

מעבדה 1 - 03350001

סמסטר חורף תשפ"ה

קבוצה מס' 43

דו"ח מסכם: B4 - הכרת מכשור מדידה

שם המדריך: אדם סוקר

שם: עדי ששון

ת"ז: 314828005

שם: גל בן אור

ת"ז: 203638887

שם: טלי לרנר

ת"ז: 208825497

תאריך הניסוי: 22.01.25

תוכן עניינים:

פרק 1 - תקציר	עמוד 3
פרק 2 - מטרת הניסוי	עמוד 3
פרק 3 - תמצית הרקע התיאורטי / מבוא	עמוד 4-5
פרק 4 - תיאור הניסוי	עמוד 6
פרק 5 - ניתוח ועיבוד התוצאות	עמוד 7-16
פרק 6 - מסקנות והערות	עמוד 17-18
פרק 7 - מקורות	עמוד 19
פרק 8 - נספחים	עמוד 20

1. תקציר

בניסוי זה למדנו להכיר ולעבוד עם רכיבי מעגל חשמלי בסיסיים, כגון נגדים, קבלים וסלילים. התנסונו בעבודה עם מחולל אותות, Scope שבעזרתו ניתחנו את האות שנוצר ורמ"ס ששימש למדידת פרמטרים שונים במעגל כמו מתח, התנגדות או זרם בנקודות רצויות. את המעגלים מימשנו בעזרת רכיבים פיזיים על גבי מטריצת חיבורים ולמדנו להבין את מקור הסטיות השונות ואת חשיבות היכרות הרכיבים עמם אנו עובדים בעת תכנון מעגל חשמלי.

בחלק הראשון של הניסוי, מדדנו ערכים של שני נגדים באמצעות הרמ"ס והשוונו אותם לערכים התיאורטיים המוצגים לפי פסי הצבעים שעל הנגדים. לאחר מכן, חיברנו אותם במעגל בטור ומדדנו את ההתנגדות הכוללת. קיבלנו סטיות של הערך התיאורטי מהערך הממשי שיוחסו להתנגדות הכבלים, ההתנגדות הפנימית של המכשיר, רגישותו וסטיותו.

בחלקו השני של הניסוי, מימשנו וניתחנו מעגל RC טורי (כך שהקבל היווה את מוצא המעגל). ניתחנו את המעגל בתחום התדר הן בפן התיאורטי (חישובי) והן במדידות ב-Scope ובביצוע FFT שהציגה את תגובת המעגל בתדר בזמן אמת. נמצא שמעגל זה משמש כמסנן מעביר תדרים נמוכים (LPF). כלומר, המתח על הקבל יורד ואילו המתח על הנגד עולה ככל שתדר האות גדל. לאחר מכן, ביצענו חישוב של הפרש הפאזה בין הכניסה למוצא והשוונו את התוצאה להפרש שהתקבל בפועל על ידי מדידת הפרש הזמנים בין פיק המתח בכניסה לפיק המתח במוצא. קיבלנו סטיות הן בהתמרות הפורייה והן בהפרשי הפאזה בין התיאוריה לנמדד בפועל. ייחסנו סטיות אלו לרגישות המכשירים השונים, שגיאות מדידה שלנו (בשל המדידה הידנית ב-Scope, למשל), התנגדויות פנימיות של הרכיבים השונים ושל הכבלים ורעשים אפשריים במדידה. לבסוף, בחנו אפשרות להמיר את שימוש המעגל ל-HPF ללא שינוי בחיבוריו, וזאת על ידי הגדרת אות המוצא בצורה שונה.

3.1

3.2

בחלקו האחרון של הניסוי ניתחנו באופן תיאורטי מעגל RLC טורי. בחנו את תגובת התדר שלו (פונקציית התמסורת) כאשר מתח המוצא מוגדר להיות המתח שנופל על הנגד. מצאנו שהמעגל משמש כמסנן מעביר פס תדרים (BPF) בשל יחסי האימפדנסים בין הקבל לסליל כתלות בספקטרום התדרים (בפרט תדר התהודה). לבסוף, בדומה לחלק השני של הניסוי, בדקנו אופציה להמיר את המעגל למסנן BSF בעזרת הגדרה שונה של מתח המוצא.

במהלך כל הניסוי נחשפנו לסטיות שונות בין הערך המדוד לבין ערך החישוב התיאורטי. שגיאות אלו נבעו מסטיות במכשיר המדידה או במחולל האותות, רגישות המכשירים, רעשים במדידה, התנגדויות פנימיות של המכשירים ושל הכבלים ועוד. ישנה חשיבות רבה בהבנת מקור השגיאות, שכן ידיעה על מקורן עשויה לעזור בתכנון המעגלים ובמימושם באופן מעשי בדגש על צמצום השגיאות למינימום האפשרי.

2. מטרות הניסוי

- התנסות בעבודה ובניית מעגלים חשמליים בעזרת מטריצת חיבורים.
- לימוד השימוש ברב-מודד ספרתי לביצוע מדידות זרם, מתח והתנגדות.
- הכרת מכשור מדידה בתחום האותות והמעגלים החשמליים כדוגמת מחולל אותות, Scope וספק כוח.
- חקירת מעגלי RC ו-RLC טוריים.
- הבנת אופי התמסורת של המעגלים, בתדרים גבוהים, נמוכים ובתדר העצמי של המעגל.
- מימוש מסננים בעזרת מעגלים חשמליים.
- השוואה בין הערכים התיאורטיים לערכים הנמדדים והבנת הגורם לכך.

3. תמצית הרקע התיאורטי / מבוא [1], [2], [3]

תורת החשמל הינה תחום בלתי נפרד מהקדמה הטכנולוגית במאות האחרונות ובפרט מהווה נדבך עיקרי וחשוב בתחום ההנדסה הביו-רפואית. ידע ושליטה בתחום תורמים לזיהוי תקלות ותחזוקה במתקנים תעשייתיים, ציוד רפואי, מערכות צבאיות, מוצרי צריכה מתקדמים ועוד.

מעגלים חשמליים מורכבים בתצורות חיבור שונות של רכיבים בעלי פונקציונליות מגוונת, כך שיזרמו דרכם זרמים באופנים שונים, ויזרו על הרכיבים מתחים שונים, לצורך מימושים שונים. הזרם החשמלי ($I [A]$) הוא תנועת המטען החשמלי, בעוד המתח החשמלי ($V [V]$) הוא הפרש הפוטנציאל החשמלי בין שתי נקודות במעגל (מעין מדד ליכולת התנועה של המטען). תצורות החיבור הבסיסיות הן חיבור רכיבים בטור (קרי, הזרם החשמלי שעובר דרך כל הרכיבים זהה) או במקביל (קרי, המתח החשמלי המושרה על כל הרכיבים זהה). דרך נוספת לקבלת מימושים שונים בעזרת מעגלים, היא שימוש באופני זרימה שונים. זרם ישר (DC) אידיאלי, מתאר זרימת מטענים בכיוון קבוע (מקובל גם לתאר מתח ישר, כזה בעל קוטביות קבועה). זרם חילופין (AC) אידיאלי, מתאר היפוך כיוון זרימת המטענים באופן מחזורי (מקובל גם לתאר מתח חילופין, כזה שהופך את הקוטביות שלו באופן מחזורי).

על מנת לממש מעגל פשוט, ניתן להשתמש במטריצת חיבורים, משטח המאפשר חיבור רכיבים ללא צורך בהלחמה. בנוסף דרוש ספק כוח חיצוני לקבלת האנרגיה החשמלית הנדרשת למעגל (מקור מתח או זרם). לצורכי ניתוח ניתן להשתמש במגוון מכשירים, כמו רב מודד ספרתי (רמ"ס) ואוסילוסקופ, המאפשרים מדידת ערכים רבים, למשל מתח V_{RMS} (Root Mean Square). מתח ה-DC השקול, שהיה מספק את אותו מתח ממוצע של מתח ה-AC אותו מודדים) או V_{PP} (Peak To Peak). הפרש הפוטנציאלים בין המתח המקסימלי למינימלי).

שלושת הרכיבים הפסיביים הבסיסיים הנפוצים ביותר עמם נעבוד במעבדה זו הינם נגד, קבל וסליל.

