



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΙΛΤΡΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CROSSOVER 2^{ΗΣ} ΤΑΞΗΣ 3^{ΩΝ} ΔΡΟΜΩΝ**

Εισηγητές:

Αρολιθιανάκης Φανούριος
Μπιαμής Αναστάσιος

Επιβλέπων:

Πιοτογιαννάκης Στυλιανός

Ρέθυμνο, Δεκέμβριος 2020

Πνευματικά δικαιώματα Copyright © Αναστάσιος Μπιαμής, Αρολιθιανάκης
Φανούριος, 2020 .Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Η έγκριση
της διατριβής από το Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο δεν υποδηλώνει
απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Πανεπιστημίου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα την ανάλυση φίλτρων συχνοτήτων και σκοπεύει στην δημιουργία της αντίστοιχης προσομοίωσης και της κατασκευής ενός ενεργού φίλτρου συχνοτήτων (crossover) 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων. Η τεχνολογία ηχητικού εξοπλισμού στη σημερινή εποχή έχει αποκτήσει μεγάλη ζήτηση, με αποτέλεσμα οι πληροφορίες εγγραφής ηχητικών σημάτων και διακυμάνσεων της ηχητικής πίεσης καθίστανται αντικείμενα αυξημένης μελέτης και διερεύνησης.

Στην εργασία, αρχικά, εξετάζεται το φίλτρο, τα χαρακτηριστικά του, οι κατηγορίες του και τα είδη που καταγράφονται με βάση την απόκριση συχνότητας και το ρυθμό αποκοπής. Πιο αναλυτικά, γίνεται αναφορά στα Low-Pass και στα High-Pass Φίλτρα, στα Band-Pass και στα Band-Stop φίλτρα, στα Notch ή φίλτρα εγκοπής και στα All Pass φίλτρα.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αναλογικά φίλτρα και τα ψηφιακά φίλτρα ως προς τους τύπους του κάθε είδους, αλλά και ως προς τις διαφορές που εμφανίζουν. Επίσης, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα παθητικά και στα ενεργά φίλτρα, καθώς και στα crossover.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το κατασκευαστικό στάδιο και συγκεκριμένα με την προσομοίωση και την κατασκευή ενός ενεργού φίλτρου συχνοτήτων (crossover) 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων. Ακολουθούν οι μετρήσεις που καταγράφηκαν, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την όλη διαδικασία.

Συνεπώς, η εν λόγω εργασία αναδεικνύει ,μέσα από τη μελέτη της θεωρίας σχετικά με τα φίλτρα, καθώς και από την κατασκευή προσομοίωσης, τη συχνοτική απόκριση και το ρυθμό αποκοπής crossover 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων και καταλήγει στα ανάλογα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: φίλτρα συχνοτήτων, ενεργό φίλτρο, παθητικό φίλτρο, προσομοίωση φίλτρου συχνοτήτων , κατασκευή φίλτρου συχνοτήτων , crossover

ABSTRACT

The present project is about the analysis of frequency filters and aims to create the corresponding simulation and the construction of an active frequency filter (crossover) of 2nd order and 3 roads. Audio equipment technology has become in great demand today, with the result that the information of recording audio signals and fluctuations of sound pressure are becoming objects of increased study and investigation.

First of all, in this project, we examine the filter, its characteristics, its categories and the types that are recorded based on the frequency response and the cut-off rate. Furthermore, reference is made to Low-Pass and High-Pash Filters, Band-Pass and Band-Stop filters, Notch or notch filters and All Pass filters.

Then, the analog filters and digital filters are presented in terms of the types of each type, but also in terms of their differences. Also, passive and active filters, as well as crossover are specially mentioned.

The project is completed with the construction stage and specifically with the simulation and construction of an active frequency filter (crossover) of 2nd class and 3 roads. The following are the measurements that were recorded, as well as the conclusions that emerged from the whole process.

Consequently, this work highlights, through the study of the theory of filters, and by the construction of the simulation, the frequency response and the cut-off rate of the 2nd order and 3 roads and comes to the corresponding conclusions.

Key words: frequency filters, active filter, passive filter, frequency filters simulation, frequency filters construction, crossover

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT.....	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΑ ΦΙΛΤΡΑ	8
1.1. Τι είναι φίλτρο.....	8
1.2. Γενικά περί φίλτρων.....	8
1.3. Χαρακτηριστικά και προδιαγραφές	9
1.4. Τα ακουστικά φίλτρα και η χρήση τους.....	9
1.5. Κατηγορίες των φίλτρων.....	10
1.6. Τα ιδανικά φίλτρα	10
1.7. Τα είδη των φίλτρων με βάση την απόκριση συχνότητας	11
1.7.1. Low-Pass και High-Pass	11
1.7.2. Band-Pass and Band-Stop.....	12
1.7.3. Notch ή εγκοπής	12
1.7.4. All-Pass.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	14
2.1. Γενικά στοιχεία	14
2.2. Αναλογικά φίλτρα.....	14
2.3. Τύποι αναλογικών φίλτρων	14
2.4. Ψηφιακά φίλτρα.....	15
2.5. Τύποι ψηφιακών φίλτρων	15

2.6. Διαφορές ψηφιακών και αναλογικών φίλτρων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ	17
3.1. Παθητικά φίλτρα.....	17
3.2. Low-pass παθητικά	17
3.3. High-pass παθητικά	18
3.4. Band-pass παθητικά.....	18
3.5. Band-stop παθητικά	19
3.6. Resonant ή Συντονισμού.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ	20
4.1. Ενεργά φίλτρα.....	20
4.2. Butterworth	20
4.3. Chebyshev.....	21
4.3. Ελλειπτικά ή Cauer	22
4.4. Bessel.....	23
4.5. Φίλτρα άλλων τύπων	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: CROSSOVER.....	24
5.1. Γενικά.....	24
5.2. Παθητικά Crossover.....	24
5.2.1 Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων 2ου βαθμού LC.....	24
5.2.2 Φίλτρο υψηλών συχνοτήτων 2ου βαθμού LC	25
5.2.3 Φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων 2ου βαθμού LC	25
5.3. Ενεργά Crossover.....	26
5.3.1 φίλτρα SALLEN-KEY.....	27

5.3.2 Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων 2 ^{ου} βαθμού (LPF).....	27
5.3.3 Φίλτρο ψηλών συχνοτήτων 2 ^{ου} βαθμού (HPF).....	28
5.3.4 Φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων 2 ^{ου} βαθμού (BPF).....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ CROSSOVER(multiSim).....	29
6.1 Προσομοίωση στο πρόγραμμα MultiSim.....	29
6.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων (Προσομοίωση ενεργού Crossover 2 ^{ης} τάξης 3 ^{ων} δρόμων (κύκλωμα Sallenkey))	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CROSSOVER , ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	33
7.1 Κατασκευή crossover.....	33
7.2 Μετρήσεις crossover και αποτελέσματα μετρήσεων.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλύσει τα φίλτρα συχνοτήτων με την προσομοίωση και την κατασκευή ενεργού φίλτρου συχνοτήτων (crossover) 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί είναι η βιβλιογραφική μελέτη και η πειραματική μέθοδος.

Το ενδιαφέρον που προκύπτει αναφορικά με τις δυνατότητες του ήχου, βασίζεται στην επεξεργασία του σήματος. Είναι αναμφισβήτητο το γεγονός, ότι στις μέρες μας, το πεδίο έρευνας που έχει ως αφετηρία τις πληροφορίες της εγγραφής ηχητικών σημάτων και φτάνει έως τη δημιουργία των διακυμάνσεων της ηχητικής πίεσης από ένα μεγάφωνο, δημιουργεί μια ξεχωριστή ζήτηση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας στα ηχεία. Ως εκ τούτου, όταν προσπαθεί να καλυφθεί ολόκληρο το εύρος του ήχου, από το εύρος των μπάσων έως και τις υψηλές συχνότητες, η αναπαραγωγή των ηχητικών κυμάτων χρειάζεται διαφορετικούς τύπους ηχείων (sub-woofer,woofer,twitter) για διαφορετικά είδη ήχων.

Η συγκεκριμένη εργασία θα πραγματοποιηθεί, με βάση τα φίλτρα συχνοτήτων (crossover), καθώς είναι απαραίτητος ένας διαχωρισμός του εύρους του ήχου για κατάλληλα προγράμματα καθοδήγησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι έως και σήμερα, οι σχεδιαστές ηχείων έχουν χρησιμοποιήσει αναλογική τεχνολογία για να καταφέρουν το αποτέλεσμα που επιθυμούν. Ωστόσο, η ανάπτυξη της ψηφιακής επεξεργασίας του σήματος προσφέρει σημαντικές επιλογές όσον αφορά το φιλτράρισμα των ηχητικών σημάτων, αλλά και την κατεύθυνση των σωστών σημάτων στα επιμέρους τμήματα των ηχείων με αποτελεσματικότητα και ακρίβεια.

Το «φιλτράρισμα» μπορεί να γίνει παθητικά ή ενεργά. Τα παθητικά φίλτρα αποτελούνται από παθητικά ηλεκτρικά κυκλώματα, ενώ τα ενεργά φίλτρα μπορούν να χειριστούν πιο ελεύθερα το σήμα, για παράδειγμα, ενισχύοντάς το. Με το ψηφιακό φιλτράρισμα, καθίστανται δυνατές νέες δυνατότητες, όπως διαφορετικές ιδιότητες φίλτρου, φθηνότερη μαζική παραγωγή, καλή προσαρμοστικότητα και «διόρθωση» αναπαραγωγής. Δυστυχώς, δεν έρχονται χωρίς παρενέργειες. Το ψηφιακό φιλτράρισμα ήχου μπορεί να προκαλέσει λεπτές αλλαγές στα σήματα και η ακρόαση αυτών των αλλαγών συζητείται από την εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας στον κόσμο του ήχου.

Όσο αφορά τη δομή της μελέτης αυτής, στο πρώτο κεφάλαιο θα εξεταστεί το φίλτρο, τα χαρακτηριστικά του, οι κατηγορίες του και τα είδη που καταγράφονται με βάση την απόκριση συχνότητας. Πιο αναλυτικά, θα γίνει αναφορά στα Low-Pass και στα High-Pass Φίλτρα, στα Band-Pass και στα Band-Stop φίλτρα, στα Notch ή φίλτρα εγκοπής και στα All Pass φίλτρα. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αναλογικά και τα ψηφιακά φίλτρα, ως προς τους τύπους του κάθε είδους, αλλά και ως προς τις διαφορές που εμφανίζουν. Στα τρία επόμενα κεφάλαια θα πραγματευθούμε τα Παθητικά και τα Ενεργά φίλτρα, καθώς και τα crossover. Στο έκτο κεφάλαιο θα γίνει η προσομοίωση του crossover. Στο έβδομο κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να κατασκευάσουμε ένα ενεργό φίλτρο συχνοτήτων (crossover) 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων, να καταγράψουμε τις μετρήσεις που προέκυψαν. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την όλη διαδικασία κατασκευής και μέτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΑ ΦΙΛΤΡΑ

1.1. Τι είναι φίλτρο

Το φίλτρο ήχου είναι ένα κύκλωμα που εξαρτάται από τη συχνότητα και λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων ήχου, από 20 Hz έως και 20 kHz. Τα φίλτρα ήχου μπορούν να ενισχύσουν, να περάσουν ή και να ελαττώσουν ορισμένες περιοχές συχνοτήτων. Υπάρχουν πολλοί τύποι φίλτρων για διαφορετικές εφαρμογές ήχου, συμπεριλαμβανομένων στερεοφωνικών συστημάτων hi-fi, μουσικών συνθεσάιζερ, ηχητικών εφέ, συστημάτων ενίσχυσης ήχου, ενισχυτών οργάνων, καθώς και συστημάτων εικονικής πραγματικότητας και άλλα (Pactitis, S. A. 2007).

1.2. Γενικά περί φίλτρων

Ο σκοπός των φίλτρων ως προς την επεξεργασία του σήματος, είναι η απομάκρυνση ανεπιθύμητων μερών των σημάτων, όπως τυχαίοι θόρυβοι, ή η εξαγωγή χρήσιμων-συγκεκριμένων κομματιών του σήματος, όπως μια συνιστώσα που βρίσκεται στην καθορισμένη περιοχή.

Το ψηφιακό φίλτρο λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, όπως το αναλογικό, με τη διαφορά πως το αναλογικό μερικές φορές είναι δυσκολότερο ή ακόμα και ακατόρθωτο να πραγματοποιηθεί. Η χρησιμοποίηση ψηφιακού φίλτρου έχει αρκετά προνόμια, όπως εξαιρετική αναπαραγωγή, εγγύηση στη «στάθμη» λειτουργίας και ευχέρεια στην αλλαγή των χαρακτηριστικών του. Επίσης, η χρήση ψηφιακού φίλτρου καθιστά εφικτή την κατανομή του χρόνου, του ίδιου ψηφιακού κυκλώματος ανάμεσα σε πολλά φίλτρα. Τα ψηφιακά φίλτρα είναι συστήματα, τα οποία δέχονται στις εισόδους τους μια σειρά αριθμών, που επεξεργάζονται και δημιουργούν στις εξόδους τους μία διαφορετική ακολουθία.

Επομένως, η επιδίωξη των ψηφιακών φίλτρων μοιάζει με εκείνη των αναλογικών, ως προς τον σχηματισμό μιας πτυχής εισόδου. Παρόλα αυτά, η υλοποίηση του

ψηφιακού φίλτρου δεν είναι ίδια με του αναλογικού (Kirkeby, O., & Nelson, P. A. 1999).

1.3. Χαρακτηριστικά και προδιαγραφές

Το ψηφιακό φίλτρο εφαρμόζεται σε πάρα πολλές εφαρμογές που αυξάνονται διαρκώς, σε αντίθεση με το αναλογικό φίλτρο, όπως για παράδειγμα στα περισσότερα ζητήματα ανάλυσης και επεξεργασίας σημάτων (Tsai, M. S., & Wang, K. W. 1999).

Πιο συγκεκριμένα, αυτά τα σήματα είναι μικρού μήκους, όπως η καταγραφή του σεισμού, η παλίνρροια, το κύμα, η θερμική μελέτη ενός κτιρίου, οι μελέτες κυκλικών οικονομικών αναλύσεων, η ιατρική κλπ.. Τα σημαντικότερα προτερήματα ενός ψηφιακού φίλτρου σε πραγματικό χρόνο, σε σχέση με το αναλογικό είναι: η μεγάλη ακρίβεια, το μικρό μέγεθος λόγω των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η σταθερή λειτουργία του, η εύκολη προσαρμογή των αντιστάσεων, η έλλειψη περιορισμού θέσεων για κρίσιμες συχνότητες φίλτρου, η μεγάλη ευχέρεια που οφείλεται στη δυνατότητα αλλαγής της καμπύλης απόκρισης φίλτρων με την αλλαγή κατάλληλου συντελεστή, η ικανότητα να μοιραστεί ο χρόνος σε πιο μεγάλα μέρη των συστημάτων, και τέλος το μικρότερο κόστος, ειδικά σε περιπτώσεις φίλτρου αρκετά χαμηλών συχνοτήτων διέλευσης (0.01-1Hz).

