

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

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

---

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Εργασία 3<sup>η</sup>

ΒΙΚΤΩΡ ΝΑΣΤΟΣ

AEM: 9297

Email : viktorna@auth.gr

Θεσσαλονίκη 09/2020

## Περιεχόμενα

Εργασία #3 : Σχεδίαση Ζωνοφρακτικών φίλτρων .....	3
A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου .....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	8
• Ρύθμιση Κέρδους .....	13
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB .....	15
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM .....	19

## Εργασία #3 : Σχεδίαση Ζωνοφρακτικών φίλτρων

### ΖΩΝΟΦΡΑΚΤΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ INVERSE CHEBYSHEV

Να σχεδιασθεί ένα ζωνοφρακτικό φίλτρο Inverse Chebyshev, το οποίο να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές συχνότητας και απόσβεσης :

$$AEM = [9 \ 2 \ 9 \ 7]$$

$$f_0 = 1.8 \text{ kHz}$$

$$f_1 = 1200 + 25 \cdot (9 - \alpha_4) = 1.25 \text{ kHz}$$

$$f_2 = \frac{f_0^2}{f_1} = 2.592 \text{ kHz}$$

$$f_3 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + 4f_0^2}}{2} = 1.4654 \text{ kHz} \text{ με } D = \frac{1}{1.8} \cdot \frac{f_0^2 - f_1^2}{f_1} = 745.5556 \text{ kHz}$$

$$f_4 = \frac{f_0^2}{f_3} = 2.211 \text{ kHz}$$

$$a_{min} = 30 - \alpha_3 = 21 \text{ dB}$$

$$a_{max} = 0.5 + \frac{\alpha_4}{18} = 0.8889 \text{ dB}$$

### A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

#### 1. Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

- Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστούν οι προδιαγραφές του πρότυπου χαμηλοπερατού φίλτρου.

Μετατρέπουμε τις συχνότητες :

$$\omega_0 = 11310 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_1 = 7854 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_2 = 16286 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_3 = 9207.5 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_4 = 13892 \text{ rad/sec}$$

και

$$a_{max} = 0.8889 \text{ dB} \quad a_{min} = 21 \text{ dB}$$

$$\Omega p = 1 \text{ και } \Omega s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_4 - \omega_3} = 1.8 \text{ και } bw = \omega_2 - \omega_1 = 8432 \text{ rad/sec}$$

- Προσδιορισμός  $\varepsilon$ ,  $n$ ,  $\alpha$ , συχνότητας ημίσειας ισχύος.

Στα πλαίσια της διαδικασίας σχεδίασης θα πρέπει να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου που απαιτείται. Χρησιμοποιώ τον τύπο :

$$n = \frac{\cosh - 1 [(10^{a_{min}/10} - 1) / (10^{a_{max}/10} - 1)]^{1/2}}{\cosh - 1 \omega s} = 3.2253$$

Επειδή το  $n$  δεν είναι ακέραιος αριθμός στρογγυλοποιούμε προς τον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο, άρα  $n = 4$ .

Ο συντελεστής  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  και η συχνότητα ημίσειας ισχύος υπολογίζονται παρακάτω σύμφωνα με τους τύπους:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{a_{max}}{10}} - 1}} = 0.0895$$

$$\alpha = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) = 0.772$$

$$\Omega_{hp} = \cosh \left[ \frac{1}{n} \cosh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right] = 0.7595 \text{ rad/sec (αντιστροφή του φίλτρου Chebyshev)}$$

Επειδή η τάξη του φίλτρου είναι 4, οι γωνίες Butterworth που προκύπτουν

$$\Psi_k = \pm 22.5^\circ, \pm 67.5^\circ.$$

Από τον τύπο

$$pk = -\sinh(\alpha) * \cos(\psi_k) \pm j \cosh(\alpha) * \sin(\psi_k) \text{ και}$$

$$Q = \frac{\sqrt{|pk|}}{2 \cdot |Re(pk)|}$$

παίρνω τους πόλους της συνάρτησης μεταφοράς. Επομένως θα έχω:

$$p_{1,2} = -0.7926 \pm j 0.5042 \Rightarrow Q_{1,2} = 0.5926 \text{ και } \Omega_{1,2} = 0.9393$$
$$p_{3,4} = -0.3283 \pm j 1.2173 \Rightarrow Q_{3,4} = 1.9202 \text{ και } \Omega_{3,4} = 1.2607$$

$\Psi_{\kappa}$	$Q_{\kappa}$	$P_{\kappa}$	$\Omega_{\kappa}$
$\pm 22.5^{\circ}$	0.5926	$-0.7926 \pm j 0.5042$	0.9393
$\pm 67.5^{\circ}$	1.9202	$-0.3283 \pm j 1.2173$	1.2607

Οι πόλοι απόκρισης της ICH προκύπτουν από την αντιστροφή των πόλων της απόκρισης CH :

$$\tilde{\Omega}_1 = \frac{1}{\Omega_{1,2}} = 1.0646 \text{ και } \tilde{\Omega}_2 = \frac{1}{\Omega_{3,4}} = 0.7932$$

Κλιμακοποιούμε τα μέτρα των πόλων της ICH έτσι ώστε να μεταφερθούμε στο πεδίο συχνοτήτων της απόκρισης CH:

$$\begin{aligned}\tilde{\Omega}_1 &= \tilde{\Omega}_1 \cdot \Omega_S = 1.9162 \\ \tilde{\Omega}_2 &= \tilde{\Omega}_2 \cdot \Omega_S = 1.4277\end{aligned}$$

$\Psi_{\kappa}$	$Q_{\kappa}$	$P_{\kappa}$	$\Omega_{\kappa}$
$\pm 22.5^{\circ}$	0.5926	$-0.7926 \pm j 0.5042$	1.9162
$\pm 67.5^{\circ}$	1.9202	$-0.3283 \pm j 1.2173$	1.4277

Οπότε η θέση των πόλων είναι:

$$\begin{aligned}\Sigma_{1,2} &= -0.4403 \text{ και } \Omega_{1,2} = 0.2801 \\ \Sigma_{3,4} &= -0.1824 \text{ και } \Omega_{3,4} = 0.6763\end{aligned}$$

Τα μηδενικά της απόκρισης ICH προκύπτουν από την :

$$\omega_{\kappa} = \sec\left(\frac{k\pi}{2n}\right) (\kappa \text{ περιττό}) \Rightarrow \omega_{\kappa} = \sec\left(\frac{k\pi}{6}\right) \quad \kappa = 1,3$$

$$\text{Τελικά: } \Omega_{z1} = 1.0824, \quad \Omega_{z2} = 2.6131$$

Κλιμακοποιούμε τα μηδενικά της ICH:

$$\begin{aligned}\tilde{\Omega}_{z1} &= \Omega_{z1} \cdot \Omega_S = 1.9483 \\ \tilde{\Omega}_{z2} &= \Omega_{z2} \cdot \Omega_S = 4.7036\end{aligned}$$

Αντιστρέφουμε τα μηδενικά της ICH:

$$\begin{aligned}\widehat{\Omega}_{z1} &= \frac{1}{\tilde{\Omega}_{z1}} = 0.5133 \\ \widehat{\Omega}_{z2} &= \frac{1}{\tilde{\Omega}_{z2}} = 0.2126\end{aligned}$$

Μετασχηματίζουμε τώρα τους πόλους και τα μηδενικά της κατωδιαβατής απόκρισης εφαρμόζοντας το ζωνοδιαβατό μετασχηματισμό συχνότητας  $LP \rightarrow BP$ . Εφαρμογή αλγόριθμου Geffe.

### Μετασχηματισμός μιγαδικού πόλου $-0.7926 \pm j 0.5042$ :

Πρώτα υπολογίζω το συντελεστή ποιότητας AC:

$$qc = 1.3413$$

$$\Sigma_{1,2} = -0.4403$$

$$\Omega_{1,2} = 0.2801$$

$$C = \Sigma_{1,2}^2 + \Omega_{1,2}^2 = 0.2723$$

$$D = \frac{2\Sigma_{1,2}}{qc} = 0.6566$$

$$E = 4 + \frac{C_1}{qc^2} = 4.1514$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 3.9382$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{2}(E + G)} = 3.0632$$

$$K = \frac{\Sigma_{1,2}Q}{qc} = 1.0056$$

$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.1114$$

$$\omega_{01} = 10176 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{02} = 12570 \text{ rad/sec}$$

Από τη διαδικασία μετασχηματισμού προκύπτει ότι οι πόλοι  $P_{1,2} = -\Sigma_{1,2} \pm j \Omega_{1,2}$  της συνάρτησης μεταφοράς, μετασχηματίζονται σε δύο ζεύγη μιγαδικών πόλων,  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$  καθώς και δύο μηδενικά στο  $s = 0$ .

### Μετασχηματισμός μιγαδικού πόλου $-0.3283 \pm j 1.2173$ :

Πρώτα υπολογίζω το συντελεστή ποιότητας AC:

$$qc = 1.3413$$

$$\Sigma_{3,4} = -0.1824$$

$$\Omega_{3,4} = 0.6763$$

$$C = \Sigma_{3,4}^2 + \Omega_{3,4}^2 = 0.4906$$

$$D = \frac{2\Sigma_{3,4}}{qc} = 0.2720$$

$$E = 4 + \frac{C}{qc^2} = 4.2727$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 4.2379$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{2}(E + G)} = 7.5853$$

$$K = \frac{\Sigma_{3,4}Q}{qc} = 1.0314$$

$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.2841$$

$$\omega_{03} = 8807.8 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{04} = 14522 \text{ rad/sec}$$

Από τη διαδικασία μετασχηματισμού προκύπτει ότι οι πόλοι  $P_{3,4} = -\Sigma_{3,4} \pm j\Omega_{3,4}$  της συνάρτησης μεταφοράς, μετασχηματίζονται σε δύο ζεύγη μιγαδικών πόλων,  $\omega_{03}$ ,  $\omega_{04}$  καθώς και δύο μηδενικά στο  $s = 0$ .

### Μετασχηματισμός φανταστικού μηδενικού $\tilde{\Omega}_{z1} = 1.9483$

Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο ζωνοδιαβατού μετασχηματισμού των μηδενικών και έχουμε:

$$K = 2 + \frac{\Omega_{z1}^2}{qc^2} = 2.1464$$

$$X = \frac{k + \sqrt{k^2 - 4}}{2} = 1.4628$$

$$\omega_{z1} = \omega_0 \sqrt{x} = 13679 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{z2} = \frac{\omega_0}{\sqrt{x}} = 9351 \text{ rad/sec}$$

Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι η δημιουργία δύο ζευγών φανταστικών μηδενικών και δύο πόλων στο μηδέν.

