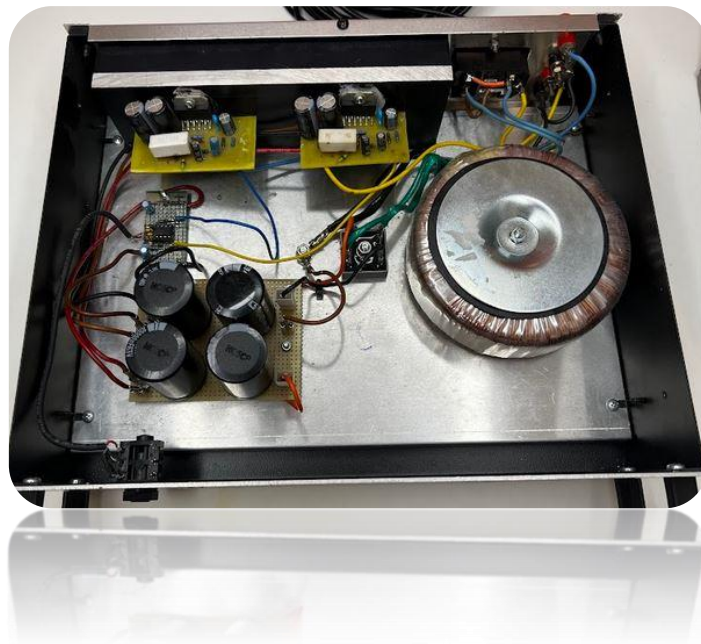


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ολοκληρωμένος Ενισχυτής Ήχου 65W



Του φοιτητή:
Γιαννακόπουλου Σταύρου
Αρ. Μητρώου: 517018

Επιβλέπων
Όνοματεπώνυμο: Βάσσιος
Βασίλειος
Βαθμίδα: Υποψήφιος Διδάκτορας

Ημερομηνία 26/05/2024

Τίτλος Δ.Ε.: Ολοκληρωμένος Ενισχυτής Ήχου 65W

Κωδικός Δ.Ε.: 23239

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Γιαννακόπουλος Σταύρος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Βάσσιος Βασίλειος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 05/09/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 26/5/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γιαννακόπουλου Σταύρου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οποιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Για να καταφέρει ένας άνθρωπος να ακούσει κάποιον ήχο θα πρέπει πρώτα αυτός να βρεθεί στο ακουστικό φάσμα συχνοτήτων. Η αναπαραγωγή επομένως ενός ηχητικού κύματος προϋποθέτει την ενίσχυσή του. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση ενισχυτών ήχου, μέσω των οποίων τα ηχητικά σήματα τροποποιούνται κατάλληλα και μεταδίδονται τελικά από κάποιο μέσο όπως ένα ηχείο. Η σωστή σχεδίαση ενός ενισχυτή απαιτεί τη μελέτη όλων των υποσυστημάτων από τα οποία αποτελείται. Καθώς ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοτείται με την τάση του δικτύου είναι αναγκαίο να μελετηθεί και να σχεδιαστεί και το κύκλωμα τροφοδοσίας του ώστε ο ενισχυτής να είναι λειτουργικός και ασφαλής. Γι' αυτό το λόγο επέλεξα την υλοποίηση ενός ενισχυτή ήχου και με την ολοκλήρωσή του κατάφερα να κατανοήσω τη δομή του μελετώντας και σχεδιάζοντας ταυτόχρονα όλα τα επιμέρους κυκλώματα τα οποία ήταν απαραίτητα.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία σχεδιάζεται και υλοποιείται ένας ολοκληρωμένος ενισχυτής ήχου 65W. Γίνεται η θεωρητική σχεδίαση του ενισχυτή ο οποίος αποτελείται από τρεις διαφορετικές βαθμίδες. Αρχικά, σχεδιάζεται το κύκλωμα τροφοδοσίας του με τέτοιο τρόπο ώστε να τροφοδοτούνται κατάλληλα όλα τα επιμέρους εξαρτήματα. Στη συνέχεια σχεδιάζεται το κύκλωμα του προενισχυτή το οποίο λαμβάνει το εκάστοτε σήμα ήχου στην είσοδό του με σκοπό να το ενισχύσει και να το στείλει στον τελικό ενισχυτή, ενισχυμένο κατά 11 φορές. Το τελευταίο στάδιο σχεδιασμού περιλαμβάνει το κύκλωμα του τελικού ενισχυτή ο οποίος ενισχύει το σήμα 21 φορές και το οδηγεί στην έξοδο του συστήματος όπου συνδέεται ηχείο. Μέσω κατάλληλου λογισμικού γίνεται η προσομοίωση αυτών των κυκλωμάτων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Το τελικό κύκλωμα είναι τοποθετημένο σε μεταλλικό κουτί. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν με τη βοήθεια πολύμετρου και παλμογράφου είναι ικανοποιητικά και πολύ κοντά στα αποτελέσματα της θεωρητικής μελέτης.

Complete audio amplifier 65W

Giannakopoulos Stavros

Abstract

A complete audio amplifier is designed and implemented in this work. The theoretical design of the amplifier consists of three different stages. First, its power supply circuit is designed so all individual components are properly powered. Then there is the preamplifier circuit where the respective audio signal is received and amplified 11 times and send to the final amplifier. The final stage includes the final amplifier circuit which amplifies the signal 21 times and leads to the output of the system where a stereo speaker is connected. These circuits are simulated using suitable software and the results are presented. The final circuit is placed in a metal box. The measurements made by a multimeter and an oscilloscope are satisfactory and very close to the results of the theoretical study.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract	5
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων.....	10
Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 1ο: Ήχος	12
1.1 Ηχητικά κύματα	12
1.2 Παραγωγή ηχητικών κυμάτων	12
1.3 Αντίληψη του ήχου.....	13
1.4 Σύστημα ήχου.....	14
1.5 Ηχεία	15
1.6 Καλώδια-συνδέσεις.....	17
Κεφάλαιο 2ο: Τελεστικός ενισχυτής.....	19
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά	19
2.2 Συνδεσμολογίες T.E.	20
2.2.1 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.....	20
2.2.2 Αναστρέφουσα συνδεσμολογία.....	20
2.3 Τάξεις ενισχυτή	21
2.3.1 Τάξη A.....	21
2.3.2 Τάξη B.....	22
2.3.3 Τάξη AB.....	22
2.3.4 Τάξη C.....	23
2.4 Παραμόρφωση διασταύρωσης	23
2.5 Ο ενισχυτής LM3886T.....	24
2.6 Ο ενισχυτής LM358	25
Κεφάλαιο 3ο: Φίλτρα συχνοτήτων και ανορθωτικές διατάξεις.....	26
3.1 Φίλτρα συχνοτήτων	26
3.2 Ανορθωτικές διατάξεις.....	30
3.2.1 Απλή ανόρθωση	30
3.2.2 Διπλή ανόρθωση.....	31

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση κυκλώματος ενισχυτή ήχου	34
4.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας.....	34
4.2 Κύκλωμα προενισχυτή	36
4.3 Κύκλωμα ενισχυτή	39
Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση κυκλώματος ενισχυτή ήχου.....	42
5.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας.....	42
5.2 Κύκλωμα προενισχυτή	44
5.3 Κύκλωμα τελικού ενισχυτή.....	46
5.4 Μετρήσεις κυκλώματος.....	48
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα.....	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κυματομορφή ηχητικού κύματος	12
Σχήμα 1.2: Απόκριση συχνότητας του ακουστικού πόρου	13
Σχήμα 1.3: Κωδικοποίηση της έντασης του ήχου στη συχνότητα των παραγόμενων παλμών	14
Σχήμα 1.4: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ήχου	15
Σχήμα 1.5: Μονοφωνικός και στερεοφωνικός ήχος.....	16
Σχήμα 1.6: Βύσμα τύπου jack	18
Σχήμα 1.7: Βύσμα τύπου phono.....	18
Σχήμα 2.1: Σύμβολο T.E.	19
Σχήμα 2.2: Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή.....	20
Σχήμα 2.3: Κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή.....	20
Σχήμα 2.4: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης A.....	21
Σχήμα 2.5: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης B.....	22
Σχήμα 2.6: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης AB.....	22
Σχήμα 2.7: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης C.....	23
Σχήμα 2.8: Παραμόρφωση διασταύρωσης.....	23
Σχήμα 2.9: LM3886.....	24
Σχήμα 2.10: Ακροδέκτες του LM3886.....	24
Σχήμα 2.11: Ακροδέκτες του LM358.....	25
Σχήμα 3.1: Φίλτρο συχνοτήτων.....	26
Σχήμα 3.2: Ζώνες φίλτρου.....	27
Σχήμα 3.3: Απόκριση χαμηλοπερατού φίλτρου.....	27
Σχήμα 3.4: Απόκριση υψιπερατού φίλτρου.....	28
Σχήμα 3.5: Απόκριση ζωνοπερατού φίλτρου.....	28
Σχήμα 3.6: Απόκριση ζωνοφρακτικού φίλτρου.....	29
Σχήμα 3.7: Κύκλωμα ενεργού χαμηλοπερατού φίλτρου.....	29
Σχήμα 3.8: Κύκλωμα ενεργού υψιπερατού φίλτρου.....	30
Σχήμα 3.9: Απλός ανορθωτής.....	31
Σχήμα 3.10: Διπλός ανορθωτής με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης.....	32
Σχήμα 3.11: Διπλός ανορθωτής γέφυρας-κύκλωμα.....	32
Σχήμα 3.12: Διπλός ανορθωτής γέφυρας-κυματομορφή εξόδου.....	33
Σχήμα 4.1: Μπλοκ διάγραμμα κυκλώματος τροφοδοσίας ενισχυτή ήχου.....	34
Σχήμα 4.2: Κύκλωμα ανορθωτή γέφυρας με μετασχηματιστή.....	34
Σχήμα 4.3: Κυματομορφή ανορθωτή.....	35
Σχήμα 4.4: Κύκλωμα εξομάλυνσης.....	36
Σχήμα 4.5: Κυματομορφή τάσης μετά την εξομάλυνση.....	36
Σχήμα 4.6: Κύκλωμα σταθεροποίησης με Zener.....	37
Σχήμα 4.7: Κυματομορφή τάσης μετά την σταθεροποίηση με Zener.....	37
Σχήμα 4.8: Σχηματικό διάγραμμα προενισχυτή.....	38
Σχήμα 4.9: Κυματομορφή εξόδου προενισχυτή.....	39
Σχήμα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα τελικού ενισχυτή.....	39
Σχήμα 4.11: Κυματομορφή εξόδου τελικού ενισχυτή.....	41
Σχήμα 5.1: Το εσωτερικό της κατασκευής.....	42
Σχήμα 5.2: Συνδέσεις διακόπτη και ασφαλειοθήκης.....	42
Σχήμα 5.3: Συνδέσεις ανορθωτή γέφυρας.....	43

Σχήμα 5.4: Ακροδέκτες ανορθωτή γέφυρας.....	43
Σχήμα 5.5: Συνδέσεις κυκλώματος εξομάλυνσης.	44
Σχήμα 5.6: Συνδέσεις υποδοχής ήχου.	45
Σχήμα 5.7: Συνδέσεις προενισχυτή.	45
Σχήμα 5.8: Συνδέσεις τελικών ενισχυτών.	46
Σχήμα 5.9: Συνδέσεις βυσμάτων εξόδου.....	46
Σχήμα 5.10: PCB πλακέτας τελικού ενισχυτή.	47
Σχήμα 5.11: Μπροστινή όψη κατασκευής.	47
Σχήμα 5.12: Πίσω όψη κατασκευής.....	48
Σχήμα 5.13: Μέτρηση τάσης δικτύου με πολύμετρο.	48
Σχήμα 5.14: Μέτρηση τάσης στην έξοδο του ανορθωτή.	49
Σχήμα 5.15: Μέτρηση τάσης στην έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης.	49
Σχήμα 5.16: Μέτρηση τάσης στην τροφοδοσία του LM3886.....	50
Σχήμα 5.17: Σήμα από τη γεννήτρια συχνοτήτων.....	50
Σχήμα 5.18: Σήμα στην είσοδο του προενισχυτή.....	50
Σχήμα 5.19: Σήμα στην έξοδο του προενισχυτή.	51
Σχήμα 5.20: Σήμα στην έξοδο του τελικού οενισχυτή.....	51

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές καλωδίων ηχείων	17
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα θεωρητικής ανάλυσης και σχεδίασης	41
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα υλοποιημένου κυκλώματος	52

Εισαγωγή

Οι Τ.Ε. είναι από τα πιο διαδεδομένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, με τη βοήθεια των οποίων κατασκευάζονται πολλά κυκλώματα. Ανάμεσα σε αυτά είναι και τα κυκλώματα προενισχυτή και τελικού ενισχυτή τα οποία αποτελούν κομμάτι ενός ενισχυτή ήχου. Μέσω μιας σειράς υπολογισμών και με την κατάλληλη επιλογή εξαρτημάτων είναι δυνατή η επίτευξη ενίσχυσης ενός ηχητικού σήματος που λαμβάνεται στην είσοδο ενός ενισχυτή ήχου.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη, η σχεδίαση και η προσομοίωση των κυκλωμάτων που συνθέτουν έναν ενισχυτή ήχου και με τη χρήση Τ.Ε. καθώς και η υλοποίησή του.

Στο 1^ο Κεφάλαιο ο αναγνώστης εισάγεται στη θεωρία του ήχου ώστε να κατανοήσει τον τρόπο παραγωγής των ηχητικών σημάτων αλλά και την αναγκαιότητα για ενίσχυσή τους ώστε να γίνουν αντιληπτά από τον άνθρωπο. Παράλληλα, παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο ενός συστήματος ήχου.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση του Τ.Ε. το οποίο αποτελεί το βασικό εξάρτημα του ενισχυτή. Αναφέρονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την συνδεσμολογία του, την ενίσχυση που προκαλεί καθώς και την τάξη στην οποία βρίσκεται, με σκοπό να γίνει κατανοητή η μετέπειτα ανάλυση του κυκλώματος.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε δύο συμπληρωματικά κυκλώματα τα οποία είναι απαραίτητα για τη σχεδίαση του ενισχυτή. Πρόκειται για τα φίλτρα συχνοτήτων και τις ανορθωτικές διατάξεις. Δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την εξοικείωση του αναγνώστη με τα κυκλώματα που ακολουθούν στη σχεδίαση του ενισχυτή.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η σχεδίαση και η προσομοίωση των επιμέρους κυκλωμάτων τα οποία είναι το κύκλωμα τροφοδοσίας, το κύκλωμα προενισχυτή και το κύκλωμα ενισχυτή.

Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η κατασκευή του ενισχυτή ήχου και δίνονται εξηγήσεις για όλες τις επιμέρους συνδέσεις της κατασκευής, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη μελέτη όσο και από την υλοποίηση του κυκλώματος ενισχυτή ήχου.

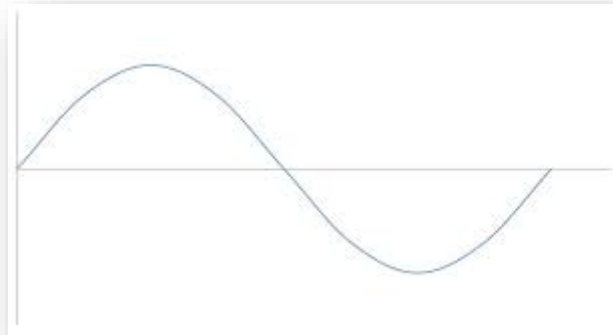
Κεφάλαιο 1ο: Ήχος

1.1 Ηχητικά κύματα

Ο ήχος είναι κύματα τα οποία αντιπροσωπεύουν την κίνηση του αέρα και τα οποία ταξιδεύουν με ταχύτητα 344.4 m/s. Ο ήχος για να έχει τη δυνατότητα να μεταφερθεί χρειάζεται κάποιο μέσο, είτε στερεό, είτε υγρό, είτε αέριο. Επομένως, η μετάδοση του ήχου δεν είναι δυνατή στο κενό.

Η παραγωγή του ήχου επιτυγχάνεται είτε μέσω μιας ταχείας μεταβολής της μέσης πυκνότητας ή μέσω της μεταβολής της πίεσης των μορίων του αέρα σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι, προκύπτουν η πίεση ήχου που αναπαριστά τις μικρές αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης και τα ηχητικά κύματα, δηλαδή οι διακυμάνσεις της πίεσης.

