

# מעבדת הכרת מכשור מדידה

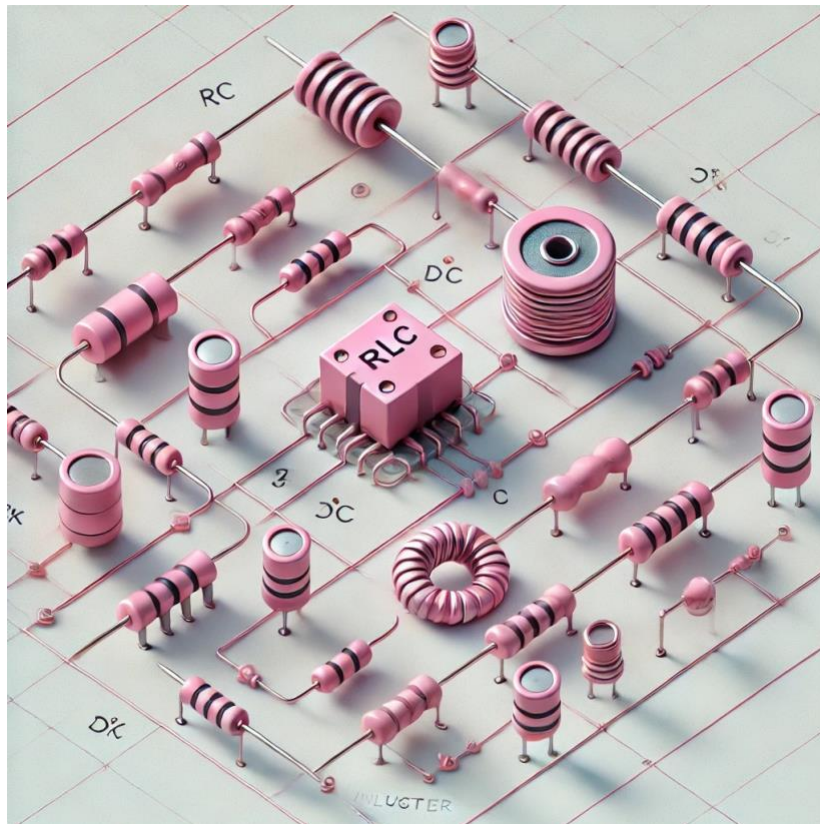
(B4)

דו"ח מסכם

15.01.2024

שם המדריכה : נרמין ח'ג

קבוצה מס' 1



ניר מרקוזון : 209157130  
אביב נימן : 314955873

## 1. תקציר הניסוי

במעבדה זו הכרנו את עקרונות השימוש במכשירי מדידה חשמליים ואת אופן תפקודם. מטרת הניסוי הייתה ללמוד ולהעריך פרמטרים שונים של מעגלים חשמליים בעזרת מכשור המעבדה, ע"י השוואה בין המדידות התאורטיות לאלו שבוצעו בפועל.

בשלב הראשון, למדנו לעבוד עם מכשירי המעבדה: ספק כוח, רב מודד דיגיטלי, מחולל אותות ומטריצת חיבורים. יצרנו מעגלים פשוטים וביצענו מדידות של מתח, זרם והתנגדות. בנוסף, התמקדנו בהשפעת שיטת המדידה על הדיוק, תוך שימוש במכשור דיגיטלי ובמדידה ידנית. הסקנו כי הסטיות בין הערכים המדודים לבין הערכים התאורטיים נובעים מחוסר אידיאליות הרכיבים, סטיות תקן במכשיר המדידה והתנגדות פנימית שנופלת על רכיבים שבתאוריה או מתייחסים אליהם כרכיבים אידיאליים (לדוגמה מתח הספק) בשלב הבא, חקרנו את תכונותיהם של רכיבים חשמליים, כמו נגדים, קבלים וסלילים, ובחנו את התנהגותם במעגלים בתדרים שונים. בפרט, ניתחנו מעגל RC מסנן מעביר נמוכים באמצעות חישוב פונקציית התמסורת, מדידת המתחים עבור תדרים שונים והסקנו מסקנות לגבי דיוק המכשירים, אידיאליות הרכיבים והשוונו בין התאוריה לבין המדידות בפועל.

בשלב השלישי ניתחנו מעגל RLC באופן תאורטי, חישבנו את פונקציית התמסורת שלו, חישבנו את תדר התהודה והשתמשנו בידע התאורטי של ניתוח קבל וסליל במצב מתמיד ובתדרים גבוהים. במהלך הניסוי, שמנו דגש להבדלים בין מודלים תאורטיים לבין תופעות מעשיות, כמו השפעת רעשים והתנגדויות פנימיות.

## 2. מטרת הניסוי

מטרתו העיקרית של ניסוי זה היא הכרת מכשור המדידה הרחב במעבדה, הכרת עקרונות המדידה בצורה תאורטית וביצוע מדידות באמצעות המכשירים. חלק עיקרי ממטרת הניסוי הוא הבנת הפערים בין המדידה המעשית לבין המדידה התאורטית, הכרת שגיאות המדידה הנובעות מחוסר אידיאליות של מכשירי מדידה, טעויות אנוש והתנגדות פנימית של רכיבי המעגל.

## 3. רקע תיאורטי

בניסוי זה נעסוק בהכרת הרכיבים החשמליים השונים ובמימוש מעגלים חשמליים. לצורך כך נרחיב ברקע התיאורטי ראשית על הרכיבים השונים ותכונותיהם, ולאחר מכן נסקור את המכשור הנחוץ בכדי לממש את המעגלים הרצויים ולסקור אלמנטים שונים בהם כגון מתח, התנגדות קיבול וכו'.

### נגד

במעבדה זו נעבוד עם נגדים אקסיאליים – מונח אשר מתייחס ליציאת רגלי הנגד מן הגליל (בציר האורך). נגד הינו רכיב פסיבי במעגל, אשר מתנגד לזרם (ומכאן שמו). את האנרגיה הוא פולט בצורת חום ולכן חשוב לשים לב לכך שהנגד מתחמם תוך כדי פעולתו. לנגד התנגדות קבועה ביחידות של אוהם, ואת הקשר בין המתח הנופל על הנגד לבין הזרם הזורם דרכו נתאר ע"י חוק אוהם[1]:

$$V = IR \quad (1)$$

כאשר  $V$  הינו המתח הנופל על הנגד,  $I$  הזרם העובר דרכו  $R$  התנגדותו של הנגד. ראוי לציין שהנגד, כפי שניתן לראות מחוק אוהם, הינו רכיב לינארי, כאשר אנו עובדים במעגל מקובץ.

