

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*ΣΥΝΘΕΣΗ*  
*ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ*

**ΕΡΓΑΣΙΑ #1**

*ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.*

**7<sup>ο</sup> ΕΞΑΜΗΝΟ**

**Όνομα : Παρδάλη Χριστίνα**

**A.E.M. : 9039**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020

## Περιεχόμενα

Εργασία #1 : Σχεδίαση Κατωδιαβατών φίλτρων.....	3
Α. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου .....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	5
• Ρύθμιση Κέρδους.....	5
Β. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	7
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	11

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

## Εργασία #1 : Σχεδίαση Κατωδιαβατών φίλτρων

### ΚΑΤΩΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ BUTTERWORTH

Να σχεδιασθεί ένα κατωδιαβατό φίλτρο Butterworth το οποίο να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές συχνότητας και απόσβεσης :

$$f_p = 3 \text{ KHz} \quad f_s = 6 \text{ KHz}$$

και

$$a_{\max} = 0.6 \text{ dB} \quad a_{\min} = 19.5 \text{ dB}$$

#### A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

##### • Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

Στο πλαίσιο της διαδικασίας σχεδίασης θα πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου που απαιτείται. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο :

$$n = \frac{\log \left[ \left( 10^{\left( \frac{a_{\min}}{10} \right)} - 1 \right) / \left( 10^{\left( \frac{a_{\max}}{10} \right)} - 1 \right) \right]}{2 \log \left( \frac{\omega_s}{\omega_p} \right)}$$

Θα μετατρέψουμε πρώτα τις συχνότητες  $f_p$  και  $f_s$  που δίνονται στην εκφώνηση στις αντίστοιχες κυκλικές άρα θα έχουμε :

$$\omega_p = 2\pi f_p = 18.850 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s = 37.699 \text{ rad/sec}$$

Μετά την αντικατάσταση των δεδομένων μας στον τύπο προκύπτει η τιμή  $n=4.6082$

Επειδή το  $n$  που προέκυψε δεν είναι μια ακέραια τιμή αλλά μια δεκαδική θα πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στην αμέσως μεγαλύτερη ακέραια. Δηλαδή ,

$$\underline{n = 5}$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την συχνότητα ημίσειας ισχύος από τον τύπο:

$$\omega_0 = \frac{\omega_p}{\left[10^{\frac{a_{max}}{10}} - 1\right]^{\frac{1}{2n}}}$$

Με τον τύπο που επιλέξαμε για τον υπολογισμό της συχνότητας ημίσειας ισχύος θα έχουμε  $\omega = \omega_s$ , δηλαδή οι προδιαγραφές στην συχνότητα αποκοπής υπερκαλύπτονται.

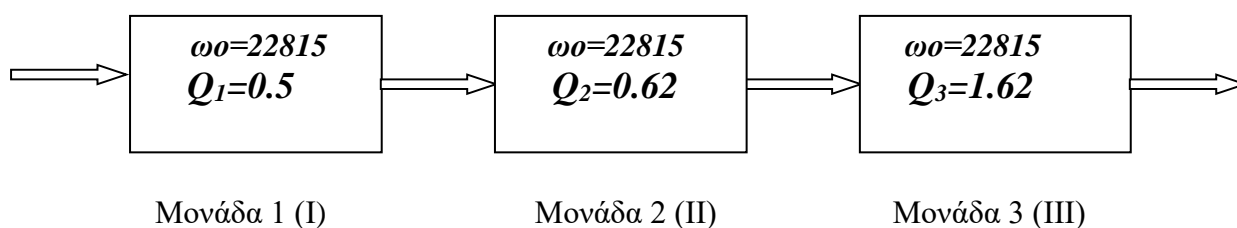
Έτσι λοιπόν έπειτα από αντικατάσταση στον τύπο θα έχουμε ότι η συχνότητα ημίσειας ισχύος  $\omega_0$  είναι :

$$\omega_0 = 22815 \text{ rad/sec}$$

Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς , οι γωνίες καθώς και τα αντίστοιχα  $Q$  των ριζών προκύπτουν από τις σημειώσεις του μαθήματος και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

$\psi_k$	$Q$	$p_k$
$0^\circ$	0.50	-1.0000
$\pm 36^\circ$	0.62	$0.8090 \pm j0.587$
$\pm 72^\circ$	1.62	$0.3090 \pm j0.950$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να υλοποιηθεί θα αποτελείται από 3 μονάδες οι οποίες και φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



## •Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Θα θεωρήσουμε προσωρινά  $\omega_0=1\text{rad/s}$  και θα υλοποιήσουμε τις κανονικοποιημένες μονάδες. Στην συνέχεια θα κάνουμε κλιμακοποίηση την συχνότητα με  $k_f=\omega_0=22815\text{rad/s}$  έτσι ώστε στο τέλος να υπολογίσουμε τις τιμές των πραγματικών στοιχείων.

Η πρώτη (I) μονάδα του φίλτρου είναι ένα κατωδιαβατό φίλτρο πρώτης τάξης , η υλοποίηση του οποίου φαίνεται παρακάτω. Η δεύτερη (II) και η τρίτη(III) μονάδα θα υλοποιηθούν με το κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key σύμφωνα με την στρατηγική 2. Ακολουθεί η ανάλυση της κάθε μονάδας του φίλτρου.

### ΜΟΝΑΔΑ 1 (I)

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κατωδιαβατό φίλτρο πρώτης τάξης, δηλαδή ένα φίλτρο RC και η συνάρτηση μεταφοράς του έχει έναν πραγματικό πόλο στο  $-1$ .

$$T_1(s) = \frac{p_1}{s+p_1} \text{ όπου } p_1 = -\frac{1}{RC} = -1 \text{ και } \omega_0 = 1 \text{ rad/s}$$

Τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος είναι λοιπόν  $R=C=1$  .

### Κλιμακοποίηση μονάδας 1 (I)

Εφόσον  $\omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$  επιλέγουμε  $k_f = \omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$ . Επιπλέον, με βάση την εκφώνηση θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας πυκνωτής με χωρητικότητα  $C_n = 0.01\mu\text{F}$ .

Με βάση τους τύπους κλιμακοποίησης έχουμε:

$$C_n = \frac{1}{k_f k_{m1}} = 10^{-8} \Rightarrow k_{m1} = \frac{1}{k_f * 10^{-8}} = 4383$$

Επομένως, οι τιμές των καινούριων στοιχείων είναι  $C_{11} = C_n \cdot C = 0.01\mu\text{F}$  και  $R_{11} = R \cdot k_{m1} = 4383\Omega$ .

### **ΜΟΝΑΔΑ 2 (II)**

Η μονάδα αυτή θα υλοποιηθεί με ένα κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key με βάση την στρατηγική 2. Στην στρατηγική αυτή έχουμε κέρδος ίσο με τη μονάδα και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}k_2 &= 1 \\R_{21} &= R_{22} = 1 \\C_{21} &= 2 \cdot Q_2 \\C_{22} &= \frac{1}{2 \cdot Q_2}\end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε ότι  $C_{21} = 1.24\text{F}$  και  $C_{22} = 0.8065\text{F}$ .

### **Κλιμακοποίηση μονάδας 2 (II)**

Εφόσον  $\omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$  επιλέγουμε  $k_f = \omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$ . Επιπλέον, με βάση την εκφώνηση θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας πυκνωτής με χωρητικότητα  $C_n = 0.01\mu\text{F}$ .

Με βάση τους τύπους κλιμακοποίησης έχουμε:

$$k_{m2} = \frac{C_{21}}{C_n \cdot k_f} = 5434.9$$

Επομένως, οι τιμές των πραγματικών στοιχείων είναι :

$$\begin{aligned}C_{21} &= C_n = 0.01\mu\text{F} \\C_{22} &= \frac{1}{k_f \cdot k_{m2}} \cdot C_{22} = 6.5036 \cdot 10^{-9}\text{F} \\R_{21} &= R_{21} = R_{21} \cdot k_{m2} = 5434.9\Omega\end{aligned}$$

### **ΜΟΝΑΔΑ 3 (III)**

Η μονάδα αυτή θα υλοποιηθεί με ένα κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key με βάση την στρατηγική 2. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με την μονάδα 2(II). Στην στρατηγική αυτή έχουμε κέρδος ίσο με τη μονάδα και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}k_2 &= 1 \\R_{31} &= R_{32} = 1 \\C_{31} &= 2 \cdot Q_3 \\C_{32} &= \frac{1}{2 \cdot Q_3}\end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε ότι  $C_{31} = 3.24F$  και  $C_{32} = 0.3086F$

### **Κλιμακοποίηση μονάδας 3 (III)**

Εφόσον  $\omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$  επιλέγουμε  $k_f = \omega_0 = 22815 \text{ rad/s}$ . Επιπλέον, με βάση την εκφώνηση θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας πυκνωτής με χωρητικότητα  $C_n = 0.01\mu F$ .

