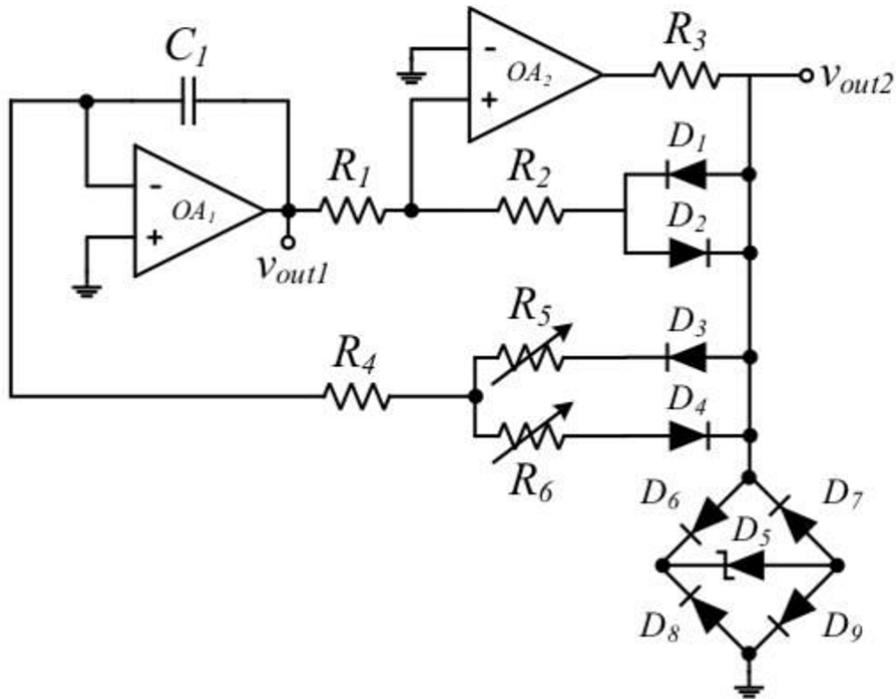


עבודה מסכמת בקורס מעגלים אלקטרוניים אנלוגיים 2024

מגיש: מיסון נפתל

שאלה 1



סעיף א'

המעגל המוצג משמש כמחולל אותות אלקטרוני, המסוגל לייצר שני סוגי אותות: אותות ריבועים ואותות משולשים. תפקודו מבוסס על שילוב של מגברים מבצעיים (Operational Amplifiers - OAs), דiodות, נגדים ופוטנציאומטרים.

תיאור תפקוד הרכיבים:

1. **מגבר מבצעי - OA1 אינטגרטור:**

- **תפקיד:** המגבר OA1 משמש כאינטגרטור. הוא מקבל אותן כניסה אחת ריבועית מתחלף בסימנו (חיובי ושלילי) ומיציר במווצאו V_{out1} אותה מושך סביבה מתח אפס.
- **מנגנון הפעולה:** האינטגרציה של אותן ריבועי גורמת לשינוי ליניארי במתח המוצא, וכתוצאה לכך מתקבלאות מושולש.

2. **דiodות (לא אלו שבענף התחתון):**

- **תפקיד:** הדiodות במעגל משמשות למנגנון פריקה של מוצא האינטגרטור. הן מאפשרות זרימה חד כיוונית של זרם, ומאפשרות פריקה ליניארית של הקבל המחבר למגבר OA1.
- **מנגנון הפעולה:** כאשר האינטגרטור טוען את הקבל, הזרם זורם דרך הדiodה בכיוון אחד, ומאפשר פריקה. כאשר האינטגרטור פורק את הקבל, הזרם זורם בכיוון הפוך, ומאפשר טיענה. כיוון הדiodות קובע את כיוון הזרם, וערכי הנגדים בטור לדiodות קובעים את כצב הפריקה והטיענה.

3. מגבר מבצעי - OA2 משווה שמייט טריגר:

- **תפקיד:** המגבר OA2 משמש כמשו (Comparator) מסווג שמייט טריגר. הוא משווה את מתח הכניסה שלו למתח יייחוס קבוע ומיציר בМОצאו Vout2 אותן ריבועי.
- **מנגנון הפעולה:** כאשר מתח הכניסה עובר את סף ההשוואה, המוצא של המשווה משתנה באופן היסטריזי, ומיציר אותן ריבועי בעל מחזור עבודה (Duty Cycle) קבוע.

4. פוטנציאומטרים R5 ו-R6:

- **תפקיד:** הפוטנציאומטרים R5 ו-R6 משמשים לקביעת מחזור העבודה (Duty Cycle) של האות הריבועי בМОצא המגברים.
- **מנגנון הפעולה:** על ידי שינוי ערך התנגדות של הפוטנציאומטרים, ניתן לשנות את נקודת ההשוואה במשווה, וכתוואה מכך לשנות את רוחב הפולסים של האות הריבועי.

