

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

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

## **ΕΡΓΑΣΙΑ #4**

***ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.***

**7<sup>ο</sup> ΕΞΑΜΗΝΟ**

**Όνομα : Μπεκιάρης Θεοφάνης**

**A.E.M. : 8200**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018

## Πίνακας περιεχομένων

Εργασία #4 : Σχεδίαση Ανωδιαβατού Φίλτρου Butterworth.....	3
Προδιαγραφές του προβλήματος :.....	3
A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου.....	4
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	4
Ρύθμιση κέρδους.....	9
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	10
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	13
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	21

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

## Εργασία #4 : Σχεδίαση Ανωδιαβατού Φίλτρου Butterworth

Ανωδιαβατό Φίλτρο Butterworth

### Προδιαγραφές του προβλήματος :

Οι προδιαγραφές για το ανωδιαβατό φίλτρο Butterworth που προκύπτουν σύμφωνα με το ΑΕΜ του φοιτητή δίνονται από τους τύπους

$$f_p = (4 + \mu) \text{ kHz}, \quad f_s = \frac{f_P}{2.6} \text{ kHz}$$
$$\mu = \begin{cases} 0, & \text{αν } a_4 \in \{4, 5, 6\} \\ 1, & \text{αν } a_4 \in \{0, 1, 2, 3\} \\ 2, & \text{αν } a_4 \in \{7, 8, 9\} \end{cases} \quad (1)$$

$$a_{min} = 24 + a_4 \times \frac{6}{9} \text{ (dB)}$$
$$a_{max} = 0.5 + \frac{a_3}{36} \text{ (dB)} \quad (2)$$

Δεδομένου ότι ΑΕΜ :8200 οι προδιαγραφές είναι.

$$f_p = 5\text{KHz}, \quad f_s = 1.9231\text{KHz}$$

Για τις αποσβέσεις είναι:

$$a_{min} = 24 \text{ dB}$$

$$a_{max} = 0.5 \text{ dB}$$

Σε rad/sec οι παραπάνω συχνότητες γίνονται :

$$\omega_p = 31415.9 \text{ rad/sec}, \quad \omega_s = 12083 \text{ rad/sec},$$

και

$$a_{min} = 24 \text{ dB}$$

$$a_{max} = 0.5 \text{ dB}$$

## A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

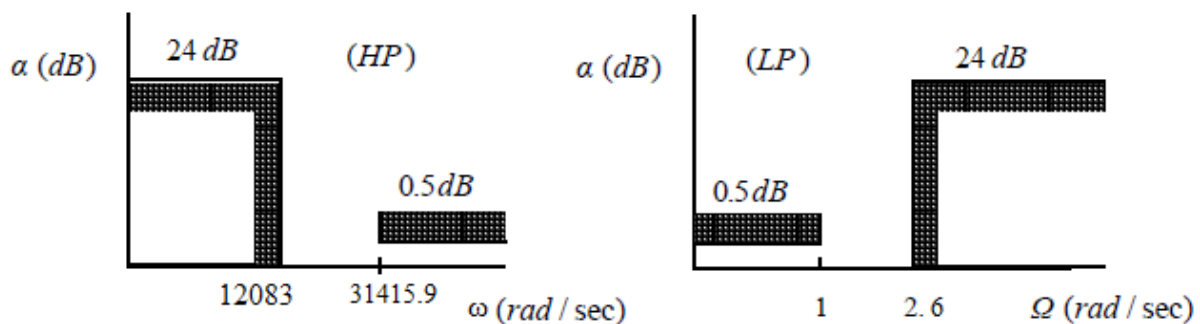
### • Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

#### Υπολογισμός προδιαγραφών πρότυπου φίλτρου

Η αντιστοιχία  $\omega_{(HP)}$  και  $\Omega_{(LP)}$  είναι  $\Omega = \omega_p / \omega$  και επομένως οι προδιαγραφές του πρωτότυπου φίλτρου είναι:

$$\Omega(\omega_p) = 1 = \Omega_p \text{ και } \Omega(\omega_s) = \omega_p / \omega_s = 31415.9 / 12083 = 2.6$$

Όπου  $\Omega_p$  και  $\Omega_s$  είναι οι συχνότητες διόδου και αποκοπής του μετασχηματισμένου κατωδιαβατού πρωτότυπου φίλτρου. Οι προδιαγραφές του υπό σχεδίαση συστήματος σχηματικά είναι



Στην συνέχεια, προχωράμε στον υπολογισμό της τάξης, της συχνότητας ημίσειας ισχύος και των πόλων της κατωδιαβατής απόκρισης Butterworth. Για να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο :

$$n = \frac{\log \left[ (10^{a_{\min}/10} - 1) / (10^{a_{\max}/10} - 1) \right]}{2 \log(\omega_s / \omega_p)} \quad (9-52) \quad \text{όπου } \omega_s \rightarrow \Omega(\omega_s) = 2.6 \text{ και } \omega_p \rightarrow \Omega(\omega_p) = 1$$

Επομένως

$$n = \log[(10^{2.4} - 1) / (10^{0.05} - 1)] / 2 \log(2.6)$$

$$n = \log[250.1886 / 0.1220] / 2 \log(2.6)$$

$$n = 3.99$$

Ο αμέσως επόμενος ακέραιος είναι το 4, όμως επειδή οι παραπάνω προδιαγραφές βγάζουν οριακά το παραπάνω αποτέλεσμα ως κατάλληλο για την ικανοποίηση των προδιαγραφών προβλέπεται ότι στην καλύτερη περίπτωση θα πιάσουμε ακριβώς τα μεγέθη αποσβέσεων (δηλαδή θα έχουμε ακριβώς  $a_{\min} = 24$  dB και  $a_{\max} = 0.5$  dB) και ίσως λόγω αριθμητικών προσεγγίσεων να μην

ικανοποιούνται οι παραπάνω προδιαγραφές ,για αυτό θα επιλέξω ως κατάλληλη τάξη του φίλτρου την  $n = 5$ . Εξάλλου οι διαφορές μεταξύ ενός φίλτρου για  $n=4$  και  $n=5$  είναι ένα απλό φίλτρο CR πρώτης τάξης και μια απομόνωση ,δηλαδή στην ουσία έχουμε απλά προσθήκη μίας αντίστασης, ενός πυκνωτή και ενός τελεστικού στο συνολικό σύστημα. Επομένως, δεδομένου ότι η επιλογή για  $n=5$  θα προσθέσει μεγαλύτερη ευελιξία χωρίς επιπλέον κατασκευαστική και υπολογιστική πολυπλοκότητα θεωρώ ότι επιλογή για  $n=5$  είναι η πιο πρόσφορη.

### Άρα τάξη φίλτρου $n = 5$

Θα υπολογίσουμε τώρα την **συχνότητα ημίσειας ισχύος**.

$$\omega_o = \frac{\omega_p}{\left[10^{a_{\max}/10} - 1\right]^{1/2n}} \quad (9-53)$$

Έτσι λοιπόν έπειτα από αντικατάσταση θα έχουμε ότι η συχνότητα ημίσειας ισχύος είναι :

$$\Omega_0 = 1 / (10^{0.05} - 1)^{1/10}$$

$$\Omega_0 = 1.234120$$

Η αντίστοιχη συχνότητα του ανωδιαβατού φίλτρου είναι:

$$\omega_0 = \omega_p / \Omega_0 = 31415.9 / 1.234120 = 25456.111103 \text{ rad/sec} \Rightarrow f_0 = 4.0514 \text{ KHz}$$

Θεωρούμε προσωρινά ότι  $\Omega_0 = 1$ , δηλαδή θεωρούμε ένα κανονικοποιημένο φίλτρο Butterworth.

Στην περίπτωση αυτή και για  $n=5$  οι πόλοι Butterworth από τους πίνακες 9.1 ως 9.3 του κεφαλαίου 9 προκύπτουν όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

$P_k$	$\psi_k$	$\sigma_k \pm j\omega_k$	$\Omega_k$	$Q_k$
$P_1$	$0^\circ$	$-1.0$	1	0.5
$P_{2,3}$	$\pm 36^\circ$	$-0.809 \pm j0.5877$	1	0.618
$P_{4,5}$	$\pm 72^\circ$	$-0.309 \pm j0.951$	1	1.618

Η συνάρτηση μεταφοράς του κανονικοποιημένου πρωτότυπου LP φίλτρου είναι:

$$T_{LP}(S) = \frac{1}{(S+1)(S^2 + 1.618S + 1)(S^2 + 0.618S + 1)}$$

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό  $S = 1/s$  έχουμε:

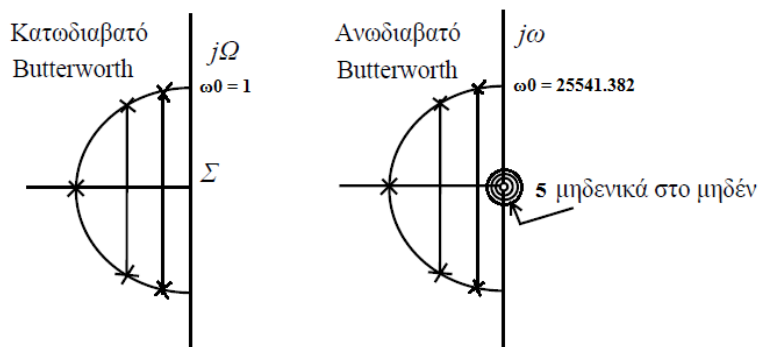
$$T_{HP}(s) = s^5 / ((s+1)(s^2 + 1.618s + 1)(s^2 + 0.618s + 1))$$

Οι πόλοι της ανωδιαβατής συνάρτησης είναι οι ίδιοι με τους πόλους της πρωτότυπης κατωδιαβατής συνάρτησης, με την προσθήκη και τριών μηδενικών στο μηδέν. Στην παραπάνω σχέση, η συχνότητα ημίσειας ισχύος για το ανωδιαβατό φίλτρο είναι  $\omega_0 = 1$ , δηλαδή έχουμε ένα κανονικοποιημένο ανωδιαβατό φίλτρο. Στην πραγματικότητα όμως η συχνότητα 3dB του ανωδιαβατού φίλτρου είναι

$\omega_0 = 25456.111103$  rad/sec διότι είναι  $\Omega_0 \neq 1$  και  $\omega_p \neq 1$ .  $\Omega_{ok}=1$ . Οι πόλοι της ανωδιαβατής συνάρτησης δίνονται και πάλι από τον παραπάνω πίνακα, όπου αντί για  $\Omega_0 = 1$  θεωρούμε μέτρα  $\omega_0$ , δηλαδή:

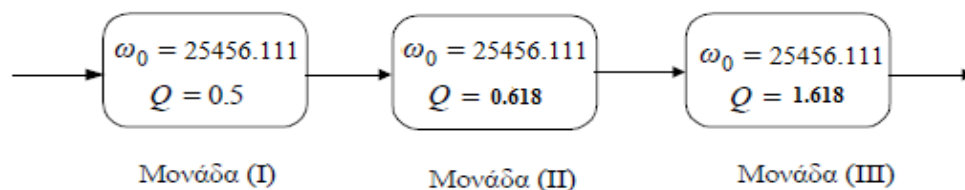
$$s_k = \omega_0 \times (-\cos \psi_k + j \sin \psi_k)$$

Σχηματικά οι παραπάνω διαδικασία είναι.