Με βάση τους τύπους κλιμακοποίησης έχουμε:

$$k_{m3} = \frac{C_{31}}{C_n \cdot k_f} = 14201$$

Επομένως, οι τιμές των πραγματικών στοιχείων είναι :

$$\begin{aligned}C_{31} &= C_n = 0.01\mu F \\C_{32} &= \frac{1}{k_f \cdot k_{m3}} \cdot C_{32} = 9.526 \cdot 10^{-10} F \\R_{31} &= R_{31} = R_{31} \cdot k_{m3} = 14201\Omega\end{aligned}$$

### **• Ρύθμιση Κέρδους**

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου να είναι 0dB. Έχοντας υλοποιήσει τις τρεις μονάδες παρατηρούμε ότι στη συχνότητα  $\omega_0$  έχουν όλες κέρδος 1, δηλαδή 0dB. Επομένως, το συνολικό κύκλωμα δρα σαν φίλτρο και όχι σαν ενισχυτής. Δεν χρειάζεται λοιπόν να γίνει κάποια περαιτέρω ρύθμιση κέρδους.

### Συναρτήσεις Μεταφοράς Μονάδων

1. Για την πρώτη μονάδα όπως είναι γνωστό η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_1(s) = \frac{\omega_0}{s + \omega_0} = \frac{22815}{s + 22815}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα που είναι Sallen-Key η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_2(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_2}s + \omega_0^2} = \frac{22815^2}{s^2 + \frac{22815}{0.62}s + 22815^2} = \frac{5.2055 \cdot 10^8}{s^2 + 36799s + 5.2055 \cdot 10^8}$$

3. Για την τρίτη μονάδα με παρόμοιο τρόπο η συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει :

$$T_2(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_2}s + \omega_0^2} = \frac{22815^2}{s^2 + \frac{22815}{1.62}s + 22815^2} = \frac{5.2055 \cdot 10^8}{s^2 + 14084s + 5.2055 \cdot 10^8}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του κατωδιαβατού φίλτρου είναι:

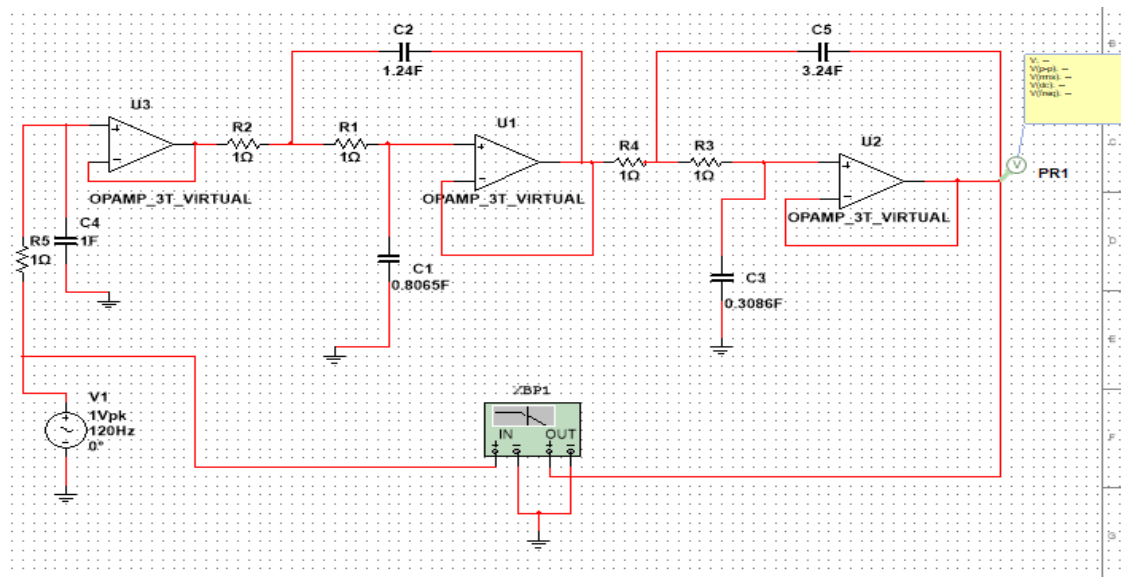
$$T_{LP}(s) = T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot T_3(s)$$

$$T_{LP}(s) = \frac{6.1823 \cdot 10^{21}}{s^5 + 73698s^4 + 2.7203 \cdot 10^9s^3 + 6.2064 \cdot 10^{13}s^2 + 8.7528 \cdot 10^{17}s + 6.1823 \cdot 10^{21}}$$

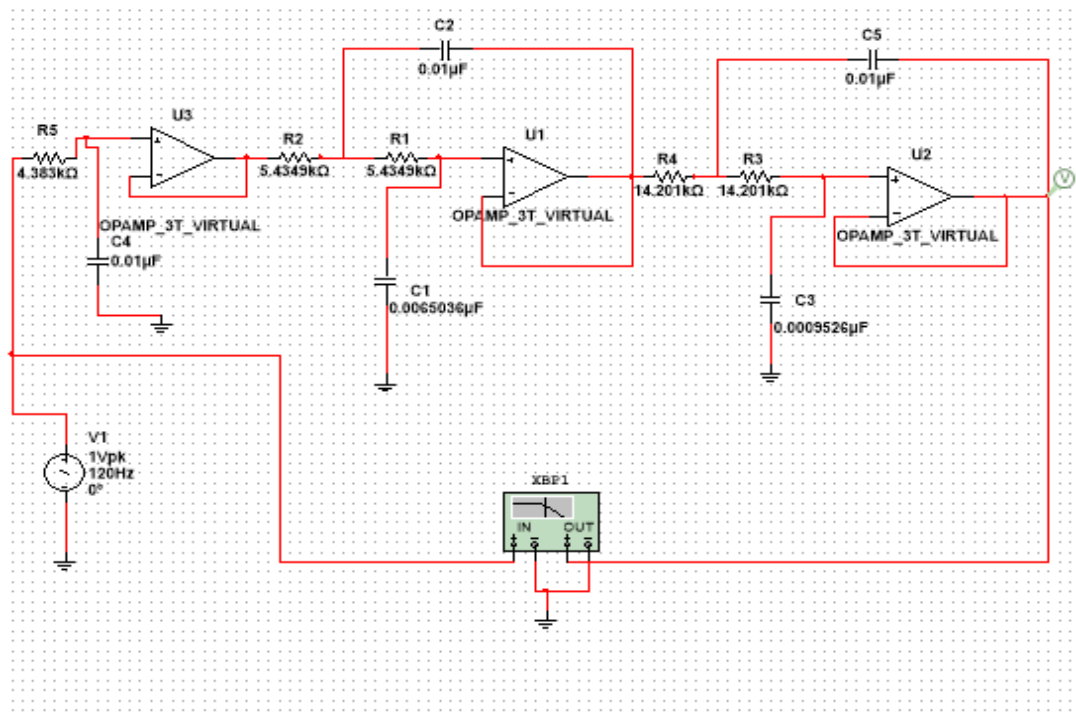
Δεν έχει τοποθετηθεί κάποιος συντελεστής k αφού δεν χρειάστηκε ρύθμιση κέρδους.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τρεις μονάδες.





Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό δηλαδή κατωδιαβατό φίλτρο Butterworth με ότι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.



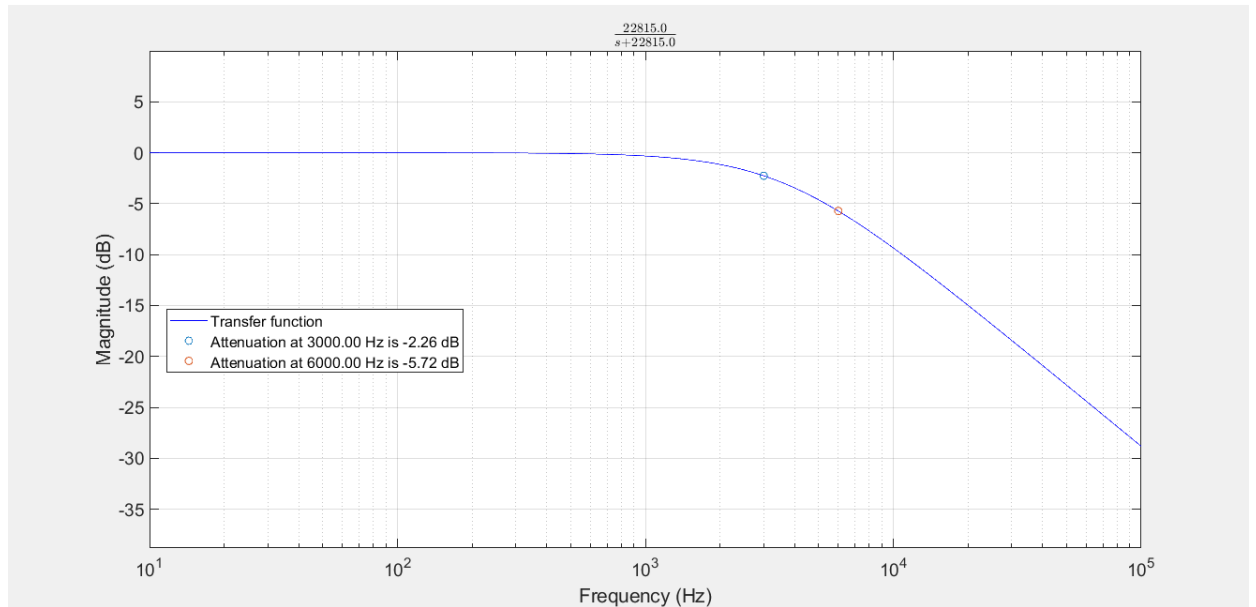
## B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

Εισάγουμε στο πρόγραμμα MATLAB τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των τριών μονάδων αλλά και την συνολική συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου και παίρνουμε τις αποκρίσεις πλάτους σε dB.

