Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών **Ηλεκτρονικών Υπολογιστών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

TITLE

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ACTIVE FILTERS

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ-ΑΡΗΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ
ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΠΛΕΣΣΑΣ ΦΩΤΙΟΣ

Βόλος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την υλοποίηση και μελέτη αναλογικών ενεργών φίλτρων ενός αλλά και περισσότερων σταδίων.

Αρχικά έγινε προσομοίωση κατωπερατών φίλτρων με το πρόγραμμα Advanced Design System 2008 Update 2 με χρήση του default ενισχυτή του ADS.

Σε δεύτερο στάδιο τα ίδια φίλτρα σχεδιάστηκαν πάλι στο ADS αλλά αυτη τη φορα στις παραμέτρους του ενισχυτή,δόθηκαν οι τιμές των παραμέτρων του LM741.

Το τρίτο σκέλος αυτής της εργασίας είναι η υλοποίηση των κυκλωμάτων του δεύτερου σκέλους, σε breadboard με τη χρήση του τελεστικού ενισχυτή LM741 έτσι ώστε να γίνει μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τέλος έγινε συλλογή και σύγκριση των αποτελεσμάτων της εκάστοτε προσομοίωσης.

ABSTRACT

This thesis aims at the study and implementation of analog active filters which consist of one or more stages.

Firstly we did simulate the low pass filters by using the program Advanced Design System 2008 Update 2.As far as the amplifier is concerned we made use of the default ready to use amplifier which can be found in ADS.

As a second step, the same filters were designed in ADS again, but this time, the parameters of the amplifier had the same values as the parameters of the amplifier LM741.

The third part of the thesis, is the build of the actual circuits (of the second part) in breadboard by using the operational amplifier LM741 in order to study and compare the results.

Finally, all simulation results were gathered and compared.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 *Εισαγωγή*

1.2 *Σκοπός της διπλωματικής εργασίας*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 *Εισαγωγή στα αναλογικά φίλτρα*

2.2 *Διαφορές ενεργών και παθητικών φίλτρων*

2.3 *Ιδανικά και πραγματικά φίλτρα*

2.4 *Προσεγγίσεις φίλτρων*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 *Εισαγωγή στον τελεστικό ενισχυτή*

3.2 *Συνδεσμολογίες τελεστικού ενισχυτή*

3.3 *Πραγματικός τελεστικός ενισχυτής*

3.3.1 *Χαρακτηριστικά του πραγματικού ενισχυτή*

3.3.2 *Ενισχυτής LM741*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων στο DSA με τον default ενισχυτή*
4.2 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων στο DSA με τιμές του LM741 και σύγκριση με τα αποτελέσματα της ενότητας 4.1.*
4.3 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων με χρήση του ενισχυτή LM741 σε breadboard σε εργαστηριακό περιβάλλον.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή

Η χρήση της ασύρματης μετάδοσης τόσο δεδομένων όσο και ομιλίας στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχει γνωρίσει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια.Τον ακρογωνιαίο λύθο αυτής της εξέλιξης αποτελούν τα ηλεκτρονικά φίλτρα,χωρίς την χρήση των οποίων θα ήταν αδύνατη η μετάδοση και η λήψη δεδομένων λόγο της ύπαρξης του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

Η σχεδίαση φίλτρων είναι ένας απο τους ελάχιστους τομείς της ηλεκτρονικής για τους οποίους υπάρχει μια ολοκληρωμένη θεωρία σχεδίασης,η οποία ξεκινά απο τις προδιαγραφές και φτάνει ως την υλοποίηση του κυκλώματος.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη φίλτρων, ανάλογα με το είδος του σήματος στο οποίο απευθύνονται. Συγκεκριμένα τα φίλτρα με τα οποία επεξεργαζόμαστε αναλογικά σήματα καλούνται αναλογικά, ενώ τα αντίστοιχα που εφαρμόζονται στην επεξεργασία ψηφιακών σημάτων ψηφιακά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσουμε στα αναλογικά φίλτρα.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση και προσομοίωση αναλογικών ενεργών φίλτρων τόσο με τη χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2008 Update 2, όσο και με χρήση Breadboard *στο εργαστήριο (χρησιμοποιώντας πραγματικό τελεστικό ενισχυτή) και η μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εισαγωγή στα αναλογικά φίλτρα

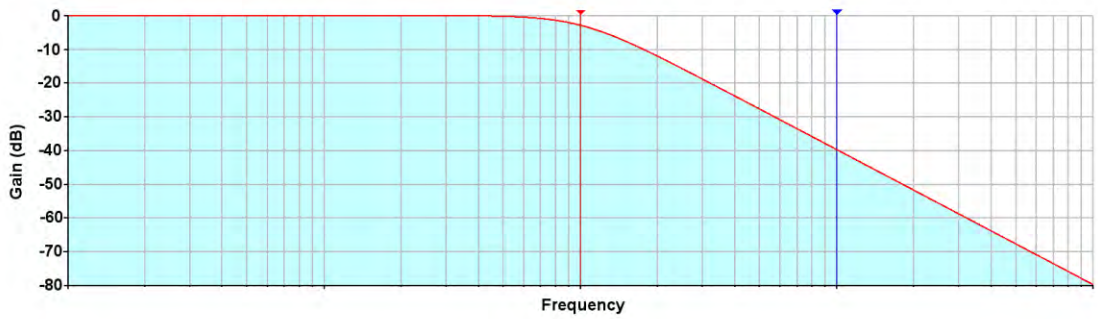
Ως αναλογικό φίλτρο ορίζουμε ένα δικτύωμα παθητικών ή ενεργών και παθητικών στοιχείων που ενεργεί επιλεκτικά και επιτρέπει ή εμποδίζει τη διέλευση ενός σήματος σε μια ορισμένη συχνότητα ή σε μια ορισμένη περιοχή συχνοτήτων.

Τα αναλογικά φίλτρα χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά συστήματα για να δώσουν έμφαση σε σήματα σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων και να απορρίψουν σήματα σε άλλες περιοχές συχνοτήτων. Η επιλεκτικότητα κάθε φίλτρου όσον αφορά την συχνότητα είναι ίσως η πιο συνήθης μέθοδος κατηγοριοποίησης.Αυτό που αποζητούμε δηλαδή απο τα φίλτρα ,είναι να 'περνούν' τα σήματα που το το φάσμα συχνοτήτων τους βρίσκεται μέσα σε μια επιθυμητή ζώνη και να αποκόπτουν σήματα που το φάσμα συχνοτήτων τους βρίσκεται έξω απο αυτή τη ζώνη .Στην ιδανική περίπτωση ένα φίλτρο διαθέτει μία ή περισσότερες ζώνες συχνοτήτων οπου το μέτρο της μεταφοράς είναι μονάδα(ζώνη διέλευσης) και μια ή περισσότερες ζώνες συχνοτήτων που το μέτρο μεταφοράς είναι μηδέν(ζώνη φραγής).

Με βάση τις περιοχές συχνοτήτων που θέλουμε να ενισχύσουμε,μπορούμε να διαχωρίσουμε τα αναλογικά φίλτρα σε διάφορους τύπους.Οι πιο διαδεδομένοι τύποι φίλτρων είναι τα βαθυπερατά(low-pass),υψιπερατά(high-pass),ζωνοπερατά(band-pass) και ζωνοφρακτά(band-stop).

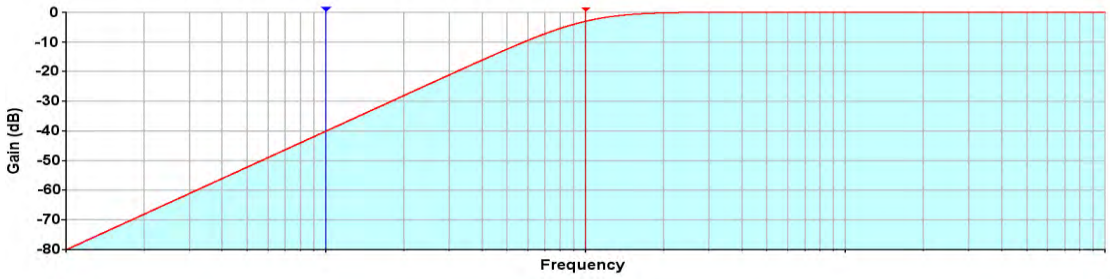
Στη συνέχεια παραθέτω κάποιες ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις για κάθε μια απο τις παραπάνω απο τις βασικές υποομάδες πραγματικών φίλτρων που αναφέρθηκαν.

(1) <u>Low pass</u>



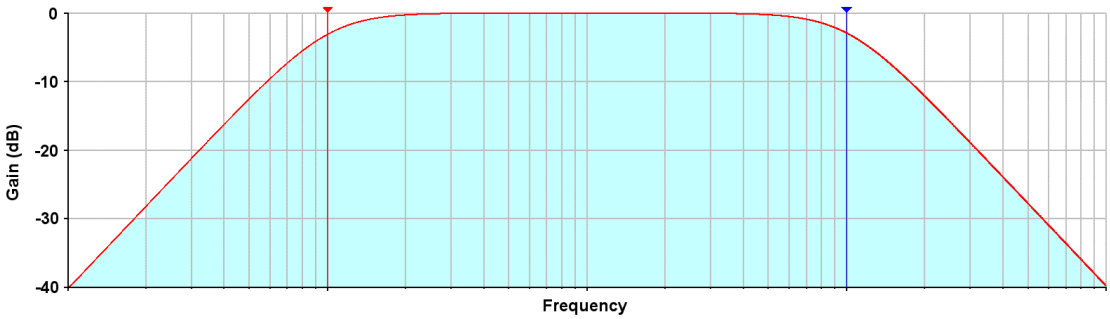
Στην παραπάνω εικόνα(1) φαίνεται ένα low pass φίλτρο(αφήνει τις χαμηλές συχνότητες να περάσουν και αποκόπτει τις ψηλές)

(2) <u>High pass</u>



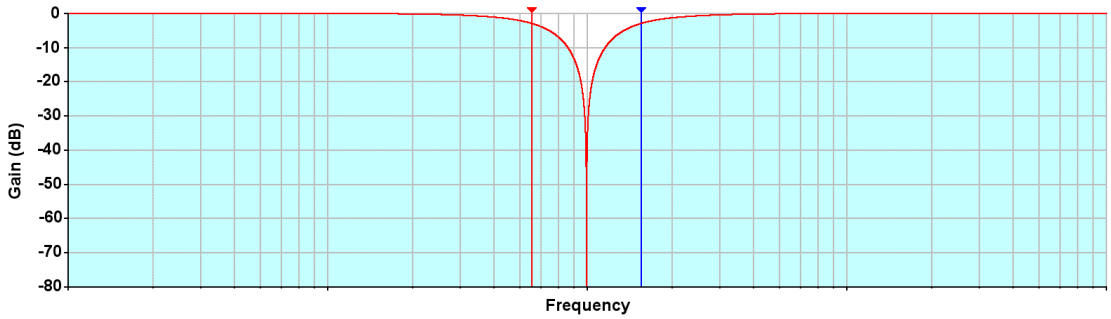
Στην εικόνα 2 φαίνεται ένα high pass φίλτρο(αφήνει τις υψηλές συχνότητες να περάσουν και αποκόπτει τις χαμηλές)

(3) <u>Band pass</u>



Στην εικόνα 3 βλέπουμε ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων , που περνά συχνότητες ενός ορισμένου εύρους και απορρίπτει (εξασθενεί) συχνότητες εκτός αυτής της περιοχής.

(4) **<u>Stop band</u>**



Στην εικόνα 4 βλέπουμε ένα φίλτρο αποκοπής ζώνης(stop-band).στο σχήμα φαίνεται ότι περνάνε όλες οι συχνότητες πλην της ζώνης στη μέση. Το συγκεκριμένο φίλτρο δηλαδή αποκόπτει μια μπάντα συχνοτήτων και περνάει όλες τις υπόλοιπες.

2.2 Διαφορές ενεργών και παθητικών φίλτρων

Τα αναλογικά φίλτρα χωρίζονται σε Ενεργά και Παθητικά.*Τα* ενεργά φίλτρα ,(*active filters*) είναι φίλτρα που ενισχύουν το διερχόμενο σήμα, σε αντίθεση με τα παθητικά που όχι μόνο δεν το ενισχύουν, αλλά πολλές φορές το εξασθενούν.

Η ειδοποιός διαφορά στις 2 παραπάνω κατηγορίες των αναλογικών φίλτρων έγκειται στα στοιχεία τα οποία τα συνθέτουν.
Τα παθητικά φίλτρα ,όπως υποδηλώνει και το όνομά τους αποτελούνται απο παθητικά στοιχεία,όπως πυκνωτές,πηνία και αντιστάσεις σε αντίθεση με τα ενεργά ,τα οποία πέρα των αντιστάσεων και πυκνωτών χρησιμοποιούν και τελεστικούς ενισχυτές οι οποίοι απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία και δίνουν στα φίλτρα επιπλέον χαρακτηριστικά που είναι πολύ χρήσιμα για πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές.
Από τη μεριά τους τα ενεργά φίλτρα δεν εισάγουν απώλειες, μιας και ο τελεστικός ενισχυτής παρέχει κέρδος, προσαρμόζονται εύκολα, μιας και ο τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση εισόδου και μικρή εξόδου.

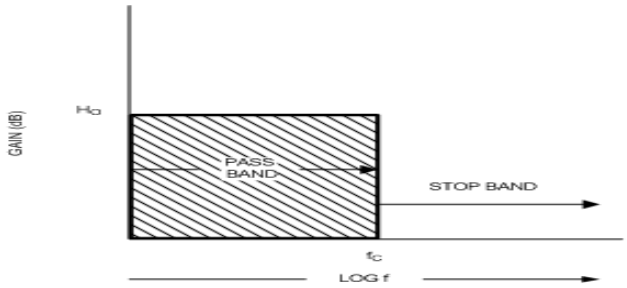
Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων έναντι των παθητικών φίλτρων είναι το χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή τους καθώς το κόστος για τα πηνία που απαιτούνται στα παθητικά είναι μεγάλο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εστίασα στην υλοποίηση και μελέτη των ενεργών αναλογικών φίλτρων τύπου low pass.

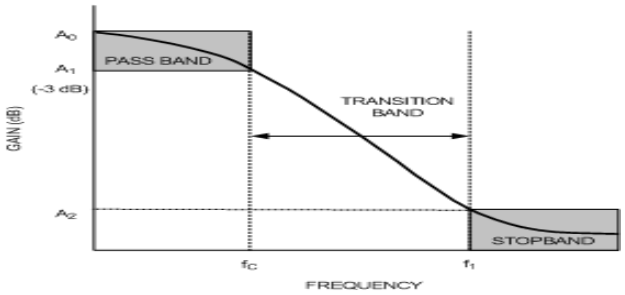
2.3 Ιδανικά και πραγματικά φίλτρα

Στον κόσμο τίποτα δεν είναι ιδανικό,έτσι λοιπόν και τα φίλτρα τα οποία κατασκευάζονται (πραγματικά φίλτρα) προσπαθούν να προσεγγίσουν την ιδανική κατάσταση.Ιδανικά φίλτρα υπάρχουν μόνο στην θεωρία.

Ένα ιδανικό φίλτρο περιέχει 2 ζώνες,την ζώνη διέλευσης και την ζώνη φραγής.Στην πραγματικότητα όμως,ανάμεσα σε αυτές τις 2 ζώνες μεσολαβεί η ζώνη μετάβασης την οποία συναντάμε στα πραγματικά φίλτρα.Για να γίνει πιο αντιληπτό αυτό,παραθέτω παρακάτω 2 γραφικές παραστάσεις τόσο απο ενα ιδανικό κατωπερατό φίλτρο,όσο και απο ένα πραγματικό.



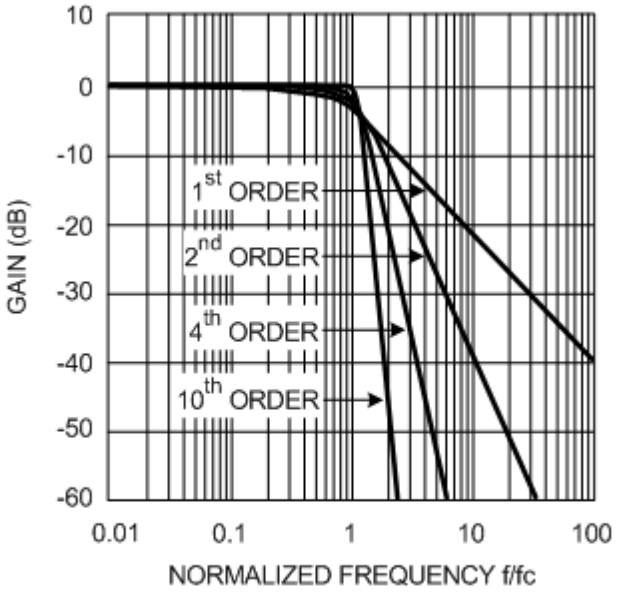
IDEAL LOW-PASS FILTER RESPONSE



LOW-PASS FILTER RESPONSE

Έτσι λοιπόν έγκειται το ερώτημα,του πώς μπορούμε να προσεγγίσουμε την ιδανική κατάσταση.Οι παραπάνω γραφικές απεικονίσεις αναφέρονται σε φίλτρα 1 σταδίου.Αύξηση του αριθμού των σταδίων ενός φίλτρου συνεπάγεται η απόκριση της ζώνης διέλευσης να γίνει πιο επίπεδη και η ζώνη αποκοπής να γίνει πιο απότομη.

Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται και στην εικόνα που ακολουθεί όπου έχει επιλεχθεί ένα φίλτρο Butterworth.



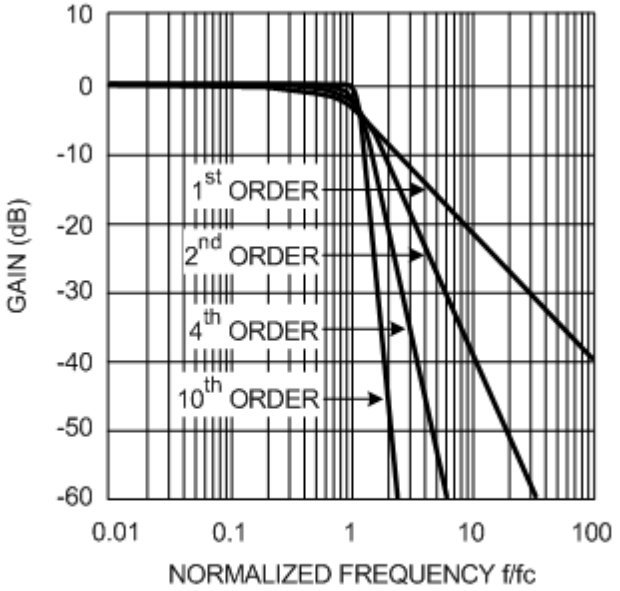
Amplitude Responses of Butterworth Low-Pass Filters

Στο κεφάλαιο 3 θα φανεί και στην πράξη μέσω των πειραματικών δοκιμών που έγιναν στο πρόγραμμα προσομοίωσης ADS ,πως η αύξηση των σταδίων ενός φίλτρου μας φέρνει πιο κοντά στην ιδανική κατάσταση ενός φίλτρου.

2.4 Προσεγγίσεις φίλτρων τύπου low-pass

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας,τα φίλτρα σχεδιάστηκαν με τις παρακάτω προσεγγίσεις: Butterworth,Chebyshev και elliptic.

(1) ***<u>Butterworth low pass:</u>*** *Το φίλτρο Butterworth,είναι ένας τύπος φίλτρου που σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει όσο το δυνατόν πιο επίπεδη απόκριση συχνότητας στη ζώνη διέλευσης*

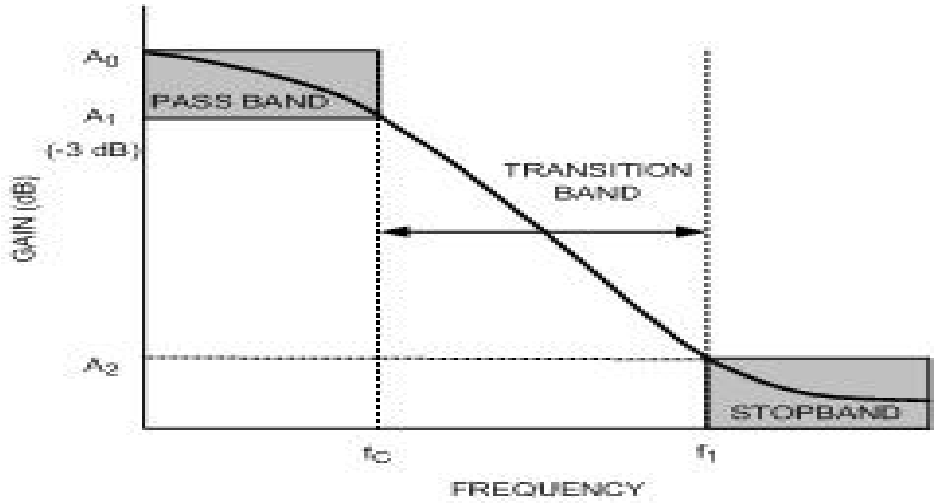


Amplitude Responses of Butterworth Low-Pass Filters

Όπως φαίνεται και απο τη γραφική παράσταση το φίλτρο Butterworth όσο αυξάνεται ο βαθμός του φίλτρου τόσο πιο απότομη γίνεται η μετάβαση και τόσο πιο κοντά φτάνουμε στην ιδανική απόκριση.Επιπλέον παρέχει μονοτονική απόκριση,τη μέγιστη επίπεδη απόκριση ζώνης διέλευσης.Γι'αυτό το λόγο μερικές φορές το αποκαλούν και flat-flat φίλτρο.Τα φίλτρα Butterworth χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση σε εφαρμογές μετατροπής δεδομένων όπου απαιτούνται ακριβή επίπεδα σήματος σε ολόκληρη την ζώνη διέλευσης.

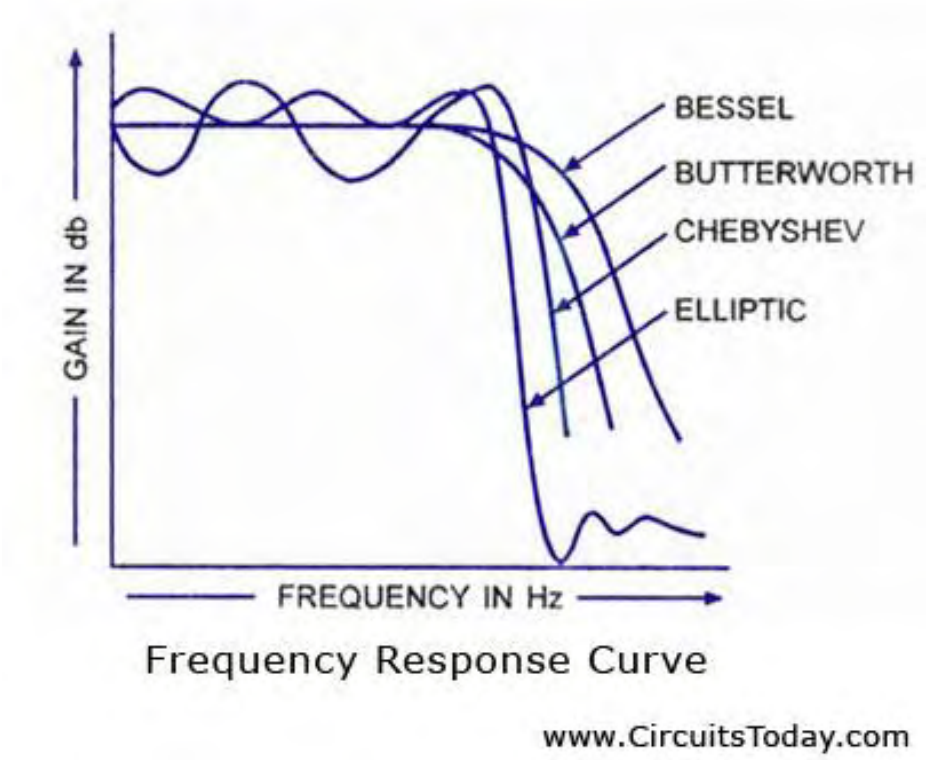
Η απόκριση συχνότητας που ακολουθεί παρακάτω, δείχνει τη ζώνη μετάβασης (fc στο f1), όπου η απόκριση μετατοπίζεται από τη ζώνης διέλευσης στη ζώνη αποκοπής. Η ζώνης διέλευσης τελειώνει στο σημείο με κέρδος A1 που βρίσκεται -3dB κάτω από την απόκριση χαμηλής συχνότητας A0.

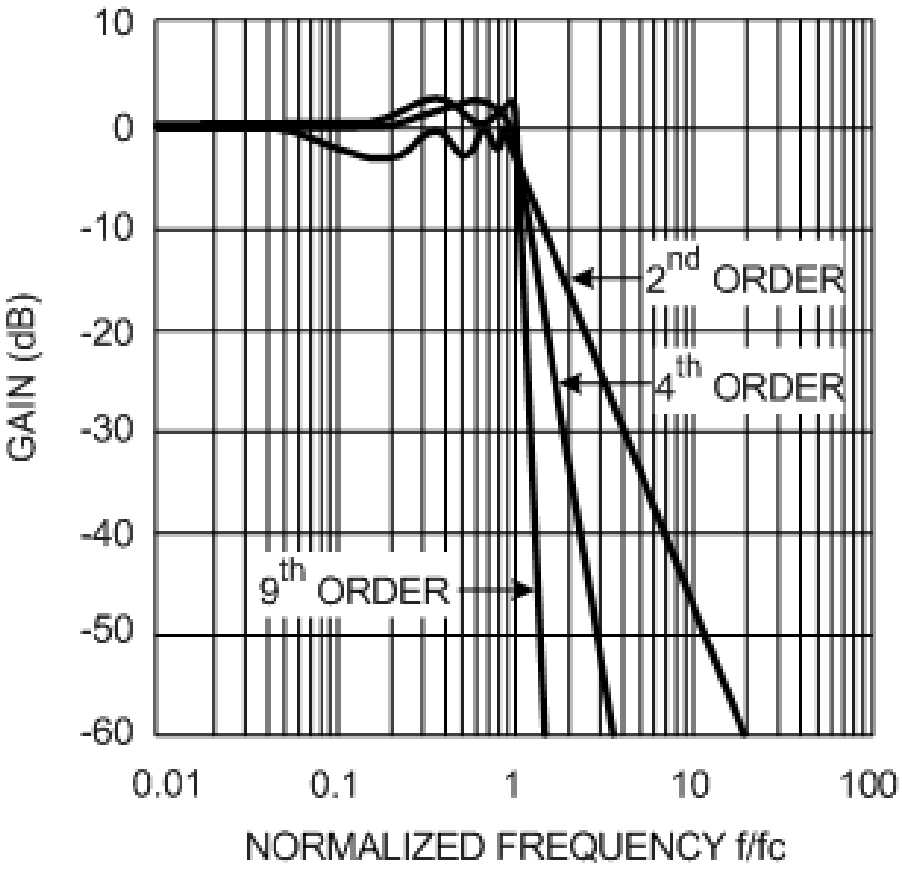
Η ζώνη αποκοπής εισέρχεται όταν η απόκριση μειώνεται σε κάποια προκαθορισμένη τιμή κέρδους A2.



(2) Chebyshev low-pass:

Τα φίλτρα Chebyshev ,έχουν πολύ απότομη μετάβαση απο τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη φραγής.Επίσης παρέχουν μεγάλο κέρδος στη ζώνη μετάβασης σε σχέση με τις άλλες προσεγγίσεις που μελετήθηκαν(Butterworth,elliptic).





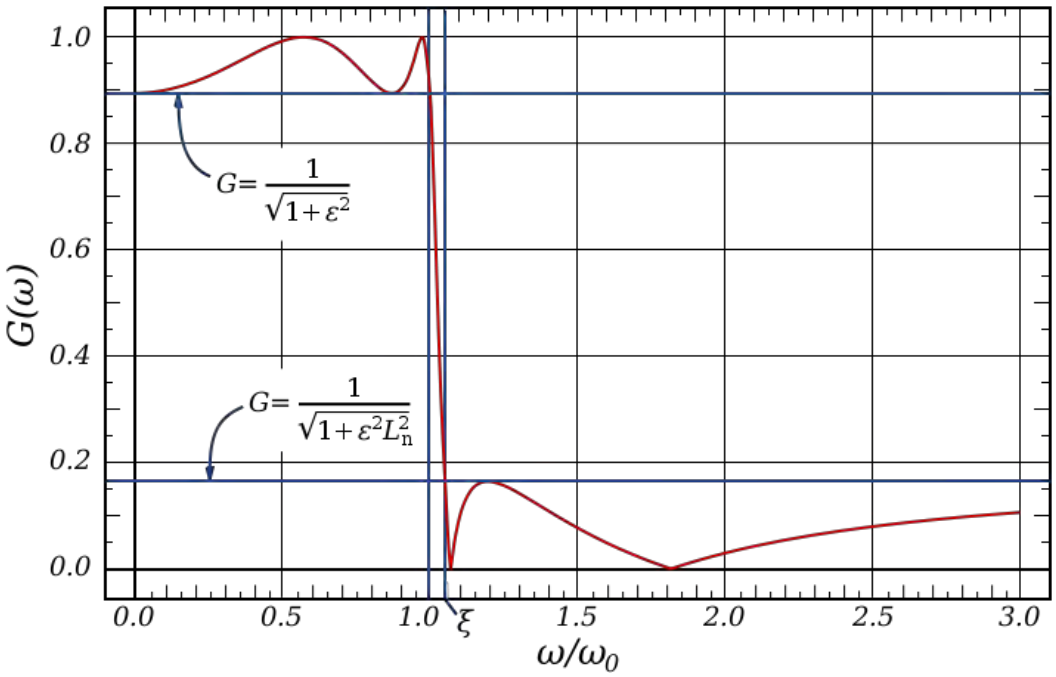
Amplitude Responses of Chebyshev Low-pass Filters

Όπως φαίνεται και απο την παραπάνω γραφική παράσταση , η ζώνη διέλευσης(pass-band) δεν είναι μονοτονική αλλά περιέχει ακμές(ριπές)σταθερού πλάτους.Για ένα δεδομένο αριθμό σταδίων ενός φίλτρου,όσο πιο ψηλές είναι οι ακμές στην ζώνη διέλευσης(όσο αυξάνει ο αριθμός των σταδίων του φίλτρου τόσο αυξάνει το μέγεθος των ριπών),τόσο μεγαλύτερο θα είναι το κέρδος στη ζώνη μετάβασης.Τέλος, φίλτρα με ζυγό αριθμό σταδίων παράγουν κυματισμούς προς τα πάνω, ενώ τα φίλτρα με μονό αριθμό σταδίων δημιουργούν κυματισμούς προς τα κάτω.

(3)Elliptic low-pass:

Απο της 3 προσεγγίσεις (butterworth,chebyshev,elliptic) ,τα ελλειπτικά φίλτρα έχουν την πιο απότομη μετάβαση απο τη ζώνη διέλευσης

στηζώνη φραγής.



Είναι εμφανές και απο την εικόνα παραπάνω ,πόσο απότομη είναι η μετάβαση ανάμεσα στις 2 ζώνες(διέλευσης και φραγής) και πόσο μικρό είναι το εύρος της ζώνης μετάβασης (1.0→ξ).Τα ελλειπτικά φίλτρα έχουν τον ίδιο αριθμό κυματισμών(ριπών) στη ζώνη διέλευσης και στη ζώνη αποκοπής.

Η πολύ απότομη μετάβαση απο την ζώνη διέλευσης στη ζώνη φραγής μας φέρνει πιο κοντά στην επιθυμητή ιδανική λειτουργία των φίλτρων όπου δεν υφίσταται ζώνη μετάβασης ,όμως το τίμημα που πληρώνουμε είναι η μη-γραμμική συμπεριφορά στη ζώνη διέλευσης.

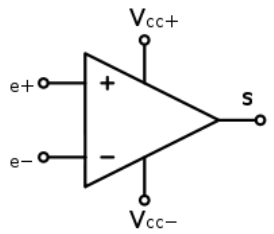
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα γίνεται σαφές πως το κόστος για ομαλή(γραμμική) περιοχή pass-band,είναι η αύξηση του εύρους της ζώνης μετάβασης.Στο κεφάλαιο 3 θα φανεί πιο ξεκάθαρα αυτό το συμπέρασμα απο τα αποτελέσματα των πειραματικών προσομοιώσεων.

Εύρος ζώνης μετάβασης(απο το μεγαλύτερο στο μικρότερο εύρος)	*Γραμμικότητα στην περιοχή pass-band(απο το λιγότερο γραμμικό-> στο πιο γραμμικό)*
Butterworth	*Elliptic*
chebyshev	*Chebyshev*
elliptic	*Butterworth*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή κυκλωμάτων με διακριτά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, απαιτεί συνήθως αρκετές θεωρητικές και πρακτικές γνώσεις ηλεκτρονικών. Κυκλώματα γενικής και ειδικής χρησιμότητας στη χημική οργανολογία μπορούν να κατασκευασθούν εύκολα με τελεστικούς ενισχυτές (operational amplifiers, op amp’s, OA’s), οι οποίοι προσφέρονται στο εμπόριο ως φθηνά ολοκληρωμένα κυκλώ-
ματα (integrated circuits, ICs). Η ονομασία των τελεστικών ενισχυτών είναι ενδεικτική της ικανότητάς τους να πραγματοποιούν (μετά από μια κατάλληλη συνδεσμολογία) μαθηματικές τελέσεις σε σήματα αναλογικού χαρακτήρα

3.1 *Εισαγωγή στον τελεστικό ενισχυτή*



Τελεστικός ενισχυτής

Ο ενισχυτής είναι μια απο τις σημαντικότερες βαθμίδες ή δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά.Στην πιο απλή μορφή του όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα,έχει δύο εισόδους,την Μη αναστρέφουσα είσοδο(+) και την Αναστρέφουσα είσοδο(-) στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου και μια έξοδο όπου παρέχει το ενισχυμένο σήμα της διαφοράς των δύο εισόδων .Επιπλέον στη διάταξη του τελεστικού ενισχυτή υπάρχουν και 2 ακόμα είσοδοι (Vcc+ ,Vcc-),οι οποίες εισάγουν στον ενισχυτή δύο συμμετρικές τάσεις με βάση τις οποίες λειτουργεί η ενίσχυση.

Απο τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν το πολύ μεγάλο κέρδος τάσης ανοιχτού βρόγχου, η πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου και η μικρή αντίσταση εισόδου.

Η κύρια λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή είναι να ενισχύσει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών εισόδου.Ορίζουμε την διαφορά δυναμικού των ακροδεκτών εισόσου ως Vin=(Ve+)-(Ve-) ως διαφορική τάση εισόδου.Υποθέτωντας οτι το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή ειναι Av (το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές),τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή ισούται με Vout=Av*Vin **(1)**.

Απο τη σχέση 1 λοιπόν προκύπτει πως το κέρδος τάσης Av=Vout/Vin.

Πέραν όμως του κέρδους τάσης, στους τελεστικούς ενισχυτές υπάρχουν και κάποια ακόμα βασικά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν.

- Υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου.
- Χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου.

- Δυνατότητα του σήματος της εξόδου του ενισχυτή να παρακολουθεί τις μεταβολές του σήματος εισόδου.(slew rate)
- Απόκριση συχνότητας(εύρος ζώνης)

Θα ξεχωρίσουμε 2 μεγάλες κατηγορίες ενισχυτών.Τους πραγματικούς ενισχυτές και τους ιδανικούς ενισχυτές.Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τους πραγματικούς ενισχυτές και πιο συγκεκριμένα, με τον LM741.

3.2 Σ*υνδεσμολογίες τελεστικού ενισχυτή*

Δύο από τα βασικότερα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών είναι η αναστρέφουσα και η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Και οι δύο συνδεσμολογίες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: μια εξωτερική αντίσταση ανάδρασης συνδεδεμένη ανάμεσα στην έξοδο και την αναστρέφουσα είσοδο (-). Το κοινό τους αυτό χαρακτηριστικό κατατάσσει και τις δυο συνδεσμολογίες στα κυκλώματα αρνητικής ανάδρασης.Το πλεονεκτήμα της αρνητικής ανάδρασης είναι η σταθεροποίηση του κέρδους τάσης σε καθοριζόμενη τιμή που εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων του δικτύου ανάδρασης καθώς και την διεύρυνση του εύρους ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή.

Στις παρακάτω αναλύσεις ενισχυτών με τελεστικούς,θα θεωρήσουμε τους τελεστικούς ενισχυτές ιδανικούς για να γίνει πιο κατανοητή η ανάλυση.

Οι δυο βασικές ιδιότητες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι οι κατώθι:Το κέρδος τάσης ανοικτού βρόγχου είναι άπειρο. Από αυτό συνεπάγεται ότι για να έχουμε πεπερασμένη τάση εξόδου πρέπει η διαφορική είσοδος να είναι μηδέν. Δεύτερον: η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή R_{in} είναι άπειρη κι έτσι το ρεύμα που διαρρέει τους δυο ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενικό.

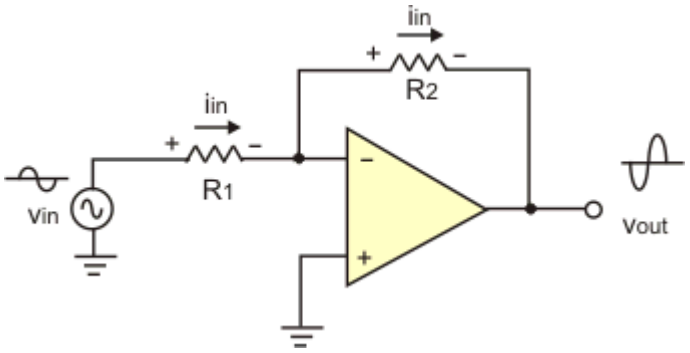
Οι παραπάνω ιδιότητες του τελεστικού ενισχυτή ονομάζονται ***φαινομενικό βραχυκύκλωμα****.Το φαινομενικό βραχυκύκλωμα, αποτελεί βραχυκύκλωμα για την τάση, επομένως και οι δυο τάσεις εισόδου θα*

είναι ίσες και ανοιχτό κύκλωμα για το ρεύμα, επομένως δεν θα ρέει ρεύμα μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου.

Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Το κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα,αποτελείται από δυο αντιστάσεις και έναν τελεστικό ενισχυτή. Συγκεκριμένα, η τάση εισόδου v_{in} εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή μέσω της αντίστασης R_1, ενώ η μη αναστρέφουσα είσοδος συνδέεται με τη γείωση.

