

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

*ΣΥΝΘΕΣΗ  
ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ  
ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ  
ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ*

*7ο ΕΞΑΜΗΝΟ*

**ΕΡΓΑΣΙΑ #2**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.**

**Όνομα : ΘΑΝΑΣΗΣ ΧΑΡΙΣΟΥΔΗΣ**

**Α.Ε.Μ. : 9026**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 6 Οκτωβρίου 2019

# Περιεχόμενα

1.	Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου.....	6
1.1.	Προδιαγραφές Προβλήματος.....	6
1.2.	Υπολογισμός παραμέτρων πρωτότυπου LPF.....	6
1.2.1.	Υπολογισμός Τάξης & Συχνότητας Ημίσειας Ισχύος.....	7
1.2.2.	Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	8
1.3.	Μετασχηματισμός Συχνότητας LP → BP.....	10
1.3.1.	Πόλοι και Μηδενικά Ζωνοδιαβατής ΣΜ.....	12
1.4.	Υπολογισμός προδιαγραφών μονάδων.....	13
1.5.	Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	14
1.5.1.	Μονάδα 1 (I).....	15
1.5.2.	Μονάδα 2 (II).....	16
1.5.3.	Μονάδα 3 (III).....	18
1.5.4.	Μονάδα 4 (IV).....	19
1.5.5.	Ρύθμιση Κέρδους.....	21
2.	Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	23
2.1.	Μονάδα 1 (I): Fried LPN.....	24
2.2.	Μονάδα 2 (II): Fried HPN.....	24
2.3.	Μονάδα 3 (III): Fried LPN.....	25
2.4.	Μονάδα 4 (III): Fried HPN.....	26
2.5.	Συνολική ΣΜ.....	27
2.6.	Συνολική Συνάρτηση Απόσβεσης.....	30
3.	Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	33
3.1.	Ανάπτυξη μονάδων στο MULTISIM.....	33
3.2.	Αποκρίσεις Bode Πλάτους.....	34
3.3.	Απόκριση σε άθροισμα ημιτονοειδών σημάτων εισόδου.	36
3.3.1.	Σήμα Εισόδου – Εξόδου στο χρόνο.....	37
3.3.2.	Φάσμα Σήματος Εισόδου.....	38
3.3.3.	Φάσμα Σήματος Εξόδου.....	39
3.4.	Τεστάρισμα με MatLAB.....	40
3.4.1.	Σήμα & Φάσμα Εισόδου.....	40
3.4.2.	Σήμα & Φάσμα Εξόδου.....	41
3.5.	Συμπεράσματα.....	41
3.6.	Παρατηρήσεις.....	42

## Πίνακας Εικόνων

Εικ. 1: Fried LPN (σχ. 7.23 – Σημειώσεις) .....	15
Εικ. 2: Fried HPN (σχ. 7.21 – Σημειώσεις) .....	16
Εικ. 3: Κύκλωμα φίλτρου στο Multisim.....	33

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Μιγαδικό Επίπεδο όπου φαίνονται οι πόλοι και τα μηδενικά της ΣΜ BP Inverse Chebysev που θα υλοποιηθεί (άξονες σε rad/sec) .....	13
Σχήμα 2: Απόκριση Πλάτους της 1ης Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ).....	24
Σχήμα 3: Απόκριση Πλάτους της 2ης Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ).....	25
Σχήμα 4: Απόκριση Πλάτους της 3ης Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ).....	26
Σχήμα 5: Απόκριση Πλάτους της 4ης Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ).....	27
Σχήμα 6: Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα 10dB.....	28
Σχήμα 7: Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ) - χωρίς ρύθμιση κέρδους.....	28
Σχήμα 8: Όλες οι αποκρίσεις πλατους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – χωρίς ρύθμιση κέρδους της συνολικής ΣΜ.....	29
Σχήμα 9: Όλες οι αποκρίσεις πλατους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – το κέρδος στη ζώνη διέλευσης της συνολικής ΣΜ έχει ρυθμιστεί στα 10dB.....	29
Σχήμα 10: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα 0dB.....	30
Σχήμα 11: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης ΔΕΝ έχει ρυθμιστεί.....	31
Σχήμα 12: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ , $f_4$ , και $f_\theta$ ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα 10dB.....	31
Σχήμα 13: Simulation: AC Sweep (φαίνονται οι tracers στις $f_1$ , και $f_2$ ).....	34
Σχήμα 14: Simulation: AC Sweep (φαίνονται οι tracers στις $f_3$ , και $f_4$ ).....	35

Σχήμα 15: Simulation: AC Sweep (φαίνεται ο tracer στη συχνότητα $f_\theta$ ).....	35
Σχήμα 16: Simulation: Transient Analysis.....	37
Σχήμα 17: Φάσμα Σήματος Εισόδου (Simulation: Fourier Analysis).....	38
Σχήμα 18: Φάσμα Σήματος Εισόδου μεγενθυμένο (Simulation: Fourier Analysis).....	38
Σχήμα 19: Φάσμα Σήματος Εξόδου (Simulation: Fourier Analysis).....	39
Σχήμα 20: Φάσμα Σήματος Εξόδου μεγενθυμένο (Simulation: Fourier Analysis).....	39
Σχήμα 21: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εισόδου & φάσμα αυτού.....	40
Σχήμα 22: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εξόδου & φάσμα αυτού ( φαίνεται η απόσβεση για συχνότητες μεγαλύτερες από $f_s = 8.36\text{kHz}$ ).....	41

## Πίνακας Πινάκων

Πιν. 1: Πόλοι $\Sigma M$ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Chebysev.....	8
Πιν. 2: Πόλοι $\Sigma M$ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev.....	9
Πιν. 3: Μηδενικά $\Sigma M$ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev.....	9
Πιν. 4: Πόλοι $\Sigma M$ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev (για $\Omega_p = 1$ ).....	9
Πιν. 5: Μηδενικά $\Sigma M$ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev (για $\Omega_p = 1$ ).....	10
Πιν. 6: Πόλοι $\Sigma M$ ζωνοδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev.....	12
Πιν. 7: Μηδενικά $\Sigma M$ ζωνοδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebesev.....	13
Πιν. 8: Στοιχεία των πηγών διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγή δοκιμής στο τεστάρισμα του κυκλώματος - φίλτρου. .	36
Πιν. 9: Συνολική Πηγή Εισόδου του κυκλώματος.....	36

# **ΖΩΝΟΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ INVERSE CHEBYSEV**

"*Na σχεδιασθεί ένα ζωνοδιαβατό φίλτρο Inverse Chebysev το οποίο να πληρεί τις παρακάτω προδιαγραφές συχνότητας και απόσβεσης:*

$$f_1 = 1.55\text{KHz}, \quad f_2 = 1.756\text{KHz}, \quad f_3 = 1.412\text{KHz}, \quad f_4 = 1.928\text{KHz}$$

$$a_{max} = 0.5667 \text{ dB}, \quad a_{min} = 35.11 \text{ dB}$$

# 1. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

## 1.1. Προδιαγραφές Προβλήματος

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

$$\omega_1 = 2\pi * f_1 = 27646.015 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi * f_2 = 52527.429 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = 2\pi * f_3 = 27646.015 \text{ rad/s}$$

$$\omega_4 = 2\pi * f_4 = 52527.429 \text{ rad/s}$$

και επίσης

$$bw = \omega_2 - \omega_1 = 1297.17 \text{ rad/s}$$

$$\omega_0 = \sqrt(\omega_1 * \omega_2) = 10367.26 \text{ rad/s}$$

$$q_c = \omega_0 / bw = 7.99$$

ενώ επειδή  $a_2=0$ , το κέρδος στη ζώνη διεύλεσης (π.χ. στη συχνότητα  $\omega_0$ ) πρέπει να είναι **10dB**.

## 1.2. Υπολογισμός παραμέτρων πρωτότυπου LPF

Σε πρώτη φάση από τις προδιαγραφές του ζωνοφρακτικού φίλτρου και με βάση τον αντίστροφο μετασχηματισμό συχνοτήτων BP → LP οδηγούμαστε στις προδιαγραφές του πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου (σχέση 11.56 - Σημειώσεις). Στους υπολογισμούς στα ζωνοδιαβατά φίλτρα, θεωρείται ότι  $\Omega_p=1$ . Για να γίνει αυτό, θέτουμε:

$$\Omega_p = 1$$

$$\Omega_s = (\omega_4 - \omega_3) / bw = 2.5$$

Όμως επειδή το πρωτότυπο κατωδιαβατό φίλτρο (LPF) θα προσεγγιστεί κατά Inverse Chebysev, πριν ξεκινήσουμε να υπολογίσουμε την Συνάρτηση Μεταφοράς κανονικοποιούμε τις συχνότητες ώστε  $\Omega_s = 1$ . Έτσι, θα είναι:

$$\Omega_p = \Omega_p / \Omega_s = 0.4$$

$$\Omega_s = 1$$

### 1.2.1. Υπολογισμός Τάξης & Συχνότητας Ημίσειας Ισχύος

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

$$n = \cosh^{-1}(\sqrt{10^{(0.1 * a_{min}) - 1}} / (10^{(0.1 * a_{max}) - 1})) / \cosh^{-1}(1 / \Omega_p) = 3.651 \Rightarrow n = 4$$

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

$$\epsilon = 1 / \sqrt{10^{(0.1 * a_{min}) - 1}} = 0.0176$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την κανονικοποιημένη (ως προς τη συχνότητα αποκοπής) συχνότητα ημίσειας ισχύος από τη σχέση

$$\Omega_{hp} = 1 / \cosh((1/n) * \cosh^{-1}(1/\epsilon)) = 0.5598$$

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

### 1.2.2. Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

Αρχικά θα υπολογίσουμε τους πόλους και στη συνέχεια τα μηδενικά της ΣΜ του πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδίασης του πρωτότυπου και τη προσέγγιση κατά Inverse Chebysev.

#### Υπολογισμός Πόλων Συνάρτησης Μεταφοράς

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

- βρίσκουμε τις γωνίες Butterworth
- εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο του Guillemin για να πάρουμε τους πόλους της ΣΜ Chebysev LPF
- αντιστρέφουμε τους πόλους Chebysev για να πάρουμε τους πόλους της ΣΜ Inverse 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  $a$ :

$$a = (1 / n) * \sinh^{-1}(1 / \epsilon) = 1.1838$$

σύμφωνα με τον οποίο οι πόλοι της ΣΜ Chebysev θα είναι:

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \sinh a * \cos \psi_k \\ \pm \omega_k &= \cosh a * \sin \psi_k \end{aligned} \quad \left. \right\} p_k = \sigma_k \pm j \omega_k$$

και άρα παίρνουμε τους πόλους ΣΜ Chebysev LPF:

$k$	$\Omega_k$	$\Omega_k$	$p_k$
1,2	0.559	1.529	-1.368 ± j0.684
3,4	1.540	1.745	-0.567 ± j1.651

Πιν. 1: Πόλοι ΣΜ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Chebysev

Αντιστρέφοντας τους παραπάνω πόλους ( $p_k = 1/p_k$ ) παίρνουμε τους πόλους της ΣΜ Inverse Chebysev LPF:

$k$	$Q_k$	$\Omega_k$	$p_k$
1, 2	0.559	0.654	-0.585 ± j0.292
3, 4	1.540	0.573	-0.186 ± j0.542

Πιν. 2: Πόλοι ΣΜ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev

### Υπολογισμός Μηδενικών Συνάρτησης Μεταφοράς

Ακολούθως, βρίσκουμε τα μηδενικά της ΣΜ του πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με βάση τη ακόλουθη σχέση:

$$\Omega z_k = \sec((k * \pi) / (2 * n)), \text{ για } k \in \{1, 3\}$$

Τα μηδενικά θα κείνται πάνω στον φανταστικό άξονα και έτσι θα είναι της μορφής  $\pm j\Omega z_k$ . Έτσι, τα μηδενικά της ΣΜ Inverse Chebysev LPF είναι:

$k$	$\Omega z_k$	$z_k$
1	1.082	± j1.082
3	2.613	± j2.613

Πιν. 3: Μηδενικά ΣΜ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev

Ακολούθως, απο-κανονικοποιούμε στη συχνότητα ώστε να επανέλθουμε σε  $\Omega_p = 1$ . Για τον λόγο αυτό, κάνουμε scaling στο  $\Omega_0$  των πόλων και μηδενικών (τα  $Q$  δεν επηρεάζονται). Έτσι, οι πόλοι της ΣΜ του πρωτότυπου Inverse Chebysev LPF γίνονται:

$k$	$Q_k$	$\Omega_k$	$p_k$
1, 2	0.559	1.635	-1.462 ± j0.731
3, 4	1.540	1.433	-0.465 ± j1.355

Πιν. 4: Πόλοι ΣΜ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev (για  $\Omega_p = 1$ )

ενώ τα μηδενικά αντίστοιχα γίνονται:

<b>k</b>	<b><math>\Omega z_k</math></b>	<b><math>z_k</math></b>
<b>1</b>	<b>2.706</b>	<b><math>\pm j2.706</math></b>
<b>3</b>	<b>6.533</b>	<b><math>\pm j6.533</math></b>

*Πιν. 5: Μηδενικά ΣΜ πρωτότυπου κατωδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev (για  $\Omega_p = 1$ )*

### 1.3. Μετασχηματισμός Συχνότητας LP → BP

Στην επόμενη φάση, χρησιμοποιούμε τον ευθύ μετασχηματισμό LP→BP και μεταφερόμαστε από το πρωτότυπο πεδίο στο ζωνοδιαβατό πεδίο συχνοτήτων, ώστε να πάρουμε τους πόλους και τα μηδενικά της ζωνοδιαβατής ΣΜ Inverse Chebysev. Για να το πετύχουμε αυτό, ακολουθούμε τον αλγόριθμο του Geffe για τον μετασχηματισμό πόλων και μηδενικών. Σύμφωνα με αυτόν, για κάθε ζεύγος μιγαδικών πόλων της ΣΜ του πρωτότυπου LPF, θα προκύψουν δύο (2) ζεύγη μιγαδικών πόλων στην ζωνοδιαβατή ΣΜ (+2 μηδενικά @ origin). Αντίστοιχα για κάθε ζεύγος φανταστικών μηδενικών, θα προκύψουν 2 ζεύγη φανταστικών μηδενικών στην ζωνοδιαβατή ΣΜ (+2 πόλοι @ origin).

**Μετασχηματισμός Ζεύγους:  $p_{1,2} = -1.462 \pm j0.731$**

$$\Sigma = 1.462 \quad \Omega = 0.731 \quad C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 2.673$$

$$D = 2*\Sigma/q_c = 0.366 \quad E = 4 + C/q_c^2 = 4.042$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 3.975 \quad Q = (1/D)*\sqrt{((E+G)/2)} = 5.471$$

$$k = \Sigma*Q/q_c = 1.001 \quad W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.047$$

$$f_{\theta 1} = f_\theta * W = 1727.52 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{\theta 1} = 10854.31 \text{ rad/s}}$$

$$f_{\theta_2} = f_\theta / W = 1575.96 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{\theta_2} = 9902.06 \text{ rad/s}}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν δύο (2) ζεύγη μιγαδικών πόλων  $\omega_{\theta_1}$  και  $\omega_{\theta_2}$  και δύο (2) μηδενικά στο μηδέν. Οι πόλοι έχουν μεταξύ τους το ίδιο  $Q = 5.471$ , κείνται επομένως πάνω στην ίδια ευθεία  $Q$ .

**Μετασχηματισμός Ζεύγους:**  $p_{3,4} = -0.465 \pm j1.355$

$$\Sigma = 0.465 \quad \Omega = 1.355 \quad C = \Sigma^2 + \Omega^2 = 2.052$$

$$D = 2*\Sigma/q_c = 0.116 \quad E = 4 + C/q_c^2 = 4.032$$

$$G = \sqrt{E^2 - 4D^2} = 4.025 \quad Q = (1/D)*\sqrt{((E+G)/2)} = 17.245$$

$$k = \Sigma*Q/q_c = 1.004 \quad W = k + \sqrt{k^2 - 1} = 1.088$$

$$f_{\theta_3} = f_\theta * W = 1795.86 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{\theta_3} = 11283.70 \text{ rad/s}}$$

$$f_{\theta_3} = f_\theta / W = 1515.99 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{\theta_4} = 9525.25 \text{ rad/s}}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν δύο (2) ζεύγη μιγαδικών πόλων  $\omega_{\theta_3}$  και  $\omega_{\theta_4}$  και δύο (2) μηδενικά στο μηδέν. Οι πόλοι έχουν μεταξύ τους το ίδιο  $Q = 17.245$ , κείνται επομένως πάνω στην ίδια ευθεία  $Q$ .

**Μετασχηματισμός Μηδενικού:**  $\Omega_z = 2.706$

$$K = 2 + (\Omega_z / q_c)^2 = 2.115$$

$$x = 0.5 * (K + \sqrt{K^2 - 4}) = 1.401$$

$$f_{z1} = f_\theta * \sqrt{x} = 1952.80 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{z1} = 12269.83 \text{ rad/s}}$$

$$f_{z2} = f_\theta / \sqrt{x} = 1394.15 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{z2} = 8759.70 \text{ rad/s}}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν δύο (2) ζεύγη φανταστικών μηδενικών  $\omega_{z1}$  και  $\omega_{z2}$  και δύο (2) πόλοι στο μηδέν.

**Μετασχηματισμός Μηδενικού:  $\Omega_z = 6.533$**

$$K = 2 + (\Omega_z / q_c)^2 = 2.668$$

$$x = 0.5 * (K + \sqrt{K^2 - 4}) = 2.217$$

$$f_{z3} = f_0 * \sqrt{x} = 2456.84 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{z3} = 15436.79 \text{ rad/s}}$$

$$f_{z4} = f_0 / \sqrt{x} = 1108.13 \text{ Hz} \quad \underline{\omega_{z4} = 6962.59 \text{ rad/s}}$$

Από τον μετασχηματισμό προκύπτουν δύο (2) ζεύγη φανταστικών μηδενικών  $\omega_{z3}$  και  $\omega_{z4}$  και δύο (2) πόλοι στο μηδέν.

### 1.3.1. Πόλοι και Μηδενικά Ζωνοδιαβατής ΣΜ

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν από το μετασχηματισμό συχνότητας, οι πόλοι της προς υλοποίηση Ζωνοδιαβατής ΣΜ Inverse Chebysev θα είναι:

k	$Q_k$	$\omega_k$	$p_k$
1,2	5.471	10854.31	-992.04 ± j10808.88
3,4	5.471	9902.06	-905.01 ± j 9860.62
5,6	17.245	11283.70	-327.15 ± j11278.95
7,8	17.245	9525.25	-276.17 ± j 9521.24

Πιν. 6: Πόλοι ΣΜ ζωνοδιαβατού φίλτρου  
με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev

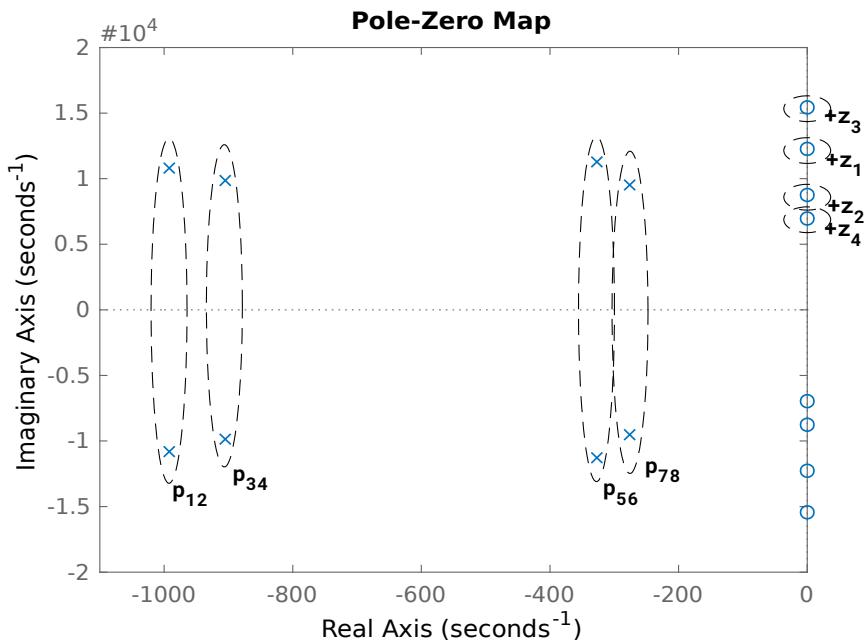
ενώ τα μηδενικά θα είναι (στο φανταστικό άξονα - ±j $\omega_k$ ):

<b>k</b>	<b>wz<sub>k</sub></b>	<b>z<sub>k</sub></b>
<b>1</b>	12269.83	<b>± j12269.83</b>
<b>2</b>	8759.70	<b>± j 8759.70</b>
<b>3</b>	15436.79	<b>± j15436.79</b>
<b>4</b>	6962.59	<b>± j 6962.59</b>

Πιν. 7: Μηδενικά ΣΜ ζωνοδιαβατού φίλτρου με προσέγγιση κατά Inverse Chebysev

#### 1.4. Υπολογισμός προδιαγραφών μονάδων

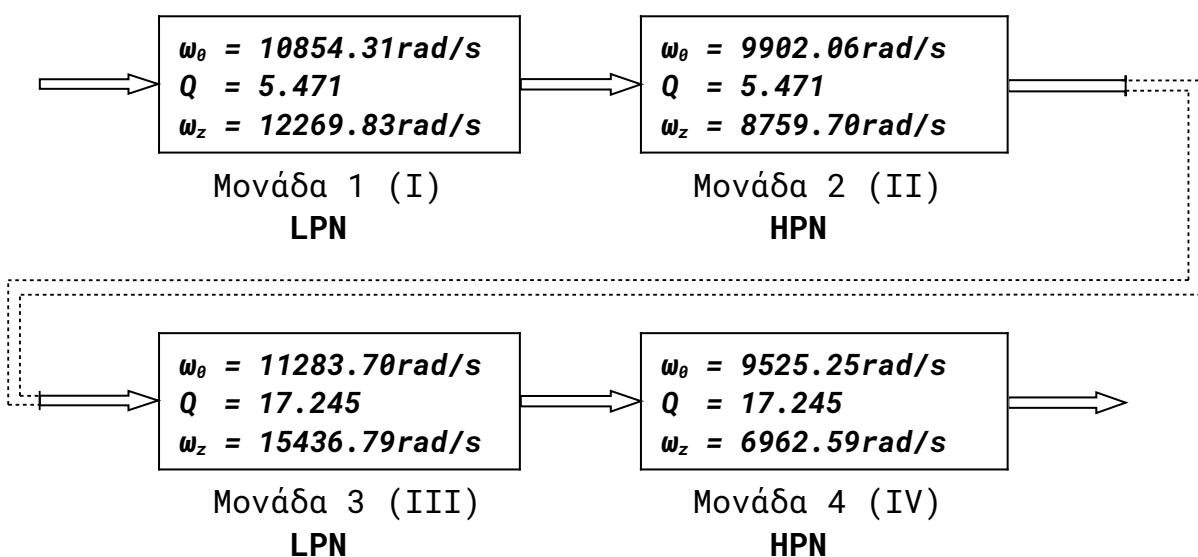
Με βάση τους Πιν. 2 και Πιν. 3 παραπάνω, προκύπτουν τα παρακάτω μηδενικά και πόλοι της ζωνοδιαβατής ΣΜ Inverse Chebysev που ζητείται να υλοποιηθεί:



Σχήμα 1: Μιγαδικό Επίπεδο όπου φαίνονται οι πόλοι και τα μηδενικά της ΣΜ BP Inverse Chebysev που θα υλοποιηθεί (άξονες σε rad/sec)

Κάθε ζεύγος μιγαδικών πόλων σε συνδυασμό με ένα ζεύγος φανταστικών μηδενικών δημιουργεί μία ζωνοφρακτική (notch) μονάδα. Επίσης τα μηδενικά και οι πόλοι που παράγονται στο origin (0) από τον Geffe αλληλοανατρούνται. Έτσι, το κύκλωμα που θα υλοποιήσει τη παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς θα αποτελείται από **τέσσερις (4)** μονάδες κάθε μία από τις

οποίες θα αναλάβει την υλοποίηση ενός ζεύγους φανταστικών πόλων και ενός ζεύγους φανταστικών μηδενικών (άρα όλες θα είναι μονάδες notch). Επιλέγεται η πρώτη μονάδα να υλοποιήσει τους πόλους  $p_{1,2}$  και το μηδενικό  $z_1$  (ενν. ζεύγος μηδενικών), η δεύτερη τους πόλους  $p_{3,4}$  και το μηδενικό  $z_2$ , η τρίτη τους πόλους  $p_{5,6}$  και το μηδενικό  $z_3$  και η τέταρτη τους πόλους  $p_{7,8}$  και το μηδενικό  $z_4$ . Οι μονάδες φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή:



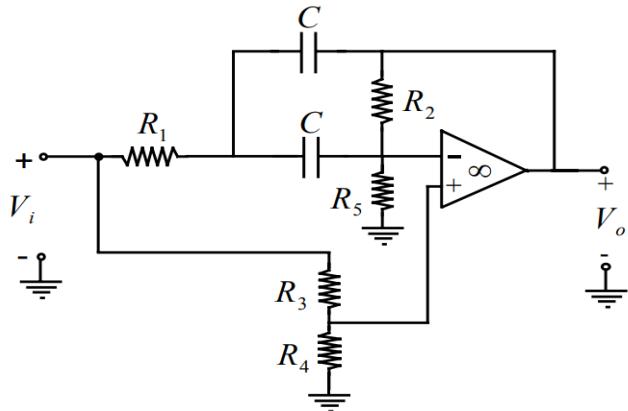
### 1.5. Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Για την υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς θα γίνει χρήση των ζωνοφρακτικών φίλτρων του Fried (σχήματα 7.21 & 7.23 - Σημειώσεις) καθώς  $a_3 = 2$ .