Όταν τα μόρια του αέρα ταλαντεύονται προκαλείται ένα ηχητικό σήμα το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με μια κυματομορφή όπου θα παρουσιάζεται η μετατόπιση των μορίων του αέρα που προκαλεί η πίεση συναρτήσει του χρόνου. Η κυματομορφή θα είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 1.1: Κυματομορφή ηχητικού σήματος

1.2 Παραγωγή ηχητικών κυμάτων

Η παραγωγή των ηχητικών κυμάτων είναι αποτέλεσμα της ταλάντωσης σωμάτων. Χαρακτηρίζονται από περιοχές υποπίεσης, δηλαδή περιοχές όπου η τιμή της πίεσης είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής και από περιοχές υπερπίεσης, δηλαδή περιοχές όπου η τιμή της πίεσης είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής.

Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και στους 20°C είναι περίπου ίση με 343 m/s. Η απόσταση λ στην οποία ταξιδεύει το ηχητικό κύμα στη διάρκεια μιας περιόδου ονομάζεται μήκος κύματος και ισούται με:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

Επομένως,

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.2)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (1.2) στις χαμηλές συχνότητες εμφανίζονται ηχητικά κύματα μεγάλου μήκους κύματος και στις υψηλές συχνότητες εμφανίζονται ηχητικά κύματα μικρού μήκους κύματος. Για παράδειγμα στα 20Hz το μήκος κύματος είναι $\cong 17m$, ενώ στα 20KHz το μήκος κύματος είναι $\cong 17mm$.

Ο τόνος και το ύψος ενός ηχητικού κύματος καθορίζονται από τη συχνότητα του κύματος. Το εύρος συχνοτήτων ενός ατόμου νεαρού σε ηλικία είναι περίπου 20Hz έως 20KHz.

Ο άνθρωπος είναι ικανός να δέχεται ήχους οι οποίοι παράγονται στο περιβάλλον γύρω του αλλά δεν μπορεί να τους ακούσει όλους. Ήχοι, δηλαδή ηχητικά κύματα, χαμηλών συχνοτήτων δεν μπορούν να ακουστούν όπως για παράδειγμα ο καρδιακός παλμός (1-2Hz) και ανήκουν στο φάσμα των υπόηχων. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν ήχοι πολύ υψηλών συχνοτήτων οι οποίοι δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο και καλύπτουν το φάσμα των υπερήχων.

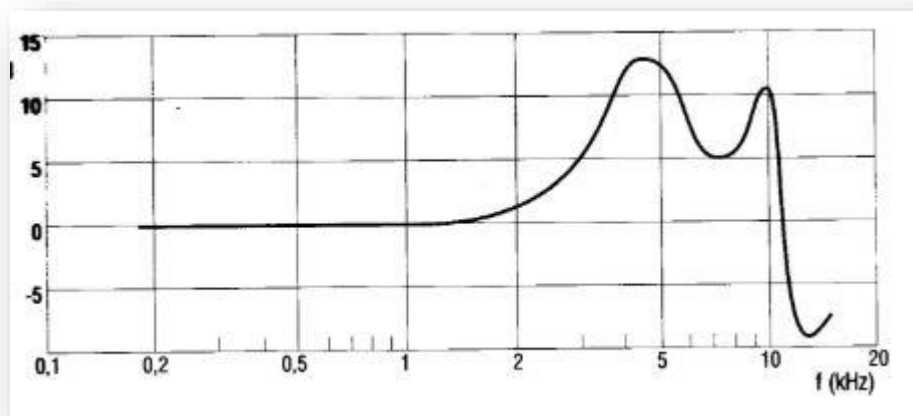
Η ένταση του ήχου σχετίζεται με τη δύναμη του ηχητικού κύματος η οποία εκφράζεται σε $\frac{W}{m^2}$ αλλά έχει υπερισχύσει η μονάδα Decibel (dB).

1.3 Αντίληψη του ήχου

Το αισθητήριο όργανο της ακοής χωρίζεται το ακουστικό μας σύστημα σε τρία μέρη. Καθώς η ανάλυση του συστήματος αυτού δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, θα γίνει αναφορά στα βασικά στοιχεία κάθε μέρους τα οποία σχετίζονται με την επεξεργασία του ήχου.

- Έξω ους

Ο έξω ους αποτελείται από τον ακουστικό λοβό και τον ακουστικό πόρο. Ο ήχος συλλέγεται μέσω του ακουστικού λοβού ο οποίος βοηθάει στην αναγνώριση της κατεύθυνσης του ήχου. Τα ηχητικά κύματα κινούνται προς την τυμπανική μεμβράνη με τη βοήθεια του ακουστικού πόρου και παράλληλα ο ίδιος είναι υπεύθυνος για τη μερική ενίσχυσή τους λόγω φαινομένων συντονισμού που εμφανίζονται στην περιοχή 2K Hz - 5K Hz. Βέβαια, η ενίσχυση αυτή είναι ανεπαρκής καθώς κατά την μετάδοση από ένα μέσο χαμηλής ακουστικής αντίστασης, όπως είναι ο αέρας, σε ένα μέσο υψηλής ακουστικής αντίστασης, όπως είναι το υγρό στον κοχλία, δημιουργούνται προβλήματα προσαρμογής.



Εικόνα 1.2: Απόκριση συχνότητας του ακουστικού πόρου

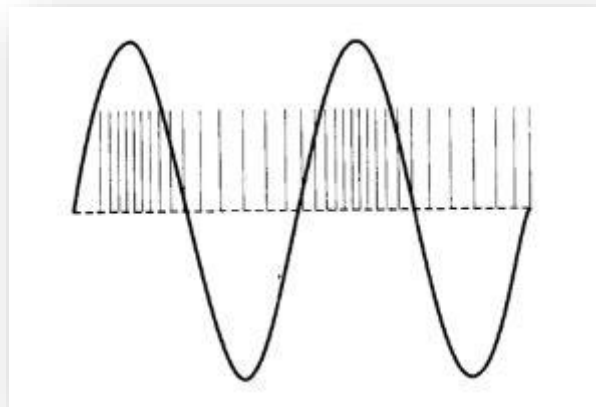
- Μέσος ους

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα υπάρχει διαφορά μεταξύ των ακουστικών συχνοτήτων του υγρού του κοχλίου και του αέρα και μάλιστα είναι ίση με 4000:1 . Το μεσαίο τμήμα του ακουστικού αισθητήριου οργάνου είναι αυτό που καταφέρνει να επιτύχει ικανοποιητική προσαρμογή. Το συνολικό κέρδος που προκύπτει σε αυτή την περιοχή υπολογίζεται περίπου 35-80 φορές. Σε εντάσεις μεγαλύτερες από 110-120 dB ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας ώστε να μειώσει τις δονήσεις που μεταφέρονται προς τον κοχλίο.

- Έσως ους

Στο εσωτερικό τμήμα του αυτιού βρίσκεται η βασική μεμβράνη. Στο σημείο αυτό υπάρχει το όργανο του Corti το οποίο αποτελείται από περίπου 1.500 εξωτερικά και 3.500 εσωτερικά τριχίδια. Το κάθε τριχίδιο έχει στη βάση του έναν αριθμό από 40 - 140 μετατροπείς (stereocilia) που μετατρέπουν τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρικούς παλμούς.

Η μετάδοση των ακουστικών ερεθισμάτων στο ακουστικό νεύρο επιτυγχάνεται με μία σειρά παλμών. Η κωδικοποίηση της έντασης του ήχου γίνεται με ανάλογη μεταβολή της συχνότητας μετάδοσης παλμών.

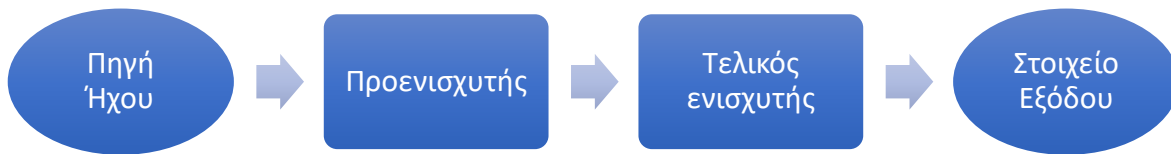


Εικόνα 1.3: Κωδικοποίηση της έντασης του ήχου στη συχνότητα των παραγόμενων παλμών

1.4 Σύστημα ήχου

Ένα βασικό σύστημα ήχου αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- Πηγή ήχου
- Προενισχυτής
- Τελικός ενισχυτής
- Στοιχείο εξόδου (π.χ. ηχείο)
- Μέσα μετάδοσης



Σχήμα 1.4: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ήχου

Πηγή ήχου σε ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να είναι η έξοδος από κάποιο μικρόφωνο, από μια τηλεόραση, από ένα DVD-player κ.α. Τα σήματα εξόδου που προκύπτουν από αυτές τις πηγές είναι κατά κανόνα ασθενή σήματα, δηλαδή η στάθμη τους είναι της τάξης των mV και η ισχύς εξόδου τους της τάξης των mW.

Ο προενισχυτής αποτελεί ένα από τα βασικά κομμάτια ενός συστήματος ήχου. Η κύρια λειτουργία που επιτελεί είναι η ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται από την εκάστοτε πηγή ήχου με σκοπό να φτάσει το σήμα σε ένα επιθυμητό επίπεδο, κατάλληλο για την περαιτέρω επεξεργασία που θα δεχθεί στον τελικό ενισχυτή. Παράλληλα, ο προενισχυτής αναλαμβάνει και το κομμάτι της προσαρμογής. Όπως είναι γνωστό, για την πλήρη προσαρμογή ενός συστήματος απαιτείται ιδανικά ίδια τιμή αντίστασης εισόδου και εξόδου. Τα ασθενή σήματα που προκύπτουν από τις πηγές ήχου εμφανίζουν πολύ διαφορετική αντίσταση σε σχέση με την αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η απευθείας σύνδεσή τους. Επομένως, ο προενισχυτής καθίσταται απαραίτητος.

Ο τελικός ενισχυτής ακολουθεί τον προενισχυτή. Ο ρόλος του είναι καθοριστικός για την ενίσχυση του ήχου καθώς αυτό που κάνει είναι να ενισχύσει το ηλεκτρικό σήμα που δέχεται από τον προενισχυτή με σκοπό να λάβουμε το ενισχυμένο πλέον σήμα στην έξοδο του συστήματος που θα είναι π.χ. ένα ηχείο. Το ασθενές σήμα που λαμβάνεται από την εκάστοτε πηγή ήχου δεν επαρκεί ώστε να διεγερθεί η συσκευή εξόδου. Όμως είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όσο απαραίτητος κι αν είναι ο ενισχυτής για την λειτουργία ενός συστήματος ήχου, η ενίσχυση που προκαλεί δεν θα πρέπει να συνοδεύεται από αλλοίωση των ηλεκτρικών σημάτων που αποτελούν τον ήχο.

Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, ως στοιχείο εξόδου θεωρούμε συσκευές όπως ηχεία, ακουστικά, μεγάφωνα κ.α. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα δοθούν ορισμένα στοιχεία για τα ηχεία καθώς αυτή θα είναι η συσκευή που θα χρησιμοποιηθεί ως έξοδος.

Τα συνηθέστερα μέσα μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στα διάφορα συστήματα ήχου καθώς και στην παρούσα εργασία είναι τα καλώδια. Επειδή τα ασθενή σήματα που λαμβάνονται από την έξοδο της εκάστοτε πηγής ήχου είναι επιρρεπή στην παραμόρφωση λόγω παρεμβολών ή θορύβου είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται καλώδια όσο το δυνατό πιο ανθεκτικά και γι' αυτό είθισται να επιλέγονται ομοαξονικά καλώδια με ενισχυμένη θωράκιση. Να σημειωθεί πως τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των σημάτων από τον τελικό ενισχυτή στην έξοδο του συστήματος θα πρέπει να είναι μεγάλης διατομής καθώς μεταφέρουν υψηλά ρεύματα και ταυτόχρονα να εμφανίζουν τη μικρότερη δυνατή αντίσταση για αποφυγή απωλειών άρα θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από αρκετά αγώγιμα υλικά.

1.5 Ηχεία

Ένα ηχείο αποτελεί ουσιαστικά το πλαίσιο το οποίο φιλοξενεί τουλάχιστον έναν τύπο μεγάφωνου ή συνδυασμό αυτών. Τα είδη των μεγάφωνων είναι τρία:

- Χαμηλών συχνοτήτων-Woofers

- Μεσαίων συχνοτήτων-Midrange
- Υψηλών συχνοτήτων-Tweeter

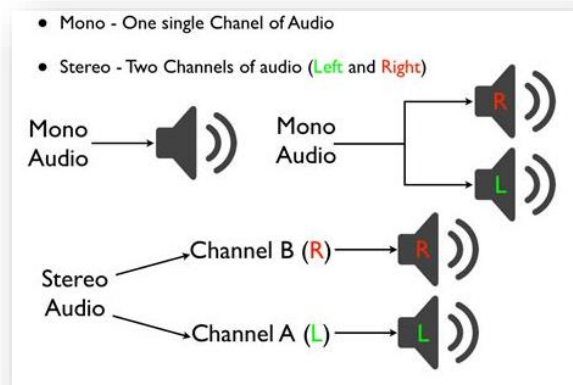
Κάθε είδος μεγάφωνου περιγράφεται από μια καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων. Οι καμπύλες αυτές παρ' όλο που βρίσκονται μέσα στο ακουστικό φάσμα δεν παρουσιάζουν την ίδια απόδοση για όλο το φάσμα.

Ο τελικός μετατροπέας του ηλεκτρικού σήματος σε ηχητικά κύματα είναι τα ηχεία και αποτελεί τη διάταξη με τις περισσότερες ατέλειες συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις μιας ηχητικής αλυσίδας. Οι προδιαγραφές ενός ηχείου που εξετάζονται είναι:

- Η ονομαστική του ευαισθησία που μετριέται σε dB/W/m.
- Η ονομαστική τιμή της αντίστασής του που είναι συνήθως 4, 8 ή 16Ω.
- Η μέγιστη συνεχής ισχύς που μπορεί να αντέξει.

Με σκοπό να καλυφθεί το μεγαλύτερο δυνατό εύρος του ακουστικού φάσματος, ένα ηχείο αποτελείται από δύο τουλάχιστον μεγάφωνα. Ένα ηχείο δύο δρόμων έχει τυπική απόκριση συχνότητας 80Hz ως 15KHz. Ένα ηχείο τριών δρόμων έχει τυπική απόκριση 50Hz ως 18KHz. Για συχνότητες ως τα 25Hz, δηλαδή πολύ χαμηλές συχνότητες, χρησιμοποιούνται ηχεία τα οποία αποτελούνται από μεγάφωνα με μεγάλη διάμετρο (τουλάχιστον 18") που ονομάζονται subwoofer. Τα μεγάφωνα αυτά λειτουργούν στην περιοχή 20-125Hz.

Συχνό φαινόμενο αποτελεί ο συνδυασμός ηχείων είτε σε σειρά, είτε παράλληλα είτε σε συνδυασμό παράλληλα-σε σειρά. Προτείνεται η συνολική αντίσταση των συστημάτων αυτών να μην είναι μικρότερη των 4Ω καθώς ο ενισχυτής απαιτεί αυξημένο ρεύμα και ταυτόχρονα η τιμή του συντελεστή απόσβεσης ελαττώνεται.



Σχήμα 1.4: Μονοφωνικός και στερεοφωνικός ήχος

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ήχου είναι δύο, ο μονοφωνικός και ο στερεοφωνικός.

Ο μονοφωνικός ήχος μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα ενιαίο ηχητικό κύμα. Ο συνδυασμός όλων των καναλιών σε ένα έχει ως αποτέλεσμα η αναπαραγωγή του ήχου να επιτυγχάνεται από ένα μόνο κανάλι και με τον ίδιο τρόπο από οποιαδήποτε θέση.

Ο στερεοφωνικός ήχος αντίθετα δημιουργεί την αίσθηση πως ο ήχος κατευθύνεται στο χώρο. Η αναπαραγωγή του ήχου επιτυγχάνεται ουσιαστικά με τον διαχωρισμό του σε δύο ξεχωριστά κανάλια

και ρυθμίζεται με την κατάλληλη τοποθέτηση των συσκευών εξόδου (π.χ. ηχεία, ακουστικά, μεγάφωνα) στο χώρο.

1.6 Καλώδια-συνδέσεις

Τα καλώδια που τροφοδοτούν τα ηχεία μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Καλώδια που μεταφέρουν χαμηλά ρεύματα (της τάξης των mA) υπό τάση 1V.
- Καλώδια που μεταφέρουν υψηλά ρεύματα .

