

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ενισχυτής Ήχου Κλάσης A/B
με Τροφοδοτικό»



Του Φοιτητή : Χρήστου Φιλιά
Αρ. Μητρώου: 516323

Επιβλέπων
Παπακώστας Δημήτριος
Καθηγητής

Ημερομηνία 22/12/2025

Τίτλος Δ.Ε: Ενισχυτής Ήχου Κλάσης A/B με Τροφοδοτικό

Κωδικός Δ.Ε. 25237

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Χρήστος Φιλιάς

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Παπακόστας Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. ...

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. ...

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 Χρήστου Φιλιά 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' οιονδήποτε 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 διπλωματικής 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

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αναλυτική παρουσίαση των βασικών βημάτων και μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή ενός Ενισχυτή Ήχου της Τάξεως A/B με ενσωματωμένο Τροφοδοτικό.

Το θέμα αυτό δεν επιλέχθηκε τυχαία αλλά στοχευμένα, όχι μόνο λόγω της τεχνικής του σημασίας, αλλά και εξαιτίας του προσωπικού μου ενδιαφέροντος για τον ηλεκτρισμό και του πάθους μου για τη μουσική τα οποία συνδυάζονται ιδανικά σε αυτήν την κατασκευή.

Η ευκαιρία που μου δίνεται μέσα από αυτήν την εργασία είναι να δημιουργήσω κάτι εξολοκλήρου από την αρχή βήμα προς βήμα, μελετώντας την κάθε πιθανή δυσκολία που θα προκύψει με υπομονή και επιμονή προς την επίλυση της, εφαρμόζοντας γνώσεις και εμπειρίες που έχω συλλέξει κατά τα προηγούμενα χρόνια.

Αυτή η διαδικασία καθίστασε ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και συναρπαστική για εμένα αλλά και ουσιαστική για την ακαδημαϊκή και την προσωπική μου εξέλιξη.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε και υλοποιήθηκε ένας ενισχυτής ήχου κλάσης A/B, ο οποίος λειτουργεί με δικό του τροφοδοτικό. Στόχος της μελέτης ήταν η παρουσίαση και ανάλυση όλων των απαραίτητων σταδίων για τη βήμα προς βήμα κατασκευή και ολοκλήρωση ενός πλήρως λειτουργικού κυκλώματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνικές όσο και τις εργονομικές παραμέτρους που διασφαλίζουν την ορθή και ασφαλή λειτουργία του ενισχυτή. Η εργασία επικεντρώθηκε αρχικά στην επιλογή και ανάλυση των υλικών κατασκευής, με έμφαση στην κατανόηση των χαρακτηριστικών και των τιμών των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, καθώς και στην επισήμανση των κρίσιμων σταδίων προσοχής κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης, ώστε να αποφευχθούν λάθη και πιθανές αστοχίες. Παράλληλα, αναλύθηκαν τα μέτρα προφύλαξης και τα απαραίτητα εργαλεία που αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία για τη σωστή εκτέλεση της διαδικασίας.

Σε επόμενο στάδιο, η εργασία προχώρησε στη συναρμολόγηση της πλακέτας πάνω σε πειραματική βάση, τη μεταφορά της σε μόνιμο μεταλλικό πλαίσιο και την ασφαλή τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων, με έμφαση στη σταθερότητα, την αξιοπιστία και την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέρος της μελέτης αποτέλεσαν οι πειραματικές και θεωρητικές μετρήσεις, οι οποίες επέτρεψαν την αξιολόγηση της απόδοσης του ενισχυτή, την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του και τη σύγκριση με τις αρχικές θεωρητικές προσδοκίες. Τέλος, η εργασία ολοκληρώθηκε με τη διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντικές βελτιώσεις. Η μελέτη αυτή παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την κατασκευή και αξιολόγηση ενός πλήρως λειτουργικού ενισχυτή ήχου κλάσης A/B.

«Class A/B Audio Amplifier with Power Supply»

«Christos Filias»

Abstract

In the present study, a Class A/B audio amplifier with its own dedicated power supply was examined and implemented. The aim of the study was to present and analyze all the necessary stages for the step-by-step construction and completion of a fully functional circuit, taking into account both technical and ergonomic parameters that ensure the correct and safe operation of the amplifier. The work initially focused on the selection and analysis of the construction materials, emphasizing the understanding of the characteristics and values of the electronic components, as well as the identification of critical points of attention during assembly to prevent errors and potential failures. At the same time, precautionary measures and essential tools, which constitute integral elements for the proper execution of the process, were thoroughly examined.

In the next stage, the study progressed to the assembly of the circuit board on an experimental breadboard, its transfer to a permanent metal chassis, and the safe installation of all components, with particular attention to stability, reliability, and the prevention of short circuits. A particularly significant part of the study involved experimental and theoretical measurements, which allowed for the evaluation of the amplifier's performance, the verification of its correct operation, and comparison with the initial theoretical expectations. Finally, the work concluded with the formulation of conclusions and proposals for future improvements. This study provides a comprehensive framework for the construction and evaluation of a fully functional Class A/B audio amplifier.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα από καρδιάς να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς όλους τους καθηγητές του Τμήματος, οι οποίοι, μέσα από τη σταδιοδρομία μας στο Πανεπιστήμιο, μας δίνουν τη δυνατότητα να έρθουμε σε επαφή με τη γνώση και να αναπτύξουμε τις ικανότητές μας, υλοποιώντας κατασκευές αυτού του επιπέδου ή ακόμη πιο σύνθετες. Η καθοδήγησή τους και η διδασκαλία τους αποτέλεσαν πολύτιμο οδηγό σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, προσφέροντάς μου τη δυνατότητα να εξελιχθώ τόσο ακαδημαϊκά όσο και προσωπικά. Χαίρομαι βαθύτατα για τα φοιτητικά μου χρόνια που έζησα στο Διεθνές Πανεπιστήμιο και ελπίζω ότι οι συνάδελφοι φοιτητές θα αξιοποιούν τη γνώση που αποκτούν ως ένα πολύτιμο εργαλείο για την υπόλοιπη μελλοντική τους πορεία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή Δημήτριο Παπακώστα, ο οποίος υπήρξε ο επιβλέπων καθηγητής μου. Μέσα από εποικοδομητικές συζητήσεις και τη μελέτη των δημοσιευμένων έργων του, μου παρείχε καθοδήγηση και υποστήριξη, καθιστώντας τη διαδικασία ολοκλήρωσης αυτής της εργασίας ιδιαίτερα ομαλή και χωρίς σημαντικές δυσκολίες.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων.....	ix
Κατάλογος Πινάκων	xi
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	1
1.1 Ενισχυτής Ήχου	1
1.2 Αφετηριακή Προσέγγιση Της Κατασκευής	1
1.3 Βασικά Στοιχεία Της Κατασκευής Ενισχυτή Ήχου με Τροφοδοτικό	2
Κεφάλαιο 2 ^ο Υλικά Που Χρησιμοποιήθηκαν	3
2.1 Πυκνωτές	3
2.2 Αντιστάσεις.....	6
2.3 Δίοδοι.....	8
2.4 Γέφυρες Διόδων	11
2.5 Ποτενσιόμετρο	13
2.6 Μετασχηματιστής.....	14
2.7 Transistor	16
Κεφάλαιο 3ο: Λίγα Λόγια Για Τους Ενισχυτές	18
3.1 Κλάση Α	18
3.2 Κλάση Β (push-pull).....	19
3.3 Κλάση Α/Β.....	20
Κεφάλαιο 4ο: Κατασκευή	22
4.1 Τροφοδοτικό.....	22
4.2 Ενισχυτής.....	26
4.3 Σχολιασμός Τιμών Που Επιλέχθηκαν.....	46
Κεφάλαιο 5ο: Από Την Θεωρία Στην Πράξη	53
5.1 Υλοποίηση Σε Πειραματική Πλακέτα Ράστερ.....	53
5.2 Θεωρητικές - Πείραματικές Μετρήσεις.....	54
5.3 Ενσωμάτωση Σε Μόνιμη Πλακέτα.....	56.
5.4 Ενσωμάτωση Σε Προστατευτικό Πλαίσιο.....	59

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα / Προτάσεις Για Βελτίωση	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	63

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.3 Σχηματικό Κατασκευής.....Αυτοσχέδια Εικόνα.....	2
Εικόνα 2.1.1 Πυκνωτές https://depositphotos.com/	3
Εικόνα 2.1.2 Εφεύρεση Πυκνωτή https://sciencebob.com/	4
Εικόνα 2.2.1 Αντιστάσεις https://rfnews.gr/	6
Εικόνα 2.2.2 Ο Georg Ohm επί το έργον: (Πειραματική διάταξη μέτρησης του ρεύματος που διαρρέει χάλκινη αγωγίμη ταινία)..... https://myschlab.com/	7
Εικόνα 2.3.1 Δίοδος PN..... https://douflias.sites.sch.gr/	8
Εικόνα 2.3.2 Σύμβολο Διόδου..... https://douflias.sites.sch.gr/	8
Εικόνα 2.3.3 Δίοδος Εμπορίου..... https://douflias.sites.sch.gr/	8
Εικόνα 2.3.4 Επαφή PN..... https://douflias.sites.sch.gr/	9
Εικόνα 2.3.5 Σχηματισμός Περιοχής Απογυμνώσεως..... https://douflias.sites.sch.gr/	9
Εικόνα 2.3.6 Χαρακτηριστική Της Διόδου σε Θερμοκρασία 25° C... https://learnelectronics.gr/	10
Εικόνα 2.3.7 Ορθή Πόλωση..... https://douflias.sites.sch.gr/	10
Εικόνα 2.3.8 Ανάστροφη Πόλωση..... https://douflias.sites.sch.gr/	10
Εικόνα 2.4.1 Γέφυρα Διόδων Εσωτερικά-Σχηματικό..... https://electro.tomathouse.com/	11
Εικόνα 2.4.2 Ανόρθωση Σήματος..... https://www.hlektronika.gr/	12
Εικόνα 2.4.3 Δίοδοι Εμπορίου..... https://electro.tomathouse.com/	12
Εικόνα 2.5.1 Ρυθμιστική (μεταβλητή) Αντίσταση..... https://www.arnos.gr/	13
Εικόνα 2.5.2 Ρυθμιστική (μεταβλητή) Αντίσταση..... https://www.arnos.gr/	13
Εικόνα 2.6.1 Μετασχηματιστής..... https://www.djshop.gr/	14
Εικόνα 2.6.2 Μετασχηματιστής Τάσης..... https://www.noesis.edu.gr/	15
Εικόνα 2.7.1 Δομή και κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ (α) PNP και (β) ενός NPN https://users.sch.gr/kgiannaras/	16
Εικόνα 2.7.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Συλλέκτη..... https://learnelectronics.gr/	17
Εικόνα 3.1.1 Ενισχυτής τάξης Α...Διαφάνειες Πανεπιστημίου <Ηλεκτρονικά Κυκλώματα>.....	18
Εικόνα 3.2.1 Κλάση Β... https://alexkaltsas.wordpress.com/	19
Εικόνα 3.3.1 Push-pull με Πόλωση Διόδων.....Αυτοσχέδια Εικόνα.....	21
Εικόνα 4.1.1 Εναλλασσόμενη Τάση...Διαφάνειες Πανεπιστημίου <Ηλεκτρονικά Κυκλώματα>.....	22

Εικόνα 4.1.2 Πλήρως Ανορθωμένη Τάση Χωρίς Φίτρο...Διαφάνειες Πανεπιστημίου <Ηλεκτρονικά Κυκλώματα>.....	22
Εικόνα 4.1.3 Διαφορές <<Με>> και <<Χωρίς>> τον Πυκνωτή Εξομάλυνσης Στην Έξοδο Διαφάνειες Πανεπιστημίου <Ηλεκτρονικά Κυκλώματα>.....	23
Εικόνα 4.1.4 Σχηματικό Τροφοδοτικού : (Από Μέρος Της Εργασίας).....Αυτοσχέδια Εικόνα.....	24
Εικόνα 4.1.5 Εσωτερικό Τροφοδοτικό PS1... https://www.easytechnology.gr/	25
Εικόνα 4.2.1 NE5532..... https://solderingmind.com/	26
Εικόνα 4.2.2 LM358..... https://www.kasuo.com/	28
Εικόνα 4.2.3 Χαρακτηριστικά..... https://www.alldatasheet.com/	30
Εικόνα 4.2.4 MJE15032 Transistor https://www.ic-components.com/	31
Εικόνα 4.2.5 2N3055 Transistor..... https://www.rs-online.id/	32
Εικόνα 4.2.6..... https://www.alldatasheet.com/	33
Εικόνα 4.2.7 Transistor..... https://www.sereniasupply.com/	33
Εικόνα 4.2.8 MJE15032..... https://www.alldatasheet.com/	33
Εικόνα 4.2.9 Τροφή για Σκέψη..... https://dreamonline.gr/	34
Εικόνα 4.2.10 Ενισχυτής Ήχου..... https://hxosplus.gr/	38
Εικόνα 4.2.11 Thermal Runaway https://www.youtube.com/watch?v=ASOHUXa0ucw	41
Εικόνα 4.2.12 Αντιστάσεις Ισχύος..... https://www.pilianidis.gr/	43
Εικόνα 4.2.13 Μεγάφωνο..... https://anoixtosxoleio.weebly.com/	45
Εικόνα 4.3.1 BR3510W..... https://www.tme.eu/	46
Εικόνα 4.3.2 Από Την Θεωρία Στην Πράξη... https://www.linkedin.com/	52
Εικόνα 5.2.1 Πειραματική Πλακέτα..... https://electronicroom.eu/	55
Εικόνα 5.3.1 Ηλεκτρονική Πλακέτα Εγκατάστασης Υλικών-Εξαρτημάτων https://grobotronics.com/	56
Εικόνα 5.3.2 Κολλητήρι... https://store.fixmobile.gr/	58
Εικόνα 5.3.3 Πολύμετρο... https://www.meidanis.gr/	58
Εικόνα 5.4.1 Διαδικασία Κατασκευής	Αυτοσχέδια Εικόνα.....59
Εικόνα 5.4.2 Μόνωση Της Κάτω Επιφάνειας.....Αυτοσχέδια Εικόνα.....	59
Εικόνα 5.4.3 Διαδικασία Κατασκευής Τοποθέτηση Πλακέτας.....Αυτοσχέδια Εικόνα.....	61
Εικόνα 5.4.4 Διαδικασία Κατασκευής	Αυτοσχέδια Εικόνα.....61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Διηλεκτρική Σταθερά.....	https://ebooks.edu.gr/	5
Πίνακας 2.2 Αντίσταση Υλικών.....	https://ebooks.edu.gr/	7

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ενισχυτής Ήχου

Η κατασκευή ενός ενισχυτή ήχου δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική διαδικασία, αλλά μια δημιουργική πράξη με βαθιά συναισθηματική διάσταση. Πρόκειται για μια κατασκευή που αλληλεπιδρά άμεσα με μία από τις βασικότερες αισθήσεις του ανθρώπου, την ακοή και μέσω αυτής επηρεάζει τη διάθεση, τα συναισθήματα και την ψυχική κατάσταση. Από το στάδιο της παραγωγής έως το τελικό αποτέλεσμα, ο ήχος που αποδίδεται μπορεί να μετατραπεί σε φορέα έκφρασης, παρηγοριάς και εσωτερικής ηρεμίας.

Ένας ποιοτικός ενισχυτής, σε συνδυασμό με κατάλληλο τον εξοπλισμό, προσφέρει πιστή αναπαραγωγή μουσικών οργάνων και ηχητικών λεπτομερειών, επιτρέποντας στον ακροατή να βιώσει τη μουσική με αυθεντικότητα σε βάθος. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, ο ήχος αποκτά τη δύναμη να ξυπνά μνήμες, να ανακαλεί συναισθήματα και να μεταφέρει τον ακροατή σε διαφορετικές χρονικές ή συναισθηματικές στιγμές. Έτσι, η αξία ενός ποιοτικού ενισχυτή ήχου υπερβαίνει την εμφανή τεχνική του υπόσταση, αποκαλύπτοντας τη σημαντική του συμβολή στην ανθρώπινη εμπειρία και στην ουσιαστική απόλαυση της μουσικής.

1.2 Αφετηριακή Προσέγγιση της Κατασκευής

Ένας ενισχυτής ήχου αποτελείται από επιμέρους τμήματα και διακριτά στοιχεία, τα οποία συνθέτουν ένα ενιαίο και λειτουργικό σύνολο. Η επιτυχής υλοποίησή του προϋποθέτει προσεκτικό σχεδιασμό σε κάθε στάδιο, από τη θεωρητική σύλληψη της λειτουργίας του έως την τελική κατασκευή και δοκιμή. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη μεθοδολογία που ακολουθείται, καθώς αυτή καθορίζει την ορθότητα, την αξιοπιστία και την απόδοση του τελικού κυκλώματος. Η διαδικασία ξεκινά με τη σωστή σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος, όπου λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ηλεκτρικές παράμετροι όσο και οι απαιτήσεις ποιότητας ήχου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μεταφορά του σχεδίου σε ράστερ και η σχεδίαση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος. Σε αυτό το στάδιο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη διάταξη των εξαρτημάτων, στη δρομολόγηση των αγωγών και στη σωστή γείωση, ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές, θόρυβος και ανεπιθύμητες απώλειες σήματος. Η ποιότητα της πλακέτας και η ακρίβεια στην κατασκευή της επηρεάζουν άμεσα τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του ενισχυτή.

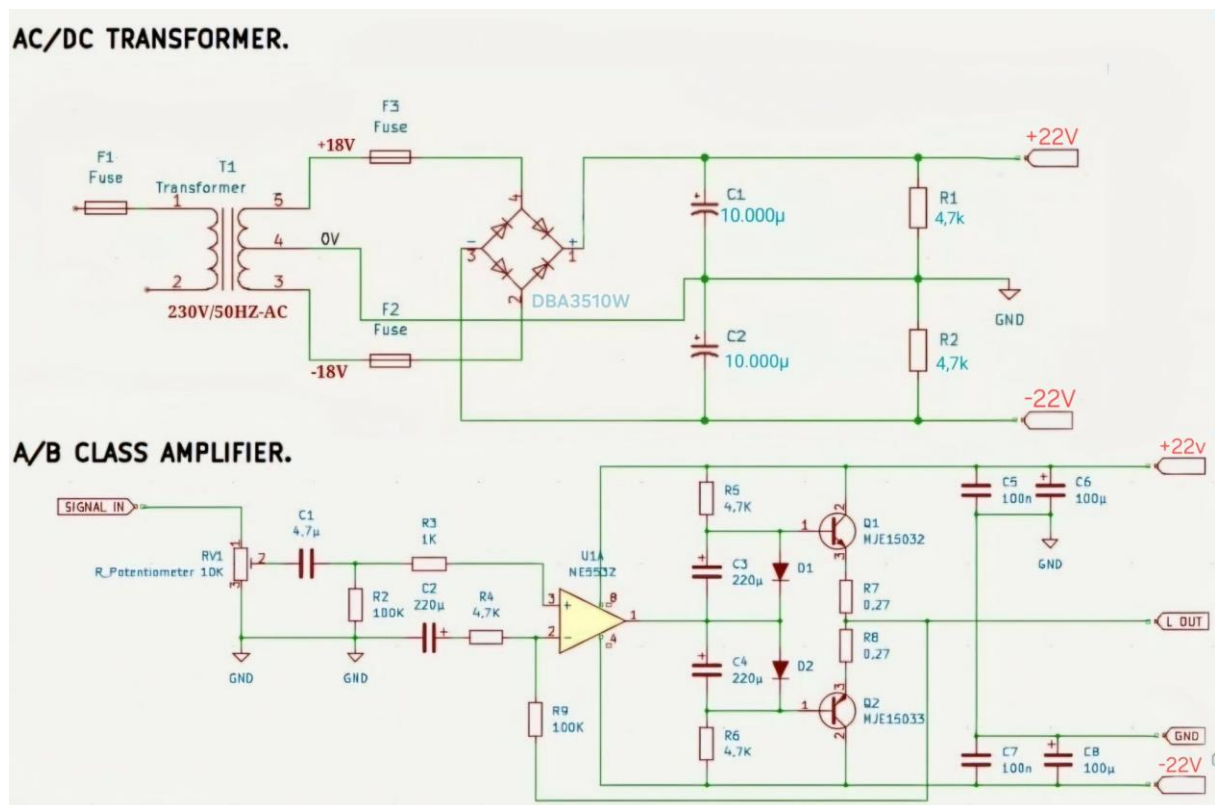
Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο τροφοδοτικό του συστήματος, καθώς αποτελεί θεμελιώδες μέρος της λειτουργίας του ενισχυτή. Το τροφοδοτικό διαχειρίζεται υψηλότερες τάσεις και ρεύματα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αυξημένη προσοχή τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην υλοποίησή του. Ακόμη και μικρά λάθη σε αυτό το στάδιο μπορούν να αποβούν καθοριστικά ή και καταστροφικά για το σύνολο της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται επαρκής γνώση των ηλεκτρονικών αρχών, τήρηση συγκεκριμένων μέτρων ασφαλείας και ενσωμάτωση προστατευτικών στοιχείων, όπως ασφάλειες και κατάλληλα κυκλώματα προστασίας. Η συστηματική και προσεκτική προσέγγιση σε κάθε βήμα της διαδικασίας διασφαλίζει όχι μόνο την ασφαλή λειτουργία του ενισχυτή, αλλά και την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος, τόσο σε επίπεδο τεχνικής αξιοπιστίας όσο και σε ποιότητα ήχου.

1.3 Βασικά Στοιχεία Της Κατασκευής Ενισχυτή Ήχου με Τροφοδοτικό

Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται αναφορά στα βασικά υλικά και εξαρτήματα που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός ενισχυτή ήχου σε συνδυασμό με το αντίστοιχο τροφοδοτικό του. Η επιλογή και η σωστή χρήση των υλικών αυτών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη λειτουργικότητα, την ασφάλεια και την ποιότητα του τελικού συστήματος. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν αρχικά σε γενικό επίπεδο, ώστε να αποκτηθεί μια συνολική εικόνα της δομής και της λογικής του κυκλώματος.

Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο μετασχηματιστής, οι ασφάλειες και τα καλώδια, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την τροφοδοσία και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται γέφυρες διόδων ανόρθωσης, για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχόμενη. Στο κύκλωμα συναντώνται επίσης αντιστάσεις και πυκνωτές διαφόρων τύπων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ρύθμιση, φιλτράρισμα και σταθεροποίηση των ηλεκτρικών μεγεθών. Ιδιαίτερη σημασία έχουν ακόμη οι σταθεροποιητές τάσης, τα τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα οποία αποτελούν τον βασικό πυρήνα ενίσχυσης και ελέγχου του σήματος. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται ποτενσιόμετρα για τη ρύθμιση παραμέτρων, καθώς και διάφοροι τύποι διόδων και πυκνωτών, ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού και της λειτουργίας του ενισχυτή.

Στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, ορισμένα από τα παραπάνω υλικά θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα, με έμφαση στον ρόλο τους, στα χαρακτηριστικά τους και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται η σταδιακή μετάβαση από τη γενική παρουσίαση στη λεπτομερή κατανόηση των βασικών στοιχείων της κατασκευής.



Εικόνα 1.3 Σχηματικό Κατασκευής

Κεφάλαιο 2: Υλικά Που Χρησιμοποιήθηκαν

2.1 Πυκνωτές

Σε πλήθος ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή, όπως τα στερεοφωνικά συστήματα, οι τηλεοράσεις, οι τηλεφωνικές συσκευές και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, παρατηρείται η ανάγκη προσωρινής αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου [1]. Η αποθήκευση αυτή πραγματοποιείται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε το φορτίο να μπορεί να αξιοποιηθεί τη χρονική στιγμή που απαιτείται, συμβάλλοντας στη σωστή και ομαλή λειτουργία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Η διάταξη που καθιστά δυνατή την αποθήκευση του ηλεκτρικού φορτίου είναι ο πυκνωτής. Ο πυκνωτής αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη παθητικά στοιχεία της ηλεκτρονικής και χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα τροφοδοσίας, φιλτραρίσματος, σύζευξης και αποσύζευξης σημάτων, καθώς και σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης.

Στη βασική του μορφή, ο πυκνωτής λειτουργεί ως αποθήκη ηλεκτρικού φορτίου και, κατ' επέκταση, ηλεκτρικής ενέργειας[1]. Αποτελείται από δύο αγωγικές επιφάνειες, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα μονωτικό υλικό, γνωστό ως διηλεκτρικό. Η παρουσία του διηλεκτρικού επιτρέπει τη συσσώρευση φορτίου στους αγωγούς χωρίς να δημιουργείται άμεση ηλεκτρική επαφή μεταξύ τους.



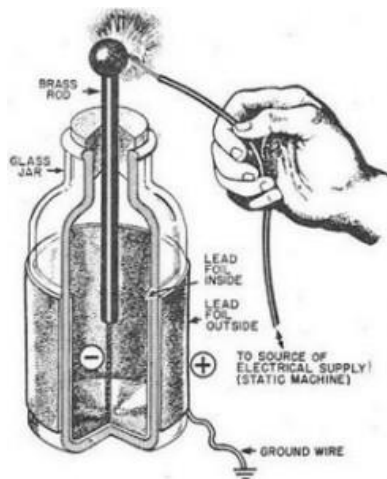
Εικόνα 2.1.1 Πυκνωτές

Ιστορικά, η πρώτη μορφή πυκνωτή κατασκευάστηκε το 1745 στο Πανεπιστήμιο του Leyden της Ολλανδίας και είναι γνωστή ως φιάλη του Leyden [2]. Η κατασκευή αυτή αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο στην εξέλιξη της ηλεκτροστατικής και της ηλεκτρικής τεχνολογίας. Η φιάλη του Leyden αποτελούνταν από ένα γυάλινο δοχείο, το οποίο ήταν καλυμμένο τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά με λεπτά μεταλλικά φύλλα, τα οποία λειτουργούσαν ως αγώγιμες επιφάνειες.

Στο στόμιο του δοχείου διέτρεχε ένα κατακόρυφο μεταλλικό στέλεχος, το οποίο στο επάνω άκρο του έφερε μεταλλικό σφαιρίδιο και ήταν μονωμένο με κατάλληλο πάμα. Το κάτω άκρο του στελέχους, μέσω μεταλλικής αλυσίδας, ερχόταν σε επαφή με το εσωτερικό μεταλλικό φύλλο. Τα δύο μεταλλικά φύλλα, το εσωτερικό και το εξωτερικό, αποτελούσαν τους δύο αγωγούς του πυκνωτή, ενώ το γυαλί λειτουργούσε ως διηλεκτρικό μέσο.

Κατά τη διαδικασία φόρτισης, αν ο εσωτερικός αγωγός φορτιστεί αρνητικά μέσω μιας φορτισμένης ράβδου, τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού αγωγού απωθούνται και διαφεύγουν μέσω της γείωσης. Με τον τρόπο αυτό, ο εξωτερικός αγωγός αποκτά θετικό φορτίο. Όταν διακοπεί η επαφή τόσο με τη φορτισμένη ράβδο όσο και με τη γείωση, το σύστημα παραμένει σε φορτισμένη κατάσταση, σχηματίζοντας έναν πλήρως φορτισμένο πυκνωτή.

Η αρχή λειτουργίας της φιάλης του Leyden αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των σύγχρονων πυκνωτών, οι οποίοι, παρότι διαφέρουν κατασκευαστικά, βασίζονται στο ίδιο θεμελιώδες φυσικό φαινόμενο της αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου μέσω διαχωρισμένων αγώγιμων επιφανειών.



Εικόνα 2.1.2 Εφεύρεση Πυκνωτή

Όταν ένας πυκνωτής φορτίζεται διαδοχικά με αυξανόμενες ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου, όπως Q , $2Q$, $3Q$ και ούτω καθεξής, παρατηρείται ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αυξάνεται ανάλογα, λαμβάνοντας τιμές V , $2V$, $3V$ αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό καταδεικνύει ότι το αποθηκευμένο φορτίο και η αναπτυσσόμενη τάση σε έναν πυκνωτή συνδέονται με σχέση άμεσης αναλογίας. Η αναλογία αυτή αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό του πυκνωτή και εκφράζεται μέσω ενός μεγέθους που παραμένει σταθερό για συγκεκριμένη κατασκευή και διάταξη. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται χωρητικότητα του πυκνωτή και συμβολίζεται με το γράμμα C [1]. Η χωρητικότητα εκφράζει την ικανότητα του πυκνωτή να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο για δεδομένη διαφορά δυναμικού και αποτελεί βασική παράμετρο στον σχεδιασμό και τη λειτουργία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Χωρητικότητα C ενός πυκνωτή ονομάζεται το μονόμετρο φυσικό μέγεθος που είναι ίσο με το πηλίκο του ηλεκτρικού φορτίου Q του πυκνωτή, προς την τάση V του πυκνωτή.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος, γιατί μας πληροφορεί για το φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα τάσης μεταξύ των οπλισμών του. Η τιμή της χωρητικότητας δεν εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία και τη διάταξη των αγωγίμων επιφανειών, αλλά και από το είδος του μονωτικού υλικού που παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Το διηλεκτρικό μέσο παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη διηλεκτρική σταθερά, η οποία επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένας πίνακας που περιλαμβάνει ενδεικτικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς για διάφορα μέσα, όπως ο αέρας και άλλα κοινά διηλεκτρικά υλικά, προκειμένου να καταστεί σαφής η επίδραση του κάθε υλικού στη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά
κενό	1
αέρας	1,0005
νερό	80
χαρτί	3,5
μίκρα	5,4
κεχριμπάρι	2,7
γυαλί	4,5
πορσελάνη	6,5
πολυαιθυλένιο	2,3

Πίνακας 2.1 Διηλεκτρική Σταθερά

2.2 Αντιστάσεις

Ο αντιστάτης αποτελεί βασικό παθητικό στοιχείο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η λειτουργία του συνδέεται άμεσα με τη μετατροπή μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική [3]. Η συμπεριφορά του αντιστάτη καθορίζεται από ένα χαρακτηριστικό ηλεκτρικό μέγεθος, το οποίο ονομάζεται ηλεκτρική αντίσταση και αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο στον σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρονικών διατάξεων. Η ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού ή ενός εξαρτήματος να αντιστέκεται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται τόσο από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού όσο και από τη γεωμετρία του αντιστάτη, και καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος που μπορεί να περάσει μέσα από αυτόν υπό δεδομένες συνθήκες τάσης.

