

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

*ΣΥΝΘΕΣΗ  
ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ  
ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ  
ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ*

*7ο ΕΞΑΜΗΝΟ*

**ΕΡΓΑΣΙΑ #3**

*ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.*

**Όνομα : ΘΑΝΑΣΗΣ ΧΑΡΙΣΟΥΔΗΣ**  
**Α.Ε.Μ. : 9026**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 28 Ιουλίου 2019

## Περιεχόμενα

A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου.....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	4
• Ρύθμιση Κέρδους.....	5
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	7
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM....	11

# ΖΩΝΟΦΡΑΚΤΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ CHEBYSEV

“Να σχεδιασθεί ένα ζωνοφρακτικό φίλτρο Chebysev το οποίο να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές συχνότητας και απόσβεσης:  
 $f_1 = 1.80\text{KHz}$ ,  $f_2 = 3.472\text{KHz}$ ,  $f_3 = 2.133\text{KHz}$ ,  $f_4 = 2.93\text{KHz}$   $a_{\max} = 0.567 \text{ dB}$ ,  $a_{\min} = 28.11 \text{ dB}$ ”

## A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

Βάσει του  $AEM = 9026$  προέκυψαν οι παραπάνω προδιαγραφές σχεδίασης. Επίσης:

$$\omega_1 = 2\pi * f_1 = 11309.73 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi * f_2 = 21816.62 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = 2\pi * f_3 = 13404.28 \text{ rad/s}$$

$$\omega_4 = 2\pi * f_4 = 18407.56 \text{ rad/s}$$

και επίσης

$$bw = \omega_2 - \omega_1 = 10506.88 \text{ rad/s}$$

$$\omega_0 = \text{sqrt}( \omega_1 * \omega_2 ) = 15707.96 \text{ rad/s}$$

$$q_c = \omega_0 / bw = 1.495$$

ενώ επειδή  $AEM(4) = 6$ , το κέρδος στις ζώνες διεύλεσης ( π.χ. στις χαμηλές συχνότητες όπως το DC ) πρέπει να είναι **10dB**.

## • Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

### Υπολογισμός παραμέτρων πρωτότυπου LPF

Στους υπολογισμούς στα ΒΕ φίλτρα, θεωρείται ότι  $\Omega_p = 1$ . Για να γίνει αυτό, θέτουμε:

$$\Omega_p = 1$$

$$\Omega_s = bw / (\omega_4 - \omega_3) = 2.1$$

Αρχικά θα υπολογίσουμε την τάξη  $n$  του φίλτρου και τη συχνότητα ημίσειας ισχύος προσεγγίζοντας το πρωτότυπο κατωδιαβατό φίλτρο κατά Chebysev:

$$n = \cosh^{-1}(\sqrt{(10^{(0.1 * a_{\min})} - 1) / (10^{(0.1 * a_{\max})} - 1)}) / \cosh^{-1}(\Omega_s) = 3.579 \Rightarrow \mathbf{n = 4}$$

Πρίν υπολογίσουμε την συχνότητα ημίσειας ισχύος, υπολογίζουμε την παράμετρο  $\epsilon$  για Chebysev φίλτρο, ως εξής:

$$\epsilon = \sqrt{10^{(0.1 * a_{\max})} - 1} = 0.373$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την κανονικοποιημένη ( ως προς τη συχνότητα  $\Omega_p$  ) συχνότητα ημίσειας ισχύος από τον τύπο

$$\Omega_{hp} = 1 / \cosh((1 / n) * \cosh^{-1}(1 / \epsilon)) = 1.085$$

όπου φαίνεται ότι  $\Omega_{hp} > 1$  ( όπως πρέπει για Chebysev φίλτρο ).

Για την εύρεση των πόλων της ΣΜ Chebysev LPF ακολουθούμε τα εξής βήματα:

- βρίσκουμε τις γωνίες Butterworth
- εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο του Guillemin για να πάρουμε τους πόλους της ΣΜ Chebysev LPF

Για  $n = 4$ , οι γωνίες Butterworth είναι:

$$\psi_{1,2} = \pm 22.5^\circ$$

$$\psi_{3,4} = \pm 67.5^\circ$$

Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο Guillemin με παράμετρο  $\alpha$ :

$$\alpha = (1 / n) * \sinh^{-1}(1 / \epsilon) = 0.428$$

σύμφωνα με τον οποίο οι πόλοι της ΣΜ Chebysev θα είναι

$$\sigma_k = \sinh \alpha * \cos \psi_k$$

$$\pm \omega_k = \cosh \alpha * \sin \psi_k$$

και άρα παίρνουμε τους πόλους ΣΜ Chebysev LPF:

k	$Q_k$	$\Omega_k$	$p_k$
1,2	0.716	0.584	$-0.407 \pm j0.418$
3,4	3.033	1.024	$-0.567 \pm j1.651$

### Μετασχηματισμός Συχνότητας LP → BE

Ο μετασχηματισμός συχνότητας από LP σε BE αποτελείται από δύο μετασχηματισμούς σε σειρά:

- μετασχηματισμός συχνότητας LP → HP ( αντιστροφή )
- μετασχηματισμός συχνότητας HP → BE ( αλγ. Geffe )

( ο συνολικός μετασχηματισμός φαίνεται καλύτερα στο σχ. 13.14, στο κεφ. 13 των σημειώσεων του κ. Θεοχάρη )

### Μετασχηματισμός Συχνότητας LP → HP

Ακολουθώντας, εφαρμόζουμε μετασχηματισμό συχνότητας LP → HP ώστε να πάρουμε τους πόλους της ΣΜ Chebysev HPF. Αυτό το πετυχαίνουμε απλώς αντιστρέφοντας τους παραπάνω πόλους:

k	$Q_k$	$\Omega_k$	$p_k$
1,2	0.716	1.712	$-1.195 \pm j1.223$
3,4	3.033	0.977	$-0.161 \pm j0.963$

### Μετασχηματισμός Συχνότητας HP → BE

Ακολουθώντας, εφαρμόζουμε μετασχηματισμό συχνότητας HP → BE ώστε να πάρουμε τους πόλους ζωνοφρακτικής ΣΜ Chebysev. Για να το πετύχουμε αυτό, ακολουθούμε τον αλγόριθμο του Geffe για τον μετασχηματισμό πόλων. Σύμφωνα με αυτόν για κάθε ζεύγος μιγαδικών πόλων της ΣΜ του πρωτότυπου ( πλέον του HPF ), θα προκύψουν 2 ζεύγη μιγαδικών πόλων στη ζωνοφρακτική ΣΜ ( + 2 μηδενικά @ origin ). Αντίστοιχα για κάθε ζεύγος φανταστικών μηδενικών, θα προκύψουν 2 ζεύγη φανταστικών μηδενικών στη ζωνοφρακτική ΣΜ.

### **Μετασχηματισμός Ζεύγους: $p_{1,2} = -1.195 \pm j1.223$**

$$\Sigma = 1.195 \quad \Omega = 1.223 \quad C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 2.933$$

$$D = 2*\Sigma/q_c = 1.599 \quad E = 4 + C/q_c^2 = 5.312$$

$$G = \text{sqrt}(E^2 - 4D^2) = 4.243 \quad Q = (1/D)*\text{sqrt}((E+G)/2) = 1.367$$

$$k = \Sigma*Q/q_c = 1.093 \quad W = k + \text{sqrt}(k^2 - 1) = 1.534$$

$$f_{\theta 1} = f_{\theta} * W = 3833.95 \text{ Hz} \quad \omega_{\theta 1} = 24089.41 \text{ rad/s}$$

$$f_{\theta 2} = f_{\theta} / W = 1630.17 \text{ Hz} \quad \omega_{\theta 2} = 10242.68 \text{ rad/s}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν 2 ζεύγη μιγαδικών πόλων  $\omega_{\theta 1}$  και  $\omega_{\theta 2}$  και **2 μηδενικά στη συχνότητα  $\omega_{\theta}$** . Οι πόλοι έχουν μεταξύ τους το ίδιο  $Q = 1.367$ .