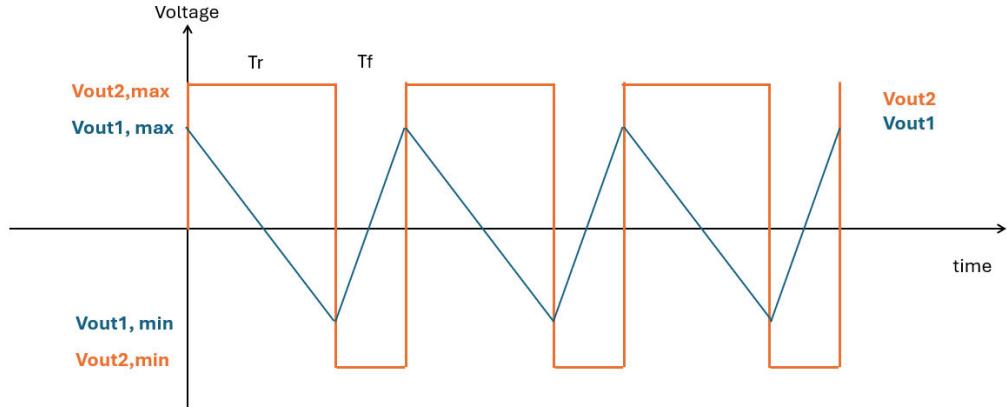
5. נגדים בענף הכניסה השילילי של OA1:

- **תפקיד:** הנגדים בענף הכניסה השילילי של OA1 יחד עם הקבל המחבר אליו, קובעים את תדר האותות הריבועיים.
- **מנגנון הפעולה:** ערך התנגדות של הנגדים משפיע על קבוע הזמן של מעגל ה-RC-וכתוואה מכך משפיע על תדר התנדות של המעגל.

6. גשר דיודות ודיודת זנر:

- **תפקיד:** גשר הדיודות ממיר את הזרם לזרם ישיר, ודיודת הזנר מבטיחה כי הזרם יזרום רק בכיוון ההפוך (Reverse Current) לאחר מעבר סף מתוך מסויים.
- **מנגנון הפעולה:** גשר הדיודות מבטיחה כי הזרם יזרום תמיד באותו כיוון, ללא תלות בכיוון המתח. דיודת הזנר פועלת כווסת מתח, ובבטיחה כי המתח על הקתודה שלה לא יעלה על ערך מסוים.

סעיף ב'



$$V_{out2,max} = V_{D9} + V_{D6} + V_{D5}$$

$$\Rightarrow V_{out2,max} = V_{D(on),9} + V_{D(on),6} + V_{Z,D5}$$

$$V_{out2,min} = -V_{D5} - V_{D7} - V_{D8}$$

$$\Rightarrow V_{out2,min} = -V_{ZD5} - V_{D(on),7} - V_{D(on),8}$$

$$I_{R1} = I_{R2}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out1,max}}{R1} = \frac{-V_{D(on)2} - V_{out2,min}}{R2}$$

$$V_{out1,max} = \frac{-R1(V_{D(on)2} - V_{ZD5} - V_{D(on),7} - V_{D(on),8})}{R2}$$

$$V_{out1,min} = \frac{-R1(-V_{D(on)1} + V_{ZD5} + V_{D(on),6} + V_{D(on),9})}{R2}$$

נסמן את זמני הטעינה והפריקה להיות T_r ו- T_f . על ידי שימוש בשימור המטען קובע :

$$T_f = \frac{C\Delta V}{I_{\text{טעינה}}} = \frac{C(V_{out1,max} - V_{out1,min})}{\frac{V_{out2,max} - V_{D(on)8}}{R_4 + R_5}}$$

$$T_r = \frac{C\Delta V}{I_{\text{פריקה}}} = \frac{C(V_{out1,max} - V_{out1,min})}{\frac{-V_{out2,min} + V_{D(on)4}}{R_4 + R_6}}$$

סעיף ג'

נכיב מספרים :

$$5 = V_{out2,max} = V_{D(on),9} + V_{D(on),6} + V_{Z,D5} = 2V_D + V_{Z,D5}$$

עבור מפל מתח טיפוסי על דיודות של $V_D = 700 [mV]$ נקבל $V_{Z,D5} = 5 - 2V_D = 3.6 [V]$

נמשיך למציאת יחסיו נגדים :

$$\begin{aligned} V_{out1,max} &= \frac{-R1(V_{D(on)2} - V_{ZD5} - V_{D(on),7} - V_{D(on),8})}{R2} = \\ &\quad \frac{-R1(0.7 - 3.6 - 0.7 - 0.7)}{R2} = 5[V] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{4.3}$$

נבחר לכך $R_1 = 50 [k\Omega]$, $R_2 = 43 [k\Omega]$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{out1,min} &= \frac{-R1(-V_{D(on)1} + V_{ZD5} + V_{D(on),6} + V_{D(on),9})}{R2} = \\ &\quad \frac{-50(-0.7 + 3.6 + 0.7 + 0.7)}{43} = -5 [V] \end{aligned}$$

