

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

ΣΥΝΘΕΣΗ
ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΙΑ #3

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.

7^ο ΕΞΑΜΗΝΟ

Όνομα : ΑΡΓΥΡΙΟΣ ΚΟΚΚΙΝΗΣ

A.E.M. : 8459

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
Εργασία #3 : Σχεδίαση Ζωνοφρακτικών φίλτρων.....	3
Α. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου.....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	9
• Ρύθμιση Κέρδους.....	11
Β. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	13
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	18

ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

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 :

$$f_0 = 1800\text{Hz} , f_1 = 1200\text{Hz} , f_2 = 2700\text{Hz} , f_3 = 1.43\text{kHz} , f_4 = 2.264\text{kHz}$$

και

$$a_{\max} = 1 \text{ dB} , \quad a_{\min} = 25 \text{ dB} .$$

A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

Στο πλαίσιο της διαδικασίας σχεδίασης θα πρέπει αρχικά να βρούμε τις προδιαγραφές του πρότυπου φίλτρου. Υπολογίζουμε αρχικά τις κυκλικές συχνότητες των προδιαγραφών.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 11310 \text{ r/s}$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 7539 \text{ r/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 16965 \text{ r/s}$$

$$\omega_3 = 2\pi f_3 = 8990 \text{ r/s}$$

$$\omega_4 = 2\pi f_4 = 14227 \text{ r/s}$$

$$\text{Και } \Omega_p = 1 , \Omega_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_4 - \omega_3} = 1.8$$

Έπειτα πρέπει να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου , και αυτό θα το κάνουμε με τον παρακάτω τύπο.

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

Μετά την αντικατάσταση των δεδομένων μας από τον τύπο προκύπτει η τιμή $n=3.5587$.

Επειδή το n που προέκυψε δεν είναι ακέραιος το στρογγυλοποιούμε στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο Δηλαδή ,

$$\mathbf{n = 4}$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την συχνότητα ημίσειας ισχύος καθώς και τους συντελεστές a και ε .

$$\varepsilon = \frac{1}{(10^{a_{min}/10} - 1)^{1/2}} = 0.0563 \quad , \quad a = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) = 0.8926$$

Και η συχνότητα ημίσειας ισχύος,

$$\omega_{hp} = \frac{1}{\cosh \left(\frac{1}{n} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right)} = 0.7017$$

Για φίλτρο 4^{ης} τάξης οι γωνίες Butterworth είναι: $\pm 22.5^\circ, \pm 67.5^\circ$

Οι πόλοι Chebyshev βρίσκονται από την σχέση.

$$p_k = -\sinh(a) \cos(\psi_k) \pm \cosh(a) \sin(\psi_k) = \sigma_k \pm \omega_k j$$

Από όπου προκύπτει:

$$p_{1,2} = -0.9387 \pm 0.5455j \quad \text{για } \pm 22.5^\circ$$

$$p_{3,4} = -0.3888 \pm 1.3171j \quad \text{για } \pm 67.5^\circ$$

$$\text{Με } \Omega_{01} = \Omega_{02} = 1.0857 \quad \text{και } \Omega_{03} = \Omega_{04} = 1.3733$$

$$\text{Τα } Q \text{ των πόλων προκύπτουν } Q = \frac{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}}{2|\sigma_k|}, \text{ με } Q_{1,2} = 0.5783 \text{ και } Q_{3,4} = 1.766$$

Οπότε έχουμε:

Ψ_k	Q	P_k
$\pm 22.5^\circ$	0.5783	$-0.9387 \pm 0.5455j$
$\pm 67.5^\circ$	1.766	$-0.3888 \pm 1.3171j$

Οι πόλοι του Inverse Chebyshev προκύπτουν από την αντιστροφή των πόλων Chebyshev,

$$\widetilde{\Omega}_{01,2} = \frac{1}{\Omega_{01,2}} = 0.9211 \quad \text{και} \quad \widetilde{\Omega}_{03,4} = \frac{1}{\Omega_{03,4}} = 0.7282$$

Κλιμακοποιούμε τα μέτρα της ICH απόκρισης:

$$\widetilde{\Omega}_{01,2} = \widetilde{\Omega}_{01,2} * \Omega_s = 1.6779$$

$$\widetilde{\Omega}_{03,4} = \widetilde{\Omega}_{03,4} * \Omega_s = 1.3108$$

Τα μηδενικά της απόκρισης ICH προκύπτουν από την σχέση :

$$\omega_k = \sec\left(\frac{k\pi}{2n}\right), k = 1,3$$

$$\Omega_{z1} = \sec\left(\frac{\pi}{8}\right) = 1.0824, \quad \Omega_{z2} = \sec\left(\frac{3\pi}{8}\right) = 2.6131$$

Κλιμακοποιούμε τα μηδενικά της ICH απόκρισης:

$$\widetilde{\Omega}_{z1} = \Omega_{z1} * \Omega_s = 1.9483$$

$$\widetilde{\Omega}_{z2} = \Omega_{z2} * \Omega_s = 4.7036$$

Αντιστρέφουμε τους πόλους της ICH απόκρισης:

$$\widehat{\Omega}_{01,2} = \frac{1}{\widetilde{\Omega}_{01,2}} = 0.6032 \quad \text{και} \quad \widehat{\Omega}_{03,4} = \frac{1}{\widetilde{\Omega}_{03,4}} = 0.7629$$

Αντιστρέφουμε τα μηδενικά της ICH απόκρισης:

$$\widehat{\Omega}_{z1} = \frac{1}{\widetilde{\Omega}_{z1}} = 0.5133 \quad \text{και} \quad \widehat{\Omega}_{z2} = \frac{1}{\widetilde{\Omega}_{z2}} = 0.2126$$

Επομένως οι πόλοι της ανωδιαβατής απόκρισης υπολογίζονται:

$$\hat{\Sigma}_{1,2} = -\frac{\hat{\Omega}_{01,2}}{2Q_{1,2}} = -0.5215 \text{ και } \hat{\Omega}_{1,2} = \sqrt{\hat{\Omega}_{01,2}^2 - \hat{\Sigma}_{1,2}^2} = 0.3031$$

Αντίστοιχα,

$$\hat{\Sigma}_{3,4} = -\frac{\hat{\Omega}_{03,4}}{2Q_{3,4}} = -0.216 \text{ και } \hat{\Omega}_{3,4} = \sqrt{\hat{\Omega}_{03,4}^2 - \hat{\Sigma}_{3,4}^2} = 0.7317$$

Εφαρμόζουμε ζωνοδιαβατό μετασχηματισμό για τους παραπάνω πόλους και μηδενικά χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Geffe.

$$q_c = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = 1.2 \text{ και } bw = \omega_2 - \omega_1 = 9424 \text{ r/s}$$

- **Μετασχηματισμός μιγαδικού πόλου $p_{1,2} = -0.5125 \pm 0.3031j$**

$$\Sigma = 0.5125$$

$$\Omega = 0.3031$$

$$C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 0.3638$$

$$D = 2 \frac{\Sigma}{q_c} = 0.8691$$

$$E = 4 + \frac{C}{q_c^2} = 4.2526$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 3.8812$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{E + G}{2}} = 2.32$$

$$k = \frac{\Sigma Q}{q_c} = 1.0083$$

$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.1376$$

$$\omega_{01} = \frac{\omega_0}{W} = 9941 \text{ r/s}$$

$$\omega_{02} = W * \omega_0 = 12867 \text{ r/s}$$

- Μετασχηματισμός μιγαδικού πόλου $p_{3,4} = -0.216 \pm 0.7317j$

$$\Sigma = 0.216$$

$$\Omega = 0.7317$$

$$C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 0.582$$

$$D = 2 \frac{\Sigma}{q_c} = 0.36$$

$$E = 4 + \frac{C}{q_c^2} = 4.4042$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 4.3449$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{E + G}{2}} = 5.8097$$

$$k = \frac{\Sigma Q}{q_c} = 1.0458$$

$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.3518$$

$$\omega_{03} = \frac{\omega_0}{W} = 8366 \text{ r/s}$$

$$\omega_{04} = W * \omega_0 = 15288 \text{ r/s}$$

- Μετασχηματισμός μηδενικού $\hat{\Omega}_{z1} = 0.5133$

$$K = 2 + \frac{\hat{\Omega}_{z1}^2}{q_c^2} = 2.1829$$

$$x = \frac{K + \sqrt{K^2 - 4}}{2} = 1.5289$$

$$\omega_{z1} = \omega_0 \sqrt{x} = 13984 \text{ r/s}$$

$$\omega_{z2} = \frac{\omega_0}{\sqrt{x}} = 9146 \text{ r/s}$$

- Μετασχηματισμός μηδενικού $\hat{\Omega}_{z2} = 0.2126$

$$K = 2 + \frac{\hat{\Omega}_{z2}^2}{q_c^2} = 2.0314$$

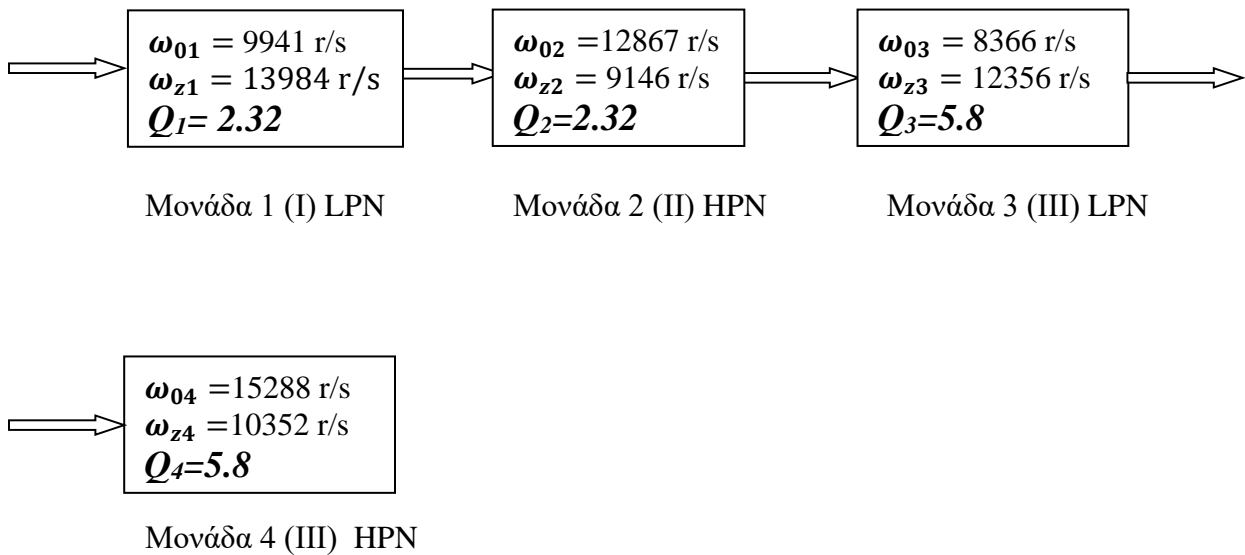
$$x = \frac{K + \sqrt{K^2 - 4}}{2} = 1.1936$$

$$\omega_{z3} = \omega_0 \sqrt{x} = 12356 \text{ r/s}$$

$$\omega_{z4} = \frac{\omega_0}{\sqrt{x}} = 10352 \text{ r/s}$$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να υλοποιηθεί θα αποτελείται από 4 μονάδες οι οποίες και φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.