התנגדות חשמלית ($R [\Omega]$) מתארת את יכולתו של גוף כלשהו להתנגד להולכת זרם דרכו. נגדים הם רכיב חשמלי שמסתמך על עקרון זה (והקשר שלו לגיאומטריה של הרכיב) לצורך שימושים רבים. בתנאים מסוימים עבור חומרים מסוימים הנקראים חומרים אוהמיים, ניתן לקשר לינארית בין ההתנגדות, המתח והזרם החשמלי דרך נגד, לפי חוק אוהם:

$$(1) V = I \cdot R [V]$$

ערך ההתנגדות השקולה של נגדים המחוברים בטור:

$$(2) R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i [\Omega]$$

ערך ההתנגדות השקולה של נגדים המחוברים במקביל:

$$(3) R_{eq} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \right)^{-1} [\Omega]$$

חישובי השקילות לעיל (ואלו שיופיעו בהמשך) נובעים מתוך חוקי קירכהוף, אלו שני חוקים בסיסיים לניתוח מעגלים. **חוק קירכהוף לזרמים** (חוק הצומת) קובע כי סכום כל הזרמים הנכנסים ויוצאים אל צומת (נקודת חיבור ענפי מעגל) שווה לאפס (נובע מחוק שימור המטען החשמלי). **חוק קירכהוף למתחים** קובע כי בכל לולאה סגורה במעגל החשמלי, סכום המתחים שווה לאפס (נובע מחוק שימור האנרגיה). מחלק מתח הנגזר מחוקי קירכהוף מבוצע על מנת לקבל פרקציה ממתח הכניסה כמתח המוצא. ניתן להשתמש בו עבור רכיבים שזורם בהם אותו הזרם (למשל רכיבים על אותו ענף במעגל). נדגים בעזרת מעגל פשוט בעל שני נגדים המחוברים בטור את אופן ביצוע חלוקת המתח:

$$(4) V_{out} = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} [V]$$

כאשר מתח המוצא מוגדר להיות המתח שנפול על הנגד R_1 , והמכנה הוא למעשה ההתנגדות השקולה R_{eq} במקרה זה. נזכיר שזו רק דוגמה פשוטה וניתן לבצע מחלק מתח בעזרת מעגלים רבים, הן בחיבור טורי והן בחיבור מקבילי. באופן שקול ניתן לממש מחלק זרם.

לצורך אספקת מתח AC למעגל, ניתן להשתמש למשל במחולל אותות - מכשיר ייעודי המסוגל לייצר מגוון אותות מחזוריים בתדרים שונים. לטובת ניתוח מעגלי AC, מקובל להיעזר בביצוע פעולות מתמטיות (התמרות לפלס ופורייה למשל, או מעבר לייצוג פאזורי) על משוואת המעגל אותו מנתחים, לצורכי פישוט, שכן משוואת מעגל המתארת קשר בין הזרם למתח ברכיבים תלויי תדר היא לעתים משוואה דיפרנציאלית. ניתוחים מסוג זה מכונים ניתוח "בתחום התדר", שכן המשתנה אליו מתייחסים הוא התדר $f [Hz]$, מספר המחזורים בשניה). גודל נוסף אותו מקבל לנתח במעגלי AC הוא הפאזה $\phi [rad]$ (מופע), ההיסט הזוויתי של אות מחזורי ביחס לאות ייחוס או לנקודת זמן מסוימת.

פאזה של מספר מרוכב מוגדרת בתור $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Im(Z)}{Re(Z)} \right) [rad]$.

באופן מעשי, החישוב יעשה בעזרת מדידת הפרשי הזמנים בין הפיקים של המתחים הנופלים על שני הרכיבים שביניהם אנו מעוניינים למדוד את הפרש הפאזה:

$$(5) \Delta\phi = \Delta t \cdot 2\pi \cdot f$$

ישנם רכיבים חשמליים שהתנגדותם החשמלית משתנה כתלות בתדר ובגודל האופייני שלהם, על כן מקובל להכליל את ההגדרה הבסיסית של התנגדות. ההרחבה הפאזורית של ההתנגדות נקראת עכבה חשמלית (אימפדנס) ומוגדרת כמו התנגדות, על ידי חוק אוהם (חלוקת פאזור המתח בפאזור הזרם) בתחום התדר.

קיבול ($C [F]$) מתאר את יכולתו של גוף כלשהו לאגור מטען חשמלי. הרכיבים החשמליים המבוססים על עקרון זה נקראים קבלים, ולרוב הם בנויים משני גופים מוליכים (בעלי התנגדות נמוכה) וחומר מבודד ביניהם. היחס בין המתח על הקבל לזרם שעובר בו נגזר מתוך הגדרת הקיבול ומתואר באופן הבא:

$$(6) I = C \cdot \frac{dV}{dt} [A]$$

ניתן לראות מהקשר, כי כאשר המתח קבוע בזמן (במקרה DC), הזרם דרך הקבל הינו אפס. זאת אומרת, אפקטיבית, הקבל מהווה נתק במעגל. דרך נוספת לראות זאת, היא בעזרת אימפדנס הקבל:

$$(7) Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} [\Omega]$$

עבור מתח קבוע, התדר $f = 0$, אימפדנס הקבל "אינסופי" ועל כן הקבל שקול לנתק. באופן אנלוגי, ניתן ללמוד מהנוסחה כי בתדירות גבוהה מאוד, אימפדנס הקבל אפסי ועל כן הקבל שקול לקצר.

השראות ($L [H]$) מתארת את יכולתו של גוף כלשהו להתנגד לשינויי זרם חשמלי הזורם דרכו. רכיבים חשמליים המתבססים על עיקרון זה הם למשל סלילים. באופן פשטני, מעין תיל המלוכף סביב חומר כלשהו, לרוב פרומגנטי. אימפדנס של סליל מחושב באופן הבא:

$$(8) Z_L = j2\pi fL [\Omega]$$

על ידי ניתוח תדרי קיצון, נבחין בתופעה הפוכה לזו של הקבל. במתח קבוע ($f = 0$), אימפדנס הסליל מתאפס ועל כן הסליל מהווה קצר. בתדרים גבוהים האימפדנס "אינסופי" ועל כל הסליל שקול לנתק במעגל.

על מנת לאפיין התנהגות מעגלים ותגובות תדר שלהם, מקובל להשתמש בפונקציית תמסורת, המוגדרת כיחס בין מתח המוצא למתח הכניסה:

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

חישובי שגיאה יחסית יעשו לפי:

$$(10) \%e = \frac{|Theoretical Value - Measured Value|}{Theoretical Value} \cdot 100\% [\%]$$

4. תיאור הניסוי

מערכת הניסוי

- רב מודד ספרתי (רמ"ס) לביצוע מדידות זרם, מתח והתנגדות מתוצרת UNI-T מדגם UT803
- ספק כוח מתוצרת MATRIX מדגם MPS-3003LK-3
- מחולל אותות מתוצרת MATRIZ מדגם MFG-8216A
- Scope מתוצרת TEKTRONIX מדגם TBS 1052B-EDU
- מטריצת חיבורים
- חוטים חד גדיים
- כבלים (קואקסיאליים, בננה)
- נגדים (בפרט בעלי התנגדויות של 68Ω , 1000Ω , 1500Ω)
- קבל בעל קיבוליות של $1.5\mu F$
- מפצל מסוג T חיבור BNC לפיצול היציאה ממחולל האותות
- Voltage Probe ("מכשפה")

מהלך הניסוי

בחלק הראשון, בשלב הראשון, השתמשנו ברמ"ס למדידת התנגדות. תחילה, מדדנו באמצעות חיבור ישיר של הרמ"ס לנגדים את ההתנגדות וחישבנו את הסטייה מהערך הצפוי (1000Ω , 1500Ω). בשלב השני, הרכבנו על גבי מטריצת חיבורים את המעגל המתואר באיור מספר 1, הכולל את שני הנגדים המחוברים בטור ומדדנו פעם נוספת את ההתנגדות הכוללת של שני הנגדים. בשלב השני, העברנו את הרמ"ס למצב מדידת מתח DC, קבענו את ספק המתח לקונפיגורציה טורית, הפעלנו את ספק המתח, שינינו את המתח כך שיפול מתח של $4.4V$ על הנגד בעל ערך תיאורטי של $1,000 [\Omega]$ ומדדנו בעזרת הרמ"ס את כניסת הספק בפועל. לסיום, ניתקנו את ספק הכח והחזרנו את הנגדים והתיל למקום.

