



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και υλοποίηση ηλεκτρικής ενίσχυσης και διαμόρφωσης  
ακουστικών σημάτων μέσω λυχνιών κενού»



Του φοιτητή  
**Παπαδόπουλου Γεώργιου**  
Αρ. Μητρώου: **517110**

Επιβλέπων  
**κ. Μπάμνιος Γεώργιος**  
Καθηγητής

Θεσσαλονίκη 2025

Τίτλος Π.Ε.: Μελέτη και υλοποίηση ηλεκτρικής ενίσχυσης και διαμόρφωσης ακουστικών σημάτων  
μέσω λυχνιών κενού.

Κωδικός Π.Ε.: 23157

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Παπαδόπουλος Γεώργιος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Μπάμνιος Γεώργιος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 21-03-2023

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 26-01-2025

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



«Στην οικογένεια και στους φίλους μου»

## Πρόλογος

Η αγάπη μου για τη μουσική ξεκίνησε από πολύ μικρή ηλικία και όσο μεγαλώνω γίνεται ακόμα πιο δυνατή. Από την άλλη, ο κόσμος των ηλεκτρονικών μου προκαλούσε δέος, κυρίως η ιδέα πως ο Άνθρωπος σκέφτηκε, σχεδίασε και κατασκεύασε την τηλεόραση CRT, το VCR, τα πικάπ, το τηλέφωνο και η λίστα συνεχίζεται... Επέλεξα να σπουδάσω Ηλεκτρονική, και από την πρώτη στιγμή ήξερα πως η πτυχιακή εργασία στο τέλος της θητείας μου, θα έχει να κάνει με τη μουσική. Κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου, ανακάλυψα το εύρος που καλύπτει η Ηλεκτρονική, και αντιλήφθηκα την κλίση μου στα αναλογικά ηλεκτρονικά. Όντας μουσικός, επέλεξα να ασχοληθώ με τη μελέτη της ηλεκτρονικής ενίσχυσης και διαμόρφωσης ακουστικού σήματος χρησιμοποιώντας λυχνίες κενού. Το ταξίδι μέχρι την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας ήταν συναρπαστικό. Συνάντησα αρκετά εμπόδια τόσο στη σχεδίαση όσο και στην υλοποίηση των επιμέρους κυκλωμάτων, ενώ κατάλαβα πως ο κόσμος του ήχου είναι μια ξεχωριστή επιστήμη όπου συνιστά προσοχή στη λεπτομέρεια. Αποκόμισα γνώσεις και εμπειρία στη στοχευμένη έρευνα, τη σχεδίαση και σύνθεση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τη σχεδίαση τυπωμένων πλακετών και την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου ενισχυτή ακουστικών σημάτων, ενώ το δέος που ένιωθα ως παιδί για τα ηλεκτρονικά, πλέον μετά το πέρας της πτυχιακής, έχει δεκαπλασιαστεί.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη πτυχιακή πραγματεύεται τη ροή ενός ακουστικού σήματος, από την παραγωγή και προενίσχυσή του, ως την διαμόρφωση και τελική ενίσχυσή του, ενώ ταυτόχρονα επισημαίνει διάφορους παράγοντες που συμβάλλουν σε φαινόμενα όπως αλλοίωση ή παραμόρφωση του σήματος. Ακόμη, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των λυχνιών κενού, όπως και διάφοροι τύποι ενισχυτών ακουστικών σημάτων. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση της διαδικασίας σχεδίασης και υλοποίησης κυκλώματος ενισχυτή με επιλογή διαμόρφωσης του σήματος μέσω ταλαντωτή μετατόπισης φάσης χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιώντας λυχνίες κενού, παραθέτοντας τις κατάλληλες ηλεκτρικές μετρήσεις.

# «Study and implementation of electrical amplification and modulation using vacuum tubes»

Papadopoulos Georgios

## **Abstract**

This particular thesis follows the flow of an acoustic signal, from its production and pre-amplification to its modulation and power amplification using vacuum tube technology, whilst acknowledging different factors that contribute to phenomena such as signal corruption and/or distortion. Within the thesis, there will be an analysis on the working principles of vacuum tubes, as well as a closer look at different types of amplifiers. In addition, there will be an analysis of the design process and implementation of a vacuum tube amplifier including the option of electric modulation through low-frequency phase-shift oscillation, while providing expected electric measurements.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια και τους φίλους μου για την έντονη και συνεχή τους στήριξη, και τον καθηγητή μου κύριο Μπάμνιο Γεώργιο για την άψογη συνεργασία και τις καίριες συμβουλές του. Ιδιαίτερο ευχαριστώ στον πατέρα μου Βασίλειο, χωρίς τη βοήθεια του οποίου η κατασκευή δεν θα είχε ολοκληρωθεί, όπως και στο φίλο Παρασκευά Γεώργιο για τη βοήθεια στην επίλυση σημαντικών προβλημάτων. Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στους καθηγητές μου στα χρόνια του Λυκείου, κυρίως Βογιατζή Βασίλειο, Λευθερούδη Θεόδωρο και Αλμαλιώτη Ιωάννη για την ανιδιοτελή τους βοήθεια σε τέσσερα παιδιά που είχαν όνειρο να σπουδάσουν και δεν θα τα είχαν καταφέρει χωρίς εκείνους.

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάδοση Κύματος .....	1
Σχήμα 2: Συχνότητες μουσικών νοτών .....	4
Σχήμα 3: Θεμελιώδης και Αρμονικές Συχνότητες.....	4
Σχήμα 4: Καμπύλες ίσης ακουστότητας για καθαρούς τόνους .....	6
Σχήμα 5: Γενικό διάγραμμα ενός πλήρους ηλεκτροακουστικού συστήματος .....	7
Σχήμα 6: Μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα πυλώνα μόνιμου μαγνήτη .....	8
Σχήμα 7: Κατασκευή single-coil μαγνήτη κιθάρας .....	9
Σχήμα 8: Κατασκευή Humbucker μαγνήτη .....	10
Σχήμα 9: Ίδανικό σήμα κιθάρας, μονοπηνιακού μαγνήτη .....	11
Σχήμα 10: Ίδανικό σήμα κιθάρας, μονοπηνιακού μαγνήτη και φαινόμενο hum.....	12
Σχήμα 11: Ίδανικό σήμα κιθάρας, διπλοπηνιακού μαγνήτη εκτός φάσης, και φαινόμενο hum εκτός φάσης.....	12
Σχήμα 12: Ίδανικό σήμα κιθάρας, διπλοπηνιακού μαγνήτη ελαφρώς ενισχυμένο και φαινόμενο hum εκτός φάσης.....	13
Σχήμα 13: Θέσεις μαγνητών στην κιθάρα Telecaster της Fender .....	14
Σχήμα 14: Άμεσα θερμαινόμενη διάδος .....	15
Σχήμα 15: Έμμεσα θερμαινόμενη διάδος .....	15
Σχήμα 16: Στοιχεία διόδου λυχνίας .....	16
Σχήμα 17: Χαρακτηριστική V-I ανόδου της διόδου λυχνίας .....	17
Σχήμα 18: Ανόρθωση θετικής ημιπεριόδου .....	19
Σχήμα 19: Ανόρθωση αρνητικής ημιπεριόδου .....	20
Σχήμα 20: Πλήρης ανόρθωση (PDC) .....	20
Σχήμα 21: Τριόδος λυχνία.....	21
Σχήμα 22: Βασικό κύκλωμα τριόδου.....	21
Σχήμα 23: Στοιχεία τριόδου λυχνίας.....	22
Σχήμα 24: Βασική συνδεσμολογία τριόδου .....	22
Σχήμα 25: Χαρακτηριστική V-I ανόδου τριόδου .....	23
Σχήμα 26: Ευθεία φόρτου τριόδου .....	25
Σχήμα 27: Ευθεία φόρτου τριόδου και εύρος λειτουργίας.....	26
Σχήμα 28: Σχέση φάσεων τάσης πλέγματος και τάσης ανόδου .....	27
Σχήμα 29: Παρασιτικές συχνότητες .....	28
Σχήμα 30: Στοιχεία τετρόδου λυχνίας .....	29
Σχήμα 31: Τέτροδος λυχνία.....	29
Σχήμα 32: Σχέση μεταβολής των ρευμάτων ανόδου και προστατευτικού πλέγματος με την τάση ανόδου .....	30
Σχήμα 33: Χαρακτηριστική V-I τετρόδου .....	31
Σχήμα 34: Πέντοδος λυχνία .....	33
Σχήμα 35: Στοιχεία πεντόδου λυχνίας .....	34
Σχήμα 36: Χαρακτηριστική V-I ανόδου πεντόδου .....	34
Σχήμα 37: Τέτροδος λυχνία κατευθυνόμενης δέσμης .....	36
Σχήμα 38: Στοιχεία τετρόδου λυχνίας κατευθυνόμενης δέσμης .....	37
Σχήμα 39: Χαρακτηριστική V-I τετρόδου κατευθυνόμενης δέσμης .....	37
Σχήμα 40: Άτομο χαλκού (Αγωγός) .....	38
Σχήμα 41: Άτομο πυριτίου (Ημιαγωγός) .....	39

Σχήμα 42: Σχηματικό Vox T-60.....	40
Σχήμα 43: Block διάγραμμα ενισχυτικής διάταξης.....	41
Σχήμα 44: Προσομοίωση κυκλωμάτων καθόδου και κοινής ανόδου (ονομαστικές τιμές στοιχείων) .....	42
Σχήμα 45: Προσομοίωση κυκλώματος κλάσης B (ονομαστικές τιμές στοιχείων).....	44
Σχήμα 46: Κυματομορφές input output κυκλώματος κλάσης B με τρανζίστορ.....	44
Σχήμα 47: Διαφορά πλάτους (τάσης) στον άξονα y .....	45
Σχήμα 48: Προσομοίωση κυκλώματος κλάσης AB (ονομαστικές τιμές στοιχείων) .....	46
Σχήμα 49: Πόλωση πλέγματος για κάθε κλάση ενισχυτών.....	46
Σχήμα 50: Ηλεκτροδυναμικό ηχείο .....	47
Σχήμα 51: Συχνότητα (κόκκινη γραμμή), Σύνθετη Αντίσταση (πορτοκαλί γραμμή).....	49
Σχήμα 52: Active crossover και passive crossover .....	50
Σχήμα 53: Ισοβαρές διάγραμμα.....	51
Σχήμα 54: Τύποι καμπινών ηχείου .....	52
Σχήμα 55: Μετασχηματιστής .....	53
Σχήμα 56: Μετασχηματισμός.....	56
Σχήμα 57: Block διάγραμμα ροής σήματος (signal flow) από την παραγωγή στον ενισχυμένο ήχο .....	56
Σχήμα 58: Συνδεσμολογία (α), σύνδεση στην κάθοδο του προενισχυτή .....	60
Σχήμα 59: Συνδεσμολογία (β), σύνδεση στην άνοδο του προενισχυτή .....	60
Σχήμα 60: Κύκλωμα ενισχυτή.....	64
Σχήμα 61: Ευθεία φόρτου 12AX7 .....	65
Σχήμα 62: Προσέγγιση α ευθείας φόρτου EL34 .....	67
Σχήμα 63: Προσέγγιση β ευθείας φόρτου EL34 .....	67
Σχήμα 64: Κυματομορφές σταθεροποιητή στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice της OrCAD .....	70
Σχήμα 65: LPF.....	71
Σχήμα 66: HPF .....	72
Σχήμα 67: Συνδεσμολογία bandpass (αριστερά), συνδεσμολογία bandstop (δεξιά) .....	72
Σχήμα 68: Φίλτρο διέλευσης ζώνης (πάνω), φίλτρο απόρριψης ζώνης (κάτω) .....	73
Σχήμα 69: Συνδυασμοί φίλτρων του κυκλώματος ισοσταθμιστή.....	74
Σχήμα 70: Συχνοτική απόκριση ισοσταθμιστή.....	75
Σχήμα 71: Τυπωμένη πλακέτα σε 2D.....	77
Σχήμα 72: Κάτω όψη τυπωμένης πλακέτας σε 3D.....	78
Σχήμα 73: Πάνω όψη τυπωμένης πλακέτας σε 3D.....	78

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αντιστοιχία στάθμης έντασης ήχου και έντασης ήχου .....	5
Πίνακας 2: Πίνακας σήματος εξόδου μαγνήτη σύμφωνα με την πολικότητα των μαγνητών και την φορά τυλίγματος.....	11
Πίνακας 3: Τάση και ρεύμα ανόδου .....	25
Πίνακας 4: Τάση και ρεύμα ανόδου σε σχέση με την τάση πλέγματος.....	27
Πίνακας 5: Σύγκριση κλάσεων AB1 και AB2.....	45
Πίνακας 6: Αποτέλεσμα παραδείγματος βρόζου ανάδρασης.....	61
Πίνακας 7: Αποτέλεσμα τελικής εισόδου-εξόδου παραδείγματος βρόχου ανάδρασης .....	61
Πίνακας 8: Αποτέλεσμα τελικής παραμόρφωσης παραδείγματος βρόχου ανάδρασης .....	63
Πίνακας 9: Στάδιο ανόρθωσης και σταθεροποίησης .....	79
Πίνακας 10: Στάδιο πρώτης προενίσχυσης .....	79
Πίνακας 11: Στάδιο δεύτερης προενίσχυσης.....	80
Πίνακας 12: Στάδιο ταλαντωτή μετατόπισης φάσης .....	80
Πίνακας 13: Στάδιο ενίσχυσης ισχύος .....	80

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κουτί κατασκευής από αλουμίνιο μετά τη διάτρηση.....	81
Εικόνα 2: Επισήμανση σημείων της κατασκευής με αυτοκόλλητα.....	82
Εικόνα 3: Εγκατάσταση βοηθητικών κλεμών για τη συνδεσμολογία του κυκλώματος .....	82
Εικόνα 4: Εγκατάσταση εξαρτημάτων σταδίου τροφοδοσίας, ανόρθωσης και εξομάλυνσης .....	83
Εικόνα 5: Τελικό στάδιο κατασκευής.....	83

## Συντομογραφίες

ΔΠΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΑΔΕ	Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας
AF	Audio Frequency
RF	Radio Frequency
SNR	Signal-to-noise ratio
LPF	Low-pass filter
HPF	High-pass filter
EMI	Electromagnetic Interference
V	Volt
A	Ampere
W	Watt
Hz	Hertz
Ω	Ohm
Σχ.	Σχήμα
Βλ.	Βλέπε
Σελ.	Σελίδα

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη .....	vi
Abstract.....	vii
Ευχαριστίες .....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	ix
Κατάλογος Πινάκων .....	xi
Κατάλογος Εικόνων.....	xi
Συνομογραφίες.....	xiii
Περιεχόμενα .....	xiii
Εισαγωγή.....	xv
<b>Κεφάλαιο 1ο: Ήχος .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ακουστική συχνότητα. ....	3
1.3 Στάθμη έντασης ήχου και Ακουστότητα .....	5
<b>Κεφάλαιο 2ο: Ηλεκτρική Ενίσχυση.....</b>	<b>7</b>
2.1 Εισαγωγή .....	7
2.2 Μαγνήτες.....	8
2.3 Ηλεκτρονική Λυχνία .....	15
2.3.1 Δίοδος. ....	15
2.3.2 Τρίοδος.....	21
2.3.3 Τέτροδος.....	29
2.3.4 Πέντοδος .....	33
2.3.5 Τέτροδος κατευθυνόμενης δέσμης. ....	36
2.4 Τρανζίστορ.....	38
2.5 Κλάσεις Ενισχυτών .....	41
2.6 Ηχεία.....	47
2.7 Μετασχηματισμός Σήματος.....	53
2.8 Θόρυβος και Παραμόρφωση.....	55
<b>Κεφάλαιο 3ο: Σχεδίαση.....</b>	<b>63</b>
3.1 Σχεδίαση και ανάλυση κυκλώματος.....	64
<b>Κεφάλαιο 4ο: Κατασκευή .....</b>	<b>78</b>

Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

# Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία επιλέχθηκε με γνώμονα τη μελέτη, ανάλυση και τριβή με τα κυκλώματα ενισχυτών ακουστικών σημάτων μέσω λυχνιών κενού, λόγω της ενασχόλησής μου με τη μουσική. Μέσα από τη μελέτη συγγραμμάτων, κατανόησα τη λειτουργία των λυχνιών κενού ενώ η επιλογή της κλάσης του ενισχυτή, του τρόπου διαμόρφωσης του ακουστικού σήματος μέσω ταλαντωτή μετατόπισης φάσης καθώς και των υλικών της κατασκευής έγινε με γνώμονα την προσπάθεια για καλή πιστότητα, την προσωπική αισθητική, και το χαμηλό οικονομικό κόστος σε σύγκριση με άλλες κλάσεις ενισχυτών και κυκλωμάτων διαμόρφωσης του σήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του ήχου, αλλά και σε έννοιες που χαρακτηρίζουν έναν ήχο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη στάθμη έντασης του ήχου, την ακουστότητα καθώς και τις θεμελιώδεις και αρμονικές συχνότητες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στην ηλεκτρική ενίσχυση ενός σήματος, συγκεκριμένα αναλύεται η μετατροπή του ακουστικού σήματος ηλεκτρικής κιθάρας σε ρεύμα μέσω των μαγνητών της, ενώ γίνεται μια πρώτη αναφορά σε φαινόμενα θορύβου μέσω ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Το κεφάλαιο εμβαθύνει στην τεχνολογία και τις αρχές λειτουργίας των διάφορων τύπων λυχνιών κενού, την εφαρμογή τους σε κυκλώματα ανόρθωσης και ενίσχυσης, τις μεταξύ τους διαφορές αλλά και τις διαφορές τους με τα τρανζίστορ και τους λόγους που προτιμώνται μέχρι και σήμερα από επαγγελματίες μουσικούς. Επιπλέον, μελετώνται οι διάφορες κλάσεις ισχύος κυκλωμάτων ενίσχυσης, καθώς και οι αρχές λειτουργίας των ηχείων και των μετασχηματιστών, γίνεται ανάλυση διαφόρων τύπων θορύβου και παραμόρφωσης που συναντώνται σε κυκλώματα με λυχνίες κενού, ενώ επισημαίνεται η σημασία της ανάδρασης, τεχνική η οποία αποσκοπεί σε μείωση ή εξάλειψη της παραμόρφωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται διεξοδική ανάλυση του τρόπου με τον οποίο σχεδιάστηκε, προσομοιώθηκε και υπολογίστηκε θεωρητικά το κύκλωμα του ενισχυτή προς κατασκευή. Το κύκλωμα χωρίζεται σε τέσσερα στάδια, τα οποία αναλύονται και υπολογίζονται σταδιακά. Συγκεκριμένα, αναλύεται κατά βήμα ο τρόπος υπολογισμού των λειτουργικών ορίων των λυχνιών κενού, ο υπολογισμός της τάσης κυμάτωσης, της συχνότητας αποκοπής και της πτώσης τάσης στο κύκλωμα ανόρθωσης και σταθεροποίησης, το κύκλωμα του ισοσταθμιστή και τα διάφορα φίλτρα που το αποτελούν όπως και ο τρόπος λειτουργίας τους, και τέλος το κύκλωμα του ταλαντωτή μετατόπισης φάσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση του τρόπου προσέγγισης της κατασκευής του κυκλώματος ενισχυτή που σχεδιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στον τρόπο επιλογής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, στη σχεδίαση τυπωμένων πλακετών που πραγματοποιήθηκε αλλά και στις δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επιπλέον, παραθέτονται εικόνες της κατασκευής, καθώς και ηλεκτρικές μετρήσεις οι οποίες επιβεβαιώνουν τους θεωρητικούς υπολογισμούς και κρίνουν τον ενισχυτή ασφαλή για χρήση.