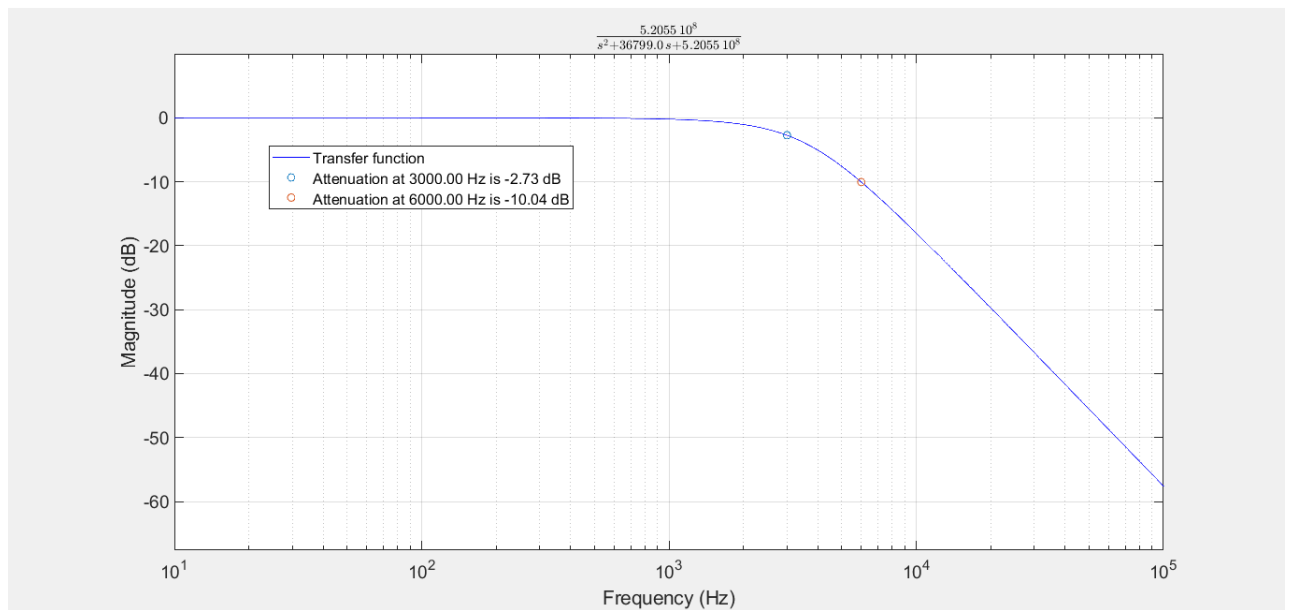
Η απόκριση πλάτους σε dB για την πρώτη, την δεύτερη και την τρίτη μονάδα φαίνονται στις επόμενες σελίδες.

Τα παρακάτω διαγράμματα προέκυψαν στο Matlab χρησιμοποιώντας την παρεχόμενη συνάρτηση `plot_transfer_function.m` με όρισμα κάθε φορά την συνάρτηση μεταφοράς των επί μέρους συστημάτων, καθώς και τις κρίσιμες συχνότητες αυτών.

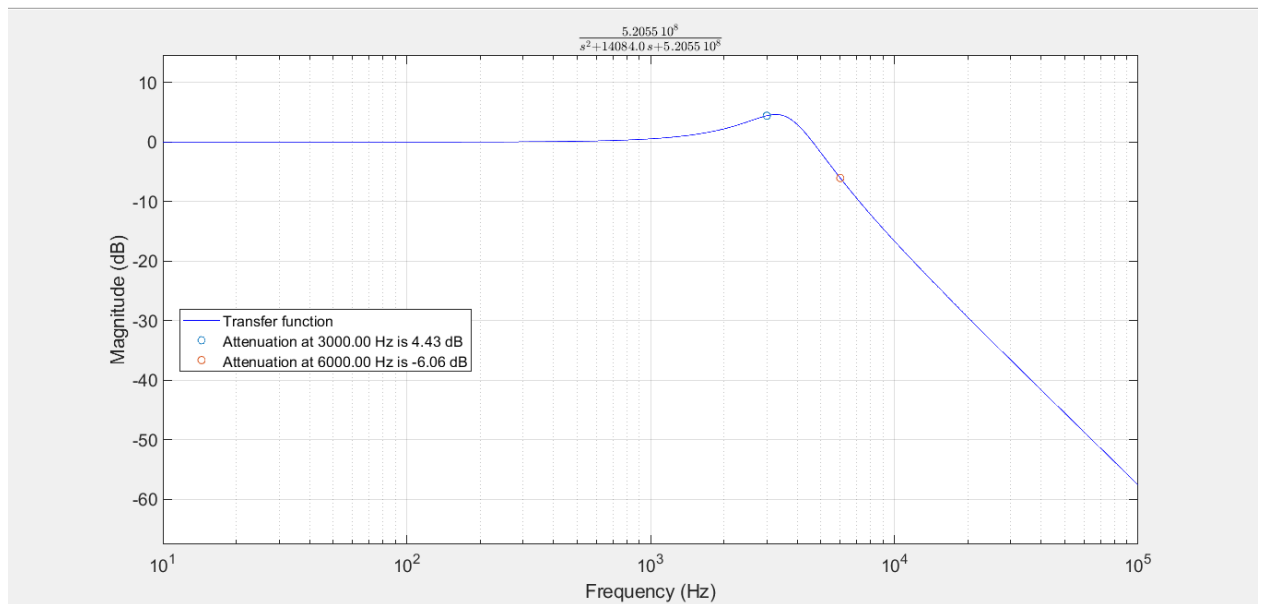
1<sup>η</sup> Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο πρώτης τάξης



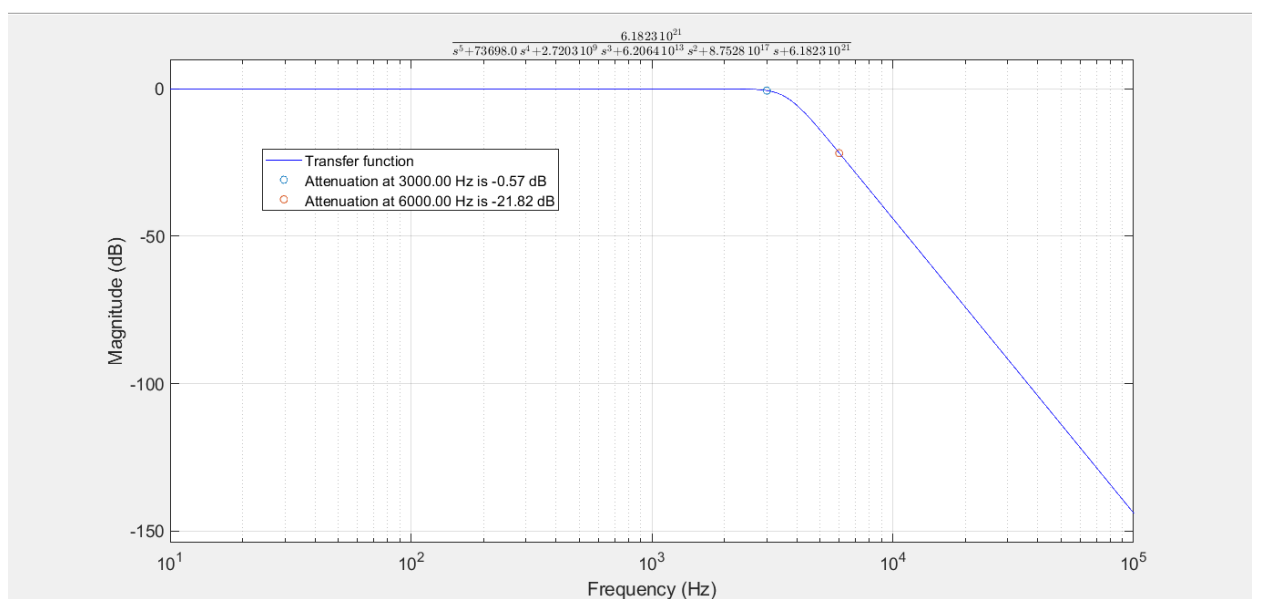
## 2<sup>η</sup> Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