### Μετασχηματισμός φανταστικού μηδενικού $\tilde{\Omega}_{z2} = 4.7036$

Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο ζωνοδιαβατού μετασχηματισμού των μηδενικών και έχουμε:

$$K = 2 + \frac{\Omega_{z2}^2}{qc^2} = 2.0251$$

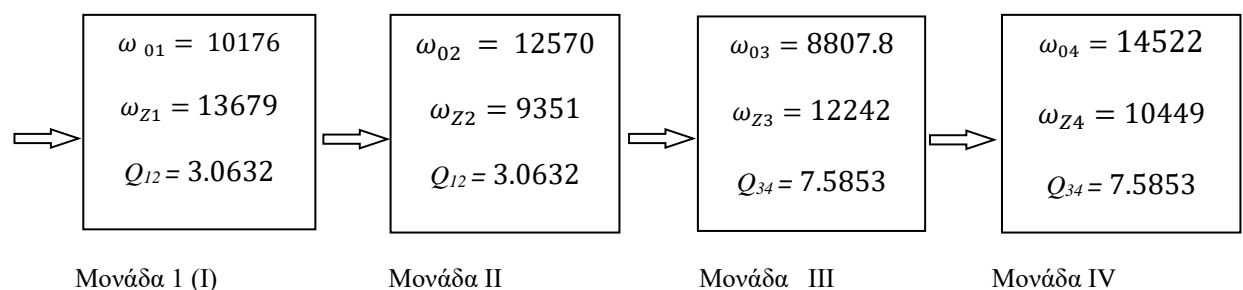
$$X = \frac{k + \sqrt{k^2 - 4}}{2} = 1.1716$$

$$\omega_{z3} = \omega_0 \sqrt{x} = 12242 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{z4} = \frac{\omega_0}{\sqrt{x}} = 10449 \text{ rad/sec}$$

Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι η δημιουργία δύο ζευγών φανταστικών μηδενικών και δύο πόλων στο μηδέν.

Ομαδοποιούμε τους πόλους και τα μηδενικά της ζωνόφρακτης απόκρισης. Προκύπτει λοιπόν πως η συνάρτηση μεταφοράς αποτελείται από 4 μονάδες οι οποίες και φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



## 2. Υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς

Για τις μονάδες (I), (II), (III) και (IV) ζητείται να υλοποιηθούν τα LPN και HPN με το κύκλωμα Bactor.

Η πρώτη και η τρίτη μονάδα αποτελούνται από ένα LPN ( $\frac{\omega_{z1}}{\omega_{01}} > 1$ )

ζωνόφρακτο φίλτρο και θα υλοποιηθούν με το κύκλωμα Bactor, σύμφωνα με το σχήμα 7.23.



Αντίστοιχα, η δεύτερη και η τέταρτη μονάδα αποτελούνται από ένα HPN ( $\frac{\omega_{z1}}{\omega_{01}} < 1$ ) ζωνόφρακτο φίλτρο και θα υλοποιηθούν με το κύκλωμα Bostor, σύμφωνα με το σχήμα 7.21.

Επειδή υλοποιείται το φίλτρο Inverse Chebyshev, κάθε πόλος έχει το δικό του μέτρο και επομένως η κλιμακοποίηση γίνεται για κάθε μονάδα ξεχωριστά.

Θεωρώ αρχικά  $\omega_0 = 1$ , ώστε να υπολογίσω τις κανονικοποιημένες μονάδες.

### Μονάδα (I)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με το φίλτρο LPN του Σχ. 7.23.

$\omega_{z01} = \frac{\omega_{z1}}{\omega_{01}} = 1.3442$  και  $Q_{1,2} = 3.0632$ . Με βάση τη σχεδίαση έχουμε τα παρακάτω κανονικοποιημένα στοιχεία:

$$R1 = 1, \quad R5 = \frac{4 \cdot Q_{1,2}^2}{\omega_{z01}^2 - 1} = 46.5107, \quad R2 = 4 \cdot Q_{1,2}^2 = 37.5332,$$

$$R3 = \frac{\omega_{z01}^2}{2 \cdot Q_{1,2}^2} = 0.0963, \quad R4 = 1, \quad C1 = \frac{1}{2Q_{1,2}} = 0.1632$$

Το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις υψηλές συχνότητες είναι:

$$K_{1H} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{z01}^2}{2 \cdot Q_{1,2}^2}} = 0.9122$$

Το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις χαμηλές συχνότητες είναι:

$$K_{1L} = K_{1H} \cdot \omega_{z01}^2 = 1.6483$$

### Κλιμακοποίηση

Είναι  $\omega_0 = 10176 \text{ rad/sec}$  άρα  $Kf = 10176$ . Για να έχω πυκνωτές  $0.1 \mu F$ , πρέπει να επιλέξω  $km = \frac{C_{1old}}{kf \cdot C_{new}} = 160.4057$ . Τα πραγματικά στοιχεία λοιπόν είναι τα εξής:

$$R1 = R1 \cdot k_m = 160.4057 \Omega$$

$$R2 = R2 \cdot k_m = 6020.5 \Omega$$

$$R3 = R3 \cdot k_m = 15.445 \Omega$$

$$R4 = R4 \cdot k_m = 160.4057 \Omega$$

$$R5 = R5 \cdot k_m = 7460.6 \Omega$$

$$C1 = 0.1 \mu F$$

## Μονάδα (II)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με το φίλτρο HPN του Σχ.7.21.

Θεωρούμε προσωρινά ότι  $\omega_0 = 1$  και έχουμε  $\omega_{z02} = \frac{\omega_{z2}}{\omega_{02}} = 0.7439$  και  $Q_{1,2} = 3.0632$ .

Με βάση τη σχεδίαση έχουμε τα παρακάτω κανονικοποιημένα στοιχεία:

$$R1 = R3 = 1, R2 = (2 + K_{21})^2 \cdot Q_{1,2}^2 = 73.9323,$$

$$R4 = (2 + K_{21}) \cdot Q_{1,2}^2 = 26.3387,$$

$$C2 = \frac{1}{(2+K_{21}) \cdot Q_{1,2}} = 0.1163, C1 = K_{21} \cdot C2 = 0.0939$$

και το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις υψηλές συχνότητες είναι:

$$K_{21} = \frac{1}{\omega_{z02}^2} - 1 = 0.8070$$

$$\text{και } K_{22} = \frac{(2+K_{21}) \cdot Q_{1,2}^2}{(2+K_{21}) \cdot Q_{1,2}^2 + 1} = 0.9634$$

$$K_{2H} = K_{22} \cdot \left( \frac{1}{\omega_{z02}^2} \right) = 1.7409$$

$$K_{2L} = K_{2H} \cdot \omega_{z02}^2 = 0.9634$$

## Κλιμακοποίηση

Είναι  $\omega_0 = 12570 \text{ rad/sec}$  άρα  $Kf = 12570$ . Για να έχω πυκνωτές  $0.1 \mu F$ , πρέπει να επιλέξω  $km = \frac{C_{22}}{kf \cdot C_{new}} = 92.5232$ . Τα πραγματικά στοιχεία λοιπόν είναι τα εξής:

$$R1 = R1 \cdot k_m = 92.5232 \Omega$$

$$R2 = R2 \cdot k_m = 6840.5 \Omega$$

$$R3 = R3 \cdot k_m = 92.5232 \Omega$$

$$R4 = R4 \cdot k_m = 2436.9 \Omega$$

$$C1 = 80.698 \text{ nF}$$

$$C2 = 0.1 \mu F$$

### Μονάδα (III)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με το φίλτρο LPN του Σχ. 7.23.

$\omega_{z03} = \frac{\omega_{z1}}{\omega_{03}} = 1.3899$  και  $Q_{3,4} = 7.5853$ . Με βάση τη σχεδίαση έχουμε τα παρακάτω κανονικοποιημένα στοιχεία:

$$R1 = 1, \quad R5 = \frac{4 \cdot Q_{3,4}^2}{\omega_{z03}^2 - 1} = 247.0171,$$

$$R2 = 4 \cdot Q_{3,4}^2 = 230.1444,$$

$$R3 = \frac{\omega_{z03}^2}{4 \cdot Q_{3,4}^2} = 0.0168, \quad R4 = 1, \quad C1 = \frac{1}{2Q_{3,4}} = 0.0659$$

και το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις υψηλές συχνότητες είναι:

$$K_{3H} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{z03}^2}{2 \cdot Q_{3,4}^2}} = 0.9835$$

Το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις χαμηλές συχνότητες είναι:

$$K_{3L} = K_{3H} \cdot \omega_{z03}^2 = 1.8998$$

### Κλιμακοποίηση

Είναι  $\omega_0 = 8807.8 \text{ rad/sec}$  άρα  $Kf = 8807.8$ . Για να έχω πυκνωτές  $0.1 \mu F$ , πρέπει να επιλέξω  $km = \frac{C_{old}}{kf \cdot C_{new}} = 74.8399$ . Τα πραγματικά στοιχεία λοιπόν είναι τα εξής:

$$R1 = R1 \cdot k_m = 74.8399 \Omega$$

$$R2 = R2 \cdot k_m = 17224 \Omega$$

$$R3 = R3 \cdot k_m = 1.2563 \Omega$$

$$R4 = R4 \cdot k_m = 74.8399 \Omega$$

$$R5 = R5 \cdot k_m = 18.487 \Omega$$

$$C1 = 0.1 \mu F$$

### Μονάδα (IV)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με το φίλτρο **HPN του Σχ.7.21**.

Θεωρούμε προσωρινά ότι  $\omega_0 = 1$  και έχουμε  $\omega_{z04} = \frac{\omega_{z4}}{\omega_{04}} = 0.7195$  και  $Q_{3,4} = 7.5853$ .

Με βάση τη σχεδίαση έχουμε τα παρακάτω κανονικοποιημένα στοιχεία:

$$R1 = R3 = 1, \quad R2 = (2 + K_{41})^2 \cdot Q_{3,4}^2 = 494.5131,$$

$$R4 = (2 + K_{41}) \cdot Q_{3,4}^2 = 168.6783,$$

$$C2 = \frac{1}{(2+K_{41}) \cdot Q_{3,4}} = 0.045, \quad C1 = K_{41} \cdot C2 = 0.0419$$

και το κέρδος της ζωνόφρακτης μονάδας στις υψηλές συχνότητες είναι:

$$K_{41} = \frac{1}{\omega_{z04}^2} - 1 = 0.9317$$

$$\text{και } K_{42} = \frac{(2+K_{41}) \cdot Q_{3,4}^2}{(2+K_{41}) \cdot Q_{3,4}^2 + 1} = 0.9941$$

$$K_{4H} = K_{42} \cdot \left( \frac{1}{\omega_{z04}^2} \right) = 1.9203$$

$$K_{4L} = K_{4H} \cdot \omega_{z04}^2 = 0.9941$$

### Κλιμακοποίηση

Είναι  $\omega_0 = 14522 \text{ rad/sec}$  άρα  $Kf = 14522$ . Για να έχω πυκνωτές  $0.1 \mu F$ , πρέπει να επιλέξω  $km = \frac{C_{22}}{kf \cdot C_{new}} = 30.9651$ . Τα πραγματικά στοιχεία λοιπόν είναι τα εξής:

$$R1 = R_1 \cdot k_m = 30.9651 \Omega$$

$$R2 = R_2 \cdot k_m = 15313 \Omega$$

$$R3 = R_3 \cdot k_m = 30.9651 \Omega$$

$$R4 = R_4 \cdot k_m = 5223.1 \Omega$$

$$C1 = 93.169 \text{ nF}$$

$$C2 = 0.1 \mu F$$

### Ρύθμιση Κέρδους:

Πρέπει σε αυτό το σημείο να ρυθμίσουμε το κέρδος στα **0dB** στις χαμηλές συχνότητες. Το συνολικό κέρδος στις χαμηλές συχνότητες είναι:

$$K = K_{1L} * K_{2L} * K_{3L} * K_{4L} = 2.9991$$

$$\text{Έτσι: } 20\log(\alpha K) = 0 \Rightarrow \alpha = 0.3334$$

Εφ' όσον το  $\alpha < 1$  η τάση εξόδου που δίνει το κύκλωμα είναι μεγαλύτερη από αυτή που ζητάμε. Θα πρέπει λοιπόν να εξασθενήσουμε την είσοδο.

