

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

*ΣΥΝΘΕΣΗ  
ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ  
ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ  
ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ*

**ΕΡΓΑΣΙΑ #1**

*ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.*

**7<sup>ο</sup> ΕΞΑΜΗΝΟ**

**Όνομα : ΚΑΜΠΑΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ**

**A.E.M. : 8151**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018

## Περιεχόμενα

Εργασία #1 : Σχεδίαση Κατωδιαβατών φίλτρων .....	3
Α. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου .....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς .....	5
• Ρύθμιση Κέρδους.....	8
Β. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	9
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	13

# ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

## Εργασία #1 : Σχεδίαση Κατωδιαβατών φίλτρων

### ΚΑΤΩΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ CHEBYSHEV

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

$$f_p = 4\text{KHz} \quad , \quad f_s = 7\text{KHz} \quad , \quad \text{και} \quad a_{\max} = 0.5 \text{ dB} \quad , \quad a_{\min} = 24 \text{ dB} \quad .$$

#### A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

##### • Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

Στο πλαίσιο της διαδικασίας σχεδίασης θα πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου που απαιτείται. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο :

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

Θα μετατρέψουμε τώρα τις συχνότητες σε γωνιακές συχνότητες, άρα θα έχουμε :

$$\omega_p = 2\pi f_p = 25133 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s = 43982 \text{ rad/sec}$$

Κανονικοποιούμε την συχνότητα  $\omega_p$  έτσι ώστε να παίρνουμε  $\Omega_p = 1$ . Έτσι θα έχουμε:

$$\Omega_s = \omega_s / \omega_p = 1.75$$

Αντικαθιστώντας θα βρούμε την τάξη:

$$n = \frac{\cosh^{-1} \left[ \frac{(10^{\frac{24}{10}} - 1)}{(10^{\frac{0.5}{10}} - 1)} \right]^{1/2}}{\cosh^{-1}(1.75)} = 3.88841 \xrightarrow{[3.8881]} \mathbf{n = 4}$$

Μετά την αντικατάσταση των δεδομένων μας από τον τύπο προκύπτει η τιμή n=4.

Επειδή το n που προέκυψε δεν είναι ακέραιος χρησιμοποιούμε τον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο από το n που υπολογίσαμε. Δηλαδή, **n = 4**.

Θα υπολογίσουμε τώρα την συχνότητα ημίσειας ισχύος από τον τύπο

$$\Omega_{hp} = \cosh \left[ \frac{1}{n} \cosh^{-1}((10^{a_{max}/10} - 1)^{-1/2}) \right] = \cosh \left[ \frac{1}{4} \cosh^{-1}((10^{0.5/10} - 1)^{-1/2}) \right]$$

$$\rightarrow \mathbf{\Omega_{hp} = 1.093102}$$

Η πραγματική  $\omega_{hp}$  είναι:

$$\mathbf{\omega_{hp} = \Omega_{hp} * \omega_p = 1.093102 * 25133 = 27473 \text{ rad/s}}$$

Έτσι η  $f_{hp}$  είναι:

$$\mathbf{f_{hp} = 4.3724 \text{ kHz}}$$

Στη συνέχεια αναζητούμε τους πόλους της συνάρτησης μεταφοράς, τις γωνίες και τα αντίστοιχα Q των ριζών. Αρχικά υπολογίζουμε τις γωνίες Chebyshev,  $\varphi_k = \frac{(2k-1)\pi}{2n}$ , για  $k = 1, 2, 3, 4$ . Προκύπτουν:  $\varphi_1 = 22.5^\circ, \varphi_2 = 67.5^\circ, \varphi_3 = 112.5^\circ, \varphi_4 = 157.5^\circ$

Έτσι προκύπτουν οι γωνίες Butterworth:

$$\mathbf{\psi_k = \pm 22.5^\circ, \pm 67.5^\circ}$$

Οι πόλοι βρίσκονται από τη σχέση:

$$p_k = -\sinh(\alpha) * \cos(\psi_k) + \cosh(\alpha) * \sin(\psi_k) * j$$

$$\text{Όπου } \alpha = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \left( (10^{\frac{a_{max}}{10}} - 1)^{-1/2} \right) = 0.4435$$

Έχουμε επίσης  $\Omega_{0\kappa} = |p_\kappa|$  και  $Q_\kappa = \frac{\Omega_\kappa}{2|Re(p_\kappa)|}$

Έτσι τελικά παίρνουμε:

$$p_{1,2} = -0.42334 \pm 0.420946j, \quad \Omega_{0,1,2} = 0.597, \quad Q_{1,2} = 0.7051$$

$$p_{3,4} = -0.175353 \pm 1.01625j, \quad \Omega_{0,3,4} = 1.0313, \quad Q_{3,4} = 2.9406$$

Τα πραγματικά μέτρα των πόλων είναι:

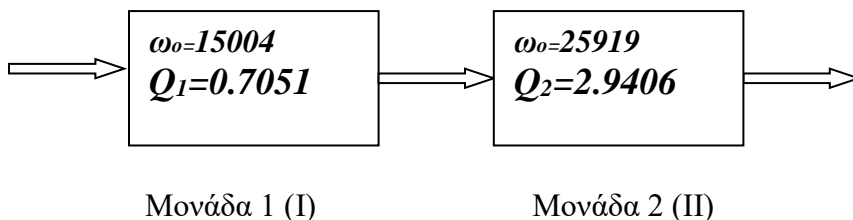
$$\omega_{0,1,2} = \Omega_{0,1,2} * \omega_p = 15004 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{0,3,4} = \Omega_{0,3,4} * \omega_p = 25919 \text{ rad/s}$$

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

$\Psi_\kappa$	Q	$p_\kappa$
$\pm 22.5$	0.7051	$-0.42334 \pm 0.420946j$
$\pm 67.5$	2.9406	$-0.175353 \pm 1.01625j$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να υλοποιηθεί θα αποτελείται από 2 μονάδες. Η πρώτη μονάδα αντιστοιχεί στο ζευγάρι μιγαδικών πόλων  $p_{1,2}$  και η δεύτερη μονάδα αντιστοιχεί στο ζευγάρι μιγαδικών πόλων  $p_{3,4}$ . οι οποίες και φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



#### • Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Θα θεωρήσουμε προσωρινά  $\omega_0 = 1$  και θα υλοποιήσουμε τις κανονικοποιημένες μονάδες. Στη συνέχεια θα κάνουμε κλιμακοποίηση πλάτους και συχνότητας έτσι ώστε οι μονάδες να έχουν τουλάχιστον έναν πυκνωτή με χωρητικότητα  $1\mu F$ . Μετά από την κλιμακοποίηση θα προκύψουν όλες οι πραγματικές τιμές των στοιχείων. Επίσης, με βάση το AEM 8151 θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς η στρατηγική σχεδίασης 1 των κυκλωμάτων Salley-Key, η κλιμακοποίηση θα γίνει ώστε οι μονάδες Salley-Key να έχουν τουλάχιστον έναν πυκνωτή με τιμή  $1\mu F$  και η ρύθμιση του κέρδους θα γίνει ώστε το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες να είναι 10dB.

### **ΜΟΝΑΔΑ (1)**

Η πρώτη αυτή μονάδα υλοποιείται από ένα κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key 2<sup>ης</sup> τάξης σύμφωνα με τη στρατηγική σχεδίασης (1) και αντιστοιχεί στο ζευγάρι μιγαδικών πόλων  $p_{1,2}$ . Έτσι έχουμε:

$$R_{11} = R_{12} = 1$$

$$C_{11} = C_{12} = 1$$

$$k = 3 - \frac{1}{Q_1} = 3 - \frac{1}{0.7051} = 1.5818$$

$$r_{11} = 1$$

$$r_{12} = 2 - \frac{1}{0.7051} = 0.5818$$

### **Κλιμακοποίηση**

Κλιμακοποιούμε τώρα το παραπάνω κύκλωμα ως εξής: α) κλιμακοποίηση συχνότητας, ώστε το κύκλωμα που θα υλοποιηθεί να έχει  $\omega_0 = 15004 \text{ rad/sec}$  και β) κλιμακοποίηση πλάτους, έτσι ώστε οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές να έχουν πρακτικές τιμές.