Η αντίσταση (R) είναι μια μονάδα η οποία ορίζεται ως το κλάσμα της τάσης του υλικού (V) προς το ρεύμα (I):

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2.1)$$

Η αγωγιμότητα (G) ορίζεται ως το ανάποδο:

$$G = \frac{I}{V} \quad (2.2.2)$$

Για μεγάλο αριθμό υλικών και υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, παρατηρείται ότι η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα ενός στοιχείου και το ρεύμα που το διαρρέει παρουσιάζουν άμεση και γραμμική σχέση. Στις περιπτώσεις αυτές, η ηλεκτρική αντίσταση R , καθώς και η αντίστοιχη αγωγιμότητα G , μπορούν να θεωρηθούν σταθερά μεγέθη, παρότι στην πράξη ενδέχεται να επηρεάζονται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία ή οι συνθήκες περιβάλλοντος. Η γραμμική αυτή συσχέτιση μεταξύ τάσης και ρεύματος αποτελεί τη θεμελιώδη αρχή που είναι γνωστή ως νόμος του Ωμ. Τα υλικά και τα εξαρτήματα που υπακούουν σε αυτή τη σχέση χαρακτηρίζονται ως ωμικά υλικά και παρουσιάζουν προβλέψιμη και σταθερή ηλεκτρική συμπεριφορά εντός των ορίων λειτουργίας τους.



Εικόνα 2.2.1 Αντιστάσεις

Η συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος αποδίδεται στον Γερμανό φυσικό Georg Simon Ohm (1787–1854)[4]. Κατά τη διάρκεια της επιστημονικής του δραστηριότητας, ο Ohm ασχολήθηκε εκτενώς με τη μελέτη της αγωγιμότητας των μετάλλων και της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ξεκινώντας τις έρευνές του ήδη από το 1825.

Αντίθετα από τις προσδοκίες του ίδιου, η εργασία του αυτή έτυχε ψυχρής υποδοχής και έντονης κριτικής από τους συναδέλφους του. Μάλιστα ο **Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770–1831)** αμφισβήτησε την αυθεντικότητα των πειραματικών πρακτικών του Ohm [4]. Το γεγονός αυτό τον οδήγησε σε παραίτηση από την θέση του. Η αναγνώριση της προσφοράς του Ohm, ήρθε το έτος **1841**, με την βράβευσή του από την Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου



Εικόνα 2.2.2 Ο Georg Ohm επί το έργον: (Πειραματική διάταξη μέτρησης του ρεύματος που διαρρέει χάλκινη αγωγήμη ταινία)

Ειδική αντίσταση (ρ) μερικών υλικών	
Υλικό	Ειδική αντίσταση (ρ) σε Ωm στους $20\text{ }^\circ\text{C}$
Μέταλλα	
Άργυρος	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Χαλκός	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Σίδηρος	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Υδράργυρος	$96 \cdot 10^{-8}$

Πίνακας 2.2 Αντίσταση Υλικών

2.3 Δίοδοι

Η διάδος είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα που επιτρέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση. Είναι βασικό στοιχείο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως τα κυκλώματα τροφοδοσίας (ανόρθωση) [5].

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (δωματίου) το δυναμικό φραγμού για τις διόδους πυριτίου είναι 0,7 V και για τις διόδους γερμανίου είναι 0,3 V. Η διάδος έχει δύο ακροδέκτες:

Άνοδος (+) που αντιστοιχεί στην περιοχή τύπου P του ημιαγωγού.

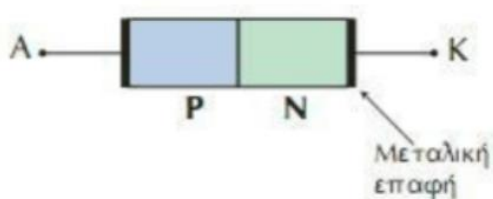
Κάθοδος (-) που αντιστοιχεί στην περιοχή τύπου N του ημιαγωγού.

Η διάδος μπορεί να συνδεθεί σε κύκλωμα υπό τάση με δύο τρόπους:

Σε **ορθή πόλωση**, όπου επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος και

σε **ανάστροφη πόλωση**, όπου δεν επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

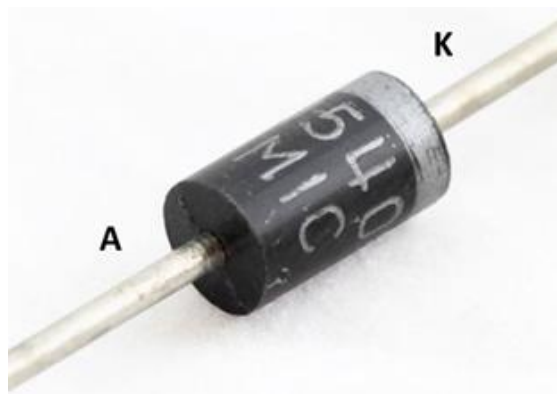
Ορθή πόλωση έχουμε όταν ο θετικός πόλος της πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή P της διόδου (άνοδος) και ο αρνητικός πόλος της πηγής με την περιοχή N της διόδου (κάθοδος).



Εικόνα 2..3.1 Δίοδος PN

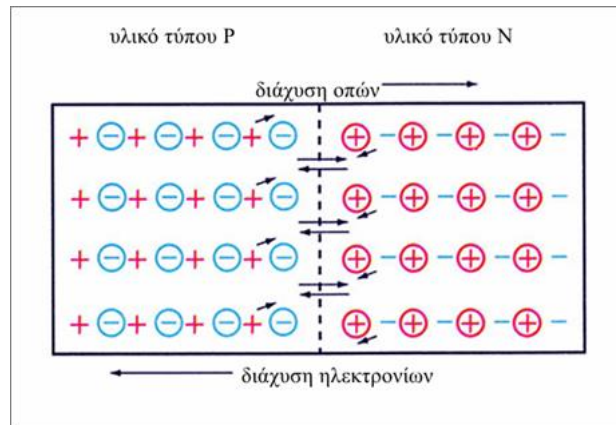


Εικόνα 2.3.2 Σύμβολο Διόδου



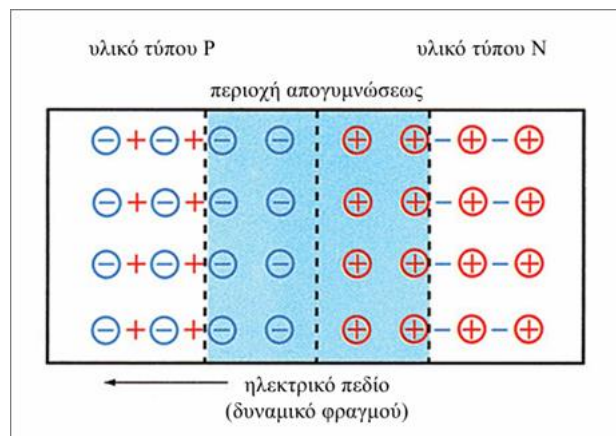
Εικόνα 2.3.3 Δίοδος Εμπορίου

Η κρυσταλλοδίodos, η οποία συχνά αναφέρεται απλώς ως δίοδος, αποτελεί ένα ημιαγωγικό στοιχείο συνεχούς δομής και σχηματίζεται από δύο διαφορετικά εμπλουτισμένες περιοχές ημιαγωγού, μία τύπου P και μία τύπου N [5]. Η μετάβαση από την περιοχή τύπου P στην περιοχή τύπου N πραγματοποιείται σταδιακά, δημιουργώντας μια ενιαία κρυσταλλική δομή με συγκεκριμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Η επιφάνεια στην οποία έρχονται σε επαφή οι δύο αυτές περιοχές ονομάζεται επαφή P–N. Κατά τον σχηματισμό της επαφής, παρατηρείται μετακίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων από την περιοχή τύπου N προς την περιοχή τύπου P, όπου επανασυνδέονται με τις διαθέσιμες οπές που βρίσκονται πλησιέστερα στην περιοχή επαφής. Αντίστοιχα, οπές από την περιοχή τύπου P κινούνται προς την περιοχή τύπου N και επανασυνδέονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία μιας χαρακτηριστικής ζώνης στην περιοχή της επαφής, η οποία επηρεάζει τη συμπεριφορά της δίοδου και καθορίζει τις βασικές της ιδιότητες ως ημιαγωγικού στοιχείου ελέγχου της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος [5].



Εικόνα 2.3.4 Επαφή PN

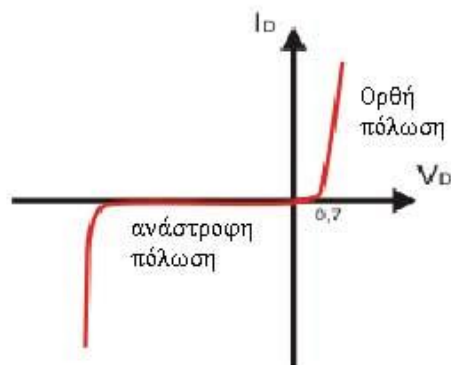
Περιοχή απογυμνώσεως ονομάζεται μια περιοχή δεξιά και αριστερά της επαφής που περιέχει μόνο ακίνητα θετικά και αρνητικά ιόντα. Στα άκρα της επαφής εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού, που οφείλεται στη συσσώρευση των θετικών και αρνητικών ιόντων, η οποία ονομάζεται δυναμικό φραγμού.



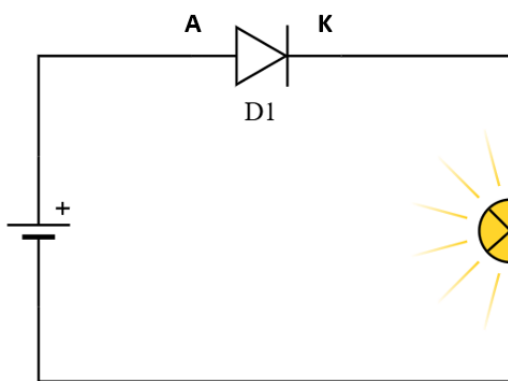
Εικόνα 2.3.5 Σχηματισμός Περιοχής Απογυμνώσεως

Η ορθή πόλωση μιας διόδου επιτυγχάνεται όταν ο θετικός πόλος της πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή P (άνοδος) και ο αρνητικός πόλος με την περιοχή N (κάθοδος) [6]. Υπό αυτές τις συνθήκες, ηλεκτρόνια από την περιοχή N κινούνται προς την περιοχή P, ενώ οπές από την περιοχή P κατευθύνονται προς την περιοχή N. Η κίνηση αυτή οδηγεί στη συρρίκνωση της περιοχής απογύμνωσης, επιτρέποντας την εμφάνιση συνεχούς ροής ρεύματος I_d μέσω της διόδου. Η αγωγιμότητα της διόδου αρχίζει όταν η εφαρμοζόμενη τάση υπερβεί περίπου τα 0,3 V για διόδους γερμανίου και τα 0,7 V για διόδους πυριτίου, ενώ πέρα από αυτό το σημείο το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά με την τάση [6].

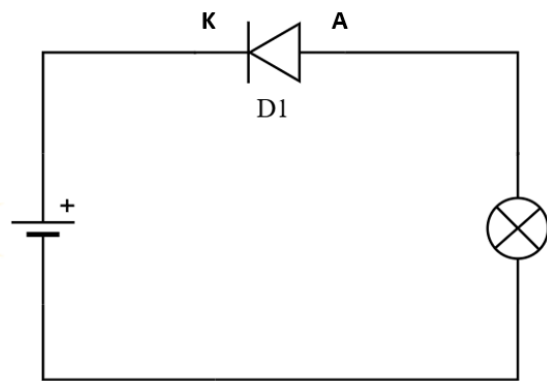
Ανάστροφη πόλωση μιας διόδου έχουμε όταν ο θετικός πόλος της πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή N (κάθοδος) και ο αρνητικός πόλος με την περιοχή P (άνοδος). Υπό την εφαρμογή της ανάστροφης πόλωσης, τα ηλεκτρόνια έλκονται προς τον θετικό πόλο της πηγής, ενώ οι οπές προς τον αρνητικό, γεγονός που οδηγεί στη διεύρυνση της περιοχής απογύμνωσης. Ως αποτέλεσμα, η διάοδος δεν άγει κανονικά, παρά μόνο ένα πολύ μικρό ανάστροφο ρεύμα I_0 , της τάξης των μA .



Εικόνα 2.3.6 Χαρακτηριστική Της Διόδου σε Θερμοκρασία 25° C



Εικόνα 2.3.7 Ορθή Πόλωση



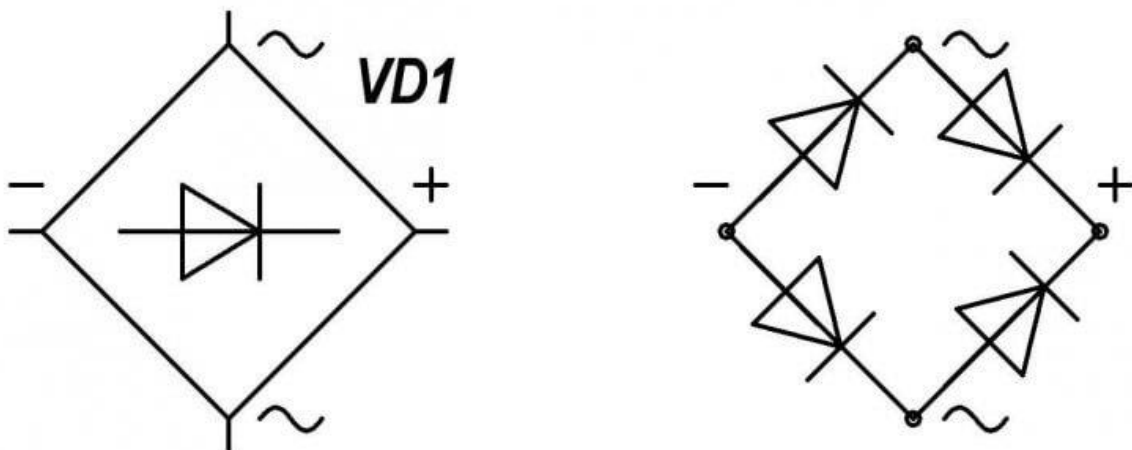
Εικόνα 2.3.8 Ανάστροφη Πόλωση

2.4 Γέφυρες Διόδων

Η γέφυρα διόδων αποτελεί μια βασική και ιδιαίτερα διαδεδομένη διάταξη ανορθωτή, σχεδιασμένη για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης (AC) σε συνεχόμενη τάση (DC). Πρόκειται για ανορθωτή **πλήρους κύματος**, καθώς αξιοποιεί και τα δύο ημικύματα της εναλλασσόμενης τάσης, επιτυγχάνοντας υψηλότερη απόδοση και καλύτερη ποιότητα τροφοδοσίας σε σχέση με απλούστερες διατάξεις [7].

Η διάταξη της γέφυρας διόδων βασίζεται στη χρήση τεσσάρων διόδων ημιαγωγών σε μονοφασικά κυκλώματα, συνδεδεμένων με τέτοιον τρόπο ώστε το φορτίο να διαρρέεται πάντοτε από ρεύμα της ίδιας πολικότητας. Οι γέφυρες διόδων μπορούν να υλοποιηθούν είτε με διακριτές διόδους συγκολλημένες επάνω στην πλακέτα, είτε – όπως συνηθίζεται πλέον – σε ενιαίο περίβλημα, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες διόδους και ακροδέκτες σύνδεσης, διευκολύνοντας την εγκατάσταση και αυξάνοντας την αξιοπιστία του κυκλώματος.

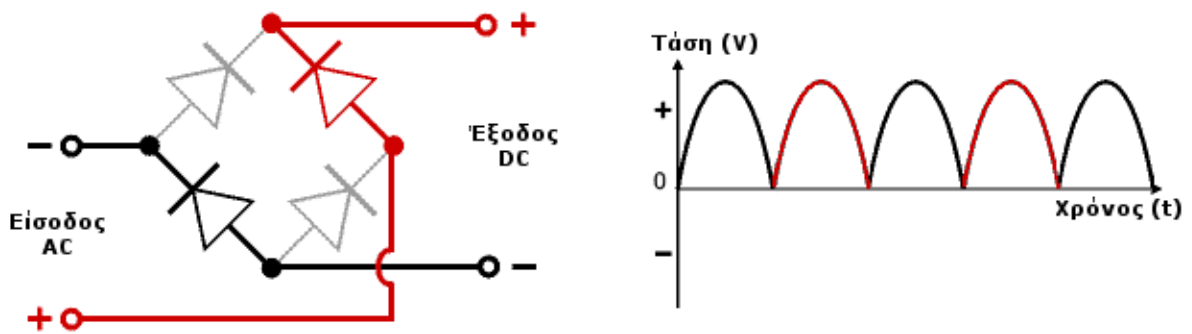
Ανάλογα με την εφαρμογή και το είδος της τροφοδοσίας, οι γέφυρες διόδων διακρίνονται σε **μονοφασικές** και **τριφασικές**, με τις δεύτερες να χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα αυξημένης ισχύος και βιομηχανικές εφαρμογές.



Εικόνα 2.4.1 Γέφυρα Διόδων Εσωτερικά-Σχηματικό

Η λειτουργία της γέφυρας διόδων βασίζεται στη θεμελιώδη ιδιότητα των διόδων να άγουν το ρεύμα μόνο προς μία κατεύθυνση. Όταν στην είσοδο της γέφυρας εφαρμοστεί ένα εναλλασσόμενο ημιτονοειδές σήμα (π.χ. τάση δικτύου 230V AC), σε κάθε ημικύμα άγει ένα διαφορετικό ζεύγος διόδων, το οποίο βρίσκεται διαγώνια τοποθετημένο στο κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο το θετικό όσο και το αρνητικό ημικύμα της εναλλασσόμενης τάσης οδηγούνται στο φορτίο με την ίδια πολικότητα.

Πρακτικά, το αρνητικό ημικύμα της εναλλασσόμενης τάσης «αναστρέφεται», με αποτέλεσμα στην έξοδο της γέφυρας να εμφανίζεται μια παλμική συνεχής τάση, η οποία στη συνέχεια μπορεί να εξομαλυνθεί μέσω κατάλληλων πυκνωτών φίλτρανσης. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τη γέφυρα διόδων απαραίτητο δομικό στοιχείο σε κάθε γραμμικό τροφοδοτικό, εξασφαλίζοντας αποδοτική και αξιόπιστη ανόρθωση της τάσης.



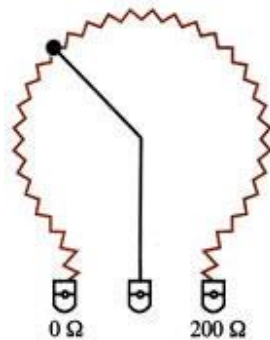
Εικόνα 2.4.2 Ανόρθωση Σήματος



Εικόνα 2.4.3 Δίοδοι Εμπορίου

2.5 Ποτενσιόμετρο

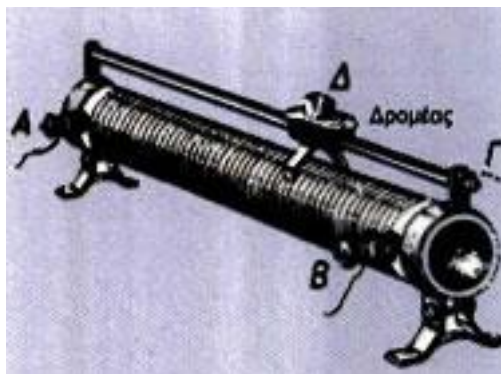
Η καθημερινή εμπειρία από τη ρύθμιση της έντασης ενός ραδιοφώνου ή ενός ενισχυτή μάς φέρνει άμεσα σε επαφή με τη λειτουργία μιας ρυθμιστικής αντίστασης, γνωστής και ως ποτενσιόμετρο [8]. Το περιστροφικό κουμπί που χρησιμοποιείται σε τέτοιες συσκευές δεν μεταβάλλει άμεσα την ισχύ του ήχου, αλλά ρυθμίζει την ηλεκτρική αντίσταση μέσα στο κύκλωμα, επηρεάζοντας έτσι το πλάτος του ηλεκτρικού σήματος.



Εικόνα 2.5.1 Ρυθμιστική (μεταβλητή) Αντίσταση

Η ρυθμιστική αντίσταση αποτελεί ειδική μορφή ωμικής αντίστασης, της οποίας η τιμή δεν είναι σταθερή αλλά μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς εντός ενός προκαθορισμένου εύρους [8]. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της τάσης ή του ρεύματος σε ένα κύκλωμα, γεγονός που καθιστά το ποτενσιόμετρο ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές ελέγχου, ρύθμισης και βαθμονόμησης.

Η κινητή επαφή Δ, που λέγεται δρομέας, μπορεί να μετακινείται από το Α μέχρι το Β.



Εικόνα 2.5.2 Ρυθμιστική (μεταβλητή) Αντίσταση

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ποτενσιόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως μεταβλητές αντιστάσεις είτε ως διαιρέτες τάσης, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους στο κύκλωμα.

2.6 Μετασχηματιστής

Η ανάγκη για μετασχηματισμό των ηλεκτρικών μεγεθών έγινε εμφανής ήδη από το 1882, με την ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος τριών αγωγών, σε τάσεις 220/110 V, τα οποία λειτούργησαν ταυτόχρονα στη Νέα Υόρκη και στο Λονδίνο. Καθώς όμως η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αυξανόταν, διαπιστώθηκε ότι η οικονομικά αποδοτική μεταφορά της απαιτούσε πολύ υψηλότερες τάσεις από εκείνες που χρησιμοποιούνταν στην κατανάλωση [9].

Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαίο η ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται σε υψηλή τάση και στη συνέχεια να υποβιβάζεται σε χαμηλότερα επίπεδα, ώστε να μπορεί να διανεμηθεί με ασφάλεια και να χρησιμοποιηθεί από τους καταναλωτές. Το πρόβλημα αυτό επιχειρήθηκε αρχικά να λυθεί με την τεχνολογία της εποχής, μέσω της μεταβολής της τάσης του συνεχούς ρεύματος με ένα σύστημα κινητήρα-γεννήτριας. Στη διάταξη αυτή, η γεννήτρια παρείχε συνεχές ρεύμα στην επιθυμητή τάση, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτούνταν από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Ωστόσο, η λύση αυτή παρουσίαζε χαμηλό βαθμό απόδοσης, με αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες ηλεκτρικής ισχύος.

Περί το 1890 πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα πειράματα με εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο σταδιακά επικράτησε έναντι του συνεχούς. Η επικράτηση αυτή οφείλεται κυρίως στο σημαντικό πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος να μετασχηματίζεται εύκολα, γρήγορα και με μικρό κόστος, μέσω ειδικών ηλεκτρικών διατάξεων που ονομάστηκαν μετασχηματιστές.

Βασικό χαρακτηριστικό των μετασχηματιστών είναι ότι δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστους και ανθεκτικούς στη φθορά· για τον λόγο αυτό αναφέρονται και ως στατικοί μετασχηματιστές (συμβολικά Μ/Σ). Με τη χρήση των μετασχηματιστών, η ανύψωση ή η υποβίβαση της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος πραγματοποιείται με ελάχιστες απώλειες ισχύος. Ενδεικτικά, στη σύγχρονη τεχνολογία κατασκευάζονται μεγάλοι μετασχηματιστές με βαθμό απόδοσης που φτάνει ακόμη και το 99%, δηλαδή με απώλειες μόλις 1% της μεταδιδόμενης ισχύος.



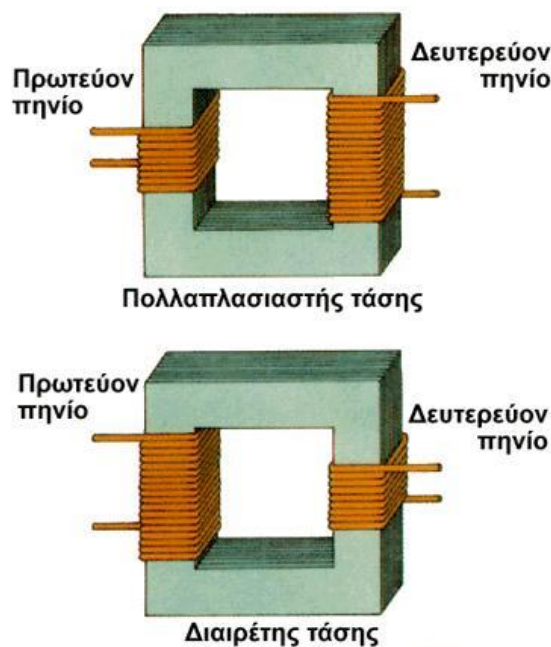
Εικόνα 2.6.1 Μετασχηματιστής

Κάθε μετασχηματιστής (Μ/Σ) αποτελείται βασικά από δύο κύρια μέρη: τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Ο πυρήνας σχηματίζει το μαγνητικό κύκλωμα του μετασχηματιστή και κατασκευάζεται συνήθως από λεπτά ελάσματα σιδήρου ή ειδικού πυριτιούχου χάλυβα, ώστε να περιορίζονται οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων και υστέρησης. Ο ρόλος του πυρήνα είναι να καθοδηγεί και να συγκεντρώνει τη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας μεταξύ των τυλιγμάτων [9].

Πάνω στον πυρήνα είναι τοποθετημένα δύο τυλίγματα, τα οποία αποτελούνται από μονωμένο αγωγίμο σύρμα. Τα τυλίγματα αυτά είναι το τύλιγμα υψηλής τάσης (Υ.Τ.) και το τύλιγμα χαμηλής τάσης (Χ.Τ.). Τα δύο τυλίγματα ενός μετασχηματιστή ονομάζονται επίσης πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα.

Ως πρωτεύον χαρακτηρίζεται το τύλιγμα που συνδέεται απευθείας με την ηλεκτρική πηγή, δηλαδή το δίκτυο ηλεκτροδότησης, ενώ δευτερεύον ονομάζεται το τύλιγμα από το οποίο λαμβάνεται η μετασχηματισμένη τάση. Η μεταφορά ενέργειας από το πρωτεύον στο δευτερεύον δεν γίνεται με άμεση ηλεκτρική σύνδεση, αλλά μέσω του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στον πυρήνα, γεγονός που προσδίδει στον μετασχηματιστή υψηλό επίπεδο ηλεκτρικής απομόνωσης και ασφάλειας.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης, το πρωτεύον τύλιγμα είναι εκείνο της υψηλής τάσης (Υ.Τ.), ενώ το δευτερεύον είναι το τύλιγμα χαμηλής τάσης (Χ.Τ.). Αντίστοιχα, σε έναν μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης, το πρωτεύον συνδέεται στη χαμηλή τάση και το δευτερεύον παρέχει υψηλότερη τάση. Η σχέση μεταξύ των τάσεων εξαρτάται άμεσα από τον λόγο των σπειρών των δύο τυλιγμάτων, στοιχείο που καθορίζει τη λειτουργία και την εφαρμογή κάθε μετασχηματιστή.



Εικόνα 2.6.2 Μετασχηματιστής Τάσης

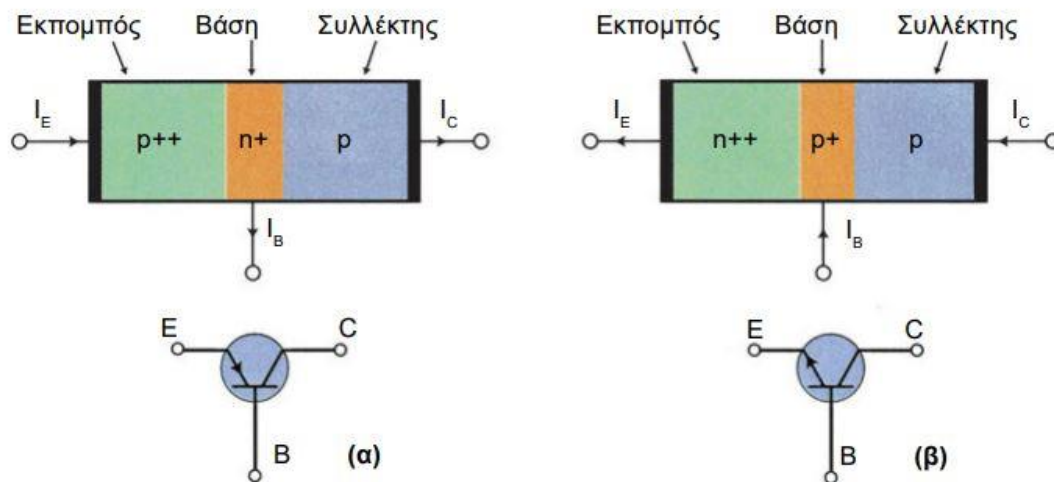
2.7 Transistor

Το τρανζίστορ αποτελεί έναν ημιαγωγικό κρύσταλλο που αποτελείται από τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις. Ανάλογα με τη διάταξη και τον τύπο εμπλουτισμού των περιοχών αυτών, τα τρανζίστορ διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους: PNP και NPN, όπου η ακολουθία των γραμμάτων δηλώνει τον τύπο του ημιαγωγού κάθε περιοχής [10].

Οι τρεις περιοχές ενός τρανζίστορ, σύμφωνα με τη λειτουργία τους, ονομάζονται εκπομπός (emitter), βάση (base) και συλλέκτης (collector) [10]. Ο εκπομπός είναι έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, με σκοπό την εκπομπή φορέων φορτίου προς τη βάση. Η βάση είναι λιγότερο εμπλουτισμένη περιοχή και παρουσιάζει πολύ μικρό πάχος, ώστε τα περισσότερα φορτία που εκπέμπονται από τον εκπομπό να μπορούν να διέρχονται μέσω αυτής και να καταλήγουν στον συλλέκτη.

Ο συλλέκτης είναι περιοχή με χαμηλότερο βαθμό εμπλουτισμού σε σχέση με τον εκπομπό και τη βάση. Παράλληλα, λόγω της μεγαλύτερης ισχύος που καταναλώνεται στον συλλέκτη κατά τη λειτουργία του τρανζίστορ, η φυσική του περιοχή είναι μεγαλύτερη, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της διάταξης.

Στο εσωτερικό κάθε τρανζίστορ σχηματίζονται δύο επαφές τύπου διόδου: μία μεταξύ βάσης και εκπομπού και μία μεταξύ βάσης και συλλέκτη. Για τον λόγο αυτό, ένα τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμα ως δύο διόδοι συνδεδεμένες σε αντίθετη φορά.