Γ' αυτό χρησιμοποιώ ένα κύκλωμα αναστρέφουσας συνδεσμολογίας με κέρδος  $\alpha = 0.3334$ . Η αναστρέφουσα συνδεσμολογία θα έχει λόγο αντιστάσεων  $R2/R1 = 0.3334$ , δηλαδή  $R1 = 100 \Omega$  και  $R2 = 33.34 \Omega$ .

Τέλος, προστέθηκε και μία ακόμη αναστρέφουσα συνδεσμολογία μοναδιαίου κέρδους έτσι ώστε να μην έχουμε αντιστροφή φάσης.

### Συναρτήσεις μεταφοράς μονάδων

1. Για την πρώτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T1(s) = K_{1H} \frac{s^2 + \omega_{z1}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{0.9122s^2 + 1.707 \cdot 10^8}{s^2 + 3322s + 1.035 \cdot 10^8}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T2(s) = K_{2H} \frac{s^2 + \omega_{z2}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{1.741s^2 + 1.522 \cdot 10^8}{s^2 + 4104s + 1.58 \cdot 10^8}$$

3. Για την τρίτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T3(s) = K_{3H} \frac{s^2 + \omega_{z3}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{0.9835s^2 + 1.474 \cdot 10^8}{s^2 + 1161s + 7.758 \cdot 10^7}$$

4. Για την τέταρτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T4(s) = K_{4H} \frac{s^2 + \omega_{z4}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{1.92s^2 + 2.097 \cdot 10^8}{s^2 + 1915s + 2.109 \cdot 10^8}$$

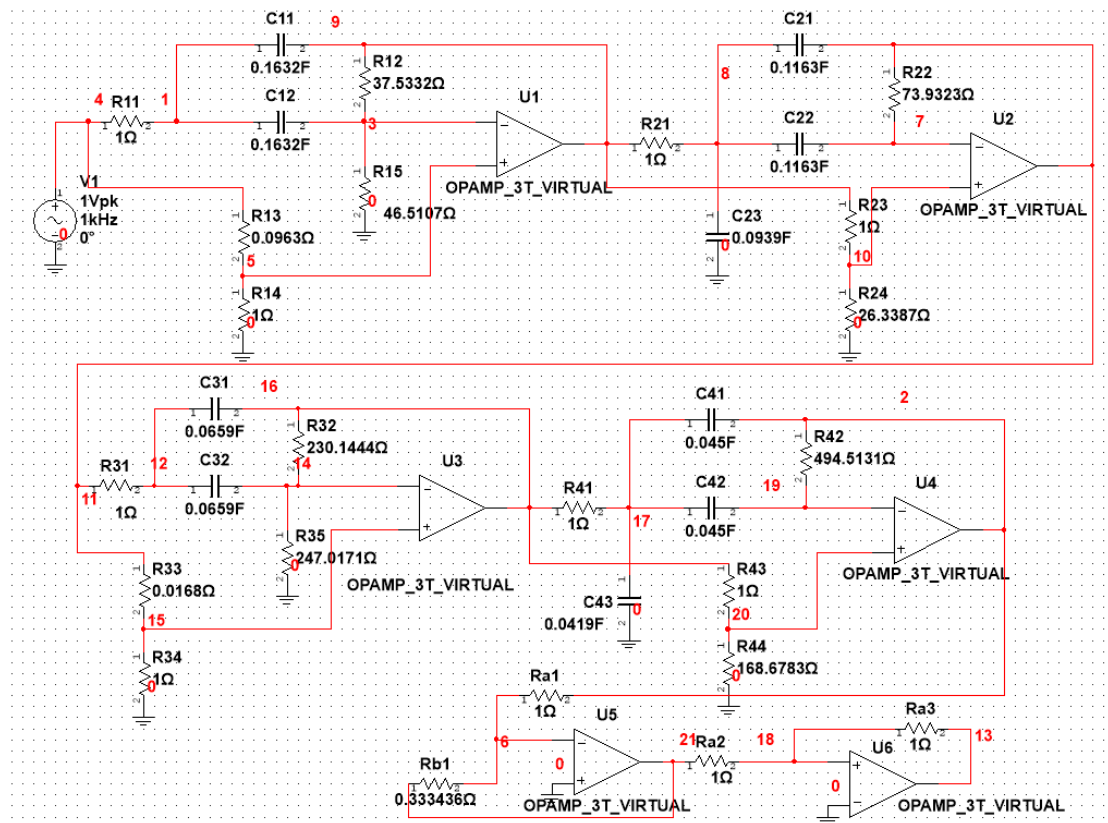
Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοφρακτικού φίλτρου Inverse Chebyshev είναι:

$$TBE(s) = a * T1(s) * T2(s) * T3(s) * T4(s) =$$

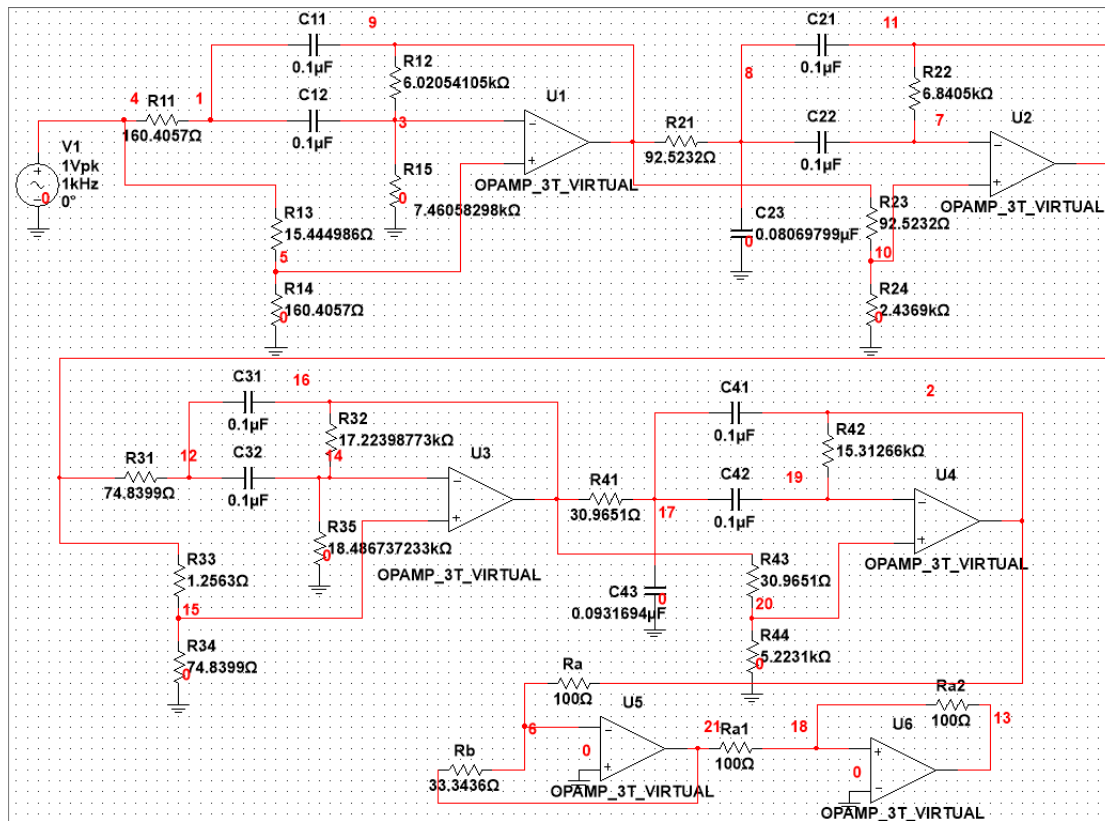
$$\frac{3.1623 s^8 + 5.336 \cdot 10^8 s^6 + 1.038 \cdot 10^{17} s^4 + 8.73 \cdot 10^{24} s^2 + 2.677 \cdot 10^{32}}{s^8 + 1.05 \cdot 10^4 s^7 + 5.887 \cdot 10^8 s^6 + 4.348 \cdot 10^{12} s^5 + 1.186 \cdot 10^{17} s^4 + 5.562 \cdot 10^{20} s^3 + 9.632 \cdot 10^{24} s^2 + 2.198 \cdot 10^{28} s + 2.677 \cdot 10^{32}}$$

$$\text{Όπου } a = \frac{10^0}{K_{1H} * K_{2H} * K_{3H} * K_{4H}} = 0.3334$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τέσσερις μονάδες αλλά και η αναστρέφουσα συνδεσμολογία για την ρύθμιση του κέρδους.



Παρακάτω φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό δηλαδή ζωνοδιαβατό φίλτρο Chebyshev με ό,τι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.

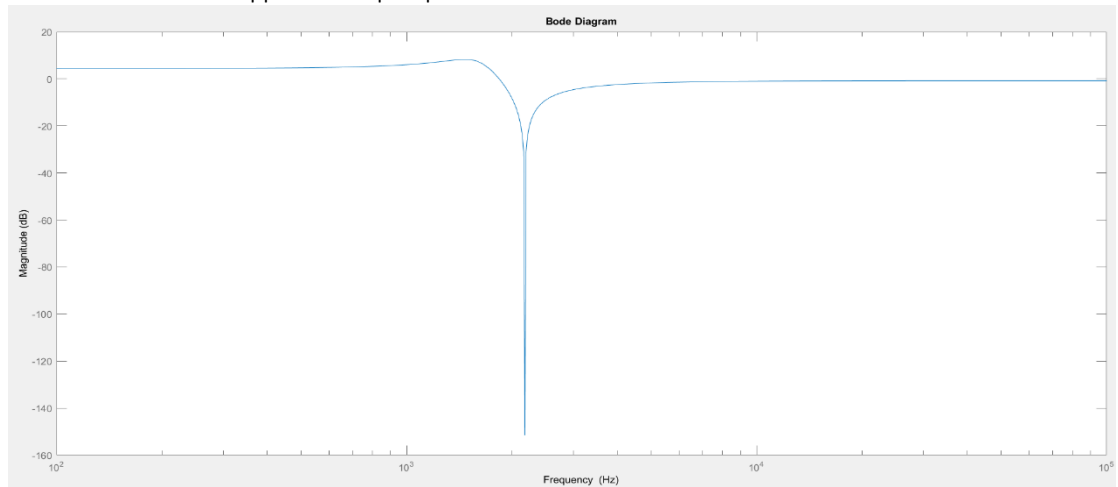


## B. Μελέτη της συνάρτησης μεταφοράς στο Matlab

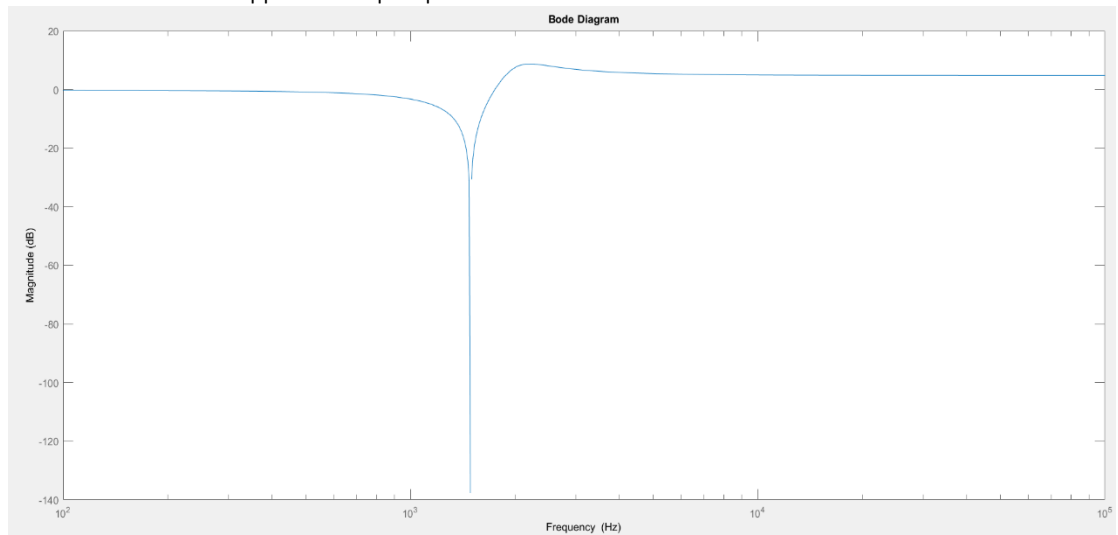
Εισάγουμε στο πρόγραμμα **MATLAB** τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των τεσσάρων μονάδων αλλά και την συνολική συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου και παίρνουμε τις αποκρίσεις πλάτους σε dB.