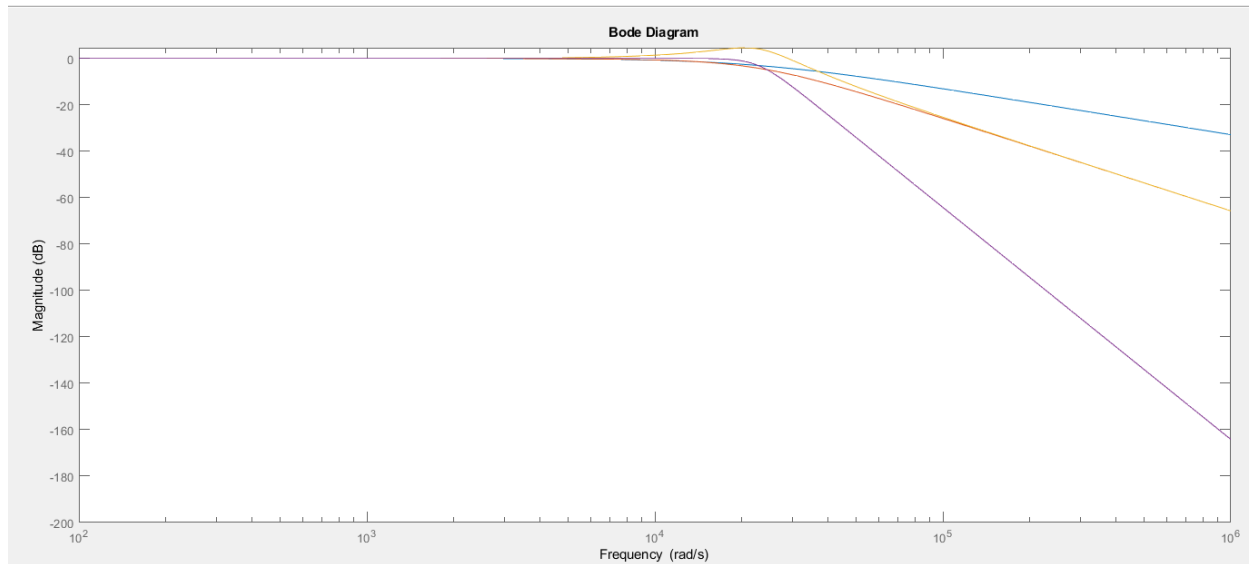
## 3<sup>η</sup> Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



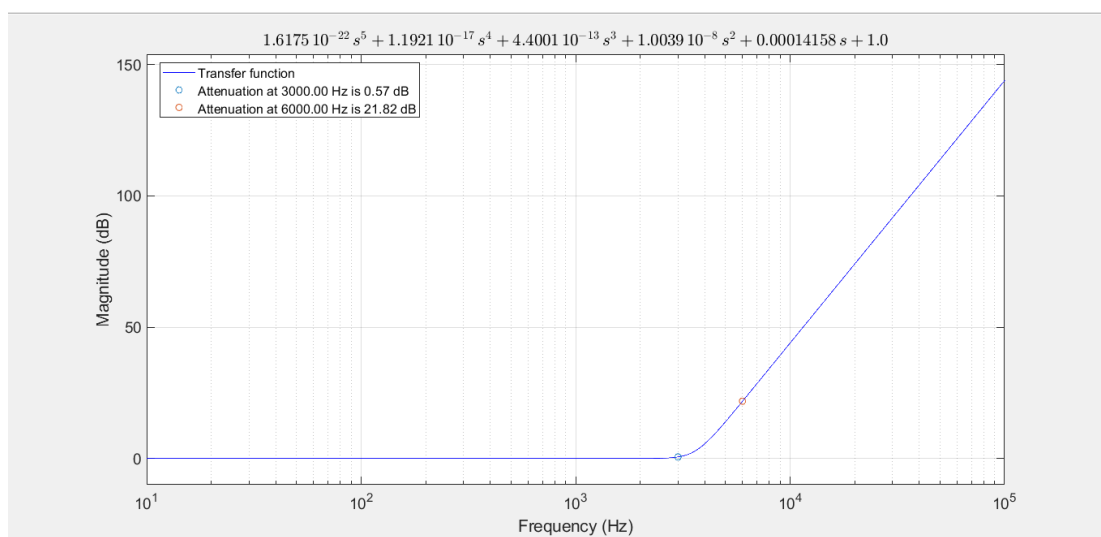
Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας με χρήση της συνάρτησης `plot_transfer_function`.



Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε όλες τις παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode. Η  $T_1$  αντιστοιχεί στο γαλάζιο χρώμα, η  $T_2$  στο κόκκινο, η  $T_3$  στο πορτοκαλί και η συνολική  $T_{lp}$  του φίλτρου στο μωβ.



Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dB της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας.



Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και αποκοπής , δηλαδή την  $f_p=3\text{kHz}$  και την  $f_s=6\text{kHz}$ , καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις.

Παρατηρούμε ότι η απόκριση στη συχνότητα  $f_p=3\text{kHz}$  είναι  $0.57\text{dB}$  .Άρα τηρείται η προδιαγραφή του φίλτρου που θέλει  $a_{\text{max}}=0.6\text{dB}$  αφού  $0.57<0.6$ .

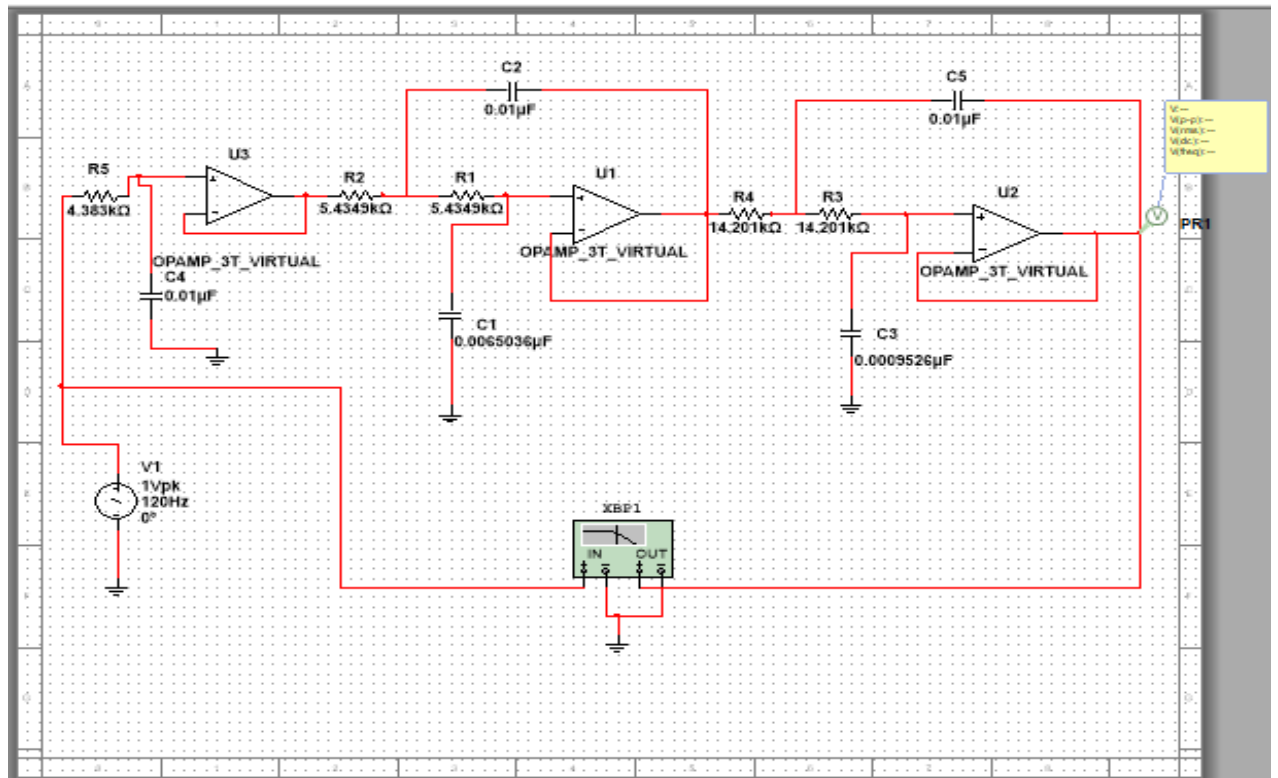
Αντίστοιχα, στην συχνότητα  $f_s=6\text{kHz}$  η απόκριση είναι  $21.82\text{dB}$ . Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ,εμείς επιθυμούμε  $a_{\text{min}}=19.5\text{dB}$  άρα και πάλι καλύπτεται η προδιαγραφή αφού  $21.82>19.5$ .

