

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

ΣΥΝΘΕΣΗ
ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ
ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ
ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΙΑ #4

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.

7^ο ΕΞΑΜΗΝΟ

Όνομα : Μουρατίδης Αναστάσιος

A.E.M. : 9040

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020

Περιεχόμενα

Εργασία #4 : Σχεδίαση Ανωδιαβατών φίλτρων.....	3
Α. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου.....	3
• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	3
• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς.....	5
• Ρύθμιση Κέρδους.....	7
Β. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB.....	9
Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM.....	14

ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Εργασία #4 : Σχεδίαση Ανωδιαβατών φίλτρων

ΑΝΩΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ CHEBYSHEV

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

$$f_p = 3 \text{ KHz} \quad , \quad f_s = 1.6667 \text{ KHz} \quad ,$$

και

$$a_{\max} = 0.5 \text{ dB} \quad , \quad a_{\min} = 26.7778 \text{ dB} \quad .$$

A. Αναλυτική Σχεδίαση του Φίλτρου

• Υπολογισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς

Μετατρέπουμε τις συχνότητες σε κυκλικές συχνότητες:

$$\omega_p = 2\pi f_p = 18849 \text{ rad/sec} \quad \text{και} \quad \omega_s = 2\pi f_s = 10471 \text{ rad/sec}$$

Μετασχηματίζουμε τις προδιαγραφές και έχουμε:

$$\Omega_p = 1 \quad \text{και} \quad \Omega_s = \frac{\omega_p}{\omega_s} = 1.8$$

Έπειτα θα πρέπει να υπολογίσουμε την τάξη του φίλτρου που απαιτείται. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο :

$$n = \frac{\cosh^{-1} \left[\left(10^{a_{\min}/10} - 1 \right) / \left(10^{a_{\max}/10} - 1 \right) \right]}{\cosh^{-1} \Omega_s} = 4.0462$$

Αντικαθιστούμε τα δεδομένα στον τύπο και προκύπτει η τιμή 4.0462, που δεν είναι ακέραια, οπότε πρέπει να στρογγυλοποιήσουμε στην αμέσως μεγαλύτερη ακέραια τιμή, δηλαδή:

$$\underline{\underline{n = 5}}$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την συχνότητα ημίσειας ισχύος από τον τύπο

$$\Omega_{hp} = \cosh \left\{ \frac{1}{n} \cosh^{-1} \left(10^{\alpha_{max}/10} - 1 \right)^{-1/2} \right\} = 1.0593$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τους συντελεστές ε και a από τους παρακάτω τύπους:

$$\varepsilon = \left(10^{\alpha_{max}/10} - 1 \right)^{1/2} = 0.3493 \text{ και } a = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \left(\frac{1}{n} \right) = 0.3548$$

Η τάξη του φίλτρου είναι 5, οπότε οι γωνίες Butterworth είναι $\psi_k = 0^\circ, \pm 36^\circ, \pm 72^\circ$

Οι πόλοι Chebyshev προκύπτουν από τους τύπους:

$$p_k = -\sinh a \cdot \cos \psi_k + \cosh a \cdot \sin \psi_k ,$$

$$\text{όπου: } -\sigma_k = \sinh a \cdot \cos \psi_k \text{ και } \pm \omega_k = \cosh a \cdot \sin \psi_k$$

$$\Omega = \sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2} \text{ και } Q = \frac{\Omega}{2 \cdot \sigma_k}$$

Οπότε:

$$p_1 = -0.3623, \Omega_{0_1} = 0.3623 \text{ και } Q_1 = 0.5$$

$$p_{2,3} = -0.2931 \pm j0.6252, \Omega_{0_{2,3}} = 0.6905 \text{ και } Q_{2,3} = 1.1778$$

$$p_{4,5} = -0.112 \pm j1.0116, \Omega_{0_{4,5}} = 1.0117 \text{ και } Q_{4,5} = 4.545$$

Αντιστροφή των πόλων

Η συχνότητα ημίσειας ισχύος της ανωδιαβατής συνάρτησης είναι:

$$\omega_{hp} = \frac{\omega_p}{\Omega_{hp}} = \frac{18849}{1.0593} = 17795 \text{ rad/sec}$$

Οι πόλοι της ανωδιαβατής συνάρτησης είναι:

$$\sigma_1 = \frac{\omega_p}{\Sigma_1} = \frac{18849}{0.3623} = 52025 \text{ rad/sec}$$

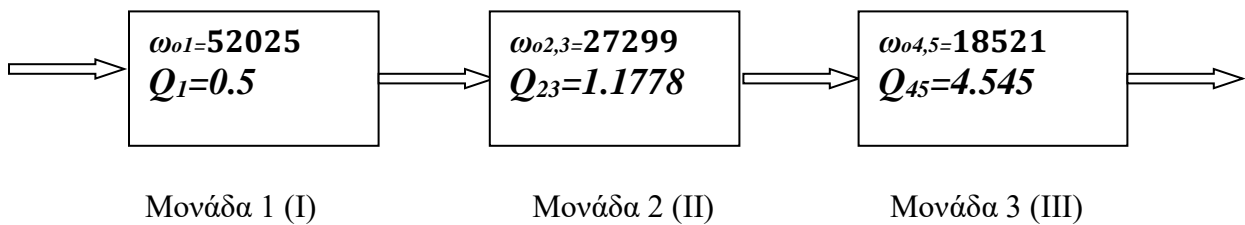
$$\omega_{o_{2,3}} = \frac{\omega_p}{\Omega_{0_{2,3}}} = \frac{18849}{0.6905} = 27299 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{o_{4,5}} = \frac{\omega_p}{\Omega_{0_{4,5}}} = \frac{18849}{1.0116} = 18521 \text{ rad/sec}$$

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

Ψ_k	Q	p_k
0°	0.5	-0.3623
$\pm 36^\circ$	1.1778	$-0.2931 \pm j0.6252$
$\pm 72^\circ$	4.545	$-0.112 \pm j1.0116$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να υλοποιηθεί θα αποτελείται από 3 μονάδες οι οποίες και φαίνονται παρακάτω σε διαγραμματική μορφή.



• Υλοποίηση της Συνάρτησης Μεταφοράς

Για την υλοποίηση των μονάδων (II) και (III) χρησιμοποιούμε το ανωδιαβατό φίλτρο Sallen - Key με την στρατηγική σχεδίασης (1), ενώ η πρώτη μονάδα αποτελεί μονάδα πρώτης τάξης. Η στρατηγική σχεδίασης επιλέχθηκε για να έχουμε κέρδος 10 dB στις υψηλές συχνότητες. Εφόσον, υλοποιούμε το φίλτρο κατά Chebyshev, κάθε πόλος έχει το δικό του μέτρο και επομένως η κλιμακοποίηση γίνεται για κάθε μονάδα ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων μονάδων, θα θεωρήσουμε ότι $\omega_o = 1$

ΜΟΝΑΔΑ (I)

Η πρώτη μονάδα είναι πρώτης τάξης. Θεωρούμε προσωρινά ότι $\omega_o = 1$ κι έχουμε:

$$R_{11} = 1, \quad C_{11} = 1, \quad k_1 = 1$$

Κλιμακοποίηση

Είναι $\omega_{o1} = 52025 \text{ rad/sec}$, οπότε επιλέγουμε $k_{f1} = 52025$. Επίσης, θέλουμε $C = 0.01 \mu F$, άρα η σταθερά κλιμακοποίησης του πλάτους υπολογίζεται ως εξής $k_{m1} = \frac{C_{11}}{k_{f1} \cdot C} = 1922$. Επομένως, κλιμακοποιούμε ως εξής:

$$C_{11} = 0.01 \mu F$$
$$R_{11} = R_{11} \cdot k_{m1} = 1.922 \text{ k}\Omega$$

ΜΟΝΑΔΑ (II)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η μονάδα αυτή θα υλοποιηθεί με ένα ανωδιαβατό φίλτρο Sallen – Key. Σύμφωνα με την στρατηγική σχεδίασης (1) προκύπτει:

$$C_{21} = C_{22} = 1 \text{ και } R_{21} = R_{22} = 1$$
$$r_{21} = 1, \quad r_{22} = 2 - \frac{1}{Q_{23}} = 1.151 \text{ και } k_2 = 3 - \frac{1}{Q_{23}} = 2.151$$