Μέρος της τάσης εξόδου επιστρέφει στην αναστρέφουσα είσοδο δια μέσου της αντίστασης R_2 και αφαιρείται, δημιουργώντας αρνητική ανάδραση. Έτσι σταθεροποιείται και το ολικό κέρδος τάσης, αφού οποιαδήποτε μεταβολή της τάσης εισόδου έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο σήμα εξόδου και αναλόγως μεγαλύτερο σήμα αφαιρείται από την τάση εισόδου.



Επειδή οι ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού ενισχυτή εμφανίζουν άπειρη αντίσταση, δεν διαρρέονται από ρεύμα, επομένως το ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση R_2 θα είναι ίσο με αυτό που διαρρέει την R_1, ίσο με i_{in} όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι πολικότητες που δίνονται στο σχήμα, αναφέρονται στην περίπτωση θετικής τάσης εισόδου. Αντίστροφες είναι κατά την αρνητική τάση εισόδου.

Λόγω του φαινομενικού βραχυκυκλώματος με τη γη, η τάση εισόδου ισούται με: $v_{in} = R_1 \cdot i_{in}$

Και η τάση εξόδου θα είναι: $v_{out} = -R_2 \cdot i_{in}$

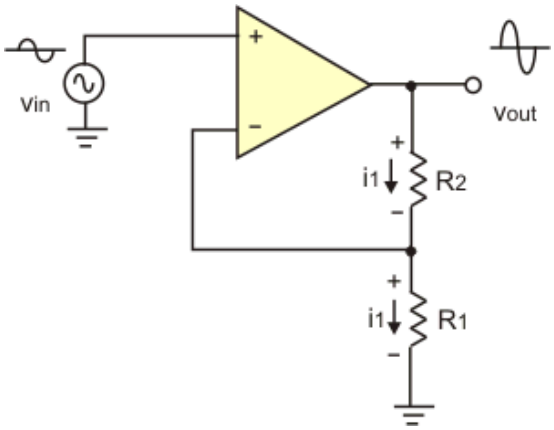
Διαιρώντας κατά μέλη τις παραπάνω σχέσεις βρίσκουμε το κέρδος τάσης κλειστού βρόγχου A_{CL}, του αναστρέφοντος ενισχυτή:

$A_{CL} = v_{out}/v_{in} \Rightarrow A_{CL} = -R_2 \cdot i_{in} / R_1 \cdot i_{in} \Rightarrow A_{CL} = -R_2 / R_1$

Βλέπουμε, πως το κέρδος κλειστού βρόγχου εξαρτάται μόνο από το λόγο των δυο αντιστάσεων R_2 και R_1 που σημαίνει ότι μπορούμε να επιλέξουμε το κέρδος κλειστού βρόγχου όσο θέλουμε, επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των αντιστάσεων του δικτυώματος ανάδρασης. Το πρόσημο (-) δείχνει ότι ο τελεστικός ενισχυτής σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία προκαλεί και αναστροφή του σήματος εξόδου.

Μη Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Το κύκλωμα του μη αναστρέφοντος ενισχυτή είναι όμοιο με αυτό του αναστρέφοντος ενισχυτή, με μόνη διαφορά ότι η τάση εισόδου εφαρμόζεται στην μη αναστρέφοντα είσοδο, ενώ η αντίσταση R_1 στην αναστρέφουσα είσοδο είναι γειωμένη στο αριστερό της άκρο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η τάση εισόδου που οδηγεί τη μη αναστρέφουσα είσοδο δημιουργεί μια ενισχυμένη έξοδο ίδιας πολικότητας. Ένα μέρος της τάσης εξόδου, το οποίο καθορίζεται από το διαιρέτη τάσης που σχηματίζεται από τις αντιστάσεις R_1 και R_2, επιστρέφει πάλι στον αναστρέφοντα ακροδέκτη εισόδου, όπου αφαιρείται προκαλώντας αρνητική ανάδραση.

Επειδή μεταξύ των εισόδων του τελεστικού ενισχυτή έχουμε φαινομενικό βραχυκύκλωμα, η τάση εισόδου στον μη αναστρέφοντα ενισχυτή εμφανίζεται στα άκρα τηςR_1.Άρα, μπορούμε να γράψουμε: $v_{in} = R_1 \cdot i_1$

Επιπλέον, αφού δεν εισέρχεται ρεύμα στον τελεστικό ενισχυτή, το ίδιο ρεύμα i_1 θα πρέπει να ρέει μέσω της R_2, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Βλέπουμε επίσης, ότι η τάση εξόδου δίνεται απο τη σχέση:
$v_{out} = (R_1 + R_2)\cdot i_1$

Διαιρώντας κατά μέλη τις προηγούμενες σχέσεις, βρίσκουμε το κέρδος τάσης της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας:

$A_{CL} = v_{out} / v_{in} \Rightarrow A_{CL} = (R_1 + R_2)\cdot i_1 / R_1\cdot i_1 \Rightarrow A_{CL} = 1 + R_2/R_1$

Βλέπουμε οτι ,το κέρδος τάσης της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας είναι θετικό, που σημαίνει ότι το σήμα εξόδου έχει την ίδια πολικότηταμε το σήμα εισόδου. Επίσης, και σ' αυτή τη συνδεσμολογία του τελεστικού ενισχυτή το κέρδος τάσης καθορίζεται από το λόγο των δύο αντιστάσεων. Έτσι, για να έχουμε ένα ορισμένο κέρδος τάσης, αρκεί να επιλέξουμε κατάλληλα τις τιμές των δύο αντιστάσεων.

3.3.1 Χαρακτηριστικά του πραγματικού ενισχυτή

Ο πραγματικός τελεστικός ενισχυτής είναι αυτός που χρησιμοποιείται στην πράξη.Είναι συνήθως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα,το οποίο λέγεται μονολιθικό,επειδή είναι εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο σε μια ψηφίδα πυριτίου,στην οποία δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός των επιμέρους στοιχείων.Σε αντίθεση με τον ιδανικό ενισχυτή ,ο πραγματικός τελεστικός ενισχυτής έχει πεπερασμένες τιμές τόσο στην απολαβή κέρδους, όσο και στα υπόλοιπα στοιχεία του όπως την αντίσταση εισόδου,το εύρος ζώνης.
Στον πρώτο πίνακα απεικονίζεται το τι θα θέλαμε απο ένα πραγματικό ενισχυτή(προσέγγιση του ιδανικού),και στον δεύτερο πίνακα παραθέτονται οι απολαβές που έχουμε απο έναν πραγματικό ενισχυτή σε σχέση με αυτά που θα θέλαμε να πάρουμε.
<u>ΤΙ ΑΠΟΖΗΤΑΜΕ</u>

Άπειρη αντίσταση εισόδου
Μηδενική αντίσταση εξόδου
Άπειρο κέρδος ανοιχτού βρόγχου
Άπειρο Bandwidth
Τάση εξόδου ίση με το 0 όταν η διαφορά δυναμικού στην είσοδο είναι μηδέν

ΤΙ ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΟΜΩΣ...

Πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου(της τάξης των giga ακομα και tera)
αντίσταση εξόδου πολύ κοντά στο μηδέν(ακόμα και μερικά ohm)
Πολύ μεγάλο κέρδος ανοιχτού βρόγχου
Bandwidth της τάξης των μερικών MHz
Τάση εξόδου ,υπάρχει(μικρή),λόγω του ότι η διαφορά δυναμικού στην είσοδο(στους ακροδέκτες είσοδου του ενισχυτή) δεν είναι μηδέν.

Πέραν όμως των παραπάνω χαρακτηριστικών,για την ενσωμάτωση του τελεστικού ενισχυτή σε ένα κύκλωμα είναι σημαντικό να γνωρίζουμε και κάποια ακόμα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία παραθέτονται παρακάτω.

Ρεύμαπόλωσηςεισόδων(Input bias current)*:είναι το ημιάθροισμα των ρευμάτων πόλωσης των δύο εισόδων του τελεστικού.*

Ρεύμα αποστάθμισης εισόδων(input offset current): *Ορίζεται ως η διαφορά των ρευμάτων πόλωσης των δύο εισόδων του τελεστικού.*

Τάση αποστάθμισης εισόδου(input offset voltage V0):*Το μέτρο της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ των εισόδων για να μηδενιστεί η τάση εξόδου*

Λόγος απόρριψης κοινού τρόπου(common mode rejection ratio):*Μετράται απο την απολαβή τάσης που εκδηλώνεται όταν ένα σήμα εφαρμόζεται ταυτόχρονα και στις δύο εισόδους του ενισχυτή.Βλέπουμε πρακτικά πόσο απέχει ο ενισχυτής απο την ιδανική κατάσταση κατά την οποία η τάση εξόδου(Vout) είναι ίση με μηδέν όταν V+=V-*

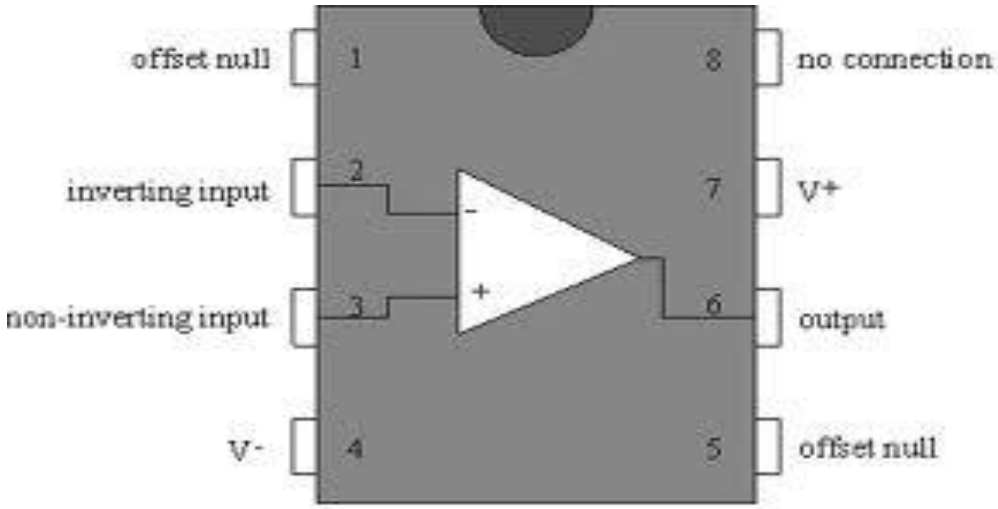
Ρυθμός μεταβολής της τάσης εξόδου(slew rate): *Είναι ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η τάση εξόδου.*

3.3.2 *Ενισχυτής LM741*

Για τις μετρήσεις/προσομοιώσεις των κυκλωμάτων με breadboard στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής LM741. Ο ενισχυτής LM741 είναι "απόγονος" του μA741 και ανήκει στην οικογένεια των ενισχυτών 741 που είναι ενισχυτές γενικού σκοπού.

Ακολουθεί μια φωτογραφία ενός πραγματικού ενισχυτή LM 741 και στη συνέχεια θα παραθέσω και μια εικόνα που φαίνεται η τοπολογία του κυκλώματος του εν λόγω ενισχυτή.

LM741



Όπως φαίνεται και απο το σχήμα παραπάνω,ο ενισχυτής έχει 8 ακροδέκτες.Την λειτουργία των οποίων θα εξηγήσουμε σε αυτό το σημείο.

<u>Ακροδέκτης 1: (offset null)</u> *Σε αυτό τον ακροδέκτη παρέχουμε τάση όταν θέλουμε να δημιουργήσουμε διαφορά τάσης μεταξύ των ακροδεκτών 2,3 (είσοδοι του ενισχυτή) ώστε, αυτή να είναι πολύ κοντά στο μηδέν.Αυτό συνεπάγεται ότι η έξοδος του ενισχυτή θα είναι μηδέν.*

<u>Ακροδέκτης 2: (Inverting Input)</u> *Σε αυτό τον ακροδέκτη πηγαίνει το θετικό μέρος του σήματος εισόδου που θέλουμε να ενισχύσουμε,εφόσον θέλουμε το ενισχυμένο σήμα μας ανεστραμένο.Αν δεν θέλουμε το ενισχυμένο σήμα αντεστραμένο ,τότε βάζουμε το θετικό τμήμα του σήματος στην μη αναστρέφουσα είσοδο(3) και στον ακροδέκτη 2 συνδέουμε το αρνητικό τμήμα του σήματος.*

<u>Ακροδέκτης 3: (Non-Inverting Input)</u> *Στην περίπτωση που θέλουμε στην έξοδο να έχουμε ένα ενισχυμένο σήμα το οποίο να μην είναι αντεστραμένο,τότε στον ακροδέκτη 3 θα συνδέσουμε το θετικό τμήμα του σήματος εισόδου*

<u>Ακροδέκτης 4: (V-)</u> *Για να λειτουργήσει ο LM741 χρειάζεται και θετική αλλά και αρνητική DC τάση.Μέσω του ακροδέκτη 4 παρέχεται στον ενισχυτή η αρνητική DC τάση που χρειάζεται.*

<u>Ακροδέκτης 5: (offset null)</u> *Σε αυτό τον ακροδέκτη παρέχουμε τάση όταν θέλουμε να δημιουργήσουμε διαφορά τάσης μεταξύ των ακροδεκτών 2,3 (είσοδοι του ενισχυτή) ώστε, αυτή να είναι πολύ κοντά στο μηδέν.Αυτό συνεπάγεται ότι η έξοδος του ενισχυτή θα είναι μηδέν.*

Ο ακροδέκτης 5 έχει την ίδια ακριβώς λειτουργία με τον ακροδέκτη 1.

<u>Ακροδέκτης 6: (Output)</u> *Σε αυτό τον ακροδέκτη παίρνουμε το ενισχυμένο σήμα που βγαίνει απο τον ενισχυτή.*

<u>Ακροδέκτης 7: (V+)</u>*Μέσω αυτού του ακροδέκτη παρέχεται θετική DC τάση.*

<u>Ακροδέκτης 8: (NC)</u> *Αυτός ο ακροδέκτης δεν χρησιμοποιείται και θα πρέπει να μένει ανοιχτός.*

Σε αντίθεση με τους ιδανικούς ενισχυτές,όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.1 ο LM741(πραγματικός ενισχυτής) ,έχει πεπερασμένο κέρδος ανοιχτού βρόγχου και πεπερασμένο εύρος συχνοτήτων

Παρακάτω φαίνεται μια γραφική παράσταση για έναν ενισχυτή γενικού σκοπού 741.Στην γραφική παράσταση φαίνεται το κέρδος ανοιχτού βρόγχου συναρτήση της συχνότητας.

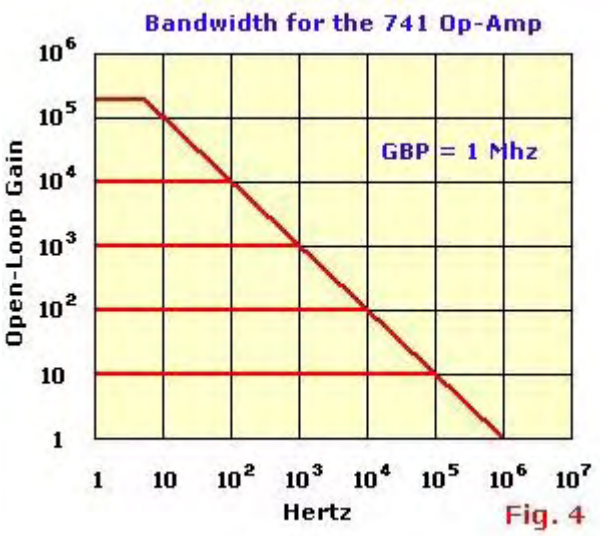
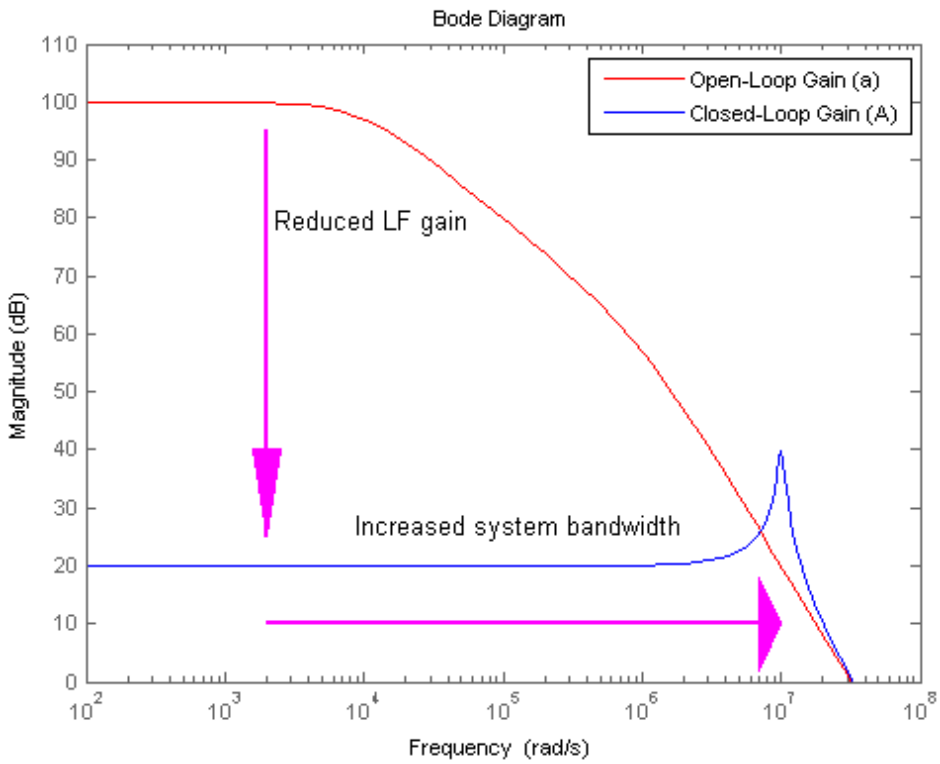


Fig. 4

Όπως φαίνεται και απο τη γραφική παράσταση,στις πολύ χαμηλές συχνότητες,μέχρι τα 6 Hz περίπου το κέρδος ανοιχτού βρόγχου είναι σταθερό.Μετά τη συχνότητα των 6Hz αρχίζει η πτώση μέχρι το κέρδος ανοιχτού βρόγχου να γίνει μονάδα.Η συχνότητα στην οποία το κέρδος ισούται με τη μονάδα ονομάζεται συχνότητα μοναδιαίου κέρδους.

Το εύρος(bandwidth) ορίζεται ως το σημείο(η τιμή του σημείου),στο οποίο το η καμπύλη του κέρδους κλειστού βρόγχου τέμνει την καμπύλη του κέρδους ανοιχτού βρόγχου.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται:open loop-gain, closed-loop gain και bandwidth.Είναι εμφανές πως η καμπύλη του κέρδους κλειστού βρόγχου τέμνει την καμπύλη του κέρδους ανοιχτού βρόγχου.



Επιπλέον κάτι πολύ σημαντικό που αξίζει να σημειωθεί για την παραπάνω εικόνα είναι οτι μπορούμε να υπολογίσουμε την αρνητική ανάδραση.Η διαφορά του κέρδους ανοιχτού βρόγχου με το κέρδος κλειστού βρόγχου μας δίνει το κέρδος βρόγχου που μας δείχνει την αρνητική ανάδραση.

Στην ενότητα 3.3.1 παρουσιάστηκαν οι προσδοκίες που έχουμε απο ένα πραγματικό ενισχυτή και αντ'αυτού ποιές είναι οι απολαβές τελικά. Θεωρώ σκόπιμο σε αυτό το σημείο να κάνω μια αναφορά στις τιμές των χαρακτηριστικών(ενδεικτικές τιμές) του LM741 σε σχέση με τον ιδανικό ενισχυτή.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	*ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ*	*LM741*
Αντίσταση εισόδου(Rin)	*ΑΠΕΙΡΗ*	*6MΩ*
Αντίσταση εξόδου(Rout)	*0*	*50Ω*
Κέρδος τάσης(Gain)	*ΑΠΕΙΡΟ*	*50.000 με 100.000*
Εύρος(bandwidth)	*ΑΠΕΙΡΟ*	*1MHz*
Διαφορά δυναμικού ακροδεκτών εισόδου (Offset voltage)	*0*	*1mV*
Input Current	*0*	*30 nanoVolts*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων στο ADS με τον default ενισχυτή*

Όπως έχει αναφερθεί και στις παραπάνω ενότητες οι τοπολογίες των low pass φίλτρων που προσομοιώθηκαν είναι οι εξής:

1. *Butterworth*
2. *Chebyshev*
3. *Elliptic*

Κατασκευάζοντας ένα φίλτρο ενός σταδίου και ένα δύο σταδίων ,μπορούμε να φτιάξουμε φίλτρα με ότι αριθμό σταδίων μας ζητηθεί .

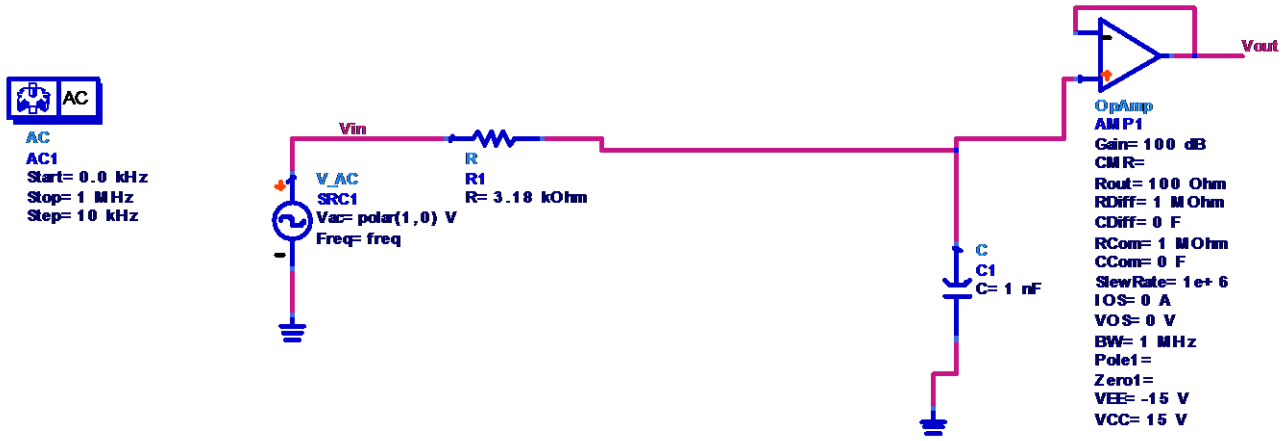
Φίλτρο 1^{ος} σταδίου	*Φίλτρο 2 σταδίων*	*Φίλτρο ν σταδίων*
2	*0*	*2*
1	*1*	*3*
1	*2*	*5*
0	*2*	*4*
0	*3*	*6*
1	*3*	*7*

Πρακτικά και μόνο με φίλτρα 1^{ος} σταδίου μπορούμε να κατασκευάσουμε φίλτρα οσονδήποτε σταδίων,αλλά η κατασκευή τους γίνεται πιο ουσιαστική και εύκολη με τη χρήση και φίλτρων 2 ή και παραπάνω σταδίων.

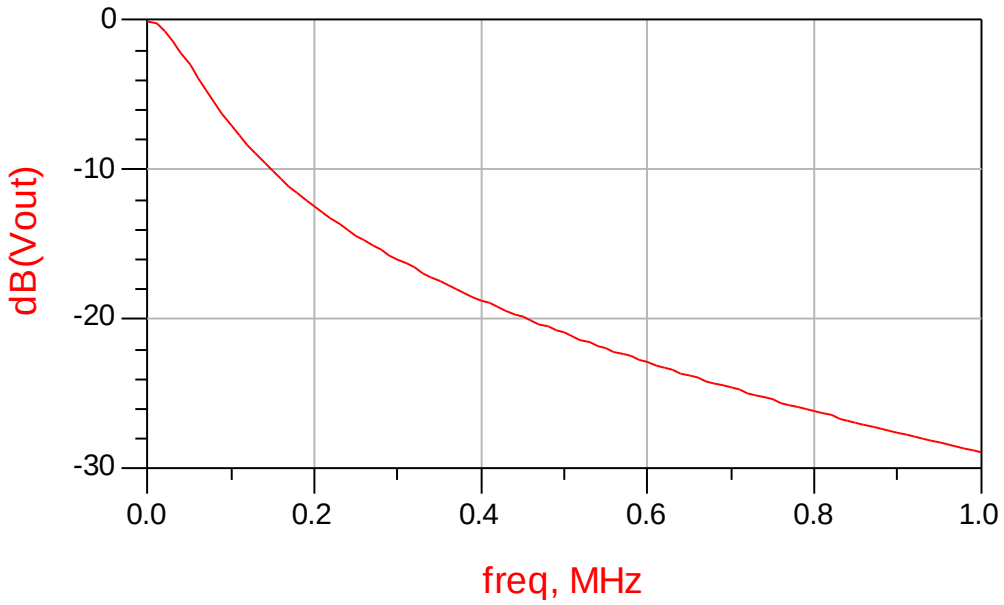
Τα φίλτρα που κατασκευάστηκαν είχαν όλα σαν βάση τους φίλτρα 1^{ος} και 2 σταδίων.

Θα αρχίσουμε με τα φίλτρα Butterworth,και πιο συγκεκριμένα θα μελετήσουμε φίλτρα ενός,δύο και πέντε σταδίων.

Butterworth 1 σταδίου

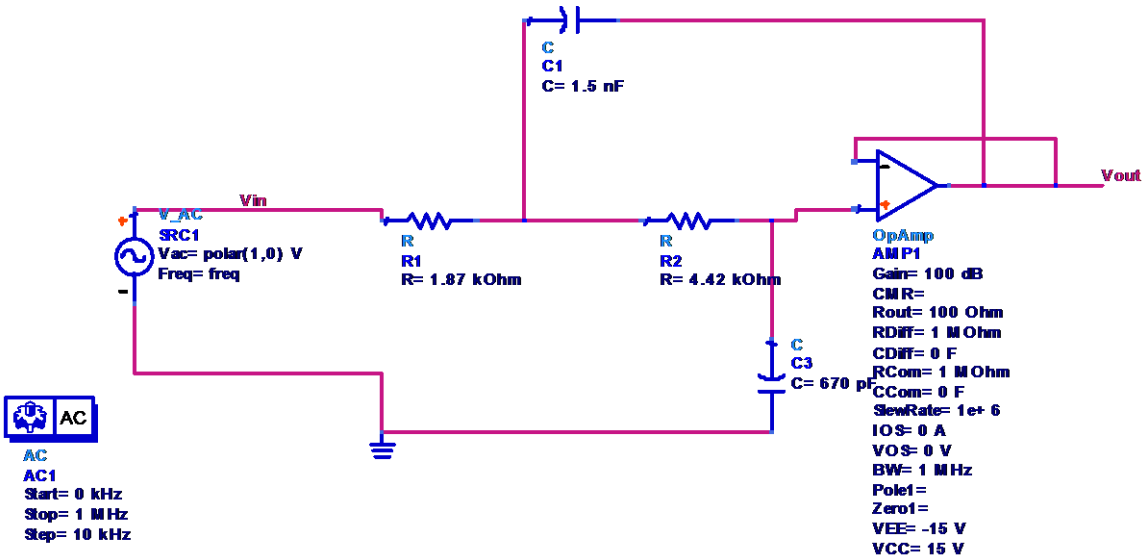


Παραπάνω φαίνεται το κύκλωμα και στη συνέχεια παρατίθεται η γραφική του παράσταση.Χαρακτηριστικό των φίλτρων Butterworth είναι η ομαλή μετάβαση που έχουν απο τη περιοχή της ενεργούς ζώνης στην ζώνη φραγής.

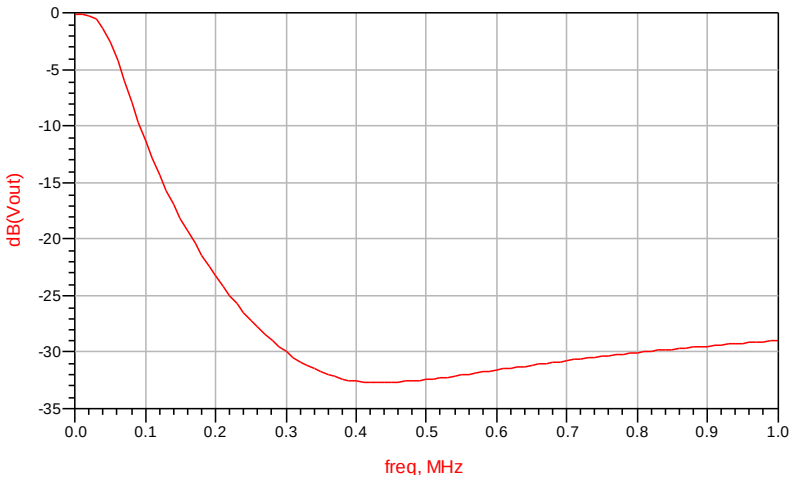


Butterworth 1ος σταδίου

Butterworth 2 σταδίων

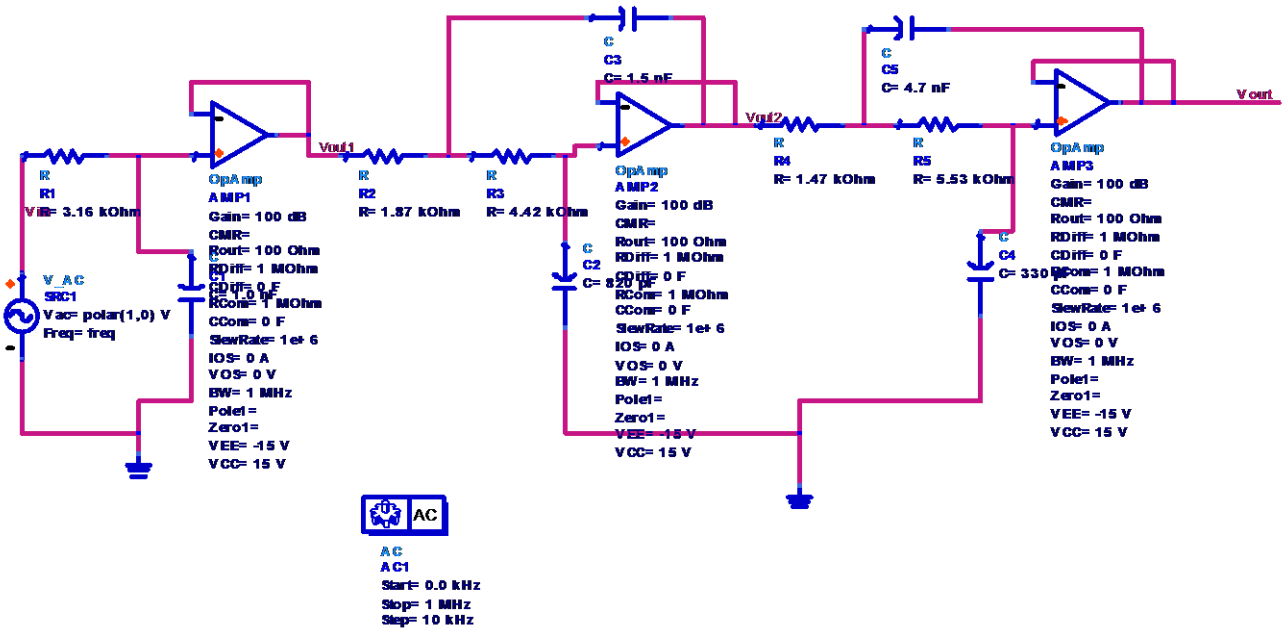


Το παραπάνω φίλτρο είναι 2 σταδίων και εφόσον απο τη θεωρία των φίλτρων γνωρίζουμε οτι όσο μεγαλώνει η τάξη ενός φίλτρου(αριθμός των σταδίων του) τόσο περισσότερο το φίλτρο πλησιάζει την ιδανική κατάσταση,περιμένουμε η περιοχή μετάβασης να είναι πιο απότομη απο αυτή του φίλτρου ενός σταδίου,το οποίο και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



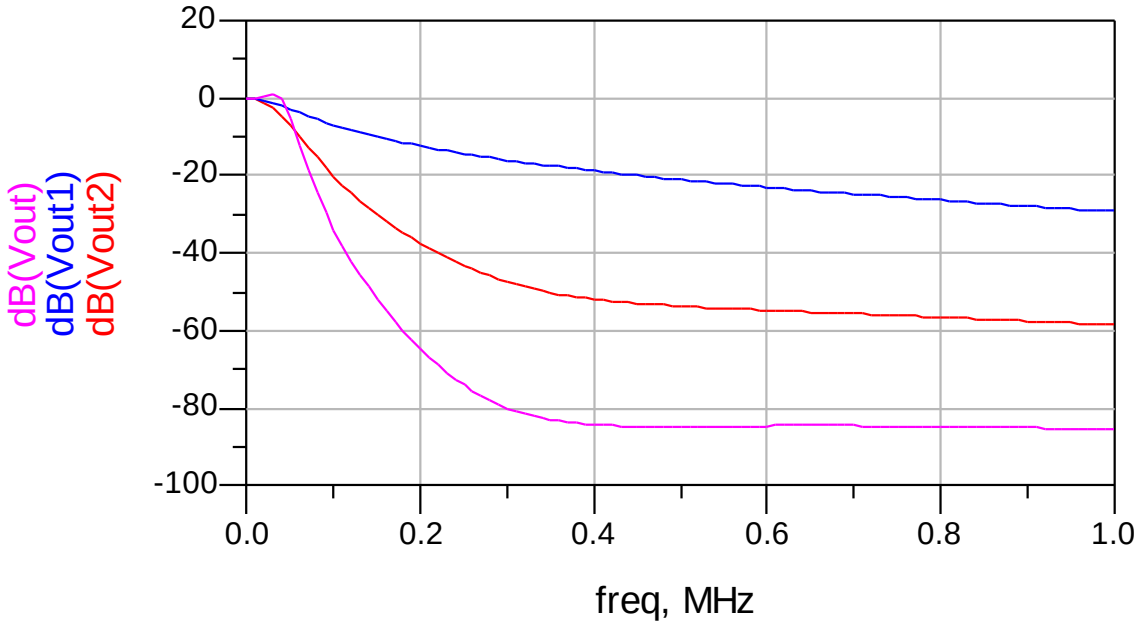
Butterworth 5 σταδίων

Για τη δημιουργία φίλτρου 5 σταδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί συνδιασμοί φίλτρων των οποίων το άθροισμα των βαθμών τους να είναι πέντε.Στην προκειμένη περίπτωση ,το φίλτρο 5 σταδίων δημιουργήθηκε απο 2 φίλτρα δύο σταδίων και απο 1 φίλτρο ενός σταδίου.



Η τάση Vout δείχνει την τάση εξοδου του φίλτρου 5 σταδίων,πάνω στο κύκλωμα έχουν σημειωθεί 2 ακόμα τάσεις.Η τάση Vout2 και η τάση Vout1,σηματοδοτουν αντίστοιχα τις τάσεις εξόδου των φίλτρων $3^{ων}$ σταδίων και $1^{ος}$ σταδίου.Το κύκλωμα του οποίου η τάση εξόδου είναι η Vout2 αποτελείται απο 1 φίλτρο ενός σταδίου και ένα φίλτρο 2 σταδίων ,επομένως η Vout2 είναι έξοδος φίλτρου $3^{ων}$ σταδίων.Επιπλέον η Vout1 είναι η τάση εξόδου του φίλρου ενός σταδίου.

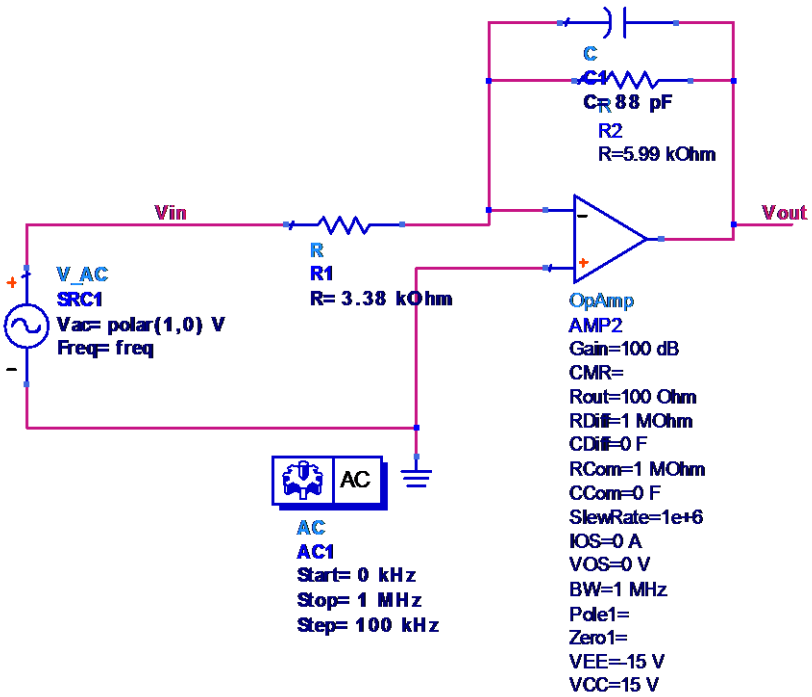
Στο επόμενο γράφημα φαίνεται το κέρδος για τις 3 εξόδους. Επομένως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο ίδιο γράφημα τις διαφορές στην κυματομορφή των φίλτρων $1^{ος}$,$3^{ων}$ και 5 σταδίων.



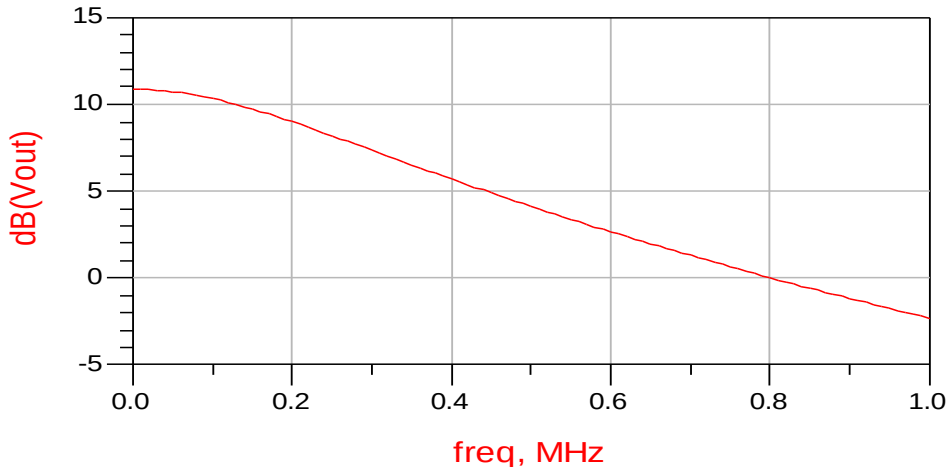
Είναι εμφανές οτι όσο μεγαλώνει ο αριθμός των σταδίων του φίλτρου τόσο πιο απότομη γίνεται η περιοχή μετάβασης.Το φίλτρο 5 σταδίων έχει την πιο απότομη μετάβαση,στη σύνεχεια όπως περιμέναμε, ακολουθεί το φίλτρο 3 σταδίων και τέλος την πιο ομαλή μετάβαση παρουσιάζει το φίλτρο $1^{ος}$ σταδίου.Επομένως βλέπουμε και πρακτικά οτι για να προσεγγίσουμε την ιδανική κατάσταση αρκεί να μεγαλώσουμε τον αριθμό των σταδίων του φίλτρου.