1.4. Τα ακουστικά φίλτρα και η χρήση τους

Τα ακουστικά φίλτρα είναι η συσκευή για την απομόνωση συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων από έναν πολύπλοκο ήχο. Το απλούστερο ακουστικό φίλτρο είναι ο συντονιστής Helmholtz (Ατσάλης, Μ. 2018). Η θεωρία των ακουστικών φίλτρων αναπτύχθηκε με τη μέθοδο ηλεκτρομηχανικής αναλογίας με βάση τη θεωρία των ηλεκτρικών φίλτρων.

1.5. Κατηγορίες των φίλτρων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης των φίλτρων (Guenther, F. H., Nieto-Castanon, A., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. 2004). Εάν ταξινομηθούν σύμφωνα με τις συχνότητες που εξασθενίζουν, τότε τα φίλτρα παρουσιάζονται ως εξής:

- low-pass filter – διατηρεί τις συχνότητες κάτω από ένα καθορισμένο όριο
- high-pass filter – διατηρεί τις συχνότητες πάνω από ένα καθορισμένο όριο
- bandpass filter – διατηρεί τις συχνότητες εντός μιας δεδομένης ζώνης συχνοτήτων
- bandstop filter – εξαλείφει τις συχνότητες σε μια δεδομένη ζώνη συχνοτήτων
- comb filter – εξασθενεί τις συχνότητες με τρόπο που όταν γράφεται στον τομέα συχνοτήτων, έχει σχήμα «χτένα», δηλαδή, πολλαπλασιάζονται κάποιες θεμελιώδεις συχνότητες εξασθενώντας τις υπόλοιπες σε όλο το ακουστικό φάσμα.
- peaking filter – ενισχύει ή εξασθενεί τις συχνότητες σε μια μπάντα
- shelving filters – τα φίλτρα «ραφιών» χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
 - ✓ low-shelf filter – ενισχύει ή εξασθενεί τις χαμηλές συχνότητες
 - ✓ high-shelf filter – ενισχύει ή εξασθενεί τις υψηλές συχνότητες

1.6. Τα ιδανικά φίλτρα

Τα πιο κλασσικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες είναι τα κλασσικά φίλτρα, που δεν αλλοιώνουν τις συχνότητες ή τις διακόπτουν τελείως (Λιαπέρδος, I. 2015). Τα παρακάτω είδη κλασσικών φίλτρων παρουσιάζονται στις περιπτώσεις, είτε ψηφιακών, είτε αναλογικών φίλτρων με ακριβή αντιστοιχία και είναι τα εξής:

- Low-Pass και High-Pass
- Band-Pass και Band-Stop
- Notch ή εγκοπής
- All-Pass

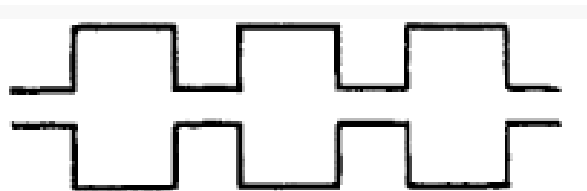
1.7. Τα είδη των φίλτρων με βάση την απόκριση συχνότητας

Παρακάτω γίνεται κατηγοριοποίηση των φίλτρων με βάση την απόκριση συχνότητας. Συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά στο φίλτρο χαμηλής διέλευσης, φίλτρο υψηλής διέλευσης, στο φίλτρο διέλευσης ζώνης, στο φίλτρο εγκοπής και τέλος στο φίλτρο all-pass.

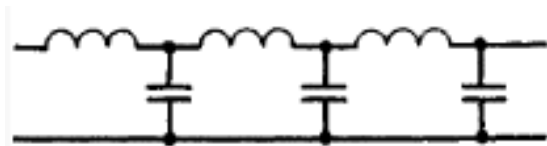
1.7.1. Low-Pass και High-Pass

Ένα ακουστικό φίλτρο που περνά όλες τις συχνότητες, από το μηδέν έως κάποια καθορισμένη συχνότητα, ονομάζεται φίλτρο χαμηλής διέλευσης (low-pass). Ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης (high-pass), από την άλλη πλευρά, περνά όλες τις συχνότητες πάνω από μια καθορισμένη τιμή και δεν υπάρχουν συχνότητες κάτω από αυτό. Ένα ακουστικό φίλτρο χαμηλής διέλευσης (Εικόνα 1) αποτελείται από ένα σύνολο πανομοιότυπων κοιλοτήτων που συνδέονται με στενούς σωλήνες (το ηλεκτρικό ανάλογο φαίνεται στην Εικόνα 2).

Εικόνα 1



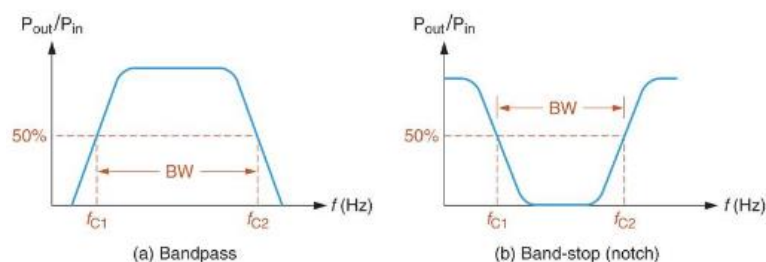
Εικόνα 2



1.7.2. Band-Pass and Band-Stop

Ένα ακουστικό φίλτρο που περνά περισσότερο ή λιγότερο στενό εύρος συχνοτήτων μεταξύ δύο καθορισμένων συχνοτήτων, ονομάζεται φίλτρο διέλευσης ζώνης (Μουσιάδης, Χ. Ν. 2018). Τα φίλτρα Band-Pass και Band-Stop έχουν σχεδιαστεί για να περνούν ή να αποκλείουν ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων. Ως ανασκόπηση, οι κύριες συχνότητες προσδιορίζονται στις καμπύλες απόκρισης συχνότητας στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3). Όπως μπορείτε να δείτε, καθένα από αυτά τα φίλτρα έχει δύο συχνότητες αποκοπής, που ορίζονται f_{c1} και f_{c2} . Η διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων αναφέρεται ως εύρος ζώνης (BW) του φίλτρου και ο γεωμετρικός μέσος όρος των συχνοτήτων αποκοπής αναφέρεται ως η κεντρική του συχνότητα (f_0). Το φίλτρο Band-Pass είναι αυτό όπου επιτρέπει την διέλευση καθορισμένου πεδίου συχνοτήτων.

Εικόνα 3 Band-Pass,band Stop

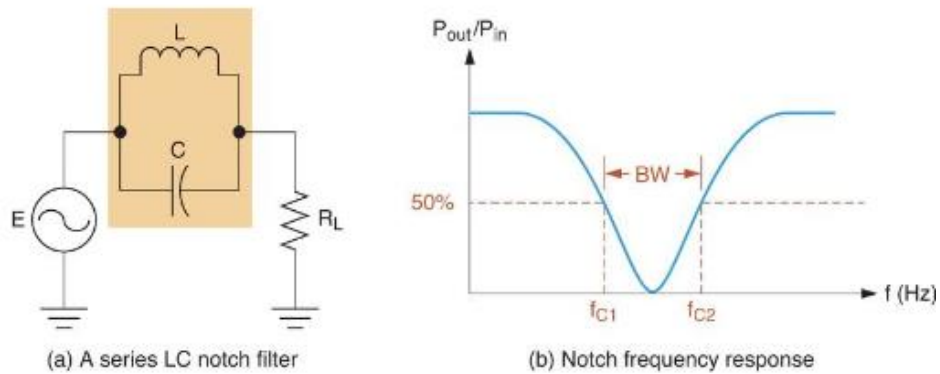


Ένα φίλτρο Band-Stop, γνωστό, επίσης, και ως Notch Filter, είναι αυτό όπου μπλοκάρει και απορρίπτει τις συχνότητες που βρίσκονται μεταξύ των δύο σημείων συχνοτικής αποκοπής, ενώ περνά όλες τις συχνότητες έξω από αυτό το εύρος. (Setayesh, A., Mirnaziry, S. R., & Abrishamian, M. S. 2011).

1.7.3. Notch ή εγκοπής

Ένα φίλτρο εγκοπής σειράς LC μπορεί να κατασκευαστεί, τοποθετώντας ένα παράλληλο κύκλωμα LC σε σειρά μεταξύ της πηγής σήματος και του φορτίου. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4), μαζί με την καμπύλη απόκρισης της συχνότητας (Karimi-Ghartemani, 2011).

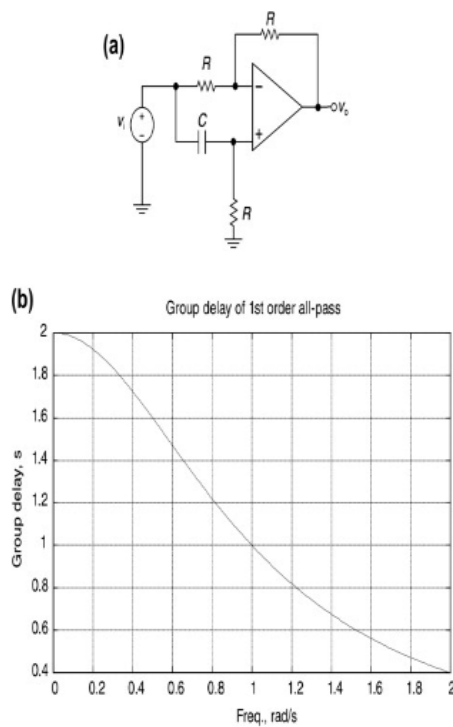
Εικόνα 4 Notch filter



1.7.4. All-Pass

Ένα φίλτρο all-pass είναι ένα φίλτρο που έχει εύρος όλο το συχνοτικό φάσμα που μας ενδιαφέρει, αλλά παρέχει μετατόπιση φάσης. Τα φίλτρα all-pass μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσαρμόσουν τις αποκρίσεις καθυστέρησης στην αλυσίδα επεξεργασίας σήματος (Μίναει, S., & Yuce, E. 2010). Ένα κύκλωμα all-pass φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 5):

Εικόνα 5 all-pass filter



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

2.1. Γενικά στοιχεία

Τα ψηφιακά και τα αναλογικά φίλτρα λαμβάνουν και τα δύο ανεπιθύμητα στοιχεία θορύβου ή σήματος, αλλά λειτουργούν διαφορετικά στον αναλογικό και τον ψηφιακό τομέα. Τα αναλογικά φίλτρα μπορούν να αφαιρέσουν τα πάντα, πάνω ή κάτω από μια επιλεγμένη συχνότητα αποκοπής, ενώ τα ψηφιακά φίλτρα μπορούν να προγραμματιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα αναλογικά φίλτρα που αφαιρούν σήματα πάνω από μια συγκεκριμένη συχνότητα ονομάζονται φίλτρα χαμηλής διέλευσης, επειδή αφήνουν τα σήματα χαμηλής συχνότητας να διέρχονται από το φίλτρο, ενώ ταυτόχρονα εμποδίζουν τα πάντα πάνω από τη συχνότητα αποκοπής. Ένα αναλογικό φίλτρο που αφαιρεί όλα τα σήματα, κάτω από μια συγκεκριμένη συχνότητα είναι ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης, επειδή επιτρέπει τη μετάδοση όλων των υψηλότερων συχνοτήτων από τη συχνότητα αποκοπής (Velazquez, S. R., Nguyen, T. Q., & Broadstone, S. R. 1998).

2.2. Αναλογικά φίλτρα

Τα αναλογικά φίλτρα είναι κυκλώματα κατασκευασμένα από αναλογικά εξαρτήματα, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία.

2.3. Τύποι αναλογικών φίλτρων

Οι πιο γνωτοί τύποι αναλογικών φίλτρων είναι: Butterworth, Chebyshev I και II, Elliptic ή Cauer και Bessel. Οι παραπάνω τύποι δεν πλησιάζουν την ιδανική καμπύλη απόκρισης, αλλά ο κάθε τύπος είναι χρήσιμος ξεχωριστά (Su, K. L. 2012).

2.4. Ψηφιακά φίλτρα

Τα ψηφιακά φίλτρα ενσωματώνονται συχνά σε ένα τσιπ που λειτουργεί σε ψηφιακά σήματα, όπως MCU, SoC, επεξεργαστή ή DSP. Τα ψηφιακά φίλτρα μπορεί να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς το φιλτράρισμα, αλλά το σήμα τους πρέπει να είναι αναλογικό. Η τοποθέτηση ενός ψηφιακού φίλτρου σε μια αναλογική αλυσίδα σήματος, θα απαιτούσε τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα, προτού εφαρμοστεί το ψηφιακό φιλτράρισμα. Τα ψηφιακά φίλτρα λειτουργούν με υπερβολική δειγματοληψία και κατά μέσο όρο είναι προγραμματιζόμενα. Ωστόσο, είναι συνετό να εφαρμοστεί ένα αναλογικό φίλτρο πριν από τη μετατροπή σήματος, ώστε να αφαιρεθούν πρώτα όλες οι ανεπιθύμητες συχνότητες πάνω ή κάτω, όπου αναμένεται να λειτουργήσει το επιθυμητό σήμα.

2.5. Τύποι ψηφιακών φίλτρων

Τα ψηφιακά φίλτρα διακρίνονται στο φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR) και στο φίλτρο άπειρης κρουστικής απόκρισης (IIR). Λόγω των κύριων αρχών λειτουργίας τους, το φίλτρο IIR ονομάζεται και επαναληπτικό ή αναδρομικό, ενώ το FIR ονομάζεται και μη αναδρομικό.

2.6. Διαφορές ψηφιακών και αναλογικών φίλτρων

Τα αναλογικά και τα ψηφιακά φίλτρα έχουν διαφορές ως προς τις συμπεριφορές τους και την εφαρμογή τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα αναλογικό φίλτρο υλοποιείται με το κλασσικό ηλεκτρικό αναλογικό κύκλωμα και η επεξεργασία του αντίστοιχου σήματος είναι άμεση χωρίς καθυστερήσεις. Από την άλλη πλευρά, το ψηφιακό φίλτρο υλοποιείται μόνο με ψηφιακούς επεξεργαστές και κατά την επεξεργασία του καθυστερεί, κάτι το οποίο οφείλεται στην πολυπλοκότητα της επεξεργασίας και της ταχύτητας του επεξεργαστή.