Κλιμακοποίηση

Είναι $\omega_{o2} = 27299 \text{ rad/sec}$, οπότε επιλέγουμε $k_{f2} = 27299$. Επίσης, θέλουμε $C = 0.01 \mu F$, άρα η σταθερά κλιμακοποίησης του πλάτους υπολογίζεται ως εξής $k_{m2} = \frac{C_{21}}{k_{f2} \cdot C} = 3663.1$. Επομένως, κλιμακοποιούμε ως εξής:

$$C_{21} = C_{22} = C = 0.01 \mu F$$
$$R_{21} = R_{21} \cdot k_{m2} = 3.6631 \text{ k}\Omega$$
$$R_{22} = R_{22} \cdot k_{m2} = 3.6631 \text{ k}\Omega$$
$$r_{21} = r_{21} \cdot k_{m2} = 3.6631 \text{ k}\Omega$$
$$r_{22} = r_{22} \cdot k_{m2} = 4.2161 \text{ k}\Omega$$

ΜΟΝΑΔΑ (III)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η μονάδα αυτή θα υλοποιηθεί με ένα ανωδιαβατό φίλτρο Sallen – Key. Σύμφωνα με την στρατηγική σχεδίασης (1) προκύπτει:

$$C_{31} = C_{32} = 1 \text{ και } R_{31} = R_{32} = 1$$

$$r_{31} = 1, \quad r_{32} = 2 - \frac{1}{Q_{45}} = 1.78 \text{ και } k_3 = 3 - \frac{1}{Q_{45}} = 2.78$$

Κλιμακοποίηση

Είναι $\omega_{o_3} = 18521 \text{ rad/sec}$, οπότε επιλέγουμε $k_{f2} = 18521$. Επίσης, θέλουμε $C = 0.01 \mu F$, άρα η σταθερά κλιμακοποίησης του πλάτους υπολογίζεται ως εξής $k_{m3} = \frac{C_{21}}{k_{f2} \cdot C} = 5399.3$. Επομένως, κλιμακοποιούμε ως εξής:

$$\begin{aligned} C_{31} &= C_{32} = C = 0.01 \mu F \\ R_{31} &= R_{31} \cdot k_{m3} = 5.3993 \text{ k}\Omega \\ R_{32} &= R_{32} \cdot k_{m3} = 5.3993 \text{ k}\Omega \\ r_{31} &= r_{31} \cdot k_{m3} = 5.3993 \text{ k}\Omega \\ r_{32} &= r_{32} \cdot k_{m3} = 9.6105 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

• Ρύθμιση Κέρδους

Θέλουμε να ρυθμίσουμε το κέρδος έτσι ώστε το κέρδος του φίλτρου στα 10 dB στις υψηλές συχνότητες. Το συνολικό κέρδος είναι $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 5.9796$. Οπότε για να φτάσουμε τα 10 dB θα πρέπει να αυξήσουμε το κέρδος του συνολικού φίλτρου:

$$20 \cdot \log(a \cdot k) = 10 \Rightarrow a \cdot 5.9796 = 10^{0.5} \Rightarrow a = 0.52884$$

Εφόσον το a είναι μικρότερο του 1, πρέπει να γίνει εξασθένηση του κέρδους παθητικά. Οπότε, χρησιμοποιούμε μία αναστρέφουσα συνδεσμολογία με κέρδος $k = -\frac{r_2}{r_1} = -0.52884$. Επιλέγουμε $r_1 = 10 \text{ k}\Omega$ και $r_2 = 5.2284 \text{ k}\Omega$. Επειδή, η λύση αυτή εισάγει αλλαγή φάσης, εισάγουμε μία επί πλέον αναστρέφουσα συνδεσμολογία με κέρδος μονάδα.

Συναρτήσεις Μεταφοράς Μονάδων

1. Για την πρώτη μονάδα, που είναι πρώτης τάξης, όπως είναι γνωστό η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_1(s) = \frac{s}{s + 52025}$$

2. Για την δεύτερη μονάδα, Sallen-Key, η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$T_2(s) = k_2 \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_{02,3}}{Q_{2,3}} + \omega_{02,3}^2} = \frac{2.151 \cdot s^2}{s^2 + 2.318 \cdot 10^4 \cdot s + 7.452 \cdot 10^8}$$

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

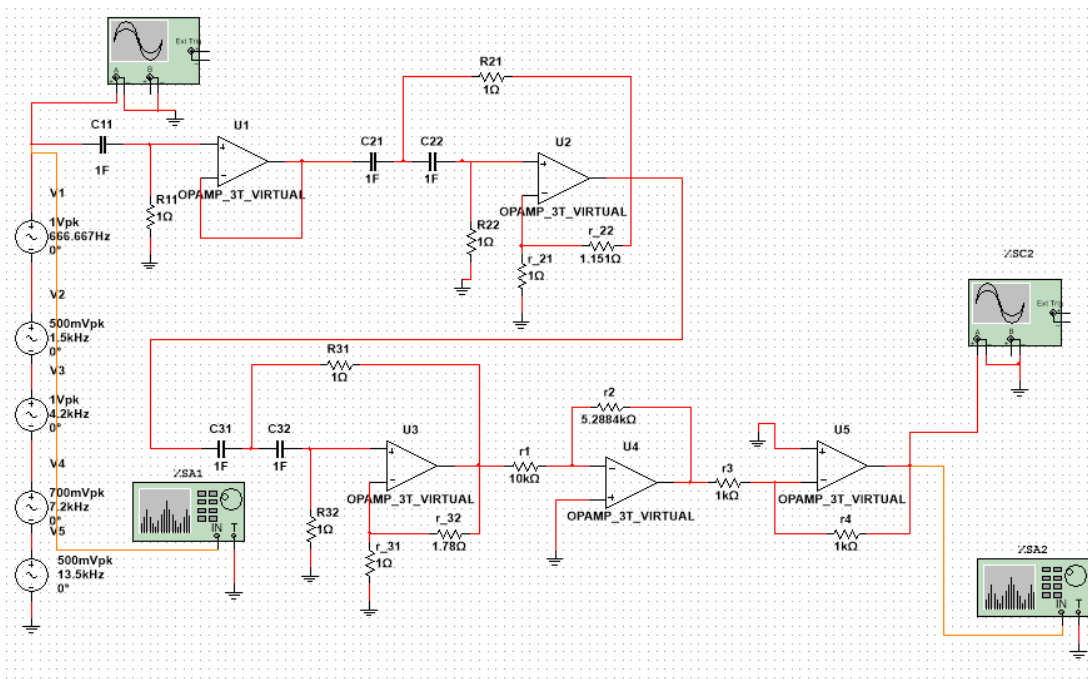
$$T_3(s) = k_3 \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_{04,5}}{Q_{4,5}} + \omega_{04,5}^2} = \frac{2.78 \cdot s^2}{s^2 + 4075 \cdot s + 3.43 \cdot 10^8}$$

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του ανωδιαβατού φίλτρου:

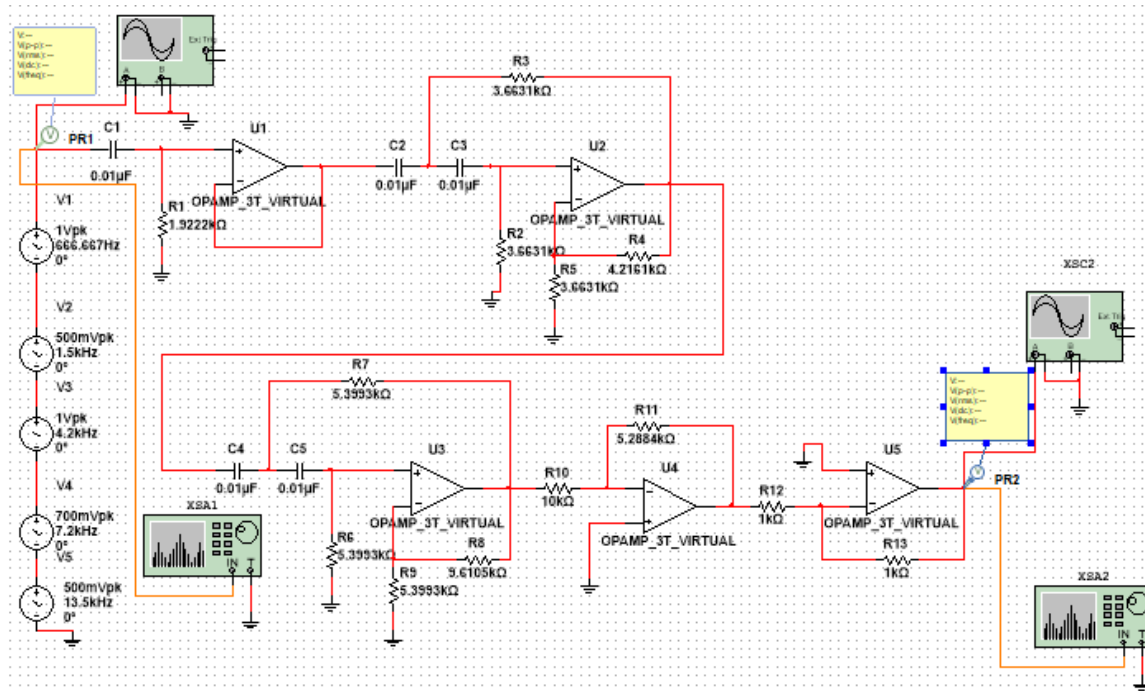
$$T_{HP}(s) = k \cdot T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot T_3(s)$$

