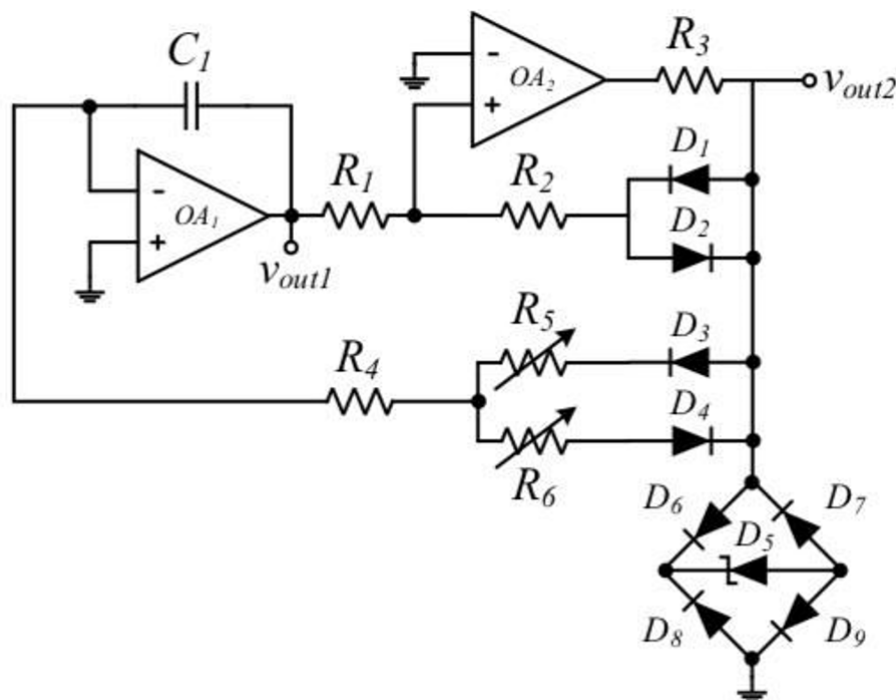


עבודה מסכמת בקורס מעגלים אלקטרוניים אנלוגיים 2024

מגיש: מייסון נפתל

שאלה 1



סעיף א'

המעגל המוצג משמש כמחולל אותות אלקטרוני, המסוגל לייצר שני סוגי אותות: אותות ריבועיים ואותות משולשים. תפקודו מבוסס על שילוב של מגברים מבצעים (Operational Amplifiers - OAs), דיודות, נגדים ופוטנציומטרים.

תיאור תפקוד הרכיבים:

1. מגבר מבצעי - OA1 אינטגרטור:

- **תפקיד:** המגבר OA1 משמש כאינטגרטור. הוא מקבל כאות כניסה אות ריבועי מתחלף בסימנו (חיובי ושלילי) ומייצר במוצאו V_{out1} אות משולש סביב מתח אפס.
- **מנגנון הפעולה:** האינטגרציה של אות ריבועי גורמת לשינוי ליניארי במתח המוצא, וכתוצאה מכך מתקבל אות משולש.

2. דיודות (לא אלו שבענף התחתון):

- **תפקיד:** הדיודות במעגל משמשות למנגנון פריקה של מוצא האינטגרטור. הן מאפשרות זרימה חד כיוונית של זרם, ומאפשרות פריקה ליניארית של הקבל המחובר למגבר OA1.
- **מנגנון הפעולה:** כאשר האינטגרטור טוען את הקבל, הזרם זורם דרך הדיודה בכיוון אחד, ומאפשר פריקה. כאשר האינטגרטור פורק את הקבל, הזרם זורם בכיוון ההפוך, ומאפשר טעינה. כיוון הדיודות קובע את כיוון הזרם, וערכי הנגדים בטור לדיודות קובעים את קצב הפריקה והטעינה.

3. מגבר מבצעי - OA2 משווה שמיט טריגר:

- **תפקיד:** המגבר OA2 משמש כמשו (Comparator) מסוג שמיט טריגר. הוא משווה את מתח הכניסה שלו למתח ייחוס קבוע ומייצר במוצאו V_{out2} את ריבועי.
- **מנגנון הפעולה:** כאשר מתח הכניסה עובר את סף ההשוואה, המוצא של המשווה משתנה באופן היסטריזי, ומייצר את ריבועי בעל מחזור עבודה (Duty Cycle) קבוע.