Επομένως, το φίλτρο ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

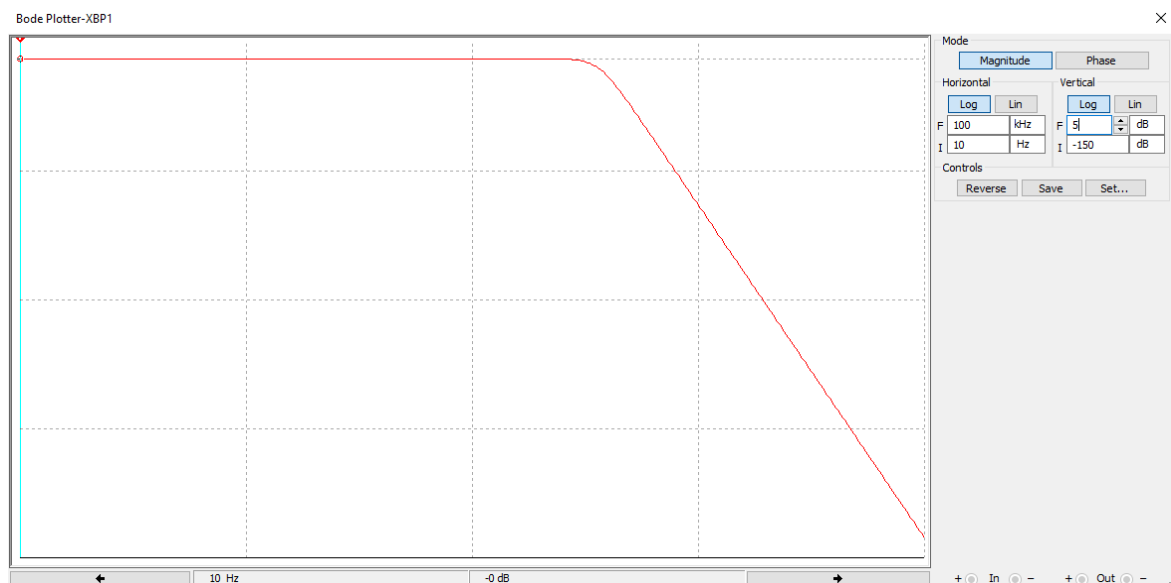
Εφόσον το κέρδος του φίλτρου είναι με βάση την παραπάνω ανάλυση  $0\text{ dB}$ , δεν υπάρχει κάποιο άλλο διάγραμμα που να μας δίνει περισσότερες πληροφορίες.

### Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM

Σχεδιάζουμε το κύκλωμα μας στο ElectronicWorkBench (MULTISIM) προκειμένου να ελέγξουμε αν υλοποιεί την συνολική συνάρτηση μεταφοράς που αναλύθηκε στο προηγούμενο στάδιο της εργασίας αλλά και για να διερευνήσουμε την απόκριση του φίλτρου όταν αυτό διεγείρεται από ένα στοιχειώδες περιοδικό σήμα. Εισάγουμε λοιπόν τις τρεις μονάδες του φίλτρου που έχουν σχεδιασθεί στην προηγούμενη φάση της εργασίας στο περιβάλλον MULTISIM και παίρνουμε το παρακάτω κύκλωμα.



- Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει χρησιμοποιούμε τον Bode-Plotter για να προκύψει η απόκριση συχνότητας του φίλτρου-κυκλώματος. Το διάγραμμα που παίρνουμε φαίνεται παρακάτω :

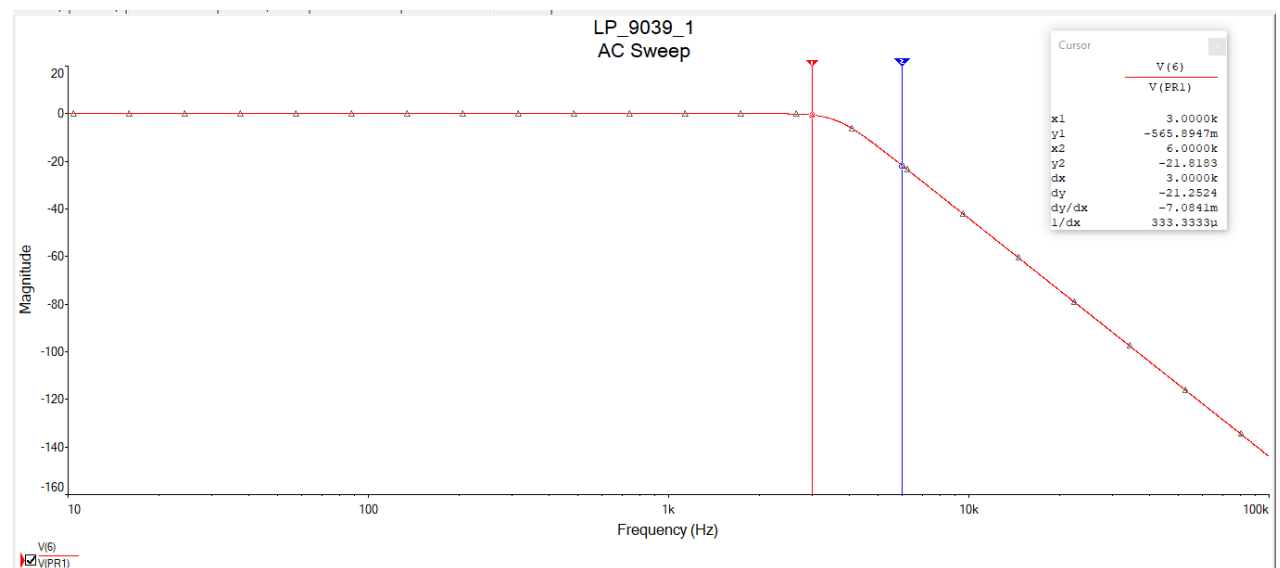


Έχουμε ρυθμίσει το εύρος συχνοτήτων στο ίδιο διάστημα που προέκυψε από το Matlab για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το διάγραμμα που προκύπτει επιβεβαιώνει την μορφή ενός χαμηλοπερατού φίλτρου Butterworth που έχει κέρδος 0dB.

Για αναλυτικότερη επαλήθευση τήρησης των προδιαγραφών θα χρησιμοποιήσουμε AC Analysis όπου με τους κέρσορες θα έχουμε την ακριβή τιμή των μεταβλητών.

Το παρακάτω διάγραμμα του Multisim απεικονίζει ό,τι ακριβώς και το προηγούμενο αλλά με δυνατότητα ανάγνωσης των τιμών.



Πραγματοποιούμε την ίδια ανάλυση με αυτή του Matlab για να επιβεβαιώσουμε την τήρηση των προδιαγραφών.

Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και αποκοπής, δηλαδή την  $f_p=3\text{kHz}$  και την  $f_s=6\text{kHz}$ , καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις.

Παρατηρούμε ότι η απόκριση στη συχνότητα  $f_p=3\text{kHz}$  είναι 0.565dB. Άρα τηρείται η προδιαγραφή του φίλτρου που θέλει  $a_{\max}=0.6\text{dB}$  αφού  $0.565 < 0.6$ .

Αντίστοιχα, στην συχνότητα  $f_s=6\text{kHz}$  η απόκριση είναι 21.81dB. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, εμείς επιθυμούμε  $a_{\min}=19.5\text{dB}$  άρα και πάλι καλύπτεται η προδιαγραφή αφού  $21.81 > 19.5$ .

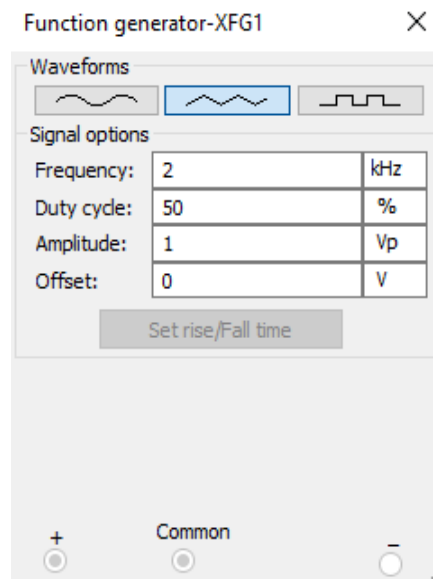
Επομένως, το φίλτρο ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Οι αποκλίσεις που υπάρχουν από τα αποτελέσματα του Matlab είναι πάρα πολύ μικρές και για αυτό θεωρούνται αμελητέες.