Επειδή  $\omega_0 = 15004$ , θεωρούμε  $k_f = 15004$ . Υποθέτουμε τώρα ότι το κύκλωμα θέλουμε να έχει πυκνωτές  $1\mu F$  και επομένως έχουμε:

$$C_{\text{new}} = \frac{1}{k_f k_m} C_{\text{old}}$$

Άρα:

$$k_m = \frac{1}{k_f} 10^6 = \frac{1}{15004} 10^6 = 66.6475$$

όπου  $k_m$  συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους και σύνθετων αντιστάσεων. Οι τιμές των αντιστάσεων προκύπτουν από την σχέση:

$$R_{\text{new}} = k_m R_{\text{old}}$$

Άρα

$$R_{11} = R_{12} = r_{11} = 66.6475 \Omega, \quad r_{12} = 38.7743 \Omega$$

### **ΜΟΝΑΔΑ ( II )**

Η πρώτη μονάδα υλοποιείται από ένα κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key 2<sup>ης</sup> τάξης σύμφωνα με τη στρατηγική σχεδίασης (1) και αντιστοιχεί στο ζευγάρι μιγαδικών πόλων  $p_{3,4}$ . Έτσι έχουμε:

$$R_{12} = R_{22} = 1$$

$$C_{12} = C_{22} = 1$$

$$k = 3 - \frac{1}{Q^2} = 3 - \frac{1}{2,9406} = 2.66$$

$$r_{12} = 1$$

$$r_{22} = 2 - \frac{1}{2,9406} = 1.6$$

### **Κλιμακοποίηση**

Κλιμακοποιούμε τώρα το παραπάνω κύκλωμα ως εξής: α) κλιμακοποίηση συχνότητας, ώστε το κύκλωμα που θα υλοποιηθεί να έχει  $\omega_0 = 25919 \text{ rad/sec}$  και β) κλιμακοποίηση πλάτους, έτσι ώστε οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές να έχουν πρακτικές τιμές.

Επειδή  $\omega_0 = 25919$ , θεωρούμε  $k_f = 25919$ . Υποθέτουμε τώρα ότι το κύκλωμα θέλουμε να έχει πυκνωτές  $1 \mu\text{F}$  και επομένως έχουμε:

$$C_{\text{new}} = \frac{1}{k_f k_m} C_{\text{old}}$$

Άρα:

$$k_m = \frac{1}{k_f} 10^6 = \frac{1}{25919} 10^6 = 38.5823$$

όπου  $k_m$  συντελεστής κλιμακοποίησης πλάτους και σύνθετων αντιστάσεων. Οι τιμές των αντιστάσεων προκύπτουν από την σχέση:

$$R_{\text{new}} = k_m R_{\text{old}}$$

Άρα

$$R_{12} = R_{22} = r_{12} = 38.5823\Omega, \quad r_{22} = 64.0438\Omega$$

$$C_1 = C_2 = 1\mu\text{F}$$

Το τελικό πραγματικό κύκλωμα Salley-Key που προκύπτει για την δεύτερη μονάδα θα είναι το ίδιο με την πρώτη με την διαφορά ότι οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών είναι διαφορετικές.

### • Ρύθμιση Κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου να είναι 10dB στις χαμηλές συχνότητες όπως και μας ζητείται στις προδιαγραφές του φίλτρου.

### Συναρτήσεις Μεταφοράς Μονάδων

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

$$T_1(s) = \frac{k_1 \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{1.5818 * 15004^2}{s^2 + \frac{15004}{0.7051}s + 15004^2}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα, Sallen-Key 2<sup>ης</sup> τάξης , η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_2(s) = \frac{k_2 \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} = \frac{2.66 * 25919^2}{s^2 + \frac{25919}{2.9406}s + 25919^2}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του κατωδιαβατού φίλτρου Chebyshev είναι:

$$T_{LP}(s) = K * T_1(s) * T_2(s):$$

$$T_{LP}(s) = K \frac{1.5818 * 14552^2}{s^2 + 20638.2s + 14552^2} \frac{2.66 * 25960^2}{s^2 + 8814.82s + 25960^2}$$

Θέτοντας όπου  $s = j\omega$  και αντικαθιστώντας  $\omega = 0$  προκύπτει το κέρδος DC.

$$T_{LP}(s = j\omega | \omega = 0) = K * 1.5818 * 2.66 = K * 4.2076$$

Αφού θέλουμε κέρδος 10 dB το  $K$  προκύπτει:

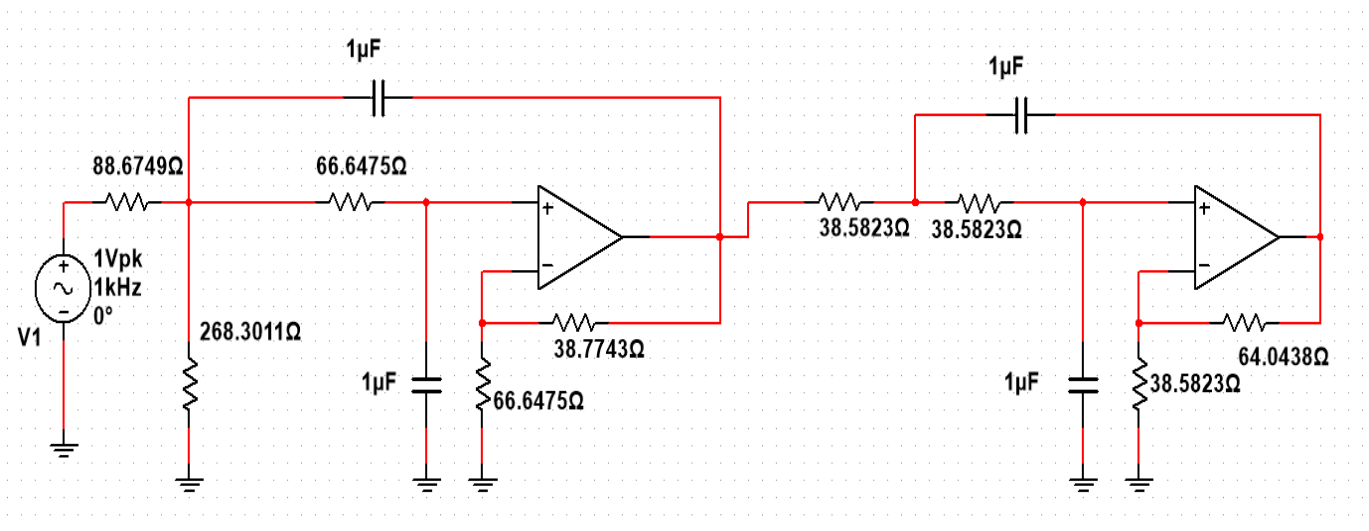
$$20 \log(4.2076K) = 10 \rightarrow K = 0.7516$$



Το κέρδος που ζητείται είναι  $20\log(x) = 10 \Rightarrow x = 3.1623\text{dB}$ . Επομένως, πρέπει να γίνει εξασθένιση του κέρδους παθητικά. Ο λόγος εξασθένισης και οι αντιστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

$$\alpha = \frac{3.1623}{k_1 k_2} = 0.7516 \quad \text{και} \quad Z_{11} = \frac{R_{11}}{a} = 88.6749\Omega \quad \text{και} \quad Z_{12} = \frac{R_{11}}{1-a} = 268.3011\Omega$$