נציין כי כאשר פעמים רבות נגדים אשר מחוברים זה לזה בטור או במקביל נחבר יחדיו. נציג את הדרך וההגדרה :

- נגדים המחוברים בטור הינם נגדים להם הדק אחד משותף בלבד, והנוסחה לחיבורם :

$$(2) R_{tot} = \sum_1^i R_i$$

- נגדים המחוברים במקביל הינם נגדים אשר שני ההדקים שלהם משותפים, והנוסחה לחיבורם :

$$(3) \frac{1}{R_{tot}} = \sum_1^i \frac{1}{R_i}$$

### קבל

הקבל הבסיסי, אתו נעבוד במעבדה זו מורכב משני לוחות מוליכים אשר מופרדים זה מזה ע"י חומר מבודד או ריק. כך, כאשר נשרה מתח על הקבל, על כל אחד מן הלוחות יצטבר מטען בגודל שווה ללוח השני, ובסימן הפוך. לקבל אידיאלי תכונות אשר נשתמש בהן רבות ולכן נציין אותן[2]:

- כאשר המתח אשר נופל על הקבל קבוע (DC), ניתן להתייחס לקבל כאל נתק, זאת מכיוון שלא יעברו מטענים דרך הקבל.
- כפי שאנו יודעים, במעגלים בעלי אות משתנה בזמן (AC) נראה שעבור תדרים גבוהים במיוחד יהווה הקבל קצר.

לכל קבל ניתן למדוד קיבול ביחידות של פאראד. הקיבול הינה יחידה המתארת את היכולת של רכיב לאגור מטען חשמלי כאשר קיים מתח בין שני לוחותיו. את הקיבול ניתן להגדיר ע"י המשוואה :

$$(4) C = \frac{dq}{dV_C}$$

כאשר  $dq$  מתאר את שינוי המטען לפי  $dV_C$ , מתח הקבל. משימוש בהגדרת הזרם כשינוי במטען לפי הזמן נוכל לקבל את משוואת הזרם בקבל[2]:

$$(5) i_c = C \frac{dV_C}{dt}$$

כלומר הזרם אשר זורם דרך הקבל שווה לקיבול כפול שינוי מתח הקבל בזמן.

### סליל

בעוד שהקבל אוגר אנרגיה חשמלית, הסליל אוגר אנרגיה מגנטית. הוא מורכב מתיל מוליך אשר מלופף סביב חומר בעל פרמביליות מגנטית גבוהה. זרימה של זרם AC דרך הסליל תוביל ליצירה של שדה מגנטי סביב ליבת הסליל (החומר הפרמבילי), וכפי שאנו יודעים, שינוי בזמן של שטף מגנטי גורם להיווצרות של כא"מ (כוח אלקטרו-מניע) על הסליל. כמו שבקבל נמדוד את הקיבול, בסליל נמדוד את ההשראות, היכול של הסליל להתנגד לשינויים בזרם הזורם דרכו ע"י יצירת של מתח עצמי. את ההשראות נמדוד ביחידות של הנרי. תוך התחשבות במספר הליפופים, שטח הליבה ועוד ניתן לקבל את אופיין המתח זרם של הסליל[2]:

$$(6) V_L = -L \frac{di_L}{DT}$$

### מקורות מתח וזרם

מקור מתח ומקור זרם הינם, בהתאמה, רכיב אשר מאלץ בין שתי קודקודיו מתח וזרם נתון. אלו נשארים קבועים ללא תלוי בזרם או המתח (בהתאמה) הזורם דרכם. כאשר נתייחס למקורות אידיאליים, נניח כי לא קיימת בהם התנגדות פנימית ולכן הערך אותו נדרוש הינו הערך אותו נקבל. במציאות, לא קיימים מקורות אידיאליים ולכן נהוג למדל את ההתנגדות הפנימית של המקור ע"י חיבור של נגד בטור (מקור מתח) או במקביל (מקור זרם) למקור[1].

גורם נוסף אשר נשתמש בו הינם הכבלים או גידים אשר בעזרתם נחבר בין המעגל למקורות. בהנחות המעגל המקובץ אנחנו מניחים כי הגיד מתנהג כמו קצר, כלומר חסר התנגדות לחלוטין. כמו עם המקורות שלנו, במציאות כמובן שלא קיים גיד אידיאלי, ולגידים גם כן התנגדות פנימית, בה ייתכן ונצטרך להתחשב בהתאם למעגל אותו נממש.

לפני שניגש למכשור בו נשתמש נרצה להציג כמה חוקים חשובים ודרכי עבודה במעגלים חשמליים :

### חוקי קירכהוף[2]

- חוק קירכהוף למתחים אומר כי הסכום של מתחים במעגל סגור שווה לאפס
- חוק קירכהוף לזרמים אומר כי הסכום של כלל הזרמים הנכנסים והיוצאים מכל צומת במעגל שווה לאפס.

### מחלק מתח[2]

- מחלק מתח אומר כי במעגל טורי הזרם על כל הנגדים שווה ולכן המתח הנופל עליהם תלוי בהתנגדות הנגד. מכאן ניתן לחלץ את הנוסחה עבור שני נגדים (הנוסחה קיימת גם עבור מספר גבוהה יותר של נגדים, נציג את הנוסחה הרלוונטית לנו :

$$(7) V_i = V_{in} * \frac{R_i}{R_i + R_j}$$

כאשר הנגד המסומן ב*i* הינו הנגד אשר את המחפש שלו אנו מחפשים.