Τα καλώδια που μεταφέρουν υψηλά ρεύματα εμφανίζουν ορισμένες παραμέτρους από τις οποίες σημαντικότερες είναι το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα και η ωμική αντίσταση του καλωδίου.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά για τις διαστάσεις καλωδίων που χρησιμοποιούνται περισσότερο για καλώδια ηχείων. Για το μέγιστο ρεύμα θεωρείται μόνωση PVC με μέγιστη θερμοκρασία αντοχής 80°C.

Πίνακας 1. 1-1: Χαρακτηριστικές τιμές καλωδίων ηχείων

AWG	Διάμετρος (mm)	$\Omega/100m$	Μέγιστο ρεύμα (A)
24	0,51	8,75	6
22	0,64	5,17	8
20	0,81	3,41	10
18	1,02	2,19	15
16	1,29	1,30	19
14	1,63	0,85	27
12	2,05	0,54	36
10	2,59	0,34	47
8	3,25	0,22	65
6	4,115	0,15	95
4	5,189	0,08	125

Η αντίσταση των καλωδίων προκαλεί πτώση τάσης καθώς και απώλειες. Στα καλώδια που μεταφέρουν ασθενή ρεύματα οι ωμικές απώλειες δεν είναι σημαντικές. Όμως η χωρητικότητα του καλωδίου σε συνδυασμό με την αντίσταση εξόδου της προηγούμενης διάταξης σχηματίζουν ένα βαθυπερατό φίλτρο, κάτι το οποίο θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

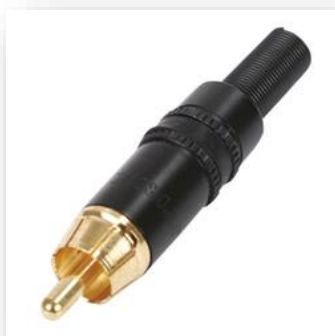
Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί πως η μεταφορά του ηλεκτρικού σήματος διαμέσω καλωδίου απαιτεί ένα ρεύμα για να φορτίσει και να εκφορτίσει την χωρητικότητα που παρουσιάζει το καλώδιο.

Σε οικιακά συστήματα ήχου, για λόγους οικονομίας, χρησιμοποιούνται μη ισορροπημένες συνδέσεις, όπου ο αγωγός επιστροφής του σήματος και γης είναι κοινός. Για τις μη ισορροπημένες

συνδέσεις χρησιμοποιούνται συνηθέστερα βύσματα τύπου jack ή phono.



Εικόνα 1.5: Βύσμα τύπου jack



Εικόνα 1.6: Βύσμα τύπου phono

Κεφάλαιο 2ο: Τελεστικός ενισχυτής

2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

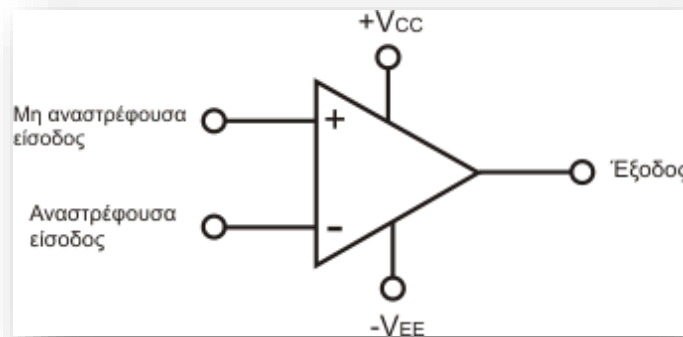
Ο τελεστικός ενισχυτής (op-amp) είναι ένα βασικό ηλεκτρονικό εξάρτημα, το οποίο χρησιμοποιείται στη σχεδίαση αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων. Έχει τη μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία με σκοπό την υλοποίηση αρκετών χρήσιμων συναρτήσεων.

Μερικές από τις λειτουργίες που επιτελεί ένας Τ.Ε. είναι:

- Ενίσχυση ή/και αναστροφή σήματος εισόδου.
- Πρόσθεση και αφαίρεση πολλών σημάτων εισόδου.
- Διαφόριση και ολοκλήρωση (στο χρόνο) σήματος εισόδου.
- Υλοποίηση αναλογικού φίλτρου.
- Υλοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων.
- Απομόνωση εισόδου-εξόδου.

Ένας τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από δύο εισόδους, την αναστρέφουσα (-) και τη μη αναστρέφουσα (+), την έξοδο απ' όπου παρέχεται το ενισχυμένο σήμα, δύο ακροδέκτες τροφοδοσίας (είτε συμμετρική είτε μονοπολική) καθώς και ορισμένους επιπλέον ακροδέκτες.

Η έξοδος ενός τελεστικού ενισχυτή δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας του. Πιο συγκεκριμένα, η έξοδος ενός τελεστικού ενισχυτή περιορίζεται από τον κορεσμό εξόδου του που είναι συνήθως $\pm 1-2V$ από την τάση τροφοδοσίας του τελεστικού και καθορίζεται από τους κατασκευαστές στα φύλλα δεδομένων του εξαρτήματος.



Σχήμα 2.1: Σύμβολο Τ.Ε.

Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζει ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής είναι:

- Πολύ μεγάλο κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου ($A_{OL} \rightarrow \infty$).
- Πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου ($R_D \rightarrow \infty$).
- Μικρή αντίσταση εξόδου ($R_0 \rightarrow 0$).

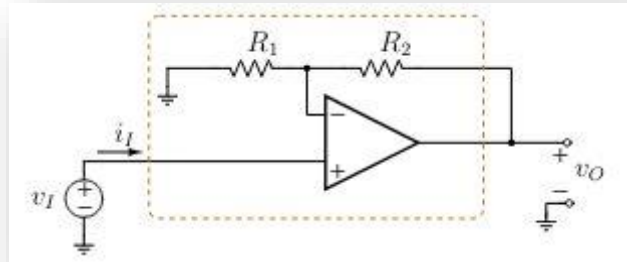
Πολλές φορές, στη συνδεσμολογία ενός Τ.Ε. χρησιμοποιούνται δικτύωματα ανάδρασης με σκοπό τον έλεγχο του κέρδους τάσης καθώς και του εύρους ζώνης συχνοτήτων. Ως αποτέλεσμα προκύπτουν ενισχυτές κλειστού βρόχου.

2.2 Συνδεσμολογίες Τ.Ε.

Οι δύο βασικές συνδεσμολογίες τελεστικού ενισχυτή είναι:

- Η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία
- Η αναστρέφουσα συνδεσμολογία

2.2.1 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία



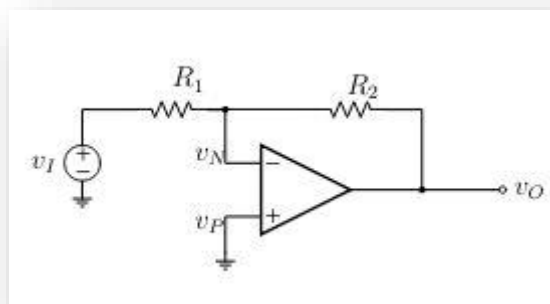
Σχήμα 2.2: Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η τάση στην μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία του Τ.Ε. ισοδυναμεί με την τάση εισόδου του. Από την άλλη, η τάση εξόδου του Τ.Ε. τροφοδοτείται ξανά στην αναστρέφουσα είσοδό του μέσω των δύο αντιστάσεων R_1, R_2 . Η τάση αυτή αντιπροσωπεύει το ποσοστό της τάσης εξόδου που επιστρέφει πίσω στην είσοδο. Το κύκλωμα αυτό αναπαριστά έναν ενισχυτή τάσης ο οποίος εμφανίζει κέρδος τάσης κλειστού βρόχου A_{CL} ίσο με:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.1)$$

Όπως παρατηρείτε το τελικό κέρδος του κυκλώματος A_{CL} με το κέρδος A_{OL} του τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ διαφορετικά. Ο κλειστός βρόχος προκύπτει από τις αντιστάσεις R_1 και R_2 που αποτελούν το δίκτυο ανάδρασης και επανατροφοδοτούν ένα μέρος της εξόδου ξανά στην είσοδο.

2.2.2 Αναστρέφουσα συνδεσμολογία



Σχήμα 2.3: Κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή

Σε αυτή την περίπτωση η τάση εισόδου του Τ.Ε. ισοδυναμεί με την τάση που δέχεται στην αναστρέφουσα είσοδό του. Ένα ποσοστό της τάσης εξόδου επιστρέφει στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού μέσω του δικτύωματος ανάδρασης, δηλαδή μέσω των δύο αντιστάσεων R_1 , R_2 . Το κύκλωμα αυτό αναπαριστά έναν ενισχυτή τάσης ο οποίος εμφανίζει κέρδος τάσης κλειστού βρόχου A_{CL} ίσο με:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_i} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.2)$$

Όπως είναι φανερό, η τάση εξόδου σε αυτή την περίπτωση εμφανίζει διαφορά φάσης 180° σε σχέση με την τάση εισόδου, αφού το κέρδος τάσης είναι αρνητικό.

2.3 Τάξεις ενισχυτή

Το μεγαλύτερο ποσοστό των τελεστικών ενισχυτών εμφανίζει τα ίδια βασικά δομικά στοιχεία σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό του, καθώς το στοιχείο ενίσχυσης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως το τρανζίστορ το οποίο συνοδεύεται από έναν αριθμό επιπλέον στοιχείων όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, καλώδια και άλλα υποστηρικτικά στοιχεία.

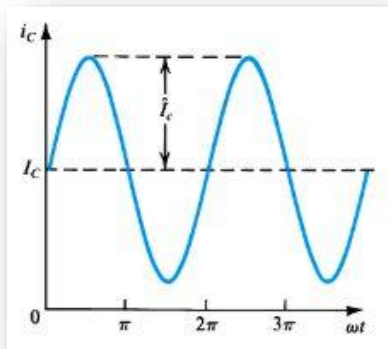
Η διαφορά που εμφανίζουν οι διάφοροι τελεστικοί ενισχυτές έγκειται στον ρεύμα που ρέει μέσω των τρανζίστορ εξόδου όταν αυτό δεν δέχεται κάποιο σήμα στην είσοδό του. Η ποσότητα του ρεύματος αυτού καθορίζει και την τάξη ή αλλιώς κλάση του ενισχυτή.

Παρακάτω αναφέρονται οι πιο γνωστές τάξεις ενισχυτών και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

2.3.1 Τάξη Α

Στους ενισχυτές τάξης Α το τρανζίστορ εξόδου διαρρέεται συνεχώς από ρεύμα, επομένως άγει όλη την ποσότητα του σήματος και δεν προκύπτει κάποια καθυστέρηση μεταγωγής. Παρ' όλο που η παραμόρφωση που εμφανίζουν είναι αρκετά μικρή, μειονεκτούν στην απόδοση ισχύος η οποία κυμαίνεται περίπου στο 25% αφού το τρανζίστορ άγει χωρίς ασυνέχεια και το εμφανίζεται πολύ μεγάλο ρεύμα αγωγής. Το υπολειπόμενο 75% της ισχύος καταναλώνεται ως θερμότητα κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το τρανζίστορ και κατά συνέπεια ο τελεστικός να θερμαίνονται σε μεγάλο βαθμό.

Οι ενισχυτές αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που επεξεργάζονται ασθενή σήματα.

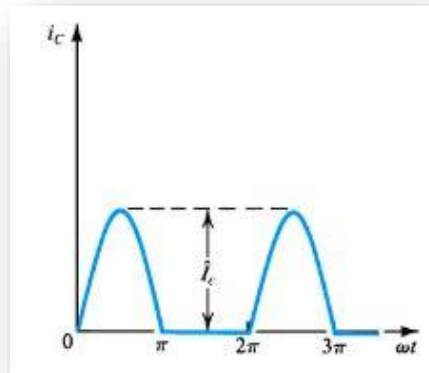


Σχήμα 2.4: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης Α

2.3.2 Τάξη B

Στους ενισχυτές τάξης B το τρανζίστορ εξόδου άγει μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος με αποτέλεσμα να λαμβάνεται το 50% του σήματος. Για να είναι δυνατή η λήψη ολόκληρου του σήματος χρησιμοποιείται κατάλληλη συνδεσμολογία δύο τρανζίστορ η οποία καλείται push-pull. Οι ενισχυτές αυτοί σε αντίθεση με τους ενισχυτές τάξεις A εμφανίζουν απόδοση ισχύος 75% όμως εμφανίζουν πολύ μεγάλη παραμόρφωση κάτι το οποίο απαιτεί την προσθήκη επιπλέον εξαρτημάτων και καθιστά την κατασκευή του πιο περίπλοκη.

Οι ενισχυτές αυτοί είναι οι πιο κοινοί σε σχεδιασμούς ενισχυτών ήχου.

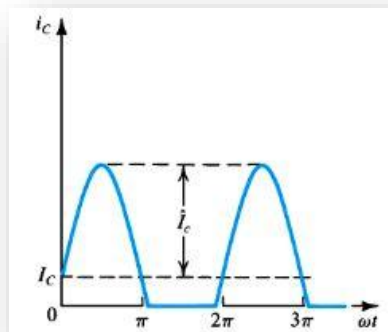


Σχήμα 2.5: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης B

2.3.3 Τάξη AB

Οι ενισχυτές τάξης AB είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων ενισχυτών αν και προσεγγίζουν περισσότερο τους ενισχυτές τάξης B. Το τρανζίστορ διαρρέεται συνεχώς από ένα μικρό ρεύμα κάτι το οποίο βοηθά στην εξάλειψη της παραμόρφωσης διασταύρωσης. Με αυτό τον τρόπο όμως μειώνεται η απόδοσή του.

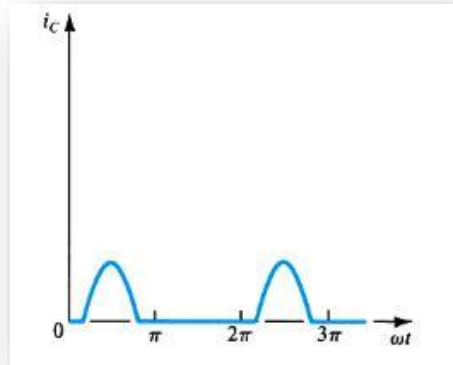
Τελικά, η απώλεια σε απόδοση ισχύος που προκύπτει σε σχέση με την τάξη B ισορροπεί με την γραμμικότητα που αυξάνεται και μειώνεται η παραμόρφωση όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να φθάσει τα επίπεδα γραμμικότητας ενός ενισχυτή τάξης A.



Σχήμα 2.6: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης AB

2.3.4 Τάξη C

Οι ενισχυτές τάξεις C εμφανίζουν την καλύτερη απόδοση ισχύος η οποία κυμαίνεται στο 90% όμως το τελικό σήμα που λαμβάνεται είναι λιγότερο από το 50% του αρχικού σήματος. Εμφανίζουν πολύ μεγάλη παραμόρφωση η οποία καθιστά απαραίτητη την προσθήκη επιπλέον εξαρτημάτων με σκοπό τη δημιουργία κυκλωμάτων συντονισμού για την αντιστάθμισή της.

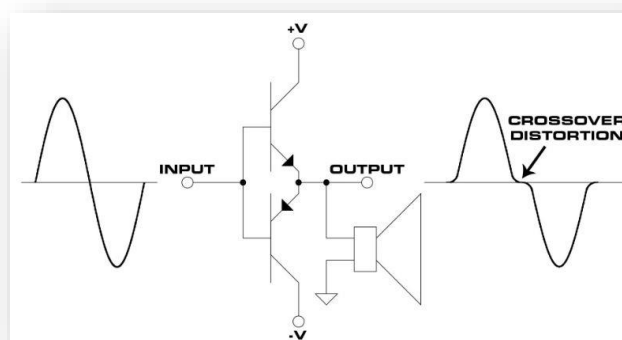


Σχήμα 2.7: Ρεύμα εξόδου ενισχυτή τάξης C

2.4 Παραμόρφωση διασταύρωσης

Η παραμόρφωση διασταύρωσης (crossover distortion) προκύπτει ουσιαστικά από τη βασική δομή ενός τρανζίστορ. Ένα τρανζίστορ αποτελεί το συνδυασμό δύο διόδων, μιας μεταξύ συλλέκτη και βάσης και μιας μεταξύ βάσης και εκπομπού. Για να μπορέσει ένα τρανζίστορ να έρθει σε αγωγή θα πρέπει η διόδος να είναι σε αγωγή, επομένως θα πρέπει να εμφανιστεί μεταξύ βάσης και εκπομπού τάση περίπου 0.7V. Ως αποτέλεσμα το τρανζίστορ εξόδου δεν μπορεί να πολωθεί μέχρι να ξεπεραστεί αυτή τη τάση των 0.7V, άρα το κομμάτι του σήματος που εισέρχεται τη δεδομένη στιγμή δεν μπορεί να αναπαραχθεί με ακρίβεια. Εμφανίζονται δηλαδή σημεία ασυνέχειας στο σήμα εξόδου και δεν είναι ημιτονικό.