Άρα οι συντελεστές  $Q$  παραμένουν σταθερή και έχουμε αλλαγή μόνο για το  $\omega_0$ .

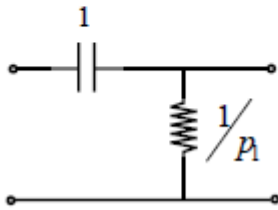
Το σύστημα αποτελείται από 3 μονάδες οι οποίες φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



Για την υλοποίηση της μονάδας (I) χρησιμοποιούμε ένα απλό φίλτρο CR πρώτης τάξης. Για την υλοποίηση των μονάδων (II) και (III) θα χρησιμοποιήσουμε το ανωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key με την στρατηγική σχεδίασης (1). Το ανωδιαβατό φίλτρο CR πρώτης τάξης και το φίλτρο Sallen-Key καθώς και η στρατηγική σχεδίασης του φαίνονται παρακάτω.

### Φίλτρο CR

$$T_1(s) = \frac{s}{s + p_1}$$

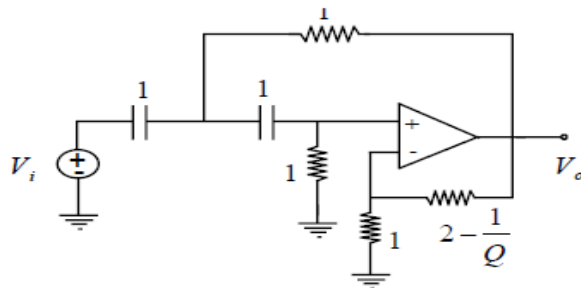


### Στρατηγική (1)

$$R_1 = R_2 = 1, \quad C_1 = C_2 = 1 \quad (\omega_o = 1) \quad (6-74)$$

και

$$k = 3 - \frac{1}{Q}, \quad r_1 = 1, \quad r_2 = 2 - \frac{1}{Q} \quad (6-75)$$



Σχ. 6.21

Κατά την σχεδίαση των μονάδων θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι το κέρδος του φίλτρου στις υψηλές συχνότητες σύμφωνα με την εκφώνηση θα πρέπει να είναι ίσο με 10dB ή  $|T|=3.1622$ . Επιπλέον οι μονάδες πρέπει να έχουν ένα τουλάχιστον πυκνωτή 0.01μF (εκφώνηση 0.01μF αν  $a_3 \in \{8, 9, 0\}$ ), άρα σύμφωνα με τα προαναφερθέντα :

### Μονάδα 1 : Ανωδιαβατό φίλτρο CR

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$T_1(s) = \frac{s}{s + p_1} \quad \text{όπου για } \omega_o = 1 \text{ έχουμε}$$

$$p_1 = \frac{1}{R_{11}C_{11}} = 1, \quad C_{11} = 1, \quad R_{11} = \frac{1}{p_1} = 1$$

### Κλιμακοποίηση

Επειδή έχουμε  $\omega_o = 25456.111103 \text{ rad/sec}$  και όχι  $\omega_o = 1$  είναι  $k_f = 25456.111103$ .

Για να έχουμε πυκνωτή ίσο με 0.01μF πρέπει.

$$C_{11} / (k_f \cdot k_m) = 10^{-8} \Rightarrow k_m = 3928.329806$$

Επομένως τα τελικά στοιχεία είναι

$$C_{11} = 0.01\mu\text{F} \text{ και } R_{11} = 3.9283 \text{ K}\Omega$$

Το κέρδος του φίλτρου για τις υψηλές συχνότητες είναι

$$K_{h1} = 1$$

## Μονάδα 2 : Sallen-Key Στρατηγικής (1)

Για  $\omega_0 = 1$  και  $Q = 0.618$

$$R_1 = R_2 = 1, C_1 = C_2 = 1$$

και

$$k = 3 - 1/Q = 1.382$$

$$r_1 = 1 \text{ και } r_2 = 2 - 1/Q = 0.382$$

### Κλιμακοποίηση

Επειδή έχουμε  $\omega_0 = 25456.111103 \text{ rad/sec}$  και όχι  $\omega_0 = 1$  είναι  $k_f = 25456.111103$ .

Για να έχουμε πυκνωτές  $0.01 \mu\text{F}$  πρέπει.

$$C_1 / (k_f \cdot k_m) = 10^{-8} \Rightarrow k_m = 3928.329806$$

Επομένως τα τελικά στοιχεία είναι

$$C_1 = C_2 = 0.01 \mu\text{F} \text{ και } R_1 = R_2 = k_m \cdot 1 = 3.9283 \text{ K}\Omega$$

Τα στοιχεία  $r_1$  και  $r_2$  κλιμακοποιούνται ανεξάρτητα οπότε επιλέγοντας  $r_1 = 10 \text{ K}\Omega$  έχουμε

$$r_2 = 3.82 \text{ K}\Omega$$

Το κέρδος του φίλτρου για τις υψηλές συχνότητες είναι

$$K_{h2} = k = 1.382$$

## Μονάδα 3 : Sallen-Key Στρατηγικής (1)

Ομοίως με την μονάδα 2 για  $\omega_0 = 1$  και  $Q = 1.618$

$$R_1 = R_2 = 1, C_1 = C_2 = 1$$

και

$$k = 3 - 1/Q = 2.382$$

$$r_1 = 1 \text{ και } r_2 = 2 - 1/Q = 1.382$$

### Κλιμακοποίηση

Επειδή έχουμε  $\omega_0 = 25456.111103 \text{ rad/sec}$  και όχι  $\omega_0 = 1$  είναι  $k_f = 25456.111103$ .

Για να έχουμε πυκνωτές  $0.01 \mu\text{F}$  πρέπει.

$$C_1 / (k_f \cdot k_m) = 10^{-8} \Rightarrow k_m = 3928.329806$$

Επομένως τα τελικά στοιχεία είναι

$$C_1 = C_2 = 0.01 \mu\text{F} \text{ και } R_1 = R_2 = k_m \cdot 1 = 3.9283 \text{ K}\Omega$$

Τα στοιχεία  $r_1$  και  $r_2$  κλιμακοποιούνται ανεξάρτητα οπότε επιλέγοντας  $r_1 = 10 \text{ K}\Omega$  έχουμε

$$r_2 = 13.82 \text{ K}\Omega$$

Το κέρδος του φίλτρου για τις υψηλές συχνότητες είναι

$$K_{h3} = k = 2.382$$



### Ρύθμιση κέρδους

Από τις 3 παραπάνω μονάδες παίρνουμε τα αντίστοιχα κέρδη στις υψηλές συχνότητες

Μονάδα 1 :  $K_{H1} = 1$

Μονάδα 2 :  $K_{H2} = 1.382$

Μονάδα 3 :  $K_{H3} = 2.382$

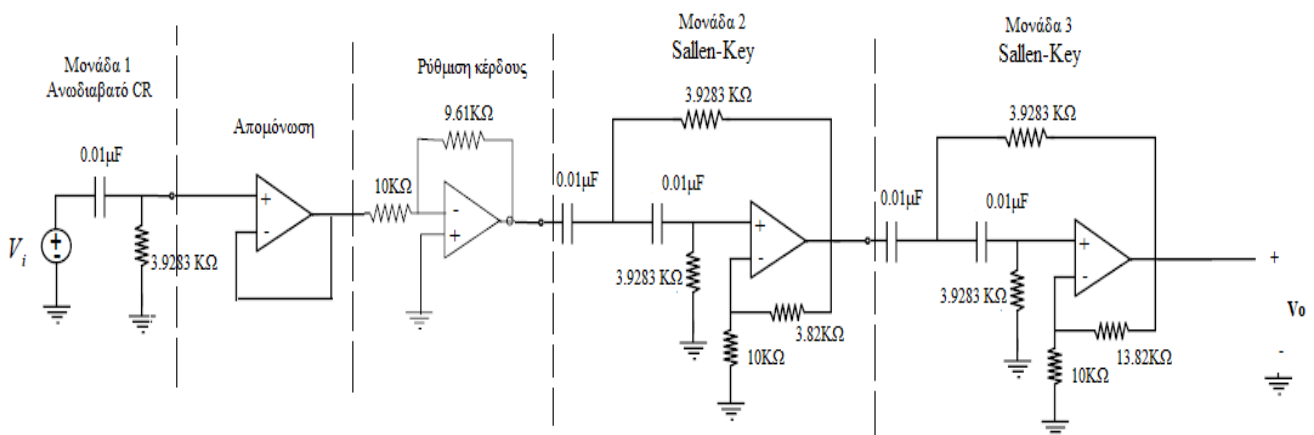
Άρα συνολικά θα έχουμε κέρδος :  $H_{total} = 1 * 1.382 * 2.382 \Rightarrow H_{total} = 3.29$

Σύμφωνα με την εκφώνηση θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου στις υψηλές συχνότητες να είναι 10dB δηλαδή  $|T| = 3.1622$ . Επομένως εισάγουμε μια αναστρέφουσα συνδεσμολογία ανάμεσα στην πρώτη και δεύτερη μονάδα για απομόνωση με κέρδος  $K = 3.1622 / 3.29 = 0.961$

όπου  $r2/r1 = 0.961$  και επιλέγουμε  $r1 = 10K\Omega$  άρα  $r2 = 9.61K\Omega$

Χρησιμοποιώντας τα ανωδιαβατά κυκλώματα Sallen-Key που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε η κυκλωματική μορφή του **ανωδιαβατού φίλτρου**

**Butterworth** φαίνεται παρακάτω με ότι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.



## • Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Για την συνάρτηση μεταφοράς της πρώτης μονάδας όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ισχύει:

$$T(s) = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \quad (2-22)$$

$$\text{Θεωρώντας } \omega_0 = 1/RC$$

Για τα φίλτρα Sallen-Key η συνάρτηση μεταφοράς τους είναι έχει την μορφή.

### 6.2 ΑΝΩΔΙΑΒΑΤΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΘΕΤΙΚΗ ΑΝΑΔΡΑΣΗ

Η γενική μορφή της ανωδιαβατής συνάρτησης μεταφοράς (*High-Pass transfer function*) είναι:

$$T_{HP}(s) = H \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q} \cdot s + \omega_o^2} \quad (6-60)$$

Όπου H τα κέρδη τις των μονάδων στις υψηλές συχνότητες όπως είδαμε και πριν, δηλαδή.

Μονάδα 2 :  $K_{H2} = 1.3819$

Μονάδα 3 :  $K_{H3} = 2.3819$

Άρα με χρήση της συνάρτησης tf() του matlab παίρνουμε τις παρακάτω συναρτήσεις μεταφοράς.