**Μετασχηματισμός ζεύγους:  $p_{3,4} = -0.161 \pm j0.963$**

$$\Sigma = 0.161 \quad \Omega = 0.963 \quad C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 0.954$$

$$D = 2*\Sigma/q_c = 0.215 \quad E = 4 + C/q_c^2 = 4.427$$

$$G = \text{sqrt}(E^2 - 4D^2) = 4.406 \quad Q = (1/D)*\text{sqrt}((E+G)/2) = 9.754$$

$$k = \Sigma*Q/q_c = 1.051 \quad W = k + \text{sqrt}(k^2 - 1) = 1.373$$

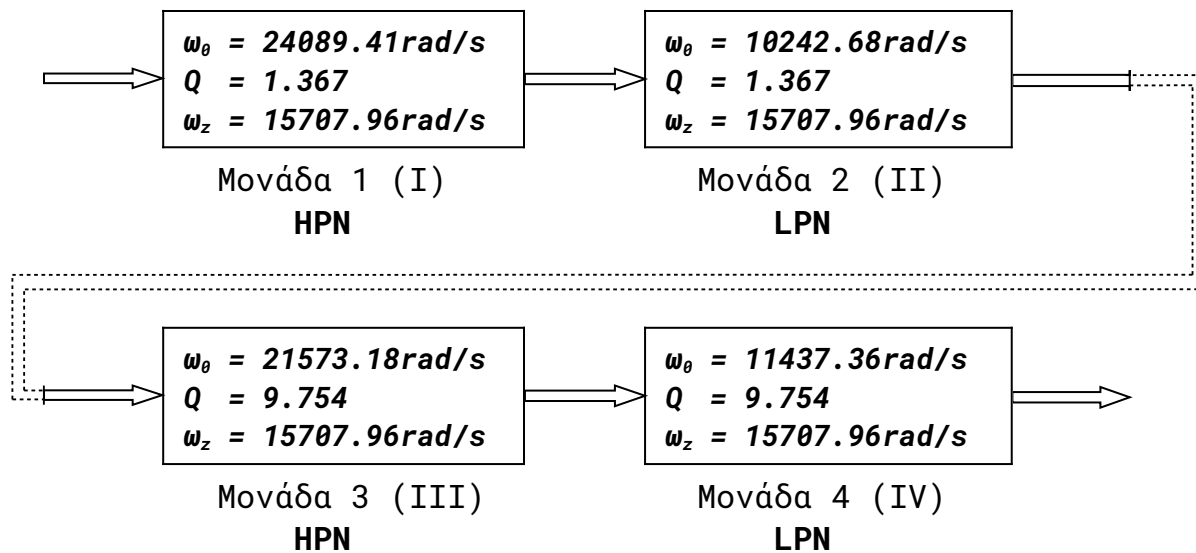
$$f_{\theta 3} = f_{\theta} * W = 3433.48 \text{ Hz} \quad \omega_{\theta 3} = 21573.18 \text{ rad/s}$$

$$f_{\theta 4} = f_{\theta} / W = 1820.31 \text{ Hz} \quad \omega_{\theta 4} = 11437.36 \text{ rad/s}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν 2 ζεύγη μιγαδικών πόλων  $\omega_{\theta 3}$  και  $\omega_{\theta 4}$  και **2 μηδενικά στη συχνότητα  $\omega_{\theta}$** . Οι πόλοι έχουν μεταξύ τους το ίδιο  $Q = 9.754$ .

Κάθε ζεύγος μιγαδικών πόλων σε συνδυασμό με ένα μηδενικό στο  $\omega_{\theta}$  δημιουργεί μία ζωνοφρακτική ( notch ) μονάδα.

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



### • Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

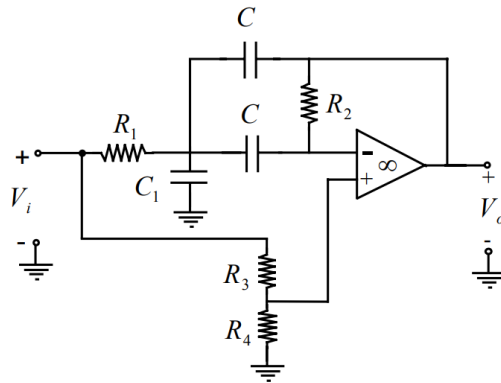
Για την υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς θα γίνει χρήση των ζωνοφρακτικών φίλτρων του Fried ( σχήματα 7.21 & 7.23 ) (καθώς  $\alpha_3 = 2$ ).

Θα θεωρήσουμε προσωρινά  $\Omega_\theta = 1 \text{ rad/s}$  για κάθε μονάδα, θα υλοποιήσουμε τις κανονικοποιημένες μονάδες και στην συνέχεια θα κάνουμε κλιμακοποίηση στην συχνότητα με  $k_f = \omega_\theta$ .

### ΜΟΝΑΔΑ ( I )

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα Fried HPN, ένα διτετράγωνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 1 παρακάτω:





Σχήμα 1: Fried HPN

Στη σελίδα 7-34 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης.

Αρχικά επιλέγεται ένας αριθμός  $k_1$  τ.ω.:

$$k_1 = (\omega_0 / \omega_z)^2 - 1 = \mathbf{1.352}$$

Ακολουθως, υπολογίζουμε τα εξής:

$$k_2 = 0.862$$

$$k = 2.028$$

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 20.999 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 6.265 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 0.295 \text{ F}$$

$$C_2 = 0.218 \text{ F}$$

$$C_3 = 0.218 \text{ F}$$

### Κλιμακοποίηση

Υπάρχει η απαίτηση ένας πυκνωτής να είναι 1.0μF, έστω ο C.  
Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 24089.41$$

$$k_m = C / ( C_n * k_f ) = 9.059$$

Τα πραγματικά στοιχεία επομένως του κυκλώματος θα είναι (  $R_i = R_{in} * k_m$ ,  $C_i = C_{in} / k_m * k_f$  ):

$$R_1 = 9.059 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 190.23 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 9.059 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 56.75 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 1.352 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_2 = 1.0 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_2 = 1.0 \text{ }\mu\text{F}$$

Η ΣΜ της μονάδας που προκύπτει είναι:

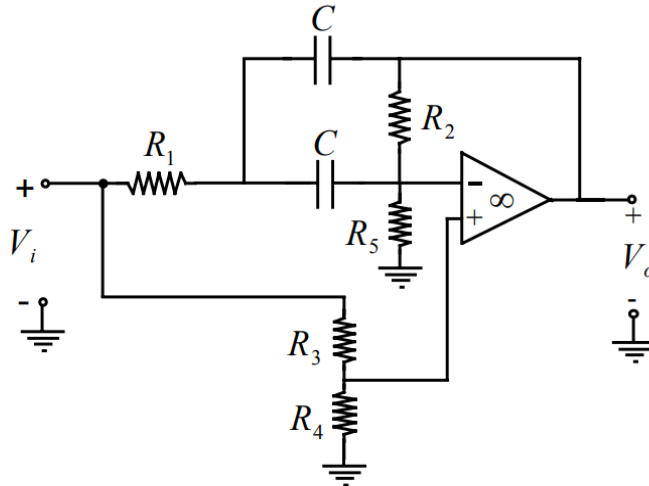
$$T_2(s) = \frac{2.028s^2 - 1.845e-12s + 5.004e08}{s^2 + 1.762e04s + 5.803e08}$$

με το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες ( DC ) να είναι

$$k_{LF} = 0.862 (= -1.29\text{dB})$$

### ΜΟΝΑΔΑ ( II )

Η δεύτερη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried LPN, ένα διτετράγωνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2: Fried LPN

Στη σελίδα 7-36 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης.

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 7.476 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.629 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 5.53 \text{ Ohm}$$

$$C = 0.366 \text{ F}$$

### Κλιμακοποίηση

Υπάρχει η απαίτηση ένας πυκνωτής να είναι  $1.0\mu\text{F}$ , έστω ο  $C$ .

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 10242.68$$

$$k_m = C_1 / ( C_{1n} * k_f ) = 35.706$$

Τα πραγματικά στοιχεία επομένως του κυκλώματος θα είναι (  $R_i = R_{in} * k_m$ ,  $C_i = C_{in} / k_m * k_f$  ):

$$R_1 = 35.71 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 266.95 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 22.46 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 35.71 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 197.47 \text{ Ohm}$$

$$C = 1.0 \text{ } \mu\text{F}$$

Η ΣΜ της μονάδας που προκύπτει είναι:

$$T_1(s) = \frac{0.6138s^2 + 1.117e-12s + 1.515e08}{s^2 + 7492s + 1.049e08}$$

με το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες ( DC ) να είναι

$$k_{LF} = 1.44 (= 3.19\text{dB})$$

### ΜΟΝΑΔΑ ( III )

Η τρίτη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried HPN, ένα διτετραγώνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 1 παραπάνω.

Στη σελίδα 7-34 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης.

Αρχικά επιλέγεται ένας αριθμός  $k_1$  τ.ω.:

$$k_1 = ( \omega_0 / \omega_z )^2 - 1 = 0.886$$

Ακολουθως, υπολογίζουμε τα εξής:

$$k_2 = 0.996$$

$$k = 1.879$$

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 792.59 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 274.62 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 0.018 \text{ F}$$

$$C_2 = 0.035 \text{ F}$$

$$C_3 = 0.035 \text{ F}$$

### **Κλιμακοποίηση**

Υπάρχει η απαίτηση ένας πυκνωτής να είναι 1.0μF, έστω ο C.

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 21573.18$$

$$k_m = C / ( C_n * k_f ) = 1.646$$

Τα πραγματικά στοιχεία επομένως του κυκλώματος θα είναι (  $R_i = R_{in} * k_m$ ,  $C_i = C_{in} / k_m * k_f$  ):

$$R_1 = 1.65 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 1305 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 1.65 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 452.15 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 886.20 \text{ nF}$$

$$C_2 = 1.0 \text{ μF}$$

$$C_2 = 1.0 \text{ μF}$$

Η ΣΜ της μονάδας που προκύπτει είναι:

$$T_4(s) = \frac{1.879s^2 - 2.607e-11s + 4.637e08}{s^2 + 2212s + 4.654e08}$$

με το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες ( DC ) να είναι

$$k_{LF} = 0.996 \text{ (} = -0.03\text{dB)}$$

#### ΜΟΝΑΔΑ ( IV )

Η τέταρτη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried LPN, ένα διτετραγώνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 2 παραπάνω.

Στη σελίδα 7-36 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης.

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 380.59 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.01 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 429.46 \text{ Ohm}$$

$$C = 0.051 \text{ F}$$

#### Κλιμακοποίηση

Υπάρχει η απαίτηση ένας πυκνωτής να είναι 1.0μF, έστω ο C.