4. פוטנציומטרים R5 ו-R6-

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

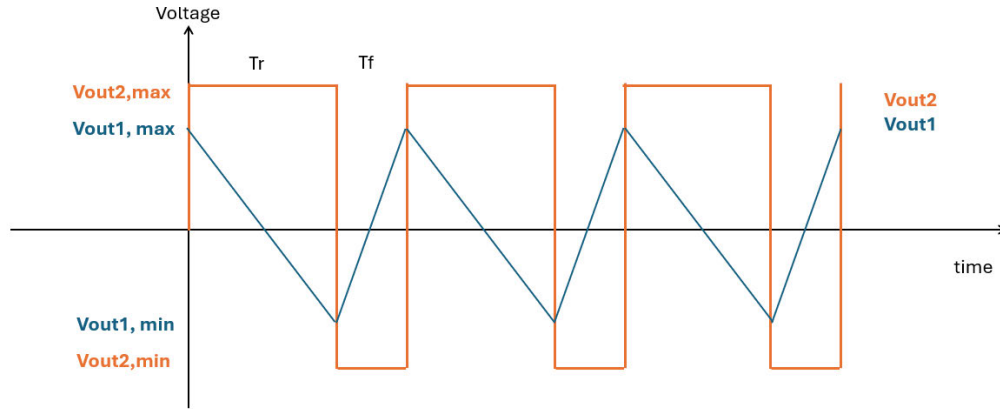
5. נגדים בענף הכניסה השלילי של OA1:

- **תפקיד:** הנגדים בענף הכניסה השלילי של OA1 יחד עם הקבל המחובר אליו, קובעים את תדר האותות הריבועיים.
- **מנגנון הפעולה:** ערך ההתנגדות של הנגדים משפיע על קבוע הזמן של מעגל ה-RC וכתוצאה מכך משפיע על תדר התנודות של המעגל.

6. גשר דיודות ודיודת זנר:

- **תפקיד:** גשר הדיודות ממיר את הזרם לזרם ישר, ודיודת הזנר מבטיחה כי הזרם יזרום רק בכיוון ההפוך (Reverse Current) לאחר מעבר סף מתח מסוים.
- **מנגנון הפעולה:** גשר הדיודות מבטיח כי הזרם יזרום תמיד באותו כיוון, ללא תלות בכיוון המתח. דיודת הזנר פועלת כווסת מתח, ומבטיחה 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:

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

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

סעיף ג'

נציב 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 יחסי נגדים :

$$\begin{aligned} V_{out1, max} &= \frac{-R1(V_{D(on)2} - V_{ZD5} - V_{D(on),7} - V_{D(on),8})}{R2} = \\ &= \frac{-R1(0.7 - 3.6 - 0.7 - 0.7)}{R2} = 5[V] \\ \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} &= \frac{5}{4.3} \end{aligned}$$

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

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

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

נציב בתוצאות הסעיף הקודם :

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

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

ניבחר קבל בערך טיפוסי של $C = 1 [nF]$ ונגד $R_4 = 10 [k\Omega]$ אז טווח ההתנגדויות הנדרש מהפוטנציומטר R_5 הוא :

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

חישוב דומה :

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

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

חישוב ערך הנגד R_3 :

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

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

שאלה 2

על פי מספר תעודת הזהות שלי:

תדר האות הנושא 31 MHz

תדר סינוס המידע 30 kHz

המידול המתמטי של אות סינוסי מקודד 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 דרישה לאמפליטודה זו, לכן נבחר $A_c = 1$ ☐

f_c הוא תדר האות הנושא 31MHz ☐

f_m הוא תדר סינוס המידע 30kHz ☐

β הוא אינדקס המודולציה, מדד לכמות הסטיה בתדר הנושא, אין בתרגיל דרישה לאינדקס זה, לכן ☐

ניקח מספר טיפיקלי עבור מערכות wideband FM של $\beta = 2.5$

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

סעיף א'