#### ΜΟΝΑΔΑ 1 : Ανωδιαβατό φίλτρο CR

$$T1 = \frac{s}{s + 2.546e04}$$

#### ΜΟΝΑΔΑ 2 : Sallen-Key Στρατηγικής (1)

$$T2 = \frac{1.382 s^2}{s^2 + 4.119e04 s + 6.48e08}$$

#### ΜΟΝΑΔΑ 3 : Sallen-Key Στρατηγικής (1)

$$T3 = \frac{2.382 s^2}{s^2 + 1.573e04 s + 6.48e08}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς με την ρύθμιση του κέρδους ώστε να έχουμε 10dB στις υψηλές συχνότητες φαίνεται παρακάτω.

### Συνολικό ανωδιαβατό φίλτρο Butterworth με κέρδος 10dB στη ζώνη διόδου

$$T_{total} = \frac{3.162 \cdot s^5}{s^5 + 8.238e04 \cdot s^4 + 3.393e09 \cdot s^3 + 8.638e13 \cdot s^2 + 1.359e18 \cdot s + 1.069e22}$$

## B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

Σε αυτό το σημείο θα ελέγξουμε την θεωρητική ανάλυση που εκτελέσαμε στο προηγούμενο στάδιο ώστε να διαπιστώσουμε αν τελικά οι μονάδες που δημιουργήσαμε καλύπτουν τις προδιαγραφές που θέσαμε. Για αυτό τον σκοπό εισάγουμε στο πρόγραμμα MATLAB τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς του ανωδιαβατού φίλτρου CR καθώς και των φίλτρων Sallen-Key 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.

Υπενθυμίζουμε τις προδιαγραφές του φίλτρου

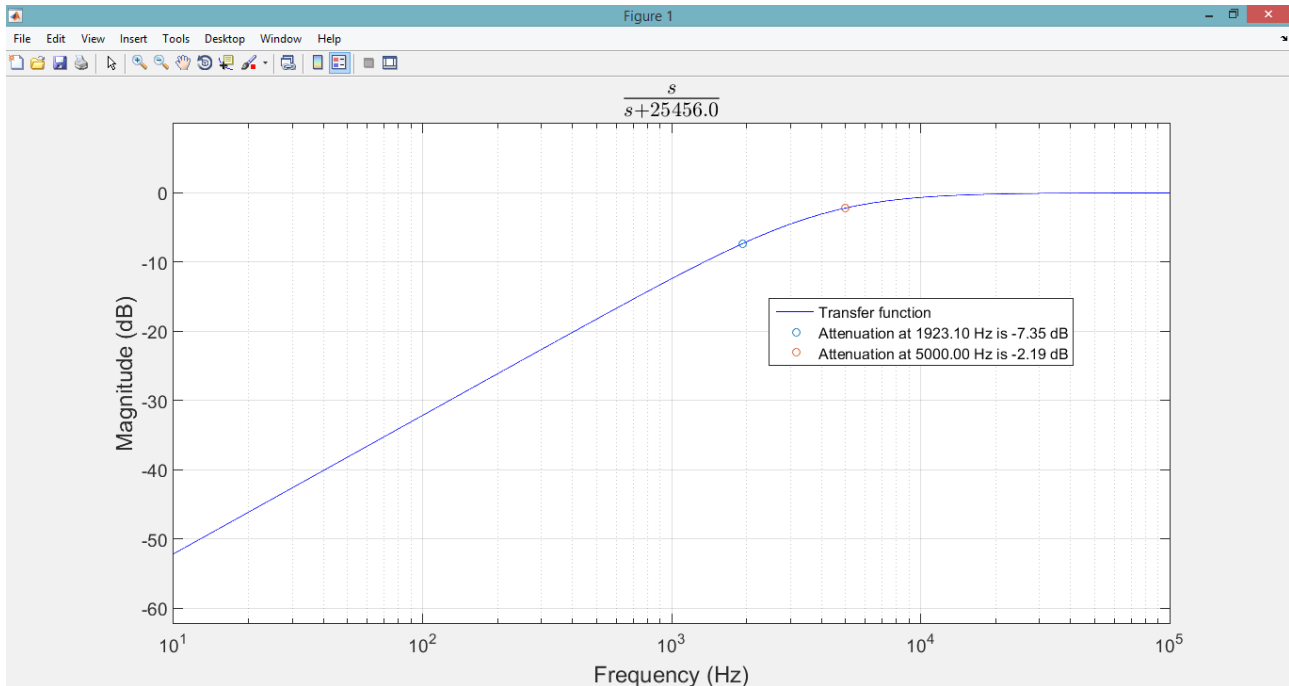
$$f_p = 5\text{KHz}, f_s = 1.9231\text{KHz}$$

Για τις αποσβέσεις είναι:

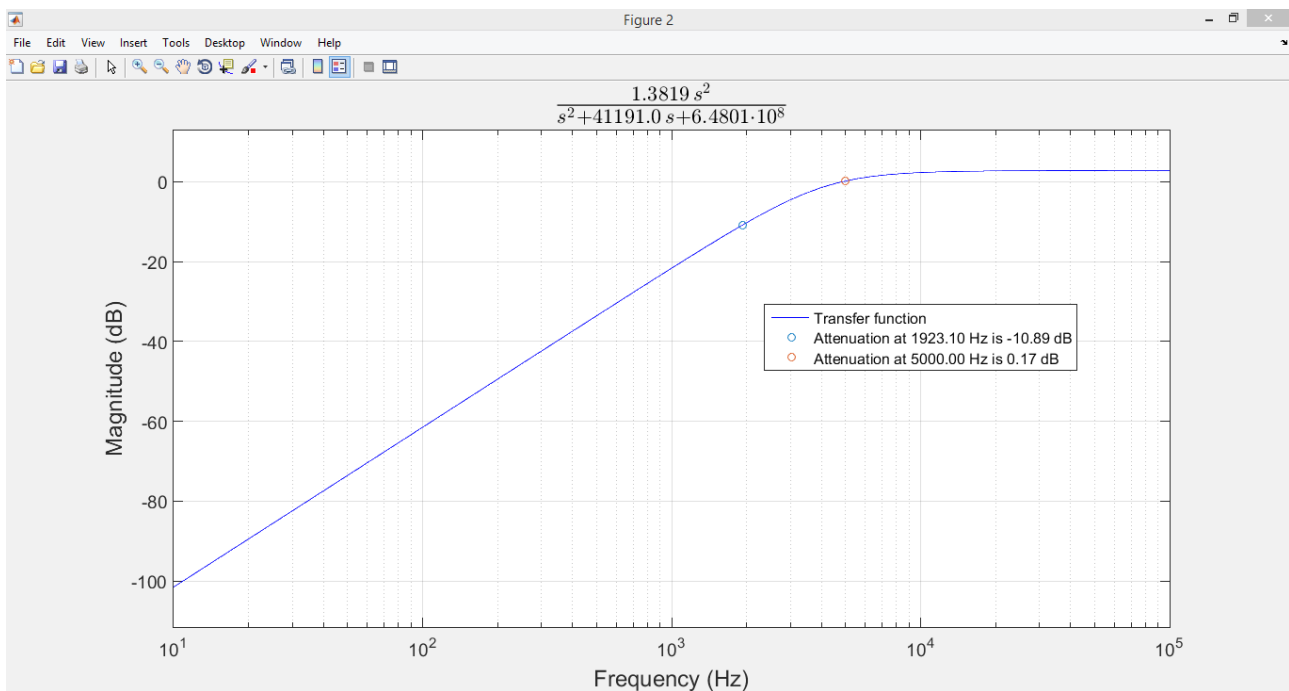
$$a_{min} = 24 \text{ dB}$$

$$a_{max} = 0.5 \text{ dB}$$

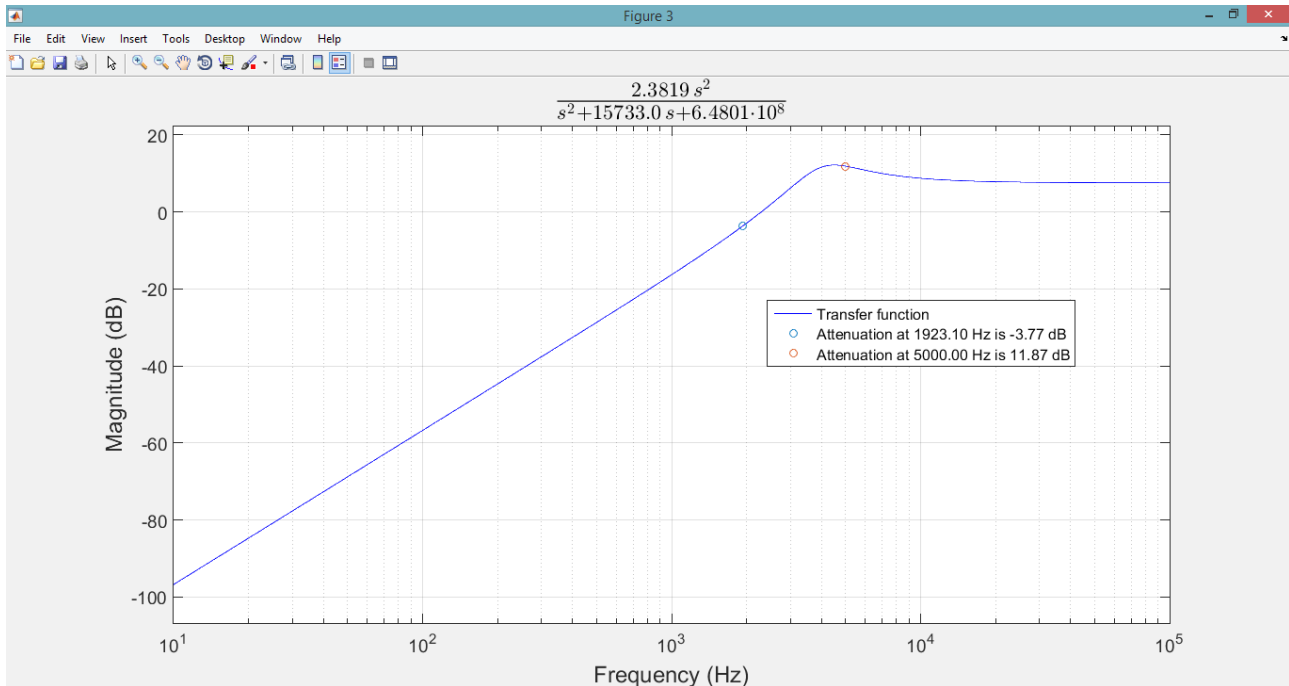
## 1<sup>η</sup> Μονάδα : Ανωδιαβατό φίλτρο πρώτης τάξης.