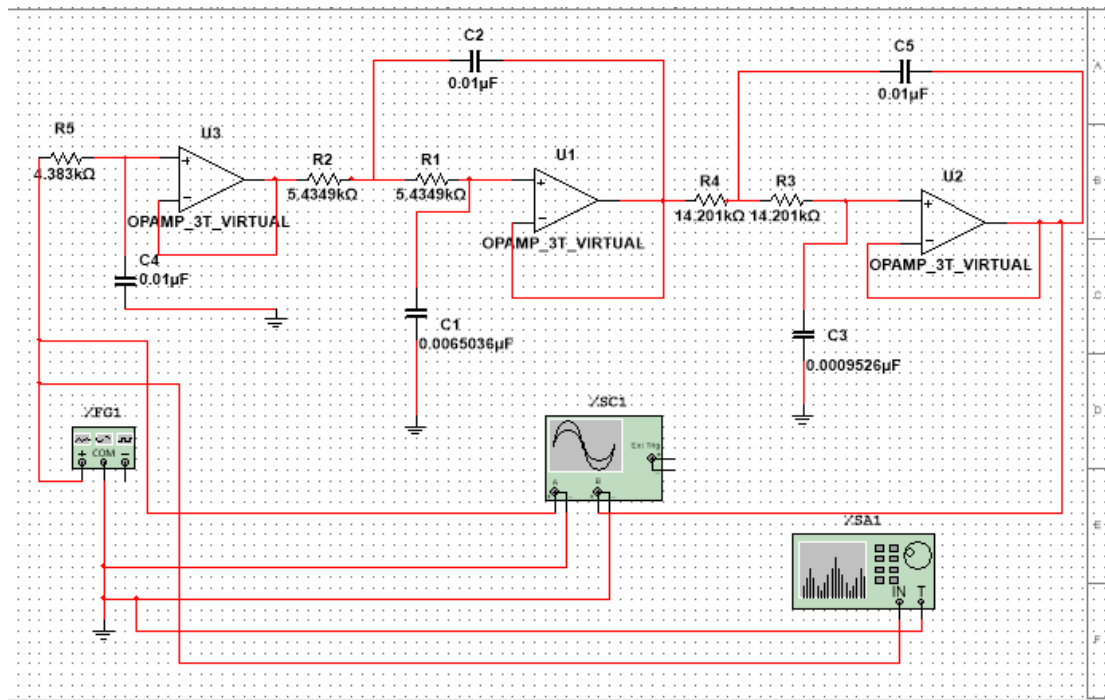
### Διέγερση με τριγωνικό σήμα

Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα μια πηγή διέγερσης τριγωνικού περιοδικού σήματος με θεμελιώδη συχνότητα 2kHz.

Για την δημιουργία του τριγωνικού σήματος χρησιμοποιούμε την επιλογή Function Generator με τα παρακάτω χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στην εικόνα:

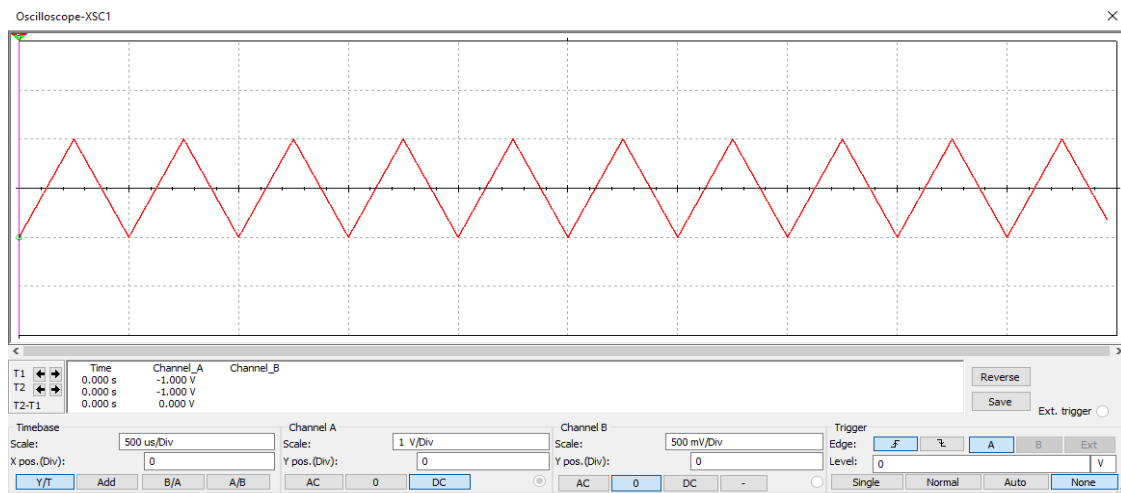


Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των σημάτων εισόδου και εξόδου είναι η παρακάτω:

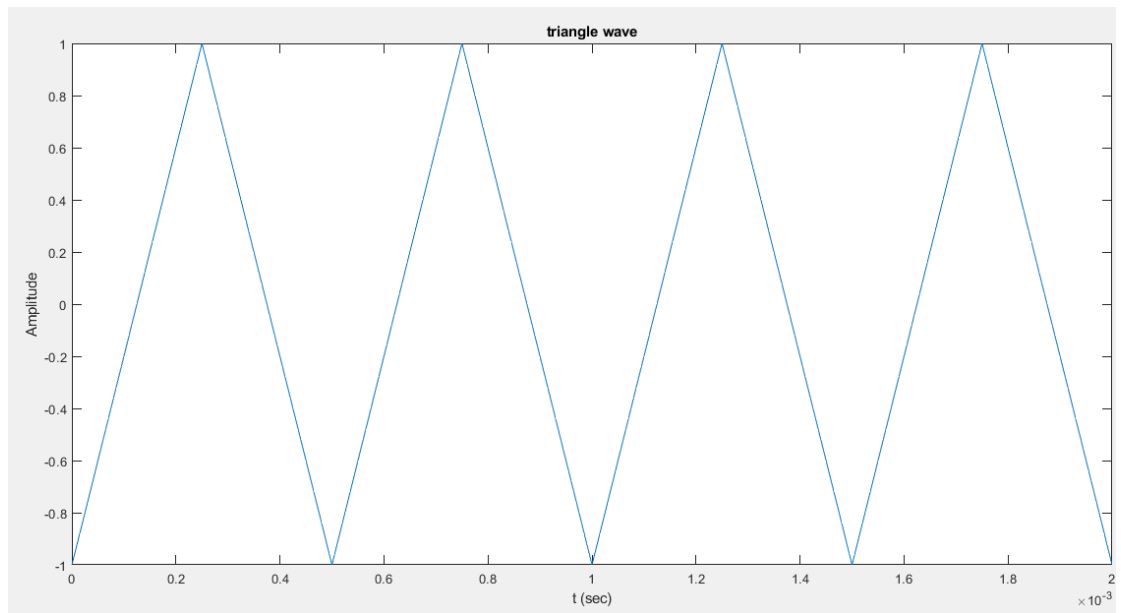


Τα σήματα που προκύπτουν είναι:

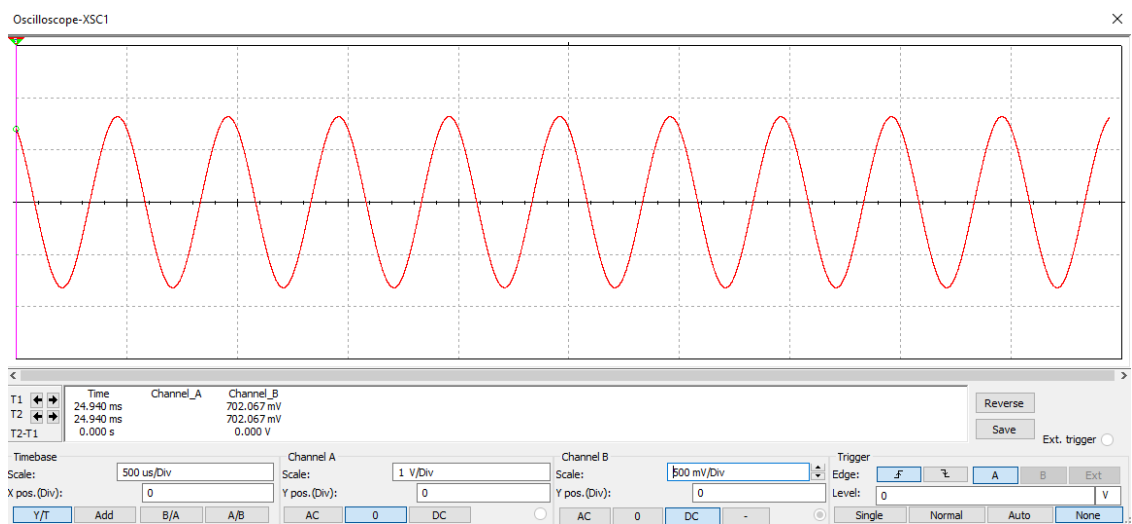
Σήμα εισόδου Multisim:



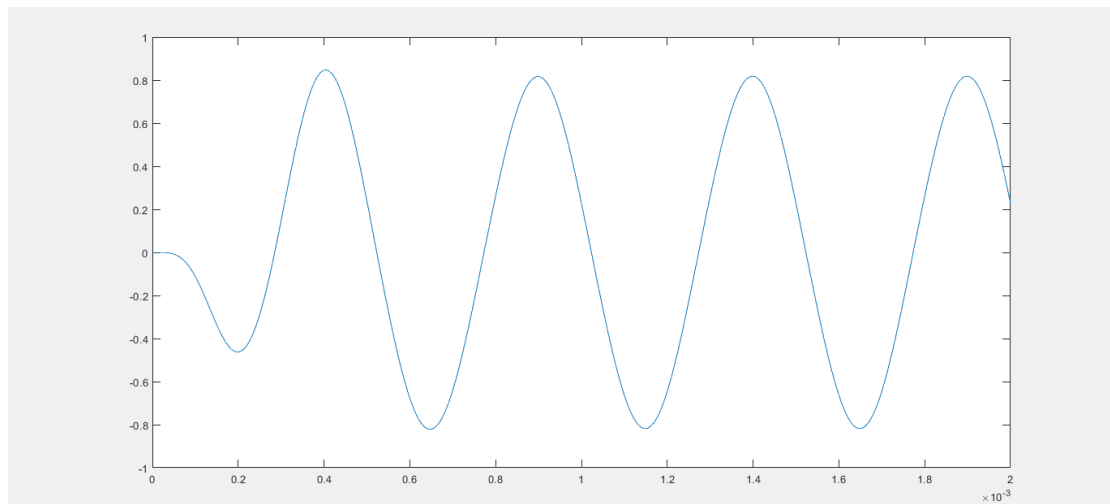
Σήμα εισόδου Matlab:



### Σήμα εξόδου Multisim:



### Σήμα εξόδου Matlab:



Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου όπου φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων από Matlab και Multisim ταυτίζονται.

Και στα τρία σχήματα του Multisim φαίνονται οι επιλογές που κάναμε στον παλμογράφο για να προκύψουν οι αντίστοιχες παραστάσεις (για παράδειγμα: 1V/Div , 500us/Div ).

Τηρείται όπως φαίνεται η προδιαγραφή για κέρδος 0dB.

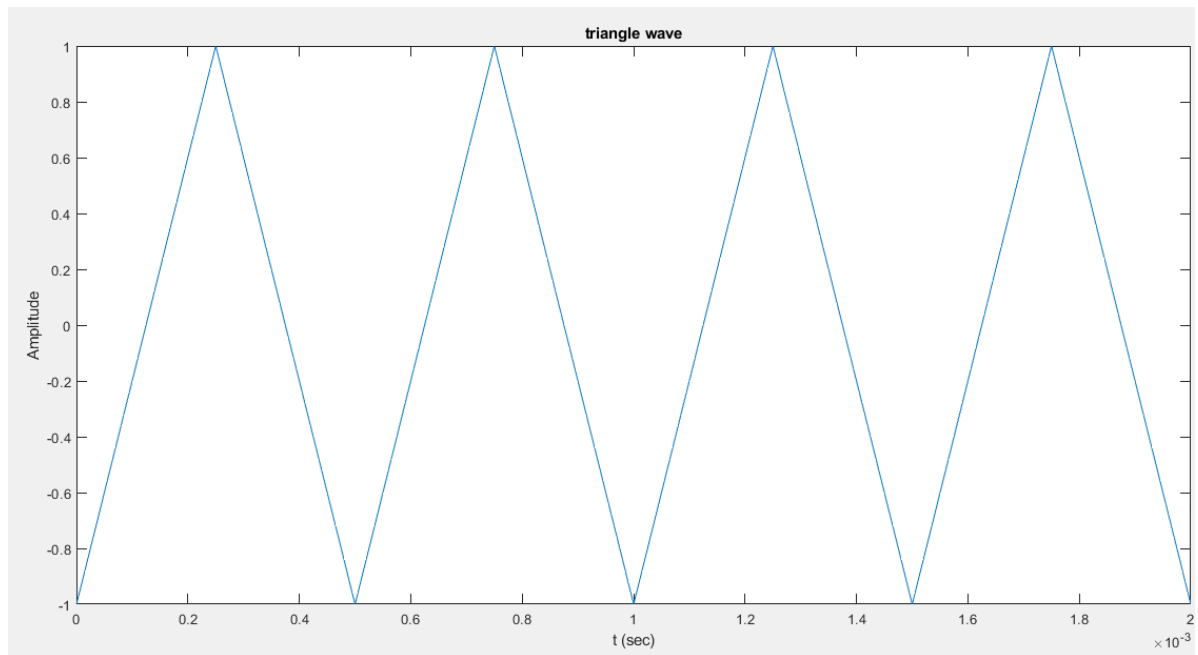
Η μελέτη των φασμάτων στη συνέχεια θα μας δώσει περισσότερα στοιχεία.

### **Σχεδίαση φασμάτων-Ανάλυση Fourier**

Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του κατωδιαβατού φίλτρου Butterworth. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα εξετάσουμε τα φάσματα τόσο στο Multisim όσο και στο Matlab. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα.

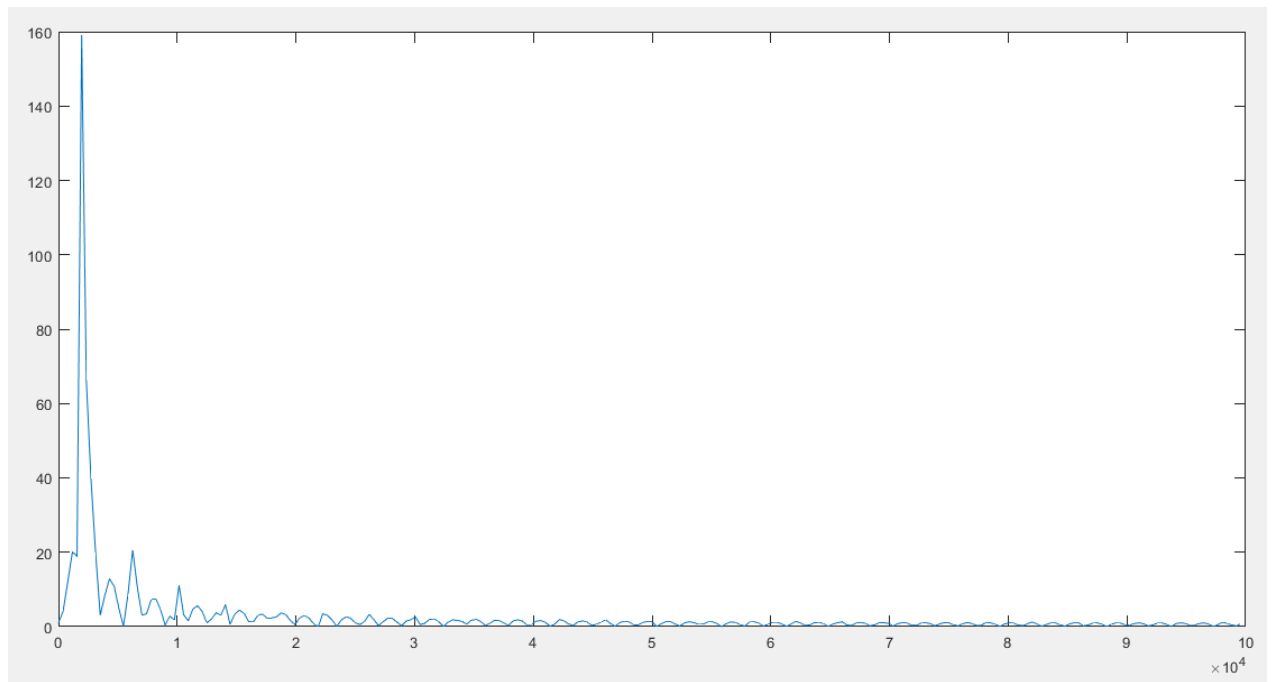
Στο Multisim για την δημιουργία των φασμάτων θα χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο Spectrum Analyser