בחלק השני, בשלב הראשון, מדדנו בעזרת הרמ"ס את ערכי ההתנגדות והקיבול של הקבל והנגד וחישבנו את הסטייה מהערך המוכרז ($1.5 [\mu F]$, 68Ω בהתאמה).

בשלב השני, הרכבנו על גבי מטריצת חיבורים את המעגל המתואר באיור מספר 2, הכולל קבל ונגד המחוברים בטור, חיבור למחולל אותות וחיבור ל-Scope, אשר מחוברים זה לזה. בעזרת מחולל האותות, יצרנו אות סינוסי המוגדר באופן הבא: $V_{pp} = 1000[mV]$, $f = 50[Hz]$ וביצענו מדידות שונות. בעזרת ה-Scope של ה-Probe מדדנו את המתח על הקבל, בעזרת כפתור Math של ה-Scope חיסרנו את המתח בין שני הערוצים שהתקבלו ועל ידי כך מדדנו את המתח על הנגד. בעזרת פונקציית Measure של ה-Scope, מצאנו את מתח RMS של הנגד, הקבל והמתח הכולל.

בשלב השלישי, בחנו את התנהגות המעגל באמצעות שינוי התדר ומדידת המתחים השונים. בחרנו 5 תדרים שונים ($50Hz$, $300Hz$, $1,523.77Hz$, $5,000Hz$, $10,000Hz$) ומדדנו בעזרת הרמ"ס את ערכי המתחים האפקטיביים (RMS) עבור הנגד, הקבל ואת המתח הכולל.

בשלב הרביעי, בחרנו את התדר $5,000Hz$ ובעזרת פונקציית Cursor של ה-Scope מדדנו את הפרש הזמנים בין שיאים של ערוץ 1 וערוץ 2 (המתח הכולל ומתח הקבל בהתאמה) וממנו גזרנו את הפרש הפאזה. חישבנו את הפרש הפאזה התיאורטי והתייחסנו לסטייה ביניהם.

בשלב החמישי, השתמשנו בפונקציית FFT של ה-Scope על מנת להציג את התמרת פורייה של מתח המוצא.

ובשלב האחרון, התיאורטי, בחנו את השפעת מעגל ה-LPF על אות כניסה מחזורי ריבועי. כיוונו את יציאת המחולל באופן הבא: $V_{pp} = 1000 [mV]$, $f = 3 [kHz]$. לסיום, ניתקנו את מחולל האותות, ה-Scope והרמ"ס והחזרנו את הנגדים, התיל ומטריצת חיבורים למקום.

5. ניתוח ועיבוד התוצאות

חלק 1

2. להלן טבלה המסכמת את ערכי הנגדים כפי שנמדדו במדידה ישירה על ידי הרמ"ס ואת ההשוואה שלהם אל מול הערכים הצפויים בהתאם לצבעי הנגדים.

טבלה מספר 1 - השוואה בין הערך המדוד והמוכרז של הנגדים

נגד	ערך מדוד [Ω]	ערך מוכרז לפי צבעים [Ω]	Tolerance [$\pm\%$]	סטייה מערך אידאלי [%]
R_1	989	1,000	5	1.1
R_2	1,508	1,500	5	0.53

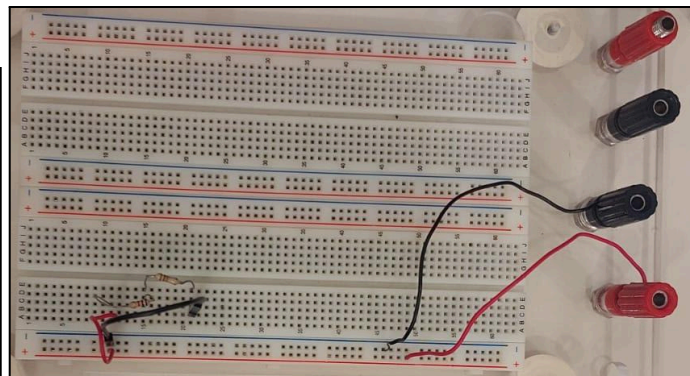
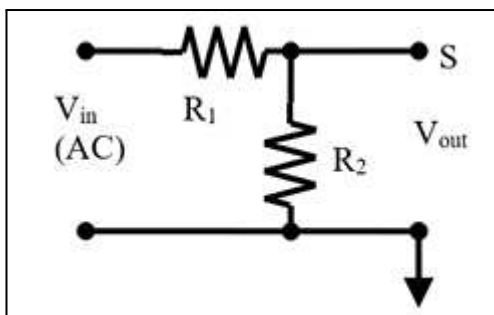
נחשב אחוז שגיאה יחסית לפי נוסחה (10), נקבל:

$$e(R_1)\% = \frac{|989[\Omega] - 1,000[\Omega]|}{1,000[\Omega]} \cdot 100\% = 1.1\%$$

$$e(R_2)\% = \frac{|1,508[\Omega] - 1,500[\Omega]|}{1,500[\Omega]} \cdot 100\% = 0.53\%$$

נשים לב שקיבלנו אחוזי שגיאה יחסית קטנים כך שהערך המדוד קרוב מאוד לערך הצפוי, בהתאם ל-Tolerance הנגדים שעמם עבדנו, לפי היצרן. בנוסף, ניתן לייחס את השגיאה לרגישות מכשיר הרמ"ס ולהתנגדות הפנימית שעלולה להסיט מעט את המדידה (שכן היא לא התנגדות אידיאלית - נתק).

3. להלן תמונה של המעגל שמימשנו בהתאם לאיור 26 מדפי הניסוי:



איור 1 - המעגל החשמלי של חלק 1 ותיאורו בדפי הניסוי

4. להלן טבלה המשווה בין ההתנגדות הכוללת המדודה של שני הנגדים לבין הערך התיאורטי:

טבלה מספר 2 - השוואה בין הערך המדוד והתיאורטי של ההתנגדות הכוללת של שני הנגדים

נגד	סוג חיבור	ערך מדוד [Ω]	ערך תיאורטי [Ω]	סטייה מערך אידאלי [%]
R_{Total}	טורי	2,580	2,497	3.3

מכיוון שמדובר בחיבור טורי, הערך התיאורטי לו ציפינו היה חיבור ערכי ההתנגדות המדודה של שני הנגדים, בהתאם לנוסחה (2):

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 989\Omega + 1,508\Omega = 2,497 [\Omega]$$

נשים לב שלפי מדידת הרמ"ס קיבלנו שההתנגדות הכוללת של שני הנגדים היא 2,580 [Ω]. נבחין שהערך המדוד גבוה מהערך התיאורטי.

ניתן להסביר זאת על ידי כך שלעומת מדידת הרמ"ס, החישוב התיאורטי לא מתחשב בהתנגדות הכבלים, בהתנגדות הפנימית ובסטיית המדידה של המכשיר ולכן הוא שונה מהמדידה המעשית. חישוב אחוז הסטייה לפי נוסחה (10):

$$e(R_{Total})\% = \frac{|2.580[\Omega] - 2.497[\Omega]|}{2.497[\Omega]} \cdot 100\% = 3.3\%$$

7. להלן טבלה המשווה בין ערך מתח כניסה תיאורטי הדרוש על מנת להשרות 4.4V על הנגד R_1 לבין ערך מתח כניסת הספק בפועל.