קביעת תדר הקיטעון (-3db) של ה-LPF –

אמור לסנן את התדר הגבוה ולהשאיר מידע מהאות הרצוי, לכן נבחר

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

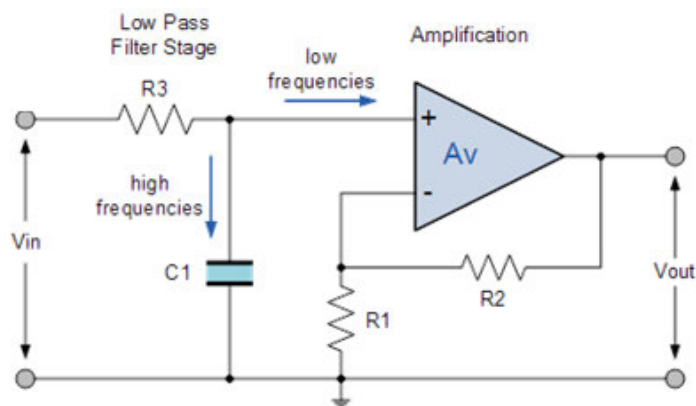
תדר הקטעון נבחר להיות פי 1.2 מהתדר המרבי של אות המידע על מנת להבטיח שכל רכיבי התדר של אות המידע יעברו דרך המסנן ללא הנחתה משמעותית.

קביעת תדר העבודה המרכזי של ה-VCO –

קרוב לתדר הנושא, לכן נבחר

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

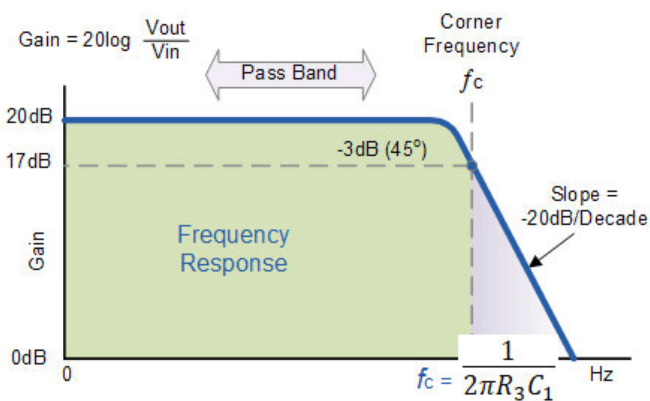
בממש LPF מסוג מסוג Active Low Pass Filter with Amplification



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

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

תמסורת LPF מסדר ראשון –



איורים מתוך - https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html

לכן נבחר

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

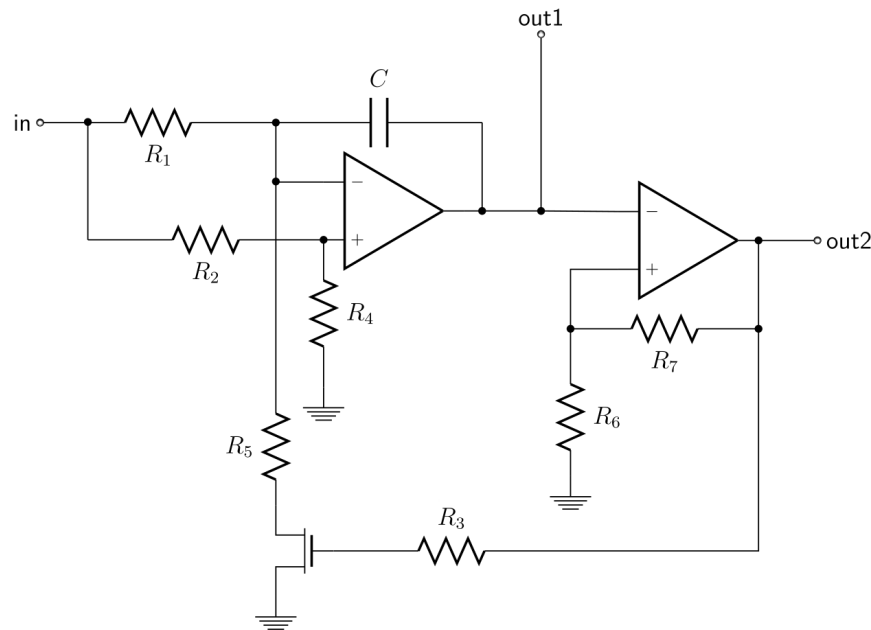
$$\Rightarrow f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} = \frac{1}{2\pi 5k900p} = 35.38 \text{ kHz} \approx 36 \text{ kHz}$$