Χωρίζουμε τους πόλους και τα μηδενικά της ζωνοφρακτικής απόκρισης όπως φαίνεται παρακάτω. Η 1^η και η 3^η μονάδα υλοποιούνται με LPN φίλτρα και η 2^η και η 4^η με HPN.



• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Θα υλοποιήσουμε αρχικά τις κανονικοποιημένες μονάδες και στην συνέχεια θα κάνουμε κλιμακοποίηση . Οι LPN και οι HPN μονάδες θα υλοποιηθούν με τα κυκλώματα 7.21 και 7.23

ΜΟΝΑΔΑ (I)

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται με βάση το κύκλωμα 7.23 (LPN).

Θεωρούμε αρχικά ότι $\omega_0 = 1$ και $R_1 = R_4 = 1$ και $\omega_z = \frac{\omega_{z1}}{\omega_{01}} = 1.4$

$$C = \frac{1}{2Q_1} = 0.215 \text{ και } R_2 = 4Q_1^2 = 21.52$$

$$R_3 = \frac{\omega_z^2}{2Q_1^2} = 0.18 \text{ και } R_5 = \frac{4Q_1^2}{\omega_z^2 - 1} = 22.42$$

$$k_1 = \frac{1}{1 + R_3} = 0.847$$

Κλιμακοποίηση

Επειδή $\omega_{01} = 9941 \text{ r/s}$, θεωρώ $k_f = 9941$. Θέλουμε πυκνωτή $0.01\mu\text{F}$

$$k_m = \frac{C}{k_f 10^{-8}} = 2167 , R_1 = R_4 = 2.16k\Omega , R_3 = 389\Omega , R_5 = 48.4k\Omega ,$$

$$R_2 = 46.5k\Omega$$

ΜΟΝΑΔΑ (II)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με βάση το κύκλωμα 7.21 (HPN).

Θεωρούμε αρχικά ότι $\omega_0 = 1$, $R_1 = R_3 = 1$, $k_{21} = \frac{\omega_0^2}{\omega_z^2} - 1 = 0.97$ με $\omega_z = 0.71$

$$R_2 = Q_2^2 (2 + k_{21})^2 = 47.47 \text{ και } R_4 = Q_2^2 (2 + k_{21}) = 15.98$$

$$C = \frac{1}{Q_2 (2 + k_{21})} = 0.145 \text{ και } C_{21} = C k_{21} = 0.14$$

$$k_2 = \frac{\omega_{02}^2}{\omega_{z2}^2} \frac{(2 + k_{21}) Q_2^2}{1 + (2 + k_{21}) Q_2^2} = 1.8626$$

Κλιμακοποίηση

Επειδή $\omega_{02} = 12867 \text{ r/s}$, θεωρώ $k_f = 12867$. Θέλουμε πυκνωτή $0.01\mu\text{F}$

$$k_m = \frac{C}{k_f 10^{-8}} = 1126 , R_1 = R_3 = 1.12k\Omega , R_4 = 18k\Omega , R_2 = 53.4k\Omega ,$$

$$C_1 = \frac{C_{21}}{k_m k_f} = 9.6n\text{F}$$

ΜΟΝΑΔΑ (III)

Η τρίτη αυτή μονάδα υλοποιείται με βάση το κύκλωμα 7.23 (LPN).

Θεωρούμε αρχικά ότι $\omega_0 = 1$ και $R_1 = R_4 = 1$ και $\omega_z = \frac{\omega_{z3}}{\omega_{03}} = 1.47$

$$C = \frac{1}{2Q_3} = 0.086 \text{ και } R_2 = 4Q^2 = 134.56$$

$$R_3 = \frac{\omega_z^2}{2Q_3^2} = 0.032 \text{ και } R_5 = \frac{4Q_3^2}{\omega_z^2 - 1} = 115.9$$

$$k_3 = \frac{1}{1 + R_3} = 0.968$$

Κλιμακοποίηση

Επειδή $\omega_{03} = 8366 \text{ r/s}$, θεωρώ $k_f = 8366$. Θέλουμε πυκνωτή $0.01\mu\text{F}$

$$k_m = \frac{C}{k_f 10^{-8}} = 1027, R_1 = R_4 = 1.02k\Omega, R_3 = 32.2\Omega, R_5 = 119k\Omega,$$

$$R_2 = 138k\Omega$$

ΜΟΝΑΔΑ (IV)

Η μονάδα αυτή υλοποιείται με βάση το κύκλωμα 7.21 (HPN).

Θεωρούμε αρχικά ότι $\omega_0 = 1$, $R_1 = R_3 = 1$, $k_{41} = \frac{\omega_0^2}{\omega_z^2} - 1 = 1.18$ με $\omega_z = 0.67$

$$R_2 = Q_4^2(2 + k_{41})^2 = 340.18 \text{ και } R_4 = Q_4^2(2 + k_{41}) = 107$$

$$C = \frac{1}{Q_4(2 + k_{41})} = 0.054 \text{ και } C_{41} = C k_{41} = 0.063$$

$$k_4 = \frac{\omega_{04}^2}{\omega_{z4}^2} \frac{(2 + k_{41})Q_4^2}{1 + (2 + k_{41})Q_4^2} = 2.16$$

Κλιμακοποίηση

Επειδή $\omega_{04} = 15288 \text{ r/s}$, θεωρώ $k_f = 15288$. Θέλουμε πυκνωτή $0.01\mu\text{F}$

$$k_m = \frac{C}{k_f 10^{-8}} = 353.21, R_1 = R_3 = 353.21k\Omega, R_4 = 37.7k\Omega, R_2 = 120k\Omega,$$

$$C_1 = \frac{C_{41}}{k_m k_f} = 11.6nF$$

- Ρύθμιση Κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου να είναι 10 dB στις χαμηλές συχνότητες.

Το κέρδος που έχουμε τώρα στις χαμηλές συχνότητες είναι

$$K = k_1 k_2 k_3 k_4 = 3.298$$

Με $20 \log(3.298) = 10.36 \text{ dB}$. Δηλαδή είμαστε πολύ κοντά στο κέρδος που θέλουμε.

Επομένως δεν θα εφαρμόσουμε κάποιο επιπλέον κύκλωμα προκειμένου να το ρυθμίσουμε.

Συναρτήσεις Μεταφοράς Μονάδων

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

$$T_1(s) = \frac{s^2 + \omega_{z1}^2}{s^2 + \frac{\omega_{01}}{Q_1}s + \omega_{01}^2} k_1 = \frac{0.8447s^2 + 1.65 * 10^8}{s^2 + 4284.5s + 9.88 * 10^7}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_2(s) = \frac{s^2 + \omega_{z2}^2}{s^2 + \frac{\omega_{02}}{Q_2}s + \omega_{02}^2} k_2 = \frac{1.8626s^2 + 1.558 * 10^8}{s^2 + 5545.2s + 1.655 * 10^8}$$

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

$$T_3(s) = \frac{s^2 + \omega_{z3}^2}{s^2 + \frac{\omega_{03}}{Q_3}s + \omega_{03}^2} k_3 = \frac{0.9687s^2 + 1.478 * 10^8}{s^2 + 1440s + 7 * 10^7}$$

4. Για την τέταρτη μονάδα με παρόμοιο τρόπο η συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει :

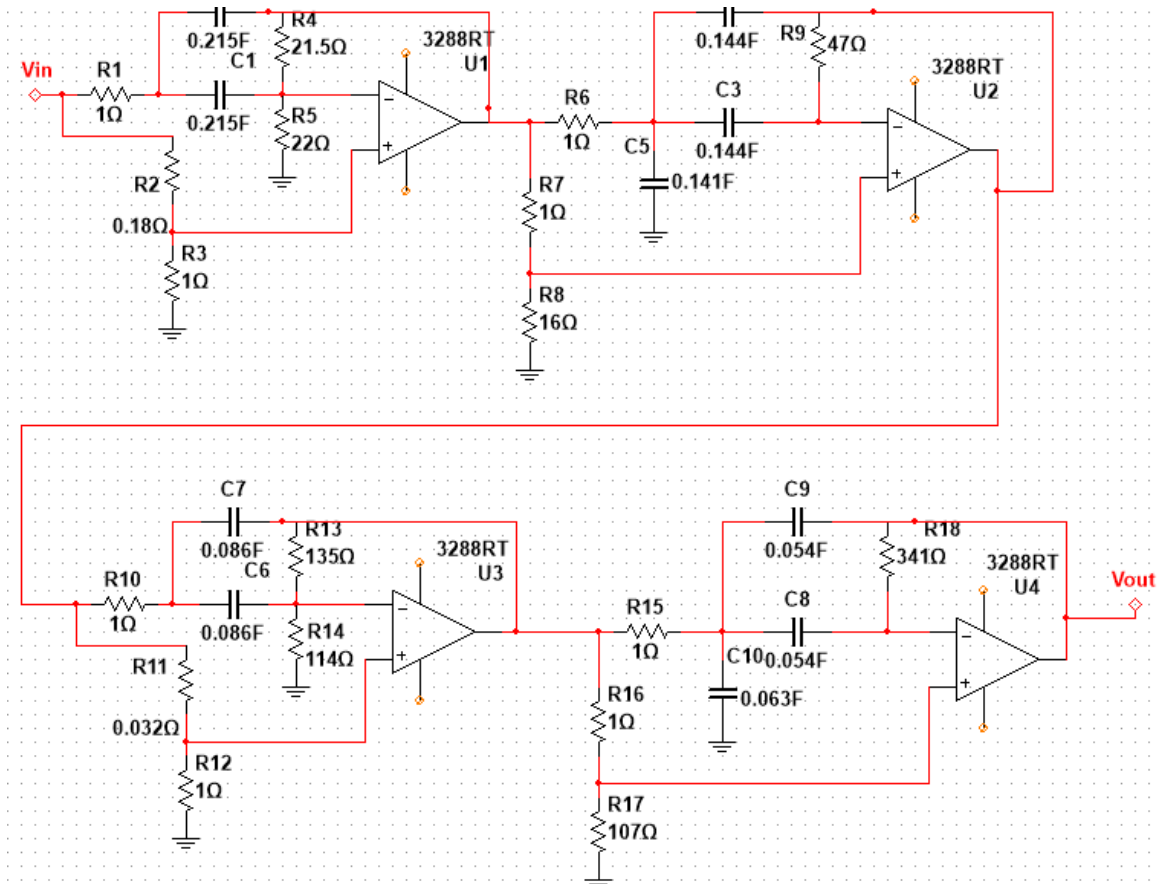
$$T_4(s) = \frac{s^2 + \omega_{z4}^2}{s^2 + \frac{\omega_{04}}{Q_4}s + \omega_{04}^2} k_4 = \frac{2.16s^2 + 2.31 * 10^8}{s^2 + 2631.5s + 2.337 * 10^8}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοφρακτικού φίλτρου Inverse Chebyshev είναι