טבלה מספר 3 - השוואה בין הערך המדוד והתיאורטי של ההתנגדות הכוללת של שני הנגדים

ערכים	מתח כניסה ספק בפועל [V]	מתח כניסה תיאורטי [V]	סטייה מערך אידאלי [%]
חישובים/מדידות	11	11.109	0.1

נציין, כי מתח יציאת הספק בפועל אינו המתח שהוצג במכשיר, מאחר ובקונפיגורציה הטורית של ספק הכוח הוצג הראה מתח 5.5V, אך בפועל ערך המתח בכניסה הוא פי 2 מערך הצג (מפני שה-Master וה-Slave מחוברים בטור, זאת אומרת, סכימת המתחים, כאשר ה-Master מגדיר את המתח גם עבור ה-Slave). ערך מתח הכניסה, שהוצג במכשיר הרמ"ס ריצד סביב הערך 11V ולכן בחרנו לרשום אותו כממוצע המתח. נחלץ את מתח הכניסה התיאורטי בעזרת מחלק מתח לפי נוסחה (4):

$$V_{R_1} = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow 4.4[V] = \frac{989}{989 + 1508} V_{in} \rightarrow V_{in} = 11.109 [V]$$

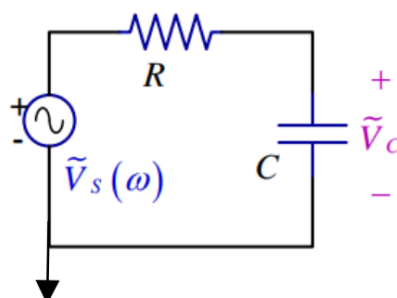
חישוב אחוז הסטייה לפי נוסחה (10):

$$e\% = \frac{|11[V] - 11.109[V]|}{11.109[V]} \cdot 100\% \sim 0.1\%$$

נבחין שהשגיאה היחסית שהתקבלה קטנה מאוד, ונזכיר כי הערך ברמ"ס ריצד ולכן נסיק כי היא נובעת מרגישות המכשיר ומרעשים במדידה.

חלק 2

א. כעת, אנו עובדים עם מעגל RC טורי, כמתואר באיור מספר 2. ננתח את התוצאות שהתקבלו בהתאם למימוש המעגל.



איור 2 - תיאור סכמטי של המעגל הרצוי שמומש

נחשב ערכי אימפדנס הקבל עבור התדרים המבוקשים בדפי הניסוי.

לצורך החישוב ניעזר בהגדרת האימפדנס של קבל כתלות בתדר המתוארת לפי נוסחה (7) $Z_C = \frac{1}{j2\pi fC}$

- $f \rightarrow 0$: הקבל מתנהג כנתק - אימפדנס הקבל הוא: $Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} \rightarrow \infty$
- $f = \frac{1}{2\pi RC}$: בתדר זה (תדר הברך) מתקבל $f = \frac{1}{RC}$ ולכן אימפדנס הקבל הוא:

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} = \frac{1}{j \frac{C}{RC}} = \frac{R}{j} = -jR = R \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$$
- $f \rightarrow \infty$: הקבל מתנהג כקצר - אימפדנס הקבל הוא: $Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} \rightarrow 0$

ב. פונקציית התמסורת מוגדרת (לפי נוסחה (9)), כיחס בין מתח המוצא (במקרה זה, מתח הקבל - V_C)

למתח הכניסה (V_S).

על מנת לחשב את מתח המוצא, נשתמש במחלק מתח לפי נוסחה (4):

$$V_C = V_S \frac{\frac{1}{j2\pi fC}}{(R + \frac{1}{j2\pi fC})}$$

$$\Rightarrow H(f) = \frac{V_C}{V_S} = \frac{\frac{1}{j2\pi fC}}{(R + \frac{1}{j2\pi fC})} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC}$$

ג. נחשב את ערכה של פונקציית התמסורת שמצאנו בתדרים שונים על מנת לקבל תחושה לאופן פעולת המעגל:

- $H(f \rightarrow 0) = \lim_{f \rightarrow 0} \frac{1}{1 + j2\pi fRC} = 1$
- $H(f = \frac{1}{2\pi RC}) = \frac{1}{1 + \frac{j2\pi RC}{2\pi RC}} = \frac{1}{1 + j} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}j$
- $H(f \rightarrow \infty) = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + j2\pi fRC} = 0$

נשים לב שקיבלנו מסנן LPF כך שעבור תדרים נמוכים מתקבל הגבר של 1 במוצא, כלומר אות המוצא עוקב אחר אות הכניסה.

עבור תדרים שגבוהים מתדר הברך ההגבר יורד מתחת ל- $\frac{1}{\sqrt{2}}$ $|H(f = \frac{1}{2\pi RC})| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ואנו מגדירים

שהאות הונחת מספיק כדי שייחשב שהוא לא הועבר הלאה. בפרט, עבור תדרים גדולים ההגבר שואף ל-0.

ד. בהינתן קבל בערך ערך קיבולי $C = 1.5 [\mu F]$, נחשב את ערך הנגד שעבורו תדר הברק יהיה $f_{3dB} = 1.5 [kHz]$

תדר הברק מוגדר להיות התדר שבו $f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$, כלומר ערך הנגד בתדר הברק הוא $R = \frac{1}{2\pi f_{3dB} C}$. נציב ונקבל:

$$R = \frac{1}{2\pi f_{3dB} C} = \frac{1}{2\pi \cdot 1.5 \cdot 10^3 [Hz] \cdot 1.5 \cdot 10^{-6} [F]} = 70.735 [\Omega]$$

ה. להלן טבלה המסכמת את מדידת ערכי ההתנגדות והקיבול של הנגד והקבל, בהתאמה, כפי שנמדדו ישירות בעזרת הרמ"ס ואת חישוב אחוז הסטייה מהערך המוכרז שלהם:

טבלה מספר 4 - השוואה בין הערך המדוד והמוכרז של הנגד והקבל

מדידה	ערך מדוד	ערך מוכרז לפי צבעים	סטייה מערך אידאלי [%]
קבל	1.536 $[\mu F]$	1.5 $[\mu F]$	2.4
נגד	68 $[\Omega]$	68 $[\Omega]$	0

נחשב את תדר הברק התיאורטי לפי הגדרה בעזרת הערכים המדודים:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 68 [\Omega] \cdot 1.536 [\mu F]} = 1523.772 [Hz]$$

חישוב אחוז הסטייה מהערך המוכרז לפי נוסחה (10):

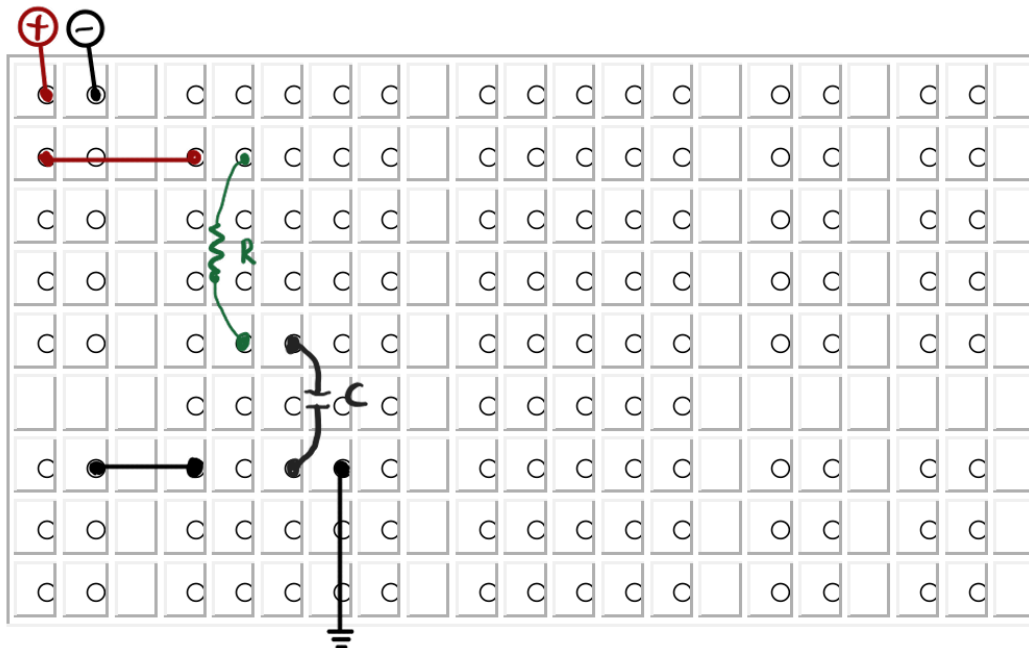
$$e(C)\% = \frac{|1.536 [\mu F] - 1.5 [\mu F]|}{1.5 [\mu F]} \cdot 100\% = 2.4\%$$

$$e(R)\% = \frac{|68 [\Omega] - 68 [\Omega]|}{68 [\Omega]} \cdot 100\% = 0\%$$

$$e(f_{3dB})\% = \frac{|1523.772 [Hz] - 1500 [Hz]|}{1500 [Hz]} \cdot 100\% = 1.584\%$$