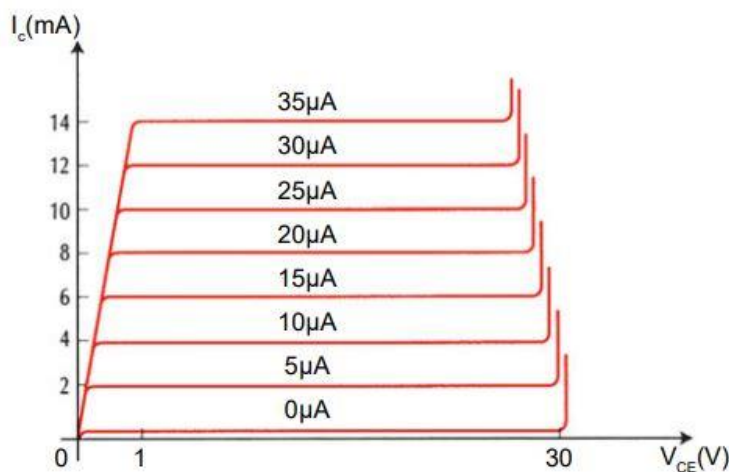
Εικόνα 2.7.1 Δομή και κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ (α) PNP και (β) ενός NPN

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του τρανζίστορ διακρίνονται σε τρεις βασικές περιοχές, ανάλογα με την τιμή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού V_{CE} [11].

Η πρώτη περιοχή αντιστοιχεί σε μικρές τιμές της τάσης V_{CE} , συγκεκριμένα από 0 V έως περίπου 1 V. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται απότομη αύξηση του ρεύματος συλλέκτη, γεγονός που αποδίδεται στο ότι η επαφή συλλέκτη δεν είναι ανάστροφα πολωμένη. Η έντονα κεκλιμένη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης σε αυτό το εύρος ονομάζεται περιοχή κόρου (saturation region), ενώ η τάση συλλέκτη-εκπομπού στην κατάσταση αυτή συμβολίζεται ως $V_{CE(sat)}$.

Η δεύτερη περιοχή αφορά τιμές της τάσης συλλέκτη-εκπομπού από περίπου 1 V έως 30 V. Σε αυτή την περιοχή, η επαφή εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, ενώ η επαφή συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Πρόκειται για τη σημαντικότερη περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ, καθώς το ρεύμα συλλέκτη καθορίζεται αποκλειστικά από το ρεύμα βάσης. Για τον λόγο αυτό, η περιοχή αυτή ονομάζεται ενεργός περιοχή (active region) και το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, με σχέση $I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$.

Η τρίτη περιοχή εμφανίζεται όταν η τάση συλλέκτη-εκπομπού υπερβεί την τάση διάσπασης της διάταξης. Στην περίπτωση αυτή, το τρανζίστορ παύει να λειτουργεί κανονικά και παρατηρείται διάσπαση της επαφής συλλέκτη-εκπομπού. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή διάσπασης (breakdown region) και η λειτουργία σε αυτή θεωρείται μη επιθυμητή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της διάταξης.



Εικόνα 2.7.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Συλλέκτη

Κεφάλαιο 3: Λίγα Λόγια Για Τους Ενισχυτές

3.1 Κλάση A

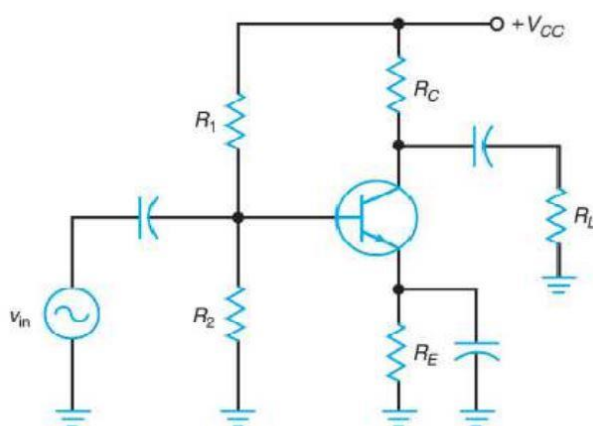
Οι ενισχυτές κατηγορίας A διακρίνονται για την εξαιρετική ποιότητα ήχου που προσφέρουν. Η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η έξοδος τους παραμένει ενεργή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου του σήματος, εξασφαλίζοντας μια συνεχή, ομαλή και χωρίς παραμορφώσεις αναπαραγωγή του ήχου. Αυτός ο σχεδιασμός εστιάζει στον καθαρό και λεπτομερή ήχο, καθιστώντας τους ιδανικούς για εφαρμογές όπου η πιστότητα της ηχητικής απόδοσης είναι υψίστης σημασίας [12].

Λόγω της συνεχούς λειτουργίας τους, οι ενισχυτές κατηγορίας A απαιτούν μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος από την πηγή τροφοδοσίας, με την αποτελεσματικότητα να περιορίζεται συνήθως στο 25% [13]. Παρόλα αυτά, η χαμηλή απόδοση αντισταθμίζεται από την απaráμιλλη ποιότητα του ήχου, καθώς ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει τη μέγιστη πιστότητα αναπαραγωγής, με καθαρότητα και ακρίβεια στη μεταφορά των λεπτομερειών κάθε σήματος.

Η απόδοση ενός ενισχυτή μετράται ως η αναλογία της ισχύος εξόδου AC προς τη συνολική ισχύ DC που καταναλώνεται. Παρά το γεγονός ότι η κατηγορία A δεν αποτελεί οικονομική επιλογή σε όρους κατανάλωσης, η αξία της σε εφαρμογές υψηλής ποιότητας ήχου είναι αναμφισβήτητη, καθώς διατηρεί τον ήχο ζωντανό, χωρίς αλλοιώσεις και με πλήρη δυναμική απόκριση.

Οι ενισχυτές κατηγορίας A χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου η ποιότητα του ήχου υπερτερεί της εξοικονόμησης ενέργειας. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι σε συστήματα ήχου υψηλής πιστότητας, στούντιο ηχογράφησης, πολυτελή home cinema, καθώς και σε εργαστηριακές εφαρμογές για δοκιμές και έρευνα. Επιπλέον, ορισμένα συστήματα RF υψηλής ισχύος τα αξιοποιούν για την καθαρή μετάδοση σημάτων, όπου η παραμόρφωση πρέπει να παραμένει ελάχιστη [12].

Συνολικά, οι ενισχυτές κατηγορίας A συνδυάζουν τη λεπτομέρεια, την πιστότητα και την ομαλότητα της εξόδου, καθιστώντας τους την πλέον κατάλληλη επιλογή όταν η απόδοση του ήχου είναι προτεραιότητα, ακόμα και αν αυτό απαιτεί αυξημένη κατανάλωση ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, αποτελούν τη βασική επιλογή για επαγγελματικές και υψηλού επιπέδου ηχητικές εφαρμογές, όπου κάθε λεπτομέρεια μετράει.



Εικόνα 3.1.1 Ενισχυτής Τάξης A

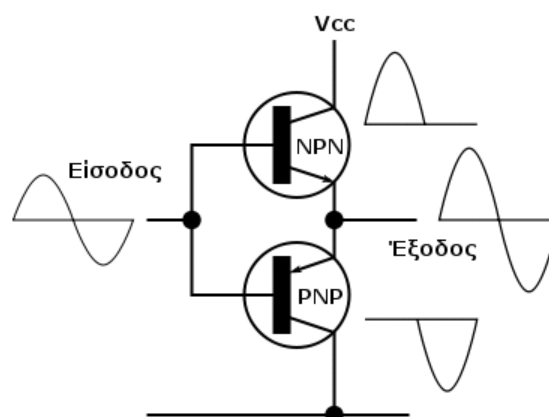
3.2 Κλάση B (push-pull)

Όταν ένα τρανζίστορ λειτουργεί σε ενισχυτική τάξη B, η έξοδός του ψαλιδίζει περίπου τη μισή περίοδο του εισερχόμενου σήματος. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η παραμόρφωση που προκύπτει από την συνεχόμενη λειτουργία του, όπως συμβαίνει στην τάξη A [12]. Για την αντιστάθμιση αυτής της ψαλιδισμένης συμπεριφοράς και την πλήρη αναπαραγωγή του σήματος, χρησιμοποιούμε συνήθως δύο τρανζίστορ σε διάταξη push-pull [13]. Σε αυτή τη διάταξη, το ένα τρανζίστορ άγει κατά τη διάρκεια μιας περιόδου του σήματος, ενώ το άλλο βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, και αντιστρόφως κατά την επόμενη περίοδο. Με τον τρόπο αυτό, οι δύο ημισυχνοτήτες του σήματος συνδυάζονται στην έξοδο και φτάνουν στο μεγάφωνο ως ένα συνεχές και ομαλό σήμα, αποκαθιστώντας πλήρως την κυματομορφή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ενισχυτών τάξης B είναι ότι, όταν δεν υπάρχει σήμα εισόδου, κάθε τρανζίστορ παραμένει σε κατάσταση αποκοπής. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει κατανάλωση ρεύματος κατά τη διάρκεια του σήματος μηδενικής έντασης, μειώνοντας έτσι την άσκοπη απώλεια ισχύος και αυξάνοντας την αποδοτικότητα της διάταξης. Η μέγιστη απόδοση ενός ενισχυτή τάξης B σε διάταξη push-pull μπορεί να φτάσει περίπου το 78,5%, γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη βαθμίδα εξόδου πιο αποδοτική και συχνότερα προτιμώμενη σε σύγκριση με την τάξη A, όπου η απόδοση είναι σημαντικά χαμηλότερη [12].

Ωστόσο, η λειτουργία αυτή παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο φαινόμενο που ονομάζεται **διασταύρωση παραμόρφωσης (crossover distortion)** [13]. Επειδή στην τάξη B δεν εφαρμόζεται συνεχής πόλωση στα τρανζίστορ εκπομπής, η τάση εισόδου AC πρέπει να υπερβεί το δυναμικό φράγμα των διόδων εκπομπής (περίπου 0,7 V για πυρίτιο) ώστε να αρχίσει η ροή ρεύματος. Στην περιοχή γύρω από το μηδέν, όπου το σήμα είναι μικρότερο από 0,7 V, δεν ρέει ρεύμα και το τρανζίστορ παραμένει σε αποκοπή, με αποτέλεσμα μια μικρή παραμόρφωση κατά τη διασταύρωση των ημισυχνοτήτων.

Για την εξάλειψη αυτής της παραμόρφωσης, εφαρμόζεται μια μικρή **ορθή πόλωση** σε κάθε τρανζίστορ εκπομπής, τοποθετώντας το σημείο λειτουργίας λίγο πάνω από την αποκοπή. Με αυτόν τον τρόπο, τα τρανζίστορ άγουν αμέσως όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει το μηδενικό επίπεδο, μειώνοντας σημαντικά τη διασταύρωση παραμόρφωσης και διατηρώντας την έξοδο πιο ομαλή και πιστή στο αρχικό σήμα.



Εικόνα 3.2.1 Κλάση B

3.3 Κλάση A/B

Οι ενισχυτές κατηγορίας AB αποτελούν έναν επιτυχημένο συμβιβασμό μεταξύ των ενισχυτών κατηγορίας A και κατηγορίας B, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο αρχιτεκτονικών. Στόχος τους είναι να προσφέρουν υψηλή ποιότητα ήχου, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτη και διαδεδομένη επιλογή σε πλήθος εφαρμογών ενίσχυσης ισχύος [12].

Σε σύγκριση με τους ενισχυτές κατηγορίας A, οι οποίοι παραμένουν συνεχώς ενεργοί και καταναλώνουν σημαντική ισχύ ακόμη και χωρίς σήμα εισόδου, οι ενισχυτές κατηγορίας AB εμφανίζουν μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Παράλληλα, σε αντίθεση με τους ενισχυτές κατηγορίας B, στους οποίους παρατηρείται έντονα η παραμόρφωση διασταύρωσης (crossover distortion), οι ενισχυτές κατηγορίας AB χρησιμοποιούν κατάλληλη πόλωση ώστε να περιορίζουν σημαντικά το συγκεκριμένο φαινόμενο.

Η βασική αρχή λειτουργίας των ενισχυτών κατηγορίας AB στηρίζεται στην ελαφρά ταυτόχρονη αγωγή και των δύο τρανζίστορ της διάταξης push-pull κατά τη μετάβαση του σήματος από τη θετική στη αρνητική ημιπερίοδο και αντίστροφα [14]. Η μικρή αυτή επικάλυψη αγωγής εξαλείφει την «νεκρή ζώνη» που χαρακτηρίζει τους ενισχυτές κατηγορίας B, επιτρέποντας την ομαλή αναπαραγωγή του σήματος γύρω από το μηδενικό σημείο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της παραμόρφωσης, χωρίς να θυσιάζεται η ενεργειακή απόδοση.

Η ισορροπία μεταξύ καθαρού ήχου και εξοικονόμησης ενέργειας καθιστά τους ενισχυτές κατηγορίας AB ιδιαίτερα δημοφιλείς σε συστήματα ήχου, ενισχυτές ισχύος, οικιακά και επαγγελματικά ηχητικά συστήματα, καθώς και σε εφαρμογές όπου απαιτείται χειρισμός ισχυρών σημάτων με χαμηλή παραμόρφωση. Η ικανότητά τους να συνδυάζουν ποιότητα και απόδοση τους έχει καταστήσει μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες βαθμίδες εξόδου στην πράξη.

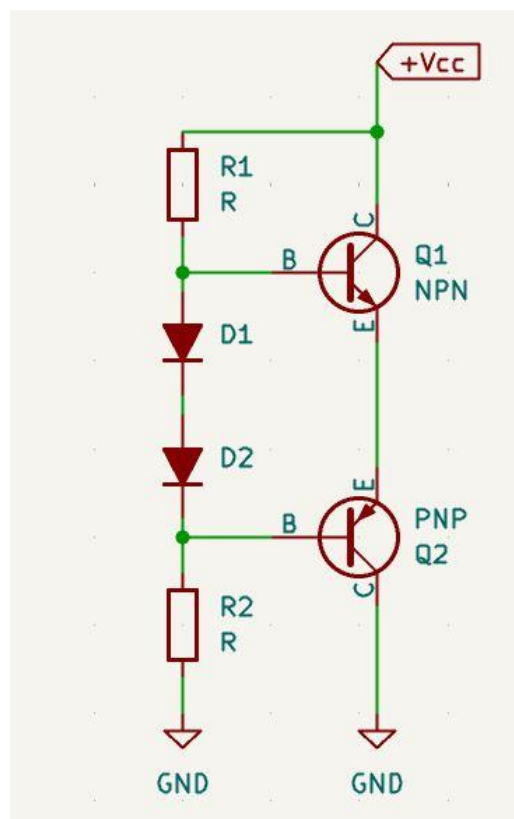
Για την αποφυγή της παραμόρφωσης διασταύρωσης, το σημείο λειτουργίας (σημείο Q) τοποθετείται ελαφρώς πάνω από την περιοχή αποκοπής, μέσω κατάλληλης τάσης πόλωσης των βάσεων [14]. Ωστόσο, η ρύθμιση αυτή παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, καθώς το ρεύμα συλλέκτη είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε μικρές μεταβολές της τάσης βάσης-εκπομπού (V_{BE}). Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τρανζίστορ, μία μεταβολή της τάξης μερικών millivolt μπορεί να προκαλέσει αύξηση του ρεύματος συλλέκτη κατά μία τάξη μεγέθους.

Για τον λόγο αυτό, συχνά χρησιμοποιείται ρυθμιζόμενη αντίσταση ώστε να επιτευχθεί με ακρίβεια το επιθυμητό σημείο Q. Ωστόσο, η λύση αυτή δεν αντιμετωπίζει επαρκώς το πρόβλημα της θερμικής αστάθειας. Ακόμη και αν το σημείο λειτουργίας ρυθμιστεί ιδανικά σε θερμοκρασία δωματίου, μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς η τάση V_{BE} μειώνεται κατά περίπου 2 mV ανά βαθμό Κελσίου. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος συλλέκτη, η οποία με τη σειρά της προκαλεί περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της ένωσης, δημιουργώντας ένα φαινόμενο θερμικής φυγής (thermal runaway) που μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του τρανζίστορ [14].

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού εφαρμόζεται συχνά πόλωση με διόδους αντιστάθμισης. Η βασική ιδέα είναι η χρήση διόδων, οι οποίες παράγουν την απαιτούμενη τάση πόλωσης για τις βάσεις των τρανζίστορ εξόδου. Προκειμένου η μέθοδος αυτή να είναι αποτελεσματική, οι χαρακτηριστικές καμπύλες των διόδων πρέπει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις καμπύλες των τρανζίστορ. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την τάση πόλωσης που παράγεται από τις διόδους κατά το ίδιο περίπου ποσό που μειώνεται και η τάση V_{BE} των τρανζίστορ, εξασφαλίζοντας θερμική σταθερότητα και ασφαλή λειτουργία του ενισχυτή [14].

Έτσι αμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για υψηλή ποιότητα ήχου, περιορισμό της παραμόρφωσης και ταυτόχρονα ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, καταλήξαμε στην υλοποίηση ενός ενισχυτή κλάσης A/B.

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κλάσης A, όπως ο ομαλός και καθαρός ήχος, με την αυξημένη απόδοση της κλάσης B. Η χρήση πόλωσης με διόδους εξασφαλίζει την κατάλληλη τάση βάσης-εκπομπού στα τρανζίστορ εξόδου, εξαλείφοντας την παραμόρφωση διέλευσης (crossover distortion) που χαρακτηρίζει τους απλούς ενισχυτές κλάσης B. Έτσι, επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ποιότητας και απόδοσης, καθιστώντας την κλάση A/B με πόλωση διόδων μία από τις καλύτερες και πιο αξιόπιστες επιλογές για εφαρμογές ενίσχυσης ήχου υψηλών απαιτήσεων.



Εικόνα 3.3.1 Push-pull με Πόλωση Διόδων

Κεφάλαιο 4: Η Κατασκευή

4.1 Τροφοδοτικό

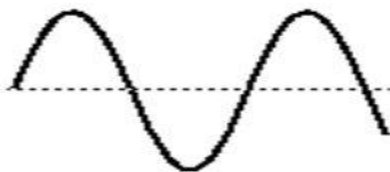
Ξεκινώντας την αναζήτηση για μια λύση που να είναι ταυτόχρονα απλή, εύκολη στην υλοποίηση και λειτουργική, καταλήξαμε στην προμήθεια ορισμένων βασικών εξαρτημάτων, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διαδικασία μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένας μετασχηματιστής και μία γέφυρα διόδων τύπου **BR3510W**, καθώς τα στοιχεία αυτά αποτελούν τον θεμέλιο λίθο κάθε τροφοδοτικού που προορίζεται να παρέχει σταθερή συνεχή τάση σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Αμέσως μετά την παραλαβή του μετασχηματιστή, το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η τοποθέτηση ασφαλειών στα σημεία **F1, F2 και F3**. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμονα την ασφάλεια, τόσο του ίδιου του κυκλώματος όσο και των χρηστών του. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι, σε περίπτωση κάποιου απρόβλεπτου σφάλματος ή υπερφόρτωσης, οι επιπτώσεις θα είναι περιορισμένες, αποτρέποντας ενδεχόμενες βλάβες στα εξαρτήματα αλλά και κινδύνους για την υγεία μας.

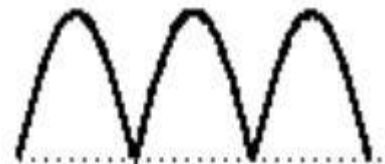
Κατά τη χρήση του μετασχηματιστή παρατηρήθηκαν μικρές αποκλίσεις στις τιμές της τάσης σε σχέση με τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα. Το φαινόμενο αυτό θεωρείται απολύτως φυσιολογικό, καθώς στην πράξη υπεισέρχονται παράγοντες όπως οι ανοχές των υλικών, οι απώλειες και οι συνθήκες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, σε επόμενη ενότητα θα παρουσιαστεί αναλυτική σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πρακτικών τιμών, ώστε να αξιολογηθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του κυκλώματος.

Αφού τοποθετήθηκαν σωστά ο μετασχηματιστής, οι ασφάλειες και η γέφυρα διόδων, προχωρήσαμε στις απαραίτητες συνδέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις βασικές λήψεις της εξόδου: μία θετική, μία αρνητική και μία γείωσης. Η σύνδεση αυτή είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος και για τη δημιουργία των απαιτούμενων δυναμικών που θα τροφοδοτήσουν τα επόμενα στάδια.

Μετά τη γέφυρα διόδων, στην πραγματικότητα δεν έχουμε ακόμη καθαρή και σταθερή συνεχή τάση. Το σήμα που προκύπτει είναι ένα παλμικό ανορθωμένο σχήμα, στο οποίο η τάση αυξάνεται και μειώνεται περιοδικά, μηδενιζόμενη ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή η μορφή τάσης δεν είναι κατάλληλη για την ορθή τροφοδοσία του υπόλοιπου κυκλώματος, καθώς ούτε το ολοκληρωμένο **NE5532** ούτε το τελικό στάδιο μπορούν να λειτουργήσουν αξιόπιστα με μια τέτοια κυματομορφή.



Εικόνα 4.1.1 Εναλλασσόμενη Τάση



Εικόνα 4.1.2 Πλήρως Ανορθωμένη Τάση Χωρίς Φίτρο

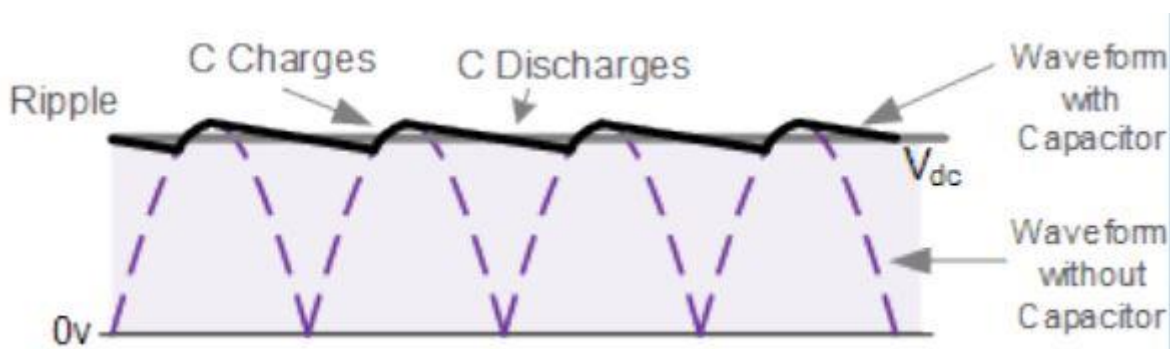
Επομένως, καθίσταται σαφές ότι απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία της τάσης εξόδου της γέφυρας, προκειμένου να επιτευχθεί μια όσο το δυνατόν πιο σταθερή και ομαλή συνεχή τάση, ικανή να καλύψει τις απαιτήσεις τόσο του προενισχυτικού όσο και του τελικού σταδίου του κυκλώματος.

Συνεχίζοντας με την ίδια λογική και ροή της πειραματικής διαδικασίας, αμέσως μετά τη γέφυρα διόδων καθίσταται απαραίτητη η σύνδεση των δύο πυκνωτών εξομάλυνσης. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του τροφοδοτικού, καθώς είναι υπεύθυνοι για την εξομάλυνση και τη σταθεροποίηση της τάσης, δηλαδή του σήματος που προκύπτει μετά την ανορθωτική βαθμίδα [15].

Η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός ότι, όταν η τάση εξόδου της γέφυρας αυξάνεται, ο πυκνωτής φορτίζεται έως την κορυφή της κάθε περιόδου. Στη συνέχεια, κατά τη φάση που η τάση τείνει να μειωθεί, ο πυκνωτής αρχίζει να εκφορτίζεται, αποδίδοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο κύκλωμα μέχρι να φτάσει η επόμενη κορυφή, δηλαδή η επόμενη άνοδος του σήματος. Με αυτόν τον τρόπο, οι πυκνωτές «γεμίζουν» τα χρονικά κενά μεταξύ των διαδοχικών κορυφών της ανορθωμένης τάσης, με αποτέλεσμα η έξοδος να προσεγγίζει ολοένα και περισσότερο μια συνεχή μορφή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι οι πυκνωτές πρέπει να είναι μεγάλης χωρητικότητας. Ο λόγος είναι ότι, κατά τη φάση καθόδου της τάσης, το τελικό στάδιο του κυκλώματος απαιτεί σημαντικό ρεύμα για τη σωστή λειτουργία του. Σε αυτές τις στιγμές, οι πυκνωτές καλούνται να αποδώσουν άμεσα την ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει, εξασφαλίζοντας ότι η τάση τροφοδοσίας δεν θα παρουσιάσει απότομες μεταβολές ή πτώσεις.

Έτσι, μέσω της αποθήκευσης ενέργειας και της σταδιακής απόδοσής της στο κύκλωμα, οι πυκνωτές μετατρέπουν την ανορθωμένη παλμική τάση της γέφυρας σε μια πιο σταθερή και συμμετρική συνεχή τάση. Παράλληλα, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του φαινομένου του κυματισμού (ripple), το οποίο θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τόσο το προενισχυτικό στάδιο όσο και το τελικό στάδιο ισχύος. Η σωστή επιλογή και τοποθέτηση των πυκνωτών αποτελεί, επομένως, κρίσιμο βήμα για την αξιόπιστη και ομαλή λειτουργία ολόκληρου του κυκλώματος.

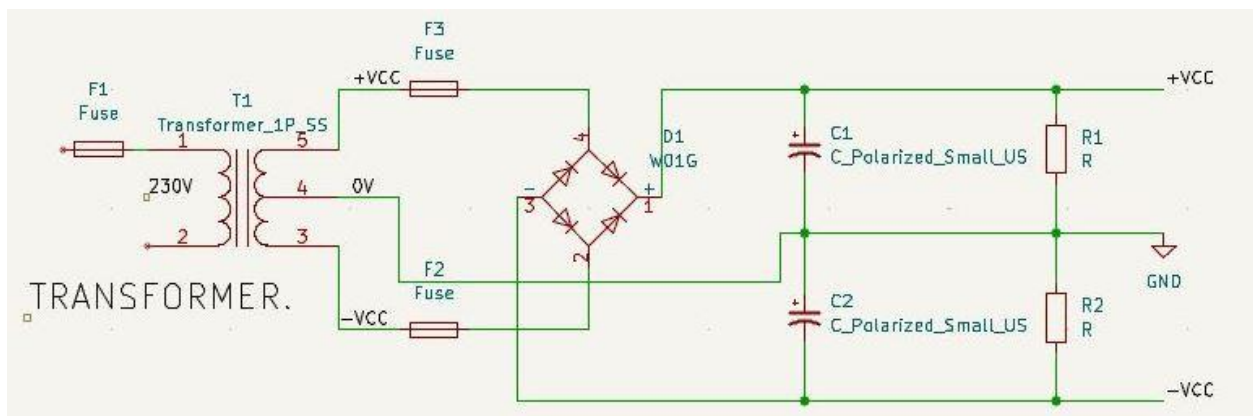


Εικόνα 4.1.3 Διαφορές «Με» και «Χωρίς» τον Πυκνωτή Εξομάλυνσης Στην Έξοδο

Συνεχίζοντας με την ίδια μεθοδική και αναλυτική προσέγγιση, μετά την τοποθέτηση των πυκνωτών εξομάλυνσης, αμέσως επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση του τροφοδοτικού μας είναι η ενσωμάτωση των δύο αντιστάσεων R1 και R2, οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα με τους πυκνωτές, ειδικά σε τροφοδοτικά με μεσαία λήψη. Αυτές οι αντιστάσεις, αν και μοιάζουν με δευτερεύοντα στοιχεία, έχουν σημαντικό και πολυδιάστατο ρόλο στην ασφάλεια, τη σταθερότητα και τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος.

Ο κύριος και πιο εμφανής λόγος για την παρουσία τους είναι η ασφάλεια. Οι μεγάλοι πυκνωτές εξομάλυνσης έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν το ηλεκτρικό τους φορτίο για λεπτά ή ακόμη και ώρες μετά το κλείσιμο του διακόπτη. Αυτό σημαίνει ότι οποιοσδήποτε ακουμπήσει το κύκλωμα για επισκευή ή ρύθμιση μπορεί να εκτεθεί σε ηλεκτροπληξία. Οι αντιστάσεις R1 και R2 παρέχουν μια ασφαλή διαδρομή για την σταδιακή εκφόρτιση των πυκνωτών, μειώνοντας την τάση σε ασφαλή επίπεδα μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Έτσι, προστατεύεται τόσο ο χρήστης όσο και τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος από τυχαίες ζημιές ή επικίνδυνες καταστάσεις [14].

Σε τροφοδοτικά με μεσαία λήψη, δημιουργούνται ουσιαστικά δύο κλάδοι τάσης: ένας θετικός (+V σε σχέση με τη γείωση) και ένας αρνητικός (-V σε σχέση με τη γείωση). Στην πράξη, οι πυκνωτές και τα υπόλοιπα εξαρτήματα κάθε κλάδου παρουσιάζουν μικρές κατασκευαστικές αποκλίσεις λόγω ανοχών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε άνιση κατανομή τάσης. Για παράδειγμα, αντί για μια συμμετρική τάση +15V/-15V, μπορεί να παρατηρηθεί +17V/-13V, γεγονός που θα δημιουργούσε αστάθεια και δυνητικά προβλήματα στα κυκλώματα που ακολουθούν. Οι αντιστάσεις R1 και R2 λειτουργούν ουσιαστικά ως διαιρέτες τάσης, εξαναγκάζοντας το «μηδέν» της μεσαίας λήψης να παραμείνει ακριβώς στη μέση και διασφαλίζοντας τη συμμετρία και ισορροπία του τροφοδοτικού.



Εικόνα 4.1.4 Σχηματικό Τροφοδοτικού : (Από Μέρος Της Εργασίας)

Ορισμένα κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης και προενισχυτικά στάδια λειτουργούν καλύτερα όταν υπάρχει έστω και ένα ελάχιστο φορτίο στο τροφοδοτικό, γνωστό και ως dummy load [16]. Οι αντιστάσεις R1 και R2 παρέχουν αυτό το ελάχιστο φορτίο, εξασφαλίζοντας ότι το τροφοδοτικό δεν μένει ποτέ σε κατάσταση «απόλυτου κενού». Αυτό αποτρέπει απότομες υπερτάσεις (voltage spikes) κατά την ενεργοποίηση ή την επαναφορά του, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά σε ευαίσθητα εξαρτήματα όπως οι NE5532 ή τα τελικά στάδια ισχύος.

Οι αντιστάσεις αυτές επιλέγονται συνήθως με υψηλή τιμή (π.χ. 2.2kΩ έως 10kΩ), ώστε να μην απορροφούν σημαντικό ρεύμα κατά τη κανονική λειτουργία και να μην υπερθερμαίνονται. Με την τοποθέτηση των αντιστάσεων R1 και R2, λοιπόν, ολοκληρώνεται ένα κρίσιμο στάδιο της σχεδίασης του τροφοδοτικού μας, εξασφαλίζοντας τόσο την **ασφάλεια και προστασία** όσο και τη **σταθερότητα και συμμετρία τάσεων**, στοιχεία απαραίτητα για την σωστή και αξιόπιστη λειτουργία όλων των επόμενων σταδίων του κυκλώματος.

