

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

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

---

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Εργασία 2<sup>η</sup>

ΒΙΚΤΩΡ ΝΑΣΤΟΣ

AEM: 9297

Email : viktorna@auth.gr

Θεσσαλονίκη 09/2020

## Περιεχόμενα

Εργασία #2 : Σχεδίαση Ζωνοδιαβατών φίλτρων .....	3
A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου .....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	7
• Ρύθμιση Κέρδους .....	9
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB .....	12
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM .....	16

## Εργασία #2 : Σχεδίαση Ζωνοδιαβατών φίλτρων

### ΖΩΝΟΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ CHEBYSHEV

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

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

$$f_0 = 0.65kHz$$

$$f_1 = 400 + 25 \cdot \alpha_3 = 0.625kHz$$

$$f_2 = \frac{f_0^2}{f_1} = 0.676kHz$$

$$f_3 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + 4f_0^2}}{2} = 593.9907 \text{ Hz} \text{ με } D = 2.3 \cdot \frac{f_0^2 - f_1^2}{f_1}$$

$$f_4 = \frac{f_0^2}{f_3} = 711.2907 \text{ Hz}$$

$$a_{min} = 27.5 + \alpha_4 = 34.5 \text{ dB}$$

$$a_{max} = 0.5 + \frac{\alpha_3 - 5}{10} = 0.9 \text{ dB}$$

### A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

#### 1. Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

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

Μετατρέπουμε τις συχνότητες :

$$\omega_0 = 4084.1 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_1 = 3927 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_2 = 4247.4 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_3 = 3732.2 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_4 = 4469.2 \text{ rad/sec}$$

και

$$a_{max} = 0.9 \text{ dB} \quad a_{min} = 34.5 \text{ dB}$$

$$\Omega p = 1 \text{ και } \Omega s = \frac{\omega_4 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_1} = 2.3 \text{ και } bw = \omega_2 - \omega_1 = 320.4425 \text{ rad/sec}$$

- 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 :

$$n = \frac{\cosh - 1 [(10^{a_{min}/10} - 1)/(10^{a_{max}/10} - 1)]^{1/2}}{\cosh - 1 \omega s} = 3.6603$$

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:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{a_{max}}{10}} - 1}} = 0.4799$$

$$\alpha = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) = 0.3701$$

$$\Omega_{hp} = \cosh \left[ \frac{1}{n} \cosh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right] = 1.0587 \text{ rad/sec (αντιστροφή του φίλτρου Chebyshev)}$$

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

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

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

παίρνω τους πόλους της συνάρτησης μεταφοράς. Επομένως θα έχω:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -0.3498 \pm j 0.4092 \Rightarrow Q_{1,2} = 0.7695 \\ p_{3,4} &= -0.1449 \pm j 0.9879 \Rightarrow Q_{3,4} = 3.4453 \end{aligned}$$

$\Psi_k$	$Q_k$	$P_k$
$\pm 22.5^\circ$	0.7695	$-0.3498 \pm j 0.4092$
$\pm 67.5^\circ$	3.4453	$-0.1449 \pm j 0.9879$

Μετασχηματίζουμε τους πόλους Chebyshev της κατωδιαβατής απόκρισης σύμφωνα με τον αλγόριθμο Geffe.

Μετασχηματισμός του μιγαδικού πόλου:  $p_{1,2} = -0.3498 \pm j 0.4092$

$$qc = 12.7451$$

$$\Sigma = -0.3498$$

$$C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 0.2898$$

$$D = \frac{2\Sigma}{qc} = 0.05489$$

$$E = 4 + \frac{C}{qc^2} = 4.0018$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 4.0003$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{2}(E + G)} = 36.4375$$

$$k = \frac{\Sigma * Q}{qc} = 1.0001$$

$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.0162$$

$$\omega_{01} = \frac{\omega_0}{W} = 4150.2 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{02} = W * \omega_0 = 4019 \text{ rad/sec}$$

Από τη διαδικασία μετασχηματισμού προκύπτει ότι οι πόλοι  $p_{1,2} = -0.3498 \pm j 0.4092$  της συνάρτησης μεταφοράς, μετασχηματίζονται σε δύο ζεύγη μιγαδικών πόλων,  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$  καθώς και δύο μηδενικά στο  $s=0$ .

Μετασχηματισμός του μιγαδικού πόλου:  $p_{3,4} = -0.1449 \pm j 0.9879$

$$qc = 12.7451$$

$$\Sigma = -0.1449$$

$$C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 0.9969$$

$$D = \frac{2\Sigma}{qc} = 0.02273$$

$$E = 4 + \frac{C}{qc^2} = 4.0061$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 4.0059$$

$$Q = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{2}(E + G)} = 88.0227$$

$$k = \frac{\Sigma * Q}{qc} = 1.0008$$

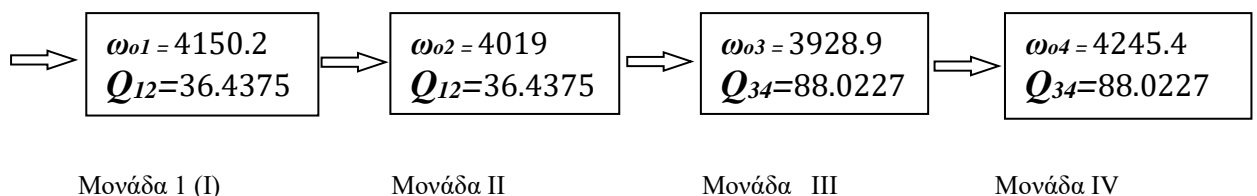
$$W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.0395$$

$$\omega_{03} = \frac{\omega_0}{W} = 3928.9 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{04} = W * \omega_0 = 4245.4 \text{ rad/sec}$$

Από τη διαδικασία μετασχηματισμού προκύπτει ότι οι πόλοι  $p_{3,4} = -0.1449 \pm j 0.9879$  μετασχηματίζονται σε δύο ζεύγη μιγαδικών πόλων,  $\omega_{03}$  και  $\omega_{04}$  καθώς και δύο μηδενικά στο  $s=0$ . Οι πόλοι έχουν το ίδιο Q, κείνται επομένως πάνω στην ίδια ευθεία Q.

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να υλοποιηθεί προκύπτει ότι θα αποτελείται από **τέσσερις μονάδες**, οι οποίες φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς, οι γωνίες καθώς και τα αντίστοιχα Q των ριζών φαίνονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω πίνακα:

$\Psi_k$	$Q_k$	$P_k$
$\pm 89.2138^\circ$	36.4375	$55.1496 \pm j4018.6$
$\pm 89.2138^\circ$	36.4375	$56.9491 \pm j4149.8$
$\pm 89.6745$	88.0227	$22.3173 \pm j3928.8$
$\pm 89.6745$	88.0227	$24.1155 \pm j4245.4$

## 2. Υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς

Όλες οι μονάδες υλοποιούνται με κυκλώματα **Delyiannis-Fried** με χρήση της στρατηγικής (2).

### Μονάδα (I)

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κύκλωμα Delyiannis-Fried και αντιστοιχεί στον μιγαδικό πόλο  $p_{1,2} = 55.1496 \pm j4018.6$ . Σύμφωνα με τη στρατηγική 2 έχουμε:

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ και } \omega_0 = 1$$

Επειδή όμως έχουμε  $Q > 5$  χρησιμοποιούμε στρατηγική με ενίσχυση. Θεωρούμε τον λόγο  $\frac{R_1}{R_2} = \beta = 1$ , άρα έχουμε  $R_1 = R_2 = 1$ . Ακόμη από τις σχέσεις  $k = 1 + \frac{R_B}{R_A}$  και

$$k = \frac{Q(\beta+2)-\sqrt{\beta}}{2Q-\sqrt{\beta}} \text{ προκύπτει } k = 1.5070, \text{ άρα } \frac{R_B}{R_A} = 1.5070$$

### Κλιμακοποίηση

Έχουμε  $kf = \omega_0 = 4019 \text{ rad/sec}$  και επειδή θέλουμε πυκνωτές με τιμή  $0.1\mu F$

από τη σχέση  $C_{new} = \frac{1}{k_f * k_m} * C_{old}$  προκύπτει  $k_m = 2488.2$ . Επομένως

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu F, R_1 = R_2 = k_m * R_{old} = 2488.16 \Omega,$$

$$R_A = k_m * R_{A,old} = 2488.16 \Omega, R_B = k_m * R_{B,old} = 1261.4 \Omega$$

και το κέρδος  $H_1 = \frac{k*\beta}{2*(k-1)-\beta} = 108.3126$

### Μονάδα (II)

Η δεύτερη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κύκλωμα Delyiannis-Fried και αντιστοιχεί στον μιγαδικό πόλο  $p_{3,4} = 56.9491 \pm j4149.8$

Οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών είναι όμοιες με αυτές της Μονάδας 1.