על פי דרישת התרגיל, $T_f, T_r < 50 [\mu s]$

נכיב בתוצאות הסעיף הקודם :

$$50 [\mu s] < T_f = \frac{C(5 - (-5))}{\frac{5 - 0.7}{R_4 + R_5}} < 50 [ms]$$

$$21.5 [\mu s] < C(R_4 + R_5) < 21.5 [ms]$$

נבחר קבל בערך טיפוסי של $R_4 = 10 [k\Omega]$ ונגד $C = 1 [nF]$ או טווח ההנגדויות הנדרש מהפתרונות ציומטר R_5 הוא :

$$11.5 [k\Omega] < R_5 < 21.5 [M\Omega]$$

חישוב דומה :

$$T_r = \frac{C(V_{out1,max} - V_{out1,min})}{\frac{-V_{out2,min} + V_{D(on)4}}{R_4 + R_6}} = \frac{1n(5 - (-5))}{\frac{-(-5) + 0.7}{10k + R_6}}$$

$$\Rightarrow \mathbf{11.5 \ [k\Omega] < R_6 < 21.5 \ [M\Omega]}$$

чисוב ערך הנגד : R_3

$$R_3 = \frac{V_{R3}}{I_{R3}} = \frac{V_{supp} - V_{out2max}}{\frac{V_{out2max} - V_D}{R_4}} = \frac{10 - 5}{\frac{5 - 0.7}{10k}} \approx \mathbf{12 \ [k\Omega]}$$

הערה : לא הוגדר מתח אספקה V_{supp} נכון הנחתי . 10V

שאלה 2

על פי מספר תעודת זהות של :

תדר האות הנושא 31 MHz

תדר סינוס המידע 30 kHz

המידול המתמטי של אות סינוסי מוקוד על ידי שיטת FM הוא –

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t))$$

כאשר –

A_c אמפליטודת האות הנושא, אין בתרגיל דרישת אמפליטודה זו, لكن נבחר 1 □

f_c הוא תדר האות הנושא 31MHz □

f_m הוא תדר סינוס המידע 30kHz □

β הוא איינדקס המודולציה, מدد לכמות הסטיה בתדר הנושא, אין בתרגיל דרישת איינדקס זה, لكن □

ניחס מספר טיפיקלי עבור מערכות FM wideband $\beta = 2.5$

$$\text{FM - MODULATED - SIGNAL} = 1 \times \cos(2 \times \pi \times 31000000 \times t + 2.5 \times \sin(2 \times \pi \times 30000 \times t))$$

סעיף א'

קביעת תדר הקיטוען (db-3) של ה-LPF

אמור לסמן את התדר הגבוה ולהשאיר מידע מהאות הרצוי, لكن נבחר

$$f_{cutoff} = 1.2 \times f_m = 1.2 \times 30 \text{ kHz} = 36 \text{ kHz}$$

תדר הקיטוען נבחר להיות פי 1.2 מהתדר המרבי של אות המידע על מנת להבטיח שככל רכיבי התדר של אות המידע יעברו דרך המסנן ללא הנחתה משמעותית.

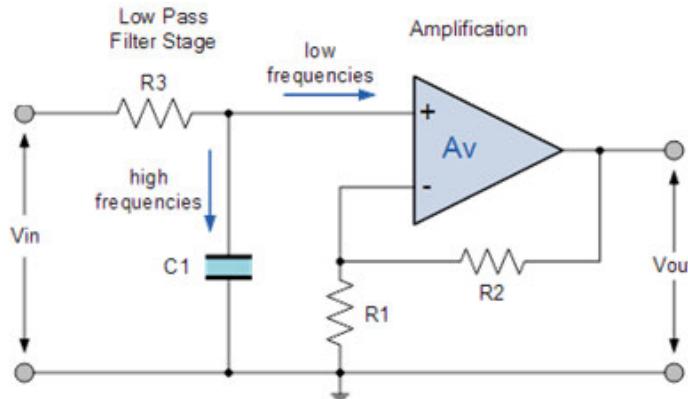
קביעת תדר העבודה המרכזי של ה-VCO –

קרוב לתדר הנושא, لكن נבחר

$$f_{vco} = f_c = 31 \text{ MHz}$$

סעיף ב'

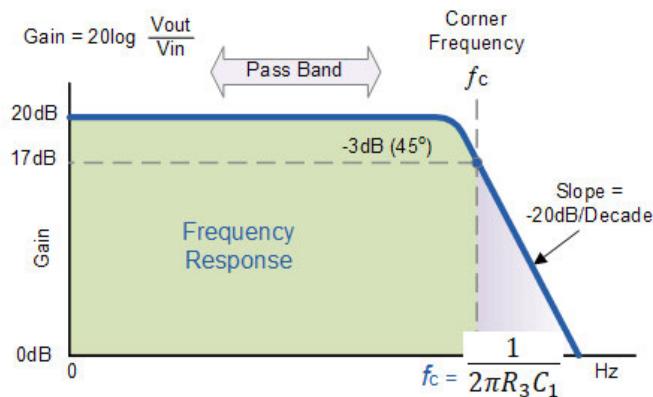
نمמש מסוג LPF Active Low Pass Filter



$$\text{Voltage gain} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{cutoff}}}\right)^2}}$$

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1}$$

תמסורת LPF מסדר ראשון –



[אילרים מתחזק](https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html) - https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html