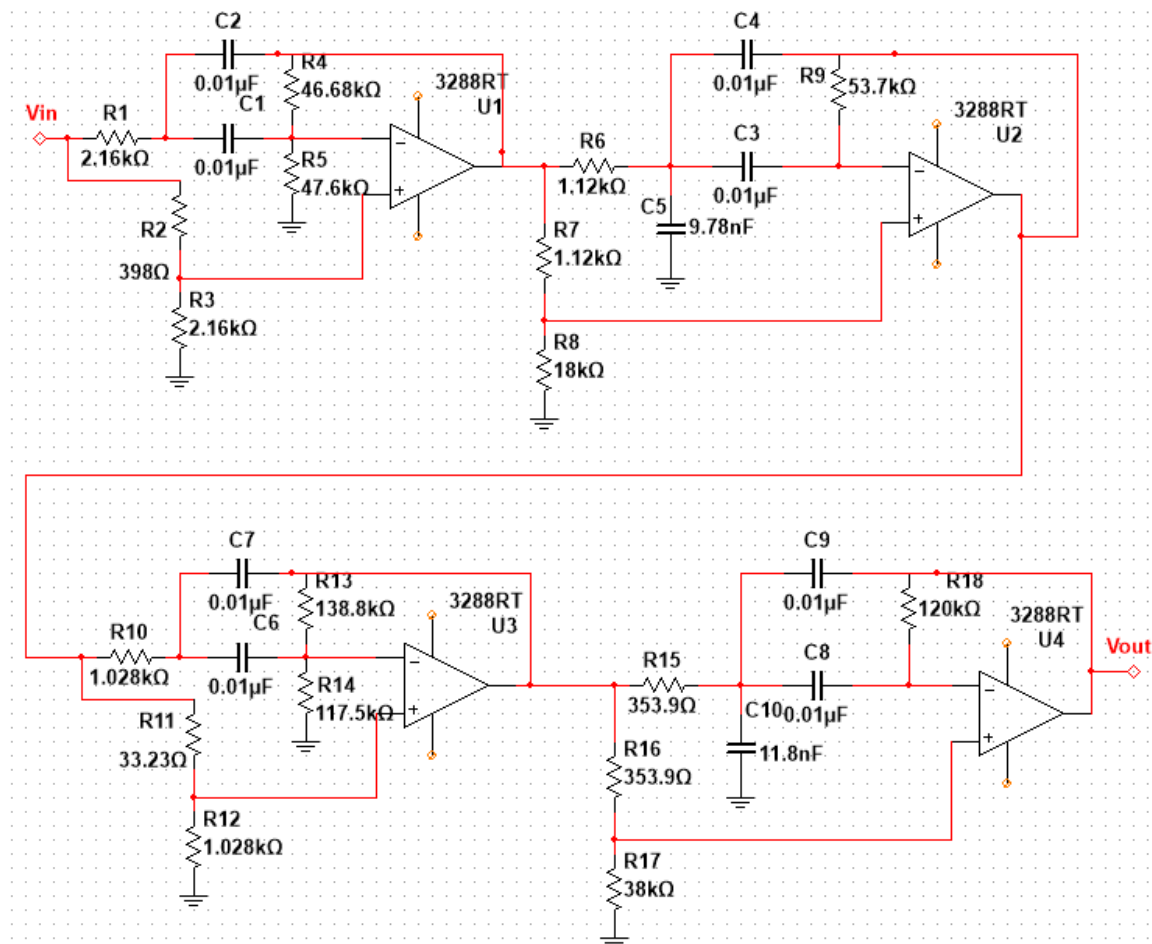
$$T_{BE}(s) = T_1(s) * T_2(s) * T_3(s) * T_4(s) :$$

$$T_{BE}(s) = \frac{3.293s^8 + 1.775 * 10^9 s^6 + 3.46 * 10^{17} s^4 + 2.9 * 10^{25} s^2 + 8.81 * 10^{32}}{s^8 + 13901s^7 + 6.356 * 10^8 s^6 + 5.974 * 10^{12} s^5 + 1.315 * 10^{17} s^4 + 7.641 * 10^{20} s^3 + 1.04 * 10^{25} s^2 + 2.9 * 10^{28} s + 2.67 * 10^{32}}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τέσσερις μονάδες:



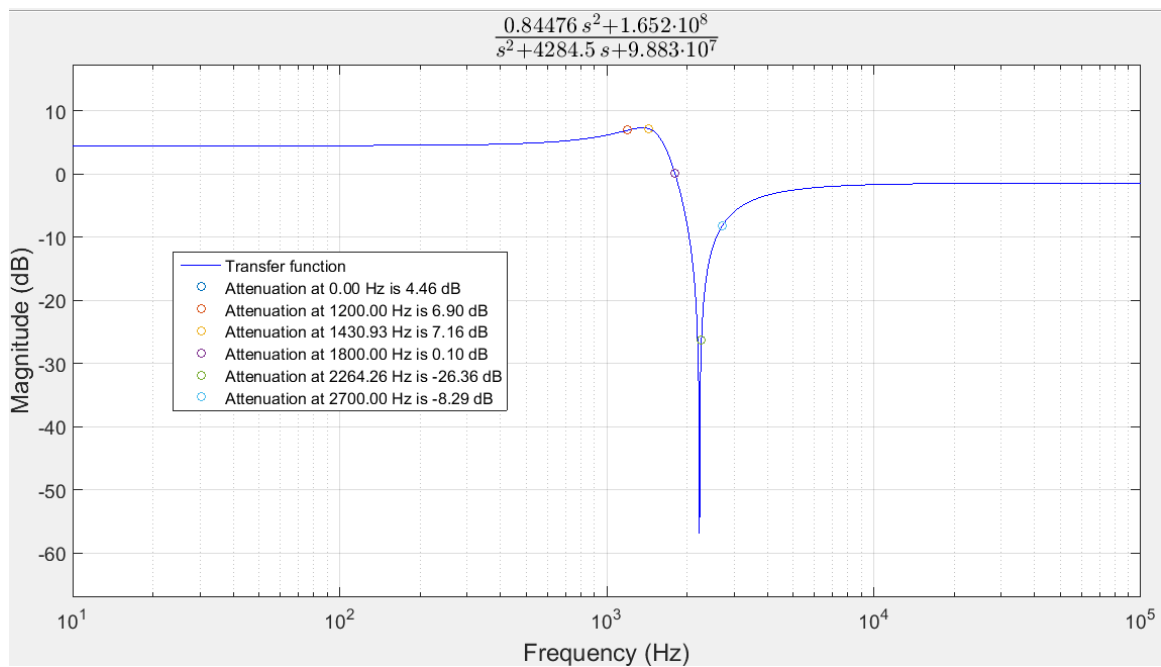
Παρακάτω φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό ζωνοφρακτικό φίλτρο Inverse Chebyshev



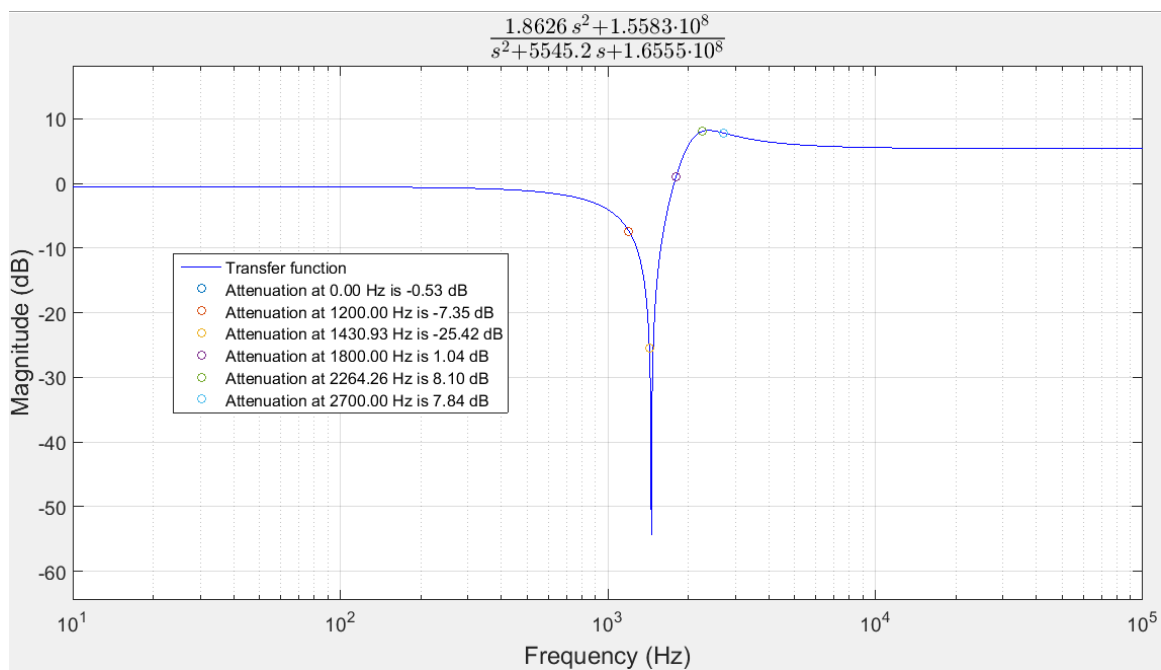
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

Εισάγουμε στο πρόγραμμα MATLAB τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των τεσσάρων 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 και την τέταρτη 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.

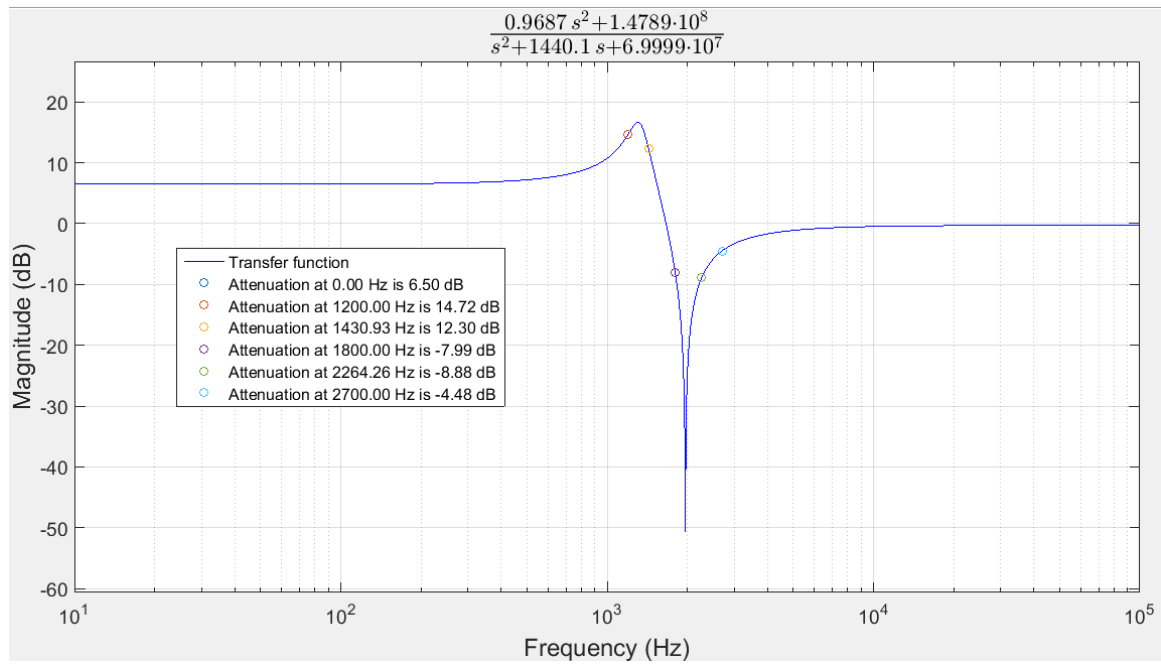
1^η Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο LPN.