### Κλιμακοποίηση

Έχουμε  $kf = \omega_0 = 4150.2 \text{ rad/sec}$  και επειδή θέλουμε πυκνωτές με τιμή  $0.1\mu F$

από τη σχέση  $C_{new} = \frac{1}{k_f * k_m} * C_{old}$  προκύπτει  $k_m = 2409.5$ . Επομένως

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu F, R_1 = R_2 = k_m * R_{old} = 2409.5 \Omega,$$

$$R_A = k_m * R_{A,old} = 2409.5 \Omega, R_B = k_m * R_{B,old} = 1221.5 \Omega$$

και το κέρδος  $H_2 = \frac{k*\beta}{2*(k-1)-\beta} = 108.3126$

### Μονάδα (III)

Η τρίτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κύκλωμα Delyiannis-Fried και αντιστοιχεί στον μιγαδικό πόλο  $p_{5,6} = 22.3173 \pm j3928.8$ . Σύμφωνα με τη στρατηγική 2 έχουμε:

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ και } \omega_0 = 1$$

Επειδή όμως έχουμε  $Q > 5$  χρησιμοποιούμε στρατηγική με ενίσχυση. Θεωρούμε τον λόγο  $\frac{R_1}{R_2} = \beta = 1$ , άρα έχουμε  $R_1 = R_2 = 1$ . Ακόμη από τις σχέσεις  $k = 1 + \frac{R_B}{R_A}$  και

$$k = \frac{Q(\beta+2)-\sqrt{\beta}}{2Q-\sqrt{\beta}} \text{ προκύπτει } k = 1.5029, \text{ άρα } \frac{R_B}{R_A} = 1.5029$$

### Κλιμακοποίηση

Έχουμε  $kf = \omega_0 = 3928.9 \text{ rad/sec}$  και επειδή θέλουμε πυκνωτές με τιμή  $0.1\mu F$



από τη σχέση  $C_{new} = \frac{1}{k_f * k_m} * C_{old}$  προκύπτει  $k_m = 2545.3$ . Επομένως

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu F, R_1 = R_2 = k_m * R_{old} = 2545.3 \Omega,$$

$$R_A = k_m * R_{A,old} = 2545.3 \Omega, R_B = k_m * R_{B,old} = 1279.9 \Omega$$

$$\text{και το κέρδος } H_3 = \frac{k * \beta}{2 * (k-1) - \beta} = 263.068$$

### Μονάδα (IV)

Η τέταρτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κύκλωμα Delyiannis-Fried και αντιστοιχεί στον μιγαδικό πόλο  $p_{7,8} = 24.1155 \pm j4245.4$

Οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών είναι όμοιες με αυτές της Μονάδας 3.

### Κλιμακοποίηση

Έχουμε  $k_f = \omega_0 = 4245.4 \text{ rad/sec}$  και επειδή θέλουμε πυκνωτές με τιμή  $0.1\mu F$

από τη σχέση  $C_{new} = \frac{1}{k_f * k_m} * C_{old}$  προκύπτει  $k_m = 2355.5$ . Επομένως

$$C_1 = C_2 = 0.1\mu F, R_1 = R_2 = k_m * R_{old} = 2355.5 \Omega,$$

$$R_A = k_m * R_{A,old} = 2355.5 \Omega, R_B = k_m * R_{B,old} = 1184.5 \Omega$$

$$\text{και το κέρδος } H_4 = \frac{k * \beta}{2 * (k-1) - \beta} = 263.068$$

### Ρύθμιση κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου στη ζώνη διόδου να είναι  $5 \text{ dB}$ .

Η πρώτη μονάδα έχει κέρδος  $k_1 = |T_1(j\omega_0)| = 70.3734$

Η δεύτερη μονάδα έχει κέρδος  $k_2 = |T_2(j\omega_0)| = 70.3734$

Η τρίτη μονάδα έχει κέρδος  $k_3 = |T_3(j\omega_0)| = 38.1492$

Η τέταρτη μονάδα έχει κέρδος  $k_4 = |T_4(j\omega_0)| = 38.1492$

Το συνολικό κέρδος είναι  $k = k_1 * k_2 * k_3 * k_4$

Οπότε για να φτάσουμε τα  $5 \text{ dB}$  θα πρέπει να μειώσουμε το κέρδος του συνολικού φίλτρου. Δηλαδή:

$$20\log(\alpha K) = 5 \Rightarrow \alpha K = 10^{0.25} \Rightarrow \alpha = 2.4672 * 10^{-7}$$

Επειδή το  $\alpha \ll 1$ , η τάση εξόδου που δίνει το κύκλωμα είναι μεγαλύτερη από αυτή που ζητάμε. Θα πρέπει λοιπόν να εξασθενήσουμε την είσοδο :

$$Z_a = \frac{R_{11}}{a} = 10.085 \text{ } G\Omega \text{ και } Z_b = \frac{R_{11}}{1-a} = 2488.2 \text{ } \Omega$$

### Συναρτήσεις μεταφοράς μονάδων

1. Για την πρώτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T1(s) = H_1 \frac{\frac{\omega_{01}}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_{01}}{Q} s + \omega_{01}^2} = \frac{1.195 * 10^4}{s^2 + 110.3s + 1.615 * 10^7}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T2(s) = H_2 \frac{\frac{\omega_{02}}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_{02}}{Q} s + \omega_{02}^2} = \frac{1.234 * 10^4}{s^2 + 113.9s + 1.722 * 10^7}$$

3. Για την τρίτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T3(s) = H_3 \frac{\frac{\omega_{03}}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_{03}}{Q} s + \omega_{03}^2} = \frac{1.174 * 10^4}{s^2 + 44.63s + 1.544 * 10^7}$$

4. Για την τέταρτη μονάδα η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

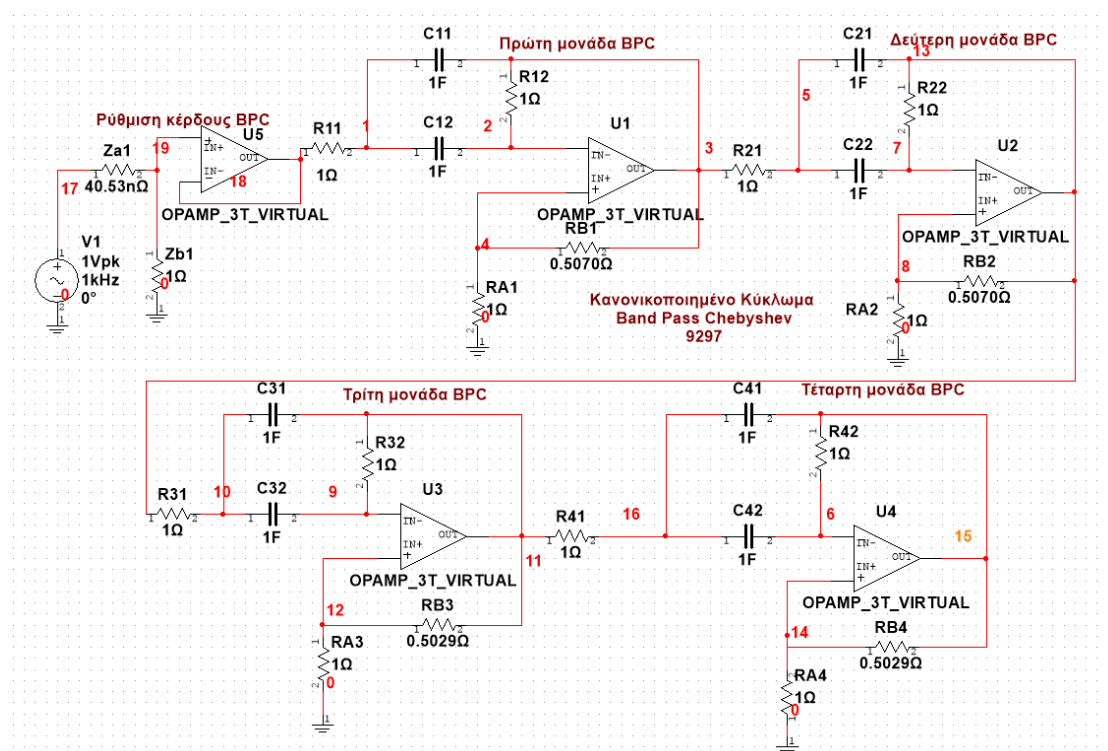
$$T4(s) = H_4 \frac{\frac{\omega_{04}}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_{04}}{Q} s + \omega_{04}^2} = \frac{1.269 * 10^4}{s^2 + 48.23s + 1.802 * 10^7}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοδιαβατού φίλτρου Chebyshev είναι:

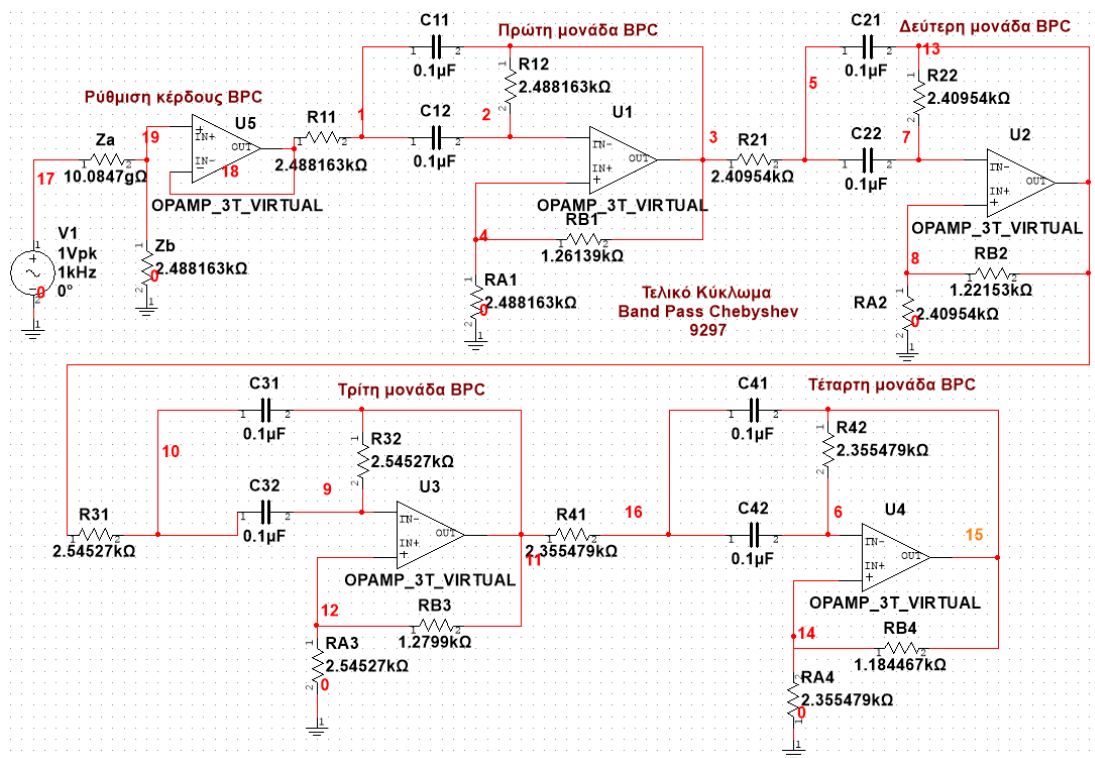
$$TBP(s) = a * T1(s) * T2(s) * T3(s) * T4(s) =$$

$$= \frac{5.417 * 10^9 s^4}{s^8 + 317.1 s^7 + 6.687 * 10^7 s^6 + 1.589 * 10^{10} s^5 + 1.674 * 10^{15} s^4 + 2.651 * 10^{17} s^3 + 1.86 * 10^{22} s^2 + 1.471 * 10^{24} s + 7.74 * 10^{28}}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τέσσερις μονάδες αλλά και η μη 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.

