרפים שקיבלת והסק מסקנות.

השגיאות בערכם של הנגד והקבל הם 10% ו 5% בהתאמה וזאת לפי נתוני היצרנים.

11. חזור על חישוב זה גם עבור תהליך הטעינה של הקבל בתהליך הטעינה. כעבור זמן $t = \tau$ המתח על הקבל יהיה: $0.62 \cdot V_0$ (כלומר עבור מתח כניסה של 5V המתח

יהיה 3.14 V)

-מעגלי RC-

מצא את Δt בצורה דומה לזו שביצעת בתהליך הפריקה וחשב את קבוע הזמן. הסבר את הגרפים שקיבלת והסבר איך משפיע שינוי הקיבול וההתנגדות על זמן הטעינה והפריקה.

12. רשום את משוואת הטעינה והפריקה עבור הזרם וצייר את גרפים של הזרם

כפונקציה של הזמן (זכור ברגע סגירת המפסק ($t=0$) הזרם הוא: $I_0 = \frac{V_0}{R}$.

2.3 מעגלי אינטגרציה וגזירה

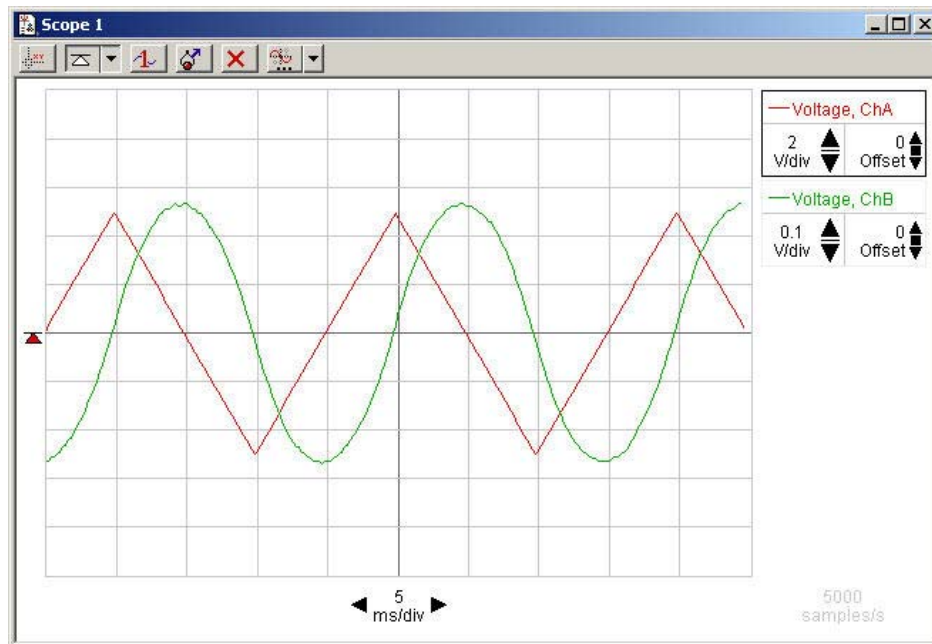
2.3.1. מעגלי אינטגרציה

החלף את הנגד שבאיור 7 ל $47K\Omega$ והחלף את האות החשמלי בכניסה מגל ריבועי לאות SIN את השינוי ניתן לבצע על ידי לחיצה כפולה בחלון Output כפי שתיארנו בסעיף 3 בפרק 2.2. קבע את אמפליטודת האות ל- 5 Volts ואת תדירותו ל- 50 Hz וסגור את החלון.

במצב זה גש לסקופ הפעל את המדידה למספר שניות והפסק. תאר את מתח המבוא למול מתח היציאה.

בצע זאת גם למתחי מבוא נוספים כגון שן-משורר גל משולש וכו'. הדפס חלק מהגרפים (העזר במדריך).

דוגמה לתוצאה שצריך להתקבל עבור גל משולש:



איור 19: דוגמה לאינטגרציה עבור אות כניסה של גל משולש

על מנת לקבל את האות במרכז המסך וביחסי עוצמה הניתנים לצפייה יש לתאם בסקופ את יחסי המתח למשבצת באמצעות החיצים בצד הימני של החלון. תוצאה זו מראה כי עבור אות ליניארי במבוא (CH1) מתקבלת במוצא (CH2) אינטגרציה כלומר פרבולות.

2.3.2 מעגלי גזירה

החלף בין המיקום של הנגד והקבל כמתואר באיור 6 החלף את ערך הנגד ל- 150Ω . חזור על הסעיף הקודם ותאר את מתח המבוא למול מתח היציאה שמתקבל בסקופ. בצע זאת גם למתחי מבוא נוספים כגון שן-משורר גל משולש וכו'. הדפס חלק מהגרפים (העזר ממדריך).