$$T_{HP}(s) = \frac{3.162 \cdot s^5}{s^5 + 7.928 \cdot 10^4 \cdot s^4 + 2.601 \cdot 10^9 \cdot s^3 + 7.252 \cdot 10^{13} \cdot s^2 + 8.273 \cdot 10^{17} \cdot s + 1.33 \cdot 10^{22}}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κανονικοποιημένο κύκλωμα στο οποίο φαίνονται οι τρεις μονάδες αλλά και η απομόνωση μεταξύ 1^{ης} και 2^{ης} μονάδας προκειμένου να μην αλληλοεπιδρούν η μια στην άλλη. Τέλος, φαίνεται και η πρώτη αναστρέφουσα συνδεσμολογία για την ρύθμιση του κέρδους, καθώς κι η δεύτερη αναστρέφουσα συνδεσμολογία που συνδέθηκε για να αναιρέσει την αλλαγή φάσης που εισάγει η πρώτη.



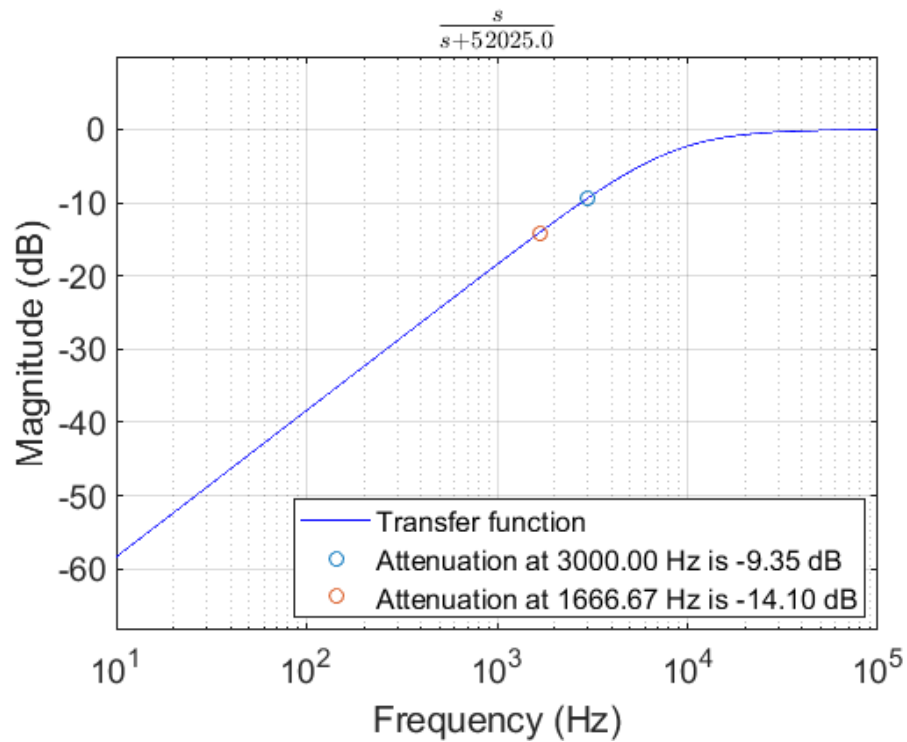
Παρακάτω φαίνεται το τελικό κύκλωμα, το επιθυμητό δηλαδή ανωδιαβατό φίλτρο Chebyshev με ό,τι στοιχείο είναι απαραίτητο αλλά και με τις απαιτούμενες τιμές όλων των στοιχείων για την ικανοποίηση των ζητούμενων προδιαγραφών.



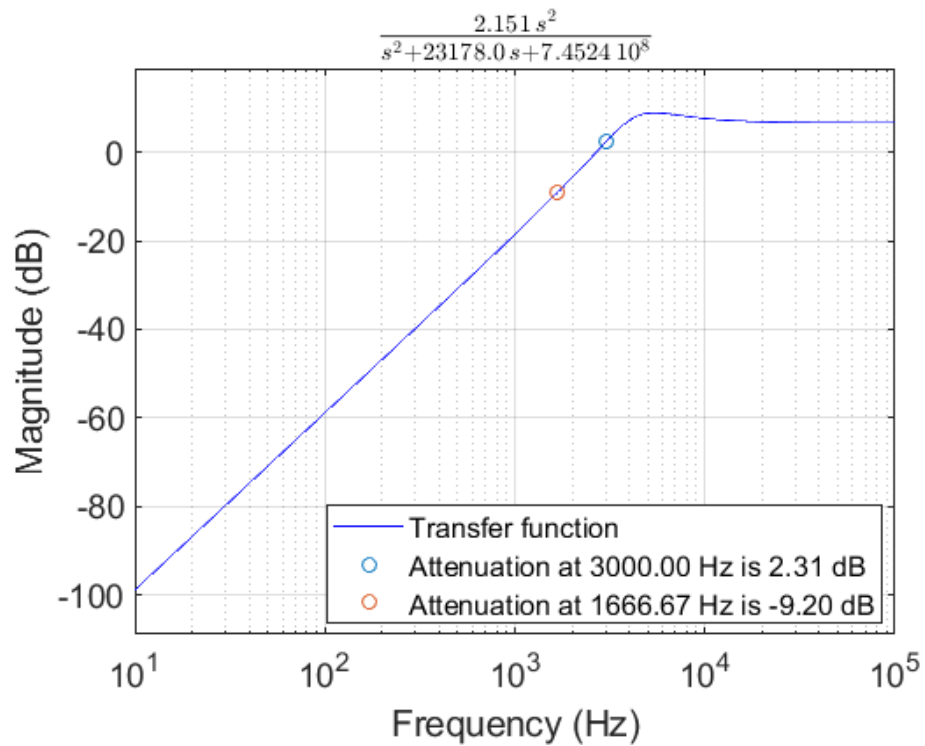
B. Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς στο MATLAB

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

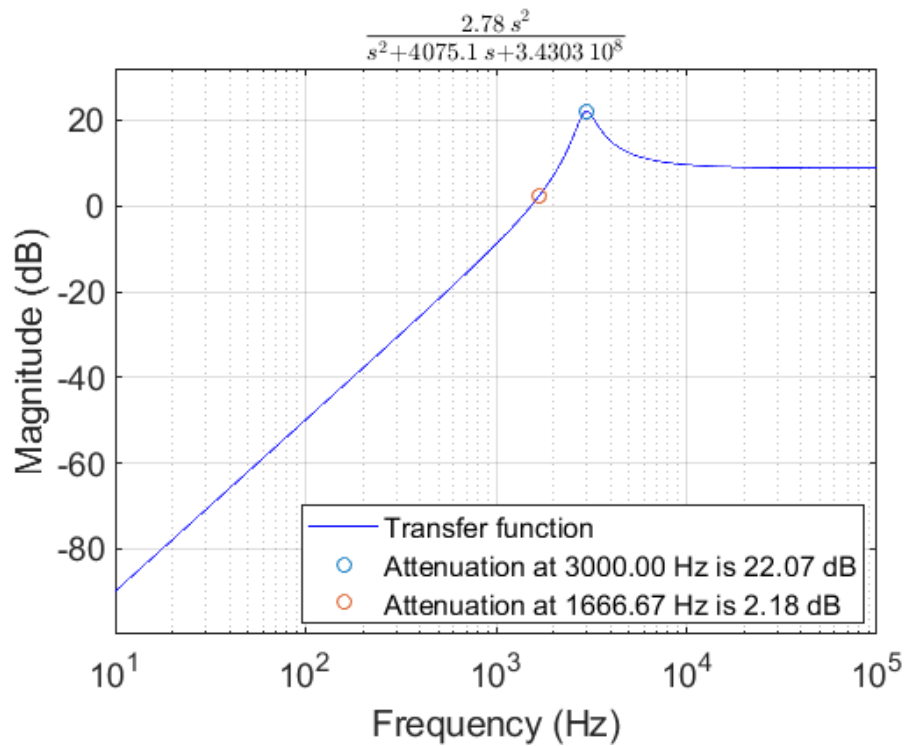
1^η Μονάδα : Ανωδιαβατό φίλτρο πρώτης τάξης.