Τέλος, μετά το πέρας της κατασκευής, προκύπτουν τα προσωπικά συμπεράσματα και οι προτάσεις βελτιστοποίησης του κυκλώματος, ενώ γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία που μελετήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

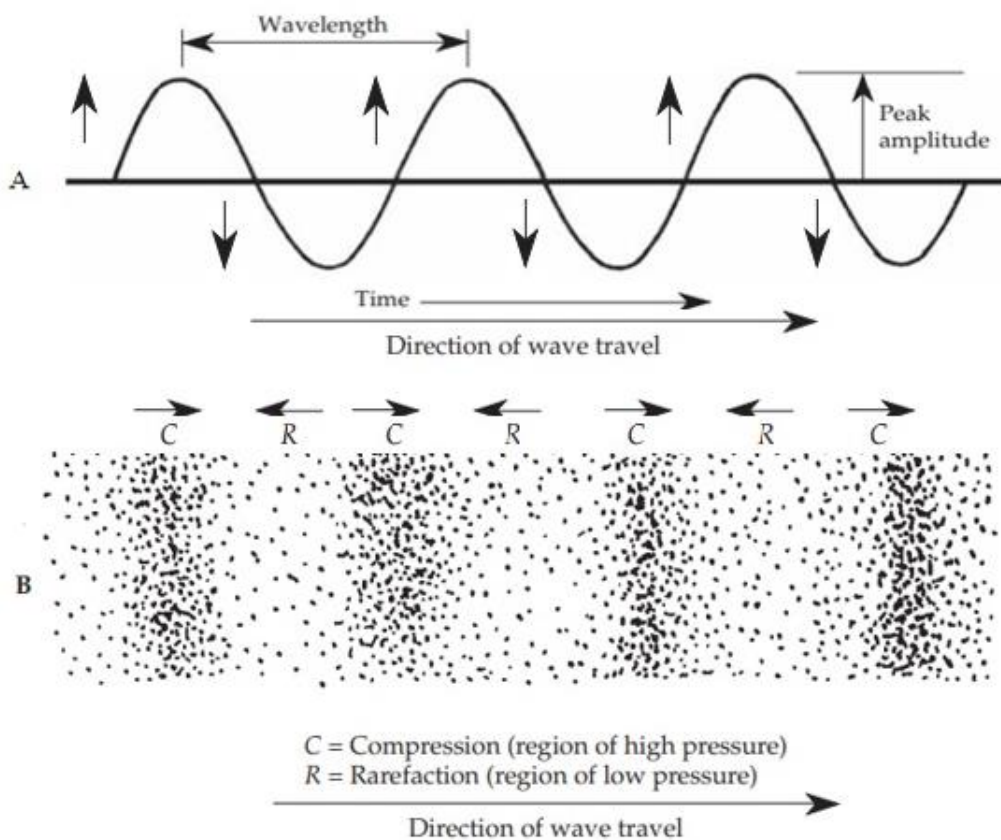
# 1. Ήχος

## 1.1 Εισαγωγή

Για να κατανοήσουμε πλήρως την σημασία των κυκλωμάτων ενίσχυσης και διαμόρφωσης ακουστικών ηλεκτρικών σημάτων θα πρέπει να ξεκινήσουμε από την κατανόηση της έννοιας του ήχου.

Ο ήχος, δηλαδή η ηχητική ενέργεια, είναι ταλαντώσεις που προέρχονται από κάποια πηγή (ανθρώπινη φωνή, μουσικά όργανα, φύση κ.α.) οι οποίες διαταράσσουν τα μόρια του αέρα, τα οποία πλησιάζουν ή απομακρύνονται μεταξύ τους δημιουργώντας έτσι πυκνώματα και αραιώματα μεταβάλλοντας την πίεση του αέρα. Οι ταλαντώσεις αυτές δημιουργούν μηχανικά κύματα, τα λεγόμενα ηχητικά κύματα τα οποία φθάνουν στο αυτί και συγκεκριμένα κρούουν το ακουστικό μας τύμπανο και στη συνέχεια μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα στον εγκέφαλο.

Από τη Φυσική γνωρίζουμε ότι υπάρχουν δυο είδη κυμάτων: τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα. Στα διαμήκη κύματα, τα μόρια του μέσου έχουν κατεύθυνση παράλληλη με τη διεύθυνση του κύματος και μπορούν να διαδοθούν μέσω στερεών, υγρών και αερίων σωμάτων, ενώ στα εγκάρσια κύματα, τα μόρια του μέσου έχουν κατεύθυνση κάθετη της διεύθυνσης του κύματος και μπορούν να διαδοθούν μόνο μέσω στερεών σωμάτων. Τα ηχητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν σε όλες τις καταστάσεις της ύλης (στερεά, υγρά, αέρια) γεγονός που τα καθιστά διαμήκη. Ο ήχος δεν μπορεί να διαδοθεί στο κενό λόγω έλλειψης μορίων τα οποία μπορούν να αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους.



Σχήμα 1. Διάδοση κύματος

### **Ταχύτητα ήχου**

Ταχύτητα του ήχου ονομάζεται η απόσταση που διανύεται σε ένα μέσο από ένα ηχητικό κύμα ανά μονάδα χρόνου και εξαρτάται άμεσα από παράγοντες όπως η πίεση και η θερμοκρασία, αλλά και από την κατάσταση ύλης του εκάστοτε σώματος. Μονάδα μέτρησης της ταχύτητας του ήχου είναι τα m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο) και είναι γνωστό πως για ατμοσφαιρικό, ξηρό αέρα θερμοκρασίας 20 °C η ταχύτητα του ήχου υπολογίζεται στα 343 m/s, ενώ η ταχύτητά του στο νερό για 20 °C είναι περίπου 1482 m/s. Όταν για παράδειγμα ένα αεροσκάφος ταξιδεύει γρηγορότερα από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, λέμε ότι «έσπασε» το φράγμα του ήχου δηλαδή ξεπέρασε το όριο των 343 m/s.

Λόγω της πολυμορφικότητας του περιβάλλοντος και παραγόντων όπως η κατάσταση της ύλης του μέσου ή αλλαγή στα καιρικά φαινόμενα, παρατηρούμε φαινόμενα τα οποία αλληλεπιδρούν με τα διάφορα ηχητικά κύματα που διαδίδονται. Κάποια από αυτά τα φαινόμενα είναι τα παρακάτω:

### **Ανάκλαση**

Ανάκλαση ονομάζεται η αλλαγή κατεύθυνσης ενός ηχητικού κύματος, η οποία προκαλείται από παρεμβολή ενός μέσου διαφορετικής κατάστασης ύλης από το κύριο μέσο μετάδοσής του. Όσο πιο λεία και στιλπνή είναι η επιφάνεια του νέου μέσου τόσο πιο αισθητή είναι η ανάκλαση. Αν ένα εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 17.2 μέτρων από την πηγή του ήχου τότε παρατηρείται η ηχώ (echo), ένα φαινόμενο κατά το οποίο ο ήχος που μεταδόθηκε από την πηγή προς το ανακλαστικό μέσο, επαναλαμβάνεται αυτή τη φορά από το ανακλαστικό μέσο προς την πηγή. Η απόσταση αυτή προκύπτει καθώς η ταχύτητα του ήχου είναι 343 m/s άρα 34.3 ανά δέκατο του δευτερολέπτου, επομένως αν η απόσταση του ανακλαστικού μέσου είναι μικρότερη των 17.2 μέτρων το ανθρώπινο αυτί δεν έχει την δυνατότητα να αντιληφθεί τον επαναλαμβανόμενο ήχο. Αντίστοιχα αν η απόσταση του ανακλαστικού μέσου βρίσκεται στα 34 ή 51 μέτρα, τότε ο αυθεντικός ήχος που προήλθε από την πηγή θα επιστρέψει προς την πηγή δύο ή τρεις φορές αντίστοιχα.

### **Περίθλαση**

Περίθλαση ονομάζεται η τάση που έχουν τα ηχητικά κύματα να κάμπτονται, όταν περνούν ή διαπερνούν ένα σώμα (για παράδειγμα εξαιτίας ανοίγματος του σώματος). Η έκταση που γεμίζει ένα ηχητικό κύμα στην περιοχή γύρω από ένα σώμα είναι ανάλογη με τις διαστάσεις του σώματος ή του ανοίγματος το οποίο διαπερνούν.

### **Διάθλαση**

Διάθλαση ονομάζεται η αλλαγή (ή εκτροπή) πορείας ενός ηχητικού κύματος το οποίο περνάει σε ένα υλικό διαμέσου ενός άλλου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω της διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης του ήχου ανάμεσα στα δυο υλικά, για παράδειγμα όταν ένας ήχος ταξιδεύει σε στρώματα αέρα που διακατέχονται από διαφορετική θερμοκρασία.

## Συμβολή

Συμβολή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ηχητικά κύματα προερχόμενα από δυο διαφορετικές πηγές διαδίδονται στο ίδιο μέσο (για παράδειγμα αέρας) και παράγουν ηχητικό κύμα το οποίο είναι η υπέρθεση των δυο αρχικών ηχητικών κυμάτων. Αυτό σημαίνει όμως, πως αν τα δυο αρχικά ηχητικά κύματα φτάσουν ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο ενός χώρου, δηλαδή αν είναι συχνοτικά συυφασμένες τότε παρατηρείται ενισχυτική συμβολή στο τελικό ηχητικό κύμα. Αν αντίθετα τα δυο αρχικά ηχητικά κύματα είναι εκτός φάσης, δηλαδή συχνοτικά αντίθετα μεταξύ τους, τότε έχουμε αποσβεστική συμβολή στο τελικό ηχητικό σήμα αλλά όχι σε βαθμό μηδενισμού. Λόγω του φαινομένου αυτού, επαγγελματικοί χώροι που έχουν να κάνουν με την μουσική είναι έτσι διαμορφωμένοι ώστε ο ακροατής να βρίσκεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο συμβολής των εκάστοτε πηγών ήχου (για παράδειγμα η θέση του ηχολήπτη και των ηχείων σε ένα επαγγελματικό studio ηχογράφησης).

Ο τρόπος με τον οποίο χαρακτηρίζουμε έναν ήχο, για παράδειγμα « μουσικός, απαλός, ισχυρός, θόρυβος, κρότος, ψίθυρος κ.α.» έχει άμεση σχέση με έννοιες όπως είναι η ακουστότητα, η χροιά, η ταχύτητα και η μουσικότητά του. Ίσως όμως, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του ήχου να είναι η **ακουστική συχνότητα** και η **έντασή του**.

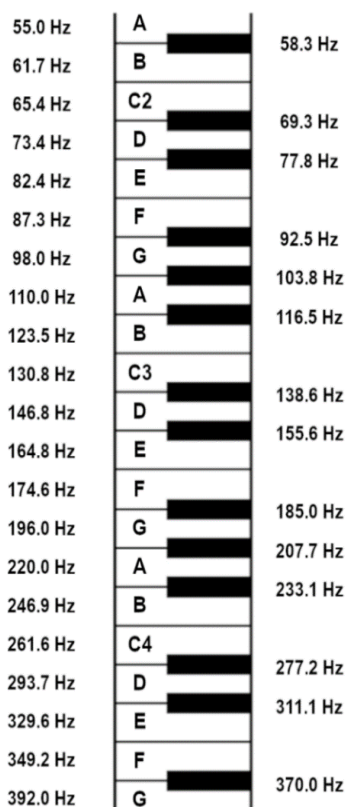
## 1.2 Ακουστική συχνότητα

Ακουστική συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός επαναλήψεων των ταλαντώσεων των μορίων του αέρα ανά μονάδα χρόνου. Το ακουστό φάσμα των ανθρώπων, δηλαδή το εύρος συχνοτήτων όπου το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ήχους κυμαίνεται από περίπου **20 έως 20.000** ταλαντώσεις ανά δευτερόλεπτο (**Hz**). Έτσι, ήχοι με συχνότητα μικρότερη των 20 Hz ονομάζονται υπόηχοι ενώ ήχοι συχνότητας μεγαλύτερης των 20 KHz ονομάζονται υπέρηχοι. Αν πάρουμε για παράδειγμα την χορδή μιας κιθάρας η οποία μετά από δική μας νύξη έχει αρχίσει να ταλαντώνεται σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, τα μόρια του αέρα που θα κρούσουν το τύμπανο στο αυτί μας θα είναι ίδιας συχνότητας με την συχνότητα ταλάντωσης της χορδής.

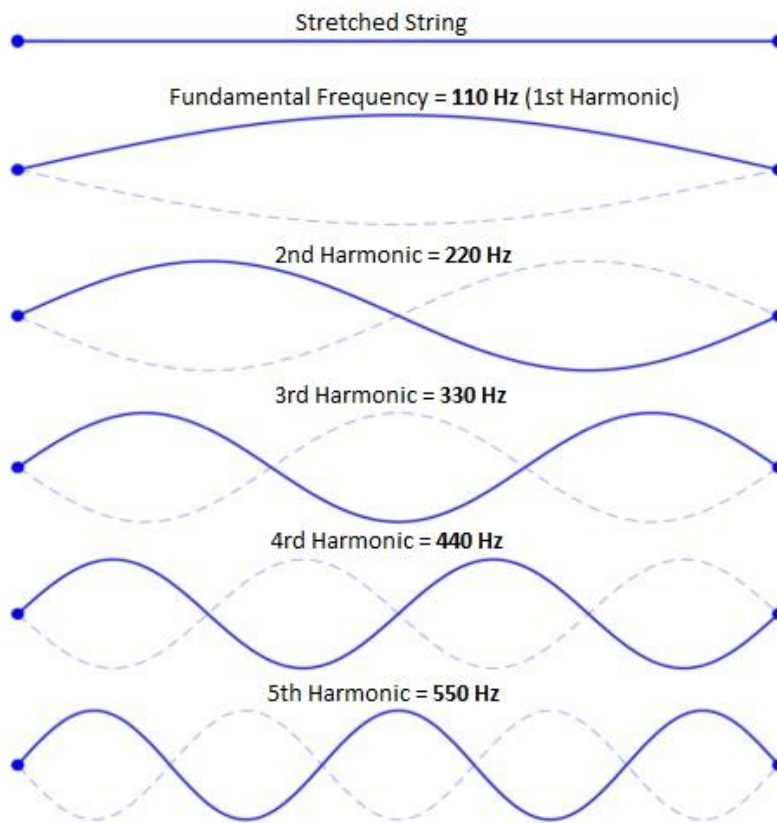
Ανάλογα με την ακουστική συχνότητα ενός ήχου, ο τελευταίος υπόκειται σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες που χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ένα μέρος του ακουστού φάσματος:

- **Sub-bass (20 Hz - 60 Hz):** Μουσικά όργανα όπως το κοντραμπάσο, η τούμπα και το ηλεκτρικό μπάσο παράγουν ήχους σε αυτές τις συχνότητες.
- **Bass (60 Hz - 250 Hz):** Εδώ βρίσκουμε την ανθρώπινη φωνή κατά τη διάρκεια τυπικής ομιλίας, και πιο συγκεκριμένα για τους άντρες ισχύει (80 – 180 Hz) ενώ για τις γυναίκες ισχύει (165 - 255 Hz).
- **Lower mid-range (250 Hz – 500 Hz):** Πνευστά μουσικά όργανα όπως το σαξόφωνο και το κλαρίνο παράγουν ήχους σε αυτό το εύρος.
- **Mid-range (500 Hz – 2000 Hz):** Συχνότητες που μπορούν να παραχθούν από τα περισσότερα μουσικά όργανα.
- **Higher mid-range (2000 Hz – 4000 Hz):** Σε αυτό το εύρος βρίσκουμε τις αρμονικές κρουστών μουσικών οργάνων.
- **Presence (4000 Hz – 6000 Hz):** Η υψηλότερη νότα σε ένα τυπικό πιάνο των 88 πλήκτρων βρίσκεται περίπου στα 4186 Hz.
- **Brilliance (6000 Hz – 20000 Hz):** Μια παλιά τηλεόραση τύπου CRT όταν βρίσκεται σε λειτουργία εκπέμπει ένα χαρακτηριστικό σφύριγμα συχνότητας περίπου 16744 Hz.

Όταν πιέζουμε το πλήκτρο ενός πιάνου, ουσιαστικά ταλαντώνουμε την χορδή που είναι συνυφασμένη με το συγκεκριμένο πλήκτρο. Ανάλογα με τη θέση του πλήκτρου στο πιάνο (αριστερά ή δεξιά) οι χορδές είναι λιγότερο ή περισσότερο τεντωμένες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ήχων, που ονομάζονται μουσικές νότες. Κάθε νότα είναι θεωρητικά αντίστοιχη με μια συχνότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Για παράδειγμα η νότα Λα (στα αγγλικά A) είναι αντίστοιχη των 110 Hz.



Σχήμα 2. Συχνότητες μουσικών νοτών



Σχήμα 3. Θεμελιώδης και Αρμονικές Συχνότητες

Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν είναι ακριβώς αλήθεια, καθώς πρακτικά μια νότα αποτελείται από περισσότερες από μία συχνότητες οι οποίες ονομάζονται αρμονικές. Ειδικά αν σκεφτούμε πως ένας ήχος μπορεί να παραχθεί από πολλές νότες, άρα πολλά πλήκτρα μαζί. Αυτό σημαίνει πως ταυτόχρονα παράγουμε δεκάδες συχνότητες. Επομένως η συχνότητα που αντιστοιχείται με την εκάστοτε νότα ονομάζεται **θεμελιώδης** (ή 1<sup>η</sup> αρμονική), ενώ ως **αρμονικές** ορίζονται οι συχνότητες που συνοδεύουν σαν απόηχος την θεμελιώδη συχνότητα κάνοντας τη νότα να ακούγεται πιο γεμάτη και μουσική, από μια νότα μιας τεχνητής πηγής ήχου. Το μαγικό φαινόμενο που συναντάμε στις αρμονικές (Σχήμα 3) είναι ότι λειτουργούν σε συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας. Για παράδειγμα η νότα Λα που αναφέραμε παραπάνω έχει ως θεμελιώδη συχνότητα τα 110 Hz, ενώ οι αρμονικές που ακολουθούν βρίσκονται στα 220, 330, 440 και 550 Hz αντίστοιχα. Μια ηλεκτρική κιθάρα, με το τυπικό κούρδισμα μπορεί να παράγει από 82 Hz (χαμηλή Μι – low E) έως και περίπου 4.5 KHz.

### 1.3 Στάθμη έντασης ήχου και Ακουστότητα

#### Στάθμη έντασης ήχου

Ως ένταση του ήχου ορίζεται η ισχύς ενός ηχητικού κύματος ανά μονάδα επιφάνειας και έχει ως μονάδα μέτρησης τα  $W/m^2$  (watt ανά τετραγωνικό μέτρο). Στην καθομιλουμένη όμως όταν λέμε ένταση ήχου, εννοούμε πραγματικά την στάθμη έντασης του ήχου η οποία υπολογίζεται σε dB (decibels) και μετράει το πλάτος του ηχητικού κύματος. Η κλίμακα των dB είναι λογαριθμική και όχι γραμμική όπως για παράδειγμα η κλίμακα μέτρησης ενός χάρακα, και αντικατοπτρίζει την αναλογία μιας τιμής προς μια τιμή αναφοράς. Η αναλογία αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \quad (1)$$

Έχοντας σαν δεδομένο ότι η ένταση του ήχου στο συγκεκριμένο σημείο είναι ίση με  $1 \cdot 10^{-12} W/m^2$  σύμφωνα με τον Πίνακα 1, η τιμή αναφοράς θα είναι ίση με 0 dB και αυτό προκύπτει από την παρακάτω σχέση η οποία αποτελεί και το κατώτατο κατώφλι ακουστότητας:

$$I_0 = 10 \log_{10} 1 \cdot 10^{-12} \quad (2)$$

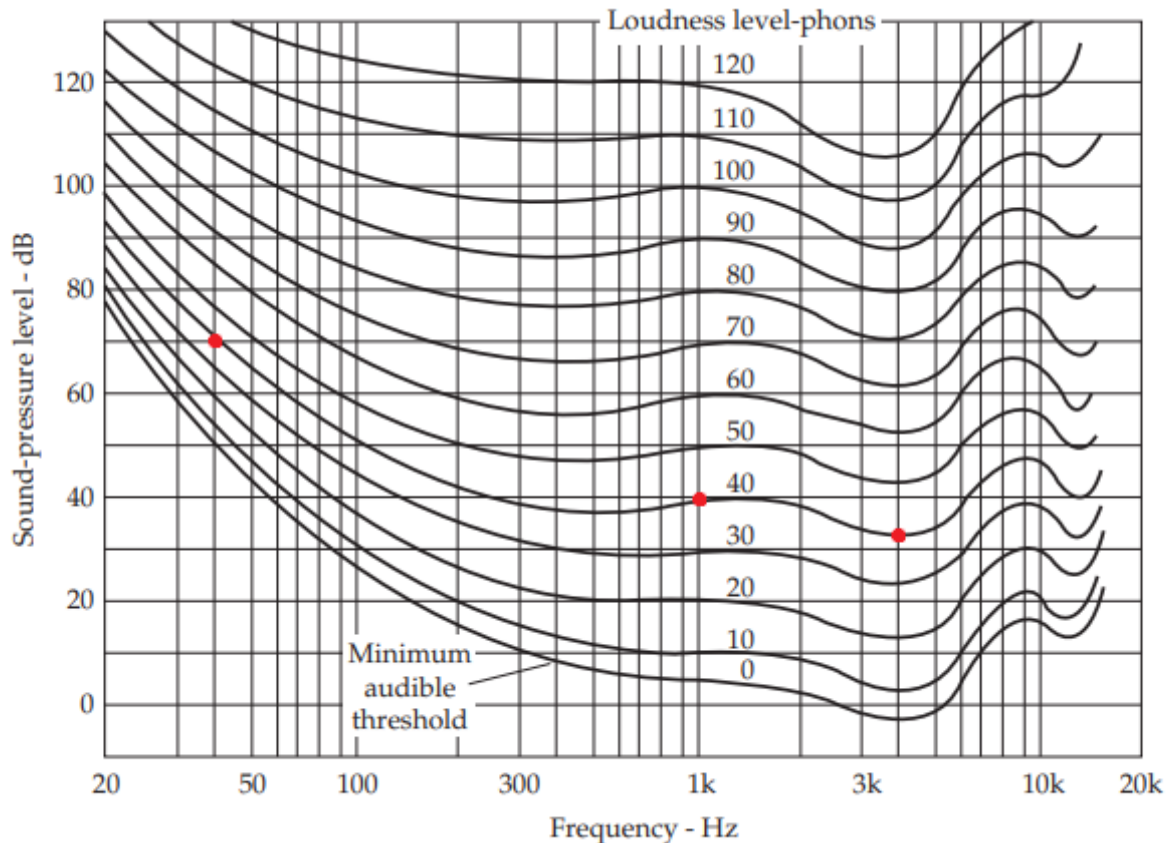
Η λογαριθμική κλίμακα σημαίνει πως αν υποθέσουμε ότι παράγουμε έναν ήχο 80 dB και αυξήσουμε την στάθμη της έντασης κατά 10 dB αυτό σημαίνει πως ο ήχος θα είναι 10 φορές πιο έντονος, αλλά στα αυτιά μας θα ακούγεται 2 φορές πιο δυνατός. Μια τυπική κουβέντα μεταξύ δυο ανθρώπων μετριέται περίπου στα 60 dB, η κυκλοφοριακή κίνηση στους δρόμους στα 80 dB ενώ μια ροκ συναυλία υπολογίζεται στα 120 dB, τιμή που αποτελεί και το ανώτατο κατώφλι ανεκτικότητας του ανθρώπου σε στάθμη έντασης του ήχου.