Η χαρακτηριστική τιμή του αναλογικού φίλτρου είναι συνάρτηση της τιμής του στοιχείου του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η τιμή μπορεί να μεταβάλλεται εξαιτίας

διάφορων παραγόντων, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τη θερμοκρασία, η οποία επιδρά και επηρεάζει την αντίστοιχη χαρακτηριστική τιμή του φίλτρου. Αντιθέτως, το ψηφιακό φίλτρο είναι πολύ σταθερό, με την προϋπόθεση βέβαια ότι λειτουργεί σωστά ο επεξεργαστής.

Τέλος, το ψηφιακό φίλτρο είναι αρκετά ευέλικτο στο σχεδιασμό του, αφού είναι δυνατόν να σχεδιαστούν φίλτρα με οποιεσδήποτε χαρακτηριστικές τιμές. Από την άλλη, το αναλογικό φίλτρο περιορίζεται κατά την υλοποίηση του (Motta, L., & Faúndes, N. 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

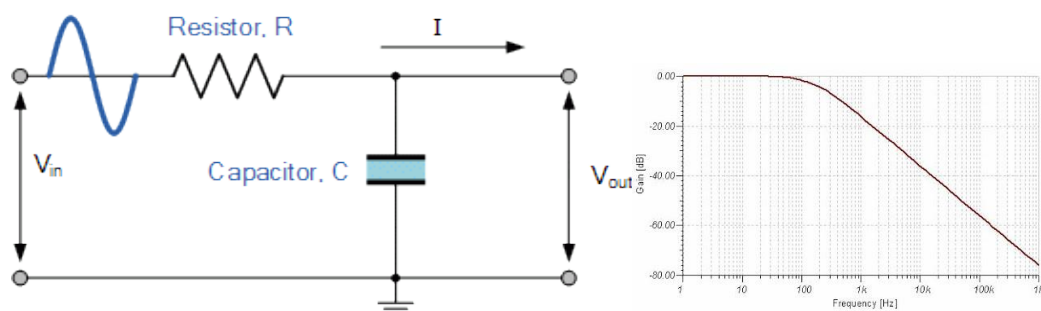
3.1. Παθητικά φίλτρα

Τα παθητικά φίλτρα αποτελούσαν την πιο συνηθισμένη λύση στα μεγάφωνα. Πιο αναλυτικά, η πλειοψηφία των ηχείων Hi-Fi με πολλούς δρόμους στο σπίτι εξακολουθούν να έχουν παθητικά φίλτρα crossover. Ωστόσο, σε εξωτερικούς χώρους, όπως για παράδειγμα στη δημόσια διεύθυνση, τα παθητικά φίλτρα αναπαραγωγής δεν χρησιμοποιούνται έως τώρα, κάτι το οποίο οφείλεται στις υψηλές απαιτήσεις ισχύος. Τα τελευταία χρόνια, όμως, οι οικιακοί χρήστες άρχισαν και εκείνοι, σταδιακά, να χρησιμοποιούν ενεργά ηχεία. Τα βασικά μέρη ενός παθητικού φίλτρου είναι οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα πηνία. Τα μέρη αυτά τοποθετούνται στο ηλεκτρικό κύκλωμα, προκειμένου να αποκτήσουν την επιθυμητή συχνοτική απόκριση. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα χαμηλότερα στοιχεία του σήματος φιλτράρονται στο μεγάφωνο, ενώ τα υψηλότερα στην κόρνα.

3.2. Low-pass παθητικά

Αυτός ο τύπος φίλτρου χαμηλής διέλευσης είναι κατασκευασμένος από μια αντίσταση και έναν πυκνωτή σε σειρά όπου η έξοδος λαμβάνεται κατά μήκος της αντίστασης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο πυκνωτής επιτρέπει το πέρασμα του σήματος χαμηλής συχνότητας, το οποίο τελικά καθιερώνεται κατά μήκος της αντίστασης και μπλοκάρει το σήμα υψηλής συχνότητας που δεν φτάνει στην αντίσταση φορτίου (Εικόνα 6).

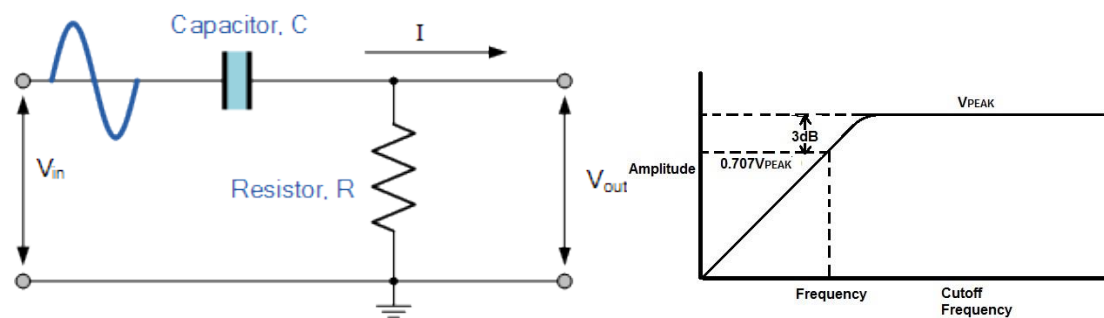
Εικόνα 6: Lowpass filter



3.3. High-pass παθητικά

Ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης περνά τις υψηλές συχνότητες, αλλά ταυτόχρονα εξασθενεί το πλάτος των συχνοτήτων χαμηλότερα από τη συχνότητα αποκοπής. Το πραγματικό ποσό εξασθένησης για κάθε συχνότητα είναι μια παράμετρος σχεδιασμού του φίλτρου. Οι όροι φίλτρο bass-cut ή rumble filter χρησιμοποιούνται, επίσης, σε εφαρμογές ήχου. Ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης είναι το αντίθετο ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 7).

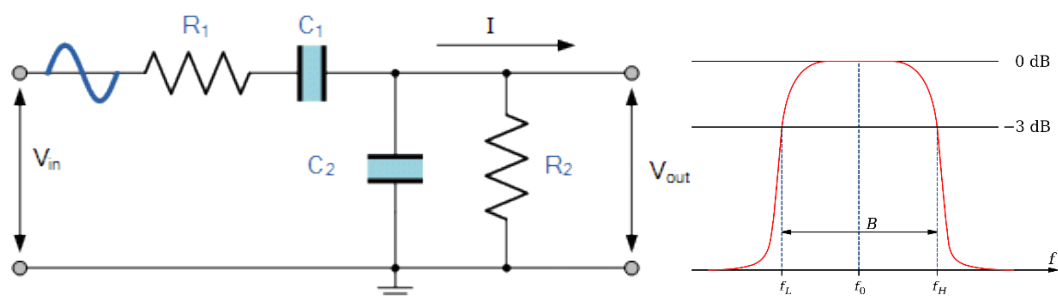
Εικόνα 7: Highpass filter



3.4. Band-pass παθητικά

Τα Band Pass Filters μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομόνωση ή το φιλτράρισμα συγκεκριμένων συχνοτήτων που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης ή εύρους συχνοτήτων. Στην ουσία αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα χαμηλοπερατό και ένα υψηλοπερατό φίλτρο συχνοτήτων σε σειρά, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8).

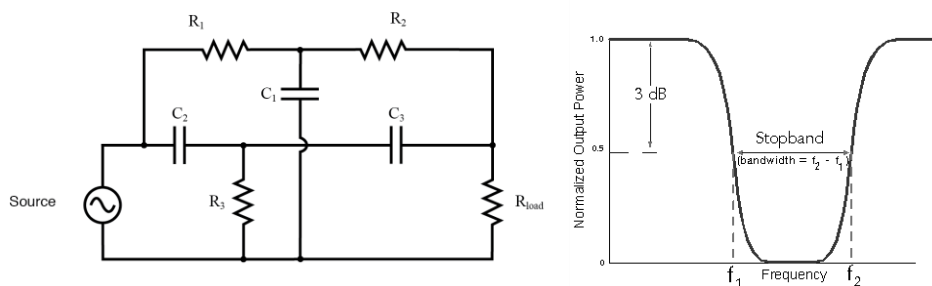
Εικόνα 8 : Bandpass filter



3.5. Band-stop παθητικά

Το φίλτρο band-stop απορρίπτει τις συχνότητες που βρίσκονται στο διάστημα ανάμεσα σε δύο επιλεγμένες συχνότητες, ενώ επιτρέπει, παράλληλα, στις υπόλοιπες να μην επηρεάζονται. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να δημιουργηθούν από low-pass ή από high-pass, ακόμα και ταυτόχρονα. Το φίλτρο αυτό χωρίζεται σε ευρεία ζώνη και σε στενή ζώνη αποκοπής. (Εικόνα 9).

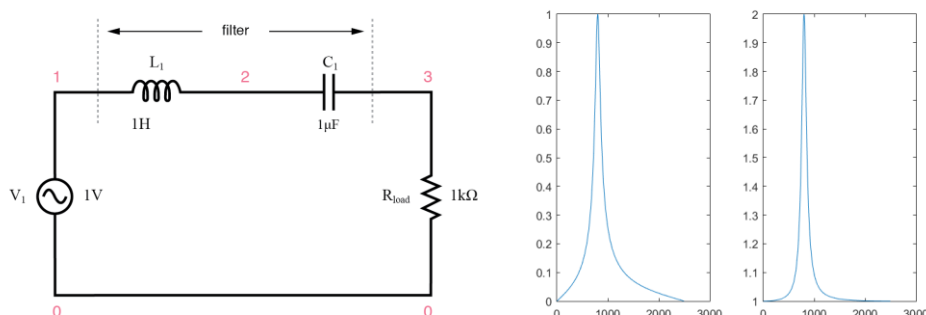
Εικόνα 9: Band-stop filter



3.6. Resonant ή Συντονισμού

Συνδυάζοντας πηνία και πυκνωτές στο ίδιο κύκλωμα μπορεί να προκληθεί συντονισμός σε μία σταθερή συχνότητα. Η συχνότητα αυτή, είτε απορρίπτεται με τη βοήθεια του band-stop φίλτρου, είτε επιλέγεται με ένα band-pass φίλτρο. Αυτός ο συνδυασμός ονομάζεται επιλογή συχνότητας ή ακόμα και «παγίδα» συχνότητας. Επιπλέον, ο παραπάνω συνδυασμός προκαλεί ελάχιστες αντιστάσεις κατά τη διάρκεια του συντονισμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίνουν τη δυνατότητα, είτε να το επιλέγει κάποιος για απόρριψη, είτε για ενίσχυση μιας συγκεκριμένης συχνότητας (Εικόνα 10).

Εικόνα 10: Resonant filter



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ

4.1. Ενεργά φίλτρα

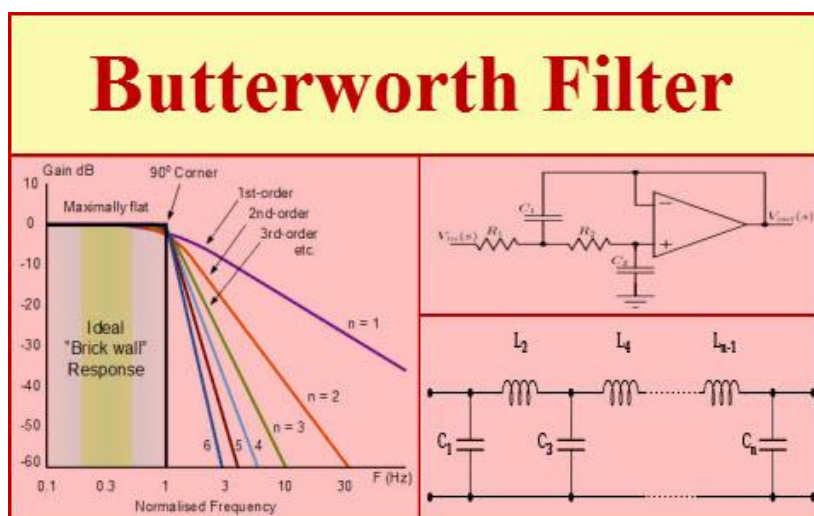
Τα ενεργά φίλτρα ονομάζονται έτσι, επειδή χρησιμοποιούν ένα ενεργό στοιχείο κέρδους (συνήθως ένα λειτουργικό ενισχυτή), πέρα των αντιστάσεων και των πυκνωτών. Το ανώτατο όριο της απόκρισης συχνότητας καθορίζεται από αυτό του στοιχείου κέρδους, συνήθως μερικές δεκάδες megahertz για ενισχυτές (Ali, A. S., Radwan, A. G., & Soliman, A. M. 2013).

Τα ενεργά φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συχνότητες μερικών hertz ή λιγότερο. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι το κατώτερο όριο του εύρους καθορίζεται από το μέγεθος των εξαρτημάτων. Το ενεργό στοιχείο απαιτεί παροχή ρεύματος. Επομένως, οι τάσεις εισόδου και εξόδου περιορίζονται, συνήθως σε ± 15 V. Ωστόσο, η χρήση του στοιχείου κέρδους επιτρέπει την παροχή τάσης, που είναι ο ρυθμιστής αντίστασης εισόδου και εξόδου, και παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία για το σχεδιασμό της απόκρισης συχνότητας.

4.2. Butterworth

Το ενεργό φίλτρο Butterworth ονομάζεται και επίπεδο φίλτρο. Η εφαρμογή του ενεργού φίλτρου Butterworth εγγυάται μια επίπεδη απόκριση στη ζώνη πρόσβασης και την άφθονη απενεργοποίηση. Αυτή η ομάδα φίλτρων προσεγγίζει την τέλεια εφαρμογή φίλτρου στη ζώνη πρόσβασης. Αυτό το φίλτρο περιλαμβάνει ουσιαστικά το επίπεδο πλάτος, στην απόκριση συχνότητας έως και τη συχνότητα αποκοπής (Ali, A. S., Radwan, A. G., & Soliman, A. M. 2013). Ένα τέτοιο παράδειγμα μπορούμε να δούμε στην εικόνα 11 παρακάτω.

