

דף שער

התיכון הישראלי למדעים ולאמנויות - 144097

נושא הפרויקט: אפנון מושיעת (Amplitude Modulation)

ממצוי הפרויקט: עידו הרון, יב, 2, 212439814. גל כהן, יב, 3, 324941277.

שם המנהה: קובי חרמוני

שם המורה: ברנד סרינג

תאריך הגשה: 2020.X.X

תוכן עניינים

1	דף שער
3	תקציר
4	רקע תיאורתי
<u>1648</u>	ניסוח שאלת מחקר והשערות ל吒וצאות
<u>1648</u>	תכנון המחקר
<u>2427</u>	吒וצאות
<u>3134</u>	מסקנות דיון ורפלקציה
<u>3336</u>	ביבליוגרפיה
<u>3438</u>	נספחים

תקציר

בפרויקט זה ניתחנו מעגלים המבצעים אפנון מושעת (Amplitude Modulation). את הפרויקט התחלנו בחקר מעגלי RLC על מנת להבין התנהוגות של מסני תדר. לאחר מכן בנו מעגל המבצע מודולציה AM בסיסית (**מודולטור אפנון**), ככלומר מייצר אותן אשר המעתפת שלו היא אוט סינוסואידלי בתדר נמוך (גל נישא) ותדרותו מוגדרת על ידי גל נושא בתדר גבוה. בהמשך, בנו מעגל המחלץ את המעתפת, משמע את האות ותדרותו מוגדרת על ידי גל נושא בתדר גבוה. בשלב הבא העברנו אותן מרכיב (שיר באורך 0.2 שניות) דרך המחשב ל**demodulator**, (**demodulator מעטפה**). ניתחנו את התוצאה ברמת המעתפת והתדר, והעברנו אותן היוצאת דרך **demodulator אפנון**. קיבלנו את השיר שהכנסנו למערכת עם איות שמע גבוהה. במקביל, בחנו את המודול התיאורטי בעזרת מערכת סימולציה מקצועית וייצרנו מעגלים שונים על מנת לבחון את ניבוי המודול. מצאנו כי בעבודה יש להתחשב בפרמטרים נוספים ולהילך בנית המעגלים כולל צורך ביצירתיות, התגברות על פערים טכניים ופתרון שוטף של תקלות. הוספנו זאת לנитוח התוצאות. כמו כן, לסיום הפרויקט עסקנו במספר הרחבות: 1.) מערכת המשדרת מספר תדרים בו זמנית (multiplexing) ; 2.) בניית מערכת לשידור רדיו המשמש במערכות שבנו על מנת להעביר את התדר ולקלוט אותו.

רקע תיאורטי

סיכום חומר מהספרות

מעגלים פשוטים:

רכיבים:

- נגד [resistor] – רכיב שמטרתו לספק לנו את ההתנגדות הדרישה לנו.
- קובל [capacitor] – רכיב השמלי בעל יכולת לאגור מטען ולפרוק אותו. קבלים בניוים משני לוחות עם מבוזד ביניהם, על כל לוח מטען שווה בגודל אך מנוגד בסימן.
- קיבול [פראד: F] - היכולת של קובל לאגור מטענים ביחס להפרש פוטנציאליים שהוא מקובל. הנוסחה: $C = \frac{q}{V}$
- האנרגיה האגורה בקובל – סך האנרגיה האגורה בקובל מתקיים על ידי הנוסחה:
$$E = \frac{q^2}{2C}$$
 כאשר q זה כמות המטענים ו C הוא הקיבול.
- דיודה- מאפשרת מעבר של אלקטرونים רק בכיוון אחד, בעצם מנעuta את מהפך כיוון הזרימה של האלקטרונים. בעצם במעגל השמלי הדיודה מאפשרת לנו להעביר זרם רק בכיוון אחד, מה שנייה אם מדובר במעגל מבוסס זרם חיליפין מאפשר לנו כיוון אחד של הזרם וב בעצם להוריד את הערכיהם ה"שליליים" מהחוטcer.
- סליל [inductor] – רכיב השמלי בעל יכולת לאגור זרם, בניגוד לקובל אשר אוגר מטען. בניו מגיליל שסביבו מולופף מוליך בצורה סליל.
- השראות [הנרי: H] – היכולת של סליל לה拮ן לשינויים בזרם העובר דרכו.

מעגלים:

- filters:
 - HPF [High pass filter] LPF [low pass filter], BPF [band pass filter]
 - מסננים טוחחים בתדרות, כאשר HPF מסנן לתדרים גבוהים, BPF מסנן לתדרים נמוכים ו BPF מסנן לתחום ספציפי.
- מעגל מסנן RLC – כפי שנרמזו מהשם מדובר על מעגל של נגד, סליל וקובל. מעגל משמש כמסנן BPF(שגדיר בהמשך, כשהיה לנו רלוונטי) וניתן לתאר את RLC

המעגל בעזרת המשוואת הדיפרנציאלית הבאה:

$$\frac{d^2I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I(t) = \frac{1}{L} \frac{dV}{dt}$$

 כאשר I זרם, R ההתנגדות, L השראות הסליל, C קיבול הקובל ו V המתה המקורי.

מודולציה איפנון (modulation)

הגדרות עזר:

- תדרות [הרץ] – מספר המוחזרים שמתבצעים כל יחידת זמן. הרץ הוא מספר המוחזרים פר שנייה, 20 הרץ זה אומר 20 מוחזרים בשנייה.
- מהירות פזה – קצב ההתקדמות שבו מופיע הגל למרחב (אם מסתכלים על נקודה בגל כמה מהר היא נעה).
- אורך גל אלקטرومגנטי – אנחנו יודעים כי אורך הגל שווה ל $\lambda = \frac{c}{f}$ כלומר מהירות הפזה חילקי התדרות שווה לאורך הגל, במקרה שלנו מדובר ב מהירות האור, ולכן: $\lambda = \frac{c}{f}$
- אנרגיה – האנרגיה שעצורה בגל פרופורציונית ל $\frac{1}{\lambda^2}$ כלומר ככל שאורך הגל יותר קצר כך האנרגיה משמעותית יותר גדולה.
- טווח השמיעה האנושית הוא בין $20kHz$ ל- $20Hz$.
- גודל אנטנה לעומת אורך גל – אנטנה חייבת להיות בסדר גודל של $\frac{\lambda}{k}$ כאשר k לא גדול במינוח. (לדוגמא $k=4$ הוא מקדם סביר, כפי שמופיע בנספח שידור)

למה אנחנו צריכים מודולציה איפנון (modulation)?

קריטריון ניוקויסט:

בנוסף אנחנו יודעים לפי קריטריון ניוקויסט כי לצורך לשחזר את המידע علينا שהתדרות של הנשא תהיה לפחות חצי מהתדרות של האות המקורי, **כמוכך** שלא נגיע לתדרויות כל כך נמוכות, כי מכל הסיבות שציינו כת עת אנחנו רוצים להעלות את התדרות ולא להוריד אותה.

אורך האנטנות:

نبדוק מה קורה כאשר אנחנו בוחרים לשדר ב $3[kHz]$ ככל יחסית במרכזה בתחום השמיעה האנושית. נקבל כי אורך הגל הוא: $100[km] = \frac{c}{3[kHz]} = \frac{(300*10^6)}{3*10^3}$. לפי משואה קודמת עולה שאורך האנטנה צריך להיות בסדר גודל של $25km$. לכן, תדרויות סטנדרטיות לשידור הן ב- GHz .

הכוח המוקן מהאנטנה:

האנרגיה משפיע באופן ישיר על המרחק שניtin לשדר את המידע, שכן אנחנו רוצים אנרגיה גבוהה, כלומר לפ"י: $\frac{1}{\lambda^2}$. אנחנו רוצים להקטין את אורך הגל כמה שניtin, שהוא אמור להגדיל את התדרות.

שידור במקביל (מולטייפלקסינג):

מודולציה איפנו מאפשרת לנו לקבל מספר אינפורטם, שישבים בתדריות סמוכות זו לזו ולהעביר אותם לתדריות גדולות בהרבה, ורחוקות אחת מהשנייה, זה אפשר לאחר כך בדימודולציה-במעטה להפריד הזרה לשני האינפורטם, כלומר לשדר את האותות במקביל.

לסיכום

יש שני סוגים נפוצים של איפנו: אפנו תדר ואפנו מושעת. בפרויקט זה נתמקד באפנו מושעת או AM.

מודל תיאורי: אפנו מושעת

נפתח מודל מתמטי לאפנו מושעת אידיאלי. נתחיל במספר הגדרות עוז:

- את המידע הנכנס נסמן ב($m(t)$)
- את הנשא (מה שקבע את התדרות עליה יושב המודולציה איפנו, נסמן ב($c(t)$))
- את התוצאה, המידע לאחר המודולציה איפנו, נסמן ב($y(t)$)

נגיד את האות שמעוניינים לשדר:

$$m(t) = A_m * \sin \omega_m t$$

A_m מייצג את אמפליטודה התדר הנכנס ו ω_m את התדרות.

פונקציית הנשא תהיה מהצורה:

$$c(t) = A_c * \sin \omega_c t$$

כאשר $\omega_c > \frac{\omega_m}{2}$, ומשנית $\omega_c > \frac{\omega_m}{2}$

אינדקס האיפנו: $\mu = \frac{A_m}{A_c}$ קיבלנו את המשוואה הבאה (חישוב בנספח תאורטי):

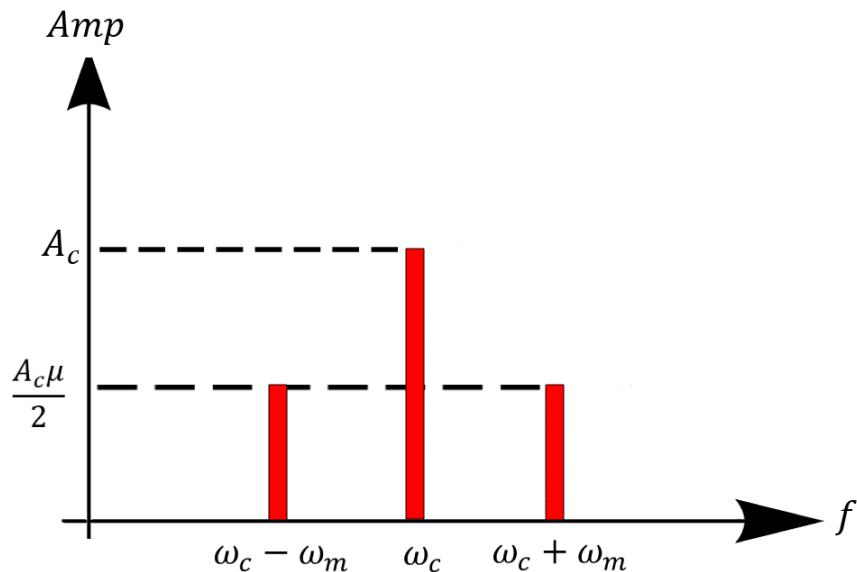
Equation

$$\text{Equation 1: } y(t) = A_c \sin \omega_c t + \frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

כלומר ניתן לראות כי קיבלנו שלושה תדרים סביב ω_c שהם:

$$\omega_c, \omega_c - \omega_m, \omega_c + \omega_m$$

ובסק הכלל, הזינו את התדר של האות הנישא ב- ω_c , שזאת הייתה הדורישה שלנו. נגדיר את המרחק בין – ω_c לבין ω_m כרוחב הפס.



משמעות אינדקס האפנון: במקרה ש $A_m < \mu = 1$ קלומר אין איבוד מידע, כאשר במקרה $A_c > A_m$ נקודת המינימום שלנו תהיה ב-0, והῆקירה האחרון והבעיתית ביותר > 1 מוגול מל- A_m ונקבל פונקציה מתהיפכת, כל מה שיורד אחרי המודולציה איפנון מתחת ל-0, עובר לערכיהם החיוביים. אפשר להשווות את הפונקציה לאחר המודולציה איפנון לפונקציה המוקפת בערך מוחלט.

הספק מדולציה (כדי לבדוק את אנרגיית השידור):

מספר הגדרות עוזר

- ממוצע שורש ממוצע ריבועים [RMS] – ההגדלה של הממוצע מעל פונקציה מהזורה בטוחה בין מינום

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt}$$

- ממוצע RMS מקביל להפסק.

- ממוצע RMS של פונקציה מהצורה הבאה: $a \sin \sin(2\pi ft)$ הוא $\frac{a}{\sqrt{2}}$

▪ מכך נובע כי

• חלק תחתון של הפס - החלק $\frac{A_c\mu}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t$

• חלק עליון של הפס – החלק $\frac{A_c\mu}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t$

כאשר ~~המוקב~~ ש: עדין הנשא [C] שלנו.

אנו יודעים להגיד כי:

$$P_c = \frac{A_c^2}{2}, P_{USB} = \frac{A_m^2}{8}, P_{LSB} = \frac{A_m^2}{8}$$

נגיד את הספק האות המשודר – שבצム יהווה לנו תחליף מתאים למושג האנרגיה, נתחיל מהספק האות לאחר

המודולציה איפנו:

$$P_{signal} = P_s = P_{USB} + P_{LSB} = \frac{A_m^2}{4}$$

עכשו נחבר לנשא:

$$P_{total} = P_c + P_s = \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_m^2}{4} = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right) = P_c \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)$$

כלומר האנרגיה שלנו בשידור.

$$\eta = \frac{P_s}{P_t} = \frac{\frac{A_m^2}{4}}{P_c \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)} = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2}$$

משוואות מולטיפלקסינג:

אפשר להציג את המשוואות למולטיפלקסינג, כפי שתארנו שאפשרי בחלק של המוטיבציה לעשיית

מודולציה איפנו:

$$m(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + \cdots + A_n \sin(\omega_n t)$$

$$y(t) = A' \sin(\omega_c t) = (A_c + m(t)) \sin(\omega_c t)$$

$$= A_c \sin(\omega_c t) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t) * \sin(\omega_c t) =$$

$$Equation 2: A_c \sin(\omega_c t) \left(1 + \sum_{i=1}^n \mu_i \sin(\omega_i t)\right)$$

ניתן לראות כי העיקרון זהה למשוואת 1.

עד כה עסקנו בהלך התיאורטי. כיצד ניתן לבנות מערכת שמבצעת את אפנון המשרעת בפועל?

מספר הגדירות עוזר

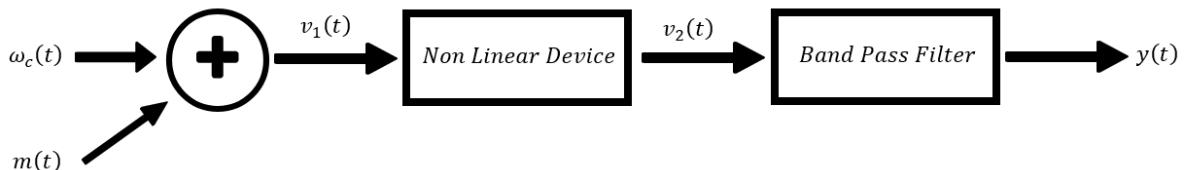
- מחבר [Adder] – רכיב אשר מ לחבר את הזרמים, ומבצע **כמוכן** את אותה פעולה מתמטית על המשוואות שלהם.
- מכשיר בלתי לינארי [non-linear device] – רכיב אשר מבצע פעולה בלתי לינארית, כלומר לא מ לחבר את הרכיבים באופן ישיר, זה אומר שאם הזרם הנכנס גדול פי a הזרם היוצא לא יהיה גם בהכרח (פחות במקרה אחד לא).

○ דוגמאות:

▪ מתמטיות: רכיב שמבצע פעולה חזקה, רכיב שמבצע ערך מוחלט.

▪ אלקטרוניות: דיודה, סליל, קבל.

מבנה סכמטי של מעגל:



נתאר את הפעולות שהמעגל מבצע שלב תוך שימוש בהגדירות שהוצגו בפרק התיאורטי.

נתחיל עם המחבר, אנחנו מחברים את $m(t) + c(t)$ כלומר נקבל:

$$v_1(t) = A_c \sin \omega_c t + m(t)$$

בשלב הבא הזרם המשותף נכנס לרכיב הלא לינארי שלנו, שניתן לתאר בעזרת הפולינום הבא (רכיב לא לינארי בעל חזקה 2):

$$F(x) = bx^2 + ax \rightarrow F(v_1(t)) = bv_1(t)^2 + av_1(t) = v_2(t)$$

נמשיך עם הביטוי:

$$v_2(t) = b(A_c \sin \omega_c t + m(t))^2 + a(A_c \sin \omega_c t + m(t)) =$$

$$b(A_c^2\omega_c t + 2A_c \sin \omega_c t * m(t) + m(t)^2) + aA_c \sin \omega_c t + a m(t) = \\ = bA_c^2\omega_c t + 2bA_c \sin \omega_c t * m(t) + bm(t)^2 + aA_c \sin \omega_c t + a m(t)$$

כפי שראינו במשוואת מס' 1 ברקע התיורטי הביטוי שמעניין אותנו הוא:

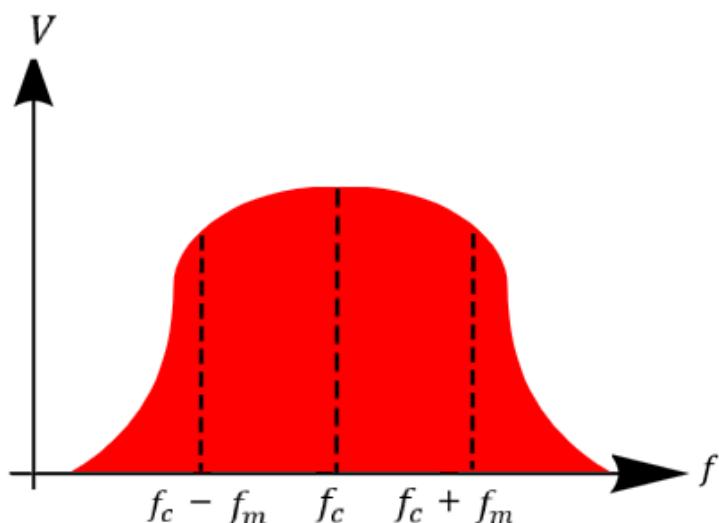
$$a A_c \sin \omega_c t + 2b A_c m(t) * \sin \omega_c t = a A_c \sin \omega_c t \left(1 + \frac{2b}{a} m(t) \right)$$

(אפשר לראות כי $\frac{2b}{a}$ דומה מאוד ל μ)

בשביל זה אנחנו צריכים לסמן מהמשווה את:

$$a m(t) + b A_c^2 \sin \omega_c t + b m^2(t)$$

בשביל זה נשתמש בPF, כלומר אנחנו רוצים רק את החלק בין הקצאות:

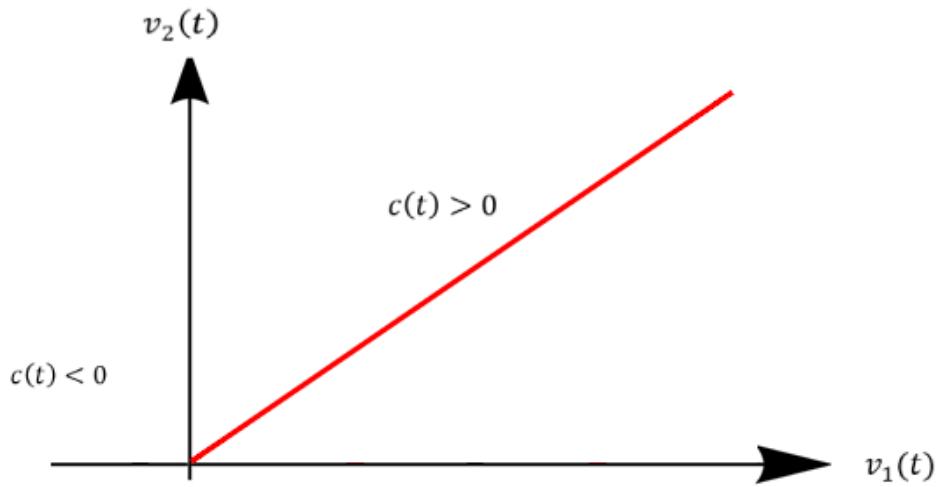


רכיב לא לינארי לדוגמא הוא דיודה. אנחנו יודעים כי דיודה עובדת על פי העקרון הבא:

כאשר האינפוט $v_1(t) > 0$ אז $v_1 = v_2$ וכשהלא, אז $v_2 = 0$. נקבל:

$$v_2(t) = g_p(t) * v(t)$$

כאשר $(g_p(t)$ היא 0 או 1 על פי הסימן של v [מכונה periodic pulse train]. אם נסתכל על הפונקציה היוצאת מתחום הדיודה כ- $c(t)$ נקבל את הגרף הבא:



שמתאר את ההתנהגות של הדיודה כאשר הזרם עולה לינארית בזמן, מה שמאפשר לנו לקבל אינטואוציה יותר טובה בנוגע להתנהגות שתיהה לפונקציית המקדם של הדיודה.