Στάθμη έντασης ήχου (dB)	Ένταση ήχου ( $W/m^2$ )
0	$1 \cdot 10^{-12}$
10	$1 \cdot 10^{-11}$
30	$1 \cdot 10^{-9}$
60	$1 \cdot 10^{-6}$
80	$1 \cdot 10^{-4}$
100	$1 \cdot 10^{-2}$
120	1
140	$1 \cdot 10^2$

**Πίνακας 1.** Αντιστοιχία στάθμης έντασης ήχου και έντασης ήχου

### Ακουστότητα

Η στάθμη έντασης του ήχου συχνά συγγέεται με την έννοια της ακουστότητας (loudness). Η ακουστότητα ενός ήχου αντικατοπτρίζει υποκειμενικά τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την δύναμή του, έχοντας ως παραμέτρους την στάθμη της έντασης αλλά και την συχνότητά του. Μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το phon.



Σχήμα 4. Καμπύλες ίσης ακουστότητας για καθαρούς τόνους (ήχους)

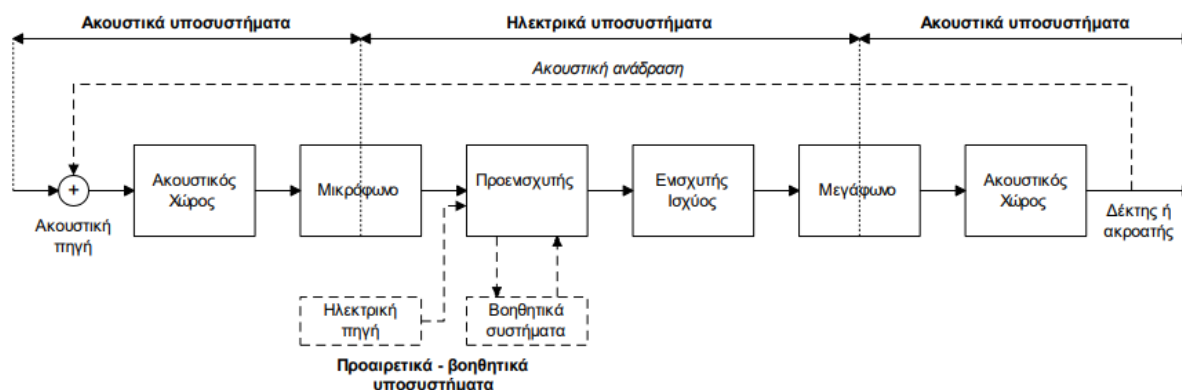
Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα, ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει το ακουστικό συχνοτικό φάσμα της ανθρώπινης ακοής σε Hz ενώ ο κάθετος άξονας απεικονίζει την στάθμη έντασης του ήχου σε dB. Ένας ήχος συχνότητας 1 KHz με στάθμη έντασης 40 dB αντιστοιχεί σε ακουστότητα 40 phon, ενώ την ίδια στιγμή ένας ήχος συχνότητας 40 Hz με στάθμη έντασης 70 dB αντιστοιχεί εξίσου σε ακουστότητα 40 phon. Αυτό σημαίνει πως προκειμένου ο ήχος των 40 Hz να γίνει **το ίδιο** αισθητός, αντιληπτός ή αλλιώς ακουστός με τον ήχο συχνότητας 1 KHz θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη στάθμη έντασης από εκείνον. Αντίθετα ένας ήχος συχνότητας 4 KHz για να γίνει **το ίδιο** ακουστός με έναν ήχο συχνότητας 1 KHz στα 40 phon, θα πρέπει να έχει μικρότερη στάθμη έντασης από εκείνον και συγκεκριμένα περίπου 33 dB

## 2. Ηλεκτρική Ενίσχυση

### 2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας παράλληλα με την εξέλιξη της μουσικής, οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που επιτυγχάνουν ελεγχόμενη ενίσχυση του ήχου, προσαρμοσμένη στην εκάστοτε συγκυρία. Από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και συγκεκριμένα το 1906 ο Αμερικανός εφευρέτης Lee De Forest ανέπτυξε την ηλεκτρονική τρίοδο λυχνία κενού Audion, ένα ενεργό ηλεκτρονικό εξάρτημα, η οποία αποτελεί μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία, καθώς χρησιμοποιήθηκε ευρέως κατά τα επόμενα χρόνια στην κατασκευή των πρώτων ενισχυτών ήχου, σε ραδιοφωνικές διατάξεις όπως και στην ανάπτυξη των πρώτων ενισχυτών ηλεκτρικής κιθάρας, γεγονότα που την καθιστούν προκάτοχο του τρανζίστορ. Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθούν τόσο τα χαρακτηριστικά και η αρχή λειτουργίας των λυχνιών κενού όσο και των τρανζίστορ.

Ηλεκτρική ενίσχυση ήχου ονομάζεται η αύξηση του πλάτους ενός ακουστικού σήματος υπό την μορφή όμως ηλεκτρικού σήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο, με τρόπο τέτοιο ώστε ο αρχικός ήχος που προήλθε από την εκάστοτε πηγή (για παράδειγμα μια ηλεκτρική κιθάρα) να ακουστεί κατά  $x$  φορές μεγαλύτερος σε ένταση, χωρίς όμως να φθείρει, παραμορφώσει ή επιφέρει οποιαδήποτε αλλαγή στο αρχικό σήμα. Ο τρόπος και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή ακουστικών σημάτων σε ηλεκτρικά, διαφέρουν ανάλογα με την πηγή του ακουστικού σήματος. Για παράδειγμα, για την μετατροπή της ομιλίας (ακουστική πηγή) σε ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιούμε το μικρόφωνο ενώ για την μετατροπή του ήχου από τις χορδές μιας ηλεκτρικής κιθάρας (ηλεκτρική πηγή) χρησιμοποιούμε τους κατάλληλους μαγνήτες. Το γενικό πλαίσιο ενός ηλεκτροακουστικού συστήματος από την παραγωγή του ακουστικού σήματος μέχρι την τελική του ενίσχυση φαίνεται στο Σχήμα 5. Παρόμοια συστήματα βρίσκουμε σε εγκαταστάσεις συναυλιών ή ομιλιών, σε χώρους ηχογράφησης και αναπαραγωγής ήχου, καθώς και σε κλειστούς ή ανοιχτούς χώρους όπως για παράδειγμα σταθμούς μέσω μαζικής μεταφοράς ή γήπεδα.



Σχήμα 5. Γενικό διάγραμμα ενός πλήρους ηλεκτροακουστικού συστήματος (Ηλεκτροακουστική 2016)

## 2.2 Μαγνήτες

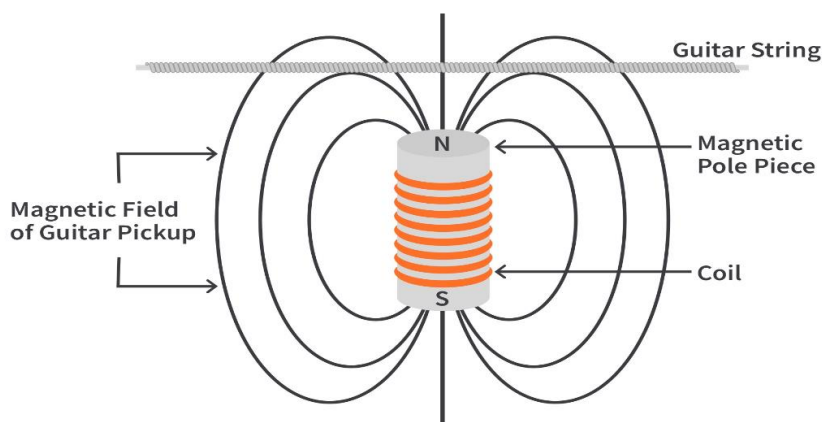
Οι μαγνήτες (pickups) είναι ηλεκτροακουστικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του ακουστικού σήματος σε ηλεκτρικό, γεγονός που τους καθιστά το πλέον απαραίτητο εξάρτημα (παράλληλα με τους ενισχυτές) που ορίζει μια κιθάρα ως ηλεκτρική, διαφοροποιώντας την από την κλασική ή την ακουστική κιθάρα οι οποίες διαθέτουν ηχείο (sound hole) για την ενίσχυση του ήχου. Στις ηλεκτρικές κιθάρες τη διεργασία αυτή έχουν αναλάβει ως σύνολο οι μαγνήτες, οι ενισχυτές και το μεγάφωνο, στοιχεία που θα αναλυθούν ξεχωριστά στις επόμενες ενότητες.

### Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των μαγνητών που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές κιθάρες βασίζεται στο νόμο επαγωγής του Faraday (έτος 1831) καθώς και στο νόμο ηλεκτρομαγνητισμού του Lenz (έτος 1834). Ο νόμος του Faraday ορίζει ότι η **ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ)** σε ένα κύκλωμα, είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής που το διαπερνά. Ηλεκτρεγερτική δύναμη ονομάζεται η αιτία που ωθεί ένα σώμα ηλεκτρικού φορτίου ενός κλειστού κυκλώματος να κινηθεί, διανύοντας έναν πλήρη κύκλο του κυκλώματος, και έχει ως μονάδα μέτρησης στο SI (Διεθνές Σύστημα Μονάδων) το Volt (V). Στην πραγματικότητα η ΗΕΔ δεν αποτελεί δύναμη καθώς αντιπροσωπεύει την αναλογία της ενέργειας (ή έργου **W**) ανά μονάδα φορτίου (**q**). Προς επεξήγηση του ορισμού του νόμου επαγωγής του Faraday, χρειαζόμαστε αύξηση ή μείωση της μαγνητικής ροής που διέρχεται από μια επιφάνεια για να αναπτύξουμε ηλεκτρεγερτική δύναμη, και επομένως επαγωγικό (ή επαγόμενο) ρεύμα. Ο νόμος του Lenz, προκύπτει από το νόμο του Faraday και ορίζει ότι η φορά οποιουδήποτε επαγωγικού ρεύματος σε έναν αγωγό είναι τέτοια ώστε να αντιτίθεται στην αλλαγή του μαγνητικού πεδίου που το προκάλεσε (εξ ου και το αρνητικό πρόσημο στη σχέση 3). Στην περίπτωση που μεταβάλλεται η μαγνητική ροή σε ακίνητο κύκλωμα, το επαγωγικό ρεύμα δημιουργεί δικό του μαγνητικό πεδίο. Εφόσον το αρχικό μαγνητικό πεδίο αυξάνει, τότε το μαγνητικό πεδίο του επαγωγικού ρεύματος θα έχει αντίθετη κατεύθυνση, ενώ θα έχει την ίδια κατεύθυνση αν το αρχικό πεδίο ελαττώνεται.

Οι δυο θεμελιώδεις νόμοι του Faraday και του Lenz εκφράζονται από την παρακάτω σχέση όπου για ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  και μαγνητική ροή  $\Phi_B$  έχουμε:

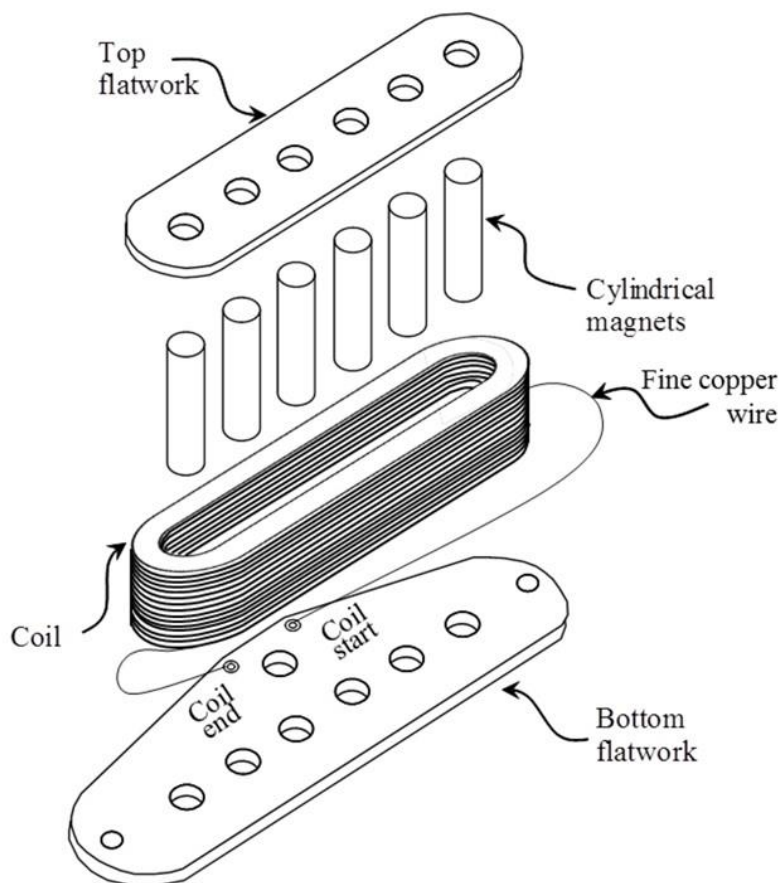
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$



Σχήμα 6. Μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα πύλωνα μόνιμου μαγνήτη (Lawing)

### Κατασκευή μαγνητών

Στην απλούστερη μορφή του, ένας μαγνήτης αποτελείται από ένα λεπτό σύρμα χαλκού το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από πυλώνες μόνιμων μαγνητών. Οι χορδές μιας ηλεκτρικής κιθάρας είναι συνήθως κατασκευασμένες από ατσάλι ή νικέλιο, υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic) δηλαδή μπορούν να σχηματίσουν μόνιμους μαγνήτες ή να έλκονται τα ίδια από μαγνήτες. Οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως τύπου AlNiCo, που σημαίνει κράμα αλουμινίου (Al), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co), ή κεραμικοί.



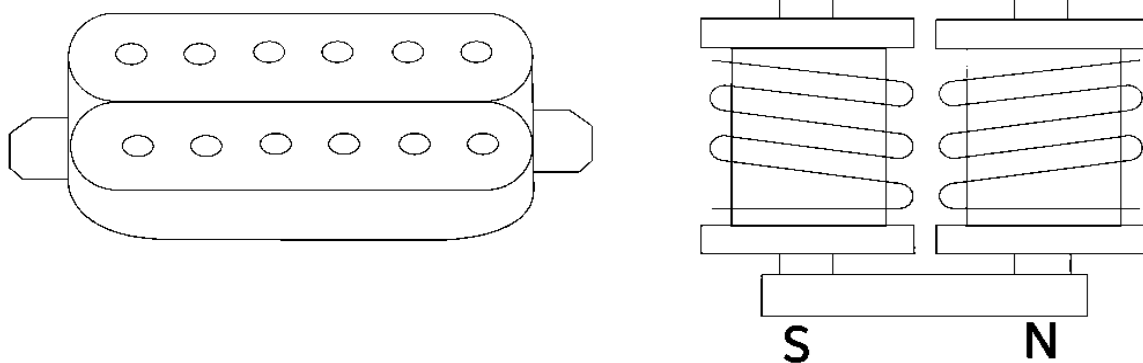
Σχήμα 7. Κατασκευή single-coil μαγνήτη κιθάρας

Καθώς μια χορδή ταλαντώνεται μετά από δική μας νύξη, όντας σιδηρομαγνητική, μεταβάλλει τη ροή στο μαγνητικό πεδίο που έχει δημιουργήσει ο μόνιμος μαγνήτης, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα στα τυλίγματα, ικανοποιώντας τον νόμο του Faraday. Επομένως το ρεύμα που θα δημιουργηθεί στα τυλίγματα του μαγνήτη θα είναι ίδιας συχνότητας με την συχνότητα που ταλαντώνεται η χορδή. Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε από το νόμο του Lenz, όταν η χορδή της κιθάρας θα βρίσκεται πολύ κοντά στον μόνιμο μαγνήτη (δηλαδή όταν το μαγνητικό πεδίο αυξάνει), το επαγόμενο ρεύμα ελαττώνεται, ενώ όταν η χορδή της κιθάρας θα βρίσκεται μακριά από τον μόνιμο μαγνήτη τότε το επαγόμενο ρεύμα αυξάνεται. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται εναλλασσόμενο ρεύμα στα άκρα του τυλίγματος.

### Τύποι μαγνητών

Οι δυο τύποι μαγνητών που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην πλειοψηφία της μουσικής ανά τα χρόνια είναι οι single-coil (μονοπηνιακοί) και οι double-coil (διπλοπηνιακοί). Ο τρόπος με τον οποίο είναι δομημένοι οι μονοπηνιακοί μαγνήτες φαίνεται από το Σχήμα 7, ενώ η βασική λειτουργία τους αναλύθηκε παραπάνω. Κάποιες από τις ευρέως διαδεδομένες ηλεκτρικές κιθάρες όπως οι Fender Stratocaster και Telecaster χρησιμοποιούν μονοπηνιακούς μαγνήτες. Η εν λόγω διάταξη παρουσιάζει ένα φαινόμενο που ονομάζεται **hum** και σημαίνει **βόμβος**, δηλαδή ένας συνεχής τόνος συχνότητας συνήθως 50/60Hz (βλέπε υποκεφάλαιο 2.8). Αυτό συμβαίνει επειδή οι μαγνήτες της ηλεκτρικής κιθάρας εκτός από την μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό ρεύμα, λειτουργούν και σαν κεραία, δεχόμενοι διάφορες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή ραδιοφωνικές συχνότητες (EMI – electromagnetic interference ή RFI – radio-frequency interference) οι οποίες μπορεί να προέρχονται από το ρεύμα του ηλεκτρικού δικτύου το οποίο τροφοδοτεί τον ενισχυτή (στην Ελλάδα το δίκτυο είναι 230V / 50Hz), ή ακόμη και από κοντινές συσκευές ή καλωδιώσεις. Για παράδειγμα μια τηλεόρασή ή monitor τύπου CRT με ρυθμό ανανέωσης 60Hz, δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που εισέρχονται από τον μαγνήτη στον ενισχυτή, και έπειτα έρχονται στα αυτιά μας σαν βόμβος από τα ηχεία.