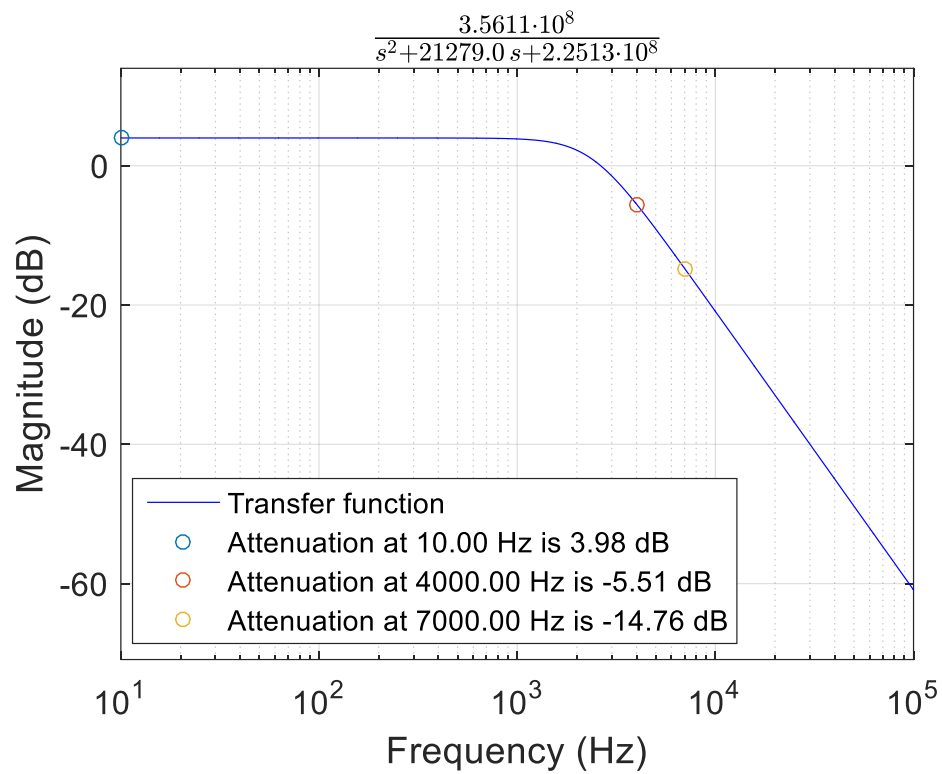
Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό δηλαδή κατωδιαβατό φίλτρο Chebyshev με ό,τι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.



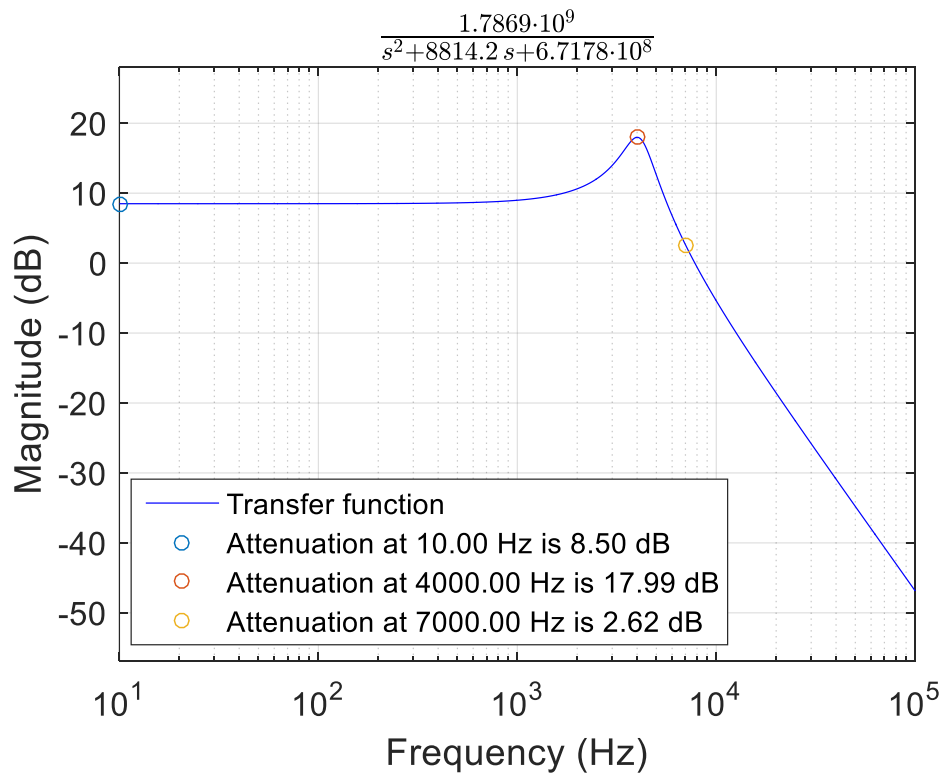
## B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

Εισάγουμε στο πρόγραμμα MATLAB τις επί μέρους συναρτήσεις μεταφοράς των 2 μονάδων του φίλτρου 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.

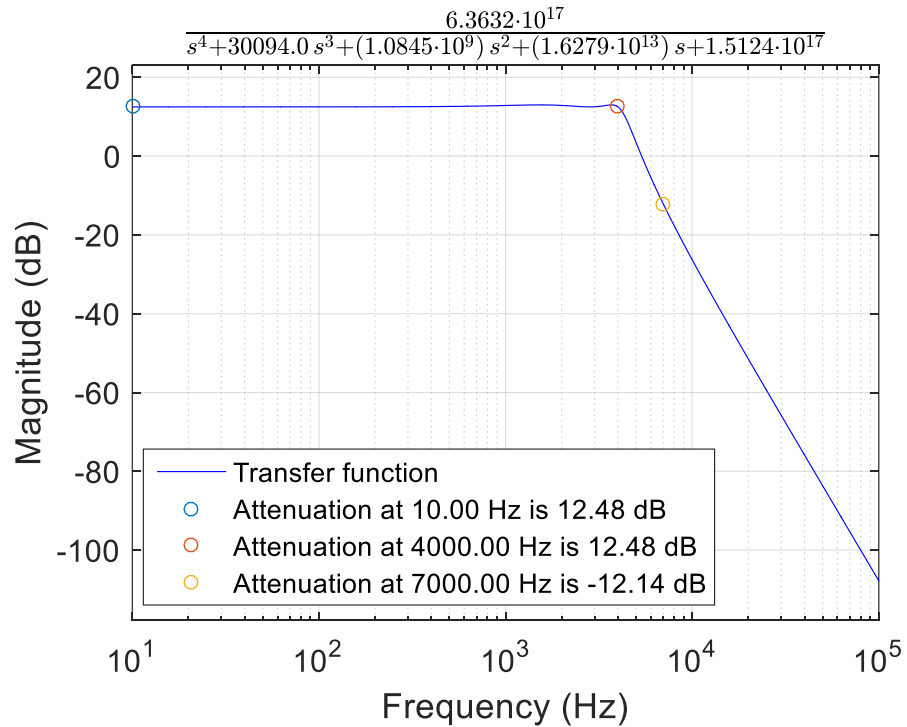
1<sup>η</sup> Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



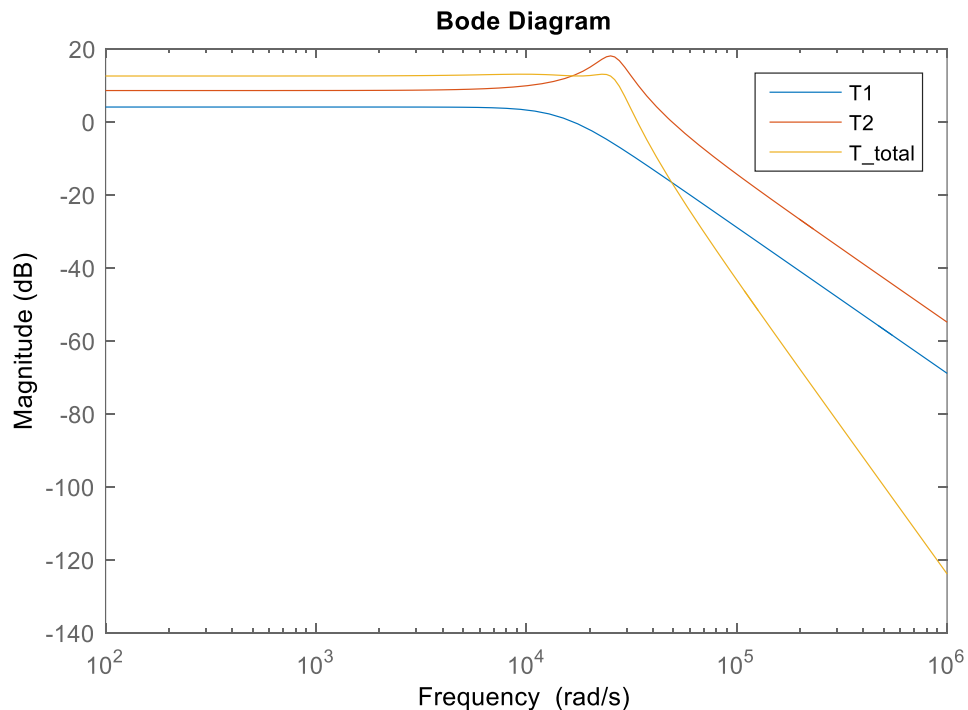
2<sup>η</sup> Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



