

הנדסה ביו רפואית

מעבדה בחשמל

מגשים:

דן טורצקי

סול אמרה

תאריך:

17.11.2021

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:	9
2.2	ניסוי 2:	10
2.2.1	היפותזה:	10
2.2.2	מתודולוגיה:	10
2.2.3	תוצאות:	10
2.2.4	מסקנות:	16
2.3	ניסוי 3:	17
2.3.1	היפותזה:	17
2.3.2	מתודולוגיה:	17
2.3.3	תוצאות:	17
2.3.4	מסקנות:	20
2.4	ניסוי 4:	21
2.4.1	היפותזה:	21
2.4.2	מתודולוגיה:	21
2.4.3	תוצאות:	22
2.4.4	מסקנות:	23
3	מסקנות כלליות:	24
4	מקורות:	25
5	נספחים:	26

1 תקציר:

מטרת ניסוי זה הינה ללמוד כיצד ניתן באמצעות הרכבה של המעגל (סדר החיבורים) ובחירת ערכי הרכיבים (התנגדות, קיבול, השראות) ליצור מעגלים לשימושים שונים – מעגלים המסננים תדרים מסוימים ומעבירים אחרים ומעגלים המשנים את הפאזה במעגל. לשם כך, הרכבנו מעגלים שונים בהתאם לשימוש שרצינו לבחון ומדדנו את השפעת שינוי הערכים המתאימים על המעגלים. כעת אנו יודעים כיצד להרכיב מסננים שונים (HPF , LPF , BPF) ומעגל משנה פאזה (מהפך פאזה). כמו כן, למדנו כי עלינו לשקול האם יש להתחשב בהתנגדות פנימית של רכיבים כמו סליל, קבל שאינם בהכרח זניחים.

2 ניסויים:

2.1 ניסוי 1:

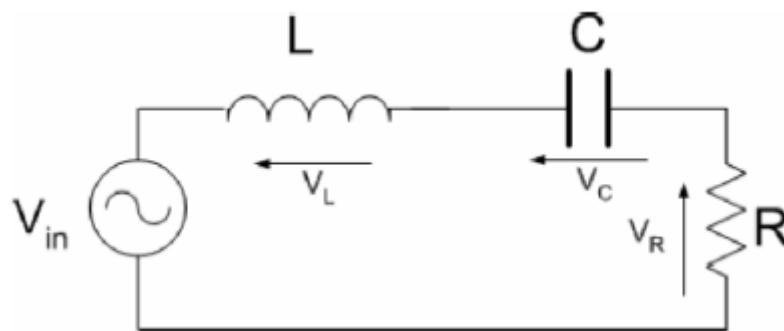
2.1.1 היפותזה:

בניסוי זה נבחן את השפעת ההתנגדות הפנימית של הסליל על הדיוק בחישוב התוצאות. נשער כי כאשר נתחשב בהתנגדות הפנימית של הסליל נקבל שגיאה נמוכה יותר מהחישובים שנבצע ללא התייחסות זו כיוון שההתנגדות משנה את המאפיינים של המעגל וכתוצאה מכך יהיה מתח שונה על שאר הרכיבים. בנוסף, על ידי מדידות ההגבר על הנגד בתדרים שונים נבנה אופיין ונשווה אותו לגרף שקיבלנו באמצעות החישוב התאורטי. נצפה כי הגרף כתוצאה מהמדידות במעבדה יהיה פחות מדויק ויצוג ערכים שונים כיוון שישנה התנגדות פנימית וחוסר דיוק במדידה יוביל לכך שתדר התהודה ישתנה וישפיע על צורת הגרף. על מנת לקבל תוצאה מדויקת ככל הניתן נבחר טווח ערכים כך שיכיל את התדרים הקרובים לתדר התהודה שחושב בדוח המכין.

2.1.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: סליל, נגד, קבל, רב מודד, מחולל אותות, אוסילוסקופ, 5 כבלי בננה-בננה, 4 כבלי BNC-בננה.

מהלך הניסוי: ראשית הגדרנו את השראות הסליל ל $L = 0.3 H$ ומדדנו את ההתנגדות הפנימית על ידי חיבור הסליל באמצעות כבלי בננה-בננה לרב מודד. לאחר מכן הרכבנו את המעגל המתואר באיור 1.



איור (1): מעגל RLC טורי [1]

חיברנו את הקבל הנגד והסליל באמצעות כבלי בננה-בננה. מקור המתח הינו מחולל האותות אותו חיברנו לסליל והנגד באמצעות כבלי BNC-בננה. הגדרנו במחולל האותות:

$f = 300 Hz$, $V_{eff} = 3 V$ ובאמצעות הרב מודד מדדנו את המתחים האפקטיביים על הנגד, הקבל והסליל. לאחר מכן חיברנו את האוסילוסקופ באמצעות שני כבלי BNC-בננה כך שימדוד את מתח הנגד ומתח המקור ושינינו את התדירות במחולל האותות בטווח $30 - 3000 Hz$. בנוסף, מדדנו את מתח המוצא באמצעות מחולל האותות ובדקנו שהוא מציג שהמתח האפקטיבי הינו $3 V$, לשם כך היינו צריכים לשנות את מחולל האותות כך שיתן מתח אפקטיבי של $3.2 V$. הגדרנו במחולל האותות את תדר התהודה שמצאנו בדוח המכין $f = 290.58 Hz$ ומדדנו את הערכים של המתח האפקטיבי על הקבל הנגד והסליל באמצעות הרב מודד.

2.1.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות הינן:

התנגדות הסליל כפי שנמדד על ידי הרב מודד: $R_L = 0.232164 \text{ k}\Omega = 232.164 \Omega$

טבלה (1): המתחים שנמדדו על ידי הרב מודד עבור $f = 300 \text{ Hz}$, $V_{eff} = 3 \text{ V}$

$V_{rms,in}$	$V_{rms,R}$	$V_{rms,C}$	V_L
2.86136 V	2.2227 V	1.47513 V	1.62816 V

טבלה (2): המתחים שנמדדו על ידי האוסילוסקופ עבור תדרים שונים

$f \text{ [Hz]}$	$V_{rms,in}$	$V_{rms,R}$
30	2.9811 V	451.22 mV
100	2.9377 V	1.3478 V
200	2.8709 V	2.0608 V
250	2.8560 V	2.1909 V
290.6	2.8517 V	2.2224 V
350	2.8557 V	2.1937 V
400	2.8638 V	2.1283 V
500	2.8834 V	1.9542 V
1000	2.9522 V	1.2320 V
1500	2.9731 V	864.20 mV
2000	2.9837 V	659.90 mV
2500	2.9888 V	534.20 mV
3000	2.9900 V	447.38 mV

טבלה (3): המתחים שנמדדו על ידי הרב מודד עבור תדר הנהודה של המעגל כאשר $V_{eff} = 3.2 \text{ V}$

f_0	$V_{rms,in}$	$V_{rms,R}$	$V_{rms,C}$	V_L
290.58 Hz	3.05066 V	2.36671 V	1.62194 V	1.68873 V

בדוח המכין התוצאות שהתקבלו עבור המתחים האפקטיביים על הקבל הנגד והסליל הן:

$$V_{R,rms} = 2.997 \text{ V}, \quad V_{L,rms} = 2.118 \text{ V}, \quad V_{C,rms} = 1.987 \text{ V}$$