## HUMBUCKER



Σχήμα 8. Κατασκευή Humbucker μαγνήτη (Sweetwater)

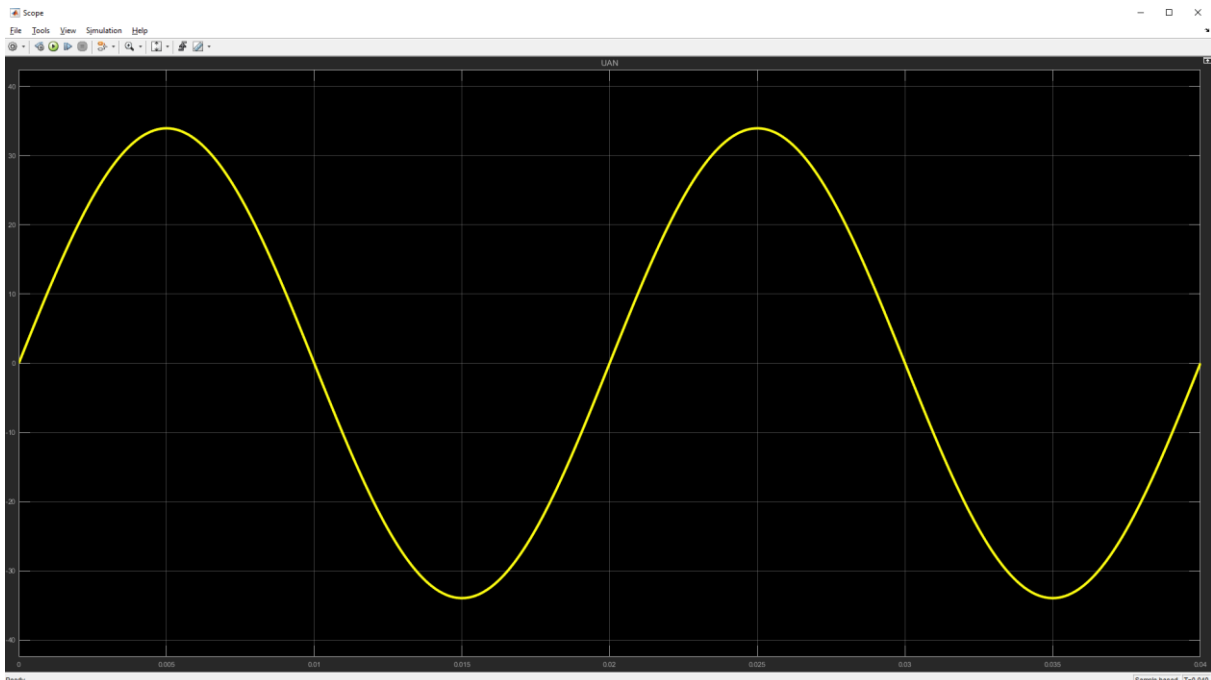
Οι διπλοπηνιακοί μαγνήτες, στα αγγλικά ονομάζονται και Humbuckers. Η λέξη αυτή είναι σύνθετη και προέρχεται από τις λέξεις hum (βόμβος) και buck (ανατρέπω, σβήνω). Όπως προδίδει και ο τίτλος τους, οι εν λόγω μαγνήτες δημιουργήθηκαν με σκοπό να εξουδετερώνουν το φαινόμενο του βόμβου που αναλύθηκε παραπάνω. Η διάταξη (Σχήμα 8), περιέχει δύο μονοπηνιακούς μαγνήτες (τύπου **RWRP**) οι οποίοι μοιράζονται έναν μεγαλύτερο μαγνήτη στη βάση τους. Οι δύο αυτοί μονοπηνιακοί μαγνήτες διαθέτουν αντίστροφα πολωμένους μόνιμους μαγνήτες (**Reverse-Polarity**) και τα τυλίγματα που τους περικλείουν είναι επίσης τυλιγμένα αντίστροφα το ένα από το άλλο, δεξιόστροφα και αριστερόστροφα αντίστοιχα (**Reverse-Wound**). Σύμφωνα με τη λειτουργία του μαγνήτη όπως αυτή εξηγείται παρακάτω, το σήμα εξόδου του μαγνήτη για να είναι σε φάση και χωρίς το φαινόμενο του βόμβου, θα πρέπει την ίδια στιγμή η πολικότητα των μαγνητών και η φορά των τυλιγμάτων να είναι αντίστροφες μεταξύ τους.

**Πίνακας 2.** Πίνακας σήματος εξόδου μαγνήτη σύμφωνα με την πολικότητα των μαγνητών και την φορά τυλίγματος

	Δεξιόστροφα και Βόρειος Πόλος	Δεξιόστροφα και Νότιος Πόλος	Αριστερόστροφα και Βόρειος Πόλος	Αριστερόστροφα και Νότιος Πόλος
<b>Δεξιόστροφα και Βόρειος Πόλος</b>	Σε φάση	Εκτός φάσης	Εκτός φάσης	Σε φάση Χωρίς βόμβο
<b>Δεξιόστροφα και Νότιος Πόλος</b>	Εκτός φάσης	Σε φάση	Σε φάση Χωρίς βόμβο	Εκτός φάσης
<b>Αριστερόστροφα και Βόρειος Πόλος</b>	Εκτός φάσης	Σε φάση Χωρίς βόμβο	Σε φάση	Εκτός φάσης
<b>Αριστερόστροφα και Νότιος Πόλος</b>	Σε φάση Χωρίς βόμβο	Εκτός φάσης	Εκτός φάσης	Σε φάση

### Λειτουργία μαγνήτη τύπου *Humbucker*

Έστω ότι, ιδανικά, έχουμε το παρακάτω ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο ενός μονοπηνιακού μαγνήτη μιας ηλεκτρικής κιθάρας (Σχήμα 9), ο οποίος δέχεται εξωτερική ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Σχήμα 10).

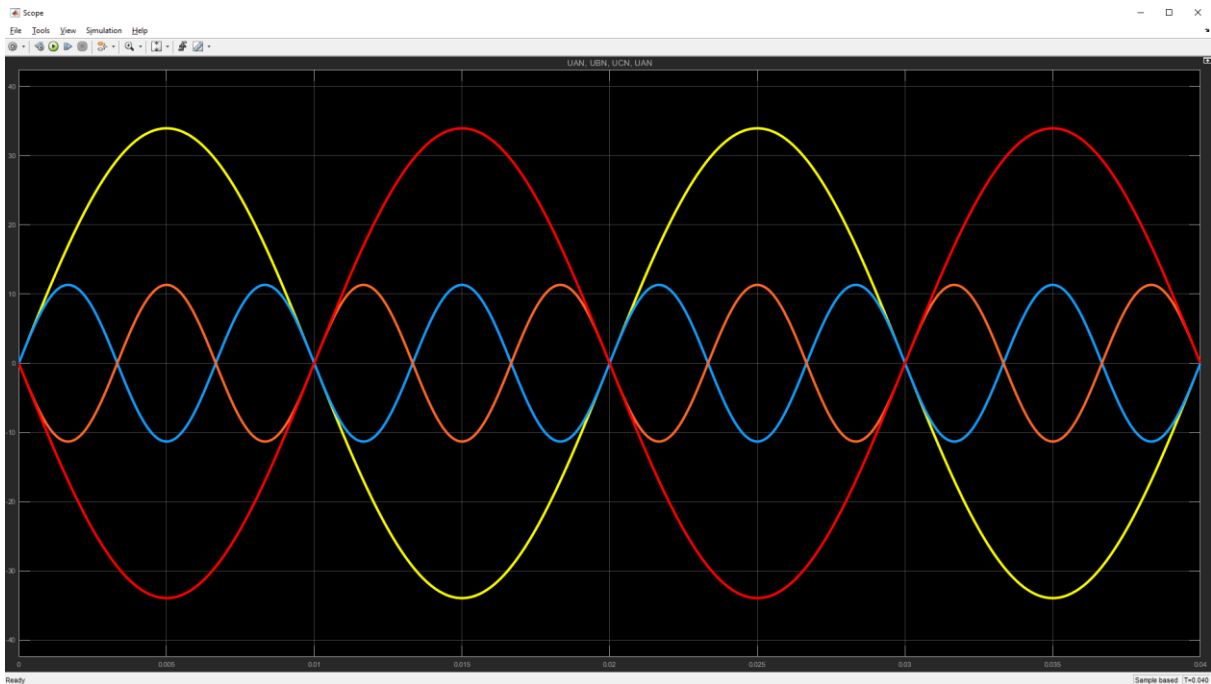


**Σχήμα 9.** Ιδανικό σήμα κιθάρας, μονοπηνιακού μαγνήτη



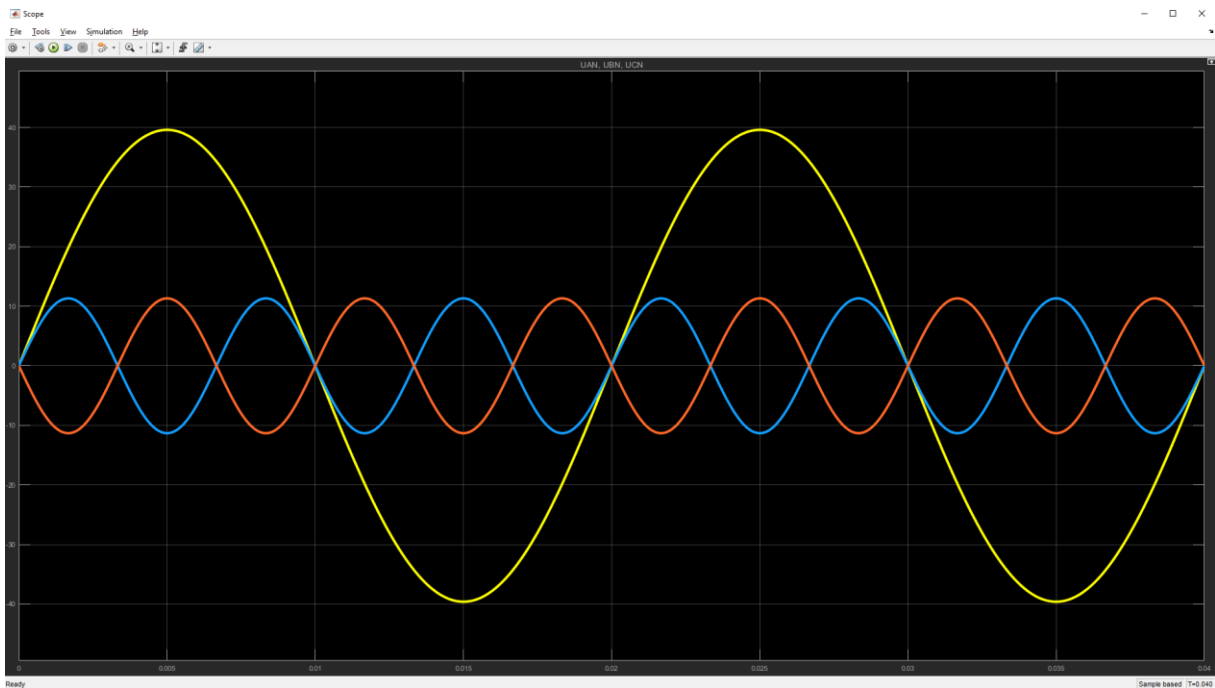
**Σχήμα 10. Ιδανικό σήμα κιθάρας μονοπηνιακού μαγνήτη, και φαινόμενο hum**

Τώρα έστω ότι έχουμε έναν διπλοπηνιακό μαγνήτη, ο οποίος έχει αντίστροφη φορά στα τυλίγματα (των δυο μονοπηνιακών μαγνητών που τον αποτελούν), αλλά ίδια φορά στους μόνιμους μαγνήτες του (Σχήμα 11). Βλέπουμε πως το σήμα της κιθάρας είναι εκτός φάσης (ιδανικά κατά  $180^\circ$ ) καθώς η κίτρινη και η κόκκινη κυματομορφή αποσβένουν η μία την άλλη. Επίσης ο βόμβος είναι εκτός φάσης (ιδανικά κατά  $180^\circ$ ) καθώς η μπλε και η πορτοκαλί κυματομορφή επίσης αποσβένονται.



**Σχήμα 11. Ιδανικό σήμα κιθάρας διπλοπηνιακού μαγνήτη εκτός φάσης, και φαινόμενο hum εκτός φάσης**

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή δεν αλληλεπιδρά με τους μαγνήτες, αλλά μόνο με τα τυλίγματα. Έτσι, αν αντιστρέψουμε τη φορά των μόνιμων μαγνητών, παρατηρούμε (Σχήμα 12), ότι ο βόμβος βρίσκεται ακόμα εκτός φάσης, καθώς η μπλε και η πορτοκαλί κυματομορφή αποσβένουν η μια την άλλη, ενώ το σήμα της κιθάρας είναι σε φάση, καθώς εξαρτάται ταυτόχρονα από τους μόνιμους μαγνήτες και τα τυλίγματα. Μάλιστα το σήμα θα είναι μεγαλύτερου πλάτους από ότι ήταν πριν καθώς το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο των δυο μονοπηνιακών μαγνητών είναι σε φάση μεταξύ τους και άρα συμψηφίζονται έχοντας αυτό το ενισχυτικό φαινόμενο. Με αυτό τον τρόπο έχουμε σιγάσι τον ενοχλητικό ήχο του βόμβου και έχουμε κρατήσει ακέραιο τον ήχο της κιθάρας, ο οποίος μάλιστα φτάνει στα αυτιά μας λίγο δυνατότερος.



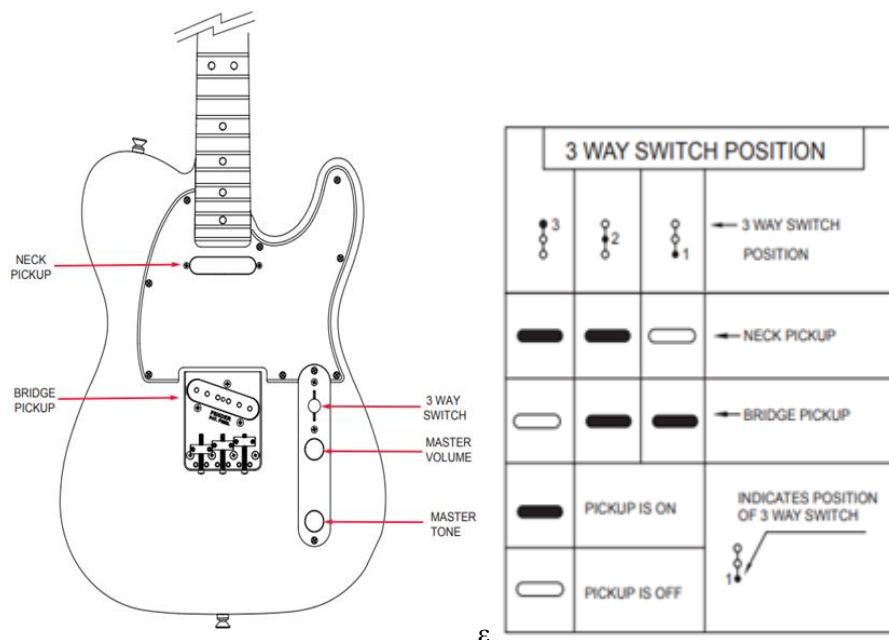
**Σχήμα 12** Ιδανικό σήμα κιθάρας διπλοπηνιακού μαγνήτη ελαφρώς ενισχυμένο, και εκτός φάσης φαινόμενο hum

Στην πραγματικότητα, όταν οι δυο μονοπηνιακοί μαγνήτες που αποτελούν έναν humbucker μαγνήτη βρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο και είναι συνδεδεμένοι εκτός φάσης, παίρνουν δείγμα από ελαφρώς διαφορετικά σημεία της χορδής. Αυτό σημαίνει πως τα ηλεκτρικά σήματα σε κάθε έναν από αυτούς δεν είναι ίδια, καθώς κάποιες συχνότητες δεν συλλέγονται και από τους δυο ενώ κάποιες άλλες είναι κοινές. Έτσι, βρίσκονται ελαφρώς εκτός φάσης και όχι κατά  $180^\circ$  όπως ιδανικά θα θέλαμε, με αποτέλεσμα να μην αποσβένονται, αλλά να παράγουν έναν ιδιαίτερο ήχο χαμηλότερου πλάτους, που αρκετοί μουσικοί χρησιμοποιούν στις συνθέσεις τους (όπως ο Brian May των Queen ή ο Jimmy Page των Led Zeppelin). Συνεπώς οι συχνότητες που είναι κοινές θα συμψηφιστούν και θα ενισχυθούν ενώ οι συχνότητες που δεν συλλέγονται και από τους δύο μαγνήτες και βρίσκονται εκτός φάσης, είναι αυτές που δημιουργούν τον ιδιαίτερο ήχο. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τον βόμβο, ο οποίος αποσβένει ούτως ή άλλως.

### Θέση μαγνητών και τάση εξόδου

Η θέση στην οποία βρίσκονται οι μαγνήτες πάνω στην κιθάρα, καθορίζουν και τον ήχο που θα προκύψει καθώς όπως βλέπουμε (Σχήμα 13), ο μαγνήτης που βρίσκεται στο μανίκι της κιθάρας (neck pickup) και ο μαγνήτης που βρίσκεται στη γέφυρα (bridge pickup) έχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως η χορδή σε κάθε μια από αυτές τις θέσεις έχει διαφορετική ελαστικότητα, είναι δηλαδή λιγότερο (neck) ή περισσότερο (bridge) τεντωμένη. Συνεπώς, σε μια λιγότερο τεντωμένη χορδή παράγονται χαμηλότερες συχνότητες, και σε μια περισσότερο τεντωμένη χορδή υψηλότερες συχνότητες. Σε μια τυπική κιθάρα Telecaster της Fender, έχουμε δυο μονοπηνιακούς μαγνήτες τύπου RWRP, οι οποίοι επιλέγονται από έναν διακόπτη τριών θέσεων. Η αριστερή θέση επιλέγει τον μαγνήτη στο μανίκι της κιθάρας, ενώ η δεξιά θέση εκείνον της γέφυρας. Η μεσαία θέση θέτει την κιθάρα υπό τη λειτουργία και των δυο μαγνητών ταυτόχρονα. Όπως προαναφέρθηκε, οι μονοπηνιακοί μαγνήτες επηρεάζονται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές με αποτέλεσμα να υπάρχει βόμβος. Έτσι αν βρισκόμαστε σε οποιαδήποτε από την αριστερή ή δεξιά θέση στον διακόπτη που επιλέγει τους μαγνήτες, είναι πολύ πιθανό να ακούσουμε αυτές τις παρεμβολές. Καθώς όμως οι δύο μονοπηνιακοί μαγνήτες είναι τύπου RWRP, όταν βρισκόμαστε στη μεσαία θέση όπου έχουμε ουσιαστικά επιλέξει τη λειτουργία και των δυο μαγνητών ταυτόχρονα, η αντίστροφη φορά και η αντίστροφη πολικότητά τους απομονώνει σημαντικά οποιοδήποτε βόμβο.

Η τάση εξόδου στους μονοπηνιακούς μαγνήτες είναι εμφανώς μικρότερη από εκείνη των διπλοπηνιακών, ωστόσο εξαρτάται από παράγοντες όπως η κατασκευή και η θέση του μαγνήτη πάνω στην ηλεκτρική κιθάρα, ο αριθμός τυλιγμάτων του, η χορδή και το κούρδισμά της, η δύναμη με την οποία ο κιθαρίστας θα την χτυπήσει καθώς και το πλήθος των χορδών που πάλλονται ταυτόχρονα. Για τον λόγο αυτό, δεν υπάρχει κάποια εκ των πραγμάτων τιμή τάσης εξόδου των μαγνητών παρόλα αυτά μπορούμε να πούμε πως είναι της τάξεως των mV και συνήθως δεν ξεπερνάει τα 1V.



Σχήμα 13. Θέσεις μαγνητών στην κιθάρα Telecaster της Fender

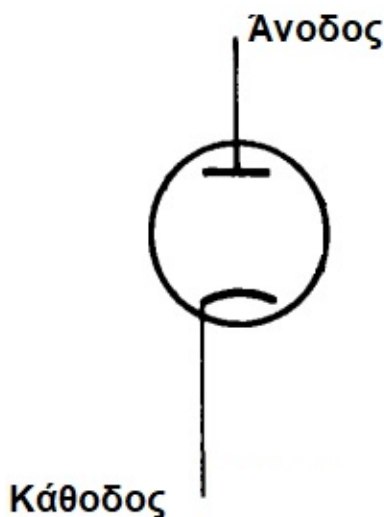
## 2.3 Ηλεκτρονική Λυχνία

Ηλεκτρονική λυχνία ή λυχνία κενού είναι ένα ενεργό ηλεκτρονικό εξάρτημα που ελέγχει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, σε χώρο χαμηλής πίεσης που πλησιάζει το κενό, μεταξύ ηλεκτροδίων στα οποία εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού. Προέρχεται από μια σειρά εφευρέσεις όπως η φωτολυχνία (1875) του George R. Carey ή η λυχνία Crookes (1869-1875) που πήρε το όνομά της από τον εφευρέτη της William Crookes. Η πρώτη λυχνία κενού (1904) που κατασκευάστηκε ήταν από τον John A. Fleming, και είναι σήμερα αυτό που γνωρίζουμε ως δίοδος λυχνία. Η ιδέα του Fleming βασίζεται στην παρατήρηση του Thomas Edison πάνω στο φαινόμενο της θερμιονικής εκπομπής (1883).

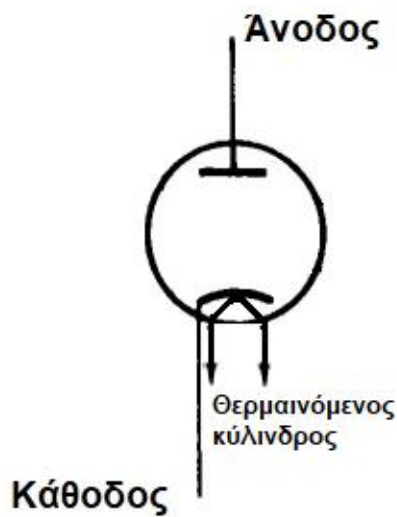
### Αρχή Λειτουργίας

Οι ηλεκτρονικές λυχνίες βασίζονται εξ ολοκλήρου στο φαινόμενο της θερμιονικής εκπομπής. Ο Edison θέλοντας να βελτιώσει την λάμπα πυρακτώσεως που είχε παρουσιάσει για πρώτη φορά το 1879, παρατήρησε πως τα ηλεκτρόνια σε περιβάλλον υψηλού κενού, ρέουν από μέταλλα που βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία -όπως είναι το νήμα μιας λάμπας πυρακτώσεως- σε άλλα θετικά φορτισμένα μέταλλα τα οποία βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία, και μάλιστα χωρίς την παρουσία κάποιου καλωδίου. Έτσι η θερμιονική εκπομπή χάρη στον άνθρωπο που την έκανε γνωστή ονομάζεται και φαινόμενο Edison.