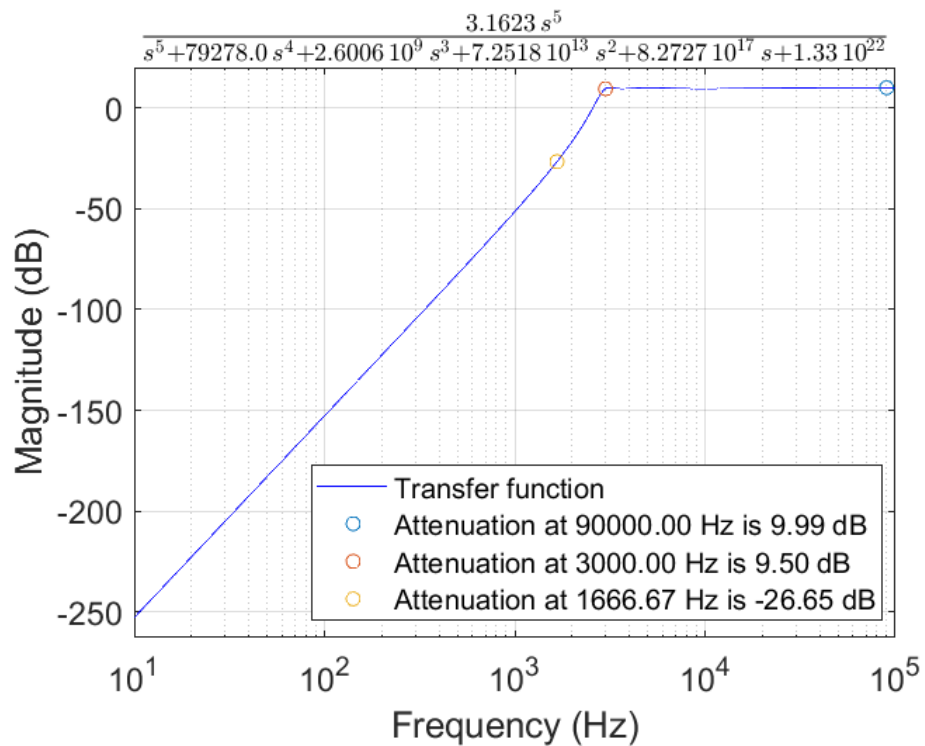
2^η Μονάδα : Ανωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key



3^η Μονάδα : Κατωδιαβατό φίλτρο Sallen-Key

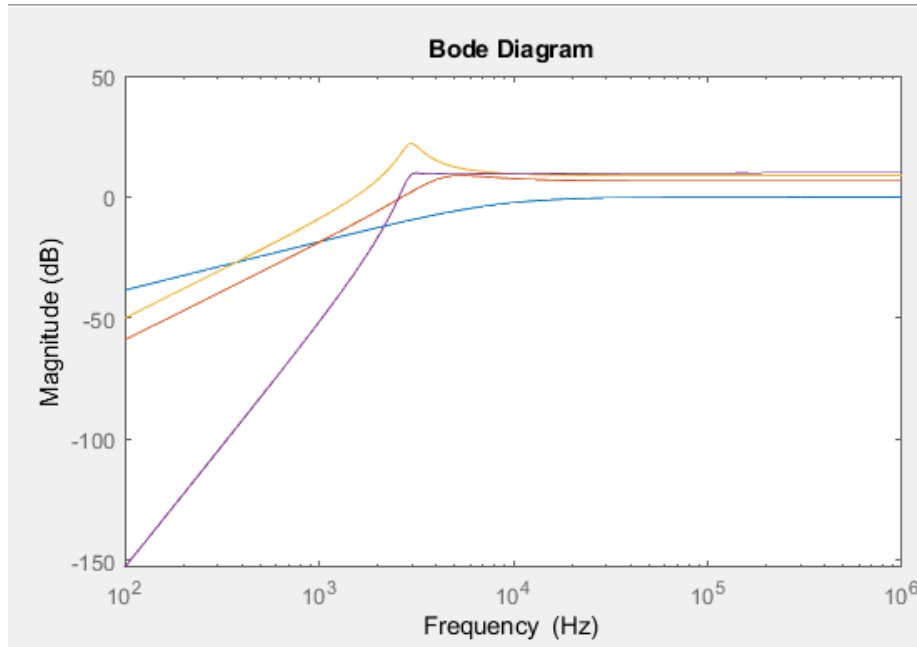


Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση πλάτους της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου συναρτήσει της συχνότητας.

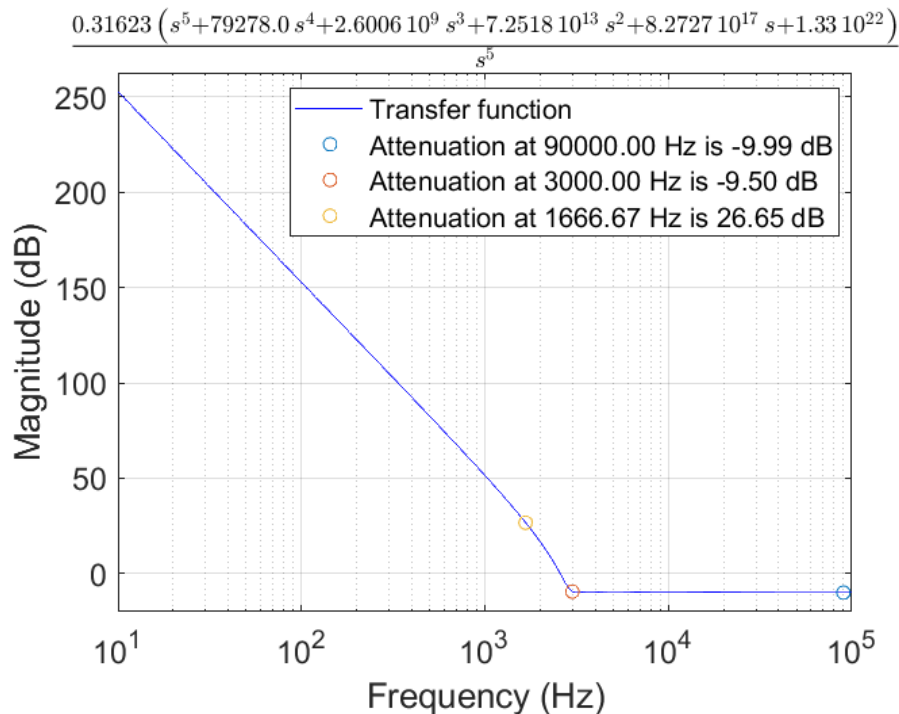


Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε όλες τις παραπάνω αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα Bode.

Η T_1 αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα, η T_2 στο κόκκινο, T_3 στο κίτρινο, ενώ η συνολική συνάρτηση μεταφοράς στο μωβ χρώμα.



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



Στη συνάρτηση απόσβεσης σημειώνουμε τις κρίσιμες συχνότητες οι οποίες καθορίζουν την ζώνη διόδου και αποκοπής, δηλαδή την $f_p=3000\text{ Hz}$ και την $f_s=1666.67\text{ Hz}$, καθώς και τις αντίστοιχες αποσβέσεις.