ללא התחשבות בהתנגדות הפנימית של הסליל נחשב את השגיאה היחסית בין ערכים אלו לערכים שנמדדו ומוצגים בטבלה (1):

$$V_{in,rms}: \frac{3 - 2.86136}{3} \cdot 100\% = 4.621 \%$$

$$V_{R,rms}: \frac{2.997 - 2.2227}{2.997} \cdot 100\% = 25.84 \%$$

$$V_{C,rms}: \frac{1.987 - 1.47513}{1.987} \cdot 100\% = 25.76\%$$

$$V_{L,rms}: \frac{2.118 - 1.62816}{2.118} \cdot 100\% = 23.13\%$$

כעת נחזור על החישוב התאורטי עם התחשבות בהתנגדות הפנימית של הסליל. ניתן להתייחס להתנגדות זו כנגד בעל התנגדות זהה המחובר לסליל בטור:

$$\begin{aligned}\widetilde{V}_R &= \frac{R}{R + j\omega L + R_L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \widetilde{V}_{in} = \\ &= \frac{800}{800 + 600\pi \cdot 0.3j + 232.164 + \frac{1}{j \cdot 600\pi \cdot 10^{-6}}} \cdot 3\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{\pi j}{2}} \\ &= 3.2865 \cdot e^{-1.6047j} \\ \widetilde{V}_L &= \frac{j\omega L}{R + j\omega L + R_L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \widetilde{V}_{in} = \\ &= \frac{j \cdot 600\pi \cdot 0.3}{800 + 600\pi \cdot 0.3j + 232.164 + \frac{1}{j \cdot 600\pi \cdot 10^{-6}}} \cdot 3\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{\pi j}{2}} \\ &= 2.3231 \cdot e^{-0.0339j} \\ \widetilde{V}_C &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + R_L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \widetilde{V}_{in} = \\ &= \frac{\frac{1}{j \cdot 600\pi \cdot 10^{-6}}}{800 + 600\pi \cdot 0.3j + 232.164 + \frac{1}{j \cdot 600\pi \cdot 10^{-6}}} \cdot 3\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{\pi j}{2}} = 2.1794 \cdot e^{3.1077j}\end{aligned}$$

נעבור לביטוי התלוי בזמן:

$$V_R = 3.2865 \cos(600\pi t - 1.6047)$$

$$V_L = 2.3231 \cos(600\pi t - 0.0339)$$

$$V_C = 2.1794 \cos(600\pi t + 3.1077)$$

נחשב את המתח האפקטיבי:

$$\begin{aligned}V_{R,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} = \sqrt{300 \cdot \int_0^{\frac{1}{300}} (3.2865 \cos(600\pi t - 1.6047))^2 dt} \\ &= 2.3239 V\end{aligned}$$

$$V_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} = \sqrt{300 \cdot \int_0^{\frac{1}{300}} (2.3231 \cos(600\pi t - 0.0339))^2 dt}$$

$$= 1.6427 \text{ V}$$

$$V_{C,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} = \sqrt{300 \cdot \int_0^{\frac{1}{300}} (2.1794 \cos(600\pi t + 3.1077))^2 dt}$$

$$= 1.5411 \text{ V}$$

עם התחשבות בהתנגדותו הפנימית של הסליל נחשב את השגיאה היחסית בין ערכים אלו לערכים שנמדדו ומוצגים בטבלה (1):

$$V_{R,rms}: \frac{2.3239 - 2.2227}{2.3239} \cdot 100\% = 4.355 \%$$

$$V_{C,rms}: \frac{1.6427 - 1.47513}{1.6427} \cdot 100\% = 10.20\%$$

$$V_{L,rms}: \frac{|1.5411 - 1.62816|}{1.5411} \cdot 100\% = 5.649\%$$

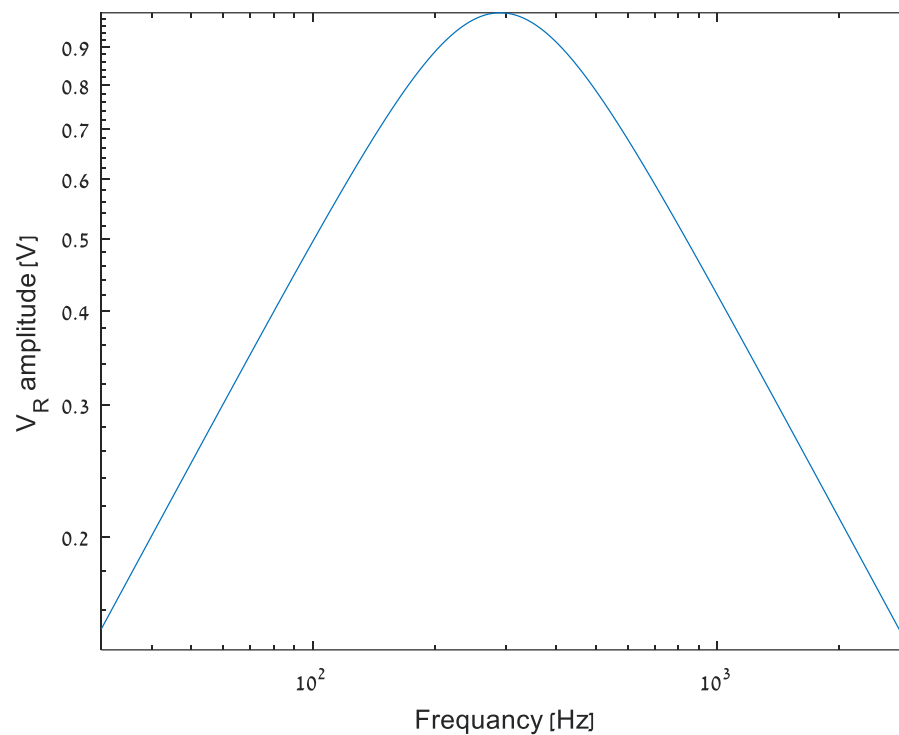
נחשב את ההגבר של הנגד:

טבלה (4): חישוב ההגבר על הנגד

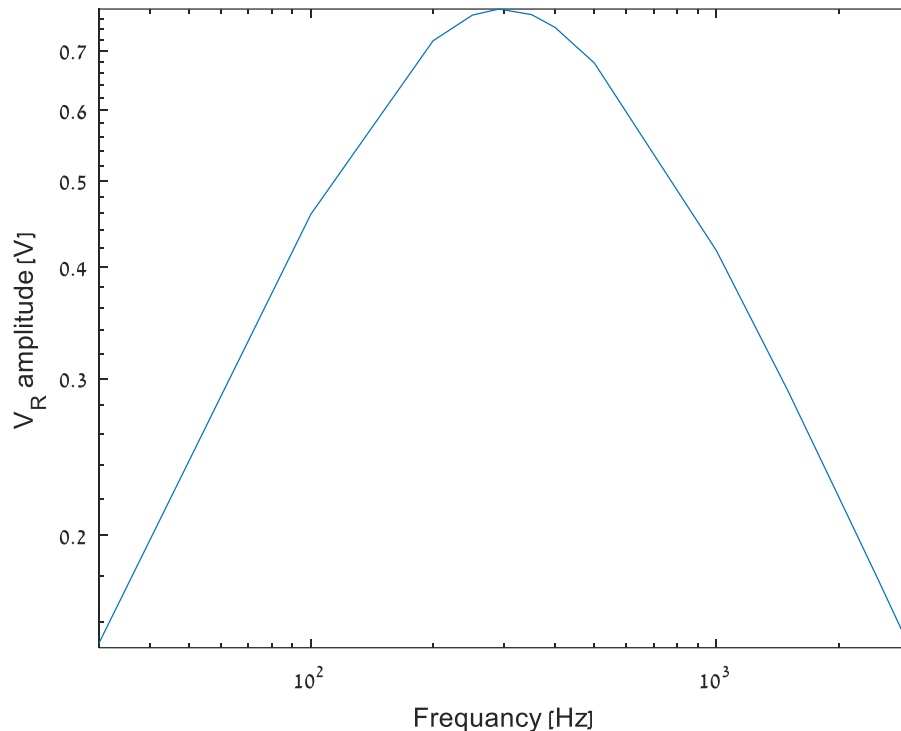
$f \text{ [Hz]}$	$\frac{V_{rms,R}}{V_{rms,in}} \text{ [V]}$
30	$\frac{451.22 \cdot 10^{-3}}{2.9811} = 0.15136 \text{ V}$
100	$\frac{1.3478}{2.9377} = 0.45879 \text{ V}$
200	$\frac{2.0608}{2.8709} = 0.71782 \text{ V}$
250	$\frac{2.1909}{2.8560} = 0.76712 \text{ V}$
290.6	$\frac{2.2224}{2.8517} = 0.77932 \text{ V}$
350	$\frac{2.1937}{2.8557} = 0.76818 \text{ V}$
400	$\frac{2.1283}{2.8638} = 0.74317 \text{ V}$
500	$\frac{1.9542}{2.8834} = 0.67774 \text{ V}$
1000	$\frac{1.2320}{2.9522} = 0.41732 \text{ V}$
1500	$\frac{864.20 \cdot 10^{-3}}{2.9731} = 0.29067 \text{ V}$