אנחנו יודעים כי מדובר בפונקציה מחזורית, כי הנושא שלנו הוא סינוסoid. נגידר את זמן המחזור שלו T_0 .

נעשה את החישוב ונגיע לפונקציה שלנו לאחר הרכיבים (הчисוב מופיע בנספח התאורטי):

$$v_2(t) = 0.5v_1(t) + \frac{2}{\pi} * \cos(\omega_c t) v_1(t)$$

נציב את $v_1(t)$ ונקבל:

$$\frac{m(t)}{2} + \frac{2m(t)}{\pi} \cos \omega_c t + \frac{A_c}{2} \cos(\omega_c t) + \frac{2A_c}{\pi} \omega_c t$$

הסיגנל:

$$\frac{m(t)}{2}$$

הרמוניות מסדר גבולה:

$$\frac{2A_c}{\pi} \omega_c t$$

אנחנו רוצים לסנן בעצם בBPF את הרכיבים הבאים:

$$\begin{aligned} & \frac{2m(t)}{\pi} \cos \omega_c t + \frac{A_c}{2} \cos(\omega_c t) \\ & \frac{2m(t)}{\pi} \cos \omega_c t + \frac{A_c}{2} \cos(\omega_c t) = \frac{A_c}{2} \cos \omega_c t \left[1 + \frac{4A_m}{\pi A_c} m(t) \right] \end{aligned}$$

נסיק כי אינדקס המודולציה אייפון של דיוודה:

$$\frac{4A_m}{\pi A_c} = \frac{4}{\pi} \mu$$

מתה של רכיב מסויים מדורב על לפני ואחריו:

בבחן מעגל RC מבחינה תאורטית:

אנחנו יודעים את העכבות הבאות:

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

אנחנו יודעים כי:

$$Z = \frac{V}{I}$$

כלומר לכל רכיב :

$$\frac{Z_i}{Z_{total}} = \frac{V_i}{V_{input}}$$

נשתמש בזה בשביל להגעה לתחום הבאות (מופייע בנספה תאורטי – תח נספה RC):

מתה של רכיב מסויים מדורב על לפני ואחריו:

$$AMP \left(\frac{V_c}{V_{input}} \right) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R C)^2}}$$

$$AMP \left(\frac{V_R}{V_{input}} \right) = \frac{\omega R C}{\sqrt{1 + (\omega R C)^2}}$$

מכונה פונקציית תגובה.

במקרה של RC הקוטען (cutoff) קאטפאו שלו ייה:

$$\frac{1}{2\pi R C}$$

בבחן מעגל RLC מבחינה תאורטית:

נשתמש בעכבות כדי לגלוות :

$$Amp \left(\frac{V_R}{V_{input}} \right) = \frac{\frac{\omega R}{L}}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right) + \left(\frac{\omega R}{L} \right)^2}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(משוואה 4)

f0 הוא מרכז טווח התדריות, cutoff קטעון ((cutoff))

$$\omega_{c1} = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}, \omega_{c2} = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

נקבל את
כלומר קיבלנו:

$$Equation 5: Band-width = \omega_{c2} - \omega_{c1} = \frac{R}{L}$$

(משוואה 5)

מייצוי האות (דמודולציה) נעשה על ידי מסנן תדר נמוך עם תדר קטעון cutoff (cutoff): השוואת הדימוי של טווח cutoff RC היא כמפורט

$$\frac{1}{2\pi RC}$$

(משוואה 6)

הניסוי הראשוני שלנו היה לבדוק מעגלי RC שכן נשתמש בהם בהמשך כמסני תדרבגאל שהיינו צריכים להשתמש בחלקם האלו. פיתחנו את המשוואות ומדכנו את המתח על החקקים. לאחר מכן, השווינו עם התיאוריה.

משוואות יחס המתחים בין הרכיבים למתח בתחילת המעגל (כפי שהראנו בנספח התאורטי):

$$\text{עבור קבל: } \frac{V_C}{V_0} = \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

$$\varphi = \omega CR \text{ הפאזה:}$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1}} \text{ האמפליטודה:}$$

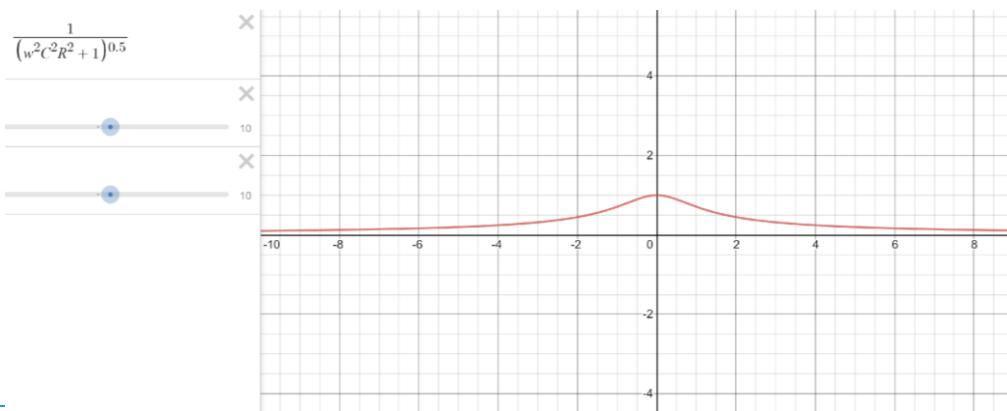
$$\frac{V_R}{V_0} = \frac{R^2 \omega^2 C^2}{1 + R^2 \omega^2 C^2} + i \left(\frac{R \omega C}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \right) \text{ עבור נגד:}$$

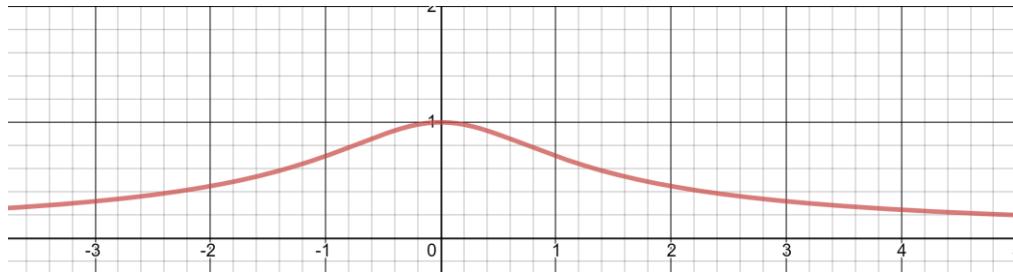
$$\varphi = \frac{1}{R \omega C} \text{ הפאזה:}$$

$$A = \frac{R \omega C}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}} \text{ האמפליטודה:}$$

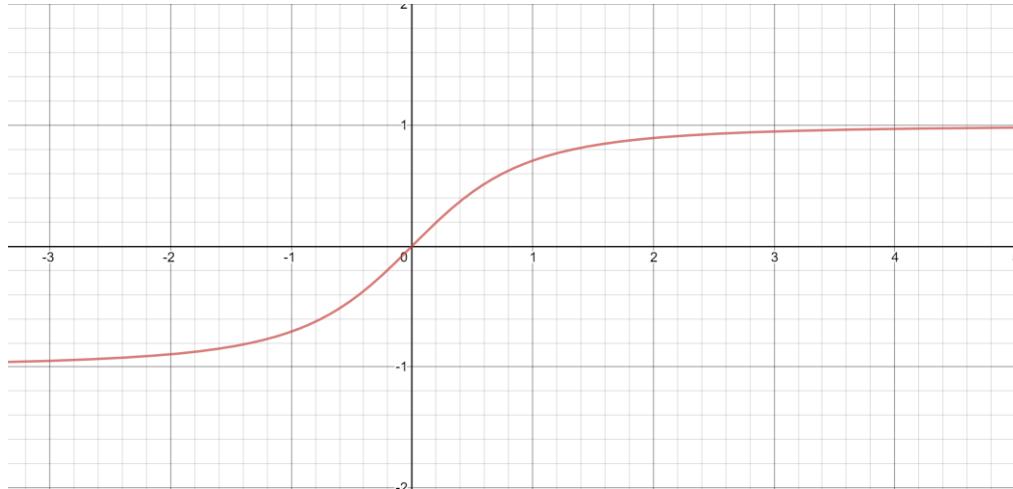
במשוואות המתוארות מדבר על היחס בין המתח הנכנס למעגל RC כלליאלי לבין המתח היוצא מהרכיב הספציפי, ככלומר לא משנה אם יש רכיב קודם או לא, זה ספציפי לסוג מעגל זה. הסדר במעגל כפוף לא משנה. מפיתוח המשוואות הנ"ל הגענו למסקנה שבמקרה להגדיל את נפח הקפיטור נימן לקבל את אותו אפקט עם הגדלת עוצמת הרזיסטור והתנגדות.

ניתן לראות את מבנה הפונקציה $F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1}}$ התאורטי בדסמוס בדסמוס:





זה עובד גם אם משתנים על [פונקציונליות](#) $F(\omega) = \frac{R\omega c}{\sqrt{1+R^2\omega^2C^2}}$



ניסוח שאלת מחקר והשערות ל贤וצאות

שאלת המחקר

כיצד נוכל להעביר קטעי קול למרחקים ארוכים ביעילות בעזרת גלים אלקטرومגנטיים?

תכנון המחקר

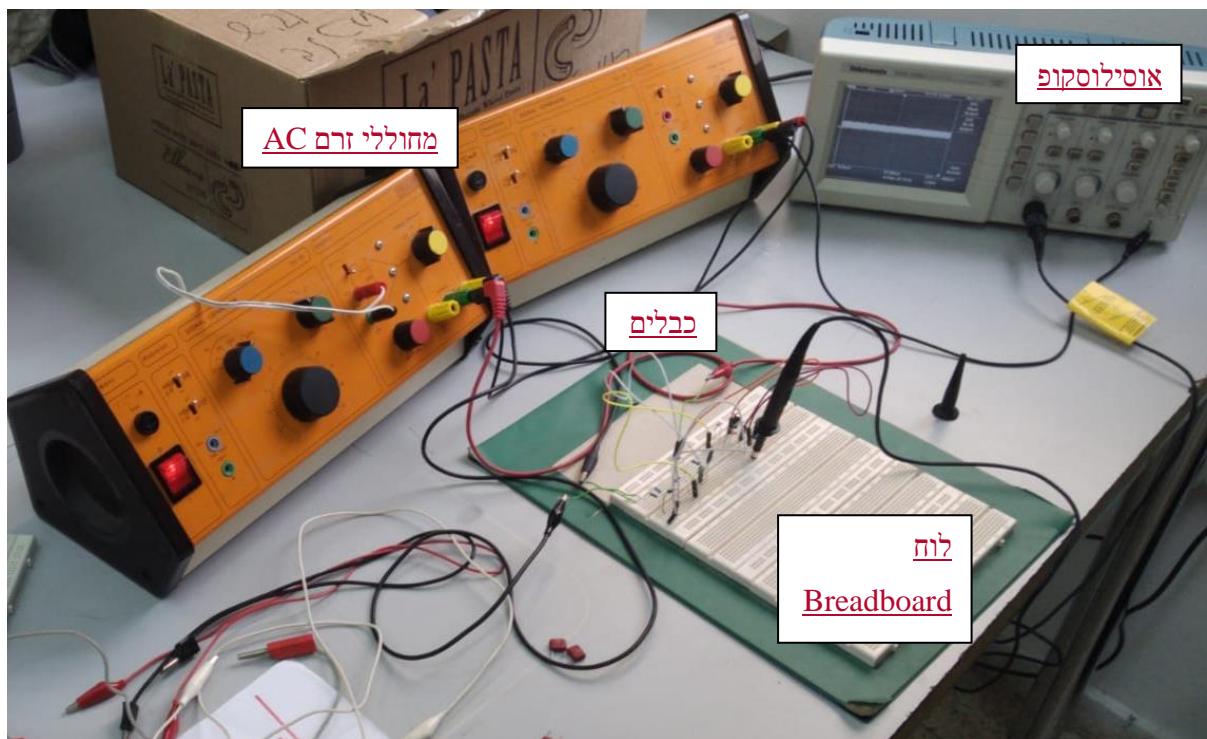
מערכת הניסוי

- שני מholes זרם AC
- אוסילוסקופ עם מהט לבדיקה
- לוח breadboard
- 6 ביסטרויב-וגדים (18, 18, 3, 5, 1, 3)
- 3 קפסטורקבליים (n, 100u, 100u6)
- סליל (m1)
- 3 דיזודות (914N4002, 1N914, 1N1)
- חוטים להיבור בין הרכיבים והמכוללים

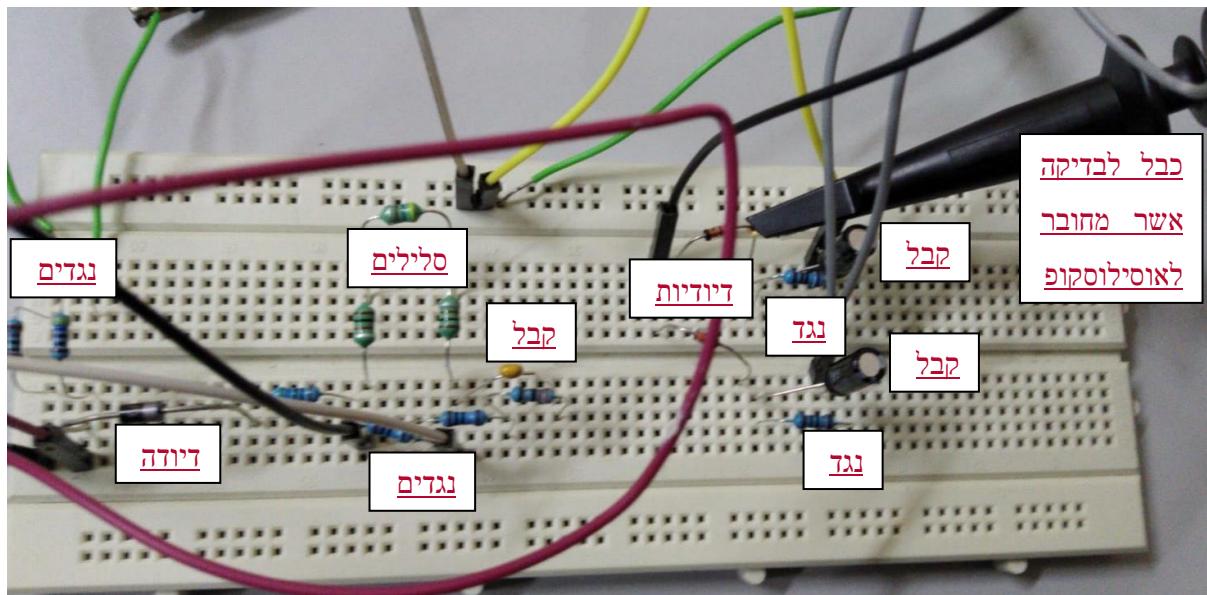
• חוט AUX ל-GND ו-[v]5

• רמקול

תמונה של כל המערכת:

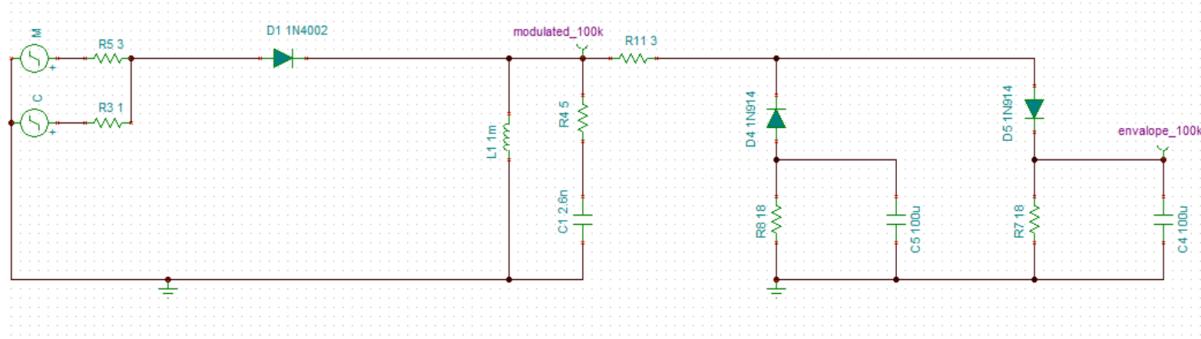


תמונה של המעגל החשמלי מקרוב:

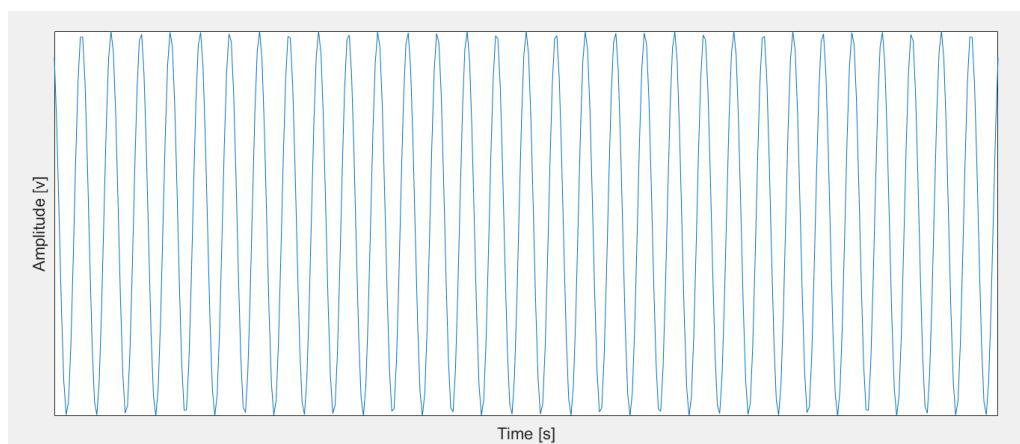


בפועל השתמשנו ביותר סילילים ורציטוררים-נדים כדי להגיע לגודלים הרצוים בחיבור בטror ובמקביל.