### 2.3.1 Δίοδος



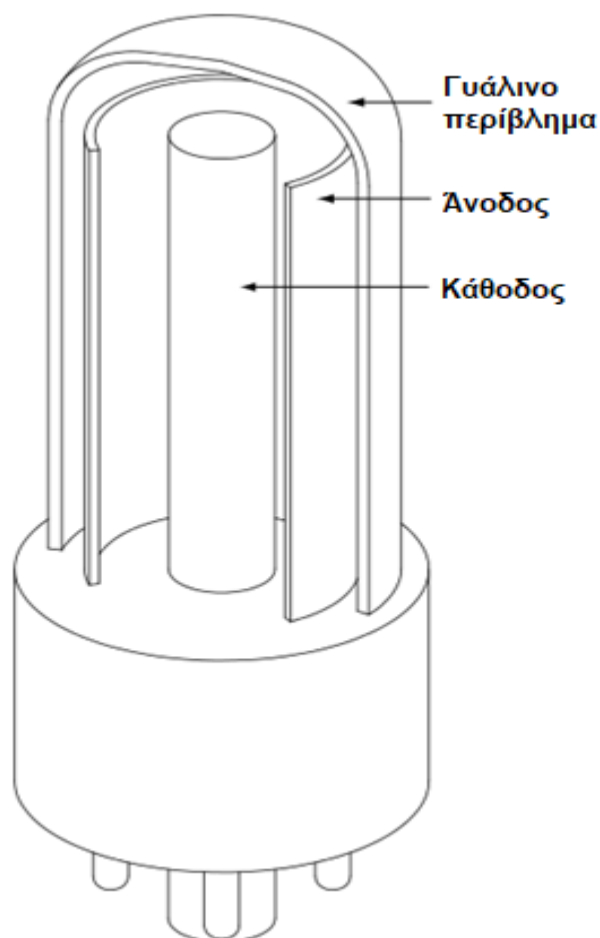
Σχήμα 14. Άμεσα θερμαινόμενη δίοδος



Σχήμα 15. Έμμεσα θερμαινόμενη δίοδος (Briggs)

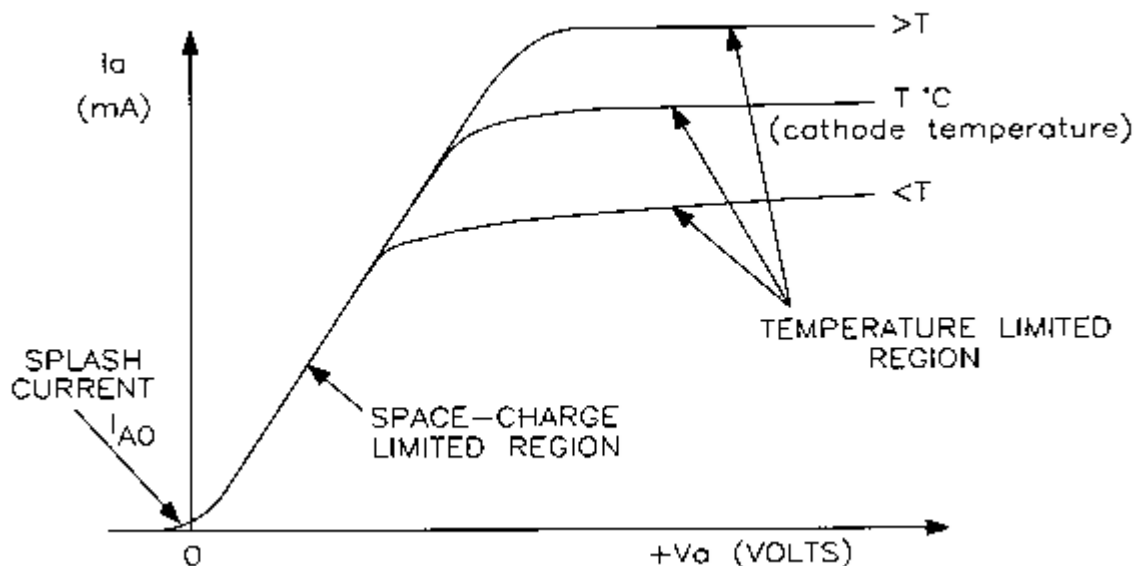
Ο Fleming χρησιμοποίησε την θερμιονική εκπομπή, δημιουργώντας μια δίοδο λυχνία κενού σαν ραδιοφωνικό δέκτη, ενώ αργότερα η δίοδος λυχνία χρησιμοποιήθηκε ως ανορθωτική διάταξη. Οι ηλεκτρονικές λυχνίες έχουν δύο κύρια στοιχεία (ηλεκτρόδια) μέσα στο γυάλινο εξωτερικό της περίβλημα, από το οποίο έχει απορροφηθεί ο αέρας: την *κάθοδο* και την *άνοδο*. Η κάθοδος είναι ένα ηλεκτρόδιο το οποίο -εφόσον θερμανθεί- εκπέμπει ηλεκτρόνια, τα οποία αποκολλούν από την επιφάνειά

του, προς θετικά φορτισμένα σώματα (άνοδος), εφόσον τα ετερόνυμα έλκονται. Αν η άνοδος ήταν αρνητικά φορτισμένη σε σχέση με την κάθοδο, τότε δεν θα υπήρχε ροή ηλεκτρονίων. Έτσι η κατασκευή ονομάστηκε δίοδος και υποδηλώνει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που την διαπερνά θα ρέει μόνο προς μια κατεύθυνση, σε αντίθεση για παράδειγμα με μια αντίσταση, της οποίας η λειτουργία παραμένει αμετάβλητη, ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος. Συνεπώς αν συνδέσουμε μια εναλλασσόμενη πηγή στα άκρα της καθόδου και της ανόδου, και υποθέσουμε πως βρισκόμαστε κατά τη θετική ημιπερίοδο, τότε η άνοδος είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την κάθοδο και άρα υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα. Αν όμως βρισκόμαστε στην αρνητική ημιπερίοδο, τότε η άνοδος είναι αρνητικά φορτισμένη σε σχέση με την κάθοδο και έτσι δεν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα. Εφόσον η εναλλασσόμενη πηγή παράγει περιοδικά σήματα και η δίοδος άγει κατά τη μια ημιπερίοδο, θα έχουμε ημιανόρθωση του σήματος στην έξοδο του κυκλώματος. Η κάθοδος σε μια λυχνία κενού χαρακτηρίζεται άμεσα ή έμμεσα θερμαινόμενη. Η άμεσα θερμαινόμενη κάθοδος (Σχήμα 14) είναι ένα ηλεκτρικά φορτισμένο νήμα (filament) το οποίο έχει υψηλό σημείο τήξης για να αντέχει σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 800-1000°C σε όλες τις μοντέρνες λυχνίες κενού ανεξαρτήτως τύπου). Η έμμεσα θερμαινόμενη κάθοδος (Σχήμα 15) είναι συνήθως ένας κύλινδρος νικελίου επικαλυμμένος με οξειδία μετάλλου. Ο κύλινδρος αυτός θερμαίνεται από νήμα βολφραμίου χωρίς να υπάρχει άμεση επαφή με την κάθοδο, προκαλώντας την εξωτερική επιφάνεια επικάλυψης νικελίου να εκπέμπει ηλεκτρόνια.



Σχήμα 16. Στοιχεία δίοδου λυχνίας

Η άνοδος όπως αναφέρθηκε, είναι μια θετικά φορτισμένη μεταλλική πλάκα η οποία ελκύει ηλεκτροστατικά τα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η κάθοδος της λυχνίας κενού. Ακόμη είναι σχεδιασμένη έτσι, ώστε να διαχέει την θερμότητα που δημιουργείται καθώς τα ηλεκτρόνια φτάνουν με υψηλή ταχύτητα προς αυτήν λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου. Ανάλογα με τον σκοπό χρήσης για τον οποίο προορίζονται οι λυχνίες υπάρχουν τα κατάλληλα συστήματα ψύξης της ανόδου, που χρησιμοποιούν την κυκλοφορία του αέρα ή του νερού.



Σχήμα 17. Χαρακτηριστική V- I ανόδου της διόδου λυχνίας (r-type)

Η κάθοδος τυπικά περιβάλλεται από ένα νέφος ηλεκτρονίων το οποίο είναι γνωστό ως χωρικό φορτίο (*space-charge*). Όταν δεν εφαρμόζεται τάση στην άνοδο, τότε υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο προς την άνοδο, και στα ηλεκτρόνια που προσκολλώνται ξανά πάνω στην επιφάνεια της καθόδου. Όταν εφαρμοστεί έστω και μικρή τάση στην άνοδο, κάποια από τα ηλεκτρόνια του χωρικού φορτίου θα έλκονται από εκείνη και έτσι θα υπάρχει ένα μικρό ρεύμα ανόδου. Όπως φαίνεται στην παραπάνω χαρακτηριστική V-I ανόδου για τη δίοδο λυχνία (Εικ. 14), όταν η τάση είναι μηδενική, υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα ανόδου (*splash current*) της τάξεως των  $\mu\text{A}$ , το οποίο ενώ δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε κάθοδο και άνοδο, είναι αποτέλεσμα κάποιων υπερφορτισμένων ηλεκτρονίων τα οποία καταφέρνουν να ξεπεράσουν το κενό ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και να προσκολληθούν στην άνοδο. Η χαρακτηριστική στην περιοχή *space-charge limited current* (περιοχή περιορισμένου ρεύματος λόγω χωρικού φορτίου ή *SCLC*) είναι σχεδόν γραμμική και ορίζει ότι η αύξηση του ρεύματος ανόδου είναι ανάλογη της αύξησης στην τάση της, γεγονός που έχει άμεση σχέση με το χωρικό φορτίο της καθόδου και το ρυθμό εκπομπής των ηλεκτρονίων από την κάθοδο προς την άνοδο. Ξεπερνώντας την περιοχή *SCLC* φτάνουμε στην περιοχή *temperature limited current* (περιοχή περιορισμένου ρεύματος λόγω θερμοκρασίας ή *TLC*) η οποία υποδηλώνει πως σύμφωνα με τη θερμοκρασία της ανόδου σε σχέση με τη θερμοκρασία της καθόδου (δηλαδή μικρότερη  $<T$ , ίση  $T$  °C ή μεγαλύτερη  $>T$ ), η τάση στην άνοδο θα έχει το ανάλογο όριο υποδοχής ηλεκτρονίων. Παρατηρούμε

πως σε κάθε μια περίπτωση θερμοκρασίας τα ρεύματα ανόδου βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους στον κάθετο άξονα Ia, ενώ για κάθε μια περίπτωση από αυτές η τάση ανόδου είναι εμφανώς ραγδαία αυξανόμενη στον οριζόντιο άξονα Va. Η μεγάλη αύξηση στην τάση ανόδου και η πολύ μικρή αύξηση στο ρεύμα της, υποδηλώνουν ότι όσο πιο μεγάλες είναι οι θερμοκρασίες που φτάνει η άνοδος, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την κάθοδο. Μάλιστα στην περιοχή TLC η άνοδος συλλέγει τα ηλεκτρόνια με τον ίδιο ρυθμό που η κάθοδος τα εκπέμπει. Όταν η άνοδος έχει φτάσει θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία της καθόδου, τότε παρατηρείται το ρεύμα κορεσμού, που έχει αρνητική -πολλές φορές καταστροφική- επίδραση στην επιφάνεια της καθόδου. Το ρεύμα κορεσμού υποδηλώνει πως η κάθοδος έχει φτάσει τον μέγιστο δυνατό αριθμό ηλεκτρονίων που μπορεί να εκπέμπει.

Η γραμμικότητα της χαρακτηριστικής, καθώς και η αναλογία της θερμοκρασίας μεταξύ ανόδου και καθόδου ικανοποιούν τον θεμελιώδη νόμο των τριών μισών ( $3/2$ ) του Child αλλιώς γνωστός ως νόμος Child-Langmuir, ο οποίος ορίζει ότι το ρεύμα σε μια δίοδο θερμοϊονικής εκπομπής είναι ανάλογο με τη μαθηματική δύναμη των τριών μισών της τάσης ανόδου και αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (καθόδου-ανόδου). Η σχέση που προκύπτει από τον νόμο είναι:

$$J = \frac{I}{S} = k \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (4)$$

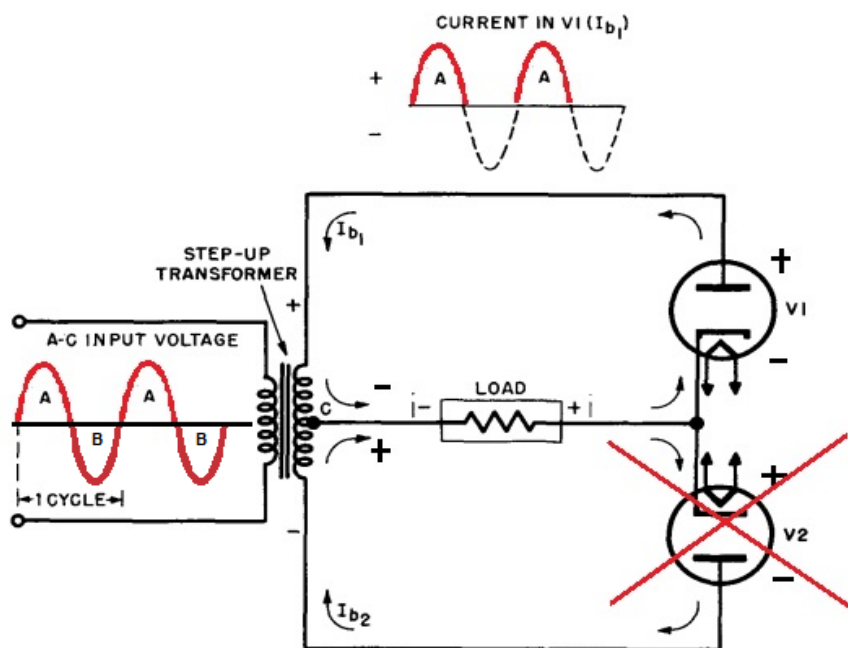
,όπου  $J$  η πυκνότητα του ρεύματος (σε  $A/m^2$ ),  $I$  το ρεύμα ανόδου και  $S$  η επιφάνεια της ανόδου που δέχεται τα ηλεκτρόνια,  $k$  η σταθερά του Boltzmann που πραγματεύεται την αναλογία της μέσης σχετικής θερμικής ενέργειας των μορίων υπό συνθήκη αερίων ή ακόμα και κενού,  $d$  η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων και  $V$  η τάση ανόδου.

### **Πλήρης ανόρθωση με δίοδο λυχνία κενού**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δίοδος λυχνία κενού χρησιμοποιήθηκε ευρέως ως ανορθωτική διάταξη και βρήκε θέση σε πολλά κυκλώματα όπως και οι ενισχυτές ηλεκτρικής κιθάρας. Το κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 18, Σχήμα19), αποτυπώνει έναν μετασχηματιστή ισχύος στον οποίο το πρωτεύον τύλιγμα επιδέχεται μια εναλλασσόμενη τάση. Ως κεντρική επαφή του δευτερεύοντος τυλίγματος έχει συνδεθεί μια αντίσταση η οποία τροφοδοτεί τον κόμβο που σχηματίζουν οι κάθοδοι των δυο δίοδων λυχνιών κενού. Η άνοδος της λυχνίας V1 συνδέεται στο πάνω άκρο του δευτερεύοντος ενώ η άνοδος της λυχνίας V2 στο κάτω άκρο. Αν πάρουμε ξεχωριστά την συνδεσμολογία της αντίστασης με την δίοδο V1, και την συνδεσμολογία της αντίστασης με τη δίοδο V2, παρατηρούμε δυο επιμέρους κυκλώματα ημιανόρθωσης τα οποία λειτουργούν μαζί για να αποτελέσουν ένα συνολικό κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης.

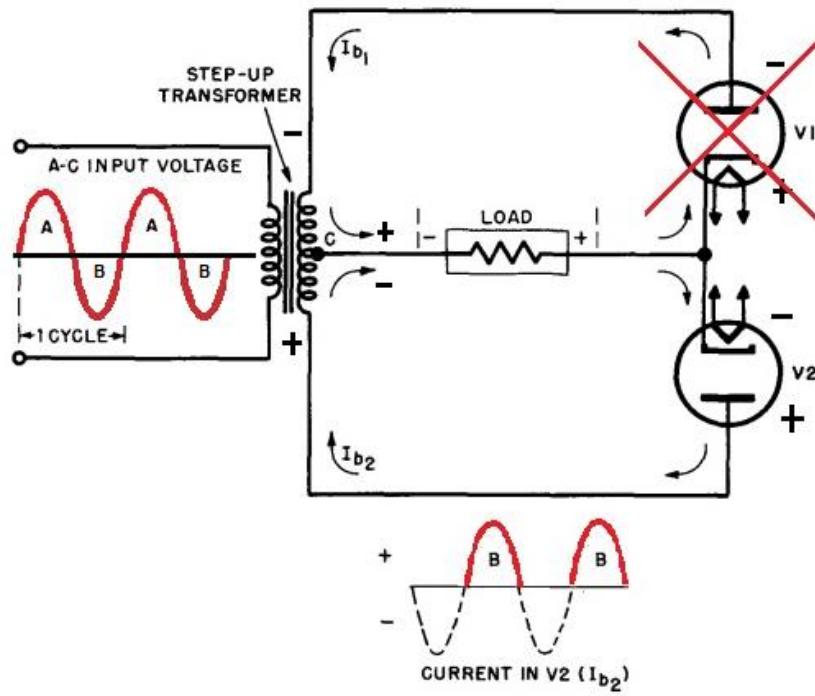
**Πριν αναλυθούν οι επιμέρους περιπτώσεις του παραδείγματος, θα πρέπει ορίσουμε τη φορά του ρεύματος ως πραγματική και όχι ως συμβατική. Αυτό γίνεται προς αποφυγή σύγχυσης καθώς κατά την επεξήγηση λειτουργίας της δίοδου λυχνίας έγινε γνωστό ότι τα ηλεκτρόνια όντας αρνητικά φορτισμένα έλκονται από θετικά φορτισμένα σώματα, από το (-) στο (+), (πραγματική φορά). Η συμβατική φορά, που έχει επικρατήσει για ιστορικούς και λοιπούς λόγους, δηλώνει ότι η φορά του ρεύματος είναι από το (+) στο (-).**

Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 18), όπου βρισκόμαστε κατά τη θετική ημιπερίοδο A της εναλλασσόμενης πηγής τροφοδοσίας, το πάνω άκρο του δευτερεύοντος είναι θετικότερο της κεντρικής επαφής, ενώ με τη σειρά της, η κεντρική επαφή είναι θετικότερη του κάτω άκρου. Συνεπώς, ακολουθώντας την πραγματική φορά του ρεύματος, η διάδος V1 άγει καθώς τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν από την αρνητικά φορτισμένη κάθοδο προς την θετικά φορτισμένη άνοδο, και κλείνουν το κύκλωμα φτάνοντας στο πάνω άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Την ίδια στιγμή η διάδος V2 δεν άγει καθώς τα ηλεκτρόνια (χωρικό φορτίο) που υπάρχουν στην κάθοδό της δεν έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη άνοδο καθώς τα ομόνυμα απωθούνται. Έτσι, στην έξοδο του κυκλώματος θα εμφανιστεί η θετική ημιπερίοδος A της εναλλασσόμενης πηγής.

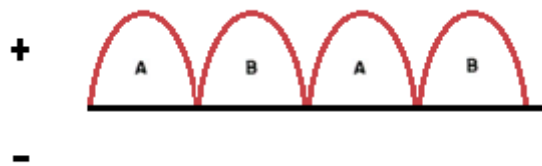


Σχήμα 18 Ανόρθωση θετικής ημιπεριόδου

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο B της εναλλασσόμενης πηγής (Σχήμα 19), το πάνω άκρο του δευτερεύοντος είναι αρνητικότερο της κεντρικής επαφής, ενώ με τη σειρά της, η κεντρική επαφή είναι αρνητικότερη του κάτω άκρου. Έτσι, και πάλι ακολουθώντας την πραγματική φορά του ρεύματος, η διάδος V2 άγει καθώς τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν από την αρνητικά φορτισμένη κάθοδο προς την θετικά φορτισμένη άνοδο κλείνοντας το κύκλωμα με το κάτω άκρο του δευτερεύοντος. Η διάδος V1 δεν θα άγει, καθώς τώρα η κάθοδός της είναι θετικά φορτισμένη και η άνοδός της είναι αρνητικά φορτισμένη, γεγονός που αποτρέπει τα ηλεκτρόνια να φτάσουν εκεί. Κατά συνέπεια, στην έξοδο του κυκλώματος η αρνητική ημιπερίοδος B της εναλλασσόμενης πηγής αντιστρέφεται και γίνεται θετική (καθώς άγει η διάδος V2). Έτσι αν αθροίσουμε τις εξόδους του κυκλώματος για κάθε μια επιμέρους περίπτωση ημιανόρθωσης, πετυχαίνουμε πλήρη ανόρθωση (Σχήμα 20), μετατρέψαμε δηλαδή την εναλλασσόμενη πηγή (AC) σε παλμική συνεχή τάση (PDC).