(2)CHEBYSHEV

Στη συνέχεια ακολουθούν τα φίλτρα Chebyshev.Και σε αυτή την περίπτωση έχουν προσομοιωθεί φίλτρα ενός ,δύο και πέντε σταδίων. Θα αρχίσουμε με ένα Chebyshev ενός σταδίου.

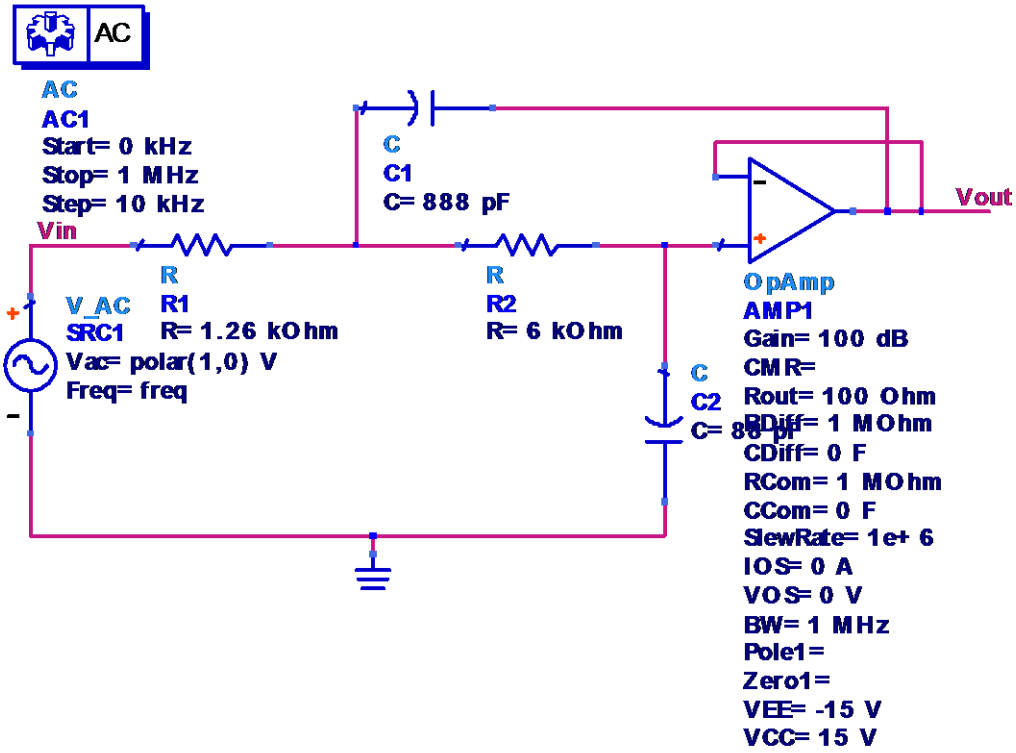


Η προσομοίωση του κυκλώματος έγινε απο 0 kHz μέχρι 10 kHz.Στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική του παράσταση.

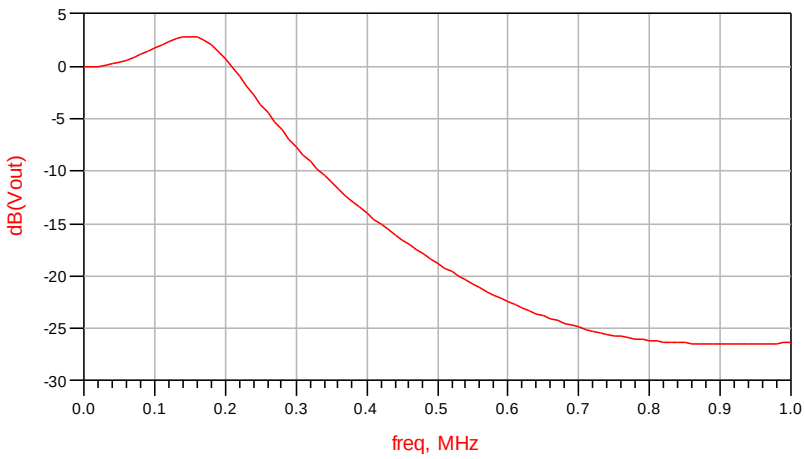


Το παπαπάνω φίλτρο ενός σταδίου έχει πολύ πιο ομαλή μετάβαση σε σχέση με τα φίλτρα 2 και 5 σταδίων που θα ακολουθήσουν.

Chebyshev 2 σταδίων



Το παραπάνω κύκλωμα έχει αναστρέφουσα συνδεσμολογία καθώς το σήμα εξόδου γυρνάει ξανά στην είσοδο 2 του ενισχυτή.

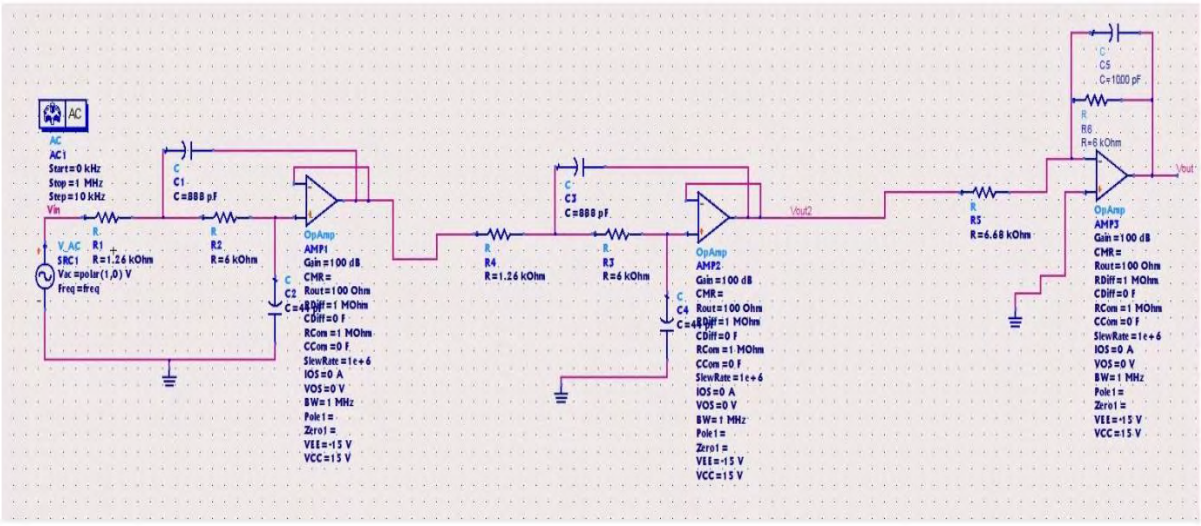


Επιπλέον απο την παραπάνω γραφική παράσταση μας δίνεται η ευκαιρία να παρατηρήσουμε την 'ριπή ' που έχουν τα φίλτρα

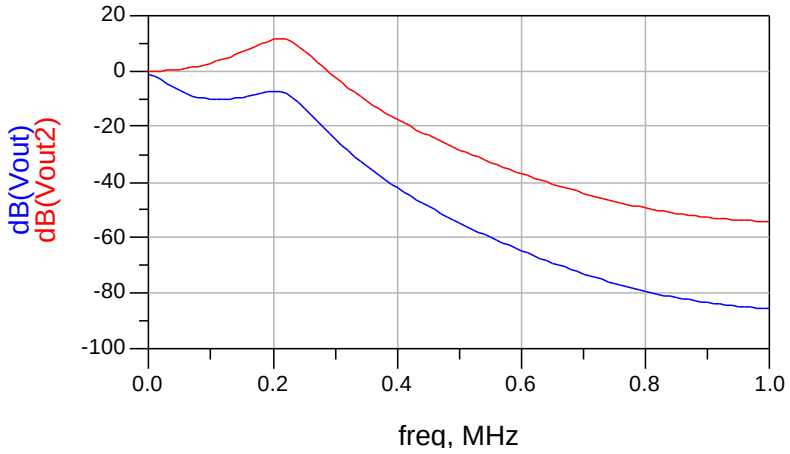
chebyshev.Δεδομένου οτι το φίλτρο μας είναι 2 σταδίων, περιμένουμε η ριπή του φίλτρου να είναι προς τα πάνω,όπως και είναι.

Τέλος,δημιουργήθηκε και ένα φίλτρο 5 σταδίων το οποίο αποτελείται απο 1 φίλτρο δύο σταδίων και ένα φίλτρο ενός σταδίου.

<u>Chebyshev 5 σταδίων</u>



Το κύκλωμα μέχρι την έξοδο του δεύτερου ενισχυτή αποτελείται απο τα 2 φίλτρα 2 σταδίων και στη συνέχεια ακολουθεί το φίλτρο 1^{ος} σταδίου.Στην έξοδο του δεύτερου ενισχυτή και πριν την αντίσταση που σηματοδοτεί την αρχή του φίλτρου 1^{ος} σταδίου έχουμε βάλει την τάση Vout2 η οποία μας δίνει την τάση εξόδου του πρώτου τμήματος του ολικού φίλτρου.Πιο απλά με την τάση Vout2 μπορούμε να δούμε την έξοδο ενός φίλτρου 4^{ων} σταδίων και να την συγκρίνουμε με την τελική έξοδο Vout που είναι η έξοδος του φίλτρου 5 σταδίων.



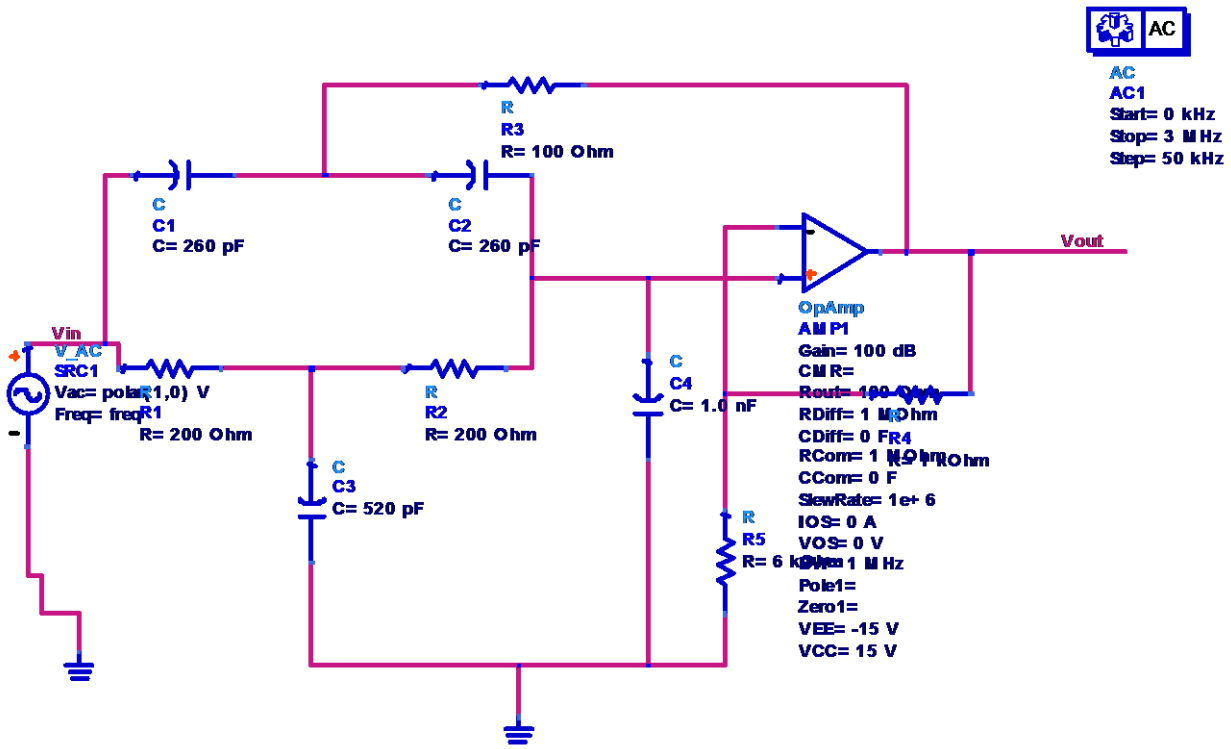
Με μπλε χρώμα είναι η καμπύλη που αφορά το φίλτρο 5 σταδίων ,ενώ με κόκκινο είναι η καμπύλη που αφορά το υποκύκλωμα 4^{ων} σταδίων.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε στην ενεργό ζώνη την ριπή προς τα κάτω που κάνει το φίλτρο 5 σταδίων σε αντίθεση με την ριπή προς τα πάνω που κάνει το φίλτρο 4^{ων} σταδίων .Επιπλέον φαίνεται η πιο απότομη μετάβαση που έχει το φίλτρο 5 σταδίων.

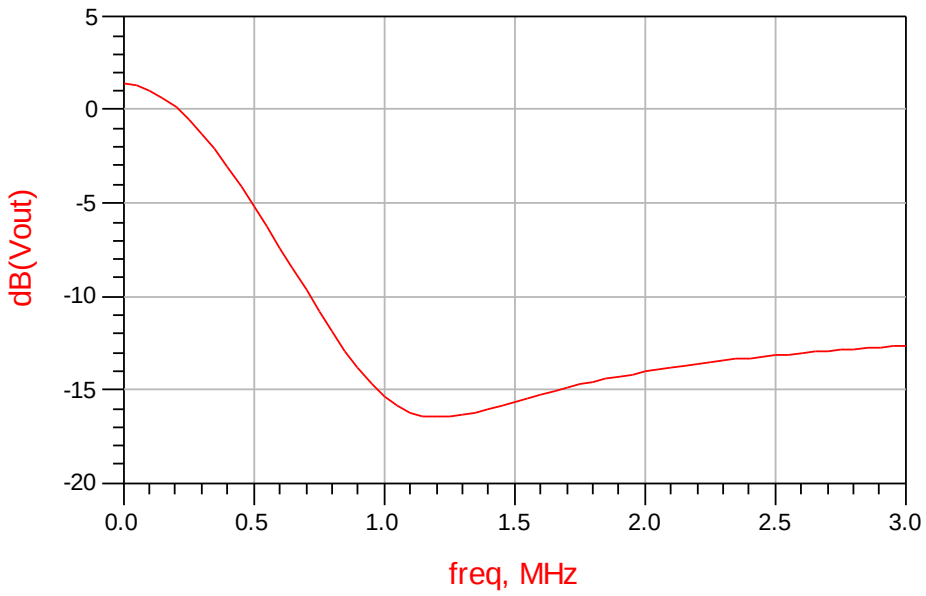
(3)Elliptic

Τέλος ακολουθούν τα ελλειπτικά φίλτρα,όπου εδώ δημιουργήθηκαν κυκλώματα ,δύο,τριών και πέντε σταδίων. Τα ελλειπτικά φίλτρα χρειάζονται μεγαλύτρο εύρος συχνοτήτων για να μπορέσουμε να μελετήσουμε την κυματομορφή του κέρδους τους.Για αυτό το λόγο οι προσομοιώσεις γίνανε μέχρι την συχνότητα των 3 MHz.

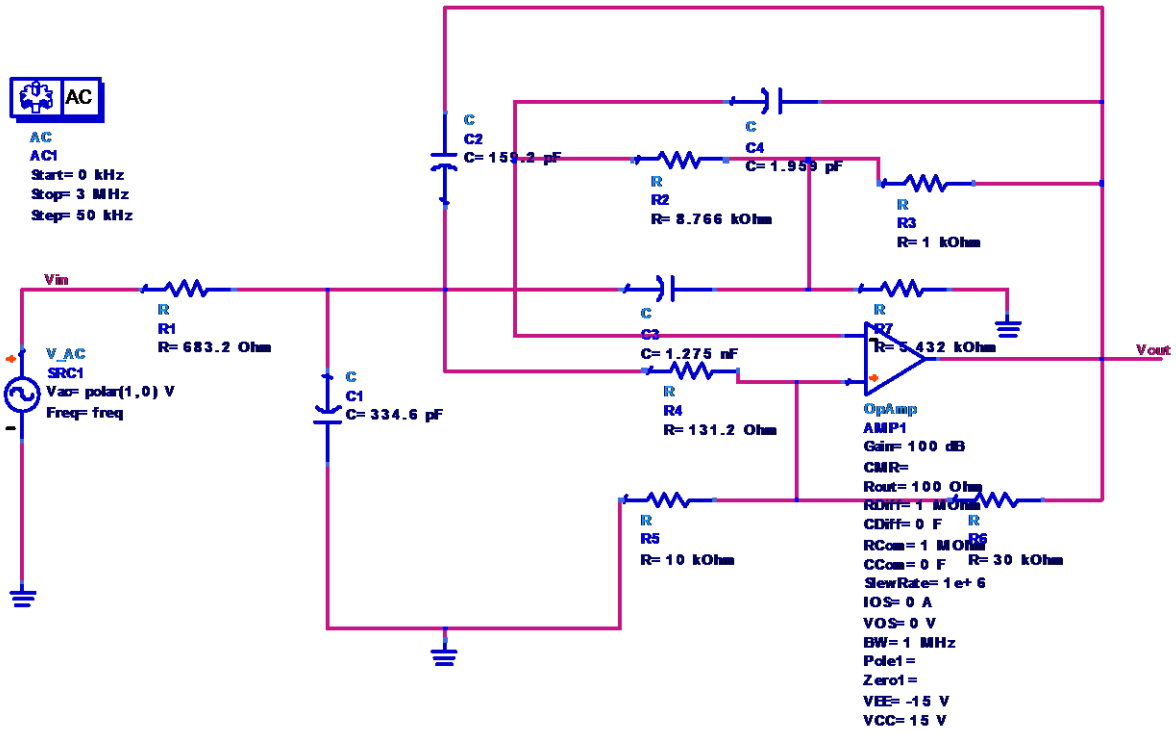
Το πρώτο κύκλωμα είναι 2 σταδίων.

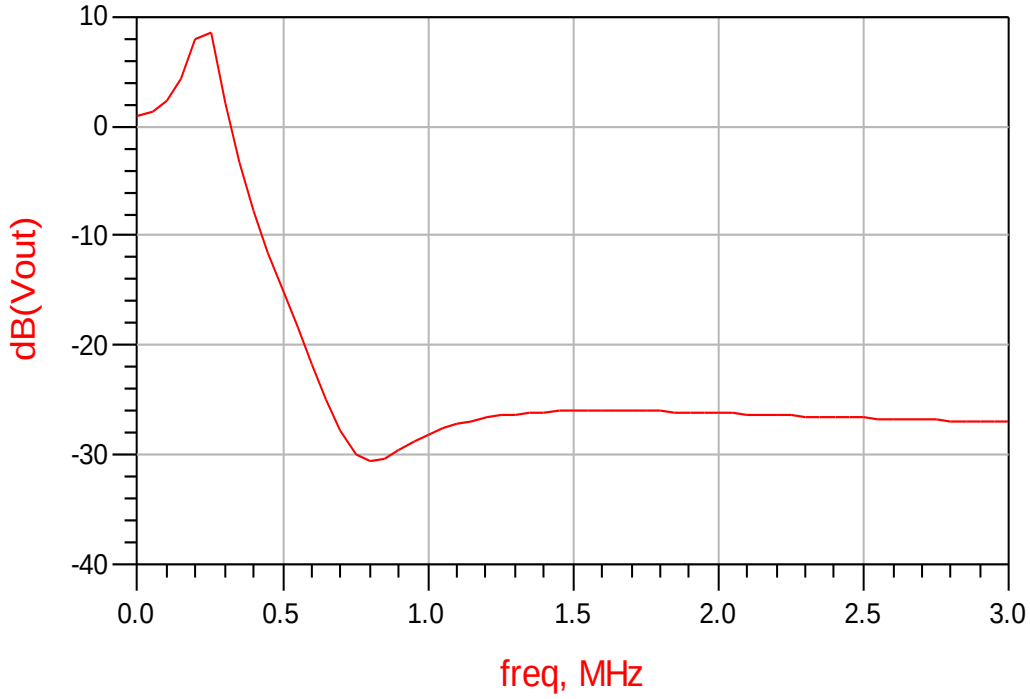


Και στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση του κέρδους του εν λόγω φίλτρου.



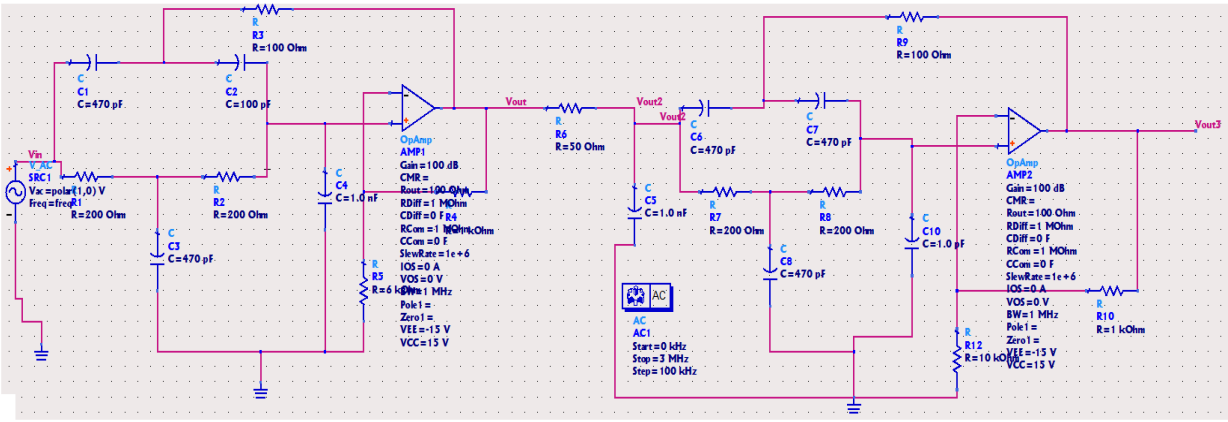
Στο φίλτρο 3 σταδίων που ακολουθεί φαίνεται καλύτερα η λειτουργία των ελλειπτικών φίλτρων και το πόσο απότομη είναι πραγματικά η μετάβαση τους απο την ενεργό ζώνη(που περνάνε οι επιθυμητές συχνότητες του σήματος εισόδου) στη ζώνη φραγής .

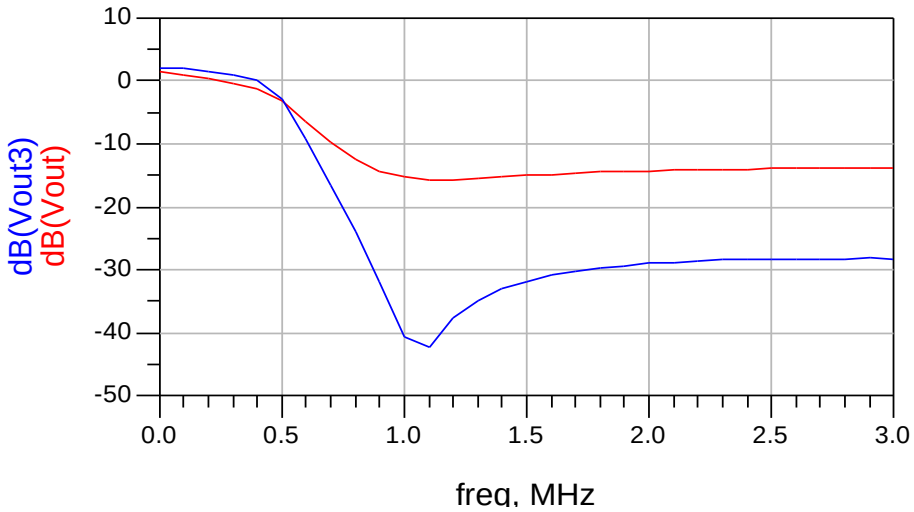




Εδώ φαίνονται πολύ καθαρά τα χαρακτηριστικά των ελλειπτικών φίλτρων.Η πολύ μικρή και απότομη περιοχή μετάβασης που έχουν αλλά και οι 'ριπές' τόσο στην ενεργό περιοχή αλλά και στην περιοχή φραγής.

Και τέλος ακολουθεί το φίλτρο 5 σταδίων το οποίο δημιουργήθηκε απο 2 φίλτρα,το πρώτο είναι 2 σταδίων και το δεύτερο 3 σταδίων ο συνδιασμός των οποίον μας δίνει το επιθυμητό ελλειπτικό φίλτρο 5 σταδίων. Για να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για το κέρδος του φίλτρου 5 σταδίων στην γραφική παράσταση που ακολουθεί ,θα παραθέσουμε και το κέρδος του φίλτρου 2 σταδίων για να είναι πιο εμφανής η διαφορά.Είναι εμφανές το πόσο πιο απότομη είναι η περιοχή μετάβασης στο φίλτρο 5^{ου} σταδίου σε σχέση με αυτό των 4^{ων} σταδίων.





Με το μπλε χρώμα φαίνεται το φίλτρο 5 σταδίων και με το κόκκινο το φίλτρο 2 σταδίων.

4.2 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων στο DSA με τις τιμές του ενισχυτή LM741*

Στο κεφάλαιο 3 και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα 3.3.2 έγινε μια εισαγωγή για τον ενισχυτή LM741.Ο εν λόγω ενισχυτής,είναι ενισχυτής γενικού σκοπού και οι τιμές του προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του default ενισχυτή του προγράμματος ADS για αρκετές απο τις παραμέτρους τους.

Παρακάτω παραθέτω ένα πίνακα με τις διαφορετικές τιμές που εισήχθησαν στους ενισχυτές των κυκλωμάτων κατά την προσομοίωση τους με τις τιμές του ενισχυτή LM741.

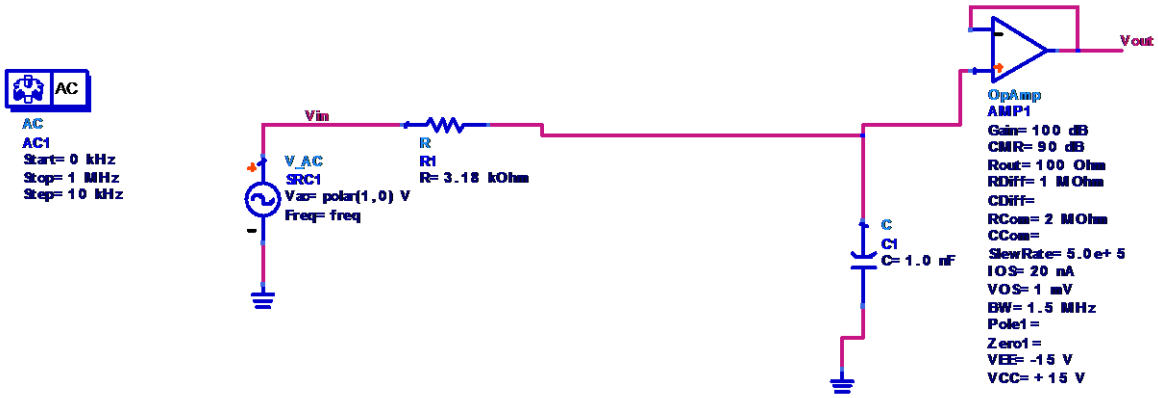
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	*DEFAULT ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΟΥ DSA*	*LM741*
Common mode rejection ratio	*------*	*90dB*
Common mode input resistance	*1MOhm*	*2Mohm*
Slewrate	*1e+6*	*5e+5*
Input offset current	*0A*	*20nA*
Input offset voltage	*OV*	*1mV*
Bandwidth	*1MHz*	*1.5MHz*

Στη συνέχεια θα παραθέσω όλα τα κυκλώματα που προσομοιώθηκαν για δεύτερη φορά ,μόνο που αυτή τη φορά έγινε χρήση των τιμών του ενισχυτή lm741.Οι διαφορές σε πολλά απο τα κυκλώματα ,είναι πολύ μικρές όσον αφορά την γραφική παράσταση του κέρδους.

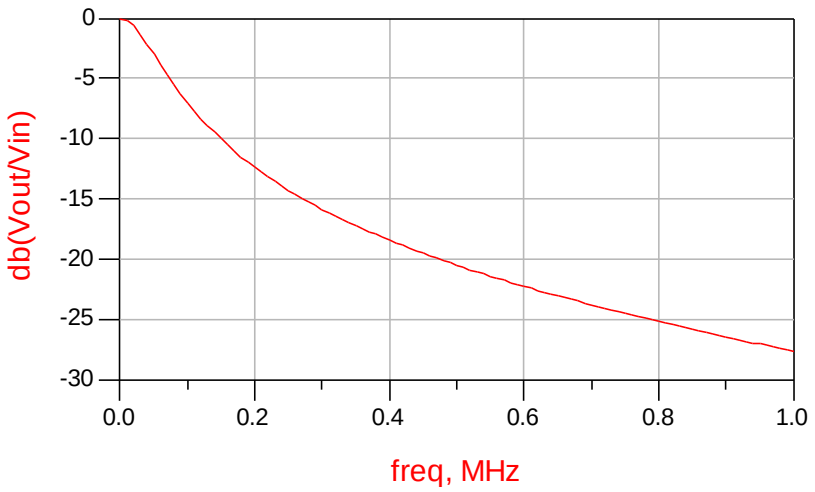
Θα ξεκινήσουμε όπως και παραπάνω με την τοπολογία Butterworth

(1)Butterworth

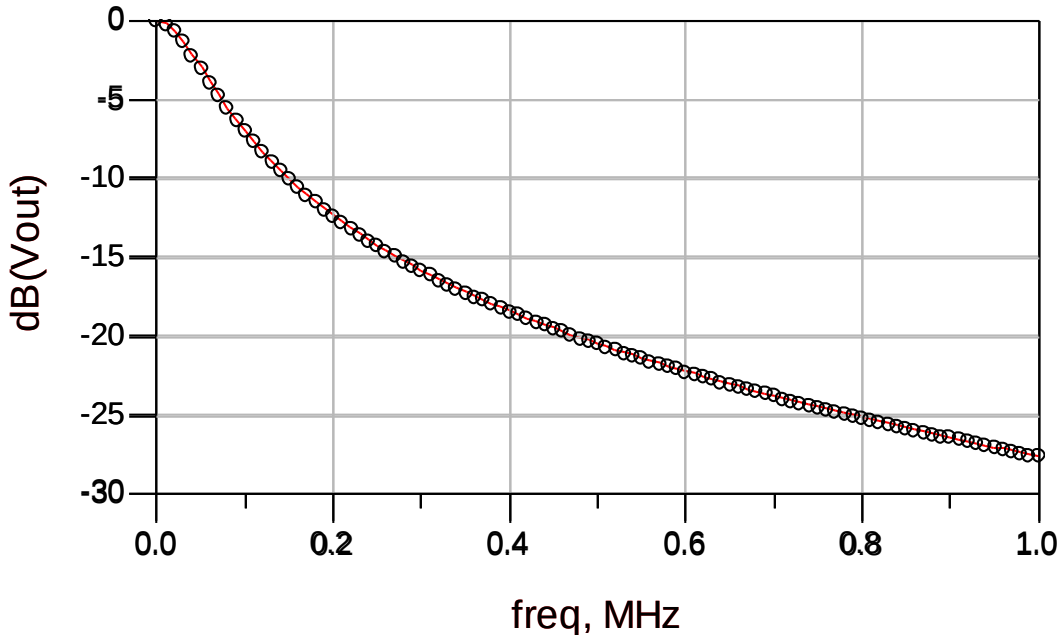
Το πρώτο κύκλωμα είναι ένα απλό φίλτρο ενός σταδίου.



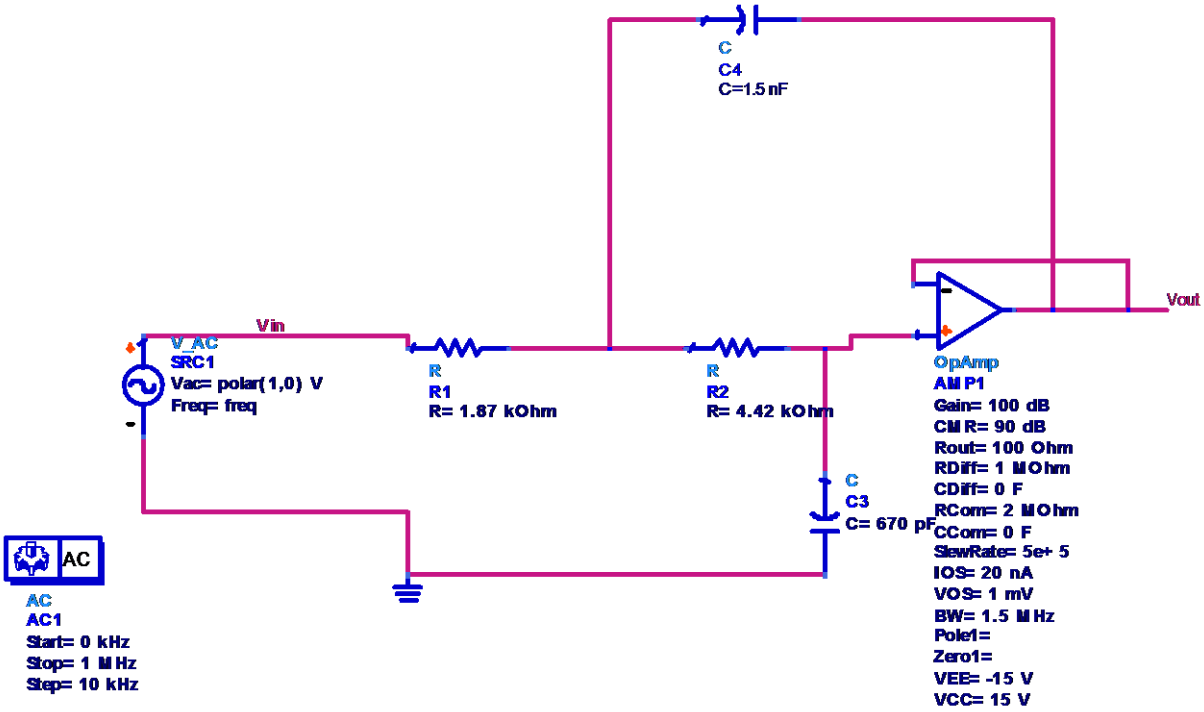
Αρχικά θα παραθέσω τη γραφική παράσταση του κέρδους για το παραπάνω φίλτρο και στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια σύγκριση των γραφικών παραστάσεων για το φίλτρο με χρήση του ενισχυτη lm741 και για το φίλτρο με χρήση του default ενισχυτή του ADS.



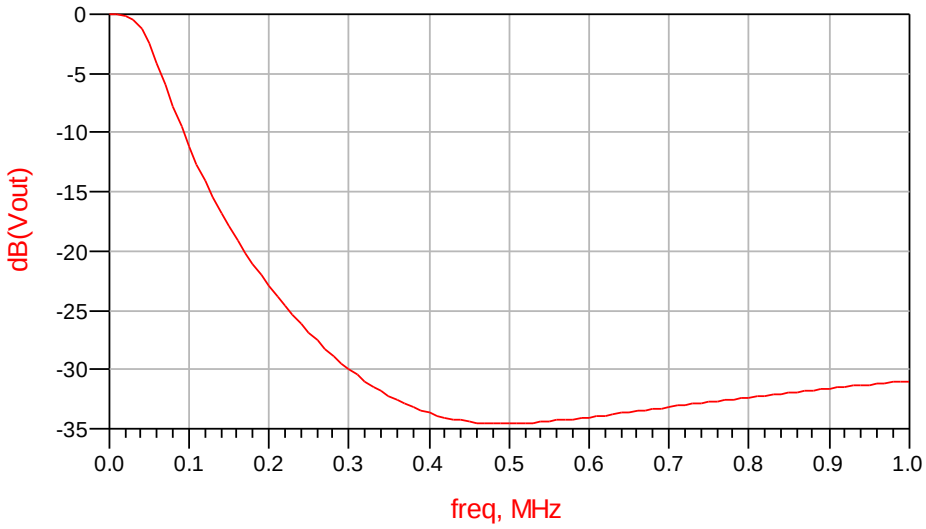
Η γραμμή με κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο κέρδος του φίλτρου με τον LM741 ,ενώ με τις μαύρες κουκίδες φαίνεται το κέρδος του φίλτρου με τον default ενισχυτή του ADS.Όπως φαίνεται και απο το γράφημα οι γραφικες παραστάσεις των 2 κυκλωμάτων είναι ίδιες.Υπάρχει απόλυτη επικάλυψη στις κυματομορφές.



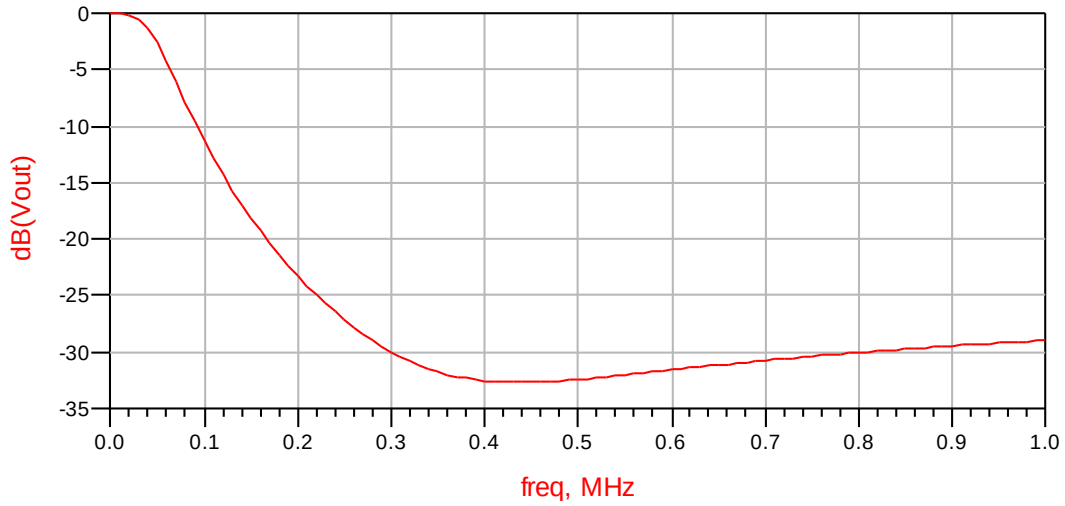
Στη συνέχεια ακολουθεί το φίλτρο 2 σταδίων,όπου φαίνεται να υπάρχει διαφορά στις κυματομορφές μεταξύ του φίλτρου με τον default ενισχυτή και σε αυτό με τον LM741.
Αρχικά παρουσιάζεται το κύκλωμα και στη συνέχεια ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις.Η δεύτερη γραφική παράσταση αντιστοιχεί στο κύκλωμα που χρησιμοποιεί τον ενισχυτή LM741.