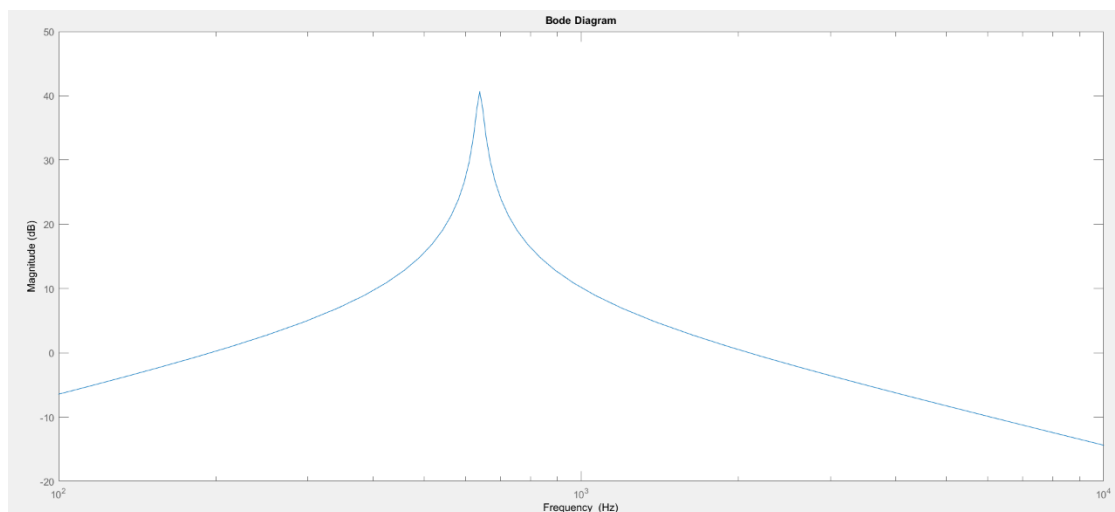


## B. Μελέτη της συνάρτησης μεταφοράς στο Matlab

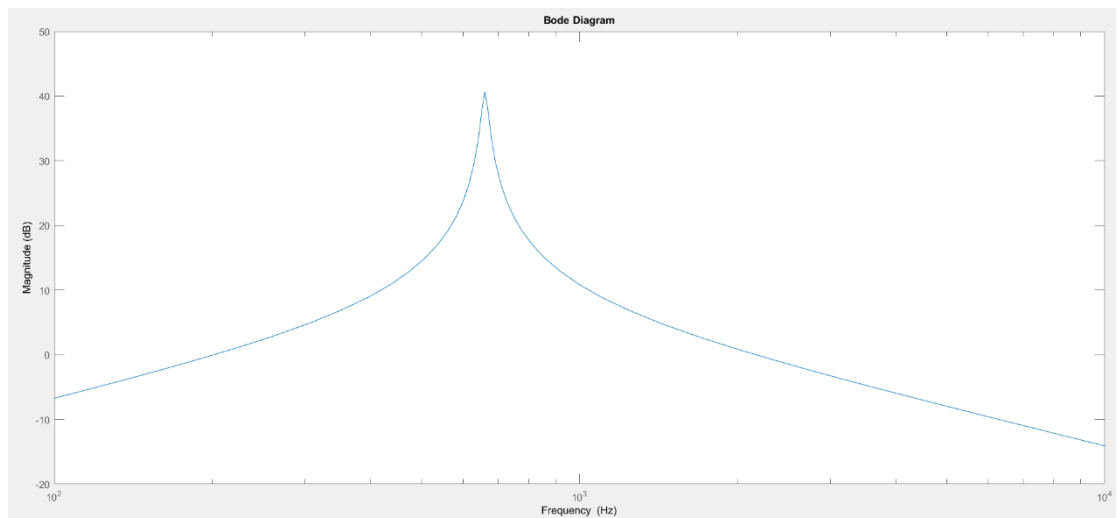
Εισάγουμε στο πρόγραμμα **MATLAB** τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των τεσσάρων μονάδων αλλά και την συνολική συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου και παίρνουμε τις αποκρίσεις πλάτους σε dB.

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

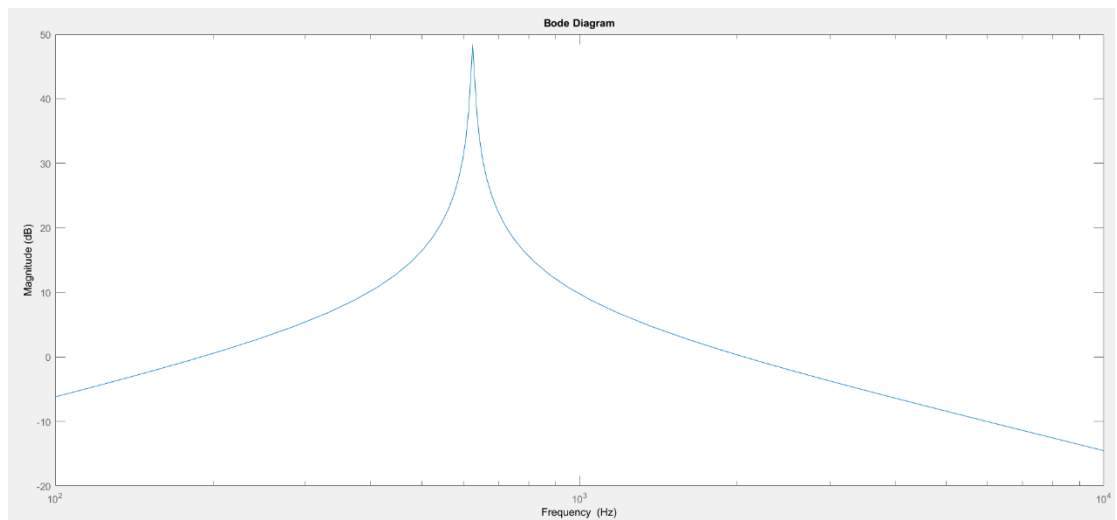
1<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοδιαβατό φίλτρο με Q-enhancement



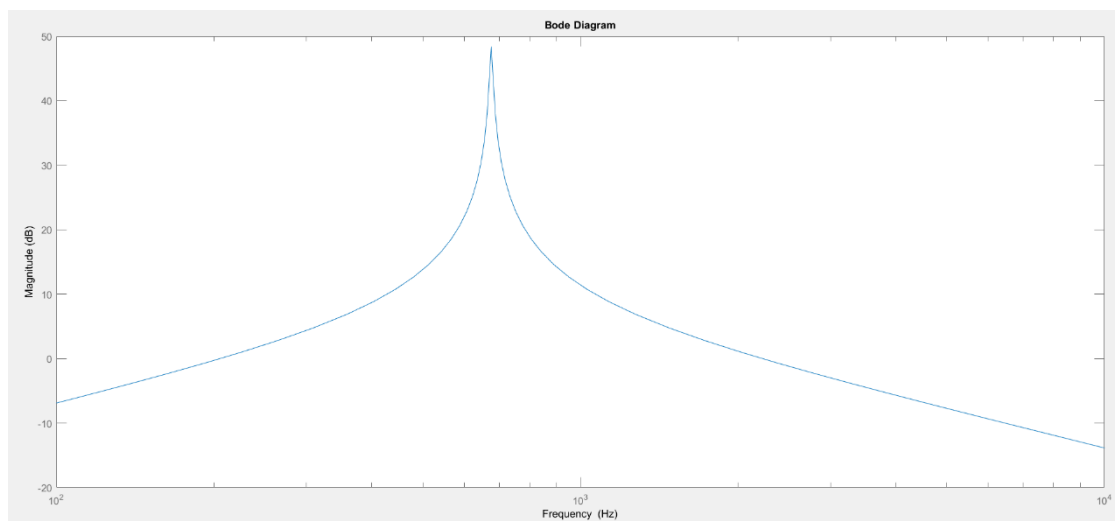
2<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοδιαβατό φίλτρο με Q-enhancement