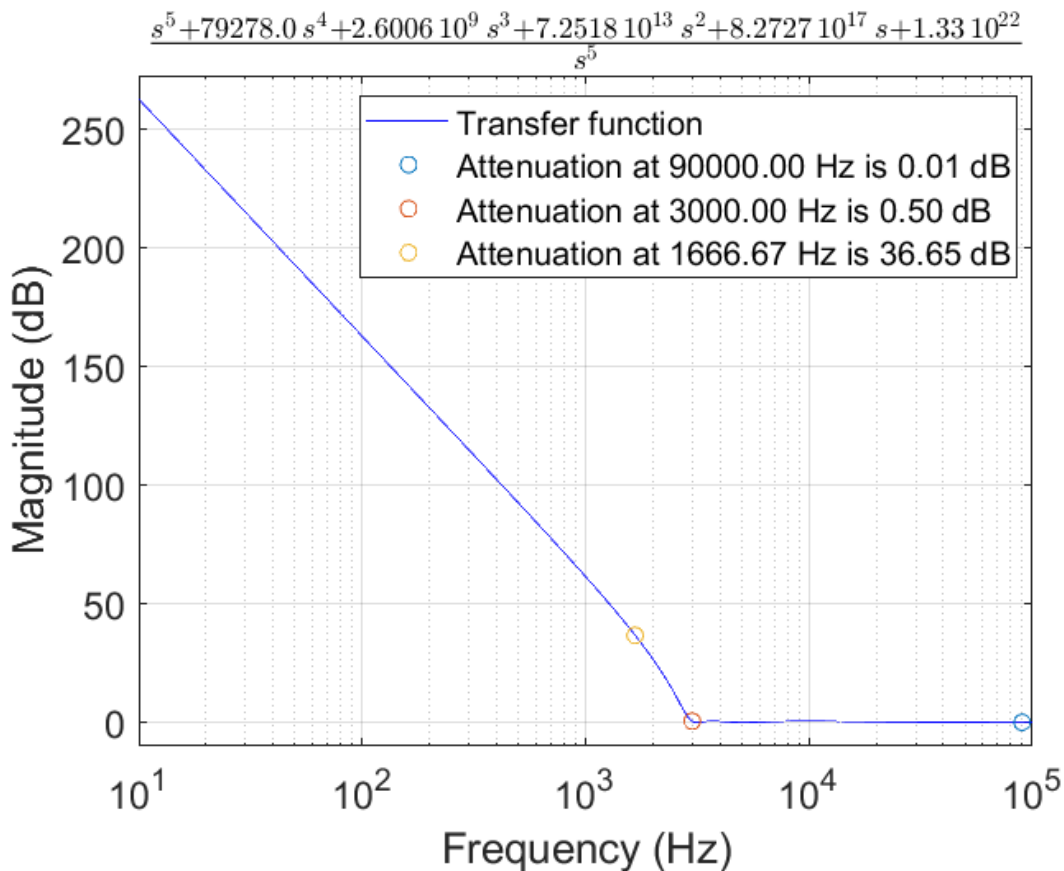
Παρατηρούμε ότι η απόκριση στη συχνότητα $f_p = 3000\text{ Hz}$ είναι $10 - 9.5 = 0.5\text{ dB}$.

Άρα η προδιαγραφή $a_{max} = 0.5\text{ dB}$ πληρείται οριακά.

Παρομοίως, παρατηρούμε ότι η απόκριση στη συχνότητα $f_s = 1666.67\text{ Hz}$ είναι $10 + 26.65 = 36.65\text{ dB}$. Άρα η προδιαγραφή $a_{min} = 26.7778\text{ dB}$ υπερκαλύπτεται.

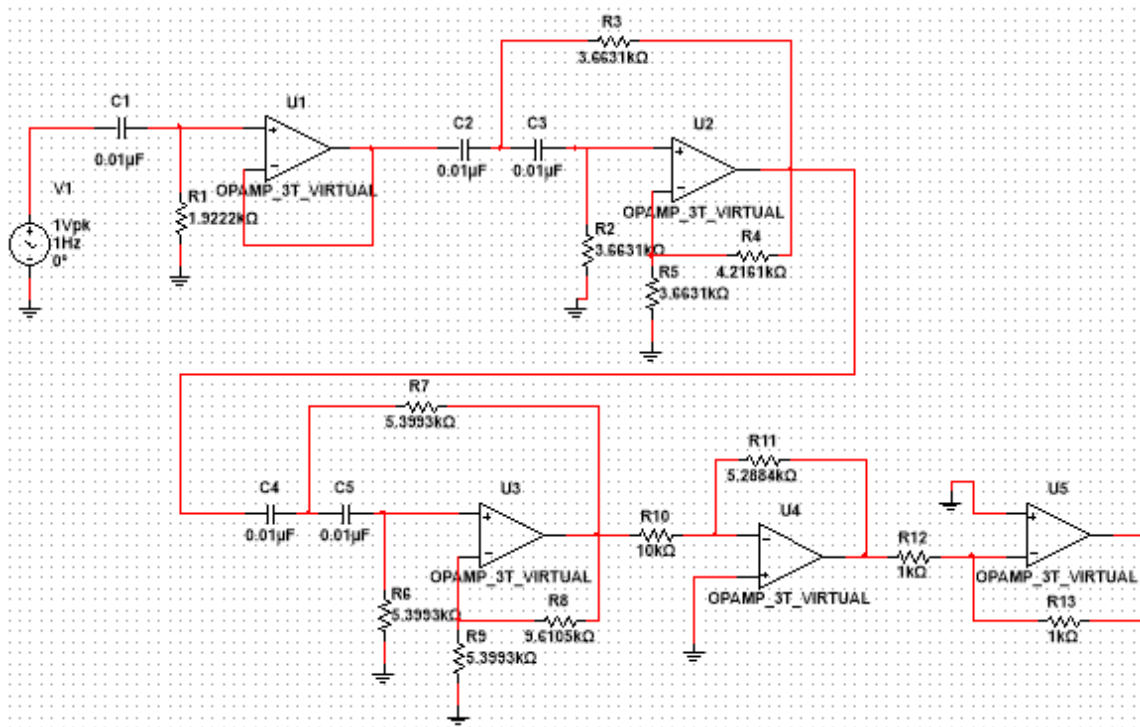
Επομένως, καλύπτονται οι προδιαγραφές που ζητούνται.

Με ρύθμιση κέρδους στα 0 dB η συνάρτηση απόσβεσης δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα όπου φαίνεται πιο καθαρά ότι καλύπτονται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