Παρατηρούμε στην γραφική παράσταση πως στη συχνότητα των 0.5MHz έχουμε την ελάχιστη τιμή (-35) και στη συνέχεια το κέρδος μεγαλώνει μέχρι τη συχνότητα του 1^{ος} MHz όπου και πλησιάζει την τιμή -30.

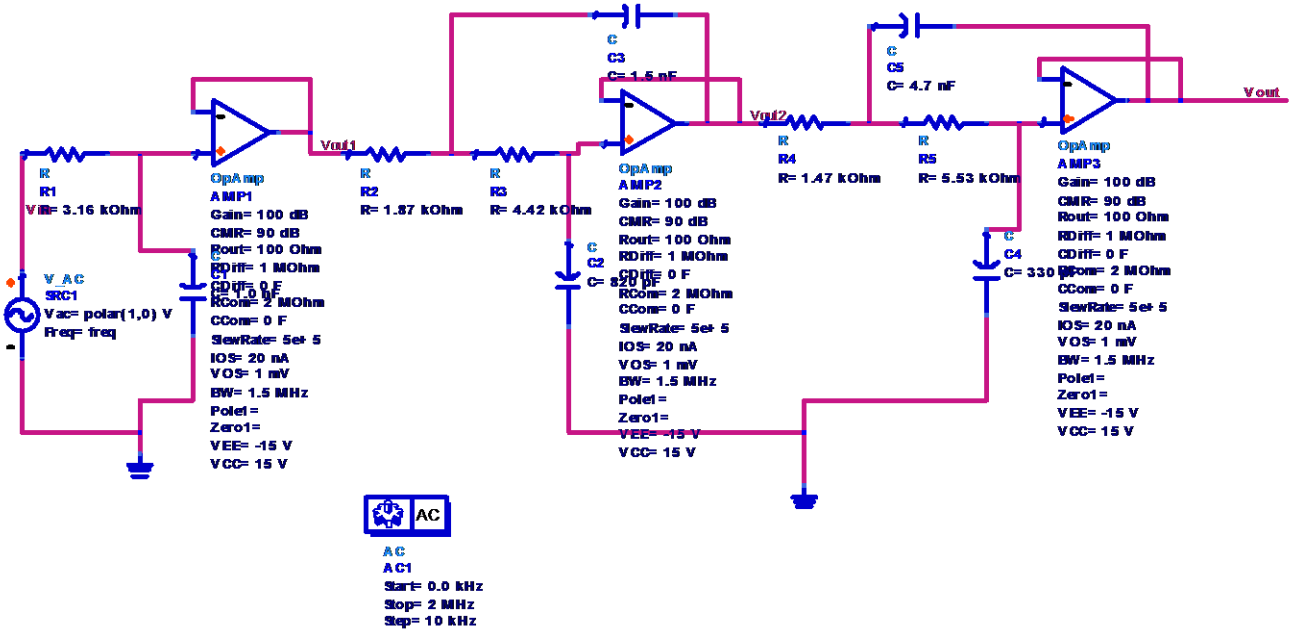


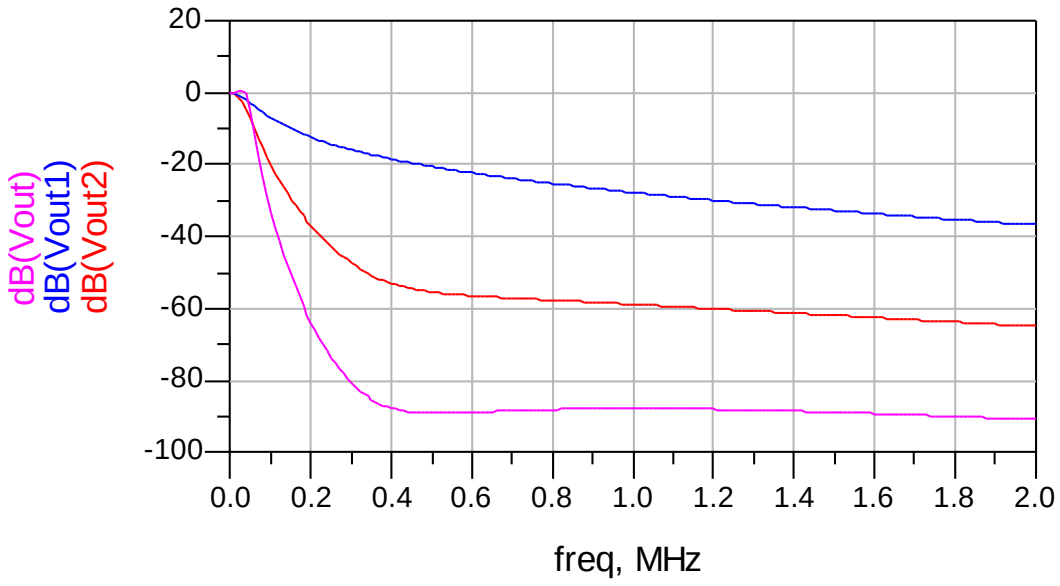
Στην γραφική απεικόνιση που ακολουθεί για το φίλτρο(2 σταδίων πάλι)στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής LM741,παρατηρούμε οτι την ελάχιστη τιμή του κέρδους την συναντάμε λίγο πριν την συχνότητα των 0.5 MHz,και πιο συγκεκριμένα στα 0.450 MHz ,ενώ η τιμή στη συχνότητα του 1^{ος} MHz ξεπερνά την τιμή -30.



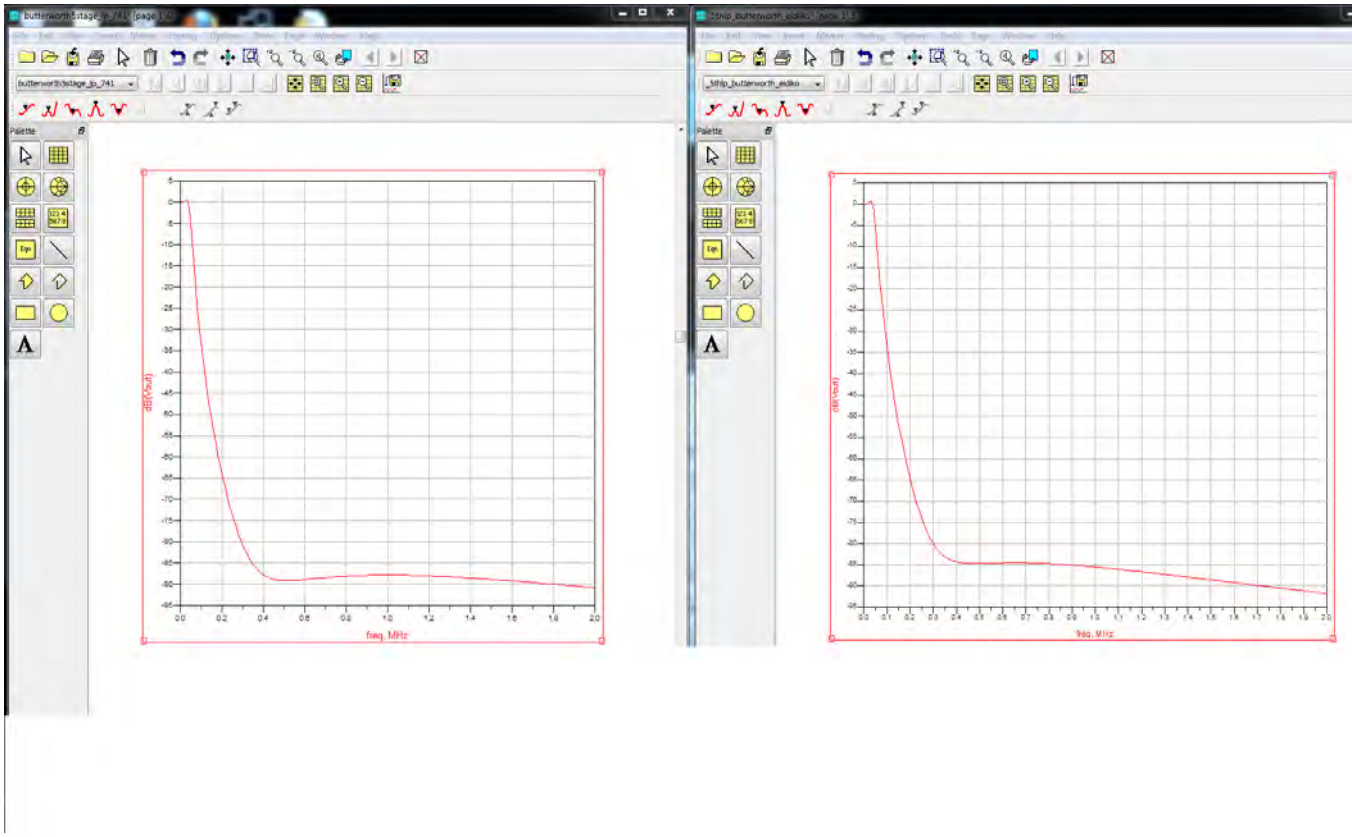
Αυτό που μπορούμε να ερμηνεύσουμε απο την σύγκριση των 2 φίλτρων 2^{ου} σταδίου είναι, πως οι όποιες διαφορές παρατηρούμε στις γραφικές απεικονήσεις είναι στην περιοχή φραγής των 2 φίλτρων.

Για να κλείσουμε με τη προσέγγιση Butterworth, θα εξετάσουμε και την περίπτωση του φίλτρου 5 σταδίων.Αρχικά θα παραθέσουμε το κύκλωμα με τις τιμές του LM741 και στη συνέχεια θα ακολουθήσει τόσο η γραφική απεικόνιση του φίλτρου όσο και η σύγκριση της κυματομορφής του με αυτή του φίλτρου που έχει τον default ενισχυτή .





Με το μπλε χρώμα είναι η κυματομορφή για το φίλτρο 1σταδίου,με το κόκκινο η κυματομορφή για φίλτρο 3^{ων} σταδίων μιας και η μέτρηση γίνεται μετά την έξοδο του 2^{ου} ενισχυτή και τέλος η ροζ κυματομορφή αντιστοιχεί στην τελική έξοδο του φίλτρου 5 σταδίων.

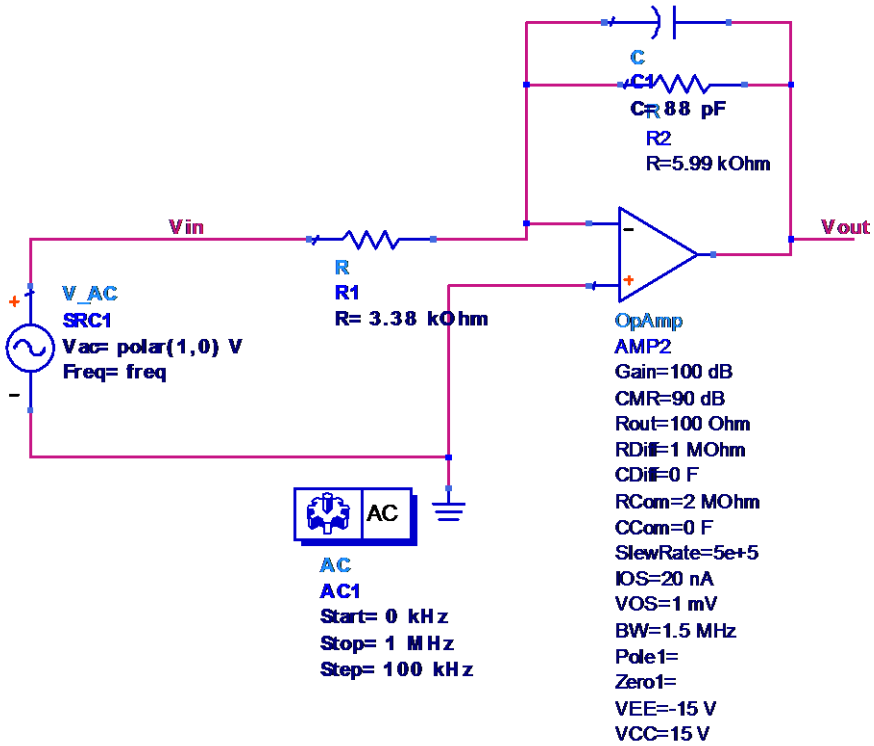


Στην αριστερή μεριά βλέπουμε την κυματομορή του φίλτρου το οποίο έχει στις παραμέτρους του ενισχυτή τις τιμές που αντιστοιχούν στον LM741 και στην δεξιά μεριά είναι η κυματομορφή για το φίλτρο με τον τις τιμές του default ενισχυτή.
Στην γραφική απεικόνιση όπου έχει γίνει χρήση του LM741 στη συχνότητα των 0.4MHz έχει τελειώσει η περιοχή μετάβασης και η τιμή του κέρδους είναι -87db.Μετά τα 0.4 MHz παρατηρούμε μια πολύ μικρή άνοδο στην καμπύλη μέχρι τη συχνότητα του 1.1 MHz και μετά απο κει σταδιακή μείωση μέχρι τα 2MHz.

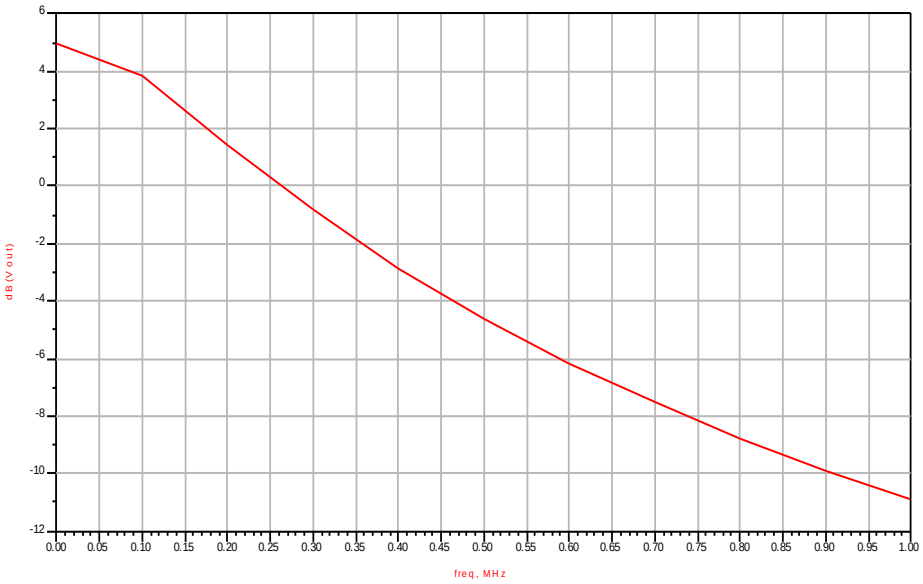
Όσον αφορά την κυματομορφή του φίλτρου όπου έχει γίνει χρήση του default ενισχυτή στη συχνότητα των 0.4MHz το κέρδος είναι sta -85db και παραμένει σταθερό μέχρι τα 0.9MHz,μετά απο τα 0.9MHz αρχίζει να πέφτει σταδιακά μέχρι και το τέλος των συχνοτήτων στα 2MHz.

(2)Chebyshev

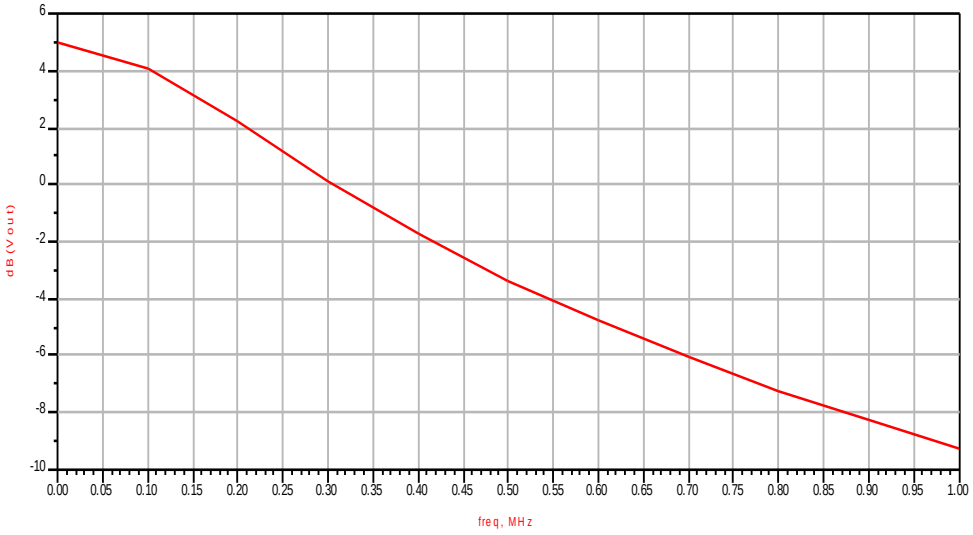
Στην προσομοίωση του φίλτρου butterworth 1^{ος} σταδίου προηγουμένως,οι διαφορές στην κυματομορφή του κέρδους του φίλτρου που χρησιμοποιούσε τον default ενισχυτή και του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε ο LM741 ήταν πολύ μικρές.Στην τοπολογία Chebyshev είναι πιο διακριτές οι διαφορές στην περίπτωση του φίλτρου 1^{ος} σταδίου.
Ακολουθεί το κύκλωμα του φίλτρου και στη συνέχεια η γραφική παράσταση του κέρδους.



Παρακάτω ακολουθεί η σύγκριση των γραφικών παραστάσεων των κερδών για τις περιπτώσεις του LM741 και του default ενισχυτή.



Εικόνα 1με χρήση του LM741



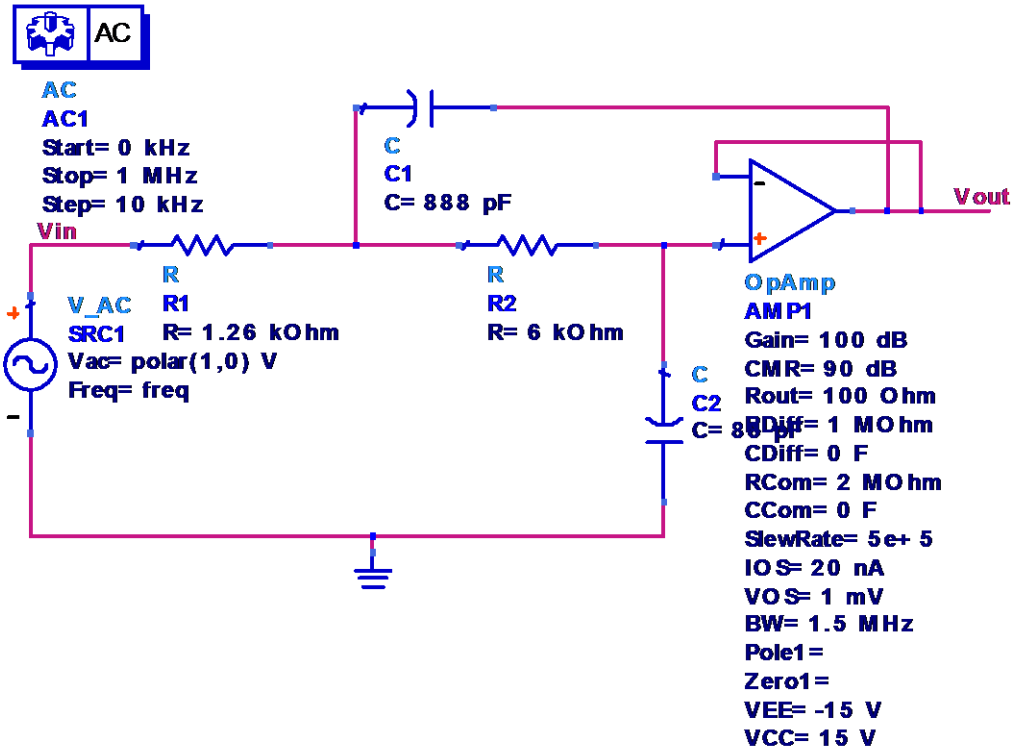
Εικόνα 2 με χρήση του default ενισχυτή

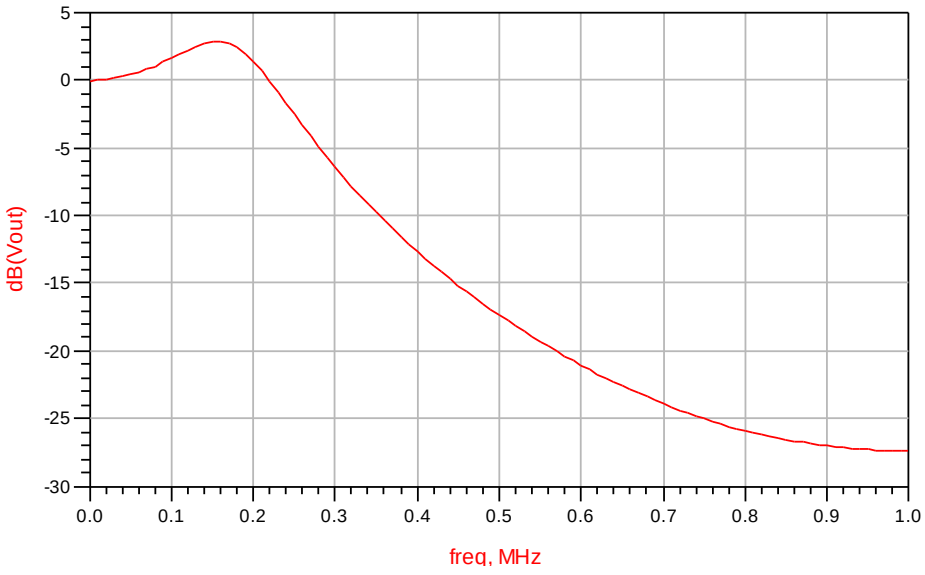
Η πρώτη γραφική παράσταση αντιστοιχεί στο φίλτρο που έχει τον ενισχυτή LM741 και η δεύτερη στο φίλτρο με τον default ενισχυτή.Στην περίπτωση της τοπολογίας Chebyshev η διαφορά στις γραφικές παραστάσεις του κέρδους δεν είναι μόνο στην περιοχή φραγής του φίλτρου όπως είχε παρατηρηθεί στην τοπολογία butterworth,αλλά ξεκινάει απο τις χαμηλές συχνότητες.
Μέχρι την συχνότητα των 0.10MHz δεν υπάρχει κάποια διαφορά.Κέρδος 0dB παρατηρούμε στην περίπτωση του LM741 στη συχνότητα των 0.26MHz ενώ στο φίλτρο με τον default ενισχυτή στη συχνότητα των 0.30 MHz. Για να μπορούμε να παρατηρήσουμε καλύτερα τη διαφορά στις τιμές του κέρδους για τις 2 περιπτώσεις θα τις εισάγω σε ένα πίνακα για να είναι πιο εύκολη η σύκριση.

GAIN	*FREQ ΣΤΟΝ LM741*	*FREQ ΣΤΟΝ DEFAULT*
-2	*0.17MHz*	*0.21 MHz*
-4	*0.46 MHz*	*0.55 MHz*
-6	*0.58 MHz*	*0.68 MHz*
-8	*0.73 MHz*	*0.87 MHz*
-9	*0.83 MHz*	*1 MHz*
-10	*0.90*	*--------*

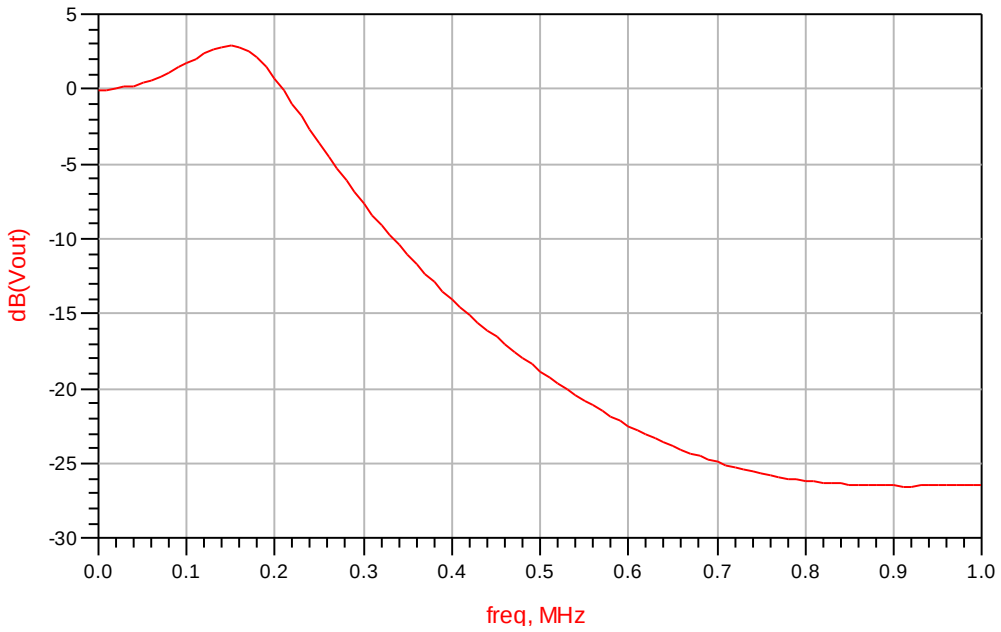
Παρατηρούμε οτι το φίλτρο με τον LM741 έχει μια πιο απότομη μετάβαση (σε όλες τις περιοχές του φίλτρου) σε σχέση με το φίλτρο που έχει τον default ενισχυτή.

Ακολουθεί το φίλτρο 2 σταδίων με τις συγκρίσεις των γραφικών παραστάσεων.





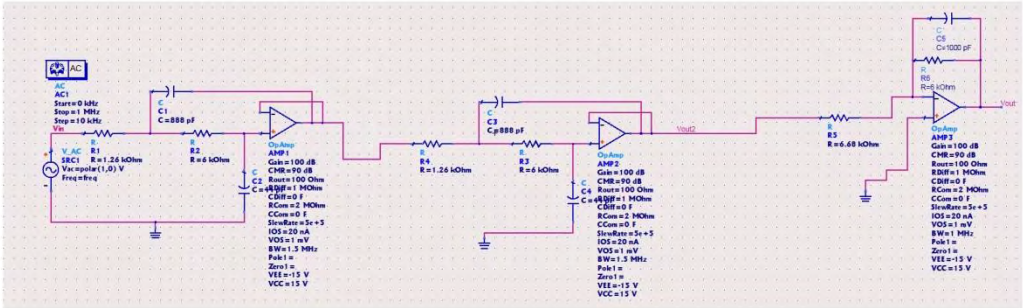
Εικόνα 3 με χρήση του LM741



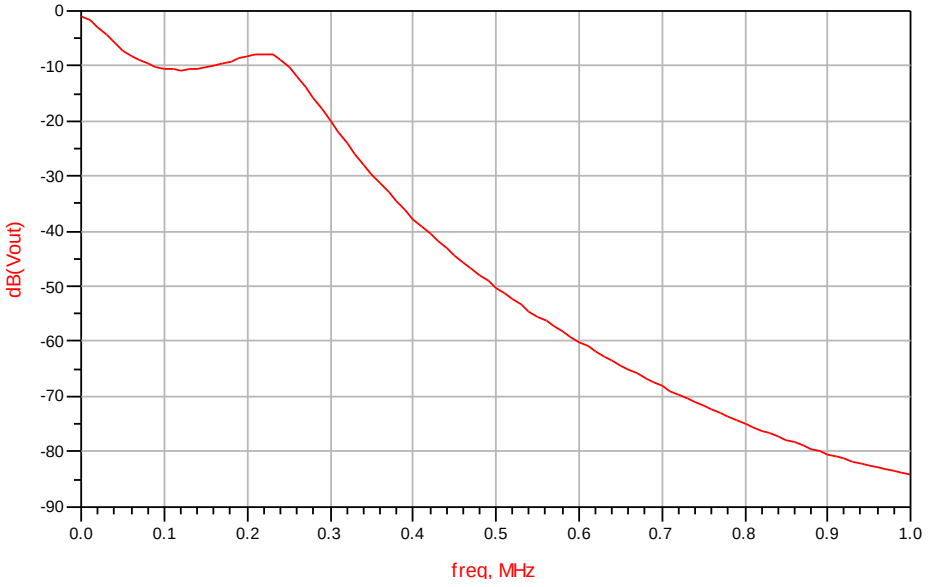
Εικόνα 4 με χρήση του default ενισχυτή

Απο τις 2 γραφικές παραστάσεις του φίλτρου chebyshev 2 σταδίων φαίνεται οτι η κυματομορφή του φίλτρου με τον ενισχυτή LM741 είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά σε σχέση με αυτήν του default ενισχυτή.

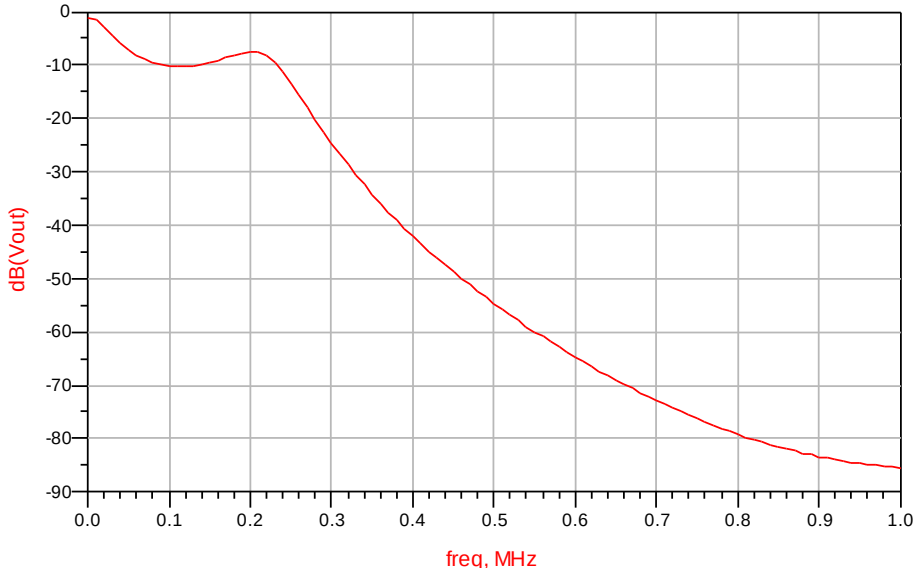
Τέλος ,θα παρουσιάσουμε και τις διαφορές για το φίλτρο 5 σταδίων.



Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για τα φίλτρα τόσο με τον ενισχυτή LM741 όσο και με τον default ενισχυτή του ADS.



Εικόνα 5 με χρήση LM741



Εικόνα 6
με χρήση του default ενισχυτή

GAIN	LM741	DEFAULT
-20dB	0.3MHz	0.28MHz
-30dB	0.35MHz	0.32MHz
-50dB	0.5MHz	0.46MHz
-60dB	0.6MHz	0.55MHz
-80dB	0.9MHz	0.81MHz

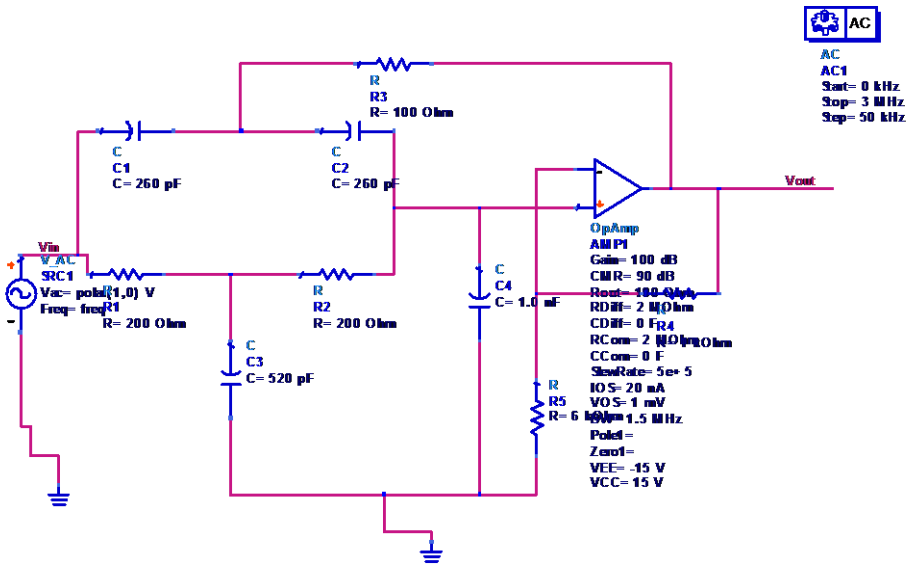
Ενδεικτικά επιλέξαμε κάποιες τιμές του κέρδους του φίλτρου για να δούμε τη διαφορά που θα έχει στη συχνότητα με τον εκάστοτε ενισχυτή κάθε φορά(LM741/default).Όπως προαναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας οι διαφορές που περιμένουμε να δούμε δεν θα είναι μεγάλες λόγω του οτι και οι 2 ενισχυτές είναι γενικού σκοπού.Αν όμως ληφθεί υπόψην το γεγονός οτι ,σε κάποιες παραμέτρους των ενισχυτών έχουμε διαφορετικές τιμές θα ήταν περίεργο να δούμε απαράλλαχτες τις γραφικές απεικονίσεις του κέρδους του φίλτρου.

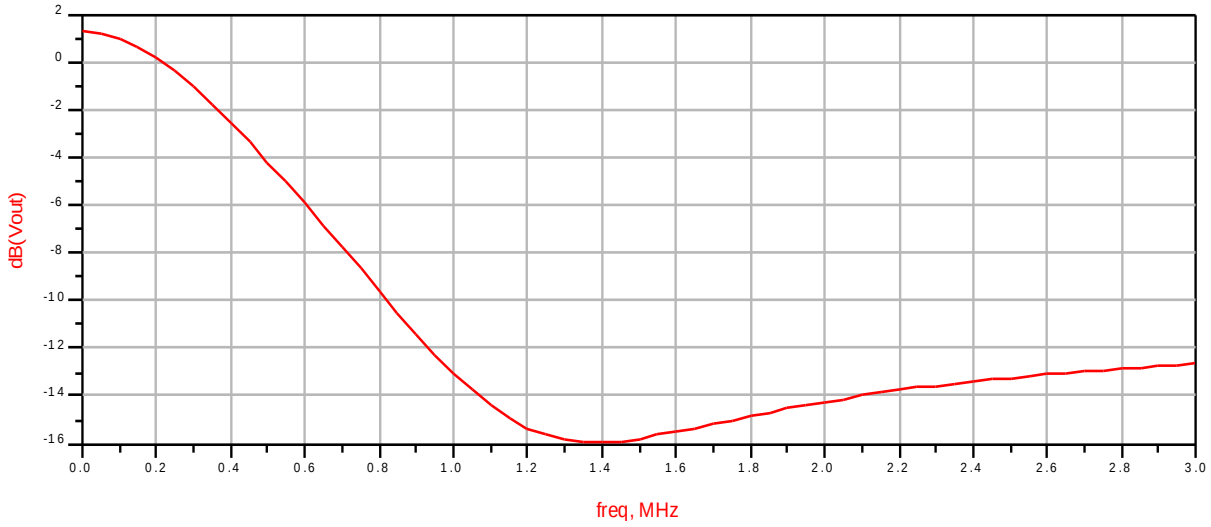
Η τελευταία τοπολογία φίλτρων που προσομοιώθηκε με χρήση του ADS είναι τα ελλειπτικά φίλτρα.

<u>(3)Elliptic</u>

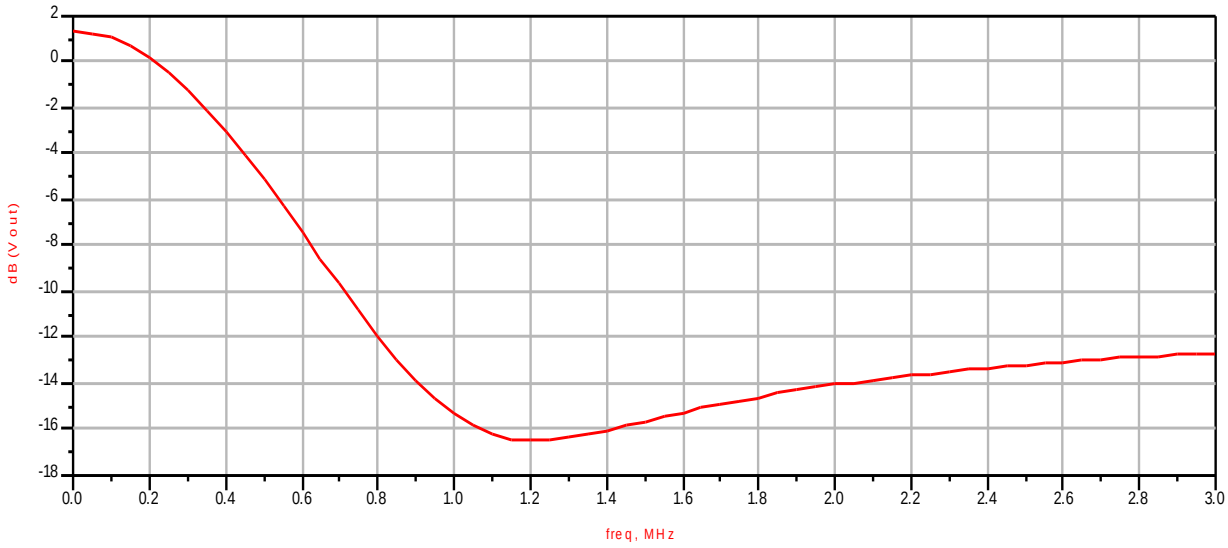
Στην κατηγορία των ελλειπτικών φίλτρων προσομοιώθηκαν φίλτρα 2,3 και 5 σταδίων.

Για αρχή θα ξεκινήσουμε με το ελλειπτικό φίλτρο 2 σταδίων.