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  $k_f = \omega_\theta$ .

### 1.5.1. Μονάδα 1 (Ι)

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα Fried LPN, ένα διτετράγωνης (biquad) ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω:



*Eik. 1: Fried LPN (σχ. 7.23 – Σημειώσεις)*

Στη σελίδα 7-36 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης  $\Omega_0=1$ ,  $\Omega_z=\omega_z/\omega_0$  και  $Q$ .

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

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

$$R_2 = 119.71 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.02 \text{ Ohm}$$

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

$$R_5 = 430.89 \text{ Ohm}$$

$$C = 0.091 \text{ F}$$

#### Κλιμακοποίηση

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

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 10854.31$$

$$k_m = C_1 / (C_{in} * k_f) = 8.42$$

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

$$R_1 = 8.420 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 1008.020 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.180 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 8.420 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 3628.205 \text{ Ohm}$$

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

Η ΣΜ της μονάδας LPN που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία είναι (σχέση 7.146 έως 7.148 - σημειώσεις):

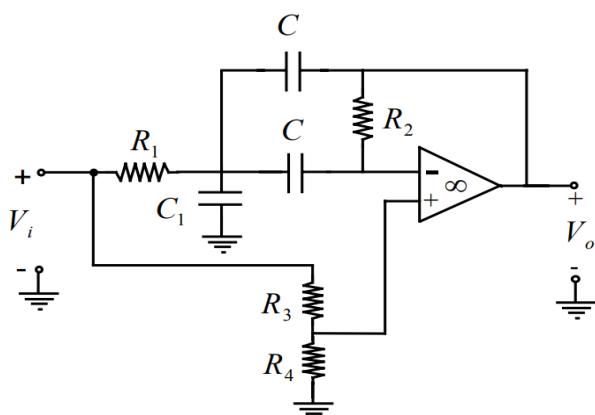
$$T_1(s) = \frac{0.9791s^2 + 5.677e-12s + 1.474e08}{s^2 + 1984s + 1.178e08}$$

με το κέρδος στη ζώνη διέλευσης να είναι

$$k_{\omega\theta} = 1.832 (= 5.26 \text{dB})$$

### 1.5.2. Μονάδα 2 (II)

Η δεύτερη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried HPN, ένα διτετράγωνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 2 παρακάτω:



Εικ. 2: Fried HPN (σχ. 7.21 - Σημειώσεις)

Στη σελίδα 7-33 έως 7-34 των σημειώσεων δίνονται οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος βάσει των προδιαγραφών σχεδίασης  $\Omega_0=1$ ,  $\Omega_z=\omega_z/\omega_0$  και  $Q$ .

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

$$k_1 = (\omega_0 / \omega_z)^2 - 1 = \mathbf{0.278}$$

Ακολούθως, υπολογίζουμε τα εξής:

$$k_2 = 0.985$$

$$k = 1.259$$

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

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

$$R_2 = 155.28 \text{ Ohm}$$

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

$$R_4 = 68.17 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 0.022 \text{ F}$$

$$C_2 = 0.080 \text{ F}$$

$$C_3 = 0.080 \text{ F}$$

### Κλιμακοποίηση

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

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 9902.060$$

$$k_m = C / (C_n * k_f) = 8.104$$

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

$$R_1 = \mathbf{8.104 \text{ Ohm}}$$

$$R_2 = \mathbf{1258.45 \text{ Ohm}}$$

$$R_3 = 8.104 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 552.48 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 277.83 \text{ nF}$$

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

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

Η ΣΜ της μονάδας HPN που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία είναι (σχέση 7.134 - σημειώσεις) :

$$T_2(s) = \frac{1.259s^2 - 3.722e-12s + 9.663e07}{s^2 + 1810s + 9.805e07}$$

με το κέρδος στη ζώνη διέλευσης να είναι

$$k_{\omega} = 1.843 \text{ (= } 5.31 \text{ dB)}$$

### 1.5.3. Μονάδα 3 (III)

Η τρίτη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried LPN, ένα διτετράγωνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στην Εικ. 1 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:

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

$$R_2 = 1189.60 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 0.003 \text{ Ohm}$$

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

$$R_5 = 1364.86 \text{ Ohm}$$

$$C = 0.029 \text{ F}$$

### Κλιμακοποίηση

Υπάρχει η απαίτηση ότι ο πυκνωτής να είναι  $1.0\mu F$ , έστω ο C.  
Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 11283.697$$

$$k_m = C_1 / (C_{1n} * k_f) = 2.57$$

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

$$R_1 = 2.57 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 3056.68 \text{ Ohm}$$

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

$$R_4 = 2.57 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 3507.01 \text{ Ohm}$$

$$C = 1.0 \mu F$$

Η ΣΜ της μονάδας LPN που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία είναι (σχέση 7.146 έως 7.148 - σημειώσεις):

$$T_3(s) = \frac{0.9969s^2 - 5.667e-11s + 2.375e08}{s^2 + 654.3s + 1.273e08}$$

με το κέρδος στη ζώνη διέλευσης να είναι

$$k_{\omega_0} = 6.219 (= 15.87 \text{ dB})$$

#### 1.5.4. Μονάδα 4 (IV)

Η τέταρτη μονάδα υλοποιείται από ένα Fried HPN, ένα διτετράγωνης ΣΜ κύκλωμα που φαίνεται στην Εικ. 2 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.:

$$k_1 = (\omega_0 / \omega_z)^2 - 1 = 0.872$$

Ακολούθως, υπολογίζουμε τα εξής:

$$k_2 = 0.999$$

$$k = 1.869$$

Έτσι, τα κανονικοποιημένα στοιχεία του κυκλώματος θα είναι:

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

$$R_2 = 2452.38 \text{ Ohm}$$

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

$$R_4 = 854.01 \text{ Ohm}$$

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

$$C_2 = 0.020 \text{ F}$$

$$C_3 = 0.020 \text{ F}$$

### Κλιμακοποίηση

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

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους, ως εξής:

$$k_f = \omega_0 = 9525.25$$

$$k_m = C / (C_n * k_f) = 2.12$$

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

$$R_1 = 2.12 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 5198.97 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 2.12 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 1810.48 \text{ Ohm}$$

$$C_1 = 871.59 \text{ nF}$$

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

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

Η ΣΜ της μονάδας HPN που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία είναι (σχέση 7.134 - σημειώσεις):

$$T_4(s) = \frac{1.869s^2 - 4.357e-12s + 9.062e07}{s^2 + 552.3s + 9.073e07}$$

με το κέρδος στη ζώνη διέλευσης να είναι

$$k_{\omega\theta} = 6.231 \text{ (= } 15.89 \text{ dB)}$$

### 1.5.5. Ρύθμιση Κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου στη ζώνη διόδου να είναι  $\sqrt{10} = 3.162$  (10dB).

Το τρέχων (συνολικό) κέρδος στη συχνότητα  $\omega_0$  (που είναι μέσα στο  $b_w$ ) είναι 130.88 (42.337 dB). Επομένως πρέπει να γίνει απόσβεση (είτε ενεργητική είτε παθητική) με συντελεστή απόσβεσης  $a = 3.16/130.88 = 0.024$ .

Επιλέγουμε να γίνει παθητική εξασθένηση της εξόδου (έτσι ώστε να μην χρειάζεται απομόνωση) μέσω ενός διαιρέτη τάσης με αντιστάσεις:

$$R_1 = 1/a \text{ (k}\Omega\text{)} = 41387 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 1/(1-\alpha) \text{ (k}\Omega\text{)} = 1024.76 \text{ Ohm}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοδιαβατού φίλτρου θα είναι:

$$T_{BP}(s) = 0.024 * T_1(s) * T_2(s) * T_3(s) * T_4(s) \Rightarrow$$

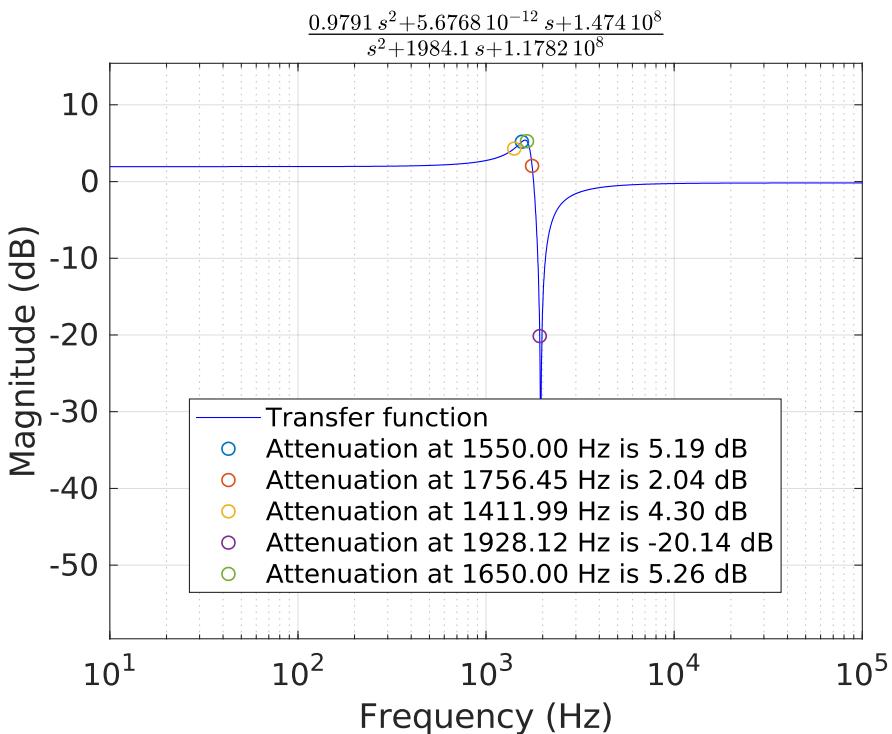
$$T_{BP}(s) = \frac{0.02s^8 - 9.89e-13s^7 + 9.03e06s^6 + 1.55e15s^4 - 2.46e04s^3 + 1.04e23s^2 - 6.71e11s + 2.34e30}{s^8 + 5001s^7 + 4.42e8s^6 + 1.63e12s^5 + 7.2e16s^4 + 1.75e20s^3 + 5.11e24s^2 + 6.21e27s + 1.334e32}$$

## 2. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

Για την μελέτη με MATLAB της 2ης εργασίας, δηλαδή της σχεδίασης του ζωνοδιαβατού φίλτρου, αναπτύχθηκε το script **p2.m**. Σε αυτό περιέχονται όλα τα βήματα θεωρητικής ανάλυσης που προηγήθηκαν συμπ. και των βημάτων για εξαγωγή των στοιχείων των κυκλωμάτων από τις παραμέτρους σχεδίασης ( $\omega_0$ ,  $Q$ ,  $\omega_z$ ). Να τονισθεί ότι για λόγους πληρότητας αναπτύχθηκαν τα παραπάνω βήματα τόσο για τα Fried Notch (σχήματα 7.21 και 7.23) όσο και για τα Bector Notch κυκλώματα που δίνονται στο κεφ. 7 των σημειώσεων (σχήματα 7.24α και 7.24β), αλλά και για τα Sallen-Key στη ζητούμενη στρατηγική σχεδίασης στην εργασία 4 (σχεδίαση ανωδιαβατού φίλτρου). Η εξαγωγή των στοιχείων των κυκλωμάτων γίνεται από συναρτήσεις που βρίσκονται στο μονοπάτι: **/MatLAB Helpers/Circuits/**. Γενικά στον φάκελο **MatLAB Helpers/** βρίσκονται όλες οι dependencies για την υλοποίηση της κάθε εργασίας, έτσι ώστε στο φάκελο **matlab/** της κάθε εργασίας να βρίσκεται μόνο το βασικό script που υλοποιεί την λογική της αντίστοιχης εργασίας. Μεταξύ άλλων βρίσκονται και οι πολύ βασικές κλάσεις για τη διαχείριση των στοιχείων αλλά και των πόλων των ΣΜ, **FilterUnit** και **Pole**. Ακολούθως, παραθέτονται παράθυρα που δείχνουν διαγράμματα Bode κέρδους ή/και απόσβεσης των επι μέρους μονάδων καθώς και της συνολικής μονάδας με και χωρίς ρύθμιση κέρδους.