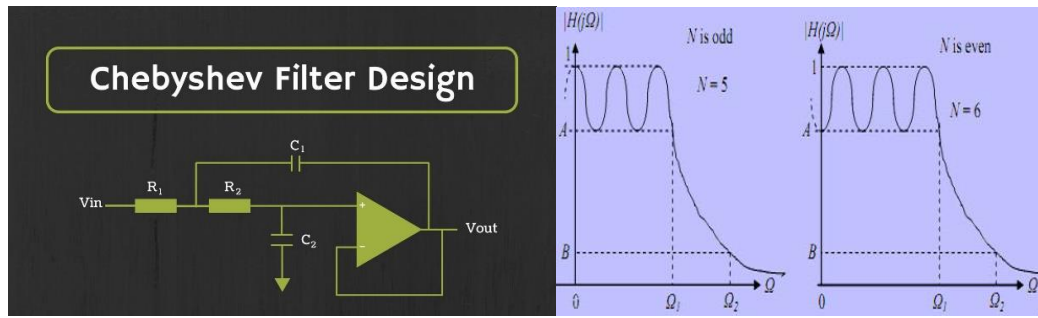
Εικόνα 11 :Butterworth Filter



4.3. Chebyshev

Το ενεργό φίλτρο Chebyshev ονομάζεται επίσης και φίλτρο «κυματισμού», καθώς δίνει μια ευκρινέστερη αποκοπή σε σχέση με ένα φίλτρο Butterworth στη ζώνη διέλευσης. Τόσο τα φίλτρα Chebyshev, όσο και τα Butterworth εμφανίζουν μεγάλες αλλαγές κοντά στη συχνότητα αποκοπής. Ένα μειονέκτημα του φίλτρου Chebyshev είναι το εξωτερικό ελάχιστο και μέγιστο κέρδους κάτω από τη συχνότητα αποκοπής. Η ρυθμιζόμενη παράμετρος στο σχεδιασμό του φίλτρου, ο κυματισμός όπως φαίνεται παρακάτω, εκφράζεται σε dB. Η εφαρμογή αυτών των φίλτρων δίνει μία πιο έντονη εναλλαγή, αλλά έχει κυματισμό στη ζώνη διέλευσης και επομένως δεν χρησιμοποιείται σε συστήματα ήχου. Ωστόσο, θεωρείται καλύτερο σε ορισμένες εφαρμογές, όταν υπάρχει μόνο μία συχνότητα, (Liao, C. K., Chi, P. L., & Chang, C. Y. 2007), (Εικόνα 12).

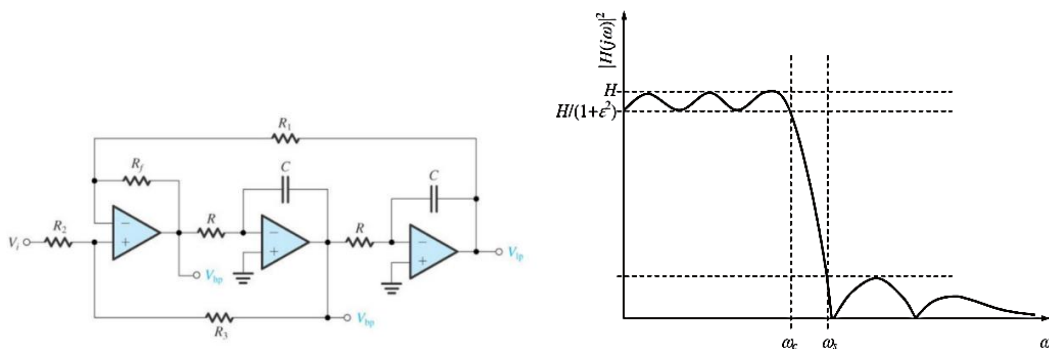
Εικόνα12 Chebyshev filter



4.3. Ελλειπτικά ή Cauer

Το ελλειπτικό φίλτρο είναι ένα πιο περίπλοκο φίλτρο, συγκριτικά με το Chebyshev, το οποίο παρουσιάστηκε παραπάνω. Περιλαμβάνει κυματισμό στη ζώνη διέλευσης και σοβαρή ανατροπή με κόστος κυματισμού στη ζώνη διακοπής. Διαθέτει τη δυνατότητα απενεργοποίησης κάθε φίλτρου στην περιοχή μετατροπής, έχοντας δύο περιοχές ζώνης διακοπής και δυο ζώνης διέλευσης. Το εν λόγω φίλτρο σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει υψηλή προσοχή συγκεκριμένων συχνοτήτων στη ζώνη διακοπής, γεγονός που μειώνει την εξασθένιση περαιτέρω συχνοτήτων στη ζώνη διακοπής (Liao, C. K., Chi, P. L., & Chang, C. Y. 2007). Ανάλογο παράδειγμα αυτού του τύπου φίλτρου μπορούμε να δούμε παρακάτω στην εικόνα13.

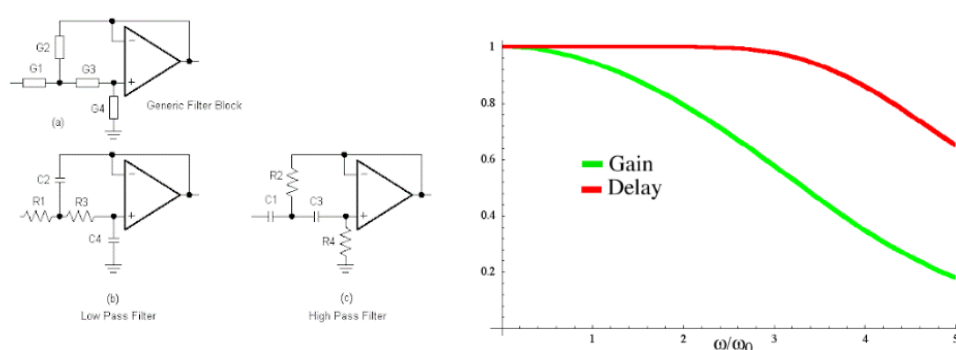
Εικόνα 13: Cauer Filter



4.4. Bessel

Το φίλτρο Bessel δίδει τη δυνατότητα μίας υψηλού επιπέδου γραμμικής απόκρισης ως προς την αλλαγή φάσης. Οι εφαρμογές αυτού του φίλτρου επιλέγονται στα σημεία, όπου το χαρακτηριστικό της αλλαγής φάσης είναι σημαντικό, παρόλο που τα χαρακτηριστικά της αποκοπής του δεν είναι πολύ καλά. Τα φίλτρα Bessel χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα crossover ήχου. (Bessell, M., Bloxham, G., Schmidt, B., Keller, S., Tisserand, P., & Francis, P. 2011)

Εικόνα 14: Bessel Filter



4.5. Φίλτρα άλλων τύπων

Πέραν των φίλτρων που προαναφέρθηκαν, καταγράφονται ακόμα πολλοί τύποι ενεργών φίλτρων, που όμως βρίσκονται στο αρχικό στάδιο, λόγω της μικρής χωρητικότητάς τους. Προς το παρόν πολλοί μηχανικοί τα σχεδιάζουν με μεγάλες δυνατότητες. Μακροπρόθεσμα, η αποτελεσματικότητα με μη γραμμικό φορτίο θα πείσει τους καταναλωτές να χρησιμοποιούν αυτά τα φίλτρα για τη διατήρηση αλλά και την ποιότητα της ισχύος σε αποδοτικό επίπεδο. Η διαμόρφωση τεράστιου αριθμού ενεργών φίλτρων θα είναι διαθέσιμη για την απόδοση υψηλής ισχύος, αρμονικού ρεύματος και μη ισορροπημένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: CROSSOVER

5.1. Γενικά

Τα crossover ήχου είναι ένας τύπος φίλτρου ηλεκτρονικού κυκλώματος, που χρησιμοποιείται σε μια σειρά εφαρμογών ήχου. Έχουν τη δυνατότητα να διαχωρίζουν ένα ηχητικό σήμα σε δύο ή περισσότερες περιοχές συχνοτήτων, έτσι ώστε τα σήματα να μπορούν να σταλούν στα επιμέρους τμήματα των ηχείων που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικά εύρη συχνοτήτων. Οι διαχωρισμοί αυτοί περιγράφονται συχνά ως «διαδρομές-δρόμοι», οι οποίες υποδεικνύουν, ότι διαχωρίζεται ένα σήμα σε δύο ή τρεις ή και τέσσερις, πολλές φορές, περιοχές συχνοτήτων. Τα crossover χρησιμοποιούνται σε ενισχυτές ισχύος σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και μηχανήματα επαγγελματικού ηχητικού εξοπλισμού.

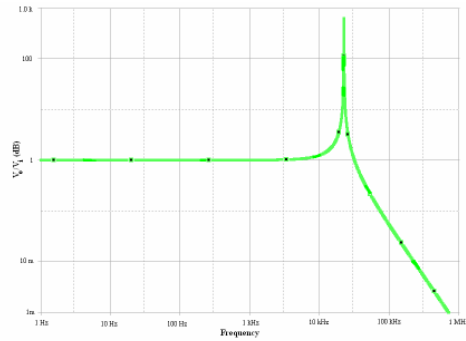
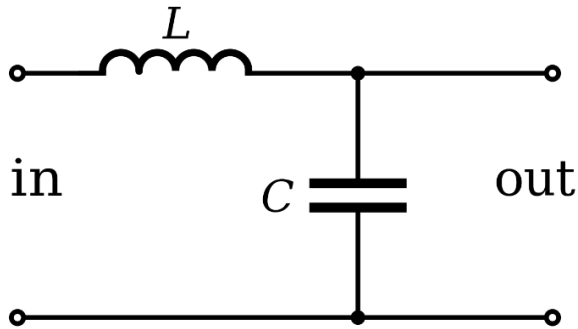
5.2. Παθητικά Crossover

Τα παθητικά crossover είναι ίσως ο πιο κοινός τύπος crossover ήχου. Χρησιμοποιούν ένα δίκτυο παθητικών ηλεκτρικών εξαρτημάτων (π.χ. πυκνωτές, πηνία και αντιστάσεις) για να χωρίσουν ένα ενισχυμένο σήμα που προέρχεται από έναν ενισχυτή ισχύος, ώστε να σταλεί σε δύο ή περισσότερους οδηγούς ηχείων (π.χ. woofer - tweeter, woofer-midrange-tweeter, woofer-low midrange-high midrange - twitter) (Wu, W., He, Y., Tang, T., & Blaabjerg, F. 2012).

5.2.1 Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων 2ου βαθμού LC

Το Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων 2ου βαθμού LC αποτελείται, επίσης, από δύο στοιχεία, γι' αυτό και αναφέρεται και ως φίλτρο χαμηλής διέλευσης LC. Στο φίλτρο αυτό, ένα πηνίο συνδέεται σε σειρά με έναν πυκνωτή. Και πάλι, η τάση εξόδου V_{out} έρχεται παράλληλα με τον πυκνωτή, όπως διακρίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 15).

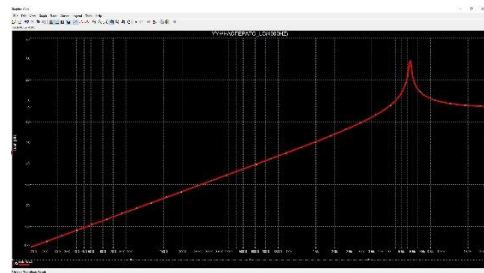
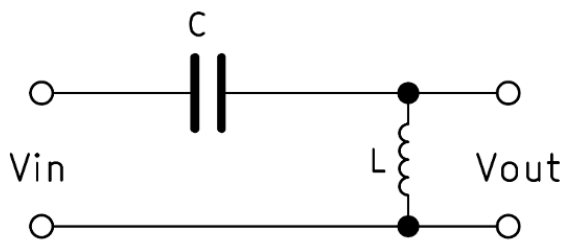
Εικόνα 15: Lowpass LC



5.2.2 Φίλτρο υψηλών συχνοτήτων 2ου βαθμού LC

Υπάρχει πολύ μικρή διαφορά μεταξύ της διαμόρφωσης φίλτρου χαμηλής διέλευσης δεύτερης τάξης και διαμόρφωσης φίλτρου υψηλής διέλευσης δεύτερης τάξης. Η διαφορά αυτή έγκειται στο ότι αλλάζει η θέση των πηνίων και των πυκνωτών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 16).

Εικόνα 16: Highpass LC

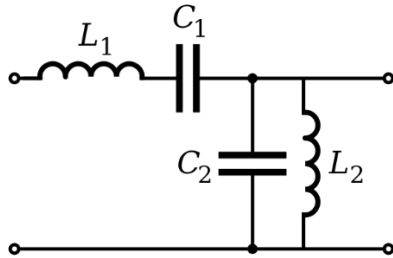


5.2.3 Φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων 2ου βαθμού LC

Ο συντελεστής Q ή ποιότητας ενός φίλτρου περιγράφει την επιλεκτικότητα του κυκλώματος. Για ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης 2ης τάξης καθορίζεται το εύρος ζώνης στην κεντρική συχνότητα, $Q = \text{Bandwidth} / f_c$. Όσο υψηλότερο είναι τόσο πιο

επιλεκτικό είναι το φίλτρο. Η κεντρική συχνότητα ενός παθητικού φίλτρου είναι συντονισμένη, με αποτέλεσμα να συντονίζεται και ο παράγοντας Q . Τα παθητικά φίλτρα περιέχουν μόνο πηνία και πυκνωτές και έτσι εξασθενούν ένα σήμα (Εικόνα 17).

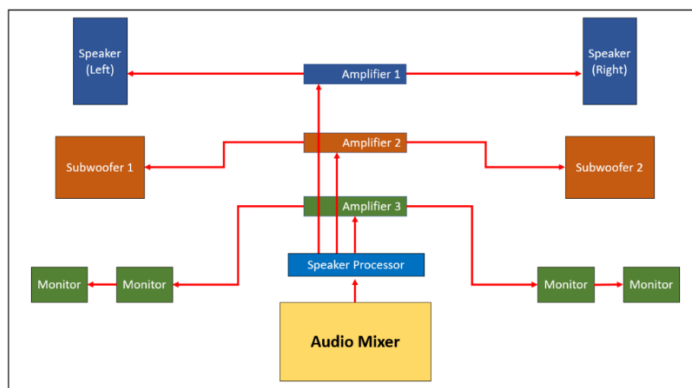
Εικόνα 17: Bandpass LC



5.3. Ενεργά Crossover

Τα ενεργά crossover διαφέρουν από τα παθητικά crossover στο ότι διαχωρίζουν ένα ηχητικό σήμα πριν από το στάδιο ενίσχυσης ισχύος, έτσι ώστε να μπορεί να σταλεί σε δύο ή περισσότερους ενισχυτές ισχύος, καθένας από τους οποίους είναι συνδεδεμένος με ξεχωριστό πρόγραμμα οδήγησης μεγάφωνου. Τα συστήματα ήχου surround χρησιμοποιούν ένα crossover που διαχωρίζει το σήμα πολύ χαμηλής συχνότητας, έτσι ώστε να μπορεί να σταλεί σε ένα subwoofer και στη συνέχεια, να στέλνει τις υπόλοιπες συχνότητες χαμηλής, μέσης και υψηλής εμβέλειας σε πέντε ηχεία που είναι τοποθετημένα γύρω από τον ακροατή (σύστημα 5.1, 1 subwoofer 5 δορυφόροι). Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα συστήματα ήχου που λειτουργούν με ενεργά crossover στην ροή του σήματος τους, όπως είναι τα επαγγελματικά συστήματα ήχου σε συναυλίες (Εικόνα 18).