Η παραμόρφωση διασταύρωσης εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό στους ενισχυτές τάξης B, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, και η ύπαρξή της κατέστησε αναγκαία την δημιουργία των ενισχυτών τάξης AB.

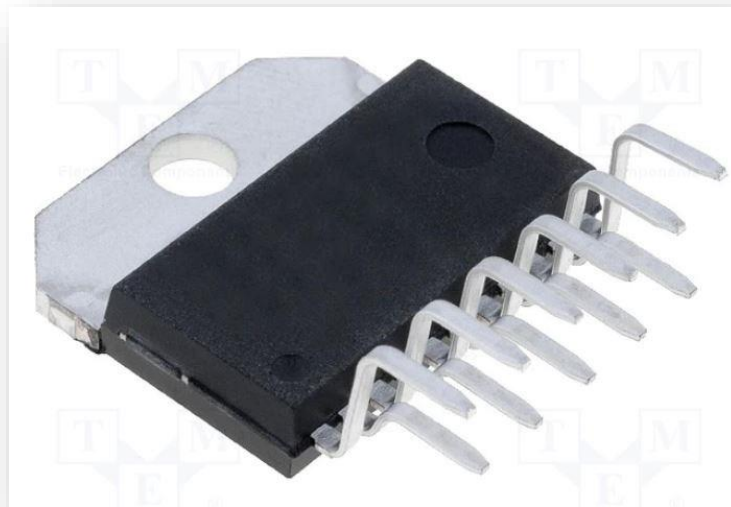


Σχήμα 2.8: Παραμόρφωση διασταύρωσης

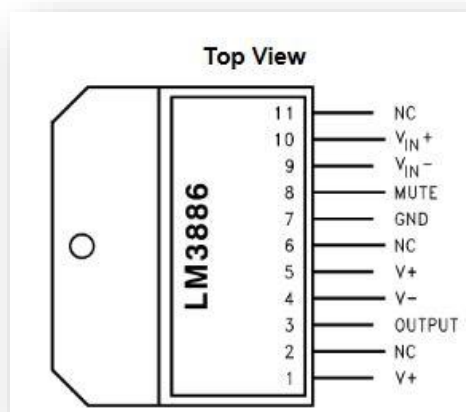
2.5 Ο ενισχυτής LM3886T

Ο ενισχυτής LM3886T είναι ένας ενισχυτής ισχύος ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κόρον στους ενισχυτές ήχου λόγω της υψηλής απόδοσης ισχύος και της πολύ καλής ποιότητας ήχου που προσφέρει. Πρόκειται για ένα ενισχυτή τάξης AB ο οποίος αποτελείται από πολλά τρανζίστορ σε συνδεσμολογία push-pull με αποτέλεσμα τη χαμηλή παραμόρφωση.

Απαιτεί συμμετρική τροφοδοσία για τη λειτουργία του και προσφέρει μέγιστη απαραμόρφωτη ισχύ εξόδου περίπου 68W σε φορτίο 4Ω, ενώ για φορτίο 8Ω περίπου 35W. Παράλληλα, προσφέρει ενσωματωμένα χαρακτηριστικά προστασίας όπως είναι η θερμική απενεργοποίηση, η προστασία από υπέρταση και ο περιορισμός ταλάντευσης εξόδου.



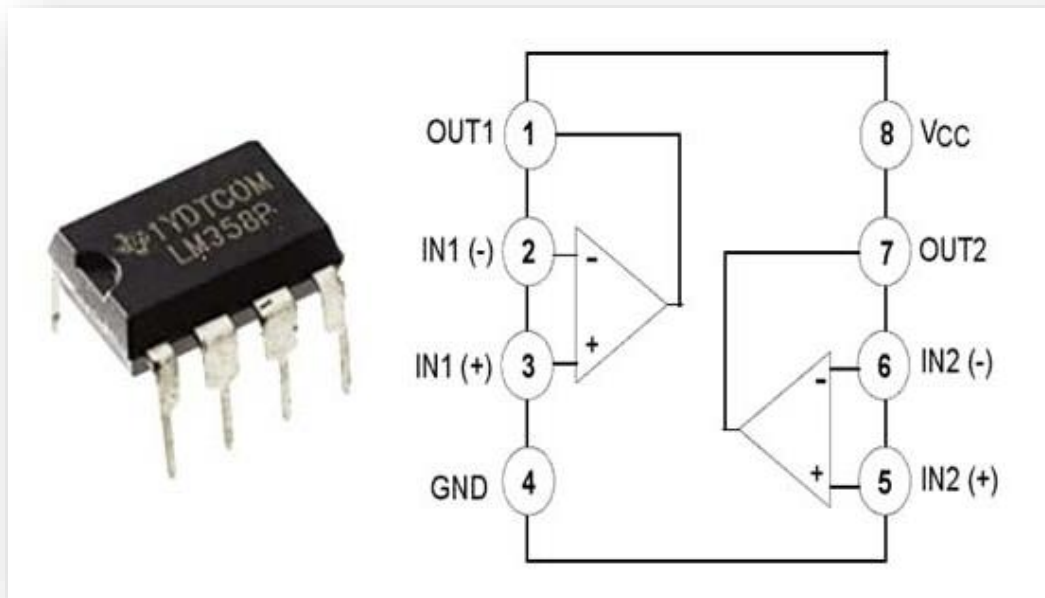
Σχήμα 2.9: LM3886



Σχήμα 2.10: Ακροδέκτες του LM3886

2.6 Ο ενισχυτής LM358

Ο ενισχυτής LM358 είναι ένα διπλός λειτουργικός ενισχυτής, μονοπολικής ή συμμετρικής τροφοδοσίας ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά σε διάφορες εφαρμογές ήχου όπως για παράδειγμα σε κυκλώματα προενισχυτών. Βασικές λειτουργίες που επιτελεί είναι η ενίσχυση του σήματος και περαιτέρω επεξεργασία και ενίσχυση αλλά και αντιστοίχιση της σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 2.11: Ακροδέκτες του LM358

Τα δύο αυτά ολοκληρωμένα κυκλώματα μπορούν να συνδυαστούν στο σχεδιασμό ενός συστήματος ήχου όπως και στην παρούσα εργασία, ώστε να παρέχεται ενίσχυση σήματος και ισχύος.

Είναι απαραίτητο πριν το σχεδιασμό οποιουδήποτε κυκλώματος με τα δύο αυτά Ο.Κ. να γίνει εξέταση των τεχνικών προδιαγραφών τους καθώς τόσο ο LM3886T όσο και ο LM358 έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις λειτουργίας.

Ο LM3886T απαιτεί συγκεκριμένη απαγωγή θερμότητας και τροφοδοσία ρεύματος ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά αλλά και να αποφευχθούν θερμικά ζητήματα και ο LM358 εμφανίζει περιορισμούς στις τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου.

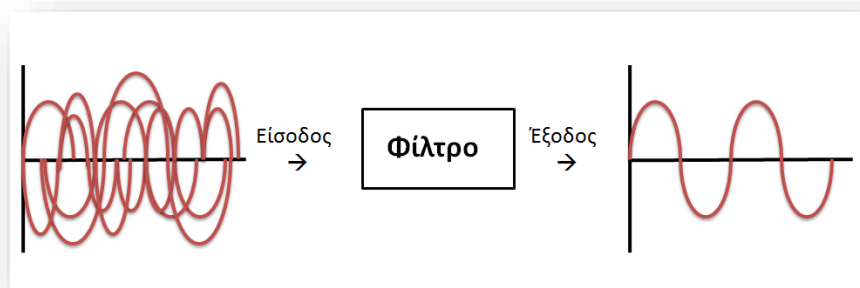
Κεφάλαιο 3ο: Φίλτρα συχνοτήτων και ανορθωτικές διατάξεις

Οι τελεστικοί ενισχυτές αποτελούν τη βάση ενός ενισχυτή ήχου. Όμως κατά τη σχεδίασή του είναι απαραίτητη η μελέτη μερικών επιπλέον κυκλωμάτων, όπως είναι τα φίλτρα συχνοτήτων και οι ανορθωτικές διατάξεις.

3.1 Φίλτρα συχνοτήτων

Τα φίλτρα είναι διατάξεις μέσω των οποίων παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με τη συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπουν τη λειτουργία του συστήματος σε μία ζώνη συχνοτήτων ενώ εξασθενούν οποιοδήποτε σήμα σε συχνότητες εκτός της ζώνης αυτής.

Σε ένα σύστημα η έξοδος εμφανίζει τόσο σήμα όσο και θόρυβο. Με σκοπό να γίνει ο διαχωρισμός τους και να επικρατήσει το σήμα έναντι των ανεπιθύμητων, παρεμβαλλόμενων σημάτων χρησιμοποιούνται τα φίλτρα.



Σχήμα 3. 1: Φίλτρο συχνοτήτων

Ένα φίλτρο απαιτεί για την περιγραφή του την επεξήγηση των προδιαγραφών του. Βασικά στοιχεία ενός φίλτρου είναι:

- Η ζώνη διέλευσης: είναι η περιοχή συχνοτήτων όπου γίνεται η ενίσχυση του σήματος ή απλώς η διέλευσή του χωρίς να εξασθενεί σημαντικά.
- Η ζώνη αποκοπής: είναι η περιοχή συχνοτήτων όπου γίνεται σημαντική εξασθένιση των σημάτων που διέρχονται.

Το μέγεθος που καθορίζει ποιες συχνότητες θα περάσουν και ποιες όχι ονομάζεται συχνότητα αποκοπής και συμβολίζεται με F_c .

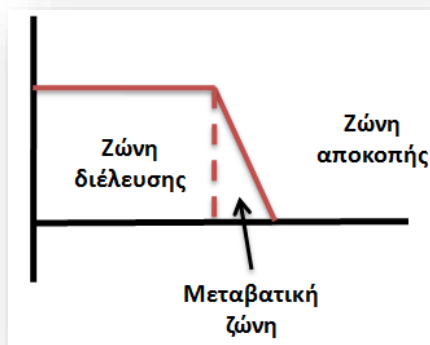
Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζει ένα ιδανικό φίλτρο είναι:

- Δεν δημιουργείται ενίσχυση ή κέρδος στη ζώνη διέλευσης επομένως η απολαβή ισούται με μονάδα.
- Το σήμα εισόδου υποβιβάζεται πλήρως στη ζώνη αποκοπής.
- Η μετάβαση από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη αποκοπής γίνεται ακαριαία.
- Η διέλευση των σημάτων από τη ζώνη διέλευσης δεν επιφέρει καμία παραμόρφωση στα σήματα.

Στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατή η υλοποίηση ενός ιδανικού φίλτρου, επομένως χρησιμοποιούνται τα πραγματικά φίλτρα. Εάν η ζώνη μετάβασης του πραγματικού φίλτρου είναι πολύ στενή, τότε προσεγγίζει αρκετά το ιδανικό φίλτρο.

Τα πραγματικά φίλτρα εμφανίζουν τις εξής διαφορές:

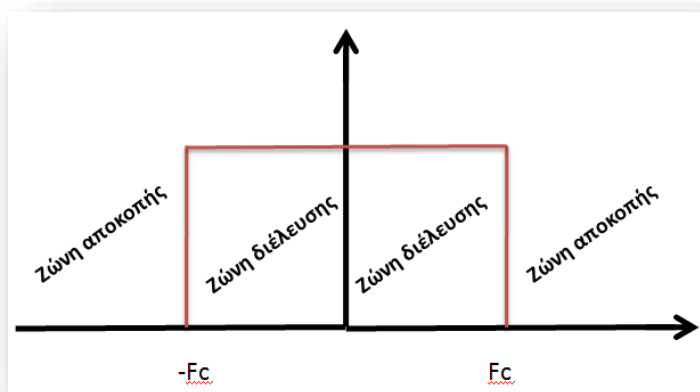
- Στη ζώνη διέλευσης δεν είναι σταθερή η τιμή του κέρδους.
- Στη ζώνη αποκοπής η ενίσχυση δεν είναι μηδενική.
- Η μετάβαση από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη αποκοπής δεν είναι ακαριαία. Επιπλέον ορίζεται μία νέα ζώνη η οποία ονομάζεται ζώνη μετάβασης και βρίσκεται μεταξύ των ζωνών διέλευσης και αποκοπής.



Σχήμα 3. 2: Ζώνες φίλτρου

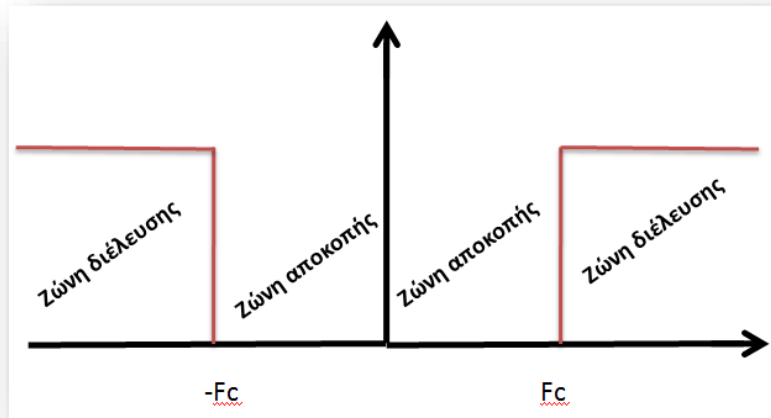
Τα φίλτρα ως προς το φάσμα χωρίζονται σε:

- Χαμηλοπερατά φίλτρα ή αλλιώς βαθυπερατά, όπου επιτρέπεται η διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων και απορρίπτονται οι υψηλές συχνότητες. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπεται η διέλευση των συχνοτήτων μέχρι την προκαθορισμένη συχνότητα αποκοπής και απορρίπτεται η διέλευση των υπόλοιπων συχνοτήτων.



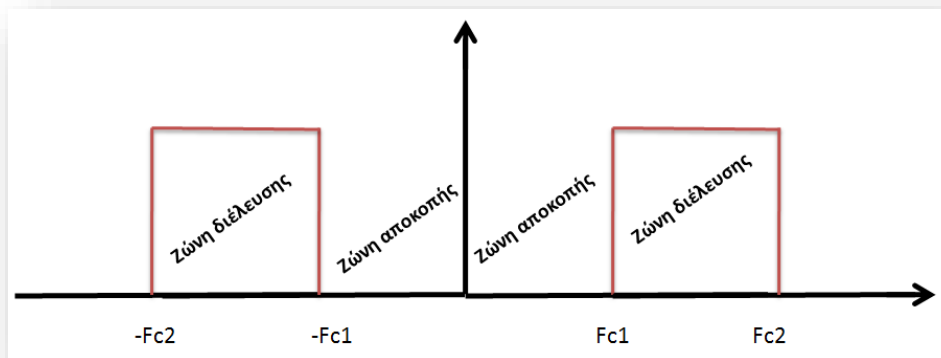
Σχήμα 3. 3: Απόκριση χαμηλοπερατού φίλτρου

- Υψιπερατά φίλτρα, όπου επιτρέπεται η διέλευση των υψηλών συχνοτήτων και απορρίπτονται οι χαμηλές συχνότητες. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπεται η διέλευση των συχνοτήτων από την προκαθορισμένη συχνότητα αποκοπής και πάνω και απορρίπτεται η διέλευση των μικρότερων συχνοτήτων.



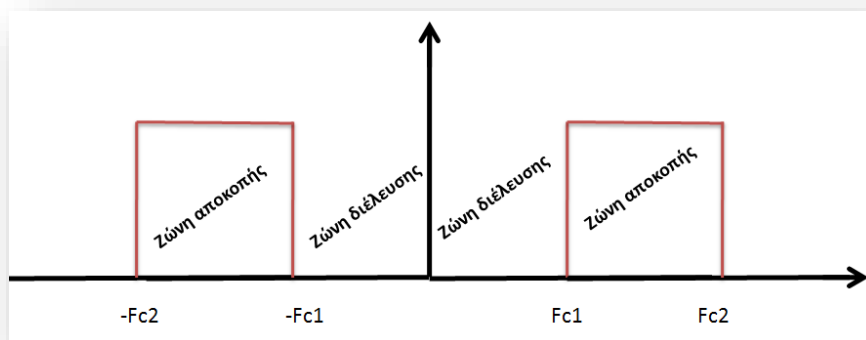
Σχήμα 3. 4: Απόκριση υπερπαρατού φίλτρου

- Ζωνοπερατά φίλτρα ή αλλιώς φίλτρα ζώνης διέλευσης, όπου επιτρέπεται η διέλευση συχνοτήτων σε μια συγκεκριμένη περιοχή η οποία ορίζεται μεταξύ δύο συχνοτήτων αποκοπής, μιας ελάχιστης (f_{CL}) και μιας μέγιστης (f_{CH}). Όλες οι συχνότητες οι οποίες βρίσκονται εκτός της περιοχής αυτής απορρίπτονται.