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

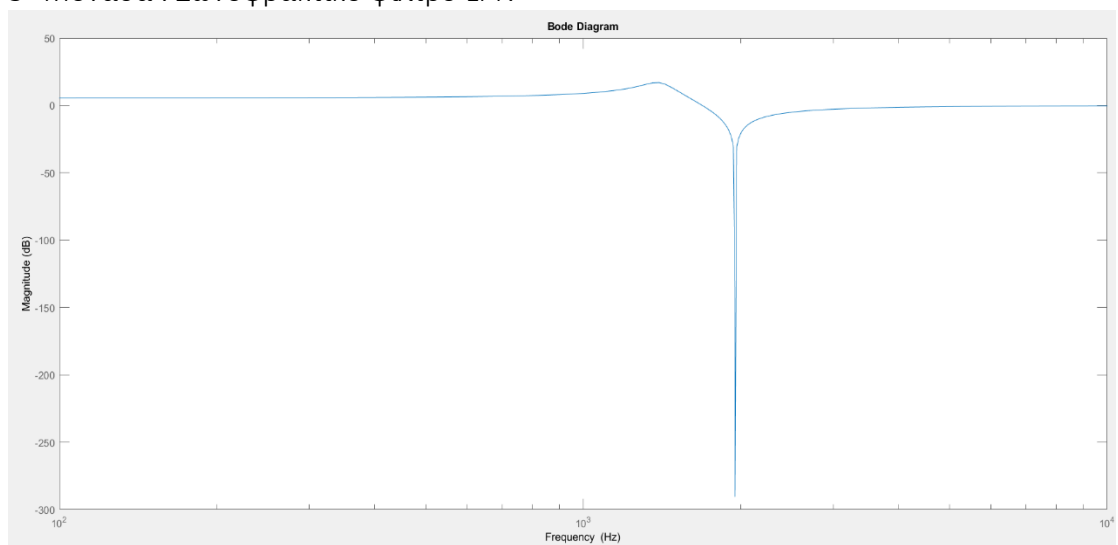
### 1<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο LPN



### 2<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο HPN

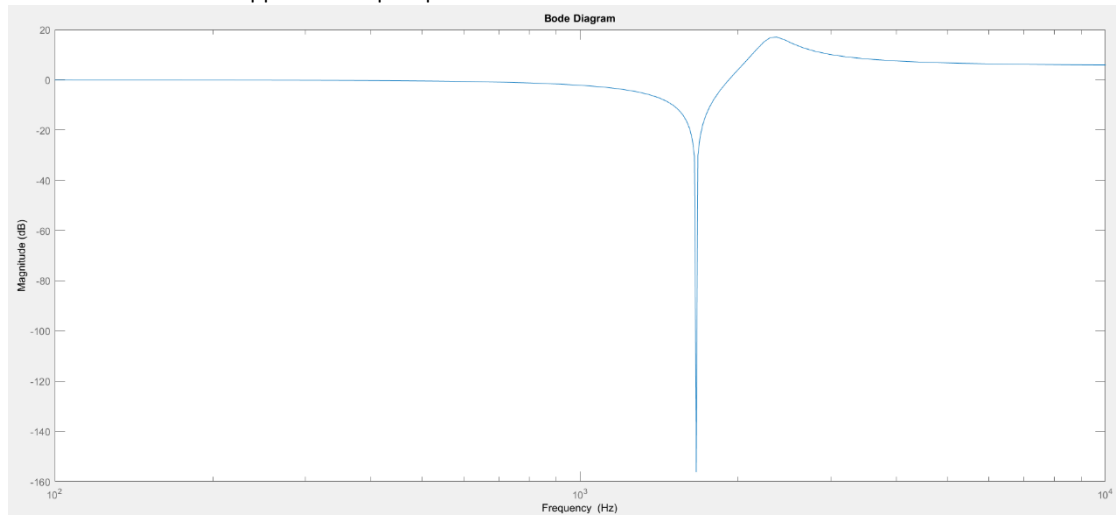


### 3<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο LPN

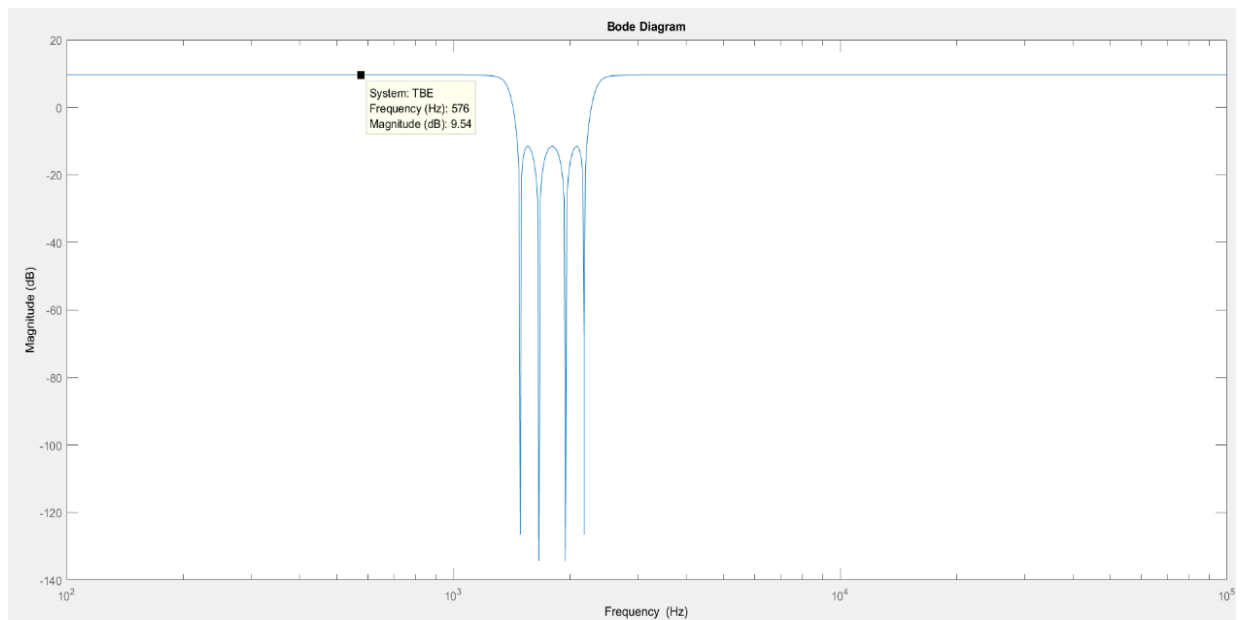




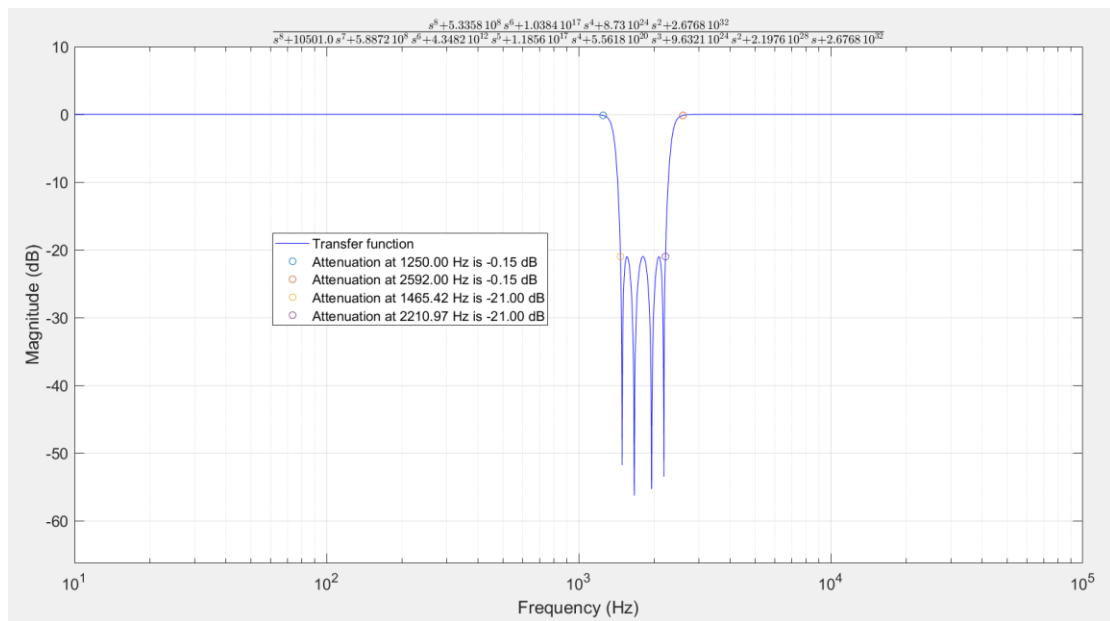
#### 4<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο HPN



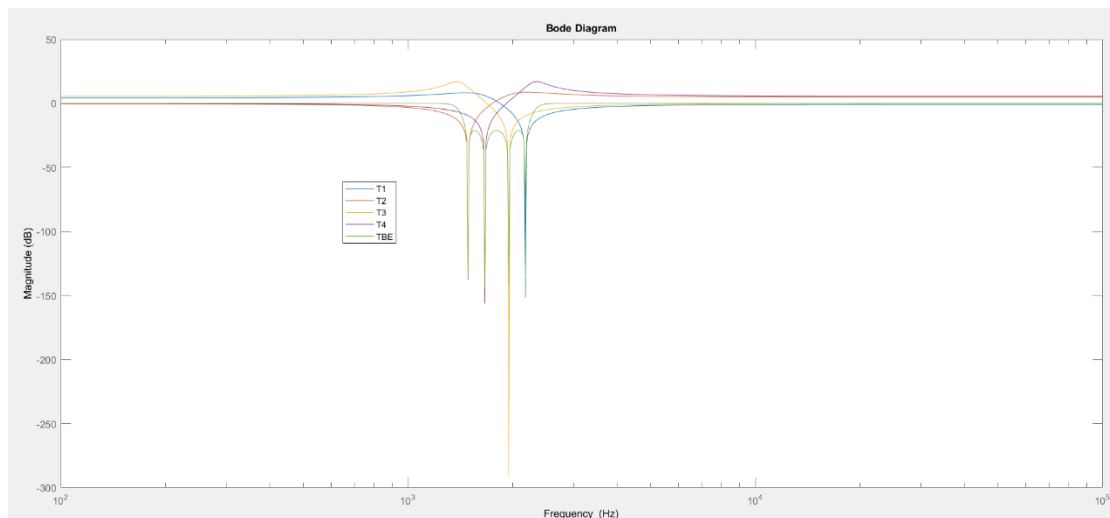
Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας πριν τη ρύθμιση κέρδους.