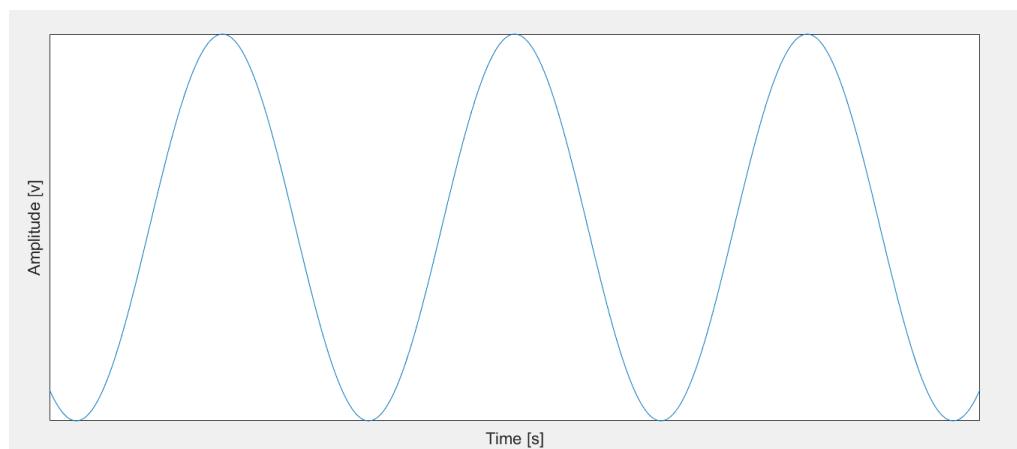
תרשים של המעגל החשמלי:



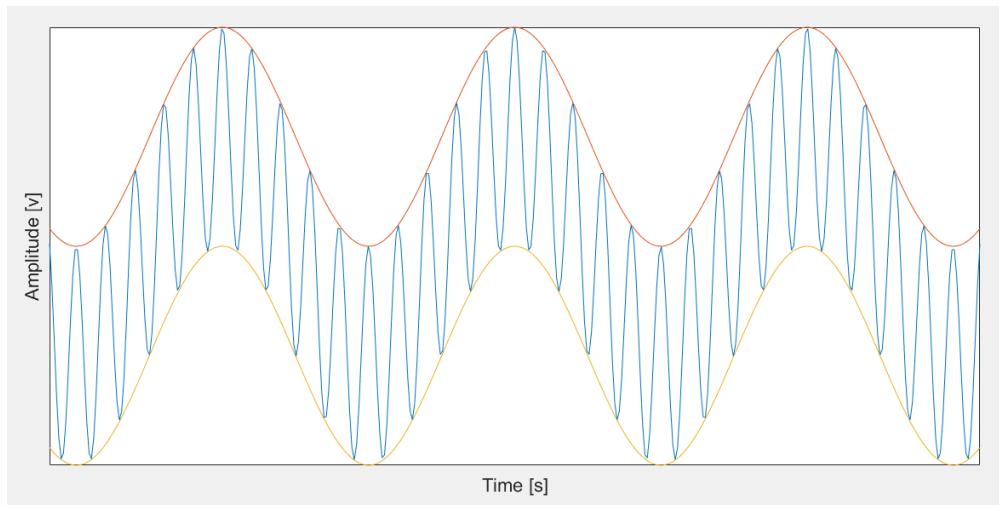
1. מחברים בין שני המחוללים כאשר אחד מתאר את האות הנישא והשני את הגל הנושא. הנושא הוא סינוס בתדרות בה נרצה לשדר את האות. מערכת הניסוי שלנו יכולה לחולל גל נושא בתדרות מקסימלית בת $Hz. 100k$. האות יכול להיות כל פונקציה (לדוגמא שיר) בתדרות הקטנה לפחות פי 2 מהגל הנושא. תיאור ויזואלי להלן. הגל הנושא:



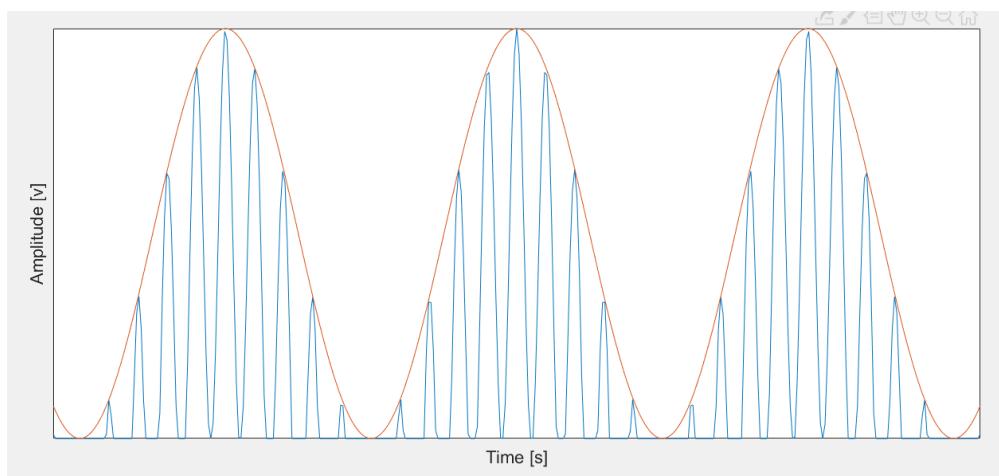
המידע:



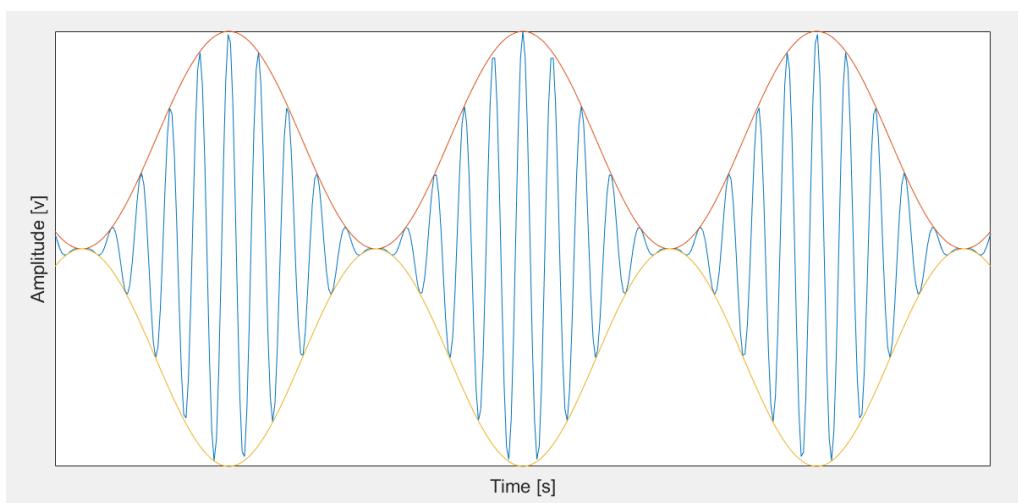
2. לפני הדiode, הזרם נראה כך (חיבור):



3. אותן הוזעuber דרך דיוודה. הדיוודה, כפי שמתואר במשווהה 3



4. לבסוף, מעגל ה-RLC מסנן את כל התדריות למעט התדריות של הגל הנושא. כך, נותרים עם המודולוציה:



5. כעת ניתן לשדר את האות. אנו העברנו את האות המאופן ישירות למעגל המחלין את המעתפה. מעגל ה-RC הוא מסנן תדר גובה כפי שמתואר במשווהה 4. אינטואיטיבית, בכל ירידה של האות, הקפיטור~~קבל~~ משחרר מטען ושמור על האות באותו הגודל כמו בנקודת הקיצון שלפניו. כך אפשר לשחזר את המידע.

6. המידע הנכנס יכול להיות כל סוג של אות אנלוגי. המערכת שלנו חיבורנו יציאת רמקול מהמחשב לכינסה של המערכת במקום אחד מהמכוללים. חיבורנו רמקול ליציאה ממugen הדרוגולציה המעתפה ושםענו את מה שיצא.

בחירת גודל החלקים

הבחירה נעשתה כתהליך של חישוב מהתיאוריה, בדיקה בסימולציה והתאמת למציאות לפי החלקים שיש לנו בפועל. שלבי עבודה:

חישוב תיאורטי:

את הגדים של הרכיבים לקחנו לפי חישובים מהתיאוריה. המלצתה של המעגל היא:

$$C = 100[nF] = 1 * 10^{-7}[F]$$

$$L = 2.47[mH] = 2.47 * 10^{-3}[H]$$

כפי שציינו בחלק התיאורי, אנו בוחנים את התוצאות שלנו למרחב התדריות ולא למרחב הזמן. אנחנו יודעים להגיד כי מרכז תחום התדריות יהיה:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 10.126.\underline{787}[kHz]$$

בשביל לשכלל עוד את המעגל שלנו לצורה שאנו מכירים, נוסיף בפטטור-נגג להלך LC ואת גודל הבריסטור-נגג נחשב על פי bandwidth:

עכשו נחשב את ה-bandwidth שלנו (לפי משואה 5), שאנו יודעים כי הוא יהיה:

$$B = 2000 = \frac{R}{2.47 * 10^{-3}} \rightarrow R = 5[Ohm]$$

נניח שנחלק את הקפיטור~~קבל~~ ב-4:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 10.126.787[kHz] * 2$$

אנו צריכים להיות בסדר גודל 100 אלף מ-20 קלומר נחלק את L ב-5 ונחלק את C ב-5:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 10126.787[Hz] * 2 * 5 \approx 100[kHz]$$

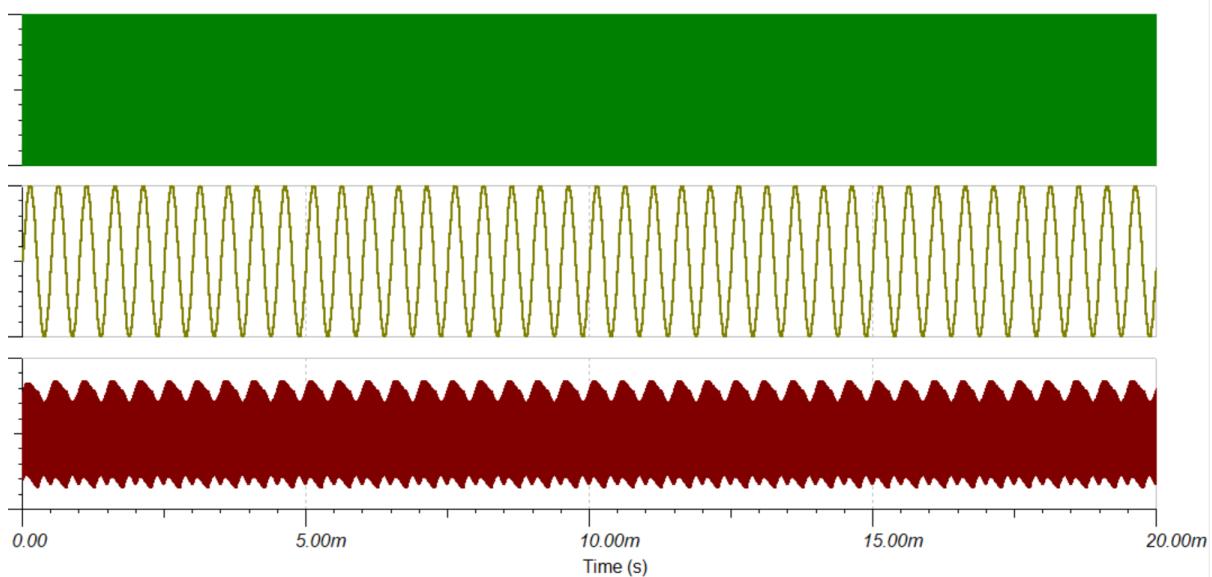
בשביל ליעל את המעגל **המעטה הדמוי לציה** השתמש במשוואת **האפקט עזון** (cutoff):

$$\frac{1}{2\pi RC}$$

נקtin את ההתנגדות משמעותית, הוא $R = 1[kOhm]$ נקטין אותו פי 100, קלומר נגדיל את **הקפסיטור קבל** פי 100: $C = 1[\mu] \rightarrow C = 100[\mu]$

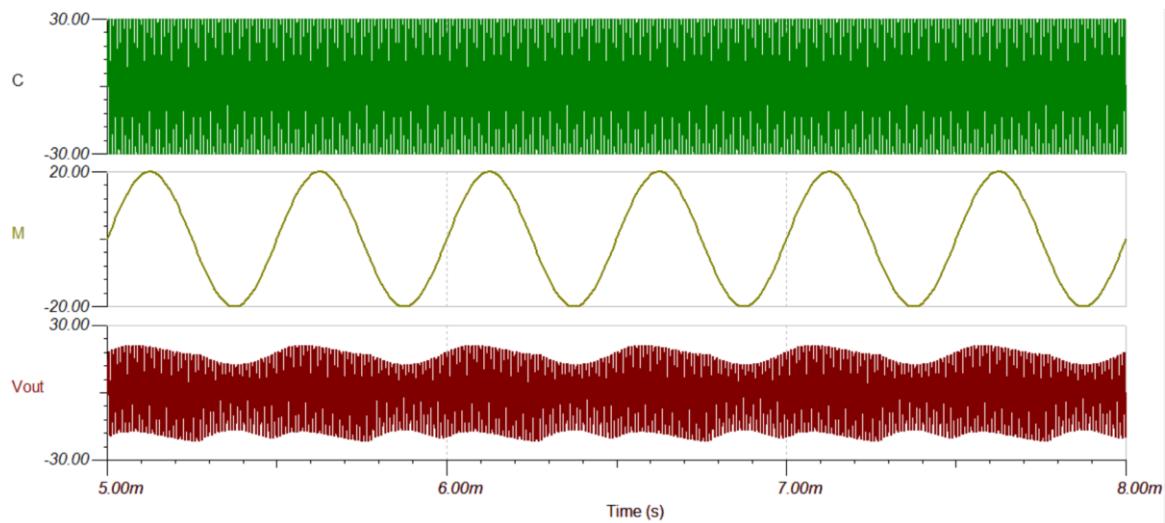
הבנו שהთאורה מתעסקת בהפרש מתחים על הנגד, ולכן הגדלת **הקפסיטור קבל** אשר מחובר אליו תנסה משמעותית. המעגל עבד לנו עד כה בגלל **הקפסיטור קבל** הקטן. בהמשך אולי נבנה מהסר כדי לפטור בעיה זאת, כרגע נתמקד בשינוי הסליל. הרחבה בנספה. מה שקיבלו **בדי-מודולור מעטה** היה קטן מדי, הוא היה בתוקן הרעש של מכשיר המדידה. **האנבלופ מעטה** יצא קטן משמעותית مما שאנו רוצים ולכן נגדיל את המודולציה שלנו על ידי הקטנת **הקפסיטור קבל** והגדלת הסליל כך שנשמר על יחס שווה בגלל אילוץ גודל החלקים שיש לנו.

בדיקות בסימולציה. הגרף החדש יראה כך:



הגרף הכהול הוא הנושא, הוא סינוס צפוף מאוד ביחס לנישא. הסגול הוא הנישא. האדום מסמל את האות לאחר **המודולציה איפנו**. החום מסמל את **האנבלופ מעטה**.

יותר מקרוב:



ניתן לראות כי המודולציה לא עובדת. נחזיר למוגל מה 2.2 שבו עבده המודולציה אבל הנשא היה קטן מדי משמעותית.

נחשב תיאורטיות שוב:

נקטין את הסליל כדי שיתאים ל 100 קילו הרץ.

כלומר:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 10.126.787[\text{kHz}]$$

נקטין אותו פי 100.

בדיקה בסימולציה:

שיהקנו עם ערכי הסליל בלי קשר לתדריות הרצואה קיבלנו ערך שעובד טוב שהוא $L = 26[\mu\text{H}]$, נבדוק לאיזו תדריות הוא משתיך:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L * 10^{-7}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{26 * 10^{-6} * 10^{-7}}} = 98.703.706[\text{kHz}]$$

ערך זה מאוד קרוב ל 100 [kHz] אך הוא לא לגמרי. הערך שדרוש ל 100 [kHz] עובד משמעותית פחות טוב. אפשר להסביר את ההבדל בין התיאוריה למציאות בכך שאין לנו יכולת למדוד על הנגד אלא רק על הנגד עם הקפסיטז'וקבל.

המשך חישוב תיאורטיות אוריינטלי:

נחשב את הערכים לדיבודולטור מעטה:

$$\frac{1}{2\pi RC} = f \rightarrow R = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$R = \frac{1}{2\pi * 10^{-7} * 100,000} = 15.92 \approx 16[\Omega]$$

מעגל מודולצייה איפנון bandwidth 100 :bandwidth

$$\frac{R}{L} = \frac{5}{25.33 * 10^{-6}} = 197.394.4[kHz]$$

ונסה להביא את זה ליחס פער מתחאים, אם אנו מגדיל את נושא את הסליל פי משהו-בפקטור, צריך להקטין את הקפיטישוב קובל באותו מידת.

כלומר:

$$\frac{10^{-3}}{25.33 * 10^{-6}} = \frac{1}{25.33 * 10^{-3}} = \frac{10^3}{25.33} = 39.4789$$

כלומר הקפיטישוב קובל שלנו הוא:

$$C = \frac{10^{-7}}{39.4789} = 2.533 * 10^{-9} = 2.533[nF]$$

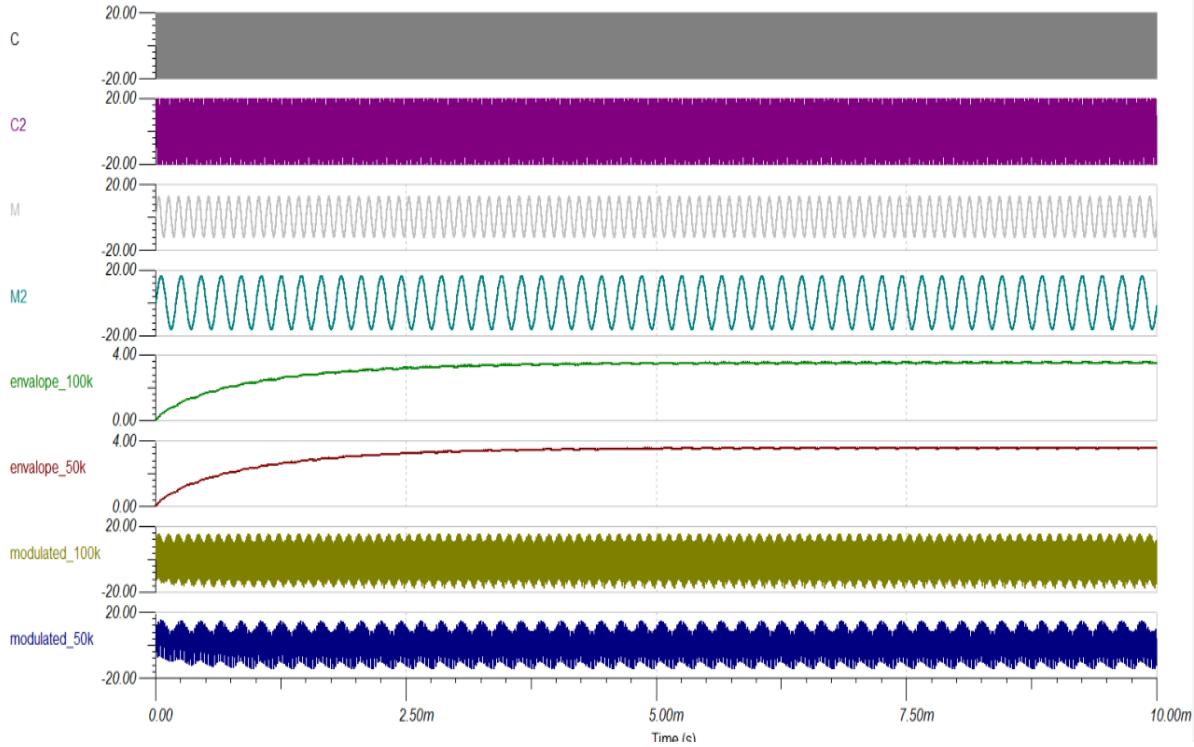
ואז הערכים במעגל הראשון הם:

$$L = 1[mH], C = 2.533[nF], R = 5[\Omega]$$

bandwidth:

$$\frac{5}{1 * 10^{-3}} = 5[kHz]$$

בדיקה בסימולציה:



הಗלים הפיזיקליים הנמדדים וכייצד הם נמדדים

אנו מודדים את המתח היוצא מעגל RC באמצעות האוסilosקופ. אפנון אמפליטודה אמר לhetbuz בתדריות גבוחות של מאות או אלפי מגה הרץ אך המcoliים שלנו מגיעים עד 110[kHz]. נוסף לכך, המcoliים מגיעים עד 6[V] ובגיל ההתנגדות של המעגל וابוד המידע מהדיודות, המתח היוצא מגיע ל0.5[V] בסוף **הdimodolzishiahifnu**.