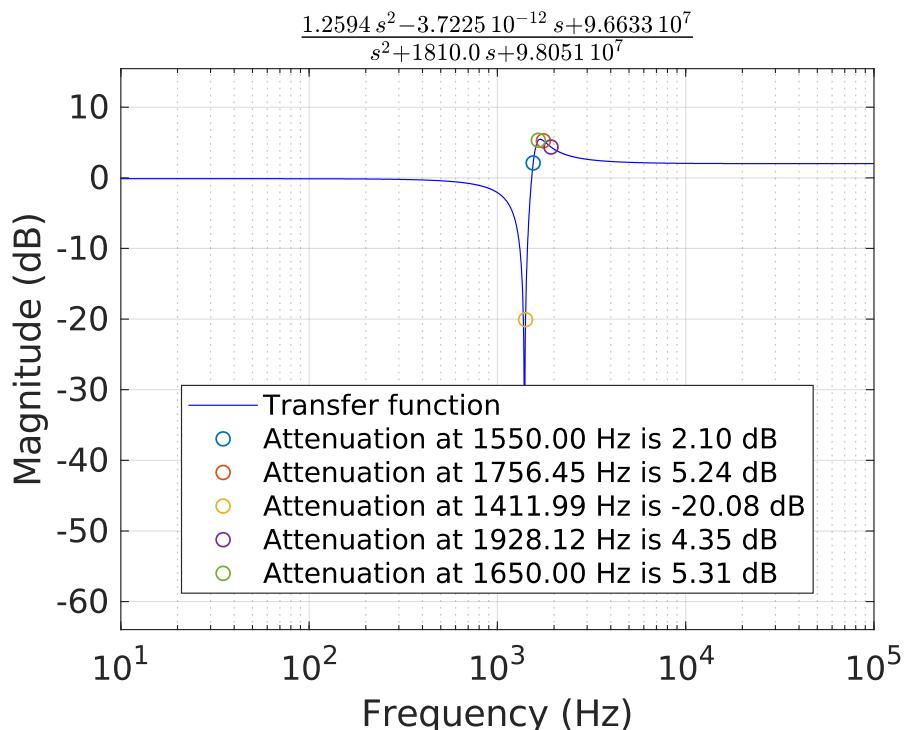
## 2.1. Μονάδα 1 (I): Fried LPN

Παρακάτω, φαίνεται η απόκριση πλάτους (κατά Bode) της πρώτης μονάδας. Στο σχήμα έχουν σημειωθεί οι κρίσιμες συχνότητες καθώς και η συχνότητα  $\omega_0$ .



## 2.2. Μονάδα 2 (II): Fried HPN

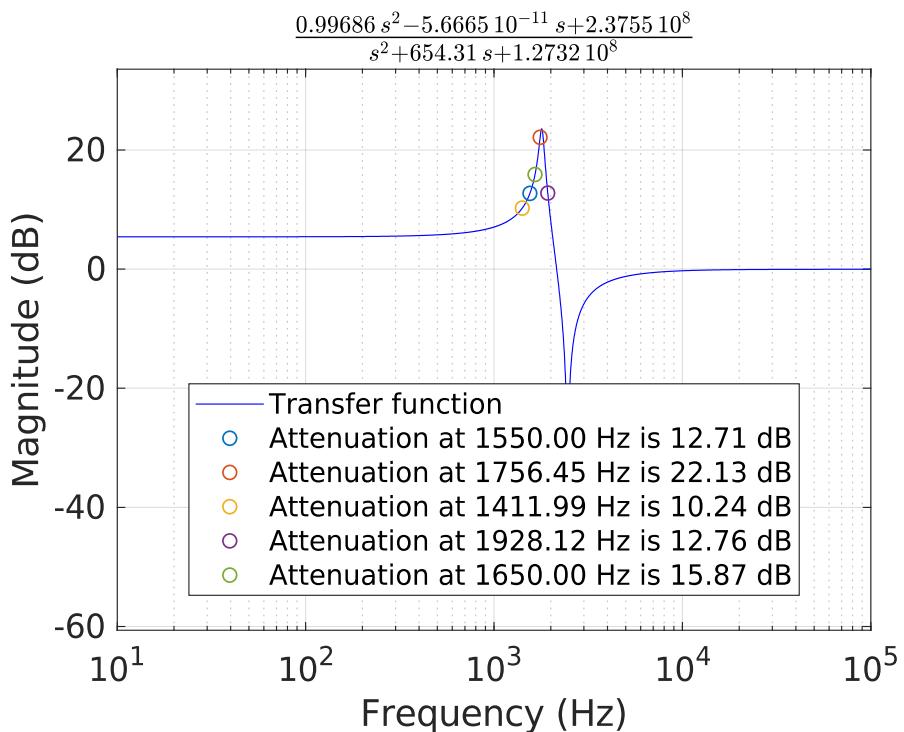
Παρακάτω, φαίνεται η απόκριση πλάτους (κατά Bode) της δεύτερης μονάδας. Στο σχήμα έχουν σημειωθεί οι κρίσιμες συχνότητες καθώς και η συχνότητα  $\omega_0$ .



Σχήμα 3: Απόκριση Πλάτους της 2ης Μονάδας  
( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )

### 2.3. Μονάδα 3 (III): Fried LPN

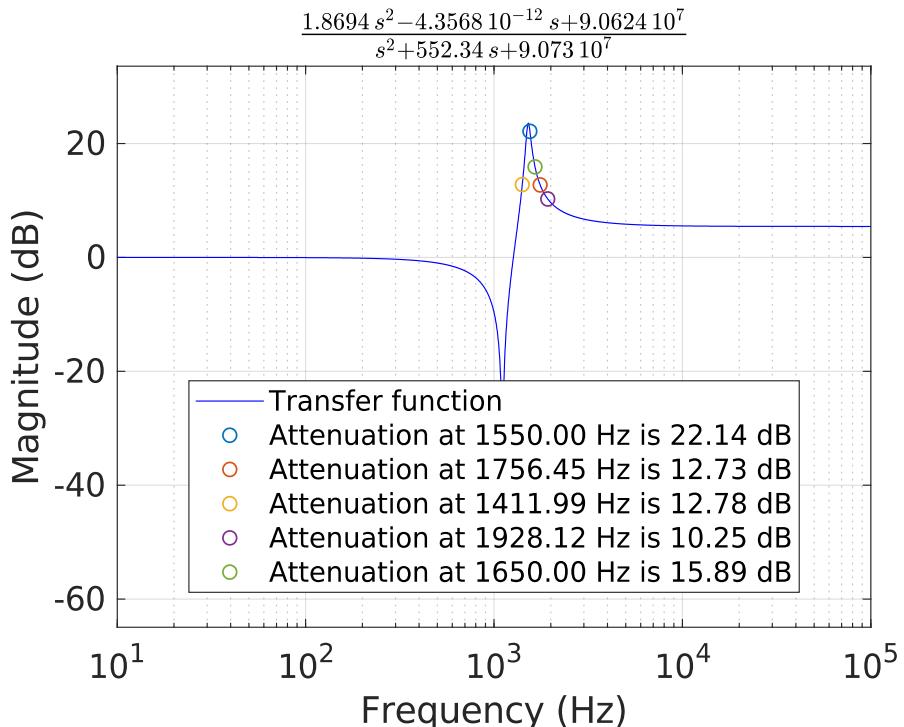
Παρακάτω, φαίνεται η απόκριση πλάτους (κατά Bode) της τρίτης μονάδας. Στο σχήμα έχουν σημειωθεί οι κρίσιμες συχνότητες καθώς και η συχνότητα  $\omega_0$ .



*Σχήμα 4: Απόκριση Πλάτους της 3ης Μονάδας  
( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )*

## 2.4. Μονάδα 4 (III): Fried HPN

Παρακάτω, φαίνεται η απόκριση πλάτους (κατά Bode) της τέταρτης μονάδας. Στο σχήμα έχουν σημειωθεί οι κρίσιμες συχνότητες καθώς και η συχνότητα  $\omega_0$ .

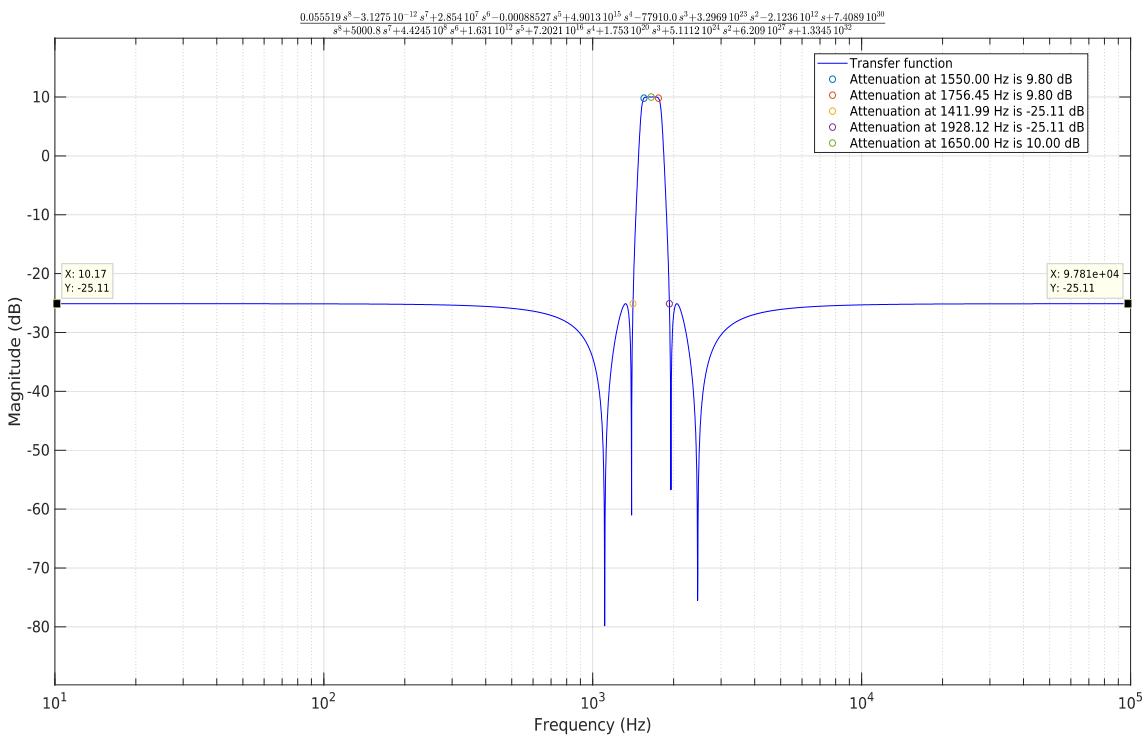


*Σχήμα 5: Απόκριση Πλάτους της 4ης Μονάδας  
( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  )*