Εικόνα 18: Ροή σήματος σε ηχητικό σύστημα συναυλίας



5.3.1 φίλτρα SALLEN-KEY

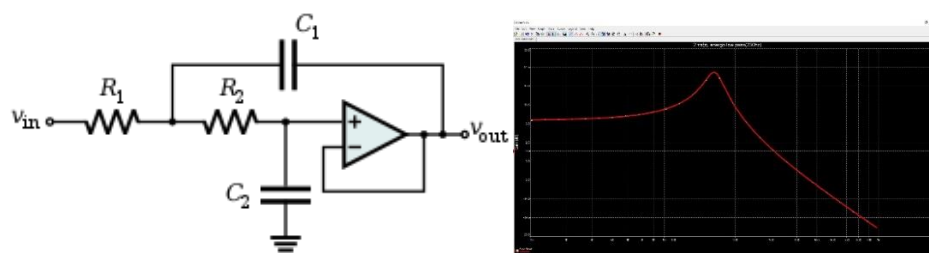
Ο σχεδιασμός Sallen and Key Filter είναι μια ενεργή τοπολογία φίλτρου δεύτερης τάξης, την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως βασικό στοιχείο για την εφαρμογή κυκλωμάτων φίλτρου υψηλότερης τάξης, όπως για παράδειγμα χαμηλής διέλευσης (LPF), υψηλής διέλευσης (HPF) και ζώνης (BPF).

Τα φίλτρα Sallen-Key 2ης τάξης είναι γνωστά και ως φίλτρα θετικής ανάδρασης, καθώς η έξοδος τροφοδοτεί ξανά το θετικό τερματικό του op-amp. Αυτός ο τύπος ενεργού σχεδιασμού φίλτρου είναι δημοφιλής, επειδή απαιτεί μόνο ένα op-amp, καθιστώντας το φίλτρο με αυτό τον τρόπο σχετικά οικονομικό. Ο σχεδιασμός φίλτρου Sallen-Key είναι ένας από τους πιο γνωστούς σχεδιασμούς φίλτρων 2ης τάξης, που απαιτούν μόνο έναν ενισχυτή λειτουργίας για τον έλεγχο κέρδους, αλλά και παθητικά εξαρτήματα RC για την ολοκλήρωση του συντονισμού.

5.3.2 Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων 2^{ου} βαθμού (LPF)

Τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης (LPF) 2ης τάξης είναι εύκολο να σχεδιαστούν και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Η βασική διαμόρφωση για φίλτρο χαμηλής διέλευσης Sallen-Key 2ης τάξης δίνεται ως (Εικόνα 19):

Εικόνα 19: Lowpass filter Sallen-Key 2^{ου} βαθμού



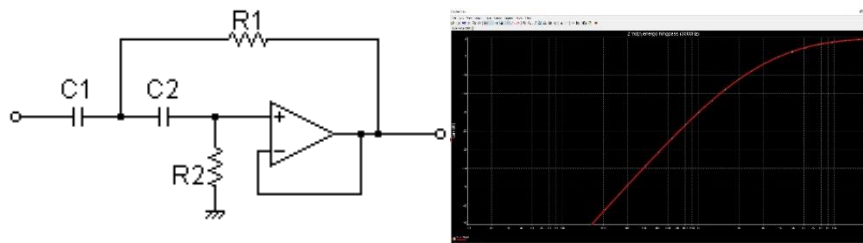
Αυτό το κύκλωμα φίλτρου χαμηλής διέλευσης 2ης τάξης έχει δύο δίκτυα RC, $R_1 - C_1$ και $R_2 - C_2$ που δίνουν στο φίλτρο τις ιδιότητες απόκρισης συχνότητας. Ο σχεδιασμός του φίλτρου βασίζεται σε μια μη αναστρέψιμη διαμόρφωση op-amp, έτσι ώστε τα φίλτρα να κερδίζουν και το A θα είναι πάντα μεγαλύτερο από το 1. Ακόμη, το op-amp

έχει υψηλή αντίσταση εισόδου, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να εναλλάσσεται με άλλα ενεργά κυκλώματα φίλτρου για να δώσει πιο περίπλοκα σχέδια φίλτρων.

5.3.3 Φίλτρο ψηλών συχνοτήτων 2^{ου} βαθμού (HPF)

Αντίστοιχα με τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης (LPF) 2ης τάξης, υπάρχουν και τα φίλτρα υψηλής διέλευσης (HPF) 2ης τάξης. Η βασική διαμόρφωση για φίλτρο υψηλής διέλευσης Sallen-Key 2ης τάξης δίνεται ως (Εικόνα 20):

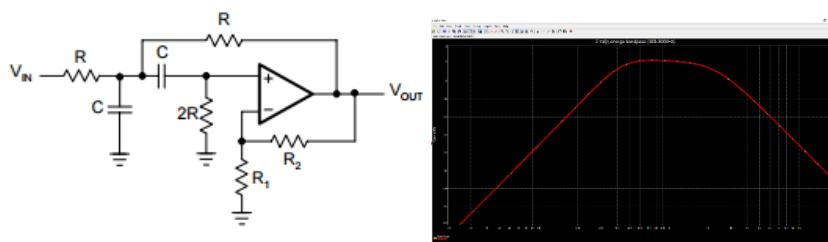
Εικόνα 20: Highpass filter Sallen-Key 2^{ου} βαθμού



5.3.4 Φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων 2^{ου} βαθμού (BPF)

Το Sallen-key είναι σχεδιασμός φίλτρου 2ης τάξης που μπορεί να τοποθετηθεί σε σειρά με άλλα παρόμοια φίλτρα για τη δημιουργία φίλτρων συγκεκριμένου εύρους. Τα πολλαπλά στάδια φίλτρου δεν χρειάζεται να είναι τα ίδια, αλλά το καθένα μπορεί να έχει διαφορετική συχνότητα αποκοπής ή χαρακτηριστικά κέρδους. Για παράδειγμα, συνδυάζοντας ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης και ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης Sallen-Key (Εικόνα 21).

Εικόνα 21: Bandpass filter Sallen-Key 2^{ου} βαθμού



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ CROSSOVER(multiSim)

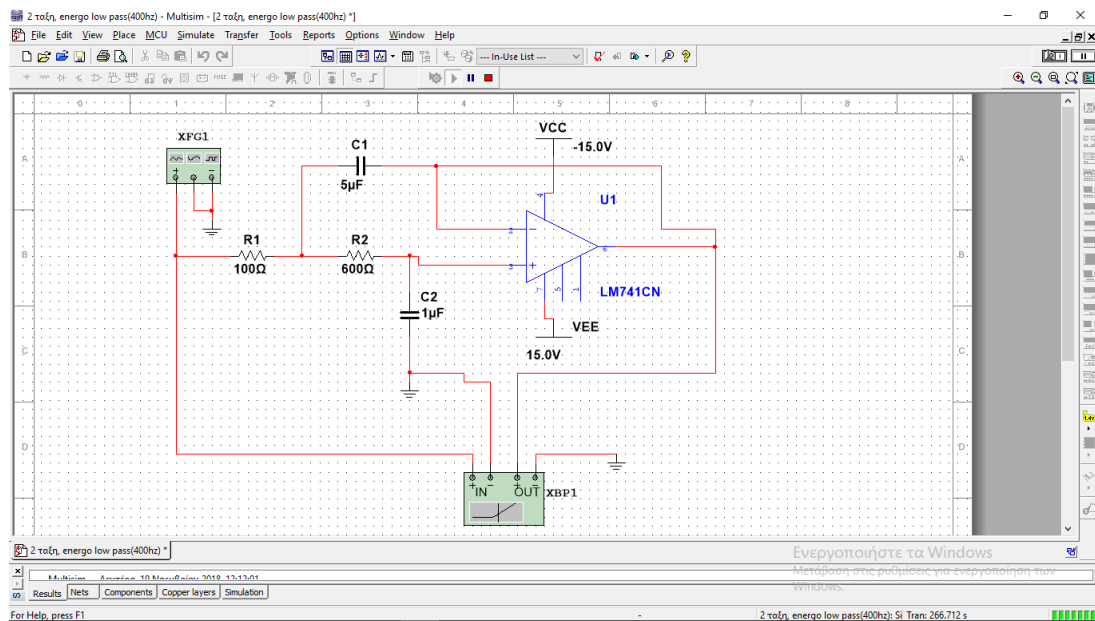
6.1 Προσομοίωση στο πρόγραμμα MultiSim

Το πρόγραμμα MultiSim είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων. Δίνει την δυνατότητα σχεδίασης διάφορων κυκλωμάτων πριν την τελική τους ολοκλήρωση, αποφεύγοντας πιθανά λάθη κατά την ολοκλήρωση κατασκευής τους. Σε αυτό έχεις την δυνατότητα να κάνεις τις μετρήσεις που θα έκανες στο κύκλωμα σου, όπως σε ένα κανονικό εργαστήριο. Το MultiSim είναι ένα από τα λίγα προγράμματα που βασίζεται στο πρώτο πρόγραμμα σχεδίασης το Berkeley SPICE. Επίσης, ανήκει στην National Instruments (NI). Περιλαμβάνει διάφορες σουίτες σχεδίασης κυκλωμάτων (NI UltiBoard, Printed Circuit Board, NI LabVIEW), καθώς και ένα μεγάλο αριθμό εργαλείων και βιβλιοθηκών που χρειάζεται ο χρήστης για να πραγματοποιήσει την προσομοίωση.

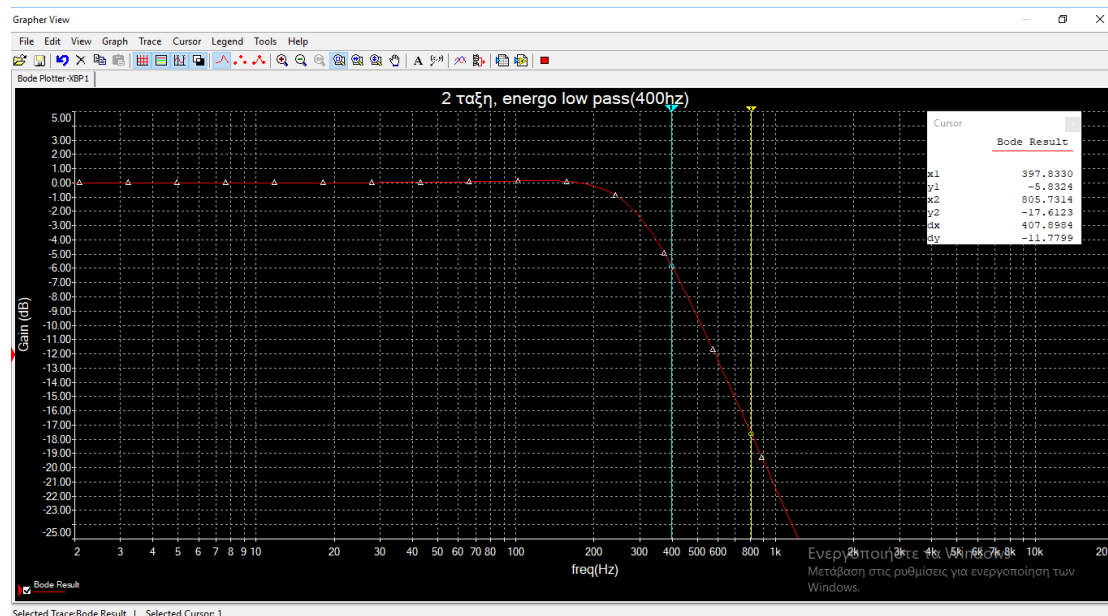
6.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων (Προσομοίωση ενεργού Crossover 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων (κύκλωμα Sallenkey))

Σε αυτή την εργασία θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα ενεργό κύκλωμα crossover, για την δρομολόγηση σήματος σε ένα σύστημα ηχείων με τρεις συχνοτικές αποκρίσεις, για τρεις διαφορετικούς τύπους μεγάφωνων (low woofers, mid-range woofers, tweeters). Επιλέχθηκε η κατασκευή κυκλώματος αποτελούμενο από φίλτρα sallen-key 2^{ης} τάξης, λόγω των αποτελεσμάτων που μας δίνουν στις καμπύλες απόκρισης. Προσπαθήσαμε μέσα από τις προσομοιώσεις να επιτύχουμε, όσον τον δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα στα cross point σημεία μεταξύ των κυκλωμάτων, ώστε να έχουμε όσο τον δυνατόν καλύτερο ηχητικό αποτέλεσμα κατά την λειτουργία του cross over.