Το τριγωνικό σήμα που δίνουμε ως είσοδο είναι στο πεδίο του χρόνου(ανάλυση Matlab):

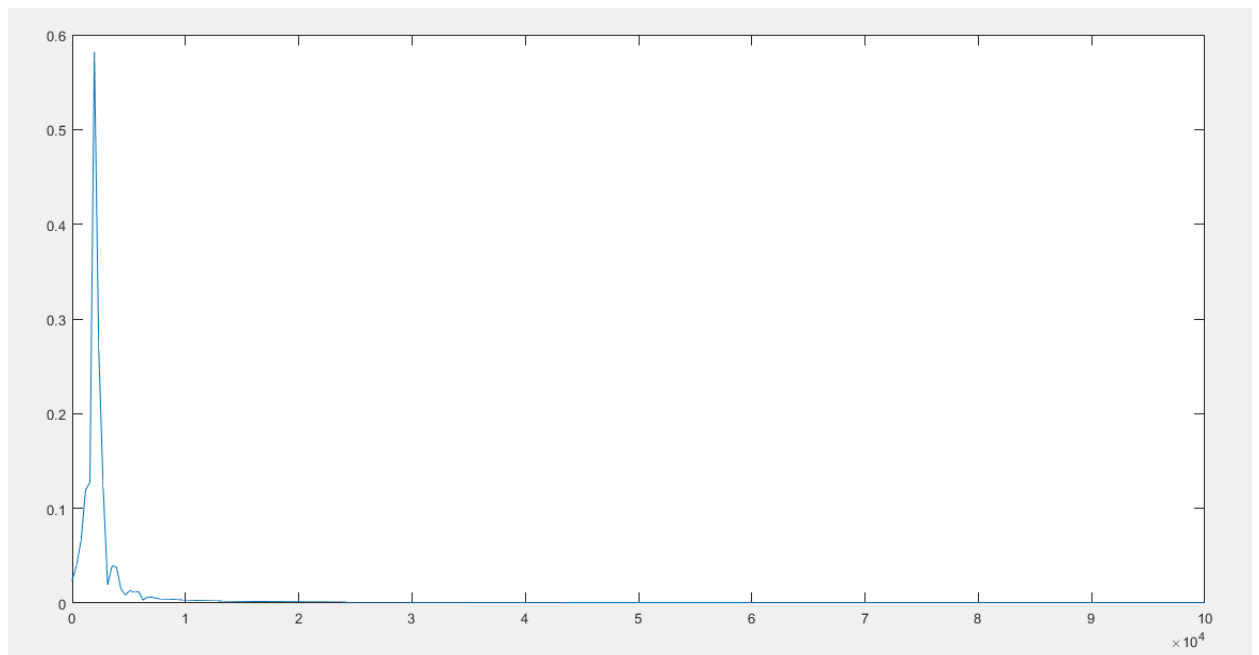


Κατά συνέπεια, στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε τα φάσματα FOURIER που προέρχονται από την FFT και τα οποία θα σχολιάσουμε στην συνέχεια.

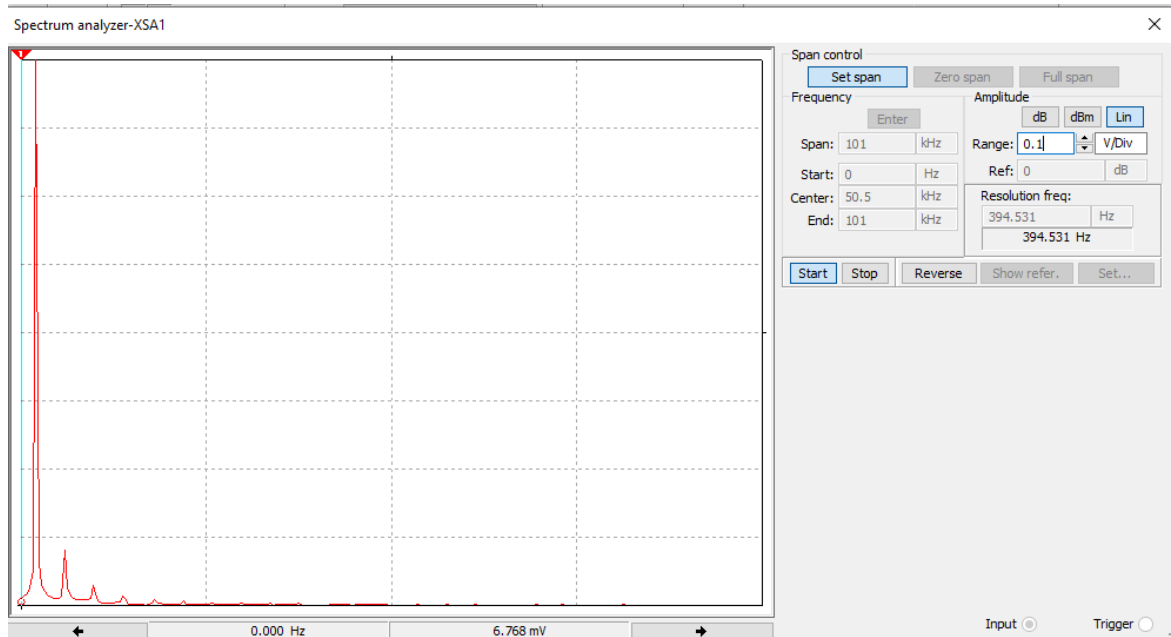
Φάσμα σήματος εισόδου Matlab:



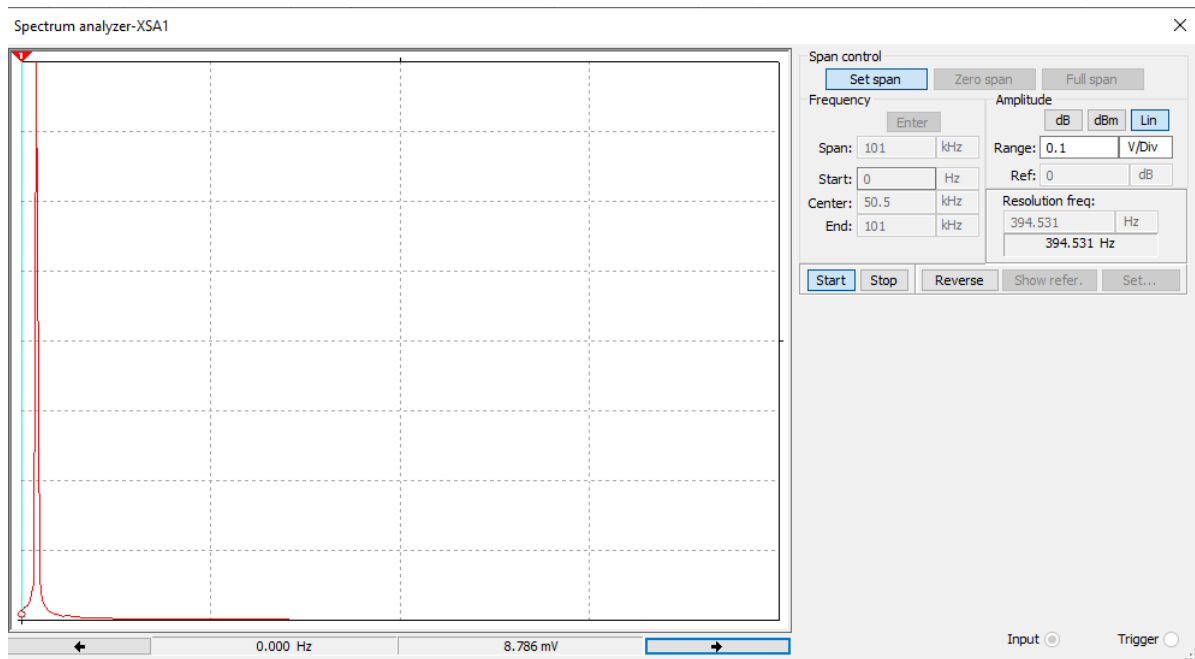
Φάσμα σήματος εξόδου Matlab:



Φάσμα σήματος εισόδου Multisim:



### Φάσμα σήματος εξόδου Multisim:



Παρατηρούμε ότι τόσο το Matlab όσο και το Multisim δίνουν τα ίδια φάσματα. Στο φάσμα εισόδου μπορεί να παρατηρήσει κανείς την ώση της θεμελιώδους συχνότητας 2kHz καθώς και κάποιες μικρότερες ώσεις. Στο φάσμα εξόδου παρατηρεί κανείς την λειτουργία του κατωδιαβατού φίλτρου καθώς μετά την συχνότητα αποκοπής που είναι τα 6 kHz δεν υπάρχουν ώσεις.

Το φίλτρο λοιπόν ικανοποιεί τις προδιαγραφές και από αυτή την πλευρά της ανάλυσης.