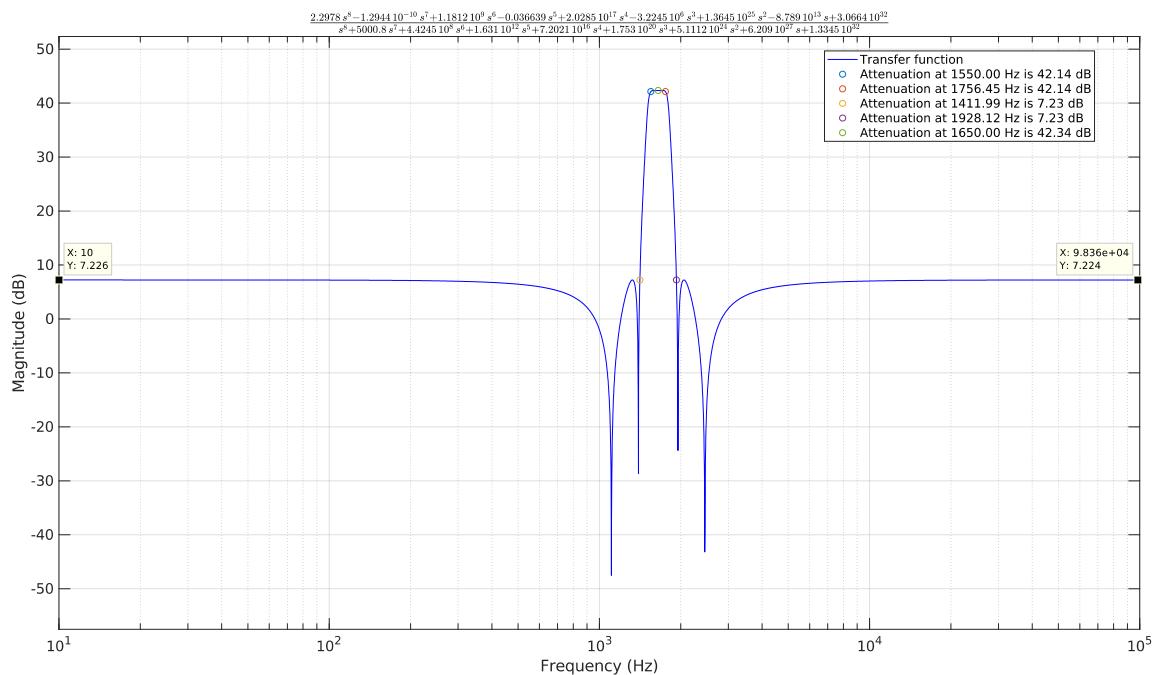
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι πράγματι οι μονάδες I και III είναι LPN ενώ οι μονάδες II και IV είναι HPN.

## 2.5. Συνολική ΣΜ

Παρακάτω, φαίνεται η απόκριση πλάτους (κατά Bode) της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας. Στο σχήμα έχουν σημειωθεί οι κρίσιμες συχνότητες και η συχνότητα ημίσειας  $\omega_0$ .

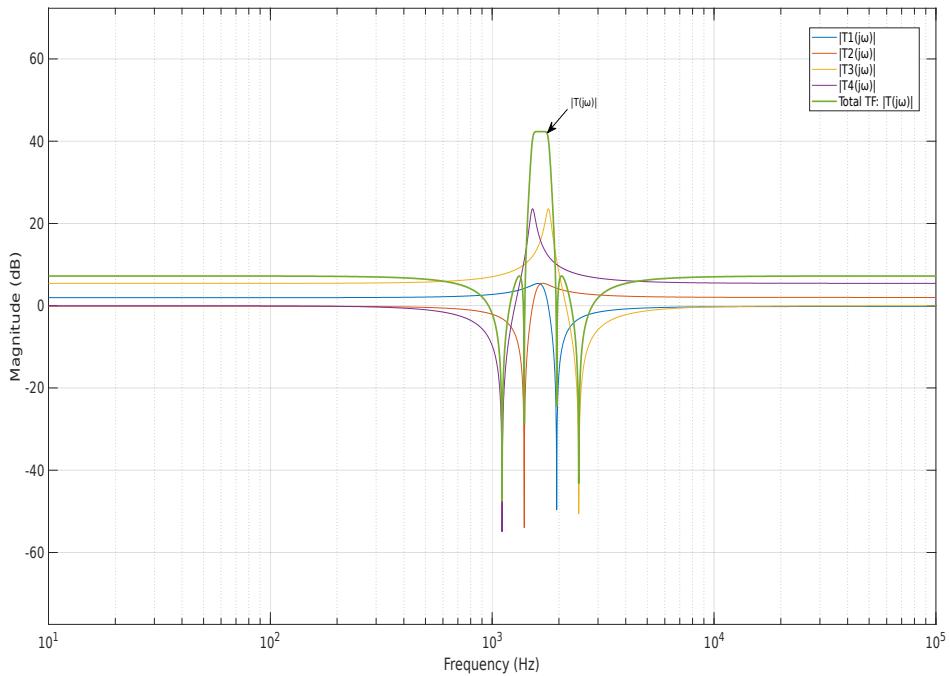


**Σχήμα 6:** Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα **10dB**



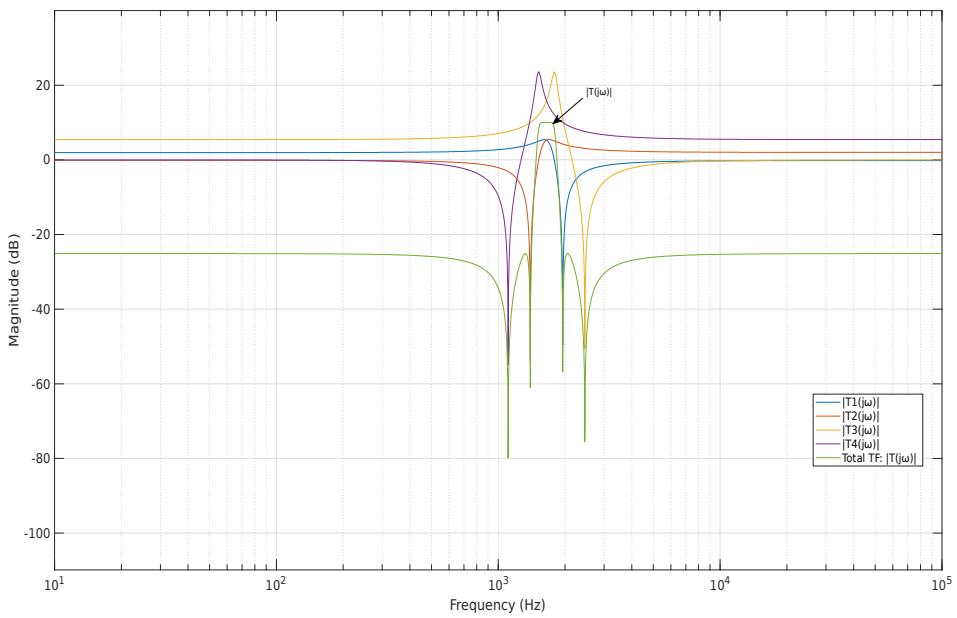
**Σχήμα 7:** Απόκριση Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - **χωρίς** ρύθμιση κέρδους

Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε όλες τις παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode. Ενώ, τέλος, παρατίθενται όλες οι παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode πλάτους:



χήμα 8: Όλες οι αποκρίσεις πλατους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – **χωρίς**  
ρύθμιση κέρδους της συνολικής ΣΜ

$\Sigma$

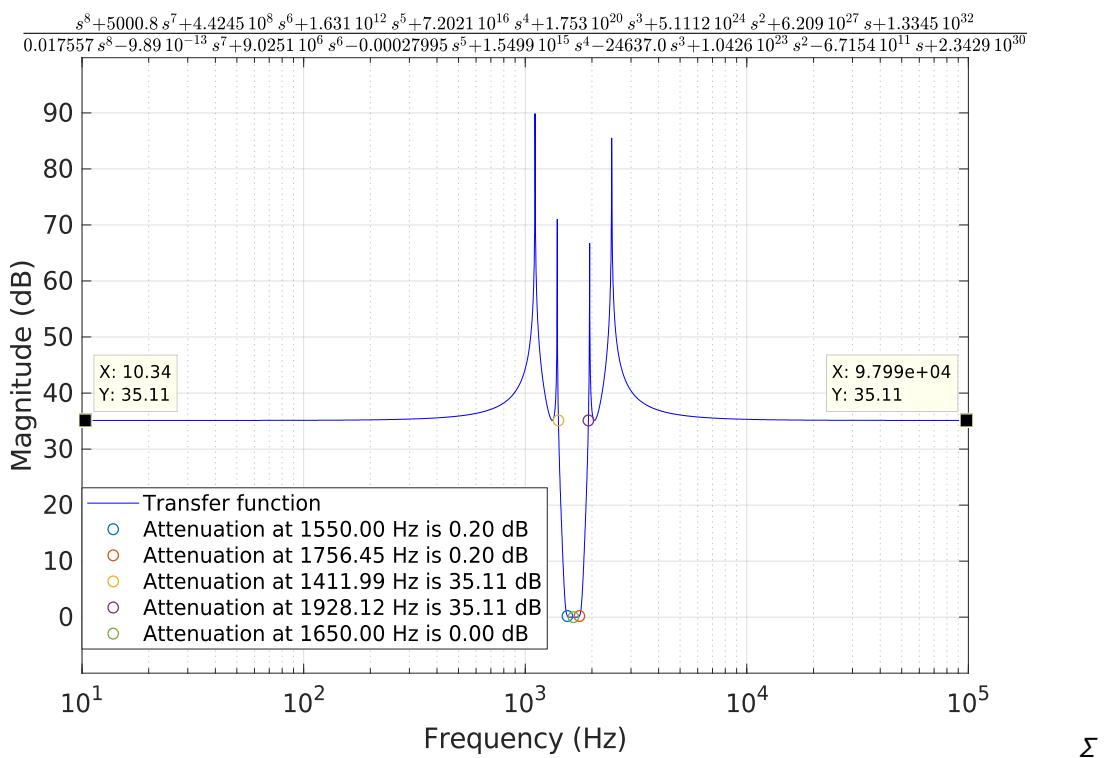


χήμα 9: Όλες οι αποκρίσεις πλατους σε ένα κοινό διάγραμμα Bode – **το**  
**κέρδος στη ζώνη διέλευσης της συνολικής ΣΜ** έχει ρυθμιστεί στα **10dB**

$\Sigma$

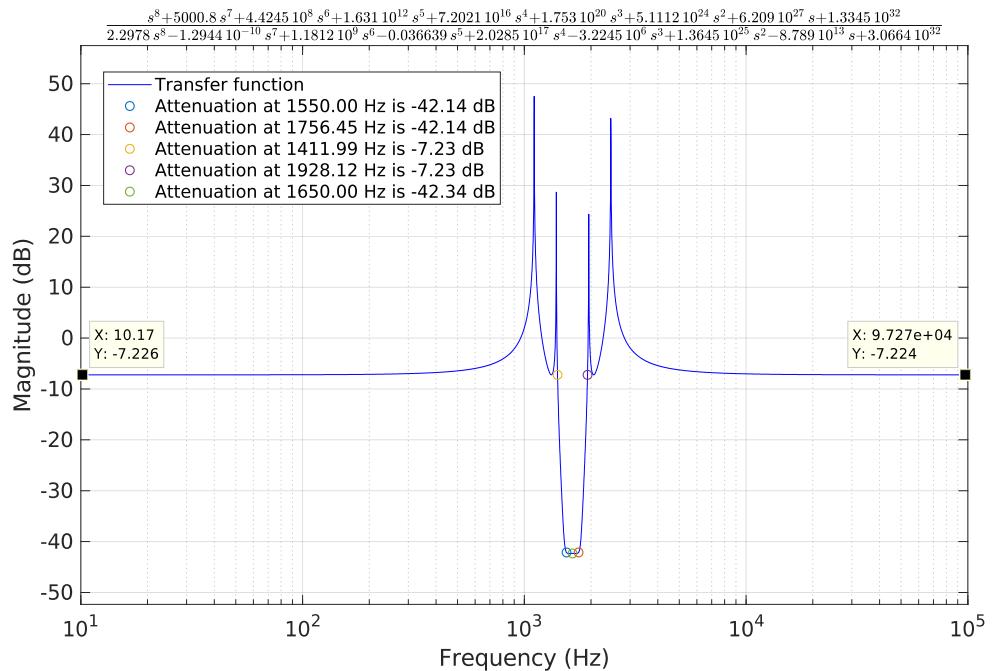
## 2.6. Συνολική Συνάρτηση Απόσβεσης

Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση απόσβεσης σε dB του συνολικού κυκλώματος 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.