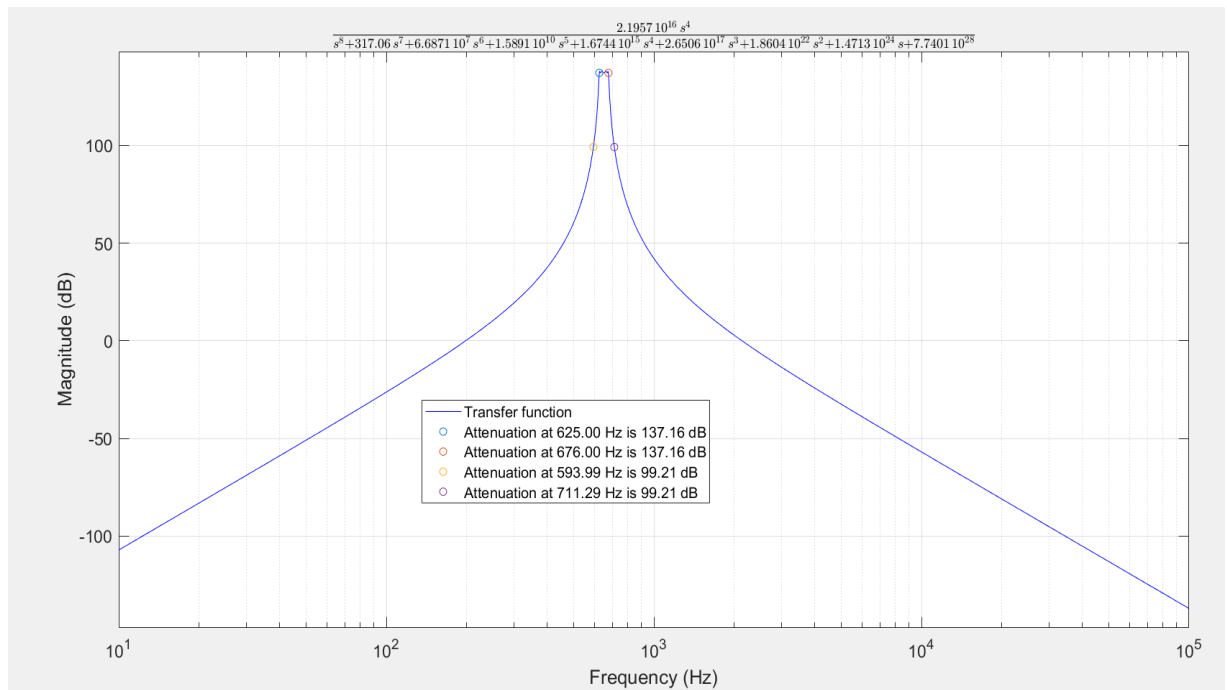
3<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοδιαβατό φίλτρο με Q-enhancement



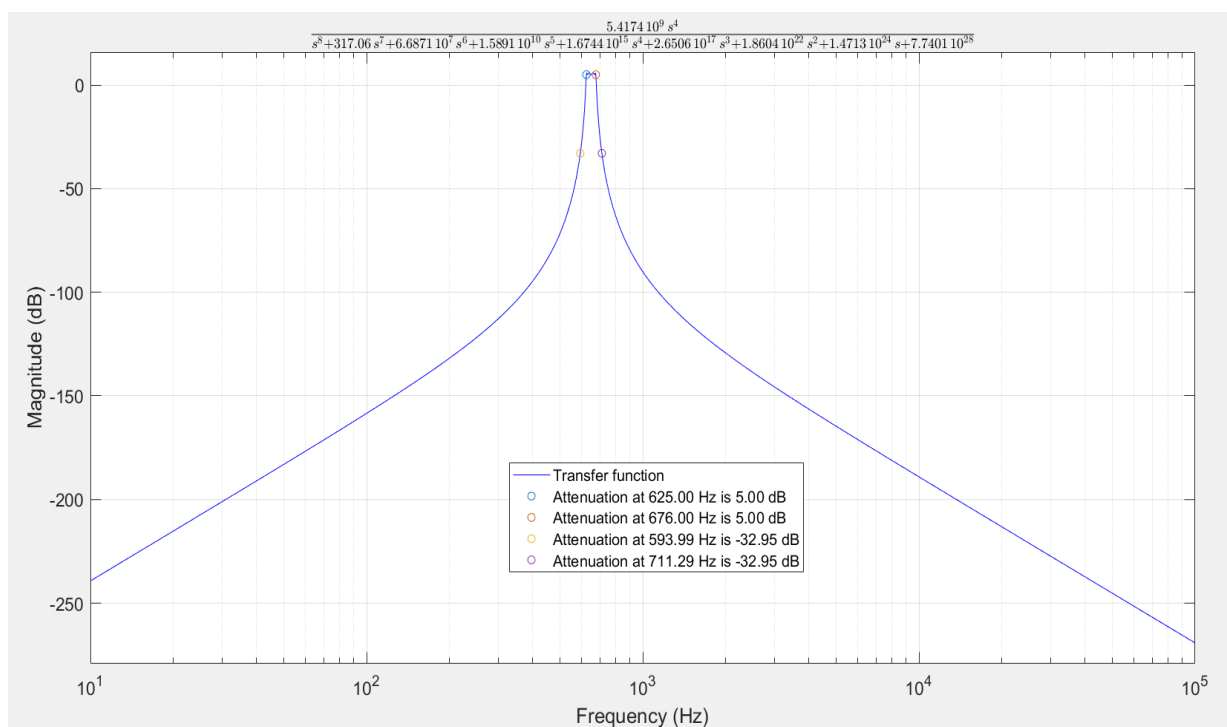
4<sup>η</sup> Μονάδα : Ζωνοδιαβατό φίλτρο με Q-enhancement



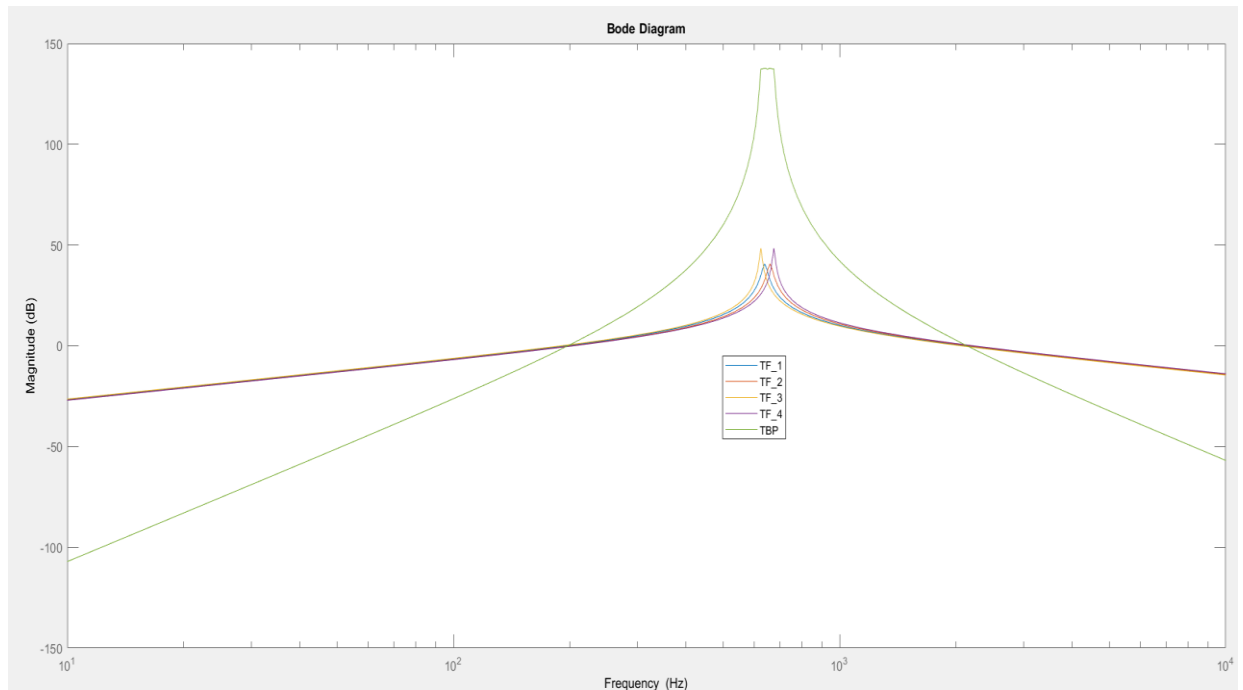
Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας πριν τη ρύθμιση του κέρδους.



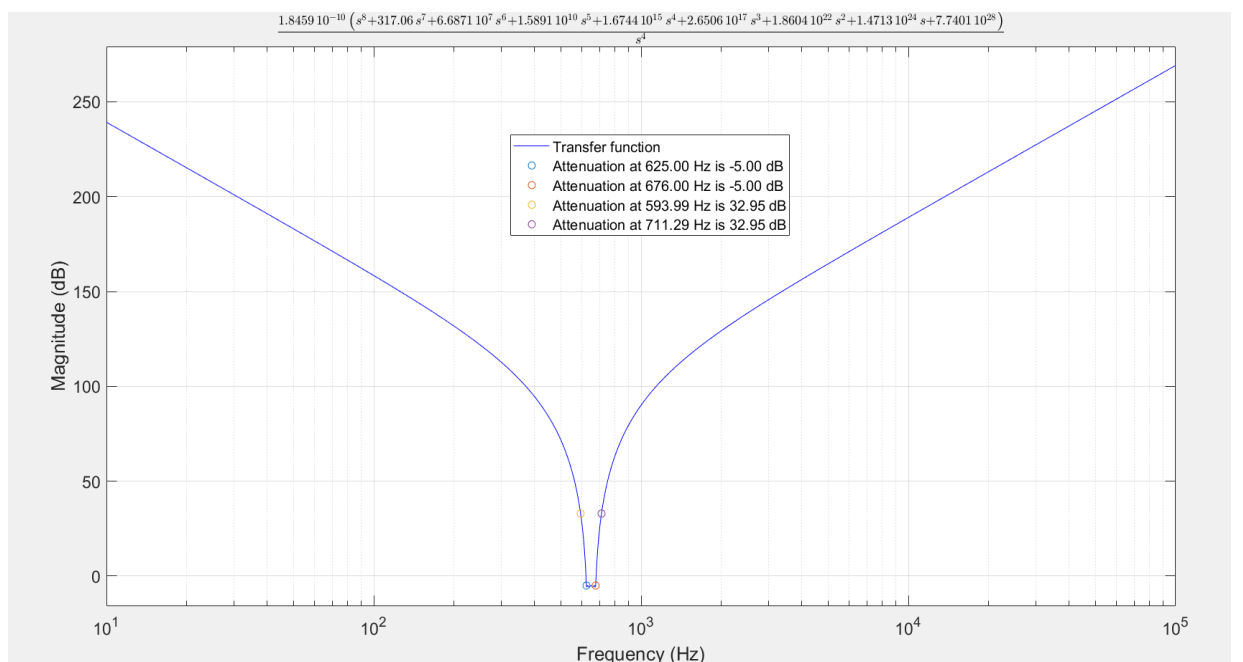
Παρακάτω φαίνεται η απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας μετά τη ρύθμιση του κέρδους(5dB).