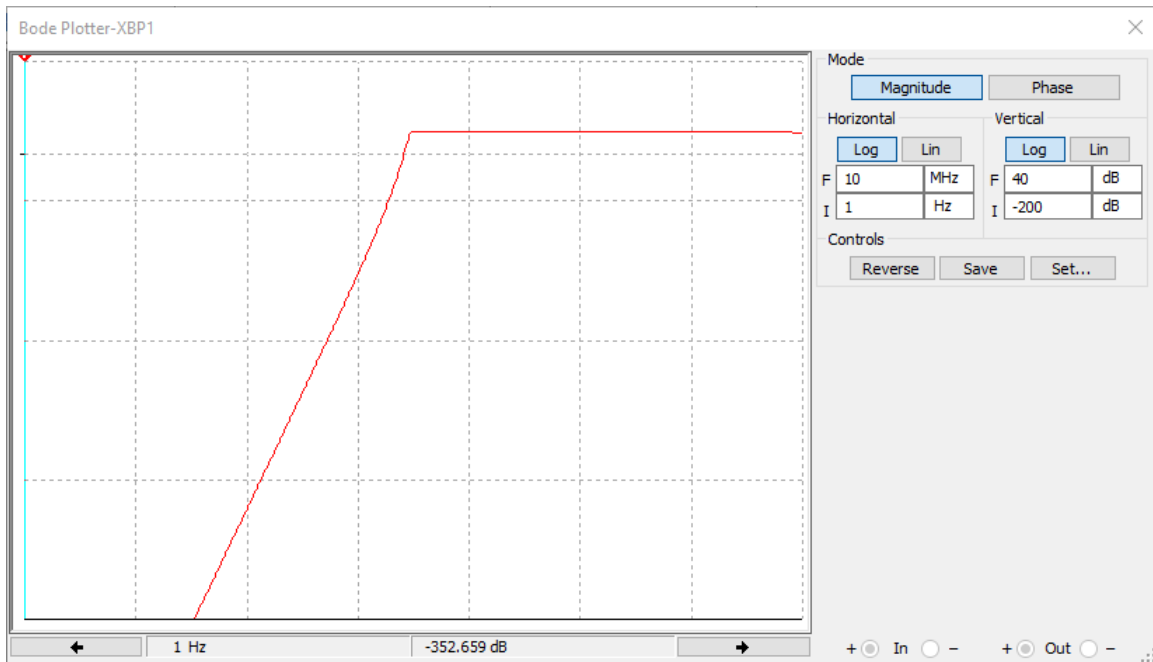


Γ. Υλοποίηση του Κυκλώματος του Φίλτρου στο MULTISIM

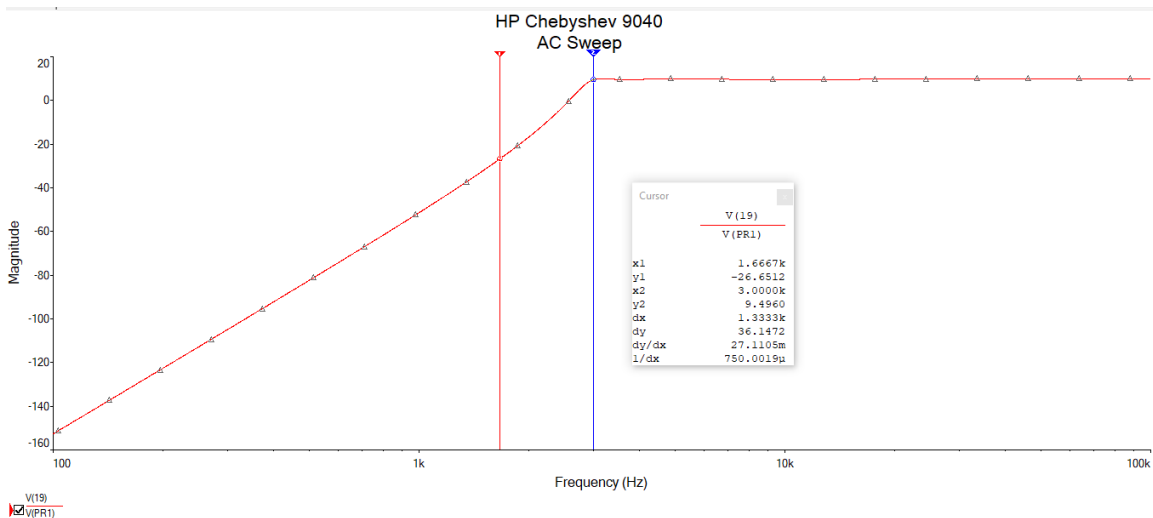
Σχεδιάζουμε το κύκλωμα μας στο ElectronicWorkBench (MULTISIM) προκειμένου να ελέγξουμε αν υλοποιεί την συνολική συνάρτηση μεταφοράς που αναλύθηκε στο προηγούμενο στάδιο της εργασίας αλλά και για να διερευνήσουμε την απόκριση του φίλτρου όταν αυτό διεγείρεται από ένα στοιχειώδες περιοδικό σήμα. Εισάγουμε λοιπόν τις τρεις 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.

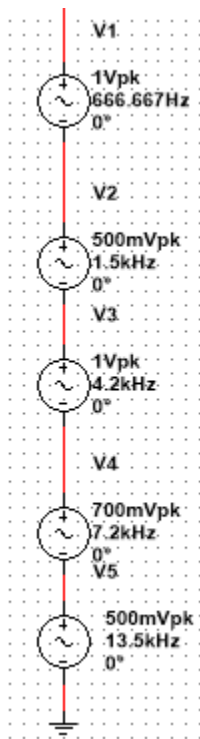


Από αυτά τα διαγράμματα λοιπόν γίνεται φανερό ότι καλύπτονται στο κύκλωμα οι προαναφερθείσες προδιαγραφές καλύπτονται στο κύκλωμα. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε πως στα 3 kHz η ενίσχυση είναι 9.496 dB , στα 1666.67 Hz η απόσβεση είναι -26.6512 dB και το κέρδος σχεδόν στα 10 dB . Υπάρχουν μικρές αποκλίσεις, τις οποίες θεωρούμε αμελητέες.

- Εισάγουμε τώρα στο κύκλωμα με μια σειρά πηγών διέγερσης το περιοδικό σήμα:

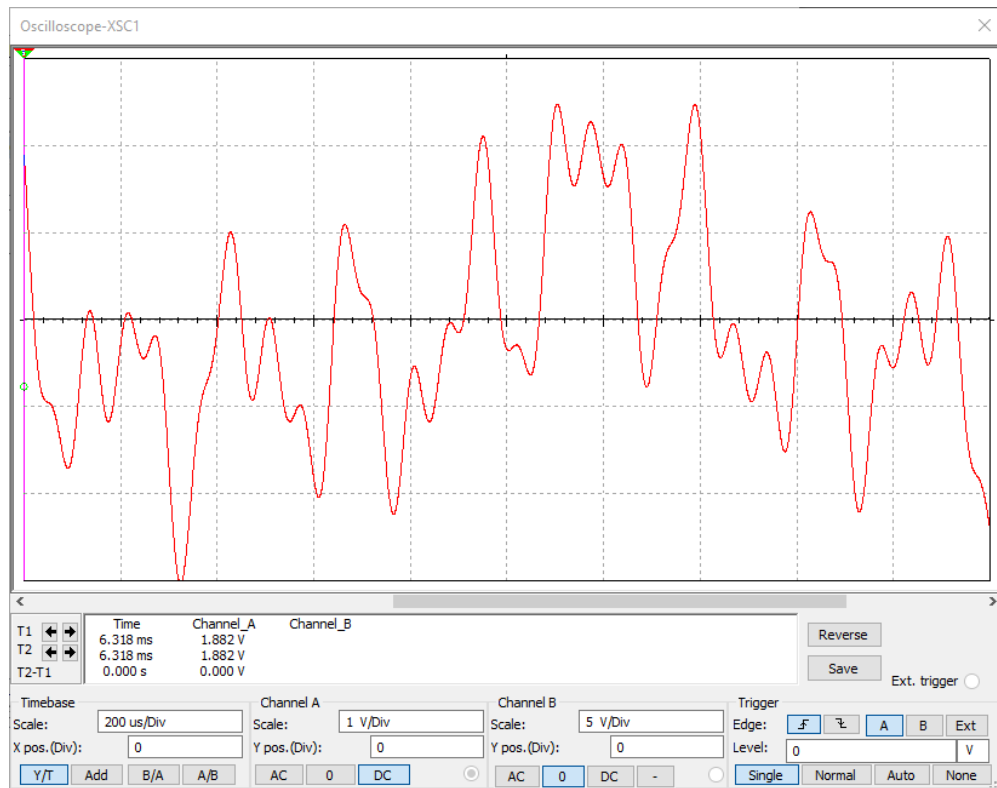
$$\begin{aligned}
 f(t) &= \cos(0.4 \cdot \omega_s t) + 0.5 \cdot \cos(0.9 \cdot \omega_s t) + \cos(1.4 \cdot \omega_s t) \\
 &\quad + 2.4 \cdot \cos(0.4 \cdot \omega_s t) + 0.5 \cdot \cos(4.5 \cdot \omega_s t) = \\
 &= \cos(4.188 \cdot \omega_s t) + 0.5 \cdot \cos(9424 \cdot \omega_s t) + \cos(26389 \cdot \omega_s t) \\
 &\quad + 2.4 \cdot \cos(45239 \cdot \omega_s t) + 0.5 \cdot \cos(84823 \cdot \omega_s t)
 \end{aligned}$$

Για να δημιουργήσουμε αυτό το σήμα χρησιμοποιούμε 5 AC πηγές τάσης συνδεδεμένες στη σειρά. Σε κάθε μία πηγή χρησιμοποιήθηκε μία συχνότητα και δόθηκε το αντίστοιχο πλάτος για προσομοιωθεί το παραπάνω σήμα, και ο συνδυασμός τους σε σειρά συνδέθηκε στην είσοδο του κυκλώματος.

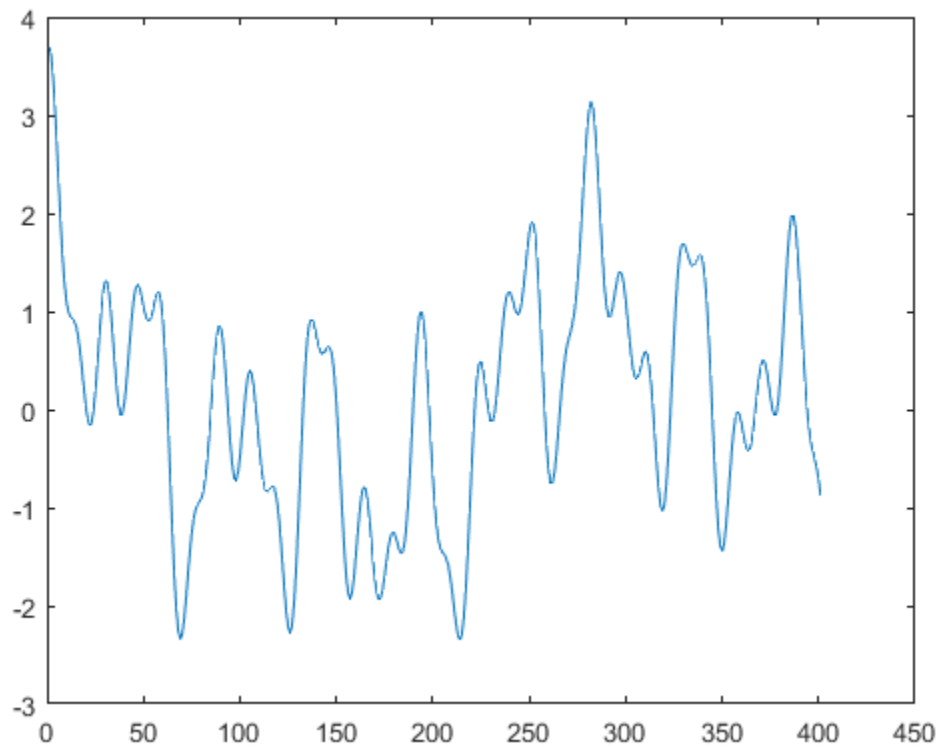


Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο στην είσοδο και την έξοδο και δημιουργούμε τα αντίστοιχα figures για το παραπάνω πείραμα.