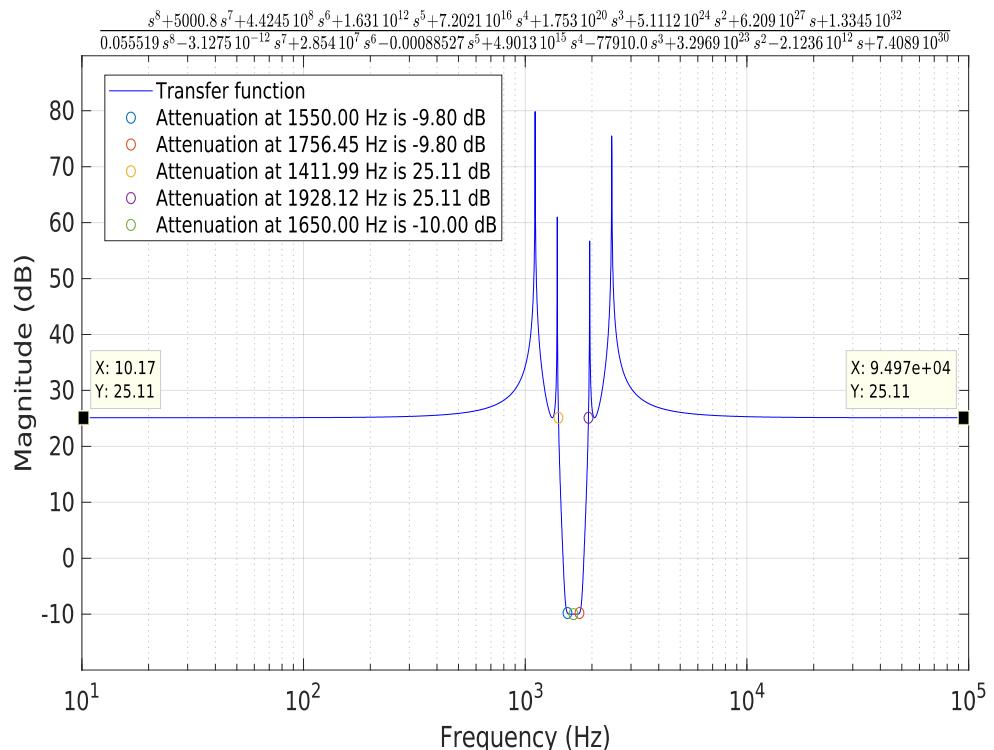
*χήμα 10: Συνάρτηση Απόσβεσης Πλάτους της Συνολικής Μονάδας ( φαίνονται οι  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , και  $f_\theta$  ) - το κέρδος στη ζώνη διέλευσης έχει ρυθμιστεί στα **0dB***

Σ



$\Sigma$

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



$\Sigma$

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

Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και τις ζώνες αποκοπής

, δηλαδή τις  $f_1=1550\text{Hz}$ ,  $f_2=1765\text{Hz}$ , τις  $f_3=1411\text{Hz}$ ,  $f_4=1928\text{Hz}$  και  $f_\theta=1650\text{Hz}$  καθώς και τις αντίστοιχες απόσβεσεις. Παρατηρούμε, από τη συνάρτηση απόσβεσης που έχει ρυθμιστεί ώστε να έχει κέρδος 0dB στη ζώνη διέλευσης, ότι η απόκριση τικανοποιεί τις προδιαγραφές σχεδίασης, καθώς:

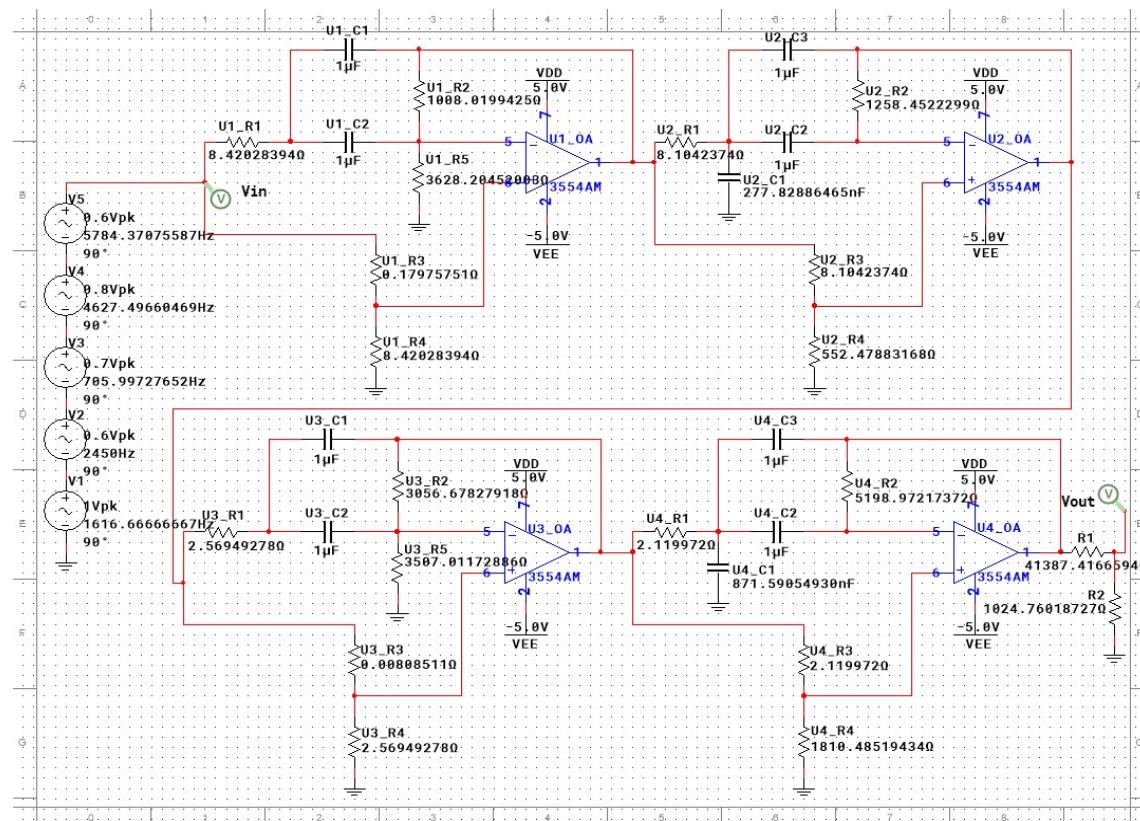
- για τις συχνότητες  $f_1$ ,  $f_2$  η απόσβεση είναι **0.20dB μικρότερη της  $a_{max}$  = 0.567dB**
- για τις συχνότητες  $f_3$ ,  $f_4$  η απόσβεση είναι **35.11dB ιση με τη  $a_{min}$  = 35.11dB** ( όπως αναμένουμε σε Inverse Chebysev ΣΜ )
- επίσης φαίνεται στο **σχήμα 12** στη συχνότητα  $f_\theta = 1650\text{Hz}$ , περίπου στο μέσο της ζώνης διέλευσης, ότι η συνάρτηση απόσβεσης / κέρδους "ακουμπάει" τη ζητούμενη απόσβεση / κέρδος της ΣΜ, δηλ **τα 10dB**

### 3. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM

#### 3.1. Ανάπτυξη μονάδων στο MULTISIM

Σχεδιάζουμε το κύκλωμα μας στο Electronics WorkBench (MULTISIM) προκειμένου να ελέγχουμε 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 ημιτονοειδές σήμα.

Εισάγουμε λοιπόν τις τέσσερις (4) μονάδες τύπου notch του φίλτρου που έχουν σχεδιασθεί στην προηγούμενη φάση της εργασίας στο περιβάλλον MULTISIM και παίρνουμε το παρακάτω κύκλωμα:

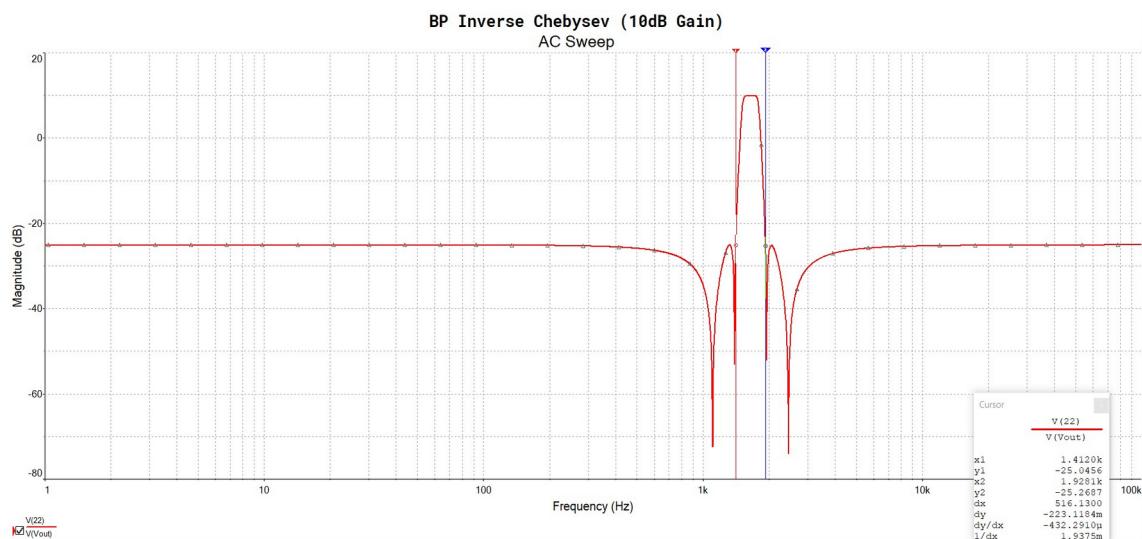


Εικ. 3: Κύκλωμα φίλτρου στο Multisim

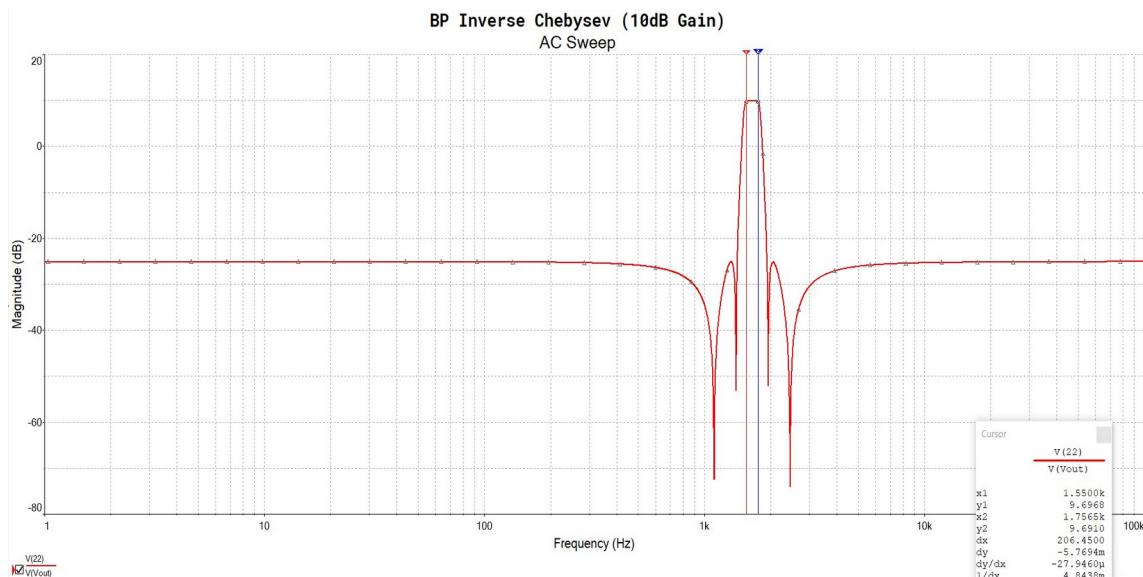
Στο παραπάνω κύκλωμα φαίνεται η ημιτονοειδής πηγή δοκιμής (αποτελείται από το άθροισμα – σε σειρά σύνδεση – πέντε συνιμοτονοειδών πηγών με πλάτη και συχνότητες ως φαίνονται στο κύκλωμα), η πρώτη μονάδα Fried LPN, η πρώτη μονάδα Fried HPN, η δεύτερη μονάδα Fried LPN, η δεύτερη μονάδα Fried HPN και η παθητική εξασθένηση κέρδους στην έξοδο του φίλτρου. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις τιμές στοιχειών του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκαν οκτώ (8) δεκαδικά ψηφία πράγμα που βοήθησε λίγο ώστε τα διαγράμματα να έχουν μικρότερη απόκλιση σε σύγκριση με τα θεωρητικά, χωρίς όμως αυτή να εξαλείφεται.