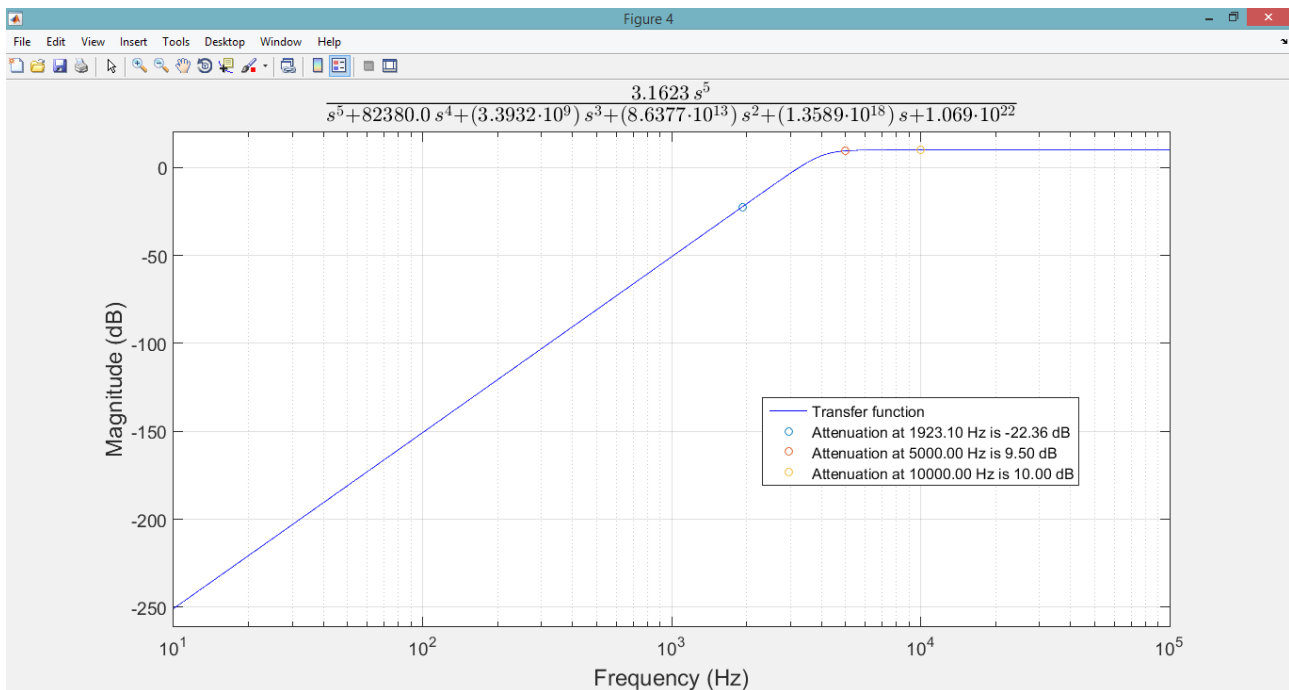
## 2<sup>η</sup> Μονάδα : Ανωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



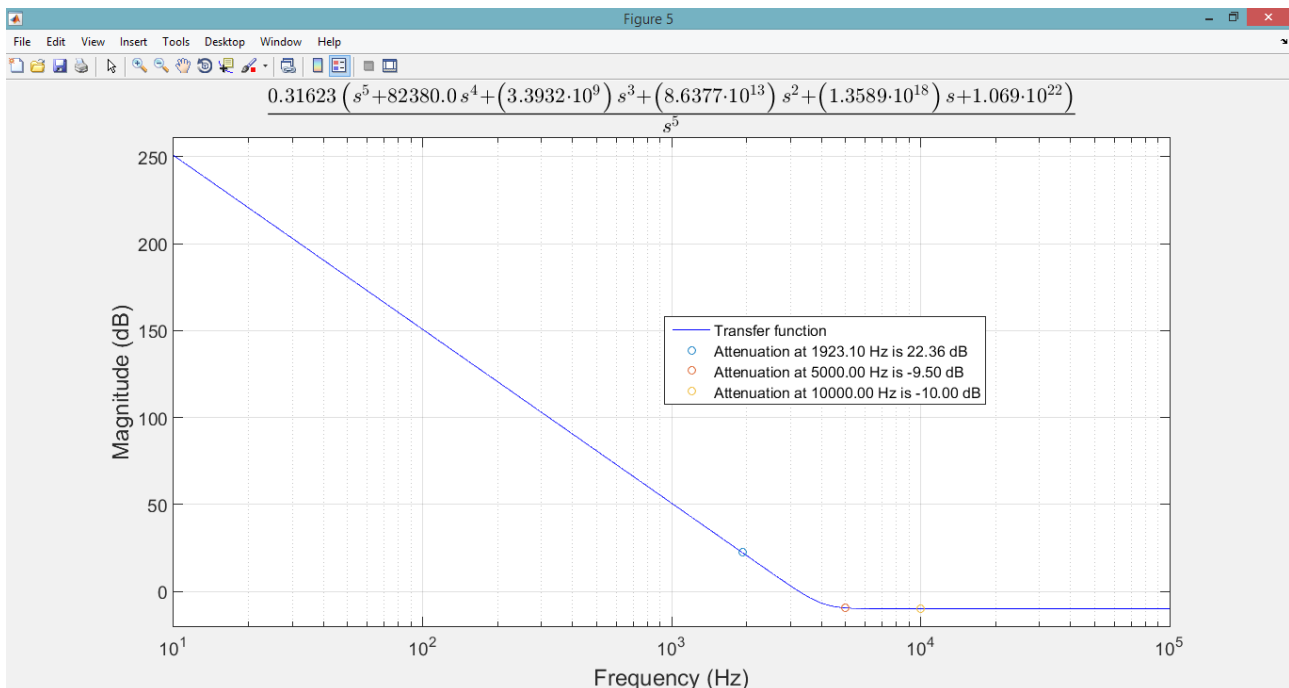
### 3<sup>η</sup> Μονάδα : Ανωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας.



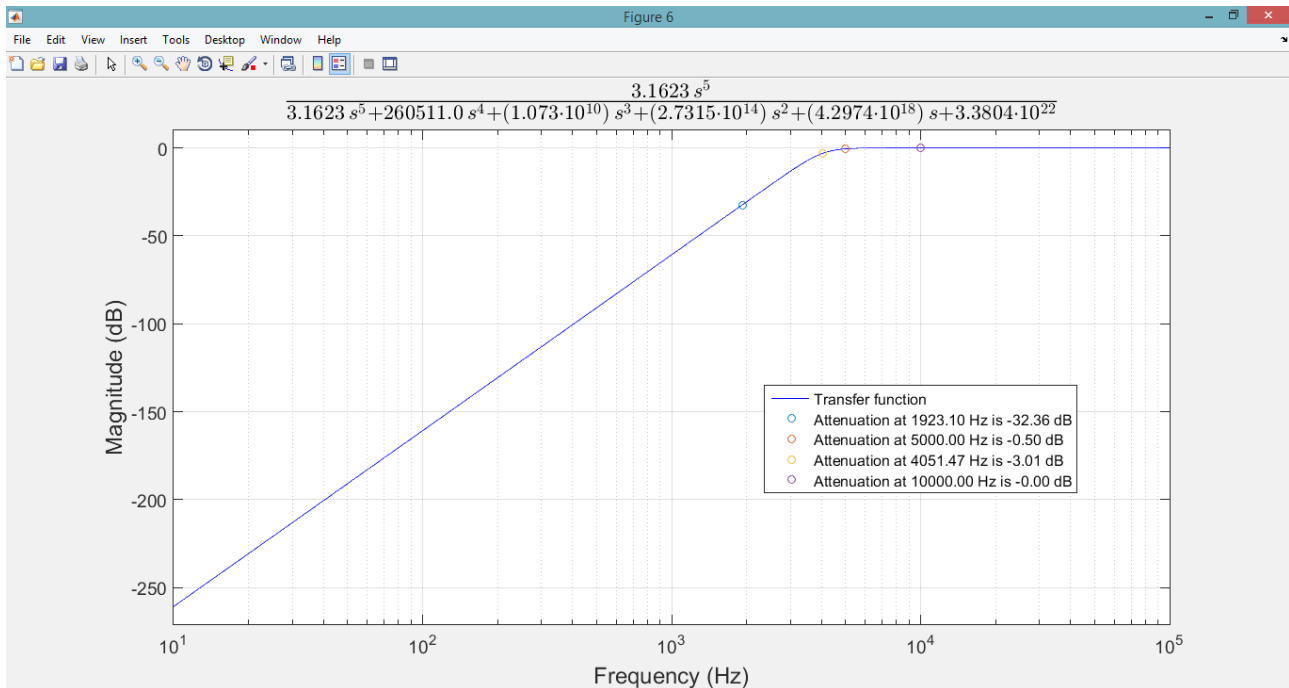
Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dBτης συνολικής συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας.