Σχήμα 3. 5: Απόκριση ζωνοπερατού φίλτρου

- Ζωνοφρακτικά φίλτρα ή φίλτρα ζώνης αποκοπής, τα οποία λειτουργούν αντίστροφα σε σχέση με τα ζωνοπερατά. Δηλαδή, απορρίπτουν τη διέλευση των συχνοτήτων εντός της περιοχής και επιτρέπουν τη διέλευση των συχνοτήτων που βρίσκονται εκτός.



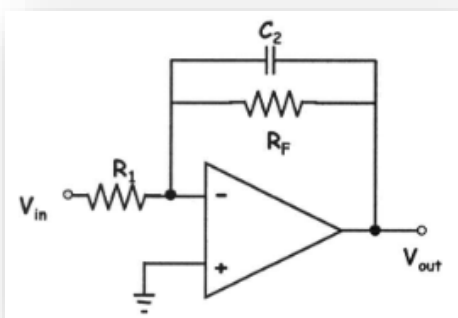
Σχήμα 3. 6: Απόκριση ζωνοφρακτικού φίλτρου

Τα φίλτρα ανάλογα με το κέρδος τους χωρίζονται σε:

- Παθητικά φίλτρα, τα οποία περιλαμβάνουν μόνο από παθητικά στοιχεία, δηλαδή πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις. Το μέγιστο κέρδος αυτών των φίλτρων είναι «1» και χρησιμοποιούνται μόνο σε κυκλώματα με μεγάλες τιμές συχνοτήτων και ισχύων. Σε χαμηλές συχνότητες απαιτούνται μεγάλα πηνία και έτσι το σήμα υποβιβάζεται και δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Ενεργά φίλτρα, τα οποία περιλαμβάνουν ενεργά στοιχεία όπως τρανζίστορ, τελεστικούς ενισχυτές κ.α., τα οποία συνδυάζονται με παθητικά στοιχεία και λειτουργούν ως ενισχυτές. Το ελάχιστο κέρδος αυτών των φίλτρων είναι «1» και αποτελούν μια οικονομική λύση για κυκλώματα που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες και ισχύεις. Όμως το κόστος τους αυξάνεται σε μεγάλες συχνότητες.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μόνο ενεργά χαμηλοπερατά και υψιπερατά φίλτρα επομένως θα δοθούν περαιτέρω πληροφορίες μόνο γι' αυτά τα δύο είδη.

- Ενεργό χαμηλοπερατό φίλτρο



Σχήμα 3. 7: Κύκλωμα ενεργού χαμηλοπερατού φίλτρου

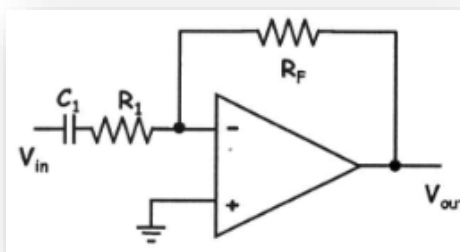
Η συχνότητα αποκοπής σε αυτό το φίλτρο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_2} \quad (3.1)$$

ενώ το κέρδος από τον τύπο:

$$A_V = \frac{R_F}{R_1} \quad (3.2)$$

- Ενεργό υπερβατό φίλτρο



Σχήμα 3. 8: Κύκλωμα ενεργού υπερβατού φίλτρου

Η συχνότητα αποκοπής σε αυτό το φίλτρο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (3.3)$$

ενώ το κέρδος από τον τύπο:

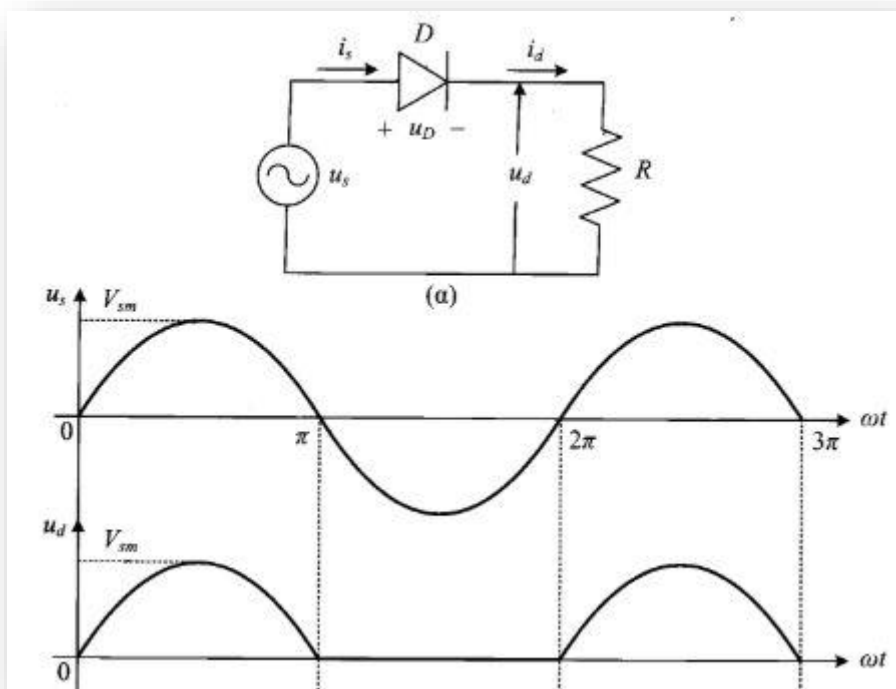
$$A_V = \frac{R_F}{R_1} \quad (3.4)$$

3.2 Ανορθωτικές διατάξεις

Οι ανορθωτές αποτελούν ένα είδος μετατροπέα ισχύος. Οι ανορθωτές χρησιμοποιούνται κυρίως με σκοπό να μετατρέψουν την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή τάση. Οι ανορθωτές που θα περιγραφούν σε αυτό το κεφάλαιο ανήκουν στην κατηγορία των μη ελεγχόμενων ανορθωτών με φυσική μετάβαση. Δηλαδή, χρησιμοποιούν διακόπτες για να επιτελέσουν το έργο τους και συγκεκριμένα διόδους.

3.2.1 Απλή ανόρθωση

Η πιο απλή μορφή ανορθωτικής διάταξης αποτελείται από ένα διακόπτη (μια δίοδο) και ονομάζεται απλή ανόρθωση ή ανόρθωση μισού κύματος. Το φορτίο σε μια τέτοια διάταξη μπορεί να είναι ωμικό, ωμικό-επαγωγικό ή ωμικό-χωρητικό.



Σχήμα 3. 9: Απλός ανορθωτής

Η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{V}_o = \frac{V_{sm}}{\pi} \quad (3.5)$$

και η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο:

$$V_o = \frac{V_{sm}}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

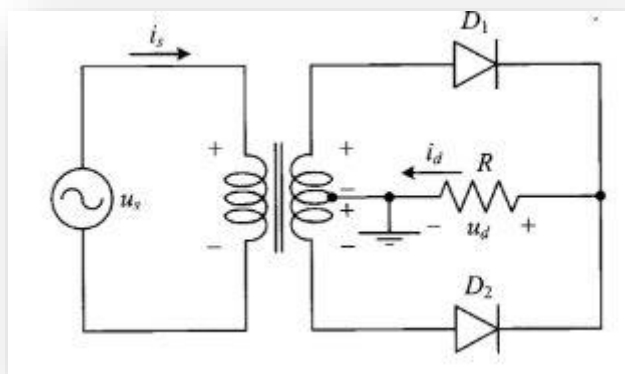
Η διάταξη αυτή δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς στη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή γίνεται η χρήση της μίας εκ των δύο ημιπεριόδων της τάσης του δικτύου.

3.2.2 Διπλή ανόρθωση

Το μειονέκτημα που εμφανίζει ο απλός ανορθωτής εξαλείφεται με τη χρήση των μετατροπέων διπλής ανόρθωσης. Οι δύο κατηγορίες αυτών των ανορθωτών είναι:

- Μετατροπείς με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης.
- Μετατροπείς γέφυρας.

Στους μετατροπείς με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης, οι τάσεις στα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν διαφορά φάσης 180°. Κατά τη θετική ημιπερίοδο άγει η δίοδος D₁ ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγει η δίοδος D₂. Το μειονέκτημα των ανορθωτών αυτών είναι πως η τάση που εμφανίζεται στο φορτίο είναι μισή σε σχέση με την τάση που εμφανίζεται στο δευτερεύον τύλιγμα.



Σχήμα 3. 10: Διπλός ανορθωτής με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης

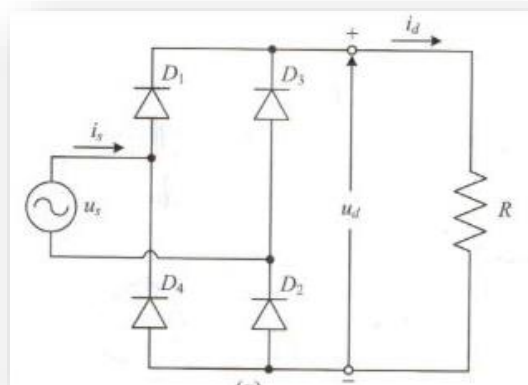
Στον ανορθωτή γέφυρας η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή επιτυγχάνεται με τη χρήση τεσσάρων διακοπών. Για τη λειτουργία του δεν απαιτείται μετασχηματιστής. Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου άγουν οι δίοδοι D_1 και D_2 , ενώ κατά την αρνητική άγουν οι δίοδοι D_3 και D_4 .

Η μέση τιμή της τάσης στο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

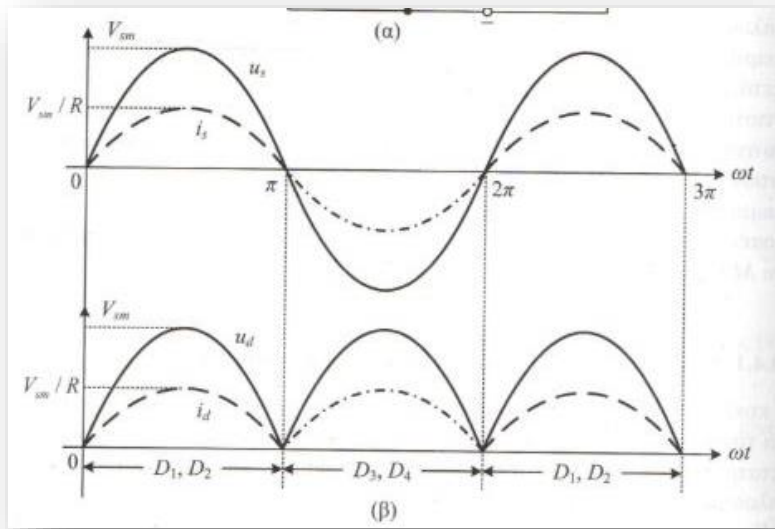
$$\bar{V}_o = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{sm}}{\pi} \quad (3.7)$$

και η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο:

$$V_o = V_{sm} \quad (3.8)$$



Σχήμα 3. 11: Διπλός ανορθωτής γέφυρας-κύκλωμα



Σχήμα 3. 12: Διπλός ανορθωτής γέφυρας-κυματομορφή εξόδου

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση κυκλώματος ενισχυτή ήχου

4.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας

Το πρώτο στάδιο του συστήματος περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κυκλώματος τροφοδοσίας. Στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

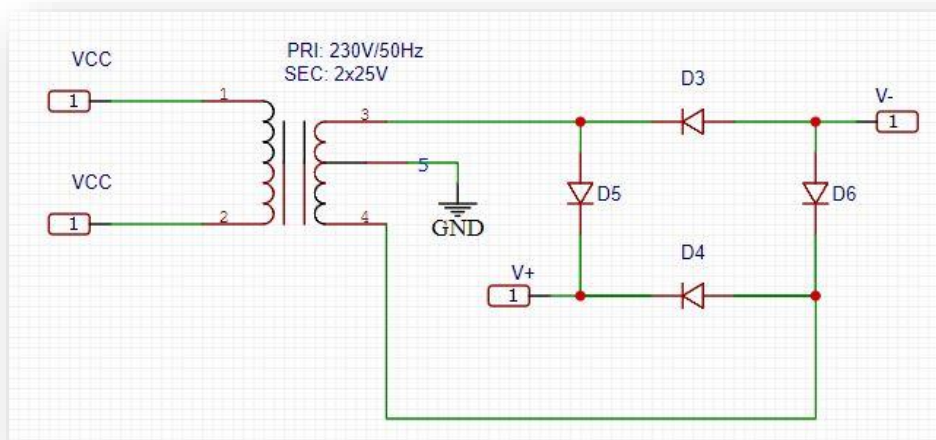


Σχήμα 4.1: Μπλοκ διάγραμμα κυκλώματος τροφοδοσίας ενισχυτή ήχου

Αρχικά το σύστημα συνδέεται στην πρίζα απ' όπου τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα 230V/50Hz. Η υποδοχή συμπεριλαμβάνει ασφαλειοθήκη και διακόπτη ενεργοποίησης-απενεργοποίησης (on-off).

Στη συνέχεια το ρεύμα οδηγείται σε έναν τοροειδή μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας δέχεται στην είσοδό του τάση $V_{CC} = \pm 230V/50Hz$ (δηλαδή την τάση του δικτύου), η τάση στο δευτερεύον τύλιγμα ισούται με 25V (δύο τυλίγματα επομένως 2x25V) και παρέχει ισχύ 250VA. Σκοπός του είναι η μείωση της τιμής κορυφής της τάσης ώστε να δημιουργηθεί κατάλληλη τάση για τροφοδοσία του T.E. LM3886T που θα αναλυθεί παρακάτω.

Το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια ανορθωτική διάταξη και συγκεκριμένα ο ανορθωτής γέφυρας KBPC5010. Η διάταξη του μετασχηματιστή και του ανορθωτή φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 4.2: Κύκλωμα ανορθωτή γέφυρας με μετασχηματιστή.



Σχήμα 4. 3: Κυματομορφή ανορθωτή

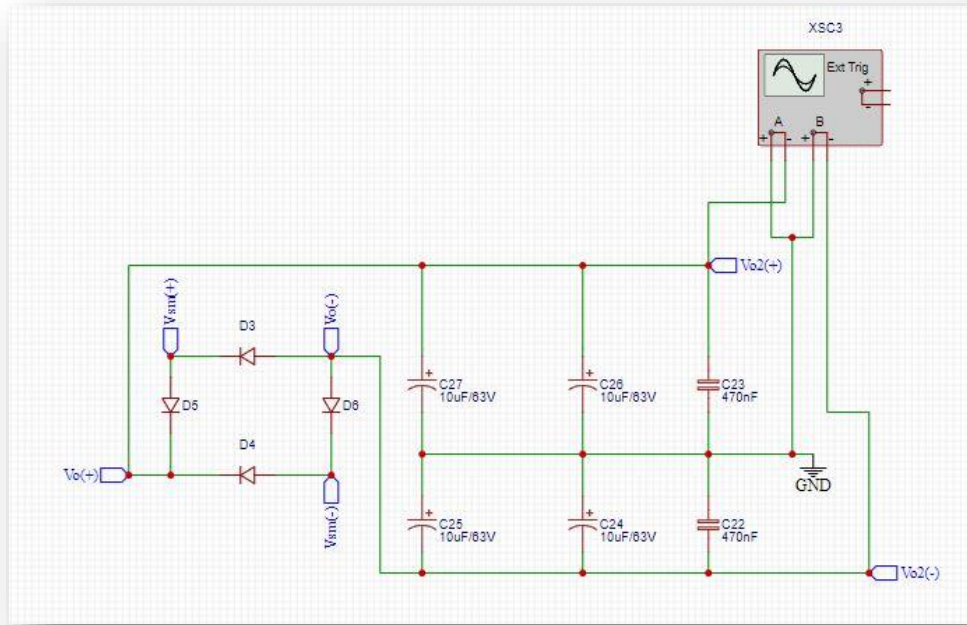
Προκύπτει έτσι τάση εξόδου για την οποία ισχύουν:

$$\overline{V_{DC}} = \frac{2 \cdot V_{max} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{2 \cdot (V_{\deltaευτ.} - 0.7) \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{2 \cdot (25 - 0.7) \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{48.6 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cong 21.88V \quad (4.1)$$

$$V_{rms} = 25V \quad (4.2)$$

Τέλος, το ρεύμα από την έξοδο της γέφυρας εισέρχεται σε φίλτρο με σκοπό τη εξομάλυνσή του. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο σειρές τριών παράλληλων πυκνωτών ώστε να είναι ανεκτοί στα μπάσα. Χρησιμοποιούνται τέσσερις ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές χωρητικότητας 10mF/63V και δύο κεραμικοί πυκνωτές χωρητικότητας 470nF. Από το κύκλωμα εξομάλυνσης προκύπτουν δύο έξοδοι: η θετική ($V_{o(+)}$) και η αρνητική ($V_{o(-)}$) καθώς και γείωση.