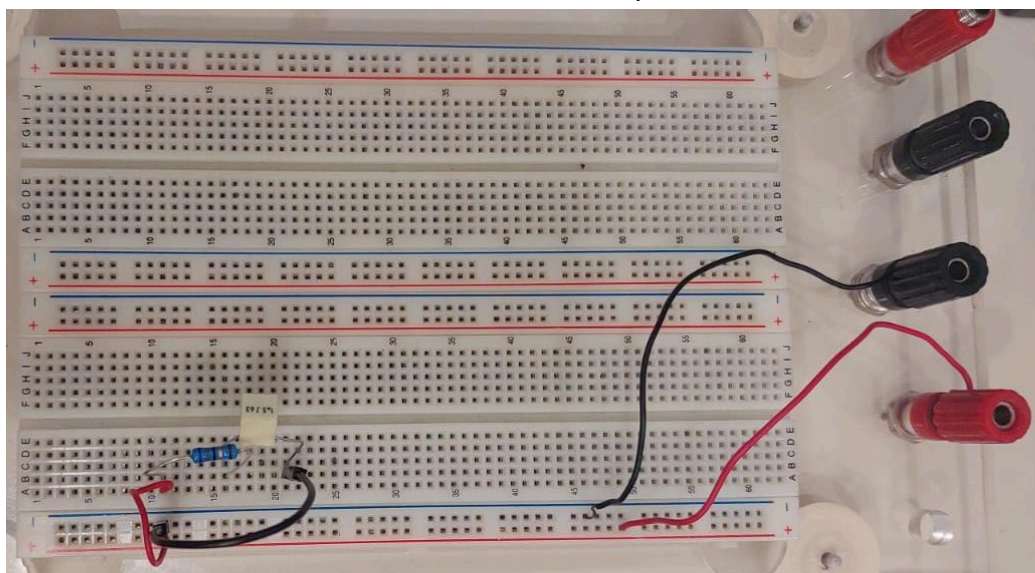
נבחין שהסטיות המתקבלות קטנות מאוד - ניתן לייחס סטיות אלו ל-Tolerance של הרכיבים שעבדנו איתם או להתנגדות הפנימית של הרמ"ס.

נ. להלן ציור סכמטי של המעגל מאיור מספר 2:



איור 3 - ציור סכמטי של המעגל החשמלי של חלק 2

להלן תמונה של המעגל הפיזי שבנינו על סמך איור 3:



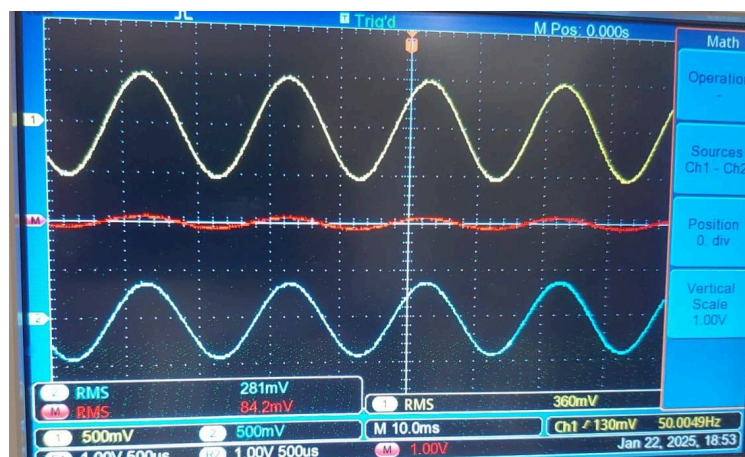
איור 4 - המעגל החשמלי של חלק 2

יג. להלן טבלה המסכמת את ערכי התדרים שנבחרו והמתחים האפקטיביים (RMS) במעגל אשר נמדדו בעזרת ה-Scope:

טבלה מספר 5 - תדרים ומתחי אפקטיביים במעגל RC טורי וכניסת AC

מס'	ערך התדר [Hz]	מתח קבל [mV]	מתח נגד [mV]	מתח כולל [mV]
f_1	50	280	83	360
f_2	300	266	100	346
f_3	1,523.77	132	180	250
f_4	5,000	44.2	197	205
f_5	10,000	22.3	198	200

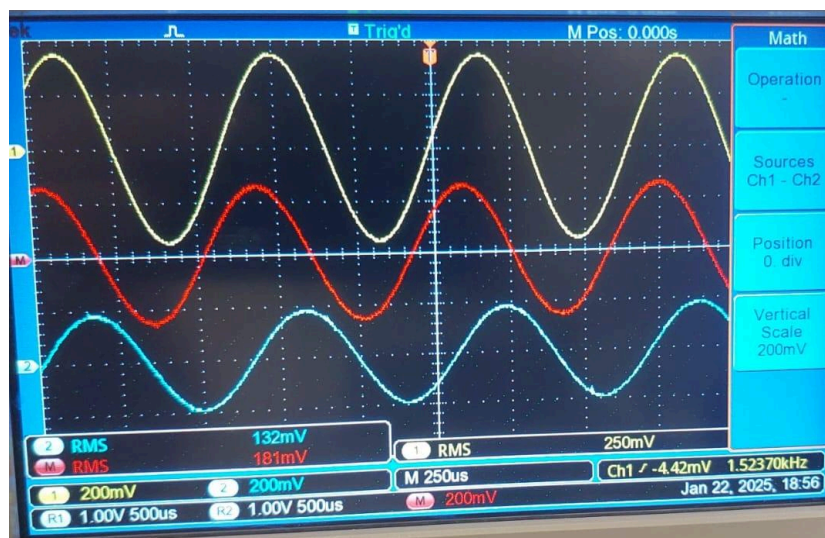
להלן תמונות של צג ה-Scope עבור כל אחד מהתדרים שבחרנו:
 נציין שה-Scope מראה מתח AMP ולא VPP ולכן המתח המוצג הוא מחצית מהמתח המוצג במחולל האותות. **בצהוב** מוצג מתח ה-RMS של מקור הכניסה, **בכחול** מתח ה-RMS של הקבל וב**אדום** מתח ה-RMS של הנגד (שהוא החיסור של מתח הקבל ממתח הכניסה האפקטיביים).



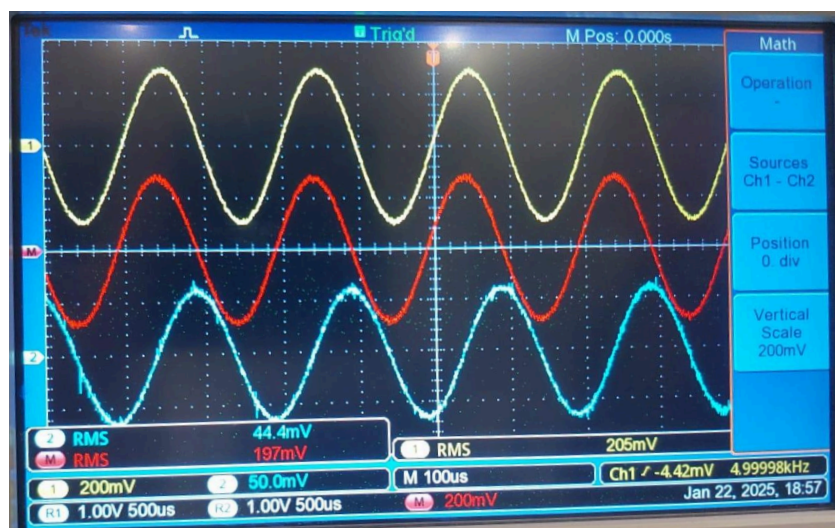
איור 5 - צג ה-Scope עבור תדר של 50 [Hz]