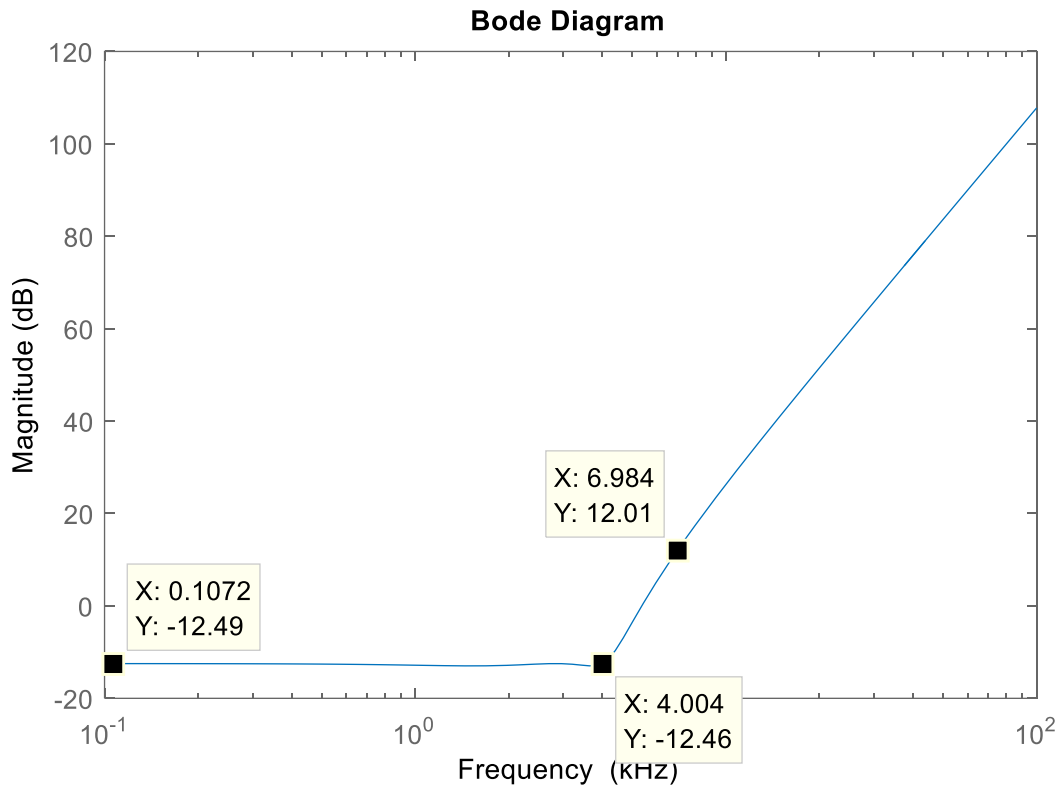
Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας.



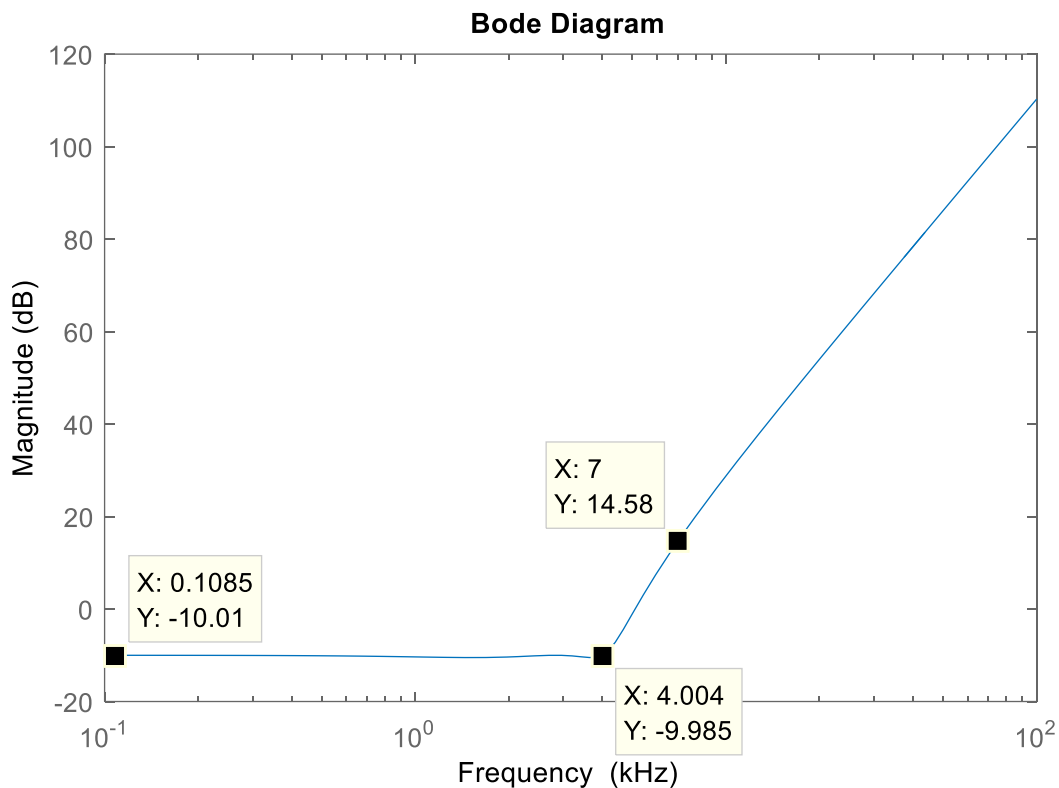
Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε όλες τις παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode.



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

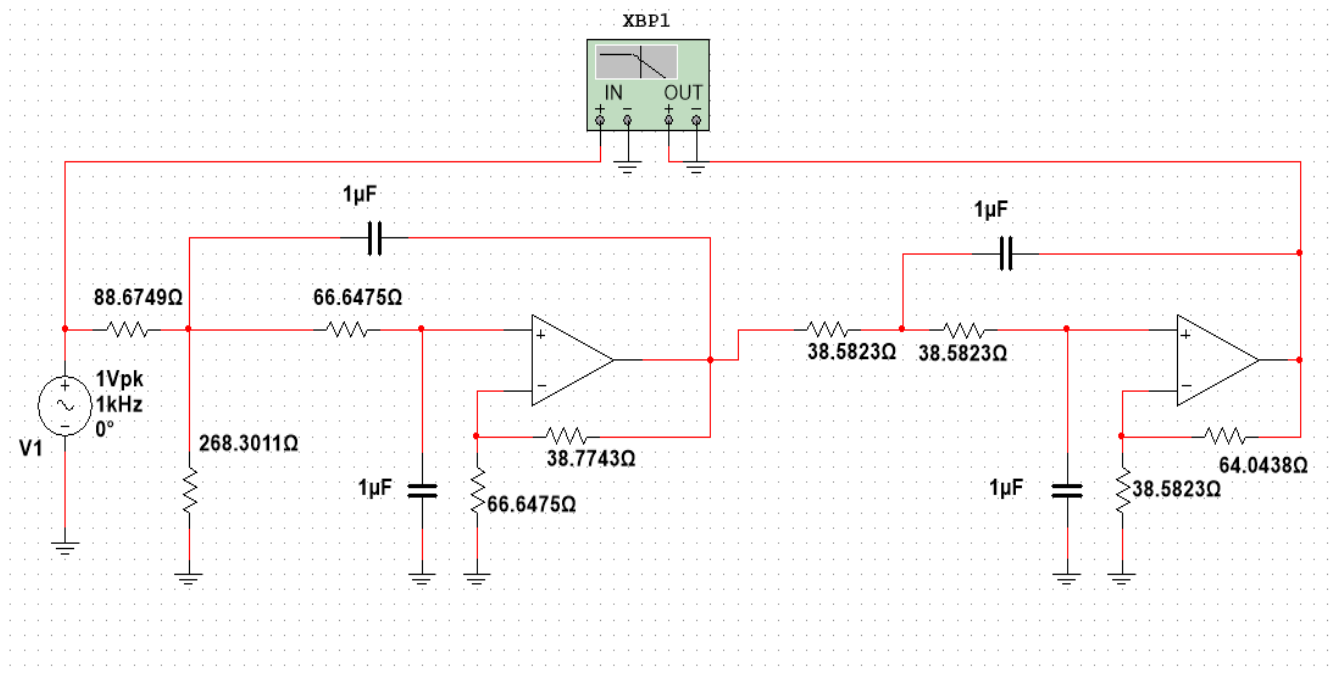


Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε την τιμή του κέρδους στις χαμηλές συχνότητες, τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και αποκοπής, δηλαδή την  $f_p=4\text{kHz}$ ,  $f_s=7\text{kHz}$ , καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις. Παρατηρούμε ότι η απόκριση στα 4kHz είναι 0.03 dB που είναι πολύ μικρότερη από την ζητούμενη τιμή. Η απόκριση στα 7kHz είναι 24.5 ενώ η θεωρητική τιμή είναι  $\alpha_{\min} = 24\text{dB}$ . Επομένως, είναι φανερό ότι και για τις 2 συχνότητες,  $f_s$  και  $f_p$  πληρούνται οι προδιαγραφές κέρδους που θέσαμε. Ωστόσο, για το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες δεν είναι 10dB όπως ζητήθηκε. Επομένως, κάνοντας την ρύθμιση κέρδους η οποία περιγράφηκε παραπάνω καταλήγουμε στην ακόλουθη απόκριση συχνότητας όπου όλες οι προδιαγραφές πληρούνται.