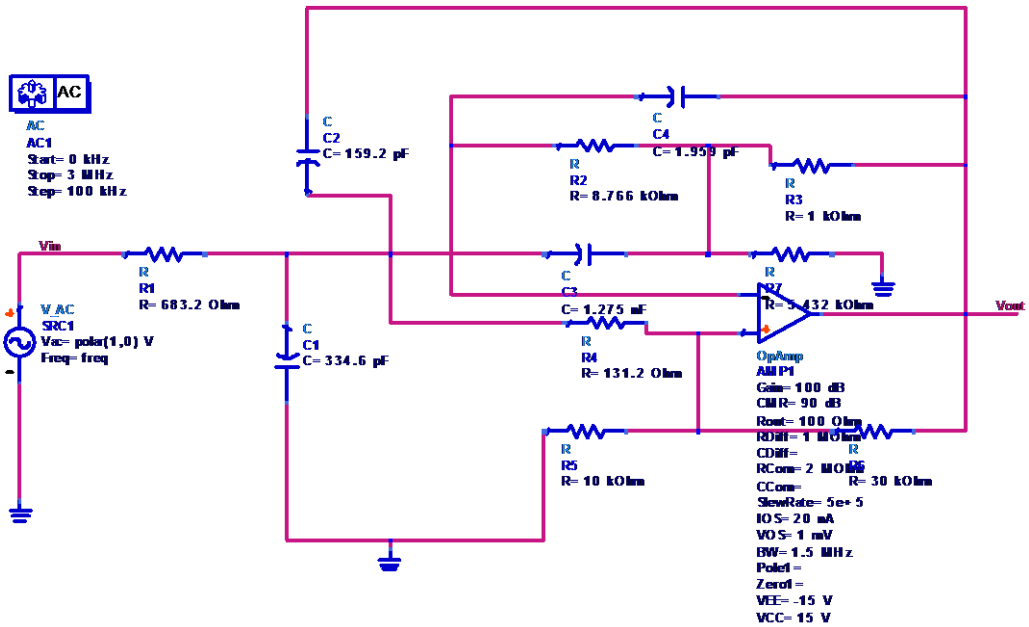
Εικόνα 7 ΜΕ χρήση του ML741



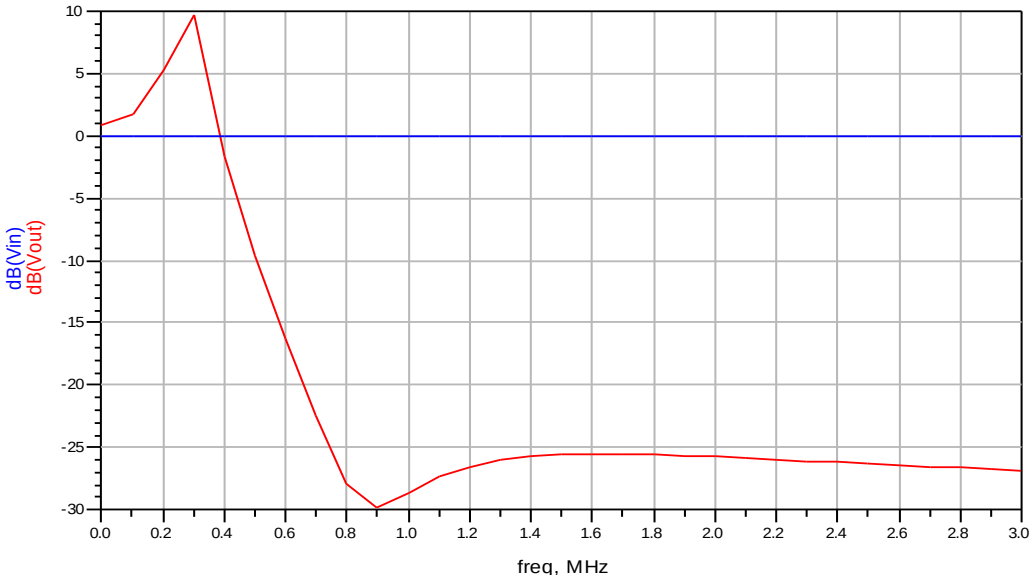
Εικόνα 8 με χρήση του default ενισχυτή

Απο τις 2 γραφικές παραστάσεις φαίνεται πως τόσο το φίλτρο που έχει υλοποιηθεί με τον ενισχυτή LM741 όσο και το φίλτρο με τον default ενισχυτή toy ADS στην ενεργό περιοχή έχουν την ίδια κυματομορφή.Μετά τα 0.2MHz αρχίζουν να διαφοροποιούνται οι κυματομορφές,και η γραφική παράσταση του φίλτρου με τον default ενισχυτή φαίνεται να έχει πιο απότομη κλίση.Ηκατώτερη τιμή του κέρδους για τα 2 φίλτρα είναι -16dB για το φίλτρο με τον lm741 και -16.5 για το φίλτρο με τον default ενισχυτή.Η διαφορά στις κυματομορφές παρατηρείται και στην περιοχή φραγής ,καθώς για κέρδος -15 dB η συχνότητες που αντιστοιχούν στα 2 φίλτρα είναι 2.1 MHz για το φίλτρο με τον ενισχυτή lm741 και 2.0 MHz για το φίλτρο με τον default ενισχυτή.Συνολικά λοιπόν παρατηρείται μια καθυστέρηση στις αντίστοιχες τιμές κέρδους όσον αφορά το ενεργό φίλτρο που υλοποιήθηκε με τον LM741.

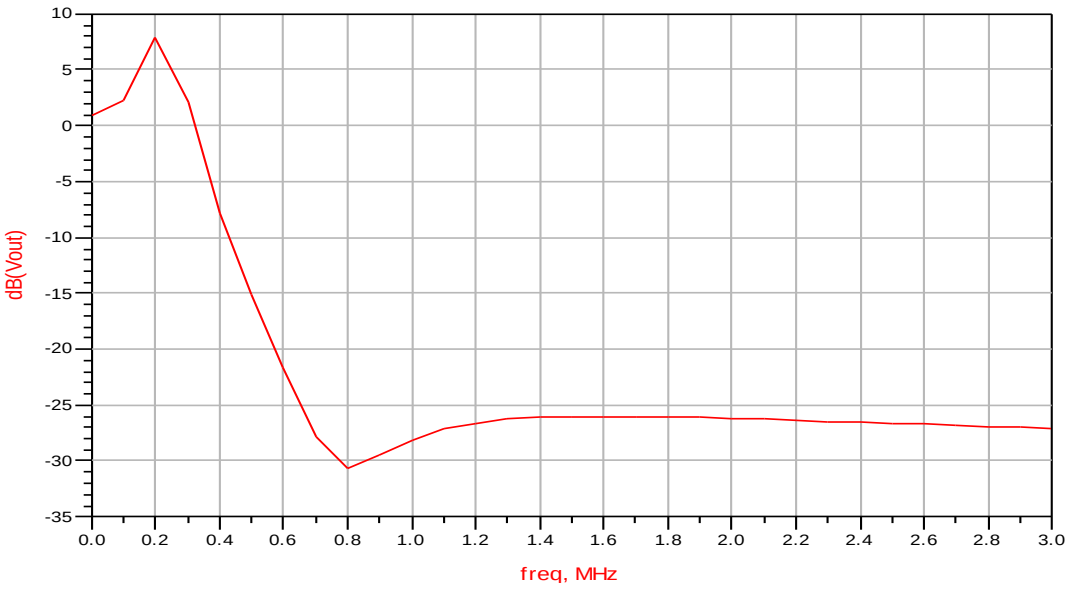
Το επόμενο κύκλωμα που θα μελετηθεί είναι το εελιπτικό φίλτρο 3^{ων} σταδίων.



Στην περίπτωση του φίλτρου 3^{ων} σταδίων οι διαφορές των γραφικών παρασάσεων είναι πιο έντονες.



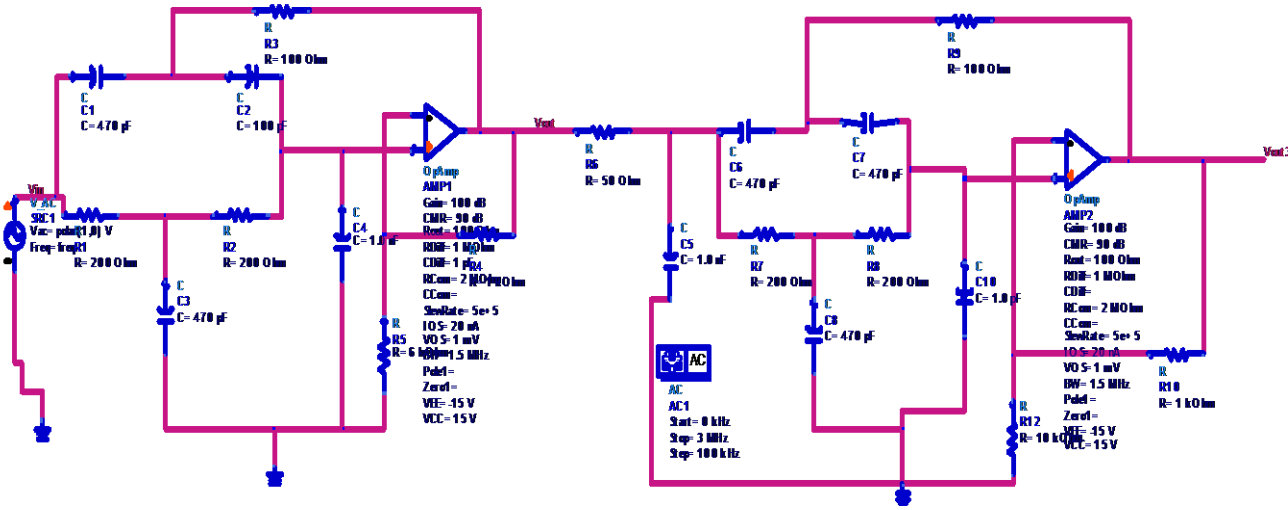
Εικόνα 9 με χρήση του LM741



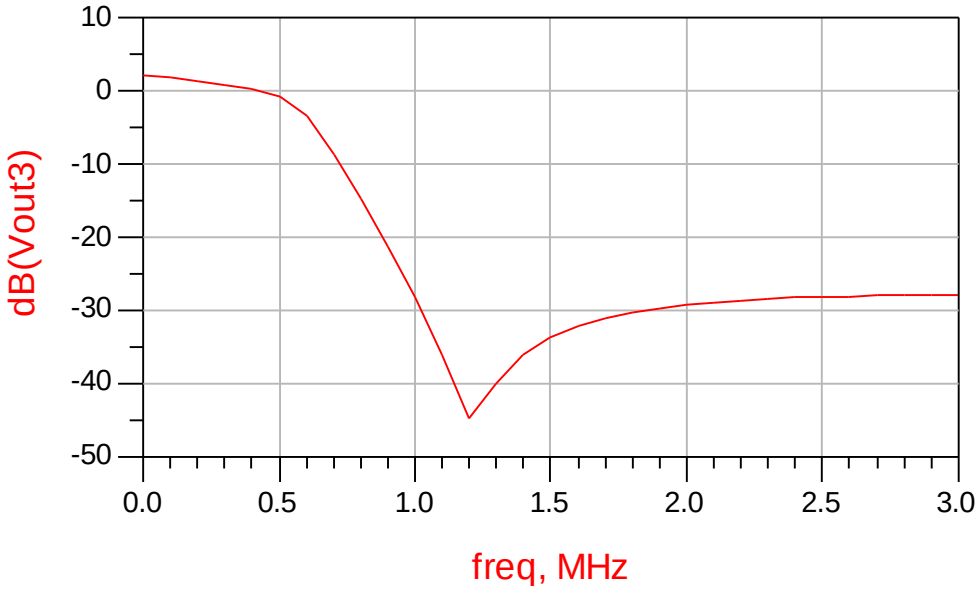
Εικόνα 10 με χρήση του default ενισχυτή

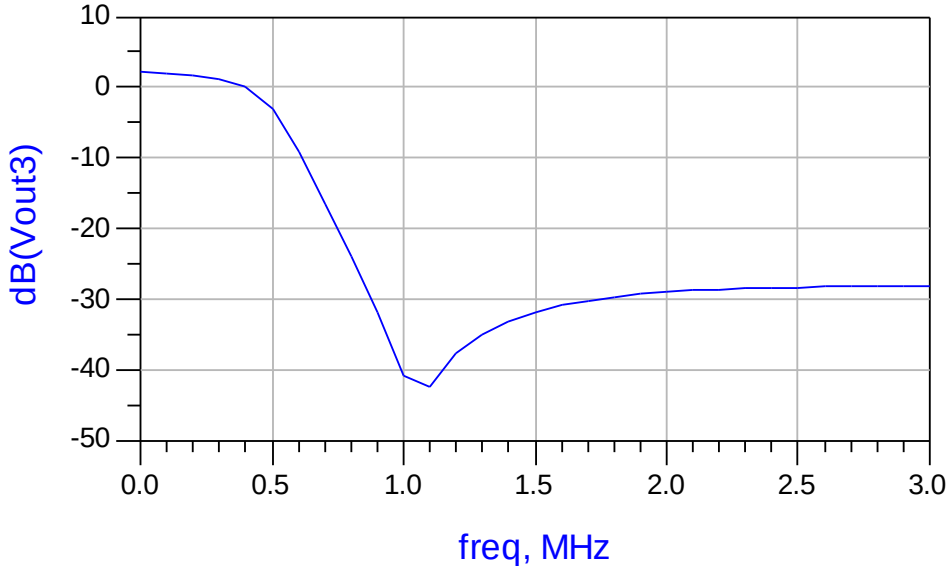
Η πρώτη διαφορά που παρατηρούμε είναι στην ενεργό περιοχή,και πιο συγκερκριμένα στην ριπή που κάνει το ελλειπτικό φίλτρο.Το peak της ριπής έχει διαφορετικές τιμές για τα 2 φίλτρα.Στο φίλτρο που έχει σχεδιαστεί με τον lm741 η μέγιστη τιμή του κέρδους βλέπουμε οτι αγγίζει τα 10 dB στη συχνότητα των 0.3MHz ενώ για το αντίστοιχο ελλειπτικό φίλτρο με τον default ενισχυτή, η μέγιστη τιμή είναι τα 8dB και παρατηρείται στα 0.2MHz.Στην συνέχεια όσον αφορά την περιοχή μετάβασης, το φίλτρο που έχει σχεδιαστεί με τον default ενισχυτή έχει πολύ πιο απότομη κλίση και βλέπουμε οτι πίανει την χαμηλότερη τιμή κέρδους στη συχνότητα των 0.8MHz,σε αντίθεση με το φίλτρο που έχει σχεδιαστεί με τον lm741 στο οποίο αυτή η τιμή κέρδους συναντάται στα 0.9MHz.Στην περιοχή φραγής οι διαφορές δεν είναι σημαντικές.

Το τελευταίο φίλτρο της τοπολογίας των ελλειπτικών φίλτρων είναι αυτό των 5 σταδίων,το οποίο έχει δημιοθργηθεί απο το συνδιασμό των 2 παραπάνω ελλειπτικών φίλτρων .



Και στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της προσομοίωσης.Η γραφική απεικόνιση με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο φίλτρο το οποίο υλοποιήθηκε με τον LM741,ενώ η γραφική απεικόνιση με το μπλε χρώμα είναι για το φίλτρο με τον default ενισχυτή.





Όπως και σε όλες τις προηγούμενες συγκρίσεις ,έτσι και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε οτι η περιοχή μετάβασης στην δεύτερη εικόνα αρχίζει νωρίτερα ,και η κυματομορφή του εν λόγο φίλτρου έχει πιο απότομη κλίση με αποτέλεσμα να φτάνει στην περιοχή φραγής σε μικρότερη συχνότητα(1MHz) σε σχέση με την συχνότητα φραγής (1.2MHz) που αντιστοιχεί στο φίλτρο με τον LM741.Επιπλέον η κατώτατη τιμή κέρδους διαφέρει στις 2 περιπτώσεις.Στην περίπτωση του φίλτρου με τον LM741 στη συχνότητα των 1.2 MHz η τιμή του κέρδους είναι -45dB ενώ για το φίλτρο με τον default ενισχυτή η κατώτατη τιμή κέρδους είναι -42dB και συναντάται στα 1.1MHz.

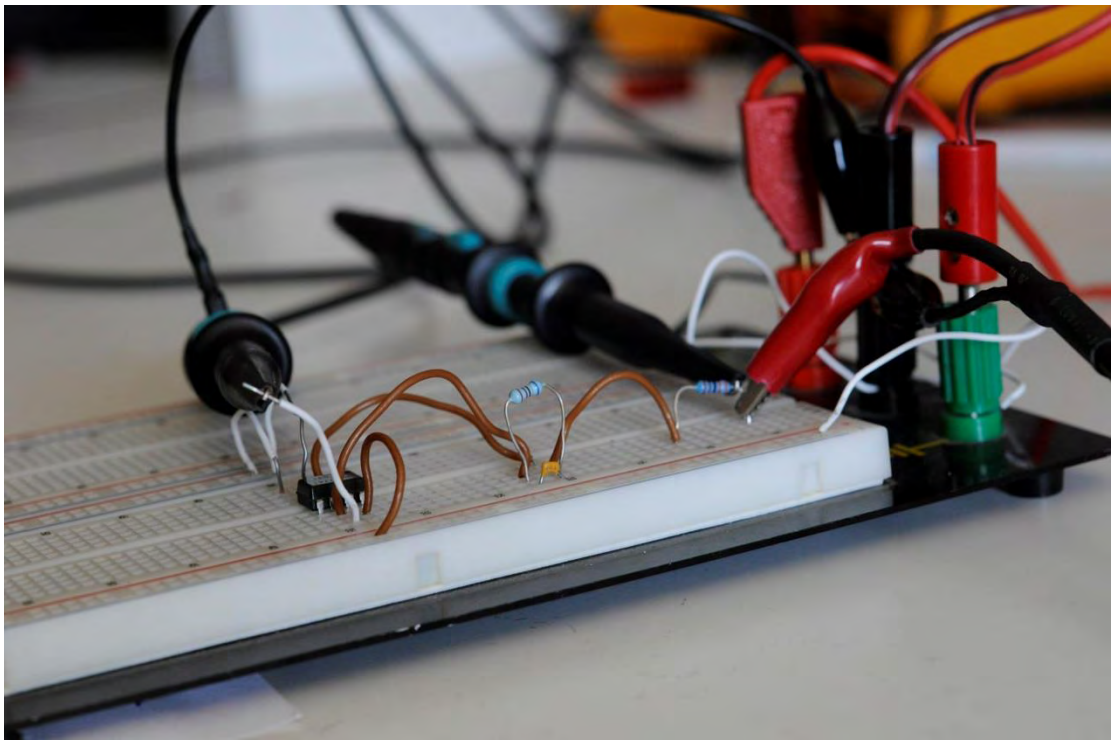
4.3 *Προσομοιώσεις κυκλωμάτων με χρήση του ενισχυτή LM741 σε breadboard σε εργαστηριακό περιβάλλον.*

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας,πέρα απο τις προσομοιώσεις των φίλτρων με χρήση του προγράμματος ADS,έγινε και προσομοίωση των κυκλωμάτων στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των φίλτρων καταγράφηκαν σε παλμογράφο του πανεπιστημίου απο όπου κρατήθηκαν οι τιμές και φτιάχτηκαν διαγράμματα για την έξοδο του φίλτρου σε συνάρτηση με τη συχνότητα.Στη συνέχεια έγινε μελέτη των αποτελεσμάτων και σύγκριση τους με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν στο ADS.Στην προσομοίωση που έγινε στο εργαστήριο,χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδές σήμα εισόδου τάσης 1V και μέσω του παλμογράφου είχαμε απεικόνιση της κυματομορφής τόσο για το σήμα εισόδου όσο και για το σήμα εξόδου.Στη συνέχεια συλλέχθηκαν οι μετρήσεις και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα για την τάση εξόδου με δεδομένο το σήμα εισόδου 1V.
Το κέρδος τάσης όπως ορίστηκε και στο 3° κεφάλαιο δίνεται απο την σχέση Av=Vout/Vin. Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος σε decibel και να ελέγξουμε κατά πόσον είναι κοντά οι τιμές της προσομοίωσης αυτής σε σχέση με την προσομοίωση στο πρόγραμμα ADS.

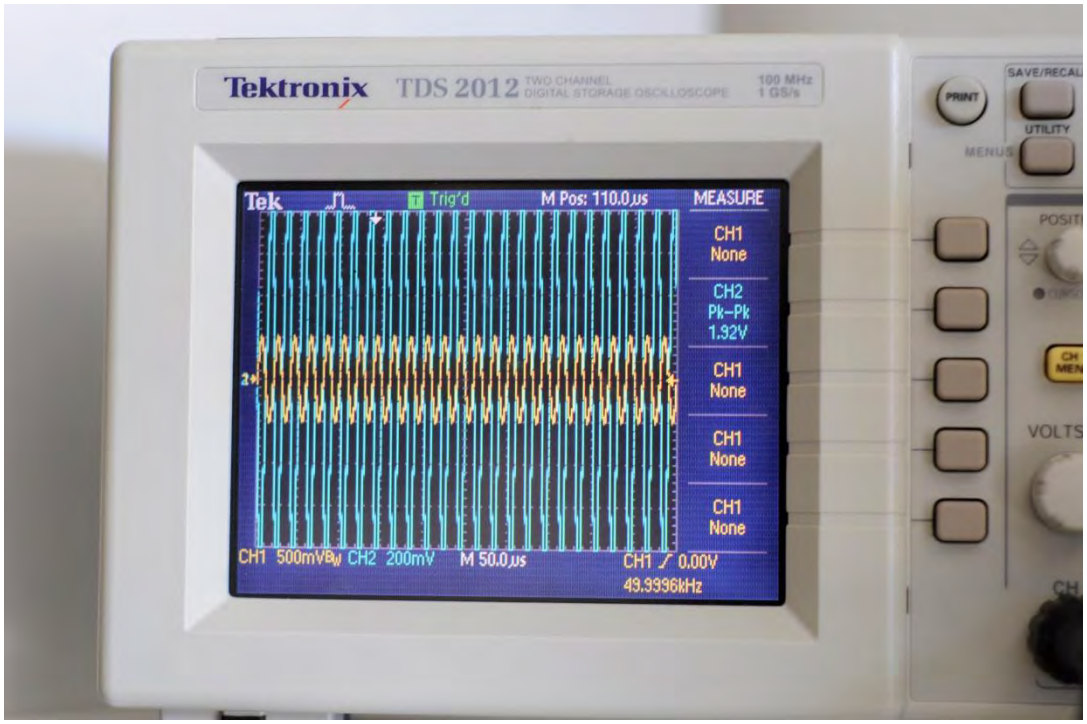
Σε αυτή την ενότητα θα αντικαταστήσουμε τις μέχρι τώρα εικόνες του κυκλώματος(όπως αυτό είχε υλοποιηθεί στο ADS) με φωτογραφίες απο τα πραγματικά κυκλώματα τα οποία δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο.Επιπλέον θα υπάρχουν για κάθε φίλτρο 2 φωτογραφίες με την ένδειξη του παλμογράφου σε χαμηλές συχνότητες για να φαίνονται καθαρά οι κυμματομορφές..Οι υπόλοιπες συχνότητες της προσομοίωσης θα παρουσιαστούν τόσο σε ένα πίνακα όσο και μέσω διαγραμμάτων.Σε όλες τις μετρήσεις έχει χρησιμοποιηθεί ημιτονοειδές σήμα εισόδου 1V.

Θα αρχίσουμε την παράθεση των αποτελεσμάτων με την τοπολογία Chebyshev.

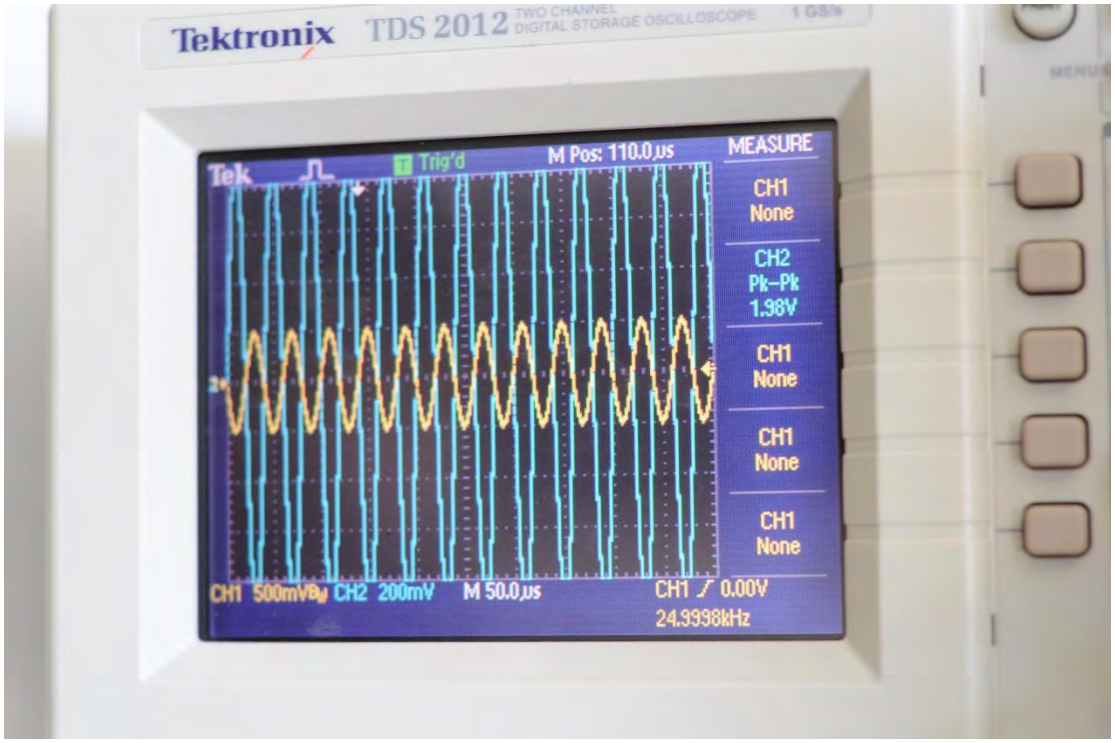
<u>Chebyshev ενός σταδίου</u>



Με τη χρήση των ακροδεκτών του παλμογράφου παίρνουμε τις τιμές τόσο για το σήμα εισόδου(το οποίο έχει σταθερή τιμή) όσο και για το σήμα εξόδου.Στη συνέχεια ακολουθούν οι 2 φωτογραφίες του παλμογράφου για προσομοίωση του φίλτρου στις συχνότητες των 25 KHz και 50 KHz.



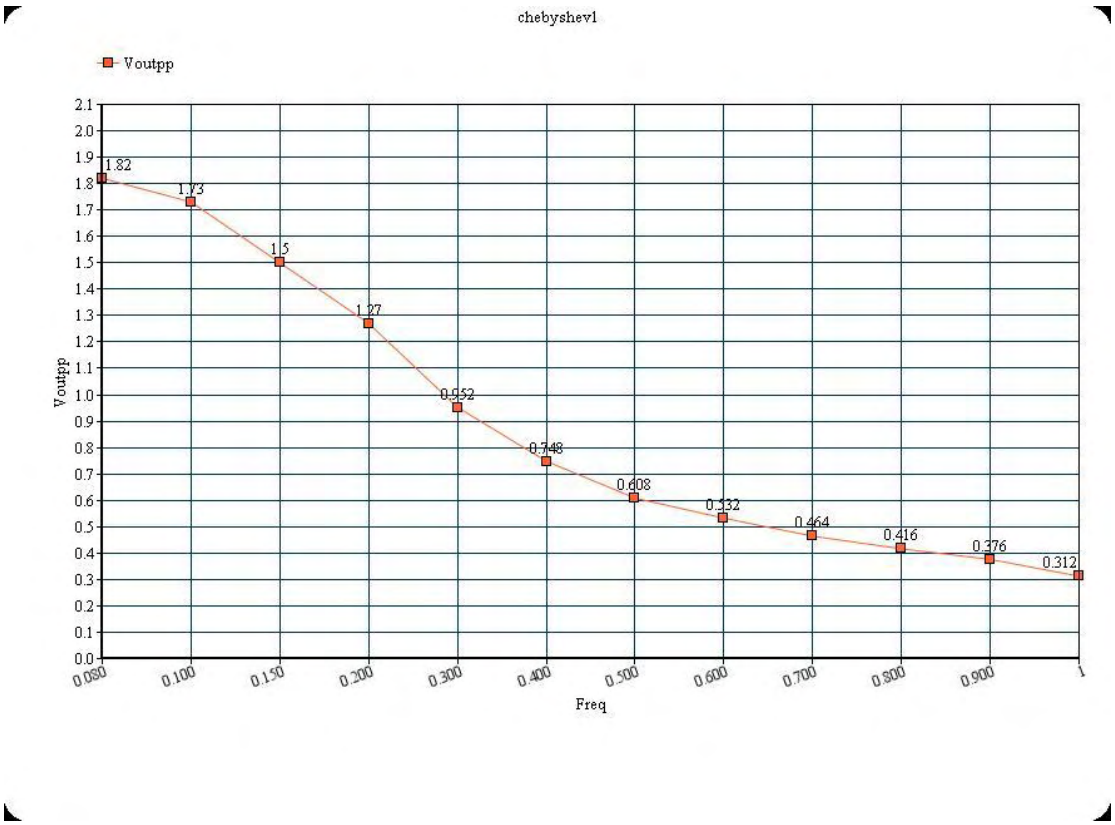
Στιγμιότυπο προσομοίωσης στα 25KHz



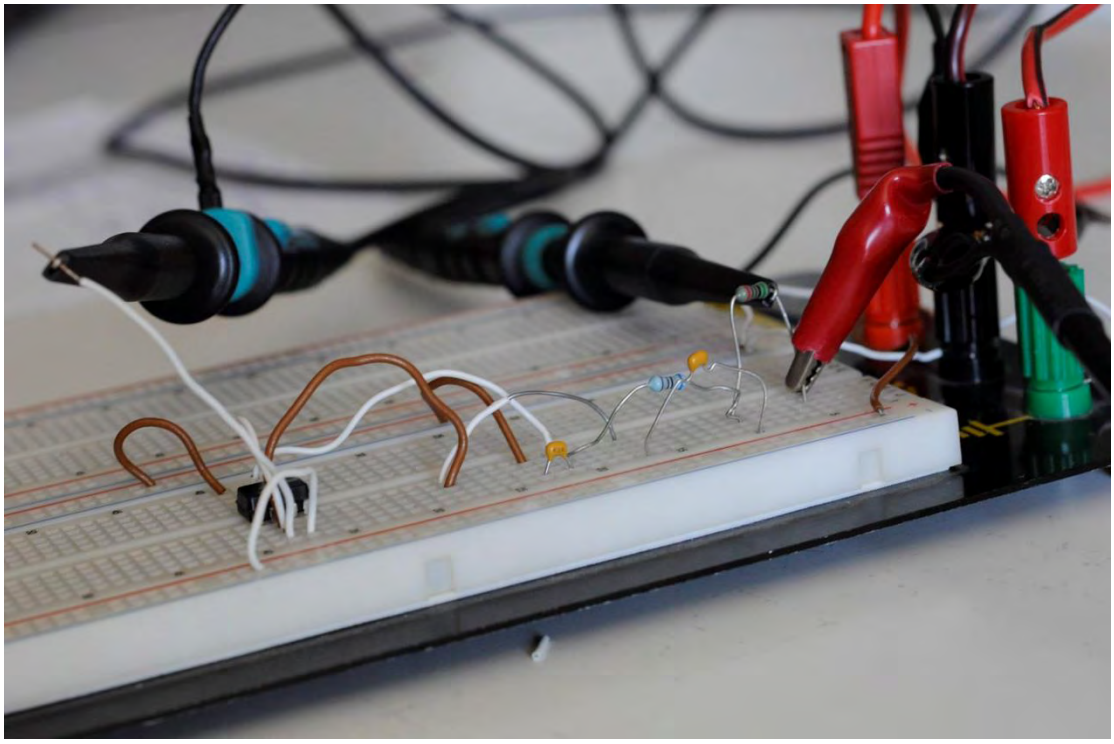
Στιγμιότυπο προσομοίωσης στα 50KHz

FREQUENCY	***Vout***
0.080MHz	*1.82 V*
0.100 MHz	*1.73 V*
0.150MHz	*1.50 V*
0.200 MHz	*1.27 V*
0.300 MHz	*952 mV*
0.400 MHz	*748 mV*
0.500 MHz	*608 mV*
0.600 MHz	*532 mV*
0.700 MHz	*464 mV*
0.800 MHz	*416 mV*
0.900 MHz	*376 mV*
1.000 MHz	*312mV*

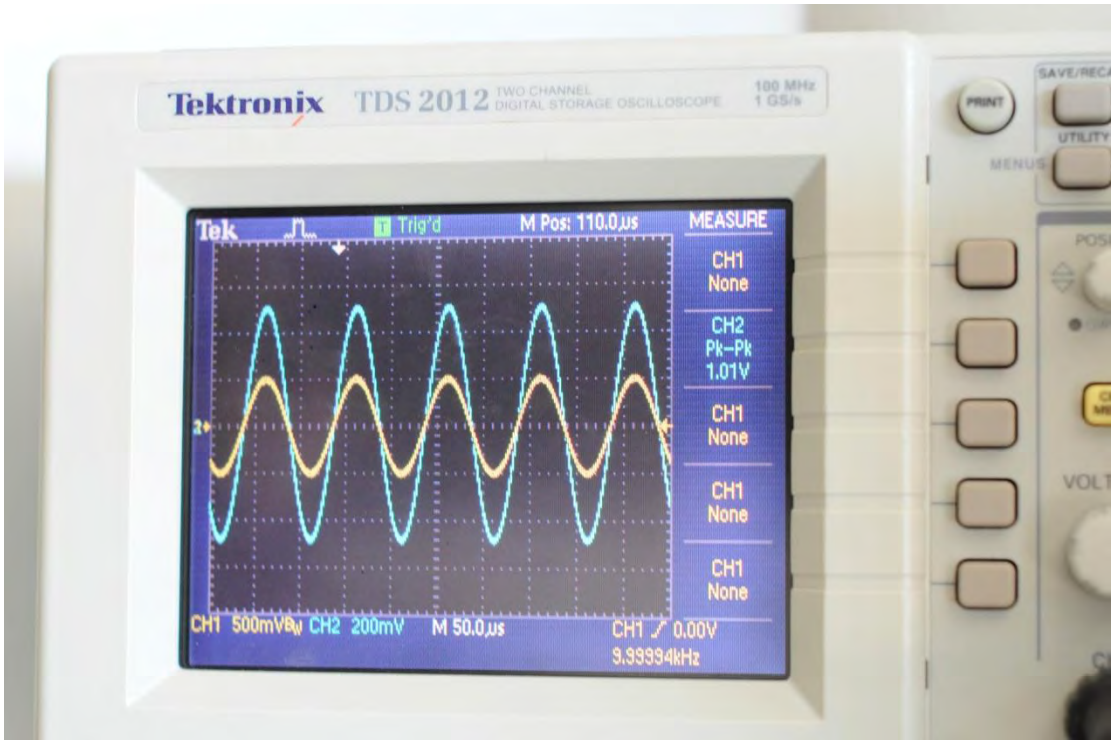
Στην γραφική παράσταση για την τάση εξόδου οι τιμές είναι σε V.



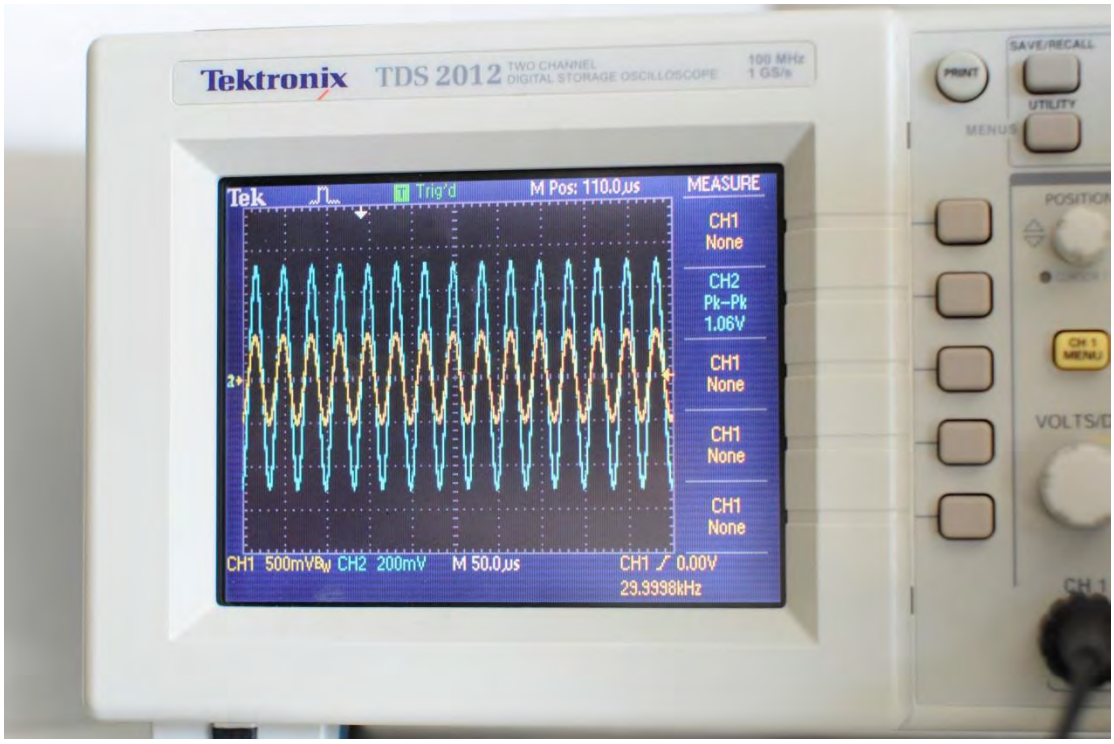
Ακολουθεί το φίλτρο 2 σταδίων.



Και στη συνέχεια οι φωτογραφίες απο τον παλμογράφο.