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

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

מעגל ה-VCO:

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

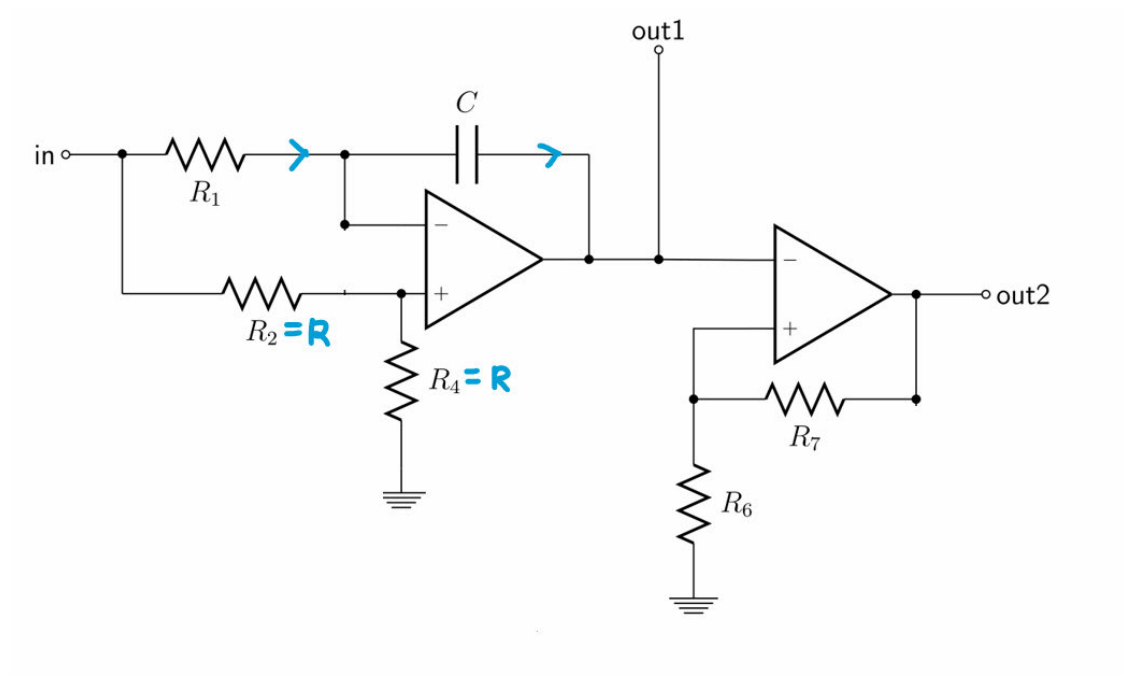


המגבר הימני משמש כמשווה, המגבר השמאלי משמש כאינטגרטור על אות הכניסה V_{in} שהוא האות שמגיע ממעגל ה-LPF שהוצג לעיל. אל האינטגרטור מחובר נגד R_5 שמחובר לטרנזיסטור המשמש כמתג. כאשר המתג פתוח, אז הקבל נטען. כאשר המתג סגור, וגם הזרם שעובר במתג גדול מהזרם על הקבל – זוהי פריקה כלומר האות משנה את שיפועו. התהליך חוזר על עצמו כאשר הזרם במתג שוב קטן מהזרם על הקבל והמתג נפתח. בכך מתקבל אות מחזורי בתדר פרופורציוני לזרם הכניסה לקבל, כלומר למתח V_{in} .

מוצא האינטגרטור out1 הוא אות משולש מחזורי, ומוצא המשווה out2 הוא אות ריבועי מחזורי.