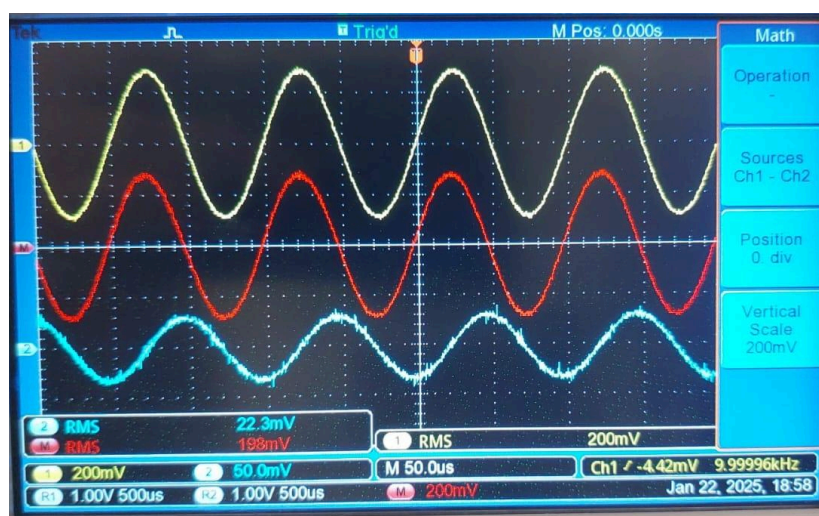
איור 6 - צג ה-Scope עבור תדר של 300 [Hz]



איור 7 - צג ה-Scope עבור תדר של $1,523.77 [Hz]$



איור 8 - צג ה-Scope עבור תדר של $5,000 [Hz]$



איור 9 - צג ה-Scope עבור תדר של $10,000 [Hz]$

יג. התופעה ההגיונית אותה ראינו היא מגמתיות, ככל שתדר הכניסה עולה, המתח האפקטיבי על הקבל יורד והמתח האפקטיבי על הנגד יורד בהתאם.

אחת התופעות הפחות צפויות היא שמתח הכניסה האפקטיבי (המתח הכולל) יורד ככל שהתדר עולה. נסביר זאת בכך שהמתח אותו מדדנו, כלל בתוכו את ההתנגדות הפנימית של מחולל האותות. לכן, ממש כמו שהמתח האפקטיבי על הנגד עלה בהתאם לעליית התדר, כך גם על "הנגד הפנימי" המדומה של המחולל, כשהמתח הכולל מתחלק ביניהם ובין הקבל.

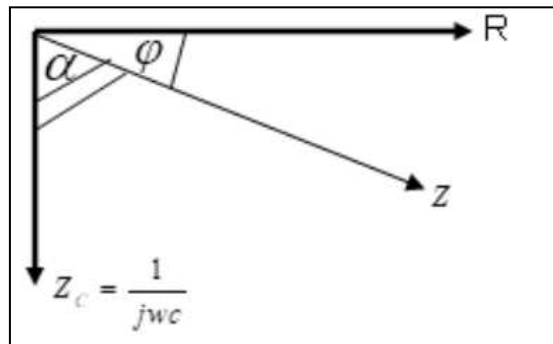
התופעה השניה אותה לא צפינו, היא שבכל אחד מהמקרים המפורטים בטבלה 5, ניתן לראות כי סכום המתחים על הנגד והקבל גדול מהמתח הכולל. הסיבה לכך היא כי מדובר במתחי RMS. נבדוק לפי הגדרת RMS האם סכום המתחים שווה למתח הסכום. לפי אי-שוויון המשולש נקבל:

$$|V_S| = |V_R + V_C| \leq |V_R| + |V_C|$$

מפני שמתח RMS מציג את המתח האפקטיבי וערכו גדול או שווה ל-0 ניתן להוסיף לו ערך מוחלט מבלי לשנות את ערכו. לאחר הוספת הערך המוחלט ניתן להפעיל עליו את אי-שוויון המשולש, כמתואר לעיל, וכך לקבל הסבר מתמטי לתופעה הבלתי צפויה שקיבלנו.

טו. נבחין כי איור 10 מתאר באופן סכמטי את האימפדנסים של רכיבי המעגל, באופן וקטורי. הפרש הפאזה בין אימפדנס הנגד לאימפדנס הקבל הוא קבוע $\frac{\pi}{2} [rad]$.

על מנת לקבוע איזו זווית מתארת את הפרש הפאזה בין מתח הכניסה למתח המוצא, נבין כי באופן שקול ניתן להתבונן באימפדנסים המתאימים. זאת אומרת אימפדנס הכניסה Z (הוא ההתנגדות הכוללת אותה המקור, המחולל, רואה) לעומת אימפדנס המוצא (הקבל במקרה זה). לכן נסיק כי הזווית המבוקשת היא הזווית α .



איור 10 - תיאור וקטורי של האימפדנסים במעגל

יז. להלן טבלה המתארת את הפרש הפאזה (מדוד ותיאורטי) בין מתח הכניסה למתח הקבל ביחס לתדר אותו בחרנו:

טבלה מספר 6 - הפרשי פאזות וזמנים בין מתחים

מס'	ערך התדר [Hz]	הפרש הזמנים [mSec]	הפרש פאזה מדוד [rad]	הפרש פאזה תיאורטי [rad]	סטייה [%]
f_4	5000	0.04	$\frac{2}{5}\pi \sim 1.25$	$1.27 \sim 0.4\pi$	1.57

הפרש הפאזה המדוד חושב לפי מדידת הפרש הזמנים בעזרת נוסחה מספר (5) באופן הבא:

$$\Delta\phi = \Delta t \cdot 2\pi \cdot f = 0.04[mSec] \cdot 2\pi \cdot 5[kHz] = \frac{2}{5}\pi [rad]$$

הפרש הפאזה התיאורטי חושב בעזרת טריגונומטריה לפי התיאור הוקטורי באיור מספר 10:

$$\Delta\phi = \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Re(Z)}{Im(Z)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\frac{1}{\omega C}}\right) = \tan^{-1}(2\pi f_4 RC) = \tan^{-1}(2\pi \cdot 5[kHz] \cdot 68[\Omega] \cdot 1.536[\mu F]) \sim 1.27 [rad]$$

כאשר הסטייה המתקבלת לפי נוסחה מספר (10):

$$e\% = \frac{|1.27[rad]-1.25[rad]|}{1.27[rad]} \cdot 100\% = 1.57\%$$

סברה הגיונית לסטייה הקטנה בין הערך התיאורטי למדוד היא רגישות המכשיר. בנוסף, על מנת למדוד את הפרש הזמנים, השתמשנו בפונקציית ה-Cursor של ה-Scope שאופן כיוונה אינה מדויק. ניסינו לכוון את הסמן כך שיתקבלו בדיוק שני השיאים של כל אחד מן הערוצים, אך כמובן שהדבר לא אפשרי באופן אידיאלי.

יח.

כפי שכתבנו בסעיף טו' ושניתן לראות באיור 10, הפרש הפאזה בין הנגד לקבל הוא קבוע וערכו $\frac{\pi}{2} [rad]$. נוכל להסיק בעזרת חיסור וקטורי, הסעיף הקודם והאמור, שהפרש הפאזה בין סיגנל הכניסה לנגד הינו החיסור המתאים:

$$\Delta\phi = \phi = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{2}{5}\pi = \frac{1}{10}\pi [rad]$$

יט. התמרת פורייה של פונקציית סינוס היא שתי דלתאות סימטריות סביב הראשית, ממורכזות בתדר של הגל. מאחר וה-Scope מראה תדרים חיוביים בלבד, קיבלנו בפועל דלתא אחת. נדייק ונאמר שמדובר בקירוב לדלתא, שכן קיים איבוד אנרגיה (וה-Scope מוגבלת גם מבחינת מתחים אותם הוא יכול להציג), וכן כי מדובר באות סופי ודגום (בניגוד לתיאוריה המתייחסת לסינוס אינסופי ורציף). התדר המרכזי התקבל בערך סביב 5000Hz.

בנוסף נציין שנראה כי התקבלה גם דלתא סביב התדר 0Hz, אנו מסיקים שהדבר נובע מרעש DC שנמצא במערכת.

כא. בשלב זה, יצרנו בעזרת מחולל האותות אות ריבועי בעל $V_{pp} = 1,000 [mV]$, $f = 3 [kHz]$.