2000	$\frac{659.90 \cdot 10^{-3}}{2.9837} = 0.22117 \text{ V}$
2500	$\frac{534.20 \cdot 10^{-3}}{2.9888} = 0.17873 \text{ V}$
3000	$\frac{447.38 \cdot 10^{-3}}{2.9900} = 0.14963 \text{ V}$

הגרף שקיבלנו באמצעות החישוב התאורטי בדוח המכין :



איור (2) : הגבר הנגד כפונקציה של התדירות על פי חישוב תאורטי



איור (3): הגבר הנגד כפונקציה של התדירות על פי התוצאות שנמדדו במעבדה

נחשב את השגיאה היחסית בין ההגבר המקסימלי הנמדד לבין החישוב:

$$\frac{1 - 0.77932}{1} \cdot 100\% = 22.068\%$$

2.1.4 מסקנות:

מההשוואה בין התוצאות התאורטיות של המתחים האפקטיביים על הקבל, הנגד והסליל לעומת המתחים האפקטיביים על רכיבים אלה שנמדדו באמצעות הרב מודד ניתן לראות כי קיבלנו שגיאה יחסית גדולה של כ-25%. כמו כן, כאשר התחשבנו בהתנגדות הסליל הייתה ירידה משמעותית באחוז השגיאה וניתן להסיק כי ההתנגדות הפנימית של הסליל משפיעה מאוד על התוצאות ולכן יש להתחשב בה בעת החישובים. בנוסף, ניתן לראות כי איור 3 המציג את הגבר המתח על הנגד כתלות בתדירות החושב באמצעות הנתונים שמדדנו הינו זהה לאיור 2 שחושב באופן תאורטי בדוח המכין. כמו כן, ניתן לראות מטבלה 2 כי בתדר התהודה $f = 290.6 \text{ Hz}$ מתקבל הערך המקסימלי הנמדד של המתח על הנגד בו ההגבר הינו 0.77932 V . לעומת זאת מאיור 2 עולה כי ההגבר המקסימלי על פי החישוב התאורטי ובאמצעות המטלאב הינו 1 V . השגיאה היחסית בין ערכים אלו הינה 22.068% כלומר קיבלנו אחוז שגיאה יחסית גדול. על מנת להקטין את אחוזי השגיאה ניתן לבצע את המדידות עבור ערכי תדירות בהפרשים קטנים יותר סביב תדר התהודה. כמו כן, השוני נובע כתוצאה מההתנגדויות הפנימיות של הרכיבים, כפי שראינו במדידה של המתח האפקטיבי של המקור באמצעות הרב מודד, כאשר מחולל האותות הפיק מתח אפקטיבי של 3.2 V רב המודד הראה כי המתח הינו 3 V .

2.2 ניסוי 2:

2.2.1 היפותזה:

בניסוי זה נבדוק את השפעת התדירות על הגבר הנגד במעגל RLC טורי עבור שלושה ערכי התנגדות שונים. נצפה כי הגבר זה יהווה מסנן BPF . מהביטוי שמצאנו להגבר - $\frac{R}{\sqrt{(\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 + R^2}}$, נצפה כי רוחב הפס יגדל וההגבר המקסימלי יגדלו ככל שההתנגדות גדלה.

2.2.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: נגד, קבל, סליל, רב מודד, מחולל אותות, משקף, שלושה כבלי בננה – BNC , שני כבלי בננה-בננה.

מהלך הניסוי: תחילה כיוונו את השארות דקדקת הסלילים ל- $84mH$ ומדדנו את ההתנגדות הפנימית באמצעות רב מודד. לאחר מכן הרכבנו מעגל RLC טורי עם השראות $L = 84mH$ וקיבול $C = 8.3nF$. חיברנו את המעגל למחולל והגדרנו את המתח הכניסה להיות סינוס בעל $V_{pp} = 3V$ (ביקשו $5V$ אבל אנחנו מודדים הגבר אז אין לכך השפעה), ושני ערוצים לאוסילוסקופ – אחד למדידת מתח הכניסה והשני למדידת המתח על הנגד. עבור כל אחד מערכי ההתנגדות הבאים:

$R = 100\Omega, 300\Omega, 10000\Omega$, בדקנו את השפעת התדירות על מתח הנגד כאשר תחום התדרים בו מדדנו הינו $4500 - 7000 Hz$.

2.2.3 תוצאות:

ההתנגדות הפנימית של הסליל:

$$R_L = 0.1675k\Omega$$

מדידות המתח על הנגד ומתח הכניסה כתלות בתדירויות עבור ערכי התנגדות:

$$R = 100\Omega, 300\Omega, 10000\Omega$$

טבלה (5): מדידת מתח הנגד ומתח הכניסה כתלות בתדירות עבור $R = 100\Omega$

$f[Hz]$	$V_{in}[V]$	$V_R[mV]$
4500	3.1309	299.15
5000	2.9524	624.35
5272.6	2.7543	862.67
5400	2.799	828.4
5500	2.8787	751.06
5700	3.0103	582.2
6000	3.1	410.9
6028	3.105	399.28

6100	3.1155	372
6200	3.127	339.6
6318	3.138	307.7
6500	3.149	269
6700	3.157	233.93
7000	3.1623	198.23

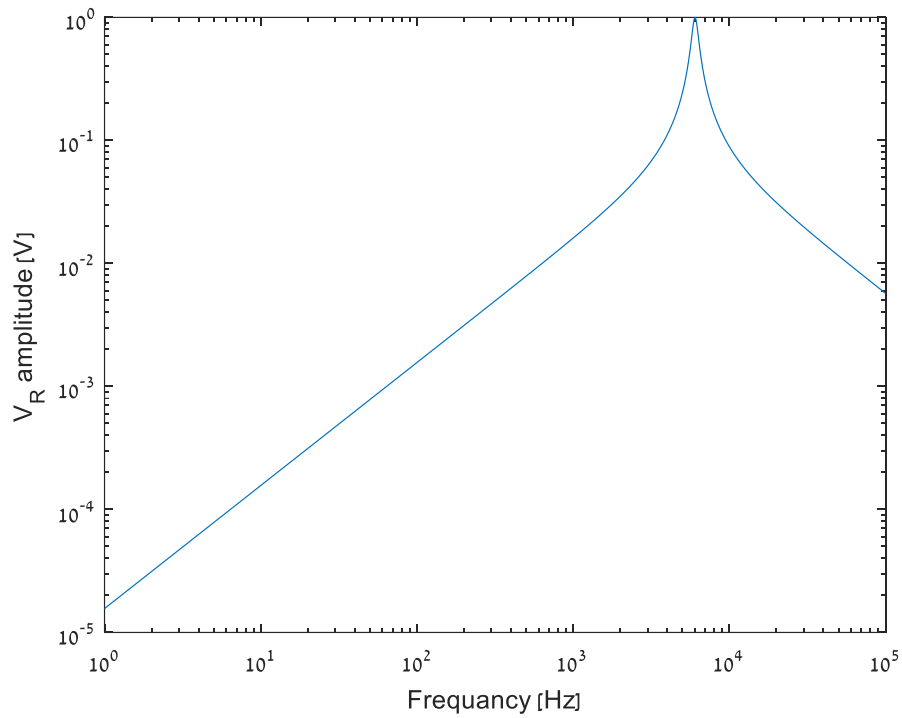
טבלה (6) : מדידת מתח הנגד ומתח הכניסה כתלות בתדירות עבור $R = 300\Omega$

$f[Hz]$	$V_{in}[V]$	$V_R[V]$
4500	3.1162	0.8297
5000	2.981	1.402
5272.6	2.905	1.6638
5400	2.9135	1.649
5500	2.9413	1.5828
5700	3.0048	1.3723
6000	3.0777	1.0819
6028	3.0822	1.0573
6100	3.0914	0.9996
6200	3.1055	0.9283
6318	3.1186	0.854
6500	3.1318	0.759
6700	3.141	0.67412
7000	3.1504	0.58028