תוצאות

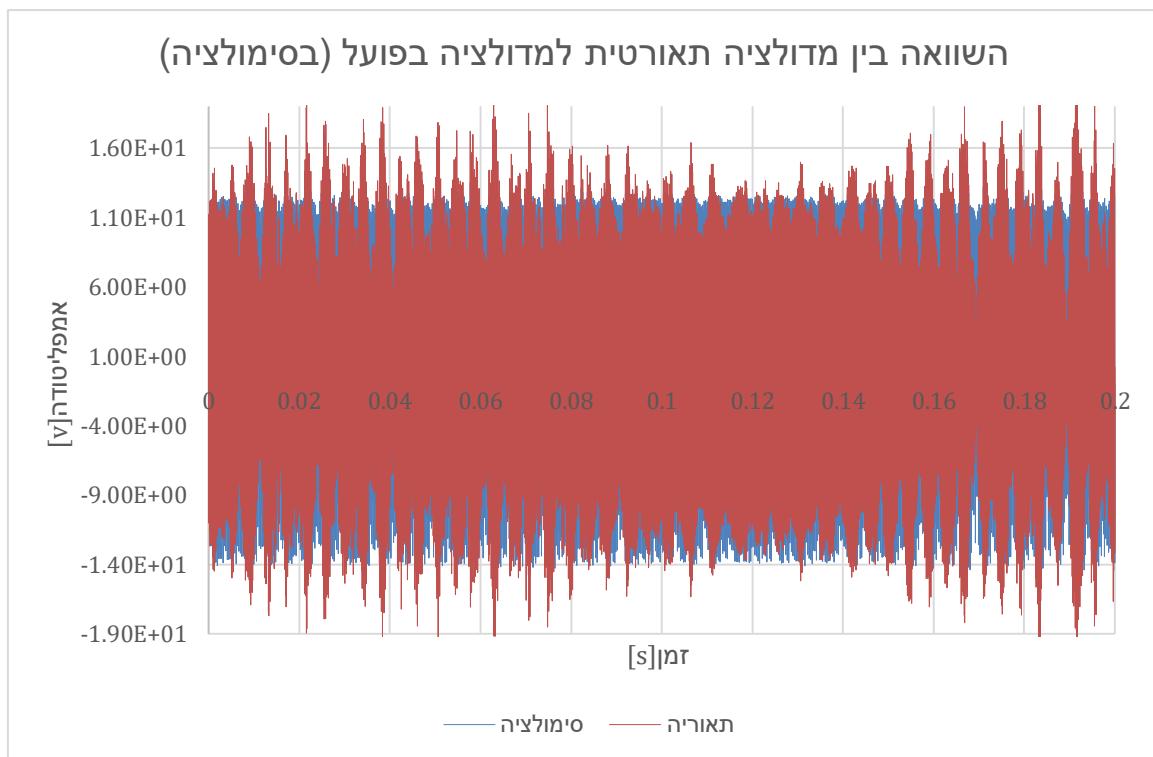
ניתוח נתונים באקסל והשוואות דיווק:

בשביל לבחון את המעגל שלנו הכנסנו אליו מقطع מהשיר "מתנות קטנות" על ידי האמן הישראלי רמי קלינינשטיין. לאחר מכן הוציאנו את הגלים שהתקבלו לנוקודות באקסל, תחילת השיר עצמו, לאחר מכן שלו לאחר **הmodolzishiahifnu** ולבסוף של השיר לאחר גמ הדימודציה. הנוקודות לא היו באותה מערכת זמן מה שהייב אותן לנו נרמל את שלושת מערכות הנוקודות לאותה מערכת זמן, בשביל זה השתמש באלגוריתם מעבר לאותה מערכת זמן (נספח עיבוד נתונים). אחרי האלגוריתם קיבלנו את כל הפונקציות שלנו מנורמלות לזמן הרצוי.

הבדיקה הראשונה שרצינו לבצע היא בין **הmodolzishiahifnu** לפי התאוריה ל**הmodolzishiahifnu** בפועל. אז הרצנו את המודל התאורטי כאשר התדריות היא 100 kHz כמו הנשא שלנו, והאמפליטודה אשר מושפעת מעיבוד האנרגיה תהיה משתנה שהחלה את ערכו ל-1. לאחר מכן עשינו סכום המרחקים בין המודל התאורטי

למודולציה איפנו בפועל בכל נקודת זמן וסכמו. השתמשנו בסולבר באקסל כדי לשחק עם האמפליטודה של התאורה כך שההפרש בין הפונקציות יהיה מינימלי ונקלט את הפונקציה התאורטית שקרובה ביותר לפונקציה בפועל.

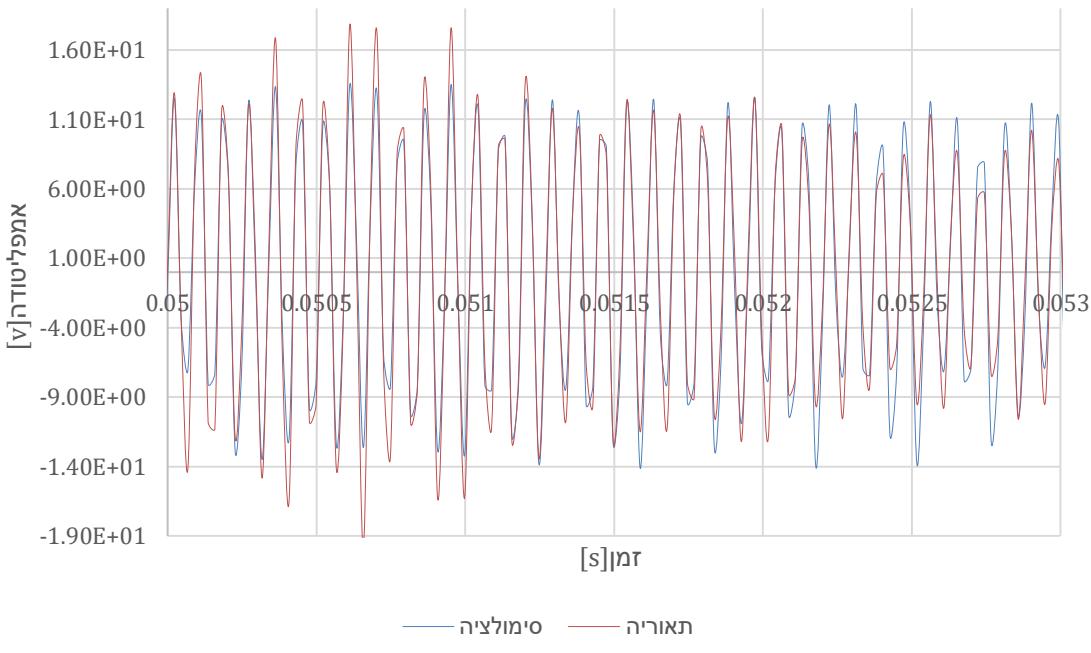
גרף המודולציה איפנו התאורטית (1) כנגד המודולציה בסימולציה:



ראש ניתן לראות שגיאת מסויימת פונקציונלית, שבאה לידי ביטוי ברגישות יותר גבוהה לאינפוט של התאורה, חזק מזה נראה כאילו שתי הפונקציות יושבות על אותה תדיות ובקרוב נעות על אותם ערכיהם.

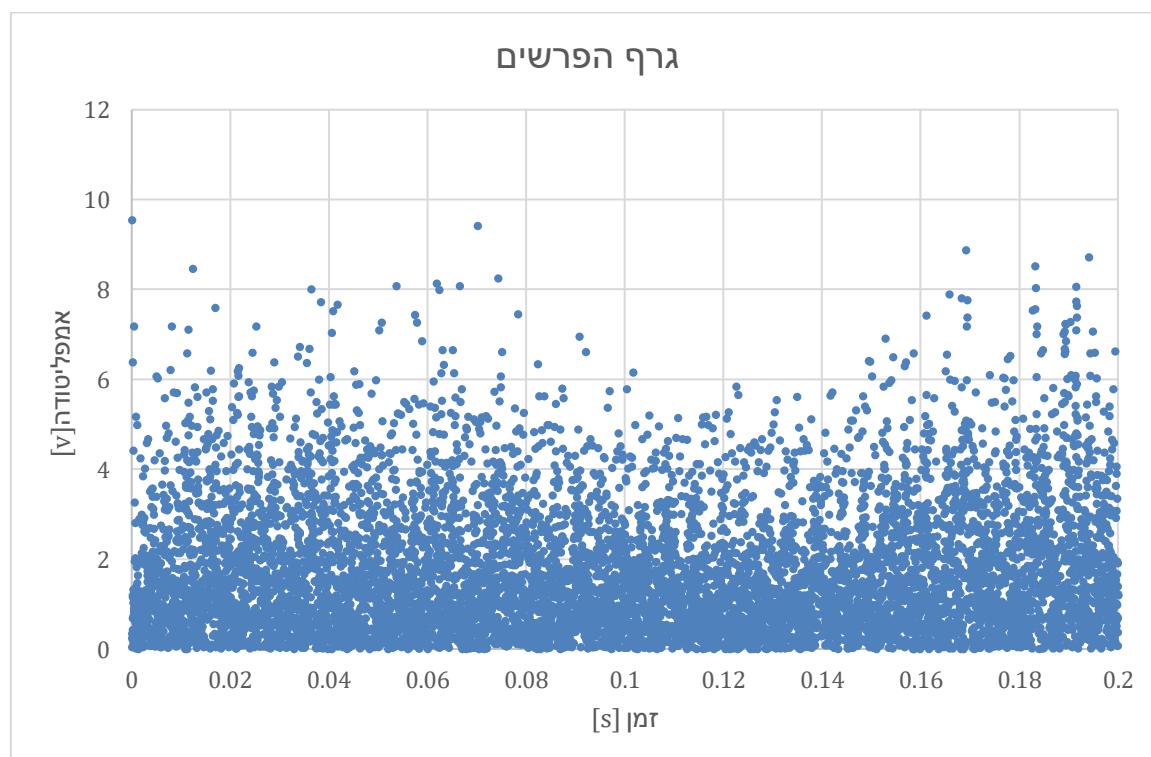
נבחן יותר מקרוב:

השוואה בין מודולציה תאורטית למודולציה בפועל (בסימולציה)



רואים יפה כיצד הנו יושבות על אותה תדריות כאשר לפעם התאוריה מגיבה יותר בקייזוניות ולפעמים הסימולציה, אך שתי הפונקציות קרובות מאוד.

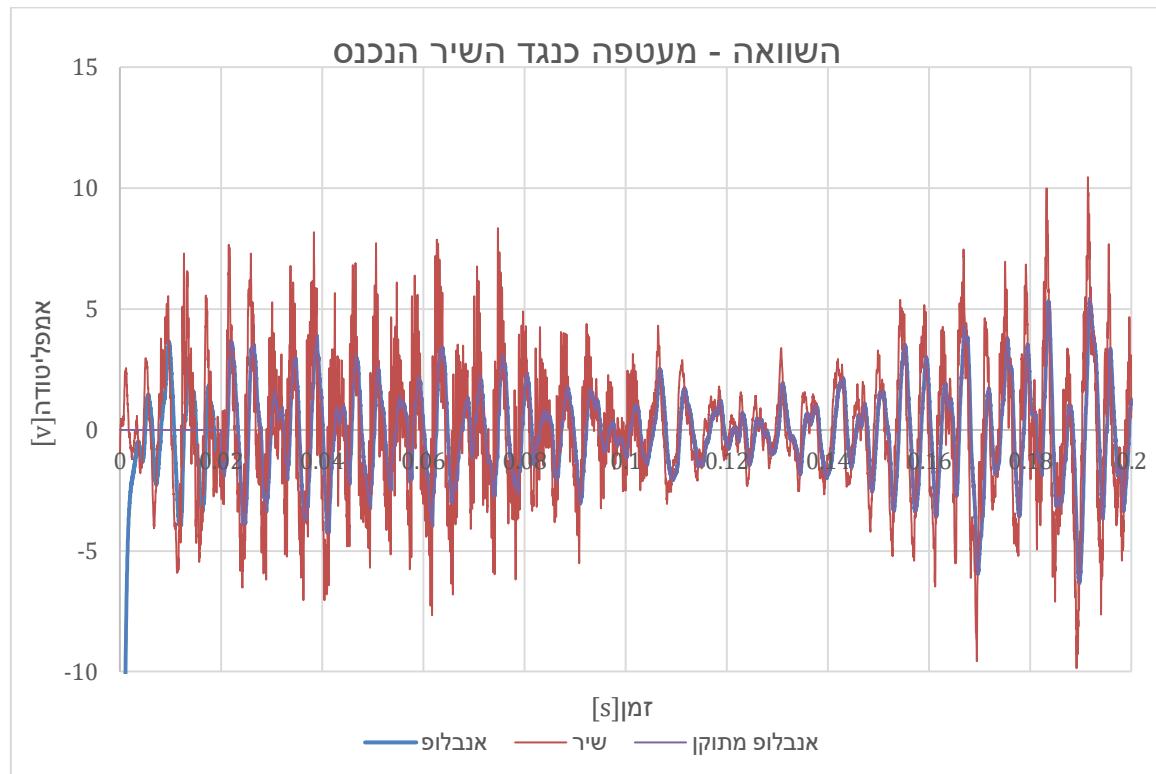
נבחן את גրף הפרשיים:



הפייזור בגרף ההפרשים לא נראה פונקציונלי, ניתן לראות צפיפות גבולה יותר של ערכיהם בשגיאות נמוכות, מה שסביר, אם כי יש שאלה למה בתחום הזמן [0.08, 0.16] הшибיאות בין התאזרה לבון הטימולציה פחות משמעותיות.

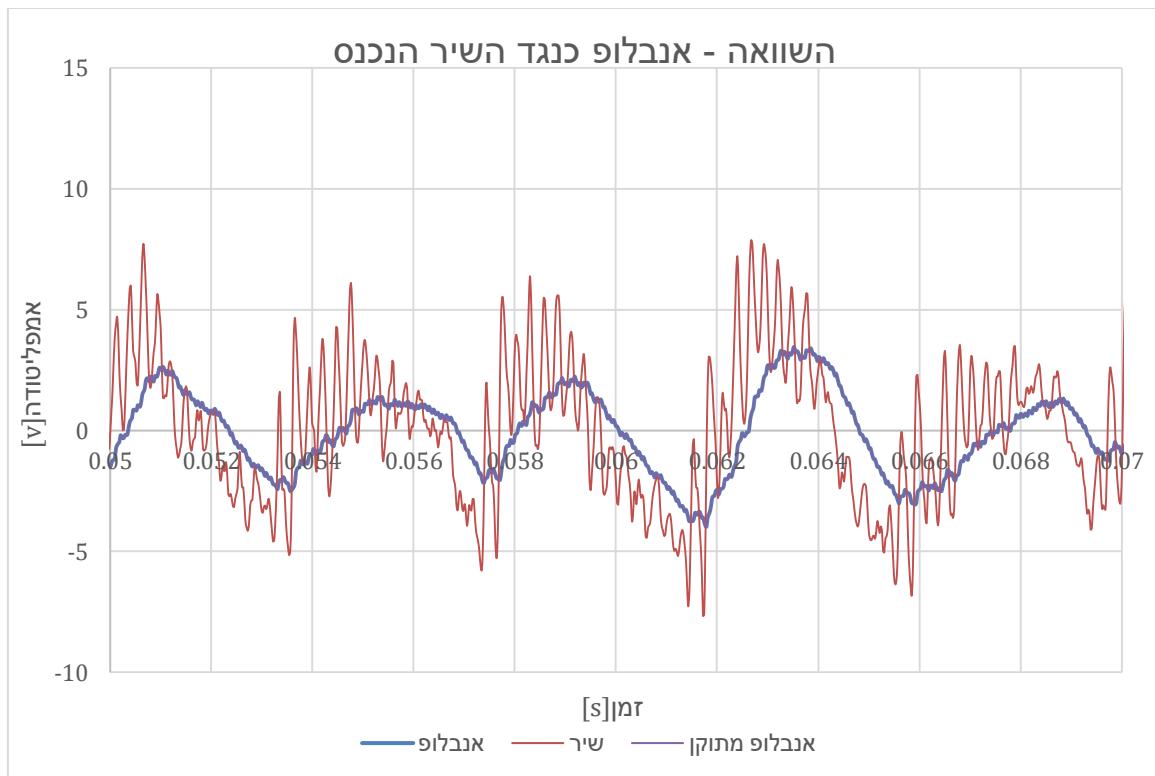
נבעצ את אותו התהליך על **האנבלופמעטפה** רק עם מספר משלחים. נשווה אותו לתדר הנכנס, השתמש בסולבר ובפרק זמן קצר כדי להגיע להתאמה (התיאור המפורט של התהליך נמצא בנספח עיבוד נתונים).

נבחן את גраф **האנבלופמעטפה** כנגד האינפורט:

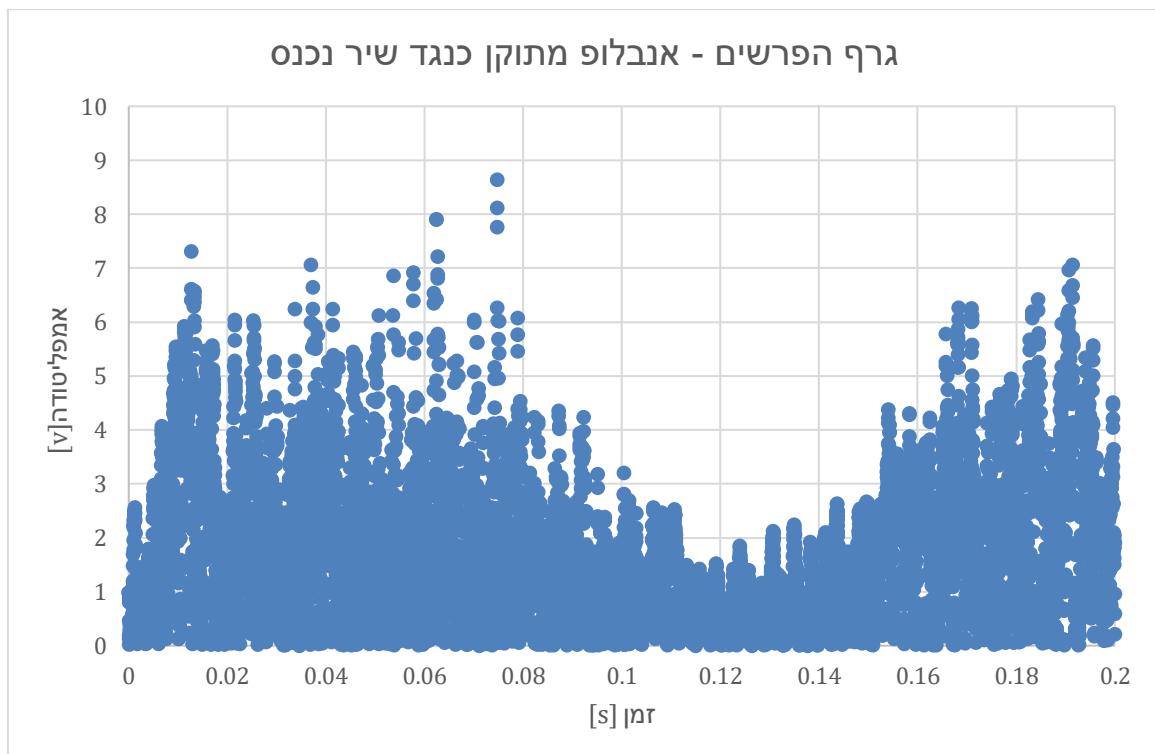


ניתן לראות כי **האנבלופמעטפה** מגיב בפחות רגישות למוזיקה, כמצופה, אך התדריות שלו ונקודות הקיצון שלו ממוקומות באותו מקום. ניתן לראות הבדל בתיקון רק בתחום הגרף, לאחר נקודת מסויימת, בערך ב-0.02. בתמונה הבאה, לא ניתן לראות הבדל בתיקון כי הוא משפיע רק על התחלה.