Η τάση V_o που προκύπτει απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Η θετική τάση εξόδου $V_{o(+)}$ αντιστοιχεί στην κόκκινη καμπύλη (Channel A-1) ενώ η αρνητική τάση εξόδου $V_{o(-)}$ αντιστοιχεί στην μπλε καμπύλη (Channel B-2).



Σχήμα 4.4: Κύκλωμα εξομάλυνσης



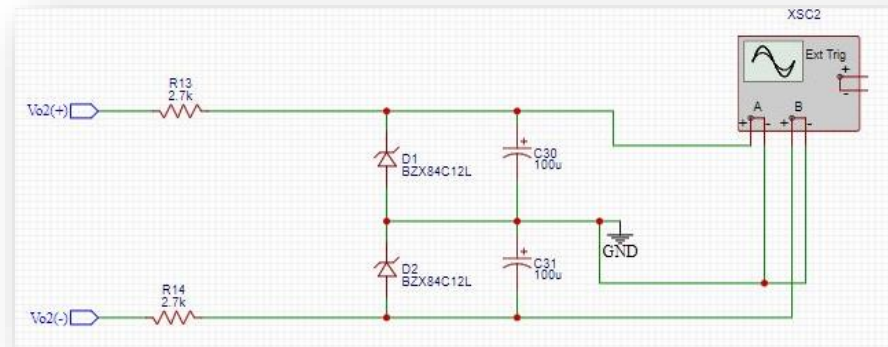
Σχήμα 4.5: Κυματομορφή τάσης μετά την εξομάλυνση

4.2 Κύκλωμα προενισχυτή

Το επόμενο στάδιο του συστήματος περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κυκλώματος του προενισχυτή. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιείται ο T.E. LM358.

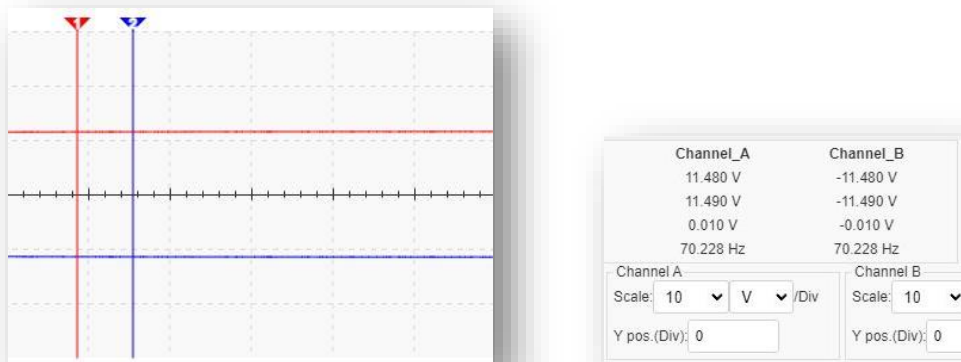
Αρχικά, η έξοδος του φίλτρου γίνεται είσοδος σε κύκλωμα σταθεροποίησης. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από δύο διόδους Zener με τάση Zener $V_Z = 12V$ σε παραλληλία με δύο ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές χωρητικότητας $100\mu F/16V$.

Ουσιαστικά το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως ένας μετατροπέας dc-dc υποβιβασμού της τάσης και η έξοδος του αποτελεί το κύκλωμα τροφοδοσίας του T.E. LM358 ο οποίος τροφοδοτείται με συμμετρική τροφοδοσία $\pm 12V$ και αποτελεί το βασικό εξάρτημα του προενισχυτή.



Σχήμα 4.6: Κύκλωμα σταθεροποίησης με Zener

Η συμμετρική τάση $\pm 12V$ απεικονίζεται παρακάτω. Η θετική τάση εξόδου αντιστοιχεί στην κόκκινη καμπύλη (Channel A-1) ενώ η αρνητική τάση εξόδου αντιστοιχεί στην μπλε καμπύλη (Channel B-2).



Σχήμα 4.7: Κυματομορφή τάσης μετά την σταθεροποίηση με Zener

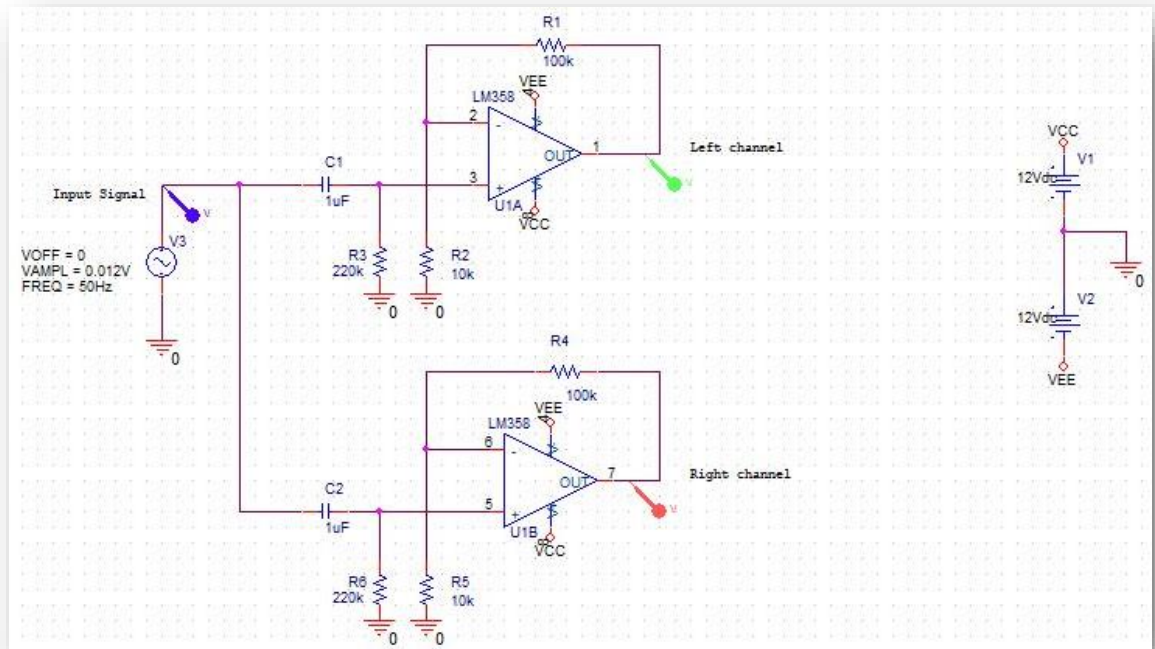
Από την πηγή ήχου εισέρχεται στο κύκλωμα του προενισχυτή στερεοφωνικός ήχος μέσω ενισχυμένου θωρακισμένου καλωδίου τύπου jack 6.3mm. Το σήμα αυτό (Input Signal) συνδέεται σε κάθε μία είσοδο του LM358, ο οποίος αποτελεί ένα δικτύωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή.

Οι πυκνωτές C_1 και C_2 τιμής $1\mu F$ λειτουργούν ως πυκνωτές σύζευξης με σκοπό να μπλοκάρουν τυχόν DC συνιστώσες του σήματος εισόδου.

Οι αντιστάσεις R_3 και R_5 τιμής $220K\Omega$ οι οποίες συνδέονται από τις μη αναστρέφουσες εισόδους προς τη γείωση χρησιμοποιούνται για το καθορισμό της αντίστασης εισόδου του προενισχυτή.

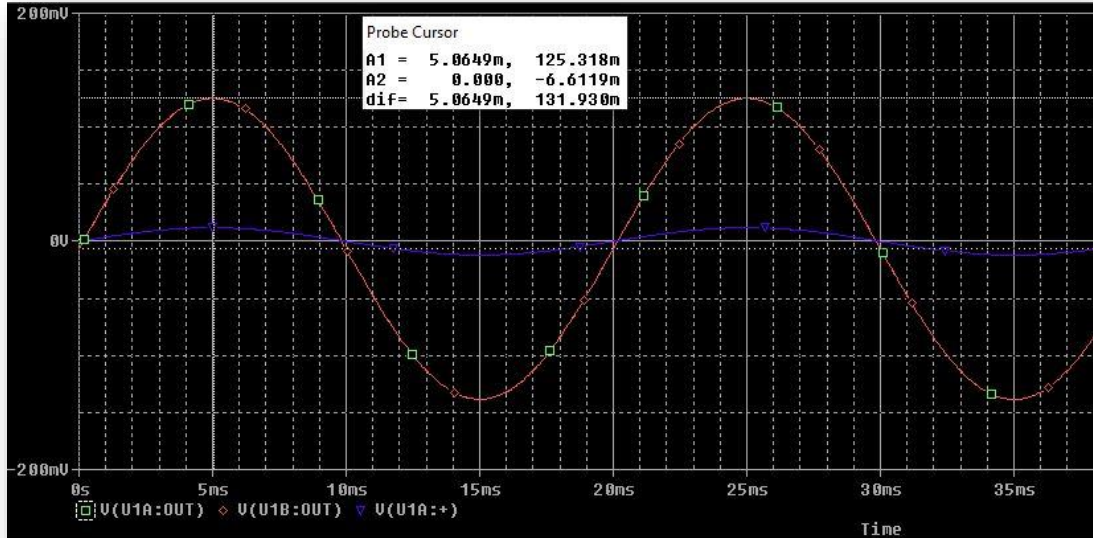
Το κέρδος τάσης, δηλαδή η ενίσχυση που δημιουργεί ο προενισχυτής, καθορίζεται από το σύστημα ανάδρασης που δημιουργούν τα ζεύγη αντιστάσεων R_1 - R_2 και R_4 - R_5 και υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{VCL} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{R_4}{R_5} = 1 + \frac{100K\Omega}{10K\Omega} = 11 \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.8: Σχηματικό διάγραμμα προενισχυτή

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται η τάση εισόδου (μωβ κέρσορας), η τάση εξόδου προς το αριστερό κανάλι (πράσινο κέρσορας) και η τάση εξόδου του προενισχυτή προς το δεξί κανάλι (κόκκινο κέρσορας). Επιβεβαιώνεται επομένως η ενίσχυση κατά 11 φορές που δημιουργεί το κύκλωμα προενισχυτή.

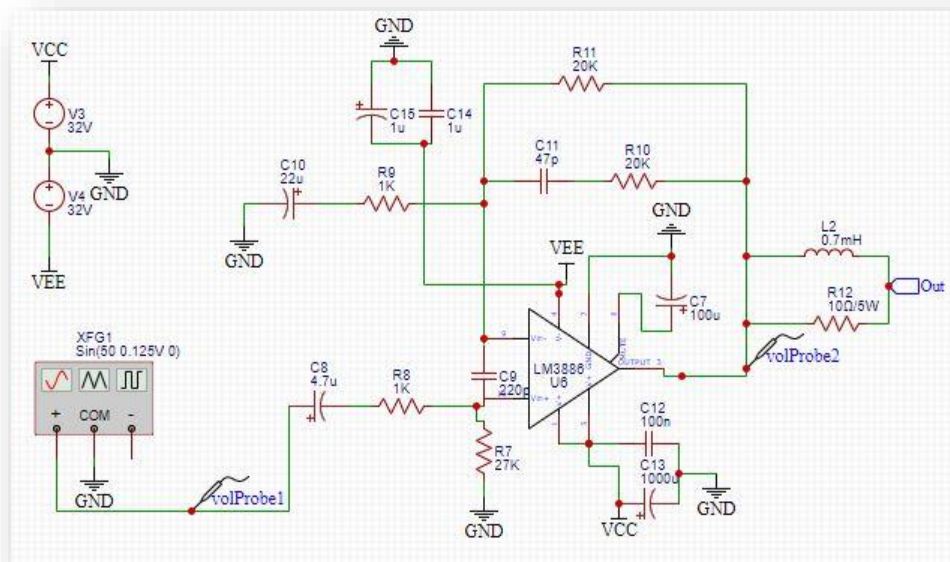


Σχήμα 4.9: Κυματομορφή εξόδου προενισχυτή

4.3 Κύκλωμα ενισχυτή

Το τελευταίο στάδιο του συστήματος περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κυκλώματος του τελικού ενισχυτή. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιείται ο Τ.Ε. LM3886Τ. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, απαιτείται η σχεδίαση του κυκλώματος του τελικού ενισχυτή μία φορά για κάθε κανάλι.

Στη μη αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. συνδέεται η έξοδος του προενισχυτή. Πιο συγκεκριμένα, η έξοδος στον ακροδέκτη 1 του LM358 συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή για το αριστερό κανάλι ενώ η έξοδος στον ακροδέκτη 7 του LM358 συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή για το δεξί κανάλι.



Σχήμα 4.10: Κύκλωμα τελικού ενισχυτή

Η γεννήτρια συχνοτήτων XFG1 αντιπροσωπεύει μία από τις εξόδους του προενισχυτή.

Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής C_8 χωρητικότητας $4.7\mu\text{F}$ συνδέεται αμέσως μετά την έξοδο του προενισχυτή με σκοπό να μπλοκάρει οποιαδήποτε DC τάση στην είσοδο του τελικού ενισχυτή και λειτουργεί ως πυκνωτής σύζευξης για το ηχητικό σήμα. Σε συνδυασμό με την αντίσταση R_7 τιμής $27\text{K}\Omega$ δημιουργούν ένα υπεραπλοποιημένο RC φίλτρο από το οποίο προκύπτει συχνότητα αποκοπής ίση με:

$$F_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_7 \cdot C_8} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 27 \cdot 10^3 \cdot 4.7 \cdot 10^{-6}} \cong 1.16\text{Hz} \quad (4.4)$$

Η αντίσταση R_8 τιμής $1\text{K}\Omega$ και ο πυκνωτής C_9 τιμής 220pF αποτελούν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο το οποίο προστατεύει την είσοδο του LM3886T από σήματα ραδιοσυχνοτήτων (RF). Η συχνότητα αποκοπής που προκύπτει είναι ίση με:

$$F_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_8 \cdot C_9} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-12}} \cong 723.8\text{KHz} \quad (4.5)$$

Η αντίσταση R_{11} τιμής $20\text{K}\Omega$ είναι η αντίσταση ανάδρασης η οποία σε συνδυασμό με την αντίσταση R_9 καθορίζουν το κέρδος του ενισχυτή το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{VCL} = \left(1 + \frac{R_{11}}{R_9}\right) = \left(1 + \frac{20\text{K}\Omega}{1\text{K}\Omega}\right) = 21 \quad (4.6)$$

Η αντίσταση R_{10} τιμής $20\text{K}\Omega$ και ο πυκνωτής C_{11} χωρητικότητας 47pF αποτελούν χαμηλοπερατό φίλτρο στο κύκλωμα ανάδρασης.

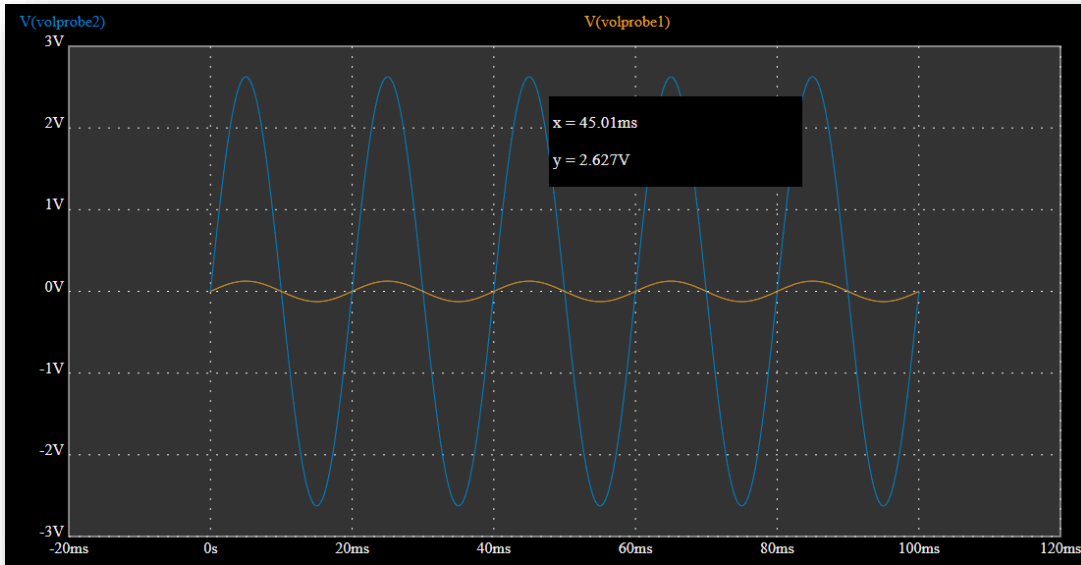
Τα ζεύγη πυκνωτών $C_{14}-C_{15}$ και $C_{12}-C_{13}$ που συνδέονται αντίστοιχα στους ακροδέκτες 4 (V-) και 1 και 5 (V+) του LM3886T χρησιμοποιούνται για την αποσύζευξη της τροφοδοσίας και για τη διασφάλιση της σταθερότητας του ενισχυτή. Λειτουργούν ουσιαστικά ως φίλτρα για το θόρυβο από την τροφοδοσία και αποτρέπουν τις ταλαντώσεις.