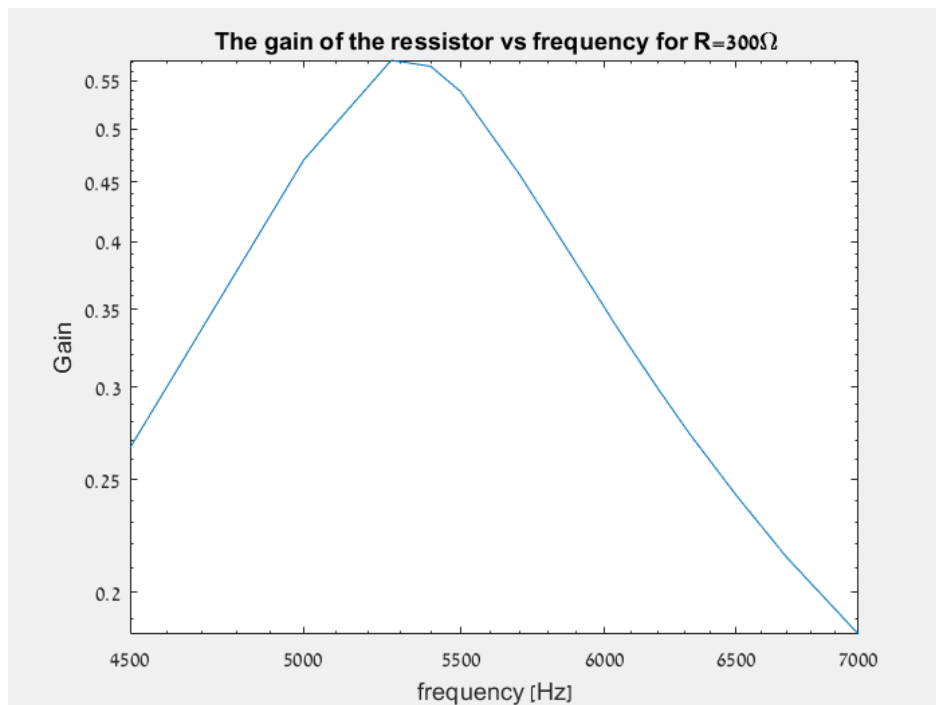
טבלה (7) : מדידת מתח הנגד ומתח הכניסה כתלות בתדירות עבור $R = 10,000\Omega$

$f[Hz]$	$V_{in}[V]$	$V_R[V]$
4500	3.132	3.0783
5000	3.17	3.096
5272.6	3.1668	3.1021
5400	3.1666	3.1028
5500	3.168	3.1048
5700	3.164	3.1079
6000	3.1618	3.1048
6028	3.1615	3.1074
6100	3.1627	3.105
6200	3.1615	3.104
6318	3.1622	3.1029
6500	3.1612	3.101
6700	3.1619	3.1007
7000	3.1598	3.0934

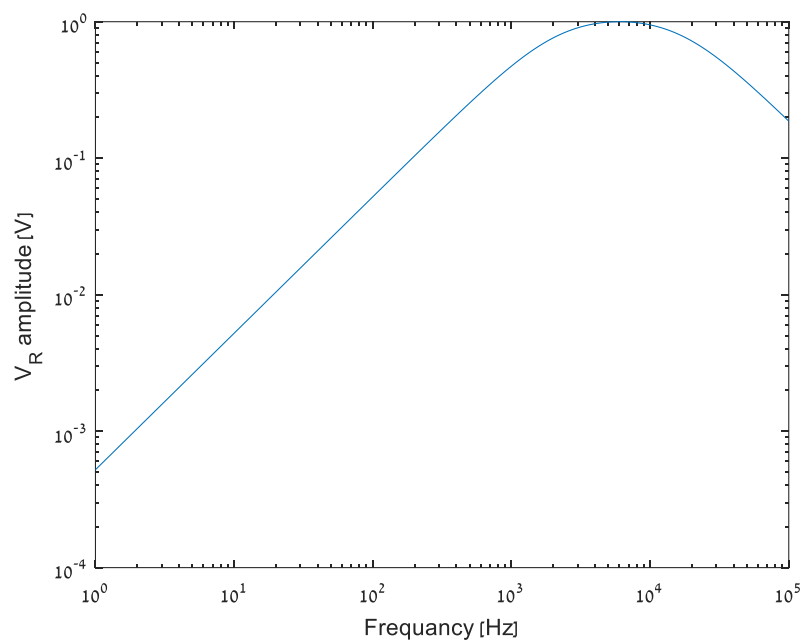
גרפים של הגבר בין מתח הנגד למתח הכניסה כתלות בתדירות :



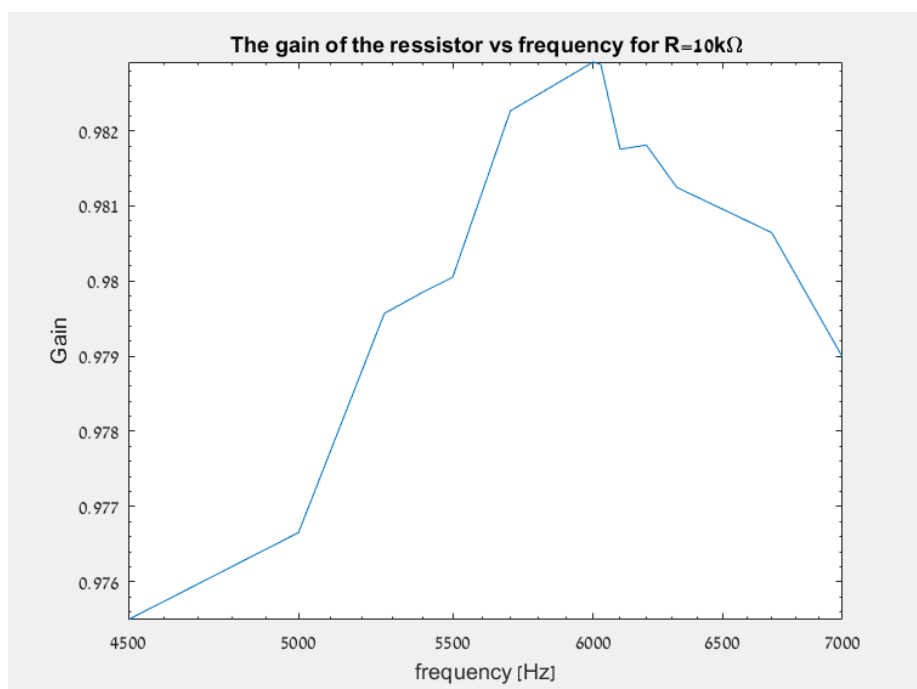
איור (4) : הגרף התאורטי של הגבר הנגד עבור $R = 300\Omega$ כתלות בתדירות.



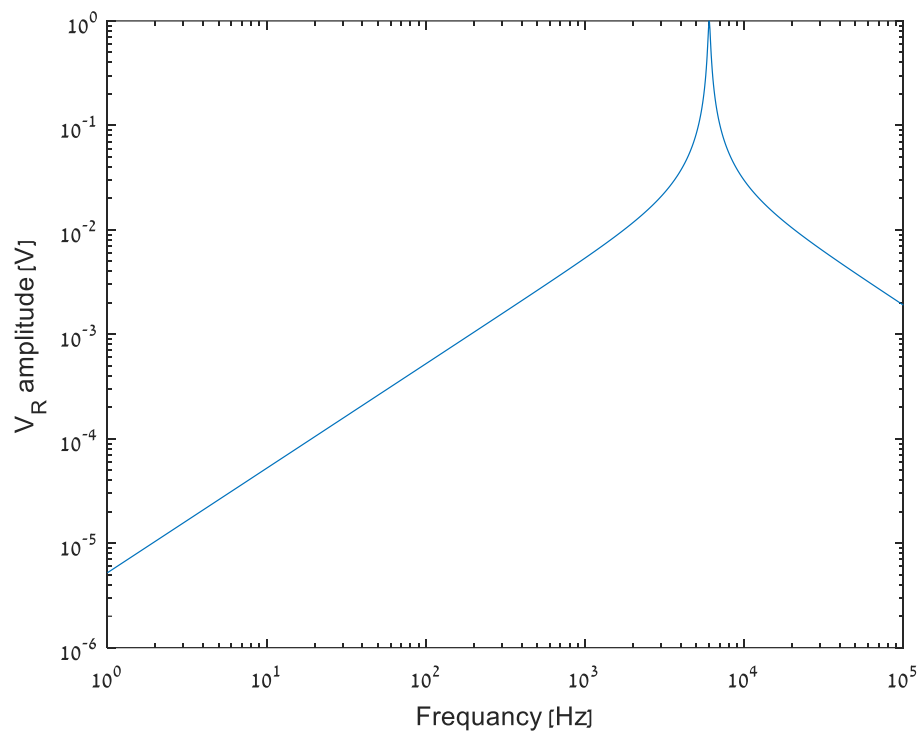
איור (5) : הגרף ששרטטנו מתוצאות הניסוי של הגבר הנגד עבור $R = 300\Omega$ כתלות בתדירות.