Παρότι ένα τέτοιο τροφοδοτικό καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες της παρούσας κατασκευής και επιτελεί με αξιοπιστία τον βασικό του ρόλο, στην πράξη τα σύγχρονα τροφοδοτικά που συναντώνται σε εμπορικές συσκευές περιλαμβάνουν πληθώρα επιπλέον κυκλωμάτων και στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά κρίνονται απαραίτητα για την ασφαλή, σταθερή και αποδοτική λειτουργία πολύπλοκων ηλεκτρονικών συστημάτων. Σε τέτοιες εφαρμογές ενσωματώνονται προστασίες υπέρτασης και υπερέντασης, κυκλώματα ελέγχου και σταθεροποίησης, φίλτρα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς και μηχανισμοί διαχείρισης ισχύος, οι οποίοι υπερβαίνουν τις απαιτήσεις ενός απλού γραμμικού τροφοδοτικού και ανταποκρίνονται στις αυξημένες ανάγκες σύγχρονων ψηφιακών συσκευών.



Εικόνα 4.1.5 Εσωτερικό Τροφοδοτικό PS1

4.2 Ενισχυτής

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο τελεστικός ενισχυτής **NE5532**, καθώς αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους και δοκιμασμένους ενισχυτές στην κατηγορία του, με μακρόχρονη παρουσία στον χώρο των εφαρμογών ήχου. Ο συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής έχει σχεδιαστεί εξ αρχής με γνώμονα τη χρήση σε audio κυκλώματα, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή πιστότητα σήματος, σταθερή λειτουργία και αξιόπιστη συμπεριφορά σε πραγματικές συνθήκες. Παράλληλα, προσφέρει μια εξαιρετικά ισορροπημένη σχέση μεταξύ ποιότητας σήματος, σταθερότητας, διαθεσιμότητας και κόστους, στοιχεία ιδιαίτερα σημαντικά στο πλαίσιο μιας εργαστηριακής αλλά και εκπαιδευτικής κατασκευής.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του NE5532 είναι ο **χαμηλός θόρυβος εισόδου (low input noise)**, χαρακτηριστικό καθοριστικής σημασίας σε προενισχυτικά στάδια και κυκλώματα επεξεργασίας σήματος ήχου [17]. Σε τέτοιες εφαρμογές, ακόμη και μικρές ανεπιθύμητες παρεμβολές ή θόρυβος μπορούν να γίνουν αντιληπτές ακουστικά και να υποβαθμίσουν την ποιότητα της αναπαραγωγής. Ο NE5532 περιορίζει αποτελεσματικά τέτοια φαινόμενα, συμβάλλοντας σε καθαρό και «ήσυχο» σήμα. Παράλληλα, εμφανίζει **χαμηλή ολική αρμονική παραμόρφωση (THD)**, γεγονός που διασφαλίζει ότι το ενισχυμένο σήμα παραμένει πιστό στο αρχικό, χωρίς αλλοιώσεις, ακόμα και όταν το κύκλωμα λειτουργεί κοντά στα όρια του.

Επιπλέον, ο NE5532 είναι σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί άριστα με **συμμετρική τροφοδοσία**, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για τη συγκεκριμένη κατασκευή, στην οποία χρησιμοποιείται γραμμικό συμμετρικό τροφοδοτικό. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ομαλή ενίσχυση τόσο θετικών όσο και αρνητικών ημιπεριόδων του σήματος.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα θετικό χαρακτηριστικό του NE5532 είναι η **σταθερότητα και η ανθεκτικότητά του στη λειτουργία** [17]. Η εκτεταμένη χρήση του για δεκαετίες σε επαγγελματικό εξοπλισμό ήχου, όπως μίκτες, κονσόλες, προενισχυτές και συσκευές επεξεργασίας σήματος, αποτελεί έμπρακτη απόδειξη της αξιοπιστίας του τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και σε πραγματικές συνθήκες συνεχούς λειτουργίας. Επιπλέον, η ευρεία διαθεσιμότητά του στην αγορά και το χαμηλό του κόστος καθιστούν την επιλογή του ιδιαίτερα πρακτική, διευκολύνοντας τόσο την υλοποίηση όσο και τη μελλοντική συντήρηση ή αντικατάσταση του εξαρτήματος.



Εικόνα 4.2.1 NE5532

Παρότι ο τελεστικός ενισχυτής **NE5532** παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, δεν στερείται ορισμένων λειτουργικών περιορισμών, οι οποίοι ωστόσο πρέπει να αξιολογούνται πάντα σε συνάρτηση με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα από τα βασικά του μειονεκτήματα είναι το γεγονός ότι **δεν ανήκει στην κατηγορία των rail-to-rail τελεστικών ενισχυτών**. Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου του δεν μπορεί να προσεγγίσει πλήρως τα όρια της τάσης τροφοδοσίας, αλλά απαιτείται ένα συγκεκριμένο περιθώριο απόστασης από τα θετικά και αρνητικά «rails» ώστε να λειτουργεί γραμμικά και χωρίς παραμόρφωση.

Στην πράξη, ο περιορισμός αυτός συνεπάγεται ότι, σε εφαρμογές χαμηλής τάσης ή σε κυκλώματα με μονή τροφοδοσία, ο NE5532 ενδέχεται να μην μπορεί να αξιοποιήσει όλο το διαθέσιμο δυναμικό εύρος του σήματος. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη κατασκευή ο περιορισμός αυτός **δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα του κυκλώματος**, καθώς χρησιμοποιείται **συμμετρική τροφοδοσία με επαρκή περιθώρια τάσης**. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ότι το σήμα παραμένει εντός της γραμμικής περιοχής λειτουργίας του ολοκληρωμένου, αποφεύγοντας φαινόμενα κορεσμού ή παραμόρφωσης στα άκρα της εξόδου.

Επιπλέον, η χρήση συμμετρικής τροφοδοσίας επιτρέπει την ομαλή ενίσχυση και των δύο ημιπεριόδων του σήματος γύρω από το μηδενικό σημείο αναφοράς, χωρίς την ανάγκη τεχνητής μετατόπισης (offset) ή πρόσθετων κυκλωμάτων προσαρμογής. Κατά συνέπεια, ο περιορισμός της μη rail-to-rail λειτουργίας του NE5532 δεν αποτελεί πρακτικό μειονέκτημα για την παρούσα εφαρμογή, αλλά αντίθετα εντάσσεται ομαλά στο συνολικό σχεδιασμό, ο οποίος έχει εξαρχής προβλέψει τις απαιτήσεις τάσης και το επιθυμητό δυναμικό εύρος του σήματος.

Παρότι ο NE5532 παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, δεν στερείται περιορισμών. Ο **NE5532** παρουσιάζει **αυξημένη κατανάλωση ρεύματος** σε σύγκριση με νεότερους τελεστικούς ενισχυτές χαμηλής κατανάλωσης, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί με κύριο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας [17]. Το χαρακτηριστικό αυτό τον καθιστά λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές όπου η κατανάλωση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, όπως σε φορητές συσκευές, μπαταριοκίνητα κυκλώματα ή συστήματα με αυστηρούς περιορισμούς ισχύος.

Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εργασία η αυξημένη κατανάλωση δεν συνιστά ουσιαστικό μειονέκτημα. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από **σταθερό γραμμικό συμμετρικό τροφοδοτικό**, ικανό να παρέχει επαρκές ρεύμα χωρίς μεταβολές ή αστάθειες. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μεγαλύτερη κατανάλωση ρεύματος του NE5532 όχι μόνο δεν επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία του συστήματος, αλλά συχνά συνδέεται και με **βελτιωμένες επιδόσεις σε όρους θορύβου, γραμμικότητας και ικανότητας οδήγησης φορτίων**, χαρακτηριστικά ιδιαίτερα επιθυμητά σε εφαρμογές ήχου.

Κατά συνέπεια, στην παρούσα υλοποίηση, η επιλογή ενός τελεστικού ενισχυτή με υψηλότερη κατανάλωση ρεύματος κρίνεται αποδεκτή και τεχνικά δικαιολογημένη, καθώς προτάσσεται η **ποιότητα του σήματος και η σταθερότητα λειτουργίας** έναντι της εξοικονόμησης ενέργειας, η οποία δεν αποτελεί πρωτεύον κριτήριο για το συγκεκριμένο σύστημα.

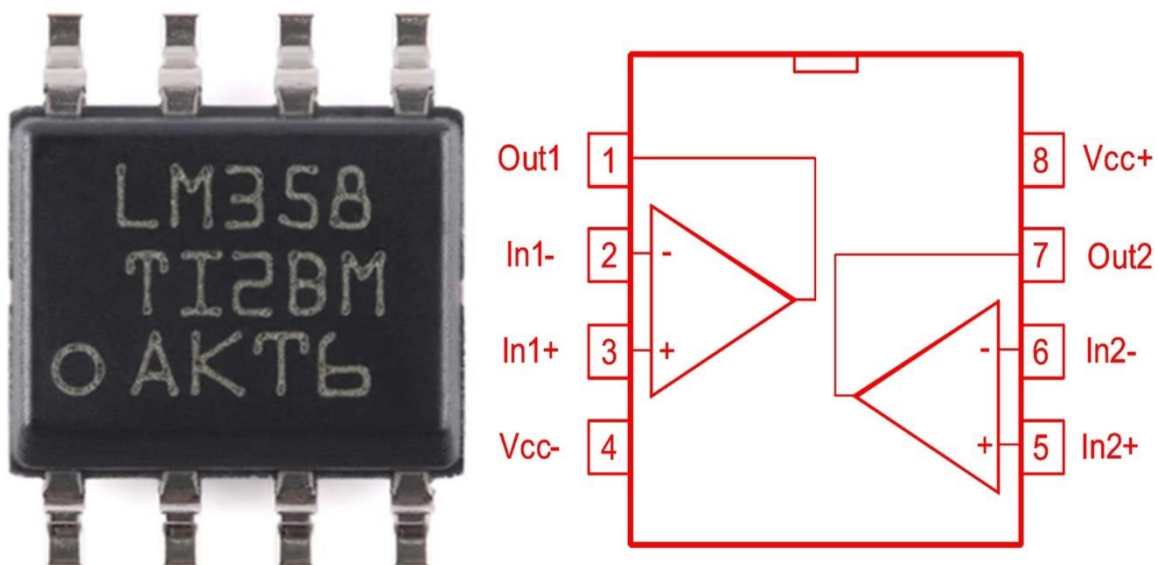
Σε σύγκριση με απλούστερους και παλαιότερους τελεστικούς ενισχυτές γενικής χρήσης, όπως ο **LM358** ή ο **LM741**, ο **NE5532** υπερτερεί σε κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζουν την ποιότητα ενός κυκλώματος ήχου. Οι LM358 και 741 έχουν σχεδιαστεί κυρίως για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων, χωρίς ιδιαίτερη μέριμνα για ακουστική πιστότητα.

Συγκεκριμένα, οι παραπάνω τελεστικοί ενισχυτές εμφανίζουν **υψηλότερο θόρυβο εισόδου, μεγαλύτερη αρμονική παραμόρφωση** και περιορισμένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τον NE5532. Στην πράξη, αυτά τα χαρακτηριστικά μεταφράζονται σε αισθητή υποβάθμιση της ποιότητας του ήχου, ιδιαίτερα σε προενισχυτικά στάδια, όπου ο θόρυβος και οι μικρές παραμορφώσεις ενισχύονται και γίνονται αντιληπτές ακουστικά. Επιπλέον, ο 741 απαιτεί σχετικά υψηλές τάσεις τροφοδοσίας και παρουσιάζει περιορισμούς στη σταθερότητα και στη δυναμική απόκριση, ενώ ο LM358, παρότι πιο σύγχρονος και χαμηλής κατανάλωσης, δεν έχει σχεδιαστεί κυρίως για εφαρμογές audio και εμφανίζει μειωμένη απόδοση σε εναλλασσόμενα σήματα ήχου.

Κατά συνέπεια, η χρήση τέτοιων τελεστικών ενισχυτών σε εφαρμογές ήχου υψηλότερων απαιτήσεων κρίνεται ακατάλληλη, καθώς δεν μπορούν να εξασφαλίσουν ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο, χαμηλή παραμόρφωση και σταθερή λειτουργία σε όλο το ακουστικό φάσμα.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν διαθέσιμοι πιο σύγχρονοι και υψηλών επιδόσεων τελεστικοί ενισχυτές, ειδικά σχεδιασμένοι για audio εφαρμογές (audio-grade high-performance op-amps), οι οποίοι προσφέρουν οριακά καλύτερες τεχνικές προδιαγραφές σε επίπεδο θορύβου και παραμόρφωσης. Παρόλα αυτά, η χρήση τους συνεπάγεται **αυξημένο κόστος**, καθώς και μεγαλύτερες απαιτήσεις στον σχεδιασμό του κυκλώματος, όπως αυστηρότερη διάταξη πλακέτας (PCB layout), προσεκτική αποσύζευξη τροφοδοσίας και αυξημένη ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, που έχει εκπαιδευτικό και εργαστηριακό χαρακτήρα, τα οριακά αυτά πλεονεκτήματα δεν μεταφράζονται σε ουσιαστική βελτίωση του τελικού αποτελέσματος. Αντιθέτως, ο **NE5532** προσφέρει την ιδανική ισορροπία μεταξύ **απόδοσης, απλότητας υλοποίησης, αξιοπιστίας και κόστους**, καθιστώντας τον μια τεχνικά ορθολογική και πλήρως τεκμηριωμένη επιλογή για τον συγκεκριμένο σκοπό.



Εικόνα 4.2.2 LM358

Σημαντικές διαφορές μεταξύ των τελεστικών ενισχυτών NE5532, LM358 και μ A741 εντοπίζονται στα βασικά ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν άμεσα την καταλληλότητά τους για εφαρμογές ήχου και γενικότερα για αναλογική επεξεργασία σήματος.

Όσον αφορά την **τάση τροφοδοσίας**, ο NE5532 έχει σχεδιαστεί για λειτουργία με συμμετρική τροφοδοσία και υποστηρίζει συνήθως τάσεις έως ± 22 V, με τυπική χρήση στα ± 16 V ή ± 18 V, προσφέροντας επαρκές περιθώριο δυναμικού για καθαρή και γραμμική ενίσχυση σημάτων ήχου [17]. Ο LM741 απαιτεί επίσης συμμετρική τροφοδοσία, όμως η τάση λειτουργίας του είναι κοντά στα ± 16 V, γεγονός που τον καθιστά λιγότερο ευέλικτο [18]. Ο LM358, από την άλλη πλευρά, ξεχωρίζει καθώς μπορεί να λειτουργήσει και με **μονή τροφοδοσία**, ενώ η μέγιστη συμμετρική του τροφοδοσία είναι συνήθως χαμηλότερη από ± 16 V, με σχεδίαση προσανατολισμένη κυρίως σε χαμηλής ισχύος και όχι audio εφαρμογές [19].

Ιδιαίτερα κρίσιμο χαρακτηριστικό για εφαρμογές ήχου είναι το **slew rate**, δηλαδή η μέγιστη ταχύτητα μεταβολής της τάσης εξόδου. Ο NE5532 παρουσιάζει υψηλό slew rate, τυπικά γύρω στα **9 V/ μ s**, επιτρέποντας την πιστή αναπαραγωγή σημάτων με απότομες μεταβολές και υψηλές συχνότητες χωρίς παραμόρφωση. Αντίθετως, ο LM741 διαθέτει χαμηλό slew rate, περίπου **0,5 V/ μ s**, ενώ ο LM358 βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα (περίπου **0,3–0,6 V/ μ s**), γεγονός που οδηγεί σε αισθητή παραμόρφωση όταν χρησιμοποιούνται σε audio σήματα μεγαλύτερου εύρους ή συχνοτήτων.

Αντίστοιχα, στο **εύρος ζώνης (bandwidth)**, ο NE5532 υπερτερεί σημαντικά, με gain-bandwidth product της τάξης των **10 MHz**, προσφέροντας σταθερή απόκριση σε ολόκληρο το ακουστό φάσμα. Ο LM741 περιορίζεται περίπου στο **1 MHz**, ενώ ο LM358 κινείται ακόμη χαμηλότερα, γύρω στα **0,7–1 MHz**, επαρκή μόνο για απλές χαμηλής συχνότητας εφαρμογές.

Σχετικά με το **ρεύμα τροφοδοσίας σε κατάσταση ηρεμίας (supply current)**, ο NE5532 καταναλώνει περισσότερο ρεύμα (περίπου **8 mA ανά ολοκληρωμένο**), στοιχείο που αντικατοπτρίζει τον προσανατολισμό του στην υψηλή ποιότητα σήματος. Αντίθετα, ο LM358 είναι σχεδιασμένος για χαμηλή κατανάλωση, με ρεύμα ηρεμίας της τάξης του **1 mA**, ενώ ο LM741 καταναλώνει περίπου **2–3 mA**. Η αυξημένη κατανάλωση του NE5532 δεν αποτελεί μειονέκτημα σε σταθερά, γραμμικά τροφοδοτικά, αλλά είναι καθοριστικός παράγοντας για την επίτευξη χαμηλού θορύβου και καλύτερης γραμμικότητας.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει ο **θόρυβος εισόδου**, παράμετρος κρίσιμη για εφαρμογές ήχου. Ο NE5532 παρουσιάζει πολύ χαμηλό θόρυβο (τυπικά **5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$**), καθιστώντας τον εξαιρετική επιλογή για προενισχυτικά στάδια. Αντίθετα, ο μ A741 και ο LM358 εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερο θόρυβο, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για απαιτητικές audio εφαρμογές, καθώς ο θόρυβος γίνεται αντιληπτός στο τελικό ακουστικό αποτέλεσμα.

Συνολικά, η σύγκριση αυτή αναδεικνύει ότι ο NE5532 προσφέρει σαφώς ανώτερη απόδοση σε κρίσιμες παραμέτρους για επεξεργασία σήματος ήχου, σε σχέση με τον LM358 και τον μ A741, επιβεβαιώνοντας την επιλογή του ως την καταλληλότερη λύση για την παρούσα εργασία.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE/5532/5532A			NE/SA/5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{OS}	Offset voltage	Over temperature		0.5	2		0.5	4	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$				5		3		5	mV $\mu V/^{\circ}C$
I _{OS}	Offset current	Over temperature			100		10	150	nA
$\Delta I_{OS}/\Delta T$				200		200		200	nA $pA/^{\circ}C$
I _S	Input current	Over temperature		200	400		200	800	nA
$\Delta I_S/\Delta T$				5		700		5	1000
I _{CC}	Supply current	Over temperature		8	10.5		8	16	mA
						13			
V _{CM}	Common-mode input range		≈ 12	≈ 13		≈ 12	≈ 13		V
CMRR	Common-mode rejection ratio		80	100		70	100		dB
PSRR	Power supply rejection ratio			10	50		10	100	$\mu V/V$
A _{VOL}	Large-signal voltage gain	R _L $\geq 2k\Omega$, V _O $\approx 10V$ Over temperature	50	100		25	100		V/mV
		R _L $\geq 600\Omega$, V _O $\approx 10V$ Over temperature	25			15			V/mV
		R _L $\geq 600\Omega$, V _O $\approx 10V$	40	50		15	50		V/mV
		Over temperature	20			10			V/mV
V _{OUT}	Output swing	R _L $\geq 600\Omega$ Over temperature	≈ 12	≈ 13		≈ 12	≈ 13		V
		R _L $\geq 600\Omega$, V _S $\approx 18V$ Over temperature	≈ 10	≈ 12		≈ 10	≈ 12		
		R _L $\geq 600\Omega$, V _S $\approx 18V$	≈ 15	≈ 16		≈ 15	≈ 16		
		Over temperature	≈ 12	≈ 14		≈ 12	≈ 14		
		R _L $\geq 2k\Omega$ Over temperature	≈ 13	≈ 13.5		≈ 13	≈ 13.5		
R _{IN}	Input resistance		30	300		30	300		k Ω
I _{SC}	Output short circuit current		10	38	60	10	38	60	mA

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SA/SE5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	
R _{OUT}	Output resistance	A _V =30dB Closed-loop f=10kHz, R _L =600 Ω		0.3		Ω
	Overshoot	Voltage-follower V _{IN} =100mV _{P-P} C _L =100pF, R _L =600 Ω		10		%
A _V	Gain	f=10kHz		2.2		V/mV
GBW	Gain bandwidth product	C _L =100pF, R _L =600 Ω		10		MHz
SR	Slew rate			9		V/ μs
	Power bandwidth	V _{OUT} $\approx 10V$ V _{OUT} $\approx 14V$, R _L =600 Ω , V _{CC} $\approx 18V$		140		kHz
				100		kHz

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SE5532			NE/SA/SE5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{NOISE}	Input noise voltage	f _o =30Hz		8			8	12	nV/ \sqrt{Hz}
		f _o =1kHz		5			5	6	nV/ \sqrt{Hz}
I _{NOISE}	Input noise current	f _o =30Hz		2.7			2.7		pA/ \sqrt{Hz}
		f _o =1kHz		0.7			0.7		pA/ \sqrt{Hz}
	Channel separation	f=1kHz, R _S =5k Ω		110			110		dB

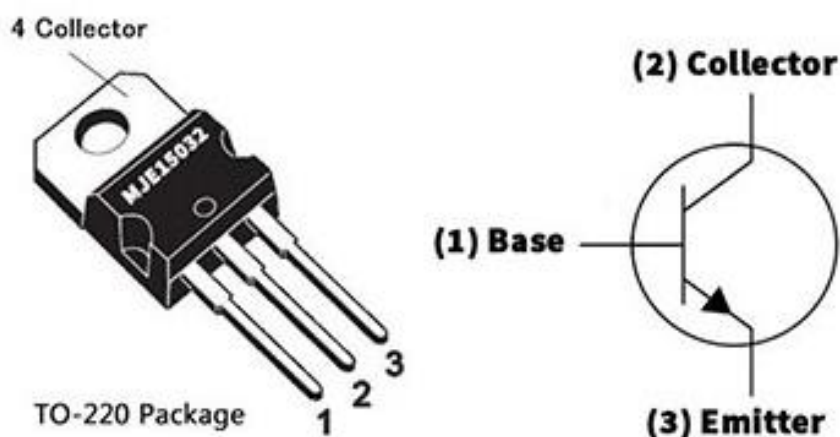
Εικόνα 4.2.3 Χαρακτηριστικά

Τα τρανζίστορ εξόδου **MJE15032 και MJE15033** που επιλέχθηκαν για την παρούσα κατασκευή συνιστούν μια εξαιρετική και πολύ καλά μελετημένη επιλογή για το τελικό στάδιο του ενισχυτή, καθώς συνδυάζουν ισχυρή ηλεκτρική απόδοση με αξιοπιστία και αντοχή σε μακροχρόνια λειτουργία. Τα συγκεκριμένα τρανζίστορ έχουν σχεδιαστεί ειδικά για **γραμμικά στάδια ισχύος**, προσφέροντας **συμμετρική συμπεριφορά σε push-pull διατάξεις**, η οποία είναι καθοριστική για τη μείωση της παραμόρφωσης διασταύρωσης και τη διατήρηση της πιστής αναπαραγωγής του σήματος, ακόμη και σε υψηλές στάθμες εξόδου.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι η ικανότητά τους να χειρίζονται **υψηλά ρεύματα και τάσεις**, ενώ παράλληλα διαθέτουν θερμική σταθερότητα που τους επιτρέπει να λειτουργούν **χωρίς έντονη υπερθέρμανση**, ακόμη και σε συνεχείς και απαιτητικές δοκιμές σε εργαστήριο. Η γραμμική τους απόκριση και το υψηλό gain διασφαλίζουν ότι το σήμα που λαμβάνεται από τα προενισχυτικά στάδια μεταφέρεται στο τελικό στάδιο με **ακρίβεια και ελάχιστη παραμόρφωση**, διατηρώντας τον ήχο καθαρό και πιστό στην πηγή.

Επιπλέον, η αξιοπιστία και η ευκολία ενσωμάτωσης των MJE15032/MJE15033 συνδέονται άμεσα με τη γενικότερη φιλοσοφία της εργασίας: η χρήση **σταθερών, επαγγελματικών και ευρέως διαθέσιμων εξαρτημάτων** που επιτρέπουν όχι μόνο **σταθερή και ασφαλή λειτουργία**, αλλά και **ευκολία συντήρησης** και προσαρμογή σε διαφορετικά σενάρια χρήσης, χωρίς να αυξάνεται η πολυπλοκότητα ή το κόστος της κατασκευής.

Με βάση όλα τα παραπάνω, τα **MJE15032 και MJE15033** αποδεικνύονται **ιδανικά για την εφαρμογή αυτή**, εξασφαλίζοντας ότι το τελικό στάδιο του ενισχυτή θα λειτουργεί με **ασφάλεια, υψηλή αποδοτικότητα, ακρίβεια και πιστότητα σήματος**, παρέχοντας ταυτόχρονα ανθεκτικότητα και αξιοπιστία που ξεπερνούν τις απαιτήσεις ενός εργαστηριακού πειράματος. Η επιλογή τους ενισχύει συνολικά την ποιότητα και την αξιοπιστία της κατασκευής, κάνοντάς την κατάλληλη για εκπαιδευτική χρήση αλλά και για αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες ήχου υψηλής πιστότητας.



Εικόνα 4.2.4 MJE15032 Transistor

Η επιλογή των **MJE15032/MJE15033** έναντι άλλων δημοφιλών τρανζίστορ ισχύος, όπως τα **TIP41/TIP42** ή τα **2N3055**, βασίζεται σε συγκεκριμένα τεχνικά και πρακτικά κριτήρια που σχετίζονται με τις απαιτήσεις της παρούσας κατασκευής. Σε σύγκριση με τα TIP41/TIP42, τα MJE15032/33 προσφέρουν **υψηλότερο gain (hFE) και βελτιωμένη γραμμικότητα**, γεγονός που σημαίνει ότι η μεταφορά του σήματος γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και με μικρότερη παραμόρφωση. Επιπλέον, διαθέτουν **καλύτερη απόκριση σε υψηλές συχνότητες**, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές ήχου υψηλής πιστότητας, όπου ακόμη και μικρές ανωμαλίες στην απόκριση μπορούν να γίνουν ακουστικά αντιληπτές.

Σε σχέση με τα κλασικά 2N3055, τα MJE15032/33 έχουν **χαμηλότερη θερμική αντίσταση** και **πιο σταθερή συμπεριφορά υπό συνεχές φορτίο**, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και αυξάνοντας την αξιοπιστία σε παρατεταμένες δοκιμές. Επιπλέον, τα 2N3055, αν και ιστορικά δημοφιλή, είναι σχεδιασμένα για γενική ισχύ και δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για **γραμμικές audio εφαρμογές**, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν υψηλότερη παραμόρφωση και χαμηλότερο gain σε χαμηλές και μεσαίες στάθμες σήματος.

Άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των MJE15032/MJE15033 είναι η **συμμετρική συμπεριφορά τους σε push-pull διάταξη**, η οποία είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης διασταύρωσης (crossover distortion). Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί με TIP41/TIP42 ή 2N3055, τα οποία μπορεί να απαιτούν επιπλέον θερμική ή ηλεκτρική προσαρμογή για να πετύχουν παρόμοιο αποτέλεσμα.

Επιπλέον, τα MJE15032/33 έχουν **χαμηλότερο συντελεστή θορύβου** και καλύτερη θερμική σταθερότητα, ενώ παραμένουν **εύκολα διαθέσιμα και οικονομικά**, διατηρώντας τη φιλοσοφία της εργασίας: χρήση αξιόπιστων, επαγγελματικών εξαρτημάτων που εξασφαλίζουν **σταθερή λειτουργία, υψηλή ποιότητα ήχου και ασφάλεια**, χωρίς να αυξάνεται η πολυπλοκότητα ή το κόστος του κυκλώματος [20].

Συνολικά, τα MJE15032/MJE15033 αποτελούν μια **σίγουρη, επαγγελματική επιλογή** για το τελικό στάδιο, προσφέροντας ένα βέλτιστο συνδυασμό **ισχύος, γραμμικότητας, θερμικής αξιοπιστίας και ποιότητας ήχου**, καθιστώντας τα σαφώς πιο κατάλληλα για την παρούσα εφαρμογή σε σχέση με τα TIP41/TIP42 ή τα 2N3055. Η χρήση τους διασφαλίζει ότι το τελικό στάδιο του ενισχυτή θα παραμένει **αξιόπιστο, αποδοτικό και πιστό σε κάθε είδους σήμα**, ακόμα και σε παρατεταμένη ή έντονη λειτουργία.



Εικόνα 4.2.5 2N3055 Transistor

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	250	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	250	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	5.0	Vdc
Collector Current - Continuous	I_C	8.0	Adc
Collector Current - Peak	I_{CM}	16	Adc
Base Current	I_B	2.0	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	50 0.40	W W/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	2.0 0.016	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
ESD - Human Body Model	HBM	3B	V
ESD - Machine Model	MM	C	V

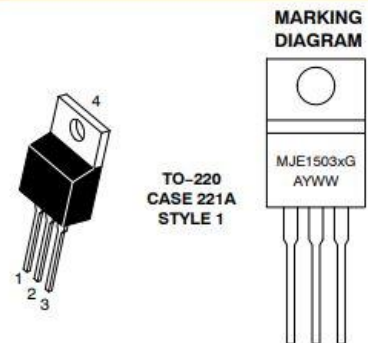
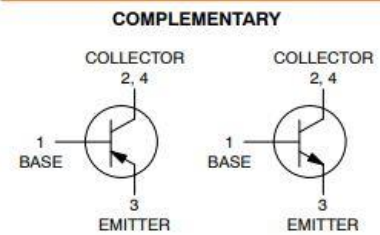
Εικόνα 4.2.6



APPLICATION: The diode is NOT included here.

Εικόνα 4.2.7 Transistor

**POWER TRANSISTORS
COMPLEMENTARY SILICON
250 VOLTS, 50 WATTS**



Εικόνα 4.2.8
MJE15032

Εφόσον πλέον έχουμε καταλήξει στην επιλογή των βασικών στοιχείων που θα συνθέσουν το κύκλωμά μας συγκεκριμένα των τρανζίστορ εξόδου MJE15032/MJE15033 και του ολοκληρωμένου NE5532—το επόμενο βήμα είναι η πλήρης θεωρητική υλοποίηση της κατασκευής. Αυτή η φάση δεν αποτελεί απλώς μια απλή αναπαράσταση των στοιχείων σε σχέδιο, αλλά μια οργανωμένη διαδικασία που συνδυάζει τη γνώση ηλεκτρονικών, τη λογική σχεδίαση και την προσοχή στη λεπτομέρεια, με στόχο να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα, η ασφάλεια και η υψηλή ποιότητα του τελικού σήματος.