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 11437.36$$

$$k_m = C_1 / ( C_{1n} * k_f ) = 4.48$$

Τα πραγματικά στοιχεία επομένως του κυκλώματος θα είναι (  $R_i = R_{in} * k_m$ ,  $C_i = C_{in} / k_m * k_f$  ):

$$R_1 = 4.482 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 1705.70 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.044 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 4.482 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 1924.73 \text{ Ohm}$$

$$C = 1.0 \text{ }\mu\text{F}$$

Η ΣΜ της μονάδας που προκύπτει είναι:

$$T_3(s) = \frac{0.9902s^2 - 1.644e-11s + 2.443e08}{s^2 + 1173s + 1.308e08}$$

με το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες ( DC ) να είναι

$$k_{LF} = 1.868 (= 5.43\text{dB})$$

#### • Ρύθμιση Κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου στις χαμηλές συχνότητες ( DC ) να είναι  $\text{sqrt}(10) = 3.162$  ( 10dB ). Το τρέχων ( συνολικό ) κέρδος στη συχνότητα  $\omega_0$  ( που είναι μέσα στο bw ) είναι 2.317 ( 7.297 dB ).

Επομένως πρέπει να γίνει ενίσχυση με συντελεστή ενίσχυσης  $A = 3.162/2.317 = 1.370$ .

Επιλέγουμε να γίνει ενίσχυση του σήματος μέσω ενός Τ.Ε. σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία σε σειρά με έναν ίδιο ενισχυτή **με μοναδιαίο κέρδος για επαναφορά της φάσης**. Οι αντιστάσεις του ενισχυτή θα είναι:

$$r_f = 10 \text{ K}\Omega$$

$$r_i = 7.30 \text{ K}\Omega$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοφρακτικού φίλτρου θα είναι:

$$T_{BE}(s) = 1.370 * T_1(s) * T_2(s) * T_3(s) * T_4(s) \Rightarrow$$

$$T_{BE}(s) = \frac{3.16s^8 + 3.12e09s^6 - 0.07s^5 + 1.16e18s^4 - 1.81e7s^3 + 1e23s^2 + 1.9e26s - 1.49e15s + 1.2e34}{s^8 + 2.9e04s^7 + 1.5e9s^6 + 2.48e13s^5 + 6.5e17s^4 + 6.13e21s^3 + 9.14e25s^2 + 4.28e29s + 3.706e33}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τρεις μονάδες αλλά και η απομόνωση μεταξύ 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> μονάδας προκειμένου να μην αλληλοεπιδρούν η μια στην άλλη. Τέλος, φαίνεται και η μη αναστρέφουσα



συνδεσμολογία για την ρύθμιση του κέρδους.

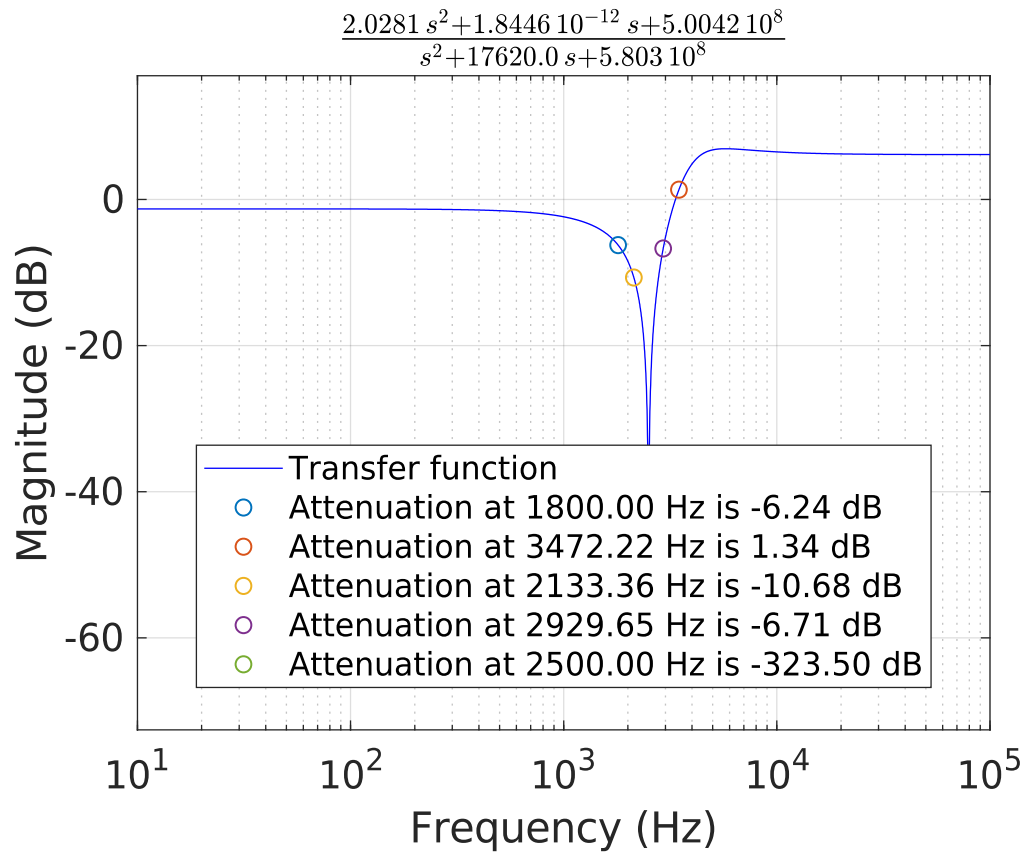


Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό δηλαδή κατωδιαβατό φίλτρο Butterworth με ότι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.

## B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

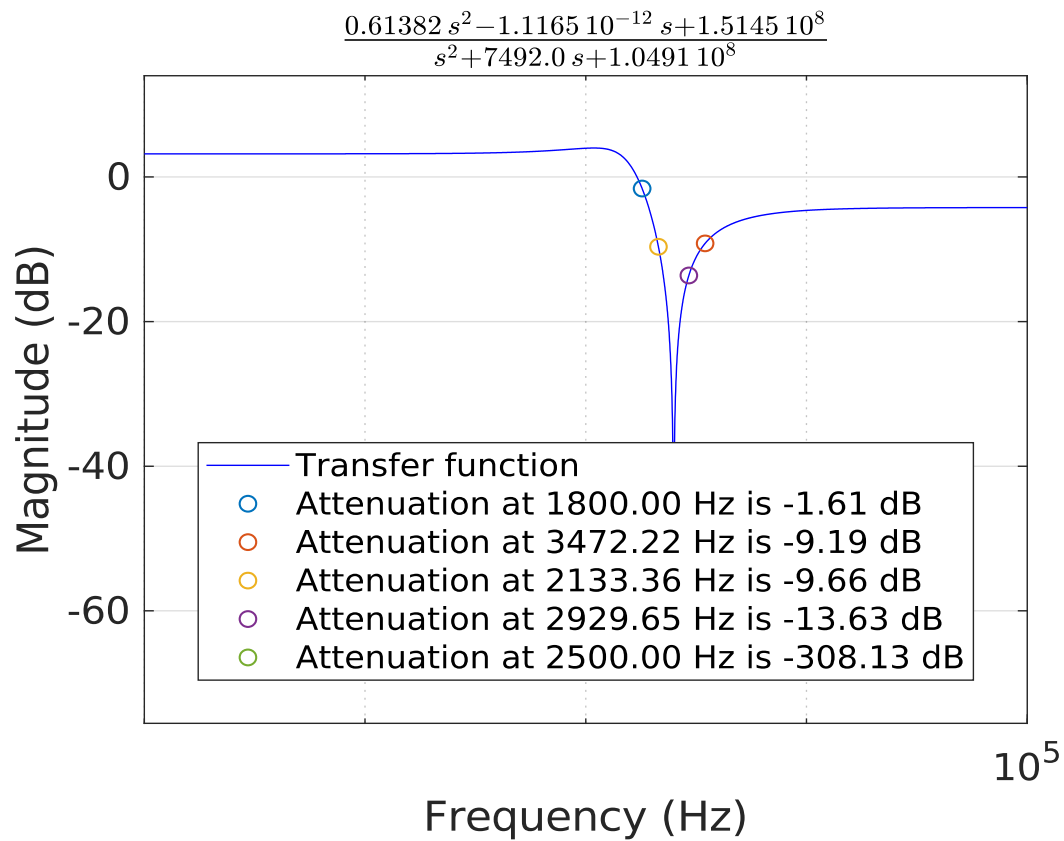
Εισάγουμε στο πρόγραμμα MATLAB τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των 2 biquad LPNs αλλά και την συνολική συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου και παίρνουμε τις αποκρίσεις πλάτους σε dB. Η απόκριση πλάτους σε dB για την πρώτη και την δεύτερη μονάδα φαίνονται στις επόμενες σελίδες. Τα παρακάτω διαγράμματα προέκυψαν στο Matlab χρησιμοποιώντας την παρεχόμενη συνάρτηση `plot_transfer_function.m` με όρισμα κάθε φορά την συνάρτηση μεταφοράς των επί μέρους συστημάτων, καθώς και τις κρίσιμες συχνότητες αυτών.