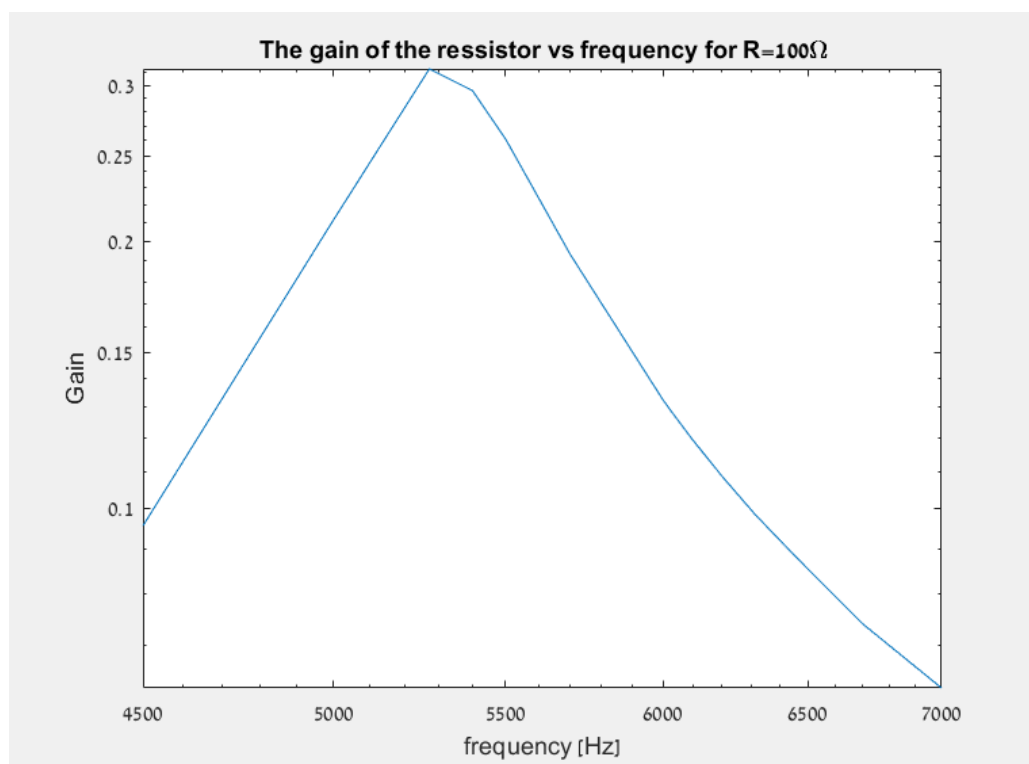
איור (6): הגרף התאורטי של הגבר הנגד עבור $R = 10k\Omega$ כתלות בתדירות.



איור (7): הגרף ששרטטנו מתוצאות הניסוי של הגבר הנגד עבור $R = 10k\Omega$ כתלות בתדירות.



איור (8): הגרף התאורטי של הגבר הנגד עבור $R = 100\Omega$ כתלות בתדירות.



איור (9): הגרף ששרטטנו מתוצאות הניסוי של הגבר הנגד עבור $R = 100\Omega$ כתלות בתדירות.

2.2.4 מסקנות:

כיוון שבניסוי מדדנו בטווח ערכים קטן (וגם קטן יותר מטווח הערכים שהשתמשנו בו לחישובים התאורטיים) לא ניתן להציג את הגרף בסקלה לוגריתמית. ניתן לראות בגרפים כי עבור שלושת ההתנגדויות ישנה שינוי בתדר התהודה שמתקבל באופן תאורטי לתדר התהודה שחישבנו. הסברים אפשריים לשינויים אלה הם: ניתן למדל את הסליל כסליל מחובר בטור לנגד בעל התנגדות של $0.1675k\Omega$. בדו"ח מכין הראנו כי הביטוי להגבר בין מתח הנגד למתח הכניסה הינו
$$- \frac{R}{\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R^2}}$$
 כלומר שינוי בהתנגדות במעגל כמובן משנה את תדר התהודה. הסבר אפשרי נוסף לשינוי בתדר התהודה יכול להיות כיוול של הרכיבים במעגל – כלומר אם הערכים שאנו מגדירים להשראות, קיבול והתנגדות אינם הערכים האפקטיביים שלהם נקבל הבדל בין התאוריה לתוצאות. כמו כן, הגרפים שקיבלנו מהניסוי פחות חלקים כיוון שביצענו מספר מדידות קטן ביחס לכמות הערכים שהשתמשנו ליצירת הגרף התאורטי. כמו כן, מתוצאות הניסוי הן ההגבר המקסימלי והן רוחב הפס גדלים עם הגדילה בהתנגדות.

2.3 ניסוי 3:

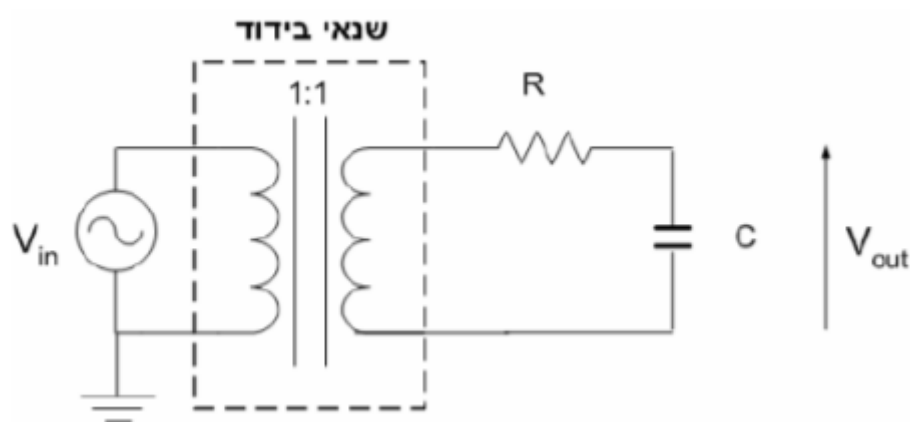
2.3.1 היפותזה:

בניסוי זה נבצע מדידות מתח של נגד וקבל במעגל RC טורי בתדירויות שונות. נצפה כי ההגבר של הנגד במעגל יהווה HPF וכי הגבר הקבל יהווה LPF . כמו כן, נצפה לקבל כי תדרי הברך של המסננים יהיו שווים וכן התדר בו הגברי המסננים שווים הוא תדרך ברך זה.

2.3.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: נגד, קבל, שנאי, מחולל אותות, משקף, רב מודד, 3 כבלי בננה – BNC , 3 כבלי בננה-בננה.

מהלך הניסוי: הרכבנו מעגל RC טורי כפי שמתואר בפרוטוקול הניסוי:



איור (10): מעגל RC טורי [1]

מדדנו את מתח הכניסה בעזרת רב מודד וכיוונו את המתח האפקטיבי במחולל כך שיתקבל ברב מודד מתח אפקטיבי של $3V$. חיברנו לאוסילוסקופ בערוץ אחד את מתח הנגד ובערוץ השני את מתח הקבל. רשמנו את המתח על הקבל ועל הנגד שהתקבלו עבר טווח התדרים $60 - 6000 Hz$.