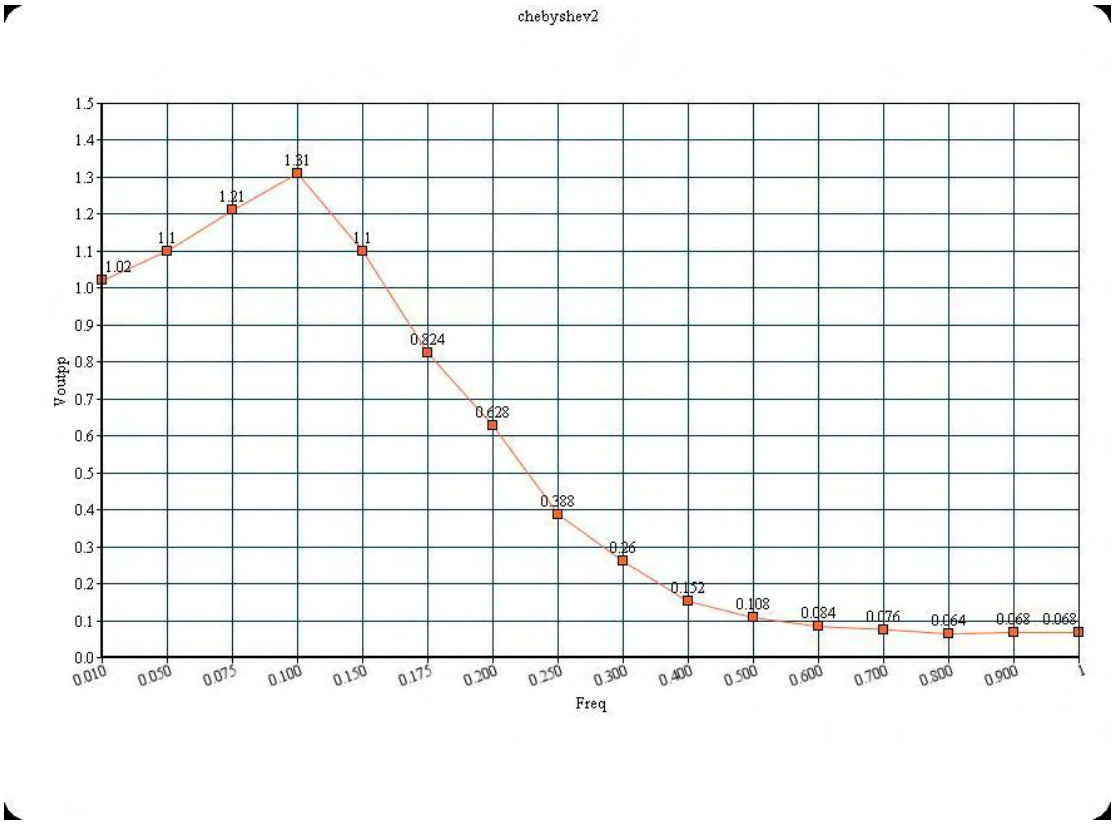
Για συχνότητα στα 10KHz



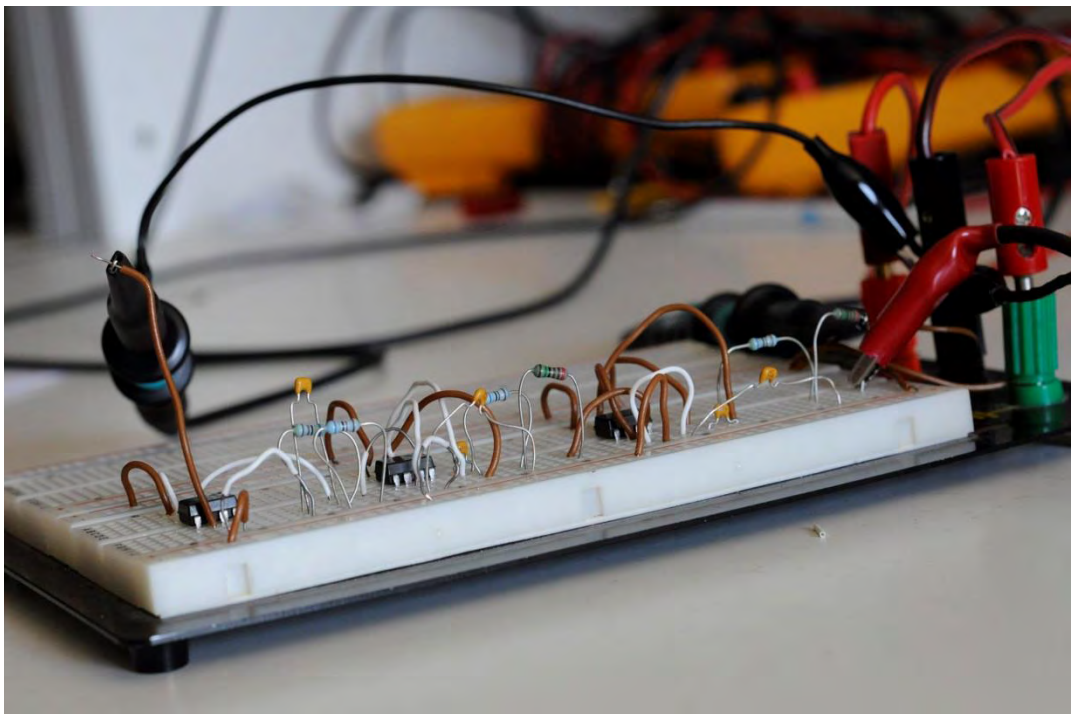
Για συχνότητα στα 30KHz

FREQUENCY	***Vout***
0.010MHz	*1.02 V*
0.050MHz	*1.10 V*
0.075MHz	*1.21 V*
0.100 MHz	*1.31 V*
0.150MHz	*1.10 V*
0.175MHz	*824mV*
0.200 MHz	*628mV*
0.250MHz	*388 mV*
0.300 MHz	*260 mV*
0.400 MHz	*152mV*
0.500 MHz	*108 mV*
0.600 MHz	*84 mV*
0.700 MHz	*76mV*
0.800 MHz	*64 mV*
0.900 MHz	*68 mV*
1 MHz	*68 mV*

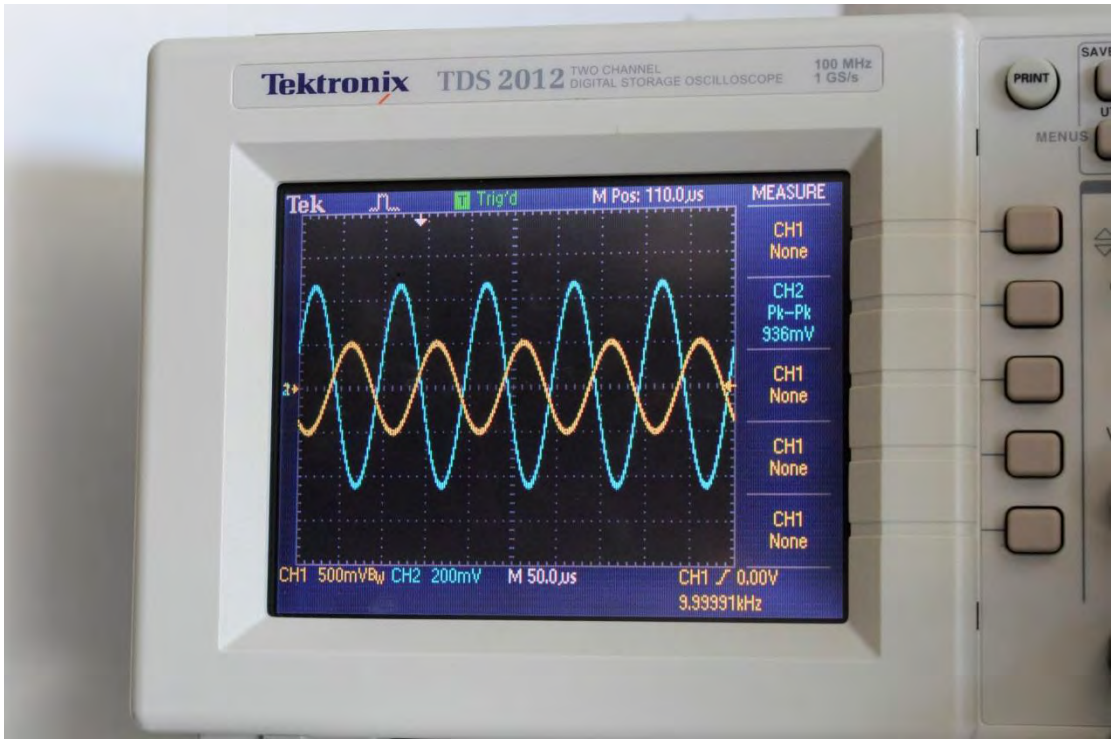
Στην γραφική παράσταση ,η τάση είναι σε V και η συχνότητα σε MHz.



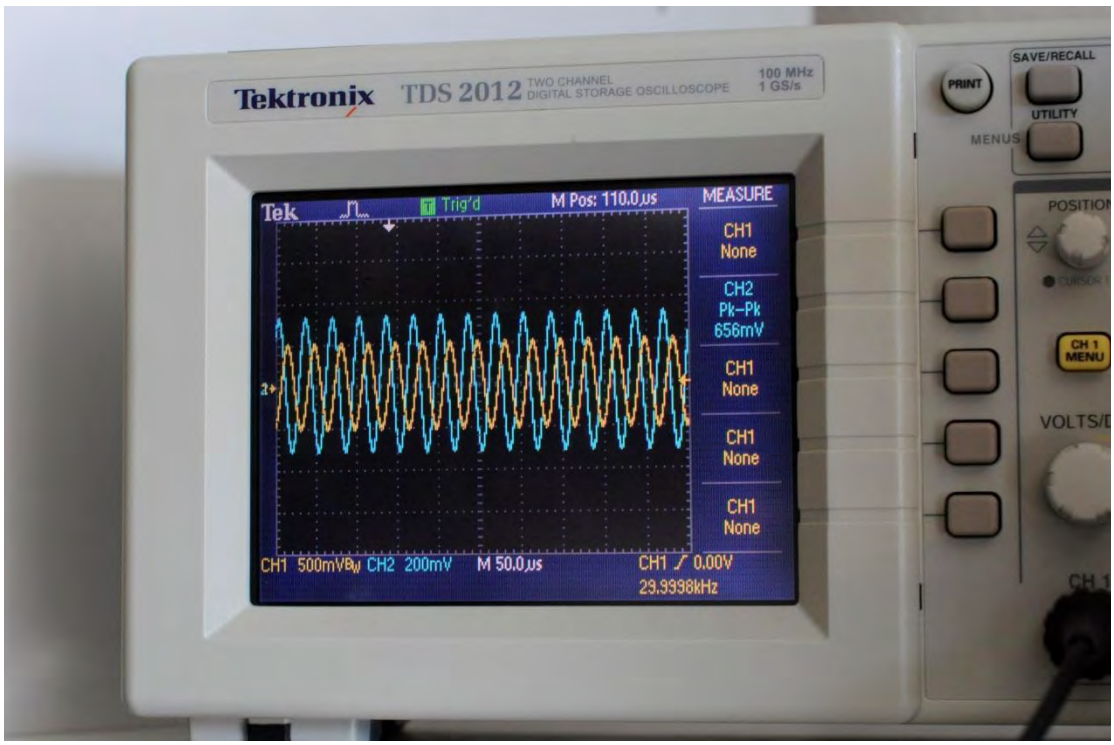
Για να κλείσουμε με την τοπολογία των φίλτρων Chebyshev ,μας απομένει η περίπτωση του φίλτρου 5 σταδίων.



Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις των φίλτρων ενός και δύο σταδίων έτσι και σε αυτήν,παραθέτω τα στιγμιότυπα της προσομοίωσης για τις συχνότητες 10KHz και 30KHz.



Για συχνότητα στα 10KHz

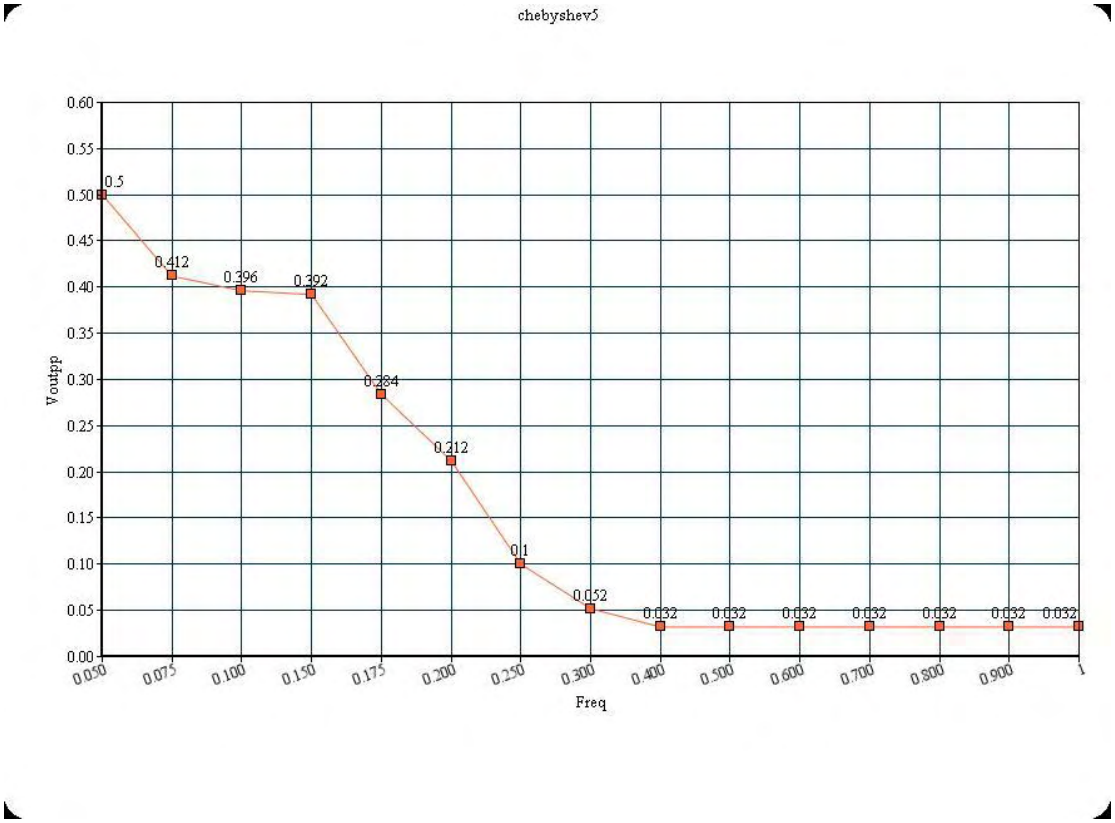


Για συχνότητα στα 30KHz

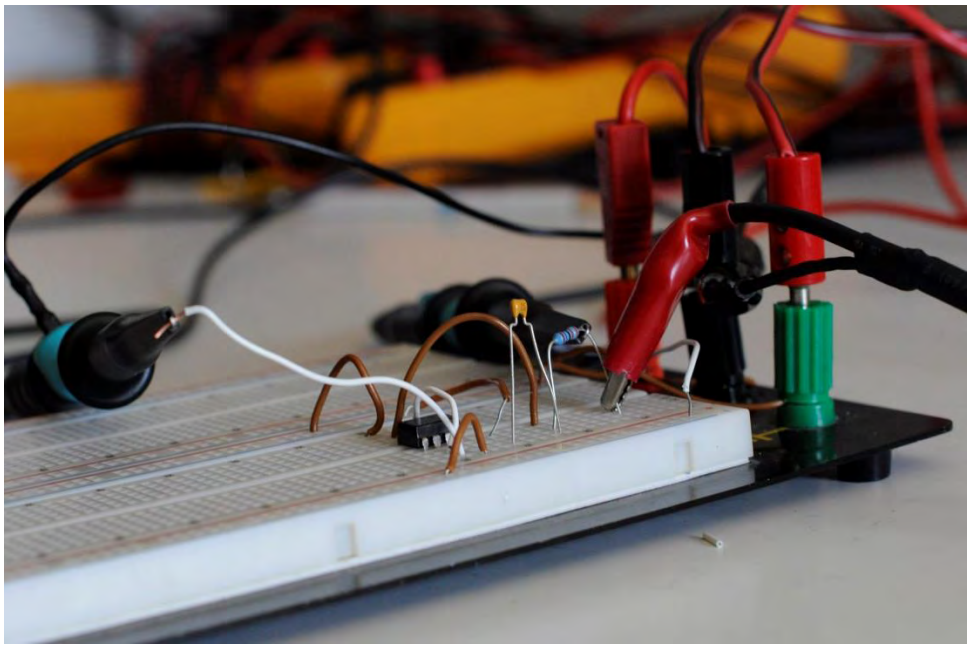
Ακολουθεί ο πίνακας με τις συχνότητες και τις τιμές της τάσης εξόδου για το φίλτρο 5 σταδίων.

FREQUENCY	***Vout***
0.050MHz	*500mV*
0.075MHz	*412mV*
0.100 MHz	*396 mV*
0.150 MHz	*392 mV*
0,175 MHz	*284 mV*
0.200 MHz	*212 mV*
0.250 MHz	*100 mV*
0.300 MHz	*52 mV*
0.400 MHz	*32 mV*
0.500 MHz	*32 mV*
0.600 MHz	*32 mV*
0.700 MHz	*32 mV*
0.800 MHz	*32mV*
0.900 MHz	*32 mV*
1 MHz	*32 mV*

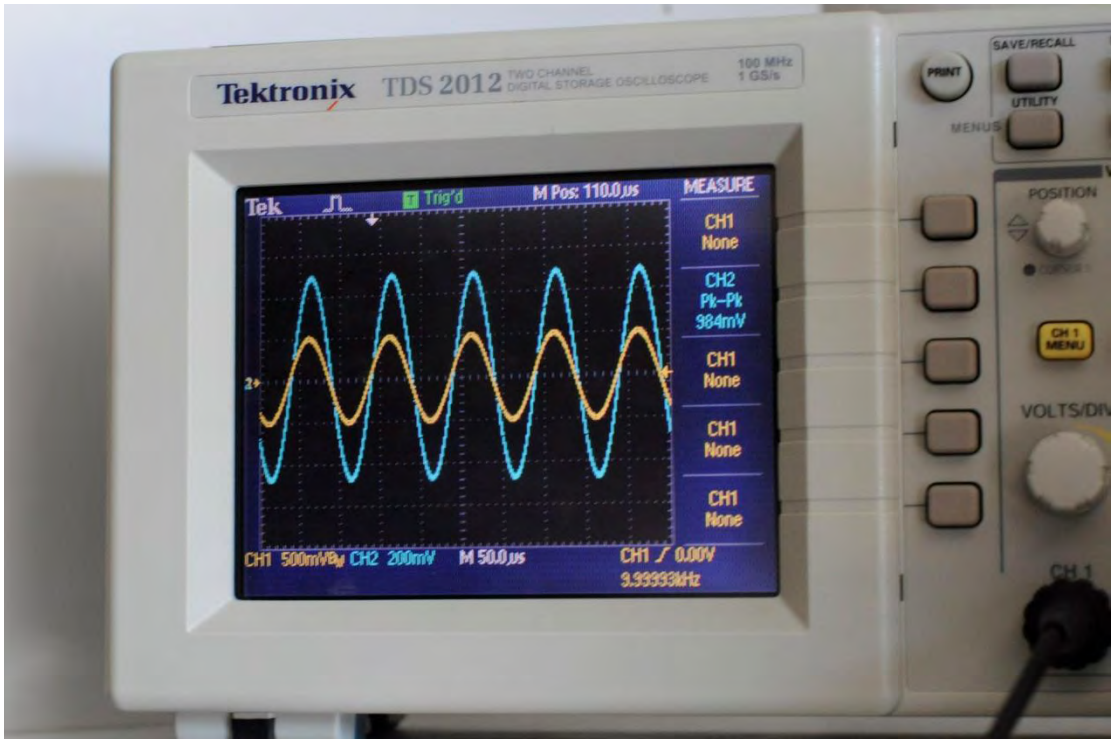
Και στη συνέχεια η γραφική παράσταση για την τάση εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα.Η τάση εξόδου είναι σε V και η συχνότητα σε MHz.



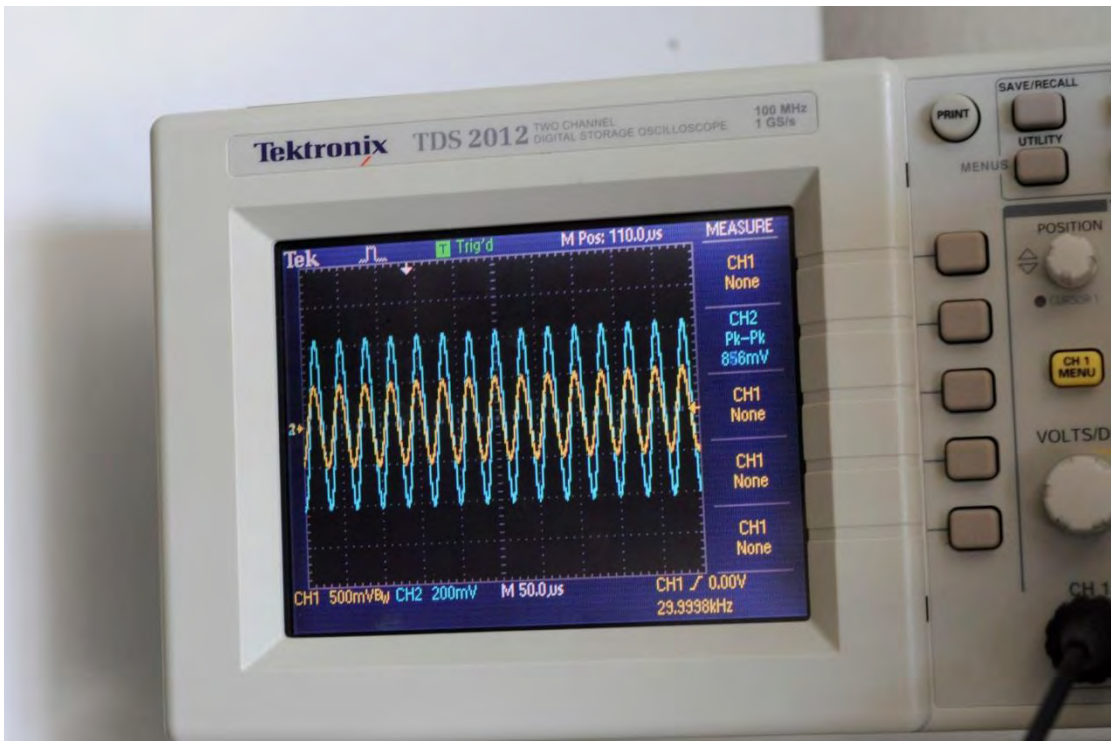
Σειρά έχουν τα φίλτρα της τοπολογίας Butterworth.
Αρχίζουμε με το φίλτρο 1^{ος} σταδίου που είναι και το πιο απλό απο τα φίλτρα αυτής της τοπολογίας.



Και όπως κάναμε και προηγουμένως θα ακολουθήσουν τα στιγμιότυπα με εικόνες απο τον παλμογράφο.



Για συχνότητα στα 10KHz

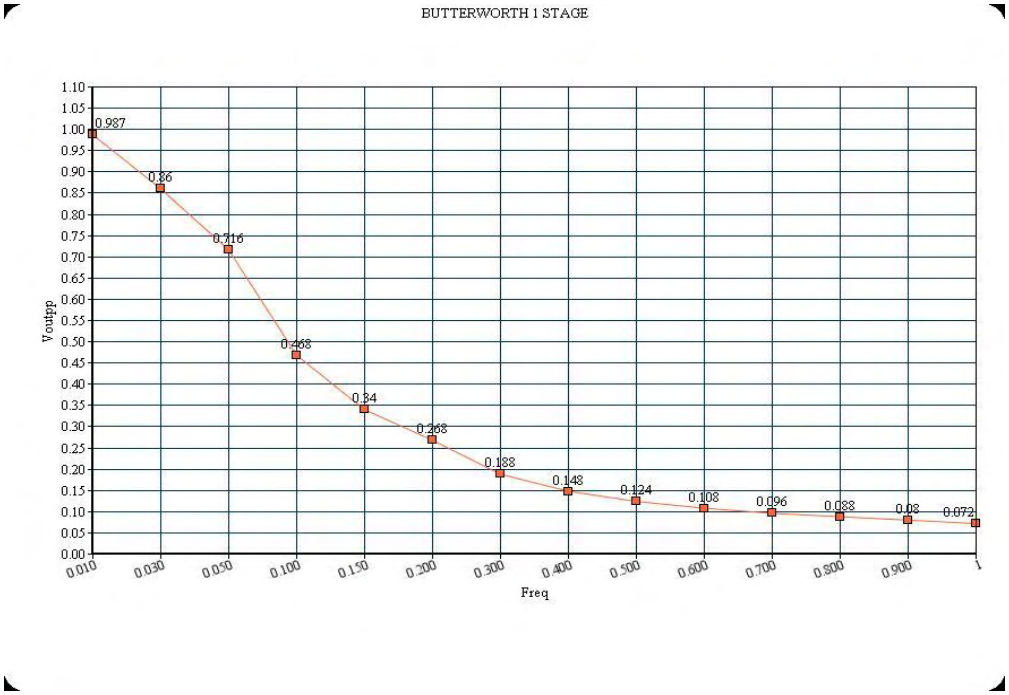


Για συχνότητα στα 30KHz

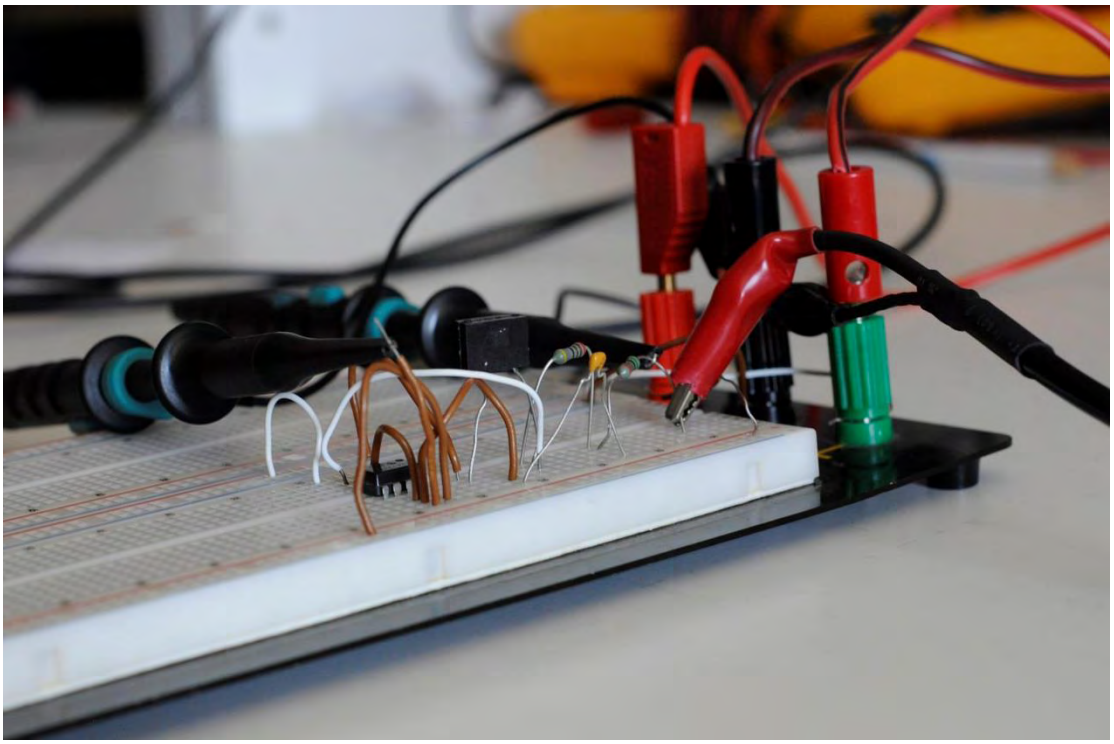
Με δεδομένο το σήμα εισόδου του 1V θα παραθέσουμε τον πίνακα με τις μετρήσει για τις διάφορες τιμές εξόδου σε συνάρτηση με την αύξηση της συχνότητας,και τέλος θα ακολουθήσει η γραφική παράσταση με τα στοιχεία του πίνακα.

FREQUENCY	***Vout***
0.010MHz	*987 mV*
0.030MHz	*856 mV*
0.050MHz	*716 mV*
0.1MHz	*468 mV*
0.150MHz	*340 mV*
0.200 MHz	*268mV*
0.300 MHz	*188 mV*
0.400 MHz	*148 mV*
0.5 MHz	*124 mV*
0.6 MHz	*108 mV*
0.7 MHz	*96 mV*
0.8 MHz	*88 mV*
0.9 MHz	*80mV*
1 MHz	*72 mV*

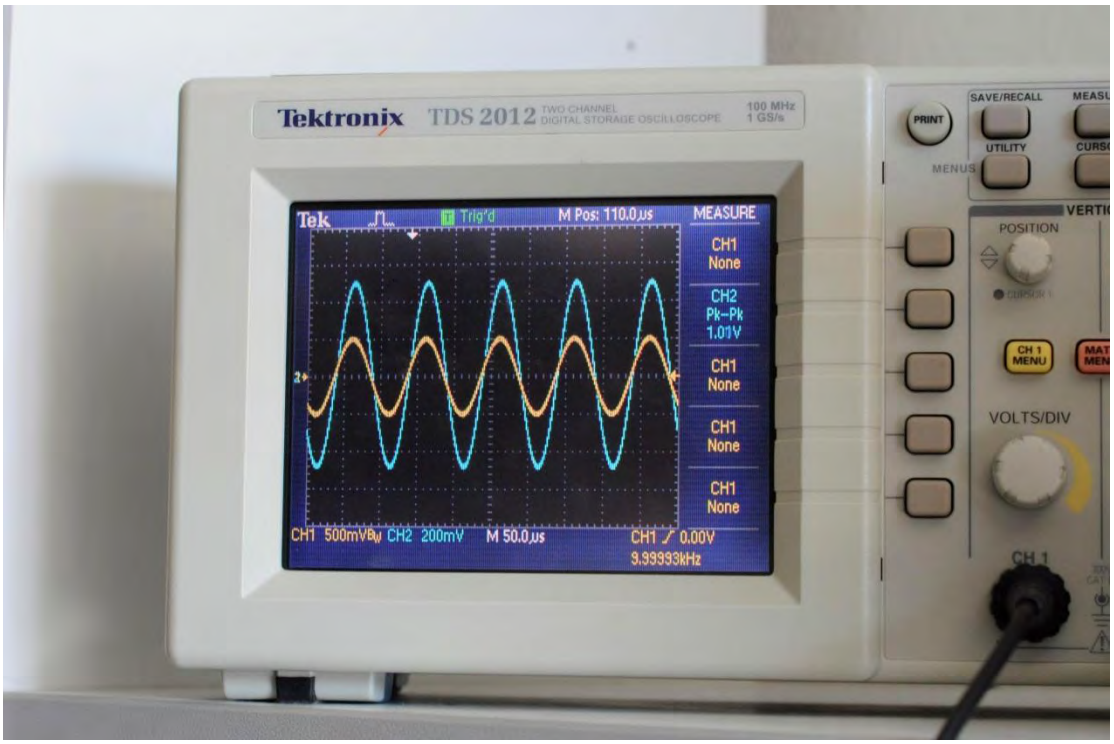
Στο διάγραμμα που ακολουθεί,στον κάθετο άξονα η τάση εξόδου και στον οριζόντιο η συχνότητα.Η τάση έχει μετρηθεί σε V και η συχνότητα σε MHz.



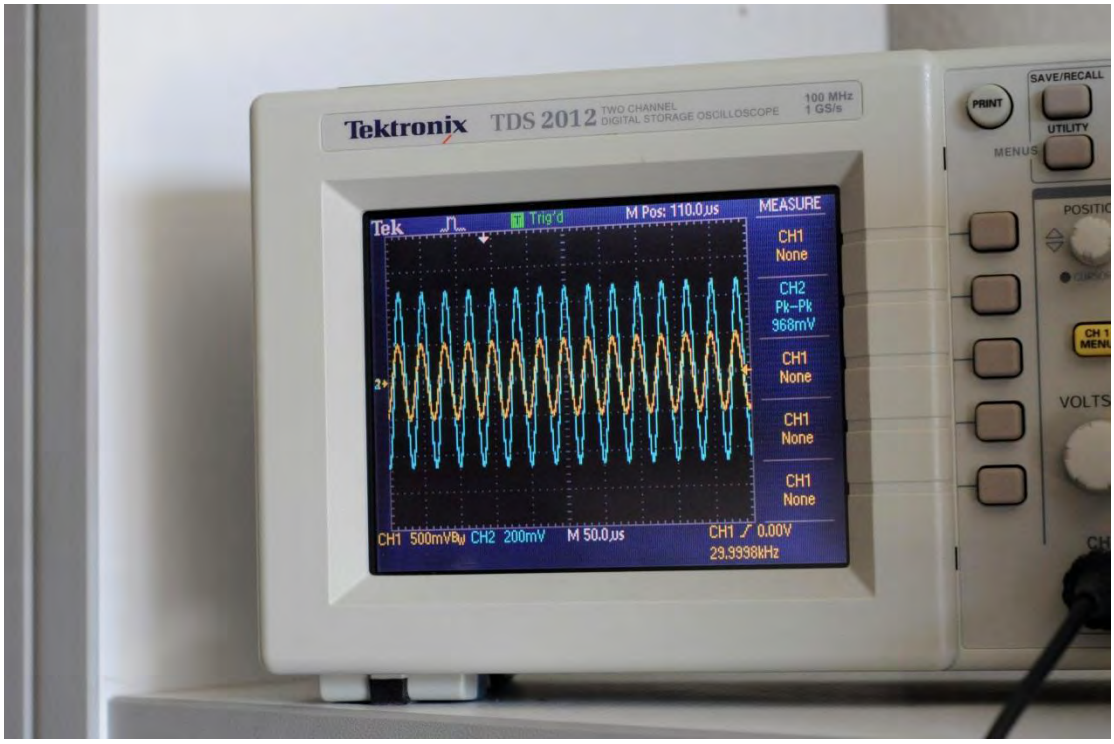
Συνεχίζουμε την τοπολογία butterworth με το φίλτρο 2 σταδίων και παραθέτουμε αρχικά το κύκλωμα.



Ακολουθούν τα στιγμιότυπα της προσομοίωσης.