1<sup>η</sup> Μονάδα : Fried HPN ( I )



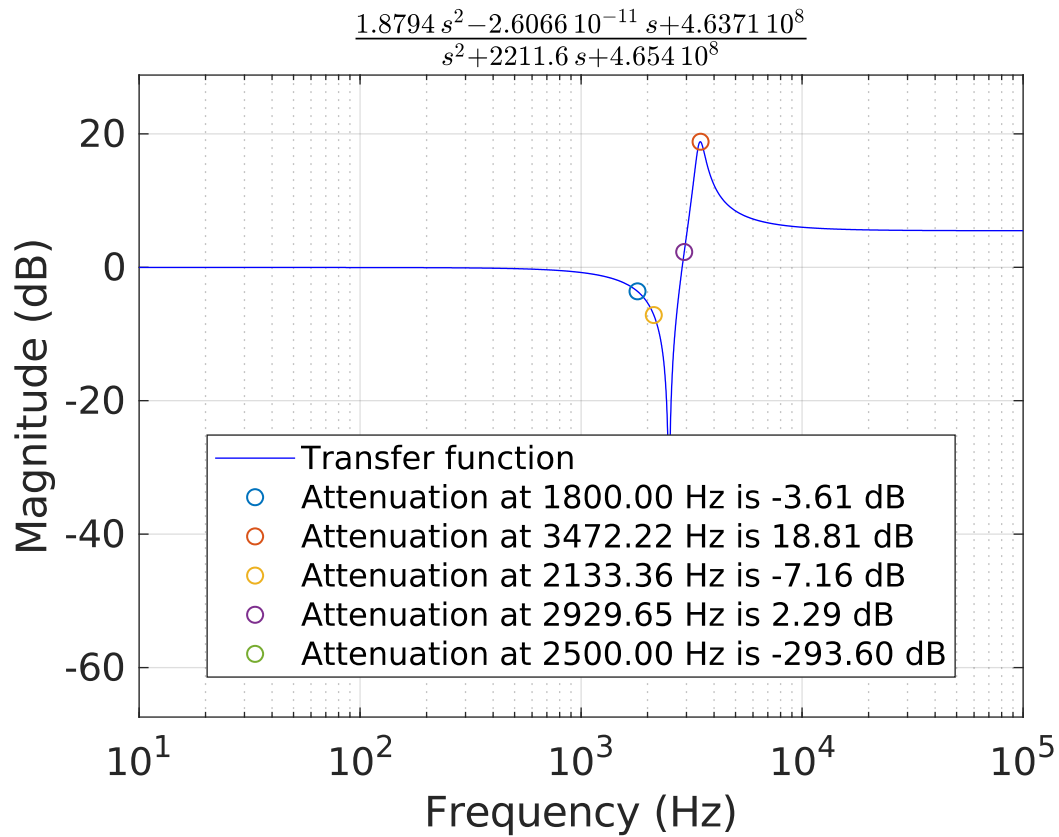
Σχήμα 3: Απόκριση Πλάτους της 1ης Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )

2<sup>η</sup> Μονάδα : Fried LPN ( II )



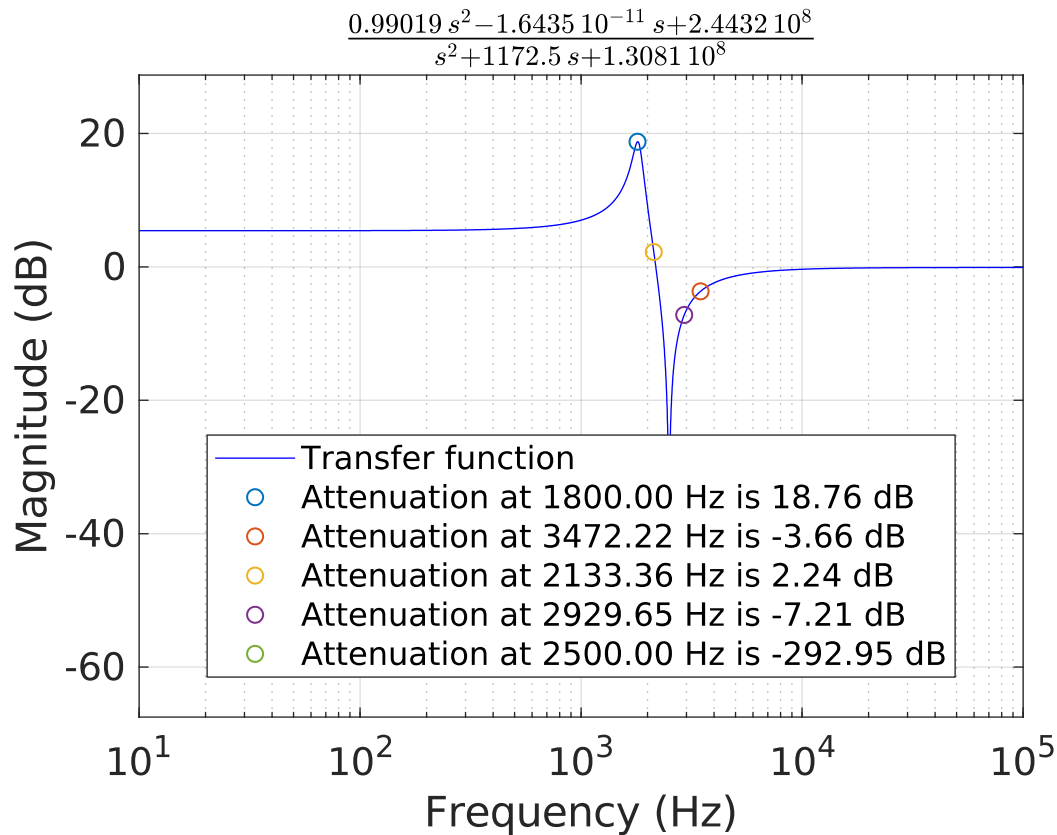
Σχήμα 4: Απόκριση Πλάτους της 2ης Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )

3<sup>η</sup> Μονάδα : Fried HPN ( III )



Σχήμα 5: Απόκριση Πλάτους της 3ης Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )

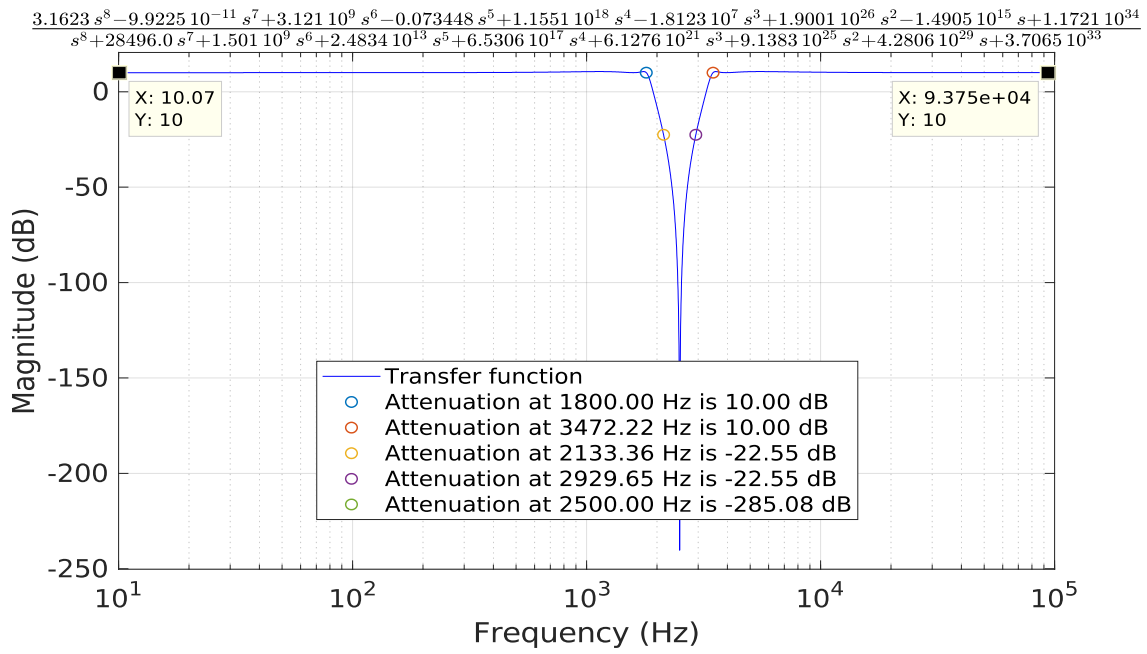
4<sup>η</sup> Μονάδα : Fried LPN ( IV )



Σχήμα 6: Απόκριση Πλάτους της 4ης Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι πράγματι οι μονάδες I και III είναι HPN ενώ οι μονάδες II και IV είναι LPN.