2.3.3 תוצאות:

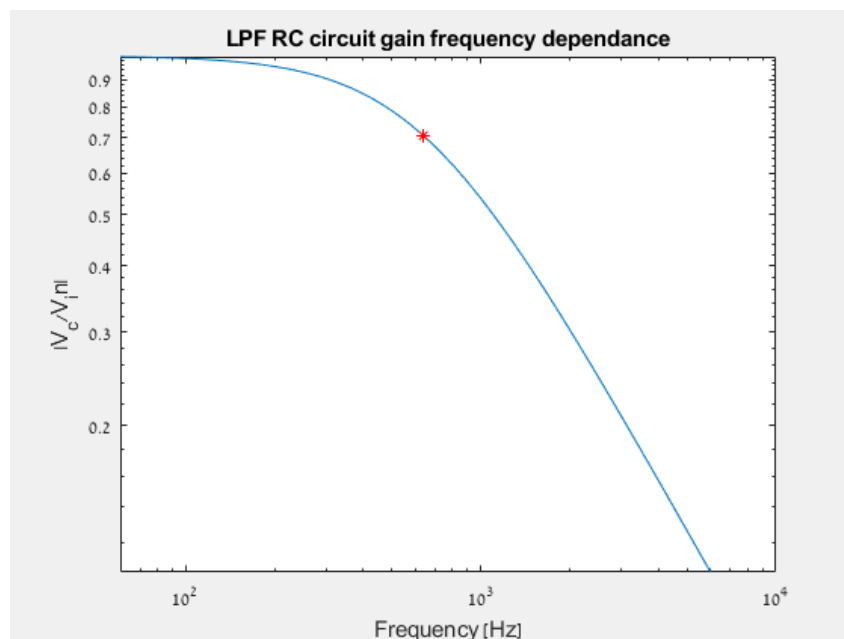
התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלאות הבאות:

טבלה (8): מדידות מתח הכניסה, מתח הנגד ומתח הקבל עבור תדירויות שונות

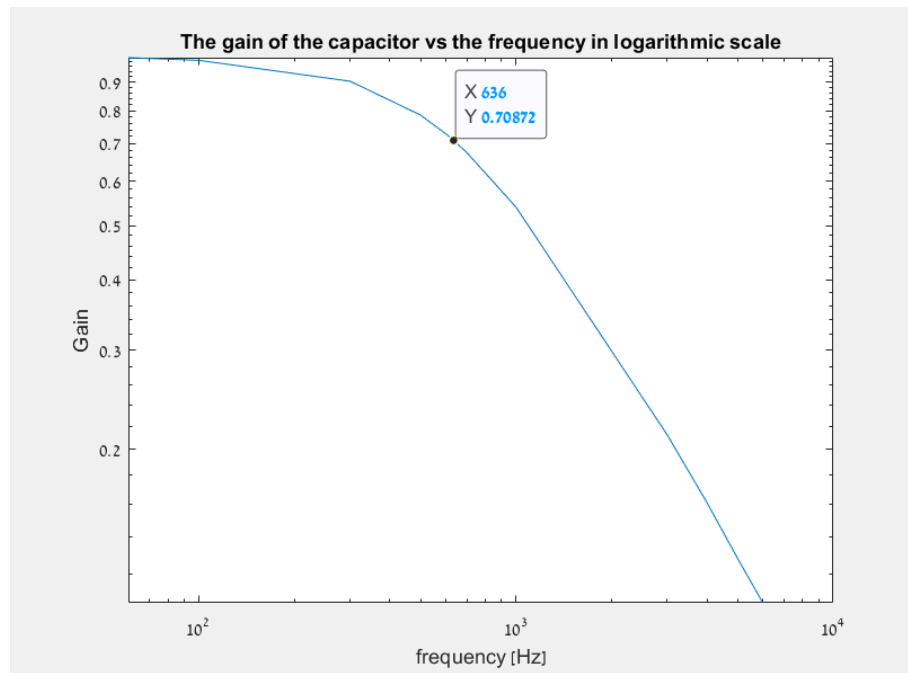
$F[Hz]$	$V_{in}[V]$	$V_R[V]$	$V_C[V]$
60	2.969	0.27642	2.9522
100	2.9975	0.4648	2.9487
300	3.0725	1.3041	2.7741
500	3.1316	1.9157	2.4622
600	3.1467	2.1391	2.2922
636	3.1492	2.2061	2.2319

700	3.1498	2.3097	2.1235
1000	3.0918	2.5884	1.6675
3000	2.0702	2.0206	0.43904
4000	1.6983	1.6732	0.27305
5000	1.4303	1.415	0.1829
6000	1.2331	1.2308	0.13155

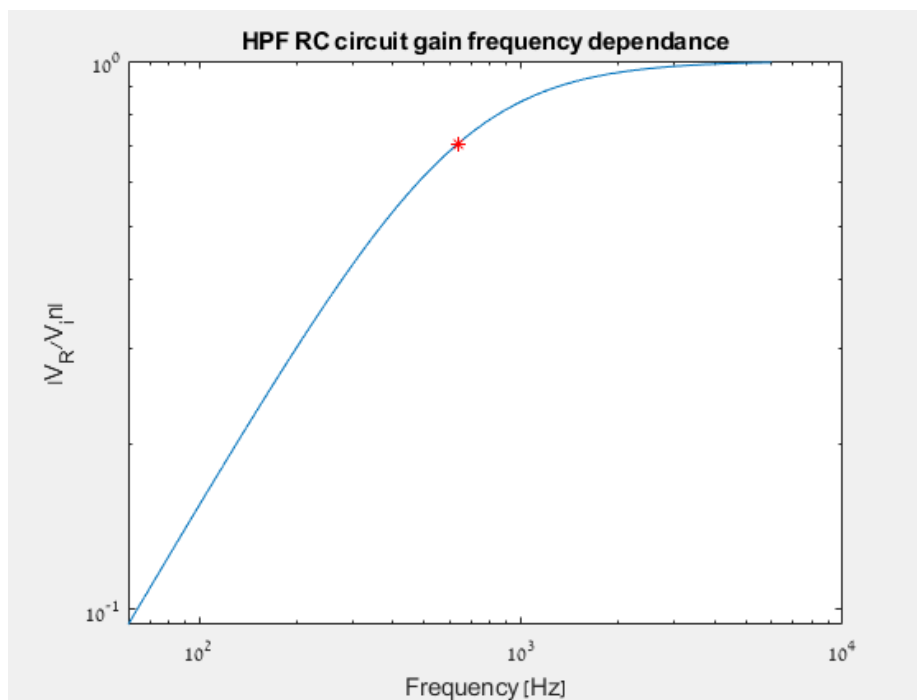
השוואה בין הגרפים שהתקבלו בדוח המכין לתוצאות הניסוי :



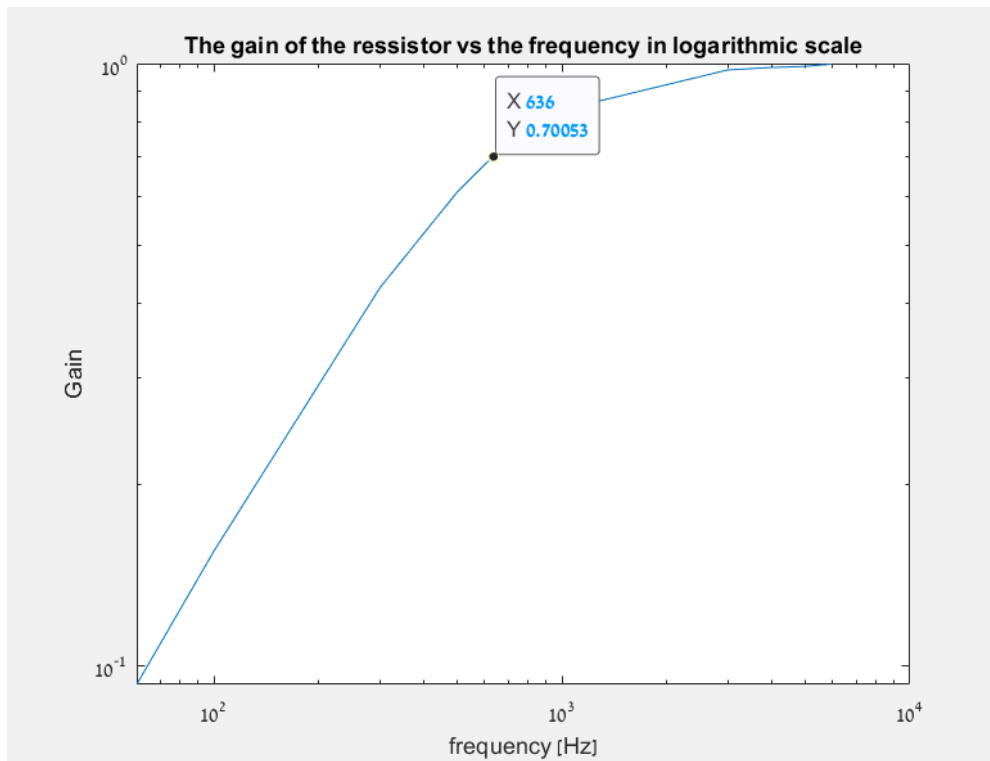
איור (11) : הגרף התאורטי של הגבר הקבל כתלות בתדירות בסקלה לוגריתמית