מקרוב:



נבחן את גרפ' הפרשיים, מה שמאפשר לנו לבדוק האם השגיאה הסטטיסטית מהמוקור היא פונקציונאלית או לא:

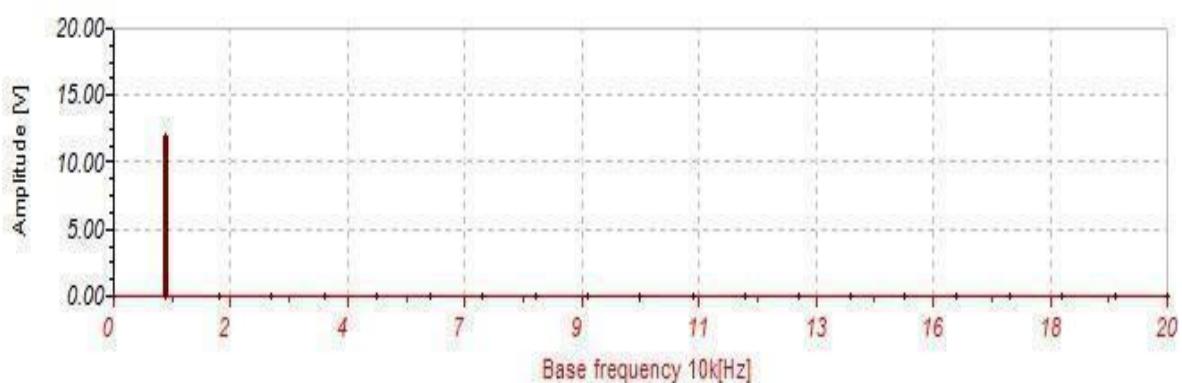


השגיאה פה נראהות פונקציונאלית, ובאותו התהום שגרף הפרשי המודולציה נראה מוזר גם כן הוא נראה מוזר.
נבחן את נקודת הקיצון, מעט לפני 0.8 יש מספר שגיאות קיצניות, ניתן לראות בגרף האנבלופ כי באותה

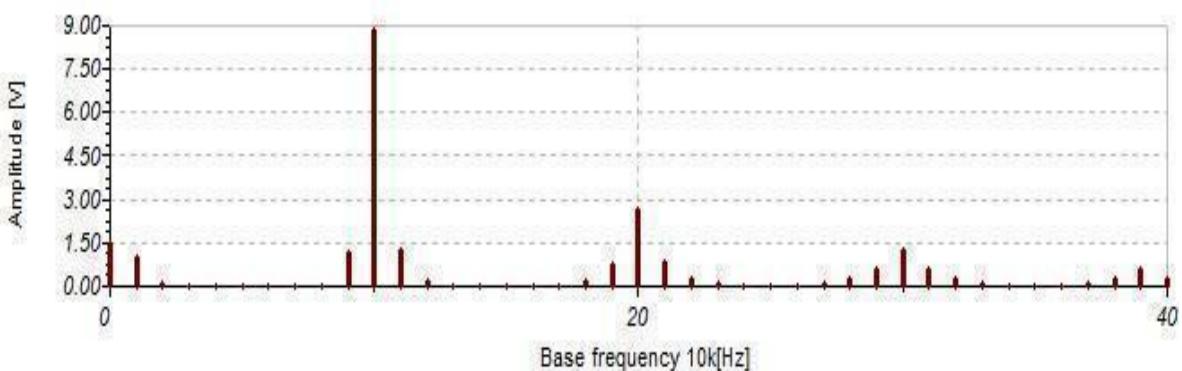
הנקודות אמפליטודת השיר נعيشית גדולה מאוד, ובעוד, האנבלופ מעודן אותה, ככלומר ברור שההפרש שם יהיה הגדול ביותר.

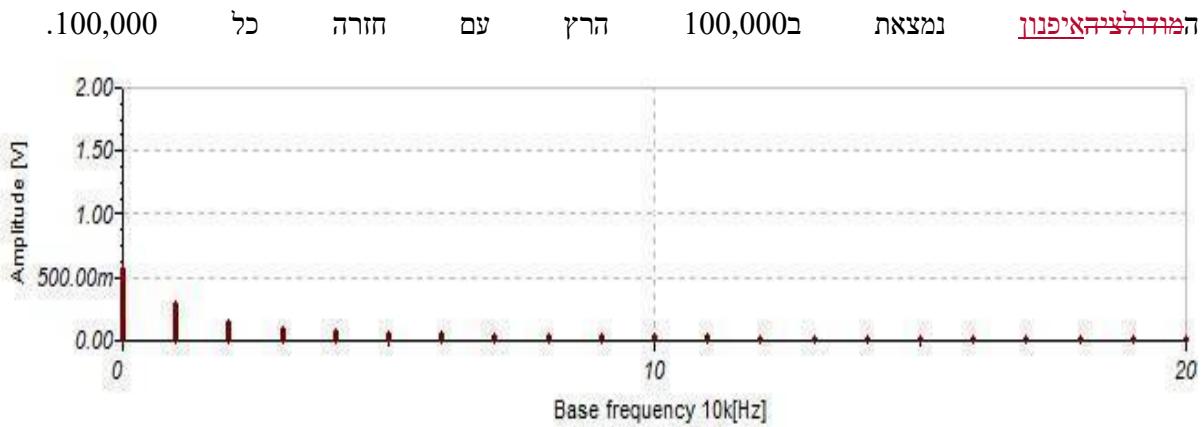
ניתוחו מרחיב התדריות [אנגליזט פורייה]:

אנגליזט פורייה היא אנליזה שעושם על מידע מהזרי כדי לראות את כל התדריות של המידע. לדוגמה, אם יש חיבור סינוסים נזהה פיקרים בתדרים של הסינוסים ובהרמוניות שלהם. ביצענו את האנליזה פורייה לסימולציה של המערכת כאשר הכנסנו שיר Cainput. ביצענו את האנליזה על המידע של השיר, המידע שעבר **מודולצייה אינפונן** ועל המידע שהתקבל אחרי ההחזרה. אנו רוצים לגלות אם התדריות של המידע השתנהו. בהתאם:



אנו רואים שהשיר נמצא באיזור התדריות של 10,000 הרץ.





אנו רואים שהתדרות של השיר בסוף המערכת יותר נמוך מהשיר לפני [המודולציה איפנו](#). אפשר לראות זאת גם בסימולציה של [האנבלופם עטפה בעמוד 28](#).

مسקנות דיוון ורפלקציה

השוואות בין התיאוריה והסימולציה

בעזרת התוצאות שקיבלנו בניתו פוריה ניתן לראות כי תדריות המידע לאחר המודולציה גבוהה בהרבה מהתדריות הראשונית שלו, והיא תדריות הנשא. כפי שהסבירנו בחלק התאורטי, זאת הייתה המטרה שלשמה מביצים את המודולציה. העלאת התדריות מאפשרת העלאת כמות האנרגיה שעלייה משודר המידע, ובכך בעצם להגדיל את דיקוק השידור ולשדר לטוח יותר רחוק. על ידי שינוי התדריות מתאפשר לנו לשדר במספר תדריות במקביל (מולטיפלקסינג) ולהזור חזרה לכל המידע המקורי, זה מאפשר שידור של הרבה מידע במקביל. בכך בעצם מצאנו פתרון לשאלת מחקר שלנו.

אנליזת פוריה

בניתו של אנליזת פוריה אנו רואים כי **המודולציה איפנו** מתחכמת לפני התיאוריה. המידע מתחילה בתדריות קטנה מסוימת. לאחר **המודולציה איפנו**, המידע עובר לתדריות של הנשא. לבסוף, התדריות חוזרת למאה שהיא הייתה לפני **המודולציה איפנו**. התדריות של המידע לאחר **המודולציה איפנו** חוזרת על עצמה בכפולות שלמות של 100,000. זה הגיוני בגלל שגם סינוס בתדריות נזאת, יהיה גם בתדריות שהזרת עליה בכפולות שלמות. בסוף המערכת, המידע נמצא בתדריות הרבה יותר נמוכה, מה שמראה על כך שהמידע נהייה חלק יותר ועם פחות פרטים לגבי **בגלל התנודות הקטנות של השיר שהמעטה מחלוקת**.

ניסוי פיזי של המערכת

לפני סגירת בית הספר, עשינו ניסוי של **מודולציה דו-מודולציה ומעטה** של שיר. חיברנו רמקול **לדימודולטור מעטה** ושםענו את מה שיצא. השיר היה נשמע כמעט ללא עיוות, לא משחו שאפשר להבחין באוזן. השיר התנגן מאוד חלש בغالל איבוד האנרגיה במערכת שלנו.

הרחבות של המערכת

1. מולטיפלקסינג - מולטיפלקסינג היא דרך לשלב כמה שירים שונים בתדרים שונים ולשדר את כל המידע ביחד. כאשר קולטים את הגל האלקטרומגנטי, אפשר להפריד בין השירים על ידי כך שימושים ב**מעטפת דימודולטורית** שמכונים לздרים שונים. ראה הרחבה בנספה.
2. subtractor - מעגל חשמלי שמאפשר להחסיר שני זרמים אחד מהשני. מעגל זה יכול לעזור למערכת על ידי כך שהוא יתנו לנו למדוד את הפרש המתדים על **הברוטטור-הנגד** ביחס **לאלקטלהדמה**. כך, במקום להשתמש בהנחה שהוא מספיק קרוב לארקה, נוכל להגיע לתוצאות מדויקות יותר.
3. שדר רדיו - הרחבה נוספת יכולה להיות לבנות מעגל שידור של **המודולציה איפנו** ומעגל קולט שיקלוט את **המודולציה איפנו**. כך נוכל למדוד את מרחק השידור האפקטיבי ואת רמת איבוד המידע והאנרגיה.

.4. מעגל מעלה תדרות - כפי שאמרנו, מכוללי הזרם שהשתמשנו בהם מגיעים עד 110,000 [Hz]. במציאות, מודול ציה איפנו ושידור קורים בתדרים של מאות ואלפי מגה הרץ. הכוונה כאן לבנות מעגל אשר מוציא סינוס בתדרות יותר קרובה למציאות כדי שנוכל לבדוק את המערכת שלנו בתדריות גבוההות.

.5. Amplifier - התוצר של המעגל שלנו נמצא נושא בטוחה של 1 [V]. זה לא מספיק כדי לנגן את המידע ברמקול. Amplifier הוא מעגל חשמלי שմגביר את המתח כך שהتוצר יהיה יותר אנרגטי.

שיעורים שלמדנו מהפרויקט

במהלך העבודה על הפרויקט נתקלנו במספר קשיים שההתגברות עליהם למדת אותנו כיצד לעבוד יותר טוב בכלל על פרויקטים וכיוצא להיות פזקים טובים יותר בפרט.

הkowski הראשון שנתקלנו בו היה מציאת מעגל עובד, חישנו ובנו מספר מעגלים אשר לא עבדו, אחד אחרי השני. ברגע ההוא הבנו שאנחנו צריכים לחת את העניינים לידיים, בחרנו את המעגל הטוב ביותר ותיקנו אותו לפי התאוריה. זה היה השיעור הראשון שלמדנו, ניתן לחת כליא לא עובד ולתקן אותו לצרכים שלנו, בעזרה ידוע שצברנו.

הבעיה השנייה שנתקלנו בה הייתה קיום המודל התאורטי במציאות. היא בא בשני היבטים, חוסר רכיבים מתאימים ומודל תאורטי בעיתי למימוש. בשביל לפתרור את היבט הראשון שלה שיחקנו עם יחס הרכיבים בהתאם לתאוריה, פתרון דומה לזה של הבעיה הראשונה.

היבט השני היה שבשביל לקבל מעגל מדויק נכנן היה אלינו למדוד את המתח על הנגד, ככלומר למדוד את הזרם לפני ואחריו, וזה היה בעיתי, בשביל זה היינו צריכים לבנות מעגל חדש לגמר. החלטנו להחזיק את הרעיון של לבנות מעגל חדש, מעגל מחסיר, בצד, והתמקדנו בلتיקן את המעגל לפי התאוריה כדי להפחית עד כמה שניתן את השפעות ההבדל הזה בין המציאות לתאוריה. בעצם לממנו כי לעיתים בכורה הנسبות אי אפשר להגיע לפתרון האידיאלי אלא צריך לתקן את הדברים במציאות בשביל להגעה כמה שיותר קרוב לאותו אידיאל.

אחרי שהמעגל כבר עבר נחישנו לבעה השלישית שלנו – התדר היוצא הבעל אמפליטודה חילשה מדי. במהלך המעלג איבדנו המון אנרגיה. שוב שבנו אל התאוריה בניסיון לראות כיצד ניתן לפתרור את בעיה זו, רצינו להקטין את ההתנגדות של כל המעגלים, המודולטור מאפנן והדי-מודולטור מעתפה כדי להפחית את האיבוד האנרגטי. ככלומר פתרנו בצורה דומה לביעות הקודמות, בנוסף חשבנו ושוב שמרנו בצד על הרעיון של לבנות מעגל אמפליפיר שיגביר את האמפליטודה של התדר היוצא.

ניתן לראות בקשר הבעיה שהוצגו כאן את השיעורים החשובים שלמדנו, בהםם הכוח שיש בידע תאורטי, לא לפחות לחת את הדברים בידיים ולנסות לפתרור את הבעיה בעצמך ואת ההבנה החשובה שלא תמיד ניתן להגיע לאידיאל, אבל שווה לנסות להגעה לכך קרוב.

ביבליוגרפיה

1. השתמשנו בערכי הוויקיפדיה הבאים: אפנון מושעתה, דיוודה, הספק חשמלי, מוליכות חשמלית, מעגל, מתח חשמלי, נגד, סליל השראה, עכבה חשמלית, קבל, תדר ניקווייסט, אנטנה, RLC.
2. Wells, Christopher J. "Amplitude Modulation and Demodulation." Amplitude Modulation, January 28, 2009.
<http://www.technologyuk.net/telecommunications/telecom-principles/amplitude-modulation.shtml>.

נספחים

נספח תאורטី:

מושגי יסוד:

זרם [אמפר: A] – תנועת אלקטرونים במעגל, שנעים לפי הר הפוטנציאלי. האלקטרונים נעים מהקווטב השילילי לחוובי במעגל. ניתן לבטא את הזרם ככמות המטענים ליחידה זמן.

זרם ישיר – זרם שנשמר בו כיוון התנועה של האלקטרונים, לדוגמא מעגל עם סוללה ונורה, שבו תמיד האלקטרונים ינועו מהקווטב השילילי לחוובי שמייקומם קבוע.

זרם חילופין – זרם שבו הקוטב השילילי והחוובי של המעגל יכולים להתחperf, כלומר כיוון תנועת האלקטרונים במעגל יכול להשתנות. דוגמא לזה היא הזרם היוצא משקעים אשר מתחperf בתדריות קבועה.

מתה [וואולט: V] – הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות שנמדד בהם המתה.

פוטנציאל חשמלי [ג'אול: J] – האנרגיה האצורה בשדה החשמלי. נובעת מכוח לורנץ הפועל על המטענים.

כוח לורנץ – הכוח הפועל על מטען חשמלי כתוצאה של השדה החשמלי והאננטי.

התנגדות [אוּם: Ω] – מידת היכולת של מטען חשמלי לעבור באותו הגוף.

חוק אוּם – היחס בין המתה לזרם בין שתי נקודות הוא התנגדות בין שתי הנקודות הללו,

$$R = \frac{V}{I} = const.$$

עכבה – התנגדות חשמלית כוללת. הגדרת עכבה על רכיב: $Z = \frac{V}{I}$

עכבה של רכיב היא קבוע בזמן – בדומה להતנגדות, מדובר בהכללה מסוימת של חוק אוּם.

עכבה משתנה על פי התדריות ולא לפי הזמן, ולכן תהיה קבוע כאשר התדריות תהיה קבועה.

מספר עכבות שימושיות:

$$Z_{capcitor} = -\frac{i}{\omega C}, Z_{resistor} = R, Z_{inductor} = i\omega L$$

חישוב משוואת המתה כנגד הזמן של אפנון המשרעת: משוואת איפנון משרעת:

דרישות אפנון משרעת הן: התדריות היוצאת היא תדריות הגל הנושא והמידע מוכל במעטפת דרך השינוי במשרעת. נסמן את המשרעת ב- A' . האות המואפנן יהיה מהצורה:

$$y(t) = A' \sin \omega_c t = (A_c + m(t)) \sin \omega_c t = (A_c + A_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t$$

המעבר ($A' = A_c + m(t)$) נובע מהדרישה שגודל המשרעת ישנה כפונקציה של הגל הנושא והגל הנישא. מכיוון ש- A_c קבוע, המעטפת תבטא את האות הנישא. קיבלנו:

$$y(t) = A_c \sin \omega_c t + A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t$$

כזכור שהחלק היחיד שמעניין אותנו, כי רק שם יושב המידע הנכensus הוא:

$$A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t$$

נחזיר לפונקציה:

3 Equation

$$\begin{aligned} \text{Equation 3: } y(t) &= (A_c + A_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t = \left(1 + \frac{A_m}{A_c} \sin \omega_m t\right) A_c \sin \omega_c t \\ &= \left(1 + \frac{A_m}{A_c} \sin \omega_m t\right) c(t) \\ &\text{אינדקס האפנון הוא אנדרט את אינדקס האפנון כ: } \mu = \frac{A_m}{A_c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(t) &= A_c \sin \omega_c t + A_c \mu \sin \omega_m t \sin \omega_c t = \\ &A_c \sin \omega_c t + \frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \end{aligned}$$

הישוב הפונקציה לאחר הדיווחה:

נפתח את הפונקציה לפי טור פורייה:

$$g_p(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos((2n-1)\omega_c t)$$

מעניין אותנו רק הקירוב הראשון, כלומר האיבר הראשון בתור. נקבל:

$$g_p(t) = 0.5 + \frac{2}{\pi} * \cos(\omega_c t)$$

4 Equation

$$\text{Equation 4: } v_2(t) = 0.5 v_1(t) + \frac{2}{\pi} * \cos(\omega_c t) v_1(t)$$

תת נספח חישובי :RC

בשביל ליחס את המאפיינים שאנו רוצים השתמש בעכבות,

נתחיל בחישוב הפאזה והAMPLITUDE על הקסיטטורקבול:

$$\frac{V_C}{V_0} = \frac{1}{i\omega CR + 1} = \frac{i\omega CR - 1}{-\omega^2 C^2 R^2 - 1} = \frac{(1 - i\omega CR)}{1 + \omega^2 C^2 R^2} = \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2},$$

$$phase = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega CR}{1 + \omega^2 C^2 R^2}}{\frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \right) = \tan^{-1}(\omega CR)$$

$$\begin{aligned} Amp &= \sqrt{\left(\frac{\omega CR}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \right)^2} = \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1}} \end{aligned}$$

עכשו ניחס את הפאזה והAMPLITUDE על הנגד:

$$\begin{aligned} \frac{V_C}{V_0} &= \frac{R}{R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{iR\omega C}{1 + Ri\omega C} = -\frac{R\omega C}{i - R\omega C} = -\frac{(-R\omega C - i)R\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2} \\ &= \frac{R^2\omega^2 C^2 + iR\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2} = \frac{R^2\omega^2 C^2}{1 + R^2\omega^2 C^2} + i \left(\frac{R\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2} \right) \\ phase &= \varphi = \tan^{-1} \frac{\frac{R\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2}}{\frac{R^2\omega^2 C^2}{1 + R^2\omega^2 C^2}} = \tan^{-1} \frac{1}{R\omega C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} amplitude &= ||Z|| = \sqrt{\left(\frac{R\omega C}{1 + R^2\omega^2 C^2} \right)^2 + \left(\frac{R^2\omega^2 C^2}{1 + R^2\omega^2 C^2} \right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + R^2\omega^2 C^2} \sqrt{R^2\omega^2 C^2 + R^4\omega^4 C^4} \\ &= \frac{R\omega c}{1 + R^2\omega^2 C^2} \sqrt{1 + R^2\omega^2 C^2} = \frac{R\omega c}{\sqrt{1 + R^2\omega^2 C^2}} \\ amplitude &= \frac{R\omega c}{\sqrt{1 + R^2\omega^2 C^2}} \quad ■ \end{aligned}$$

$$, phase = \tan^{-1} \frac{1}{R\omega C}$$

הספק:

הספק השמלי של מעגל השמלי הוא כמות האנרגיה החשמלית ליחידת זמן הנכנת אליו והופכת בו לאנרגיות אחרות. הספק הרגעי מוגדר כנגזרת האנרגיה החשמלית בזמן: $P = \frac{dE}{dt} = I(t) * V(t)$. ניתן גם לרשום את $P_{avg} = \frac{V_0^2}{2R}$. אשר המתח חילופין הוא סינוסי: $P_{avg} = \frac{(V_{RMS})^2}{R}$. הספק הממוצע כתלות במתח ה-RMS

הספק האיפנו

מספר הגדרות עוזר:

• ממוצע שורש ממוצע ריבועים [RMS] – הגדרה של הממוצע מעל פונקציה מהזורה בטוחה בין מינוס

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt}$$

איןסוף לאינסוף הוא:

○ ממוצע RMS מקביל להספק.