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.

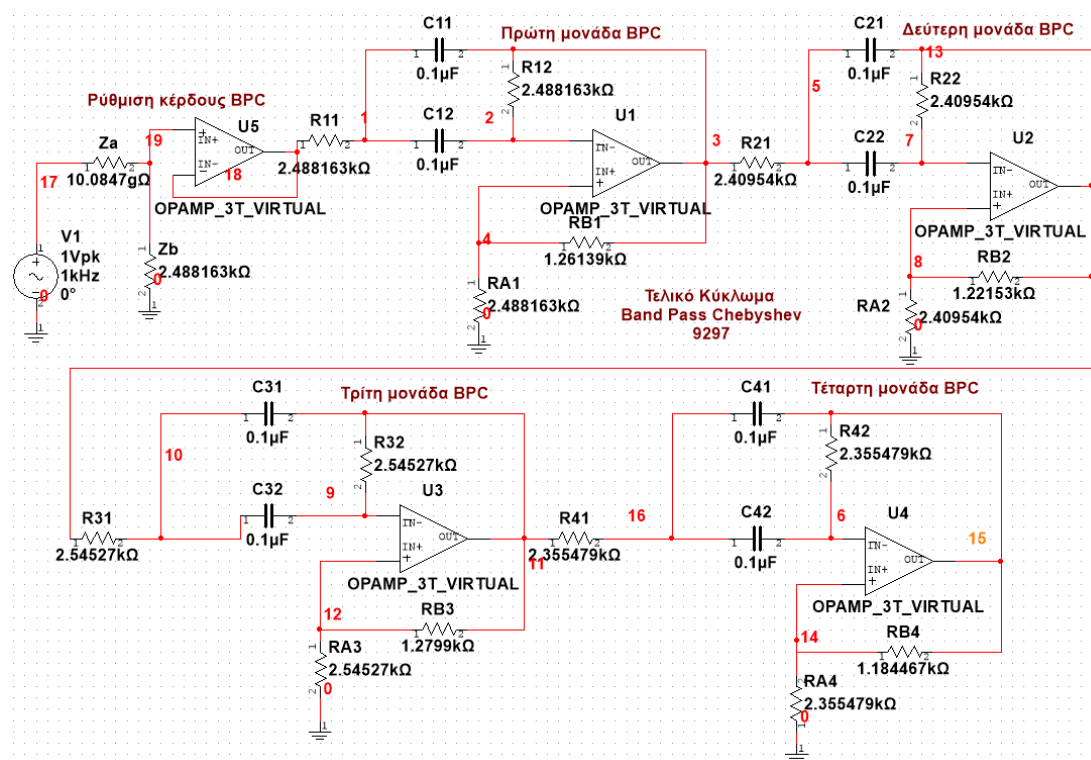


Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το φίλτρο μας έχει κέρδος 5 dB, όπως είχε ζητηθεί.

Στις συχνότητες  $593.99\text{ Hz}$  και  $711.29\text{ Hz}$  θέλουμε να έχουμε  $a_{min} = 34.5$ . Από το διάγραμμα φαίνεται ότι και για τις δύο συχνότητες έχουμε  $32.95 - (-5) = 37.95\text{ dB}$  το οποίο είναι μεγαλύτερο από το  $a_{min}$ . Οπότε οι απαιτήσεις για τη συχνότητα αποκοπής υπερκαλύπτονται. Για τη ζώνη διόδου, έχουμε την προδιαγραφή  $a_{max} = 0.9$ . Από το διάγραμμα, με την ίδια διαδικασία για τα  $625\text{ Hz}$  και  $676\text{ Hz}$  έχουμε  $-5 - (-5) = 0$  το οποίο καλύπτει την προδιαγραφή για το  $a_{max}$ , επομένως το φίλτρο μπορούμε να πούμε ότι καλύπτει τις προδιαγραφές.

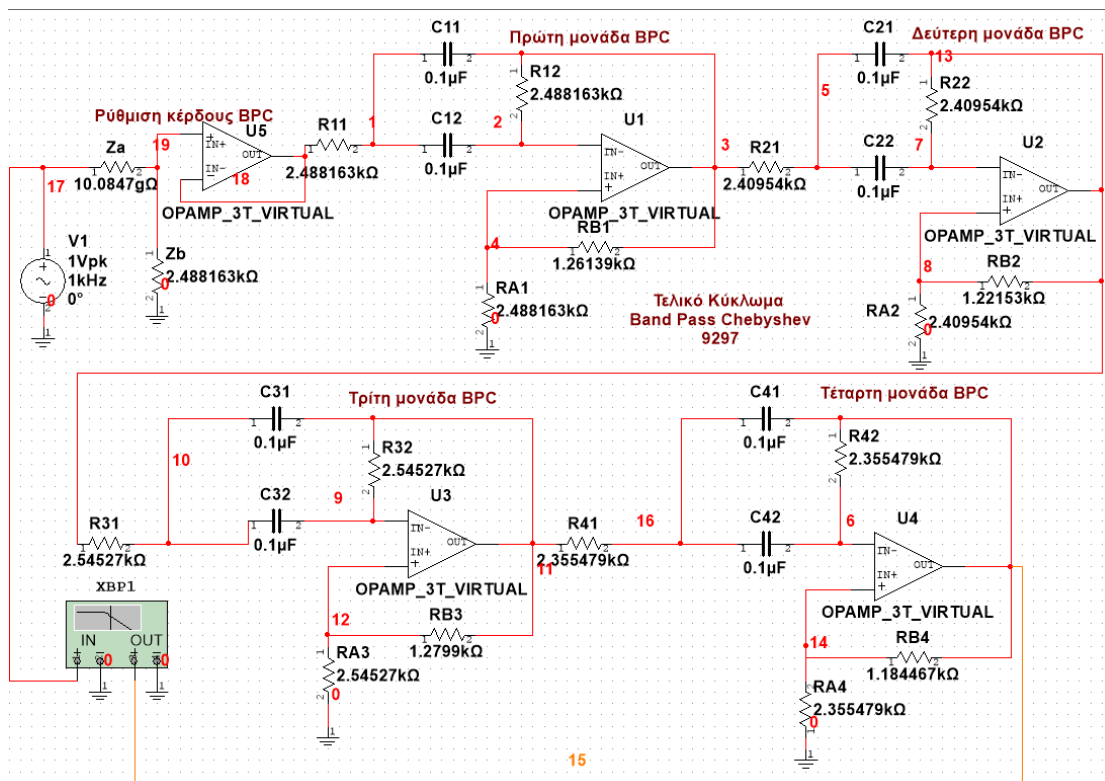
## Γ. Υλοποίηση του κυκλώματος φίλτρου στο Multisim

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.

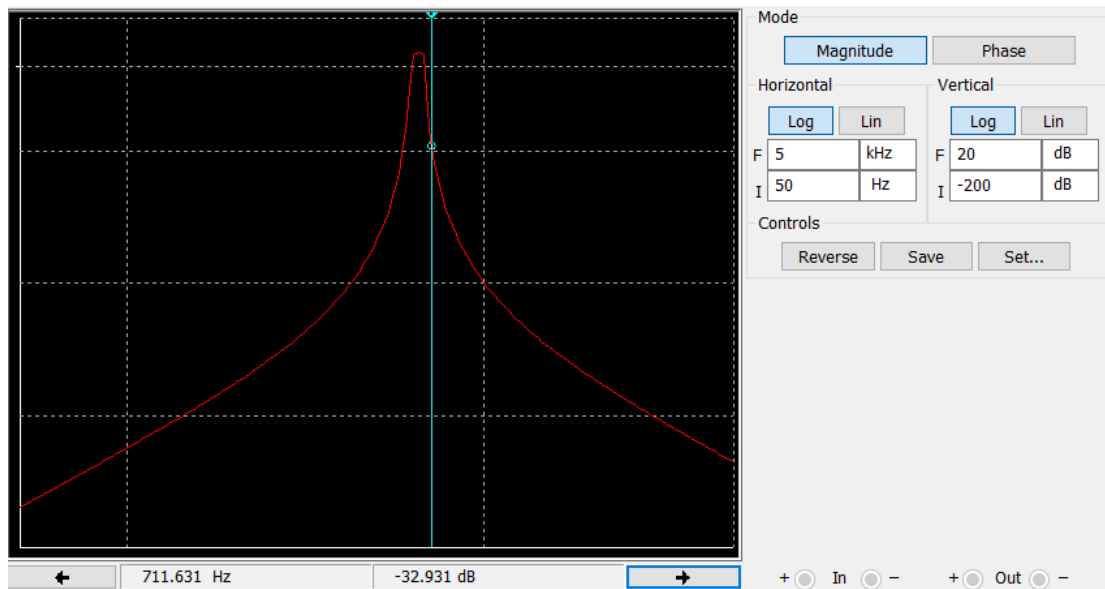


Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει χρησιμοποιούμε τον Bode-Plotter για να προκύψει η απόκριση συχνότητας του φίλτρου-κυκλώματος. Το κύκλωμα και το διάγραμμα που παίρνουμε φαίνονται παρακάτω:



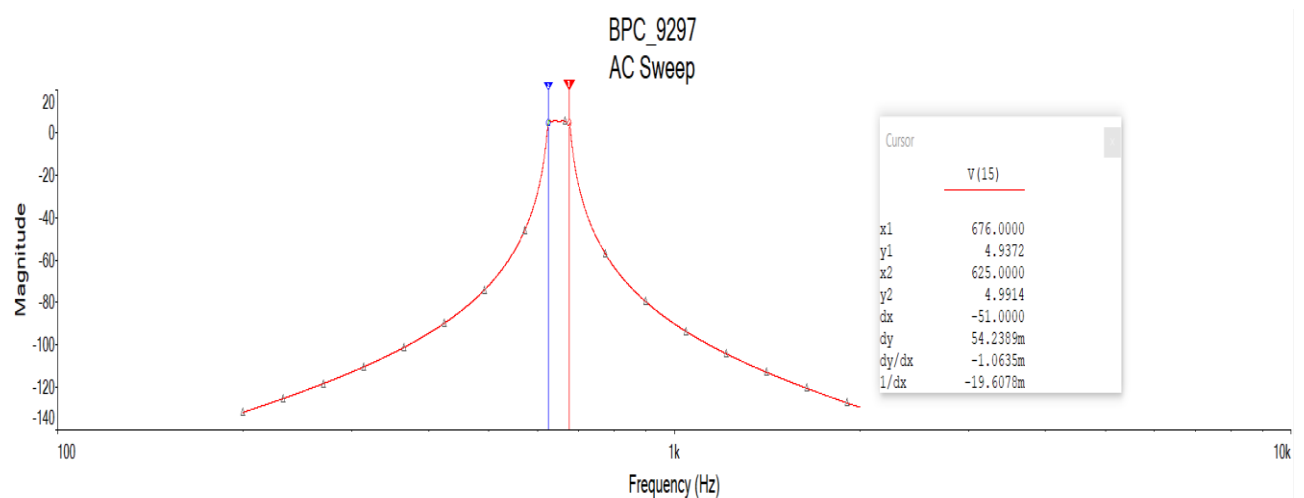
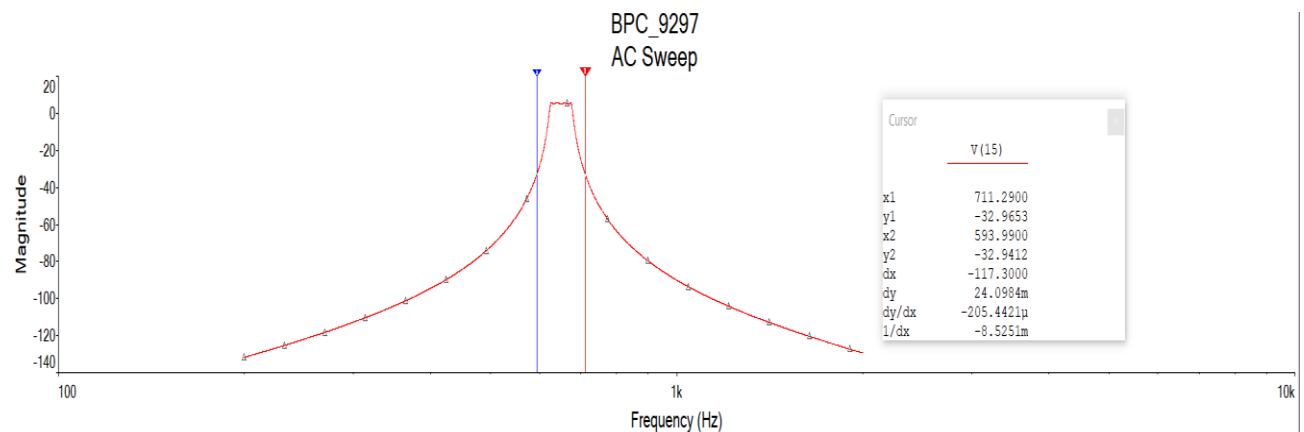


Bode Plotter-XBP1



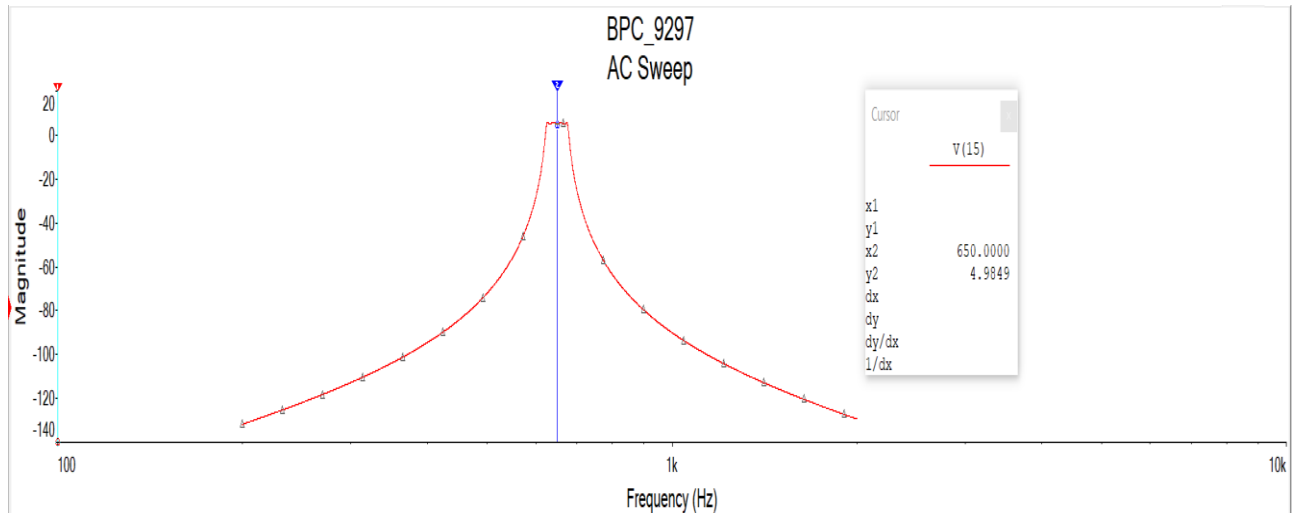
Η γενική μορφή του διαγράμματος παρουσιάζει ένα ζωνοδιαβατό φίλτρο. Μάλιστα μπορούμε να διακρίνουμε ότι πρόκειται όντως για φίλτρο Chebyshev, καθώς η απόκριση στη ζώνη διόδου δεν είναι ομαλή, αλλά έχει διακυμάνσεις. Επίσης, διαπιστώνουμε ότι πληρείται και η απαίτηση για κέρδος **5dB** στη ζώνη διόδου.

Ωστόσο, για να έχουμε τη δυνατότητα ανάγνωσης τιμών θα χρησιμοποιήσουμε την AC Analysis που παρέχει το Multisim. Στα σχήματα αυτά που ακολουθούν σημειώνονται οι κρίσιμες συχνότητες που καθορίζουν τη ζώνη διόδου και αποκοπής καθώς και η κεντρική συχνότητα του φίλτρου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν το φίλτρο πληροί τις προδιαγραφές που τέθηκαν κατά τη σχεδίαση.



Παρατηρώ δηλαδή ότι στις συχνότητες  $593.99 \text{ Hz}$  και  $711.29 \text{ Hz}$  έχω τιμές  $5 - (-32.94) = 37.94$  και  $5 - (32.96) = 37.96$  αντίστοιχα. Συνεπώς η απόκλιση σε σχέση με τα αποτελέσματα του MATLAB είναι ελάχιστη, και της τάξης του  $0.01 \text{ dB}$  και στις δύο περιπτώσεις.

Όσον αφορά τις συχνότητες  $625\text{ Hz}$  και  $676\text{ Hz}$  έχω  $5 - (4.99) = 0.01$  και  $5 - (4.937) = 0.063$  αντίστοιχα. Παρατηρώ δηλαδή πως και σε αυτήν την περίπτωση οι αποκλίσεις είναι εξαιρετικά μικρές.



Όπως φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω διαγράμματα, η απόκριση συχνότητας του φίλτρου είναι η επιθυμητή και μοιάζει πάρα πολύ με αυτήν που εξήχθη από τη θεωρητική ανάλυση με τη βοήθεια του MATLAB.