איור (12): הגרף ששרטטנו מתוצאות הניסוי של הגבר הקבל כתלות בתדירות



איור (13): הגרף התאורטי של הגבר הנגד כתלות בתדירות



איור (14): הגרף ששרטטנו מתוצאות הניסוי של הגבר הנגד כתלות בתדירות

2.3.4 מסקנות:

בדוח המכין קיבלנו כי תדרי הברך עבור שני המסננים הינם - $f = \frac{1}{2\pi RC} = 636[Hz]$. ניתן לראות בגרפים כי תדרכי הברך שנמדדו מתוצאות הניסוי זהים. כפי שניתן לראות בגרפים התאורטיים ואלו ששרטטנו ממדידות הניסוי, ההגבר של הקבל במעגל RC מהווה מסנן מעביר נמוכים וההגבר על הנגד מהווה מסנן מעביר גבוהים. הסיבה שהם נקראים כך היא שכפי שניתן לראות ההגבר של הנגד מתקרב לאחד ככל שהתדר גדל יותר ומתקרב לאפס ככל שהתדר נמוך יותר. בהתאמה, עבור הגבר הקבל במעגל RC ככל שהתדר מתקרב לאפס כך ההגבר מתקרב לאחד וככל שהתדר גדל ההגבר קטן. אם נשרשר בטור מסנן LPF ומסנן HPF נוכל ליצור מסנן BPF . הסבר לכך הוא שלאחר שנעביר את האות במסנן ה- LPF נסנן את התדרים הנמוכים, ואז נכניס את האות דרך מסנן HPF שמסנן את התדרים הגבוהים וכך נשאר עם תדרים ברוחב פס כלשהו בין תדרים נמוכים לגבוהים. ראינו כי תדר הברך של המסננים תלוי בהתנגדות ובקיבול ולכן ניתן להשתמש בפרמטרים עבור כל אחד מהמסננים על מנת לבחור את תחום התדרים הרצוי עבור מסנן ה- BPF . כפי שחישבנו בדוח המכין, ניתן לראות מהגרפים שיצרנו מתוצאות הניסוי כי אכן התדר עבורו ההגברים של שני המסננים שווה בתדר שחישבנו בתאוריה שהינו תדר הברך של המסננים.

2.4 ניסוי 4:

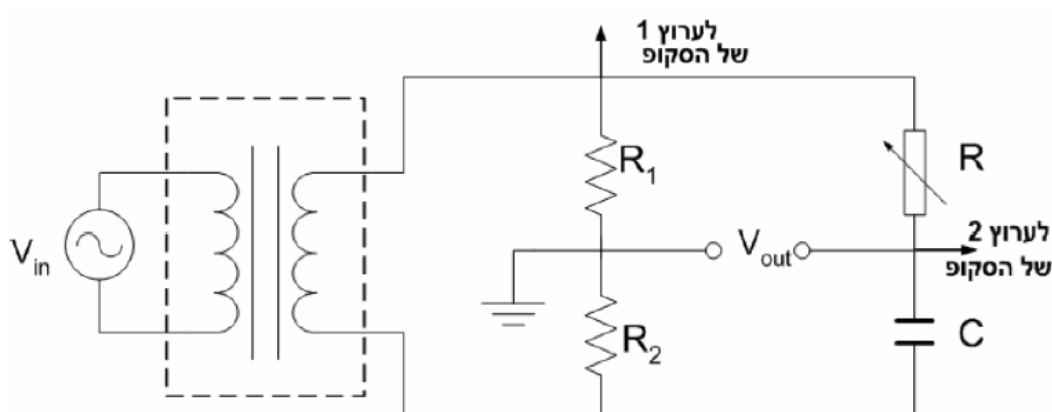
2.4.1 היפותזה:

לאחר תיקון חישוב הפאזה של מתח המקור (ביחס למוצא) קיבלנו כי הביטוי הינו $\angle \frac{V_{out}}{V_{in}} = -2 \arctan(\omega CR)$. לכן ניתן לצפות כי נקבל השפעה של ההתנגדות על הפאזה שנמדוד ומהביטוי $\angle(R_1 - V_{out})$ נצפה כי נקבל שככל שההתנגדות גדלה כך גם הפאזה תעלה.

2.4.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: 3 נגדים, קבל, אוסילוסקופ, רב מודד, מחולל אותות, שנאי, 4 כבלי BNC-בננה, 6 כבלי בננה-בננה.

מהלך הניסוי: בניסוי זה בנינו את המעגל המופיע באיור הבא:



איור (15): מעגל משנה זווית מופע [1]

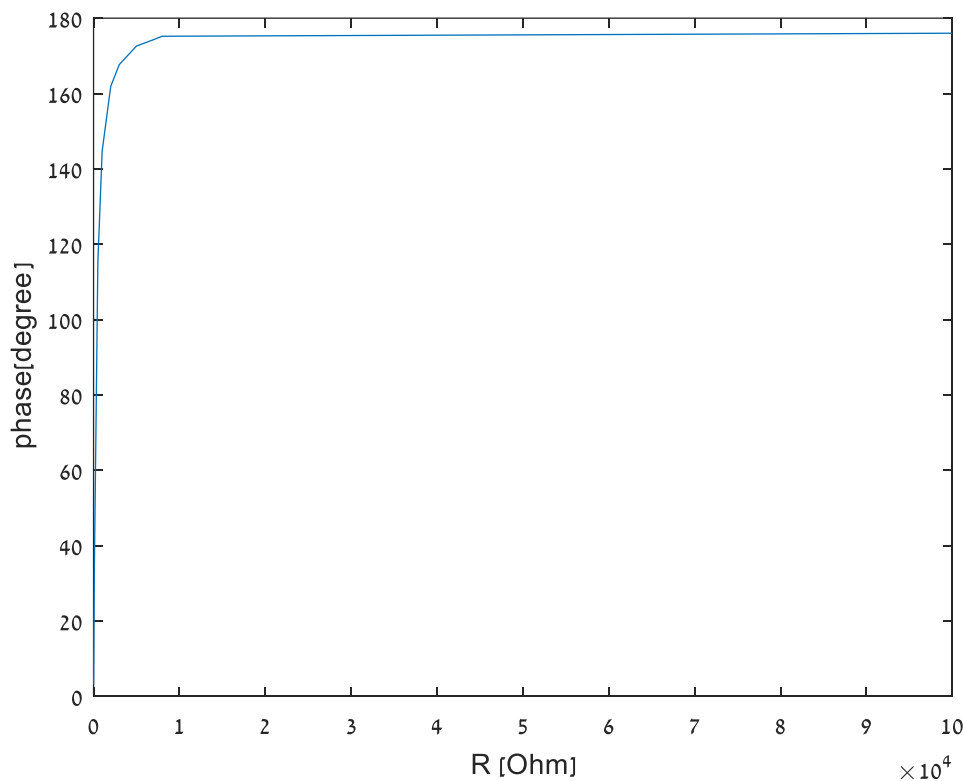
חיברנו את הנגדים והקבל באמצעות כבלי בננה-בננה והגדרנו את הקיבול להיות $C = 0.5 \mu F$ ואת התנגדות הנגדים $R_1 = R_2 = 300 \Omega$. לאחר מכן חיברנו את השנאי למחולל האותות שהוא מקור המתח ולמעגל עם הרכיבים. הגדרנו את המתח במחולל כך ש $V_{eff} = 3 V, f = 1 kHz$. בנוסף חיברנו את האוסילוסקופ באמצעות שני כבלי BNC-בננה להדקים כך שימדוד את מתח המוצא ואת המתח על הנגד R_1 . כמו כן, חיברנו את רב המודד באמצעות שני כבלי בננות להדקים של R_1, R_2 כך שימדוד את מתח המקור. שינינו את התנגדות הנגד R בתחום של $10 - 1000 \Omega$ ורשמנו את המתחים שנמדדו ואת הפרש הפאזה באמצעות פונקציית ה meas בין מתח הנגד למתח המוצא כפי שהראה האוסילוסקופ.