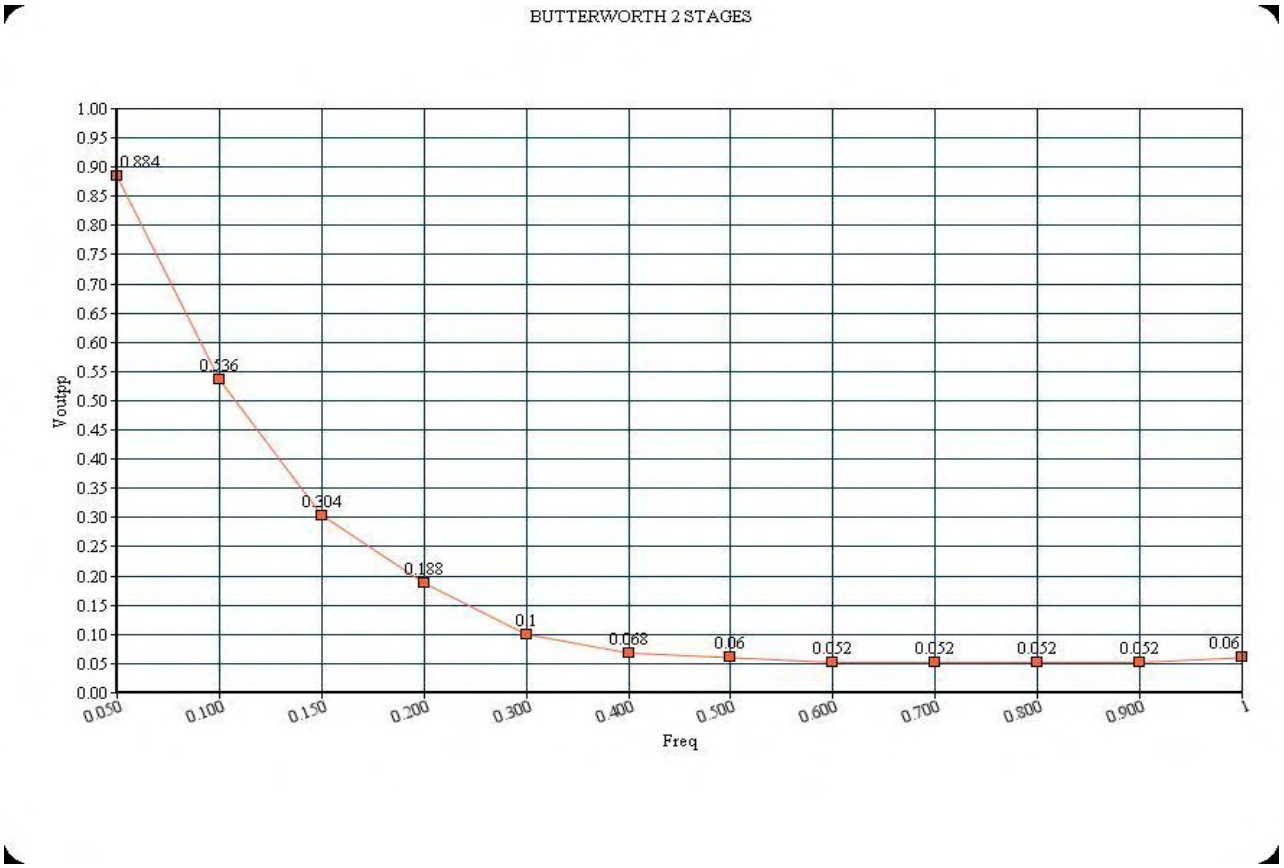
Στιγμιότυπο στα 10KHz



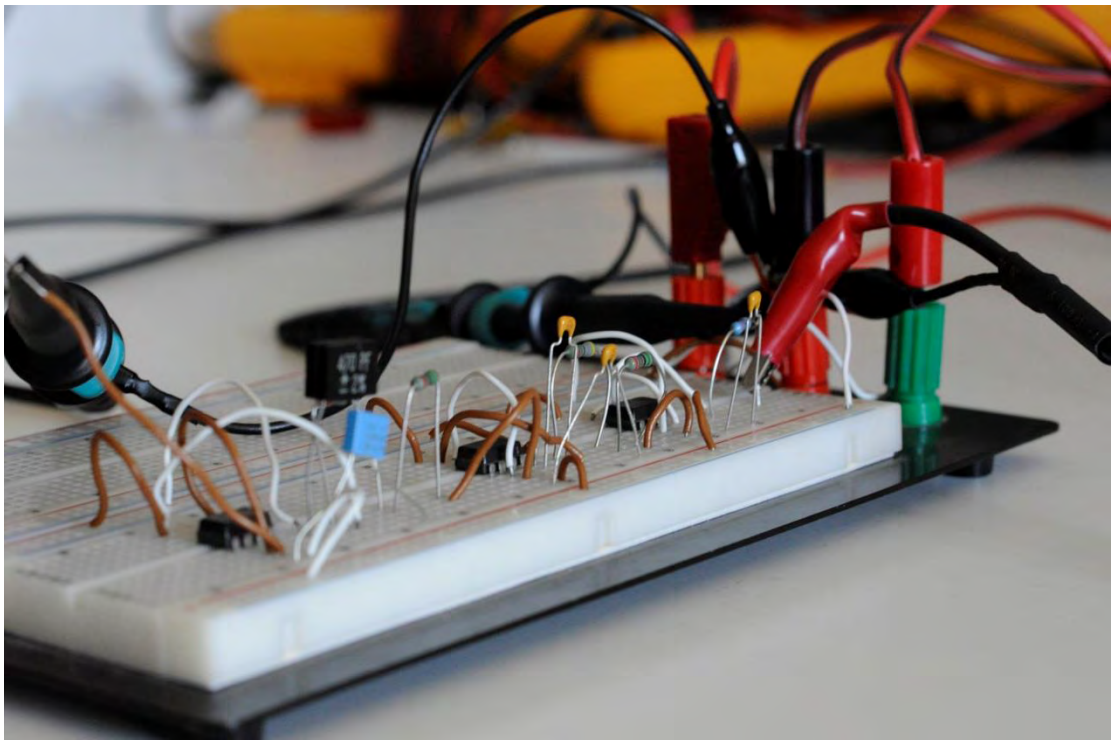
Στιγμιότυπο στα 30KHz

FREQUENCY	***Vout***
0.050MHz	*884mV*
0.100MHz	*536mV*
0.150MHz	*304mV*
0.200 MHz	*188 mV*
0.300 MHz	*100 mV*
0.400 MHz	*68 mV*
0.500 MHz	*60 mV*
0.600 MHz	*52 mV*
0.700 MHz	*52 mV*
0.800 MHz	*52 mV*
0.900 MHz	*52 mV*
1 MHz	*60 mV*

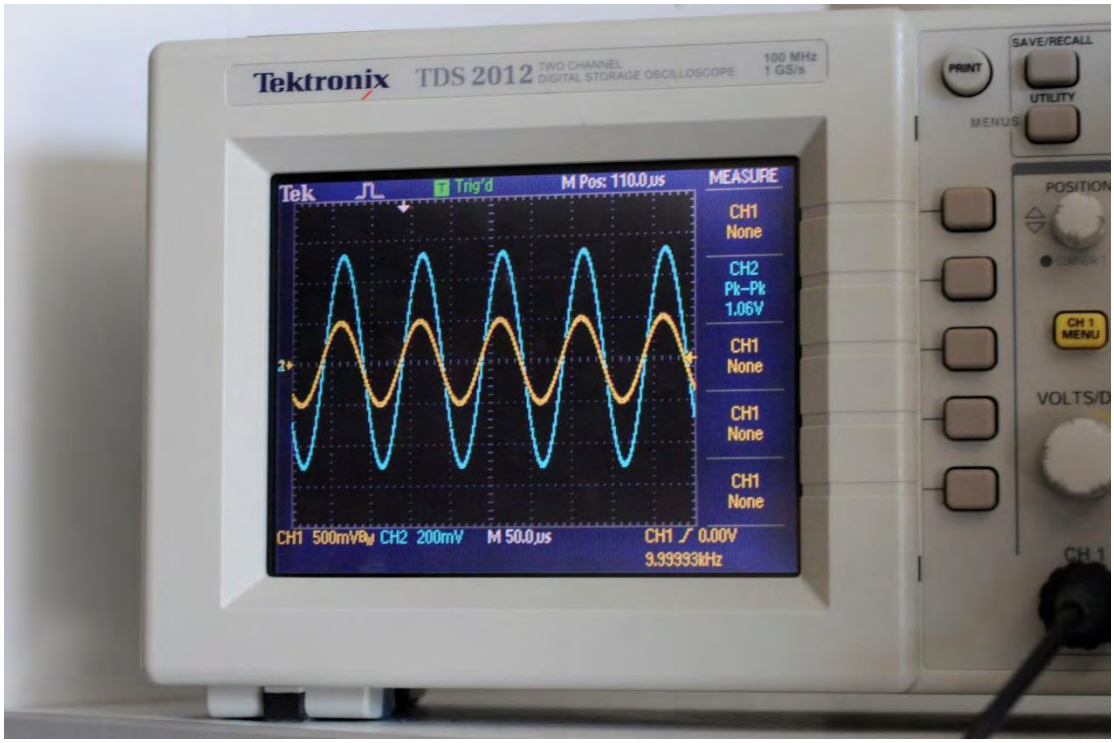
Και τέλος η γραφική παράσταση των παραπάνω δεδομένων του πίνακα



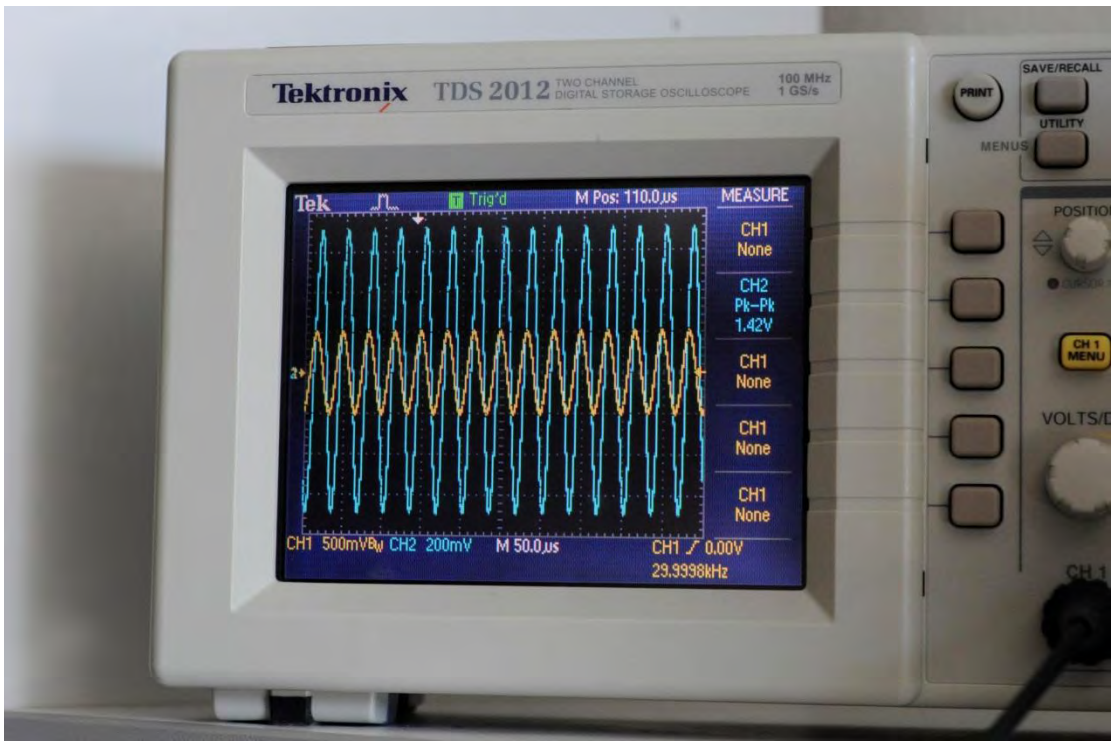
Και κλείνουμε και τη δεύτερη τοπολογία με το φίλτρο 5 σταδίων.



Όπως και στο φίλτρο Chebyshev 5 σταδίων,έτσι και εδώ χρησιμοποιήθηκαν 3 ενισχυτές lm741,όπως είχε γίνει στην προσομοίωση των φίλτρων στο πρόγραμμα ADS.



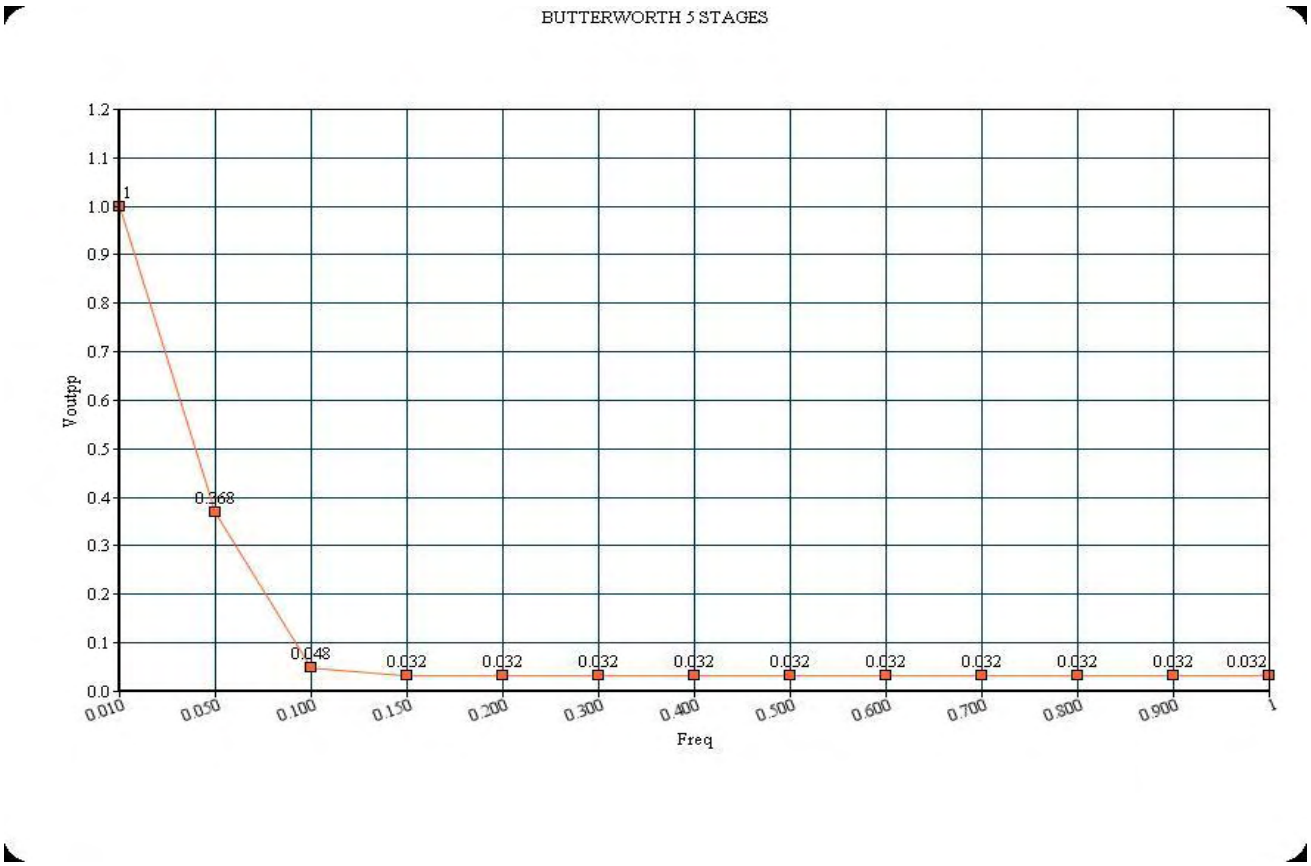
Στιγμιότυπο στα 10KHz



Στιγμιότυπο στα 30KHz

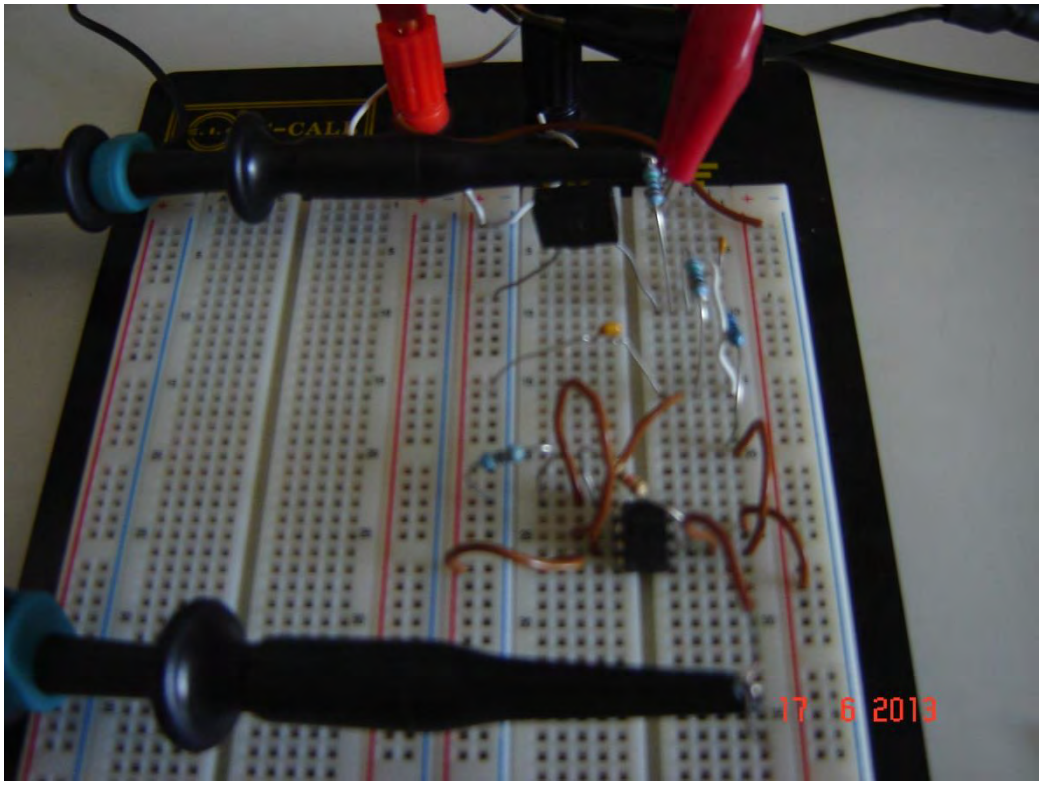
Οι τιμές που συλλέχθηκαν κατά την προσομοίωση παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα και στη συνέχεια με χρήση αυτών των τιμών γίνεται η γραφική απεικόνιση για την τάση εξόδου.

FREQUENCY	***Vout***
0.010MHz	*1V*
0.050MHz	*368 mV*
0.100MHz	*48 mV*
0.150MHz	*32mV*
0.200 MHz	*32 mV*
0.300 MHz	*32mV*
0.400 MHz	*32mV*
0.500 MHz	*32mV*
0.600 MHz	*32mV*
0.700 MHz	*32mV*
0.800 MHz	*32 mV*
0.900 MHz	*32 mV*
1 MHz	*32mV*

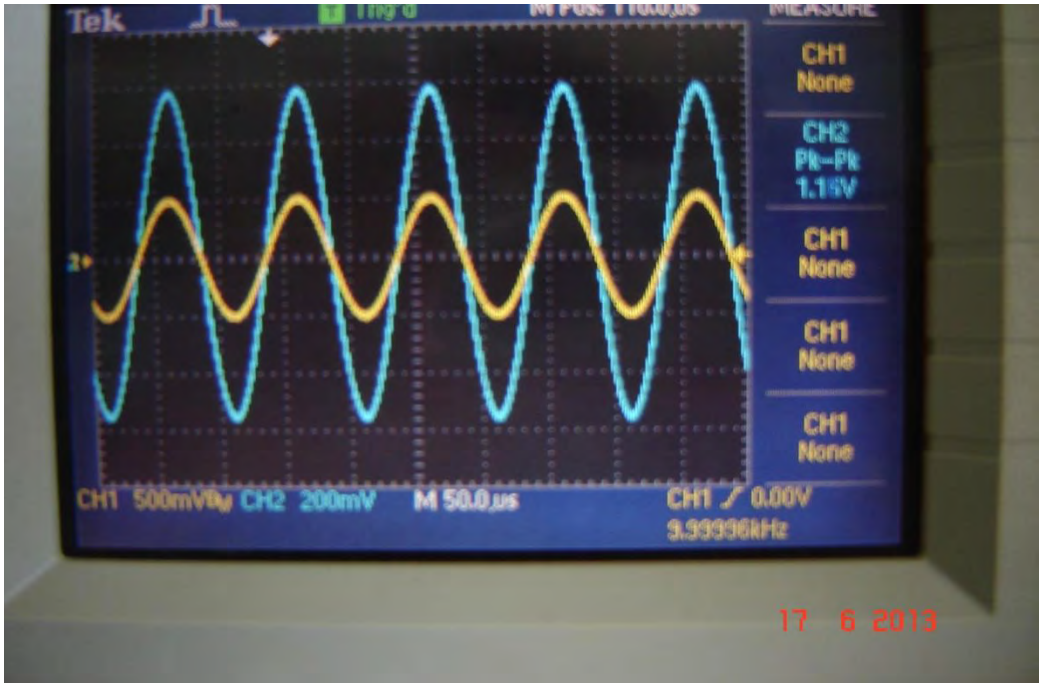


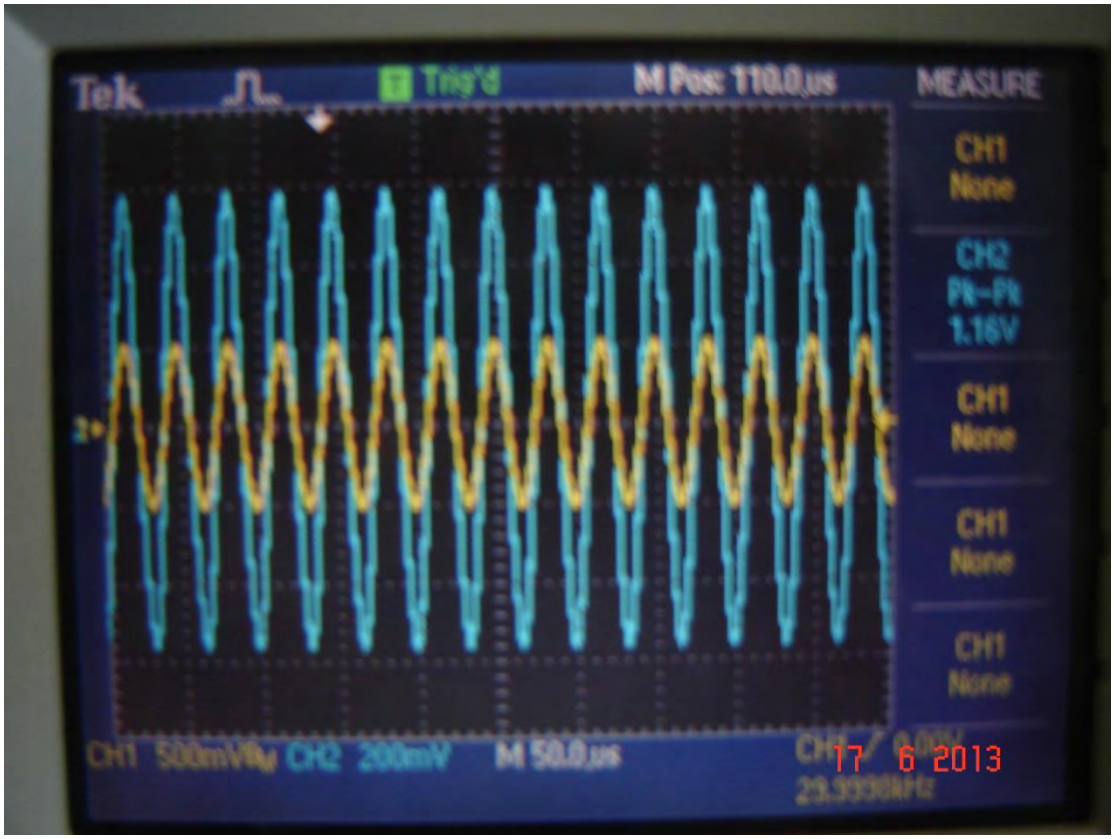
ELLIPTIC

Η τρίτη και τελευταία προς μελέτη τοπολογία ,είναι αυτή των ελλειπτικών φίλτρων.



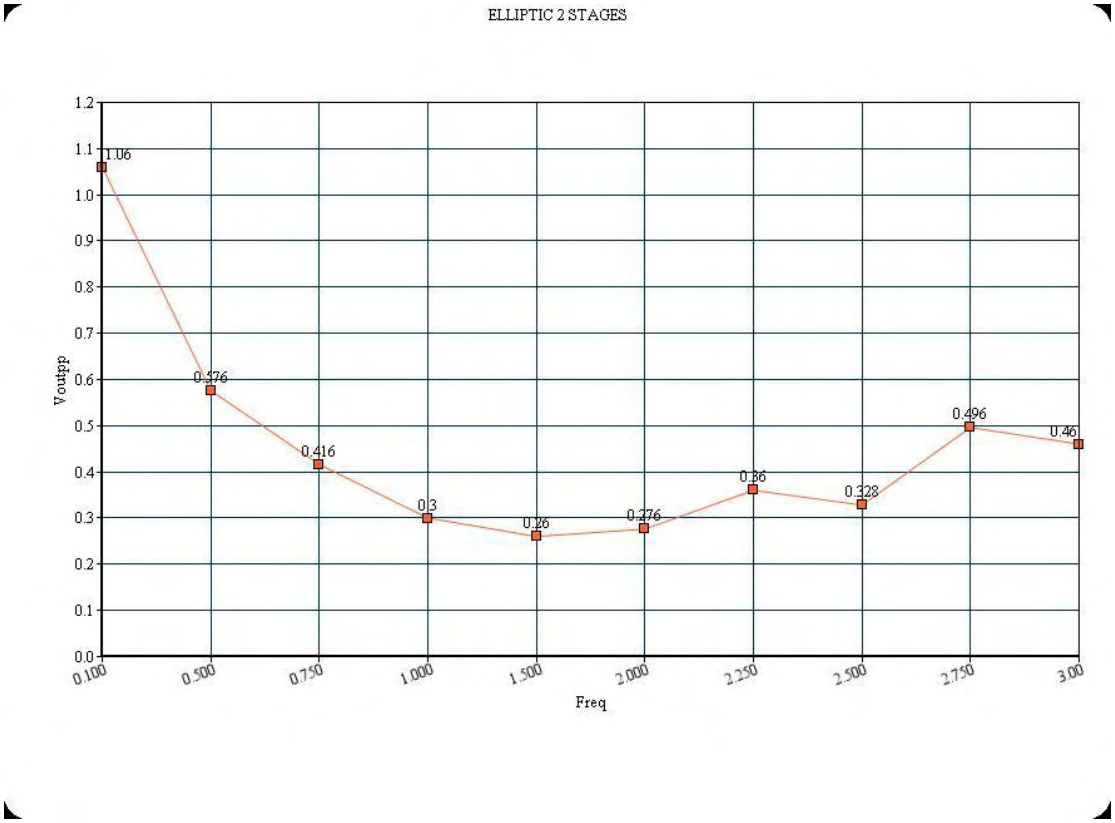
Ακολουθούν τα στιγμιότυπα της προσομοίωσης για τις συχνότητες των 10KHz αρχικά και 30KHz στη συνέχεια.



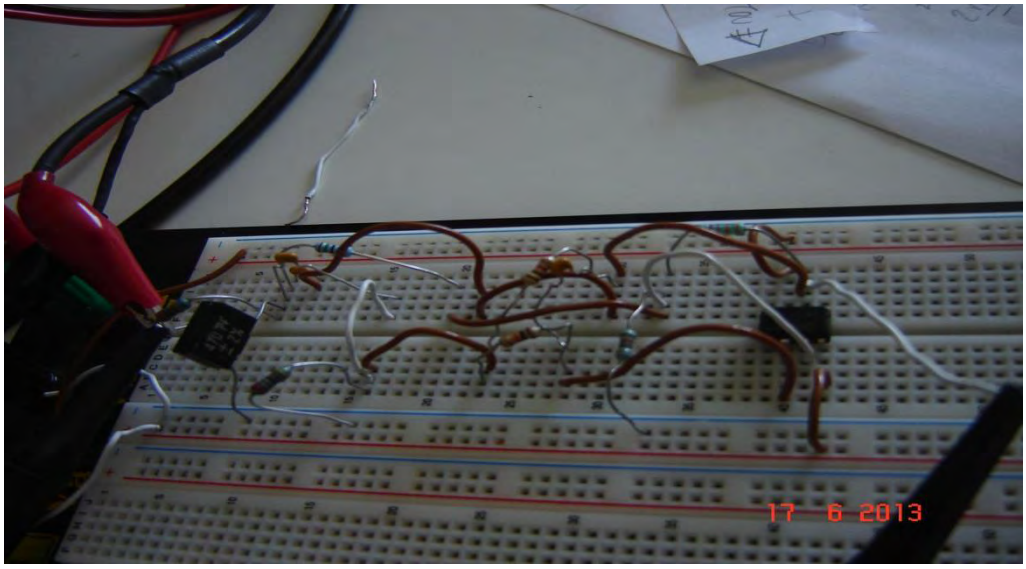


Κρατώντας το σήμα εισόδου σταθερό στο 1V και μεταβάλλωντας τη συχνότητα συνέλεξα τις τιμές του παρακάτω πίνακα για την τάση εξόδου.

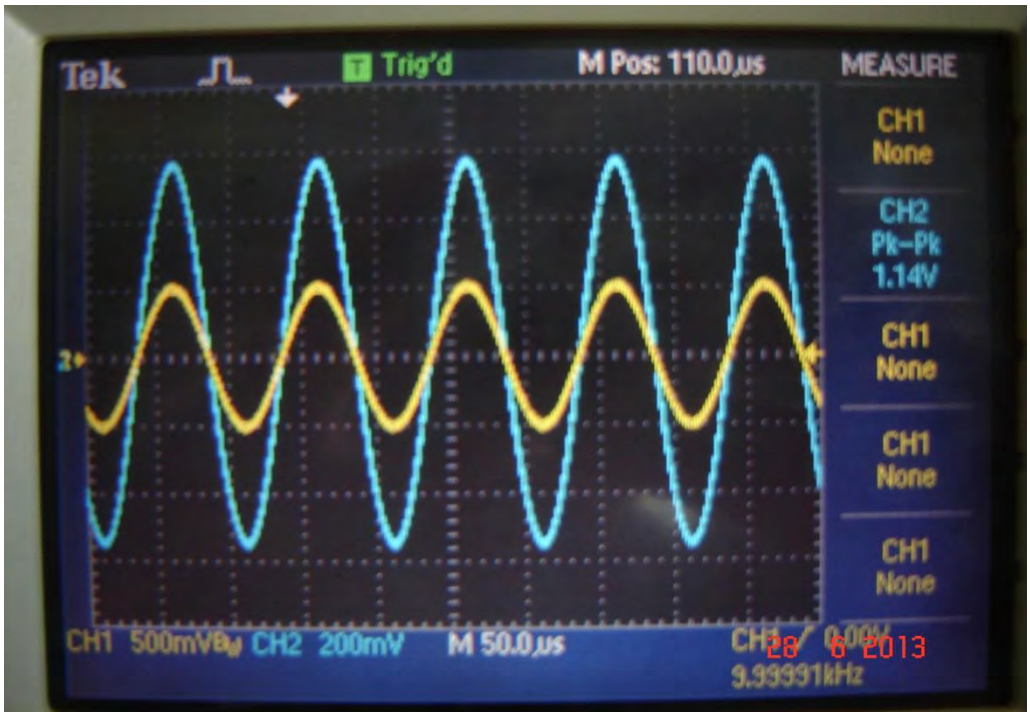
FREQUENCY	***Vout***
0.100MHz	*1.06 V*
0.500MHz	*576 mV*
0.750MHz	*416 mV*
1 MHz	*300 mV*
1.5 MHz	*260 mV*
2 MHz	*276 mV*
2.250 MHz	*360 mV*
2.500 MHz	*328 mV*
2.750 MHz	*496 mV*
3 MHz	*460 mV*



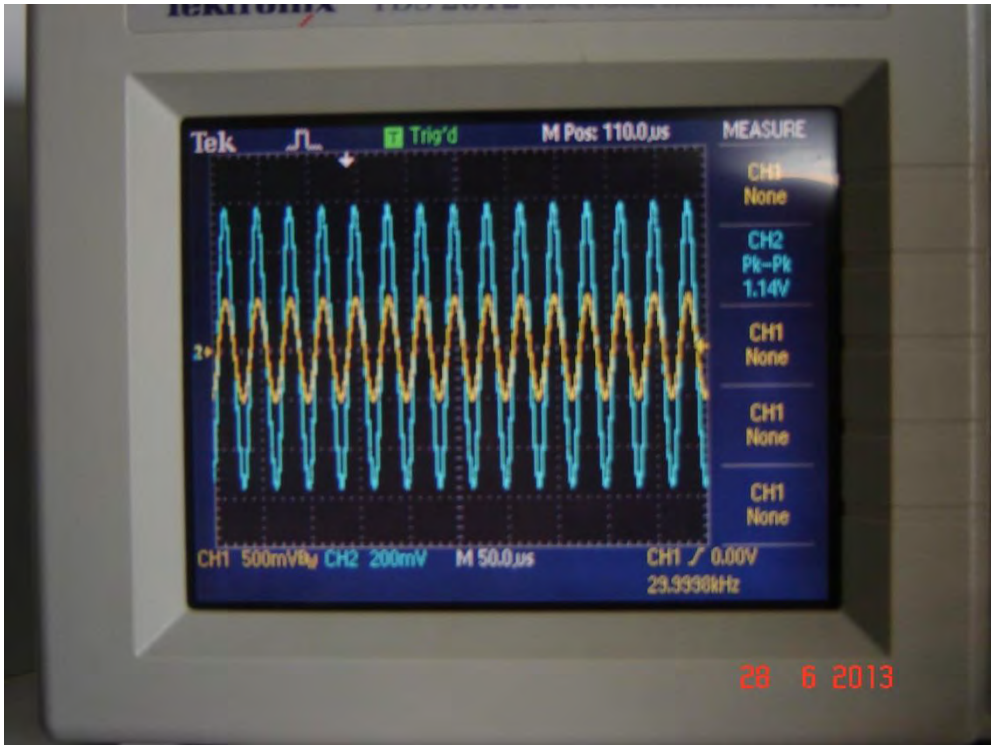
Το επόμενο φίλτρο που προσομοιώθηκε είναι 3^{ων} σταδίων.Η επιλογή του φίλτρου 3 σταδίων έγινε με σκοπό να είναι πιο εύκολο στη συνέχεια να κατασκευαστεί στο breadboard το ελλειπτικό φίλτρο 5 σταδίων με χρήση 2 μόνο και όχι 3 ενισχυτών.



Ακολουθεί ενδεικτική φωτογραφία για τις συχνότητες των 10 και 30 kHz απο την προσομοίωση όπως και στα προηγούμενα κυκλώματα.



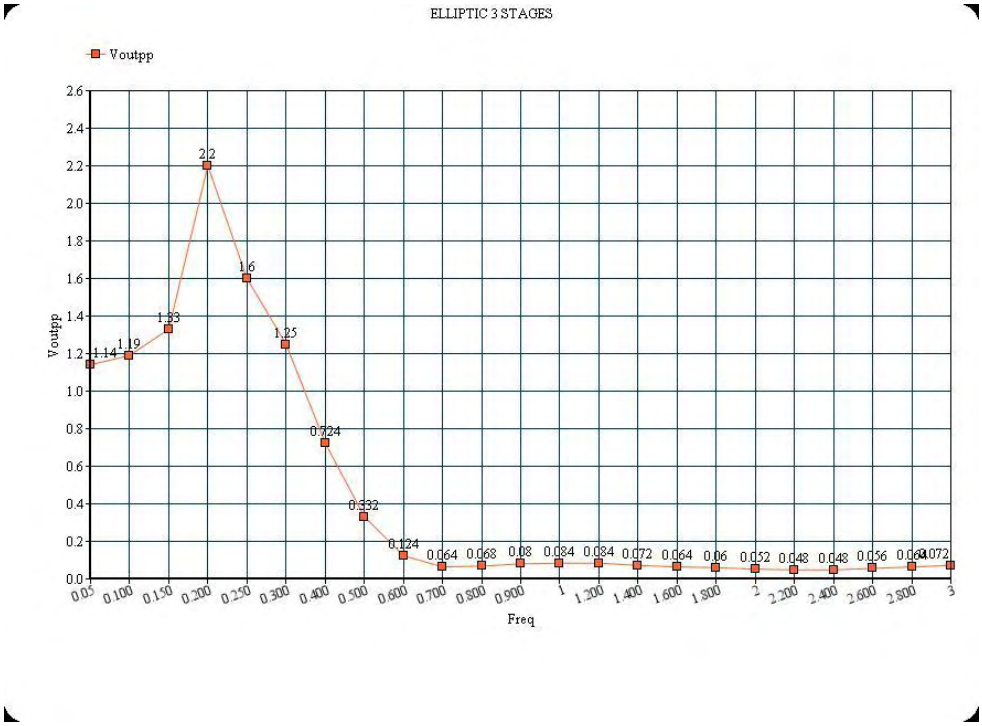
Στιγμιότυπο στα 10KHz



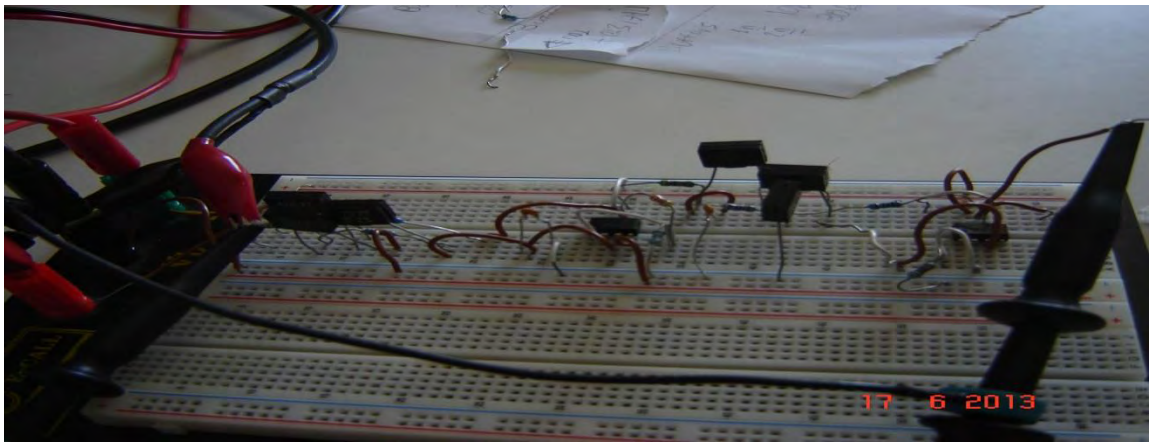
Στιγμιότυπο στα 30KHz

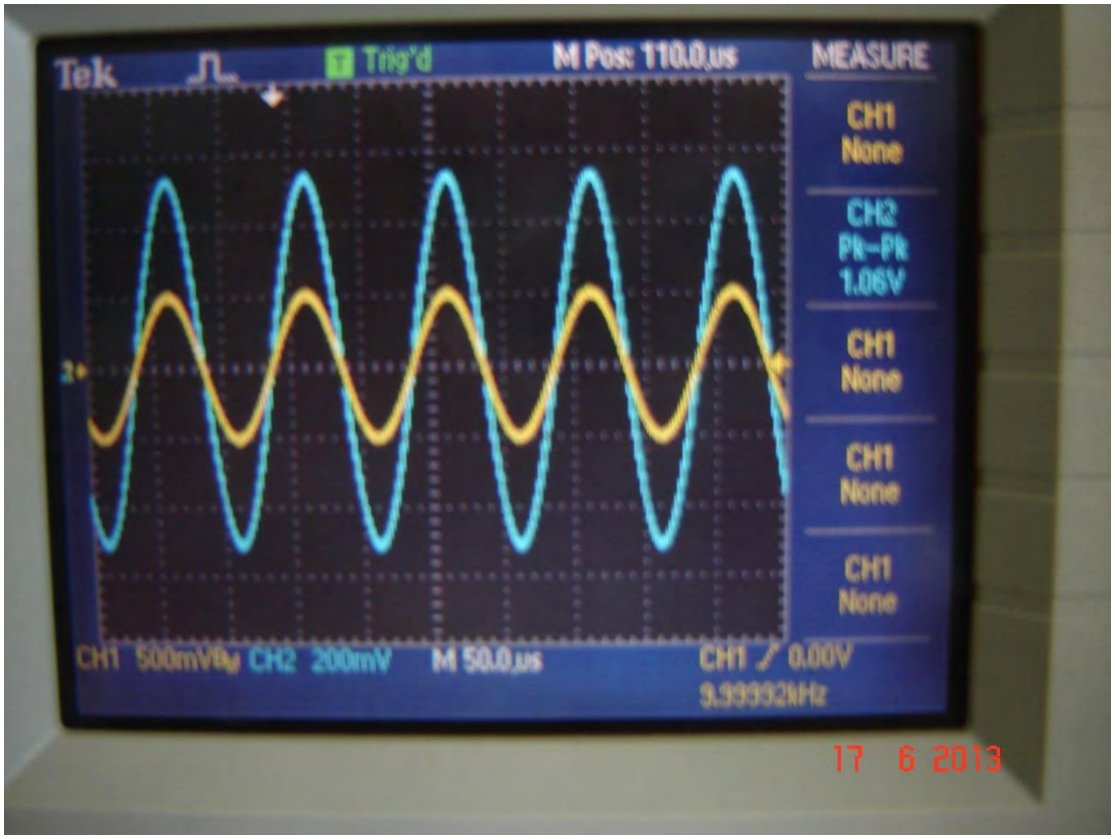
Λόγο του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (0MHz-→3MHz) έχουμε καταγράψει περισσότερες τιμές αυτή τη φορά.