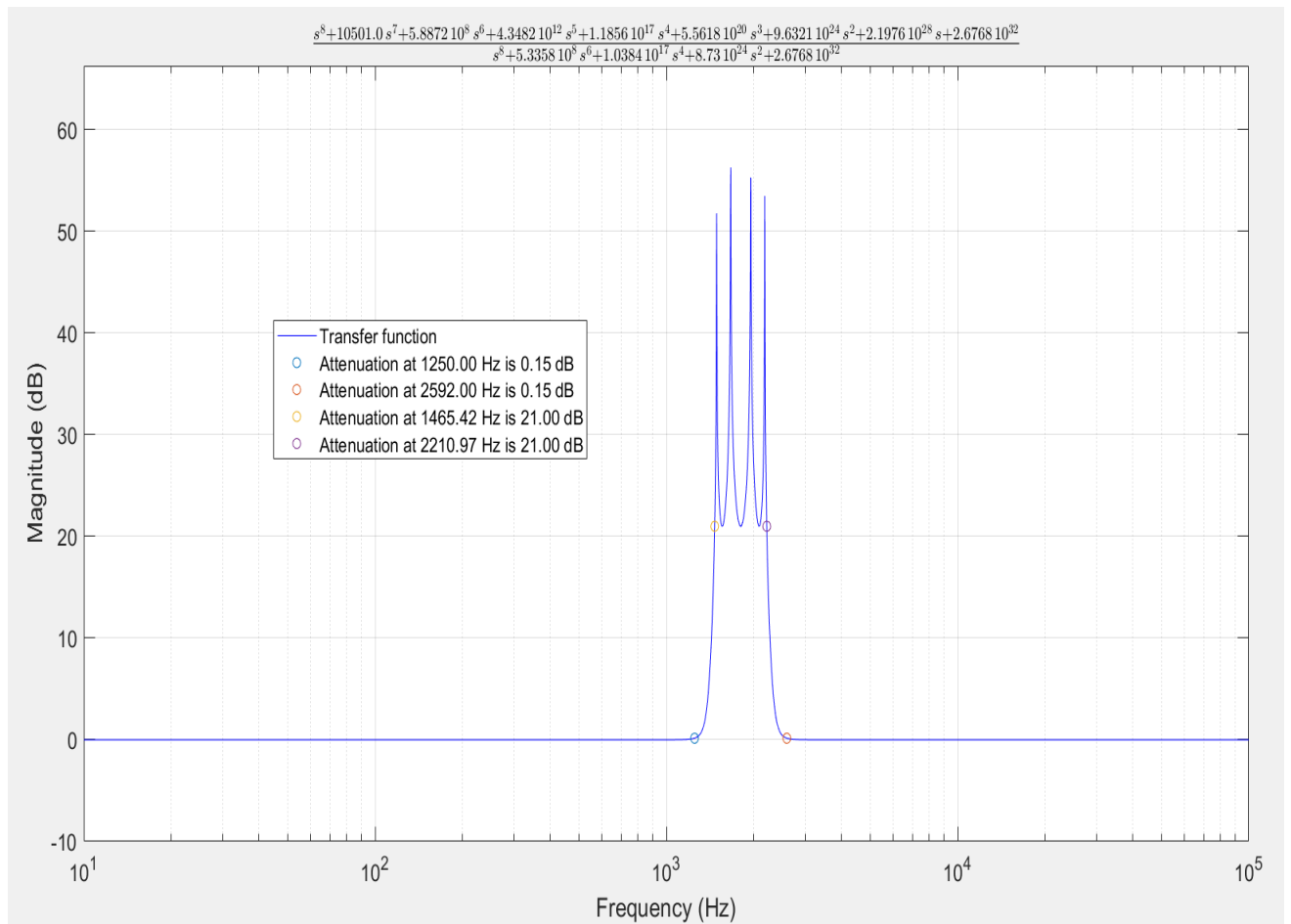
Παρακάτω φαίνεται η απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας μετά τη ρύθμιση του κέρδους.



Παρακάτω φαίνονται οι αποκρίσεις των τεσσάρων μονάδων και της συνολικής μονάδας μαζί.



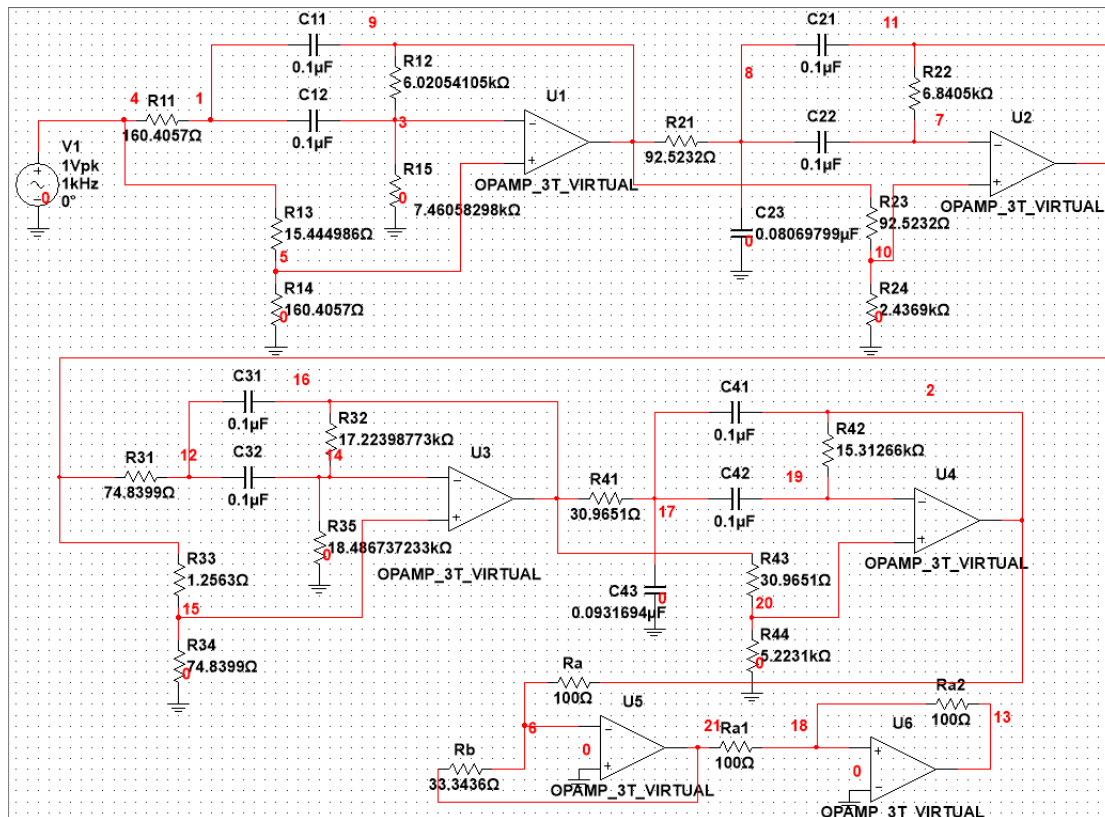
Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dB της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας.



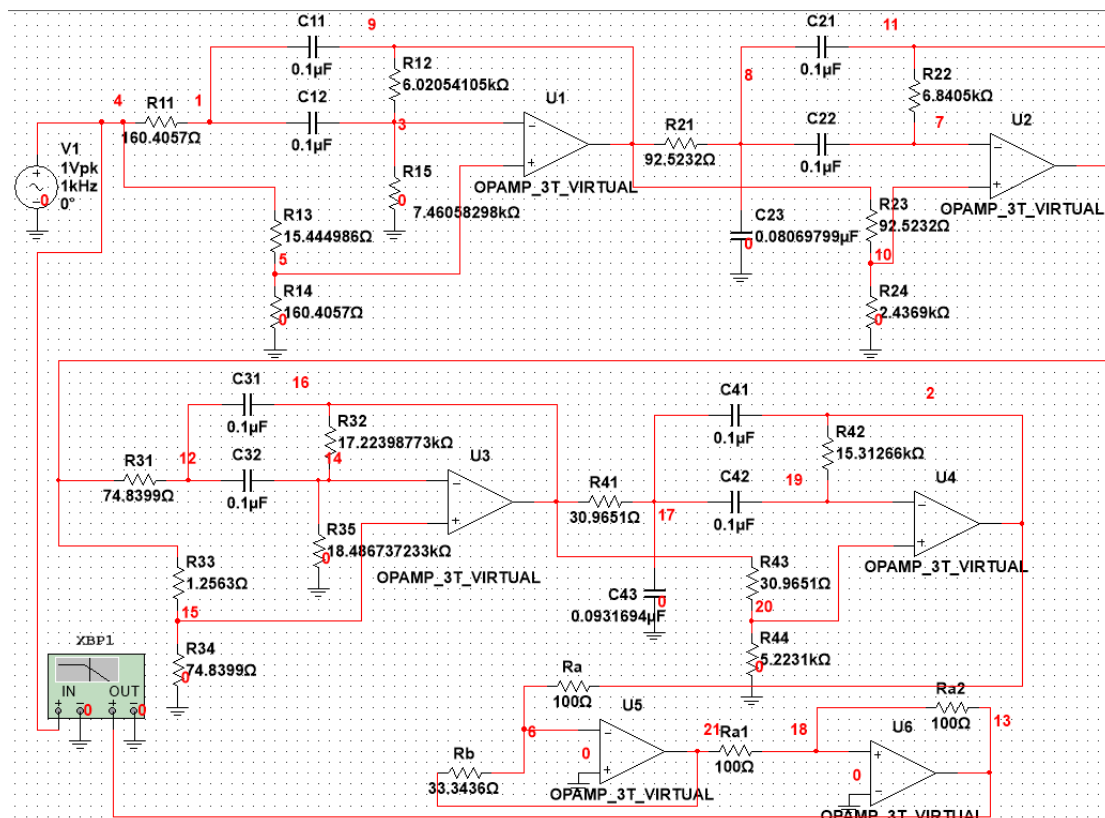
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το φίλτρο μας έχει κέρδος **0 dB** , όπως έχει ζητηθεί. Στις συχνότητες των **1.25 kHz** και **2.592 kHz** θέλουμε να έχουμε ***amax* = 0.8889 dB**. Για τις δυο αυτές συχνότητες έχουμε από το διάγραμμα απόσβεση **0.15 dB**, οπότε η προδιαγραφή αυτή υπερκαλύπτεται, καθώς η τιμή είναι μικρότερη από το ***amax***. Για τις συχνότητες **1.465 kHz** και **2.21097 kHz** υπάρχει η απαίτηση για ***amin* = 21db** .Και η απαίτηση αυτή καλύπτεται οριακά καθώς και για τις δύο συχνότητες έχουμε απόσβεση **21 dB**. Επομένως, μπορούμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση του φίλτρου.