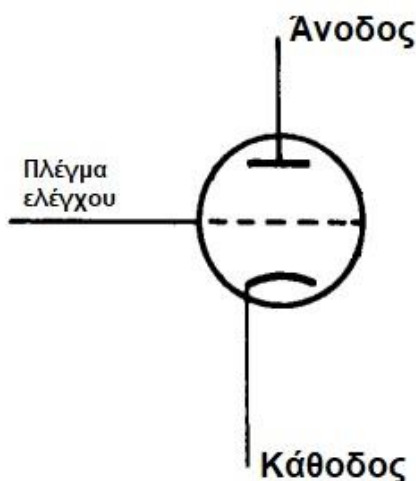
Σχήμα 19. Ανόρθωση αρνητικής ημιπεριόδου



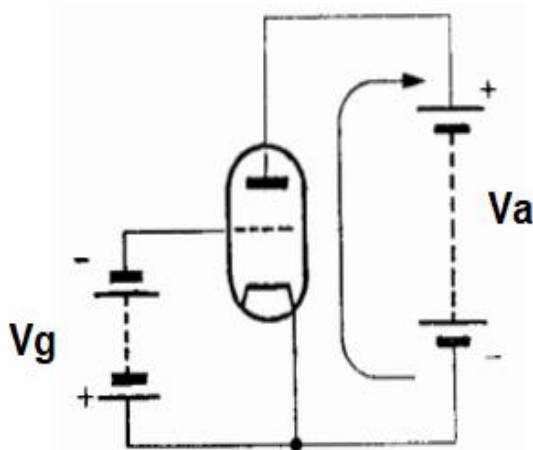
Σχήμα 20. Πλήρης ανόρθωση (PDC)

### 2.3.2 Τρίοδος

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ο Αμερικανός Lee De Forest θέλοντας να εξελίξει την δίοδο, εισήγαγε την λυχνία Audion, που αργότερα έγινε γνωστή ως τρίοδος. Το όνομά της προέρχεται από τα τρία ηλεκτρόδια που την αποτελούν: την κάθοδο, την άνοδο και ένα νέο στοιχείο, το **πλέγμα ελέγχου** (*control grid*). Αυτό που καταφέρνει η τρίοδος με την προσθήκη του πλέγματος, είναι όχι μόνο να ωθεί το ρεύμα προς μια κατεύθυνση, αλλά παράλληλα να το ενισχύει.



Σχήμα 21. Τρίοδος λυχνία

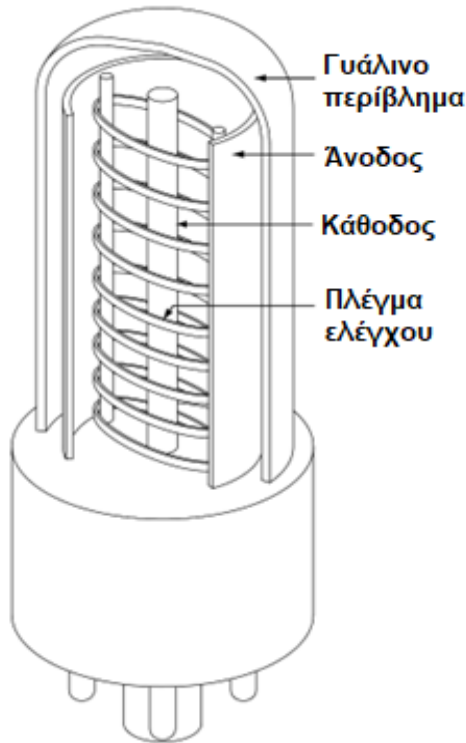


Σχήμα 22. Βασικό κύκλωμα τριόδου

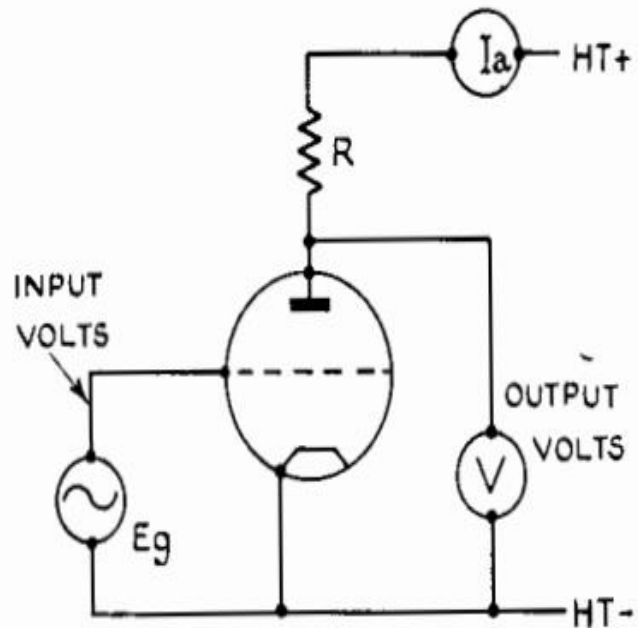
Το πλέγμα συχνά κατασκευάζεται από ένα κράμα μολυβδαινίου με επίστρωση χρυσού. Είναι έτσι διαμορφωμένο ώστε να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να εκπέμπει κάθε αυτού ηλεκτρόνια. Είναι ένα πολύ λεπτό σύρμα ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο, τυλιγμένο κατά  $x$  φορές γύρω από κυλινδρικούς στύλους που βρίσκονται μέσα στο γυάλινο περίβλημα της λυχνίας. Η βασική ιδέα πίσω από αυτή την κατασκευή είναι ότι τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο, θα πρέπει να περάσουν ανάμεσα από τα κενά που δημιουργούνται γύρω από το πλέγμα.

Προς επεξήγηση της διάταξης (Σχήμα 22), έστω αρνητικά φορτισμένο πλέγμα (σε σχέση με την κάθοδο λόγω της μπαταρίας  $V_g$ ), και θετικά φορτισμένη άνοδος (σε σχέση με την κάθοδο λόγω της μπαταρίας  $V_a$ ). Όσο πιο αρνητικό είναι το πλέγμα σε σχέση με την κάθοδο, τόσο περισσότερο απωθεί τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο χωρικό φορτίο της καθόδου, ελαττώνοντας αναλογικά τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Το σημείο όπου καταφέρνουμε μηδενικό ρεύμα λόγω αρνητικής τάσης στο πλέγμα ελέγχου ονομάζεται σημείο ρεύματος αποκοπής (*cut-off point*). Σε περίπτωση που το πλέγμα είναι θετικότερο της καθόδου, τότε θα έλκει τα ηλεκτρόνια του χωρικού φορτίου με αποτέλεσμα να έχουμε ανεπιθύμητη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα του πλέγματος (κορεσμός). Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο γεγονός και να εγγραφεί η ορθή λειτουργία του κυκλώματος, το πλέγμα πάντοτε τροφοδοτείται με τάση αρνητικότερη της καθόδου κατά τουλάχιστον 1V, που ονομάζεται τάση πόλωσης πλέγματος (*grid bias*). Από την άλλη, όσο η τάση του πλέγματος πλησιάζει αλλά δεν ξεπερνάει την τάση της καθόδου, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια διαπερνούν το πλέγμα και φτάνουν στην άνοδο,

αυξάνοντας έτσι την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η άνοδος σε αυτή την περίπτωση, όντας σημαντικά πιο θετικά φορτισμένη και επομένως έχοντας μεγαλύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από εκείνο του πλέγματος, έχει τη δυνατότητα να έλκει τα ηλεκτρόνια του χωρικού φορτίου προς το μέρος της, και μάλιστα με μεγάλη ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα το πλέγμα όντας πάντοτε αρνητικά φορτισμένο, δεν είναι σε θέση να τα φέρει προς την επιφάνειά του, αλλά αντίθετα τα ωθεί με τη σειρά του προς την άνοδο.



Σχήμα 23. Στοιχεία τριόδου λυχνίας

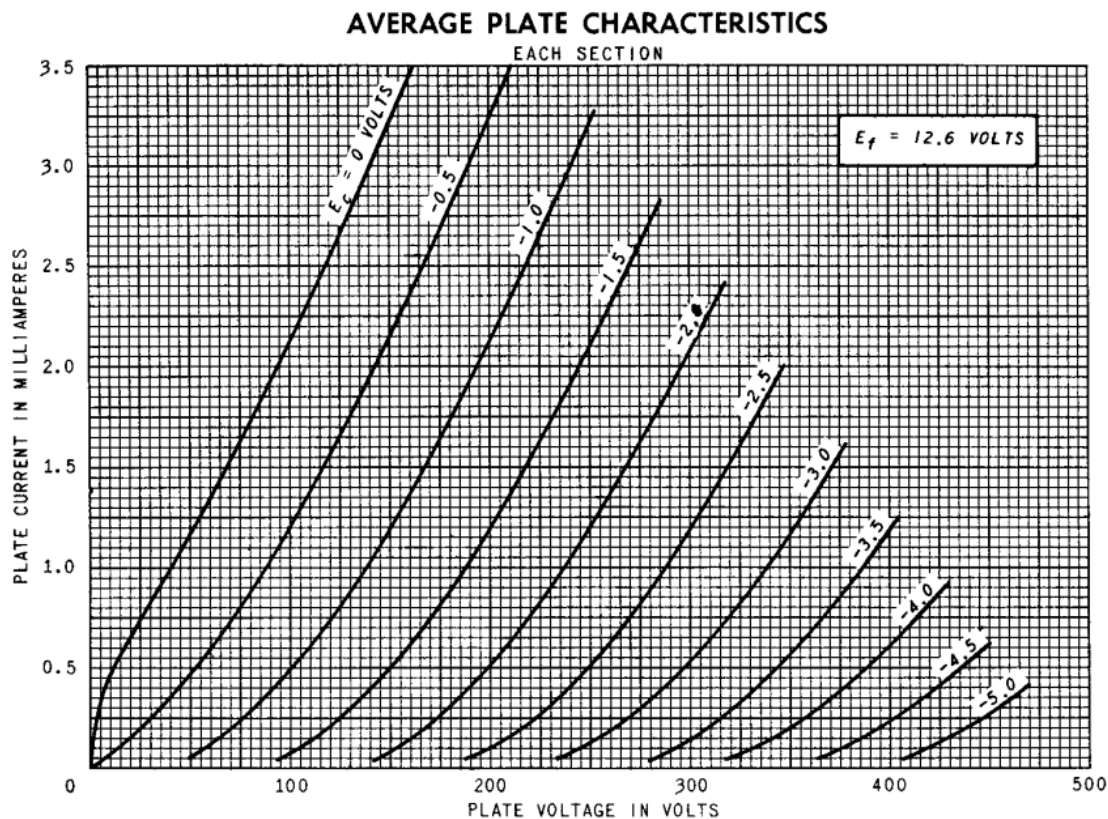


Σχήμα 24. Βασική συνδεσμολογία τριόδου

Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι μαγνήτες παράγουν εναλλασσόμενη τάση της τάξεως των  $mV < 1V$ . Το πλέγμα θα πρέπει πάντοτε να είναι αρνητικότερο της καθόδου και για αυτό τροφοδοτείται με την τάση πόλωσης πλέγματος  $V_G$ , ενώ η κάθοδος με τη σειρά της αρνητικότερη της ανόδου. Αυτό δεν σημαίνει ότι το πλέγμα για παράδειγμα θα πρέπει να έχει απαραίτητα αρνητική τάση (δηλαδή  $< 0$ ) αλλά θα πρέπει να έχει τάση μικρότερη σε σχέση με την κάθοδο, και το ίδιο ισχύει για την τάση της καθόδου σε σχέση με την άνοδο. Έτσι, σύμφωνα με το κύκλωμα (Σχήμα 24), η τάση εισόδου στην τριόδο και συγκεκριμένα στο πλέγμα ελέγχου θα είναι η τάση εξόδου των μαγνητών δηλαδή η ηλεκτρική κιθάρα. Επομένως με όσα γνωρίζουμε για την τάση εξόδου των μαγνητών, η τάση καθόδου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον θετικότερη του  $1V$ .

### Διαγωγιμότητα

Σύμφωνα με την χαρακτηριστική  $V-I$ , σε αυτό το παράδειγμα της λυχνίας 12AX7 η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα ενισχυτών ηλεκτρικής κιθάρας (Σχήμα 25), για τιμές τάσης στην άνοδο (οριζόντιος άξονας  $E_a$ ) χρειάζεται η κατάλληλη αρνητική -σε σχέση με την τάση καθόδου- τάση στο πλέγμα ( $E_g$ ) προς απόθηση των ηλεκτρονίων, δηλαδή για το σημείο αποκοπής του ρεύματος ανόδου ( $I_a$ ). Για παράδειγμα, για τάση ανόδου  $E_a = 250V$  και ρεύμα ανόδου  $I_a = 3.25mA$ , χρειάζεται αρνητική τάση πλέγματος  $E_g = -1V$  για αποκοπή του ρεύματος στην άνοδο.



**Σχήμα 25. Χαρακτηριστική V-I ανόδου τριόδου**

Όπως γνωρίζουμε, ως αγωγιμότητα, ορίζεται η ευκολία κατά την οποία ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε ένα κύκλωμα, και αντίστοιχα αντίσταση ονομάζεται η δυσκολία ροής του ρεύματος μέσα σε αυτό, μέγεθος εκφράζεται από το νόμο του Ohm, όπου για αντίσταση  $R$ , ένταση ρεύματος  $I$  και τάση  $V$  ισχύει:

$$R = \frac{V}{I} \quad (5)$$

Η αντίθεση αυτή μεταξύ αγωγιμότητας και αντίστασης έχει αντίκτυπο και στην μαθηματική σχέση η οποία εκφράζει την αγωγιμότητα  $G$  με μονάδα μέτρησης το mho (αντίστροφα γραμμένο ohm):

$$G = \frac{I}{V} \quad (6)$$

Από την άλλη, η διαγωγιμότητα ή αλλιώς αμοιβαία αγωγιμότητα, ορίζει την ευκολία με την οποία το ρεύμα ενός κυκλώματος (στην προκειμένη το ρεύμα ανόδου  $I_a$ ) επηρεάζεται από την τάση ενός άλλου κυκλώματος (στην προκειμένη την τάση πλέγματος ελέγχου  $V_g$ ). Η διαγωγιμότητα συμβολίζεται ως  $g_m$  και η μονάδα μέτρησης που έχει επικρατήσει είναι τα micromho, δηλαδή microampere ανά μονάδα volt. Στην περίπτωση της τριόδου λυχνίας κενού, η διαγωγιμότητα της διάταξης ορίζεται από την παρακάτω σχέση, όπου για ρεύμα πλάκας ανόδου ( $i_p$ ) και τάση πλέγματος ελέγχου ( $v_g$ ) ισχύει:

$$g_m = \frac{\Delta i_p}{\Delta v_g} \quad (7)$$

### **Συντελεστής Ενίσχυσης**

Ως συντελεστής ενίσχυσης ορίζεται η κατάλληλη αναλογία μεταξύ της τάσης ανόδου και της τάσης του πλέγματος, έτσι ώστε να υπάρχει σταθερό ρεύμα ανόδου. Αυτό σημαίνει πως αν υπάρξει κάποια αλλαγή στην τάση ενός εκ των δύο ηλεκτροδίων (άνοδος-πλέγμα), τότε η τάση στο άλλο ηλεκτρόδιο θα πρέπει να αλλάξει αντιστοίχως για να ισορροπήσει την παροχή σταθερού ρεύματος στην άνοδο. Συμβολίζεται ως  $\mu$  (ή  $\mu$ ), όπου για τάση ανόδου  $V_a$  και τάση πλέγματος  $V_g$ , ορίζεται από την παρακάτω σχέση, και ανάλογα με την κατασκευή της εκάστοτε τριόδου, οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ **10-100** (καθαρός αριθμός).

$$\mu = \frac{\Delta v_a}{\Delta v_g} \quad (8)$$

### **Εσωτερική αντίσταση ανόδου**

Εσωτερική αντίσταση ανόδου  $r_a$  με μονάδα μέτρησης το ohm, ορίζεται η αναλογία μεταξύ της αλλαγής στην τάση ως προς την αλλαγή στο ρεύμα της ανόδου, με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ **8-40 ΚΩ**. Για τάση ανόδου  $V_a$  και ρεύμα ανόδου  $I_a$  ισχύει η σχέση:

$$r_a = \frac{\Delta v_a}{\Delta i_a} \quad (9)$$

Η σύνδεση μεταξύ των τριών αυτών χαρακτηριστικών μεγεθών που ορίζουν τη λειτουργία μιας τριόδου λυχνίας κενού, δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = g_m r_a \quad (10)$$

### **Ευθεία φόρτου και σημείο λειτουργίας**

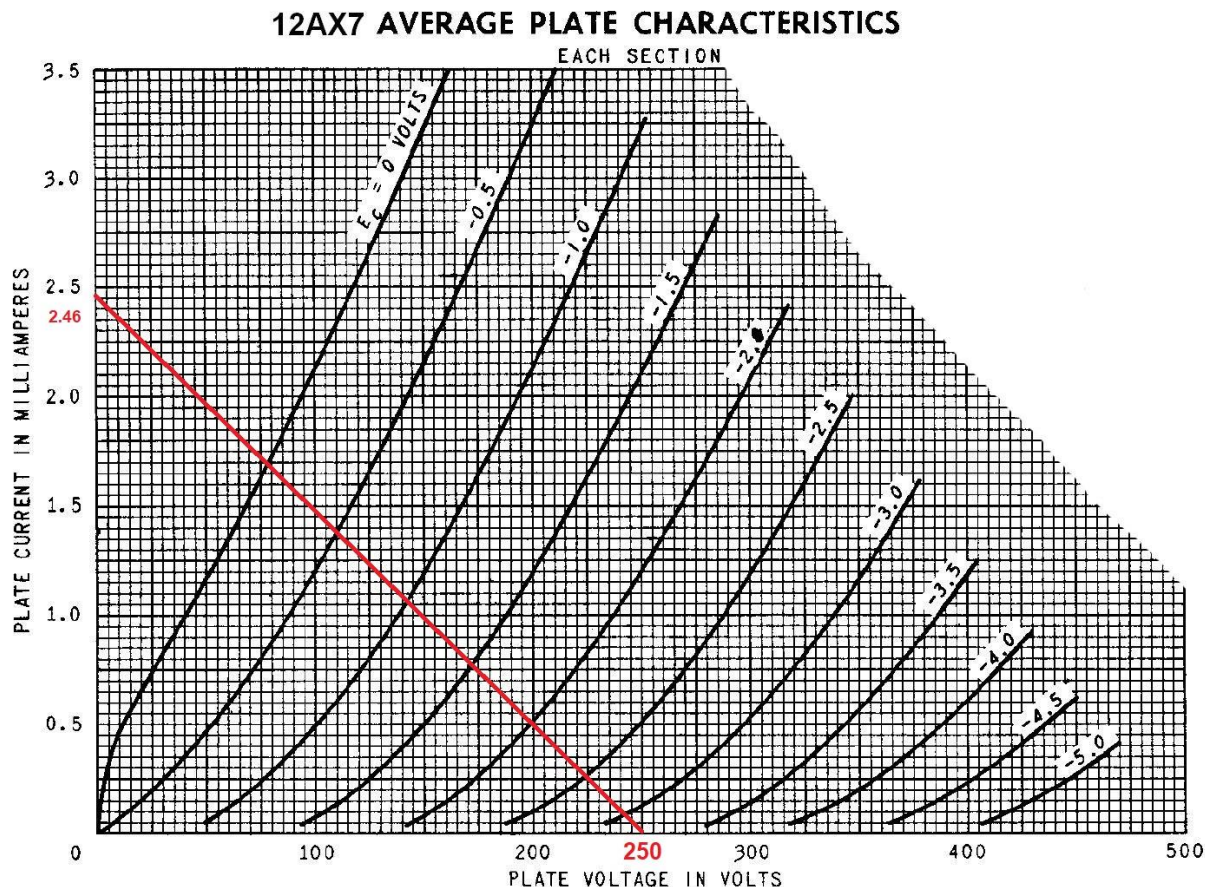
Χαράσσοντας την ευθεία φόρτου στην χαρακτηριστική V-I ανόδου μιας τριόδου λυχνίας, την οποία βρίσκουμε από τα φύλλα δεδομένων της, μας επιτρέπει να αναλύσουμε γραφικά την διάταξη, να υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης που πετυχαίνουμε στην άνοδο (στην περίπτωση μας, την ενίσχυση του σήματος της ηλεκτρικής κιθάρας), καθώς και να βρούμε το σημείο λειτουργίας της τριόδου για το εκάστοτε κύκλωμα. Η ευθεία φόρτου, ορίζει τα όρια σε ρεύμα και τάση ανόδου που υπάρχουν στο κύκλωμα και όπως είναι λογικό, η τάση τροφοδοσίας της ανόδου θα είναι το ανώτατο όριο για την τάση της, ενώ το μέγιστο ρεύμα ανόδου καθορίζεται από τις αντιστάσεις του κυκλώματος. Η σχέση που ενώνει τα μεγέθη αυτά, για τάση τροφοδοσίας  $V_s$ , ρεύμα ανόδου  $I_a$ , αντίσταση ανόδου  $R_a$  και τάση ανόδου  $V_a$  ισχύει:

$$V_s = I_a R_a + V_a \quad (11)$$

Για παράδειγμα, έστω για αντίσταση φορτίου  $R_L = 100\text{K}\Omega$ , αντίσταση καθόδου  $R_C = 500\Omega$  και τάση τροφοδοσίας  $V_S = 250\text{V}$ , το μέγιστο ρεύμα ανόδου θα ισούται με  $I_a = 2.46\text{mA}$