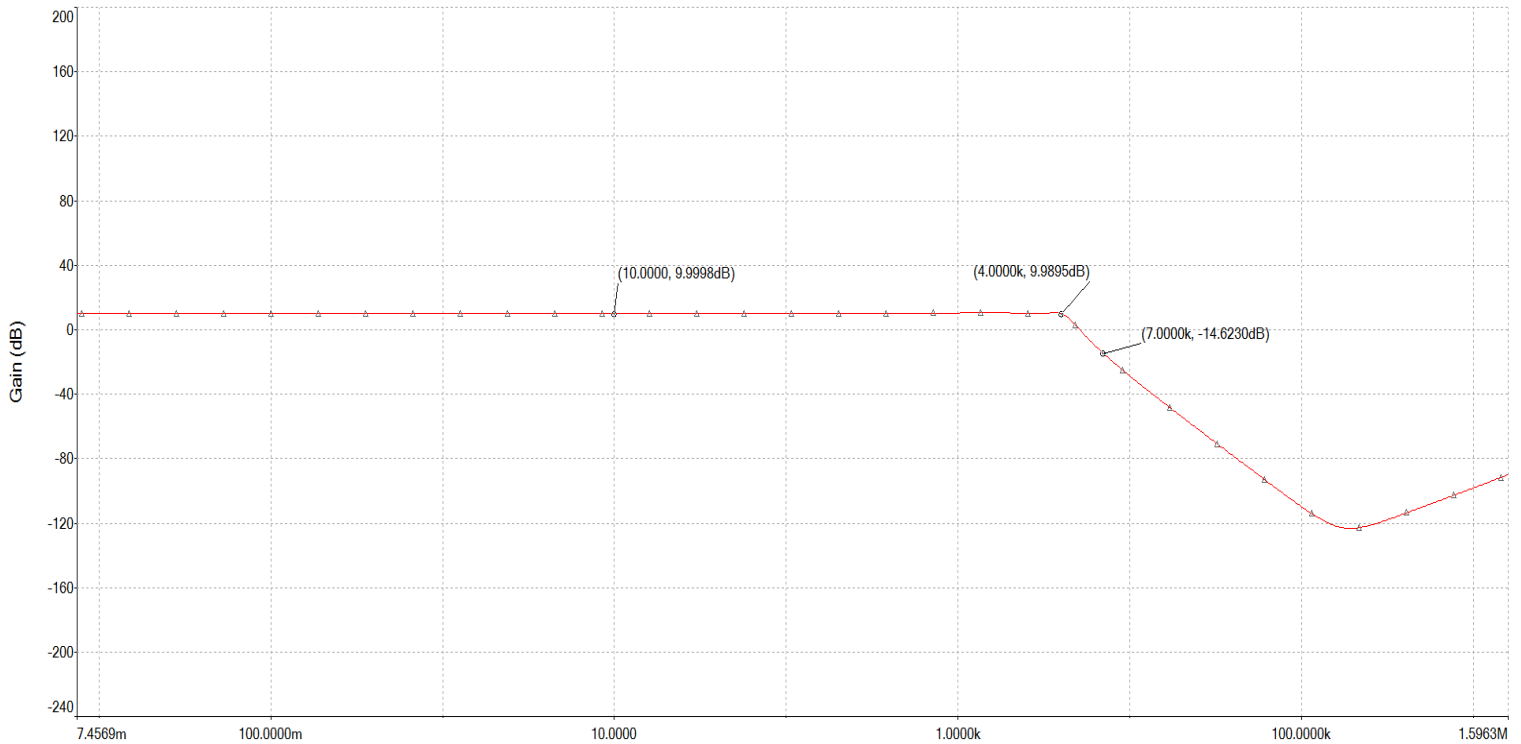


#### Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM

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 τις 2 μονάδες του φίλτρου που έχουν σχεδιασθεί στην προηγούμενη φάση της εργασίας στο περιβάλλον MULTISIM, συνδέουμε και τον Bode-Plotter και παίρνουμε το παρακάτω κύκλωμα.



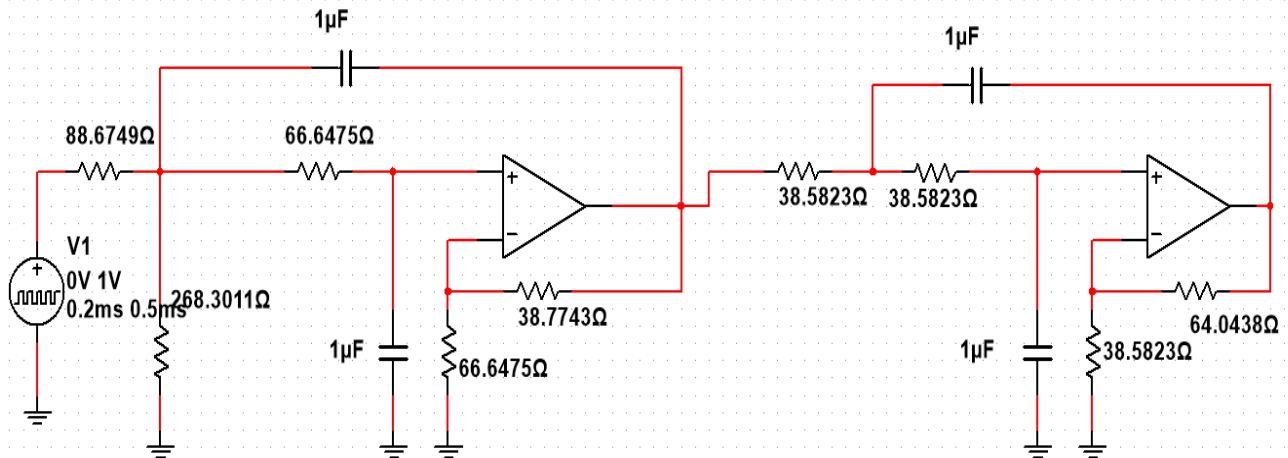
- Στο κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει χρησιμοποιούμε τον Bode-Plotter για να προκύψει η απόκριση συχνότητας του φίλτρου-κυκλώματος. Το διάγραμμα που παίρνουμε φαίνεται παρακάτω :