### Απόκριση σε περιοδική κυματομορφή:

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

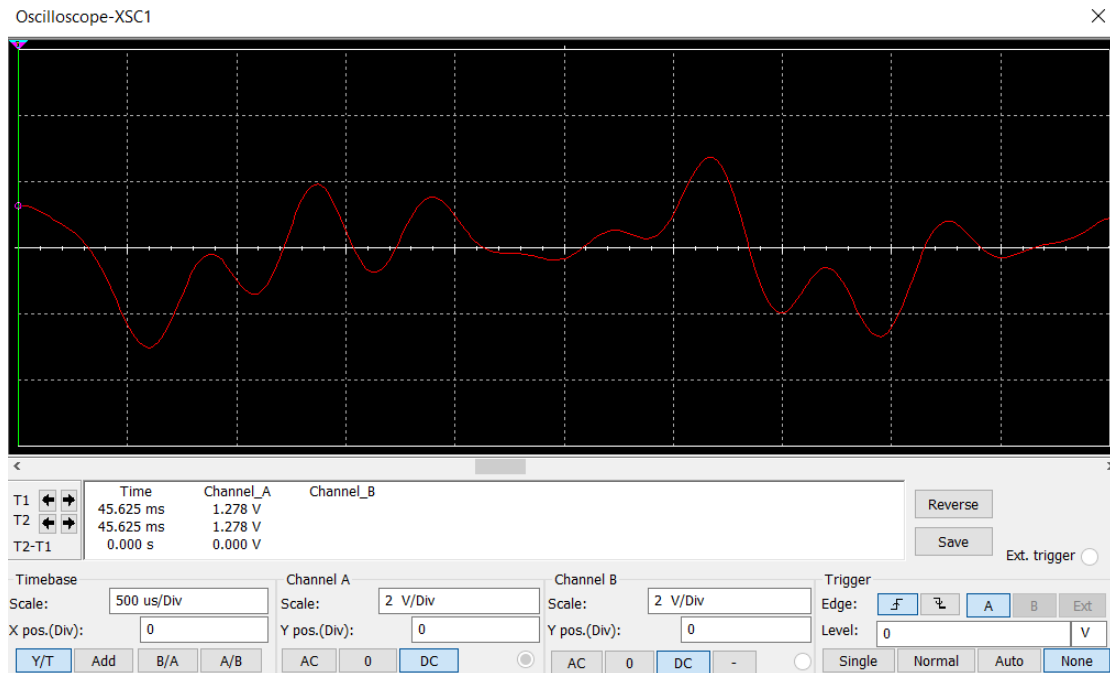
$$f(t) = \cos\left(\left(\omega_0 - \left(\frac{\omega_0 - \omega_1}{3}\right)\right)t\right) + 0.6 \cos\left(\left(\omega_0 + \left(\frac{\omega_0 + \omega_1}{4}\right)\right)t\right) + 0.7 \cos(0.5\omega_3 t) + 0.8 \cos(2.4\omega_4 t) + 0.6 \cos(3\omega_4 t)$$

Οι συχνότητες που θα παρουσιάσει το σήμα αυτό είναι:

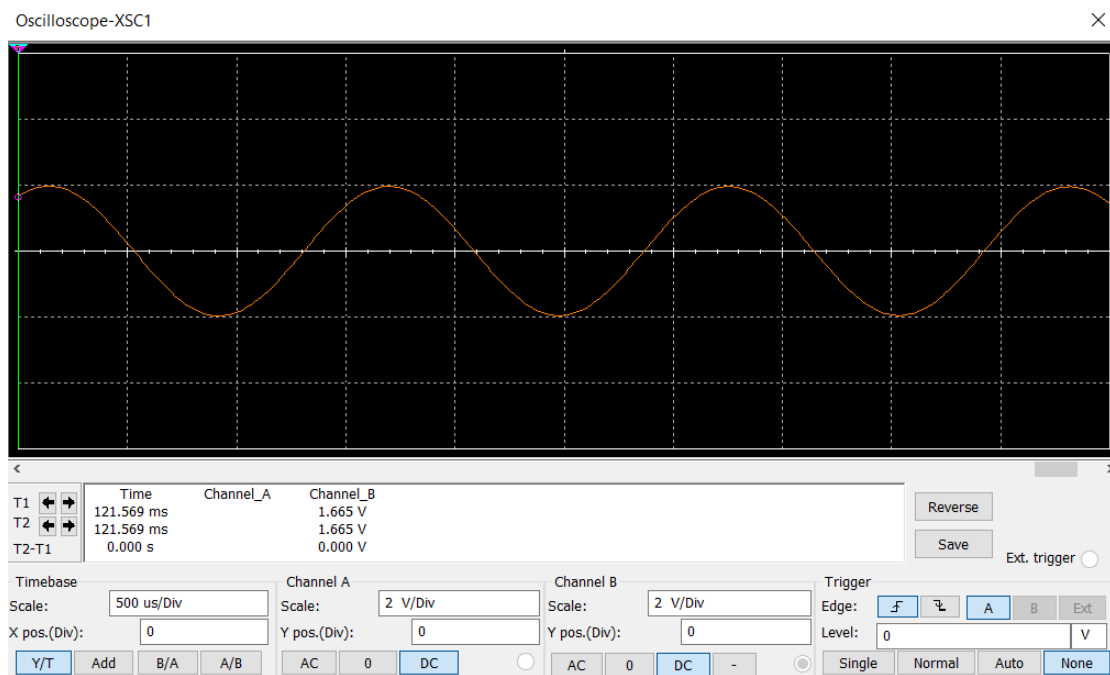
$$f1 = 641.6667\text{ Hz}, f2 = 968.75\text{ Hz}, f3 = 296.9953\text{ Hz}, f4 = 1.7071\text{ kHz}, f5 = 2.1339\text{ kHz}$$

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα.

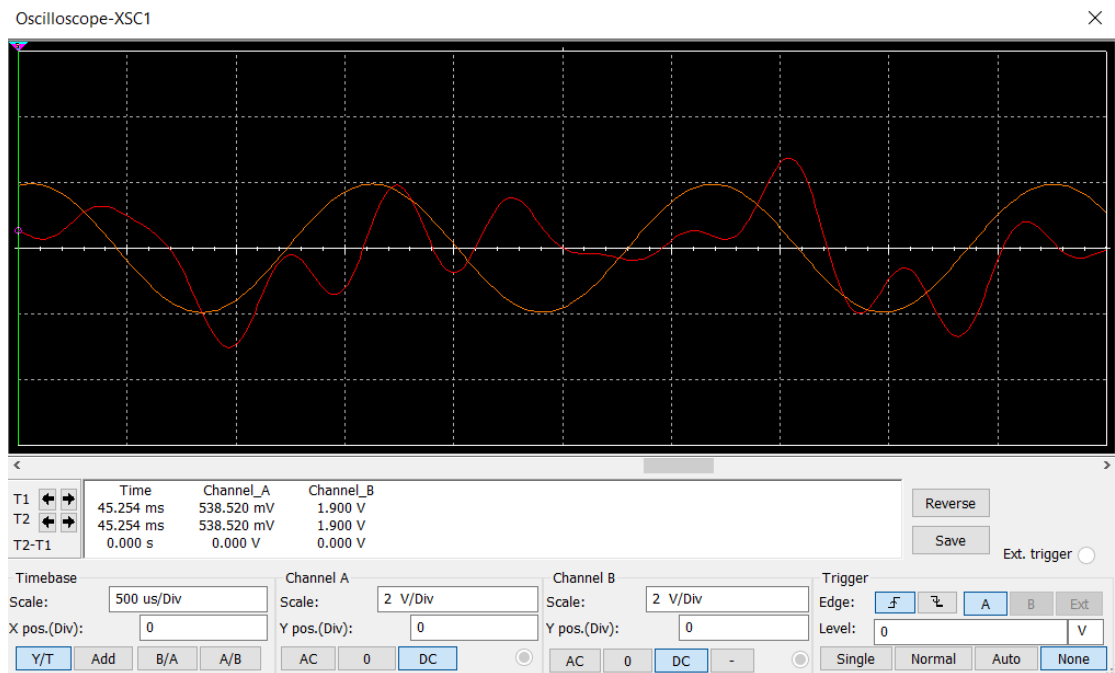
Αρχικά χρησιμοποιούμε το εργαλείο Oscilloscope , ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της μορφής του σήματος εισόδου:



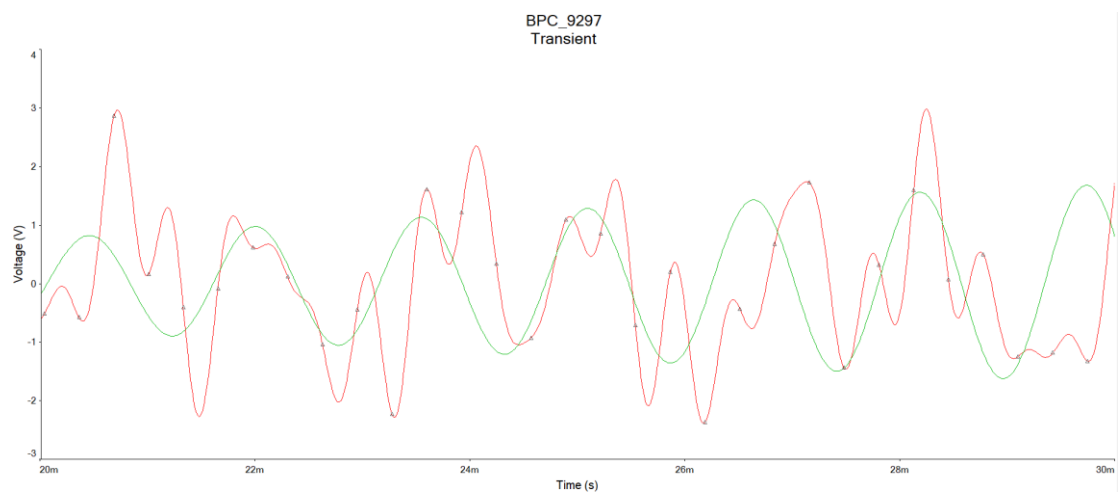
Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία, ώστε να έχουμε μια γενική εικόνα της μορφής του σήματος εξόδου:



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.