Τα στοιχεία L_2 και R_{12} αποτελούν ένα δίκτυο που ονομάζεται Thiele Network. Το δίκτυο αυτό μειώνει τις ταλαντώσεις που προκύπτουν από χωρητικά φορτία, κάτι το οποίο οφείλεται συνήθως στα καλώδια των ηχείων. Ταυτόχρονα δεν επιτρέπει στις ραδιοσυχνότητες που εμφανίζονται στα καλώδια των ηχείων να επιστρέψουν στην είσοδο του ενισχυτή μέσω του βρόχου ανάδρασης.

Το φύλλο δεδομένων προτείνει αντίσταση τιμής 10Ω ισχύος 5W συνδεδεμένη παράλληλα με έναν επαγωγέα $0.7\mu\text{H}$. Για τον στερεοφωνικό ενισχυτή της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιηθεί το προτεινόμενο δίκτυο, ένα για κάθε κανάλι.

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται η τάση εισόδου από τον προενισχυτή (volprobe1) και η τάση εξόδου του τελικού ενισχυτή (volprobe2). Επιβεβαιώνεται επομένως η ενίσχυση κατά 21 φορές που δημιουργεί το κύκλωμα τελικού ενισχυτή.

Σημειώνεται πως για την προσομοίωση θεωρήθηκε τάση εισόδου από τον προενισχυτή $0.125\text{V}/50\text{Hz}$.



Σχήμα 4.11: Κυματομορφή εξόδου τελικού ενισχυτή

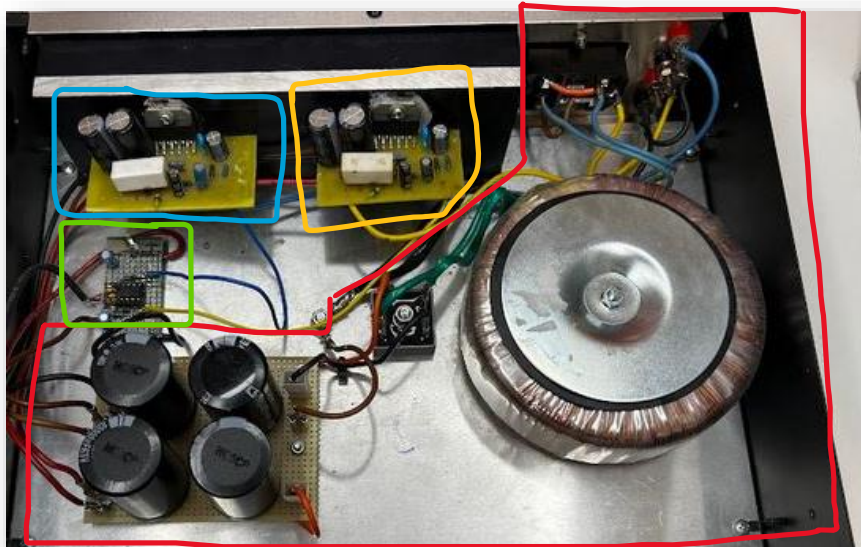
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα θεωρητικής ανάλυσης και σχεδίασης

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΤΙΜΗ	ΤΙΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
Τάση εισόδου προενισχυτή	0.012V _p	0.012
Τάση εξόδου προενισχυτή	11V _p	0.125V _p
Ενίσχυση προενισχυτή	$\frac{11}{1}=11$	$\frac{0.125}{0.012}=10.4$
Τάση εισόδου τελικού ενισχυτή	1V _p	0.125V _p
Τάση εξόδου τελικού ενισχυτή	21V _p	2.627V _p
Ενίσχυση τελικού ενισχυτή	$\frac{21}{1}=21$	$\frac{2.62}{0.125}=21$
Συνολική ενίσχυση	11·21=231	10.4·21=218.4

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση κυκλώματος ενισχυτή ήχου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η υλοποίηση του κυκλώματος και οι επιμέρους συνδέσεις των στοιχείων και των καλωδίων. Στο Σχήμα 5.1, διαχωρίζονται τα επιμέρους κυκλώματα τα οποία είναι:

- Κύκλωμα τροφοδοσίας (κόκκινο πλαίσιο)
- Κύκλωμα προενισχυτή (πράσινο πλαίσιο)
- Κύκλωμα ενισχυτή (μπλε πλαίσιο-αριστερό κανάλι και κίτρινο πλαίσιο-δεξί κανάλι)



Σχήμα 5.1: Το εσωτερικό της κατασκευής

5.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας

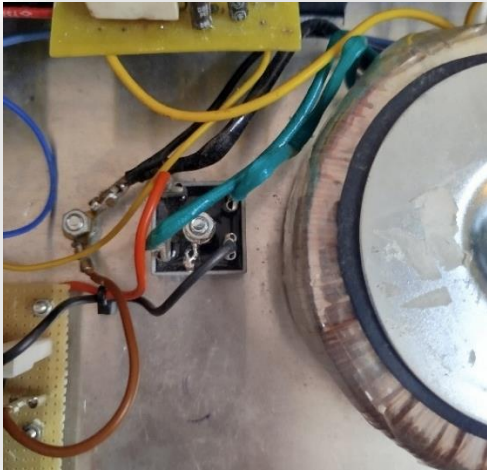
Το κύκλωμα τροφοδοσίας του κυκλώματος που περιλαμβάνει την ασφαλειοθήκη, τον μετασχηματιστή, τη διάταξη ανόρθωσης και το κύκλωμα εξομάλυνσης.



Σχήμα 5.2: Συνδέσεις διακόπτη και ασφαλειοθήκης

Αρχικά, γίνεται η σύνδεση του διακόπτη εισόδου ο οποίος συνδέεται εξωτερικά με την πρίζα. Δύο από τα πέντε καλώδια του διακόπτη χρησιμοποιούνται για την ασφαλειοθήκη (πορτοκαλί και καφέ), ένα για την σύνδεση με την κεντρική γείωση (κίτρινο) καθώς και δύο καλώδια για τη σύνδεση με τον μετασχηματιστή (μπλε), όπως φαίνονται στην Σχήμα 5.2.

Στη συνέχεια ακολουθεί η σύνδεση του μετασχηματιστή με τον ανορθωτή γέφυρας. Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3 και 5.4, τα πράσινα καλώδια του μετασχηματιστή οδηγούν στις AC εισόδους της γέφυρας, το μαύρο καλώδιο του μετασχηματιστή συνδέεται στην κεντρική γείωση του συστήματος ενώ στις DC εξόδους της γέφυρας ανόρθωσης συνδέεται ένα καλώδιο για την θετική DC τάση (πορτοκαλί καλώδιο) και ένα καλώδιο για την αρνητική DC τάση (μαύρο καλώδιο).



Σχήμα 5.3: Σύνδεσεις ανορθωτή γέφυρας



Σχήμα 5.4: Ακροδέκτες ανορθωτή γέφυρας

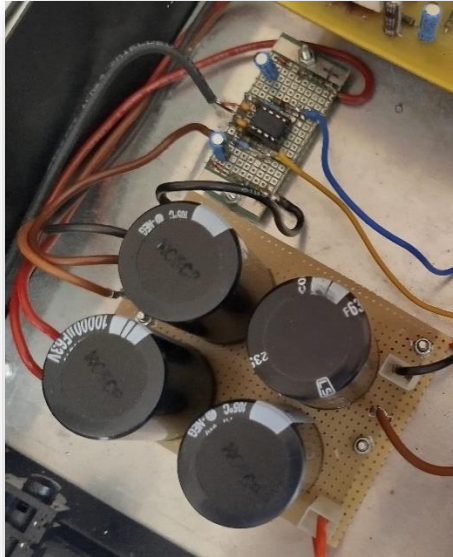
Στην έξοδο του ανορθωτή συνδέεται το κύκλωμα εξομάλυνσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τη γέφυρα προκύπτουν δύο έξοδοι: η θετική και η αρνητική με αντίστοιχα καλώδια το πορτοκαλί και το μαύρο τα οποία τροφοδοτούν το κύκλωμα εξομάλυνσης κατ' αντίστοιχο τρόπο. Δηλαδή, το πορτοκαλί καλώδιο αποτελεί τη θετική τάση εισόδου και το μαύρο την αρνητική. Το καφέ καλώδιο αντιπροσωπεύει τη γείωση.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, από την έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης λαμβάνουμε έξι καλώδια τα οποία συνδέονται στα κυκλώματα προενισχυτή και τελικού ενισχυτή, ως εξής:

- Το κάτω κόκκινο καλώδιο συνδέεται στην είσοδο του προενισχυτή και αποτελεί τη θετική τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος σταθεροποίησης. Πιο συγκεκριμένα συνδέεται στην αντίσταση R_{13} .
- Το πάνω κόκκινο καλώδιο συνδέεται στον τελικό ενισχυτή και συγκεκριμένα στους ακροδέκτες 1 και 5 που αποτελούν τη θετική τάση τροφοδοσίας του. Οι τροφοδοσίες των τελικών ενισχυτών και των δύο καναλιών είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους.
- Τα καφέ καλώδια συνδέονται στους δύο τελικούς ενισχυτές και αποτελούν τις γειώσεις των κυκλωμάτων.
- Το κάτω μαύρο καλώδιο συνδέεται στον τελικό ενισχυτή και συγκεκριμένα στον ακροδέκτη 4 που αποτελεί την αρνητική τάση τροφοδοσίας του. Οι τροφοδοσίες των τελικών ενισχυτών και των δύο καναλιών είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους.

- Το πάνω μαύρο καλώδιο συνδέεται στην είσοδο του προενισχυτή και αποτελεί τη θετική τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος σταθεροποίησης. Πιο συγκεκριμένα συνδέεται στην αντίσταση R_{13} .

Σημειώνεται ότι το κύκλωμα εξομάλυνσης υλοποιήθηκε σε διάτρητη πλακέτα

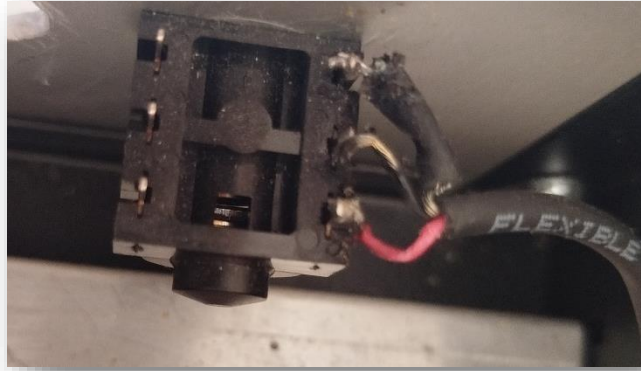


Σχήμα 5.5: Συνδέσεις κυκλώματος εξομάλυνσης

5.2 Κύκλωμα προενισχυτή

Το κύκλωμα του προενισχυτή συνδέεται τόσο με την έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης όσο και με την πηγή ήχου. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η υποδοχή στερεοφωνικού ήχου όπου μπορεί να συνδεθεί στερεοφωνικό καρφί 6.3 mm. Το ενισχυμένο θωρακισμένο καλώδιο που συνδέεται στην υποδοχή συνδέεται με τον προενισχυτή ως εξής:

- Το κόκκινο καλώδιο συνδέεται με τον πυκνωτή C_1 οποίος συνδέεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του LM358 στον ακροδέκτη 3 και η οποία δίνει έξοδο στον ακροδέκτη 1 απ' όπου λαμβάνεται σήμα για το αριστερό κανάλι.
- Το μαύρο καλώδιο συνδέεται με τον πυκνωτή C_2 οποίος συνδέεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του LM358 στον ακροδέκτη 5 και η οποία δίνει έξοδο στον ακροδέκτη 7 απ' όπου λαμβάνεται σήμα για το δεξί κανάλι.
- Το μπλε καλώδιο του καλωδίου βραχυκυκλώνεται με το καφέ καλώδιο στην είσοδο του προενισχυτή που αποτελεί τη γείωση.

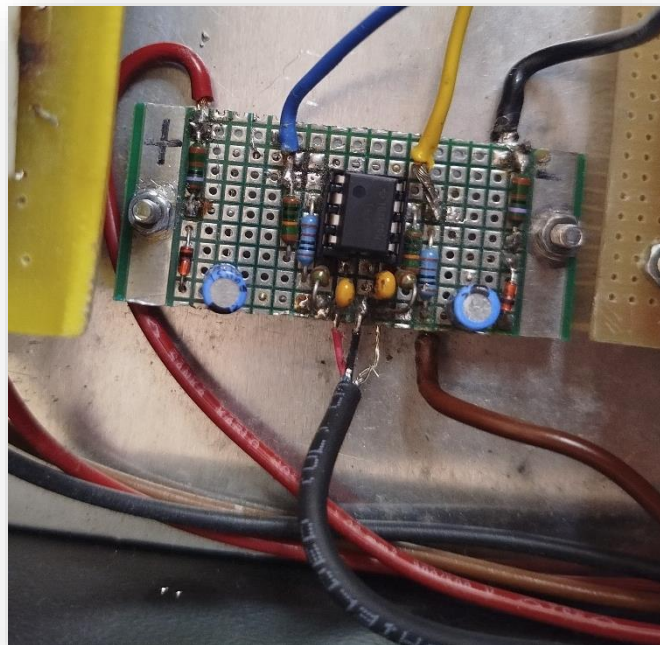


Σχήμα 5.6: Συνδέσεις υποδοχής ήχου

Η σύνδεση του προενισχυτή με το κύκλωμα εξομάλυνσης γίνεται ως εξής:

- Το καλώδιο από την πηγή ήχου συνδέεται ως είσοδος στο κύκλωμα
- Το κόκκινο και το μαύρο καλώδιο αποτελούν αντίστοιχα τη θετική και αρνητική τροφοδοσία και έχουν προκύψει από το κύκλωμα εξομάλυνσης που αναλύθηκε παραπάνω.
- Το μπλε και κίτρινο καλώδιο αντιπροσωπεύουν τις εξόδους του κυκλώματος και συνδέονται αντίστοιχα στους τελικούς ενισχυτές του αριστερού και δεξιού καναλιού.

Σημειώνεται πως το κύκλωμα του προενισχυτή έχει υλοποιηθεί σε διάτρητη πλακέτα.



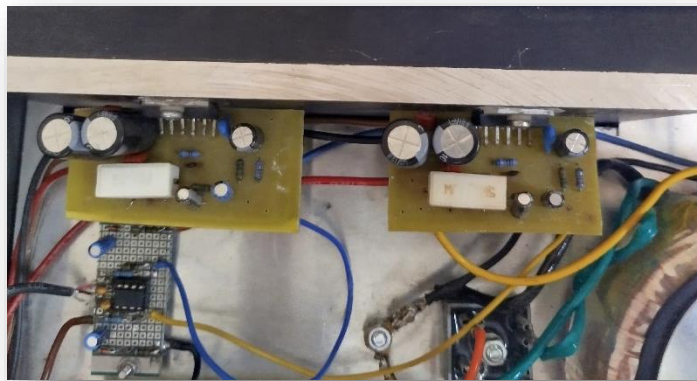
Σχήμα 5.7: Συνδέσεις προενισχυτή

5.3 Κύκλωμα τελικού ενισχυτή

Το κύκλωμα του τελικού ενισχυτή αποτελεί τον συνδυασμό δύο όμοιων κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν με σκοπό να ενισχυθεί στερεοφωνικός ήχος. Έτσι, καθένα από τα δύο κυκλώματα ενισχύει το σήμα που αργότερα θα στείλει σε ένα από τα δύο κανάλια εξόδου.