### 3.2. Αποκρίσεις Bode Πλάτους

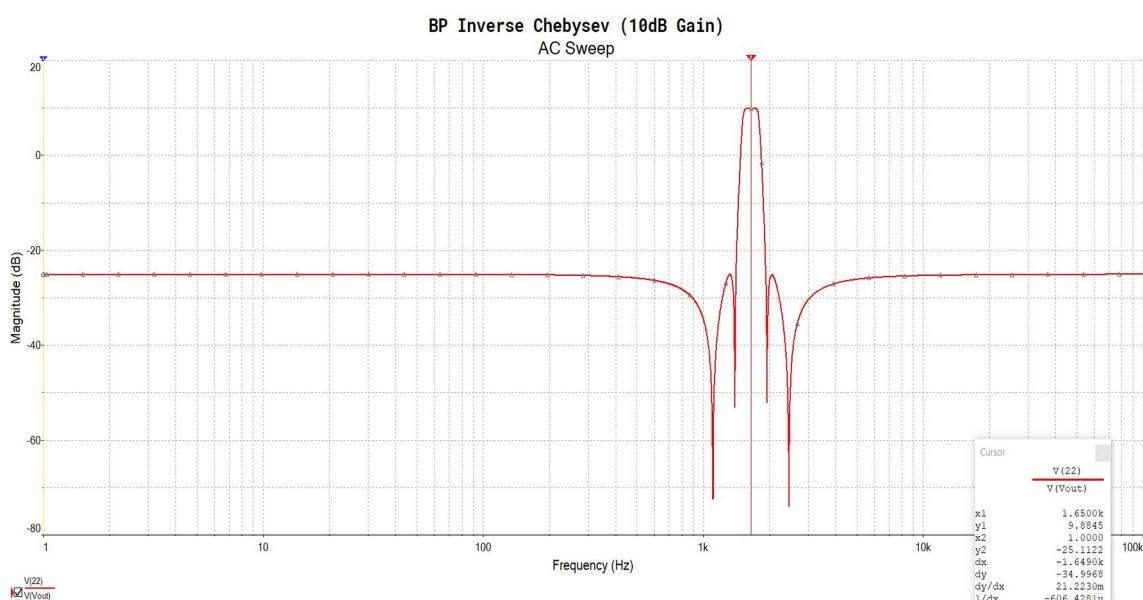
Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει κάνουμε AC Sweep για να πάρουμε την απόκριση Bode πλάτους ως προς τη συχνότητα του φίλτρου-κυκλώματος. Τα διαγράμματα που παίρνουμε φαίνονται παρακάτω :



Σχήμα 13: Simulation: AC Sweep (φαίνονται οι tracers στις  $f_1$  και  $f_2$ )



Σχήμα 14: Simulation: AC Sweep (φαίνονται οι tracers στις  $f_3$  και  $f_4$ )



Σχήμα 15: Simulation: AC Sweep (φαίνεται ο tracer στη συχνότητα  $f_\theta$ )

Σημείωση σχετικά με τα αριθμητικά σφάλματα:

Όπως γίνεται φανερό από τα σχήματα 12 έως 15, η ανάλυση του κυκλώματος στο Multisim διαφέρει λίγο από τη θεωρητική ανάλυση. Είναι σαν να “έχει κατέβει όλο το διάγραμμα Bode πλάτους κατά 0.1dB”. Ο συγγραφέας θεωρεί πως αυτό οφείλεται αφενός στη χρήση μη-ιδανικών Τ.Ε. και αφετέρου σε σφάλματα υπολογισμών, όπως τη συσσώρευση σφαλμάτων στρογγυλοποίησης.

Σε κάθε περίπτωση, από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι πληρούνται όλες οι προδιαγραφές σχεδίασης (με τη διαφορά στο κέρδος στη ζώνη διέλευσης να είναι όπως αναφέρεται περίπου 0.11dB πιο κάτω – όμως με βάση και σχετικά με αυτό οι υπόλοιπες προδιαγραφές πληρούνται όπως και στη θεωρητική ανάλυση). Το κύκλωμα υλοποιεί πράγματι ζωνοδιαβατό φίλτρο με απόκριση της μορφής Inverse Chebysev.

### 3.3. Απόκριση σε άθροισμα ημιτονοειδών σημάτων εισόδου

Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα το ζητούμενο σήμα (τάσης) διέγερσης το οποίο αποτελείται από πέντε (5) συν ημιτονοειδείς πηγές τάσης με τις παρακάτω προδιαγραφές:

i	A <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>
1	1.0 V	1616.66 Hz
2	0.6 V	2450.00 Hz
3	0.7 V	705.99 Hz
4	0.8 V	4627.49 Hz
5	0.6 V	5784.37 Hz

Πιν. 8: Στοιχεία των πηγών διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγή δοκιμής στο τεστάρισμα του κυκλώματος - φίλτρου

Έτσι, η συνολική πηγή διέγερσης θα είναι:

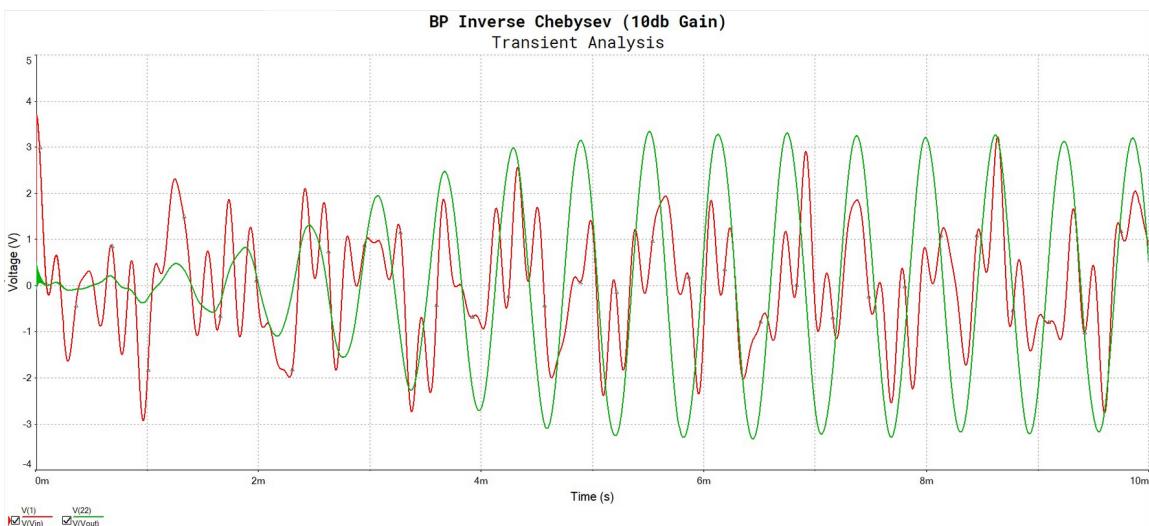
<b>v<sub>in</sub></b>
$v_{in}(t) = \cos(10157.82t) + 0.6 \times \cos(15393.80t) + 0.7 \times \cos(4435.91t) + 0.8 \times \cos(29075.42t) + 0.6 \times \cos(36344.27t)$ , $t \in \mathbb{R}$

Πιν. 9: Συνολική Πηγή Εισόδου του κυκλώματος

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο (ή κάνουμε Transient Analysis – οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα) στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα.

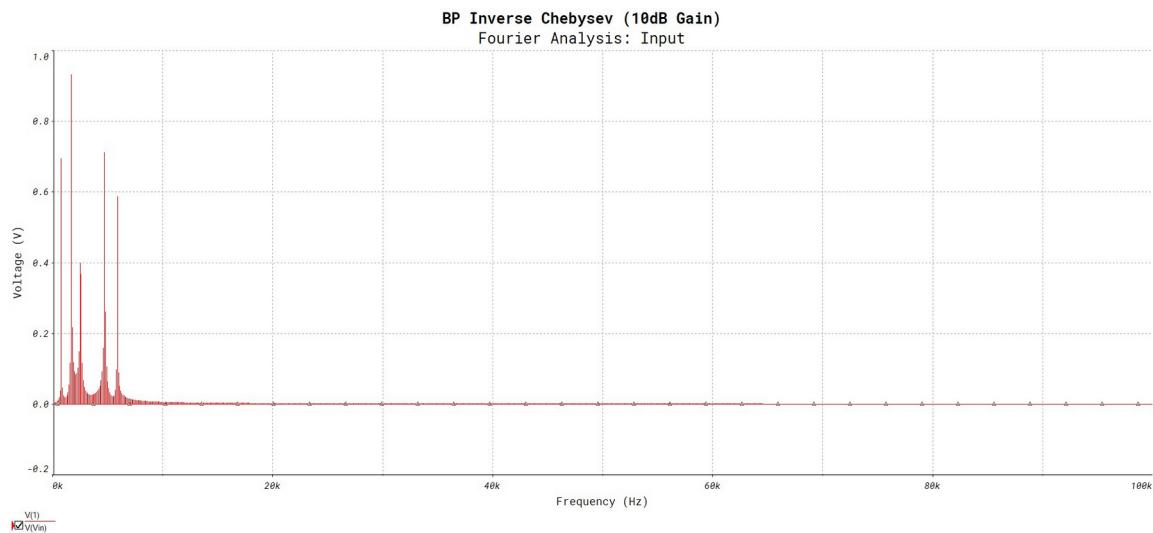
### 3.3.1. Σήμα Εισόδου – Εξόδου στο χρόνο

Το σήμα εισόδου (κόκκινο trace) είναι ένα ημιτονοειδές σήμα τάσης όπως περιγράφεται παραπάνω. Το σήμα εξόδου (πράσινο trace) φαίνεται, στο πεδίο του χρόνου, (φυσικά αυτό φαίνεται καλύτερα στο πεδίο της συχνότητας) να “κρατάει” τελικά μία μόνο συχνότητα και όχι να αποτελείται από πολλά ημίτονα όπως φαίνεται για το σήμα εισόδου στο χρόνο. Έχουν δηλαδή αποκοπεί οι συχνότητες εκτός της ζώνης διέλευσης από το σήμα, πράγμα που επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία του ζωνοδιαβατού φίλτρου που σχεδιάστηκε.