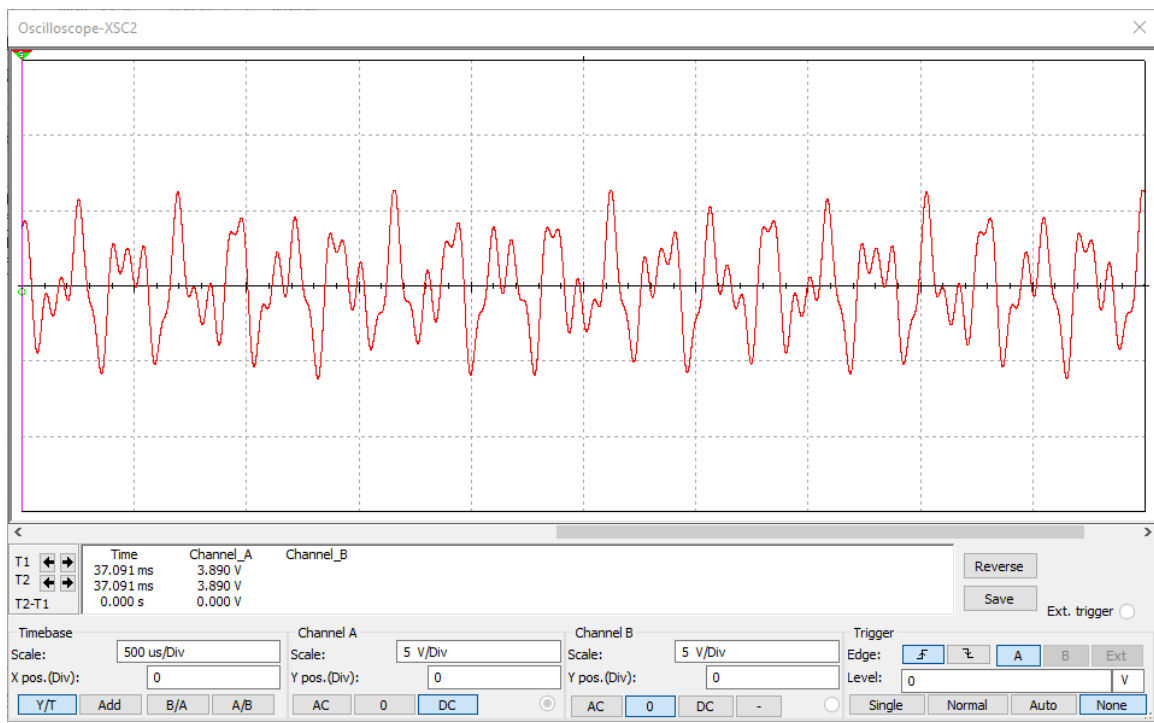
Σήμα Εισόδου :



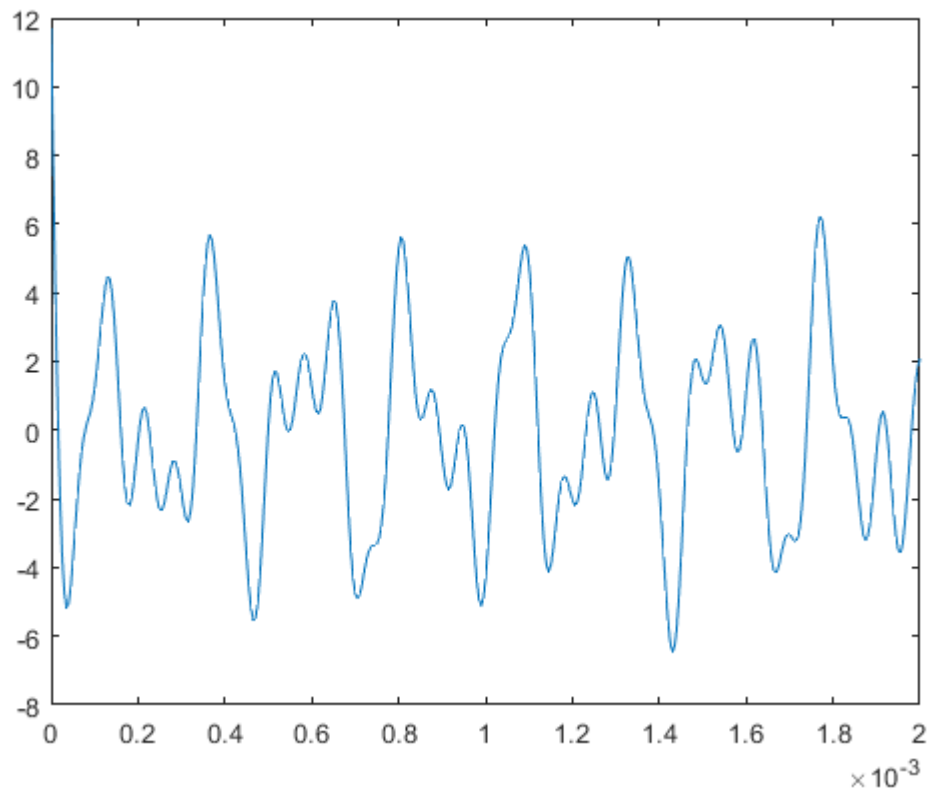
Και στο MATLAB:



Σήμα Εξόδου :



Και στο MATLAB:



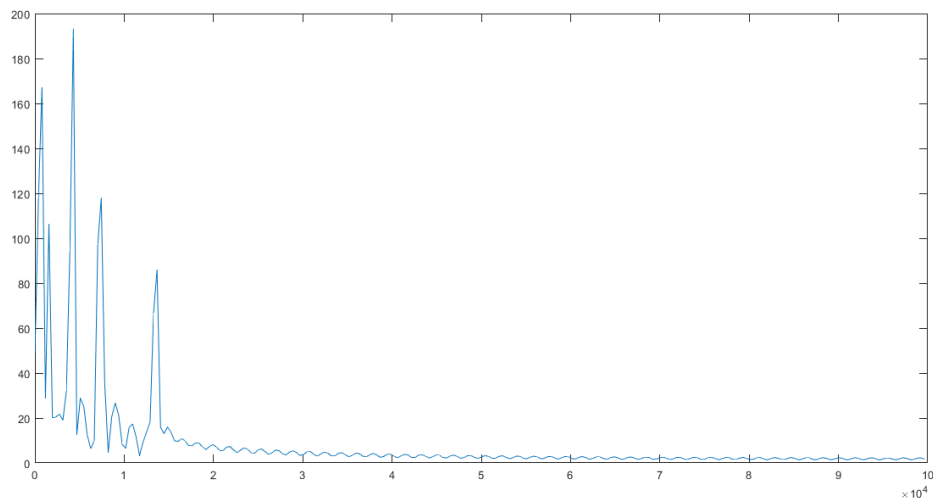
Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα σήματα εισόδου και εξόδου του ανωδιαβατού φίλτρου. Σε κάθε σχήμα φαίνονται οι επιλογές που κάναμε στον παλμογράφο για να προκύψουν οι αντίστοιχες παραστάσεις (για παράδειγμα: V/Div , sec/Div κτλ.).

Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι το σήμα εξόδου είναι ενισχυμένο σε σχέση με το σήμα εισόδου. Το κέρδος του φίλτρου γίνεται φανερό, καθώς οι τιμές στα πλάτη των σημάτων στα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνουν την επιθυμητή ενίσχυση κι επομένως πληρούνται οι ζητούμενες προδιαγραφές.