Στην Σχήμα 5.8 φαίνονται τα δύο κυκλώματα τα οποία συνδέονται με μία ψύκτρα. Σκοπός της ψύκτρας είναι να κρατήσει τον LM3886T σε κατάλληλη θερμοκρασία. Σημειώνεται πως το συγκεκριμένο πακέτο τελεστικού ενισχυτή αποτελείται από μέταλλο στο πίσω μέρος του εξαρτήματος. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η θερμοκρασία του αυξάνεται περίπου $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

Παράλληλα και πριν την σύνδεση του τελεστικού ενισχυτή με την ψύκτρα, τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος του εξαρτήματος μονωτικό-μίκρα καθώς και ένα λαστιχένιο περίβλημα στη βίδα με σκοπό να απομονώσει τη γείωση και την αρνητική τροφοδοσία των -32V .



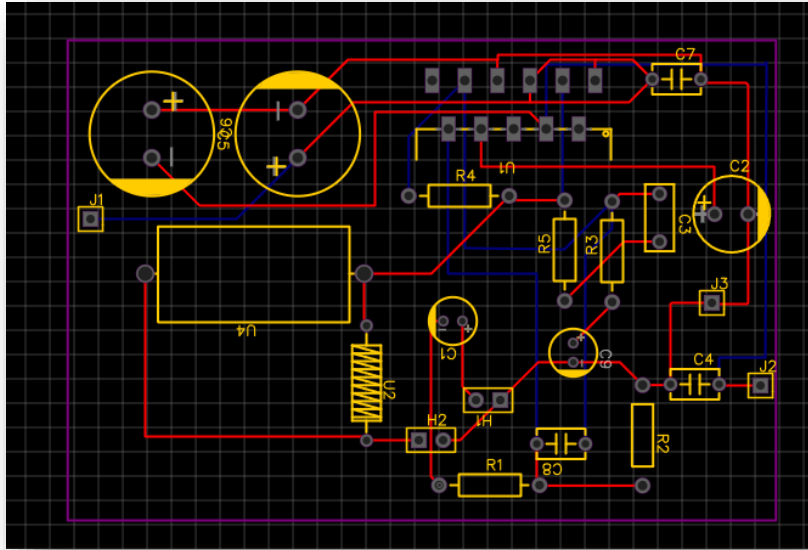
Σχήμα 5.8: Συνδέσεις τελικών ενισχυτών

Η τροφοδοσία του κυκλώματος τελικού ενισχυτή γίνεται από την έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης (μαύρο κόκκινο και καφέ καλώδιο). Στην είσοδό του συνδέεται το σήμα που προέρχεται από την έξοδο του κυκλώματος προενισχυτή (μπλε ή/και κίτρινο καλώδιο) και η έξοδός του συνδέεται στην έξοδο του συστήματος όπου υπάρχουν 4 υποδοχές όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.9. Οι δύο επάνω υποδοχές (μπλε και μαύρο καλώδιο) οδηγούν στο αριστερό κανάλι και οι δύο κάτω υποδοχές (κίτρινο και μαύρο καλώδιο) οδηγούν στο δεξί κανάλι.



Σχήμα 5.9: Συνδέσεις βυσμάτων εξόδου

Η υλοποίηση του κυκλώματος τελικού ενισχυτή πραγματοποιήθηκε σε πλακέτα μονής όψης. Το PCB σχέδιο ολοκληρώθηκε μέσω του λογισμικού EasyEDA.



Σχήμα 5.10: PCB πλακέτας τελικού ενισχυτή

Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι συνδέσεις που προέκυψαν μετά την αποχάλκωση της πλακέτας. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι επιπλέον συνδέσεις που έγιναν συμπληρωματικά στο χέρι καθώς ήταν αδύνατη η εξαρχής δημιουργία τους.

Τα επιμέρους κυκλώματα του ενισχυτή ήχου τοποθετήθηκαν σε μεταλλικό κουτί, η βάση του οποίου αποτελεί την κεντρική γείωσή του. Στο μπροστινό μέρος έχει τοποθετηθεί η υποδοχή της πηγής ήχου και συγκεκριμένα υποδοχή για βύσμα jack stereo 6.3mm. Στο πίσω μέρος του κουτιού έχει τοποθετηθεί η υποδοχή για την τροφοδοσία του μαζί με τον διακόπτη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης καθώς και οι υποδοχές για τα καλώδια της συσκευής εξόδου, δηλαδή του ηχείου.



Σχήμα 5.11: Μπροστινή όψη κατασκευής



Σχήμα 5.12: Πίσω όψη κατασκευής

5.4 Μετρήσεις κυκλώματος

Η προσομοίωση του κυκλώματος πραγματοποιήθηκε για ιδανικές τιμές όλων των στοιχείων. Παρ' όλα αυτά οι πραγματικές τιμές των στοιχείων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις μεταξύ τους συνδέσεις δεν είναι ίσες με τις θεωρητικές τιμές. Παρακάτω εξετάζονται οι αναμενόμενες τιμές και παρουσιάζονται οι τιμές που μετρήθηκαν με τη χρήση πολύμετρου και παλμογράφου για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος.

Η πρώτη μέτρηση αφορά την τάση του δικτύου που λαμβάνεται από την πρίζα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11 η τιμή αυτή είναι 244.9V έναντι της θεωρητικής τιμής των 230V.



Σχήμα 5.13: Μέτρηση τάσης δικτύου με πολύμετρο

Ακολουθεί η τιμή της τάσης στην έξοδο του ανορθωτή γέφυρας. Σύμφωνα με την εξίσωση (4.2) η τιμή αυτή θα έπρεπε να είναι $25V_{rms}$ αλλά στην πραγματικότητα η τιμή είναι $27.93V_{rms}$.



Σχήμα 5.14: Μέτρηση τάσης στην έξοδο του ανορθωτή

Κατά την ανάλυση του σχεδιασμού του κυκλώματος έγινε σαφές πως η έξοδος του κυκλώματος εξομάλυνσης είναι αυτή που τροφοδοτεί και το κύκλωμα του τελικού ενισχυτή. Για τον υπολογισμό της τάσης τροφοδοσίας του LM3886 λαμβάνονται υπόψη η ζητούμενη ισχύς εξόδου (P_o) αλλά και η αντίσταση του φορτίου (R_L) και υπολογίζονται ως εξής:

$$V_{o,peak} = \sqrt{2 \cdot R_L \cdot P_o} \quad (5.1)$$

Έτσι, για ζητούμενη ισχύ εξόδου 65W και φορτίο 4Ω (ηχείο στην έξοδο), η τάση τροφοδοσίας του LM3886 υπολογίζεται:

$$V_{o,peak} = \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 65} = 22.8V \quad (5.2)$$

Σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή για τον συγκεκριμένο Τ.Ε. προκύπτει ότι εμφανίζει dropout voltage ίση με 4V, επομένως η τροφοδοσία του άρα και η τάση εξόδου του κυκλώματος εξομάλυνσης θα πρέπει να είναι ίση με:

$$V_{o,peak} = 22.8V + 4V = 26.8V \quad (5.3)$$

Μετρώντας την τάση αυτή με το πολύμετρο προκύπτει τιμή τάσης 55.92Vp-p στην έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15 και τιμή τάσης 56.02Vp-p στην τροφοδοσία του LM3886 αντίστοιχα στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.15: Μέτρηση τάσης στην έξοδο του κυκλώματος εξομάλυνσης



Σχήμα 5.16: Μέτρηση τάσης στην τροφοδοσία του

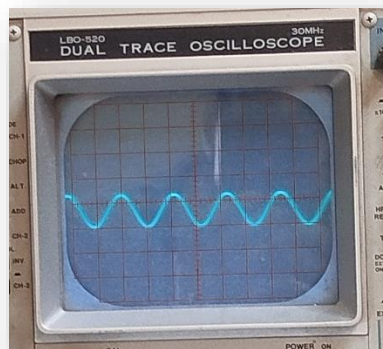
Τέλος, γίνεται έλεγχος της λειτουργίας του προενισχυτή και του τελικού ενισχυτή. Στην είσοδο του προενισχυτή ως πηγή ήχου συνδέεται γεννήτρια συναρτήσεων και ρυθμίζεται για ημιτονικό σήμα με τάση 0.012V_{p-p} και συχνότητα 1kHz.



Σχήμα 5.17: Σήμα από τη γεννήτρια συχνοτήτων

Στην είσοδο του προενισχυτή εφαρμόζεται το ημιτονικό αυτό σήμα. Ο παλμογράφος είναι ρυθμισμένος στα 0.01V/div. Άρα, η συνολική τάση που εμφανίζεται είναι:

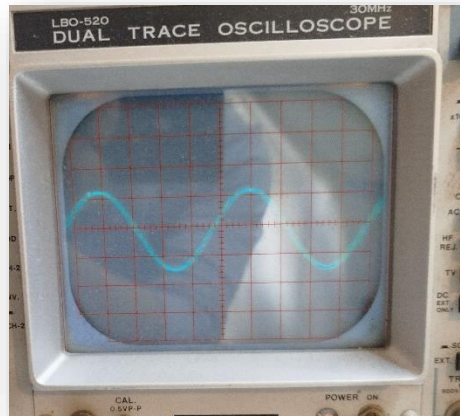
$$V_{in} = 0.01V \cdot 1.2 = 0.012V_{p-p} \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.18: Σήμα στην είσοδο του προενισχυτή

Στην έξοδο του προενισχυτή λαμβάνεται το σήμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.19. Ο παλμογράφος είναι ρυθμισμένος στα 0.05V/div. Άρα, η συνολική τάση που εμφανίζεται είναι:

$$V_o = 0.05V \cdot 2.5 = 0.125V_{p-p} \quad (5.5)$$



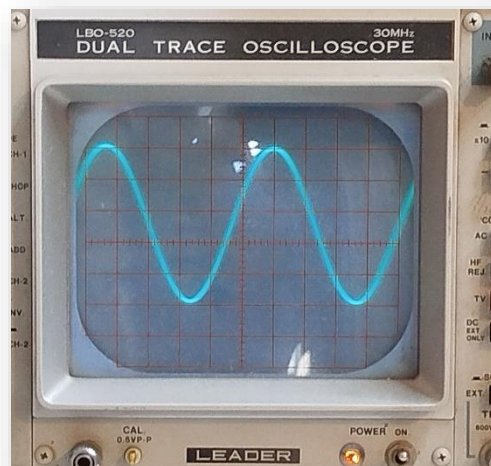
Σχήμα 5.19: Σήμα στην έξοδο του προενισχυτή

Η θεωρητική ενίσχυση που προέρχεται από το κύκλωμα του προενισχυτή σύμφωνα με τη σχέση (4.3) είναι 11. Παρ' όλα αυτά φαίνεται πως σε πραγματικές συνθήκες η ενίσχυση αυτή ισούται με:

$$A_{VCL} = \frac{0,125V_{p-p}}{0,012V_{p-p}} = 10.6 \quad (5.6)$$

Στην έξοδο του τελικού ενισχυτή λαμβάνεται το σήμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Ο παλμογράφος είναι ρυθμισμένος στα 0.5V/div. Άρα, η συνολική τάση που εμφανίζεται είναι:

$$V_o = 0.5V \cdot 5 = 2.5V_{p-p} \quad (5.7)$$



Σχήμα 5.20: Σήμα στην έξοδο του τελικού ενισχυτή

Η θεωρητική ενίσχυση που προέρχεται από το κύκλωμα του τελικού ενισχυτή σύμφωνα με τη σχέση (4.6) είναι 21. Παρ' όλα αυτά φαίνεται πως σε πραγματικές συνθήκες η ενίσχυση αυτή ισούται με:

$$A_{VCL} = \frac{2.5V_{p-p}}{0.125V_{p-p}} = 20 \quad (5.6)$$

Παρατηρείται λοιπόν πως ενώ στη θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος η συνολική ενίσχυση του σήματος έφτανε την τιμή $11 \cdot 21 = 231$, κατά την υλοποίησή του προκύπτει συνολική ενίσχυση $10.6 \cdot 20 = 212$.

Πίνακας 5. 1: Αποτελέσματα υλοποιημένου κυκλώματος

Τάση εισόδου προενισχυτή	0.012V _p
Τάση εξόδου προενισχυτή	0.125V _p
Ενίσχυση προενισχυτή	$\frac{0.125}{0.012} = 10.6$
Τάση εισόδου τελικού ενισχυτή	0.125V _p
Τάση εξόδου τελικού ενισχυτή	2.5V _p
Ενίσχυση τελικού ενισχυτή	$\frac{2.5}{0.125} = 20$
Συνολική ενίσχυση	$10.6 \cdot 20 = 212$

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός ενισχυτή ήχου. Αφού μελετήθηκαν τα επιμέρους κυκλώματα του ενισχυτή και έγινε η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων για κάθε ένα από αυτά, έγινε η προσομοίωση του τελικού κυκλώματος. Μέσω της προσομοίωσης έγινε κατανοητός ο τρόπος σύνδεσης των κυκλωμάτων τροφοδοσίας, προενισχυτή και ενισχυτή και έγινε έλεγχος της ορθότητας των θεωρητικών υπολογισμών. Ακολούθησε η υλοποίηση του κυκλώματος. Υλοποιήθηκε αρχικά το κύκλωμα τροφοδοσίας στο οποίο περιλαμβάνεται κύκλωμα εξομάλυνσης το οποίο ολοκληρώθηκε σε διάτρητη πλακέτα, ακολούθησε το κύκλωμα προενισχυτή το οποίο επίσης κατασκευάστηκε σε διάτρητη πλακέτα και έπειτα το κύκλωμα του τελικού ενισχυτή ο οποίος αποτυπώθηκε σε πλακέτα μονής όψης αφού πρώτα έγινε το PCB σχέδιο μέσω κατάλληλου λογισμικού. Τέλος, διαμορφώθηκε το μεταλλικό κουτί που φιλοξενεί τις παραπάνω πλακέτες όπου ετοιμάστηκαν οι απαραίτητες τρύπες για τις διάφορες υποδοχές του κυκλώματος (ασφαλειοθήκη-διακόπτης, βύσματα εισόδου και εξόδου).

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του ενισχυτή. Παρατηρήθηκε πως το κέρδος τόσο του προενισχυτή όσο και του τελικού ενισχυτή ήταν πάρα πολύ κοντά στις επιθυμητές τιμές οι οποίες είχαν υπολογιστεί θεωρητικά. Παρατηρήθηκαν επίσης μερικές αποκλίσεις στις τιμές των τάσεων εξόδου των επιμέρους βαθμίδων οι οποίες δικαιολογούνται βάση της μη ιδανικής λειτουργίας των εξαρτημάτων σε σχέση με το πρόγραμμα προσομοίωσης.

Συνολικά, η κατασκευή ενός ενισχυτή προϋποθέτει τη μελέτη αρκετών κυκλωμάτων και στοιχείων, τα οποία θα πρέπει να επιλεγούν με προσοχή ώστε ο ενισχυτής να είναι λειτουργικός. Ο ολοκληρωμένος ενισχυτής με βάση τις μετρήσεις που έγιναν αλλά και μετά από δοκιμή με σύνδεση σε πηγή ήχου είναι λειτουργικός και προσφέρει την ενίσχυση την οποία έχει σχεδιαστεί να προσφέρει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π. Παπαβραμίδου και Δ. Παπακώστας, *Ηλεκτρονικές Εξερευνήσεις*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
- [2] A. P. Malvino and D. J. Bates, *Ηλεκτρονική Αρχές και Εφαρμογές*, Μτφρ. Π. Παπαβραμίδου, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [3] Μ. Σπάσος και Κ. Αβραμίδης, *Σύγχρονες Εφαρμογές Αναλογικών Ηλεκτρονικών*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβαζή, 2015.
- [4] Σ. Λουτρίδης, *Ηλεκτροακουστική και Ηχητικές Εγκαταστάσεις*, Αθήνα: Εκδόσεις Ίων, 2009.
- [5] Γ. Χατζαράκης, *Ηλεκτρικά Κυκλώματα*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [6] Σ. Πακτίτης, *Αναλογικά Φίλτρα*, Αθήνα: Εκδόσεις Ίων, 2007.
- [7] A. Sedra and K. Smith, *Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2017.
- [8] Ι. Κιοσκερίδης, *Ηλεκτρονικά ισχύος*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [9] F. H. Liew, “The Design of Operational Amplifier for Low Voltage and Low Current Sound Energy Harvesting System,” *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, vol. 318, Dec. 2017.
- [10] G. Han, H. Li, H. Chen, Y. Sun, J. Zhang, S. Wang and Z. Liu, “Design and implementation of the noise sensor signal conditioning,” *6th International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, 2015, pp. 305-310.