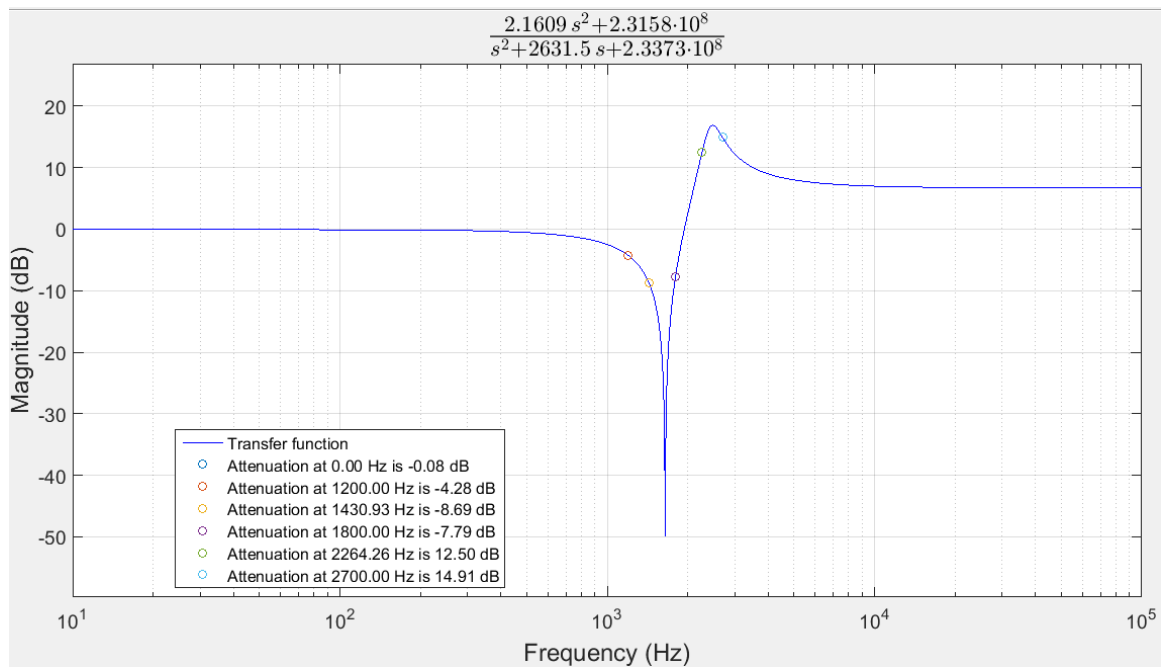
2^η Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο HPN.



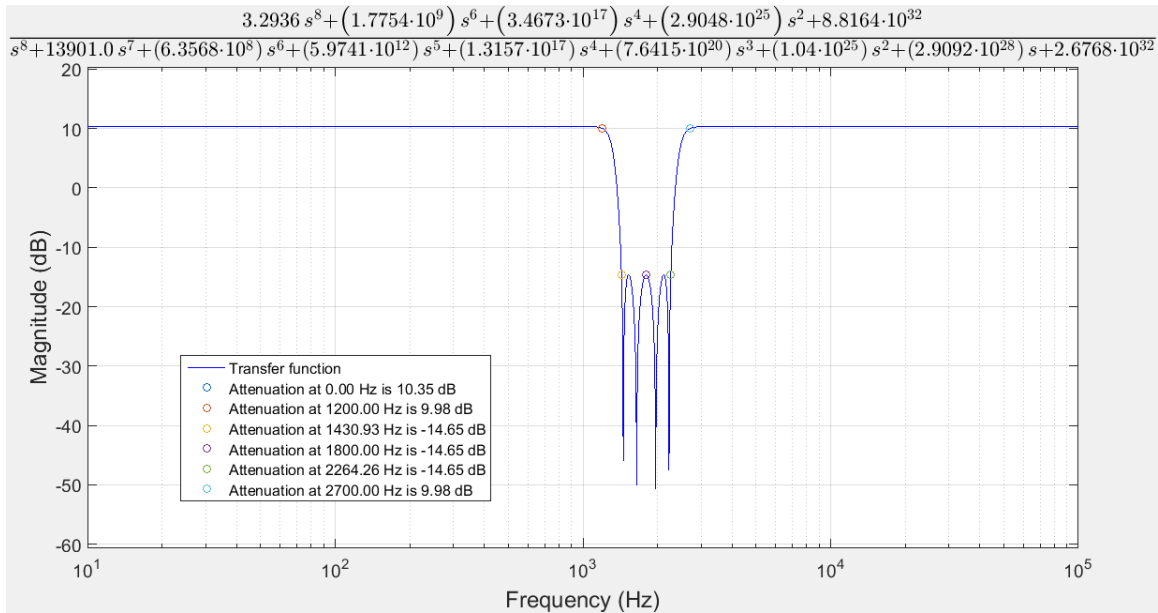
3^η Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο LPN.



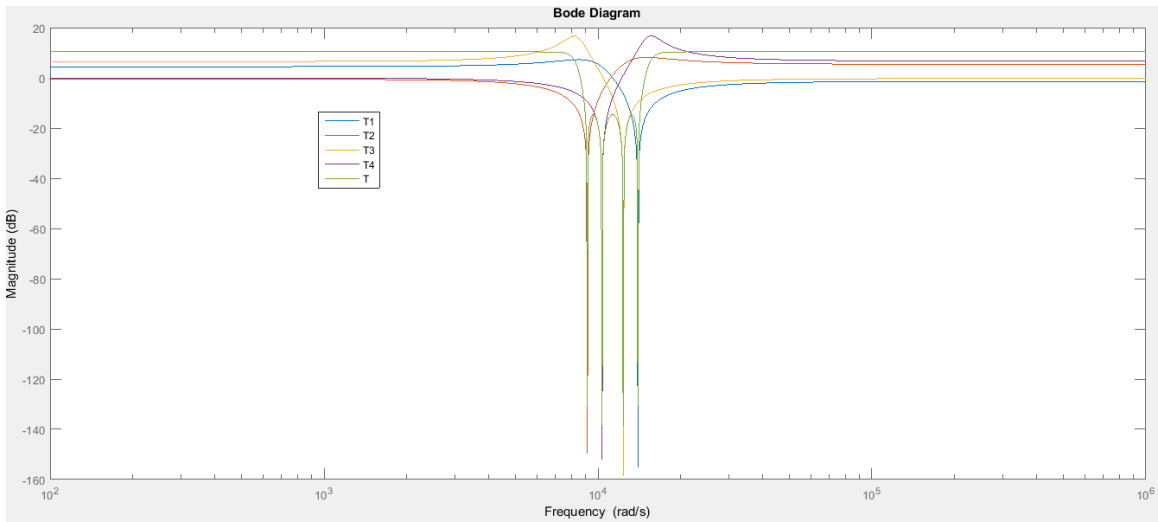
4^η Μονάδα : Ζωνοφρακτικό φίλτρο HPN.



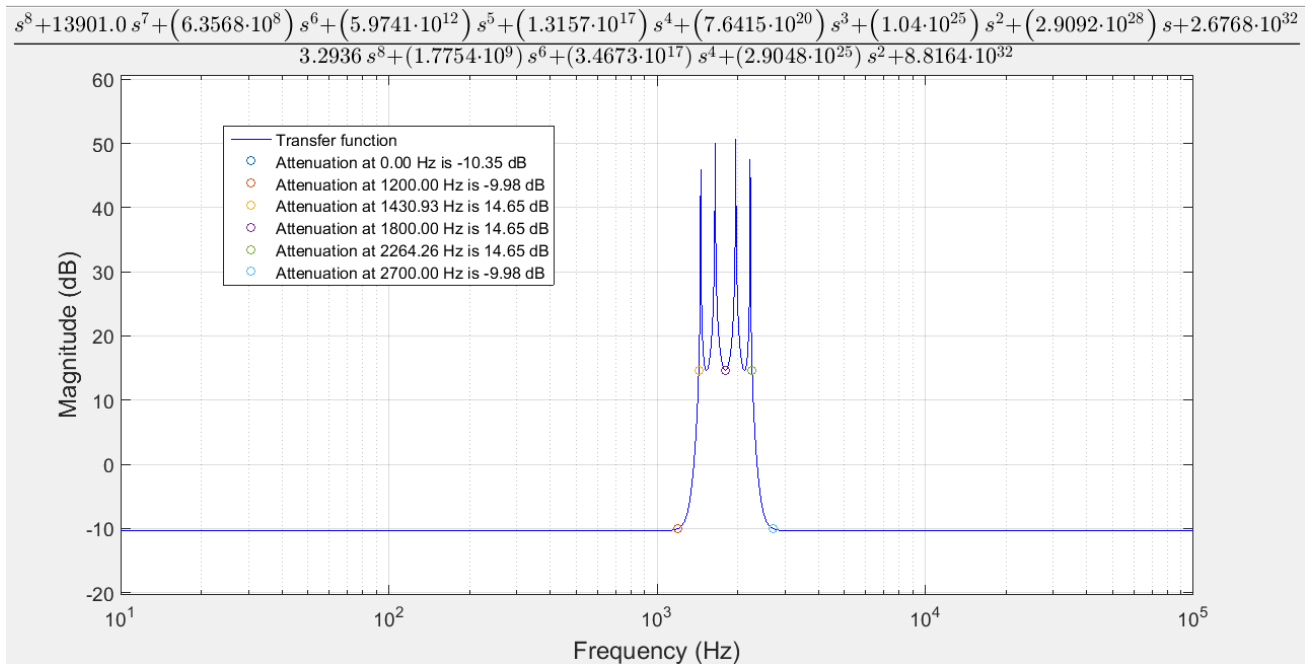
Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας με χρήση της συνάρτησης `plot_transfer_function`.



Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε όλες τις παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode.

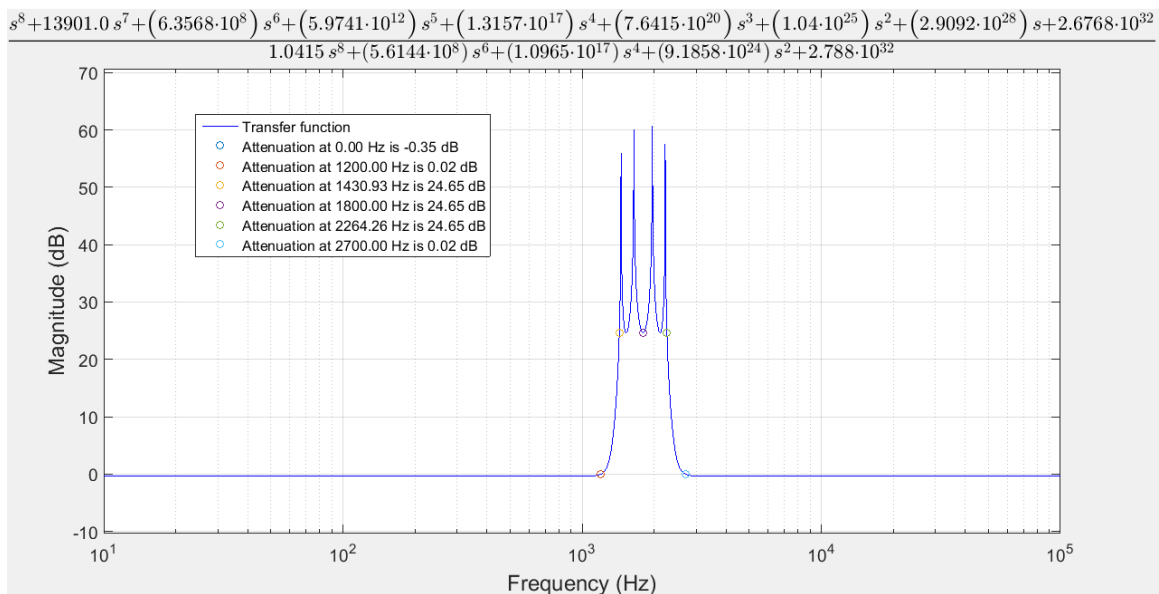


Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dB της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας.



Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και αποκοπής , δηλαδή τις $f_1 = 1.2kHz, f_2 = 2.7kHz, f_3 = 1.43kHz, f_4 = 2.26kHz$ καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις. Παρατηρούμε ότι το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες είναι 10.35dB όσο δηλαδή υπολογίσαμε και πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 10 dB. Επιπλέον παρατηρούμε ότι στην ζώνη αποκοπής έχουμε απόσβεση τουλάχιστον 24.65 dB επίσης πολύ κοντά στην τιμή των 25 dB που θέλουμε. Τέλος , στην ζώνη διόδου η μέγιστη απόσβεση που έχουμε είναι περίπου 0.35 dB αρκετά μικρότερη το 0.5 dB . Ενώ στις συχνότητες f_1, f_2 η απόσβεση είναι πολύ μικρή. Επομένως μπορούμε να καταλήξουμε ότι η προσομοίωση του φίλτρου στο MATLAB είναι σωστή καθώς το φίλτρο φαίνεται να πληροί τις προδιαγραφές που θέσαμε στην αρχή.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνάρτηση απόσβεσης του φίλτρου , με το κέρδος να είναι ρυθμισμένο στα 0 dB.

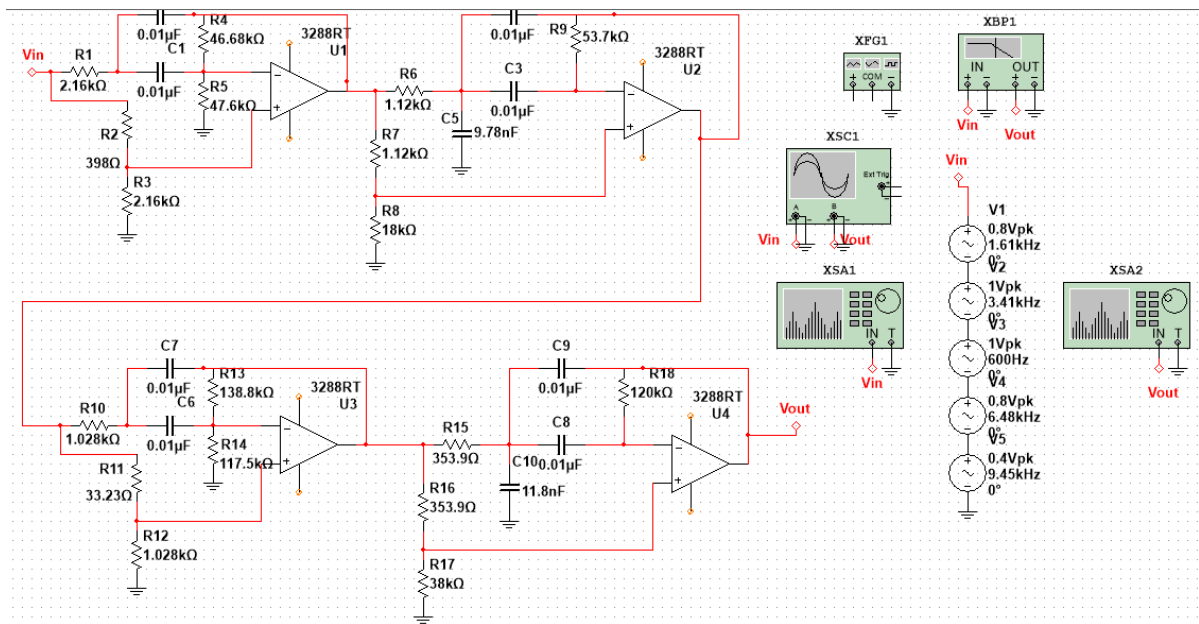


Με ρύθμιση κέρδους στα 0dB η συνάρτηση απόσβεσης δίνεται από το παραπάνω διάγραμμα όπου φαίνεται πιο καθαρά ότι καλύπτονται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί, καθώς παρατηρούμε καλύτερα τα ίδια συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

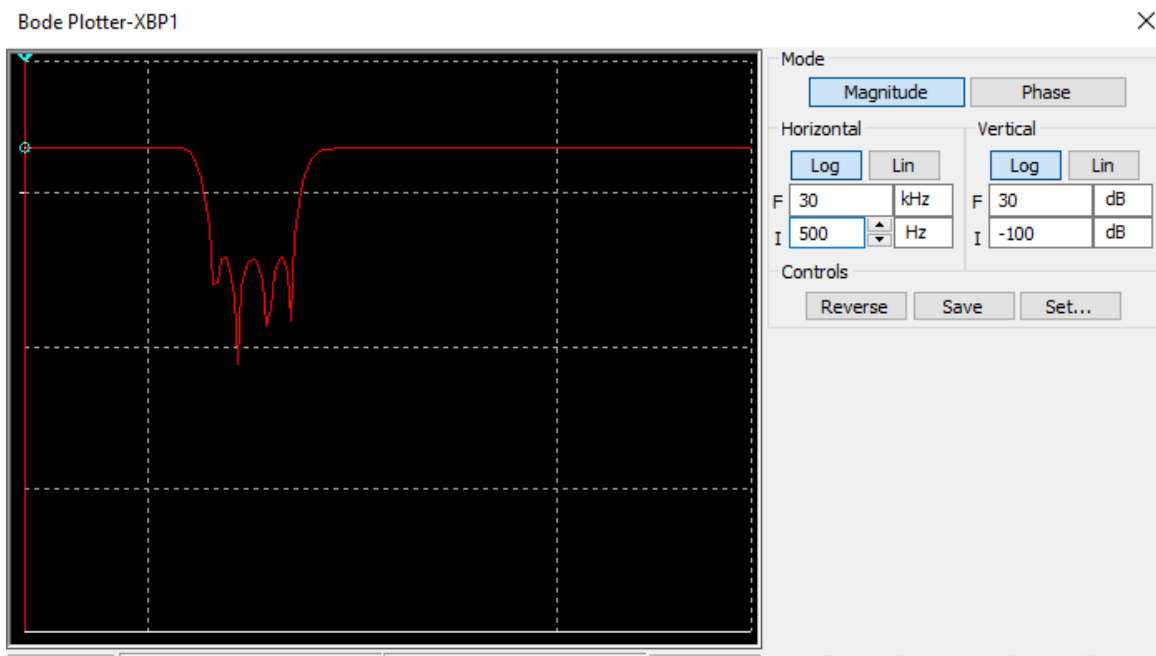
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM

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.

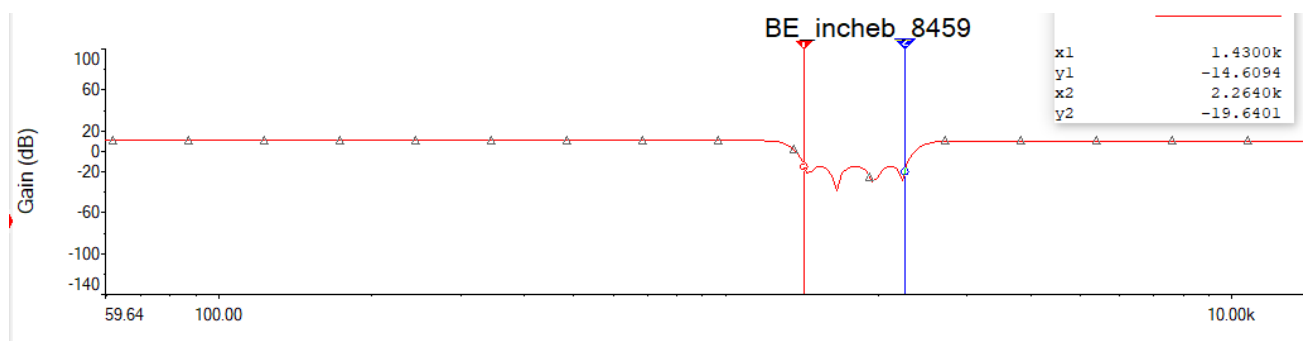
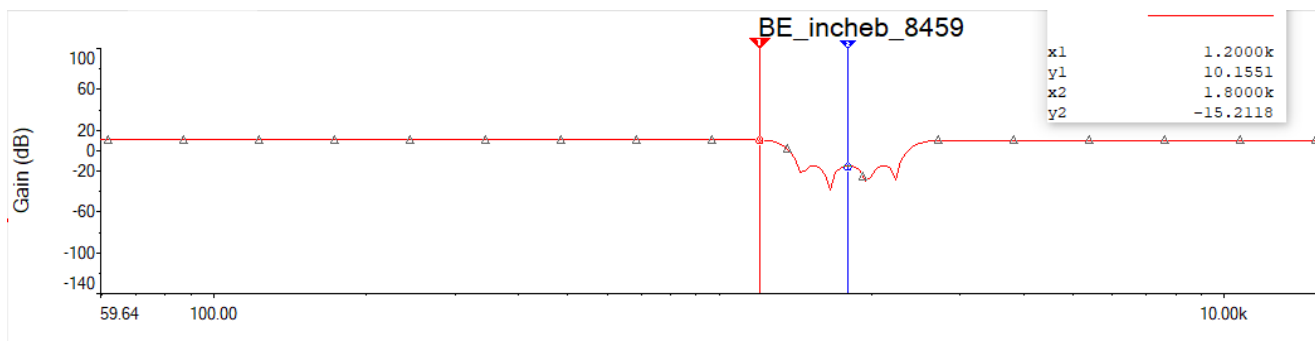
Εισάγουμε λοιπόν όπως αναφέρθηκε τις διάφορες μονάδες του φίλτρου που έχουν σχεδιασθεί στην προηγούμενη φάση της εργασίας στο περιβάλλον MULTISIM και παίρνουμε το παρακάτω κύκλωμα.