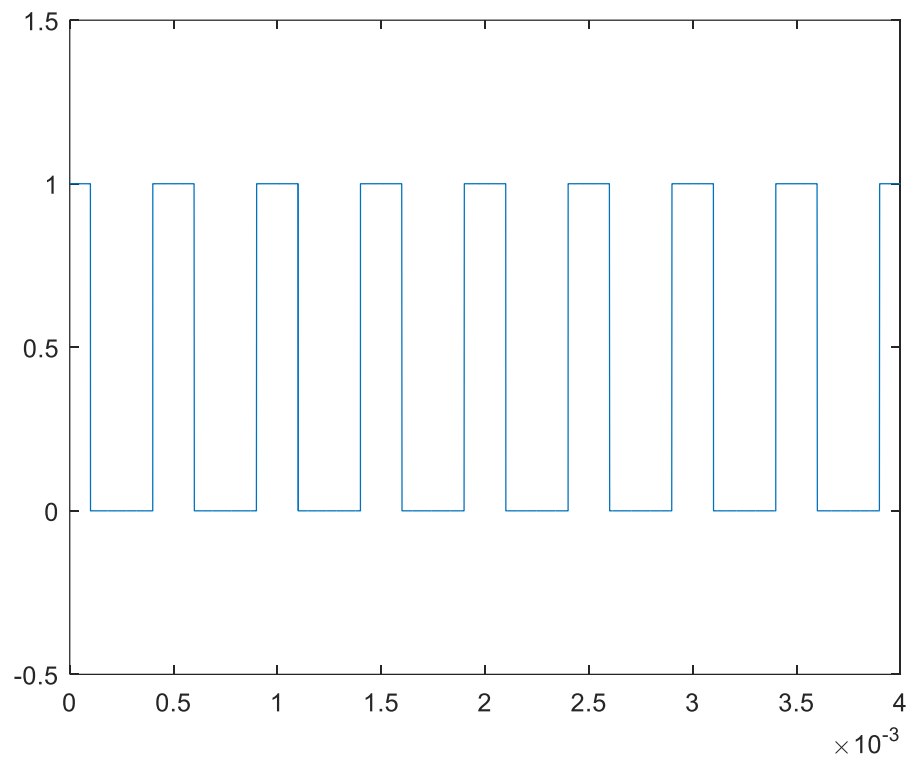
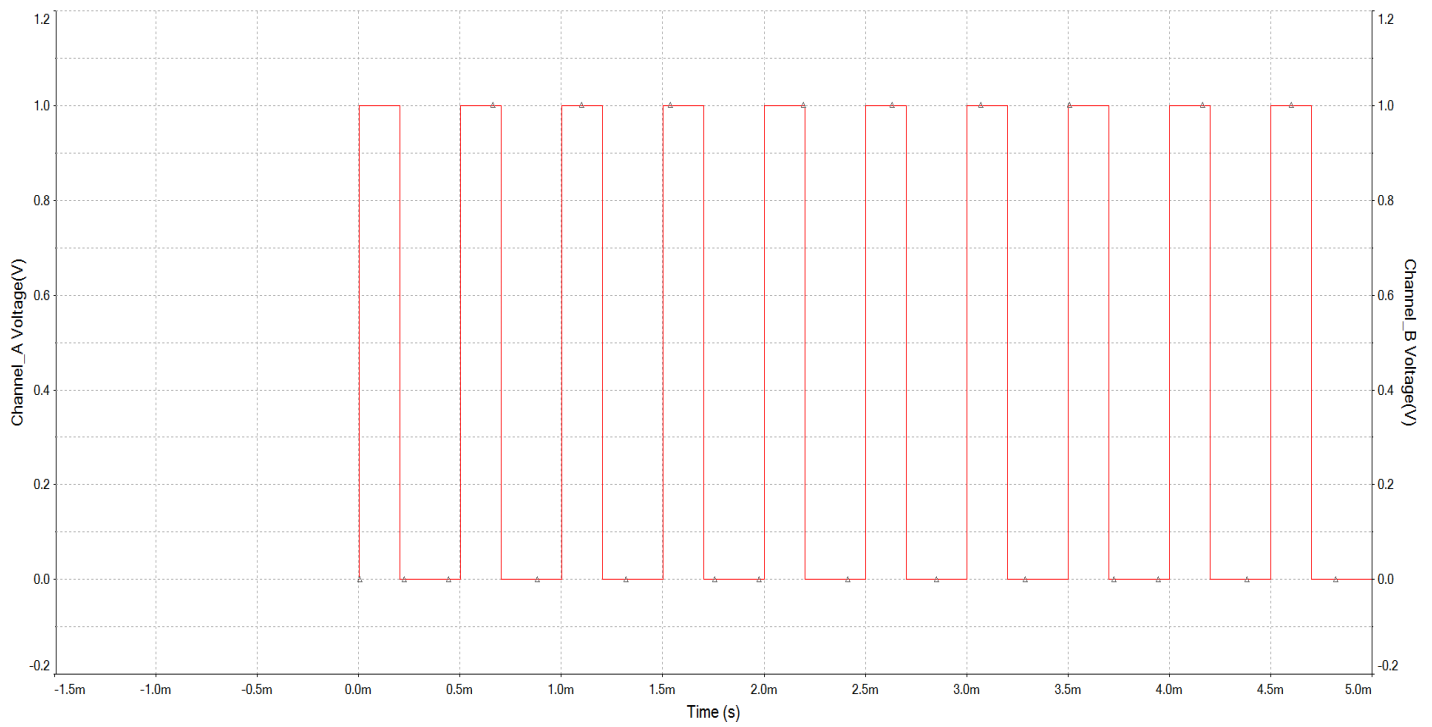
Bode Result

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι οι 3 προδιαγραφές που τέθηκαν από την εκφώνηση ικανοποιούνται. Συγκεκριμένα, το κέρδος στις χαμηλές συχνότητες είναι όπως απαιτείται 10dB, στην συχνότητα  $f_p = 4\text{kHz}$  η προδιαγραφή  $a_{\max} = 0.5\text{dB}$  ικανοποιείται καθώς σε αυτήν την περίπτωση έχουμε όπως είναι φανερό από το διάγραμμα μια αμελητέα μείωση του κέρδους και τέλος στην συχνότητα  $f_s = 7\text{kHz}$  η προδιαγραφή  $a_{\min} = 24\text{dB}$  ικανοποιείται καθώς υπάρχει 24.62dB απόσβεση περίπου. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματά μας επιβεβαιώνουν την θεωρητική ανάλυση καθώς και στις 2 περιπτώσεις όλες οι προδιαγραφές πληρούνται και μάλιστα οι τιμές των αποσβέσεων στις αντίστοιχες συχνότητες έχουν σχεδόν μηδενικές διαφορές.

- Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα μια πηγή διέγερσης με τετραγωνικό περιοδικό σήμα με θεμελιώδη συχνότητα  $2\text{kHz}$  και πλάτος παλμού  $0.2\text{ms}$ . Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα.