### RMS

RMS (root mean square) הינו מדד לחישוב גודל של מתח משתנה, הוא מבטא את המערך הממוצע האפקטיבי שלו. נוסחתו :

$$(8) RMS = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T |V(t)|^2 dt}$$

### פונקציית תמסורת

פונקציית התמסורת של המערכת מתארת לנו את היחס בין אות היציאה לאות הכניסה :

$$(9) \quad H(\omega) = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

כאשר  $\omega$  הינו התדר הזוויתי. כאשר נבצע התמרת פורייה על אות כלשהו, למעשה נעבור בין מישור הזמן למישור התדר המתואר ב $\omega$  [3]. כאשר נרצה לעבור לתדר אשר מבוטא בהרץ נשתמש בקשר :

$$(10) \quad \omega = 2\pi f$$

בעזרת פונק' התמסורת נוכל למצוא את אמפליטודת אות היציאה ואת הפאזה. את האמפליטודה של האות נחשב ע"י ערך מוחלט של פונק' התמסורת בעוד את הפאזה נחשב ע"י הנוסחה :

$$(11) \quad \Delta\phi = \arctan\left(\frac{Im(H)}{Re(H)}\right)$$

או במקרה בו יש לנו אות דגום בזמן :

$$(12) \quad \Delta\phi = 2\pi f \Delta t$$

נציג כעת את המכשור אתו נעבוד במהלך המעבדה :

### ספק כוח

ספק הכוח ממיר את מתח ה-AC אשר מגיע מן הרשת למתח DC מיוצב בעוצמות נמוכות. לספק מספר כניסות אשר יכולות לעבוד ביחד או בנפרד.

### רב מודד ספרתי (רמ"ס)

המכשיר אשר מאפשר לנו מדידת ערכים רצויים במהלך הניסוי. בעזרת הרמ"ס ניתן למדוד מתח, זרם, התנגדות, קיבול, השראות ועוד. את מדידת ההתנגדות יבצע הרמ"ס ע"י אילוץ של זרם קבוע ושימוש בחוק אוהם.

### מחולל אותות

זהו המכשיר אשר משמש אותנו ליצירת אותות AC. למכשיר שתי יציאות והתנגדות פנימית של  $50\Omega$ . בעזרת המכשיר ניתן לשנות את צורת האות, תדרו, עוצמתו ועוד.

### אוסילוסקופ

הסקופ הינו מד מתח אשר מציג גרף של האות אותו הוא מודד. המכשיר מציג את הגרף ויכול גם למדוד פרמטרים כגון תדר, זמן מחזור, RMS, ועוד. המכשיר מסוגל בנוסף לבצע התמרת פורייה FFT לאות [4].

### מטריצת חיבורים

מט' החיבורים הינה כלי אשר משמש יצירת מעגלים חשמליים באופן נוח וללא הלחמות. למט' חלקים אותם המשמשים לכניסות ויציאות המעגל, אשר בהם כלל הרכיבים מקוצרים אנכית, וחלקים בהם ימצאו הרכיבים, בהם כלל הרכיבים מקוצרים באופן אופקי. בנוסף למט' חלק חיצוני אותו ניתן לחבר למקורות.

#### 4. תיאור הניסוי

##### ציוד הניסוי

- ספק כוח
- רמ"ס- רב מודד ספרתי
- מחולל אותות
- מטריצת חיבורים
- רכיבי המעגל- חוטים, קבלים, כבלים, נגדים, מקורות מתח וזרם מעשיים.

##### מהלך הניסוי

מהלך הניסוי התחלק לשלושה חלקים: מימוש מעגל במטריצת החיבורי ושימוש ברמ"ס, בחינת מעגל RC ובחינת מעגל RLC.

##### חלק ראשון

מטרת חלק זה היא הכרת הרמ"ס, מטריצת החיבורים וביצוע מדידות זרם, מתח והתנגדות. ראשית, מדדנו באמצעות הרמ"ס את ערכי שני הנגדים בעלי ערך מוכרז מהיצרן:  $R_1 = 1000\Omega$ ,  $R_2 = 1500\Omega$ . וחישבנו ערכים מדודים של:  $R_1 = 991\Omega$ ,  $R_2 = 1490\Omega$ . בהמשך, שאר חישובנו התאורטיים התבססו על ערכי הנגדים המדודים. לאחר מכן, מימשנו מעגל טורי בעל שני נגדים, מדדנו את ההתנגדות הכוללת וחישבנו את הסטייה מהערך האידיאלי של ההתנגדות שחישבנו בצורה תאורטית. בשלב הבא, קבענו את הספק לקונפיגורציה טורית ושינינו את המתח כדי שהמתח הנופל על הנגד  $R_1$  יהיה  $4.4V$ .

השתמשנו בחוקי קירכהוף ובמחלק מתח כדי לחשב את מתח הכניסה הכולל התאורטי הדרוש על מנת שייפול המתח הדרוש על נגד  $R_1$ . ערך מתח הכניסה בפועל שמדדנו היה גבוה יותר והסקנו כי מכיוון שמקור המתח אינו אידיאלי, קיימת התנגדות פנימית שמתבזזת מהמתח הכולל ולכן דרוש מתח כניסה גבוה יותר כדי שייפול  $4.4V$  על הנגד.

##### חלק שני- מעגל RC

בחלק הזה מימשנו מעגל RC המשמש כ LPF. המעגל מורכב מחיבור טורי של נגד וקבל עם מקור מתח משתנה בזמן, כאשר מתח היציאה  $V_{out}$  מוגדר להיות המתח הנופל על הקבל. ראשית, ניתחנו את המעגל באופן תאורטי, מצאנו את פונקציית התמסורת המוגדרת ע"י:  $H(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$  וחישבנו את ערך האימפדנס ופונקציית התמסורת עבור תדרים  $f = 0, \frac{1}{2\pi RC}, \infty [Hz]$ . ראינו כי פונקציית התמסורת שואפת ל 1 עבור תדרים נמוכים ול 0 בתדרים גבוהים כמצופה ממסנן מעביר נמוכים.

בשלב הבא, חישבנו את ערך הנגד המתאים כדי שתדר הברך (המוגדר כ  $f = \frac{1}{2\pi RC}$ ) יהיה בקירוב:

$$f_{3db} = 1K[Hz] \text{ כאשר נתון לנו קבל בעל קיבול: } C = 1.5\mu F.$$

בהמשך מדדנו באמצעות הרמ"ס את ערכי הקבל והנגד וחישבנו את הסטייה מהערך האידיאלי.

את מימוש המעגל ביצענו על גבי מטריצת החיבורים. בשלב הבא, בחנו את התנהגות המעגל שמימשנו ע"י שינוי התדר ומדידת המתחים השונים. מדדנו את ערכי המתחים האפקטיביים (RMS) בתדרים:  $f = 50, 500, 1000, 5000, 10000 [Hz]$ .