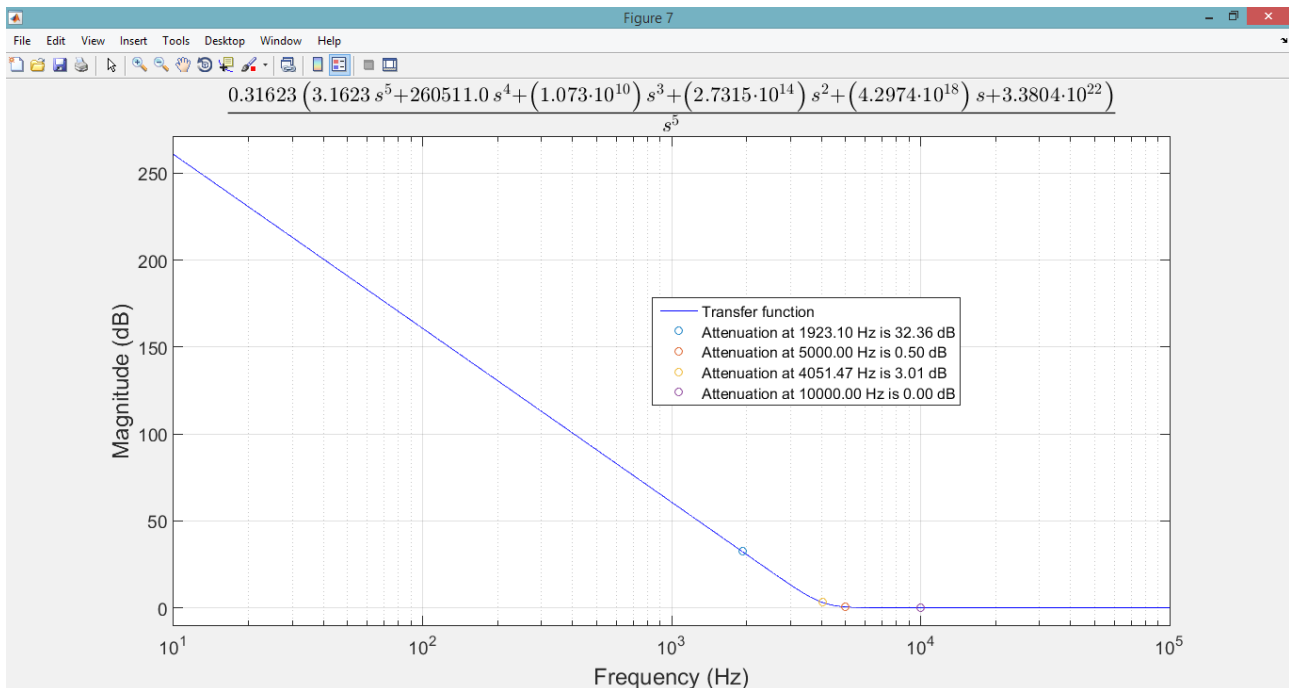
Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι το σύστημα είναι ρυθμισμένο ώστε να έχει κέρδος 10 dB στην ζώνη διάβασης. Επιπλέον φαίνεται ότι οι προδιαγραφές του φίλτρου πληρούνται αφού στην συχνότητα διάβασης 5KHz έχουμε απόσβεση ακριβώς 0.5 dB (= 10 -9.5) όσο ζητάει η προδιαγραφή και στην συχνότητα αποκοπής 1923KHz έχουμε απόσβεση ίση με 32.36 dB (= 10+22.36) ,δηλαδή στην συχνότητα αποκοπής η προδιαγραφές υπερκαλύπτονται. Στην συχνότητα διάβασης έχουμε τιμή απόσβεσης ίση ακριβώς με αυτή της προδιαγραφής λόγω του τύπου που χρησιμοποιήσαμε για να βρούμε την συχνότητα ημίσειας ισχύος, ο οποίος θεωρεί ότι στην συχνότητα διάβασης έχουμε τιμή απόσβεσης ακριβώς ίση με αυτή της προδιαγραφής και στην συχνότητα αποκοπής οι προδιαγραφές υπερκαλύπτονται, όπως δηλαδή προέκυψαν και τα αποτελέσματα. Αν θέλαμε να έχουμε υπερκάλυψη των προδιαγραφών και στην συχνότητα διάβασης τότε θα έπρεπε να θεωρήσουμε πιο αυστηρές προδιαγραφές( $p_{\text{max}} = 0.4$  dB),αλλά προφανώς τότε μιλάμε για φίλτρο με διαφορετικές προδιαγραφές.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της απόκρισης κέρδους και απόσβεσης για το σύστημα το οποίο έχει ρυθμιστεί με κέρδος 1 ή 0dB στην ζώνη διάβασης ώστε να φανεί ξεκάθαρα ότι πληρούνται οι προδιαγραφές

## Διάγραμμα κέρδους για 0 dB στην ζώνη διάβασης



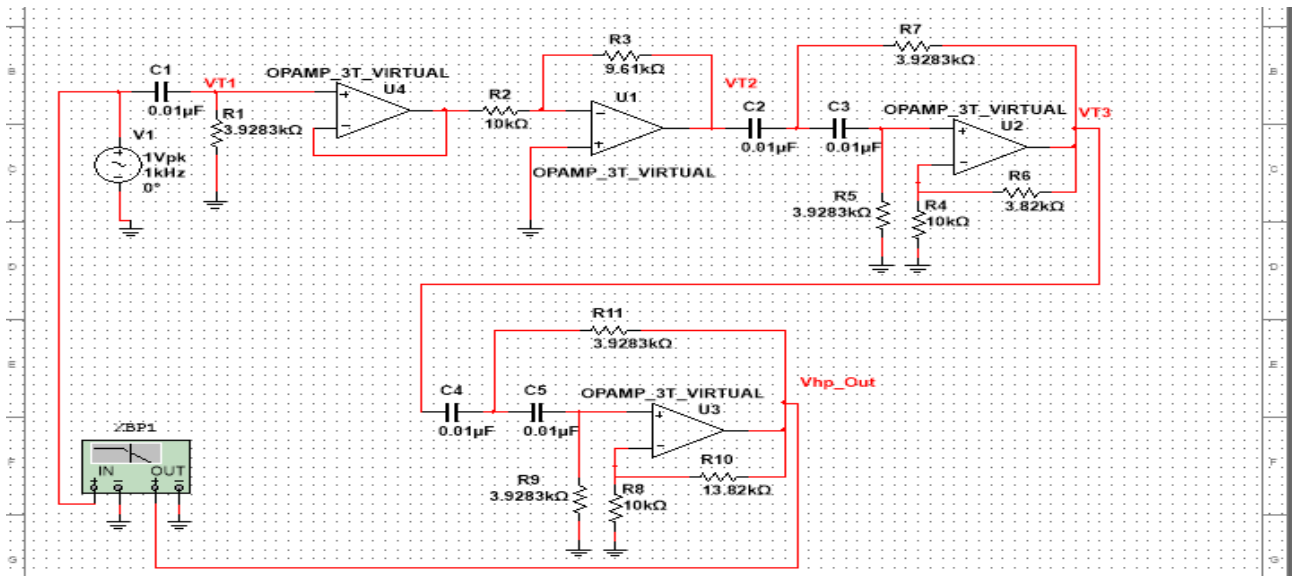
## Διάγραμμα απόσβεσης για 0 dB στην ζώνη διάβασης



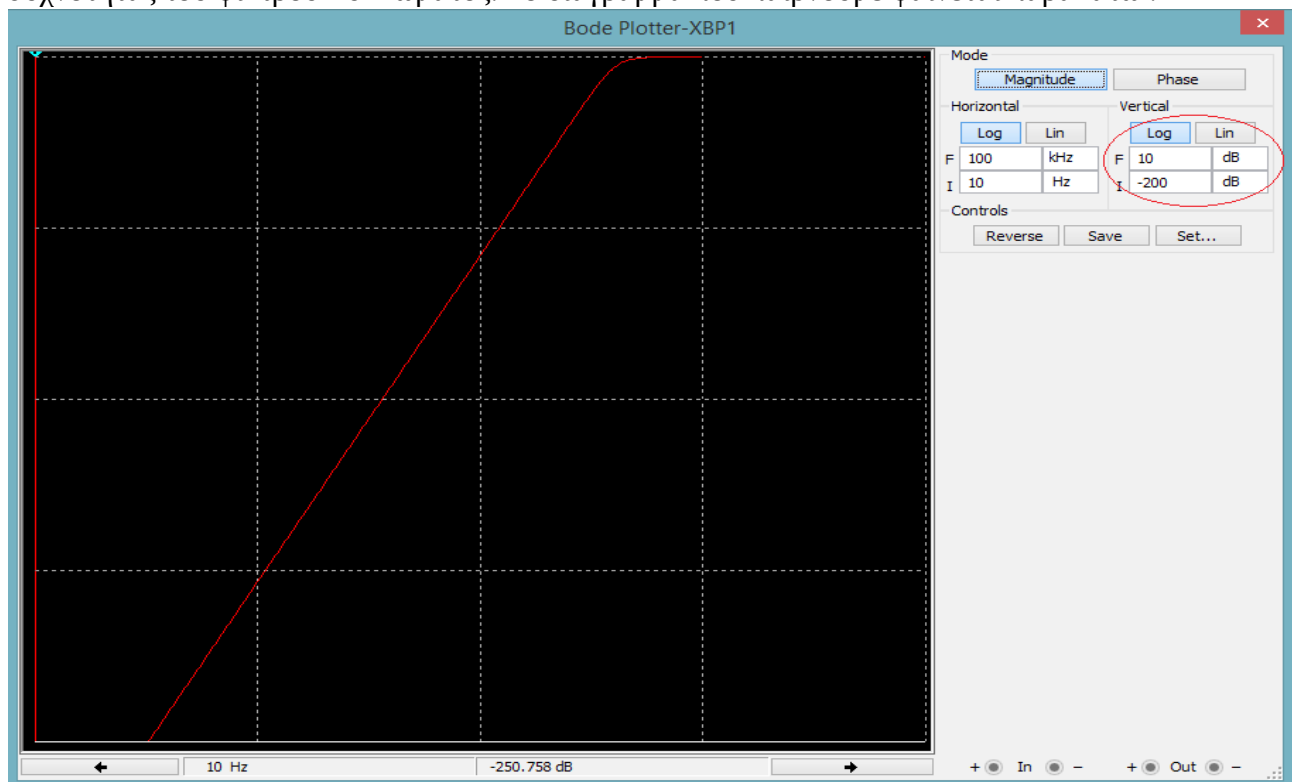
Στα παραπάνω διαγράμματα έχει σημειωθεί επιπλέον και η συχνότητα ημίσειας ισχύος 4051.47 KHz για την οποία βλέπουμε ότι η τιμή απόσβεσης είναι 3dB. Επομένως σύμφωνα με τα προηγούμενα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η θεωρητική ανάλυση στο Matlab ήταν επιτυχής.

## 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 μονάδες Sallen-Key που έχουν σχεδιασθεί στην προηγούμενη φάση της εργασίας καθώς και την ανωδιαβατή πρωτοβάθμια μονάδα RC στο περιβάλλον MULTISIM και παίρνουμε το παρακάτω κύκλωμα.

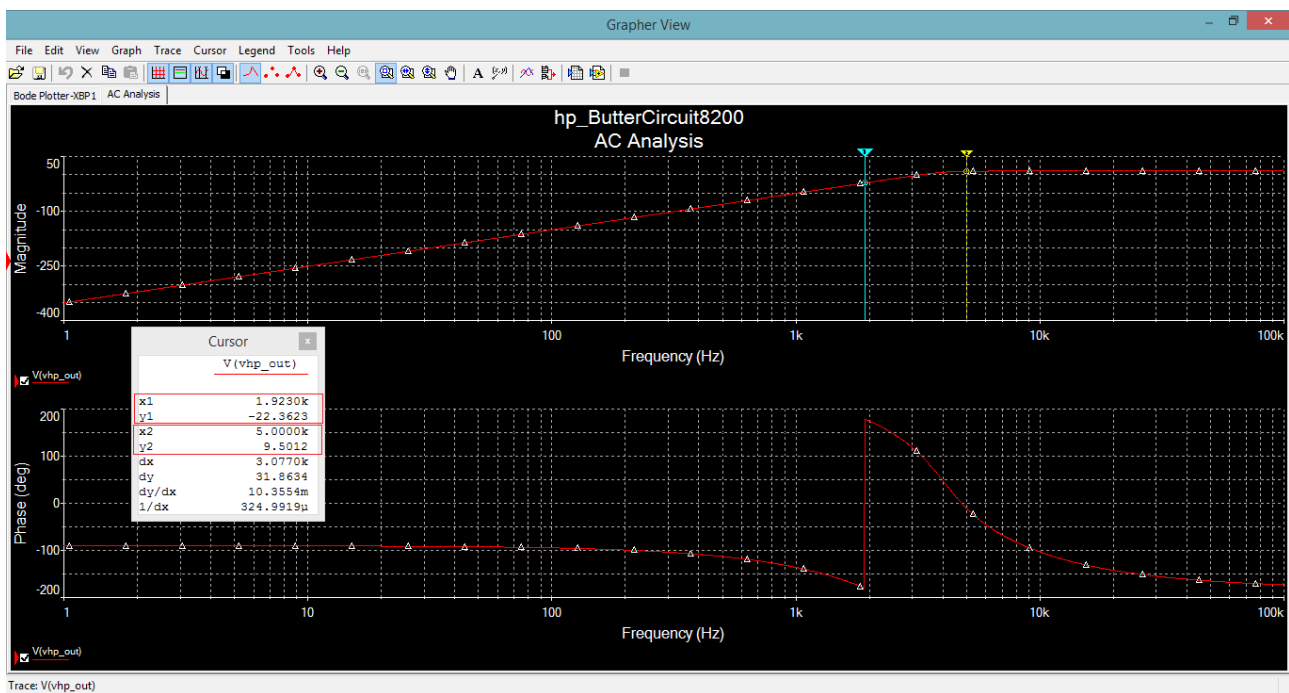


Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει χρησιμοποιούμε τον Bode-Plotter για να προκύψει η απόκριση συχνότητας του φίλτρου-κυκλώματος. Το διάγραμμα που παίρνουμε φαίνεται παρακάτω :