Η θεωρητική υλοποίηση ξεκινά με τον ακριβή σχεδιασμό των συνδέσεων. Κάθε εξάρτημα πρέπει να τοποθετηθεί σε σωστή θέση, να ενσωματωθεί με ακρίβεια και να συνδεθεί σύμφωνα με τις αρχές της ηλεκτρονικής μηχανικής. Οι συνδέσεις δεν περιορίζονται μόνο στη μετάδοση σήματος από το ένα στάδιο στο άλλο, αλλά περιλαμβάνουν και την ενσωμάτωση των στοιχείων προστασίας και εξισορρόπησης, όπως είναι οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα φίλτρα. Οι πυκνωτές εξομάλυνσης, για παράδειγμα, επιτελούν διπλό ρόλο: αφενός περιορίζουν τις αιχμές τάσης και τις διακυμάνσεις (ripple), αφετέρου εξασφαλίζουν ότι το τελικό στάδιο θα λαμβάνει μια σταθερή, συμμετρική τάση, ανεξαρτήτως των μεταβολών στην είσοδο ή στη φορτία.

Παράλληλα, οι αντιστάσεις τοποθετούνται στρατηγικά για να επιτελέσουν βασικές λειτουργίες προστασίας και ισορροπίας. Πέρα από το ότι παρέχουν ασφάλεια στο χρήστη, αποφορτίζοντας ταυτόχρονα τυχόν συσσωρευμένη ενέργεια στους πυκνωτές, συμβάλλουν στη διατήρηση της συμμετρίας της μεσαίας λήψης σε κυκλώματα με συμμετρική τροφοδοσία. Αυτό είναι κρίσιμο, καθώς η μικρή ανισορροπία στις τάσεις των δύο κλάδων μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις ή παραμόρφωση στην έξοδο, επηρεάζοντας την πιστότητα του ήχου.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στα φίλτρα, τα οποία τοποθετούνται όπου είναι απαραίτητο για την ελαχιστοποίηση του θορύβου και των παρασιτικών σημάτων. Η επιλογή και η τοποθέτηση των φίλτρων γίνεται με γνώμονα τη διατήρηση καθαρού ήχου και την αποφυγή ακουστικών ανεπιθύμητων παρεμβολών, δημιουργώντας έτσι μια έξοδο που είναι ευχάριστη και ξεκούραστη στο αυτί. Η σωστή χρήση φίλτρων είναι καθοριστική για εφαρμογές audio υψηλής ποιότητας, όπου ακόμα και μικρές παρεμβολές μπορούν να γίνουν αντιληπτές και να μειώσουν την ακουστική εμπειρία.

Η λεπτομερής μελέτη των συνδέσεων, η ενσωμάτωση των προστατευτικών στοιχείων και η προσεκτική επιλογή των φίλτρων εξασφαλίζουν ότι το τελικό κύκλωμα θα είναι όχι μόνο λειτουργικό, αλλά και άρτιο από άποψη σχεδίασης και ακουστικής εμπειρίας.



Εικόνα 4.2.9 Τροφή Για Σκέψη

Τοποθετώντας, λοιπόν, τον NE5532 στο επίκεντρο του κυκλώματος, ήρθε η στιγμή να στραφούμε στα βασικά εξαρτήματα που συνθέτουν το στάδιο της προενίσχυσης. Αυτό το στάδιο είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς κάθε μικρή παράλειψη ή λάθος μπορεί να επιβαρύνει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα και να μειώσει την ποιότητα του ήχου που θα παραχθεί. Η προενίσχυση δεν είναι απλώς μια διαδικασία αύξησης της τάσης του σήματος· είναι η φάση κατά την οποία καθορίζεται η καθαρότητα, η σταθερότητα και η δυναμική απόκριση του ήχου, στοιχεία που θα καθορίσουν την ακουστική εμπειρία του ακροατή.

Πρώτο και κύριο εξάρτημα που απαιτείται σε αυτό το στάδιο είναι το ποτενσιόμετρο. Η χρήση του είναι απολύτως αναγκαία, καθώς τοποθετείται στην έξοδο της πηγής και λειτουργεί ως ενδιάμεσος μεταξύ της πηγής σήματος και της εισόδου του NE5532. Το ποτενσιόμετρο δεν περιορίζεται μόνο στην απλή ρύθμιση της έντασης· η παρουσία του εξασφαλίζει ότι η αύξηση ή η μείωση της στάθμης του ήχου θα γίνεται ομοιόμορφα, χωρίς απότομες μεταβολές ή ανισορροπίες. Με άλλα λόγια, μετατρέπει την ένταση σε μια αναλογική, ομαλή διαδικασία που ακολουθεί τη φυσική κλίμακα της ανθρώπινης ακοής, επιτρέποντας στο χρήστη να ελέγχει με ακρίβεια τη δυναμική του σήματος.

Η επιλογή της τιμής του ποτενσιόμετρου είναι επίσης καθοριστική. Δεν αρκεί απλώς να υπάρχει· η αντίσταση και η γραμμικότητα του ποτενσιόμετρου καθορίζουν τη συμπεριφορά του σήματος κατά τη μεταβολή της στάθμης. Ένα σωστά επιλεγμένο ποτενσιόμετρο διασφαλίζει ότι σε όλο το εύρος περιστροφής του, η αύξηση ή η μείωση της έντασης θα είναι σταθερή και προβλέψιμη, χωρίς διακοπές ή ασυμμετρίες που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν διακυμάνσεις στον ήχο.

Επιπλέον, η τοποθέτηση του ποτενσιόμετρου στη σωστή θέση του κυκλώματος δεν είναι καθόλου τυχαία ή δευτερεύουσα λεπτομέρεια· αντιθέτως, αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη σωστή λειτουργία του σταδίου προενίσχυσης. Το ποτενσιόμετρο πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς στην είσοδο του σήματος που προέρχεται από την εξωτερική πηγή. Με άλλα λόγια, κάθε κύμα ήχου που εισέρχεται στον προενισχυτή περνά πρώτα από αυτό το στοιχείο, όπου ρυθμίζεται η ένταση του με ακρίβεια. Η θέση αυτή διασφαλίζει ότι το σήμα εισέρχεται στον NE5532 ήδη προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις του κυκλώματος, χωρίς υπερτάσεις ή απώλειες που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν παραμορφώσεις ή αστάθεια στο τελικό αποτέλεσμα.

Στο σχέδιο του κυκλώματος που συνοδεύει την παρούσα εργασία, το ποτενσιόμετρο φέρει την κωδική ονομασία **RV1 (potentiometer)**, καθιστώντας εύκολη την αναγνώρισή του και τη σύνδεσή του σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία. Η ονομασία αυτή δεν είναι απλώς τυπική· υποδεικνύει τη λειτουργική σημασία του στοιχείου, δηλαδή τον έλεγχο της εισερχόμενης στάθμης του σήματος πριν από την προενίσχυση. Η προσεκτική τοποθέτηση του RV1 διασφαλίζει ότι η μεταβολή της έντασης είναι ομαλή, γραμμική και πλήρως ελεγχόμενη, χωρίς απότομες αυξομειώσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα του ήχου.

Με αυτόν τον τρόπο, το ποτενσιόμετρο λειτουργεί ως ο πρώτος φραγμός προστασίας και ρύθμισης: ελέγχει την ισχύ του σήματος, προστατεύει τον NE5532 από πιθανές υπερτάσεις και ταυτόχρονα προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να διαμορφώνει την ένταση με ευκολία και ακρίβεια. Επιπλέον, η σωστή τοποθέτηση του RV1 διευκολύνει και την επίτευξη συμμετρικής και σταθερής λειτουργίας του κυκλώματος, μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα ανεπιθύμητων παραμορφώσεων ή ηλεκτρικών θορύβων που μπορούν να προκύψουν από αστάθειες στην είσοδο.

Συνολικά, η παρουσία και η σωστή ενσωμάτωση του RV1 στο στάδιο προενίσχυσης δεν είναι απλώς ένα τυπικό βήμα κατασκευής· αποτελεί θεμέλιο για τη διασφάλιση υψηλής πιστότητας, σταθερότητας

και ποιότητας του ήχου, θέτοντας τις βάσεις ώστε το τελικό σήμα που φτάνει στο στάδιο ενίσχυσης ισχύος να είναι καθαρό, ισορροπημένο και πλήρως ελεγχόμενο.

Αμέσως μετά, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον **πυκνωτή C1**, με τιμή **4,7 μF** , η τοποθέτηση του οποίου στο συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος έχει καθοριστική σημασία για τη σωστή λειτουργία του προενισχυτή. Ο ρόλος του C1 δεν είναι τυχαίος· πρόκειται για ένα κρίσιμο στοιχείο που λειτουργεί ως «φίλτρο» των συνεχών συνιστωσών τάσης (DC) που μπορεί να εισέρχονται από την πηγή σήματος προς την είσοδο του ενισχυτή. Χωρίς αυτόν τον πυκνωτή, οποιαδήποτε ανεπιθύμητη σταθερή τάση θα μπορούσε να μεταδοθεί στα επόμενα στάδια, προκαλώντας παραμορφώσεις, αστάθειες ή ακόμη και ζημιές στα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Ο C1 επιτελεί ουσιαστικά δύο βασικές λειτουργίες ταυτόχρονα. Πρώτον, **αποκόπτει τις DC συνιστώσες**, επιτρέποντας μόνο την καθαρή AC πληροφορία του ήχου – δηλαδή το πραγματικό ηχητικό σήμα – να περάσει προς τον NE5532 και τα επόμενα στάδια. Δεύτερον, **προστατεύει το κύκλωμα** από μη αναστρέψιμες ηλεκτρικές επιβαρύνσεις ή λάθη κατά τη σύνδεση εξωτερικών πηγών σήματος, μειώνοντας τον κίνδυνο βλάβης του ολοκληρωμένου ή των τρανζίστορ εξόδου.

Με άλλα λόγια, ο C1 διασφαλίζει ότι **μόνο η μουσική πληροφορία περνά προς τα επόμενα στάδια**, απομακρύνοντας κάθε περιττή «βαβούρα», ανεπιθύμητο θόρυβο ή στατική τάση που θα αλλοίωνε την καθαρότητα του ήχου. Η παρουσία του επιτρέπει στο σήμα να κυκλοφορεί με ομαλή και φυσική ροή, διατηρώντας την ποιότητα του ήχου υψηλή, χωρίς ατέλειες ή χαρακτηριστικά ερασιτεχνικού ήχου που θα μπορούσαν να προκύψουν από ανεπιθύμητες DC συνιστώσες.

Συνολικά, ο C1 δεν είναι απλώς ένας τυπικός πυκνωτής· λειτουργεί ως «φρουρός» της καθαρότητας του σήματος, εξασφαλίζοντας ότι η είσοδος του προενισχυτή παραμένει ακριβής, ασφαλής και έτοιμη να αποδώσει υψηλής ποιότητας ήχο χωρίς παραμορφώσεις ή ηλεκτρικές ανωμαλίες.

Στη συνέχεια, στο κύκλωμα συναντάμε την **αντίσταση R2**, η οποία τοποθετείται αμέσως μετά τον πυκνωτή C1 και συνδέεται κατευθείαν προς τη γείωση. Ο ρόλος της R2 είναι καθοριστικός για τη σταθερότητα και την ασφάλεια του σήματος: λειτουργεί ως **διάυλος εκφόρτισης για οποιαδήποτε υπολειπόμενη DC τάση** που ενδέχεται να παραμείνει στον πυκνωτή. Χωρίς αυτήν, το φορτίο που συγκεντρώνεται στον C1 θα μπορούσε να δημιουργήσει στιγμιαίες αυξομειώσεις ή ακόμα και δυνατούς θορύβους, ιδίως κατά την εκκίνηση του κυκλώματος ή όταν η πηγή σήματος παρουσιάζει μεταβολές.

Η σύνδεση της R2 με τη γείωση επιτρέπει την **απορρόφηση αυτών των ανεπιθύμητων DC συνιστωσών** με ασφαλή και ομαλό τρόπο, μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα δημιουργίας εκρήξεων ή απότομων παλμών θορύβου που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα του ήχου. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα που φτάνει στον προενισχυτή παραμένει καθαρό, σταθερό και χωρίς παραμορφώσεις, εξασφαλίζοντας ότι η είσοδος του NE5532 δέχεται μόνο την επιθυμητή ηχητική πληροφορία και όχι ανεπιθύμητες παρεμβολές.

Στην ουσία, η R2 λειτουργεί σαν **ασπίδα προστασίας του σήματος**, εξασφαλίζοντας ότι κάθε υπολειπόμενη ενέργεια από τον C1 απομακρύνεται με ασφάλεια προς τη γείωση, διατηρώντας την ομαλή ροή και την καθαρότητα του ήχου σε όλο το στάδιο της προενίσχυσης.

Η **αντίσταση R3**, η οποία συνδέεται με τη **μη αναστρέφουσα είσοδο** του NE5532 (στο πόδι 3 του ολοκληρωμένου), τοποθετήθηκε για να προσφέρει ένα **επιπλέον επίπεδο προστασίας** στο κύκλωμα. Αν και η R2 εκφορτίζει τις υπολειπόμενες DC τάσεις του C1, σε περίπτωση που περάσει μια **αιφνίδια αιχμή τάσης (spike)** ή αν ο χρήστης ακουμπήσει κατά λάθος το σήμα, για παράδειγμα λόγω **στατικού ηλεκτρισμού**, η R3 λειτουργεί σαν **ασφαλιστική δικλείδα**.

Πιο συγκεκριμένα, περιορίζει **το ρεύμα που προσπαθεί να εισέλθει** στη μη αναστρέφουσα είσοδο, προστατεύοντας τα ευαίσθητα τρανζίστορ του NE5532 από πιθανή **εσωτερική βλάβη ή καταστροφή**. Με αυτόν τον τρόπο, η παρουσία της R3 εξασφαλίζει ότι το ολοκληρωμένο παραμένει αξιόπιστο και ανθεκτικό ακόμα και σε ακραίες ή απρόβλεπτες καταστάσεις, διατηρώντας τη σταθερότητα και την ασφάλεια του προενισχυτικού σταδίου.

Στην ουσία, η R3 λειτουργεί σαν **προληπτικός φραγμός**: απορροφά ανεπιθύμητα ρεύματα πριν φτάσουν στο κρίσιμο σημείο του κυκλώματος, ενισχύοντας την αξιοπιστία της κατασκευής και διασφαλίζοντας ότι η ποιότητα του ήχου παραμένει καθαρή, χωρίς απρόβλεπτες παραμορφώσεις ή βλάβες.

Ο πυκνωτής C2 σε συνδυασμό με τις αντιστάσεις R4 έως R9 διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία, τη σταθερότητα και τη γραμμικότητα του μη αναστρέφοντος προενισχυτή. Η τοποθέτησή τους στα συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος δεν είναι τυχαία, αλλά προκύπτει από τις βασικές αρχές λειτουργίας των τελεστικών ενισχυτών και ειδικότερα από τις απαιτήσεις της αρνητικής ανάδρασης.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, πρόκειται για διάταξη μη αναστρέφοντος ενισχυτή, όπου το σήμα ήχου εισέρχεται από τη μη αναστρέφουσα είσοδο του NE5532 (pin 3, σύμβολο +). Σε αυτή τη διαμόρφωση, η πολικότητα του σήματος στην έξοδο παραμένει ίδια με εκείνη της εισόδου, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές ήχου, καθώς διατηρείται η φασική συνοχή του σήματος και αποφεύγονται ανεπιθύμητες ακουστικές αλλοιώσεις.

Ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προσπαθεί συνεχώς να εξισώσει τις τάσεις στις δύο εισόδους του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του δικτύου αρνητικής ανάδρασης, το οποίο αποτελείται κυρίως από τις αντιστάσεις R9 και R4, καθώς και από τον πυκνωτή C2. Η R9 (100kΩ) συνδέει την έξοδο του ενισχυτή (pin 1) με την αναστρέφουσα είσοδο (pin 2), επιστρέφοντας ένα ποσοστό του σήματος εξόδου πίσω στην είσοδο. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται και σταθεροποιείται το κέρδος τάσης του ενισχυτή.

Ο πυκνωτής C2 παίζει έναν κρίσιμο ρόλο στη σταθερότητα του ενισχυτή, λειτουργώντας ως "φίλτρο" που διαχωρίζει τη συμπεριφορά του κυκλώματος στο εναλλασσόμενο σήμα (AC - ήχος) από τη συνεχή τάση (DC).

Στο συνεχές ρεύμα (DC), ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως ανοιχτό κύκλωμα (διακοπή). Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση **R4** "απομονώνεται" από τη γη. Αυτό αποτρέπει την ενίσχυση τυχόν σφαλμάτων τάσης που θα μπορούσαν να υπερθερμάνουν τα τρανζίστορ εξόδου ή να καταστρέψουν το ηχείο.

Στο εναλλασσόμενο σήμα (τον ήχο που θέλουμε να ακούσουμε), ο C2 επιτρέπει στο σήμα να περάσει προς τη γη μέσω της R4. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπει στον διαιρέτη τάσης (R9/R4) να λειτουργήσει κανονικά, προσφέροντας την ενίσχυση που πραγματικά επιθυμούμε ανάλογα με τον λόγο κέρδους.

Ο **λόγος κέρδους** εκφράζει πόσες φορές μεγαλύτερη θα είναι η τάση στην έξοδο σε σχέση με την τάση που εισέρχεται στην είσοδο του ενισχυτή [14].

Εφόσον το NE5532 είναι συνδεδεμένο ως **μη αναστρέφων ενισχυτής**, ο υπολογισμός βασίζεται στις αντιστάσεις του δικτύου ανάδρασης, δηλαδή την **R9** και την **R4**

Ο μαθηματικός τύπος είναι:

$$AV = 1 + \frac{R9}{R4}$$

(4.2)

Εφαρμόζοντας τις τιμές από το σχέδιο ο λόγος κέρδους στην δική μας περίπτωση θα είναι 22,27. Αυτό σημαίνει ότι αν δώσουμε στην είσοδο ένα σήμα **100mV**, στην έξοδο θα πάρουμε περίπου **2,2V**. Στους ενισχυτές ήχου Class A/B, οι "φυσιολογικές" τιμές κέρδους εξαρτώνται από την πηγή του σήματος: **Η τιμή 22,27 του σχεδίου, θεωρείται ιδανική και αρκετά συνηθισμένη.** Επιτρέπει σε μια τυπική πηγή ήχου (όπως ένα κινητό, ένα CD player ή ένα PC που βγάζουν ~1V RMS) να οδηγήσει τον ενισχυτή στην πλήρη του ισχύ χωρίς να "κλιπάρει" (παραμορφώνει) εύκολα το σήμα.



Εικόνα 4.2.10 Ενισχυτής Ήχου

Έπειτα, σειρά έχει να ασχοληθούμε με το αμέσως επόμενο στάδιο, δηλαδή την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή NE5532 και τα επιμέρους στοιχεία που το περιβάλλουν, τόσο πριν όσο και μετά τα σημεία πόλωσης των τρανζίστορ του τελικού σταδίου εξόδου MJE15032 και MJE15033. Το συγκεκριμένο στάδιο αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα σημεία ολοκλήρου του κυκλώματος, καθώς λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του χαμηλής ισχύος προενισχυτικού σταδίου και του τελικού σταδίου ισχύος, το οποίο καλείται να οδηγήσει φορτία με αυξημένες απαιτήσεις ρεύματος.

Η έξοδος του NE5532, αν και χαρακτηρίζεται από πολύ καλή γραμμικότητα, χαμηλό θόρυβο και ικανοποιητική ικανότητα οδήγησης, δεν είναι σχεδιασμένη για να τροφοδοτεί απευθείας το τελικό φορτίο. Για τον λόγο αυτό, παρεμβάλλεται το ενδιάμεσο στάδιο που οδηγεί και πολώνει σωστά τα τρανζίστορ MJE15032 (NPN) και MJE15033 (PNP), τα οποία λειτουργούν σε διάταξη push-pull και αναλαμβάνουν την παροχή του απαιτούμενου ρεύματος στην έξοδο.

Τα στοιχεία που βρίσκονται αμέσως μετά την έξοδο του NE5532 έχουν διπλό ρόλο. Αφενός εξασφαλίζουν την ομαλή μετάβαση του σήματος από το επίπεδο τάσης του τελεστικού ενισχυτή στο επίπεδο οδήγησης των τρανζίστορ ισχύος, και αφετέρου προστατεύουν τόσο τον ίδιο τον NE5532 όσο και τα τρανζίστορ από απότομες μεταβολές τάσης, υπερρεύματα ή φαινόμενα αστάθειας [14]. Αντιστάσεις βάσης, πυκνωτές σύζευξης και στοιχεία πόλωσης συνεργάζονται ώστε το σήμα να μεταφερθεί καθαρά, χωρίς παραμόρφωση και χωρίς την εισαγωγή ανεπιθύμητου DC στην επόμενη βαθμίδα.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στα σημεία πόλωσης των MJE15032 και MJE15033. Η σωστή πόλωση των τρανζίστορ αυτών είναι καθοριστική για την αποφυγή παραμόρφωσης τύπου crossover, η οποία εμφανίζεται όταν τα τρανζίστορ δεν άγουν ομαλά κατά τη μετάβαση του σήματος από το θετικό στο αρνητικό ημικύκλιο. Παράλληλα, λανθασμένη πόλωση μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερβολική κατανάλωση ρεύματος και υπερθέρμανση είτε σε ανεπαρκή αγωγή και αισθητή αλλοίωση του ακουστικού αποτελέσματος.

Τα στοιχεία που βρίσκονται πριν από τα σημεία πόλωσης λειτουργούν ως στάδιο προσαρμογής και ελέγχου. Περιορίζουν τα ρεύματα βάσης, σταθεροποιούν τη λειτουργία και εξασφαλίζουν ότι οι βάσεις των τρανζίστορ λαμβάνουν ακριβώς το απαιτούμενο σήμα, χωρίς αιχμές ή απότομες μεταβολές. Αντίστοιχα, τα στοιχεία που βρίσκονται μετά τα τρανζίστορ συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της εξόδου, στη σωστή οδήγηση του φορτίου και στη μείωση της πιθανότητας ταλαντώσεων ή ανεπιθύμητων θορύβων.

Το συγκεκριμένο στάδιο, όπως και όλα τα προηγούμενα αλλά και τα επόμενα, χρήζει άμεσης και ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση. Μικρά λάθη στις τιμές των στοιχείων, στη συνδεσμολογία ή στη φυσική διάταξη πάνω στην πλακέτα μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές αστοχίες, όπως υπερθέρμανση, καταστροφή εξαρτημάτων ή ακόμα και μόνιμη βλάβη της πλακέτας. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται σχολαστικός έλεγχος, σωστή τοποθέτηση και αυστηρή τήρηση του σχεδίου, ώστε να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του τελικού σταδίου εξόδου.

Έτσι, όπως προαναφέραμε, στην παρούσα κατάσταση θα επικεντρωθούμε στη σωστή πόλωση των τρανζίστορ, βασιζόμενοι σε διαφορετικές μελέτες και θεωρητικές προσεγγίσεις που μας οδήγησαν στα συγκεκριμένα αποτελέσματα και στην τελική επιλογή των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμά μας. Το στάδιο αυτό δεν προέκυψε τυχαία, αλλά αποτελεί προϊόν προσεκτικής ανάλυσης και σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων, με κύριο στόχο την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής ακουστικής συμπεριφοράς και της ασφαλούς λειτουργίας του ενισχυτή.

Αρχικά, το πρώτο και κυριότερο ερώτημα που ανακύπτει αφορά τον τρόπο με τον οποίο θα πολωθούν σωστά τα τρανζίστορ του τελικού σταδίου. Η σωστή πόλωση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική ποιότητα του ήχου, καθώς επηρεάζει άμεσα τη γραμμικότητα του κυκλώματος και τη συμπεριφορά του στο κρίσιμο σημείο του μηδενός. Σε αυτό ακριβώς το σημείο εμφανίζεται συνήθως η λεγόμενη παραμόρφωση crossover, ένα φαινόμενο ιδιαίτερα ανεπιθύμητο σε ενισχυτές ήχου, κατά το οποίο η μετάβαση από τη θετική στη αρνητική ημιπερίοδο (και αντίστροφα) δεν πραγματοποιείται ομαλά.

Η παραμόρφωση αυτή προκύπτει όταν τα τρανζίστορ δεν βρίσκονται σε ελαφρά αγώγιμη κατάσταση γύρω από το μηδενικό σημείο του σήματος. Αν δηλαδή το ένα τρανζίστορ παύει να άγει πριν το άλλο αρχίσει να άγει, δημιουργείται ένα «κενό» στην ενίσχυση, το οποίο γίνεται αντιληπτό ως τραχύτητα, σκληρότητα ή αλλοίωση του ήχου, ιδιαίτερα σε χαμηλές εντάσεις. Για τον λόγο αυτό, βασική επιδίωξη της πόλωσης είναι να διατηρούνται και τα δύο τρανζίστορ σε κατάσταση ετοιμότητας, έτσι ώστε η μετάβαση της μίας ημιπεριόδου στην άλλη να γίνεται ομαλά, συνεχόμενα και χωρίς απότομα φαινόμενα.

Στο πλαίσιο αυτό, η πόλωση πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ακουστική ποιότητα και στη θερμική ασφάλεια. Υπερβολική πόλωση μπορεί να μειώσει μεν την παραμόρφωση, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει σημαντικά το ρεύμα ηρεμίας, οδηγώντας σε αυξημένες απώλειες ισχύος και υπερθέρμανση των τρανζίστορ. Αντίθετα, ανεπαρκής πόλωση περιορίζει την κατανάλωση, αλλά επιβαρύνει το σήμα με παραμόρφωση στο σημείο μηδενός. Συνεπώς, η τελική επιλογή δεν είναι αυθαίρετη, αλλά αποτέλεσμα προσεκτικής μελέτης των χαρακτηριστικών των τρανζίστορ, των συνθηκών λειτουργίας του κυκλώματος και των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, καταλήγουμε στη χρήση συγκεκριμένων εξαρτημάτων και τιμών, οι οποίες διαμορφώνουν το κατάλληλο δυναμικό πόλωσης και εξασφαλίζουν ότι τα τρανζίστορ MJE15032 και MJE15033 συνεργάζονται αρμονικά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση μεταξύ των ημιπεριόδων, περιορισμός της παραμόρφωσης και, τελικά, ένα ακουστικό αποτέλεσμα ποιοτικό, καθαρό και ευχάριστο, χωρίς την αίσθηση «σπασίματος» ή αστάθειας στον ήχο.

Έτσι, έχοντας μελετήσει διεξοδικά διαφορετικές περιπτώσεις πόλωσης και εναλλακτικές μεθόδους, καταλήξαμε στην ορθότερη και ασφαλέστερη λύση της πόλωσης μέσω διόδων [14]. Η επιλογή αυτή δεν έγινε τυχαία, αλλά προέκυψε από τη σύγκριση θεωρητικών δεδομένων και πρακτικών συμπεριφορών των τρανζίστορ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στόχος ήταν όχι μόνο η καλή ακουστική απόδοση, αλλά και η μακροχρόνια σταθερότητα και αξιοπιστία του κυκλώματος.

Η πιο απλή μέθοδος πόλωσης μέσω αντιστάσεων, ακόμη και στην περίπτωση χρήσης ρυθμιζόμενων αντιστάσεων (trimmers), δεν θα μπορούσε στην πράξη να προσφέρει σταθερά και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Παρότι τέτοιες λύσεις φαίνονται ελκυστικές λόγω απλότητας, παρουσιάζουν σοβαρά μειονεκτήματα ως προς τη θερμική συμπεριφορά του κυκλώματος. Συγκεκριμένα, απαιτούν συνεχή ρύθμιση, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις μεταβολές θερμοκρασίας και δεν μπορούν να αντισταθμίσουν επαρκώς τις θερμικές μεταβολές των τρανζίστορ κατά τη λειτουργία.

Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει σε αυτές τις περιπτώσεις είναι το φαινόμενο του thermal runaway. Τα διπολικά τρανζίστορ έχουν την ιδιότητα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τους, να μειώνεται η τάση βάσης-εκπομπού (VBE). Η μείωση αυτή οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος συλλέκτη, ακόμη και αν η τάση πόλωσης παραμένει θεωρητικά σταθερή. Η αύξηση του ρεύματος, με τη σειρά της, προκαλεί περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στη δίοδο επαφής, δημιουργώντας έναν φαύλο κύκλο θετικής ανάδρασης.

Αυτή η κλιμακούμενη κατάσταση έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να «ξεφεύγει» ανεξέλεγκτα, οδηγώντας σε υπερθέρμανση και, τελικά, σε καταστροφή του τρανζίστορ. Σε ένα τελικό στάδιο ενισχυτή, όπου τα ρεύματα και οι ισχύεις είναι σημαντικά, το φαινόμενο αυτό μπορεί να εκδηλωθεί πολύ γρήγορα και με σοβαρές συνέπειες τόσο για τα ενεργά στοιχεία όσο και για το υπόλοιπο κύκλωμα.



Εικόνα 4.2.11 Thermal Runaway

Αντιθέτως, ένας ιδανικός και σαφώς πιο αξιόπιστος τρόπος για να αποτραπεί η ανεξέλεγκτη αύξηση της θερμοκρασίας είναι η πόλωση με διόδους αντιστάθμισης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της κατάλληλης τάσης πόλωσης στις διόδους βάσης-εκπομπού των τρανζίστορ εξόδου. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται άμεσα τη φυσική συμπεριφορά των ημιαγωγών και αποτελεί κλασική αλλά ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση σε ενισχυτές τάξης A/B.

Για να λειτουργήσει σωστά η θερμική αντιστάθμιση, είναι απαραίτητο οι χαρακτηριστικές καμπύλες των διόδων αντιστάθμισης να ταιριάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα με τις καμπύλες των διόδων βάσης-εκπομπού (VBE) των τρανζίστορ. Αυτό σημαίνει ότι οι διόδοι πρέπει να έχουν παρόμοιο θερμικό συντελεστή τάσης, δηλαδή να μειώνεται η πτώση τάσης τους με παρόμοιο ρυθμό καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Όταν αυτή η συνθήκη ικανοποιείται, το σύστημα πόλωσης “ακολουθεί” θερμικά τα τρανζίστορ εξόδου.

Στην πράξη, οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας στα τρανζίστορ προκαλεί μείωση της VBE τους. Ταυτόχρονα, η ίδια αύξηση θερμοκρασίας μειώνει και την τάση πόλωσης που αναπτύσσεται στις διόδους αντιστάθμισης κατά σχεδόν το ίδιο ακριβώς ποσοστό. Έτσι, η συνολική τάση πόλωσης μειώνεται αυτόματα, περιορίζοντας το ρεύμα ηρεμίας και αποτρέποντας την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια μορφή αρνητικής θερμικής ανάδρασης, η οποία σταθεροποιεί τη λειτουργία του κυκλώματος.