לאחר מכן, בחרנו בתדר  $500 [Hz]$  ומדדנו באמצעות פונקציית Cursor את הפרש הפאזה ואת הפרש הזמנים (שבאמצעותו חישבנו את הפרש הפאזה התאורטי).

התמשנו בפונקציית FFT כדי להציג את התמרת פורייה של מתח המוצא, קיבלנו אות בתדר שמורכב מדלתא אחת חיובית בתדר חיובי (מכיוון שהסקופ מציג ערכים השייכים לתדרים חיוביים) ורעשים.

בשלב האחרון בחנו את השפעת המעגל כמסנן מעביר נמוכים על סיגנל ריבועי: יצרנו באמצעות המחולל אות ריבועי מחזורי בעל  $f = 3KHz, V_{pp} = 1000mV$  ובחנו את מתח הכניסה ומתח היציאה. לבסוף, בחנו תאורטית איך נוכל לממש באמצעות רכיבי המעגל מסנן מעביר גבוהים וחישבנו את פונקציית התמסורת של מעגל זה באופן תאורטי.

#### חלק שלישי- מעגל RLC

בחלק השלישי בחנו באופן תאורטי בלבד את ההתנהגות של מעגל RLC טורי, מצאנו את פונקציית התמסורת, בחנו את סוג המסנן שהמעגל מממש והתחשבנו בעקרונות התהודה.

## 5. ניתוח ועיבוד התוצאות

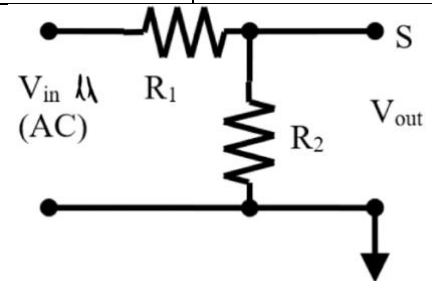
### חלק ראשון

טבלה מס' 1.1 מדדי הנגדים לפי הרמ"ס, לפי ערך מוכרז והסטייה ביניהם

נגד	ערך מדוד [ $\Omega$ ]	ערך מוכרז לפי צבעים [ $\Omega$ ]	סטייה מערך אידיאלי [%]
$R_1$	991	1000	0.9
$R_2$	1490	1500	0.6667

טבלה מס' 1.2 ערך מדוד וערך תאורטי של ההתנגדות הכוללת במעגל וסטייה מהערך האידיאלי

נגד סוג חיבור	סוג חיבור	ערך מדוד [ $\Omega$ ]	ערך תאורטי [ $\Omega$ ]	סטייה מערך אידיאלי [%]
$R_{Total}$	טורי	2480	2481	0.04



איור מס' 1- מעגל מס' 1 שמימשנו בניסוי

המעגל שמימשנו מורכב משני נגדים מחוברים בטור. לכן לפי הנוסחה להתנגדות שקולה בטור (2)  $R_{Total} =$

$$R_{Total} = R_1 + R_2 = 991 [\Omega] + 1490 [\Omega] = 2481 [\Omega] \leftarrow \sum R_i$$

החישוב התאורטי אכן תואם את המדידה, ניתן לראות כי הסטייה בין המדידה לערך התאורטי הינה קטנה

$$error\% = \frac{2481 - 2489}{2481} * 100 = 0.04\%$$

טבלה מס' 1.3 מתח כניסה ספק ומתח כניסה תאורטי במעגל וסטייה מהערך האידיאלי

ערכים	מתח כניסה ספק בפועל [V]	מתח כניסה תאורטי [V]	סטייה מערך אידיאלי [%]
חישובים/מדדות	11.03	11.015	0.136

ביצענו את החישוב באמצעות הנחות קירכהוף. מכיוון שהנגדים מחוברים בטור, הזרם הזורם בנגד  $R_1$  שווה

לזרם הזורם בנגד  $R_2$ , נסמנו  $I$ .

$$I = \frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{4.4[V]}{991[\Omega]} = 4.439[mA]$$

ולכן:

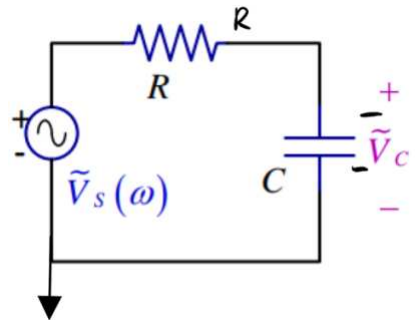


$$V_{R_2} = I * R_2 = 4.439 * 10^{-3}[A] * 1490[\Omega] = 6.615[V]$$

$$V_{in} = 6.615[V] + 4.4[V] = 11.015[V]$$

$$error\% = \frac{|11.015 - 11.03|}{11.015} * 100 = 0.136\%$$

### חלק 2- מעגלי RC



איור מס' 2.1- מעגל מס' 2 שמימשנו בניסוי

### א. חישוב ערך האימפדנס

$$Z_C = \frac{1}{j\omega c} = \frac{1}{j2\pi f c} \rightarrow \infty : f \rightarrow 0 \text{ אימפדנס הקבל כאשר } 0$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega c} = \frac{1}{2\pi f c} \rightarrow -Rj \rightarrow |Z_C| = R : f \rightarrow \frac{1}{2\pi RC} \text{ אימפדנס הקבל כאשר}$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega c} \rightarrow 0 : f \rightarrow \infty \text{ אימפדנס הקבל כאשר}$$

$$ב. \text{ מציאת פונקציית התמסורת } H(f) = \frac{V_C}{V_S}$$

נשתמש בנוסחה למחלק מתח (7) על מנת לחשב את המתח הנופל על הקבל.

$$V_C = V_S * \frac{\frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + R} = V_S \frac{1}{1 + Rj\omega C}$$

$$H(f) = \frac{V_C}{V_S} = \frac{1}{1 + Rj\omega C} = \frac{1}{1 + Rj2\pi f C}$$

### ג. ערכה של פונקציית התמסורת בתחומי תדר שונים

$$H(f \rightarrow 0) = \frac{1}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow 1$$

$$H\left(f \rightarrow \frac{1}{2\pi RC}\right) = \frac{1}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow \frac{1}{1 + \frac{1}{j}} = \frac{j}{j+1}, \left|H\left(f \rightarrow \frac{1}{2\pi RC}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$H(f \rightarrow \infty) = \frac{1}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow 0$$