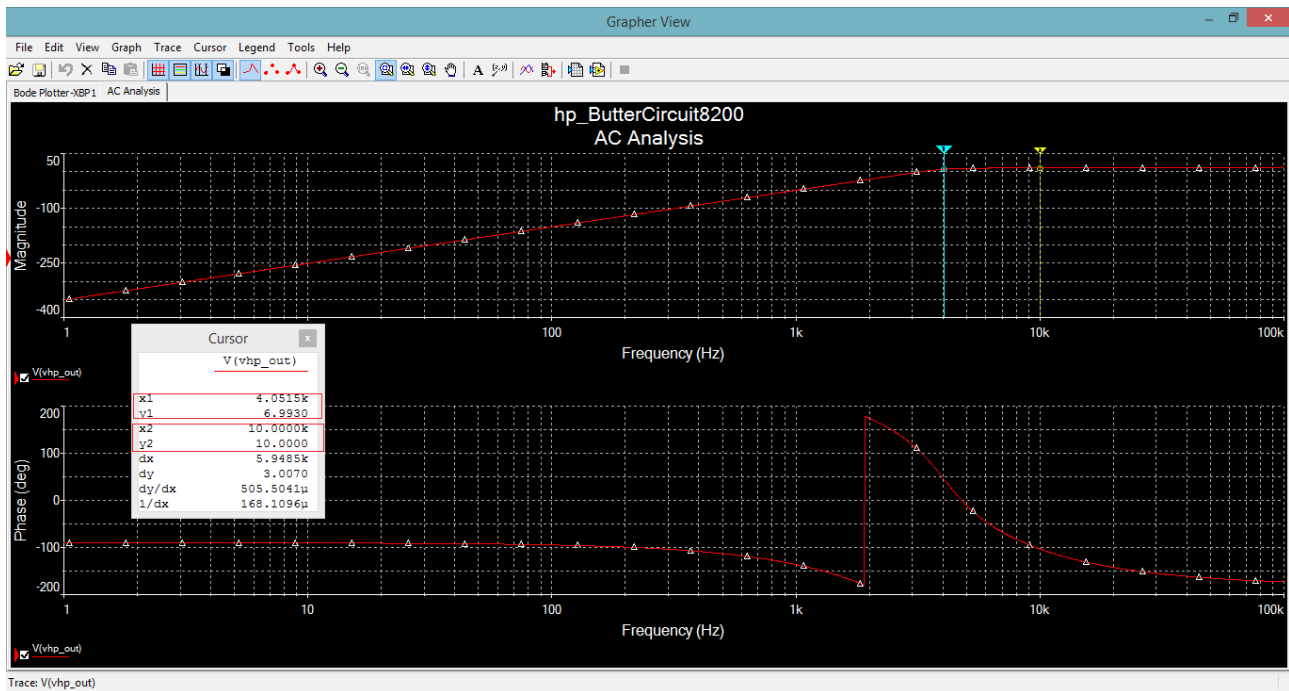


Από το προηγούμενο διάγραμμα αυτό που μπορούμε αρχικά να διακρίνουμε είναι ότι η απόκριση όντως αντιστοιχεί σε ένα ανωδιαβατό φίλτρο και ότι η ρύθμιση του κέρδους είναι στα 10 dB όπως ζητείται. Στην συνέχεια για να ελέγξουμε αν πληρούνται οι προδιαγραφές θα εισάγουμε το ίδιο διαγράμματα το οποίο όμως προκύπτει από την AC analysis, για το οποίο υπάρχει η δυνατότητα για την ανάγνωση των τιμών. Άρα κατά την διαδικασία της ανάλυσης ρυθμίζουμε αρχικά την πυκνότητα των δειγμάτων ανά δεκάδα στο 400 για να έχουμε διάγραμμα με μεγάλη ακρίβεια και παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Στο διάγραμμα οι κέρσορες έχουν τοποθετηθεί στην συχνότητα αποκοπής 1.923KHz και 5KHz στις οποίες βλέπουμε ότι οι τιμές του κέρδους είναι αντίστοιχα -22.36 dB και 9.5 dB ακριβώς ίδιες όπως και στα διαγράμματα που πήραμε από το matlab.

Στην συνέχεια φαίνεται το ίδιο διάγραμμα με σημειωμένες τις τιμές ημίσειας ισχύος και την τιμή των 10KHz που βρίσκεται στην ζώνη διάβαση ώστε να ελέγξουμε το κέρδος.



Μπορούμε να διακρίνουμε εύκολα ότι το κέρδος στην ζώνη διάβασης είναι 10dB ενώ για την συχνότητα ημίσειας ισχύος έχουμε τιμή 6.9930dB  $\approx$  7dB δηλαδή τιμή 3dB κάτω από την τιμή στην ζώνη διάβασης.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη φαίνεται ότι τα αποτελέσματα από το κύκλωμα έχουν πλήρη αντιστοιχία με τα θεωρητικά αποτελέσματα του matlab και επομένως το κύκλωμα που κατασκευάστηκε πληρεί τις προδιαγραφές και αντιστοιχεί σε ένα ανωδιαβατό φίλτρο Butterworth.

- Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα μια πηγή περιοδικού σήματος. Σύμφωνα με την εκφώνηση το επιθυμητό σήμα εισόδου είναι.

γ) Αν  $a_4 \in \{8, 9, 0, 1\}$  ένα περιοδικό σήμα της μορφής

$$f(t) = \cos(0.2\omega_s t) + 0.6 \cos(0.7\omega_s t) + 1.5 \cos(1.6\omega_p t) + 0.7 \cos(2.4\omega_p t) + 0.4 \cos(3.5\omega_p t)$$

Μετά την εκτέλεση των πράξεων η συνάρτηση αποκτάει την μορφή

$$f(t) = \cos(2\pi t) + 0.6\cos(2\pi t) + 1.5\cos(2\pi t) + 0.7\cos(2\pi t) + 0.4\cos(2\pi t)$$

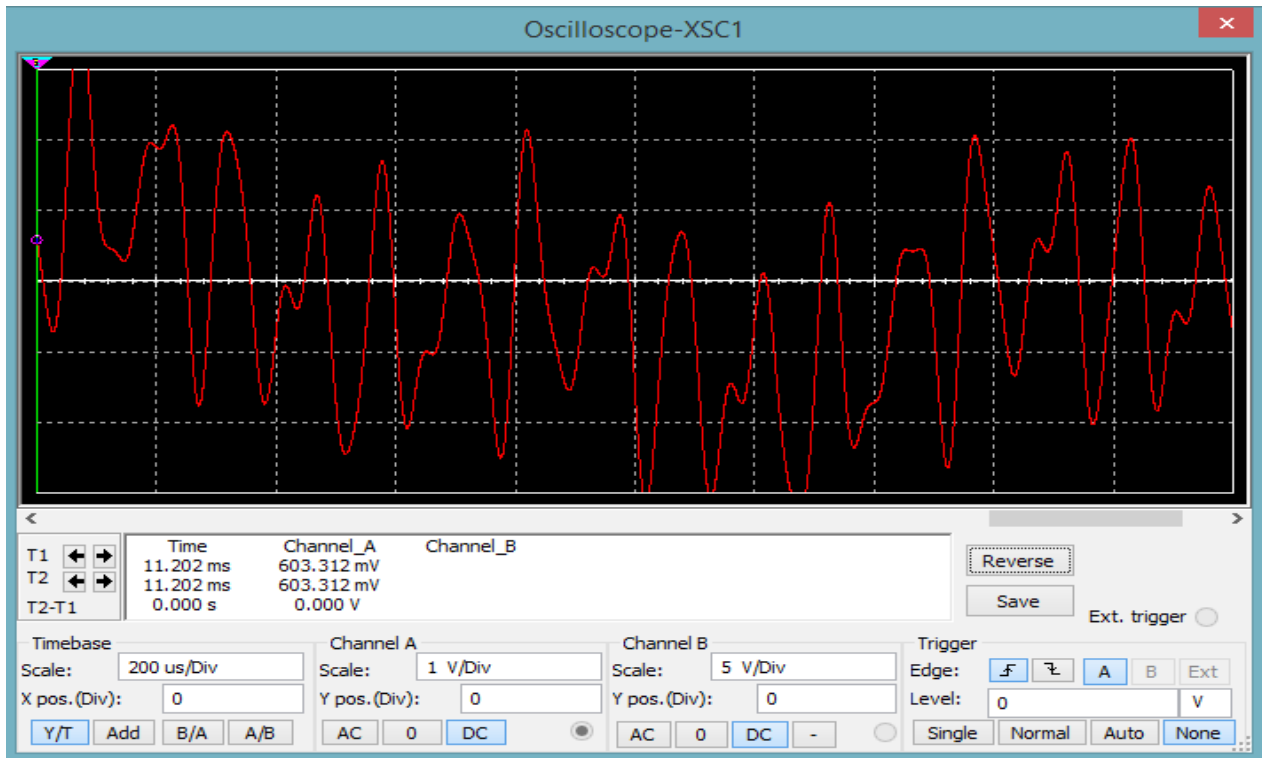
Άθροισμα αρμονικών σημάτων με συχνότητες

$$f_a = 384.62 \text{ Hz}, f_b = 1346.17 \text{ Hz}, f_c = 8 \text{ KHz}, f_d = 12 \text{ KHz}, f_e = 17.5 \text{ KHz}$$