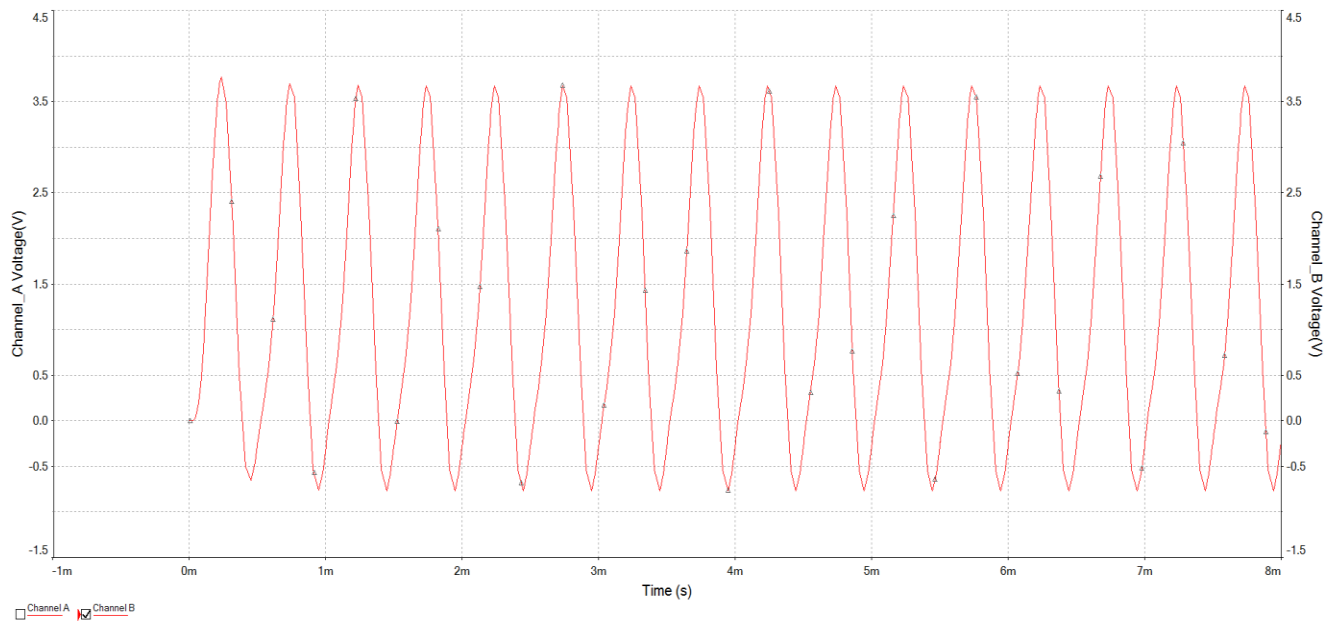


Σήμα Εισόδου :  $T=0.5\text{ms}$  ,  $\tau = 0.2\text{ms}$

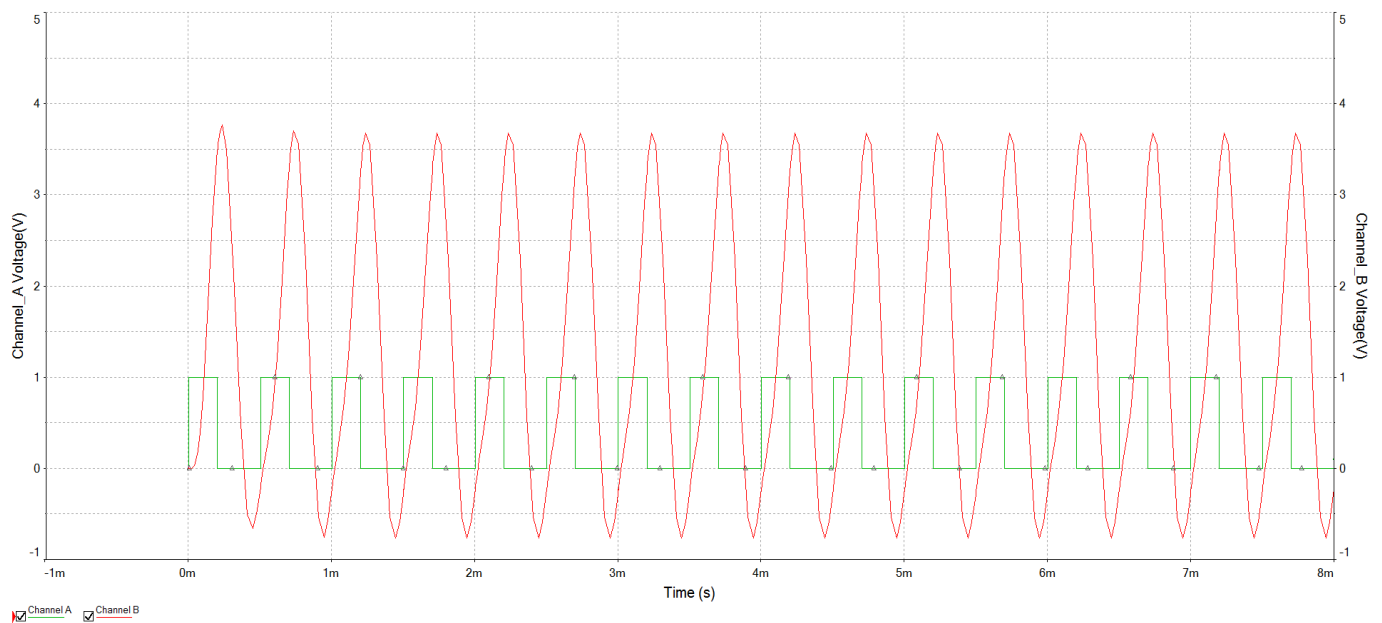




### Σήμα Εξόδου :



### Σήμα εισόδου και εξόδου σε κοινό διάγραμμα:



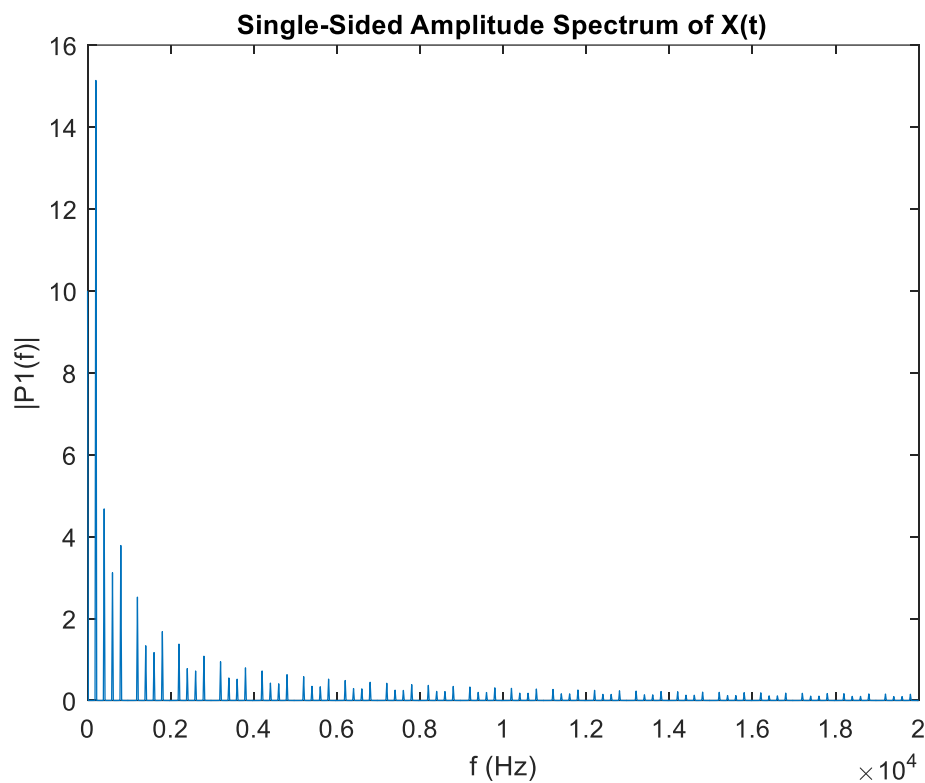
Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου του κατωδιαβατού φίλτρου Chebyshev που αποτελείται από 2 μονάδες. Στα παραπάνω σχήματα διαπιστώνουμε ότι το σήμα εισόδου όντως ενισχύεται κατά τον

παράγοντα  $k = 4.2074$ . Ενώ το σήμα εισόδου έχει πλάτος  $V_{p-p} = 1V$ , το σήμα εξόδου είναι ένα περιοδικό σήμα με  $V_{p-p}$  περίπου 4 φορές μεγαλύτερο από του σήματος εισόδου.

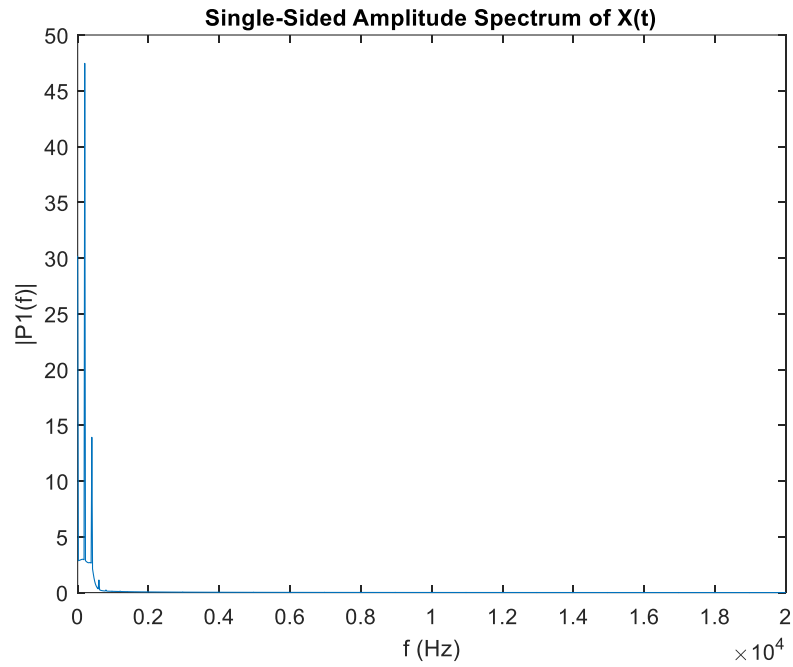
- Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του φίλτρου. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα εξετάσουμε τα φάσματα τόσο στο Multisim όσο και στο Matlab. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα.