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



Σχήμα 7: Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_0$  ) - το κέρδος στο DC έχει ρυθμιστεί στα 10dB

$$\frac{691 \cdot 10^{-11} s^7 + 2.2865 \cdot 10^9 s^6 - 0.053808 s^5 + 8.4624 \cdot 10^{17} s^4 - 1.3277 \cdot 10^7 s^3 + 1.392 \cdot 10^{26} s^2 - 1.0919 \cdot 10^{29}}{.0 s^7 + 1.501 \cdot 10^9 s^6 + 2.4834 \cdot 10^{13} s^5 + 6.5306 \cdot 10^{17} s^4 + 6.1276 \cdot 10^{21} s^3 + 9.1383 \cdot 10^{25} s^2 + 4.2806 \cdot 10^{29}}$$

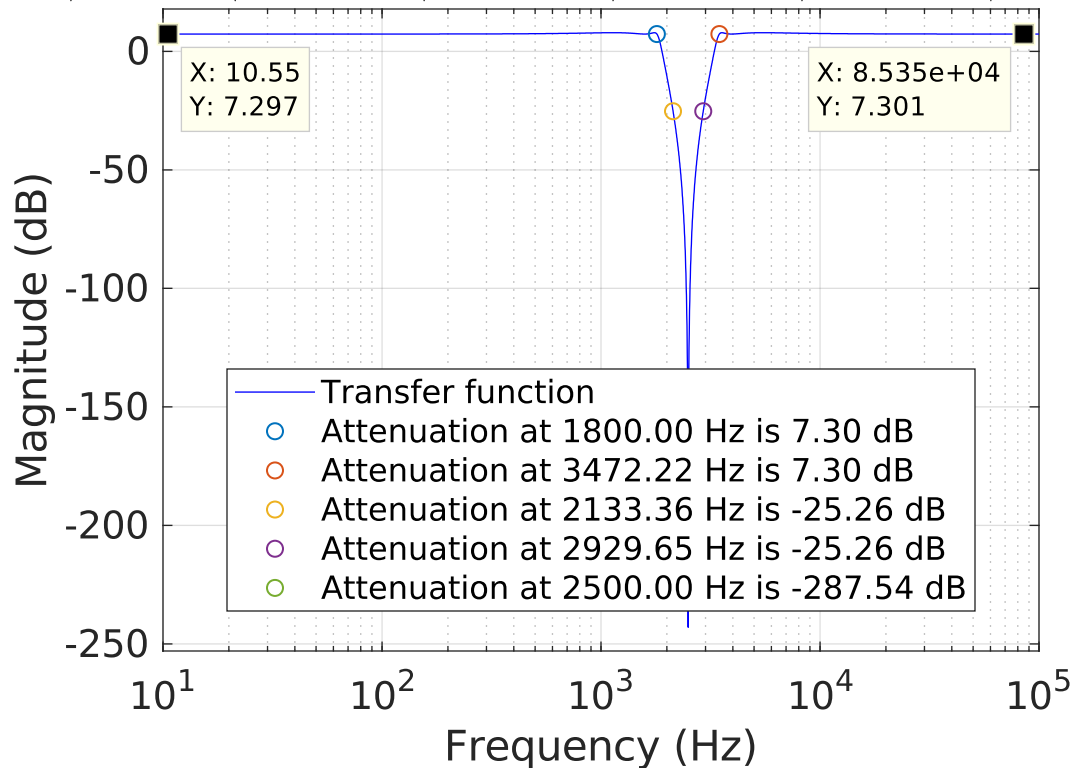
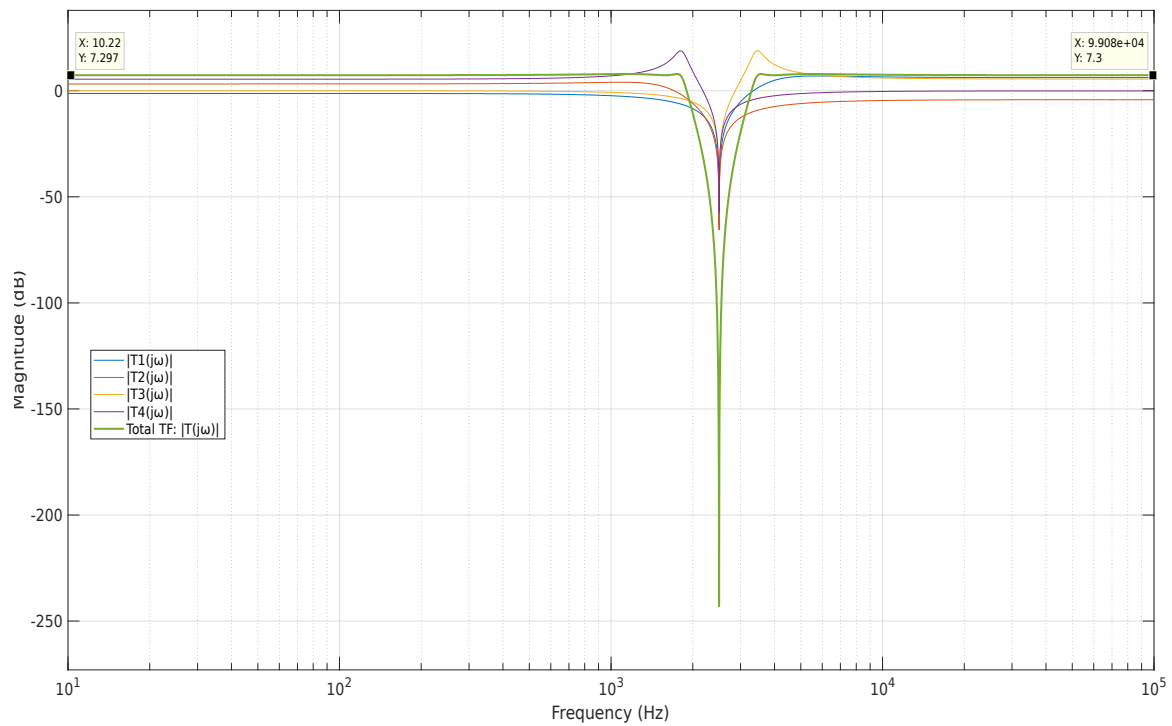


Figure 1: Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - χωρίς ρύθμιση κέρδους

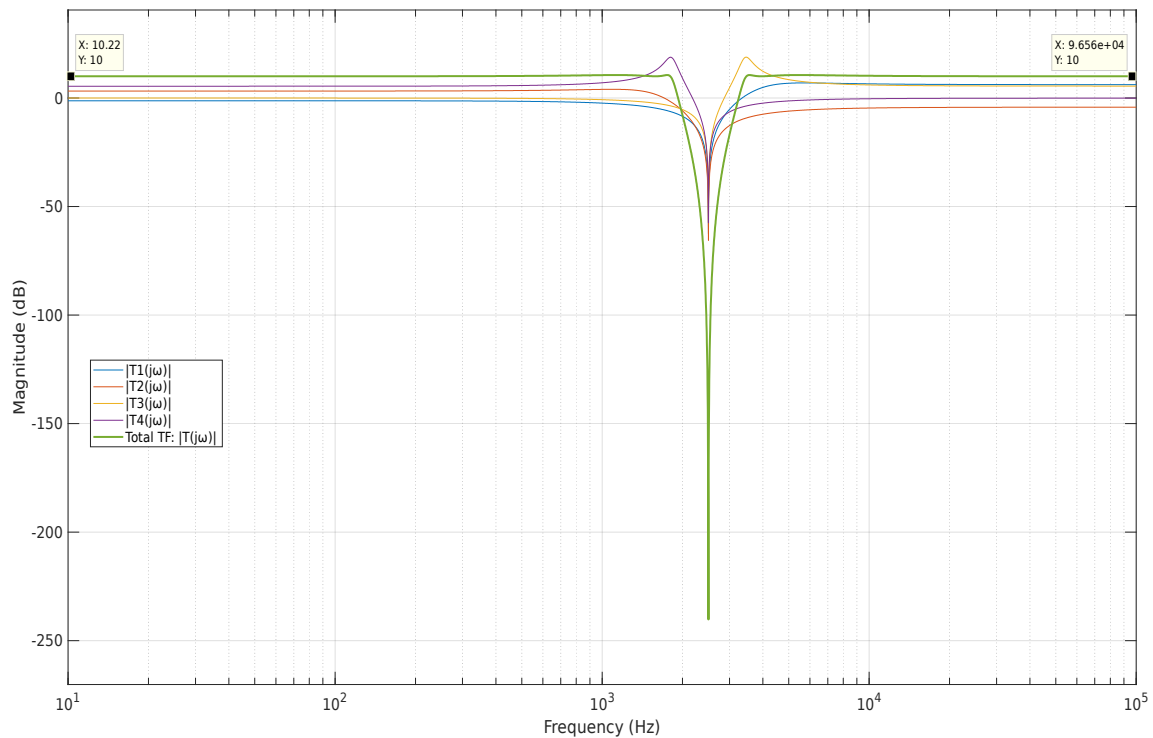
Στα παραπάνω ( με ζουμ ) φαίνεται η μικρή κυμάτωση που χαρακτηρίζει την απόκριση Chebysevan στις ζώνες διέλευσης.