Lowpass κύκλωμα



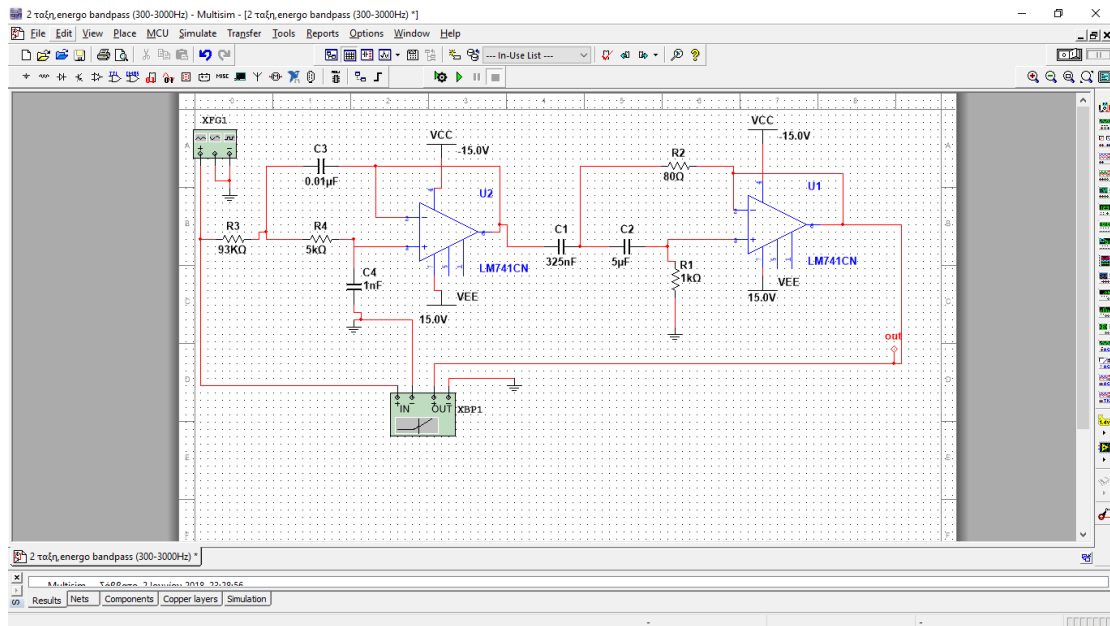
Εικόνα 23: Κύκλωμα lowpass ενεργού crossover (Sallenkey)



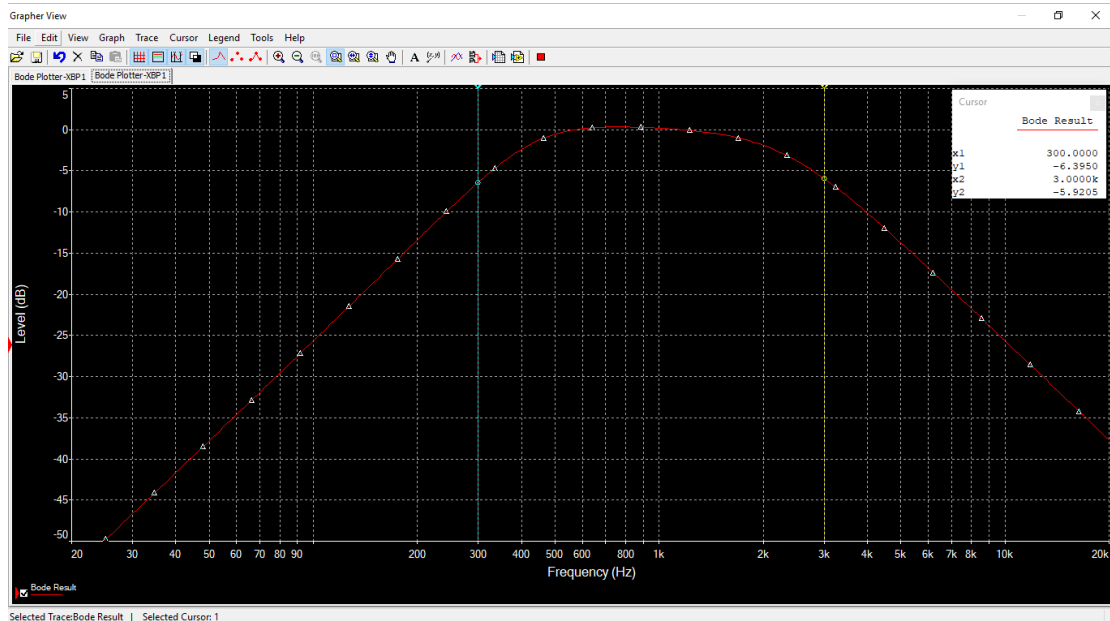
Εικόνα 24: Γραφική παράσταση κυκλώματος Lowpass

Το παραπάνω κύκλωμα είναι κύκλωμα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Lowpass) και έχει συχνότητα αποκοπής $F_c = 400 \text{ Hz}$. Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση, διακρίνουμε ότι ο ρυθμός αποκοπής είναι 12dB/οκτάβα άρα το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

Bandpass κύκλωμα



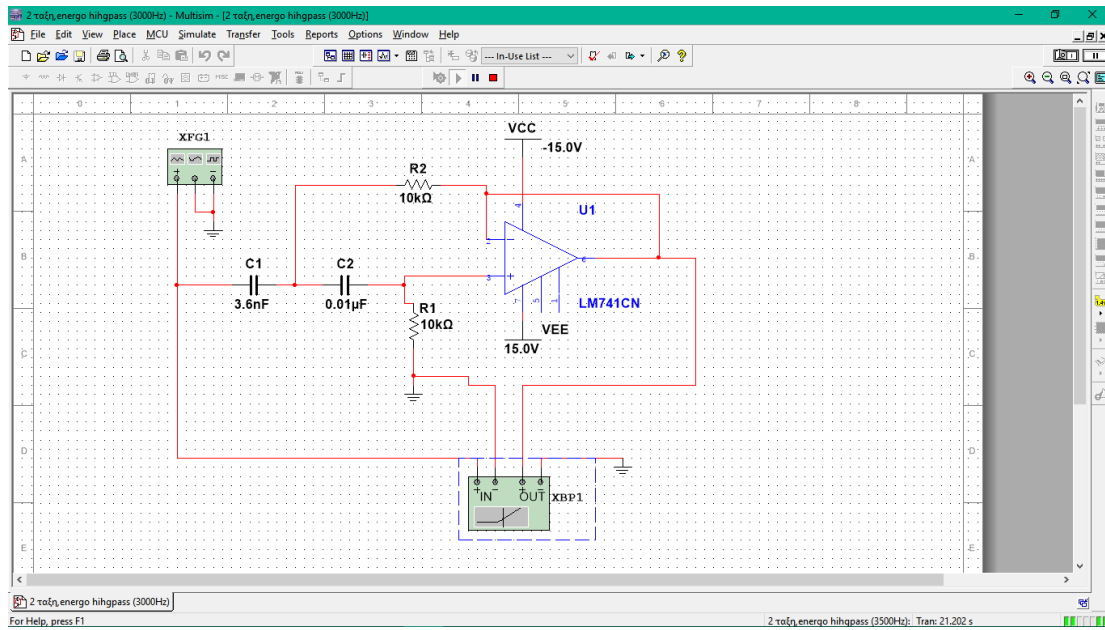
Εικόνα 25: Κύκλωμα bandpass ενεργού crossover (Sallenkey)



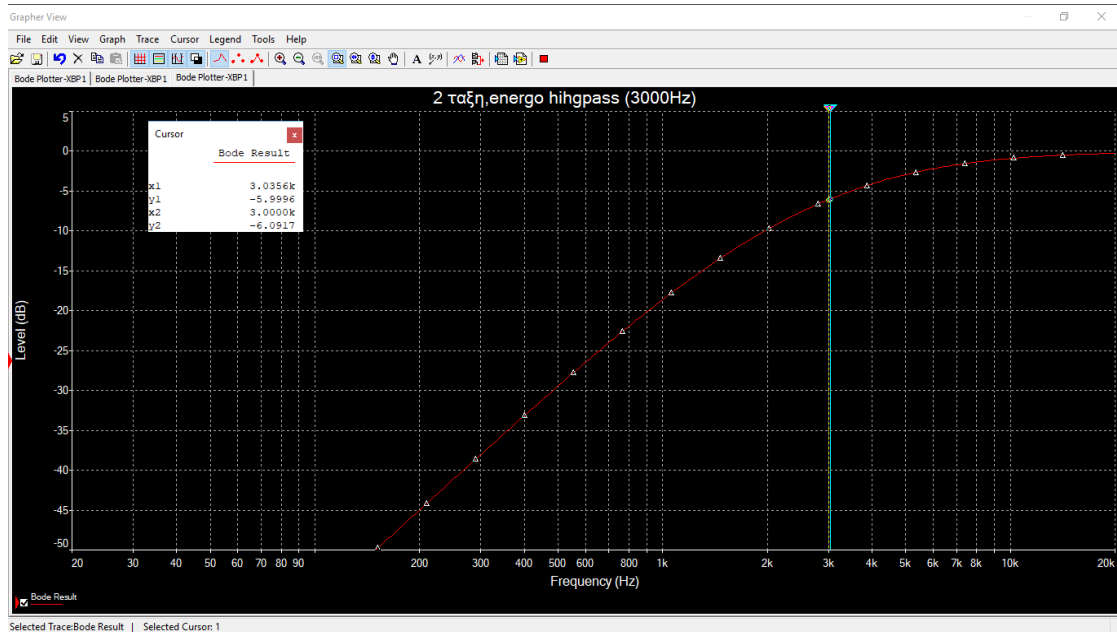
Εικόνα 26: Γραφική παράσταση κυκλώματος Bandpass

Το παραπάνω κύκλωμα είναι κύκλωμα διέλευσης ζώνης συχνοτήτων (Bandpass) και έχει συχνότητες αποκοπής $F_{CLow} = 300 \text{ Hz}$ και $F_{CHigh} = 3000 \text{ Hz}$. Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση, βλέπουμε ότι ο ρυθμός αποκοπής είναι 12dB/οκτάβα άρα το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

Highpass κύκλωμα



Εικόνα 27: Κύκλωμα Highpass ενεργού crossover (hallenkey)



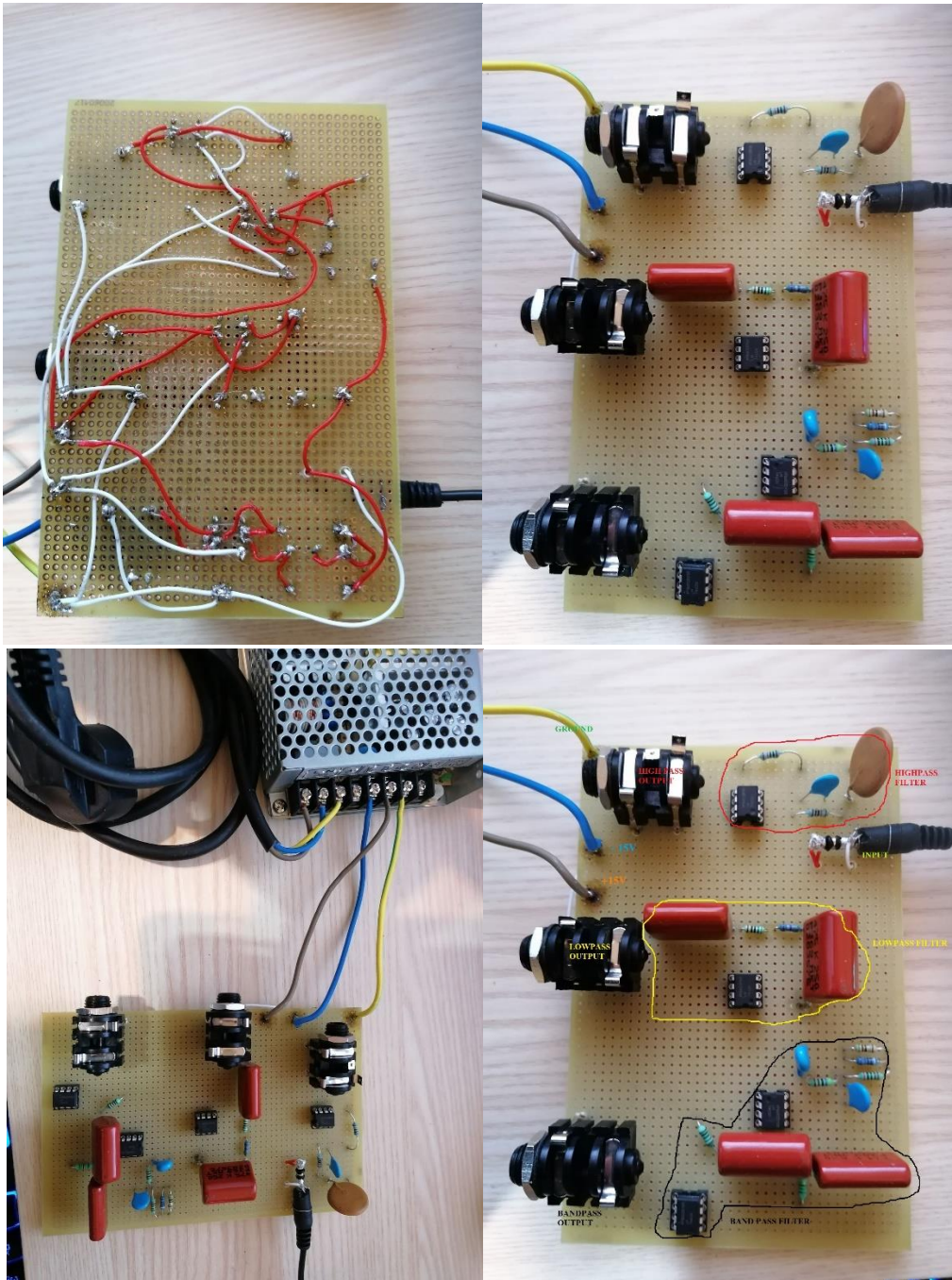
Εικόνα 28:Γραφική παράσταση κυκλώματος Highpass

Το παραπάνω κύκλωμα είναι κύκλωμα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (Highpass) και έχει συχνότητα αποκοπής $F_c = 3000 \text{ Hz}$. Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση, βλέπουμε ότι ο ρυθμός αποκοπής είναι 12dB/οκτάβα άρα το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CROSSOVER , ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Κατασκευή crossover

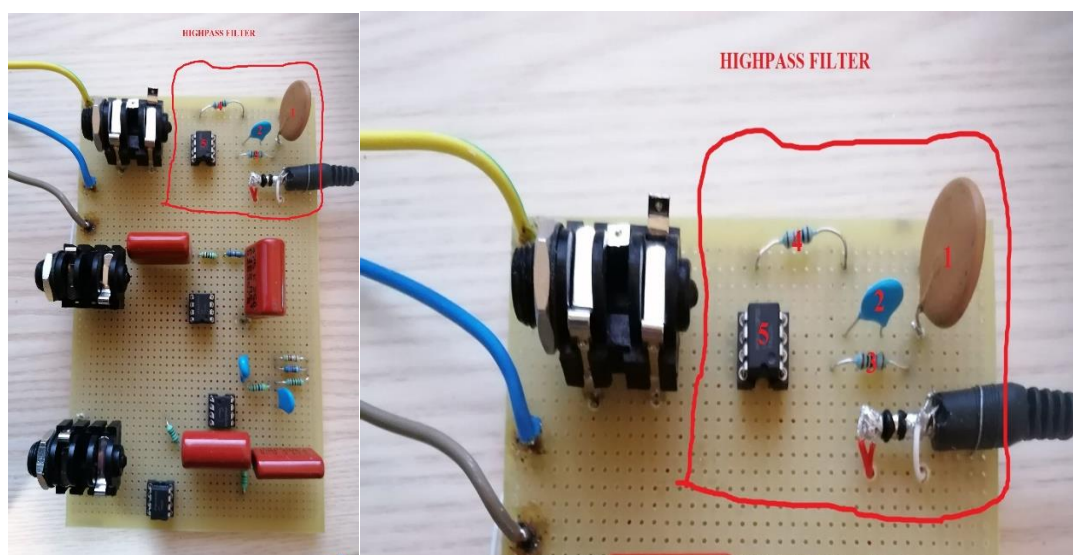
Αρχικά, κατασκευάσαμε ένα ενεργό crossover 2ης τάξης 3ων δρόμων .