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

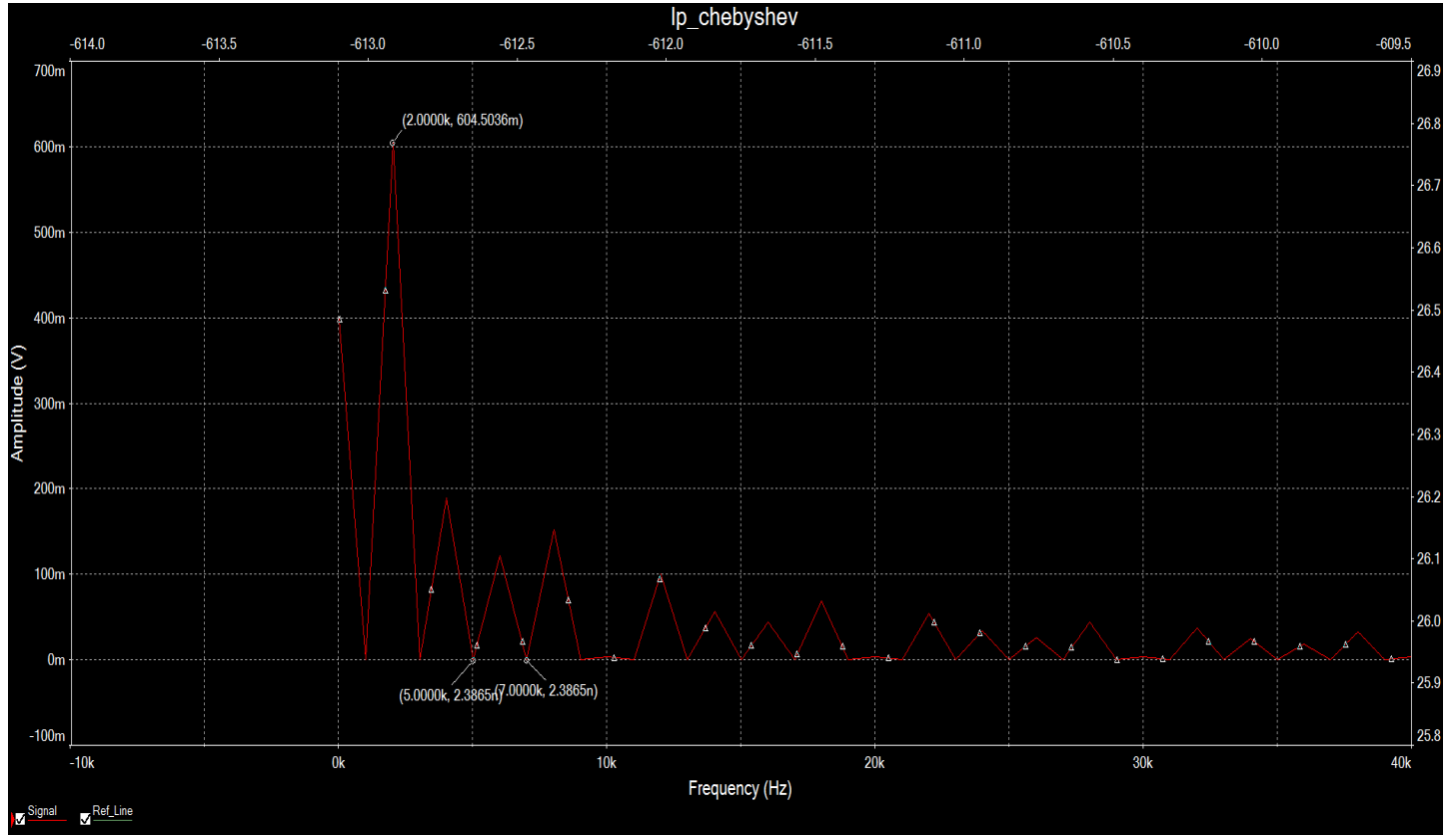
Φάσμα Σήματος Εισόδου MATLAB:



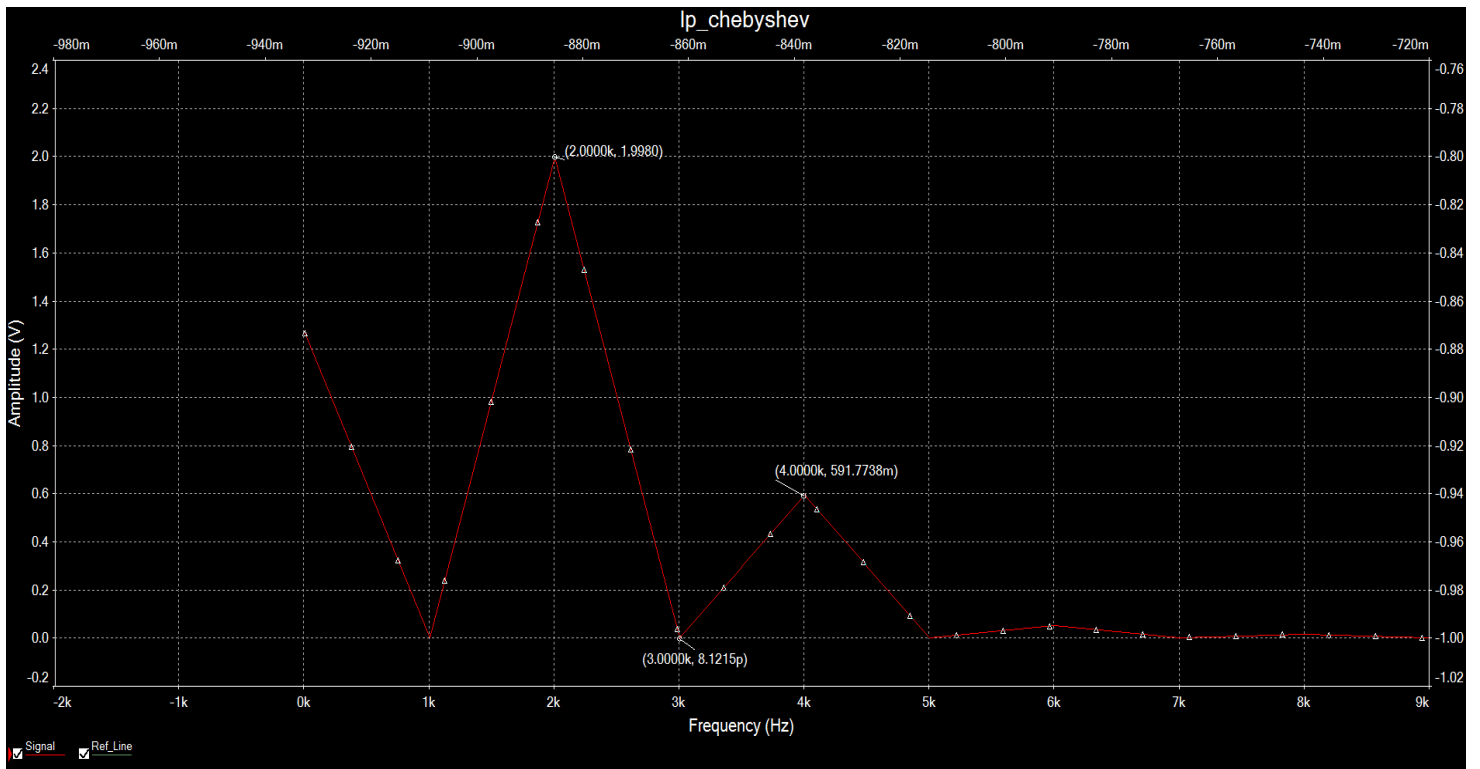
Φάσμα Σήματος Εξόδου MATLAB:



Φάσμα Σήματος Εισόδου Multisim:



### Φάσμα Σήματος Εξόδου Multisim:



Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα το φίλτρο που υλοποιήθηκε αποτελεί πράγματι ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Τα φάσματα εισόδου και εξόδου από τα 2 προγράμματα καταλήγουν σε παρόμοια αποτελέσματα. Στο φάσμα εισόδου υπάρχουν πολλές συχνότητες που συμμετέχουν στο φάσμα. Ωστόσο, στο φάσμα εξόδου παρατηρούμε ότι οι συχνότητες που είναι μεγαλύτερες της  $f_s = 7\text{kHz}$  «κόβονται». Τέλος, κάτι που αξίζει να επισημάνουμε είναι ότι το διάγραμμα του φάσματος εξόδου στο Matlab δεν συμφωνεί με το διάγραμμα του Multisim, το οποίο είναι σωστό. Πιθανόν να έχει γίνει κάποιο λάθος κατά την εύρεση του fft από τον πίνακα που προέκυψε από την lsim.