ד. נחשב את ערך הנגד המתאים עבור מעגל  $RC$  ובו  $C = 1.5\mu F$  כך שתדר הברך יהיה בקירוב טוב  $f_{3db} = 1KHz$

$$f_{3db} = \frac{1}{2\pi RC} = 1$$

$$\frac{1}{2\pi R 1.5 * 10^{-6}} = 1$$

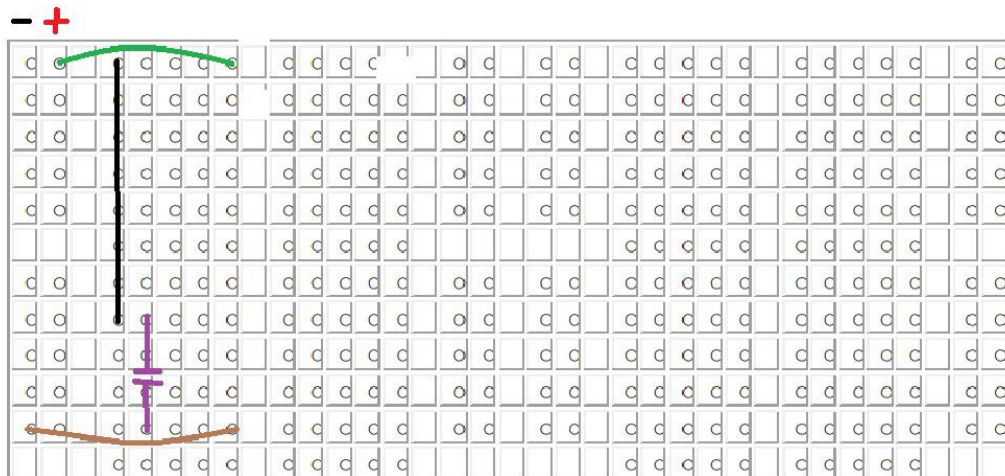
$$R = 106.1 \approx 100[\Omega]$$



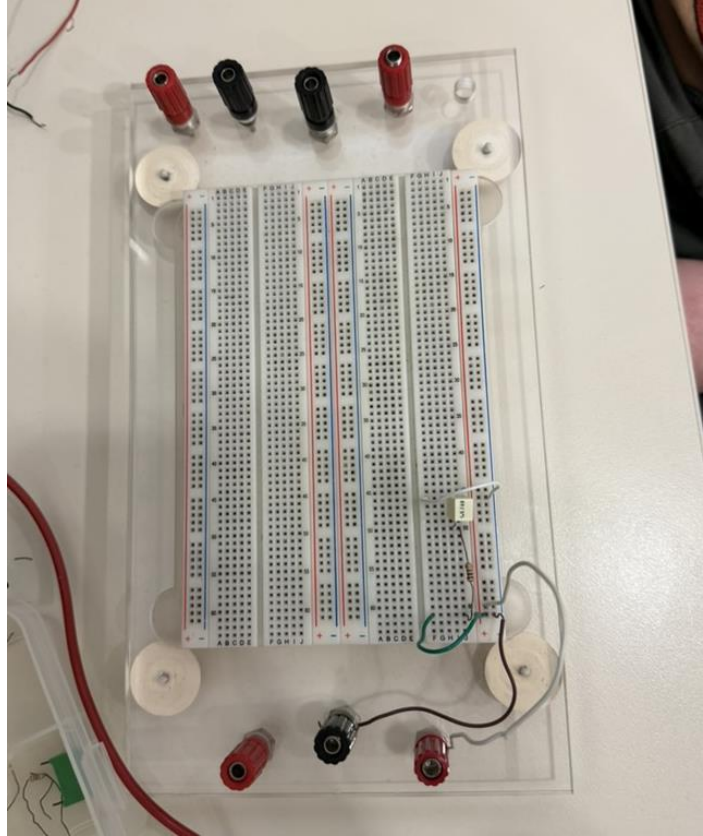
ה. טבלה מס' 2.1- ערכים מדודים של הקבל והנגד במעגל הניסוי וסטייה מערך אידיאלי

מדידה	ערך מדוד	סטייה מערך אידיאלי [%]
קבל	$1.525[\mu F]$	1.666
נגד	$98.5[\Omega]$	1.5

ו.



איור מס' 2.2- מעגל הניסוי על גבי מטריצה- הקבל מתואר בצבע סגול והנגד מתואר בצבע שחור



איור מס' 2.3- המעגל שמימשנו באמצעות המטריצה במהלך הניסוי  
את סעיפים ז- יב ביצענו במהלך הניסוי

יג. טבלה מס' 2.2 המתאים האפקטיביים במעגל בהתאם לחמשת התדרים השונים

מס' תדר	ערך התדר [Hz]	מתח קבל [mV]	מתח נגד [mV]	מתח כולל [mV]
$f_1$	50	138	222	360
$f_2$	500	182	150	324
$f_3$	1000	150	169	280
$f_4$	5000	41.2	233	239
$f_5$	10000	28	234	236

יד.

- נבחין במגמה לה ציפינו במהלך הניסוי, ככל שהתדר עולה כך המתח על הקבל יורד והמתח הנופל על הנגד עולה. (למעט השורה הראשונה בטבלה מס' 2.2 עבור תדר  $f_1$  אשר לא עומד במגמה הזאת, נסיק כי מדובר בשגיאת מדידה). מגמה זו הגיונית מכיוון שכפי שראינו [1], במעגל  $RC$  הקבל משמש כ  $LPF$  ולכן רב המתח נופל עליו בתדרים נמוכים בעוד שהנגד משמש כ  $HPF$  ולכן נופל עליו יותר מתח בתדרים גבוהים מאשר הקבל.
- צפינו במגמה נוספת, אליה לא ציפינו, המתח הכולל על המעגל יורד עם העלייה בתדר. סיבה לתופעה זו, היא מכיוון שלמחולל האותות התנגדות פנימית של כ  $50[\Omega]$  (לא קטנה ביחס לנגד במעגל), ניתן להתייחס להתנגדות במעגל כחיבור טורי בין הנגד לבין ההתנגדות הפנימית של המחולל. ולכן, בתדרים גבוהים כאשר כפי שצינו רב המתח נופל על הנגדים ולא על הקבל, יותר מתח יאבד על ההתנגדות הפנימית ולכן המתח הכולל יורד.
- ניתן לראות לפי הטבלה כי ככל שהתדרים עולים כך, סכום המתחים על הקבל והנגד לא שווה לסכום הכולל. סיבה לתופעה זו הינה הצגת ערכי המתחים ב  $RMS$  לפי נוסחה (8), פעולה שאיננה לינארית.

$$RMS = V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T |V(t)|^2 dt}$$

ניתן לראות כי פעולה זו איננה לינארית ולכן החיבור בין מתחי הרכיבים במעגל בתדרים גבוהים לא שווה למתח הכולל.