Το αποτέλεσμα αυτής της τεχνικής είναι διπλά ωφέλιμο: αφενός αποφεύγεται το φαινόμενο του thermal runaway [14] και διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία των τρανζίστορ, αφετέρου διατηρείται σταθερό το ρεύμα πόλωσης σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Αυτό οδηγεί σε ομαλή μετάβαση μεταξύ των ημιπεριόδων, ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης crossover και, τελικά, σε πιο καθαρό, φυσικό και «ξεκούραστο» ηχητικό αποτέλεσμα, όπως απαιτείται σε μια προσεγμένη κατασκευή ενισχυτή ήχου.

Οι αντιστάσεις R5 και R6 που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των διόδων πόλωσης αποτελούν ιδιαίτερα κρίσιμα στοιχεία για τη σωστή και σταθερή λειτουργία του τελικού σταδίου. Εφόσον το κύκλωμα λειτουργεί με συμμετρική τροφοδοσία, η επιλογή να τοποθετηθεί μία αντίσταση στο θετικό άκρο της τάσης (+18 V) και μία στο αρνητικό άκρο (-18 V) δεν είναι τυχαία, αλλά εξασφαλίζει συμμετρική και ισορροπημένη παροχή ρεύματος στο κύκλωμα πόλωσης.

Οι R5 και R6 είναι ουσιαστικά οι αντιστάσεις που καθορίζουν και περιορίζουν το ρεύμα πόλωσης των διόδων. Το ρεύμα ξεκινά από το θετικό δυναμικό (+18 V), διέρχεται μέσω της R5, διατρέχει τις διόδους πόλωσης (D1 και D2) και στη συνέχεια καταλήγει στο αρνητικό δυναμικό (-18 V) μέσω της R6. Το συνεχές αυτό ρεύμα διατηρεί τις διόδους σε αγωγίμη κατάσταση, επιτρέποντάς τους να αναπτύξουν την απαιτούμενη πτώση τάσης, η οποία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1,2 V και 1,4 V συνολικά, ανάλογα με το ρεύμα και τη θερμοκρασία.

Η τάση αυτή μεταφέρεται απευθείας στις βάσεις των τρανζίστορ εξόδου και είναι υπεύθυνη για τη διατήρησή τους σε κατάσταση ετοιμότητας, δηλαδή ελαφρώς αγωγή ακόμη και όταν το σήμα διέρχεται από το μηδέν. Με τον τρόπο αυτό, το τελικό στάδιο λειτουργεί στην τάξη A/B, αποτρέποντας αποτελεσματικά την παραμόρφωση crossover και εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση από τη θετική στη αρνητική ημιπερίοδο του σήματος.

Παράλληλα, οι R5 και R6 συμβάλλουν καθοριστικά στη σταθερότητα του κυκλώματος, καθώς εξασφαλίζουν ότι υπάρχει πάντα ένα ελάχιστο και ελεγχόμενο ρεύμα στο κύκλωμα οδήγησης. Αυτό αποτρέπει απότομες μεταβολές στο ρεύμα πόλωσης, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστάθεια, θερμικές αποκλίσεις ή ακόμη και ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Επιπλέον, λειτουργούν

προστατευτικά για τις διόδους, περιορίζοντας το ρεύμα σε ασφαλή επίπεδα και διασφαλίζοντας τη μακροχρόνια αξιοπιστία του κυκλώματος.

Αμέσως μετά, ιδιαίτερη προτεραιότητα στη σχεδίαση και ανάλυση του κυκλώματος έχουν οι πυκνωτές C3 και C4, οι οποίοι τοποθετούνται μετά τις αντιστάσεις πόλωσης και πριν από τις διόδους. Παρότι η παρουσία τους δεν είναι απολύτως απαραίτητη για να «δουλέψει» στοιχειωδώς το κύκλωμα, η σημασία τους στην πράξη είναι εξαιρετικά μεγάλη και επηρεάζει άμεσα την ποιότητα, τη σταθερότητα και τη σωστή δυναμική συμπεριφορά του τελικού σταδίου.

Οι συγκεκριμένοι πυκνωτές, που βρίσκονται ουσιαστικά στα σημεία οδήγησης των βάσεων των τρανζίστορ εξόδου μετά την έξοδο του NE5532, επιτελούν πολλαπλούς και κρίσιμους ρόλους. Καταρχάς, όταν ο τελεστικός ενισχυτής (U1A) παράγει το εναλλασσόμενο σήμα ήχου, οι C3 και C4 λειτουργούν ως τοπικές «αποθήκες ενέργειας». Διατηρούν την τάση στα άκρα των βάσεων πιο σταθερή και άμεσα διαθέσιμη, ιδιαίτερα στις στιγμές όπου το σήμα μεταβάλλεται γρήγορα, όπως σε αιχμές, τρανσιέντ και υψηλές συχνότητες.

Παράλληλα, οι πυκνωτές αυτοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σταθεροποίηση της τάσης πόλωσης (bias stability). Λειτουργούν ως φίλτρα εξομάλυνσης για την τάση που αναπτύσσεται στις διόδους D1 και D2, απορροφώντας τυχόν μικροδιακυμάνσεις, παλμούς ή θόρυβο που μπορεί να προέρχονται από τις γραμμές τροφοδοσίας (+18 V και -18 V). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η τάση ανάμεσα στις βάσεις των δύο τρανζίστορ εξόδου παραμένει «γρανιτένια» σταθερή, ακόμη και όταν ο ενισχυτής καλείται να αποδώσει απότομα μεγάλα ρεύματα προς το φορτίο.

Συνολικά, οι C3 και C4 συμβάλλουν ουσιαστικά τόσο στη δυναμική συμπεριφορά όσο και στη θερμική και ηλεκτρική σταθερότητα του τελικού σταδίου. Η παρουσία τους μειώνει τον κίνδυνο αστάθειας, βελτιώνει την απόκριση στις υψηλές συχνότητες και εξασφαλίζει έναν πιο καθαρό, ελεγχόμενο και «ξεκούραστο» ήχο, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε μια κατασκευή που στοχεύει όχι απλώς στη λειτουργικότητα, αλλά και στην ποιοτική αναπαραγωγή ήχου.

Στη συνέχεια, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι δύο αντιστάσεις ισχύος R7-R8 που τοποθετούνται στα σημεία εκπομπού των τρανζίστορ εξόδου. Πρόκειται για εξαρτήματα τα οποία, παρότι συχνά υποτιμώνται, είναι απολύτως καθοριστικά για τη σωστή, ασφαλή και ποιοτική λειτουργία του τελικού σταδίου. Τόσο η ακριβής τιμή τους όσο και η σωστή τοποθέτησή τους στο κύκλωμα απαιτούν αυξημένη προσοχή, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη θερμική συμπεριφορά, τη γραμμικότητα και τη συνολική αξιοπιστία του ενισχυτή.



Εικόνα 4.2.12 Αντιστάσεις Ισχύος

Ο σημαντικότερος ρόλος αυτών των αντιστάσεων, είναι η πρόληψη της θερμικής διαφυγής (thermal runaway). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τρανζίστορ ισχύος παρουσιάζουν την τάση, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τους, να άγουν περισσότερο ρεύμα για την ίδια τάση πόλωσης. Η αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, δημιουργώντας έναν φαύλο κύκλο που, χωρίς κάποιο μηχανισμό ελέγχου, μπορεί να καταλήξει σε πλήρη καταστροφή του τρανζίστορ. Οι αντιστάσεις εκπομπού λειτουργούν εδώ ως τοπική αρνητική ανάδραση: καθώς το ρεύμα αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση. Αυτή η πτώση τάσης μειώνει αποτελεσματικά την τάση V_{BE} του τρανζίστορ, περιορίζοντας την περαιτέρω αύξηση του ρεύματος και σταθεροποιώντας τη λειτουργία του σταδίου.

Επιπλέον, οι αντιστάσεις αυτές συμβάλλουν σημαντικά στην εξισορρόπηση των τρανζίστορ εξόδου. Σε ένα στάδιο τάξης AB χρησιμοποιείται ένα συμπληρωματικό ζεύγος τρανζίστορ *NPN* και *PNP*, τα οποία, ακόμη και αν είναι του ίδιου τύπου και κατασκευαστή, παρουσιάζουν αναπόφευκτες διαφορές στα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά. Χωρίς τις αντιστάσεις εκπομπού, το τρανζίστορ με τη μικρότερη εσωτερική αντίσταση ή το υψηλότερο κέρδος θα τείνει να «τραβάει» περισσότερο ρεύμα, επιβαρύνοντας τη λειτουργία του σταδίου. Οι αντιστάσεις βοηθούν στο ομοιόμορφο μοίρασμα του ρεύματος, μειώνοντας την ασυμμετρία και αποτρέποντας φαινόμενα παραμόρφωσης και αστάθειας.

Ένας ακόμη σημαντικός ρόλος τους αφορά τη βελτίωση της γραμμικότητας και τη μείωση της παραμόρφωσης. Οι αντιστάσεις εκπομπού συμβάλλουν στην ομαλότερη μετάβαση του σήματος από το ένα τρανζίστορ στο άλλο στην περιοχή του μηδενός, γνωστή ως περιοχή crossover. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η χαρακτηριστική crossover distortion των ενισχυτών τάξης AB και επιτυγχάνεται πιο ομαλή και φυσική αναπαραγωγή του ήχου, με σταθερότερη σύνθετη αντίσταση εξόδου.

Τέλος, σε πιο ολοκληρωμένες ή επαγγελματικές σχεδιάσεις, οι ίδιες αυτές αντιστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν και ως στοιχείο προστασίας από υπερρεύματα ή βραχυκυκλώματα. Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα τους είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το τελικό στάδιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σήμα ανίχνευσης για κυκλώματα προστασίας, τα οποία σε περίπτωση υπέρβασης ασφαλών ορίων μειώνουν την οδήγηση ή διακόπτουν την τροφοδοσία.

Συνοψίζοντας, οι αντιστάσεις εκπομπού δεν αποτελούν απλώς ένα βοηθητικό στοιχείο, αλλά έναν βασικό πυλώνα της σωστής λειτουργίας του τελικού σταδίου. Εξασφαλίζουν θερμική σταθερότητα, ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος, βελτιωμένη γραμμικότητα και αυξημένη ασφάλεια, συμβάλλοντας καθοριστικά στην αξιοπιστία και την ποιοτική απόδοση του ενισχυτή.

Τέλος, περνάμε στην ανάλυση και τη σωστή τοποθέτηση των τεσσάρων πυκνωτών C5, C6, C7 και C8, οι οποίοι αποτελούν ένα από τα πιο κρίσιμα –αν και συχνά υποτιμημένα– σημεία της συνολικής σχεδίασης. Οι συγκεκριμένοι πυκνωτές είναι πυκνωτές αποζεύξης (decoupling capacitors) και ο ρόλος τους είναι να εξασφαλίζουν ότι οι γραμμές τροφοδοσίας +18 V και –18 V παραμένουν όσο το δυνατόν καθαρότερες, σταθερότερες και απαλλαγμένες από θόρυβο, ακριβώς στα σημεία όπου τροφοδοτούνται ο τελεστικός ενισχυτής και τα τρανζίστορ εξόδου.

Καταρχάς, οι C6 και C8, χωρητικότητας 100 μF , λειτουργούν ως τοπικές «αποθήκες» ή «δεξαμενές» ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ενισχυτή, και ιδιαίτερα σε απότομες κορυφές του μουσικού σήματος (όπως έντονα μπάσα ή δυναμικά περάσματα), το κύκλωμα απαιτεί στιγμιαία μεγάλα ρεύματα. Αν αυτή η ενέργεια έπρεπε να παρέχεται αποκλειστικά από το κεντρικό τροφοδοτικό μέσω καλωδιώσεων και διαδρομών της πλακέτας, η ωμική τους αντίσταση και η επαγωγή θα προκαλούσαν μικρές αλλά κρίσιμες πτώσεις τάσης (voltage sag). Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας βρίσκονται πολύ κοντά στα ενεργά στοιχεία και μπορούν να αποδώσουν άμεσα το

απαιτούμενο ρεύμα, διατηρώντας σταθερή την τάση τροφοδοσίας και αποτρέποντας αλλοιώσεις του σήματος.

Παράλληλα, οι C5 και C7, χωρητικότητας 100 nF, έχουν έναν συμπληρωματικό αλλά εξίσου σημαντικό ρόλο. Πρόκειται για πυκνωτές μικρής χωρητικότητας (συνήθως κεραμικούς ή πολυεστέρα), οι οποίοι είναι εξαιρετικά γρήγοροι στην απόκρισή τους και ειδικεύονται στο φιλτράρισμα υψίσυχνου θορύβου. Οι γραμμές τροφοδοσίας σε ένα κύκλωμα ήχου μπορούν να «συλλέξουν» παρεμβολές από το περιβάλλον, από ψηφιακά κυκλώματα, ακόμη και από τα ίδια τα ενεργά στοιχεία κατά τη μεταγωγή τους. Οι πυκνωτές αυτοί βραχυκυκλώνουν τέτοιες υψίσυχνες συνιστώσες προς τη γείωση, πριν αυτές προλάβουν να εισέλθουν στον τελεστικό ενισχυτή ή στα τρανζίστορ και να μετατραπούν σε ακουστό θόρυβο.

Η χρήση συνδυασμού ενός μεγάλου και ενός μικρού πυκνωτή σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας δεν είναι τυχαία. Κανένας πυκνωτής δεν είναι ιδανικός σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αποδίδουν άριστα στις χαμηλές συχνότητες και στις μεγάλες απαιτήσεις ρεύματος, αλλά χάνουν την αποτελεσματικότητά τους στις υψηλές συχνότητες λόγω της εσωτερικής τους επαγωγής. Αντίθετα, οι μικροί κεραμικοί πυκνωτές παραμένουν αποτελεσματικοί σε πολύ υψηλές συχνότητες, εκεί όπου οι μεγάλοι δεν μπορούν να ανταποκριθούν. Ο συνδυασμός τους εξασφαλίζει καθαρή και σταθερή τροφοδοσία σε όλο το φάσμα λειτουργίας του ενισχυτή.

Χωρίς την παρουσία και τη σωστή τοποθέτηση των C5, C6, C7 και C8, το κύκλωμα θα ήταν πολύ πιο ευάλωτο σε αστάθειες, ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, αυξημένο θόρυβο ή ακόμα και σε ακουστό «φύσημα» στα ηχεία. Συνεπώς, οι πυκνωτές αποζεύξης αποτελούν θεμέλιο για την αξιόπιστη, αθόρυβη και ποιοτική λειτουργία του ενισχυτή, ολοκληρώνοντας με σωστό τρόπο τη συνολική ηλεκτρονική σχεδίαση.



Εικόνα 4.2.13 Μεγάφωνο

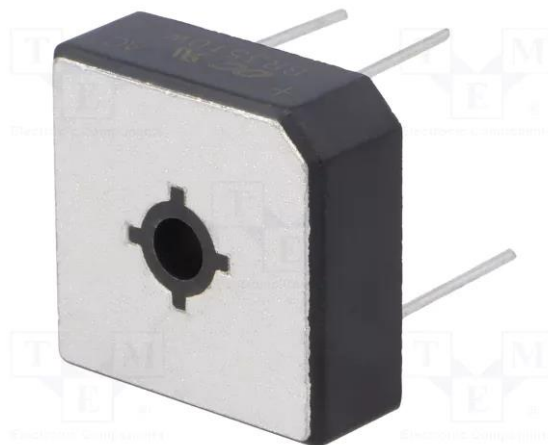
4.3 Σχολιασμός Τιμών Που Επιλέχθηκαν

Αφού επιλέχθηκε μετασχηματιστής **230V σε 18V εναλλασσόμενο, συμμετρικός με μεσαία λήψη**, το επόμενο κρίσιμο στάδιο της τροφοδοσίας ήταν η **ανορθωτική βαθμίδα** και συγκεκριμένα η επιλογή της κατάλληλης γέφυρας διόδων. Σε αρχικό στάδιο είχε εξεταστεί η ενσωμάτωση της γέφυρας **DBA4DC**, η οποία διαθέτει μέγιστο ονομαστικό ρεύμα **4A**. Ωστόσο, μετά από περαιτέρω μελέτη των απαιτήσεων του κυκλώματος, διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη επιλογή δεν παρείχε τα απαραίτητα περιθώρια ασφαλείας, δεδομένου ότι τα τρανζίστορ εξόδου του ενισχυτή είναι ικανά να αντλήσουν ρεύματα που μπορούν να προσεγγίσουν ή και να ξεπεράσουν τα **6–8A** σε στιγμιαίες συνθήκες φορτίου.

Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η αναζήτηση μιας γέφυρας διόδων με σαφώς αυξημένες αντοχές και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Η τελική επιλογή ήταν η **BR3510W**, η οποία, εκτός από το ότι ήταν άμεσα διαθέσιμη, προσφέρει χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Με ονομαστική αντοχή **35A συνεχούς ρεύματος**, μπορεί εκ πρώτης όψευς να φαίνεται υπερδιαστασιοποιημένη για τις ανάγκες της εργασίας· στην πράξη όμως, αυτή η επιλογή ενισχύει σημαντικά τη συνολική αξιοπιστία και τη μακροχρόνια αντοχή του τροφοδοτικού [21].

Ένας από τους βασικότερους λόγους επιλογής της BR3510W αφορά τις **στιγμιαίες αιχμές ρεύματος** κατά την εκκίνηση. Τη στιγμή που ενεργοποιείται ο διακόπτης τροφοδοσίας, οι μεγάλοι πυκνωτές εξομάλυνσης των **10.000μF** είναι πλήρως εκφορτισμένοι και συμπεριφέρονται πρακτικά σαν βραχυκύκλωμα. Για ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου, το ρεύμα φόρτισης που απαιτείται είναι εξαιρετικά υψηλό. Σε τέτοιες συνθήκες, μια γέφυρα όπως η DBA4DC καταπονείται έντονα σε κάθε άναμμα, με αποτέλεσμα τη θερμική κόπωση των διόδων και τη σταδιακή υποβάθμιση ή και αστοχία τους.

Αντίθετα, η **BR3510W** είναι σχεδιασμένη ώστε να αντέχει **στιγμιαία ρεύματα αιχμής που φτάνουν έως και τα 400A**, καθιστώντας τη διαδικασία φόρτισης των πυκνωτών απολύτως ασφαλή και αδιάφορη για την ίδια. Παράλληλα, λόγω της μεγάλης ονομαστικής της ικανότητας, όταν λειτουργεί στα πραγματικά ρεύματα του κυκλώματος (6–8A), παραμένει θερμικά καταπονημένη σε ελάχιστο βαθμό, συνήθως χλιαρή ή σχεδόν κρύα. Αυτό μεταφράζεται σε **σταθερότερη λειτουργία**, μικρότερες απώλειες, και σαφώς αυξημένη διάρκεια ζωής του τροφοδοτικού.



Εικόνα 4.3.1 BR3510W

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν οι πυκνωτές **C1 και C2**, οι οποίοι αποτελούν το βασικό στάδιο **εξομάλυνσης της ανορθωμένης τάσης** και λειτουργούν ως ενεργειακές δεξαμενές του τροφοδοτικού. Ο ρόλος τους είναι να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και να την αποδίδουν όταν το κύκλωμα απαιτεί στιγμιαία αυξημένο ρεύμα, συμβάλλοντας καθοριστικά στη σταθερότητα της **DC τάσης τροφοδοσίας**.

Στην πράξη, μετά την ανορθωτική βαθμίδα, η τάση δεν είναι ιδανικά συνεχής αλλά παρουσιάζει κυμάτωση (ripple), η οποία αν δεν περιοριστεί επαρκώς μπορεί να περάσει στα επόμενα στάδια του ενισχυτή και να γίνει ακουστή με τη μορφή ανεπιθύμητου βόμβου, κυρίως στα **50Hz του δικτύου** (ή στα 100Hz μετά την πλήρη ανόρθωση). Οι πυκνωτές αυτοί φορτίζονται στις κορυφές της ανορθωμένης τάσης και εκφορτίζονται μεταξύ αυτών, «γεμίζοντας» τα κενά και μειώνοντας δραστικά το ripple.

Υπάρχει ένας γενικός, εμπειρικός κανόνας στις εφαρμογές ήχου, σύμφωνα με τον οποίο απαιτούνται περίπου **1.000 έως 2.000 μF χωρητικότητας ανά 1A ρεύματος φορτίου**. Ο κανόνας αυτός δεν είναι απόλυτος, αλλά χρησιμοποιείται ευρέως ως ασφαλής οδηγός για την επιλογή χωρητικότητας σε γραμμικά τροφοδοτικά ενισχυτών. Στην παρούσα κατασκευή, η επιλογή πυκνωτών **10.000 μF** ανά γραμμή τροφοδοσίας θεωρείται ιδιαίτερα γενναιόδωρη, ωστόσο εξασφαλίζει εξαιρετικά χαμηλή κυμάτωση τάσης ακόμη και σε συνθήκες αυξημένου φορτίου.

Η αυξημένη χωρητικότητα μεταφράζεται άμεσα σε **καθαρότερη τροφοδοσία**, μειωμένο υπόβαθρο θορύβου και απουσία αντιληπτού βόμβου στα ηχεία, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ενισχυτές ήχου υψηλής πιστότητας. Παράλληλα, προσφέρει καλύτερη απόκριση σε δυναμικές κορυφές του σήματος, όπως έντονα μπάσα ή απότομα transients, χωρίς πτώση της τάσης τροφοδοσίας.

Έπειτα περνάμε στις δύο αντιστάσεις **R1 και R2**, οι οποίες τοποθετούνται αμέσως μετά τους πυκνωτές εξομάλυνσης **C1 και C2**. Παρότι συχνά θεωρούνται δευτερεύοντα στοιχεία, στην πραγματικότητα επιτελούν **διπλό και απολύτως καθοριστικό ρόλο** για την ασφάλεια, τη σταθερότητα και τη σωστή λειτουργία του τροφοδοτικού.

Αρχικά, οι πυκνωτές **C1 και C2 των 10.000 μF** είναι ιδιαίτερα μεγάλης χωρητικότητας και έχουν την ικανότητα να διατηρούν το ηλεκτρικό τους φορτίο για σημαντικό χρονικό διάστημα, ακόμη και αφού ο διακόπτης της συσκευής τεθεί εκτός λειτουργίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αποθηκευμένη τάση μπορεί να παραμείνει για λεπτά ή και ώρες. Οι αντιστάσεις **R1 και R2** λειτουργούν εδώ ως **αντιστάσεις εκφόρτισης (bleeder resistors)**, επιτρέποντας την ελεγχόμενη και ασφαλή αποφόρτιση των πυκνωτών όταν το κύκλωμα απενεργοποιείται.

Ο ρόλος αυτός είναι κρίσιμος από άποψη **ασφάλειας**. Με την ύπαρξη των αντιστάσεων, αποτρέπεται η παραμονή επικίνδυνης τάσης στο κύκλωμα, μειώνοντας δραστικά τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας ή τυχαίου βραχυκυκλώματος σε περίπτωση που χρειαστεί να ανοιχτεί η συσκευή για έλεγχο ή επισκευή λίγο μετά την απενεργοποίησή της. Παράλληλα, αποφεύγεται το ενδεχόμενο να «μπερδευτεί» το κύκλωμα του ενισχυτή σε μια επόμενη άμεση εκκίνηση, λόγω υπολειπόμενων φορτίων που δεν έχουν εκτονωθεί σωστά.

Ο δεύτερος σημαντικός ρόλος των αντιστάσεων R1 και R2 αφορά την **ισορροπία του συμμετρικού τροφοδοτικού**. Εφόσον το κύκλωμα λειτουργεί με συμμετρική τάση **+18V και -18V**, είναι απαραίτητο οι δύο πυκνωτές εξομάλυνσης να εκφορτίζονται με παρόμοιο ρυθμό. Οι αντιστάσεις αυτές εξασφαλίζουν ότι η εκφόρτιση γίνεται συμμετρικά, διατηρώντας το σημείο **0V (GND)** πραγματικά στο ηλεκτρικό κέντρο του τροφοδοτικού και αποτρέποντας τυχόν μετατοπίσεις του σημείου αναφοράς.

Η επιλογή της τιμής **4,7 kΩ** αποτελεί μια ιδιαίτερα ισορροπημένη και τεχνικά ορθή λύση. Με τάση περίπου 18–20V στα άκρα κάθε αντίστασης, η ισχύς που καταναλώνεται είναι της τάξης των **0,07 W** ($P = V^2 / R$), γεγονός που σημαίνει ότι οι αντιστάσεις δεν υπερθερμαίνονται και δεν επιβαρύνουν ενεργειακά το κύκλωμα κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του ενισχυτή.

Αν η τιμή τους ήταν μικρότερη, για παράδειγμα **1 kΩ**, οι πυκνωτές θα εκφορτίζονταν μεν ταχύτερα, όμως οι αντιστάσεις θα καταναλώναν αισθητά μεγαλύτερη ισχύ, θα ζεσταίνονταν σημαντικά και θα απαιτούσαν υψηλότερη ονομαστική ισχύ, «κλέβοντας» παράλληλα ρεύμα από το κύκλωμα του ενισχυτή. Αντίθετα, αν η τιμή τους ήταν μεγαλύτερη, όπως **47 kΩ**, η εκφόρτιση των πυκνωτών θα καθυστερούσε υπερβολικά, με αποτέλεσμα η τάση να παραμένει επικίνδυνα υψηλή για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το κλείσιμο της συσκευής.

Συνεπώς, οι αντιστάσεις **R1 και R2 των 4,7 kΩ** επιλέχθηκαν ώστε να επιτυγχάνεται ο ιδανικός συμβιβασμός μεταξύ ασφάλειας, σταθερότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας, αποτελώντας ένα μικρό αλλά εξαιρετικά κρίσιμο κομμάτι της συνολικής αξιοπιστίας του τροφοδοτικού.

Έπειτα συνεχίζουμε με τη μελέτη του σταδίου **προενίσχυσης** του ενισχυτή ήχου, εξετάζοντας εναλλακτικά σενάρια και συγκρίνοντας διαφορετικές τιμές εξαρτημάτων, με στόχο την επιλογή εκείνων που προσφέρουν την καλύτερη δυνατή ισορροπία μεταξύ ποιότητας ήχου, σταθερότητας και πρακτικής υλοποίησης. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς αποτελεί το πρώτο σημείο επαφής του εξωτερικού ηχητικού σήματος με το κύκλωμα του ενισχυτή και οποιαδήποτε αστοχία ή κακή επιλογή υλικών εδώ, μεταφέρεται και ενισχύεται στα επόμενα στάδια.

Ξεκινώντας από το πιο βασικό στοιχείο της εισόδου, το **ποτενσιόμετρο έντασης (RV1)**, η επιλογή της τιμής των **10kΩ** θεωρείται απολύτως ενδεδειγμένη και αποτελεί ουσιαστικά τη **σύγχρονη τυπική (standard) λύση** για ενισχυτές ήχου γενικής χρήσης. Η συγκεκριμένη τιμή δεν επιλέχθηκε τυχαία, αλλά προκύπτει από τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά των περισσότερων σύγχρονων πηγών ήχου.

Συγκεκριμένα, συσκευές όπως CD players, DACs, κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές διαθέτουν **χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου**, γεγονός που τους επιτρέπει να οδηγούν άνετα φορτία μεσαίας ή χαμηλής αντίστασης. Ένα ποτενσιόμετρο των 10kΩ αποτελεί για αυτές τις πηγές ένα «εύκολο» και ασφαλές φορτίο, διασφαλίζοντας ότι το σήμα μεταφέρεται ακέραιο, χωρίς απώλειες στάθμης, χωρίς παραμόρφωση και χωρίς ανεπιθύμητη φόρτιση της εξόδου της πηγής.

Παράλληλα, η τιμή του ποτενσιόμετρου επηρεάζει άμεσα και το **επίπεδο θορύβου** του κυκλώματος. Είναι γνωστό ότι κάθε αντίσταση παράγει θερμικό θόρυβο (Johnson noise), ο οποίος αυξάνεται όσο μεγαλώνει η τιμή της αντίστασης. Επιλέγοντας μια σχετικά χαμηλή τιμή, όπως τα 10kΩ, περιορίζεται σημαντικά το «φύσημα» (noise floor) που εισάγεται ήδη από την είσοδο του ενισχυτή, συμβάλλοντας σε πιο καθαρό και ήσυχο υπόβαθρο ήχου, ειδικά σε χαμηλές εντάσεις ακρόασης.

Η επιλογή των **10kΩ** προσφέρει εδώ ένα επιπλέον πλεονέκτημα: η σχετικά χαμηλή αντίσταση «βραχυκυκλώνει» αποτελεσματικά τέτοιου είδους θορύβους προς τη γείωση, μειώνοντας την πιθανότητα να εισέλθουν στο ευαίσθητο στάδιο της προενίσχυσης. Έτσι επιτυγχάνεται ένας εξαιρετικός συμβιβασμός μεταξύ χαμηλού θορύβου, καλής συμβατότητας με τις πηγές ήχου και αυξημένης ανοσίας σε παρεμβολές.

Συνεπώς, το ποτενσιόμετρο εισόδου **RV1 των 10kΩ** δεν αποτελεί απλώς μια τυπική επιλογή, αλλά μια τεχνικά τεκμηριωμένη λύση που εξασφαλίζει σωστή φόρτιση της πηγής, χαμηλό θόρυβο και σταθερή, αξιόπιστη λειτουργία του σταδίου προενίσχυσης, θέτοντας τις βάσεις για ένα ποιοτικό και «ξεκούραστο» τελικό ακουστικό αποτέλεσμα.

Έπειτα, σειρά έχει ο **πυκνωτής C1**, ο οποίος τοποθετείται αμέσως μετά το ποτενσιόμετρο εισόδου και πριν από το επόμενο στάδιο της προενίσχυσης. Η παρουσία του σε αυτό το σημείο δεν είναι τυχαία, αλλά εξυπηρετεί δύο απολύτως θεμελιώδεις λειτουργίες για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία του ενισχυτή.