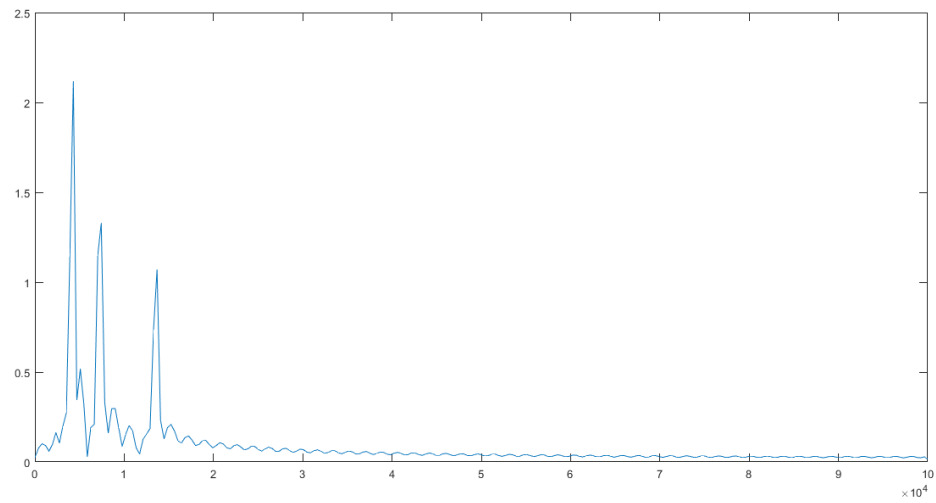
- Σε αυτό το σημείο της άσκησης θέλουμε να δημιουργήσουμε τα φάσματα εισόδου και εξόδου του φίλτρου, του ανωδιαβατού φίλτρου Chebyshev. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα εξετάσουμε τα φάσματα τόσο στο Multisim όσο και στο Matlab. Εφόσον μιλάμε για τα ίδια σήματα καθώς και για το ίδιο φίλτρο, αναμένουμε να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

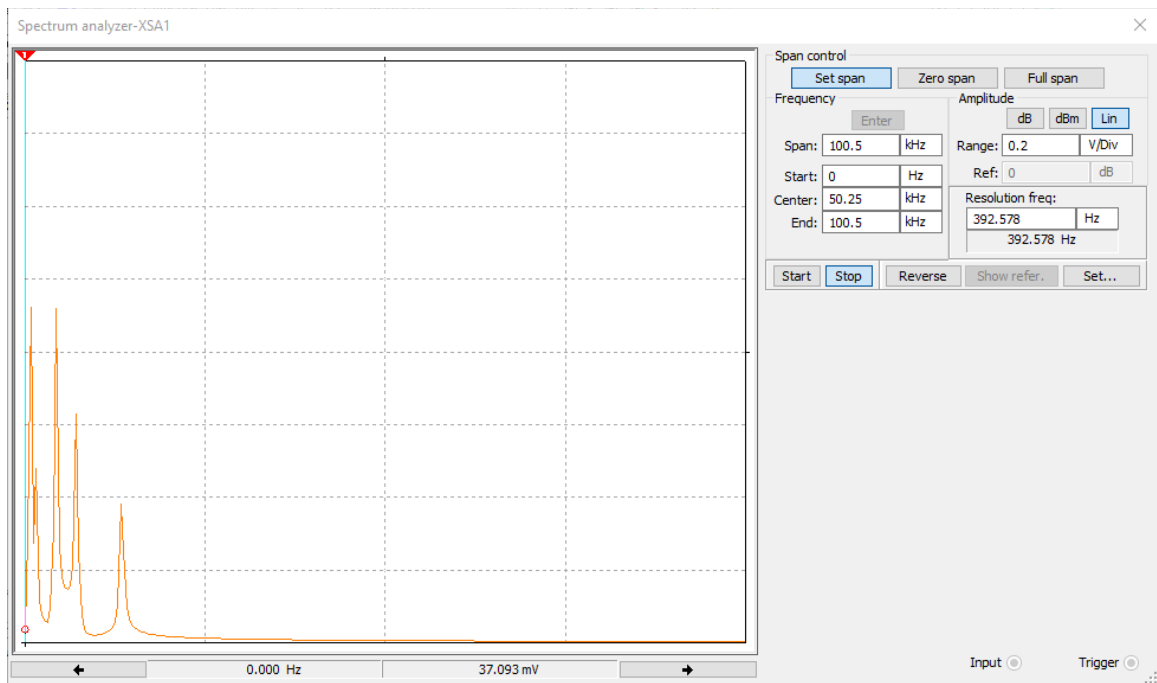
Φάσμα Σήματος Εισόδου :



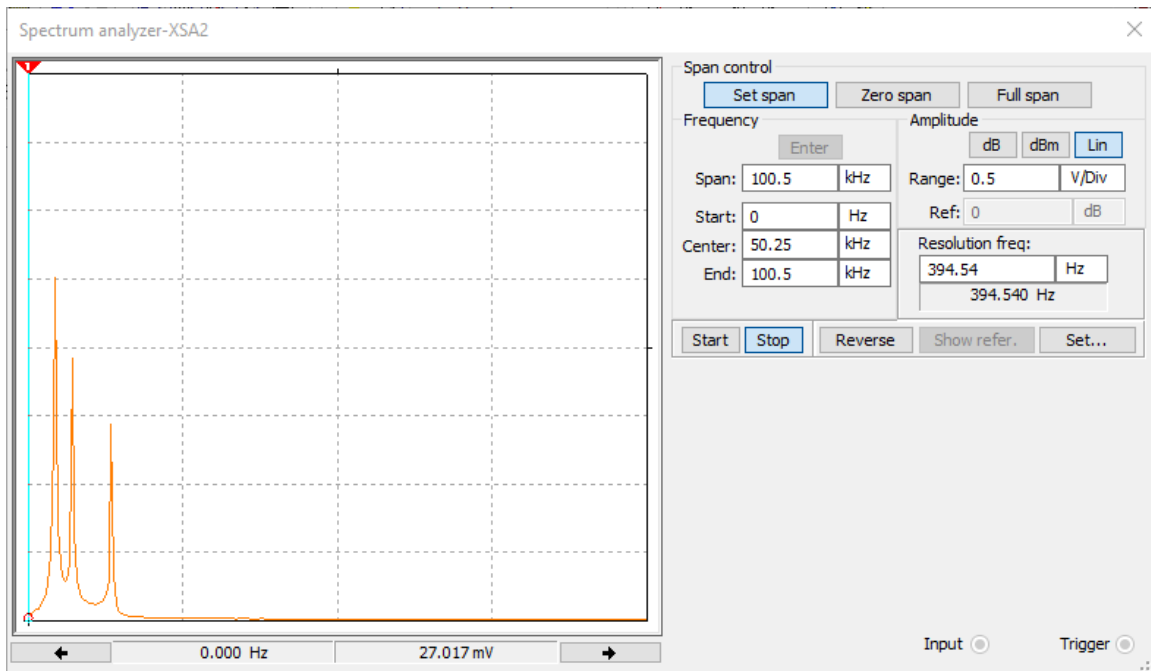
Φάσμα Σήματος Εξόδου :



Φάσμα Σήματος Εισόδου Multisim:



Φάσμα Σήματος Εξόδου Multisim:



Παρατηρούμε στο φάσμα εισόδου, τόσο στο MATLAB όσο και στο Multisim, τις 5 ώσεις, οι οποίες προκύπτουν από τις 5 θεμελιώδεις συχνότητες του σήματος που θέσαμε ως είσοδο.

Όσον αφορά το φάσμα εξόδου, παρατηρούμε ότι αποκόπτονται αρμονικές χαμηλών συχνοτήτων, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό εφόσον το κύκλωμα μας είναι ένα ανωδιαβατό φίλτρο. Συγκεκριμένα, αποσβένονται οι θεμελιώδεις συχνότητες 666,67 Hz και 1.5 KHz που βρίσκονται πριν την ζώνη διόδου των 1666.67Hz, ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται οι συχνότητες που είναι μεγαλύτερες από την f_p . Οι κρίσιμες συχνότητες για το συγκεκριμένο φίλτρο είναι $f_p=3$ kHz και $f_s=1666.67$ Hz.

Σημειώνεται πως τα δύο σήματα, εισόδου και εξόδου, παρουσιάζονται με διαφορετική τιμή V/Div για λόγους ευκρίνειας. Παρατηρούμε, λοιπόν, την ενίσχυση της εξόδου σε σχέση με την είσοδο, άρα το φίλτρο μας έχει κέρδος 10db, όπως ζητείται στις προδιαγραφές. Έτσι συνάγεται το συμπέρασμα ότι το φίλτρο λειτουργεί σωστά, καθώς πληροί όλες τις προδιαγραφές