טו. וקטור  $z$  הינו סיגנל הכניסה  $z_c$  הינו אימפדנס הקבל ו  $R$  הינו אימפדנס הנגד. הזווית אשר מתארת את הפרש המופע בין סיגנל הכניסה ליציאה הינה הזווית  $\alpha$ . אנו יודעים כי במעגל  $RC$  הפרש הפאזה עבור תדר שואף לאינסוף בערך מוחלט היא 90 מעלות. בנוסף, עבור תדרים מאוד גבוהים ידוע כי המתח במעגל נופל על הנגד ולא על הקבל, ולכן הפרש הפאזה בין אות הכניסה ליציאה יהיה 90 מעלות. עבור תדרים נמוכים השואפים ל0, הפרש הפאזה ישאף ל0. כמו כן, עבור תדרים נמוכים רב המתח נופל על הקבל ולכן הפרש הפאזה יהיה קרוב ל0. הזווית המקיימת עיקרון זה הינה הזווית  $\alpha$  ולכן היא הזווית הרלוונטית.

ל'. טבלה מס' 2.3 - הפרשי הפאזה בתדר  $500[Hz]$  המדוד והתאורטי והסטייה ביניהם.

מס' תדר	ערך התדר [Hz]	הפרש זמנים [mSec]	הפרש פאזה מדוד [rad]	הפרש פאזה תיאורטי [rad]	סטייה [%]
$f_2$	500	0.2	$0.2\pi$	$0.14\pi$	42

נחשב את הפרש הפאזה התאורטי לפי נוסחה (11):

$$\Delta\phi = \arctan(-\omega RC) = \arctan(-2\pi * 500 * 98.5 * 1.525 * 10^{-6}) = 0.14\pi$$

את הפרש הפאזה המדוד נחשב לפי נוסחה (12):

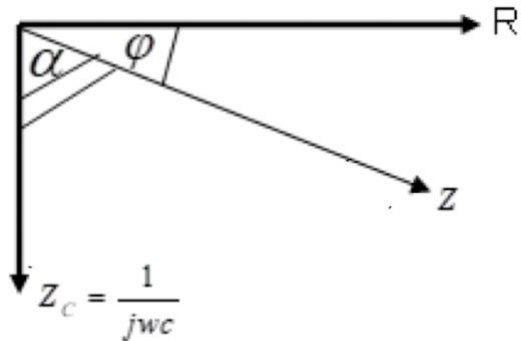
$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t = 2\pi * 500 * 0.2 * 10^{-3} = 0.2\pi$$



$$\text{error}\% = \frac{|0.14\pi - 0.2\pi|}{0.14\pi} * 100 = 42\%$$

יח. אין התאמה בין הערך המדוד לבין הערך התאורטי, חישבנו סטייה יחסית גדולה של 42%. ככל הנראה, הסטייה הגדולה התקבלה מכיוון שמדדנו את הערכים באמצעות הcursor באופן ידני ע"י שנתות המכשיר לפי מראית העין, לכן היה מקום לטעויות אנוש אשר הובילו לשגיאת מדידה.

ערך הפאזה בין סיגנל הכניסה לנגד יהיה:  $\alpha - \frac{\pi}{2}$  כאשר  $\Delta\phi$  מייצגת את הפרש הפאזה בין סיגנל הכניסה לבין אימפדנס הקבל. ניתן לראות זאת בבירור ע"י האיור הבא:



איור מס' 2.4 - הפרשי הפאזות בין סיגנל הכניסה z לבין האימפדנסים של רכיבי המעגל

יט. השתמשנו בפונקציית ה FFT ע"מ להציג התמרת פורייה של מתח המוצא. האות התאורטי שאמור היה להתקבל הינו התמרת פורייה של פונקציית סינוס מוכפלת בסקלר, כלומר 2 דלתאות שוות בגודלן והפוכות בכיווןן המופיעות בתדר האות [3]. בפועל, קיבלנו דלתא אחת בתדר האות החיובי, ורעשים בגדלים נמוכים ביחס לדלתא. הסיבה להבדל זה נובע מכך שהסקופ מציג אך ורק ערכים עבור תדרים חיוביים. כמו כן, הרעשים נובעים מרעשי רקע אשר נקלטו ע"י הסקופ ולכן נתעלם מהם.

כא. כעת נבחן את השפעת ה LPF על סיגנל ריבועי. הגדרנו סיגנל ריבועי בעל  $v_{pp} = 100[mV]$  ו  $f = 3000[Hz]$ .

בתדר הזה שזמן המחזור שלו הינו:  $T = \frac{1}{3000} = 3.33 * 10^{-4}$  קבוע הזמן

$$RC = 98.5 * 1.525 * 10^{-6} = 1.5 * 10^{-4}$$

כלומר זמן המחזור של אות היציאה הינו באותו סדר גודל של  $5\tau$ . ולכן ניתן לראות כי הקבל מספיק להיטען באופן מלא כאשר נופל עליו מתח ולפרוק כאשר מתח הכניסה שלילי. ולכן, ניתן לראות כי אות היציאה אינו גל מחזורי ריבועי אלא גל משולש.

ככל שנעלה את התדר אות היציאה יהיה בעל אמפליטודה נמוכה יותר מאות הכניסה (כלומר הקבל לא יספיק להיטען ולפרוק במלואו) וזאת בהתאמה לכך שהמעגל מתפקד כ LPF.