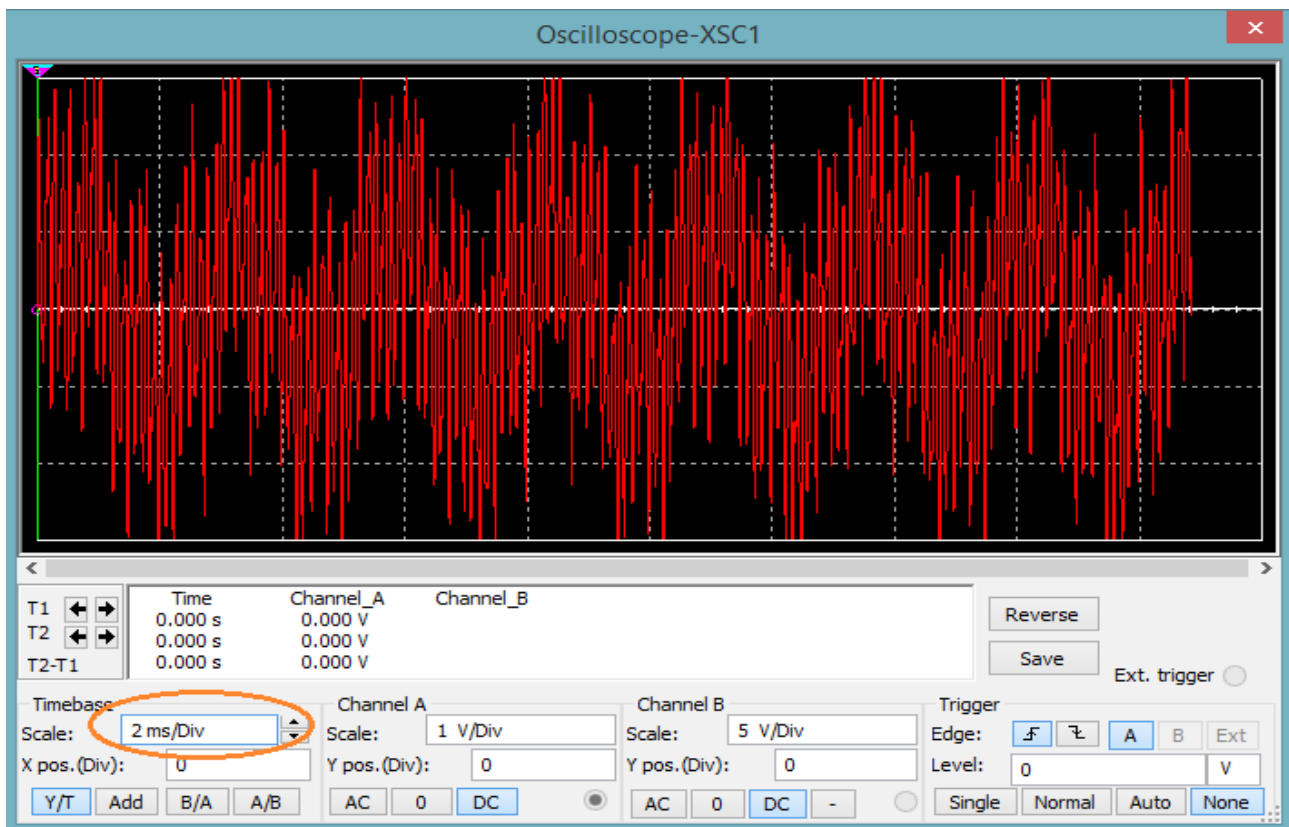
Για να επαληθεύσουμε την παραπάνω υπόθεση θα εισάγουμε στο multisim το παραπάνω σήμα και θα μελετήσουμε τόσο το σήμα εξόδου όσο και τα φάσματα των σημάτων εισόδου και εξόδου.

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα παρουσιάσουμε τα σήματα εισόδου και εξόδου σε διαφορετικά διαγράμματα, επομένως έχουμε.

## Σήμα εισόδου

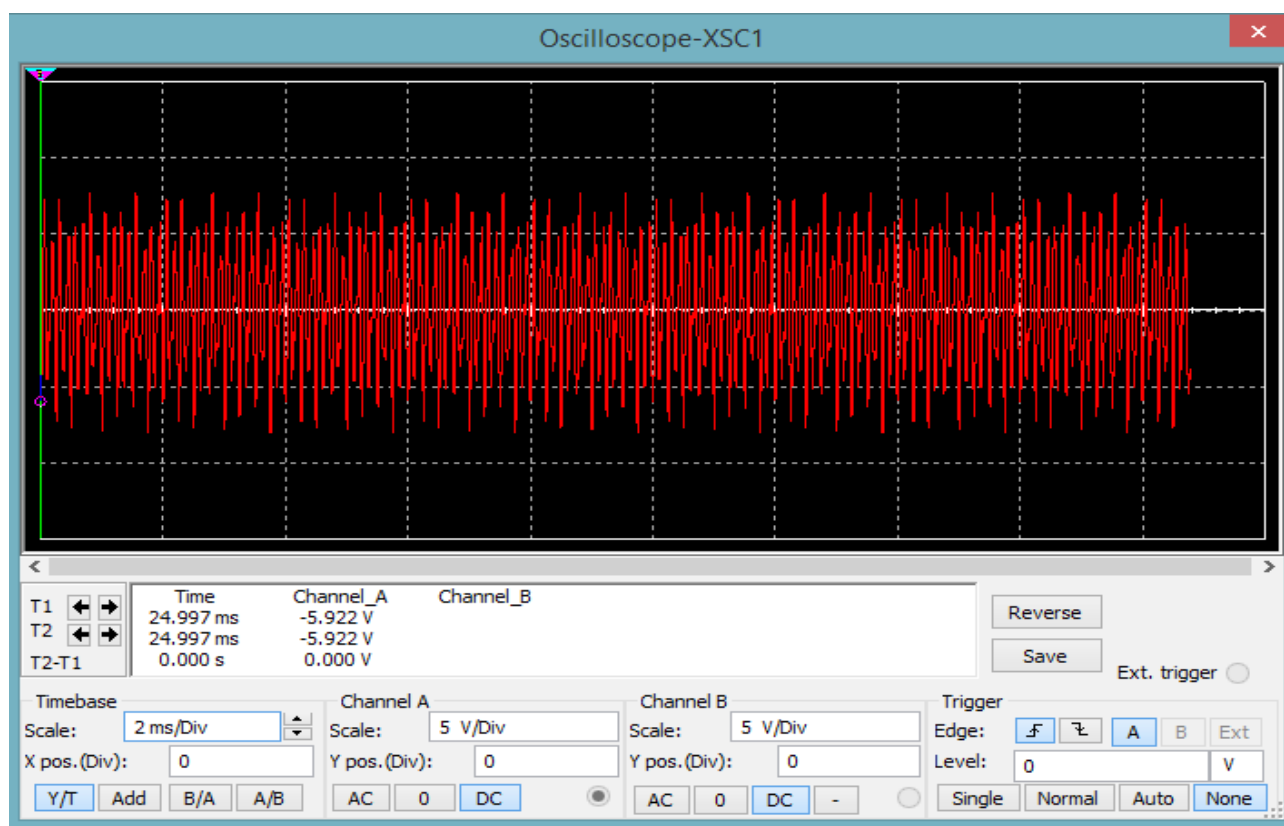


Αλλάζοντας την κλίμακα χρόνου από 200μs/Div σε 2ms/Div παίρνουμε το παρακάτω σχήμα



Από το πρώτο σχήματα βλέπουμε ότι το σήμα εισόδου περιέχει σήματα μεγάλης συχνότητας. Το δεύτερο υποδεικνύει ότι περιέχονται και σήματα μικρότερης συχνότητας καθώς φαίνεται μια πιο αργή ταλάντωση στο σήμα εισόδου, κάτι που ήδη ξέρουμε καθώς γνωρίζουμε τις συχνότητες των σημάτων εισόδου. Η σχέση σύνδεσης όμως των παραπάνω παρατηρήσεων με το σήμα εξόδου θα φανεί καλύτερα στα παρακάτω διαγράμματα του σήματος εξόδου.

## Σήμα εξόδου

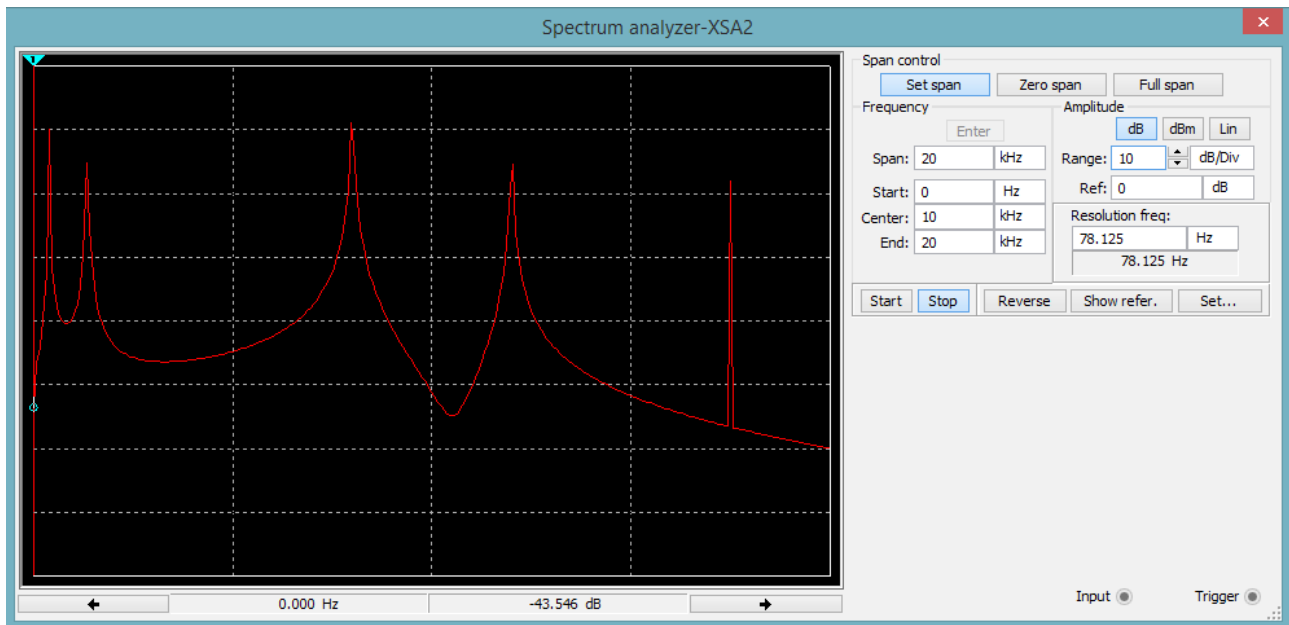


Τοποθετώντας ξανά την κλίμακα του χρόνου στην τιμή των 2ms/Div βλέπουμε ότι το σήμα εξόδου ενώ συνεχίζει να περιέχει υψηλές συχνότητες δεν περιέχει πλέον τις χαμηλές συχνότητες αφού φαίνεται ότι η αργή μεταβολή του σήματος που υπήρχε στην είσοδο πλέον δεν υπάρχει στην έξοδο, δηλαδή το φίλτρο όπως περιμέναμε απέκοψε τις χαμηλές συχνότητες της εισόδου.