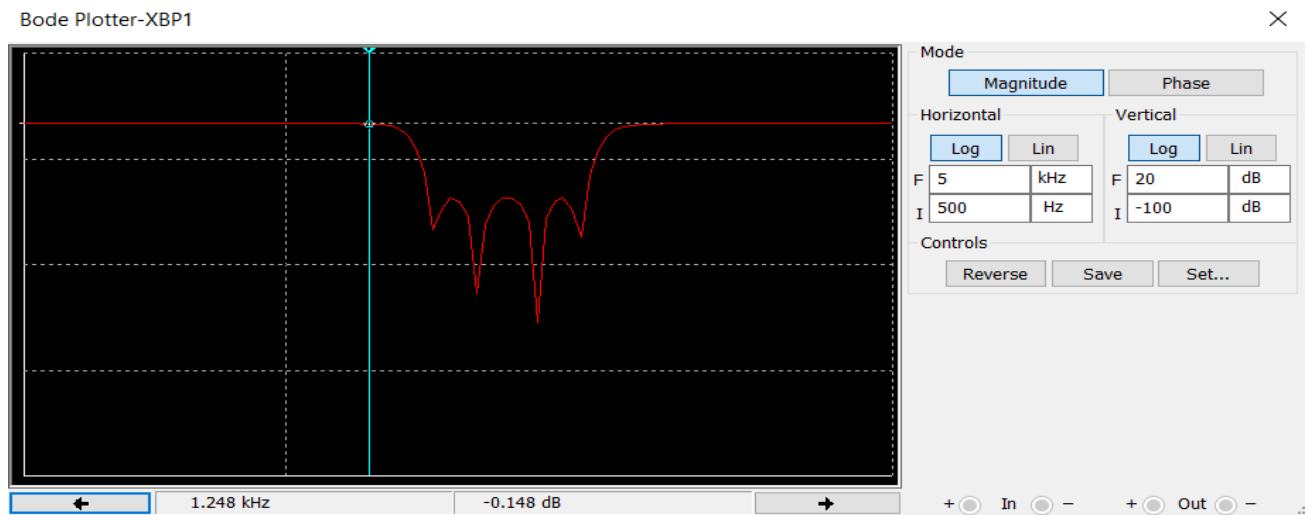
## Γ. Υλοποίηση του κυκλώματος φίλτρου στο Multisim

Σχεδιάζουμε το κύκλωμά μας στο Multisim, προκειμένου να ελέγξουμε αν υλοποιεί τη 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. Το κύκλωμα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι το παρακάτω.

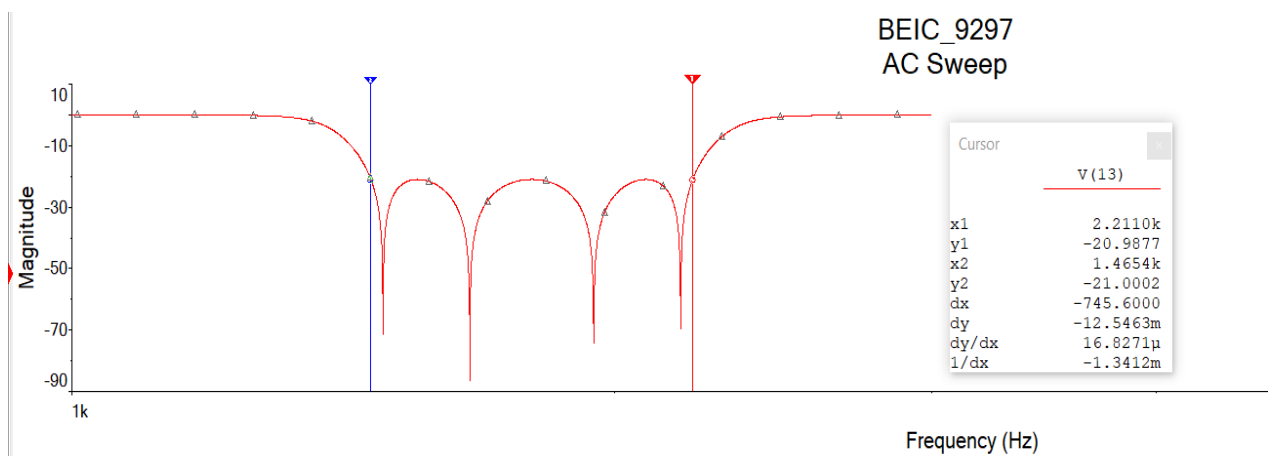
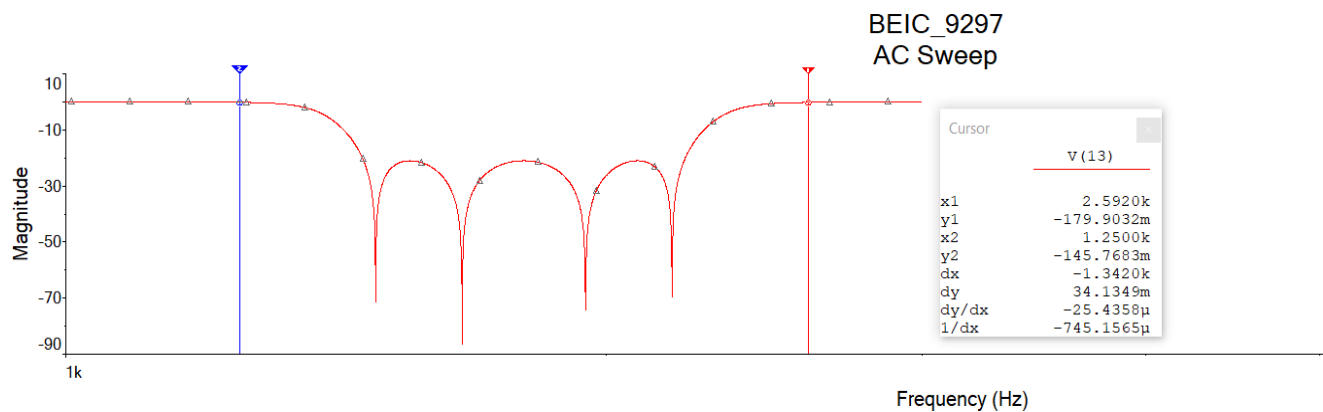


Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει χρησιμοποιούμε τον Bode-Plotter για να προκύψει η απόκριση συχνότητας του φίλτρου-κυκλώματος. Το κύκλωμα και το διάγραμμα που παίρνουμε φαίνονται παρακάτω:





Η γενική μορφή του διαγράμματος παρουσιάζει ένα ζωνοφρακτικό φίλτρο Inverse Chebyshev. Ωστόσο, για να έχουμε τη δυνατότητα ανάγνωσης τιμών θα χρησιμοποιήσουμε την AC Analysis που παρέχει το Multisim. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Από το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνουμε ότι οι προδιαγραφές για το κύκλωμα για το  $a_{min}$ ,  $a_{max}$  καλύπτονται σχεδόν, καθώς στα  $1.4654\text{ kHz}$  και  $2.211\text{ kHz}$  έχουμε απόσβεση  $21\text{ dB}$  και  $20.987\text{ dB}$  αντίστοιχα. Στα  $1.25\text{ kHz}$  και  $2.592\text{ kHz}$  έχουμε απόσβεση περίπου  $0.145\text{ dB}$  και  $0.179\text{ dB}$  αντίστοιχα. Παρατηρούνται ωστόσο μικρές αποκλίσεις οι οποίες αποδίδονται στο γεγονός ότι οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο Multisim έχουν μικρότερη ακρίβεια από ότι οι αντίστοιχες τιμές στην ανάλυση στο Matlab. Στις χαμηλές συχνότητες το κέρδος είναι  $0\text{ dB}$  μετά τη ρύθμιση του κέρδους που πραγματοποιήθηκε.

### Απόκριση σε περιοδική κυματομορφή:

Σε αυτό το σημείο αναλύεται απόκριση του κυκλώματος, όταν αυτό δέχεται ως είσοδο ένα άθροισμα συνημίτονων:

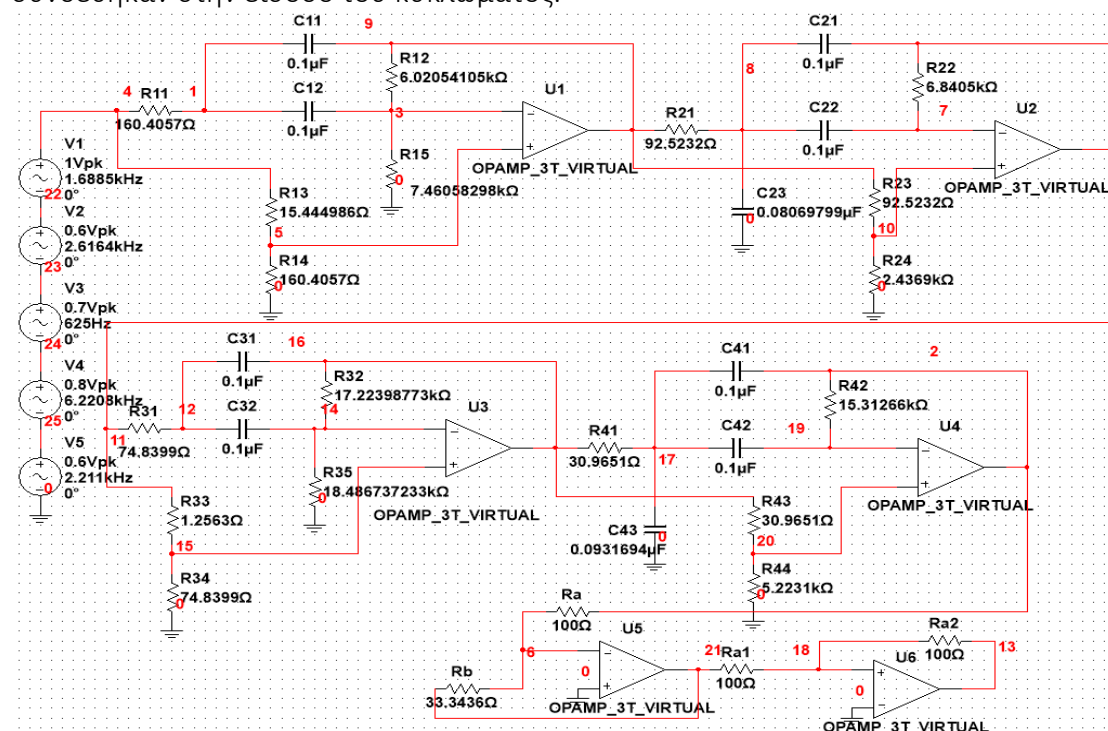
$$f(t) = \cos\left(\left(\omega_0 - \left(\frac{\omega_0 - \omega_3}{3}\right)\right)t\right) + 0.6 \cos\left(\left(\omega_0 + \left(\frac{\omega_0 + \omega_3}{4}\right)\right)t\right) + 0.7 \cos(0.5\omega_1 t) + 0.8 \cos(2.4\omega_2 t) + 0.6 \cos(3\omega_2 t)$$