הפעולה אשר הקבל מבצע על סיגנל הכניסה הינה אינטגרציה. כפי שאנו יודעים, הקשר בין אות הכניסה ליציאה מתואר ע"י פונקציית התמסורת בתדר כך:  $Y(f) = X(f) * H(f)$

וכפי שחישבנו את פונקציית התמסורת בסעיף ב:  $Y(f) = X(f) * \frac{1}{1+2\pi f jRC}$  עבור תדר גבוה ( $3000 \gg 1$ )

ניתן להזניח את ה-1 במכנה ולקבל  $Y(f) = X(f) * \frac{1}{2\pi f jRC} = X(f) * \frac{1}{RC} * \frac{1}{2\pi f j} = X(f) * \frac{1}{RC} * \frac{1}{j\omega}$

ולאחר המרה למישור הזמן  $F^{-1}\{X(f) * \frac{1}{RC} * \frac{1}{j\omega}\} = \frac{1}{RC} \int x(t)dt$  [3].



איור מס' 2.5- אות הכניסה ואות היצאה על גבי הסקופ בתדר 3000[Hz].

כעת. נרצה להמיר את המעגל למסנן מעביר גבוהים, נוכל לעשות זאת ע"י החלפה בין הנגד לקבל כך שהמתח

הנופל על הנגד יהיה מתח היצאה  $V_{out}$ .

נמצא את פונקציית התמסורת של ה  $HPF$ :

כדי למצוא את המתח הנופל על הנגד נשתמש בנוסחת מחלק מתח (7):

$$V_R = V_{in} * \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = V_{in} \frac{Rj\omega C}{1 + Rj\omega C}$$

$$H(f) = \frac{V_R}{V_{in}} = \frac{Rj2\pi fC}{1 + Rj2\pi fC}$$

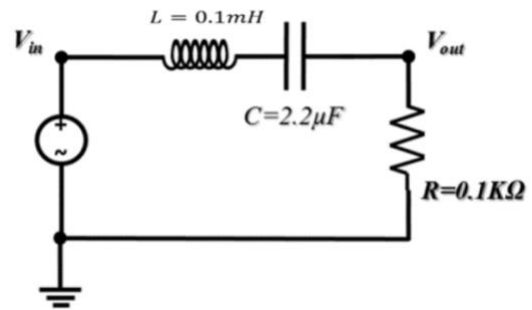
כג.

$$H(f \rightarrow 0) = \frac{Rj2\pi fC}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow 0$$

$$H\left(f \rightarrow \frac{1}{2\pi RC}\right) = \frac{Rj2\pi fC}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow \frac{1}{1+j}, \left|H\left(f \rightarrow \frac{1}{2\pi RC}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$H(f \rightarrow \infty) = \frac{Rj2\pi fC}{1 + Rj2\pi fC} \rightarrow 1$$

### חלק 3 מעגל RLC



איור מס' 3- מעגל RLC

א. אמור להתקבל מסנן מסוג  $BPF$ . אנו יודעים כי בתדרים גבוהים קבל משמש כקצר וסליל כנתק ובתדרים נמוכים הקבל משמש כנתק והסליל כקצר. לכן עבור כל התדרים (למעט תדר התהודה עליו נפרט) קיים נתק במעגל, לכן לא יזרום זרם דרך הנגד והמתח הנופל עליו  $V_{out} = 0$ .

בתדר התהודה, סליל וקבל המחוברים בטור מתנהגים כקצר, ולכן עבור תדר התהודה  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$\leftarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ . עבור המעגל שלנו המקיים: } L = 0.1 \text{ [mH]}, C = 2.2 \mu F$$

לכן מבחינה פיזיקלית, המעגל מעביר רק אותות בתדר  $f = 2\pi \frac{1}{\sqrt{LC}}$  ומשמש כ  $BPF$  [1].

ב. נחשב את פונקציית התמסורת של המעגל: אנו יודעים כי האימפדנסים של המעגל מקיימים:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}, Z_L = j\omega L, Z_R = R$$

מכיוון שכולם מחוברים בטור נבצע מחלק מתח לפי הנוסחה (7) ונשתמש בקשר בין  $\omega$  ל  $f$  (10):

$$V_R = V_{out} = V_{in} \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L} = V_{in} \frac{Rj\omega C}{(R + j\omega L)j\omega C + 1}$$

$$H(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Rj2\pi fC}{(R + j2\pi fL)j2\pi fC + 1}$$

תדר התהודה הינו:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.1 * 10^{-3} * 2.2 * 10^{-6}}} = 10.73 \text{ [KHz]}$$

ננתח את פונקציית התמסורת בצורה איכותית :

$$H(f \rightarrow 0) = \frac{Rj\omega C}{(R + j\omega L)j\omega C + 1} \rightarrow 0$$

$$H\left(f \rightarrow \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right) = \frac{Rj\omega C}{(R + j\omega L)j\omega C + 1} \rightarrow 1$$

$$H(f \rightarrow \infty) = \frac{Rj\omega C}{(R + j\omega L)j\omega C + 1} \rightarrow 0$$

ג. המסנן ההופכי לזה שהתקבל הינו  $BSF$ , מסנן חוסם סרט. על מנת לממש את המסנן הזה, נוכל להחליף בין מקום הסליל והקבל לבין מקום הנגד ומתח היציאה הנמדד יהיה מתח הנופל על הקבל והסליל. במעגל זה, עבור תדרים שונים מתדר התהודה, הסליל והקבל משמשים כנתק ולכן לא זורם זרם בנגד, והמתח של היציאה שווה למתח הכניסה. בתדר התהודה, הקבל והסליל משמשים כקצר, הם מקוצרים לאדמה ולכן המתח הנופל עליהם הוא אפס. ואותות בתדר זה יונחתו כנדרש.



## 6. מסקנות

### חלק ראשון

בחלק זה, למדנו להשתמש ברב מודד ספרתי-רמ"ס על מנת לבצע מדידות זרם, מתח והתנגדות. החלק הראשון כלל חישובים תאורטיים ומדידות של מעגל טורי פשוט הכולל שני נגדים. ראינו כי המדידות הנעשו ע"י הרמ"ס היו קרובות לחישובים התאורטיים במהלך הניסוי. שגיאות המדידה היו יחסית קטנות, כולן היו פחות מאחוז. שגיאות המדידה בחישוב הנגדים יכולות לנבוע מכך שהנגדים אינם אידיאליים, ייתכן כי לחוטים ולרמ"ס התנגדות פנימית נוספת. בנוסף, השתמשנו בחוקי קירכהוף למתחים וזרמים על מנת לחשב את מתח הכניסה עבורו יתקבל  $V_{R_1} = 4.4[V]$  שגיאת המדידה בין מתח הכניסה המעשי לבין התאורטי שהתקבלה היא: 0.136% ייתכן כי נבעה מהתנגדות פנימית של מקור המתח אשר גרמה לכך שייפול מתח נוסף על רכיב זה ויגרום לכך שהמתח הנדרש לקבלת  $V_{R_1} = 4.4[V]$  בפועל יהיה גדול יותר.