○ ממוצע RMS של פונקציה מהזורה הבאה: $\frac{a}{\sqrt{2}} \sin(2\pi ft)$ זהו

▪ מכך נובע כי

• חלק תחתון של הפס - החלק $\frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t$ ב-

• חלק עליון של הפס – החלק $\frac{A_c \mu}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t$ ב-

כאשר ש: עדין הנשא [C] שלו.

אנחנו יודעים להגיד כי:

$$P_c = \frac{A_c^2}{2}, P_{USB} = \frac{A_m^2}{8}, P_{LSB} = \frac{A_m^2}{8}$$

נדיר את הספק האות המשודר – שבעצם יהווה לנו תחליף מתאים למושג האנרגיה. נתחיל מהספק האות לאחר האיפנו:

$$P_{signal} = P_s = P_{USB} + P_{LSB} = \frac{A_m^2}{4}$$

עכשו נחבר לנשא:

$$P_{total} = P_c + P_s = \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_m^2}{4} = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right) = P_c \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)$$

כלומר האנרגיה שלנו בשידור.

$$\eta = \frac{P_s}{P_t} = \frac{\frac{A_m^2}{4}}{P_c \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)} = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2}$$

אפשר להציג את המשוואות למולטיפלקסינג, כפי שתארנו שאפשר בחלוקת המוטיבציה לעשיית איפונו:

$$m(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + \cdots + A_n \sin(\omega_n t)$$

$$y(t) = A' \sin(\omega_c t) = (A_c + m(t)) \sin \omega_c t$$

$$= A_c \sin \omega_c t + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t) * \sin(\omega_c t) = A_c \sin \omega_c t \left(1 + \sum_{i=1}^n \mu_i \sin(\omega_i t) \right)$$

ניתן לראות כי העיקרונו זהה.

במugen הפיזי:

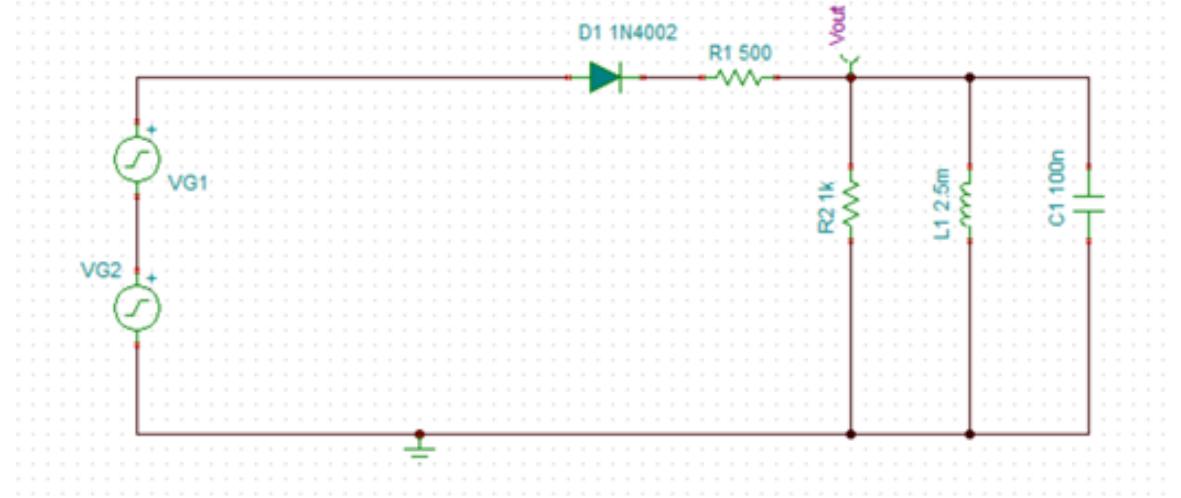
במugen הפיזי של המולטיפלקסינג נוצרה לנו בעיה שלא חווינו בסימולציה. אחד מהנדדים החל להעלות עשן.
אחרי בדיקה מקיפה הגענו למסקנה שההספק על הנגד גדול ממה שהנגד יכול להחיל. בסימולציה לא חווינו זאת.
בגלל שהסימולציה לא מחשבת את ההספק על החלקים במugen. הפתרון שלנו היה לחבר כמה נגדים במקביל.
הינו צריכים נגד של 5 או יותר. ההספק המקסימלי של הנגד הוא

במקרים, ההספק מגיע ל $[W]$. זאת אומרת שנצטרך לחבר שלושה נגדים במקביל על מנת להכיל את ההספק. לא הספקנו לעשות זאת בגלאי המצב הבריאותי.

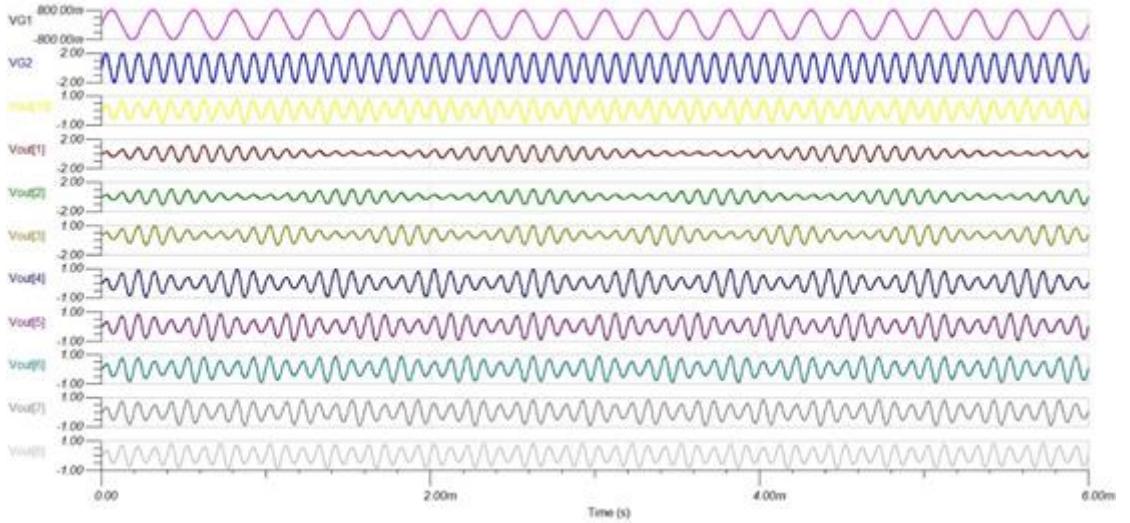
גפסה סימולציה של המעגל:

אחרי שני מעגלים כושלים שדילנו ממרחבי האינטרנט מצאנו אחד ייחד אשר בסימולציה שלו עבד.

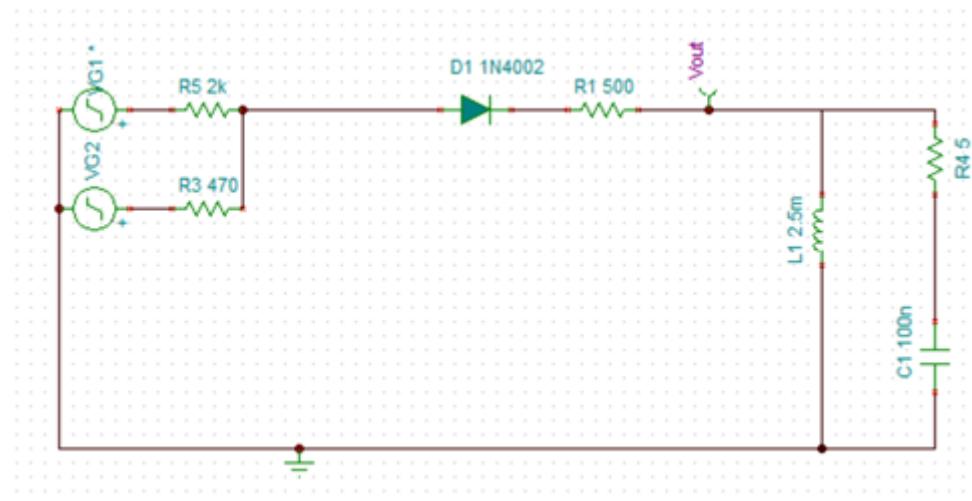
המעגל:



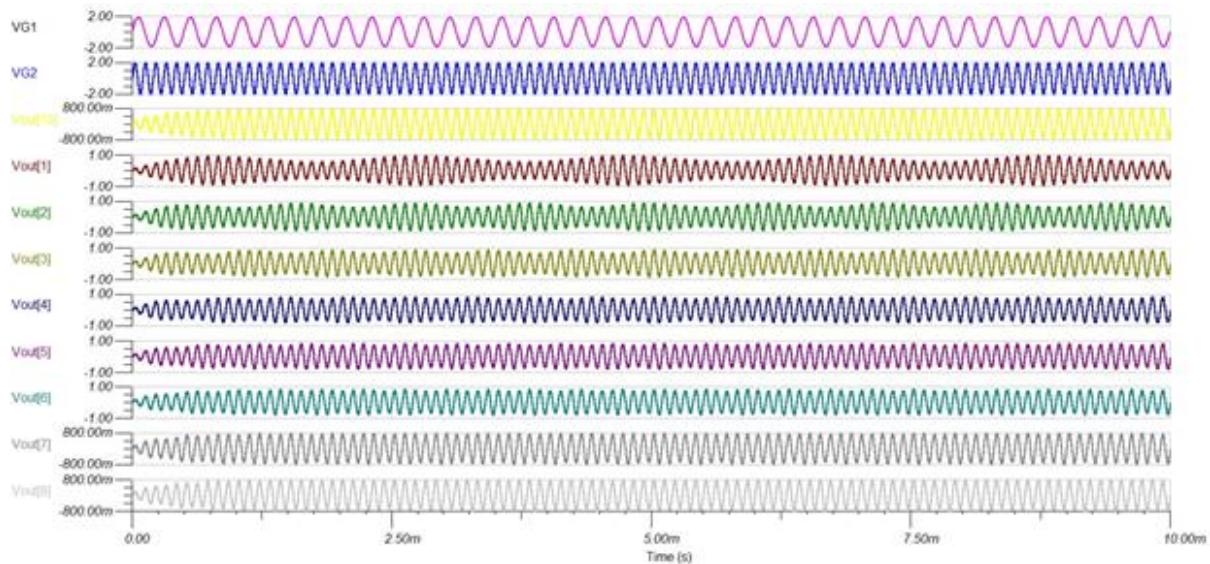
התוצאות שקיבלנו בתחום [[kHz],40[kHz]5] (בדקנו את התוצאה עבור תדרים שונים) עם 10 קפיצות היו:



בכל אחד מהמרקמים המוצגים, מtbody אפנון המתבסס על תנאי ההתחלה של המערכת. ניתן לראות כי תמצ' מהובר בתוצאות שאנו רואים, מtbody מtbody המודולציה אשר אנו רואים. בעצם הנקודות הגבוחות מתארות את האמפליטודה הגבואה בתדר הנכנס, אך התדריות משמעותית יותר גבואה וזהה carrier. עם הכלים שיש לנו בעיה להגדיר את ground הגדיר את ground ב Aperture שירותי לזריזטורן, ככלומר עליינו לחשב על מימוש אחר. זיהינו את תפקוד חיבור ground ground דרך adder, שכן נסה בסימולציה למשם adder אלטרנטיבי. אחרי מימוש adder האלטרנטיבי, ובניהם מחדש של רכיב BPF של המעגל, קיבלנו מעגל שנראה כך:

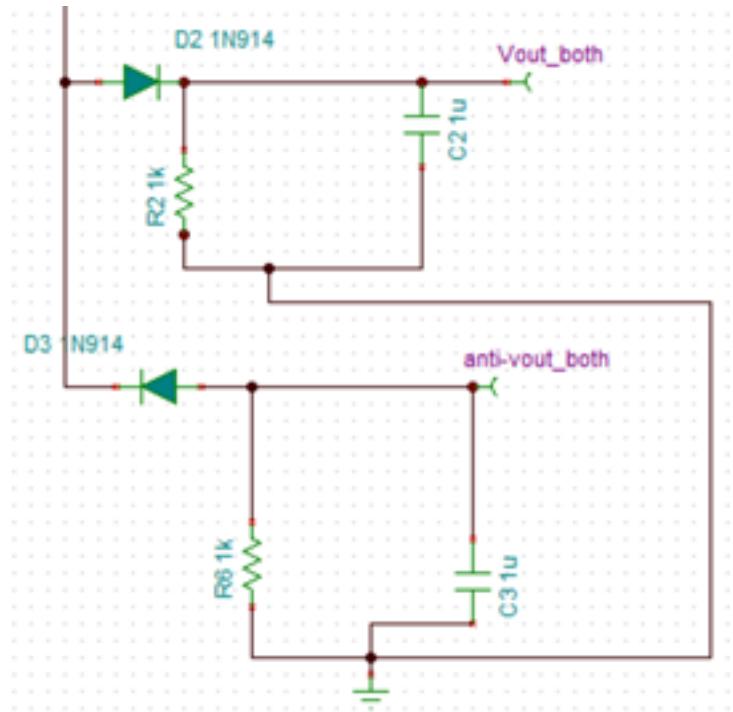


והתוצאות מודולצייה אינפונן באותו תחום הן:

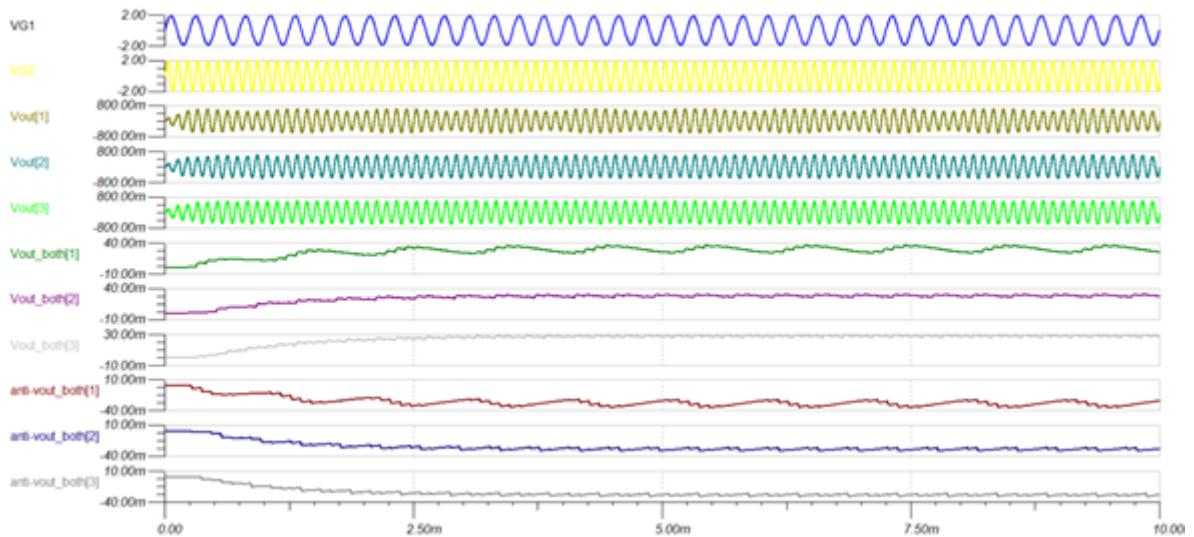


כזכור יש לנו מודולטור עובד.

בשביל לקבל בחזרה את המידע, נשתמש בenvelope detector

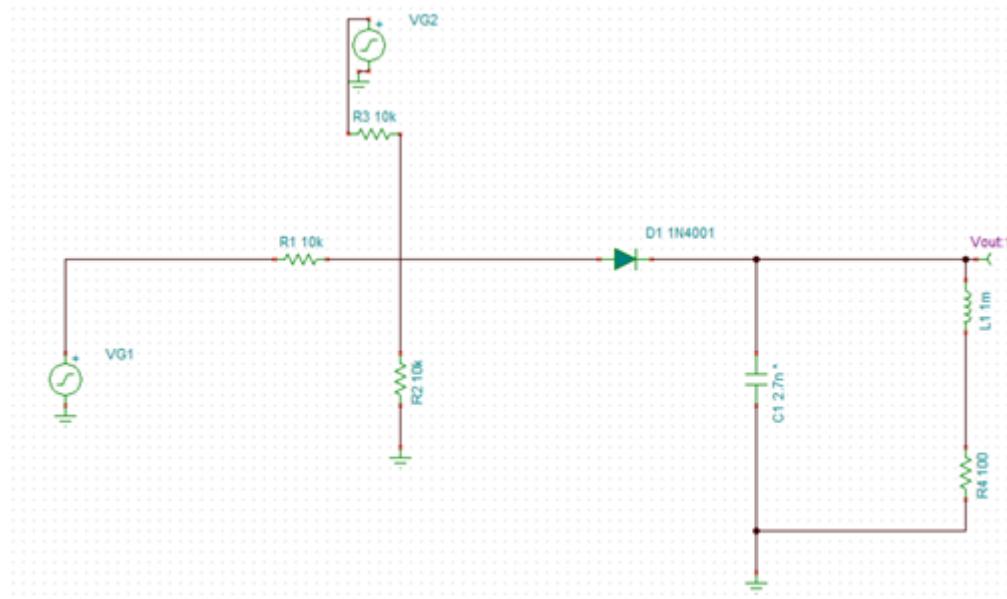


הוא ייתן לנו את המעטפת של הפענציה, ניתן לראות אותו עובד כאנ':

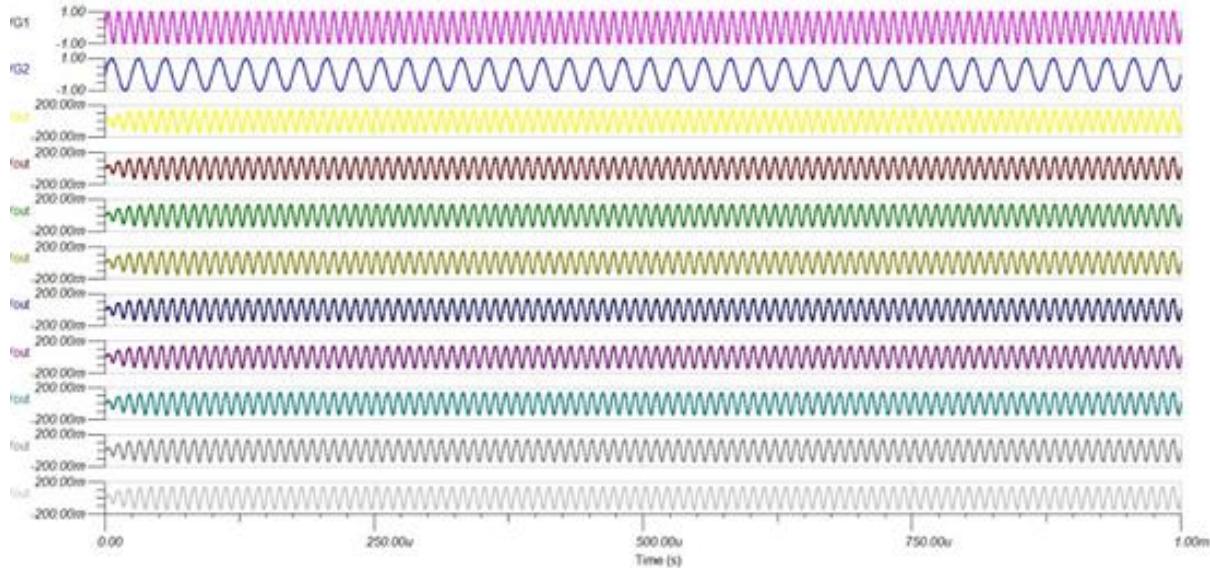


מעגל שלא עבד

אנו ביצעו סימולציה על המודל הבא:



עשינו בדיקות על כמה מעגלים כדי לראות באיזה אחד להשתמש למערכת שלנו. הרצנו סימולציה על המעגל הזה ומדדנו את היציאה כאשר נכנסים סינוסים בתחום: [5][kHz],40[kHz] (בדקנו את התוצאה עבור תווים שונים) עם 10 קפיצות התוצאות היו:



ניתן לראות כי לא מתחבצת הטודולצייה איפונו שהוא רוץים.