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



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



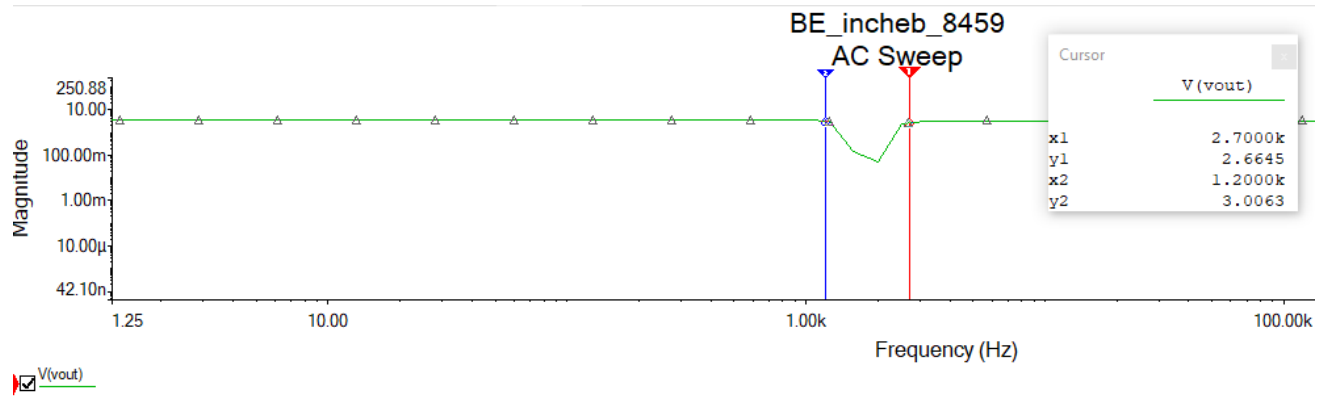
Από αυτά τα διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται οι κρίσιμες συχνότητες και η απόκριση του φίλτρου σε αυτές γίνεται φανερό ότι τα αποτελέσματα που έχουμε είναι παρόμοια με αυτά της θεωρητικής προσομοίωσης στο MATLAB.

Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι το κέρδος που έχουμε είναι περίπου 10.3 dB στις χαμηλές συχνότητες ενώ στην ζώνη αποκοπής η απόσβεση είναι πάντα μεγαλύτερη από 24.6 dB , όπως βρήκαμε από το MATLAB , και πολύ κοντά στα 25 dB που ζητήσαμε εξαρχής.

Τέλος παρατηρούμε ότι η απόσβεση στην κεντρική συχνότητα των 1.8kHz είναι περίπου 25.2 dB.

Μπορούμε να καταλήξουμε ότι το φίλτρο που σχεδιάσαμε στο Multisim ικανοποιεί τις απαιτήσεις που θέσαμε.

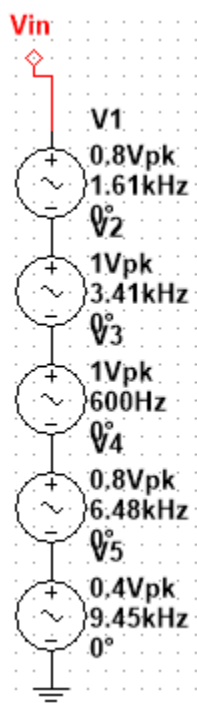
Σε αντίστοιχα συμπεράσματα καταλήγουμε παρατηρώντας της AC analysis του φίλτρου όπως φαίνεται παρακάτω.



- Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα με μια πηγή διέγερσης άθροισμα συνημίτονών με διαφορετικές συχνότητες.

$$f(t) = 0.8 \cos\left(\left(\omega_0 - \frac{\omega_0 - \omega_3}{2}\right)t\right) + \cos\left(\left(\omega_0 + \frac{\omega_0 + \omega_3}{2}\right)t\right) + \cos(0.5\omega_1 t) \\ + 0.8 \cos(2.4\omega_2 t) + 0.4 \cos(3.5\omega_2 t)$$

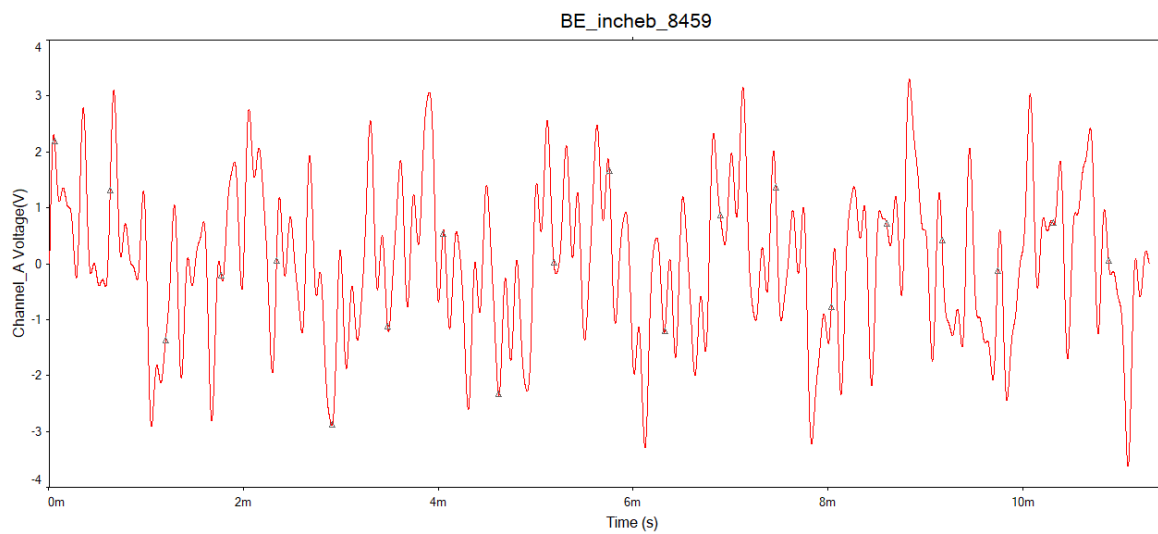
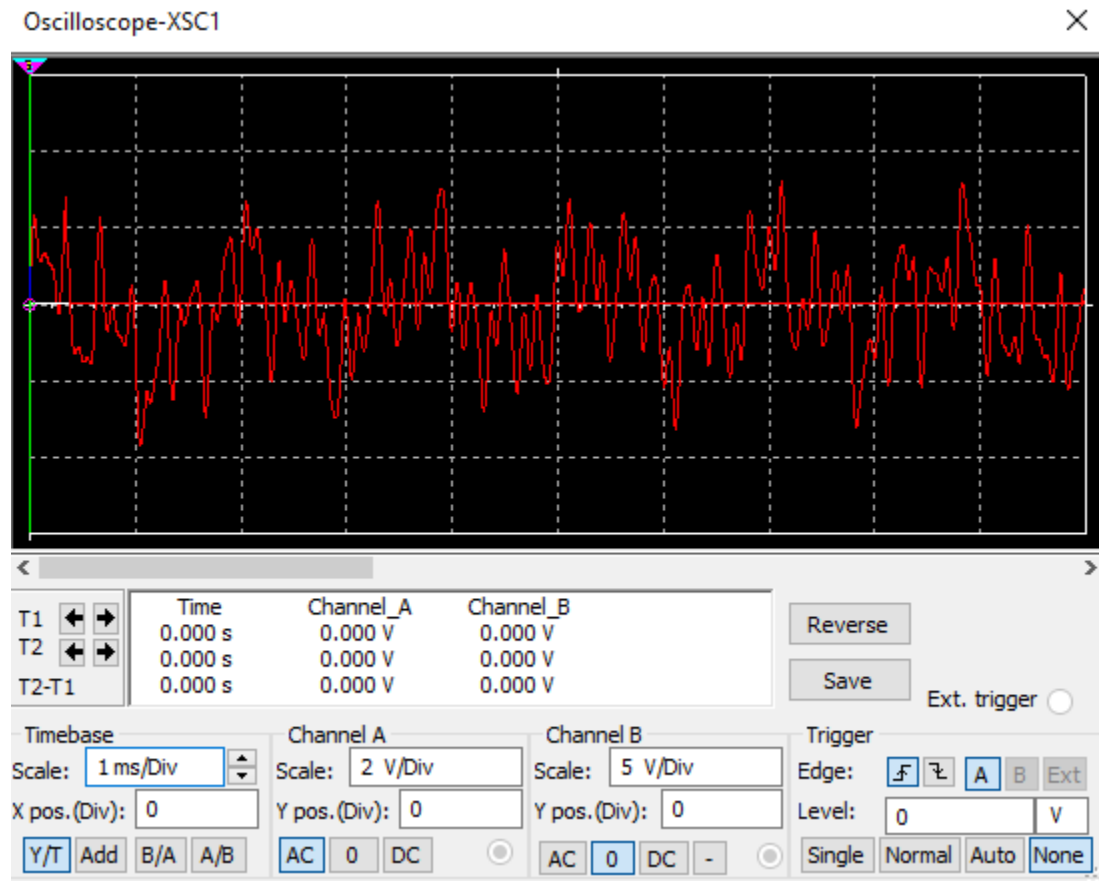
Το σήμα αυτό το υλοποιούμε στο Multisim συνδέοντας σε σειρά 5 πηγές AC των αντίστοιχων πλάτων και συχνοτήτων, όπως φαίνεται παρακάτω.