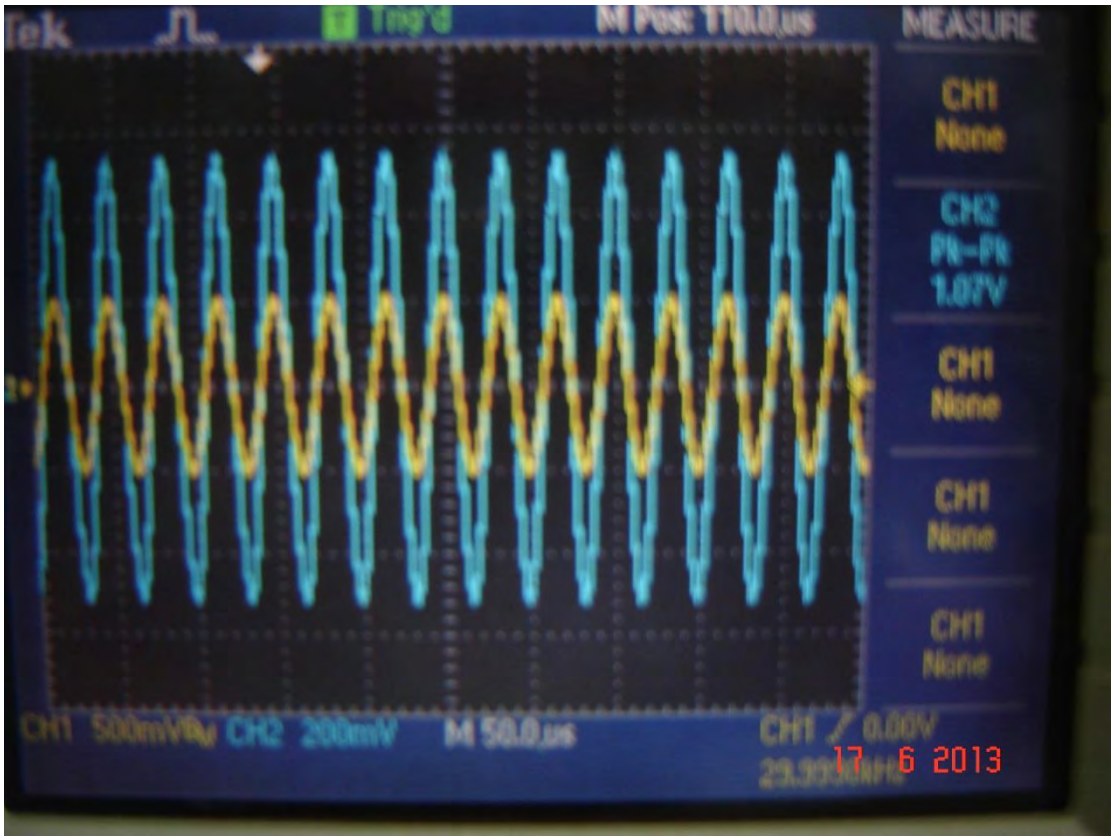
FREQUENCY	***Vout***
0.05 MHz	*1.14 V*
0.100 MHz	*1.19V*
0.150 MHz	*1.33V*
0.200 MHz	*2.20 V*
0.250 MHz	*1.60V*
0.3 MHz	*1.25 V*
0.4 MHz	*724m V*
0.5 MHz	*332mV*
0.6 MHz	*124 mV*
0.7 MHz	*64 mV*
0.8 MHz	*68 mV*
0.9 MHz	*80 mV*
1 MHz	*84 mV*
1.2 MHz	*84 mV*
1.4 MHz	*72 mV*
1.6 MHz	*64 mV*
1.8 MHz	*60 mV*
2 MHz	*52 mV*
2.2 MHz	*48 mV*
2.4 MHz	*48 mV*
2.6 MHz	*56 mV*
2.8 MHz	*64 mV*
3 MHz	*72 mV*



Θα κλείσουμε την παράθεση των κυκλωμάτων με το τελευταίο φίλτρο της τοπολογίας των ελιπτικών.Το φίλτρο 5 σταδίων που θα παρουσιαστεί παρακάτω είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης των ελιπτικών φίλτρων 2 και 3 σταδίων.

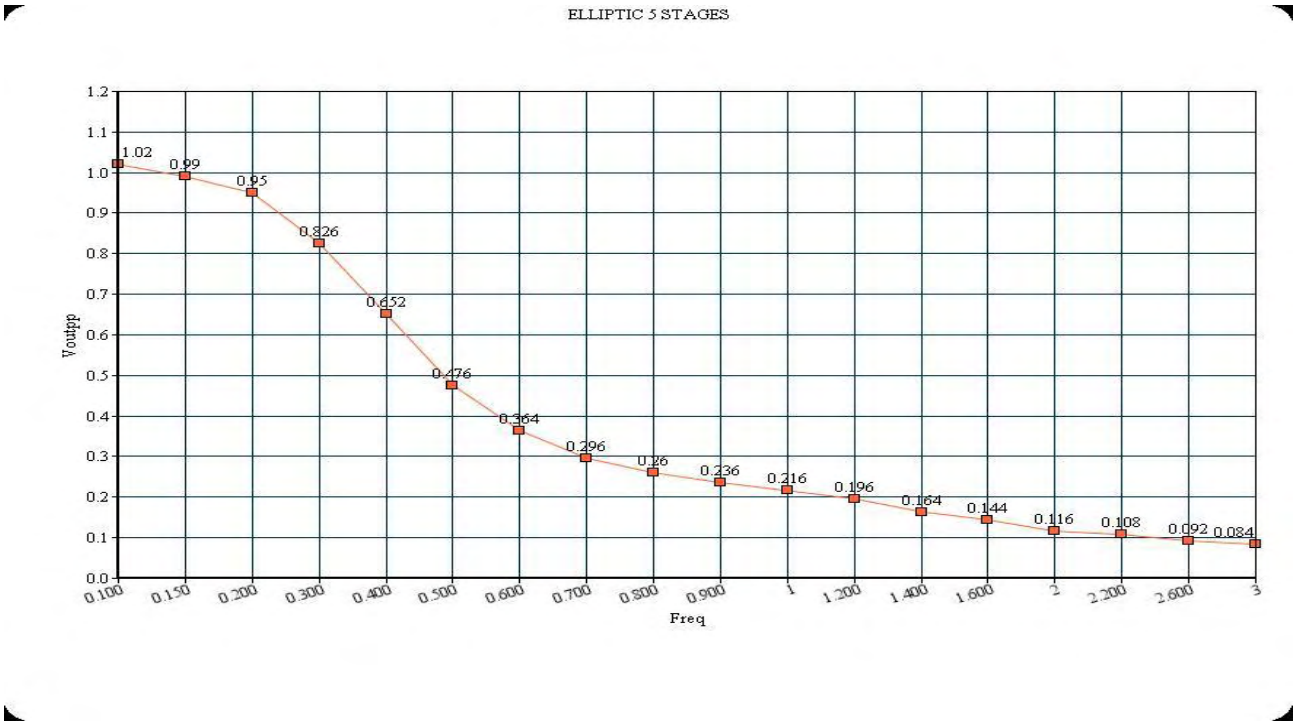






Παραπάνω βλέπουμε τα στιγμιότυπα για 10KHz αλλά και για 30KHz

FREQUENCY	***Vout***
0.1 MHz	*1.02 V*
0.150 MHz	*990 mV*
0.2 MHz	*950 mV*
0.3 MHz	*826 mV*
0.4 MHz	*652mV*
0.5MHz	*476 mV*
0.6 MHz	*364 mV*
0.7MHz	*296 mV*
0.8 MHz	*260 mV*
0.9 MHz	*236 mV*
1 MHz	*216 mV*
1.2 MHz	*196 mV*
1.4 MHz	*164 mV*
1.6 MHz	*144 mV*
2 MHz	*116 mV*
2.2 MHz	*108 mV*
2.8 MHz	*92 mV*
3 MHz	*84 mV*



Σε αυτό το σημείο κλείνουμε την η παρουσίαση των κυκλωμάτων και των μετρήσεων.Οι τιμές των παθητικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του εργαστηρίου είχαν παραπλήσιες αν όχι ίδιες τιμές με αυτές των στοιχείων στις προσομοιώσεις στο ads.Παρακάτω θα παραθέσω τις εκάστοτε τιμές των παθητικών στοιχείων για κάθε μια απο τις προσομοιώσεις που έγιναν στο εργαστήριο.

CHEBYSHEV 1 σταδίου

R1=3.3 KOhm	*C=100pf*
R2=6.8KOhm	

CHEBYSHEV 2σταδίων

R1=1.5KOhm	*C1=1000pf*
R2=6.8KOhm	*C2=100pf*

CHEBYSHEV 5σταδίων

R1=1.5KOhm	*C1=1000pf*
R2=6.8KOhm	*C2=100pf*
R3=6.8KOhm	*C3=1000pf*
R4=1.5KOhm	*C4=47pf*
R5=6.8KOhm	*C5=1000pf*
R6=6.8KOhm	

BUTTERWORTH 1σταδίου

R1=3.3 KOhm	*C1=1nf*

BUTTERWORTH 2 σταδίων

R1=1.5 KOhm	*C1=1 nf*
R2=4.7KOhm	*C2=470 pf*

BUTTERWORTH 5 σταδίων

R1=3.3KOhm	*C1=1 nf*
R2=1.5KOhm	*C2=1nf*
R3=4.7KOhm	*C3=1nf*
R4=1.5KOhm	*C4=470pf*
R5=4.7KOhm	*C5=4.7nf*

ELLIPTIC 2 σταδίων

R1=150 Ohm	*C1=100pf*
R2=150 Ohm	*C2=100pf*
R3=100 Ohm	*C3=470pf*
R4=1 KOhm	*C4=1 nf*
R5=6.8 KOhm	

ELLIPTIC 3 σταδίων

R1=680 Ohm	*C1=470pf*
R2=10 KOhm	*C2=100pf*
R3=1 KOhm	*C3=1 nf*
R4=150 Ohm	*C4=1 pf*
R5=10 KOhm	
R6=30 KOhm	
R7=4.7KOhm	

ELLIPTIC 5 σταδίων

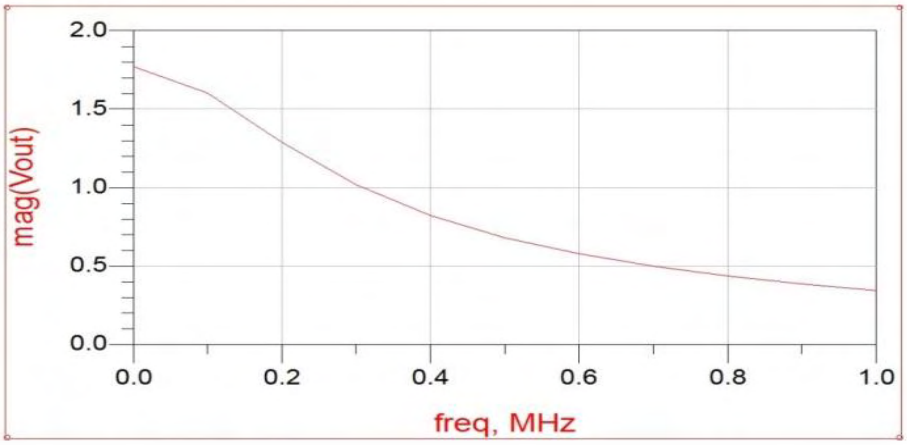
R1=220 Ohm	*C1=470pf*
R2=220 Ohm	*C2=100pf*
R3=100 Ohm	*C3=470pf*
R4=1 KOhm	*C4=1 nf*
R5=6.8 KOhm	*C5=1 nf*
R6=47 Ohm	*C6=470pf*
R7=220 Ohm	*C7=470pf*
R8=220 0hm	*C8=470pf*
R9=100 Ohm	*C9=1pf*
R10=1 KOhm	
R11=10KOhm	

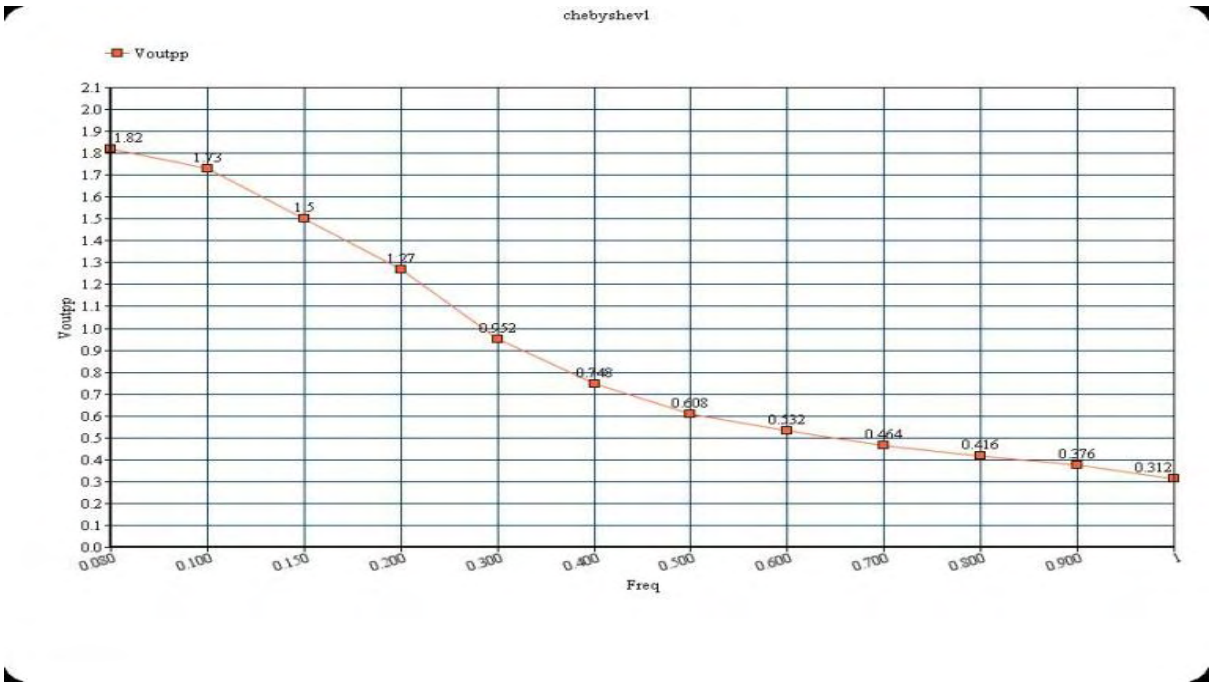
5 *Συμπεράσματα*

Απο τις προσομοιώσεις των φίλτρων που έγιναν στο ADS τόσο με χρήση του default ενισχυτή όσο και με χρήση του LM741 τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν πολύ μεγάλο βαθμό ομοιότητας και οι όποιες διαφορές υπήρχαν ήταν πολύ μικρές και οφείλονται σε κάποιες διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του LM741.Όμως δεδομένου οτι και οι 2 ενισχυτές είναι γενικού σκοπού, περιμέναμε τα αποτελέσματα να είναι σχεδόν ίδια,όπως και έγινε.
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ADS και των μετρήσεων του εργαστηρίου,τα αποτελέσματα δεν είχαν σε όλες τις περιπτώσεις την ίδια ομοιότητα.

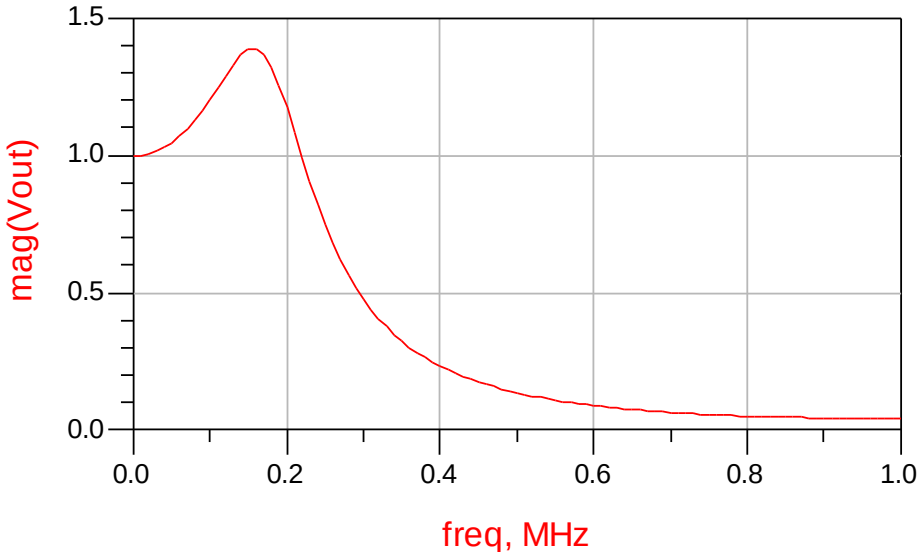
*Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα **4.3**,μας δίνουν την τάση εξόδου για το κάθε φίλτρο.Για να βρούμε το κέρδος τάσης του φίλτρου ,χρησιμοποιούμε την σχέση που παρουσιάστηκε στην ενότητα **3.1**.Το κέρδος τάσης για το φίλτρο δίνεται απο τη σχέση Av=Vout/Vin.Δεδομένου οτι το σήμα εισόδου στην περίπτωση μας είναι σταθερού πλάτους και ίσο με 1V,τότε πρακτικά απο την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι Av=Vout.*
Για να μπορέσουμε να έχουμε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που συλλέξαμε κατά την προσομοίωση στο εργαστήριο ,θα πρέπει είτε να μετατρέψουμε το κέρδος τάσης σε κέρδος που μετριέται σε decibel,είτε να κάνουμε εξαγωγή του κέρδους τάσης απο το ads.
Αν θέλουμε να μετατρέψουμε το κέρδος τάσης σε κέρδος που μετριέται σε decibel,τότε θα χρησιμοποιήσουμε την εξής σχέση GAIN(dB)=20 log10(Vout/Vin) και δεδομένου ότι Vin=1 ,η εν λόγω σχέση γράφεται ως GAIN(dB)=20* log10(Vout).*
Στην παρούσα φάση θα χρησιμόποιήσουμε τον δεύτερο τρόπο επιλέγωντας ενδεικτικά κάποια κυκλώματα για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε κατά πόσο απέχουν μεταξύ τους οι προσομοιώσεις του ads και του εργαστηρίου με χρήση του LM741.

Παρακάτω παραθέτεται ενδεικτικά σύγριση των κερδών τάσης για το φίλτρο chebyshev 1 σταδίου .Για το εν λόγω φίλτρο οι 2 γραφικές παραστάσεις έχουν παραπλήσιες αν όχι ίδιες κυματομορφές και η όποια διαφορά υπάρχει είναι ανεπαίσθητη και ίσως οφείλεται εν μέρη στις μικρές διαφορές των τιμών των παθητικών στοιχείων.Για να γίνει πιο σαφές το κατά πόσο οι μικρές διαφορές των τιμών των παθητικών στοιχείων επηρεάζουν την σύγκριση θα μελετήσουμε στη συνέχεια το φίλτρο chebyshev 2 σταδίων.

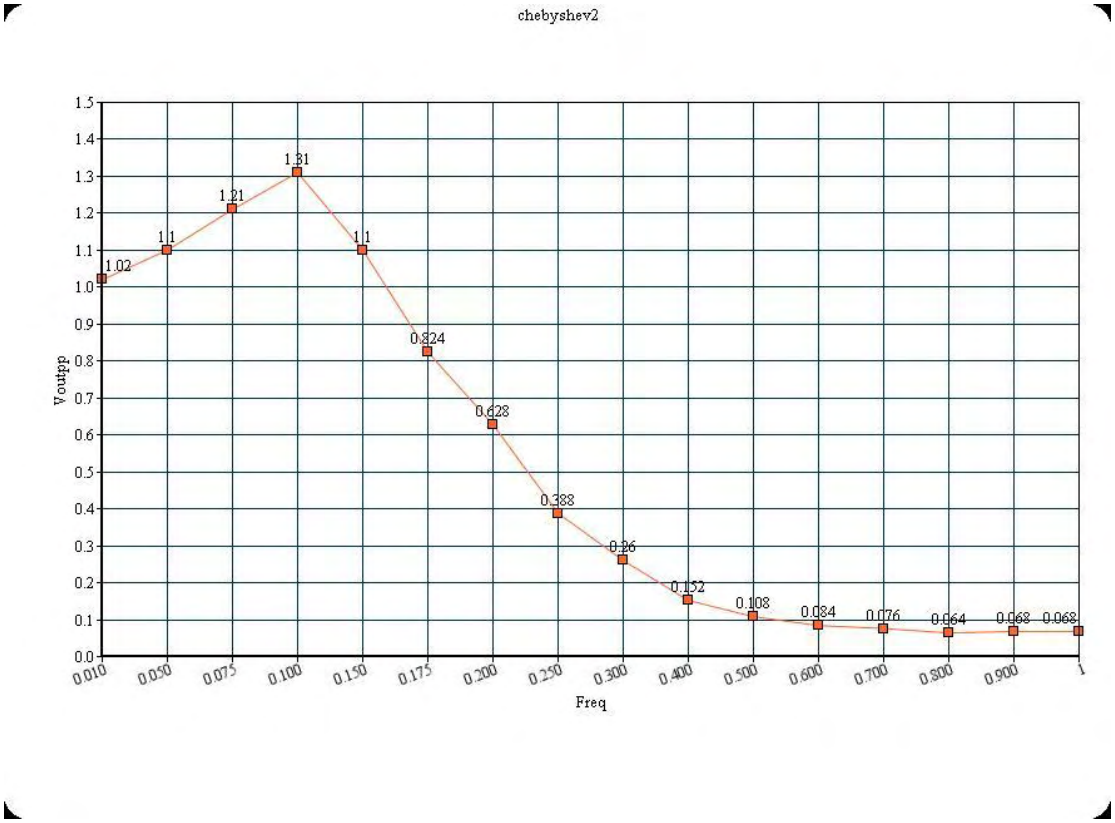




Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν οι γραφικές απεικονίσεις για το φίλτρο chebyshev 2 σταδίων.



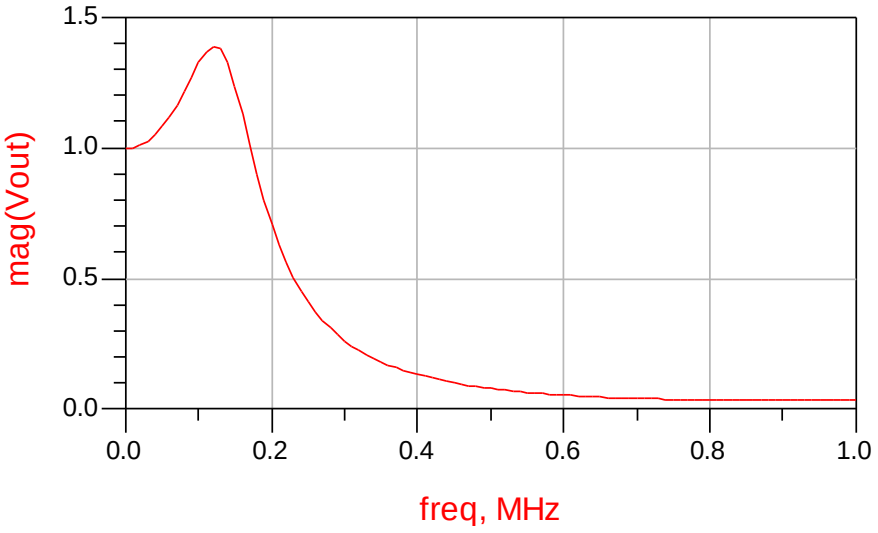
Σε αυτή την γραφική παράσταση οι τιμές των παθητικών στοιχείων ήταν οι εξής:R1=1.26KOhm,R2=6KOhm,C1=888pf και C2=88pf.



Η εμφανής διαφορά βρίσκεται στο peak του κέρδους,το οποίο για την περίπτωση του ads είναι περίπου στα 0.150 MHz ενώ στην προσομοίωση του εργαστηρίου είναι στα 0.100MHz.Λόγο των διαφορών στις τιμές των παθητικών στοιχείων ενώ έχουμε την ίδια κυματομορφή,μέχρι την περιοχή φραγής η γραφική παράσταση του ADS φαίνεται να είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά σε σχέση με την κυματομορφή της εργαστηριακής προσομοίωησης.

Ας δοκιμάσουμε λοιπόν να αλλάξουμε τις τιμές των παθητικών στοιχείων στο ADS και να δούμε την κυματομορφή που θα προκύψει. Αυτή τη φορά το φίλτρο προσομοιώθηκε με τις παρακάτω τιμές

R1=1.5KOhm	*C1=1000pf*
R2=6.8KOhm	*C2=100pf*

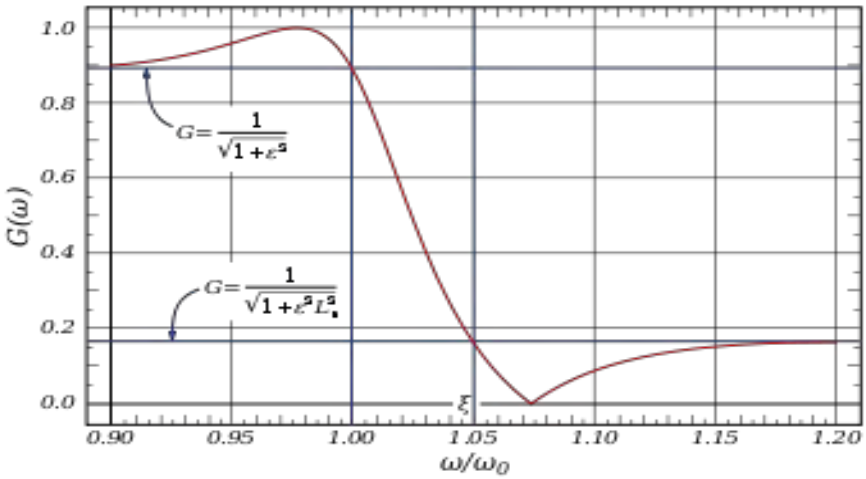


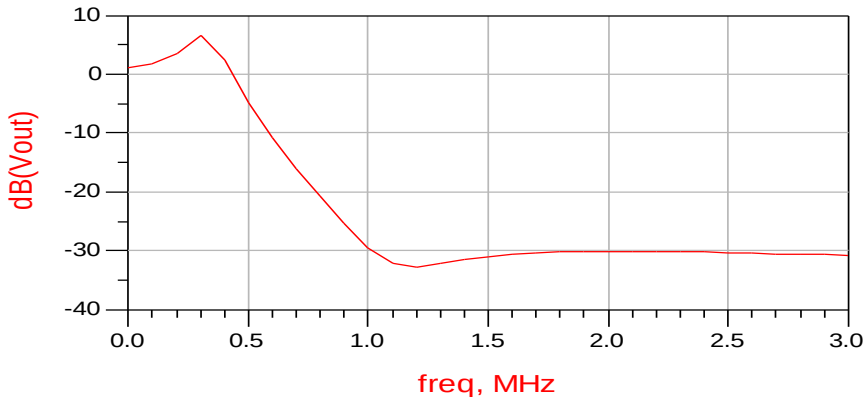
Μετά την αλλαγή των τιμών οι γραφικές παραστάσεις πλέον μοιάζουν πολύ περισσότερο.Επομένως μπορούμε να πούμε οτι το αποτελέσμα της προσομοιωσης του εργαστηρίου είναι πολύ κοντά σε αυτό του ads.

Οι προσομοιώσεις των φίλτρων τοπολογίας butterworth και chebyshev είχαν πολύ μεγάλη ομοιότητα στην κυματομορφή της εξόδου όσον αφορά της προσομοιώσεις εργαστηρίου και ADS στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής LM741.Για την τοπολογία Butterworth περιμέναμε οτι δεν θα υπάρξει πρόβλημα στη σύγκριση των αποτελεσμάτων δεδομένου οτι τα φίλτρα butterworth έχουν την πιο ομαλή μετάβαση απο την ενεργό περιοχή στην περιοχή φραγής.Τα φίλτρα chebyshev έχουν πιο απότομη μετάβαση απο την ενεργό περιοχή στην περιοχή φραγής ,όμως την πλέον απότομη μετάβαση την παρατηρούμε στα ελλειπτικά φίλτρα,στα οποία σχεδόν εξαλείφεται η περιοχή μετάβασης.Για την τελευταία τοπολογία φίλτρων (ελλειπτικά φίλτρα) τα αποτελέσματα των τάσεων εξόδου για τα φίλτρα 2 και 5 σταδίων είναι σχετικά κοντά σε αυτά που περιμέναμε να δούμε.

Υπάρχουν διαφορές, οι οποίες όμως δεν αλλοιώνουν τη μορφή της εξόδου σε πολύ μεγάλο βαθμό και ενδεχομένως να σχετίζονται με το κατά πόσον εύστοχη ήταν η επιλογή των τιμών για τα παθητικά στοιχεία αλλά και με τις διαφορές στις τιμές των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος στις 2 προσομοιώσεις.
Στο ελλειπτικό φίλτρο 3^{ων} σταδίων ,οι 2 προσομοιώσεις έχουν μεν την ιδια μορφή αλλά διαφέρουν όσον αφορά τις γραφικές επεικονίσεις της τάσης εξόδου, καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ADS εμφανίζονται με μια μικρή καθυστέρηση σε σχέση με την προσομοίωση του εργαστηρίου.Εξετάζοντας την κυματομορφή για το κέρδος (σε decibel) του φίλτρου 3^{ων} σταδίων στο ads παρατηρούμε οτι έχει πράγματι τη μορφή που θα είχε η γραφική απεικόνιση για ένα ελλειπτικό φίλτρο , (ριπή τόσο στην ενεργό όσο και στην περιοχή φραγής),έτσι λοιπόν θεωρούμε πως το γραφικό αποτέλεσμα του ads είναι οπτικά σωστό.

Στο σημείο αυτό παραθέτω την γραφική απεικόνιση ενός ελλειπτικού φίλτρου και στη συνέχεια την γραφική απεικόνιση(ads) για το ελλειπτικό φίλτρο 3^{ων} σταδίων.

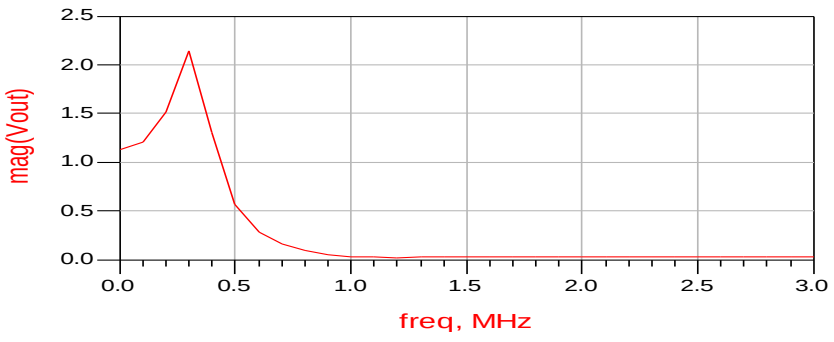


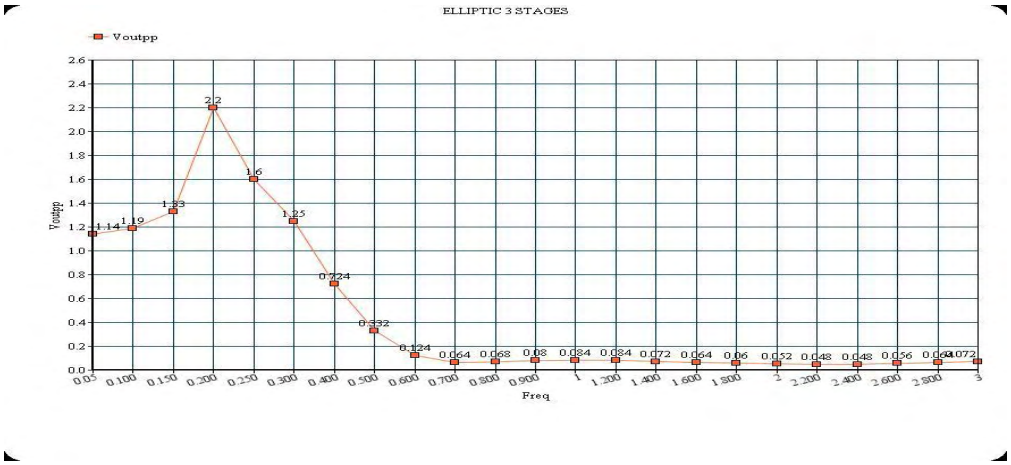


Πάνω βρίσκεται μια γραφική επεικόνιση ενός ελλειπτικού φίλτρου και ακριβώς απο κάτω η περίπτωση του φίλτρου 3^{ων} σταδίων που εξετάζουμε.

Οι κυματομορφές των 2 φίλτρων μοιάζουν αρκετά.Επομένως θεωρούμε οτι το το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του ADS είναι σωστό.

Στη συνέχεια ακολουθούν η γραφική απεικόνιση της τάσης εξόδου για το κύκλωμα στο ads,αλλά και το γράφημα με τις τιμές εξόδου που συλλέχθηκαν κατά την προσομοίωση στο εργαστήριο.



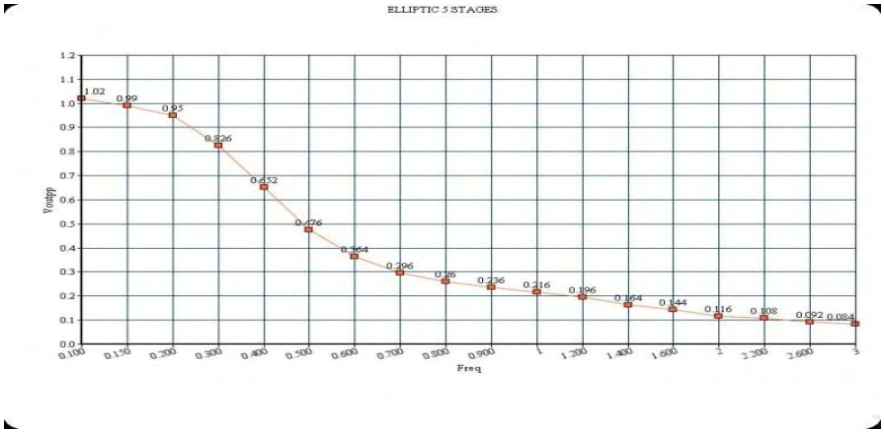


Είναι εμφανές οτι οι 2 γραφικές παραστάσεις έχουν την ίδια μορφή με μόνη διαφορά οτι το peak του κέρδους εμφανίζεται με μια μικρή καθυστέρηση της τάξης των 0.100 MHz στην περίπτωση της προσομοίωσης του φίλτρου στο ADS.Το ίδιο συμβαίνει και για τις υπόλοιπες τιμές,αυτή η διαφορά που παρατηρείται οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μικρές διαφορές των τιμών μεταξύ των δύο προσομοιώσεων ,όσον αφορά παθητικά στοιχεία του κυκλώματος.

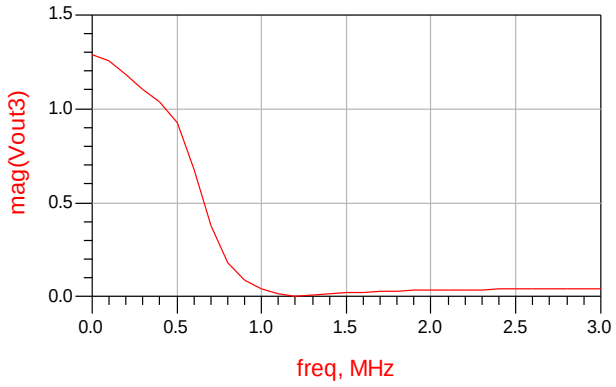
Επίσης, πολύ μικρό,ίσως και ανεπαίσθητο ρόλο στις διαφορές των 2 προσομοιώσεων , έπαιξε και το γεγονός πως κάποιες φορές τα παθητικά στοιχεία(αντιστάσεις,πυκνωτές) δεν έχουν την ακριβή τιμή την οποία καταγράφουν πάντα.

Τέλος κατασκευάστηκε το φίλτρο 5 σταδίων με χρήση των φίλτρων 2 και 3^{ων} σταδίων και η κυματομορφή που δημιουργήθηκε με βάση τις

μετρήσεις που συλλέχθηκαν είχε παραπλήσια μορφή με αυτήτου ads.



Γραφική απεικόνιση τάσης εξόδου για ελλειπτικό φίλτρο 5 σταδίων(εργαστήριο).



Γραφική απεικόνιση τάσης εξόδου για ελλειπτικού φίλτρο 5 σταδίων(ADS)

Υπάρχουν διαφορές στις τιμές των τάσεων εξόδου για τις προσομοιώσεις(ads,εργαστήριο) του φίλτρου 5 σταδίων ,αλλά αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός οτι το φίλτρο 5 σταδίων έχει σαν υποκύκλωμα του,το φίλτρο 3 σταδίων αλλά και κατά ένα μικρό ποσοστό στις διαφορές στις τιμές των παθητικών στοιχείων . Επομένως σε αντίθεση με τις 2 πρώτες τοπολογίες φίλτρων (butterworth,chebyshev) ,τα ελλειπτικά φίλτρα με την πλέον απότομη και σχεδόν ανύπαρκτη περιοχή μετάβασης δεν έχουν το ίδιο ποσοστό ομοιότητας στις τιμές της τάσης εξόδου μεταξύ των προσομοιώσεων στο εργαστήριο και στο ads.Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο ,δεδομένου οτι η απότομες μεταβάσεις μεταξύ ενεργού περιοχής και περιοχής φραγής δε θα ήταν τόσο εύκολο να μετρηθούν και να απεικονιστούν γραφικά σε σχέση με τις πιο ομαλές μεταβάσεις των άλλων 2 τοπολογιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Adel S. Sedra / Kenneth C. Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα 5η έκδοση,Τόμος Α', Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης: Γιάννης Ε. Παπανάνος ,Καθηγητής ΕΜΠ

[2] Adel S. Sedra / Kenneth C. Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα 5η έκδοση,Τόμος Β', Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης: Γιάννης Ε. Παπανάνος ,Καθηγητής ΕΜΠ

[3] Richard C.Jaeger, Μικροηλεκτρονική, 210,Τόμος Α', Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης:
Χρήστος Ι. Γεωργόπουλος,καθηγητής Πολυτεχνείου Πατρών
Νικόλαος Ι. Μάργαρης ,Αν.Καθηγητής Α.Π.Θ
Παύλος Χρ. Κούρος , Καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά
Βασίλης Α. Κώτσος ,Καθηγητής ΤΕΙ Λαμίας
Γεώργιος Ε. Χατζαράκης ,Καθηγητής ΣΕΛΕΤΕ Αθηνών

[4] http://www.futurlec.com/Linear/LM741CN.shtml

[5] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/a741p.html

[6]Operational Amplifiers: Basic Concepts Prof. Greg Kovacs Department of Electrical Engineering Stanford University

[7] **Chapter 16 Active Filter Design Techniques**
Literature Number SLOA088
Excerpted from Op Amps for Everyone Literature Number: SLOD006A
TEXAS INSTRUMENTS

[8*] Application Report SLOA093 – December 2001*
Filter Design in Thirty Seconds *Bruce Carter*
TEXAS INSTRUMENTS

[9] Application Report SLOA049A - October 2000
Active Low-Pass Filter Design *Jim Karki*
TEXAS INSTRUMENTS

[10] http://electronicslab.eu/el/analogika-hlektronika-2/309-telestikoi-se-syndesmologia-enisxyth.html