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



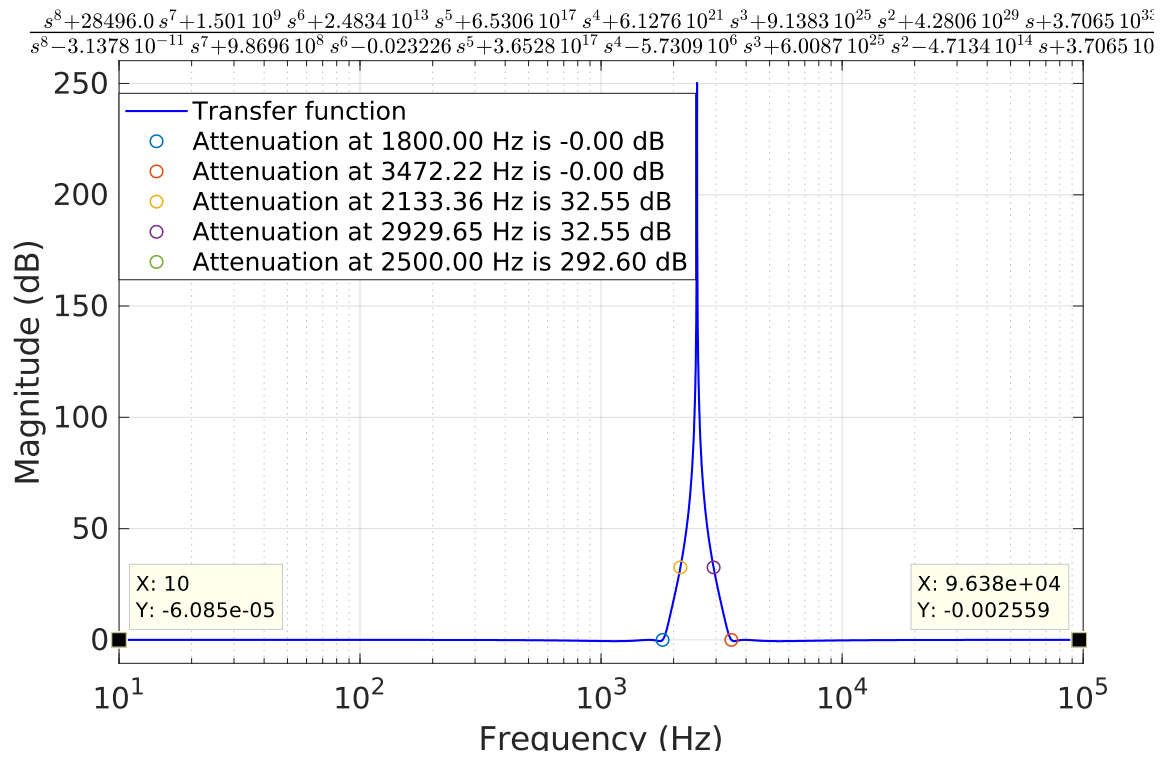


Σχήμα 8: Όλες οι αποκρίσεις πλατους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – δεν έχει γίνει ρύθμιση κέρδους στο τέλος

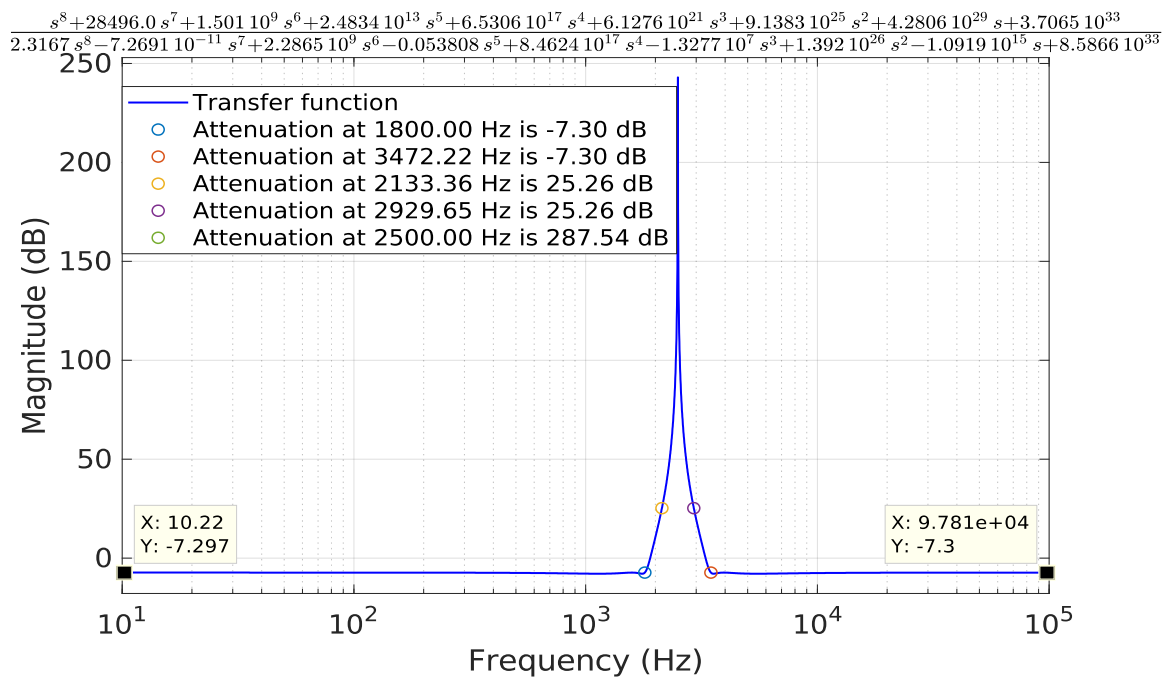


Σχήμα 9: Όλες οι αποκρίσεις πλάτους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – το κέρδος στο DC ( και στο  $\infty$  ) έχει ρυθμιστεί στα 10dB

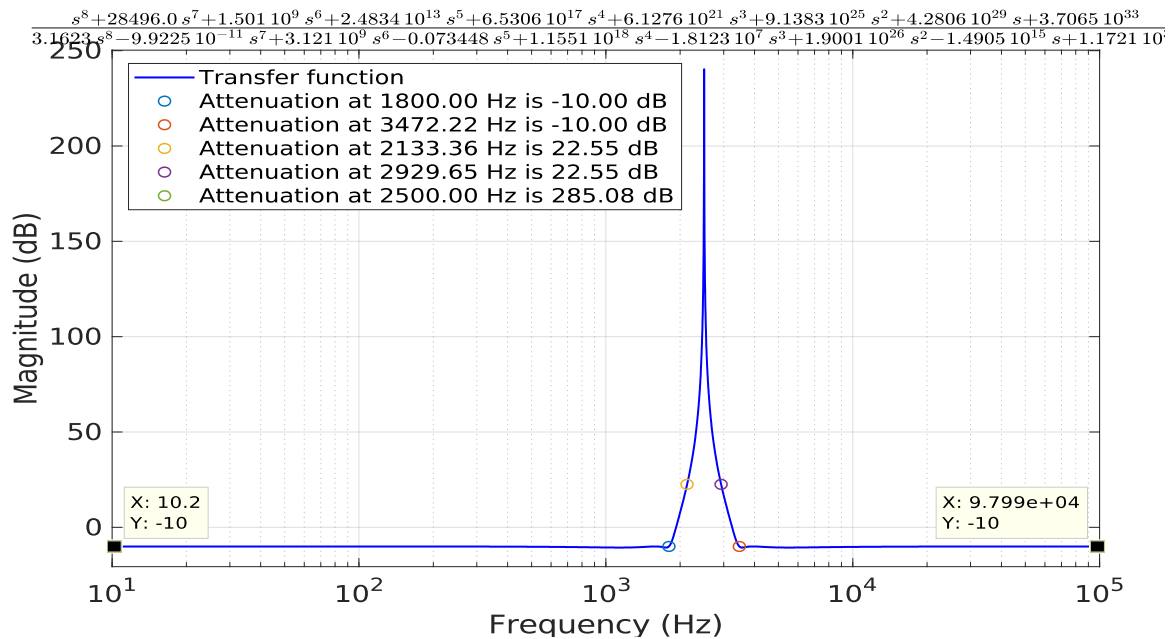
Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dB της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας. Αρχικά θέτουμε σαν επιθυμητό κέρδος στη ζώνη διέλευσης τα 0dB, ώστε να μπορούμε να δούμε ότι τηρούνται οι προδιαγραφές σχεδίασης. Κατόπιν, δίνουμε την συνάρτηση απόσβεσης χωρίς ρύθμιση κέρδους και τέλος τη συνάρτηση απόσβεσης με ρύθμιση κέρδους 10dB στη ζώνη διέλευσης.



Σχήμα 10: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - το κέρδος στις ζώνες διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα 0dB



Σχήμα 11: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - το κέρδος στις ζώνες διέλευσης ΔΕΝ έχει ρυθμιστεί



Σχήμα 12: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - το κέρδος στις ζώνες διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα 10dB

Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και τις ζώνες αποκοπής , δηλαδή την  $f_1 = 1.80\text{KHz}$ ,  $f_2 = 3.472\text{KHz}$ ,  $f_3 = 2.133\text{KHz}$ ,  $f_4 = 2.93\text{KHz}$  και  $f_\theta = 2500\text{Hz}$  καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις. Παρατηρούμε, από τη συνάρτηση απόσβεσης που έχει ρυθμιστεί ώστε να έχει κέρδος 0dB στη ζώνη διέλευσης, ότι η απόκριση ικανοποιεί τις προδιαγραφές σχεδίασης, καθώς:

- για τις συχνότητες  $f_3$ ,  $f_4$  η απόσβεση είναι 0dB μικρότερη της  $a_{\max} = 0.567\text{dB}$
- για τις συχνότητες  $f_1$ ,  $f_2$  η απόσβεση είναι 32.55dB μεγαλύτερη με τη  $a_{\min} = 28.11\text{dB}$

- επίσης φαίνεται στη συχνότητα  $f_0 = 2500 \text{ Hz}$ , περίπου στο μέσο της ζώνης αποκοπής, ότι η συνάρτηση απόσβεσης / κέρδους φτάνει σε μηδενικό κέρδος / άπειρη απόσβεση