סיגנל הכניסה לא הועבר לסיגנל המוצא (מתח הקבל) במלואו. במעגל RC טורי עם תדרי כניסה גבוהים, הקבל מתפקד כאינטגרטור, כלומר מבצע אינטגרציה על סיגנל הכניסה (לא התייחסנו לכך, אך עבור האות הסינוסי מסעיפים קודמים, הפרש הפאזה α בתדרים גבוהים הוא $\frac{\pi}{2}$, זאת אומרת, אות המוצא הוא קוסינוס, זאת אומרת אינטגרציה של אות הכניסה). מבחינה מתמטית אינטגרציה על מלבן תוצאה משולש ומבחינה פיזיקלית, בתדרים גבוהים הקבל לא מספיק להיטען בצורה מלאה לפני הפסקת המתח של הגל הריבועי ולכן נוצרת "החלקה" של האות. כפי שכתבנו, הדבר תלוי תדר. על מנת להמיר את המעגל למסנן נמוכים (HPF), נרצה למדוד את מתח הנגד כמתח המוצא. מאחר ונדרשנו לעשות זאת ללא הזזת ה-Probe, ניתן לעשות זאת על ידי חיסור מתח המוצא (מתח הקבל) ממתח הכניסה, ההפרש, בהתאם לחוק קירכהוף למתחים, יניב את מתח הנגד (כפי שראינו בסעיפים קודמים).

כב. נפתח את פונקציית התמסורת לפי הגדרה כפי שעשינו במקרה בו מתח המוצא היה הקבל, כעת נקבל:

$$H(f) = \frac{V_s - V_c}{V_s} = \frac{V_R}{V_s} = \frac{R}{(R + \frac{1}{j2\pi fC})} = \frac{j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC}$$

כג. נחשב את ערכה של פונקציית התמסורת שמצאנו בתדרים שונים:

- $H(f \rightarrow 0) = \lim_{f \rightarrow 0} \frac{j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC} = 0$
- $H(f = \frac{1}{2\pi RC}) = \frac{\frac{j2\pi RC}{2\pi RC}}{1 + \frac{j2\pi RC}{2\pi RC}} = \frac{j}{1+j} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}j$
- $H(f \rightarrow \infty) = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC} = 1$

כצפוי, בהתאם להגדרת המסנן, בתדרים נמוכים קיבלנו הנחתה מלאה ובתדרים גבוהים אות המוצא זהה לאות הכניסה.

חלק 3

א. עבור מעגל RLC טורי (עבורו מתח המוצא מוגדר להיות מתח הנגד), נקבל בתדרים נמוכים כי הקבל מהווה נתק ולכן כל מתח הכניסה נופל עליו (מתח המוצא 0V). בתדרים גבוהים יהיה זה הסליל שמהווה נתק וגם כאן, כל מתח הכניסה נופל עליו (מתח המוצא 0V). על כן נוצר תחום תדרים מרכזי בו מתח המוצא שונה מאפס, ומכאן נסיק כי המסנן המתקבל הוא Band Pass Filter. הפרש הפאזות בין מתח הקבל למתח הסליל הוא π [rad]. תדר התהודה יתקבל עבור התדר בו המתח על הקבל ועל הסליל שווה בגודלו, במקרה זה, בעקבות הפרש הפאזה ההופכי, שני הרכיבים יתנהגו כקצר (סכום המתחים עליהם יהיה 0V) ונקבל כי כל מתח הכניסה נופל על הנגד.

ב. נחשב את פונקציית התמסורת של המעגל לפי נוסחה (9):

$$H(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{RI}{(j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} + R) \cdot I} = \frac{j2\pi fRC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC}$$

כפי שכתבנו, תדר התהודה יתקבל כאשר המתח על הקבל והסליל יהיה זהה בגודלו, נחשב עבור איזה תדר נקבל את התנאי הזה. למען הנוחות נחשב באופן שקול, עבור איזה תדר האימפדנסים של הרכיבים זהים:

$$|Z_L| = |Z_C| \rightarrow 2\pi f_{res} L = \frac{1}{2\pi f_{res} C} \rightarrow f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

כפי שכתבנו המסנן המתקבל הוא Band Pass Filter, נראה זאת כעת לפי פונקציית התמסורת:

- $H(f \rightarrow 0) = \lim_{f \rightarrow 0} \frac{j2\pi fRC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC} = 0$
- $H(f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}) = \frac{j2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} RC}{1 - (2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}})^2 LC + j2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} RC} = 1$
- $H(f \rightarrow \infty) = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{j2\pi fRC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC} = 0$

כאשר כפי שהסברנו בסעיף קודם, הייחודיות של תדר התהודה היא בכך שכל מתח הכניסה האפקטיבי נופל על הנגד (עומס המוצא).

ג. המסנן ההופכי למסנן בסעיפים קודמים הינו Band Stop Filter (ידוע גם בשם Band Reject Filter). אופן המימוש הבסיסי ביותר שלו הוא באמצעות מעגל RLC טורי, והגדרת מתח המוצא כמתח הנופל על הקבל והסליל יחד. פונקציית התמסורת המתאימה במקרה זה (באופן שקול לזו שמצאנו בסעיף קודם):

$$H(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC}) \cdot I}{(j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} + R) \cdot I} = \frac{(j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC}) \cdot j2\pi fC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC} = \frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC}$$

נראה כעת כי אכן מתקבל המסנן האמור:

- $H(f \rightarrow 0) = \lim_{f \rightarrow 0} \frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC} = 1$
- $H(f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}) = \frac{1 - (2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}})^2 LC}{1 - (2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}})^2 LC + j2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} RC} = 0$
- $H(f \rightarrow \infty) = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{1 - (2\pi f)^2 LC}{1 - (2\pi f)^2 LC + j2\pi fRC} = 1$

6. מסקנות והערות

במעבדה זו חקרנו מעגלים חשמליים שונים, תוך למידה על רכיבים שונים, כגון קבלים ונגדים, ועל התנהגותם במעגל. למדנו לעבוד עם מחולל האותות, ה-Scope ומכשיר המדידה (רמ"ס), תוך מתן דגש על מגבלות המדידה והסיבות האפשריות לסטיות. לאחר הבנת הסטיות חקרנו את תגובת המעגל לתדרים משתנים של האותות בדגש על הקשר בין הכניסה ליציאה. קיבלנו מעגלים המשמשים כמסננים - הם מנחיתים תדרים מסוימים ומנגד מעבירים הלאה למוצא תדרים שונים של האות, בהתאם לנקודה במעגל שאותה הגדרנו להיות המוצא ובהתאם למבנה המעגל.

בשלב הראשון, מדדנו את ערכי ההתנגדות של שני נגדים בעזרת חיבורים למכשיר הרמ"ס והשוונו את הערך המדוד לערך התיאורטי שלהם (כלומר, הערך האידיאלי של הנגדים). קיבלנו שגיאות יחסיות קטנות בין הערך האידיאלי לערך המדוד. השגיאות ככל הנראה נבעו מה-Tolerance של הנגדים (צבע הפס האחרון) או מרגישות הרמ"ס.

לאחר מכן, חיברנו את שני הנגדים בטור במטריצת החיבורים ומדדנו את ההתנגדות הכוללת שלהם. גם כאן קיבלנו סטייה קלה מהערך התיאורטי. הערך שקיבלנו היה גבוה יותר ועשוי לנבוע מהסיבות שצוינו לעיל ובנוסף מההתנגדות הפנימית של הכבלים או של הרמ"ס, שכן בחישוב התיאורטי מניחים שהכבלים ללא התנגדות פנימית ושכל ההתנגדות מגיעה מהנגדים בלבד.

לבסוף, ביצענו מדידה של מתח הכניסה על מנת לקבל מתח מוצא רצוי של 4.4V על הנגד R_1 . קיבלנו שגיאה יחסית של 0.1% אשר נבעה ככל הנראה מחוסר דיוק של ספק המתח וממתח שנפל על ההתנגדות של הכבלים או של הספק. בנוסף, הערך בצג הרמ"ס ריצד ולקחנו ממוצע "לפי העין" כך שבפועל ישנה סבירות שנגרמה סטייה כתוצאה מכך.