Εικόνα 29:Κύκλωμα crossover 2ης τάξης 3ων δρόμων.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του crossover είναι οι κοντινότερες δυνατές τιμές που βρέθηκαν στο εμπόριο, ως προς τις τιμές των στοιχείων στις προσομοιώσεις. Χρησιμοποιήθηκε διάτρητη πλακέτα ηλεκτρονικών κατασκευών. Στην είσοδο των κυκλωμάτων τοποθετήθηκε καλώδιο minijack σαν κοινή είσοδο για την καλύτερη εξυπηρέτηση στην συνδεσμολογία κατά την διαδικασία μετρήσεων. Στην έξοδο κάθε κυκλώματος τοποθετήθηκε θηλυκό βύσμα μονοφωνικού καρφιού, για τη διευκόλυνση της συνδεσμολογίας κατά την διαδικασία των μετρήσεων. Το κύκλωμα τροφοδοσίας που χρειάζεται το ενεργό crossover αγοράστηκε. Η τάση λειτουργίας του τροφοδοτικού στην έξοδό του είναι $\pm 15\text{Volt}$.

Highpass filter



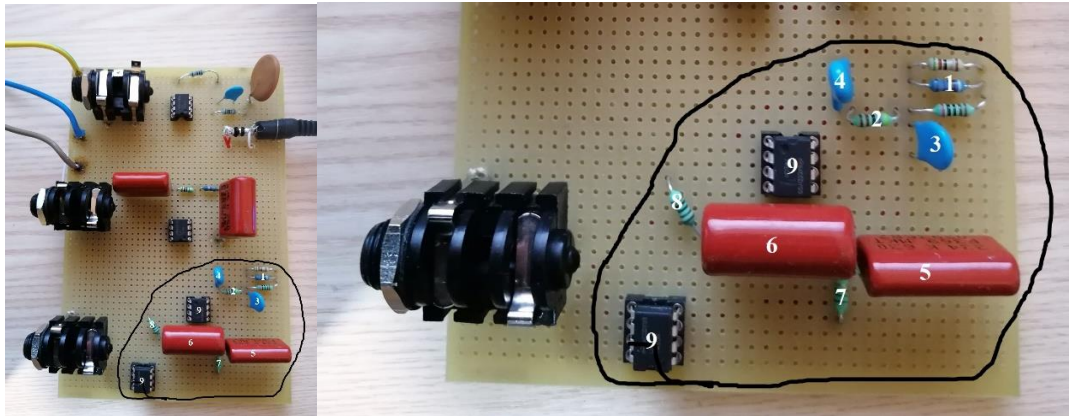
Εικόνα 30: High pass filter ανάλυση στοιχείων

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του high pass κυκλώματος είναι τα εξής (Εικόνα 30):

1. Πυκνωτής χωρητικότητας $3,9\text{nF}$
2. Πυκνωτής χωρητικότητας 11nF
3. Ωμική αντίσταση $10\text{k}\Omega$
4. Ωμική αντίσταση $10\text{k}\Omega$
5. Ολοκληρωμένο LM741CN, βάση ολοκληρωμένου

Η τοποθέτησή τους έγινε με βάση την προσομοίωση (Εικόνα 27).

BandPass filter



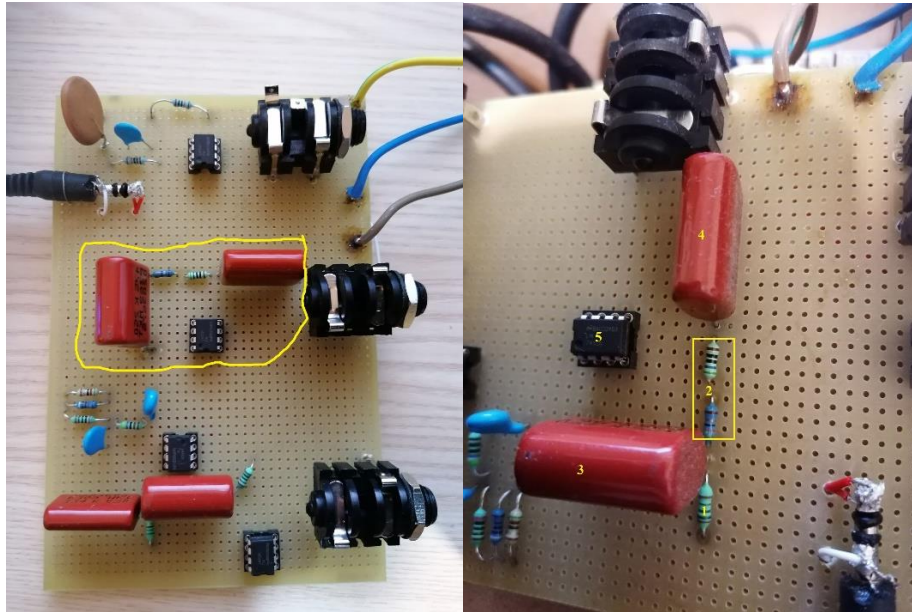
Εικόνα 31: Bandpass Filter ανάλυση στοιχείων

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του high pass κυκλώματος είναι τα εξής (Εικόνα 31):

1. Ωμική αντίσταση 92,6 k Ω
2. Ωμική αντίσταση 4,7 k Ω
3. Πυκνωτής χωρητικότητας 11 nF
4. Πυκνωτής χωρητικότητας 1 nF
5. Πυκνωτής χωρητικότητας 330 nF
6. Πυκνωτής χωρητικότητας 5 μ F
7. Ωμική αντίσταση 80 Ω
8. Ωμική αντίσταση 1 k Ω
9. Ολοκληρωμένο LM741CN, βάση ολοκληρωμένου

Η τοποθέτησή τους έγινε με βάση την προσομοίωση (Εικόνα 25).

Low pass Filter



Εικόνα 32: Low pass filter ανάλυση στοιχείων

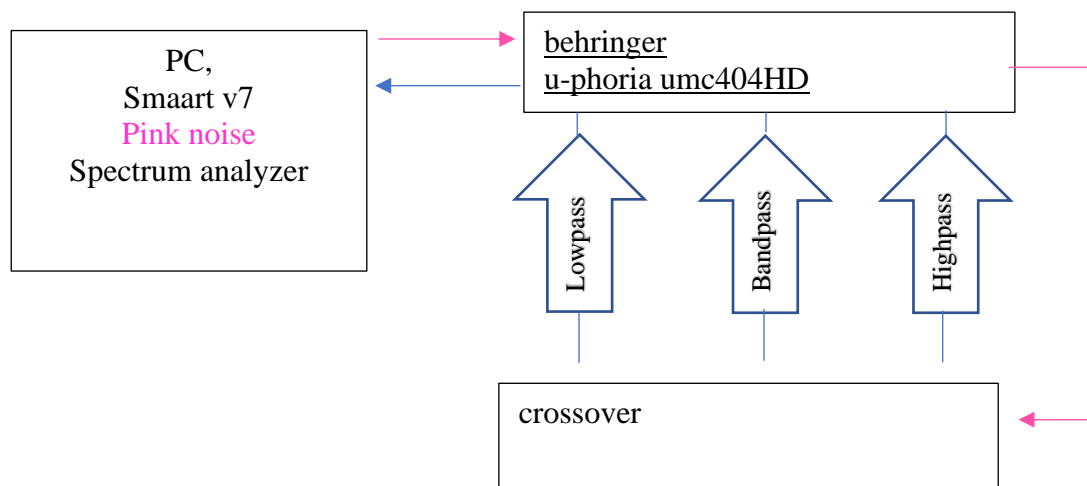
Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του high pass κυκλώματος είναι τα εξής (Εικόνα 32):

1. Ωμική αντίσταση 100 Ω
2. Ωμική αντίσταση 550 Ω
3. Πυκνωτής χωρητικότητας 4,7 μF
4. Πυκνωτής χωρητικότητας 1 μF
5. Ολοκληρωμένο LM741CN, βάση ολοκληρωμένου

Η τοποθέτηση τους έγινε με βάση την προσομοίωση (Εικόνα 23).

7.2 Μετρήσεις crossover και αποτελέσματα μετρήσεων

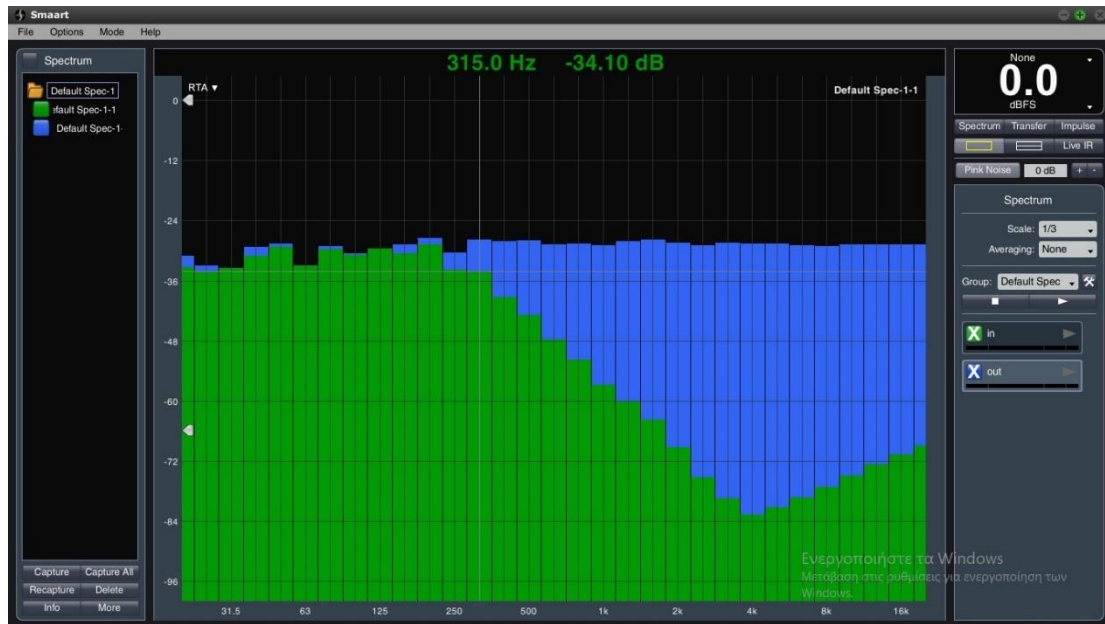
Παρακάτω δίνετε το διάγραμμα ροής του σήματος κατά την διαδικασία των μετρήσεων του κυκλώματος crossover.



Για την μέτρηση του crossover χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μέτρησης συχνοτικής απόκρισης Smaart v7 της εταιρείας Rational Acoustics και η κάρτα ήχου behringer u-phoria umc404HD και για πηγή της μέτρησης ηχητικό σήμα pink noise.

Η συνδεσμολογία κατά τη διαδικασία των μετρήσεων περιγράφεται ως εξής: Συνδέουμε τον υπολογιστή με την κάρτα ήχου, από την έξοδο της κάρτας ήχου το σήμα συνδέεται στην είσοδο του crossover. Οι τρεις έξοδοι του crossover συνδέονται σε τρεις εισόδους της κάρτας ήχου, ενώ κάθε έξοδος αντιστοιχεί σε μία είσοδο (άρα και σε ένα κανάλι, επομένως και σε μία ξεχωριστή συχνοτική ανάλυση). Επίσης από δεύτερη πανομοιότυπη έξοδο της κάρτας ήχου το σήμα συνδέεται σε μία τέταρτη είσοδο της κάρτας ήχου. Με αυτόν τον τρόπο σύνδεσης έχουμε την δυνατότητα να αναλύσουμε ταυτόχρονα και τα τρία φίλτρα του crossover σε σύγκριση με το σήμα πηγής (pink noise). Καθώς η συγκεκριμένη κάρτα ήχου μας δίνει την δυνατότητα λειτουργίας 4 εισόδων μπορούμε να αναλύσουμε τα σήματα από τα φίλτρα ταυτόχρονα, κάτι το οποίο εξαρτάται από την επιλογή της κάρτας ήχου (input) και την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή που πραγματοποιούμε την μέτρηση. Εμείς πραγματοποιήσαμε ξεχωριστή ανάλυση για το κάθε φίλτρο λόγω έλλειψης επεξεργαστικής ισχύς. Επίσης σημαντικό κατά την διαδικασία των μετρήσεων είναι ότι πρέπει να έχουμε ρυθμίσει σωστά τις στάθμες των εισόδων της κάρτας ήχου.