נבחר $R_{2,VCO} = R_{4,VCO}$

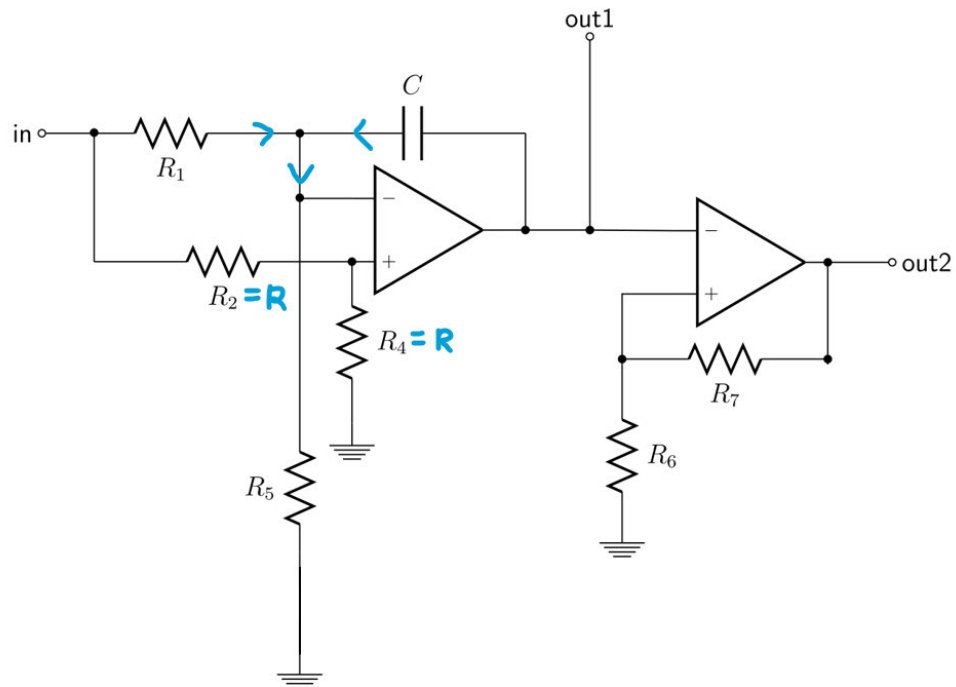
ניתוח המעגל במצב מפרסק פתוח:



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

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

ניתוח המעגל במצב מפקס סגור:



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

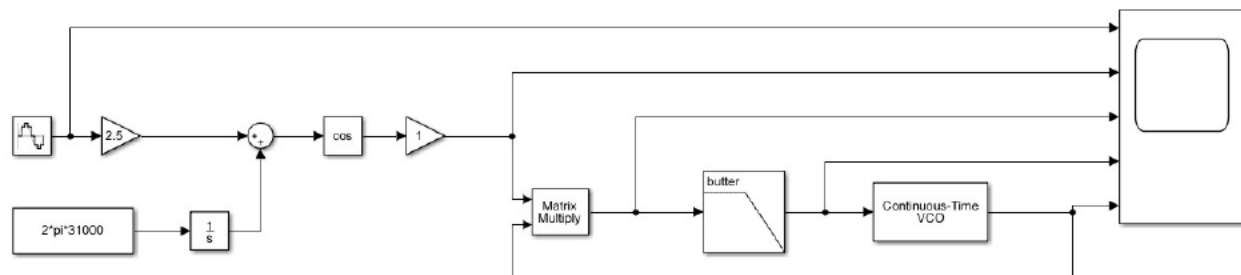
$$\Rightarrow V_{out,1} = \frac{1}{sC} \frac{V_{in}}{2} \left(\frac{1}{R_5} - \frac{1}{R_1} \right) + \frac{V_{in}}{2}$$

בשני המקרים, הנוסחא הרקורסיבית מגדירה את מוצא ה-VCO :

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

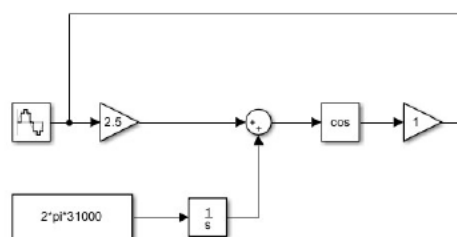
סעיף ג'

על מנת להציג את חילוף אות המידע בשרשת עיבוד האות PLL , יישמתי סימולציית $SIMULINK$ בהתאם לפרמטרים מסעיפים א'-ב'. להלן מבט-על על הסימולציה:



נחלק למקטעים ונסביר:

1. בלוק המודולציה:

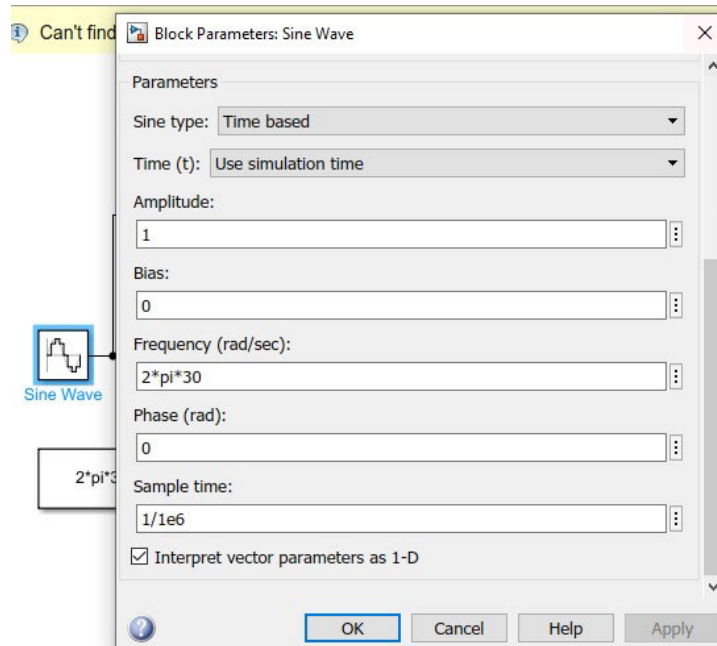


חלק זה אחראי על יצירת האות עם המודולציה:

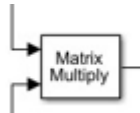
$$FM - MODULATED - SIGNAL = 1 \times \cos(2 \times \pi \times 31000 \times t + 2.5 \times \sin(2 \times \pi \times 30 \times t))$$

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

להלן הפרמטרים של בלוק יצירת הסינוס :