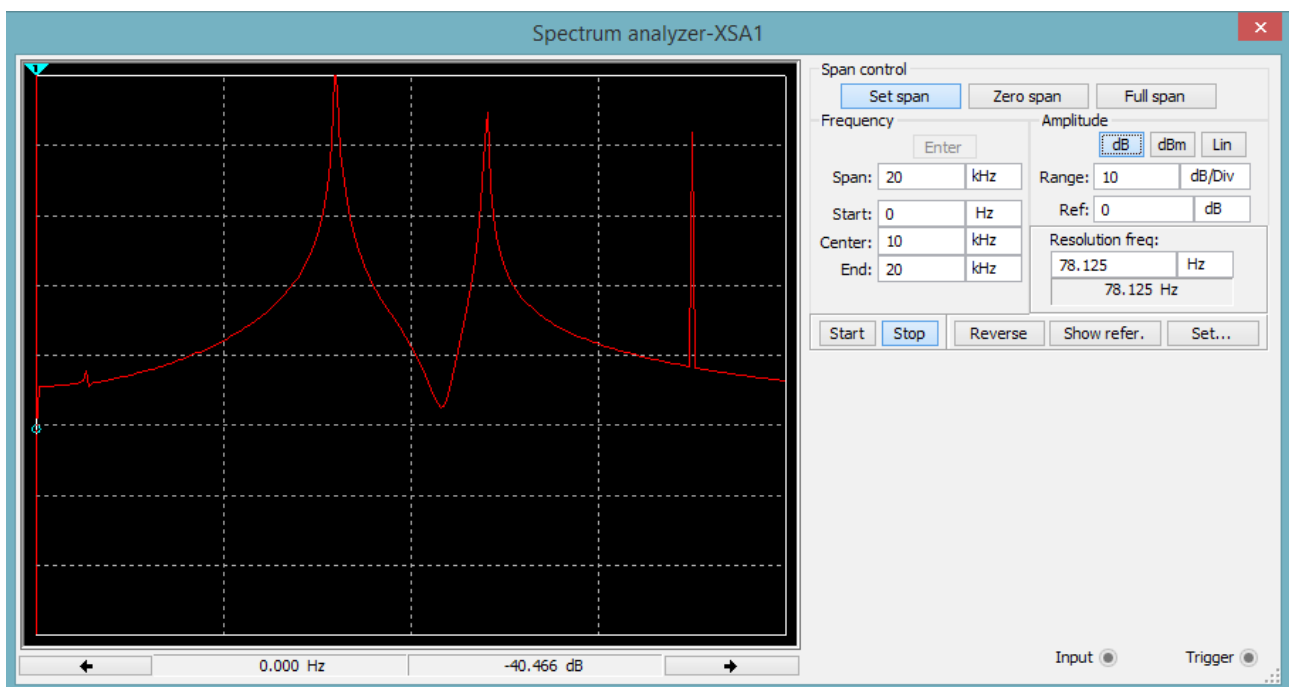
- Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του ανωδιαβατού φίλτρου Butterworth. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα εξετάσουμε τα φάσματα τόσο στο Multisim όσο και στο Matlab. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να έχουμε τα ίδια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

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα φάσματος για το σήμα εισόδου και εξόδου από το multisim καθώς και οι ρυθμίσεις των κλιμάκων στον φασματογράφο.

### Φάσμα εισόδου



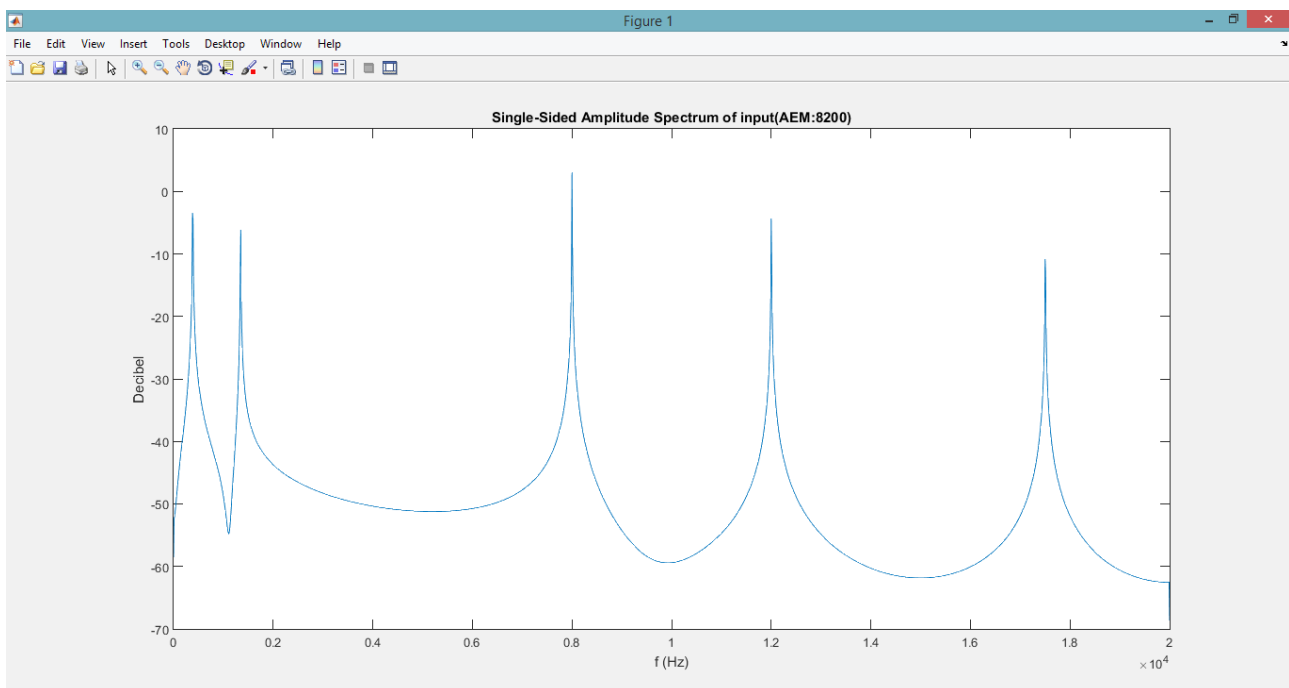
### Φάσμα εξόδου



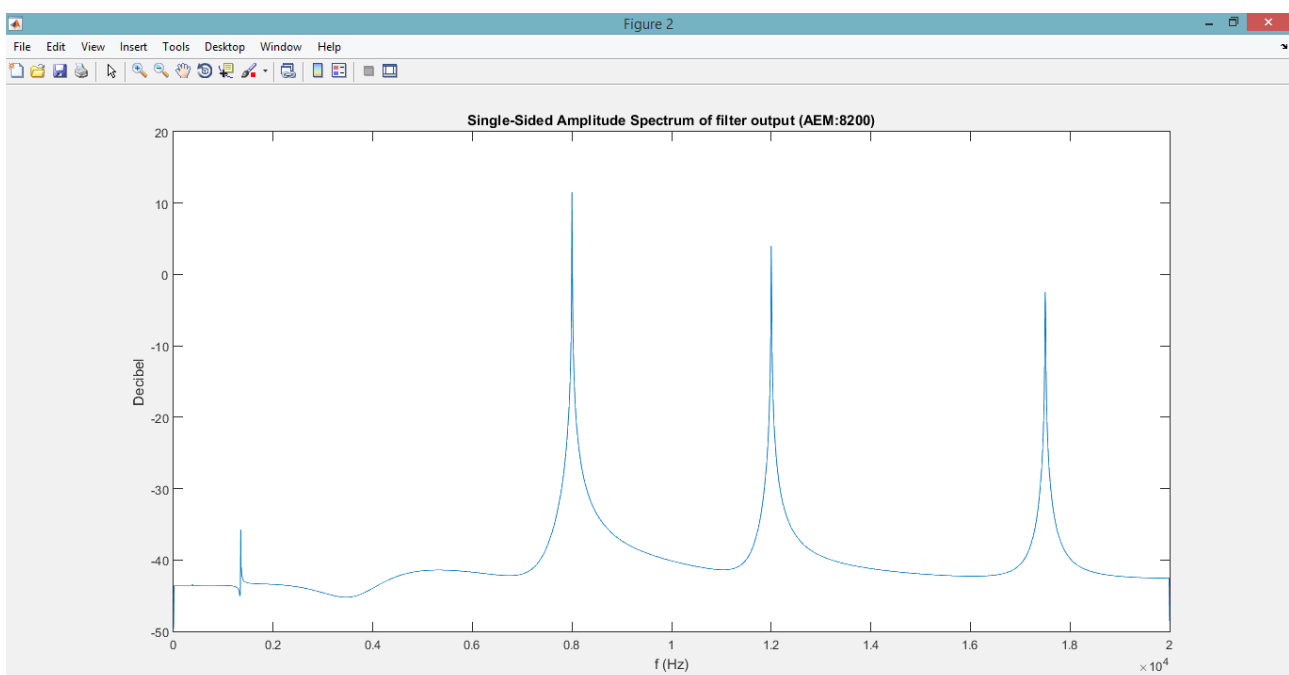
Οι ρυθμίσεις των φασματογράφων είναι ίδιες. Από τα φάσματα που παίρνουμε πλέον γίνεται ξεκάθαρη η συμπεριφορά του φίλτρου. Βλέπουμε ότι οι συχνότητες στην ζώνη αποκοπής έχουν αποκοπή από το σήμα εξόδου όπως αρχικά είχαμε προβλέψει. Επιπλέον στην ζώνη διάβασης παρατηρούμε ότι τα σήματα υπόκεινται σε ενίσχυση 10dB όπως προβλέπουν οι προδιαγραφές του φίλτρου. Συγκεκριμένα έχοντας ρυθμίσει το Range στο φασματογράφο ίσο με 10dB φαίνεται ότι τα σήματα έχουν μετακινηθεί κατά μια κλίμακα πάνω δηλαδή 10dB.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα φάσματος από της θεωρητική ανάλυση του Matlab.

### Φάσμα εισόδου



### Φάσμα εξόδου



Η θεωρητική ανάλυση που έγινε στο matlab υποδεικνύει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που πήραμε από την κυκλωματική ανάλυση. Δηλαδή το φίλτρο αποκόπτει τα σήματα με της εισόδου με χαμηλές συχνότητες  $f_a = 384.62 \text{ Hz}$ ,  $f_b = 1346.17 \text{ Hz}$  που βρίσκονται μέσα στην ζώνη αποκοπής (0 ως 1.9231KHz) του φίλτρου και περνάει τις υπόλοιπες συχνότητες που βρίσκονται στην ζώνη διάβασης ενισχυμένες κατά 10dB. Συνοψίζοντας, λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη συμπεραίνουμε ότι η θεωρητική και κυκλωματική ανάλυση ήταν επιτυχής και το φίλτρο που κατασκευάστηκε αντιστοιχεί σε ένα ανωδιαβατό φίλτρο Butterworth που ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.