לכן נבחר

$$C_{1,\text{LPF}} = 900 \text{ pF}, \quad R_{3,\text{LPF}} = 5 \text{ k}\Omega$$

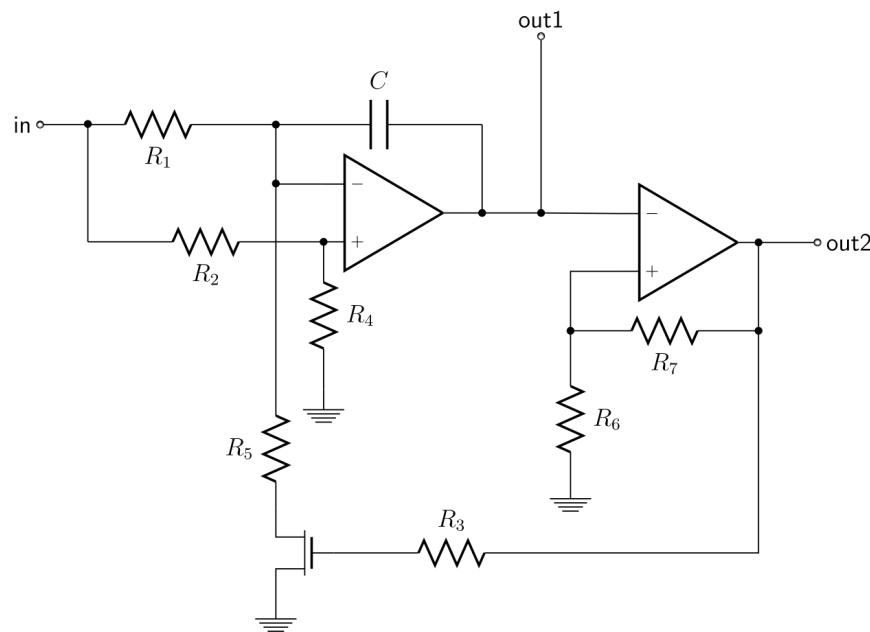
$$\Rightarrow f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} = \frac{1}{2\pi 5k900p} = 35.38 \text{ kHz} \approx 36 \text{ kHz}$$

ההגבר $1 + \frac{R_2}{R_1}$ ישפייע על התגובה של ה-VCO, הגבר חזק יותר יגרום ל-VCO להגיב באופן חד יותר.

נבחר $\Omega_{LPF} = 2 \times R_{1,LPF} = 2 k\Omega$ כלומר הגבר של 3.

מעגל ה-VCO :

ראינו בהרצאות מימוש של VCO, Voltage-controlled oscillator with programmable frequency, נציג כאן ואריאציה שלו ונקבע ערכיו נגדים וקבלים על מנת לקבל את תדר ה-VCO הנדרש 31 MHz



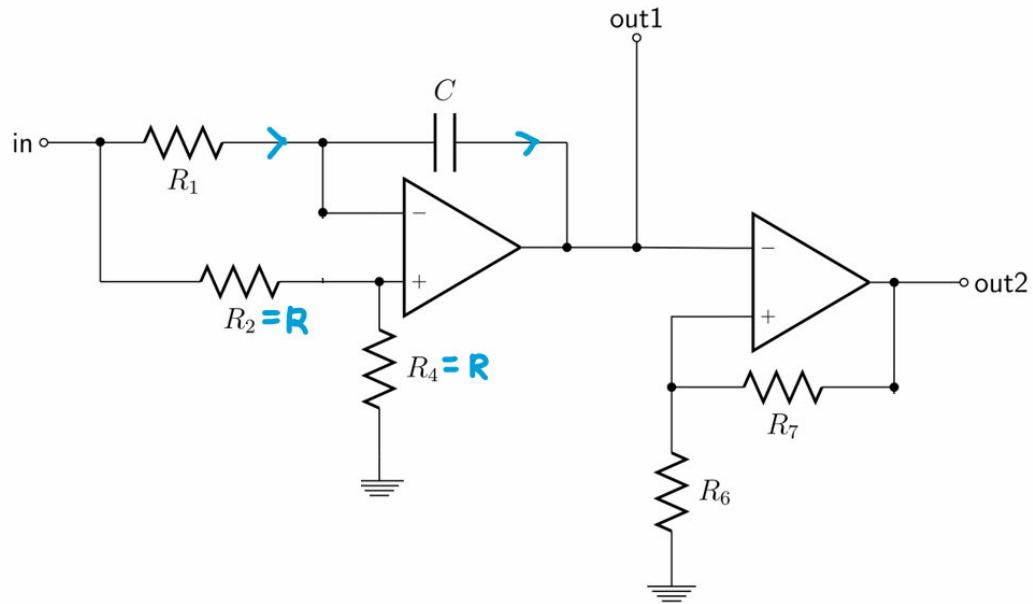
המגבר הימני משמש כמשווה, המגבר השמאלי משמש כאינטגרטור על אות הכניסה V_{in} שהוא האות שמנgive מעגל ה-LPF שהוצג לעיל. אל האינטגרטור מחובר נגד R_5 שמחובר לטרנזיטור המשמש כמתג. כאשר המתג פתוח, אז הקבל נתען. כאשר המתג סגור, וגם הזורם שעובר במתג גדול מהזורם על הקבל – זהה פריקה כלומר אותן משנה את שיפועו. התהיליך חוזר על עצמו כאשר הזורם במתג שוב קטן מהזורם על הקבל והמתג נפתח.