Οι συχνότητες που θα παρουσιάσει το σήμα αυτό είναι:

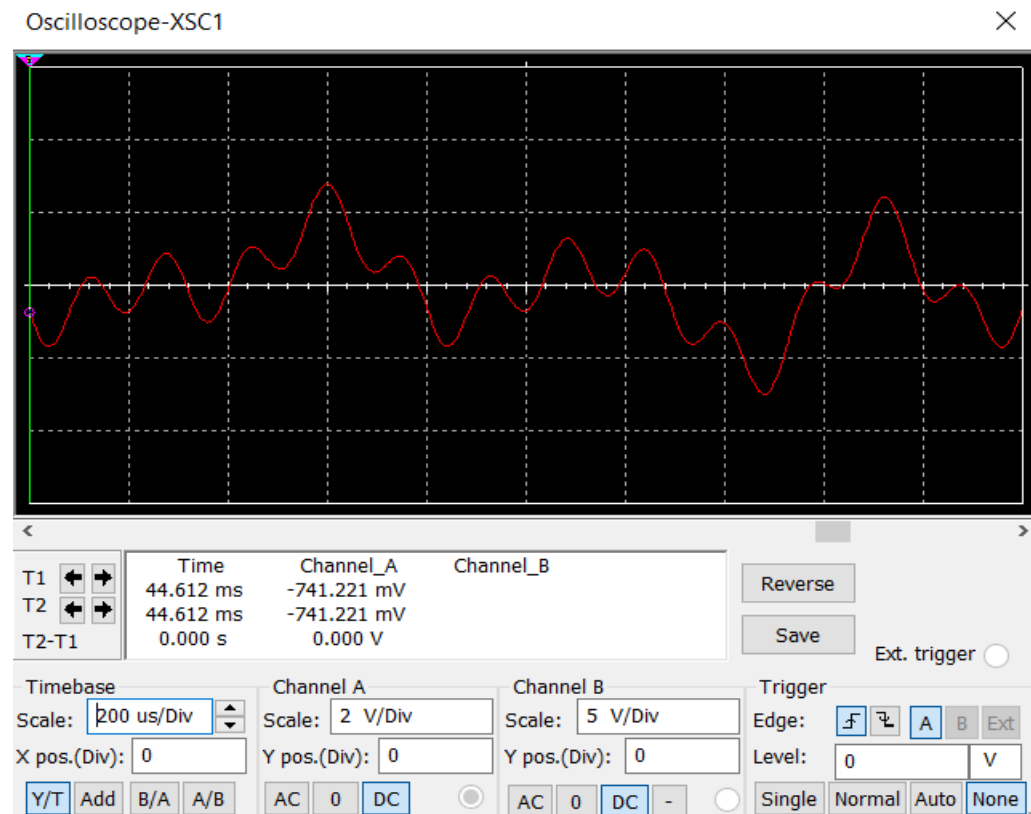
$$f1 = 1.6885\text{ kHz}, f2 = 2.6164\text{ kHz}, f3 = 0.625\text{ kHz}, f4 = 6.2208\text{ kHz},$$

$$f5 = 7.76\text{ kHz}$$

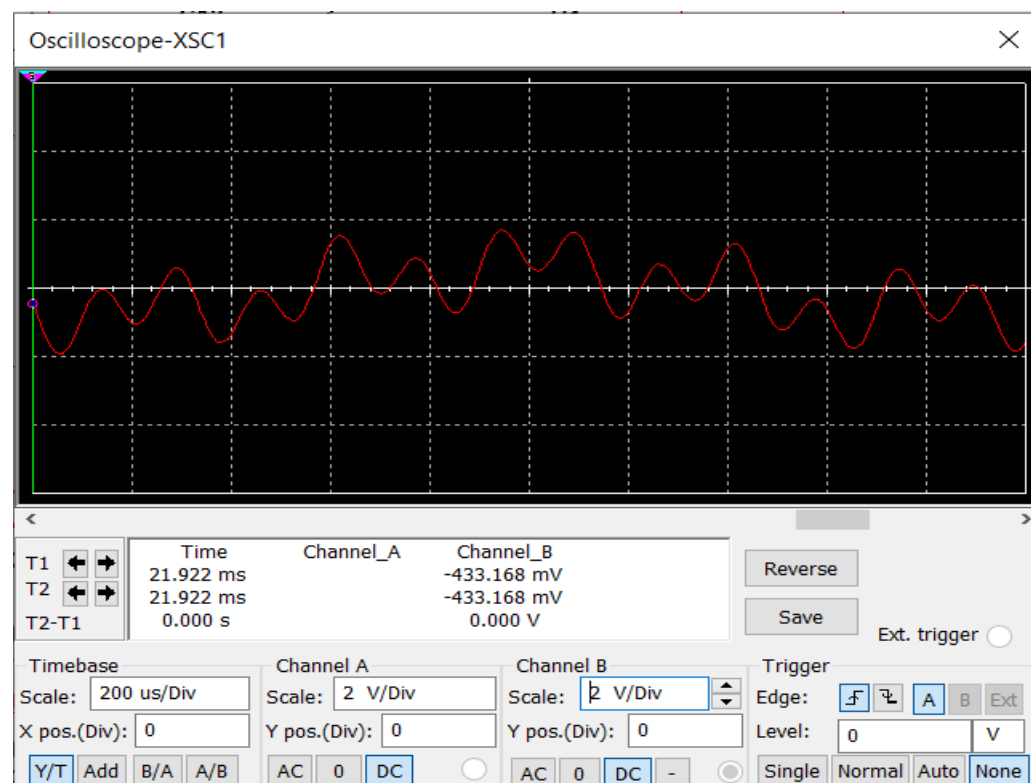
Για τη δημιουργία του σήματος αυτού χρησιμοποιούνται 5 πηγές AC Voltage σε σειρά, η κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια συχνότητα και στη συνέχεια συνδέθηκαν στην είσοδο του κυκλώματος.



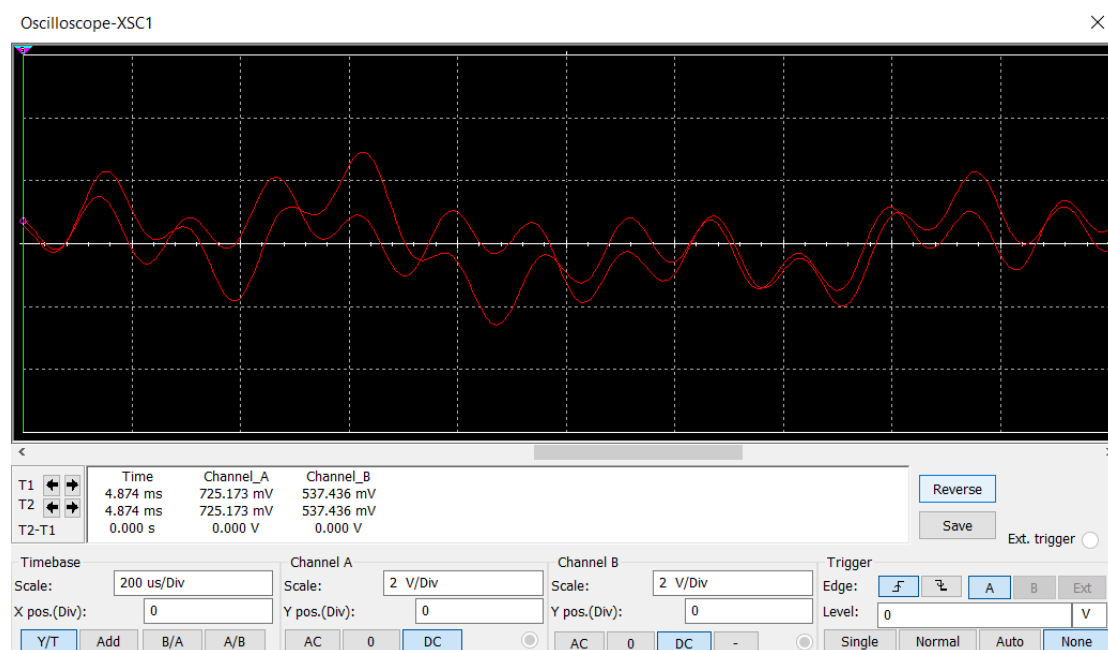
Χρησιμοποιούμε το εργαλείο Oscilloscope , ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της μορφής του σήματος εισόδου:



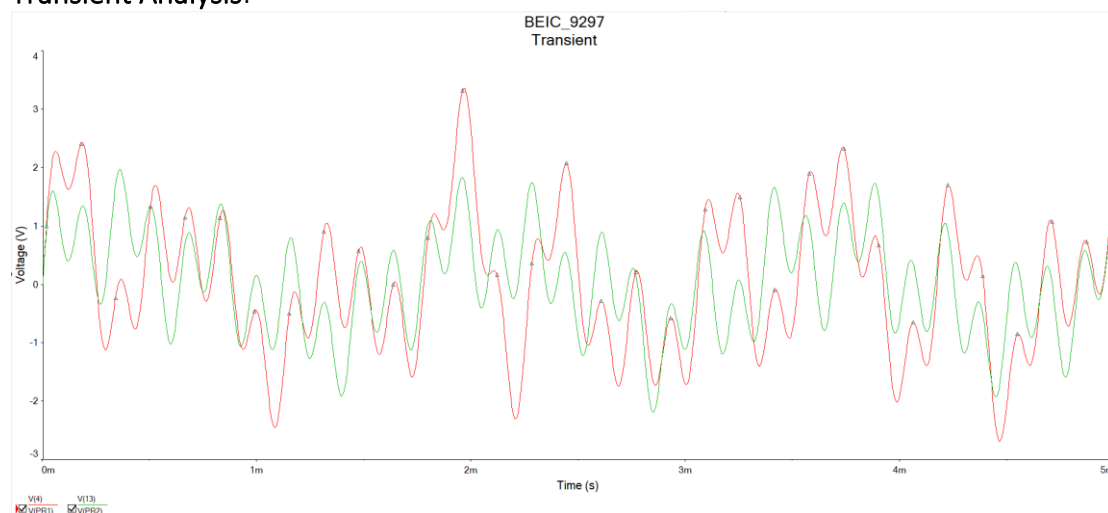
Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία, ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της μορφής του σήματος εξόδου:



Παρακάτω παραθέτω σε κοινό διάγραμμα σήμα εισόδου και εξόδου :



Στη συνέχεια παραθέτουμε το σήμα εισόδου συγκριτικά με το σήμα εξόδου μέσω της Transient Analysis:



Το σήμα εισόδου είναι χρωματισμένο με κόκκινο και με πράσινο το σήμα εξόδου.