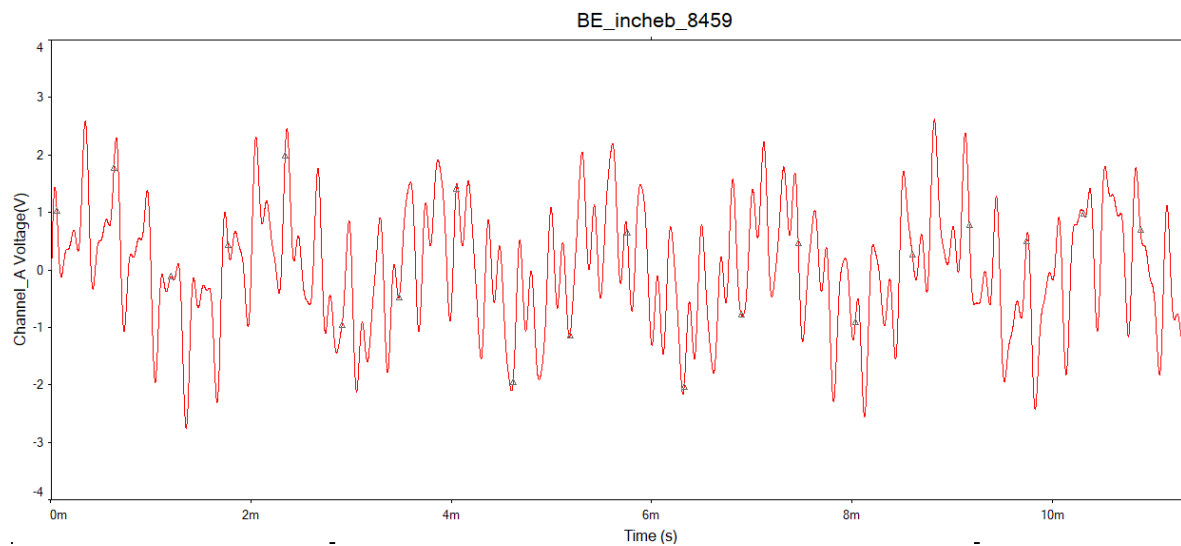
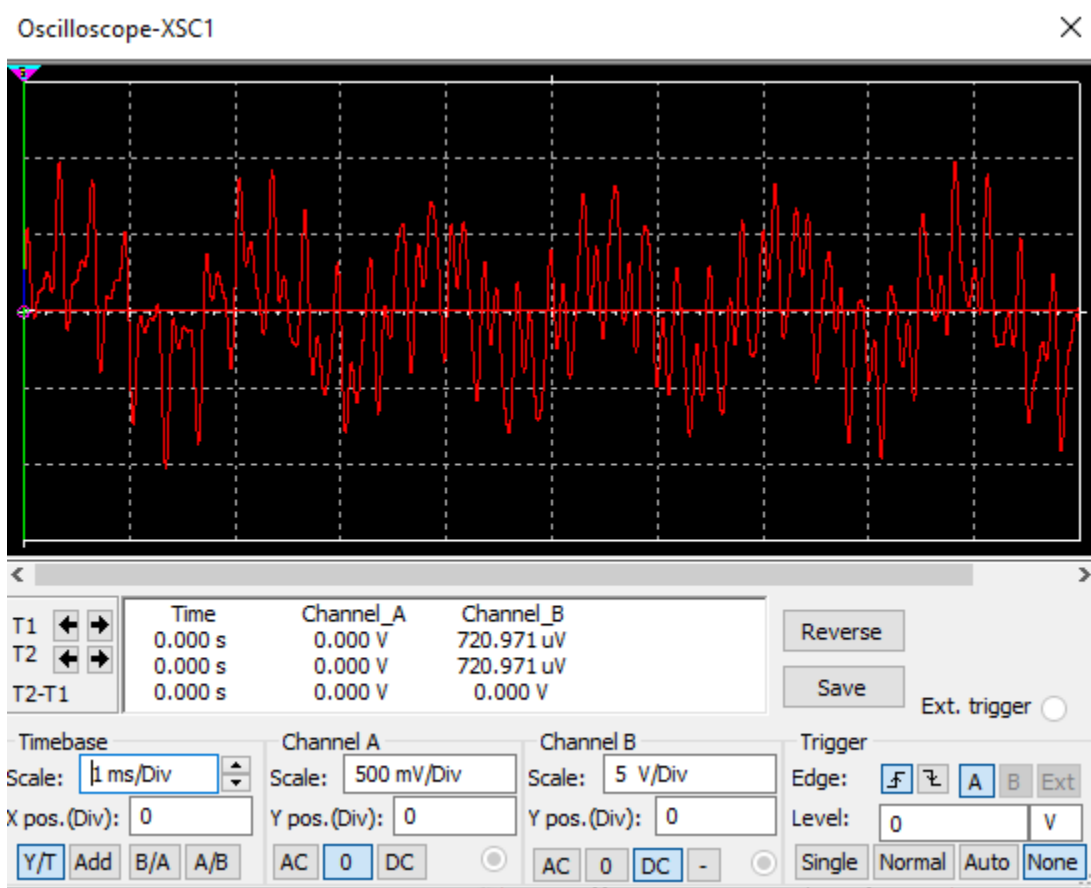
Χρησιμοποιούμε παλμογράφο στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου για να δούμε την απόκριση του συστήματος με το συγκεκριμένο σήμα εισόδου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα.

Σήμα Εισόδου :

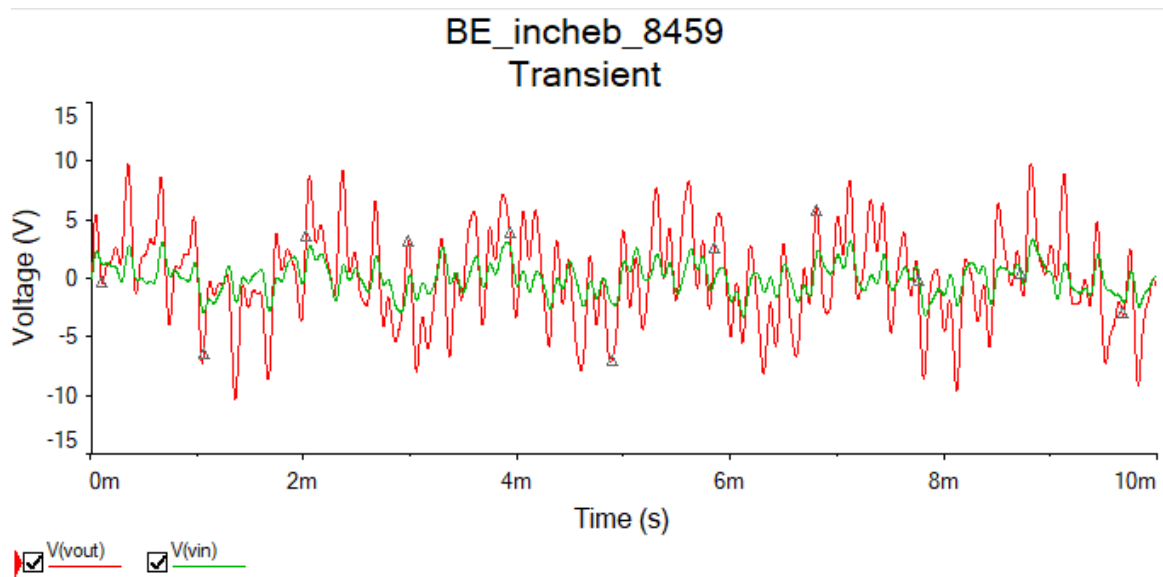


Σήμα Εξόδου :

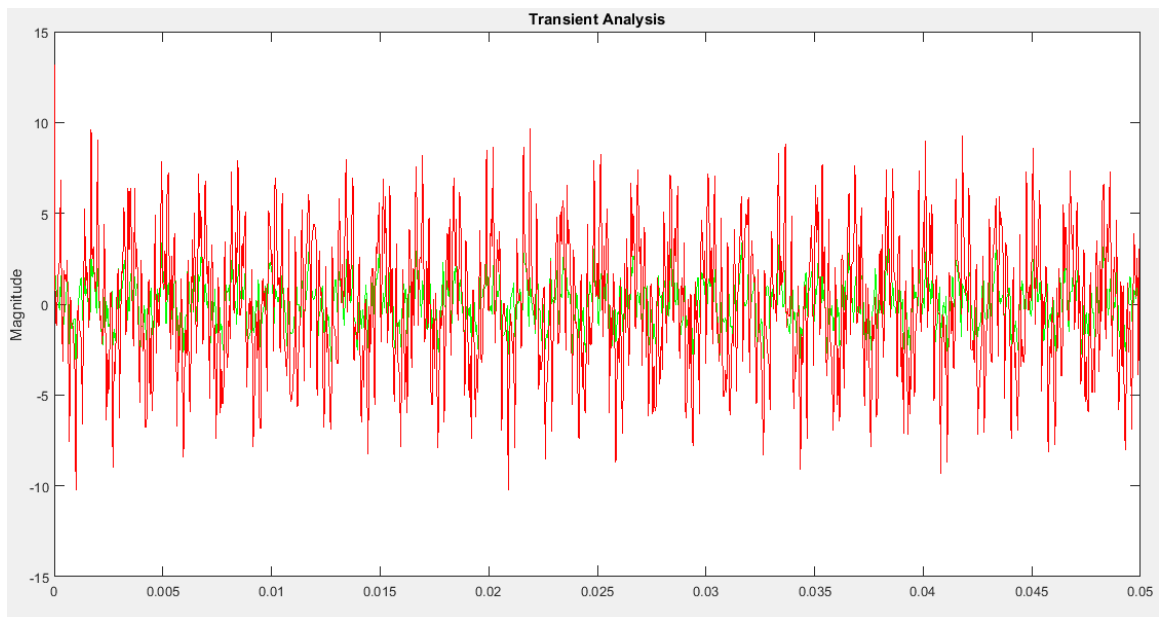


Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου. Σε κάθε σχήμα φαίνονται οι επιλογές που κάναμε στον παλμογράφο για να προκύψουν οι αντίστοιχες παραστάσεις (για παράδειγμα: V/Div, sec/Div κτλ.).

Transient analysis σήματος εισόδου και εξόδου.



Αντίστοιχα και με την transient analysis στο MATLAB.



Από τα παραπάνω σχήματα αρχικά διαπιστώνεται η ενισχυτική λειτουργία του φίλτρου , καθώς βλέπουμε ότι το πλάτος της εξόδου είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της εισόδου, Επιπλέον γνωρίζοντας την λειτουργία του φίλτρου ξέρουμε ότι από τις 5 θεμελιώδεις συχνότητες του σήματος εισόδου μόνο η 1.61kHz πρέπει να έχει αποσβεστεί ενώ οι υπόλοιπες πρέπει να διατηρούνται.

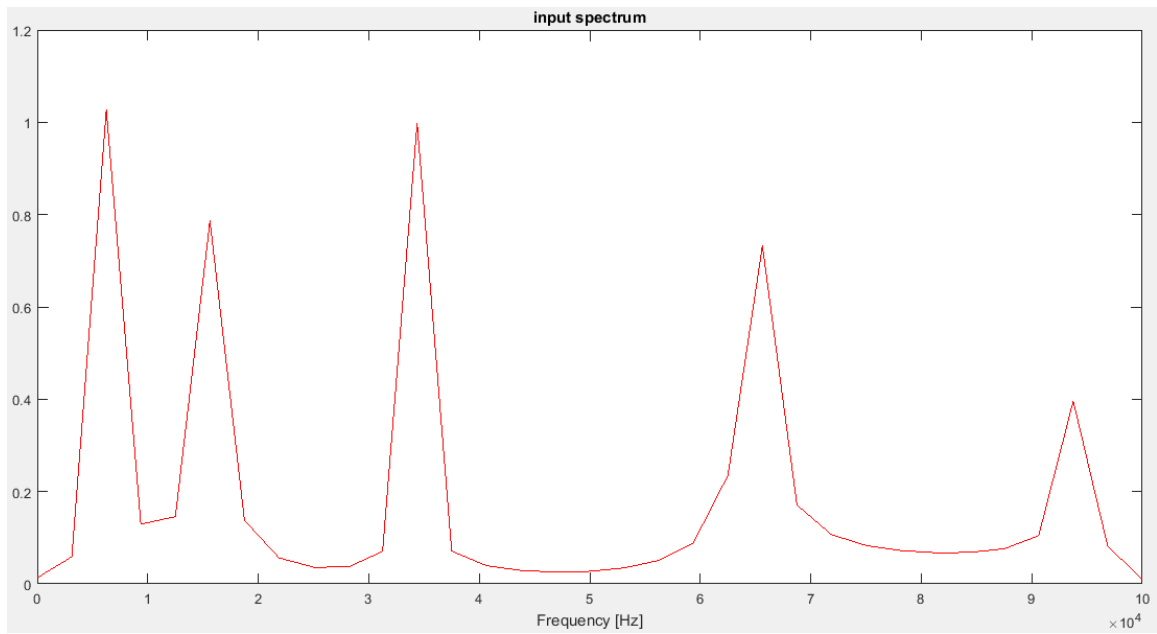
Αυτό αν και είναι δύσκολο να το διαπιστώσουμε εποπτικά από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να το φανταστούμε καθώς παρατηρούμε ότι το σήμα εξόδου φαίνεται να είναι «φτωχότερο» από άποψη συχνοτικού περιεχομένου σε σχέση με της είσοδο.

Το γεγονός αυτό θα φανεί καλύτερη στην ανάλυση φάσματος του σήματος εισόδου και εξόδου που παρουσιάζεται στην παρακάτω ενότητα.