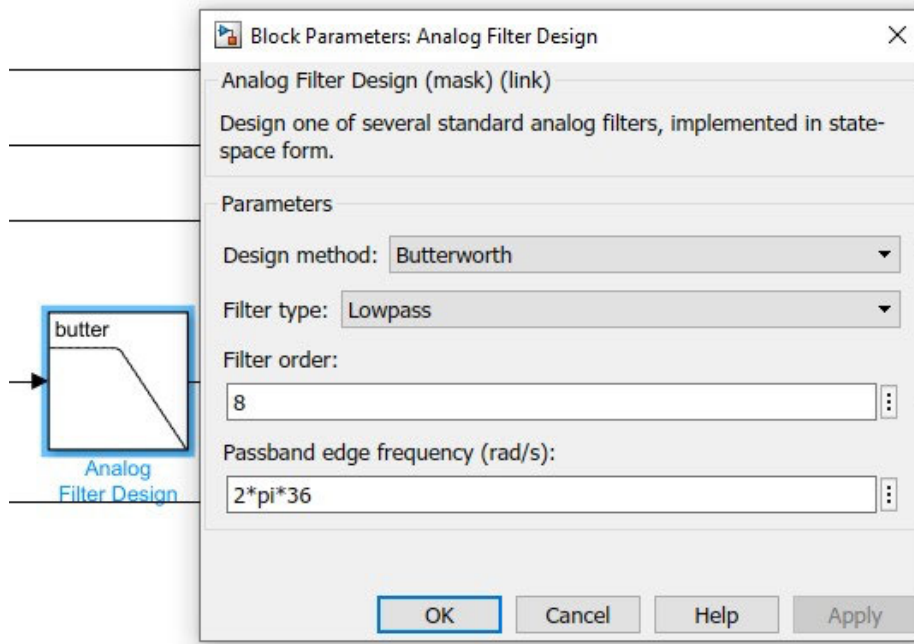


2. גלאי פאזה על ידי פעולת כפל –



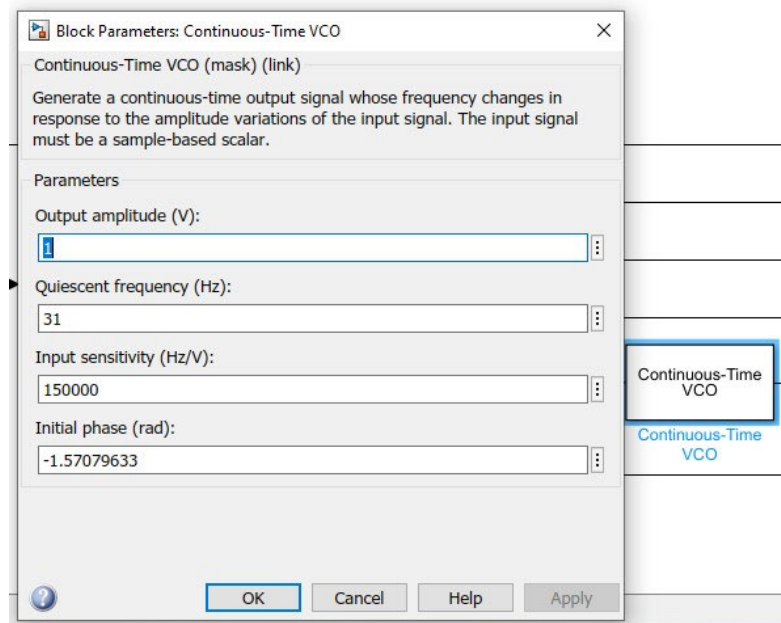
על פי זהות טריגונומטרית, כפל סינוסים מוליד איבר של הפרש הפאזות ואיבר נוסף של הסכום (בהמשך איבר הסכום יסונן).

3. מסנן אנלוגי –



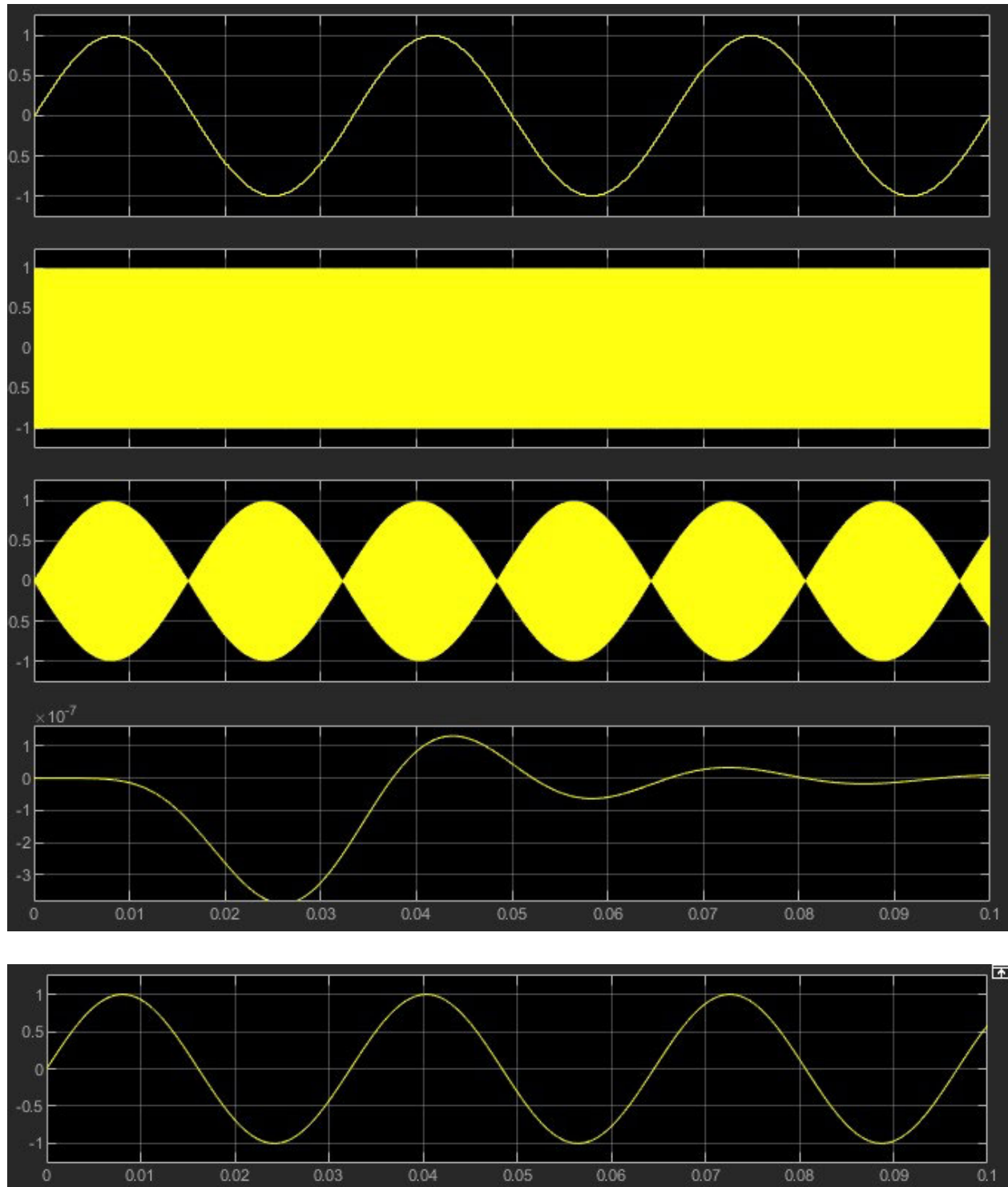
בהלימה למתואר בסעיף הקודם.