## 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 .....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.

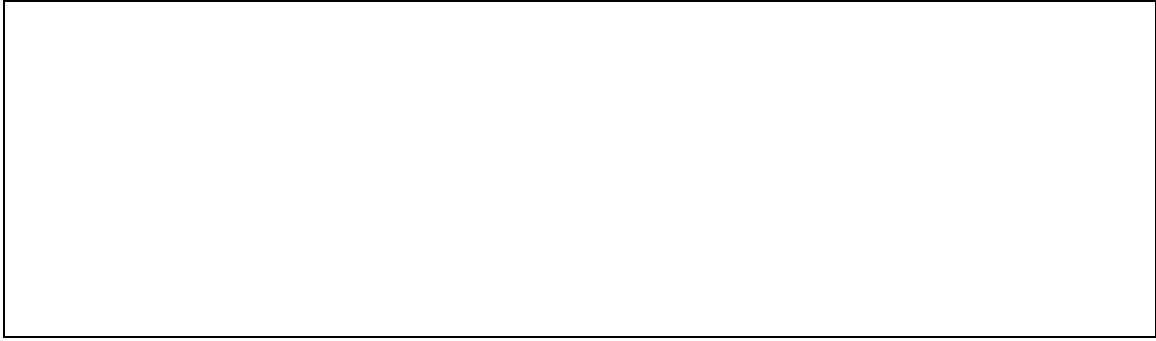


Από αυτά τα διαγράμματα λοιπόν γίνεται φανερό ότι .....



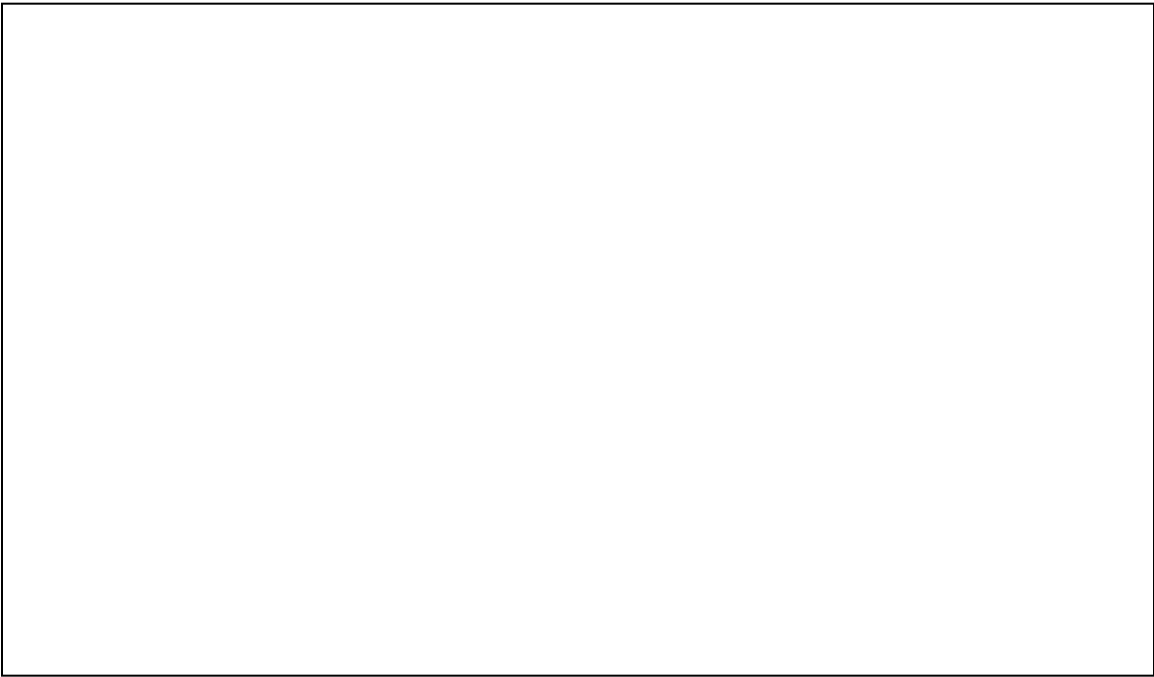
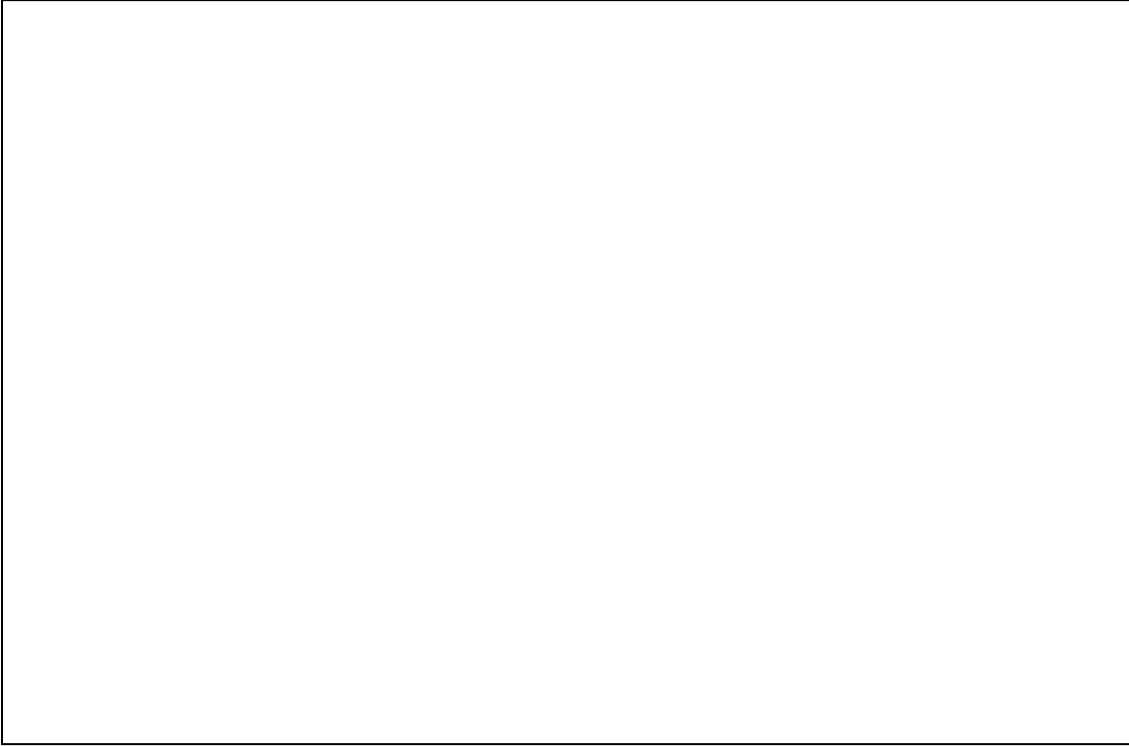
Πιο συγκεκριμένα, ελέγχοντας κατάλληλα τις κλίμακες συχνότητας και απόσβεσης διαπιστώνουμε ότι το φίλτρο .....το οποίο συμφωνεί με τη θεωρητική ανάλυση καθώς ...