### חלק שני

בשלב זה בניסוי, מימשנו מעגל  $RC$  טורי ע"י מטריצת חיבורים. ראשית, מדדנו את קיבול הקבל והתנגדות הנגד באמצעות הרמ"ס. ועבור קיבול והתנגדות נתונים קיבלנו סטייה של 1.66% עבור הקבל וסטייה של 1.5% עבור הנגד. נסיק כי גם שגיאות נובעות מאותן סיבות שפירטנו עליהן בחלק הראשון. בהמשך, חישובנו את פונקציית התמסורת המתארת את הקשר בין אות הכניסה לאות היציאה (מתח הקבל), בחנו את פונקציית התמסורת בתדרים שונים וראינו כי היא מתנהגת כ- $LPF$  כמצופה. גם לפי הבנה פיזיקלית של התנהגות המעגל נוכל להסיק זאת. הקבל בתדרים נמוכים משמש כנתק, לא זורם זרם על הנגד ולכן לא

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 \text{ ו } \text{הקבל על הנופל על הקבל}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0 \text{ מתח עליו נופל לא נופל עליו מתח}$$



בהמשך, מדדנו את המתחים הנופלים על כלל הרכיבים במעגל :  $V_{in}, V_R, V_C$  בתדרים שונים :  $f = 50, 1000, 500, 5000, 10,000 [Hz]$ . הבחנו בשלוש תופעות שונות : כצפוי, עם עליית התדר ירד המתח הנופל על הקבל ועלה המתח הנופל על הנגד, זאת בהתאמה להסבר התאורטי שפירטנו עליו. לעומת זאת, תופעה שנייה לא ציפינו : המתח הכולל החל לרדת ככל שהעלנו את התדרים. נסיק כי תופעה זו קרתה בגלל ההתנגדות הפנימית של מחולל האותות. נתייחס להתנגדות במעגל כחיבור טורי בין הנגד לבין ההתנגדות הפנימית של המחולל. בתדרים גבוהים, רב המתח ייפול על הנגד השקול ולכן, יאבד יותר מתח על ההתנגדות הפנימית. תופעה שלישית, אשר גם כן הפתיעה אותנו היא שסכום המתחים על הקבל והנגד לא היה שווה לסכום הכולל (בניגוד לחוקי קירכהוף) ככל שהעלנו את התדר. הסקנו כי תופעה זו נובעת מאי-לינאריות של חישוב המתח באמצעות  $RMS$ . בשלב הבא של החלק השני, חישובנו את הפרשי הפאזה בתדר  $500 [Hz]$  המדוד והתאורטי והסטייה ביניהם. השתמשנו בנוסחה (12) על מנת לחשב את הערך המדוד ובנוסחה (11) על מנת לחשב את הערך התאורטי. קיבלנו שגיאה גדולה של כ 42%, הסקנו כי מכיוון שמדדנו את הפרשי הזמנים, ע"י סימון הפיקים באופן ידני ע"י שנתות הסקופ, השגיאה נבעה מטעויות אנוש שלנו.

בהמשך, השתמשנו בפונקציית ה- $FFT$  כדי להציג התמרת פורייה של מתח המוצא. האות התאורטי שאמור היה להתקבל הינו התמרת פורייה של פונקציית סינוס מוכפלת בסקלר, כלומר 2 דלתאות שוות בגודלן והפוכות בכיוון המופיעות בתדר האות. אך למעשה, קיבלנו דלתא אחת בתדר האות החיובי, ורעשים בגבהים נמוכים. ההבדלים בין התמרת פוריה התאורטית למעשית נבעו מכך שהסקופ מציג ערכים של תדרים חיוביים בלבד. כמו כן, הרעשים התקבלו מחוסר אידיאליות של המכשיר.

לאחר מכן, הזנו אות כניסה ריבועי בעל  $v_{pp} = 100 [mV]$  ו  $f = 3000 [Hz]$ . עבור תדר זה, קיבלנו אות יציאה משולש מחזורי. חקרנו את התופעה שהתקבלה, והסקנו כי הפעולה אשר הקבל מבצע על אות הכניסה הינה אינטגרציה. כמו כן, בתדר זה הקבל הספיק בכל זמן מחזור להיטען ולפרוק במלואו מכיוון שזמן המחזור באותו סדר גודל של  $5\tau$ . בנוסף, הסקנו כי עלייה בתדר תגרום לכך שהקבל לא יספיק להיטען ולהיפרק במלואו ולכן עלייה בתדר תגרום להנחתת האות, כמצופה ממעגל  $LPF$ .

לבסוף, ראינו כי אפשר לשנות את המעגל למסנן  $HPF$  ע"י החלפת הנגד והקבל כך שמתח היציאה יהיה המתח הנופל על הנגד.

חלק שלישי

בחלק זה, בחנו את פעולת מעגל  $RLC$  טורי כ- $BPF$ . השתמשנו בתאוריה, לפיה בתדרים גבוהים הקבל משמש כקצר והסליל משמש כנתק ובתדרים נמוכים להפך. בעקבות כך, התדר היחיד שמועבר ע"י המסנן, הינו תדר התהודה. בתדר זה סליל וקבל המחוברים בטור משמשים יחדיו כקצר מכיוון שתגובות ההשראות של הרכיבים החשמליים מבטלות זו את זו. לכן כל המתח נופל על הנגד, כלומר מתח היציאה. ראינו כי החלפת מקום הסליל והקבל עם הנגד תגרום למעגל לשמש כ- $BSP$ .

## **ביבליוגרפיה**

1. קורס מעגלים חשמליים 044105
2. דפי הניסוי B4
3. קורס אותות ומערכות 044131
4. דפי ניסוי B1