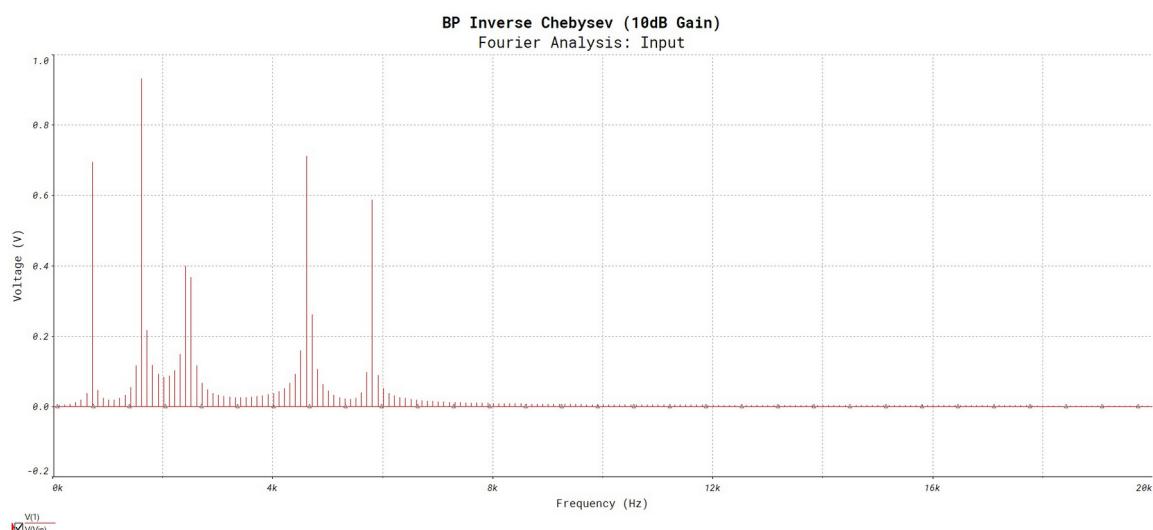


Σχήμα 16: Simulation: Transient Analysis

### 3.3.2. Φάσμα Σήματος Εισόδου



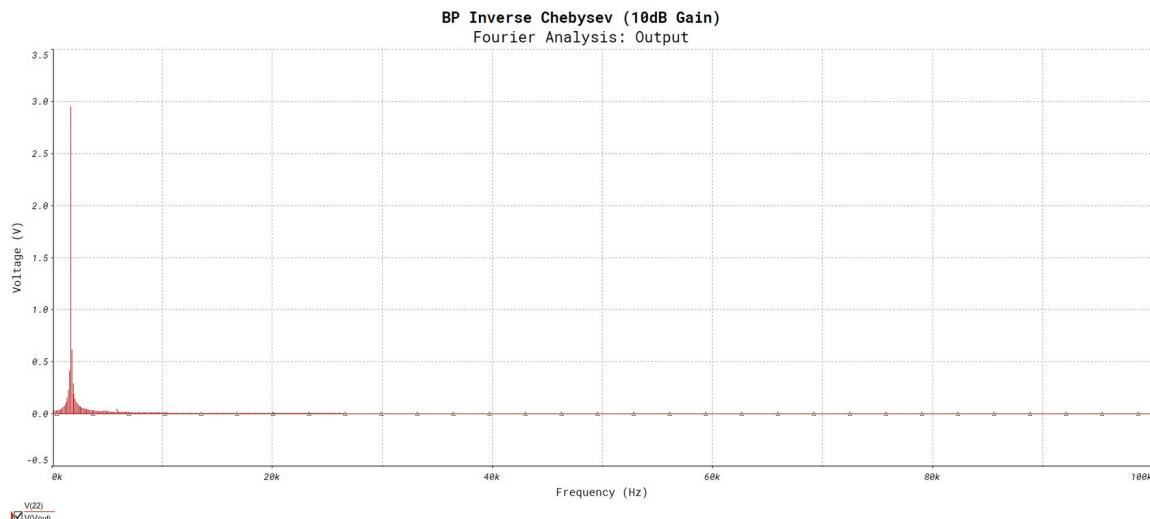
Σχήμα 17: Φάσμα Σήματος Εισόδου (Simulation: Fourier Analysis)



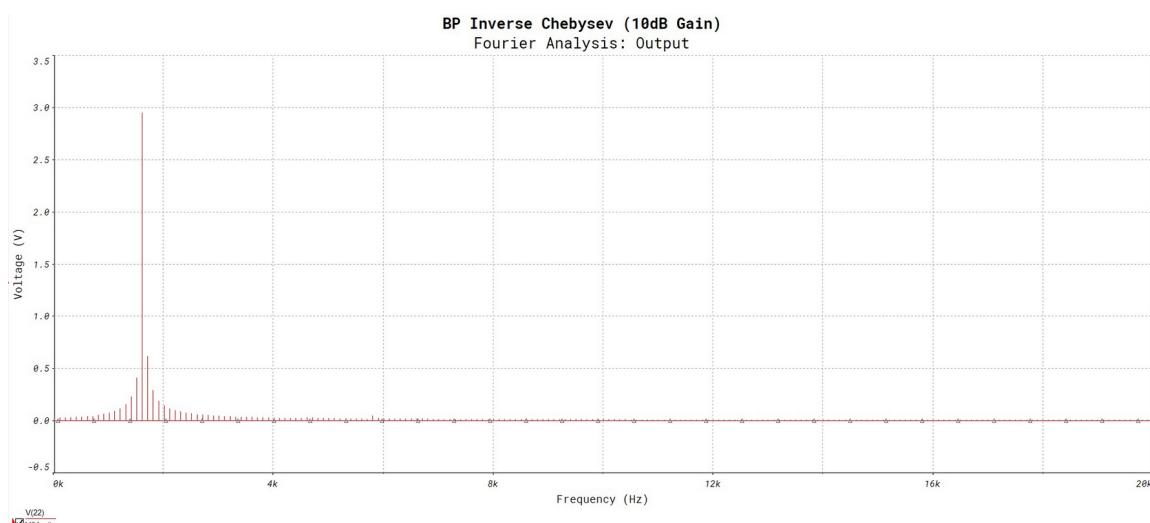
Σχήμα 18: Φάσμα Σήματος Εισόδου μεγενθυμένο  
(Simulation: Fourier Analysis)

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνοται ότι πράγματι το σήμα εισόδου αποτελείται από πέντε υπο-σήματα με συχνότητες που δηλώνονται από τις "κορυφές" στην ανάλυση Fourier εισόδου.

### 3.3.3. Φάσμα Σήματος Εξόδου



Σχήμα 19: Φάσμα Σήματος Εξόδου (Simulation: Fourier Analysis)



Σχήμα 20: Φάσμα Σήματος Εξόδου μεγενθυμένο  
(Simulation: Fourier Analysis)

Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα. Για την AC Sweep Simulation χρησιμοποιήθηκεων θεμελιώδης συχνότητα 100Hz και αριθμός αρμονικών ίσος με 1000.

Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι το σήμα εξόδου κρατάει μόνο μία “ζώνη” συχνοτήτων σε σχέση με το σήμα εισόδου. Το φίλτρο όπως φαίνεται από τις αρμονικές στη ζώνη διέλευσης εισάγει κέρδος στη ζώνη διόδου της τάξης επί τρία (x3) ή

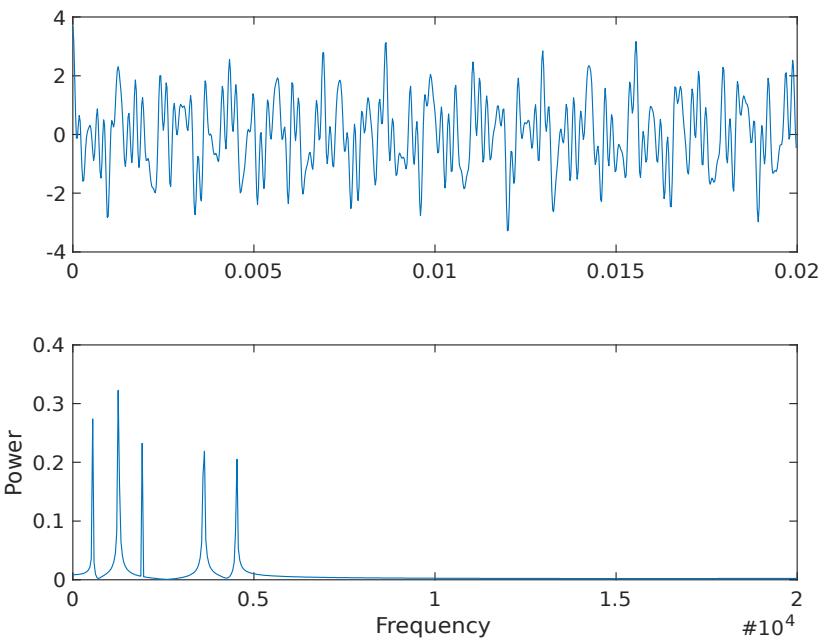
**10dB** όπως απαιτείται από τις προδιαγραφές σχεδίασης. Συγκεκριμένα, “κρατάει” το συνημίτονο της πηγής (1) με συχνότητα  $\sim 1617$  Hz, μέσα δηλαδή στη ζώνη διεύλεσης, και το ενισχύει περίπου επί τρία ( $\times 3.162$  για την ακρίβεια).

### 3.4. Τεστάρισμα με MatLAB

Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα σήματα εισόδου και εξόδου του φίλτρου και να δούμε την απόκριση του φίλτρου που δίνεται κατά την προσομοίωση με το MATLAB. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα.

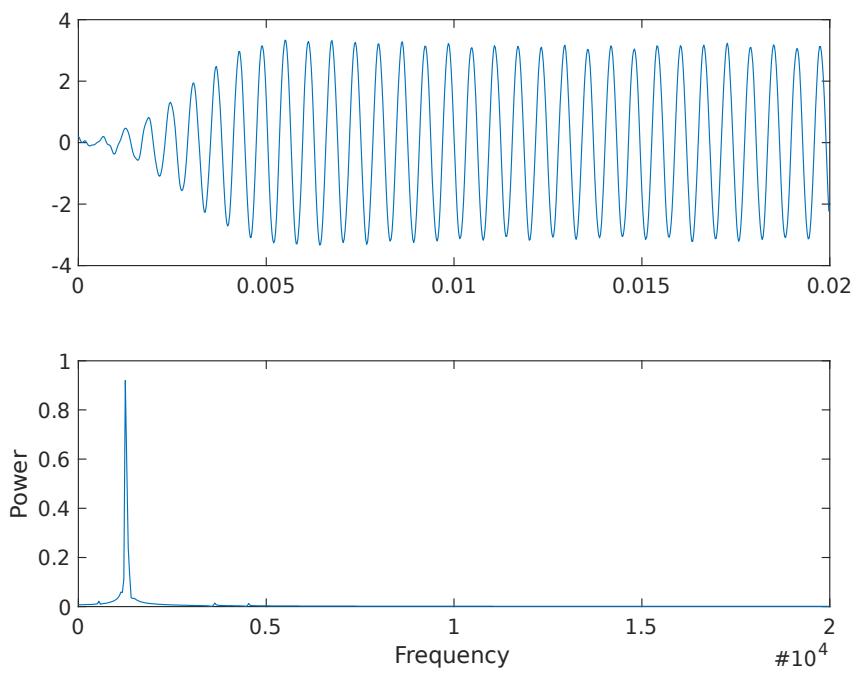
Κατά συνέπεια, στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε τα φάσματα FOURIER που προέρχονται από την `fft()` και τα οποία θα σχολιάσουμε στην συνέχεια. Το υπό εξέταση σήμα είναι ένα σήμα ως άθροισμα ημιτονοειδών σημάτων τάσης όπως φαίνεται παρακάτω.

#### 3.4.1. Σήμα & Φάσμα Εισόδου



*Σχήμα 21: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εισόδου & φάσμα αυτού*

### 3.4.2. Σήμα & Φάσμα Εξόδου



*Σχήμα 22: Ανάλυση MatLAB: Σήμα εξόδου & φάσμα αυτού ( φαίνεται η απόσβεση για συχνότητες μεγαλύτερες από  $f_s = 8.36\text{kHz}$  )*

### **3.5. Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερή η ζωνοδιαβατή λειτουργία του φίλτρου το οποίο επιδρά αποκόπτωντας τις χαμηλές συχνότητες (πριν τη συχνότητα  $f_1$ ) ενώ αποκόπτει και τις συχνότητες στη “δεξιά” ζώνη αποκοπής του φίλτρου (συχνότητες μεγαλύτερες από  $f_2$ ). Βλέπουμε ότι το φασματικό περιεχόμενο του παραγόμενου σήματος ενισχύεται στις συχνότητες που ανήκουν στη ζώνη διέλευσης συγκριτικά με το φασματικό περιεχόμενο του σήματος διέγερσης, ενώ το φασματικό περιεχόμενο του παραγόμενου από το ζωνοδιαβατό φίλτρο σήματος μηδενίζεται στις συχνότητες που είναι στη ζώνη αποκοπής. Είναι σαν να επιλέγει το κύκλωμα να κρατήσει μόνο το ένα από τα πέντε συνημίτονα με τα οποία διεγείρεται, αυτό του οποίου η συχνότητα είναι μέσα στη ζώνη διέλευσης, ενώ τα υπόλοιπα σχεδόν μηδενίζονται και άρα δεν περνούν στην έξοδο του φίλτρου.

Τέλος παρατηρούμε ότι και η φασματική ανάλυση σε θεωρητικό επίπεδο συμπίπτει με αυτή σε πειραματικό. Κατά συνέπεια συνάγεται το συμπέρασμα ότι το ζωνοδιαβατό φίλτρο με κρίσιμες συχνότητες ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  και  $f_4$ ) που σχεδιάστηκε λειτουργεί σωστά.

### **3.6. Παρατηρήσεις**

Όλα τα παραπάνω διαγράμματα διακρίνονται καλύτερα σε μεγένθυση και ειδικά τα διαγράμματα από MATLAB τα οποία αποθηκεύτηκαν σε μορφή SVG. Στο παραδοτέο φάκελο βρίσκεται και το MULTISIM project για εκ νέου αναπαραγωγή των αντίστοιχων διαγραμμάτων.