2.4.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלה הבאה :

טבלה (9) : מתחים אפקטיביים שנמדדו והפרשי פאזה עבור התנגדויות שונות

$R [\Omega]$	$V_{rms,in} [V]$	$V_{rms,out} [V]$	$V_{rms,R_1} [V]$	$Phase (R_1 - V_{out}) [^\circ]$
10	4.0561	2.0257	2.0282	3.2
100	3.3094	1.6464	1.6539	34.9
500	2.5018	1.2502	1.2572	115.2
1000	2.4813	1.2421	1.2471	144.7
2000	2.5272	1.2673	1.2700	161.9
3000	2.5534	1.2815	1.2830	167.7
5000	2.5788	1.2947	1.2958	172.6
7000	2.5908	1.2892	1.3020	174.3
8000	2.5948	1.3032	1.3039	175.2
10000	2.6004	1.2942	1.3069	176



איור (16) : הפאזה בין מתח הנגד למתח המוצא כתלות בהתנגדות

נתקן את החישוב התאורטי מהדוח המכין :

נסמן את הטרמינל החיובי של V_{out} ב- V_a ואת הטרמינל השלילי ב- V_b . נרשום את המשוואות הבאות בתחום הפאזורים :

$$1) V_a = V_{in} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_{in}}{2} \quad (R_1 = R_2)$$

$$2) V_b = V_{in} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega c}}{R + \frac{1}{j\omega c}} = V_{in} \cdot \frac{1}{1 + j\omega cR}$$

$$V_{out} = V_a - V_b = \frac{V_{in}}{2} - V_{in} \cdot \frac{1}{1 + j\omega cR} = V_{in} \cdot \frac{1 + j\omega cR - 2}{2(1 + j\omega cR)}$$

$$= V_{in} \cdot \frac{j\omega cR - 1}{2(1 + j\omega cR)}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{j\omega cR - 1}{2(1 + j\omega cR)}$$

$$\angle \frac{V_{out}}{V_{in}} = \arctan\left(\frac{\omega cR}{-1}\right) - \arctan\left(\frac{2\omega cR}{2}\right) = \arctan(-\omega cR) - \arctan(\omega cR)$$

$$= -\arctan(\omega cR) - \arctan(\omega cR) = -2 \arctan(\omega cR)$$

2.4.4 מסקנות:

מהגרף שקיבלנו עבור שינוי הפאזה בין המתחים ביחס להתנגדות ניתן לראות כי ככל שההתנגדות גדלה הפאזה גדלה עד התייצבות על ערך של 180° . באופן התאורטי ראינו כי הפאזה של מתח המוצא ביחס למקור נתונה על ידי הביטוי $\angle \frac{V_{out}}{V_{in}} = -2 \arctan(\omega cR)$. כלומר מביטוי זה ניתן לראות כי יש תלות בהתנגדות של הנגד וכי ככל שהיא עולה הפאזה קטנה. תוצאה זו תואמת לגרף שקיבלנו כיוון שציפינו בהתאם לכך שהפאזה $\angle(R_1 - V_{out})$ תעלה.

בניסוי זה ראינו את השפעת הרכיבים החשמליים השונים על תכונות המעגל החשמלי. בניסוי הראשון ראינו כי לרכיבים יכולה להיות התנגדות פנימית בעלת השפעה לא זניחה על המתחים במעגל. כאשר חישבנו את המתחים תוך התחשבות בהתנגדות הפנימית של הסליל קיבלנו שינוי משמעותי בשגיאה היחסית של המתחים שנמדדו. בניסוי השני והשלישי למדנו כיצד ערכים שונים של הרכיבים החשמליים משפיעים על תכונות הסינון של המעגל – הן מבחינת רוחב פס, ההגבר המקסימלי ותדר התהודה. בניסוי הרביעי ראינו כיצד ניתן ליצור מעגל משנה פאזה כך שהפאזה תלויה בתכונות של רכיבים במעגל (התנגדות, קיבול). במעבדה זו למדנו כי הן באמצעות מבנה המעגל והן ערכי הרכיבים (התנגדות, קיבול, השראות) ניתן לייצר מעגלים לשימושים שונים כמו סינון תדרים ושינויי פאזה.

“פרוטוקול מעבדת חשמל הנדסה ביורפואית 2” [1]

```

%% Exp2Post4C
%% 2.1
V_0=3*sqrt(2); %V
w=600*pi;
R=800; %[OHM]
L=0.3; %[H]
C=10^-6; %[F]

V_in=3*sqrt(2)*exp(-pi*j/2);
Z_C=1/(j*w*C);
Z_L=j*w*L;
Z_R=R;
R_L=232.164;

V_R=(Z_R/(Z_R+Z_L+Z_C+R_L))*V_in; %Phasor of VR
V_L=(Z_L/(Z_R+Z_L+Z_C+R_L))*V_in; %Phasor of VL
V_C=(Z_C/(Z_R+Z_L+Z_C+R_L))*V_in; %Phasor of VC

disp(abs(V_R)); %The amplitude of VR
disp(angle(V_R)); %The phase of VR
disp(abs(V_L));
disp(angle(V_L));
disp(abs(V_C));
disp(angle(V_C));

f=[30:1:3000]; %Hz
w=2*pi*f; %rad/sec
V_R_amp=V_0*R./sqrt((w*L-1./(w*C)).^2+R^2); %Theoretical calculation
figure
loglog(f,V_R_amp/V_0);
xlabel('Frequency [Hz]');
ylabel('V_R amplitude [V]');
xlim([30 3000]);

H=V_R_amp/V_0;
disp(max(H));

f1=[30 100 200 250 290.6 350 400 500 1000 1500 2000 2500 3000]; %The
values measured in the experiment
H1=[0.15136 0.45879 0.71782 0.76712 0.77932 0.76818 0.74317 0.67774
0.41732 0.29067 0.22117 0.17873 0.14963]; %Vrms_R/Vrms_in
figure
loglog(f1,H1);
xlabel('Frequency [Hz]');
ylabel('V_R amplitude [V]');
xlim([30 3000]);

%% 2.2
% reading the results data from excel
info = readtable('lab2exp2.xlsx');
f = (info.F1)'; %[Hz]
% Gain for the three resistance values
Gain_100ohm = ((info.V_out1*10^-3)./info.V_in1)';
Gain_300ohm = (info.V_out2./info.V_in2)';
Gain_10kohm = (info.V_out3./info.V_in3)';

```

```

Gain_10kohm(1)=1; %correcting a mistake in the vector
% plotting the gains vs frequency in logarithmic scale
figure;
loglog(f, Gain_100ohm);
figure;
loglog(f, Gain_300ohm);
set(gca, 'YScale', 'log', 'XScale', 'log')
figure;
loglog(f, Gain_10kohm);

%% 2.4
Phase=[3.2 34.9 115.2 144.7 161.9 167.7 172.6 174.3 175.2 176];
R=[10 100 500 1000 2000 3000 5000 7000 8000 100000];

figure
plot(R, Phase);
xlabel('R [Ohm]');
ylabel('phase[degree]');

```