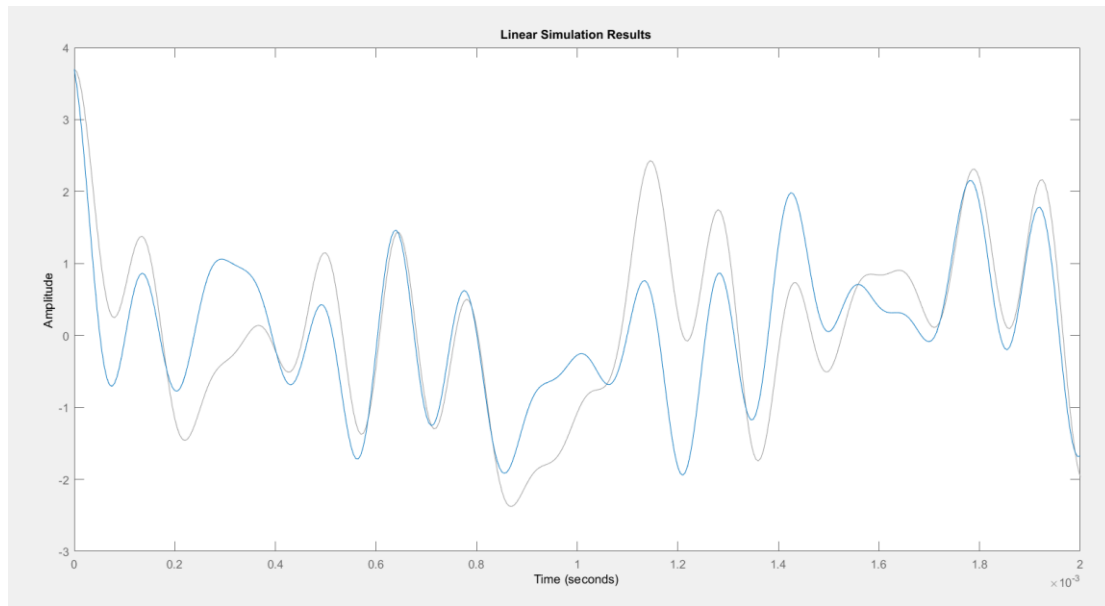
Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου. Σε κάθε σχήμα φαίνονται οι επιλογές που κάναμε στον παλμογράφο για να προκύψουν οι αντίστοιχες παραστάσεις (για παράδειγμα: V/Div , sec/Div κτλ.).



## Ανάλυση Fourier

Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του φίλτρου. 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.

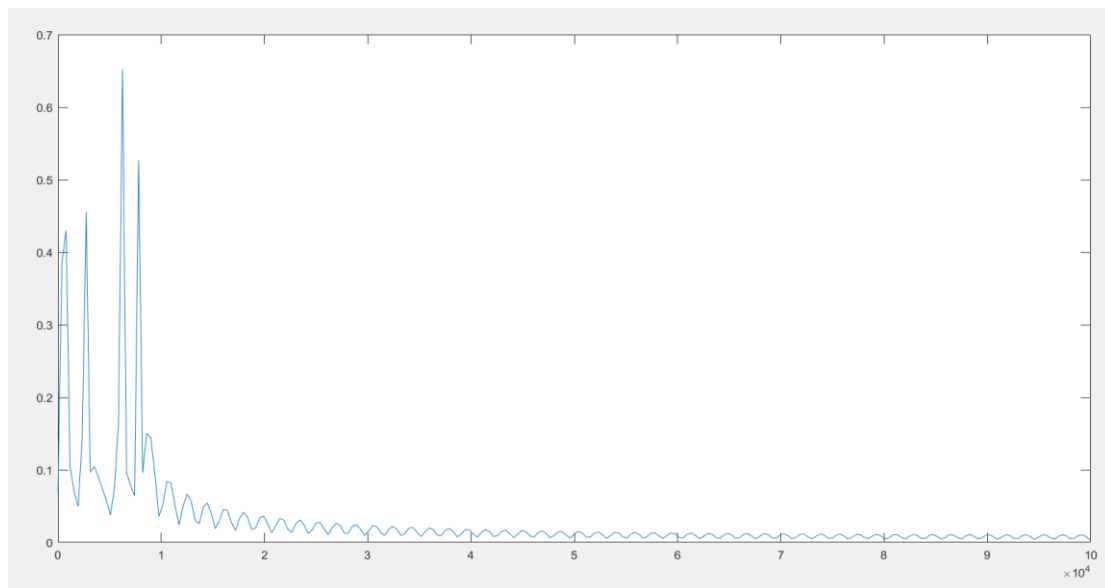
Το σήμα στο πεδίο του χρόνου είναι:



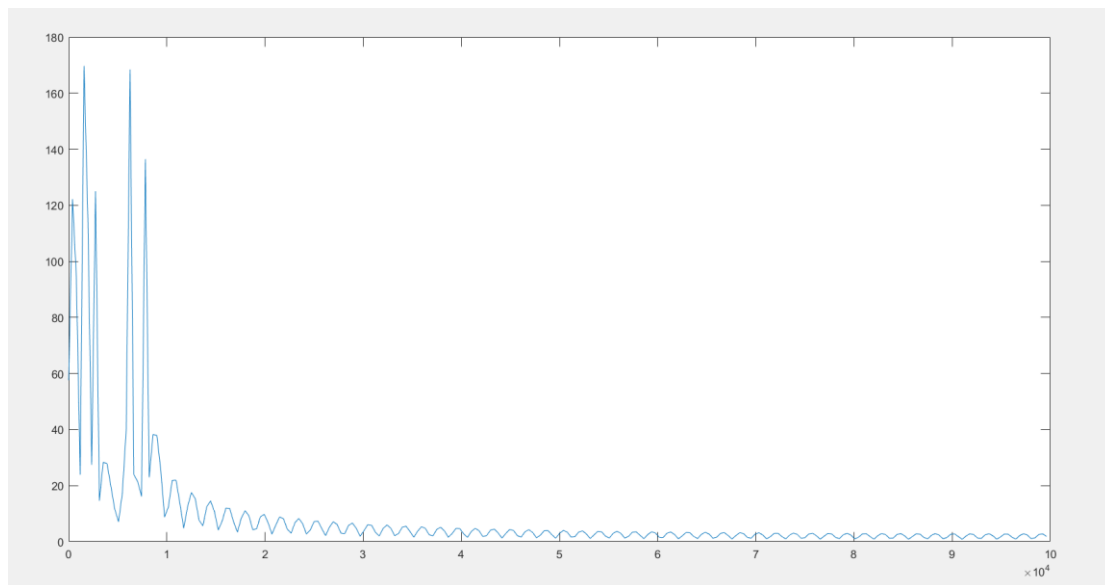
Με γκρι χρώμα απεικονίζεται το σήμα στην είσοδο του φίλτρου, ενώ με μπλε χρώμα απεικονίζεται το σήμα στην έξοδο του φίλτρου.

Κατά συνέπεια, παρακάτω παρουσιάζουμε τα φάσματα FOYRIER που προέρχονται από την FFT:

Φάσμα σήματος εισόδου:



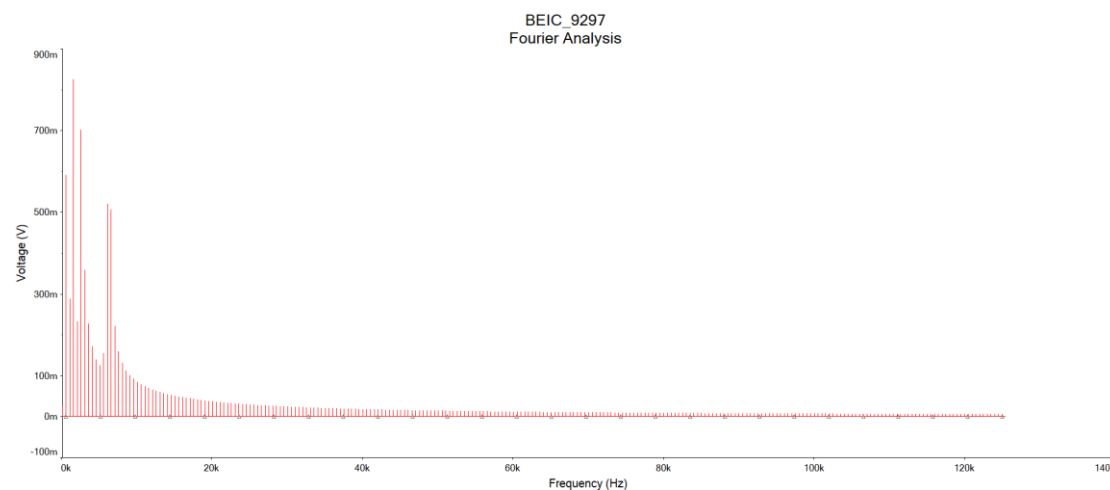
Φάσμα σήματος εξόδου:



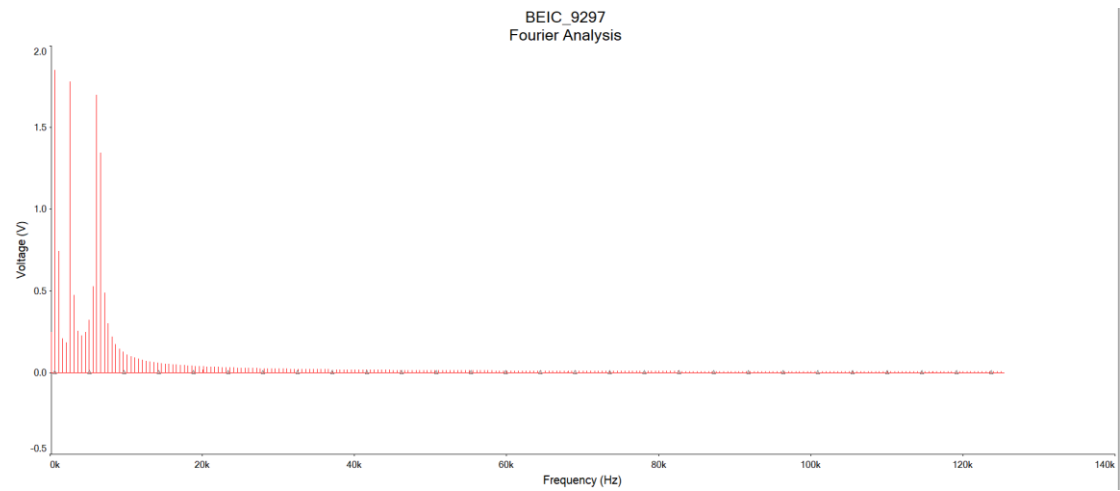
Στο φάσμα εξόδου παρατηρούμε τη ζωνοφρακτική συμπεριφορά του φίλτρου. Στη θεμελιώδη συχνότητα η οποία βρίσκεται στη ζώνη αποκοπής του φίλτρου εξαλείφεται, ενώ οι υπόλοιπες εξακολουθούν να υπάρχουν

Παρακάτω επιβεβαιώνουμε τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν με τη βοήθεια του Matlab , στο πρόγραμμα σχεδίασης κυκλωμάτων του Multisim. Χρησιμοποιώ τώρα το εργαλείο Fourier Analyser του Multisim, μια για την είσοδο και μια για την έξοδο του φίλτρου.

Φάσμα σήματος εισόδου:



Φάσμα σήματος εξόδου:



Στο φάσμα εξόδου παρατηρούμε τη ζωνοφρακτική συμπεριφορά του φίλτρου. Στη θεμελιώδη συχνότητα η οποία βρίσκεται στη ζώνη αποκοπής του φίλτρου εξαλείφεται, ενώ οι υπόλοιπες εξακολουθούν να υπάρχουν.