בשלב השני, חיברנו מעגל RC טורי וחישבנו את פונקציית התמסורת של המעגל, כאשר המתח הנופל על הקבל מוגדר להיות מתח המוצא. בחנו את התנהגות המעגל (באופן תיאורטי) עבור מגוון תדרים שונים - תדרים גבוהים, תדרים נמוכים ותדר התהודה (תדר הברך). קיבלנו באופן תיאורטי התנהגות של LPF שמעבירה תדרים נמוכים ומסננת תדרים גבוהים. לאחר מכן, מימשנו את המעגל במטריצת החיבורים ומדדנו את מתח המוצא (הקבל), מתח הכניסה ומתח הנגד (ההפרש שלהם) כתלות באותות סינוסואידליים בתדרים שונים. קיבלנו שככל שתדר הכניסה עולה, המתח האפקטיבי על הקבל יורד והמתח האפקטיבי על הנגד עולה בהתאם, כמצופה. עם זאת, קיבלנו שהמתח הכולל שמזין את המעגל יורד ככל שהתדר עולה וזאת, כנראה, כתוצאה מההתנגדות הפנימית של מחולל האותות שנופל עליה מתח גדול יותר (בדומה למתח הגדול יותר שנופל על הנגד שבמעגל) ככל שתדר האות גבוה יותר. לבסוף, ראינו גם שסכום המתחים על הנגד והקבל גדולים מהמתח הכולל וזאת מפני שמדדנו ערכי RMS ולא מתח ממוצע.

לאחר מכן חישבנו באופן תיאורטי את הפרשי הפאזה בין אות הכניסה לבין אות המוצא. קיבלנו סטייה קטנה מאוד בין הפרשי הפאזה התיאורטיים והמעשיים. סיבות אפשריות לכך הן סטייה של מחולל האותות או סטיות במדידת הפרש הזמנים בין הפיקים השונים של אות הכניסה ושל אות המוצא שנמדד באמצעות הסמן ב-Scope.

לבסוף, ביצענו התמרת FFT במכשיר ה-Scope והשוונו את התוצאה להתמרת פורייה האנליטית. במקום התמרה של 2 דלתאות שמתקבלת בתיאוריה קיבלנו דלתא אחת בלבד (נספח מספר 1) כתוצאה מהצגת תדרים חיוביים בלבד ב-Scope. בנוסף קיבלנו דלתא בתדרים נמוכים (סביבות 0) שמגיעה כנראה מרעש DC שנמצא במערכת. ראינו שיש זליגה של אנרגיה (הדלתאות לא מושלמות ויש תמך אינסופי בתדר) שנובעת מכך שהאות דגום בזמן סופי ושמחולל האותות אינו אידיאלי. בניתוח של אות המוצא ראינו שהמעגל למעשה שימש כאינטגרטור עבור תדרי כניסה גבוהים. ראינו שעל מנת להמיר את המעגל ל-HPF ניתן להגדיר את מתח המוצא של המעגל למתח הכניסה פחות מתח הקבל ובכך למעשה לקבל את מתח הנגד.

בשלב השלישי, ניתחנו מעגל RLC טורי (ללא מימוש בפועל) ובחנו את התנהגותו בתגובה לתדרי אות שונים, כאשר מתח המוצא מוגדר להיות מתח הנגד. מצאנו שהמעגל משמש כ-BPF - מסנן מעביר רוחב פס מסוים. כלומר, המעגל מעביר תחום תדרים שנקבע על ידי ערכי רכיבי המעגל. ראינו שעל מנת להפוך אותו למסנן

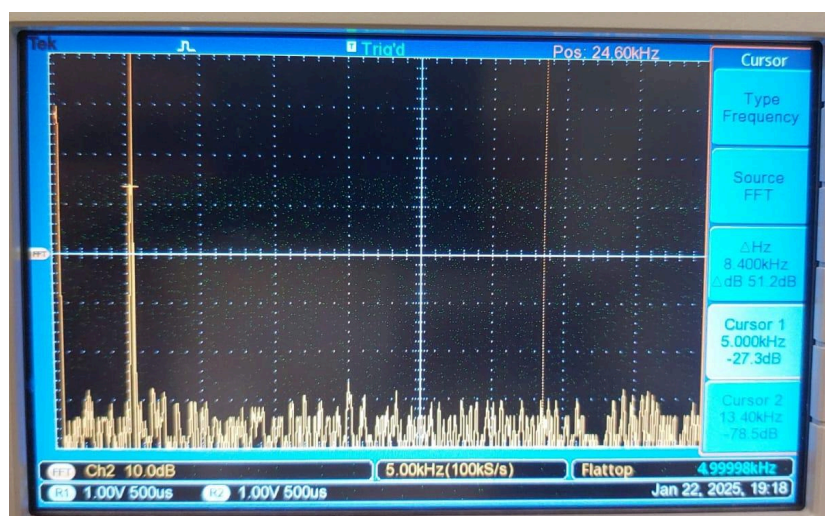
BSF - מסנן חוסם פס תדרים מסוים, נוכל להגדיר את מתח המוצא כמתח הנופל על הסליל והקבל (כלומר, לחסר את מתח הנגד ממתח הכניסה ולהגדירו כמתח המוצא).

הניסוי אפשר לנו להבין לעומק את התנהגותם של רכיבים חשמליים במעגלים שונים ולבחון את השפעתם על אותות בתדרים שונים. למדנו על סטיות מדידה אפשריות, גורמיהן והשפעתן על חישובים מעשיים, תוך שימוש במכשירי מדידה כמו רמ"ס, מחולל אותות ו-Scope. חקרנו את תגובות המעגלים למסננים שונים (LPF ו-BPF) ואת השפעת התנגדות פנימית של רכיבים על המדידות. כמו כן, חישוב הפרשי פאזה וביצוע התמרות FFT הדגישו את ההבדלים בין התיאוריה למציאות. מסקנות אלו מסייעות להבנת תכנון ויישום מעגלים בתעשייה, במיוחד בתחומי תקשורת, אלקטרוניקה ועיבוד אותות (בפרט ביולוגיים).

7. מקורות

- [1] קובץ "דפי הכנה, פרוטוקול והנחיות לכתיבת דוח מסכם ניסוי - B4".
- [2] מצגותיו של ד"ר ינון סתיו מקורס "תורת המעגלים החשמליים - 044105".
- [3] מצגותיו של ד"ר גל בן-דוד מקורס "אותות ומערכות - 044131".

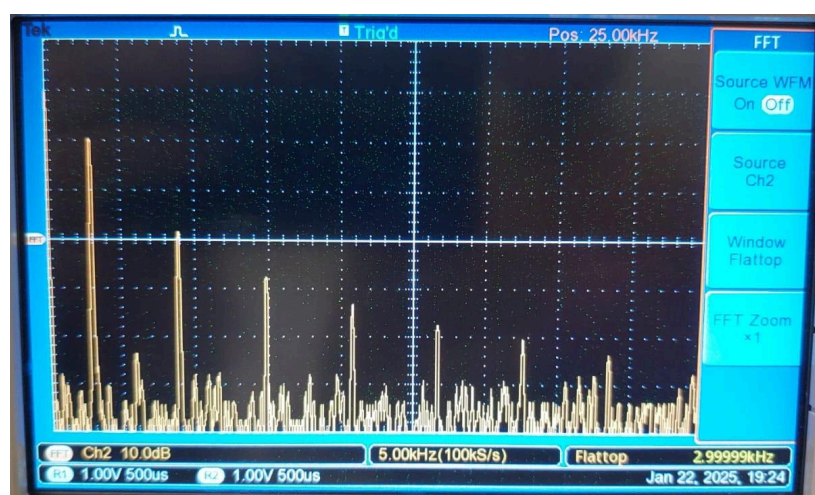
8. נספחים



נספח 1 - התמרת פורייה של מתח המוצא עבור אות סינוסי בתדר של $5,000[\text{Hz}]$



נספח 2 - סיגל הכניסה ומתח הקבל עבור אות ריבועי בתדר של $3,000[\text{Hz}]$



נספח 3 - Easter Egg למדריך המעבדה אדם סוקר - התמרת פורייה של מתח המוצא עבור אות ריבועי בתדר של $3,000[\text{Hz}]$

אינדקס הערות

- 3.1 התכוונתם התנגדות פנימית של המקור
- 3.2 לא בחנתם, הצעתם
- 8.1 התגדות הכבלים הרבה יותר קטנה