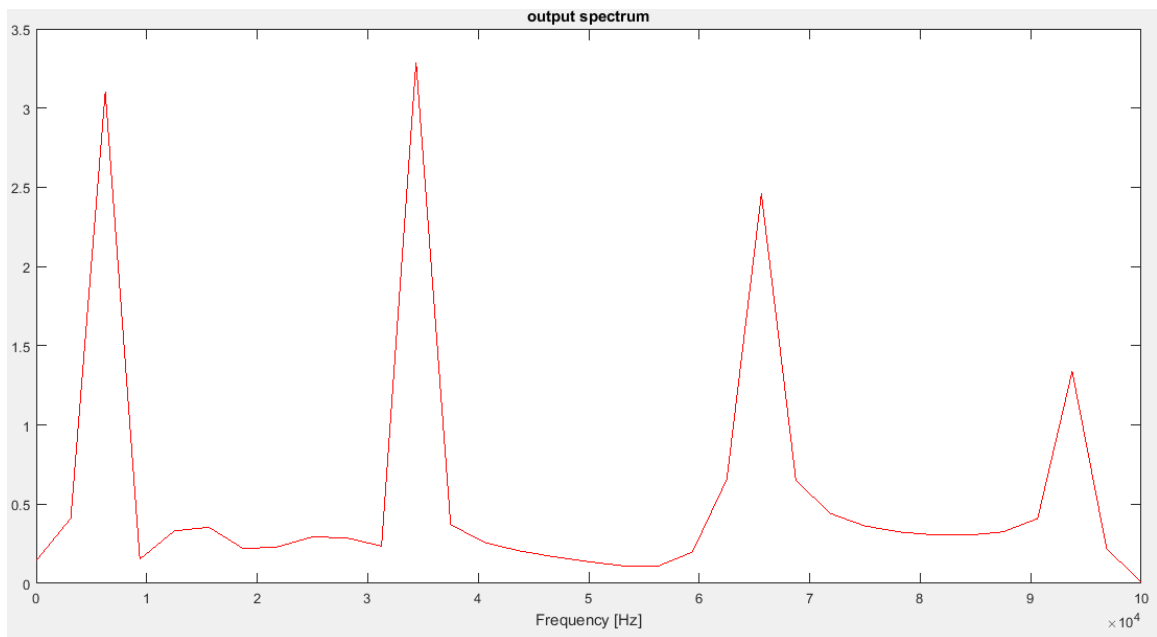
- Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του φίλτρου. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα εξετάσουμε τα φάσματα τόσο στο Multisim όσο και στο Matlab. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα.

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

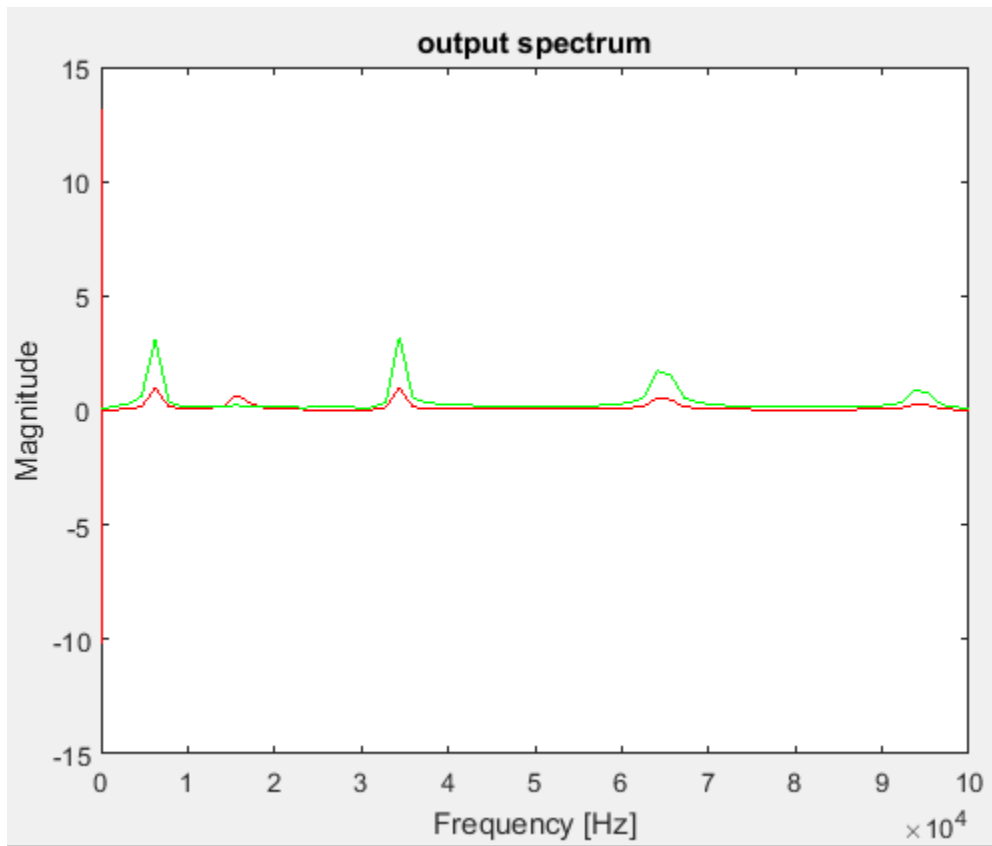
Φάσμα Σήματος Εισόδου(MATLAB) :



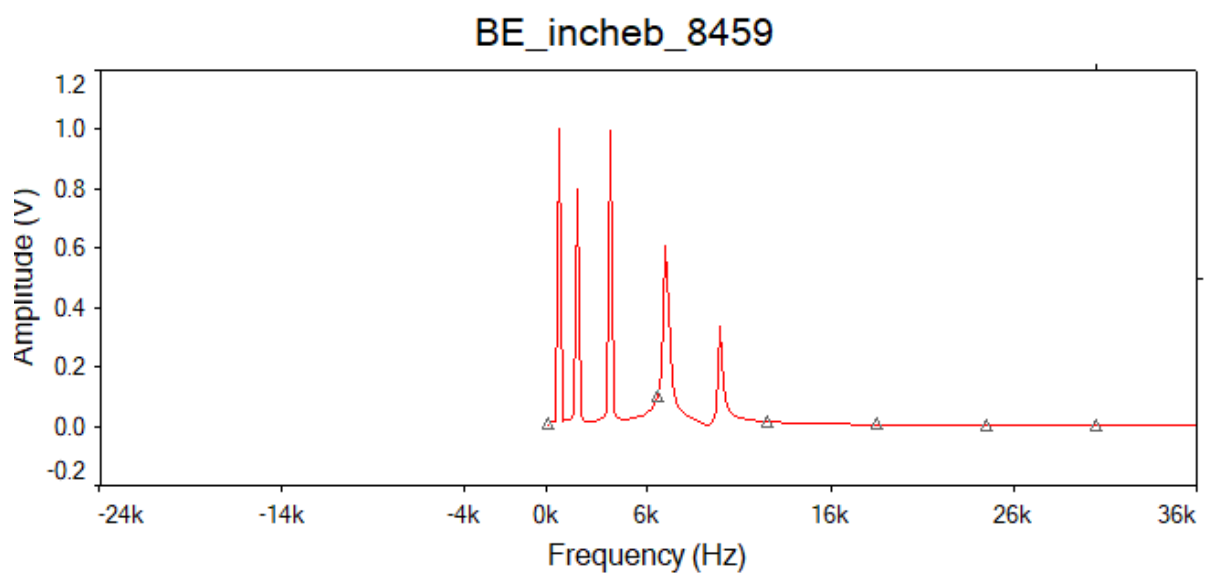
Φάσμα Σήματος Εξόδου(MATLAB) :



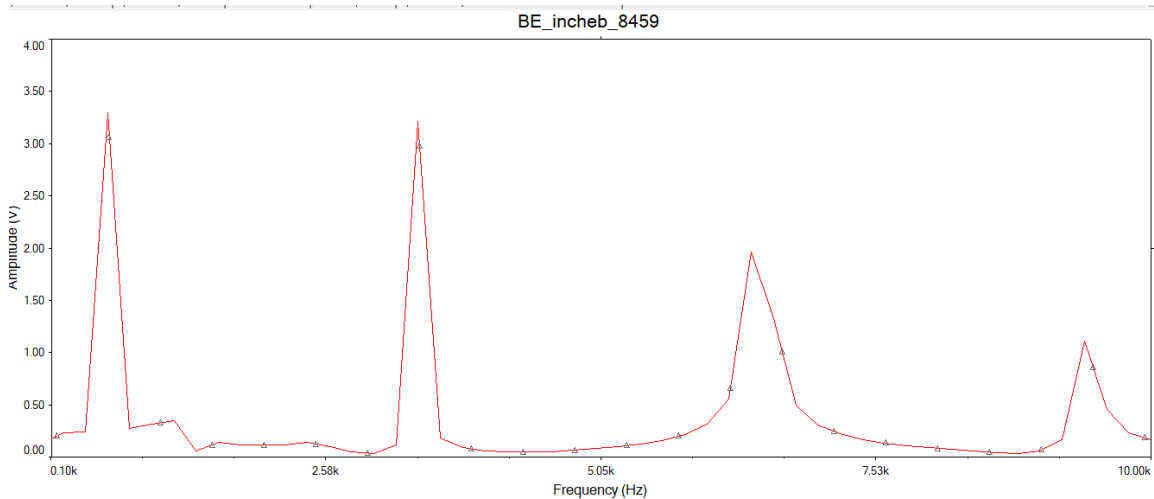
Κοινό διάγραμμα φάσματος εισόδου(κόκκινο) – εξόδου(πράσινο) (MATLAB)



Φάσμα Σήματος Εισόδου Multisim:



Φάσμα Σήματος Εξόδου Multisim:



Παρατηρώντας τα παραπάνω φάσματα μπορούμε να επαληθεύσουμε την υπόθεση που κάναμε νωρίτερα αλλά και να επιβεβαιώσουμε την ζωνοφρακτική και ενισχυτική λειτουργία του φίλτρου.

Καταρχάς τα αποτελέσματα της ανάλυσης μέσω MATLAB και Multisim είναι παρόμοια γεγονός που σημαίνει ότι δεν έχουμε απόκλιση ανάμεσα στην θεωρητική και κυκλωματική προσομοίωση.

Έπειτα, βλέπουμε ότι τα πλάτη των συχνοτήτων εξόδου έχουν σχεδόν τριπλασιαστεί , γεγονός που επαληθεύει την 10 dB ενίσχυση που θέλαμε και σχεδιάσαμε ώστε να πετύχουμε. Επιπλέον παρατηρούμε (ειδικότερα στο κοινό διάγραμμα) ότι μόνο η συχνότητα της πρώτης πηγής (1.61kHz) δεν ανήκει στην ζώνη διέλευσης του φίλτρου και αποσβένεται , με αποτέλεσμα η έξοδος να αποτελείται από 4 θεμελιώδεις συχνότητες και από ενισχυμένες αρμονικές.

Συμπερασματικά , η λειτουργία του φίλτρου που σχεδιάσαμε είναι η αναμενόμενο ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι προδιαγραφές που τέθηκαν εξαρχής.