Πίνακας 3. Τάση και ρεύμα ανόδου

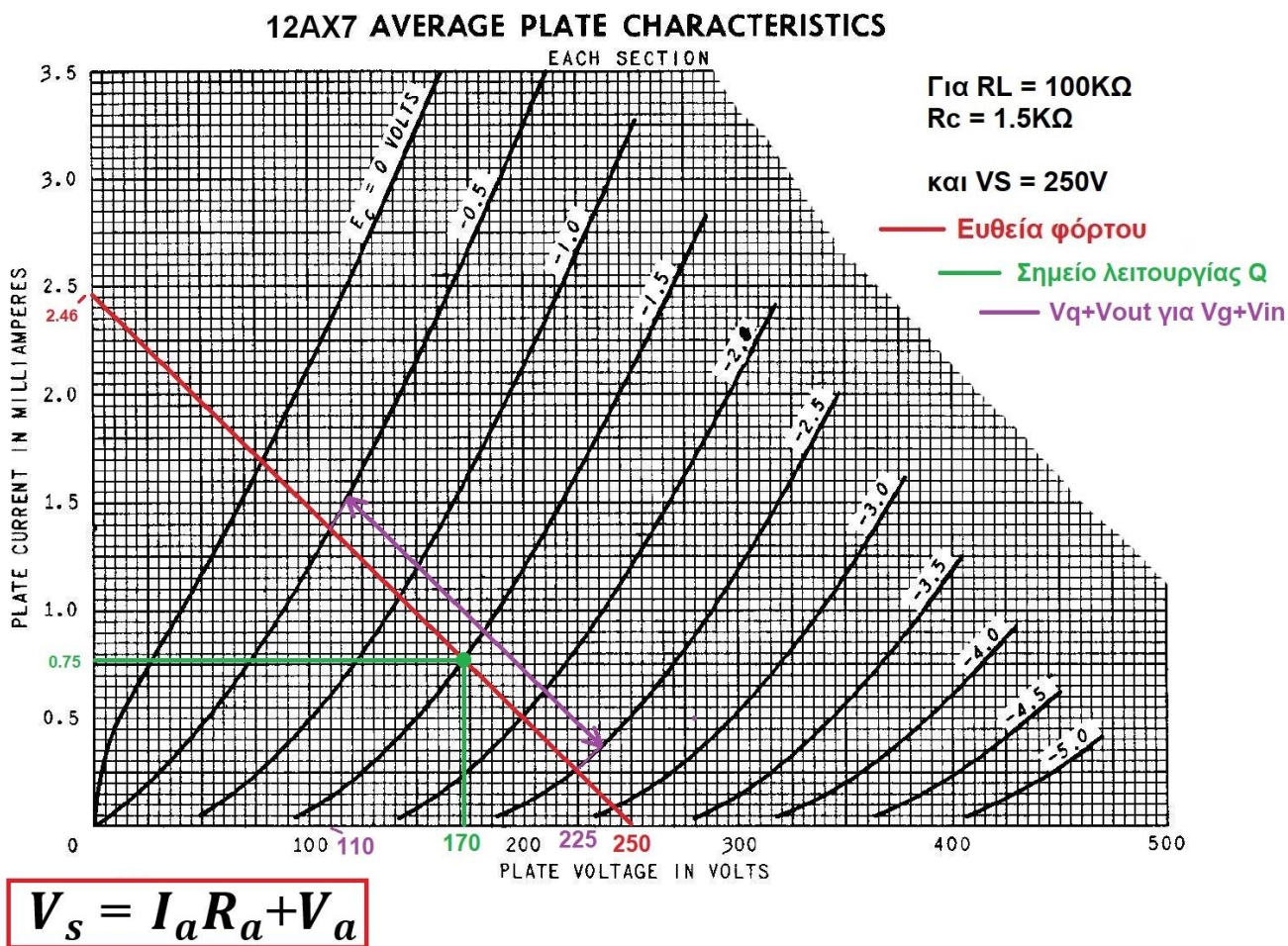
$I_a$ (σε mA)	0	2.46
$V_a$ (σε V)	250	0



Σχήμα 26. Ευθεία φόρτου τριόδου

Σύμφωνα πάντα με τη χαρακτηριστική V-I ανόδου της τριόδου, και αφού βρούμε την ευθεία φόρτου, βλέπουμε τις ευθείες  $V_G$  (στην V-I απεικονίζονται ως  $E_G$ ), που αναφέρθηκαν κατά την ανάλυση της Διαγωγιμότητας. Η τάση πλέγματος που θα επιλεγεί, σε συνδυασμό με την τάση εισόδου (το σήμα της καθάρης), ισοδυναμεί με  $V_G + V_{in}$ , και απεικονίζεται ως ένα εύρος πάνω στην ευθεία φόρτου. Επομένως αν έχουμε  $V_{in}$  για τιμές από  $-1\text{V}$  ως  $+1\text{V}$  (σε σχέση πάντα με την κάθοδο), και επιλέξουμε τάση πλέγματος  $V_G = -1.5\text{V}$ , τότε το εύρος τιμών  $V_G + V_{in}$  θα παίρνει τιμές από  $-0.5\text{V}$  ως  $-2.5\text{V}$ . Η τάση στην άνοδο θα είναι επίσης ένα εύρος τιμών που ονομάζεται  $V_q + V_{out}$  και ισχύει για τιμές που ορίζει το εύρος τιμών  $V_G + V_{in}$ . Στην προκειμένη περίπτωση, το εύρος  $V_q + V_{out}$  θα παίρνει τιμές από  $110\text{V}$  ως

225V. Το σημείο λειτουργίας της τριόδου για οποιοδήποτε κύκλωμα ενισχυτή, γνωστό ως Q point (quiescent point), είναι μια αναλογία της ευθείας φόρτου που χαράξαμε παραπάνω καθώς και της τάσης πόλωσης πλέγματος  $V_G$  που θα επιλεγεί. Εφόσον έχουμε επιλέξει  $V_G = -1.5V$ , βλέπουμε το σημείο το οποίο τέμνει την ευθεία φόρτου. Το σημείο αυτό είναι το σημείο λειτουργίας Q, και οι τιμές της τάσης ανόδου και του ρεύματος ανόδου που αντιστοιχούν στο σημείο είναι οι τιμές λειτουργίας της τριόδου λυχνίας για το συγκεκριμένο κύκλωμα ενισχυτή. Η τάση πόλωσης  $V_G$  που θα επιλέξουμε θα πρέπει να εγγυάται τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος, καθώς αν για τάση εισόδου  $V_{in}$  από  $-1V$  ως  $+1V$  είχαμε επιλέξει τάση πόλωσης πλέγματος  $V_G = -0.5V$ , τότε το εύρος  $V_G+V_{in}$  θα παίρνει τιμές από  $+0.5V$  έως και  $-1.5V$ . Συμβουλευόμενοι την ευθεία φόρτου, εφόσον η τάση από υψηλά σήματα στην είσοδο, μπορεί να είναι  $0V$  ή θετικότερη, σημαίνει ότι θα υπάρχει κορεσμός στην τριόδο και άρα πιθανώς καταστροφικές επιπτώσεις. Αν από την άλλη, για την ίδια τάση εισόδου  $V_{in}$  επιλέξουμε τάση πόλωσης πλέγματος  $V_G = -2.5V$ , τότε το εύρος  $V_G+V_{in}$  θα παίρνει τιμές από  $-1.5V$  ως  $-3.5V$  που σημαίνει ότι η διόδος δεν θα άγει καν, για χαμηλά σήματα εισόδου τιμών αρνητικότερων των  $-3V$ . Επομένως η τάση πλέγματος  $V_G$  που θα επιλεγεί θα πρέπει να ανήκει στο διάστημα μεταξύ του 40-80% της τάσης  $V_S$ , και ιδανικά στο 60%.



Σχήμα 27. Ευθεία φόρτου τριόδου και εύρος λειτουργίας

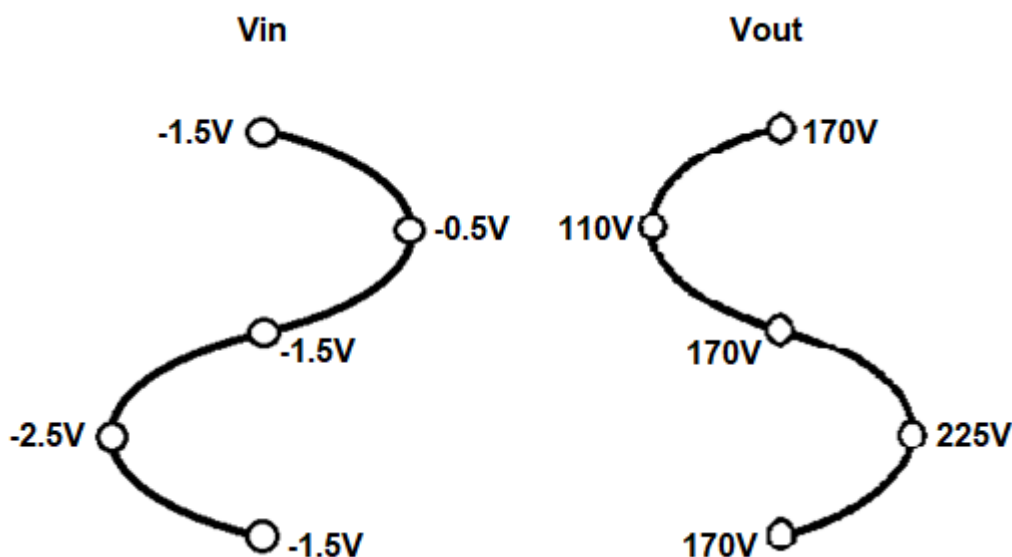
### Κέρδος τάσης

Συμβουλευόμενοι τη χαρακτηριστική V-I και ενώ έχουμε χαράξει την ευθεία φόρτου, έχουμε βρει το σημείο λειτουργίας Q και την κατάλληλη τάση πλέγματος μπορούμε με ευκολία να συμπληρώσουμε τον παρακάτω πίνακα, ο οποίος θα μας βοηθήσει να βρούμε το κέρδος τάσης (voltage gain), δηλαδή τον αριθμό που υποδεικνύει κατά πόσο έχει αυξηθεί στην έξοδο, το πλάτος του σήματος της ηλεκτρικής κιθάρας που είχαμε σαν είσοδο της τριόδου λυχνίας.

**Πίνακας 4.** Τάση και ρεύμα ανόδου σε σχέση με την τάση πλέγματος

$V_G$ (σε V)	-0.5	-1.5	-2.5
$I_a$ (σε mA)	1.3	0.75	0.25
$V_a$ (σε V)	110	170	225

Στη συνέχεια, έχοντας συμπληρώσει τον Πίνακα 3, παρατηρείται η αναστροφή της τάσης εξόδου στην άνοδο της λυχνίας κατά  $180^\circ$  σε σχέση με την τάση στο πλέγμα (Σχήμα 28).



**Σχήμα 28.** Σχέση φάσεων τάσης πλέγματος και τάσης ανόδου

Εφόσον έχουμε επιλέξει τάση πλέγματος  $V_G = -1.5V$  και αυτή αυξομειώνεται κατά  $1V$  λόγω  $V_{in}$  (άρα  $V_G + V_{in} = -1.5 \pm 1V$ ), καταλαβαίνουμε ότι στην είσοδο του κυκλώματος έχουμε ταλάντωση  $V_{input(p-p)} = 2V$  (από κορυφή σε κορυφή, peak to peak). Έτσι δεδομένου του εύρους  $V_G + V_{in}$ , ισχύει  $V_q + V_{out} = 170 \pm V_{out}$ . Το πρόβλημα εδώ, είναι πως η τάση  $V_a$  στην άνοδο της τριόδου για  $V_G + V_{in} = -0.5V$  θα είναι  $110V$  ενώ για  $V_G + V_{in} = -2.5V$  θα είναι  $225V$ , έχοντας άνιση απόσταση σε σχέση με τα  $170V$  (σελ.27). Αυτό συμβαίνει επειδή οι ευθείες  $V_G$  (ή  $E_G$ ) στη χαρακτηριστική V-I δεν είναι ποτέ πραγματικές ευθείες αλλά μη-γραμμικές ευθείες, καμπύλες. Αν όμως υποθέσουμε χάριν παραδείγματος πως για  $V_G + V_{in} = -0.5$  η τάση στην άνοδο θα είναι  $115V$ , τότε πράγματι το εύρος  $V_q + V_{out}$  θα ισούται με  $170 \pm 55V$  και άρα θα έχουμε ταλάντωση στην τάση εξόδου ίση με  $V_{output(p-p)} = 55V$ .

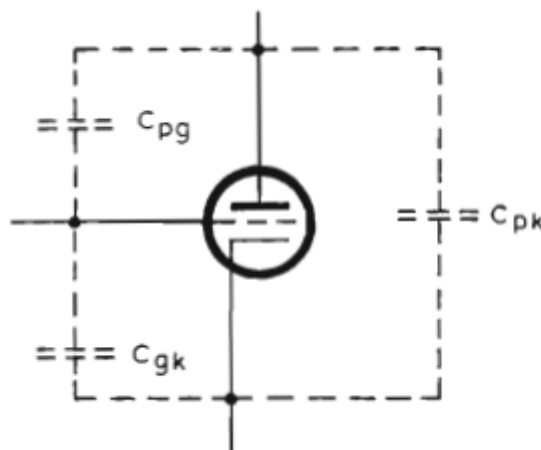
Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος τάσης του κυκλώματος από την παρακάτω μαθηματική σχέση, αντικαθιστώντας τους αριθμούς που έχουμε βρει παραπάνω:

$$G = \frac{V_{output(p-p)}}{V_{input(p-p)}} \quad (12)$$

Επομένως για  $V_{output(p-p)} = 55V$  και  $V_{input(p-p)} = 2V$ , το κέρδος τάσης  $G$  για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα είναι  $27.5$ , και είναι καθαρός αριθμός γιατί δηλώνει την κατά  $27.5$  φορές αύξηση του πλάτους του σήματος.

### Χωρητικότητα μεταξύ ηλεκτροδίων

Ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της τριόδου, όντας μεταλλικά, αναπτύσσεται μια χωρητικότητα η οποία είναι αμελητέα σε μικρές ή μεσαίες συχνότητες, όμως παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα σε μεγάλες συχνότητες (RF και UHF). Οι χωρητικότητες  $C_{gk}$  σε μια τριόδο καθόδου-πλέγματος, ανόδου-πλέγματος  $C_{pg}$  και ανόδου-καθόδου  $C_{pk}$ , ονομάζονται παρασιτικές και απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 29).



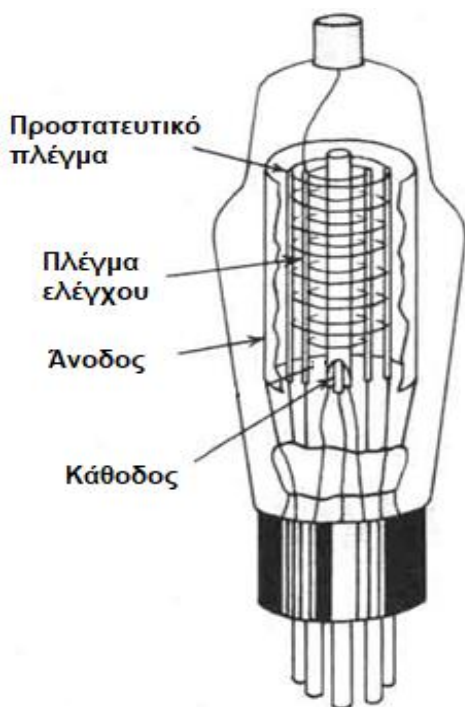
Σχήμα 29. Παρασιτικές συχνότητες (Ηλεκτρονικές λοχνίες)

$$X_c = \frac{1}{2\pi FC} \quad (13)$$

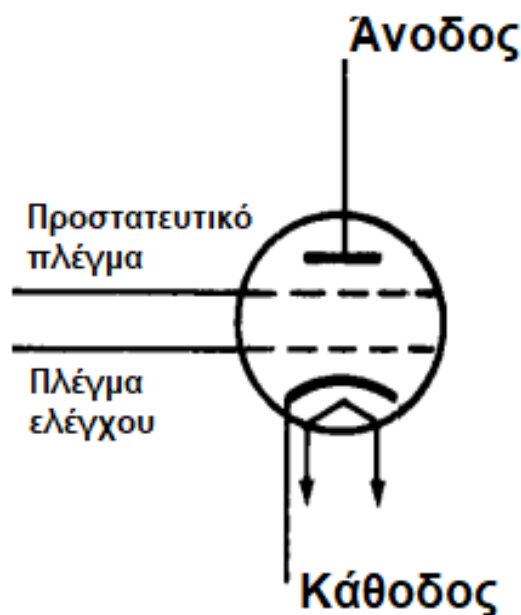
Σύμφωνα με την παραπάνω μαθηματική σχέση για τη χωρητική αντίσταση  $X_c$ , όπου  $F$  η συχνότητα του σήματος και  $C$  η χωρητικότητα, συμπεραίνουμε πως σε χαμηλές ή μεσαίες συχνότητες η χωρητικότητα επηρεάζει λίγο ως και καθόλου τη λειτουργία της τριόδου καθώς η χωρητική αντίσταση είναι μεγάλη, ενώ σε μεγάλες συχνότητες την επηρεάζει εμφανώς καθώς η χωρητική αντίσταση θα είναι μικρή. Έτσι, σε μεγάλες συχνότητες η μικρή χωρητική αντίσταση, και η χωρητικότητα μεταξύ ανόδου-πλέγματος  $C_{pg}$  συμβάλλουν στην ανατροφοδότηση μέρους του σήματος εξόδου από την άνοδο προς το πλέγμα επιβάλλοντας ανεπιθύμητες ταλαντώσεις στην τριόδο και στο κύκλωμα του οποίου είναι μέρος.

### 2.3.3 Τέτροδος

Λόγω των προβλημάτων που επέφερε η χωρητικότητα στις μεγάλες συχνότητες του σήματος, αναπτύχθηκε μια λυχνία κενού με ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο που ονομάστηκε τέτροδος, λόγω των τεσσάρων ηλεκτροδίων της. Το νέο αυτό ηλεκτρόδιο, είναι ένα επιπλέον προστατευτικό πλέγμα (*screen grid*), παρόμοιας κατασκευής με το πλέγμα ελέγχου που προϋπήρχε και στην τρίοδο λυχνία. Το προστατευτικό πλέγμα  $V_{g2}$  φορτίζεται με σταθερό θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο και το πλέγμα ελέγχου, αλλά αρνητικότερο της ανόδου.