מציאת הפרמטרים מהניסוי RC המקיים שלנו

(הניסוי מתואר בחלק התיאוריה)

הכנסנו לקובץ Excel את הנתונים שמדדנו מהoscilloscope. מדנו את המתה שיצא מההoscilloscope. כאשר אנו יודעים את המתה שנכנס והמתה שאמור לצאת לפי התיאוריה שפיתחנו. כך יוכלנו לנរמל את הנתונים. כתבנו את המשוואת שפיתחנו עבור האמפליטודה של VC עם ערך R ו- C עם ערך RC (כאשר שינינו את התדרות). חישבנו את סכום ההפרשיות של המידע שנמדד והמידע שהושב בexcel. השתמשנו באלגוריתם שি�שנה את הערכים של R ו- C כדי שסכום ההפרשיות יתאפס. עשינו זאת שוב עבור C שונה.

התוצאות עבור ניסוי ראשון:

אמתית:

R: 470000

C: $4 * 10^{-9}$

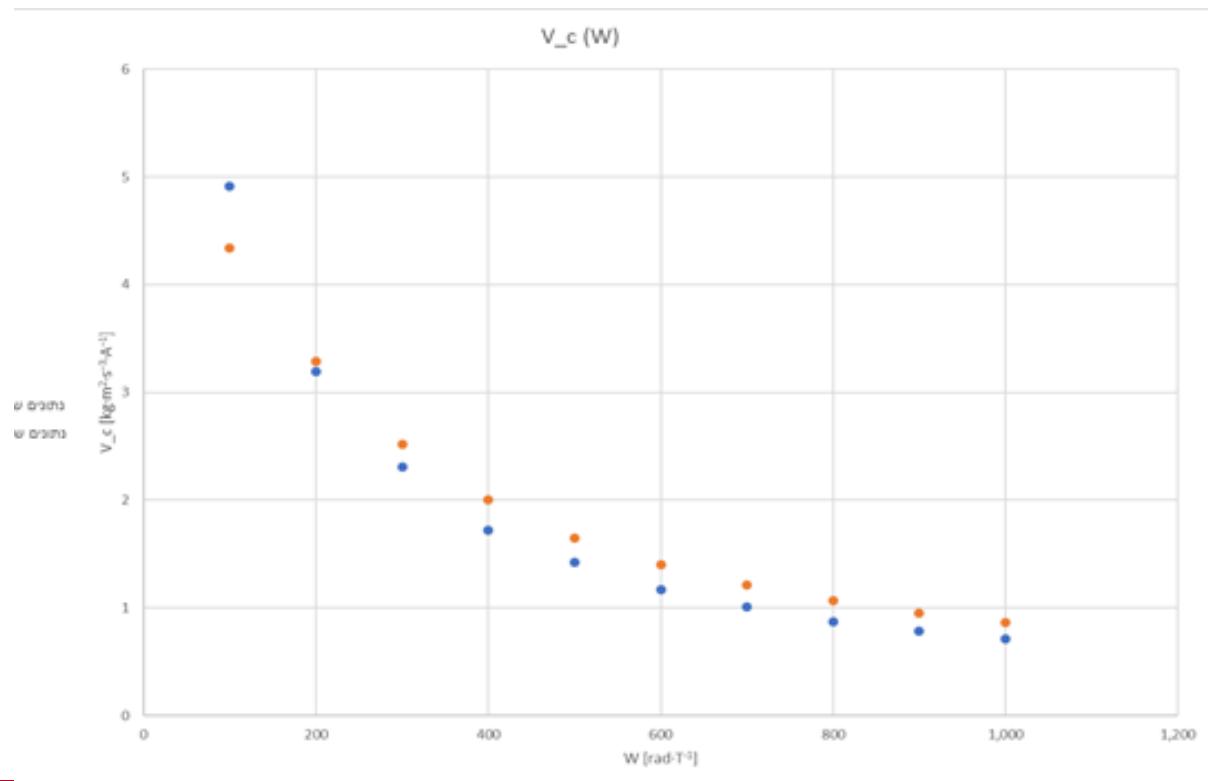
מחושב:

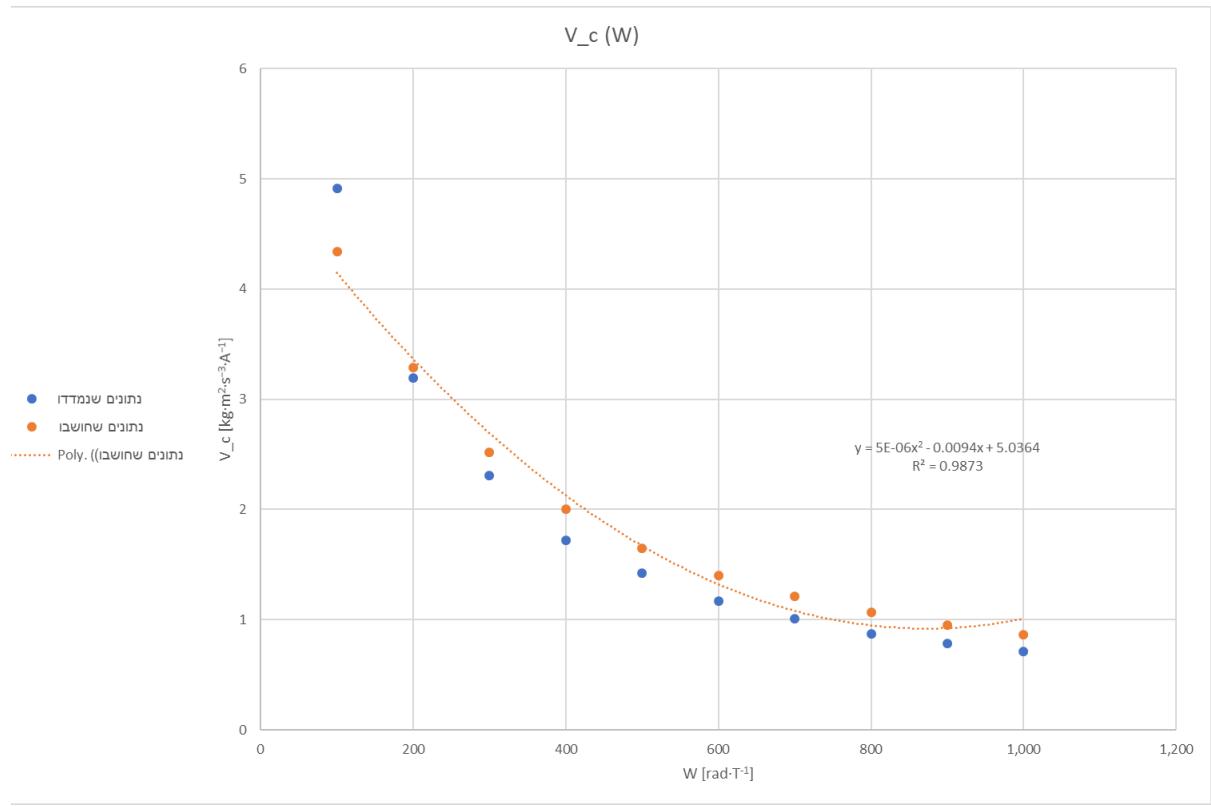
R: 470013.36

C: $1.22 * 10^{-8}$

סכום ההפרשיות: $-1.6 * 10^{-5}$

граф של הנתונים שנמדד ושל הנתונים שהושבו:





התוצאות עברו ניסוי שני:

אמתית:

R: 470000

C: $4 * 10^{-9}$

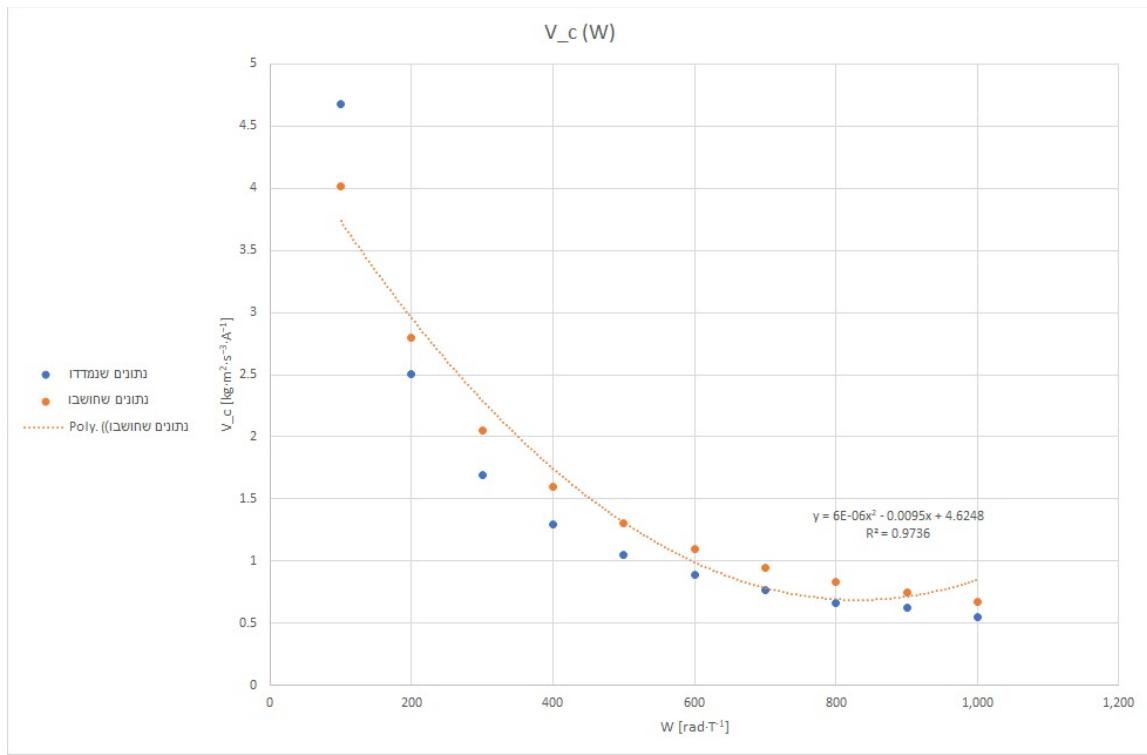
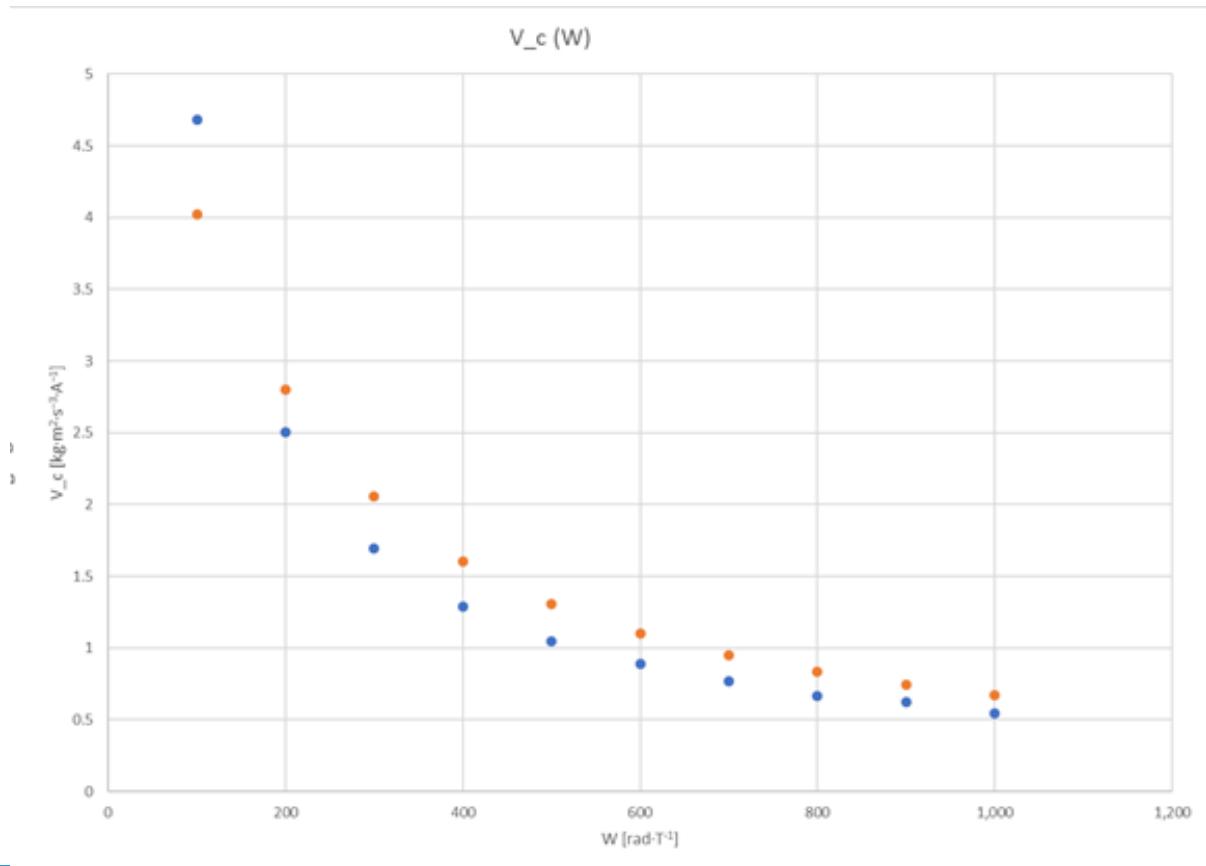
מחושב:

R: 470000

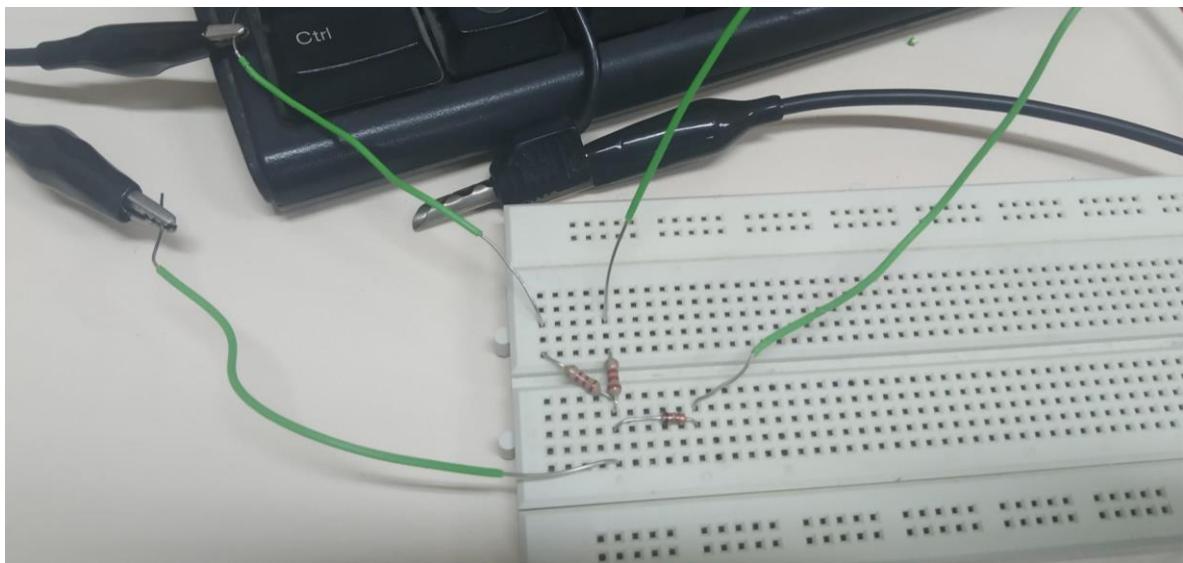
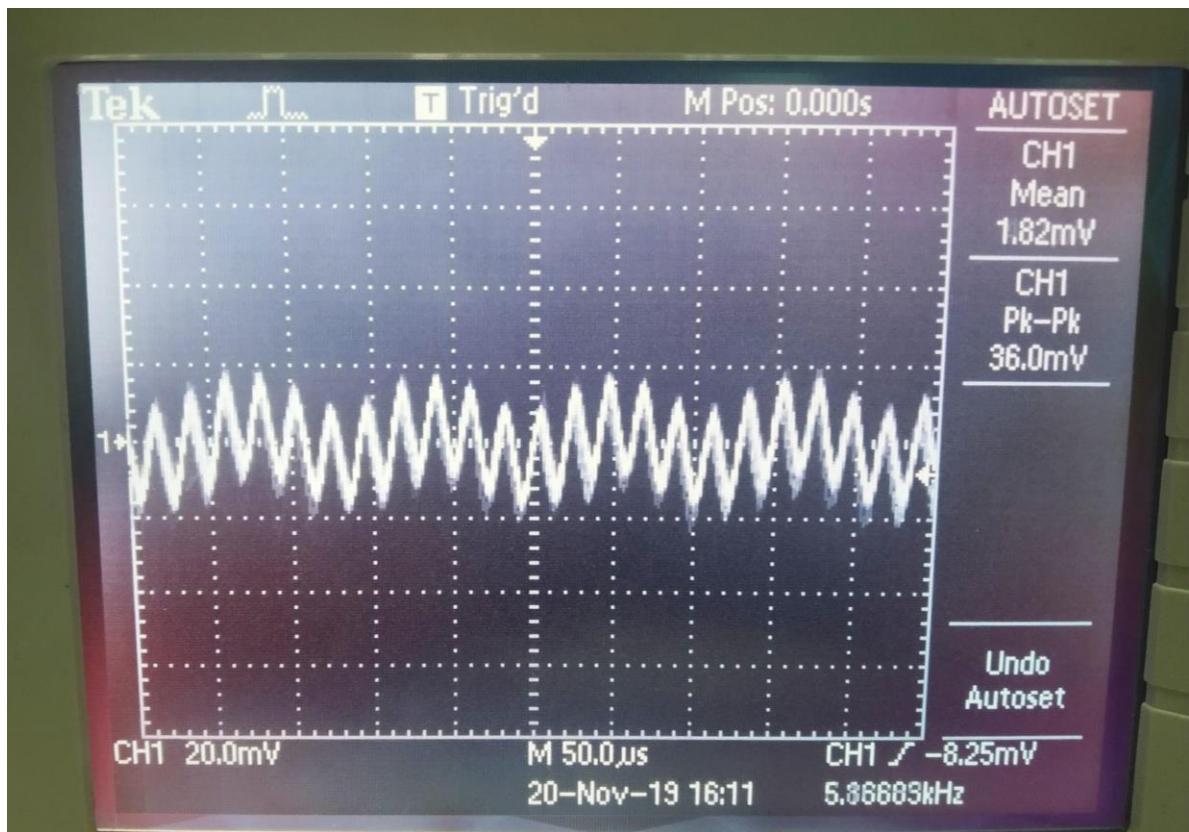
C: $1.57 * 10^{-8}$

סכום ההפרשיות: -0.00023

граф של הנתונים שנמדדו ושל הנתונים שהושבו:



תמונה של חיבור הנשא והמידע



גשפה עיבוד נתונים:

נתאר את אלגוריתם נרמול הזמן בין 3 הגրפים השונים שלנו:

את עשינו על ידי כתיבת קוד VisualBasic באקסל. האלגוריתם שלנו עבד כך:

1. ачילה-בחירה את המערכת **בזמן** עם הקפיצות הגדלות ביותר ביותר תוכנה להן "זמן האבסולוטי",
2. מעבר לאחר מסע עברת **על** נקודת הזמן הראשונה שלה,
3. ולראלי למערכות הזמן האחרות, שם טיפש-נחפש את הנקודת הראשונה בכל מערכת זמן בה הזמן במערכת גדול מנקודת הזמן של הזמן הראשונה,
4. שמורשمرة בצד את אינדקס נקודות הזמןalo בכל עמודה
5. ניכון-ALKAT את ערכי הפונקציה בנקודת הזמן הצעת ובנקודת הזמן לפני געשהעשות בניה פתק מוצע כדי להציג לערך הפונקציה הקרוב ביותר לערך שלה באמצעות נקודת זמן, ככלומר לפי התאוריה שלנו הנחנו כי מדובר בפונקציות רציפות (כל זה פתק-בתנאי שלא היה ערך זמן זהה בין המערכת הנבדקת לבין האבסולוטי).
6. חוורים לשלב 2, כל פעם עם הנקודת הבאה של מערכת הזמן האבסולוטית, עד שנגיע לערך האחרון של אחת מערכות הזמן (לא בהכרח המערכת האבסולוטית)

תיאור הפעולה על האנבלופםעטה:

ניקח את פונקציית הפרשיים בין האנבלופםעטה, מה שיוצא לאחר המעטפה-דימודולציה, ונחשב את המרחק שלה מהתדר הנכון. בשביל לעשות תיקונים של עיבוד אנרגיה, ובכלל של הוזות, נאפשר הזזה בפואה בעזרת משתנה פואה ובמכפלת אמליטודה בשביל אמפליטודה ומהסר בשビル להעביר את הערכים לטווה הערכים הנכון. הרוי מה שיוצא לנו לאחר המעטפה-דימודולציה הם הערכים החיווביים בלבד, ולכן נבצע ערך מוחלט, כי לערכים שליליים וחיווביים באבלופםעטה זה מתבטא כחוויות. משמע, נקבל פונקציית הפרשיים עם המשתנים הבאים לשחק איתם: אמפליטודה, פואה, הגבהה, ונסנתמש בסולבר כדי לבדוק את ההתאמה בין האנבלופםעטה לתדר המקורי שנכנס. בכלל התנוגות הקפישורקביל שлокח לו זו להטען, ניתן לראות כי ההשוואה בהתחלה לא תקין, כי הערכים קטנים יותר, לכן ביצאנו תיקון שבו נתחיל את ההשוואה רק לאחר פרק זמן קצר, כדי לשפר את הפתרון המתתקבל על ידי הסולבר.