Low pass



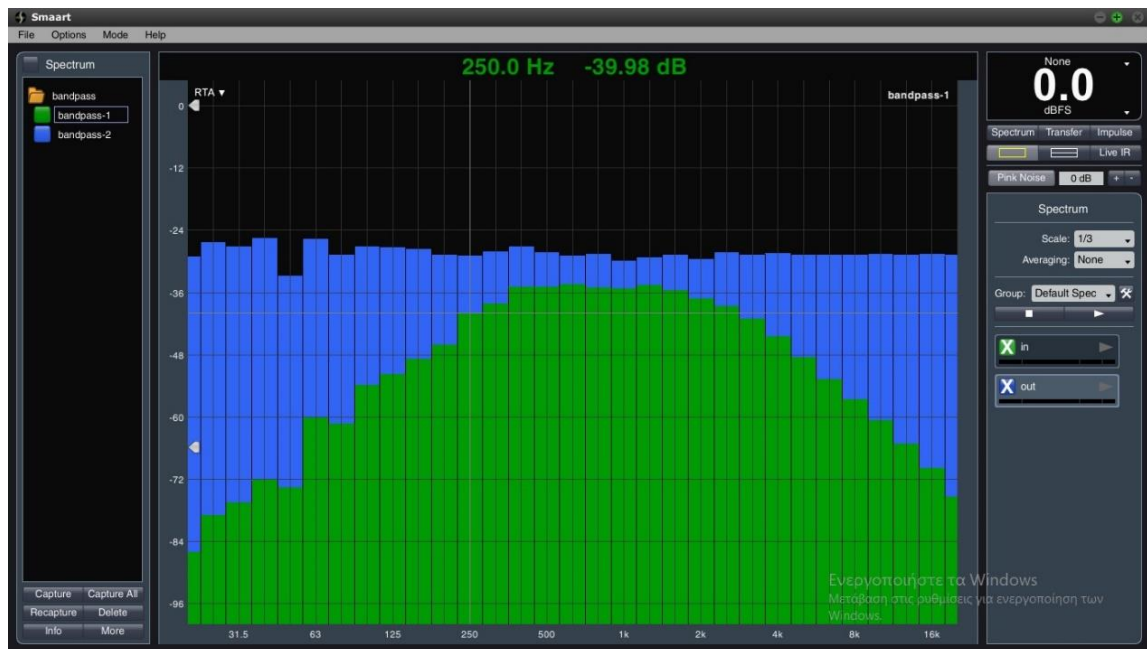
Μέτρηση Lowpass filter στο πρόγραμμα Smaart v7

Από την μέτρηση βλέπουμε πως η συχνοτική αποκοπή του φίλτρου είναι στα 315 Hz, ενώ από τις τιμές της μέτρησης αποδεικνύεται ότι το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

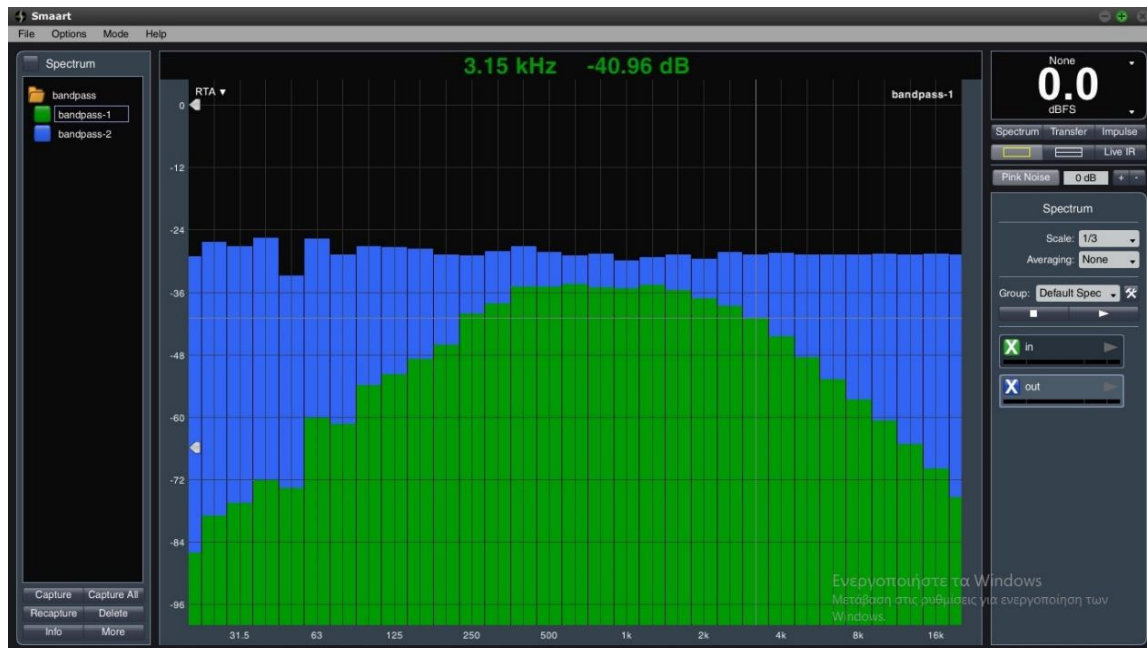
f(Hz)	in(dB)	out(dB)
25	-28	-28
31,5	-28	-28
40	-28	-28
50	-28	-28
63	-28	-28
80	-28	-28
100	-28	-28
125	-28	-28
160	-28	-28
200	-28	-28,5
250	-28	-33,75
315	-28	-34,1
400	-28	-39,2
500	-28	-42,85
630	-28	-47,6
800	-28	-51,7
1000	-28	-56,7
1250	-28	-60
1600	-28	-63,8
2000	-28	-69,2
2500	-28	-75,25
3150	-28	-79,4
4000	-28	-82,7

5000	-28	-81,2
6300	-28	-79,3
8000	-28	-77,2
10000	-28	-74,8
12500	-28	-72,65
16000	-28	-70,75
20000	-28	-69

Bandpass



Μέτρηση Bandpass filter στο πρόγραμμα Smaart v7(συχνοτική αποκοπή 250Hz)

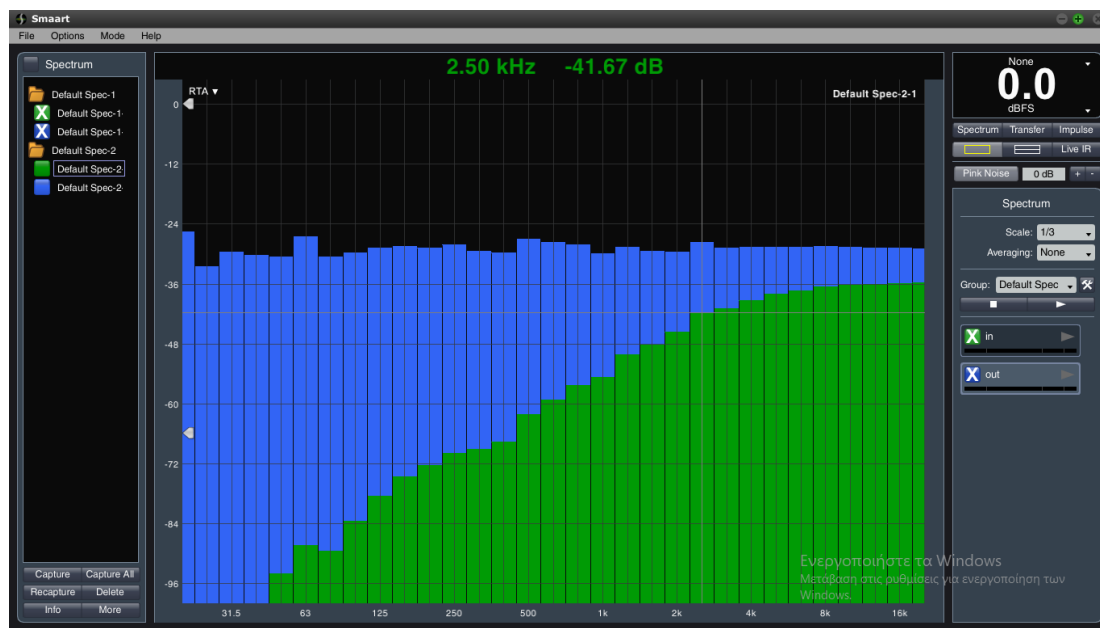


Μέτρηση Bandpass filter στο πρόγραμμα Smaart v7(συχνοτική αποκοπή 3150Hz)

Από την μέτρηση βλέπουμε πως η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι στα 250 Hz και στα 3150 Hz, ενώ από τις τιμές της μέτρησης αποδεικνύεται ότι το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

f(Hz)	in (dB)	out(dB)
25	-28	-79
31,5	-28	-76,6
40	-28	-72,2
50	-28	-73,6
63	-28	-60,2
80	-28	-61,35
100	-28	-53,85
125	-28	-51,7
160	-28	-48,8
200	-28	-46,05
250	-28	-40
315	-28	-38,1
400	-28	-35
500	-28	-35
630	-28	-35
800	-28	-35
1000	-28	-35
1250	-28	-35
1600	-28	-35,5
2000	-28	-37,15
2500	-28	-38,65
3150	-28	-41
4000	-28	-44,4
5000	-28	-48,5
6300	-28	-52,6
8000	-28	-56,6
10000	-28	-60,6
12500	-28	-65,1
16000	-28	-69,9
20000	-28	-75,4

High pass



Μέτρηση highpass filter στο πρόγραμμα Smaart v7(συχνότητα αποκοπή 2500Hz)

Από την μέτρηση βλέπουμε πως η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι στα 2500 Hz, ενώ από τις τιμές της μέτρησης αποδεικνύεται ότι το φίλτρο είναι 2^{ης} τάξης.

f(Hz)	in (dB)	out(dB)
25	-28	-103
31,5	-28	-103
40	-28	-102
50	-28	-94
63	-28	-88,41
80	-28	-89,5
100	-28	-83,4
125	-28	-78,5
160	-28	-74,56
200	-28	-72,24
250	-28	-69,86
315	-28	-69,1
400	-28	-67,64
500	-28	-62,03
630	-28	-59,21
800	-28	-56,18
1000	-28	-54,58
1250	-28	-50,15

1600	-28	-48,12
2000	-28	-45,6
2500	-28	-41,65
3150	-28	-40,9
4000	-28	-39,26
5000	-28	-37,97
6300	-28	-37,28
8000	-28	-36,44
10000	-28	-36,11
12500	-28	-36
16000	-28	-35,78
20000	-28	-35,75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάλυση φίλτρων συχνοτήτων και η δημιουργία της προσομοίωσης και της αντίστοιχης κατασκευής ενός ενεργού φίλτρου συχνοτήτων (crossover) 2^{ης} τάξης 3^{ων} δρόμων. Έπειτα από την καταγραφή των μετρήσεων προέκυψαν κάποια συμπεράσματα, τα οποία θα αναδυθούν στο παρόν κεφάλαιο.

Αρχικά, παρατηρώντας την προσομοίωση του κυκλώματος και τις τιμές μέτρησής του, διαπιστώνουμε πως έχουμε αρκετές διαφορές όσον αφορά τη συχνοτική απόκριση του crossover. Επίσης, παρατηρούμε πως η τάση εξόδου στο bandpass φίλτρο και στο highpass φίλτρο, στις συχνοτικές περιοχές που επιτρέπεται η διέλευση, είναι μικρότερη συγκριτικά με την τάση εισόδου. Αυτές οι διαφορές οφείλονται σε αστοχίες κατασκευής, καθώς οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές που υπάρχουν στο εμπόριο δεν αντιστοιχούν στα αντίστοιχα υλικά που χρειαζόμαστε με βάση τις προσομοιώσεις. Επομένως, ήταν αναμενόμενο η κατασκευή που πραγματοποιήθηκε να βασιστεί στην αναζήτηση των απαιτούμενων υλικών στην πλησιέστερη τιμή, με βάση τις τιμές των προσομοιώσεων.

Μετά το πέρας της εργασίας, συναγάγαμε το συμπέρασμα ότι η δημιουργία ενός ενεργού cross over είναι αρκετά συμφέρουσα συγκριτικά με την αντίστοιχη δημιουργία ενός παθητικού cross over, όσον αφορά τον χρόνο και τον κόπο του κατασκευαστή, καθώς και την χρήση του. Πιο συγκεκριμένα, κάτι τέτοιο οφείλεται στο ότι είναι πιο εύκολη και γρήγορη η εύρεση αυτών των υλικών στην αγορά. Επιπλέον, στα ενεργά cross over τα «ρεύματα» των σημάτων που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρότερα σε ισχύ με εκείνα των παθητικών crossover. Τέλος, η πιο σημαντική διαφορά αφορά την κατασκευή και την χρηστικότητα τους. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι πως τα ενεργά cross over τα χρησιμοποιούμε πριν από τους ενισχυτές ισχύος σε μια συστοιχία ηχείων, κάτι που μας δίνει τη δυνατότητα να προσαρμόζουμε τα μηχανήματα που έχουμε με βάση το αποτέλεσμα που θέλουμε να έχουμε πχ. Dsp audio processor πριν από συστοιχία ηχείων. Από την άλλη τα παθητικά crossover τα χρησιμοποιούμε μετά τους ενισχυτές ισχύος στην ροή σήματος, με αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε ένα παθητικό crossover για κάθε ένα ηχείο χωρίς να δίδεται όμως δυνατότητα επεξεργασίας του σήματος.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ατσάλης, Μ. (2018). *Υλοποίηση χρονοσυχνοτικών μεθόδων ανάλυσης ηχητικών σημάτων με έμφαση στην ισοστάθμιση ακουστικών (Doctoral dissertation)*.

Ali, A. S., Radwan, A. G., & Soliman, A. M. (2013). Fractional order Butterworth filter: active and passive realizations. *IEEE journal on emerging and selected topics in circuits and systems*, 3(3), 346-354.

Bessell, M., Bloxham, G., Schmidt, B., Keller, S., Tisserand, P., & Francis, P. (2011). SkyMapper Filter Set: Design and Fabrication of Large-Scale Optical Filters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(905), 789.

Guenther, F. H., Nieto-Castanon, A., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. (2004). Representation of sound categories in auditory cortical maps. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*.

Karimi-Ghartemani, M., Khajehoddin, S. A., Jain, P. K., Bakhshai, A., & Mojiri, M. (2011). Addressing DC component in PLL and notch filter algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1), 78-86.

Kirkeby, O., & Nelson, P. A. (1999). Digital filter design for inversion problems in sound reproduction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 47(7/8), 583-595.

Λιαπέρδος, Ι. (2015). *Φίλτρα*.

Liao, C. K., Chi, P. L., & Chang, C. Y. (2007). Microstrip realization of generalized Chebyshev filters with box-like coupling schemes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(1), 147-153.

Μουσιιάδης, X. N. (2018). *Σχεδίαση και μελέτη ενεργών φίλτρων (Bachelor's thesis)*.

Minaei, S., & Yuce, E. (2010). Novel voltage-mode all-pass filter based on using DVCCs. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(3), 391-402.

Motta, L., & Faúndes, N. (2016, October). Active/passive harmonic filters: Applications, challenges & trends. In *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, (pp. 657-662). IEEE.

Pactitis, S. A. (2007). *Active filters: theory and design*. CRC Press.

Velazquez, S. R., Nguyen, T. Q., & Broadstone, S. R. (1998). Design of hybrid filter banks for analog/digital conversion. *IEEE transactions on signal processing*, 46(4), 956-967.

Setayesh, A., Mirnaziry, S. R., & Abrishamian, M. S. (2011). Numerical investigation of tunable band-pass\band-stop plasmonic filters with hollow-core circular ring resonator. *Journal of the Optical Society of Korea*, 15(1), 82-89.

Su, K. L. (2012). *Analog filters*. Springer Science & Business Media.

Tsai, M. S., & Wang, K. W. (1999). On the structural damping characteristics of active piezoelectric actuators with passive shunt. *Journal of Sound and Vibration*, 221(1), 1-22.

Wu, W., He, Y., Tang, T., & Blaabjerg, F. (2012). A new design method for the passive damped LCL and LLCL filter-based single-phase grid-tied inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), 4339-4350.