2.4 מעגלי RC כמסננים לתדירויות נמוכות ולתדירויות גבוהות

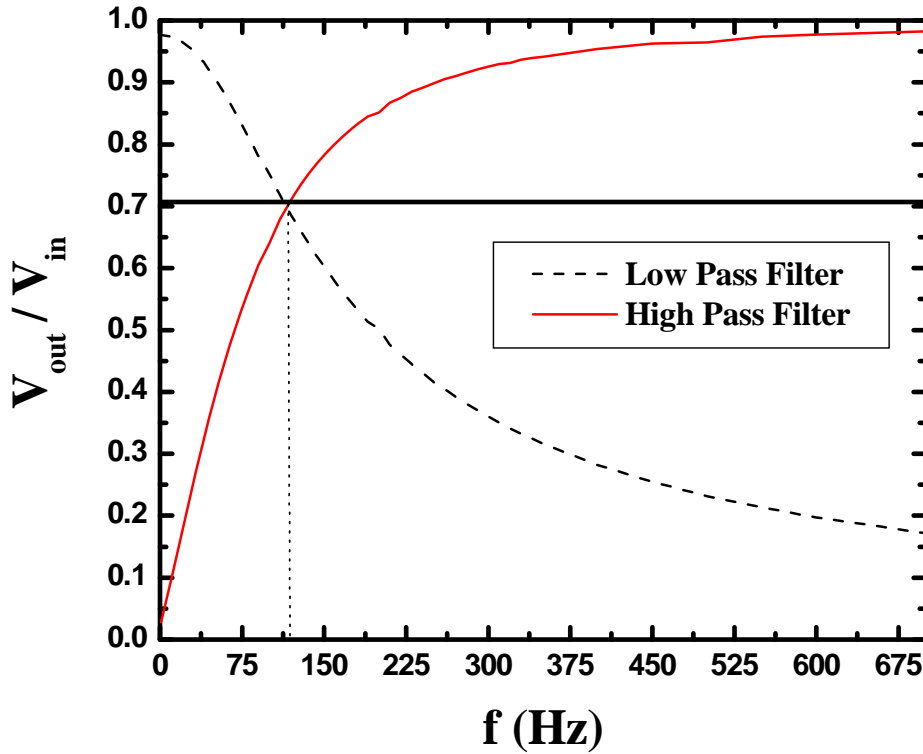
2.4.1 מעגלי RC כמסנן המעביר תדרים נמוכים (Low pass filter)

- א. חבר את המעגל המתואר באיור 7, וחבר קבל של $C=1\mu F$ ונגד $R=820\Omega$.
- ב. בחר את האות החשמלי במבוא כאות \sin בעלת אמפליטודה של 5Volts ותדירות 10 Hz .
- ג. הפעל את הממשק במצב של סקופ ורשום את הערך המקסימלי של המתח ב V_{out} (CH2).
- ד. חזור על הניסוי שוב כך שכל פעם את מעלה את תדירות האות הסינוסואידאלית
ב- 20 Hz עד לתדירות של 300 Hz , ומתדירות 300 Hz עד 1000 Hz בקפיצות של 100 Hz ומ 1000 Hz עד 3000 Hz בקפיצות של 500 Hz

2.4.2 מעגלי RC כמסנן המעביר תדירויות גבוהות (High pass filter)

- ה. החלף בין המיקום של הקבל והנגד (איור 6) וחזור שוב פעם על הניסוי (הפעם נמדד המתח על הנגד). התחל מ- 10 Hz והמשך בקפיצות של 20 Hz עד לתדירות של 300 Hz ומתדירות 300 Hz עד 1000 Hz בקפיצות של 100 Hz .

-מעגלי RC-



איור 20: היחס $V_{out}(f)/V_{in}(f)$ כפונקציה של תדירות מחולל האותות. קו מקוטע עבור מעגל של מסנן לתדירויות נמוכות, קו רציף דק עבור מסנן לתדירויות גבוהות, קו רציף עבה מתאים לערך של $\frac{\sqrt{2}}{2}$.

ערוך גרף של התדירות כפונקציה של יחסי העוצמה: V_{out} / V_{in} עבור שני המסננים. ערוך את הגרף בצורה הדומה לאיור 20. הסבר את הגרף וציין מה המשמעות של נקודת החיתוך וחשב את הערכה. השווה עם נוסחה 26. רשום סיכום ומסקנות על הניסוי שביצעת.