4. VCO –



עם תיקון פאזה של 90 מעלות.

להלן תוצאות הסימולציה כפי שניראים בסקופ המוצג באיור מבט העל:



תיאור הגרפים לפי הסדר: עליון - אות המידע הסינוסי לפני מודולציה, תשני - האות הסינוסי אחרי מודולציה גבוהה ב-3 סדרי גודל (לא ניתן להציג באותה סקאלה), תשלישי - *phase detector*, הרביעי - מוצא *LPF*, החמישי - האות ממוצא ה-*PLL* שהוא למעשה 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:

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

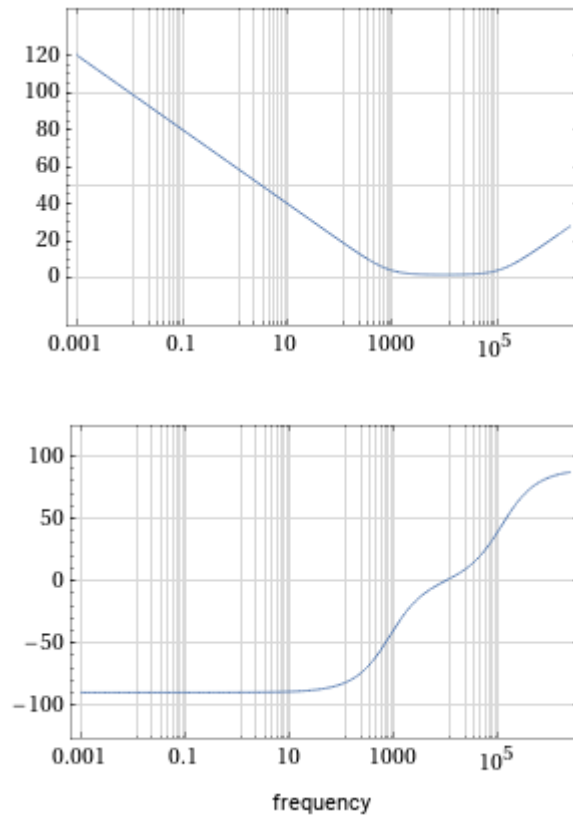
חיבור במקביל:

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

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

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

שהוא מימוש של מסנן Band Stop Filter, נראה זאת על ידי עקום בודה שמציג את הקטבים והאפסים:



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

סעיף ב'

כמעגל מחזורי, נשתמש בקריטריון ברקהאוזן לקביעת תנאי הפעולה.

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

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

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

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

תדר התהודה מתקבל באיפוס החלק הממשי של המכנה

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

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

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

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

העובדה שקיבלנו ערך גדול מ-1 מעידה על הגעה למתחי האספקות (בהנחה ומדובר במגבר *rail-to-rail*) כ"מעגל לא יציב".