Ο **πρώτος και κυριότερος ρόλος του C1** είναι η **απομόνωση της συνεχούς τάσης (DC blocking / DC isolation)** [14]. Ο πυκνωτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο του εναλλασσόμενου σήματος ήχου (AC), ενώ ταυτόχρονα εμποδίζει οποιαδήποτε ανεπιθύμητη συνεχόμενη τάση (DC) που ενδέχεται να προέρχεται από την πηγή σήματος ή να εμφανιστεί στο ποτενσιόμετρο. Η αποκοπή αυτής της DC συνιστώσας είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι η είσοδός της στο κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή NE5532 θα μπορούσε να διαταράξει την ορθή πόλωσή του, να προκαλέσει μετατόπιση της στάθμης εξόδου (DC offset), αυξημένη παραμόρφωση ή ακόμη και θερμική ή ηλεκτρική καταπόνηση των επόμενων σταδίων. Με τον C1, το κύκλωμα προστατεύεται και διασφαλίζεται ότι μόνο «καθαρό» μουσικό σήμα φτάνει στον τελεστικό ενισχυτή.

Παράλληλα, ο **δεύτερος σημαντικός ρόλος του C1** σχετίζεται με τη **διαμόρφωση της συχνοτικής απόκρισης** της εισόδου. Ο πυκνωτής C1, σε συνδυασμό με την αντίσταση εισόδου του επόμενου σταδίου – και κυρίως την **R2 των 100kΩ** – σχηματίζει ένα **υψιπερατό φίλτρο (high-pass filter)** πρώτης τάξης. Το φίλτρο αυτό καθορίζει ποιες χαμηλές συχνότητες μπορούν να περάσουν προς ενίσχυση και ποιες θα αποκοπούν. Η συχνότητα αποκοπής f_c του φίλτρου εξαρτάται άμεσα από τις τιμές του πυκνωτή και της αντίστασης και επιλέγεται σκόπιμα ώστε να βρίσκεται αρκετά χαμηλά, συνήθως κάτω από τα **20Hz**, δηλαδή εκτός του ακουστού φάσματος. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι όλες οι χρήσιμες χαμηλές συχνότητες του ήχου (μπάσα) περνούν ανεπηρέαστες, ενώ αποκόπτονται υποηχητικές συνιστώσες που δεν προσφέρουν ακουστικό όφελος και μπορεί να επιβαρύνουν άσκοπα τον ενισχυτή ή τα ηχεία.

Για τον λόγο αυτό, οι τιμές των πυκνωτών σύζευξης εισόδου, όπως ο C1, κυμαίνονται συνήθως από **1μF έως 10μF** σε εφαρμογές ήχου. Το εύρος αυτό προσφέρει την απαραίτητη ευελιξία ώστε, ανάλογα με την αντίσταση εισόδου, να επιτυγχάνεται χαμηλή συχνότητα αποκοπής χωρίς να απαιτούνται υπερβολικά μεγάλοι ή ογκώδεις πυκνωτές. Στην παρούσα κατασκευή, η επιλεγμένη τιμή του C1 εξασφαλίζει σωστή DC απομόνωση, ομαλή συχνοτική απόκριση και συμβάλλει καθοριστικά σε ένα καθαρό, ισορροπημένο και απαλλαγμένο από ανεπιθύμητα φαινόμενα ηχητικό αποτέλεσμα ήδη από το πρώτο στάδιο του ενισχυτή.

Συνεχίζοντας την ανάλυση του κυκλώματος του ενισχυτή, τα εξαρτήματα **C2, R4 και R9** αποτελούν ουσιαστικά την *καρδιά* του ελέγχου λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή **NE5532**, καθώς μέσω αυτών καθορίζονται τόσο η **ενίσχυση** όσο και η **σταθερότητα** του σταδίου προενίσχυσης. Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι καθοριστικό για τη συνολική ποιότητα του ήχου, αφού οποιοδήποτε σφάλμα ή κακή επιλογή τιμών εδώ θα αποτυπωθεί άμεσα στο τελικό ακουστικό αποτέλεσμα. Οι αντιστάσεις **R9 και R4** σχηματίζουν το δίκτυο **αρνητικής ανάδρασης (negative feedback)** του τελεστικού ενισχυτή. Ο NE5532 λειτουργεί εδώ σε **μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία**, πράγμα που σημαίνει ότι το σήμα εξόδου βρίσκεται στην ίδια φάση με το σήμα εισόδου, χωρίς αντιστροφή πολικότητας. Ο λόγος των δύο αυτών αντιστάσεων καθορίζει το κέρδος τάσης του ενισχυτή.

Με τις συγκεκριμένες τιμές, η ενίσχυση προκύπτει περίπου **22 φορές**, τιμή που θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για έναν προενισχυτή ή για το πρώτο στάδιο ενός ενισχυτή ήχου. Μια ενίσχυση της τάξης του **20–30** αποτελεί συνήθη και ισορροπημένη επιλογή, καθώς επιτρέπει σε σήματα χαμηλής στάθμης (όπως αυτά που προέρχονται από κινητό τηλέφωνο, υπολογιστή ή DAC) να ανυψωθούν σε επίπεδα

ικανά να οδηγήσουν σωστά το τελικό στάδιο ισχύος. Παράλληλα, αποφεύγεται ο πρόωρος ψαλιδισμός (clipping) του σήματος, αλλά και η υπερβολική ενίσχυση του θορύβου.

Ο πυκνωτής **C2 (220μF)** τοποθετείται σε σειρά με την αντίσταση **R4** προς τη γείωση και παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του κυκλώματος. Η παρουσία του διασφαλίζει ότι η ανάδραση του ενισχυτή λειτουργεί διαφορετικά για το **DC** και διαφορετικά για το **AC** σήμα.

Συγκεκριμένα, ο C2 μπλοκάρει τη συνεχή τάση (DC), με αποτέλεσμα το **DC κέρδος** του ενισχυτή να είναι ίσο με **1**. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι αποτρέπει την ενίσχυση μικρών DC offsets που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μετατόπιση της εξόδου και σε προβλήματα πόλωσης στα επόμενα στάδια. Αντίθετα, για το εναλλασσόμενο σήμα ήχου (AC), ο πυκνωτής επιτρέπει τη σωστή λειτουργία της ανάδρασης, ώστε ο ενισχυτής να αποκτά το επιθυμητό κέρδος.

Παράλληλα, ο C2 σε συνδυασμό με την R4 σχηματίζει ένα **υψιπερατό φίλτρο (high-pass filter)** στο κύκλωμα ανάδρασης. Η συχνότητα αποκοπής αυτού του φίλτρου επιλέγεται πολύ χαμηλά, αρκετά κάτω από τα **20Hz**, ώστε να μην επηρεάζονται οι ακουστές χαμηλές συχνότητες. Η τιμή των **220μF** είναι ιδιαίτερα γενναιόδωρη και εξασφαλίζει ότι ακόμη και τα πολύ χαμηλά μπάσα περνούν χωρίς εξασθένηση, προσφέροντας γεμάτο και φυσικό χαμηλό φάσμα, χωρίς απώλειες ή “λεπτό” χαρακτήρα στον ήχο.

Συνεχίζοντας τη μελέτη του κυκλώματος, οι πυκνωτές C3 και C4, χωρητικότητας 220 μF, επιτελούν έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του σταδίου οδήγησης των τρανζίστορ ισχύος. Οι συγκεκριμένοι πυκνωτές λειτουργούν ως πυκνωτές bootstrapping, δηλαδή ως στοιχεία «ανύψωσης» της τάσης οδήγησης, επιτρέποντας στο κύκλωμα να εκμεταλλευτεί σχεδόν ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος τάσης τροφοδοσίας.

Η τεχνική του bootstrapping εφαρμόζεται εδώ ώστε ο τελεστικός ενισχυτής NE5532 να μπορεί να οδηγήσει αποτελεσματικά τα τρανζίστορ ισχύος Q1 και Q2, ιδιαίτερα όταν το σήμα εξόδου πλησιάζει τα όρια της τροφοδοσίας. Καθώς η έξοδος του ενισχυτή μεταβάλλεται, οι πυκνωτές C3 και C4 «ακολουθούν» δυναμικά τη μεταβολή αυτή και ανυψώνουν το δυναμικό του σημείου πόλωσης των αντιστάσεων οδήγησης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η απαίτηση ρεύματος από τον τελεστικό και αυξάνεται η ικανότητά του να οδηγήσει τα τελικά τρανζίστορ χωρίς πρόωρο ψαλιδισμό.

Η τιμή τους πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, διότι οι πυκνωτές αυτοί οφείλουν να διατηρούν το φορτίο τους καθ' όλη τη διάρκεια μιας περιόδου του ηχητικού σήματος, ακόμη και στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Αν η χωρητικότητα ήταν μικρή, για παράδειγμα 10 μF, τότε στις χαμηλές συχνότητες (μπάσα) ο πυκνωτής θα εκφορτιζόταν γρήγορα, με αποτέλεσμα να μειώνεται το φαινόμενο bootstrapping ακριβώς στα σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ενεργειακή υποστήριξη. Αυτό θα οδηγούσε σε απώλεια δυναμικής, περιορισμό του διαθέσιμου πλάτους εξόδου και πιθανή παραμόρφωση στα έντονα χτυπήματα του ήχου.

Η επιλογή των 220 μF προσφέρει επαρκή «δεξαμενή» φορτίου, ώστε η ανύψωση τάσης να παραμένει σταθερή ακόμη και στις συχνότητες κοντά στα 20 Hz. Παράλληλα, οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν και ως τοπικά στοιχεία αποζεύξης (decoupling) για το στάδιο εξόδου, εξομαλύνοντας μικρές διακυμάνσεις και συμβάλλοντας στη συνολική σταθερότητα του ενισχυτή. Έτσι, διασφαλίζεται ότι το στάδιο ισχύος μπορεί να αποδώσει καθαρό, γεμάτο ήχο με επαρκές εύρος δυναμικής, χωρίς να επιβαρύνεται υπερβολικά ο τελεστικός ενισχυτής.

Ένας ακόμη καθοριστικός παράγοντας στο στάδιο ισχύος είναι οι αντιστάσεις R7 και R8, τοποθετημένες στους εκπομπούς των τρανζίστορ MJE15032 και MJE15033. Οι αντιστάσεις αυτές, με τιμή 0,27 Ω, δεν είναι τυχαίες· αποτελούν βασικό στοιχείο σταθερότητας σε έναν ενισχυτή τάξης AB και συμβάλλουν τόσο στην ορθή λειτουργία όσο και στην προστασία των τελικών τρανζίστορ.

Ο κύριος ρόλος τους είναι η θερμική και ρευματική εξισορρόπηση. Καθώς τα τρανζίστορ οδηγούνται σε υψηλά ρεύματα, ακόμη και μικρές διαφορές στα χαρακτηριστικά τους μπορούν να προκαλέσουν άνιση κατανομή ρεύματος. Οι αντιστάσεις εκπομπού δημιουργούν τοπική αρνητική ανάδραση: αν το ρεύμα ενός τρανζίστορ αυξηθεί υπερβολικά, αυξάνεται και η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση, γεγονός που μειώνει αποτελεσματικά την τάση βάσης-εκπομπού και περιορίζει το ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται το φαινόμενο της θερμικής φυγής (thermal runaway) και διασφαλίζεται σταθερή λειτουργία.

Η τιμή τους πρέπει να είναι πολύ χαμηλή ώστε να μην μειώνεται η απόδοση του ενισχυτή. Αν, για παράδειγμα, η τιμή ήταν 5 Ω ή 10 Ω, σημαντικό μέρος της τάσης εξόδου θα «έπερτε» πάνω στην αντίσταση και όχι στο ηχείο. Αυτό θα σήμαινε απώλεια ισχύος σε μορφή θερμότητας, χαμηλότερη απόδοση και αισθητή μείωση της έντασης. Επιπλέον, θα αυξανόταν η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή, μειώνοντας τον συντελεστή απόσβεσης (damping factor) και άρα τον έλεγχο του μεγαφώνου, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες.

Από την άλλη πλευρά, αν οι αντιστάσεις ήταν υπερβολικά μικρές (π.χ. 0,05 Ω ή σχεδόν μηδενικές), η προστατευτική τους δράση θα ήταν ανεπαρκής. Το κύκλωμα θα γινόταν πιο ευάλωτο σε αστάθεια και θερμική καταπόνηση, ειδικά σε υψηλή ένταση ή σε χαμηλής αντίστασης φορτία.

Για τον λόγο αυτό, η περιοχή 0,22 Ω έως 0,47 Ω θεωρείται ιδανική για τέτοιες εφαρμογές. Η επιλογή των 0,27 Ω προσφέρει μια άριστη ισορροπία: αρκετά μικρή τιμή ώστε να διατηρείται υψηλή απόδοση και χαμηλή αντίσταση εξόδου, αλλά αρκετά μεγάλη ώστε να εξασφαλίζεται σταθερότητα, ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος και μακροχρόνια αξιοπιστία του σταδίου ισχύος.

Οι πυκνωτές C5, C6, C7 και C8 που τοποθετούνται επάνω στις γραμμές τροφοδοσίας +18V και -18V αποτελούν το στάδιο αποζεύξεως (decoupling) του ενισχυτή και είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθερότητα και την καθαρότητα του ήχου. Ο ρόλος τους δεν περιορίζεται απλώς στη «στήριξη» της τροφοδοσίας, αλλά επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά του κυκλώματος στις δυναμικές μεταβολές του σήματος.

Κατά τη διάρκεια μιας απότομης κορύφωσης – για παράδειγμα σε ένα έντονο μπάσο – το στάδιο ισχύος απαιτεί στιγμιαία αυξημένο ρεύμα. Η κύρια τροφοδοσία, ακόμη και με μεγάλους πυκνωτές φίλτρο, δεν μπορεί πάντα να ανταποκριθεί ακαριαία λόγω της εσωτερικής αντίστασης και των καλωδιώσεων. Οι πυκνωτές αποζεύξεως, επειδή βρίσκονται φυσικά πολύ κοντά στα ενεργά εξαρτήματα, λειτουργούν ως τοπικές «δεξαμενές» ενέργειας και παρέχουν το απαιτούμενο ρεύμα σχεδόν στιγμιαία, διατηρώντας την τάση σταθερή.

Παράλληλα, επιτελούν και έναν δεύτερο, εξίσου σημαντικό ρόλο: απορροφούν τις υψηλόσυχνες παρεμβολές και τις αιχμές τάσης που δημιουργούνται είτε από το ίδιο το κύκλωμα (π.χ. ταχεία μεταβολή ρεύματος στα τρανζίστορ) είτε από εξωτερικούς παράγοντες. Για τις υψηλές συχνότητες, ένας πυκνωτής παρουσιάζει πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση, με αποτέλεσμα να λειτουργεί πρακτικά ως «γρήγορη διαδρομή» προς τη γείωση, εμποδίζοντας τον θόρυβο να διαχυθεί στα ευαίσθητα στάδια προενίσχυσης.

Η επιλογή δύο διαφορετικών τιμών δεν είναι τυχαία. Οι πυκνωτές των 100 μF (C6, C8), συνήθως ηλεκτρολυτικοί, είναι κατάλληλοι για χαμηλότερες συχνότητες και για πιο αργές διακυμάνσεις του ρεύματος, έχουν όμως μεγαλύτερη εσωτερική επαγωγή και αντίσταση, γεγονός που περιορίζει την

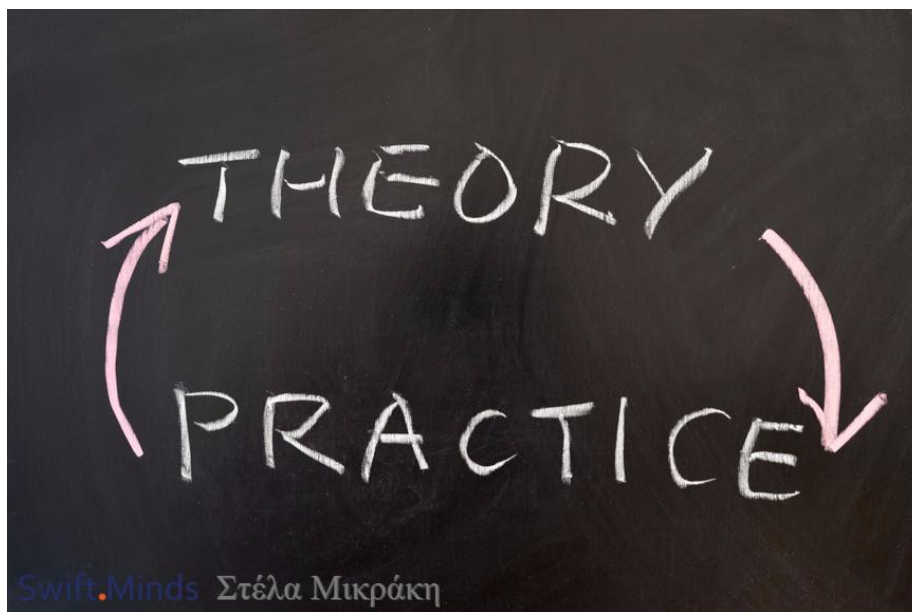
αποτελεσματικότητά τους σε πολύ υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, οι πυκνωτές των 100 nF (C5, C7), κεραμικοί ή πολυεστέρα, είναι μικρότερης χωρητικότητας αλλά εξαιρετικά «γρήγοροι», με χαμηλή επαγωγή, και μπορούν να απορροφήσουν αιχμές πολύ υψηλής συχνότητας που οι ηλεκτρολυτικοί δεν προλαβαίνουν να εξουδετερώσουν.

Ο συνδυασμός τους δημιουργεί μια ολοκληρωμένη αποζεύξη ευρέος φάσματος: οι μεγάλοι πυκνωτές φροντίζουν για τη σταθερότητα σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, ενώ οι μικροί εξασφαλίζουν καθαρότητα σε υψηλές συχνότητες και αποτρέπουν ταλαντώσεις του τελεστικού ενισχυτή. Έτσι διατηρείται σταθερή τροφοδοσία, αποφεύγονται παράσιτα και ο ενισχυτής λειτουργεί με ακρίβεια, ακόμη και σε απαιτητικές συνθήκες ακουστικού φορτίου.

Με την ολοκλήρωση της αναλυτικής παρουσίασης των βασικών στοιχείων του κυκλώματος, καθώς και της τεκμηρίωσης των επιλογών υλικών και τιμών εξαρτημάτων, κρίνεται σκόπιμο να κλείσουμε αυτήν την ενότητα. Η διεξοδική εξέταση κάθε συνιστώσας προσφέρει σαφή κατανόηση της λειτουργίας του ενισχυτή και των λόγων πίσω από κάθε σχεδιαστική απόφαση.

Η προσεκτική ανάλυση των επιλεγμένων στοιχείων εξασφαλίζει ότι η κατασκευή του κυκλώματος ακολουθεί τις αρχές της υψηλής ποιότητας ήχου και της σταθερότητας λειτουργίας.

Στη συνέχεια, η μελέτη θα επικεντρωθεί στις μετρήσεις και την αξιολόγηση της απόδοσης του ενισχυτή. Η ανάλυση θα περιλαμβάνει τόσο θεωρητικούς υπολογισμούς όσο και πρακτικές δοκιμές, προκειμένου να εξακριβωθεί κατά πόσο τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και οι στόχοι που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό έχουν επιτευχθεί. Μέσα από αυτήν τη διαδικασία, θα γίνει δυνατή η σύγκριση των αναμενόμενων θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πραγματικά, παρέχοντας πολύτιμα στοιχεία για την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του κυκλώματος.



Εικόνα 4.3.2 Από Την Θεωρία Στην Πράξη

Κεφάλαιο 5ο: Από Την Θεωρία Στην Πράξη

5.1 Υλοποίηση Σε Πειραματική Πλακέτα Ράστερ

Αφού έχει ολοκληρωθεί η μελέτη και η τεκμηρίωση των υλικών του κυκλώματος, τόσο όσον αφορά τις επιλεγμένες τιμές όσο και την ακριβή τοποθέτησή τους, το επόμενο βήμα στη διαδικασία μελέτης και σχεδιασμού είναι η πρακτική εφαρμογή του κυκλώματος. Συγκεκριμένα, προχωρούμε στη βήμα προς βήμα κατασκευή του σχεδιαστικού κυκλώματος σε μια πειραματική πλακέτα ράστερ. Η χρήση της πλακέτας αυτής επιτρέπει την ασφαλή τοποθέτηση και σύνδεση όλων των εξαρτημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε σε πραγματικές συνθήκες τη συμπεριφορά του ενισχυτή, χωρίς τον κίνδυνο μόνιμης βλάβης ή αστοχίας των στοιχείων. Παράλληλα, η πειραματική προσέγγιση προσφέρει έναν έλεγχο της αρχικής μελέτης και των θεωρητικών υπολογισμών, παρέχοντας τη δυνατότητα να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του κυκλώματος πριν από οποιαδήποτε μόνιμη υλοποίηση.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής στην πλακέτα ράστερ, τίθεται πλέον το πλαίσιο για τη συλλογή μετρήσεων, οι οποίες θα αποτελέσουν τη βάση για τη σύγκριση με τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές. Η διαδικασία αυτή δεν περιορίζεται μόνο στην επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κυκλώματος, αλλά επιτρέπει επίσης την ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων, ανωμαλιών ή αστοχιών που μπορεί να προκύψουν είτε από τις ανοχές των εξαρτημάτων είτε από πιθανές αστοχίες στο σχεδιασμό. Με αυτόν τον τρόπο, η πρακτική εφαρμογή λειτουργεί ως ουσιαστικό εργαλείο αξιολόγησης, βελτίωσης και τελικής επικύρωσης του ενισχυτή, συνδέοντας άμεσα τη θεωρητική ανάλυση με την πραγματική απόδοση του κυκλώματος.

Κατά την κατασκευή του κυκλώματος, η αυστηρή τήρηση του αρχικού σχεδίου αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή λειτουργία του ενισχυτή. Κάθε βήμα της διαδικασίας πρέπει να εκτελείται με ιδιαίτερη προσοχή και σχολαστικότητα, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων και η διασφάλιση της ορθής σύνδεσής τους. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στα κουμπώματα και στις θέσεις των στοιχείων στην πλακέτα, καθώς και στην αποφυγή κακής χρήσης των εξαρτημάτων κατά την εγκατάστασή τους, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε δυσλειτουργίες ή μόνιμες βλάβες. Η σχολαστική τήρηση αυτών των οδηγιών είναι κρίσιμη, διότι ακόμα και μικρές αποκλίσεις από το σχέδιο μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση του κυκλώματος.

Επιπλέον, η προσοχή στις σωστές συνδέσεις και η αποφυγή βραχυκυκλωμάτων αποτελεί ένα ακόμα κρίσιμο σημείο κατά την κατασκευή. Τα λάθη αυτού του είδους είναι συχνά σε μεγάλα ή ογκοδέστατα κυκλώματα, ιδίως όταν η συναρμολόγηση γίνεται από άτομα με περιορισμένη εμπειρία σε πρακτική ηλεκτρονική. Οι αστοχίες αυτές μπορεί να προκύψουν όχι μόνο από παραλείψεις ή λανθασμένες τοποθετήσεις εξαρτημάτων, αλλά και από εσφαλμένες συνδέσεις ή κακή διαχείριση των καλωδίων, οδηγώντας σε ανεπιθύμητες συνέπειες για το κύκλωμα, όπως υπερθέρμανση, βραχυκυκλώματα ή ακόμα και μόνιμη καταστροφή των στοιχείων. Η εφαρμογή προσεκτικής και συστηματικής μεθοδολογίας κατά την κατασκευή, σε συνδυασμό με τη συνεχή επαλήθευση των συνδέσεων, διασφαλίζει την ασφάλεια του κυκλώματος και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο σφαλμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία επιτρέπει την ομαλή μετάβαση από το θεωρητικό σχέδιο στην πλήρως λειτουργική πειραματική κατασκευή.

5.2 Θεωρητικές - Πειραματικές Μετρήσεις

Αφού ολοκληρώθηκε η συναρμολόγηση του κυκλώματος στην πειραματική πλακέτα ράστερ, το επόμενο και ουσιαστικότερο στάδιο είναι η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του μέσω συστηματικών μετρήσεων. Η θεωρητική μελέτη, όσο προσεκτική και αν είναι, αποκτά πραγματική αξία μόνο όταν συγκριθεί με την πρακτική συμπεριφορά του κυκλώματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η διαδικασία αυτή δεν αποσκοπεί μόνο στην επαλήθευση των υπολογισμών, αλλά και στον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων που μπορεί να οφείλονται σε ανοχές εξαρτημάτων, παρασιτικές αντιστάσεις και επαγωγές της πλακέτας, ποιότητα συνδέσεων ή ακόμη και θερμικές μεταβολές. Ιδίως σε κύκλωμα ενισχυτή ήχου, όπου η σταθερότητα και η συμμετρία της τροφοδοσίας είναι κρίσιμες, οι μετρήσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της μελέτης.

Αρχικά ελέγχεται η συμμετρική τροφοδοσία. Με τη χρήση πολύμετρου μετράται η τάση ως προς τη γείωση στο +V και στο -V, επιβεβαιώνοντας ότι οι δύο κλάδοι είναι ίσοι σε μέτρο και αντίθετοι σε πολικότητα.

Έτσι στο θεωρητικό μέρος έχουμε:

$$V_{\text{peak}} = V_{\text{rms}} \cdot \sqrt{2} \sim 18V \cdot 1.414 = (25.45 \text{ Volt})$$

(5.2.1)

Και στο πειραματικό μέρος πήραμε (22 Volt)

Αυτό εν μέρει είναι κάτι που μπορεί να δικαιολογηθεί εάν αφαιρέσουμε αμέσως την πτώση τάσης που κρατείτε επάνω στην γέφυρα, περίπου (1.2 volt) και το μικρό ρεύμα ηρεμίας που τραβάει ο ενισχυτής.

Σημαντικό επίσης να αναφερθεί πως οι δυο λήψεις της τροφοδοσίας σε σχέση με την γείωση φέρανε αρκετά παρόμοιες μετρήσεις με διαφορές μικρότερες του 1 volt.

Έπειτα, χωρίς συνδεδεμένο ηχείο, μετράτε η DC τάση στην έξοδο του ενισχυτή. Ιδανικά πρέπει να είναι πολύ κοντά στο μηδέν (μερικά mV), γεγονός που επιβεβαιώνει σωστή πόλωση και συμμετρία του σταδίου εξόδου. Οποιαδήποτε σημαντική απόκλιση υποδηλώνει ασυμμετρία ή λανθασμένη ρύθμιση.

Η πειραματική ένδειξη μας έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα με την τάση εξόδου σε κατάσταση ηρεμίας να είναι περίπου 1mV.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην τάση και στο ρεύμα ηρεμίας του σταδίου εξόδου. Η μέτρησή του (μέσω της πτώσης τάσης στις αντιστάσεις εκπομπού R7 και R8) επιβεβαιώνει ότι το κύκλωμα λειτουργεί σωστά σε τάξη AB, χωρίς υπερβολική κατανάλωση ή κίνδυνο θερμικής αστάθειας.

Οι πειραματικές μετρήσεις πάνω στο συγκεκριμένο κομμάτι μας έδειξαν πτώση τάσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 22mV.

Αμέσως μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε και το ρεύμα ηρεμίας το οποίο θα είναι:

$$I = \frac{0,022}{0,27} = \sim 80mA$$

(5.2.2)

Αυτό σημαίνει:

«ζεστό» bias.

Μικρότερη crossover παραμόρφωση.

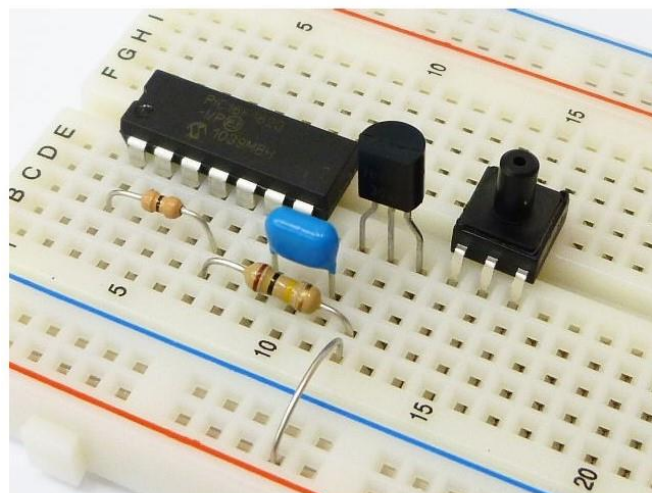
Στα αρνητικά:

Μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση.

Αυξημένη ανάγκη για καλή ψύξη.

Το θετικό σενάριο στην υπόθεση είναι ότι με μεγαλύτερες ψήκτρες η τάση ηρεμίας επάνω στις αντιστάσεις ισορροπεί πράγμα που δηλώνει ότι δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας για να καούν στην πορεία τα transistor.

Επιπλέον μετρήθηκε η αντίσταση εισόδου του σήματος προς ενίσχυση στον ενισχυτή και διαπιστώθηκε πως η θεωρητική με πραγματική τιμή συμπίπτουν με μεγάλη ακρίβεια στα 10k



Εικόνα 5.2.1 Πειραματική Πλακέτα

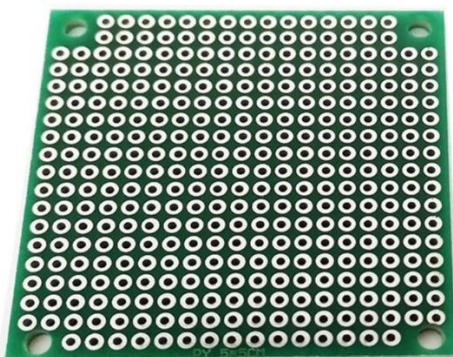
5.3 Ενσωμάτωση Σε Μόνιμη Πλακέτα

Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών και θεωρητικών μετρήσεων, το επόμενο στάδιο στη διαδικασία κατασκευής του ενισχυτή είναι η μεταφορά του κυκλώματος σε μόνιμη πλακέτα. Η χρήση μόνιμης πλακέτας παρέχει τη δυνατότητα σταθερής και αξιόπιστης λειτουργίας του κυκλώματος, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του. Αυτό το βήμα είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς εξασφαλίζει ότι οι συνδέσεις είναι ασφαλείς και ανθεκτικές σε εξωτερικούς παράγοντες, ενώ μειώνει τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων ή αστοχιών που ενδέχεται να εμφανιστούν σε προσωρινές ή πειραματικές κατασκευές.

Κατά την προσαρμογή του κυκλώματος στη μόνιμη πλακέτα, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή τόσο στη διάταξη των εξαρτημάτων όσο και στον χώρο που αυτά καταλαμβάνουν, ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του μεταλλικού κουτιού που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως τελική ενσωμάτωση. Η πλακέτα τροποποιήθηκε ανάλογα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη τοποθέτηση όλων των στοιχείων, η ευκολία πρόσβασης για τυχόν μελλοντικές ρυθμίσεις και η ομαλή ροή των συνδέσεων. Με αυτόν τον τρόπο, το κύκλωμα μετατρέπεται από πειραματική διάταξη σε μια πλήρως λειτουργική και ανθεκτική κατασκευή, έτοιμη για την τελική ενσωμάτωση και χρήση σε πραγματικές συνθήκες.