נספח מולטיפלקסינג:

תת נספח רקע ו שימוש:

לאחר סיום בניית המעלג הפיזי שלנו התחלנו לעבוד על מערכת מרכיבת יותר, מולטיפלקסינג, מערכת של שידור במקביל. כפי שפרקנו במהלך הרקע התאורטי, מעגל מולטיפלקסינג בעצם מאפשר לנו לשדר מספר דברים (מבחן אינטואיטיבית – שירים) בטוחה תדריות שונים על ידי עשיית מודולציה איפנו בתחום תדרות שונות, ואז אנגולופמעטה מתאים להם.

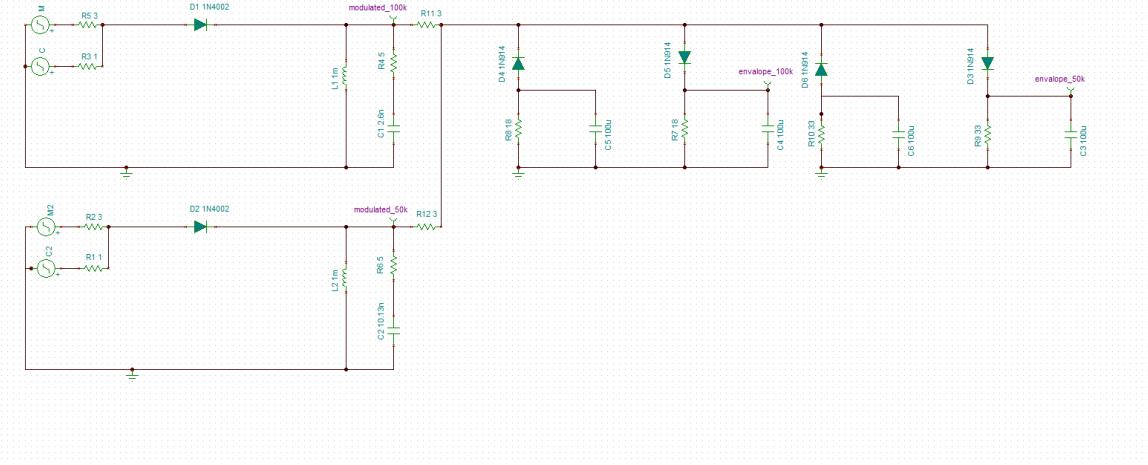
בעצם הרדיו шибש לכט באטו-רדיו AM עובד על עקרון פועלה דומהעובד על לעיקרונו מולטיפלקסינג, כאשר בפתחות שאט-מוסובבים את כפטור הרדיו כדי לשנות תחנה, אט-משנים את טווח התדריות שאט-בוחנים (אשר אט-שומעים שידורי AM). כיצד זה עובד? בעזרת קפסיטור קבל\נגד משנתנה, שבעצם משנים את טווח התדריות שאותם המעלג בוחן, זאת ניתן לראות על פי המשווה של האנגולופמעטה דיטקקטו (משווה 6):

$$\frac{1}{2\pi RC}$$

כלומר ככל שמקטינים את הקפסיטור קבל או הנגד אנחנו בעצם מסתכלים על תדריות יותר גבוהות. לעומת זאת אנחנו צריכים לשדר בשני תחומים שונים, כאשר חשוב לשים לב שני מעגלי המודולציה איפנו שלנו משחקים בטוחה f_0 מאוד שונים, וגם אין בהם חפיפה- bandwidth מתאים.

תת נספח מעגל מולטיפלקסינג בסימולציה:

לשנות את הקפסיטור קבל או הרסיטטור-הנגד בסימולציה לא נותן לנו הרבה, לאור הדרך שהסימולציה בנויה. לכן נעשה שני מודולטורים מאפננים בשני תחומים (מכיוון שאין לנו לקבל משנתנה) המתחרים לו ייחיד ולאחריו שני במודולטורם מעטפות כאשר כל אחד בוחן תדריות אחר, וכך מקבל שני ערוצי שידור.



אפשר לראות כי יש לנו את שני ההמודולטורים-המאפננים שמתחברים יחד:

נתחיל מלבחון את רכיבי מעגלי RLC :

המעגל הראשון:

$$L_1 = 1[mH], C_1 = 2.6[nF], R_4 = 5[\Omega]$$

נשתמש במשוואות שלנו כדי לבדוק את טווח התדריות והwidth. לפי (משווה 4) שמציגה לנו את f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 * 10^{-3} * 2.6 * 10^{-9}}} = 98704[\text{Hz}] \approx 100[\text{kHz}]$$

לפי (משווה 5) שנوتנת לנו את h_0 :

$$BW = \frac{R}{L} = \frac{5}{10^{-3}} = 5000[\text{Hz}] = 5[\text{kHz}]$$

כלומר תחום הערכים שלנו הוא בקרוב $[95[\text{kHz}], 105[\text{kHz}]]$.

נבחן את h_0 שלנו: $f = 100[\text{kHz}], A = 20[V]$ קלומר מתאים למודל המוצג.

המעגל השני:

$$L_2 = 1[mH], C_2 = 10.1[mF], R_6 = 5[\Omega]$$

לפי (משווה 4):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-3} * 10.1 * 10^{-9}}} = 50079.438[\text{Hz}] \approx 50[\text{kHz}]$$

כמוך-לפי (משווה 5)

$$BW = \frac{R}{L} = 5[kHz]$$

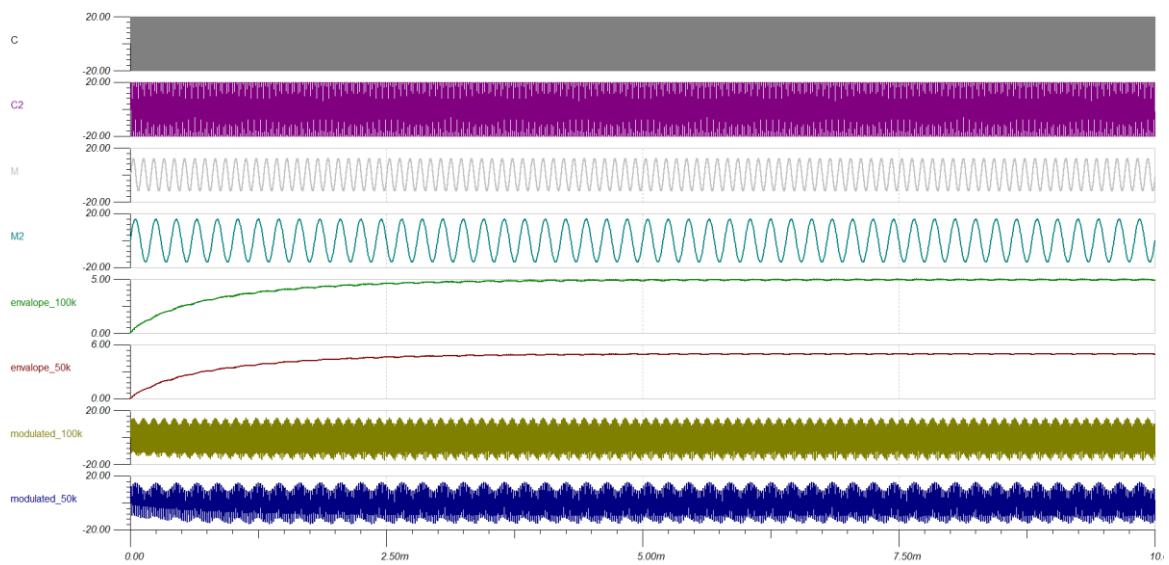
כיו הרכיבים לא השתנו כלל.

לכן תחום הערכיים שלנו הוא בקירוב $[45[kHz], 55[kHz]]$. הנשא שלנו הוא:

$$f = 50[kHz], A = 20[V]$$

כלומר מתאים למודל המוצע.

התוצאה שקיבלנו היא:



כאשר C_f הם הנשאים, M_f הם האינפוטים בהתאם. $C2_f = 50[khz]$, $modulated_50k$ הם האינפוט והאאות פוט בכל תדרות.

תת-תת נספה עיבוד נתוניים:

כאן ניתן לבצע את אותו עיבוד נתוניים שיעשינו על המוגלים הקודמיים רק עם עד שלב של השוואה בין איות האינפוט והאאות פוט בכל תדרות.

תת נספח מולטיפלקסינג במציאות:

בנינו את המעלג הפיזי לפי מה שבניינו בתיאוריה. כאשר בנו אותו, נתקלנו בבעיה, ההספק שנפל על אחד מהריציטורים-ങנדים היה גדול מדי והמעלג החל להעלות עשן. כאשר חישבנו את ההספק, הגיעו למסקנה שההתנגדות נמוכה מידי למתח שהכננו. החלטנו לחבר כמו זיסטורם-ങדים במקביל כדי להגיע להספק יותר גדול עבור אותה ההתנגדות.

נספח שידור:

תת נספח שיטות שידור:

נתרכזו בשני אנטנות: אנטנת דיפול ומונופול. אנטנת דיפול בנויה משני מוטות מתכתי מקבילים אשר מחוברות אחת לשניה בעזרת מוט נוסף אשר עבר במרכזהן. האנטנות מעבירות מידע דרך מוט זה. המוטות נמצאות בהפרש מתחים בגלל הזרם המשתנה באנטנה. אורךם של המוטות רבע אורך גל היוצרים שניים יחד אורך של חצי אורך גל: $L = \frac{\lambda}{2}$ אורך האנטנה. בשידור, האנטנה גורמת לתנועת אלקטرونים בתדרות השידור. תנועת האלקטרונים גורמת לשדה אלקטرومגנטי אשר משתנה לפי תדרות השידור. אורך האנטנה חשוב בשלילו לגרום לאלקטרונים לניע בתדרות הנכונה ולשנות כיוון בזמן המתאים. כאשר האנטנה קולעת שידור, האלקטרונים נעים לפי השדה האלקטרומגנטי אשר יוצר זרם חשמלי במוט המחבר את האנטנה.

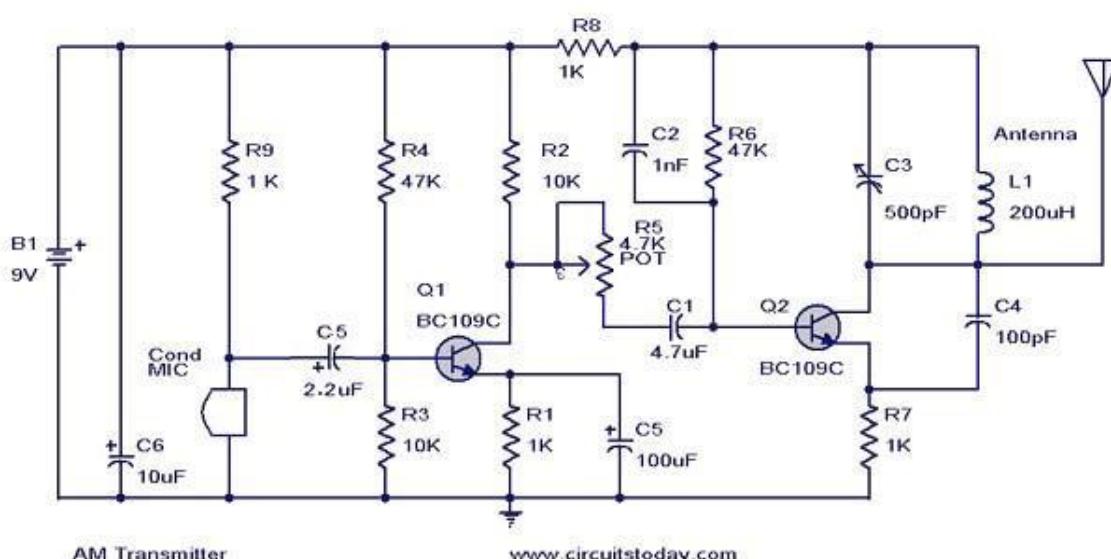
אנטנות מונופול בנוויות כמו מוט מתכתי אשר מחובר למוליך וצידו الآخر מחובר לאדמה. בדומה לדיפול, האנטנה קולעת או משדרת את השדה האלקטרומגנטי כמו דיפול רק שהמוחה משתנה בצד אחד והצד השני נשאר על אף. כיוון שהחיי מהאנטנה מתחנה כאנטנת דיפול, אורך המוט הוא שומר על אותו היחס כמו אנטנת הדיפול:

$$L = \frac{\lambda}{4}$$

ניתן לראות כאן הסבר להנחות שלנו בדוחת.

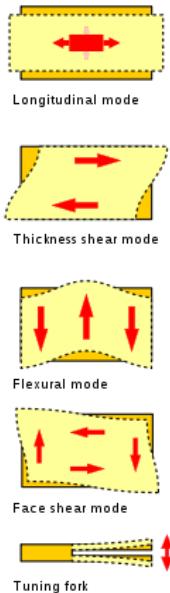
תת נספח צורות שידור:

ישנם שני צורות שידור שבחנו: מעגל שידור וקריסטל שידור. מעגל שידור נראה כך:



החלק של Q1 משנה את הכניסה DC לAC בתדר באיזור הגיכה הרץ. ניתן לשנות את ערכי המעלג בשביל לשנות את התדרות. המיקרופון מסמל את המידע שהוא נרצה לשדר. Q2 הוא המודולטורמאנפנ ואליו מתחבר האנטנה.

קריסטלי שידור: במקום להשתמש במעלג אשר ישנה DC לAC, ישם קריסטלים אשר מקבלים DC ומוצאים AC בתדרות קבועה. התדרות משתנה בין קריסטל לקריסטל. הקריסטל מתנגד כחומר אלסטי. כאשר הוא נמצא בשדה חשמלי, הוא יוצר שדה חשמלי שונה המשנה בזמן ב כדי לחזור לצורתו המקורי. דוגמאות לתנועות בחומר:



רצינו לבנות מעגל אך הוא מסובך מדי בשביל הפרויקט שלנו. החלנו להשתמש בקריסטל שידור. כאשר ניסינו למצוא קריסטל מתאים מבחינת התדרות, לא מצאנו משחו מתאים בישראל והמשלוחים מחול ל科幻 יותר מדי זמן. בשביל קריסטל שידור שנוכל להשיג, היינו צריכים לשנות את כל המעלג שלנו. בנוסף, שידור בתדרות גבוהה יגרום לאנטנה להיות קטנה. לא יכולנו להשתמש במכלול שהשתמשנו בו עד כה בגלל שהתדרות שלו הגיע עד למאה אלף הרץ.

הספק

הספק השטחי של מעגל השטחי הוא כמוות האנרגיה החשמלית ליחידה זמן הנכונות אליו והופכת בו לאנרגיות אחרות. הספק הרגעי מוגדר כנגורת האנרגיה החשמלית בזמן: $P = \frac{dE}{dt} = I(t) * V(t)$. ניתן גם לרשום את ההספק הממוצע כתלות במתוך ה-RMS:

$$P_{avg} = \frac{\nu_0^2}{2R} = \frac{(V_{rms})^2}{R} \cdot RMS$$

הספק המודולצייה איפנו

מספר הגדרות עזר:

• ממוצע שורש ממוצעים ריבועיים [RMS] – ההגדרה של הממוצע מיל פונקציה מהזורה בטוחה בין מינום

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_T^T [f(t)]^2 dt}$$

איןסוף לאינסוף הוא:

• ממוצע RMS מתקבל להספק.

• ממוצע RMS של פונקציה מהצורה הבאה: $a \sin(2\pi ft)$ הוא $\frac{a}{\sqrt{2}}$

מקרה נובל כי

• חלק תחתון של הפס החלק $\frac{A_e \mu}{2} \cos(\omega_e - \omega_m)t$

• חלק עליון של הפס החלק $\frac{A_m \mu}{2} \cos(\omega_e + \omega_m)t$

כמובן באשר ש: $A_e \sin \omega_e t$ עדין הנושא [C] שלו.

אנוינו יודעים להציג כי:

$$P_e = \frac{A_e^2}{2}, P_{USB} = \frac{A_m^2}{8}, P_{LSB} = \frac{A_m^2}{8}$$

נגידיר את הספק האות המשוחרר שבעצם יהווה לנו תחליף מתאים למושג האנרגיה, נתחיל מהספק האות לאחר המודולצייה איפנו:

$$P_{signal} = P_s = P_{USB} + P_{LSB} = \frac{A_m^2}{4}$$

עלכשו נחבר לנושא:

$$P_{total} = P_e + P_s = \frac{A_e^2}{2} + \frac{A_m^2}{4} = \frac{A_e^2}{2} \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right) = P_e \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)$$

כלומר האנרגיה שלנו בשירות.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{\frac{A_{\text{max}}^2}{4}}{P_e \left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)} = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2}$$

אפשר להציג את המשוואות למולטיפלקסינג, כפי שתארנו שאפשרי בחלק של המוטיבציה לעשיית מודולצייה אינפניטו:

$$m(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + \dots + A_n \sin(\omega_n t)$$

$$y(t) = A' \sin(\omega_e t) = (A_e + m(t)) \sin \omega_e t$$

$$= A_e \sin \omega_e t + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t) * \sin(\omega_e t) = A_e \sin \omega_e t \left(1 + \sum_{i=1}^n \mu_i \sin(\omega_i t) \right)$$

ניתן לראות כי העיקרונו זהה.

במיעל היפוי:

במיעל הפיפוי של המולטיפלקסינג נוצרה לנו בעיה שלא חווינו בסימולציה. אחד מהנדדים ההלל להעלוות עשו. לאחר בדיקה מקופה הגיעו למסקנה שההספק על הנגד גדול ממה שהנגד יכול לההיל. בסימולציה לא חווינו זאת בכלל שהסימולציה לא מחשבת את ההספק על החלקים במנגנון. הפתרוון שלנו היה לחבר כמה נגדים במקביל. היינו צריכים גנד של 5 אוهم. ההספק המקסימלי של הנגד הוא

במקרים, ההספק מגע ל $[W] = 3.6 = \frac{\epsilon^2}{2*5} = P_{\text{max}}$. זאת אומרת שנצטרך לחבר שלושה נגדים במקביל על מנת להכיל את ההספק. לא הספקנו לישות זאת בכלל המצב הבריאות.