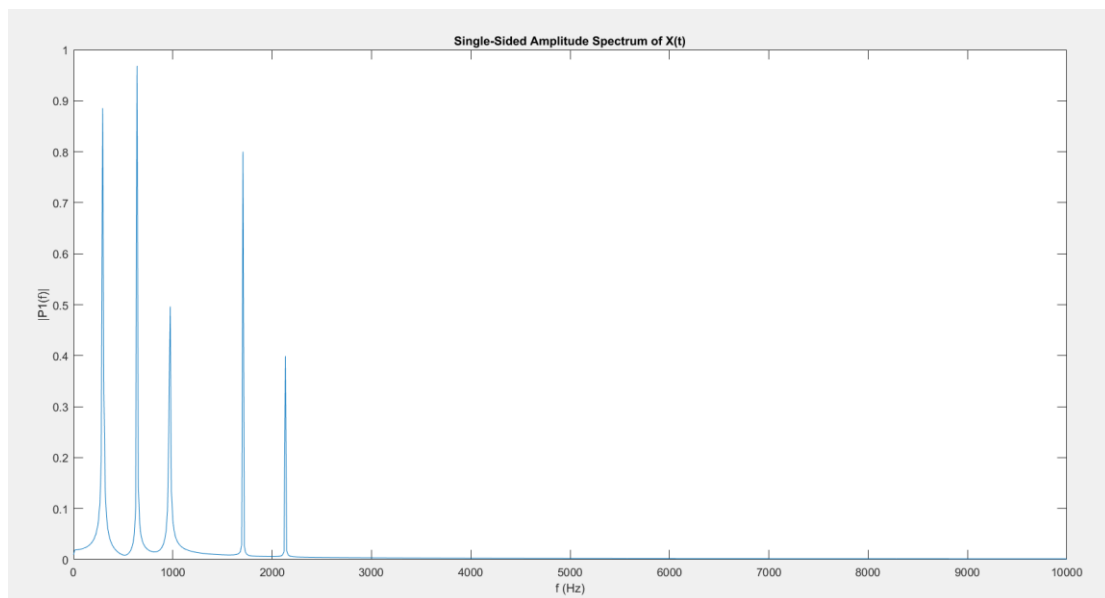
Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου. Σε κάθε σχήμα φαίνονται οι επιλογές που κάναμε στον παλμογράφο για να προκύψουν οι αντίστοιχες παραστάσεις (για παράδειγμα: V/Div , sec/Div κτλ.).

Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι το πλάτος του σήματος εξόδου είναι εξασθενημένο σε σχέση με το σήμα εισόδου, κάτι που προφανώς οφείλεται στη ρύθμιση κέρδους που κάναμε. Επίσης παρατηρούμε ότι στην έξοδο αμβλύνονται οι απότομες μεταβολές που υπάρχουν στο σήμα εισόδου, το οποίο συντίθεται από ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτό επιβεβαιώνει τη ζωνοπερατή λειτουργία του φίλτρου.

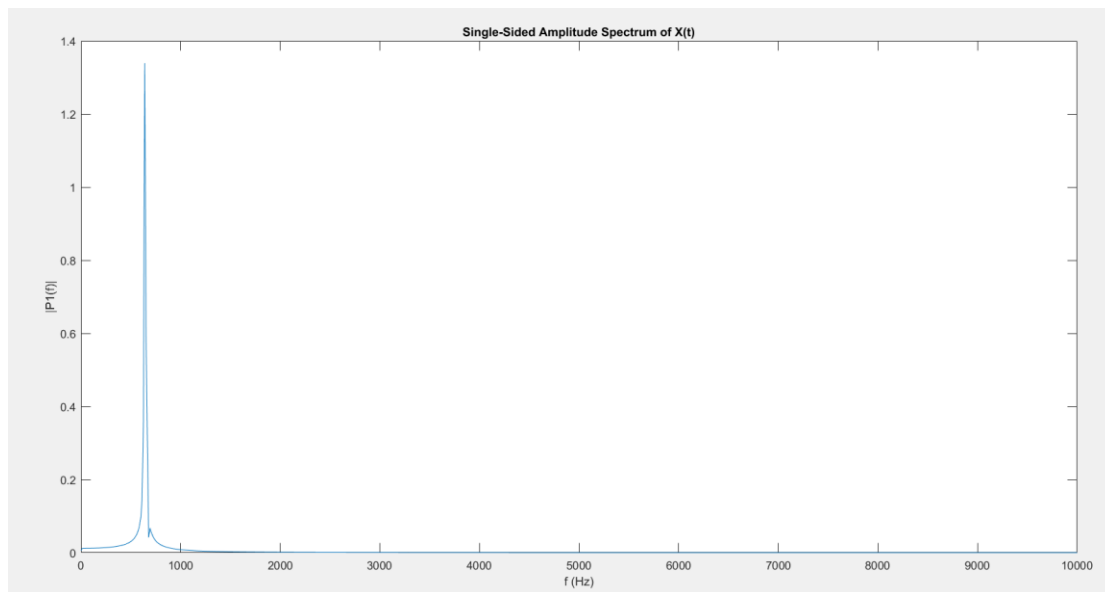
## Ανάλυση Fourier

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.

Φάσμα σήματος εισόδου:

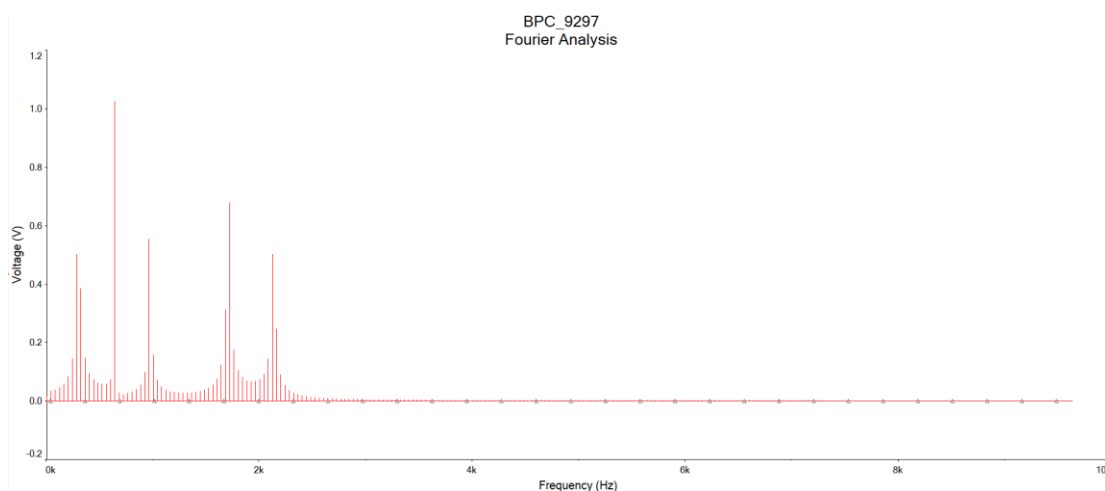


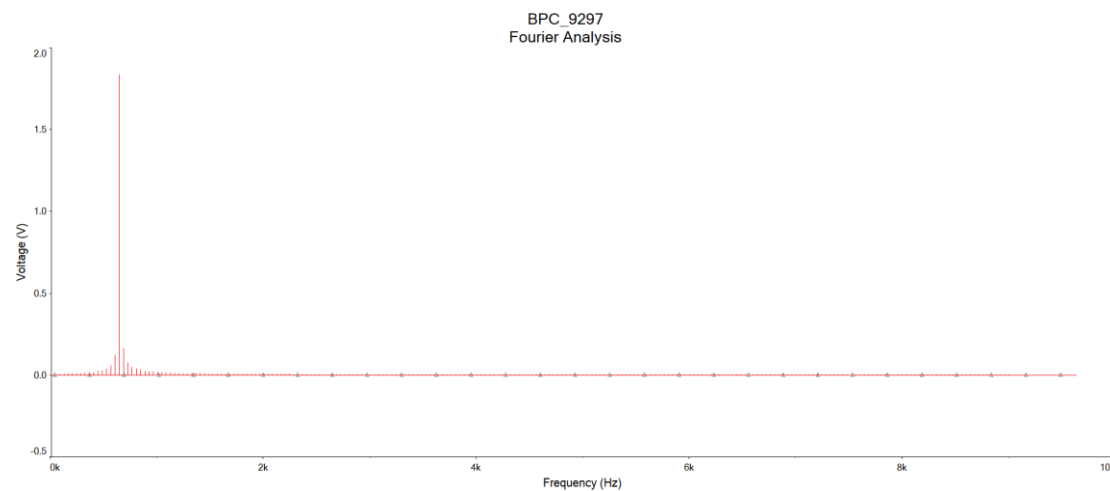
Φάσμα σήματος εξόδου:



Στο φάσμα εξόδου παρατηρούμε τη ζωνοπερατή συμπεριφορά του φίλτρου. Όπως φαίνεται στην είσοδο έχουμε 5 ώσεις. Αντίθετα στην έξοδο, υπάρχει μόνο η συχνότητα  $635\text{ Hz}$ , που είναι και η μόνη στη ζώνη διέλευσης.

Παρακάτω επιβεβαιώνουμε τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν με τη βοήθεια του matlab, στο πρόγραμμα σχεδίασης κυκλωμάτων του multisim. Χρησιμοποιώ τώρα **Fourier Analysis του Multisim**, μια για την είσοδο και μια για την έξοδο του φίλτρου.





Από τα παραπάνω φάσματα επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του φίλτρου. Στο φάσμα εισόδου βλέπουμε συνιστώσες που αντιστοιχούν στο σύνθετο σήμα εισόδου του φίλτρου.

Όσον αφορά την έξοδο μπορούμε να συμπεράνουμε πολύ πιο εύκολα ότι η μόνη αρμονική που εμφανίζεται είναι αυτή των **635 Hz**. Οι υπόλοιπες αρμονικές γύρω από αυτήν εμφανίζονται πολύ εξασθενημένες στην έξοδο, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Συνεπάγεται, λοιπόν, ότι το φίλτρο λειτουργεί σωστά.