בכך מתתקבל אות מחוזרי בתדר פרופורציוני לזרם הכניסה לקלבל, כלומר למתח V_{in} .

מוצא האינטגרטור $out1$ הוא אות משולש מחוזרי, ו选出ה המשווה $out2$ הוא אות ריבועי מחוזרי.

נבחר $R_{2,VCO} = R_{4,VCO}$

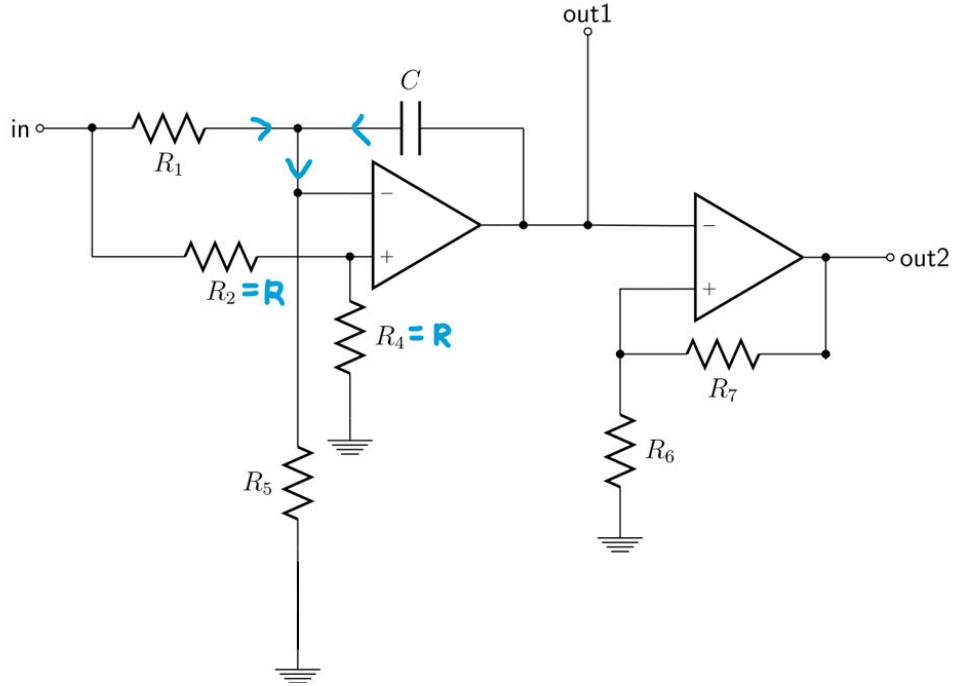
ניתוח המעגל במצב מפסק פתוח:



$$\frac{\frac{V_{in}}{2}}{R_1} = \frac{\frac{V_{in}}{2} - V_{out,1}}{R_1}$$

$$\Rightarrow V_{out,1} = \frac{V_{in}}{2} - \frac{1}{s} \frac{V_{in}}{2} \frac{1}{R_1 C}$$

ניתוח המעגל במצב מפסק סגור :



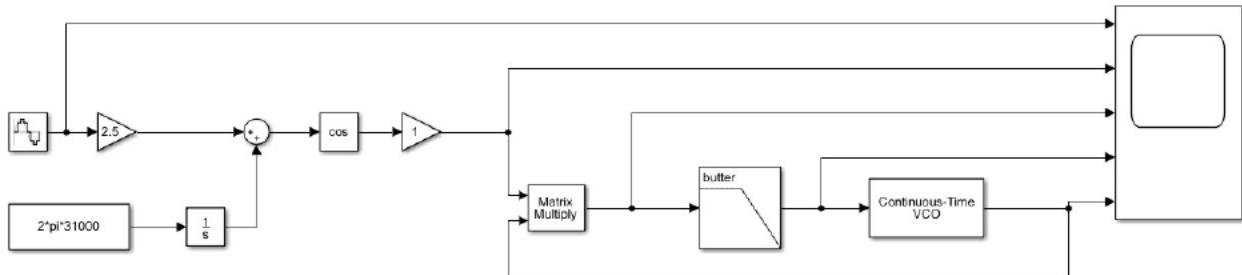
$$\frac{\frac{V_{in}}{2}}{R_1} + \frac{V_{out,1} - \frac{V_{in}}{2}}{\frac{1}{sC}} = \frac{\frac{V_{in}}{2}}{R_5}$$

$$\Rightarrow V_{out,1} = \frac{1}{sC} \frac{V_{in}}{2} \left(\frac{1}{R_5} - \frac{1}{R_1} \right) + \frac{V_{in}}{2}$$

בשני המקרים, הנוסחא הרקורסיבית מגדרה את מוצא ה-*VCO* :