Η αξιοπιστία του κυκλώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή και προσεκτική τοποθέτηση των εξαρτημάτων στη μόνιμη πλακέτα, γεγονός που καθιστά αυτό το στάδιο κρίσιμο και απαιτητικό. Η επιτυχημένη ολοκλήρωση του βήματος αυτού προϋποθέτει άτομα με την απαραίτητη εμπειρία και τεχνική γνώση, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια στη διάταξη των υλικών και η αποφυγή πιθανών αστοχιών ή βραχυκυκλωμάτων. Η σωστή ταξινόμηση του χώρου και των σημείων τοποθέτησης των εξαρτημάτων αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επίτευξη σταθερής και αξιόπιστης λειτουργίας, καθώς και για την εύκολη συντήρηση ή τυχόν μελλοντικές επεμβάσεις στο κύκλωμα.

Αφού καθοριστούν τα κατάλληλα σημεία και η διάταξη των στοιχείων, το επόμενο βήμα είναι η προετοιμασία του πάγκου εργασίας με όλα τα απαραίτητα υλικά και εργαλεία. Η σωστή οργάνωση του χώρου εργασίας εξασφαλίζει ότι όλα τα εξαρτήματα θα είναι προσβάσιμα και ότι οι διαδικασίες συναρμολόγησης θα εκτελούνται με ασφάλεια και ακρίβεια. Η τήρηση αυτής της προϋπόθεσης μειώνει σημαντικά την πιθανότητα σφαλμάτων και συντελεί στην αποτελεσματική εκτέλεση κάθε βήματος, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του τελικού κυκλώματος.



Εικόνα 5.3.1 Ηλεκτρονική Πλακέτα Εγκατάστασης Υλικών- Εξαρτημάτων

Κατά το στάδιο της συναρμολόγησης του κυκλώματος στη μόνιμη πλακέτα, η χρήση βασικών εργαλείων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ορθής και ασφαλούς εκτέλεσης κάθε βήματος. Από τα πιο κρίσιμα εργαλεία είναι το κολλητήρι και το καλάι, τα οποία αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία σταθερών και αγωγίμων ενώσεων μεταξύ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και των επαφών της πλακέτας. Το κολλητήρι θερμαίνει μια μεταλλική μύτη σε υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 200°C και 480°C, επιτρέποντας τη σύντηξη του μετάλλου κόλλησης, του γνωστού ως καλαιού. Όταν η μύτη του κολλητηριού έρχεται σε επαφή με το σημείο σύνδεσης, το καλάι λιώνει και, αφού κρυώσει, στερεοποιείται, σχηματίζοντας μια ανθεκτική και αγωγίμη ένωση. Αυτή η διαδικασία είναι θεμελιώδης για τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία του κυκλώματος και απαιτεί ακρίβεια, σταθερό χέρι και προσοχή για την αποφυγή κακής κόλλησης ή βραχυκυκλωμάτων.

Οι κύριες λειτουργίες του κολλητηριού και του καλαιού είναι πολυδιάστατες και κρίσιμες για κάθε φάση κατασκευής ή επισκευής ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Πρώτον, η συγκόλληση εξαρτημάτων επιτρέπει τη μόνιμη τοποθέτηση αντιστάσεων, πυκνωτών, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και άλλων στοιχείων πάνω στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB), εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αγωγιμότητα των συνδέσεων. Δεύτερον, η ηλεκτρική σύνδεση καλωδίων καθιστά δυνατή τη σύνδεση διαφορετικών τμημάτων του κυκλώματος ή τη σύνδεση με ακροδέκτες, εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη ροή ρεύματος. Επιπλέον, η σωστή χρήση του κολλητηριού και του καλαιού επιτρέπει την επισκευή χαλασμένων ή δυσλειτουργικών εξαρτημάτων, καθώς και την αποκατάσταση κομμένων ή κατεστραμμένων διαδρομών στην πλακέτα, ενώ με τη χρήση ειδικών εργαλείων αποκόλλησης, όπως η τρόμπα αποκόλλησης, είναι δυνατή η ασφαλής αφαίρεση παλαιών ή ελαττωματικών εξαρτημάτων για αντικατάσταση.

Ένας δυνατός και ουσιαστικός συνδυασμός εργαλείων κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης είναι η χρήση του κολλητηριού και του καλαιού, σε συνδυασμό με την τρομπά αποκόλλησης. Η τρομπά λειτουργεί με την αρχή του κενού αέρος και αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για την ασφαλή και ακριβή αφαίρεση υλικού κόλλησης ή εξαρτημάτων από την πλακέτα. Στη σύνθεσή της περιλαμβάνεται ένα έμβολο με ελατήριο, το οποίο ο χρήστης "οπλίζει" πιέζοντας προς τα κάτω. Με την απελευθέρωση του κουμπιού, το ελατήριο εκτινάσσεται προς τα πάνω, δημιουργώντας μια στιγμιαία αλλά ισχυρή αναρρόφηση, ικανή να απομακρύνει το λιωμένο μέταλλο ή το εξάρτημα μέσα στο σώμα της τρόμπας. Η διαδικασία αυτή είναι ασφαλής για την πλακέτα και τις ηλεκτρονικές διαδρομές, αποτρέποντας ζημιές που θα μπορούσαν να προκύψουν από απρόσεκτο χειρισμό.

Η τρομπά αποκόλλησης χρησιμοποιείται σε διάφορες περιπτώσεις που κρίνονται απαραίτητες για την ορθή εκτέλεση και την επισκευή του κυκλώματος. Πρώτον, διευκολύνει την αφαίρεση χαλασμένων ή ελαττωματικών εξαρτημάτων από την πλακέτα, χωρίς να προκαλεί ζημιές στις διαδρομές ή στους ακροδέκτες. Δεύτερον, επιτρέπει τον καθαρισμό των οπών σε πλακέτες τύπου through-hole, διασφαλίζοντας ότι οι τρύπες είναι έτοιμες για την τοποθέτηση νέων εξαρτημάτων. Τέλος, η τρομπά αποκόλλησης χρησιμοποιείται για τη διόρθωση λαθών κατά τη συγκόλληση, όπως η υπερβολική ποσότητα κόλλησης ή η δημιουργία βραχυκυκλωμάτων μεταξύ δύο επαφών, γνωστών και ως "γέφυρες". Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η ακρίβεια και η αξιοπιστία του κυκλώματος, καθώς και η διατήρηση της μακροχρόνιας λειτουργικότητας και σταθερότητας του ενισχυτή.

Η σωστή και συνετή χρήση της τρομπάς αποκόλλησης, σε συνδυασμό με το κολλητήρι και το καλάι, αποτελεί ουσιώδες στοιχείο της επιστημονικής και μεθοδικής προσέγγισης στην κατασκευή και επισκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η αξιοποίηση αυτών των εργαλείων όχι μόνο διευκολύνει την ακριβή τοποθέτηση και απομάκρυνση εξαρτημάτων, αλλά συμβάλλει καθοριστικά στην

ελαχιστοποίηση σφαλμάτων, στην αποφυγή βραχυκυκλωμάτων και στην επίτευξη υψηλής ποιότητας κατασκευής, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και την αξιοπιστία του τελικού προϊόντος.

Ένα ακόμα απαραίτητο εργαλείο κατά τη διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης του κυκλώματος είναι ο απογυμνωτής καλωδίων, ο οποίος καθίσταται αναντικατάστατος στις εργασίες καλωδιώσεων. Η κύρια λειτουργία του είναι η ακριβής αφαίρεση του εξωτερικού μονωτικού περιβλήματος των καλωδίων, παρέχοντας καθαρή και ομοιόμορφη έκθεση των αγωγίμων τμημάτων στο σημείο που επιθυμούμε. Η ακρίβεια αυτή είναι καθοριστική για την ασφαλή και αξιόπιστη σύνδεση των καλωδίων με ακροδέκτες, πλακέτες ή άλλα τμήματα του κυκλώματος, διασφαλίζοντας την καλή ηλεκτρική επαφή και την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων.

Ο απογυμνωτής καλωδίων διευκολύνει σημαντικά την εργασία, ιδιαίτερα όταν πρόκειται να διαχειριστούμε μεγάλο πλήθος καλωδιώσεων. Η χρήση του επιτρέπει την ταχεία, ακριβή και ομοιόμορφη απογύμνωση κάθε καλωδίου, μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων και εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο σε σύγκριση με πιο παραδοσιακές ή χειροκίνητες μεθόδους. Λόγω της αποτελεσματικότητας και της ευκολίας που προσφέρει, θεωρείται ένα εργαλείο απαραίτητο, το οποίο πρέπει να βρίσκεται σε ετοιμότητα σε κάθε στάδιο που απαιτεί καλωδιώσεις, εξασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή εκτέλεση των εργασιών συναρμολόγησης.

Ένα επίσης ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο κατά τη φάση της συναρμολόγησης του κυκλώματος είναι το πολύμετρο, το οποίο, αν και σε πρώτη φάση μπορεί να φαίνεται μη απαραίτητο, καθίσταται κρίσιμο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια του στησίματος. Η χρήση του πολύμετρου επιτρέπει την άμεση μέτρηση και επαλήθευση βασικών ηλεκτρικών παραμέτρων, όπως τάση, ένταση και αντίσταση, αλλά και τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας των στοιχείων του κυκλώματος. Ένα από τα πιο χρήσιμα χαρακτηριστικά του είναι ο ήχος «μπιπ» που παρέχει για τον έλεγχο διόδων και τη συνεχή επαλήθευση των συνδέσεων.

Με τη βοήθεια αυτής της λειτουργίας, είναι δυνατή η άμεση ανίχνευση πιθανών βραχυκυκλωμάτων ή λανθασμένων συνδέσεων, όπως όταν μια επαφή που επιθυμούσαμε να συνδεθεί δεν έχει πιάσει ή όταν συνδέθηκε άθελά μας μια άλλη, ανεπιθύμητη επαφή. Η δυνατότητα αυτή προσφέρει μεγάλη ασφάλεια κατά τη συναρμολόγηση, καθώς επιτρέπει στον κατασκευαστή να εντοπίσει και να διορθώσει σφάλματα σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του κυκλώματος. Η συνετή χρήση του πολύμετρου αποτελεί επομένως αναπόσπαστο μέρος της επιστημονικής και μεθοδικής προσέγγισης στην κατασκευή του ενισχυτή.



Εικόνα 5.3.2 Κολητήρι



Εικόνα 5.3.3 Πολύμετρο

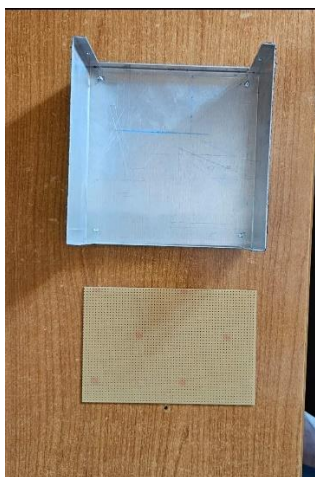
5.4 Ενσωμάτωση Σε Προστατευτικό Πλαίσιο

Στο τελείωμα αυτής της λεπτομερούς και χρονοβόρας διαδικασίας συναρμολόγησης και ελέγχου του κυκλώματος, φτάνουμε πλέον στο στάδιο επιλογής και αγοράς του πλαισίου, μέσα στο οποίο θα ενσωματωθεί η πλακέτα που έχουμε προσεκτικά στήσει. Η επιλογή του κατάλληλου πλαισίου δεν είναι απλώς μια τυπική διαδικασία, αλλά καθοριστική για την τελική σταθερότητα, ασφάλεια και αξιοπιστία του ενισχυτή. Το πλαίσιο λειτουργεί ως προστατευτικό κέλυφος, διασφαλίζοντας την αποφυγή φυσικών φθορών, επαφών με υγρά ή σκόνη και παράλληλα παρέχοντας την κατάλληλη στήριξη για όλες τις συνδέσεις και τα εξαρτήματα.

Η ενσωμάτωση της πλακέτας μέσα στο πλαίσιο απαιτεί προσεκτική προσαρμογή και προγραμματισμό της διάταξης, ώστε όλα τα στοιχεία να βρίσκονται στη σωστή θέση, να επιτρέπεται η εύκολη πρόσβαση για μελλοντικές ρυθμίσεις ή συντηρήσεις και να εξασφαλίζεται η σωστή κυκλοφορία του αέρα για την αποφυγή υπερθέρμανσης. Επιπλέον, η σωστή τοποθέτηση στο πλαίσιο επιτρέπει την ομαλή ολοκλήρωση της κατασκευής, παρέχοντας ένα τελικό προϊόν που συνδυάζει την αισθητική, τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία. Με αυτόν τον τρόπο, το κύκλωμα μετατρέπεται από μια πειραματική διάταξη σε ένα πλήρως ολοκληρωμένο και ανθεκτικό σύστημα, έτοιμο για χρήση υπό πραγματικές συνθήκες.

Δεδομένου ότι η ενσωμάτωση της πλακέτας θα πραγματοποιηθεί σε μεταλλικό πλαίσιο, το πρώτο και πιο κρίσιμο μέτρο ασφαλείας είναι η μόνωση της βάσης του κουτιού, στο οποίο θα πατήσει η πλακέτα. Η μόνωση αυτή διασφαλίζει ότι το κάτω μέρος των κολλημένων ενώσεων δεν έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό πλαίσιο, αποτρέποντας πιθανό βραχυκύκλωμα, το οποίο θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρές βλάβες ή μόνιμη καταστροφή του κυκλώματος. Η σωστή εφαρμογή μόνωσης είναι απαραίτητη για την προστασία τόσο της πλακέτας όσο και των εξαρτημάτων της, ενώ αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την ασφάλεια του χειριστή και την αξιοπιστία της τελικής κατασκευής.

Μετά την τοποθέτηση της πλακέτας, κάθε κίνηση ή επέμβαση μέσα στο μεταλλικό κουτί απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Ακόμη και μια φαινομενικά ασήμαντη ενέργεια, όπως η πτώση μιας βίδας ή λανθασμένη βίδωση μιας μεταλλικής βίδας, μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνα βραχυκυκλώματα ή καταστροφικές συνέπειες για το κύκλωμα. Αυτό το στάδιο κατασκευής επιβάλλει αυξημένη συγκέντρωση και προσοχή, καθώς η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του ενισχυτή εξαρτώνται άμεσα από τη σωστή διαχείριση και την ακριβή τοποθέτηση κάθε στοιχείου εντός του μεταλλικού πλαισίου. Η τήρηση αυτών των κανόνων αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας σταθερότητας και αξιοπιστίας του κυκλώματος.



Εικόνα 5.4.1 Διαδικασία Κατασκευής



Εικόνα 5.4.2 Μόνωση Της Κάτω Επιφάνειας

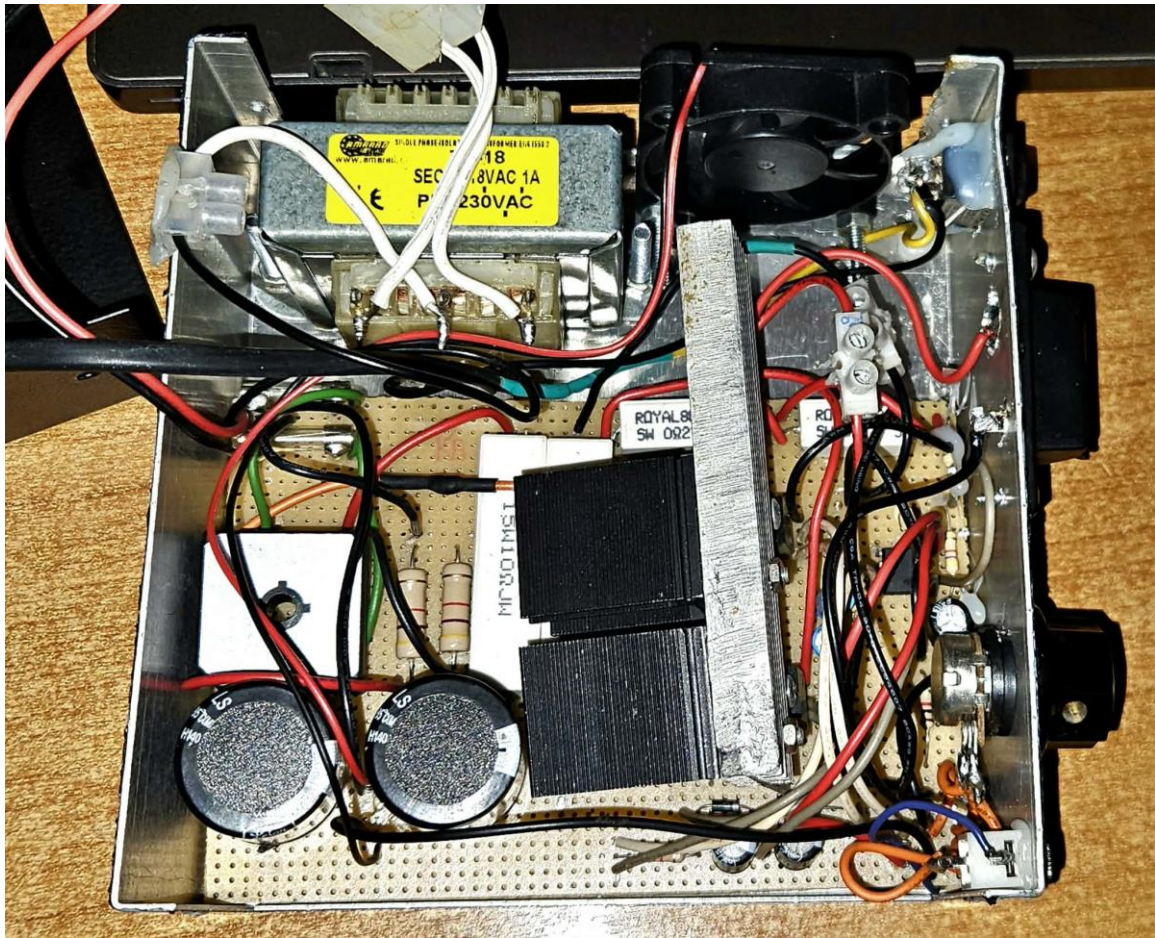
Μετά την ολοκλήρωση της προσεκτικής τοποθέτησης και ασφάλισης της πλακέτας μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο, το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τη σήμανση και τη δημιουργία των βάσεων για όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα που πρόκειται να τοποθετηθούν. Η σωστή προετοιμασία των βάσεων είναι κρίσιμη, καθώς εξασφαλίζει ότι κάθε στοιχείο θα στηριχθεί με ασφάλεια, θα παραμείνει σταθερό κατά τη χρήση και δεν θα επηρεάσει τη λειτουργία των γύρω κυκλωμάτων. Η ακριβής σήμανση καθορίζει τα σημεία στερέωσης και βοηθά στον ορθό προσανατολισμό των εξαρτημάτων, διασφαλίζοντας τη μέγιστη αξιοπιστία και λειτουργικότητα του τελικού ενισχυτή.

Ένα από τα πιο ογκώδη και σημαντικά εξαρτήματα που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη στερέωση είναι ο μετασχηματιστής. Στην περίπτωσή μας, πραγματοποιήθηκαν οπές χιλιοστών για την τοποθέτηση βιδών και παξιμαδιών, προκειμένου να επιτευχθεί η σταθερότητα και η ασφαλής συγκράτηση του μετασχηματιστή. Η σωστή στερέωση του μετασχηματιστή είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη φυσική ασφάλεια του στοιχείου, αλλά και για την αποφυγή κραδασμών ή μετακινήσεων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ηλεκτρική απόδοση ή να προκαλέσουν ζημιές στα υπόλοιπα εξαρτήματα και στις συνδέσεις του κυκλώματος.

Στη συνέχεια, προχώρησε η προετοιμασία της πρόσοψης του μεταλλικού κουτιού, με το άνοιγμα επιπλέον οπών, οι οποίες έχουν καθοριστική σημασία για τη λειτουργικότητα και την εργονομία του τελικού ενισχυτή. Οι οπές αυτές περιλαμβάνουν την υποδοχή του ποτενσιόμετρου, ένα στοιχείο που επιτρέπει στον χρήστη τον εύκολο και ομαλό έλεγχο της έντασης του ήχου, προσφέροντας παράλληλα μια ευχάριστη και εργονομική αίσθηση κατά τη χρήση. Η ακριβής τοποθέτηση του ποτενσιόμετρου, σε συνδυασμό με την κατάλληλη διαμόρφωση του εξωτερικού περιβλήματος, αποτελεί ουσιώδη παράμετρο για την αισθητική και τη λειτουργικότητα της πρόσοψης, διασφαλίζοντας ότι η ρύθμιση της έντασης γίνεται με ακρίβεια και ευκολία.

Παράλληλα, στην πρόσοψη τοποθετήθηκε ένας σημαντικός διακόπτης ON-OFF, υπεύθυνος για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση ολόκληρου του κυκλώματος. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μεγάλη περικοπή στο πλαίσιο ώστε να χωρέσει η βάση σύνδεσης των ηχείων, η οποία ασφαλίζεται με ειδικά κλιπ, εξασφαλίζοντας σταθερή και ασφαλή τοποθέτηση. Τέλος, ένα ακόμα απαραίτητο βήμα ήταν η δημιουργία της θύρας τύπου τζακ για την είσοδο του ήχου, επιτρέποντας την εύκολη και ασφαλή σύνδεση με εξωτερικές πηγές σήματος. Η προσεκτική εκτέλεση αυτών των εργασιών είναι κρίσιμη για την ασφαλή λειτουργία του ενισχυτή, την εργονομία και την αισθητική του τελικού προϊόντος, ενώ διασφαλίζει ότι όλα τα εξαρτήματα είναι εύκολα προσβάσιμα και λειτουργικά ολοκληρωμένα.

Επιπλέον, ένα σημαντικό στοιχείο για τη διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας και της μακροχρόνιας αξιοπιστίας του κυκλώματος είναι η τοποθέτηση ενός μικρού ανεμιστήρα εντός του μεταλλικού πλαισίου. Ο ανεμιστήρας αυτός συνδέθηκε απευθείας με την τροφοδοσία του κυκλώματος, με σκοπό τη διαρκή κυκλοφορία αέρα και την αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται κατά τη λειτουργία του ενισχυτή. Η σωστή θερμική διαχείριση είναι κρίσιμη, καθώς η υπερθέρμανση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τόσο την απόδοση όσο και τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, προκαλώντας πιθανές αστοχίες ή μόνιμες βλάβες. Η ενσωμάτωση του ανεμιστήρα αποτελεί, επομένως, ένα απαραίτητο μέτρο προστασίας, το οποίο εξασφαλίζει τη σωστή θερμοκρασία λειτουργίας του κυκλώματος και συμβάλλει στην αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων, όπως η θερμική υπερφόρτωση των στοιχείων ή η παραμόρφωση της πλακέτας. Επιπλέον, η προσεκτική τοποθέτηση του ανεμιστήρα και η σύνδεσή του με την τροφοδοσία πρέπει να γίνει με ακρίβεια, ώστε να μην επηρεάζει άλλα εξαρτήματα ή τις ηλεκτρικές συνδέσεις, διασφαλίζοντας τόσο την αποτελεσματικότητα του αερισμού όσο και την ασφάλεια της συνολικής κατασκευής.



Εικόνα 5.4.3 Διαδικασία Κατασκευής Τοποθέτηση Πλακέτας



Εικόνα 5.4.4 Διαδικασία Κατασκευής

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα / Προτάσεις Για Βελτίωση

Στο τελικό στάδιο της εργασίας, η αξιολόγηση της κατασκευής οδηγεί σε ιδιαίτερα θετικά συμπεράσματα. Η υλοποίηση του ενισχυτή ήχου με το δικό του τροφοδοτικό επιβεβαίωσε ότι οι αρχικοί στόχοι της μελέτης έχουν επιτευχθεί. Ο ενισχυτής λειτουργεί πλήρως, παρουσιάζοντας σταθερή και αξιόπιστη απόδοση χωρίς εμφανή σημάδια υψηλού θορύβου ή παραμορφώσεων, χαρακτηριστικό που καταδεικνύει τόσο την ορθή επιλογή των εξαρτημάτων όσο και την προσεκτική κατασκευή και συναρμολόγηση του κυκλώματος. Η σωστή διάταξη των στοιχείων και η προσεκτική τοποθέτησή τους μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο συνέβαλαν καθοριστικά στη διασφάλιση της λειτουργικής σταθερότητας και της αξιοπιστίας του τελικού προϊόντος.

Παράλληλα, η ολοκλήρωση μιας τόσο μεγάλης και σύνθετης κατασκευής για πρώτη φορά αποτέλεσε σημαντική εμπειρία, η οποία απέδωσε ευχάριστα αποτελέσματα τόσο από τεχνική όσο και από αισθητική άποψη. Ο ενισχυτής παρουσιάζει ευήχο και καθαρό ήχο, στοιχεία που επιβεβαιώνουν την επιτυχή υλοποίηση των αρχών της ηλεκτρονικής και των μεθόδων σχεδίασης που εφαρμόστηκαν. Η εμπειρία αυτή, πέρα από τα πρακτικά αποτελέσματα, προσέφερε πολύτιμες γνώσεις για τη διαχείριση σύνθετων κυκλωμάτων, τη σημασία της ακριβούς τοποθέτησης εξαρτημάτων και της σωστής θερμικής και ηλεκτρικής προστασίας, παράγοντες που αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για κάθε μελλοντική βελτίωση και εξέλιξη της εργασίας.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα της τρέχουσας κατασκευής, υπάρχουν στοιχεία που, σε μεταγενέστερες υλοποιήσεις ή σε μια αναθεωρημένη έκδοση του ενισχυτή, θα μπορούσαν να προστεθούν ή να προσαρμοστούν καλύτερα, προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική αναβάθμιση της συνολικής λειτουργικότητας και ευελιξίας του συστήματος. Μια από τις πιο ουσιαστικές βελτιώσεις αφορά την προσθήκη εξειδικευμένων ρυθμιστικών για την προσαρμογή του ήχου, τα οποία θα επέτρεπαν τον έλεγχο και της χρωματικής ισορροπίας του σήματος.

Συγκεκριμένα, η τρέχουσα κατασκευή περιορίζεται σε έναν μόνο ρυθμιστή έντασης, ο οποίος, αν και επαρκής για τον έλεγχο της συνολικής στάθμης του ήχου, δεν παρέχει δυνατότητα διαμόρφωσης των συχνοτήτων. Η ενσωμάτωση ρυθμιστών μπάσων και πρίμων θα επέτρεπε στον χρήστη να προσαρμόζει την απόκριση του ενισχυτή ανάλογα με τις ακουστικές προτιμήσεις ή τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος, βελτιώνοντας σημαντικά την ευκρίνεια και την ποιότητα του παραγόμενου ήχου. Η προσθήκη αυτών των ρυθμιστικών αποτελεί, επομένως, μια βασική προοπτική για μελλοντικές εκδόσεις, που θα αναβαθμίσει το τρέχον κύκλωμα σε πιο ολοκληρωμένο και προσαρμοστικό σύστημα ήχου.

Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη επέμβαση είναι σχετικά απλούστερη σε σύγκριση με τα προηγούμενα βήματα, θα ήταν σημαντικό να προστεθεί μια προειδοποιητική λυχνία λειτουργίας στον ενισχυτή. Η λυχνία αυτή, συνδεδεμένη με την τροφοδοσία του κυκλώματος, θα ενημερώνει άμεσα τον χρήστη για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του ενισχυτή, προσφέροντας ένα απλό αλλά αποτελεσματικό μέσο εποπτείας και ασφάλειας κατά τη χρήση.

Παρόλο που η υλοποίηση μιας τέτοιας λυχνίας δεν απαιτεί ιδιαίτερα πολύπλοκες επεμβάσεις και μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο υπάρχον κύκλωμα, η παρούσα κατασκευή δεν διαθέτει αυτήν τη λειτουργία. Η προσθήκη της θα βελτιώνει την εργονομία και την ασφάλεια του συστήματος, αποτρέποντας ενδεχόμενα λάθη χρήσης και προσφέροντας σαφή οπτική ένδειξη κατάστασης λειτουργίας του ενισχυτή, γεγονός που αποτελεί σημαντική βελτίωση για οποιαδήποτε μελλοντική αναθεώρηση του έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Internet Site

- [1] https://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2682/Fysiki_B-Lykeiou-GP_html-empl/index1_5.html
- [2] <https://sciencebob.com/static-shocker-with-a-leyden-jar/>
- [3] https://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2682/Fysiki_B-Lykeiou-GP_html-empl/index2_4.html
- [4] <https://myschlab.com/2020/04/16/electriki-antistasi-nomos-ohm/>
- [5] <https://douflias.sites.sch.gr/kef2-diodes/>
- [6] <https://acdclabs.wordpress.com/2021/05/22/%CE%B7%CE%B4%CE%AF%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82/>
- [7] <https://electro.tomathouse.com/el/chto-takoe-diodnyj-most.html>
- [8] https://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2682/Fysiki_B-Lykeiou-GP_html-empl/index2_6.html
- [9] https://blogs.sch.gr/mlagoudakos/files/2013/01/P021_074.pdf
- [10] <https://www.ariat-tech.gr/blog/transistors-the-building-blocks-of-the-digital-age-and-beyond.html>
- [11] https://eclass.uth.gr/modules/document/file.php/SE_HL_U154/%CE%91%CE%A3%CE%9A.%208%20-%20%CE%A4%CE%9F%20%CE%A4%CE%A1%CE%91%CE%9D%CE%96%CE%99%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%A1%20-%20%CE%98%CE%95%CE%A9%CE%A1%CE%97%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%9C%CE%95%CE%A1%CE%9F%CE%A3.pdf
- [12] <https://www.wonderfulpcb.com/el/blog/class-a-b-ab-c-d-amplifier-circuits-comparison/>
- [15] <https://www.ic-components.gr/blog/capacitor-smoothing-circuits-techniques-and-calculations.jsp>
- [16] <https://diyelectronics-gr.blogspot.com/2017/04/dummy-load.html>
- [17] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17968/PHILIPS/NE5532.html>
- [18] <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/840177/TI1/LM741/284/5/LM741.html>
- [19] <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1082481/TI1/LM358/529/8/LM358.html>
- [20] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/12414/ONSEMI/MJE15032.html>
- [21] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58687/DCCOM/BR3510W.html>

Βιβλία

- [13] Παναγιώτα Αθ. Παπαβραμίδου, Δημήτρης Κλ. Παπακώστας, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2014
- [14] Albert Malvino, David J. Bates, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ, 7η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2011