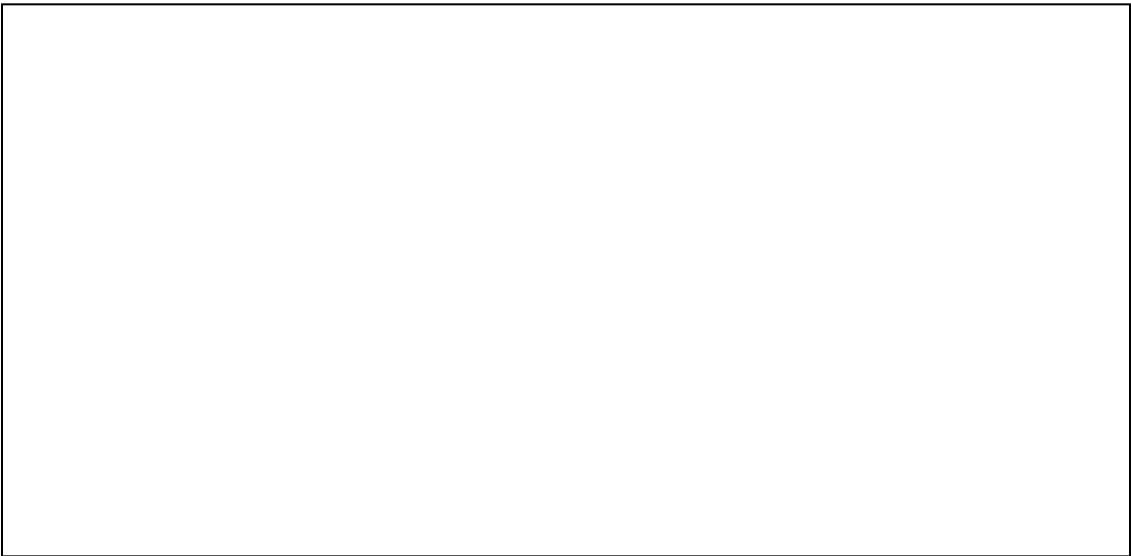
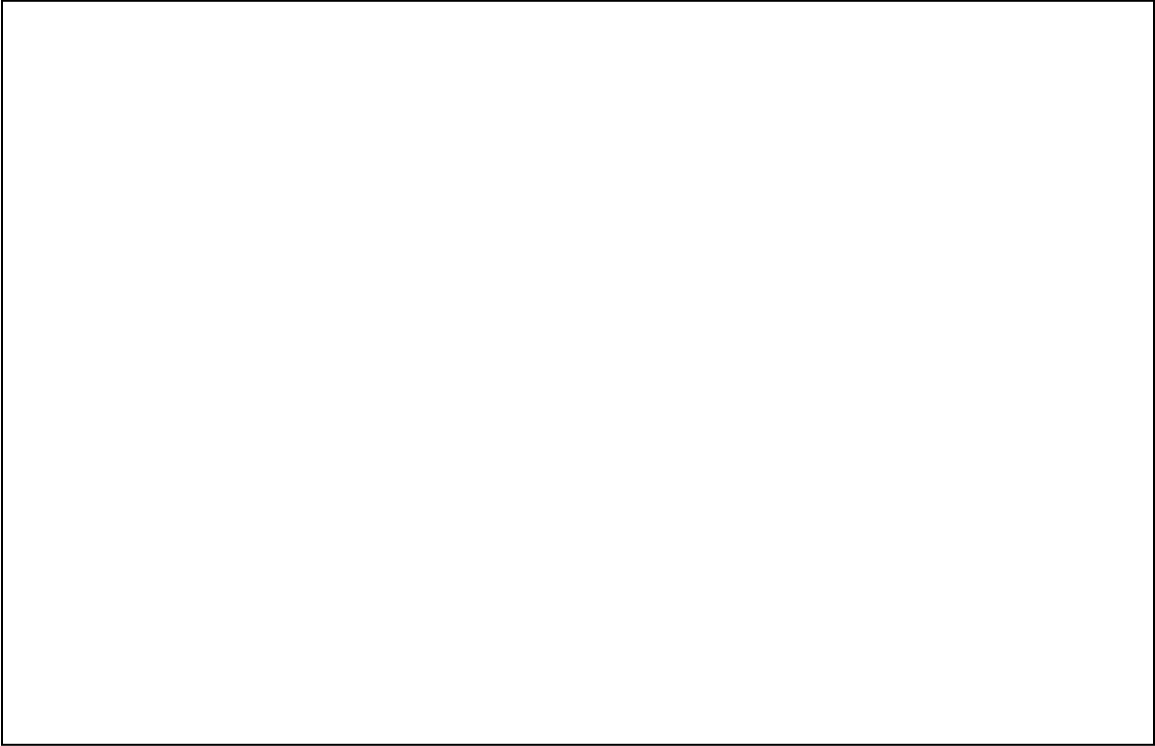


- Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα με μια πηγή διέγερσης *όπως αυτή που ζητείται στην εκφώνηση της εργασίας*. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα.

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.).

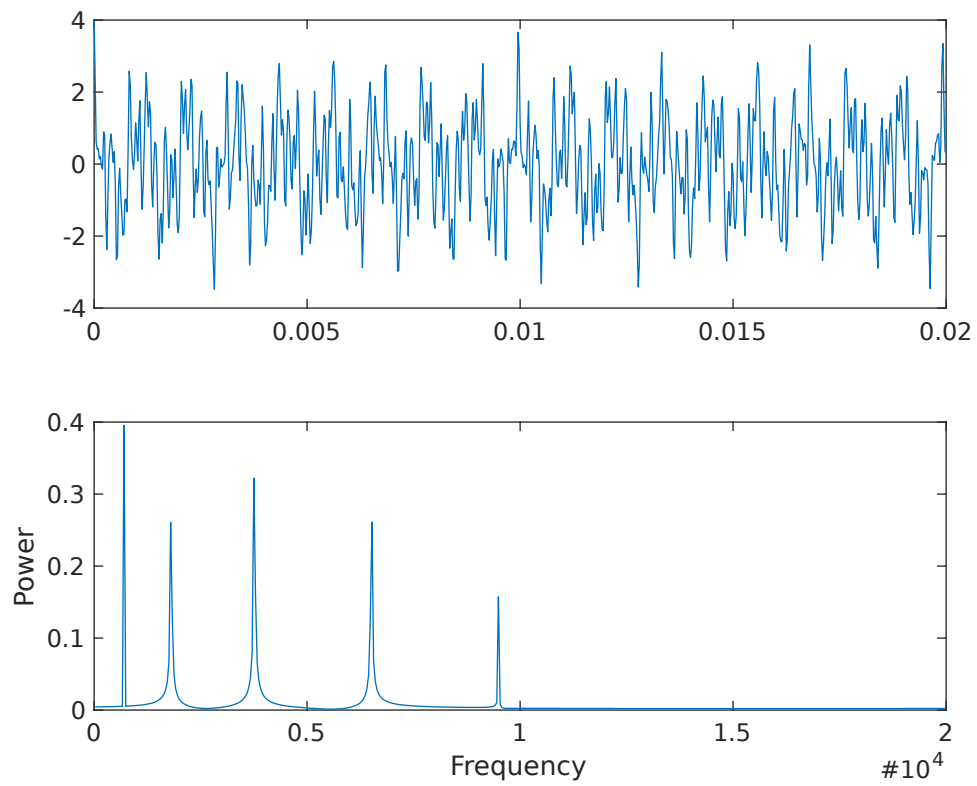
Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι το σήμα εξόδου είναι .... σε σχέση με το σήμα εισόδου. Το φίλτρο όπως φαίνεται **εισάγει κέρδος ~10dB** στη ζώνη διόδου του.

- 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. Το υπό-εξέταση σήμα είναι ένα πριονωτό σήμα όπως φαίνεται παρακάτω.

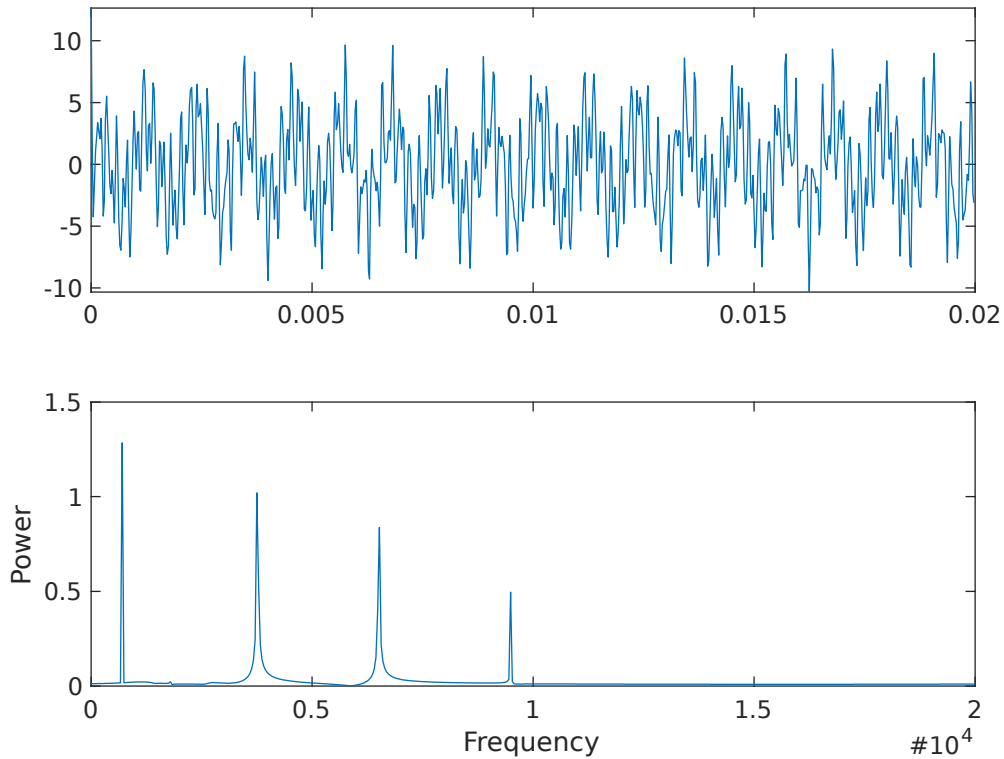
### Τεστάρισμα με MatLAB

Σήμα & Φάσμα Εισόδου:



*Σχήμα 13: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εισόδου & φάσμα αυτού*

Σήμα & Φάσμα Εξόδου :



Σχήμα 14: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εξόδου & φάσμα αυτού ( φαίνεται η απόσβεση για συχνότητες  $f \in [f_3, f_4]$  και η ενίσχυση περίπου  $\times 3$  για συχνότητες  $f \in [\theta, f_1] \cup [f_2, \infty]$  )

Φάσμα Σήματος Εισόδου Multisim:



Φάσμα Σήματος Εξόδου Multisim:



XX  
XX  
XX  
xxxxxxxxxx, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό εφόσον το  
κύκλωμα μας είναι ένα .... Οι κρίσιμες συχνότητες για το  
συγκεκριμένο φίλτρο είναι  $f_p = x \text{ kHz}$  και  $f_s = xxx \text{ kHz}$  .  
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx. Για παράδειγμα, αξίζει να παρατηρήσουμε  
ότι στην συχνότητα των  $x \text{ kHz}$  .... Έτσι συνάγεται το  
συμπέρασμα ότι το φίλτρο λειτουργεί σωστά, καθώς ....