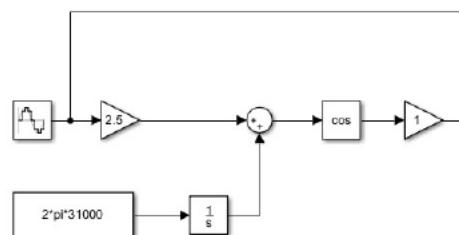
$$V_{out,2} = \begin{cases} V_{DD} & V_{out,1} > \frac{R_6}{R_6 + R_7} V_{out,2} \\ 0 & V_{out,1} < \frac{R_6}{R_6 + R_7} V_{out,2} \end{cases}$$

על מנת להציג את חילוץ אות המידע בשיטת עיבוד אותות *PLL*, ישמשי סימולציה *SIMULINK* בהתאם לפרמטרים מסעיפים א'-ב'. להלן מבט-על על הסימולציה:



נחקק למקטעים ונסביר:

1. בлок המודולציה:

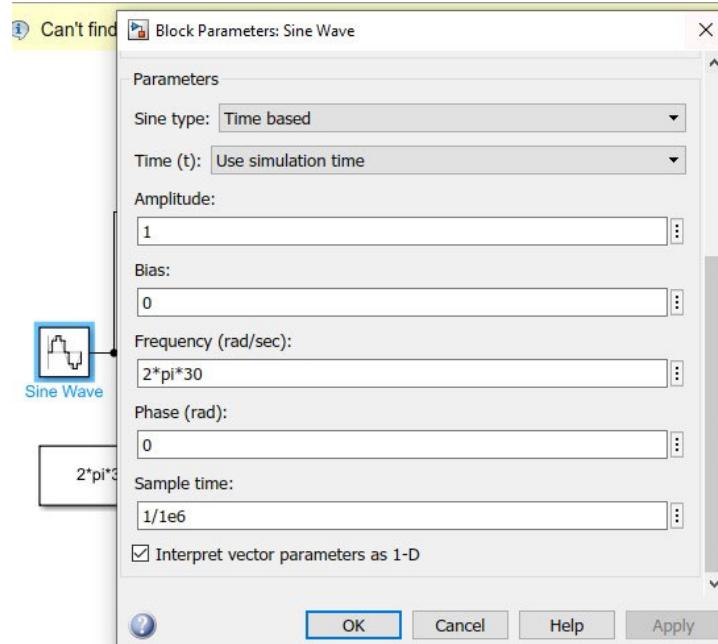


חלק זה אחראי על ייצור אותות עם המודולציה:

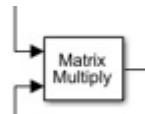
$$FM - MODULATED - SIGNAL = 1 \times \cos(2 \times \pi \times 31000 \times t + 2.5 \times \sin(2 \times \pi \times 30 \times t))$$

הערה: הורדתי את התדרים 30 KHz ו- 31 MHz פיאן 1000 כל אחד לצרכי תצוגה נוחה בסימולציה וזמני קימפוף סבירים.

להלן הפרמטרים של בLOCק ייצור הסינוס:

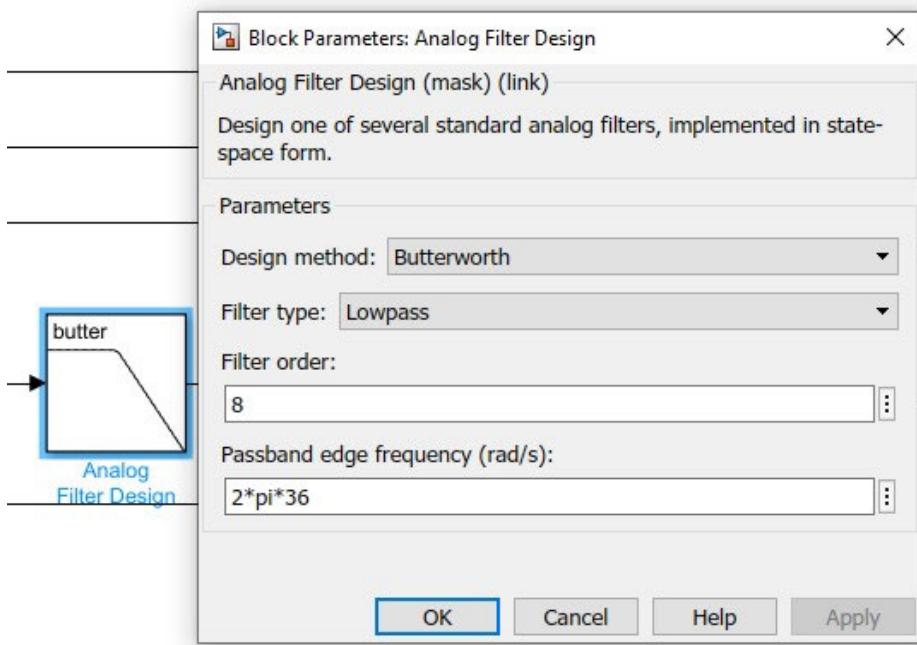


2. גלאי פאזה על ידי פעולה כפל –



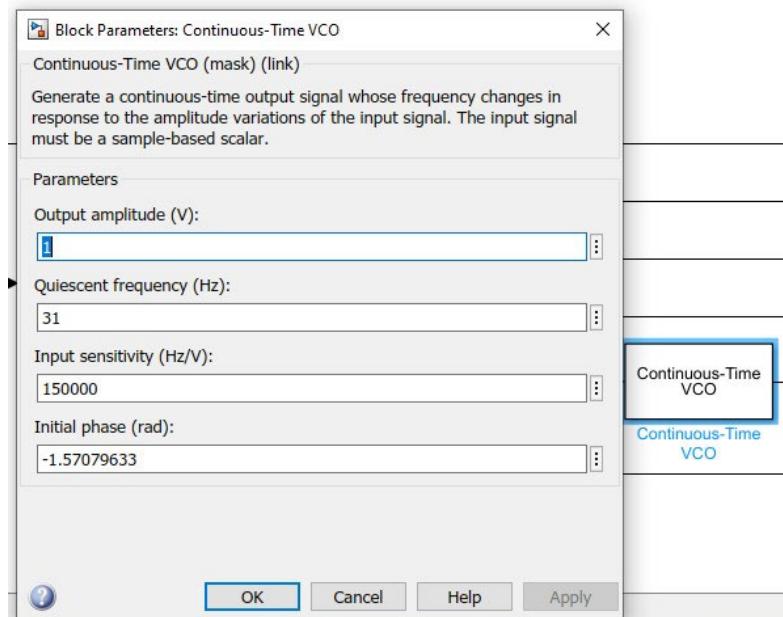
על פי זהות טריגונומטרית, כפל סינוסים מוליד איבר של הפרש הפאזה וアイבר נוסף של הסכום (בהתאם איבר הסכום יסוען).

.3. מסנן אנלוגי –



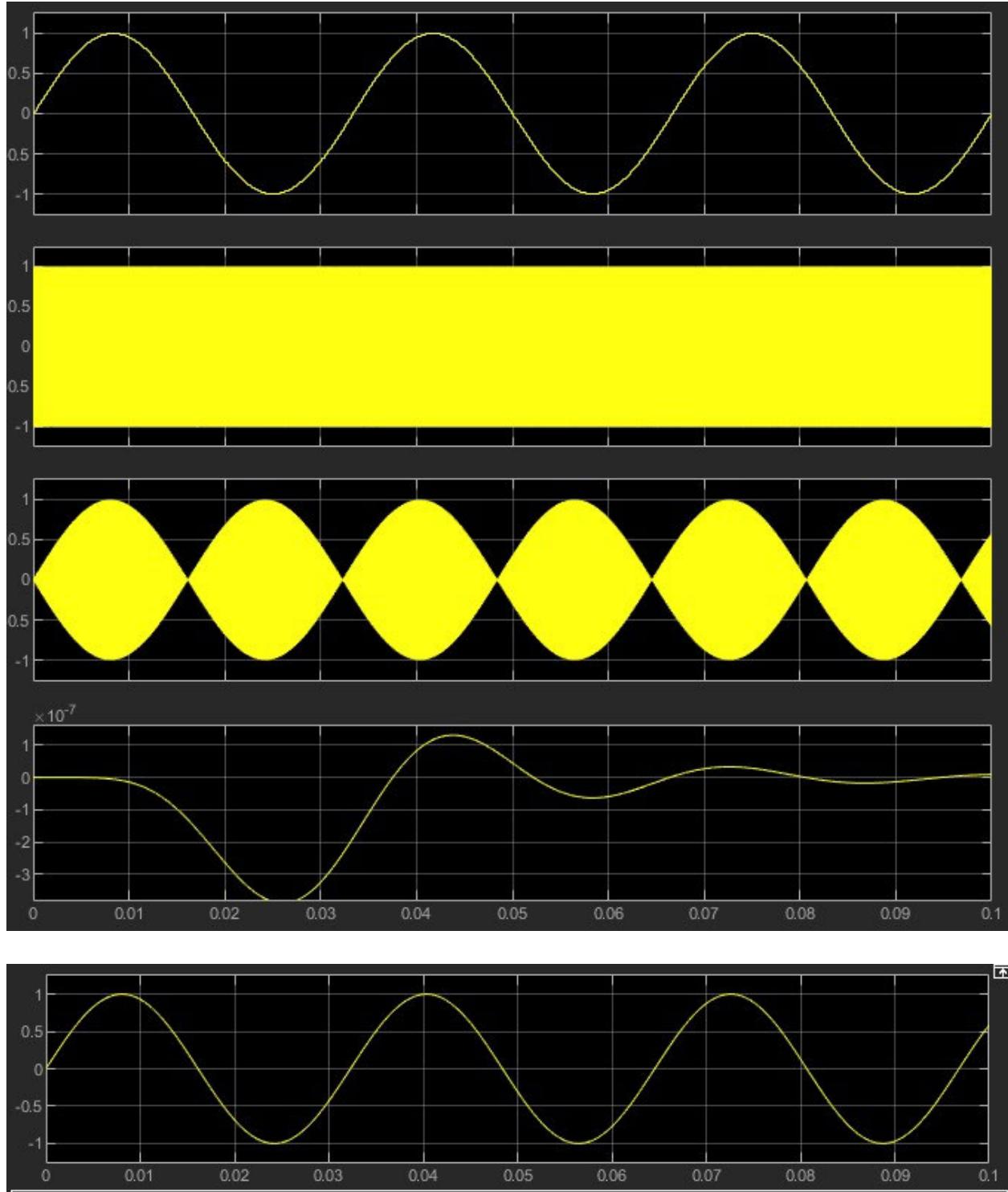
בחלימה למתואר בסעיף הקודם.

– VCO .4



עם תיקון פאזה של 90 מעלות.

להלן תוצאות הסימולציה כפי שניראים בסקופ המוצג באירור מבט העל:



תיאור הגרפים לפי הסדר: עלון – אות המדע הסינוסי לפני מודולציה, שני – אות הסינוסי אחרי מודולציה גבואה ב-3 סדרי גודל (לא ניתן להציג באותה סקלה), שלישי, השלישי – מוצא הרביעי – מוצא ה חמישי – אות מוצא ה-PLL שהוא למעשה מעשה האות אחרי דמודולציה.

שאלה 3

סעיף א'

$$V_o = V^+ \left(\frac{Z_3}{Z_4} + 1 \right) \Rightarrow \frac{V_o}{V_+} = \frac{Z_3}{Z_4} + 1$$

חיבור בטור :

$$Z_3 = 10k + \frac{1}{10nS}$$

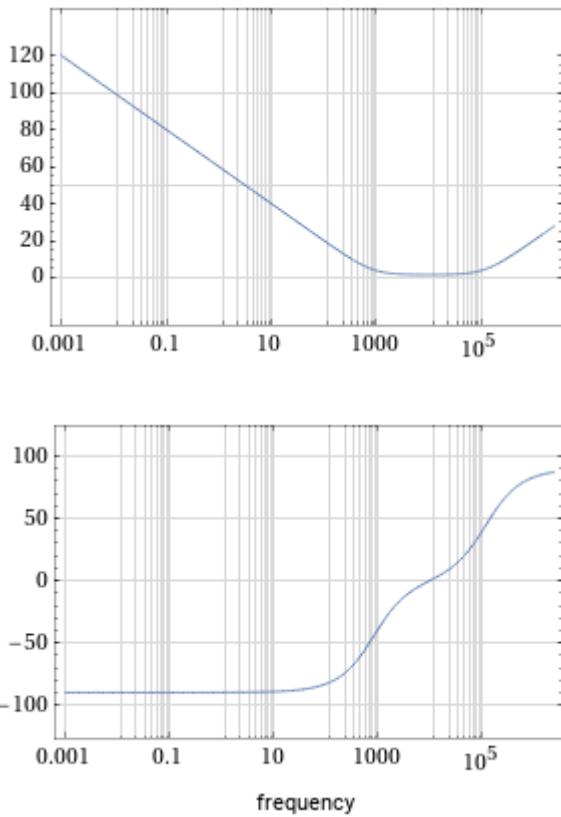
חיבור במקביל :

$$Z_4 = \frac{100k}{1 + 1n \times 100k \times S} = \left(\frac{1}{100k} + 1nS \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_+} = \frac{10k + \frac{1}{10nS}}{\left(\frac{1}{100k} + 1nS \right)^{-1}} + 1 =$$

$$= \frac{S^2 + 120kS + 100Meg}{100kS}$$

זהו מימוש של מסנן Band Stop Filter, נראה זאת על ידי עוקום בוודה שמציג את הקטבים והאפסים :



גרף עליון אמפליטודה [dB] גרף תחתון פאזה [degrees]. נוצר על ידי *Wolfram alpha**.

סעיף ב'

כמעגל מחזורי, נשתמש בקריטריון ברקאהוון לקביעת תנאי הפעולה.

$$A = 1 + \frac{5k}{1k} = 6 > 1$$

$$\beta(S = j\omega) = \frac{100kj\omega}{-\omega^2 + 120kj\omega + 100Meg}$$

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow$$

$$(\beta \times A)(f) = \frac{1200\pi kjf}{-4\pi^2 f^2 + 220\pi kjf + 100Meg}$$

תדר התהודה מתקיים באיפוס החלק הממשי של המכנה

$$-4\pi^2 f^2 + 100Meg = 0$$

$$f \approx 1592 [\text{Hz}] \Rightarrow T \approx 628 [\mu\text{s}]$$

בתדר זה יש לשים לב כי הקריטריון לא מתקיים משום ש-

$$|(\beta \times A)(f)| = \frac{1200\pi k \times 1592}{\sqrt{(100Meg - 4\pi^2 \times 1592^2)^2 + (220\pi k \times 1592)^2}} > 1$$

העובדת שקיבלנו ערך גדול מ-1 מעידה על הגעה למתחי האספקות (בנהנזה ומדובר במוגבר *rail-to-rail*) כ"מעגל לא יציב".