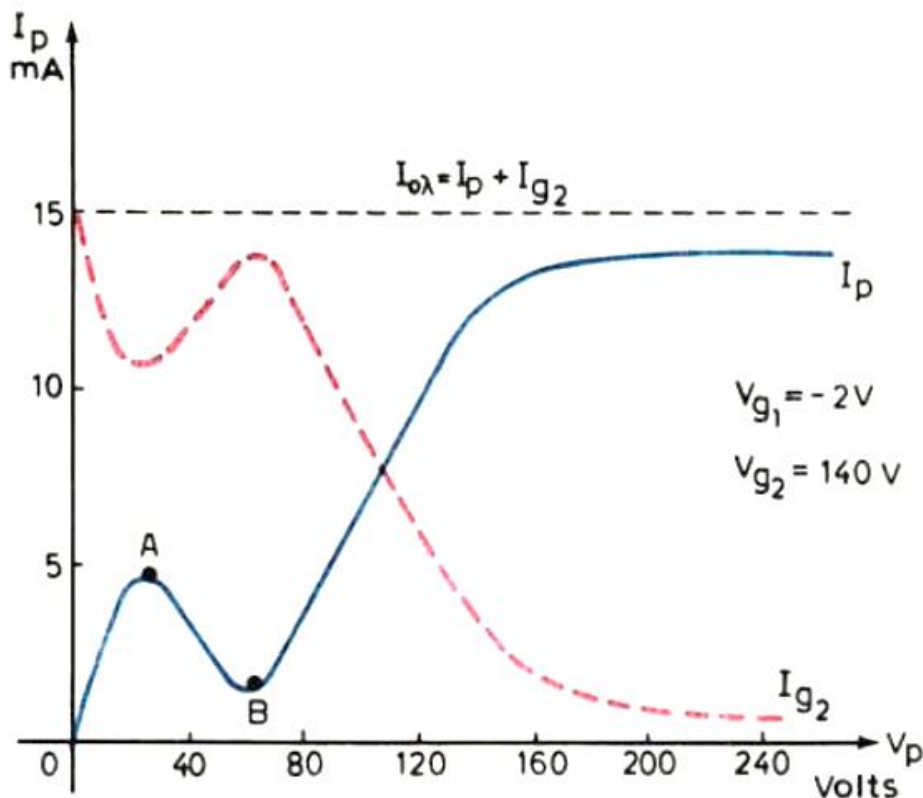


Σχήμα 30. Στοιχεία τετρόδου λυχνίας



Σχήμα 31. Τέτροδος λυχνία (Γενικά Ηλεκτρονικά)

Έτσι εφόσον η τάση του προστατευτικού πλέγματος είναι θετικότερη της ανόδου και του πλέγματος ελέγχου, δέχεται και εκείνο έναν συγκεκριμένο αριθμό από ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το χωρικό φορτίο της καθόδου. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από το δυναμικό του προστατευτικού πλέγματος και κατά πόσο θετικότερο είναι αυτό σε σχέση με το δυναμικό του πλέγματος ελέγχου. Τα ηλεκτρόνια κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και εκείνα που καταφτάνουν στο προστατευτικό πλέγμα αλλά μόλις που το ξεπερνούν, πέφτουν και πάλι πάνω στην επιφάνειά του. Εκείνα που φτάνουν πιο κοντά στην άνοδο, έλκονται τελικά από εκείνη και πέφτουν πάνω στην επιφάνειά της. Το ρεύμα ανόδου  $I_a$  πλέον εξαρτάται άμεσα από την τάση πλέγματος ελέγχου  $V_g$  και την τάση του προστατευτικού πλέγματος  $V_{g2}$ , και κατά πολύ λιγότερο από την τάση ανόδου  $V_a$ .



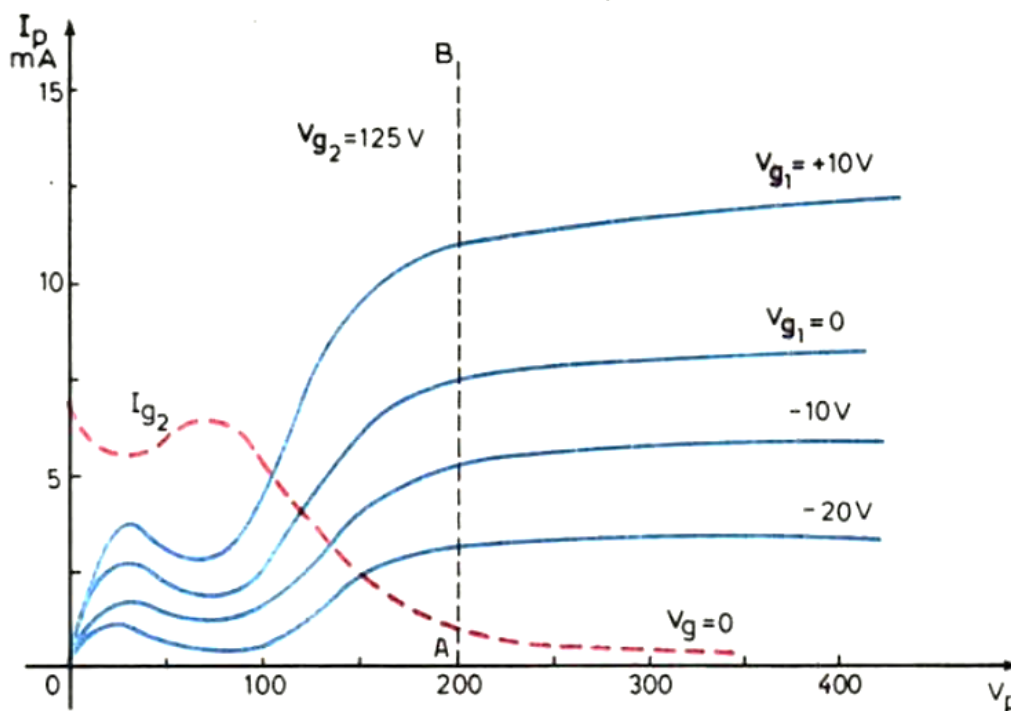
**Σχήμα 32.** Σχέση μεταβολής των ρευμάτων ανόδου και προστατευτικού πλέγματος με την τάση ανόδου.

Το συνολικό ρεύμα της τετρόδου πλέον ισούται με  $I_{ολ} = I_p + I_{g_2}$ . Έτσι παραπάνω (Σχήμα 32), βλέπουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος ανόδου  $I_p$  και του ρεύματος του προστατευτικού πλέγματος, για τάση ανόδου  $V_p$  και ρεύμα ανόδου  $I_p$ . Παρατηρούμε πως για μηδενική τάση ανόδου, το μόνο ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα είναι εκείνο του προστατευτικού πλέγματος. Όταν η τάση ανόδου αρχίσει να αυξάνεται, τότε το ρεύμα της ανόδου αρχικά διαγράφει ανοδική πορεία ενώ αντίθετα το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος καθοδική. Στη συνέχεια, από ένα σημείο (A) της τάσης ανόδου, το ρεύμα ανόδου ελαττώνεται μέχρι ένα δεύτερο σημείο (B), ενώ αντίθετα το ρεύμα του προστατευτικού πλέγματος αυξάνεται. Τελικά, από το σημείο B και έπειτα το ρεύμα ανόδου διαγράφει ανοδική πορεία μέχρι τον κόρο, ενώ το ρεύμα του προστατευτικού πλέγματος ελαττώνεται εμφανώς φτάνοντας κοντά στο μηδέν. Το τμήμα AB, όπου βλέπουμε την πτώση αυτή στο ρεύμα ανόδου, ονομάζεται κατάδυση ή τμήμα αρνητικής αντίστασης, καθώς για το συγκεκριμένο τμήμα της καμπύλης, ενώ αυξάνεται η τάση στην άνοδο, το ρεύμα της ελαττώνεται. Ονομάζεται αρνητική αντίσταση, καθώς βρισκόμαστε σε συνθήκη αντίθετη του νόμου του Ohm και επομένως πλέον δεν ισχύει η έννοια της αλληλεξάρτησης μεταξύ ρεύματος και τάσης, καθώς σε κύκλωμα με θετική αντίσταση, όσο αυξάνεται η τάση, αυξάνεται και το ρεύμα και αντιστρόφως.

Το γεγονός αυτό της αρνητικής αντίστασης του ρεύματος ανόδου οφείλεται στο φαινόμενο της δευτερογενούς εκπομπής που θα αναλυθεί παρακάτω.

### Δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρονίων

Καθώς τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την κάθοδο και περνούν από το θετικό δυναμικό του προστατευτικού πλέγματος, φτάνουν στην μεταλλική πλάκα της ανόδου με μεγάλη ταχύτητα. Εκεί ανάλογα με την ταχύτητα του κάθε ηλεκτρονίου, μπορεί να γίνει διάσπαση από την μεταλλική πλάκα, ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων, τα οποία με τη σειρά τους εκπέμπονται προς θετικότερα δυναμικά. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 33), για τιμές τάσεως  $V_p$  και ρεύματος  $I_p$  ανόδου, για σταθερή τάση προστατευτικού πλέγματος  $V_{g_2} = 125V$ , και για διάφορες τιμές τάσης πλέγματος ελέγχου  $V_g$ , παρατηρούμε τις καμπύλες τόσο του ρεύματος ανόδου  $I_p$ , όσο και του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$ . Ας πάρουμε ως παράδειγμα την τάση πλέγματος ελέγχου  $V_g = 0V$ , ξεκινώντας από το μηδέν και για όσο η τάση ανόδου είναι αρνητικότερη της τάσης προστατευτικού πλέγματος ( $V_{g_2} = 125V$ ). Βλέπουμε ότι η κατάδυση γίνεται περίπου μεταξύ τιμών τάσης ανόδου 30V και 60V, ενώ για ίδιες τιμές το ρεύμα προστατευτικού ανόδου παρουσιάζει αύξηση. Καταλαβαίνουμε πως σε αυτή τη συνθήκη, τα ηλεκτρόνια που έχουν χτυπήσει πάνω στην επιφάνεια της ανόδου (*πρωτεύοντα ηλεκτρόνια*), διασπώνται (*δευτερεύοντα ηλεκτρόνια*) και πλέον κινούνται προς το προστατευτικό πλέγμα, καθώς η άνοδος δεν είναι ικανή να τα κρατήσει στην επιφάνειά της όντας χαμηλότερη σε δυναμικό από το προστατευτικό πλέγμα. Όσο όμως η τάση ανόδου αυξάνει φτάνοντας κοντά και τελικά ξεπερνώντας την τάση του προστατευτικού πλέγματος, παρατηρούμε αύξηση του ρεύματος ανόδου και μείωση του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος. Τώρα, σε αυτή τη συνθήκη, συμβαίνει μεν η δευτερογενής εκπομπή, αλλά τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τώρα έλκονται από το δυναμικό της ανόδου καθώς πλέον είναι το θετικότερο ηλεκτρόδιο του κυκλώματος. Το φαινόμενο της δευτερογενούς εκπομπής παρατηρείται και στην τρίοδο λυχνία, όμως εκεί το μόνο δυναμικό από το οποίο θα έλκονται τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια είναι το δυναμικό της ανόδου καθώς δεν υπάρχει θετικότερο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 33. Χαρακτηριστική V-I τετρόδου (Γενικά Ηλεκτρονικά)

Όπως βλέπουμε παραπάνω (Σχήμα 33), για συνεχώς αυξανόμενες τιμές τάσης ανόδου  $V_p$ , μεγαλύτερες της τάσης προστατευτικού πλέγματος  $V_{g2}$ , οι καμπύλες του ρεύματος ανόδου  $I_p$  γίνονται σχεδόν οριζόντιες. Αυτό σημαίνει πως η **εσωτερική αντίσταση** της τετρώδου λυχνίας είναι πολύ μεγάλη, της τάξεως των **500KΩ-1MΩ** και ορίζεται από την σχέση που έχουμε αναφέρει κατά την ανάλυση της τριόδου λυχνίας:

$$\Gamma_a = \frac{\Delta v_a}{\Delta i_a} \quad (9)$$

Η τέτροδος λυχνία σε αντίθεση με την τρίοδο, έχει δυο συντελεστές ενίσχυσης οι οποίοι εκφράζονται από δύο διαφορετικές σχέσεις, όταν η τέτροδος λειτουργεί ως τρίοδος, δηλαδή ενισχύτρια. Η πρώτη σχέση είναι παρόμοια με εκείνη που συναντάμε στην τρίοδο λυχνία, και εκφράζει την κατάλληλη αναλογία μεταξύ της τάσης ανόδου και της τάσης του πλέγματος, έτσι ώστε να υπάρχει σταθερό ρεύμα ανόδου. Όπως αναφέραμε παραπάνω, το ρεύμα ανόδου επηρεάζεται κατά πολύ λιγότερο από την τάση ανόδου από ότι επηρεάζεται από τις τάσεις των δύο πλεγμάτων. Έτσι ο πρώτος **συντελεστής ενίσχυσης  $\mu_1$**  θα είναι πολύ υψηλός (της τάξεως του **1000-1200**), και αναφέρεται σπανίως στα φύλλα δεδομένων των περισσότερων μοντέλων τετρώδου.

$$\mu_1 = \frac{\Delta v_a}{\Delta v_{g1}} \quad (8)$$

Ο δεύτερος συντελεστής συχνά αναφέρεται ως εσωτερικός συντελεστής ενίσχυσης  $\mu_2$ , και ορίζει την αναλογία της τάσης προστατευτικού πλέγματος  $V_{g2}$  ως προς την τάση πλέγματος ελέγχου  $V_g$ , για να εκφράσει την επιρροή που έχουν στο ρεύμα ανόδου  $I_a$ . Η τιμή του **συντελεστή  $\mu_2$** , συνήθως παίρνει τιμές της τάξεως του **5-10**.

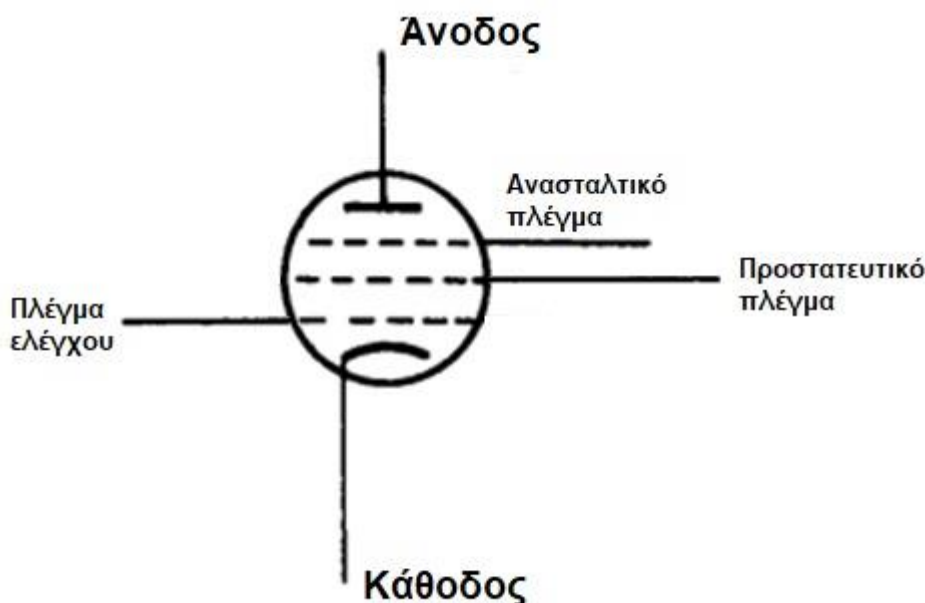
$$\mu_2 = \frac{\Delta v_{g2}}{\Delta v_{g1}} \quad (14)$$

Η σχέση και οι τιμές της διαγωγιμότητας είναι περίπου ίδιες με εκείνες που συναντάμε στην τρίοδο λυχνία:

$$g_m = \frac{\Delta i_p}{\Delta v_g} \quad (7)$$

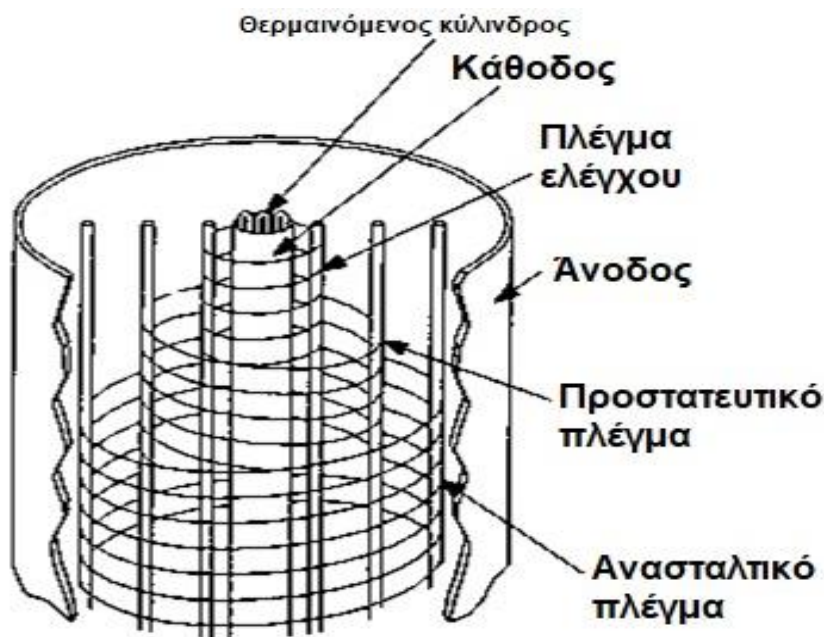
### 2.3.4 Πέντοδος

Λόγω της δευτερεύουσας εκπομπής ηλεκτρονίων η οποία οδηγεί την τέτροδο στο φαινόμενο της αρνητικής αντίστασης, δημιουργήθηκε μια νέα ηλεκτρονική λυχνία με την προσθήκη ενός παραπάνω ηλεκτροδίου, του ανασταλτικού πλέγματος (suppressor grid), με σκοπό τον περιορισμό αυτών των φαινομένων. Το επιπλέον πλέγμα τοποθετείται συνήθως ανάμεσα στην άνοδο και στο προστατευτικό πλέγμα. Συνολικά, η νέα αυτή λυχνία αποτελείται από πέντε ηλεκτρόδια (κάθοδος, άνοδος, πλέγμα ελέγχου, προστατευτικό πλέγμα, ανασταλτικό πλέγμα) από όπου και ονομάστηκε πέντοδος.



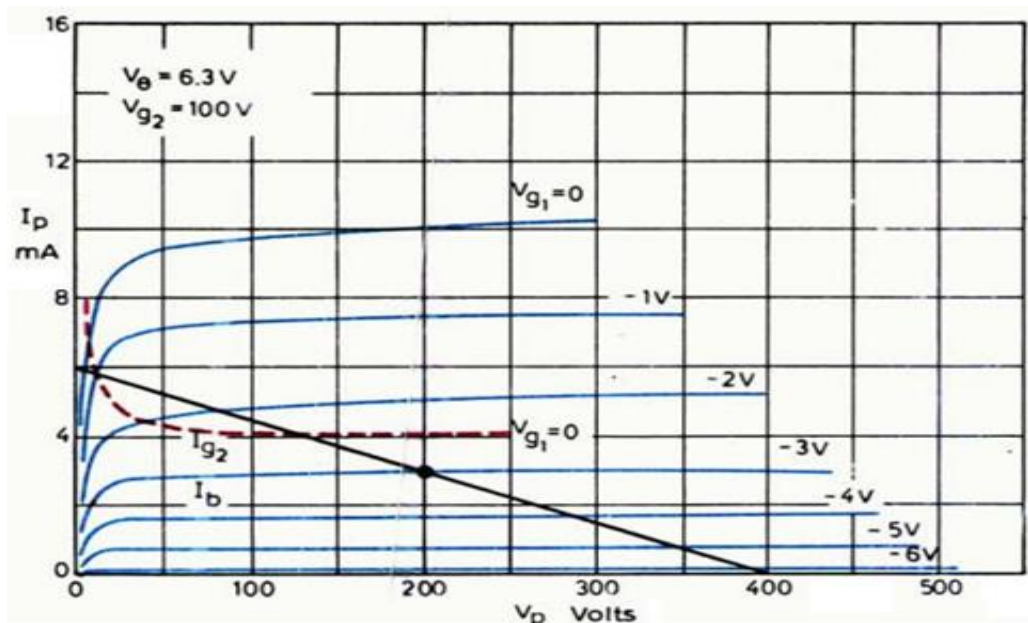
Σχήμα 34. Πέντοδος λυχνία

Τα δυναμικά σε κάθε ένα από τα ηλεκτρόδια της πεντόδου παραμένουν στις ίδιες τιμές με τα δυναμικά που συναντήσαμε στις προηγούμενες ηλεκτρονικές λυχνίες λιγότερων ηλεκτροδίων. Το ανασταλτικό πλέγμα συνήθως συνδέεται (εσωτερικά ή εξωτερικά) με την κάθοδο και συνεπώς τροφοδοτείται με δυναμικό τιμών ίσων ή περίπου ίσων, των τιμών δυναμικού της καθόδου. Έτσι, τα ηλεκτρόνια που προωθούνται από το χωρικό φορτίο της καθόδου, περνούν (σε αναλογία) το πλέγμα ελέγχου και ανατροφοδοτούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα από το προστατευτικό πλέγμα προς την άνοδο (όπως ακριβώς γίνεται και στη λειτουργία της τετρόδου λυχνίας). Το ανασταλτικό πλέγμα, όντας μεν αρνητικότερο της ανόδου, δεν είναι σε θέση να απωθήσει τα ηλεκτρόνια καθώς το δυναμικό της ανόδου είναι εμφανώς μεγαλύτερο (κατά πολύ θετικότερο, ασκεί μεγαλύτερη έλξη στα ηλεκτρόνια). Από την άλλη, αυτό που καταφέρνει το ανασταλτικό πλέγμα, είναι να μειώσει την ταχύτητα με την οποία κατευθύνονται τα ηλεκτρόνια προς την άνοδο, με αποτέλεσμα να υπάρχει εμφανώς μικρότερη δευτερεύουσα εκπομπή ηλεκτρονίων. Ακόμα, όσα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια δημιουργούνται, κατά συνέπεια απωθούνται από το ανασταλτικό πλέγμα καθώς δεν έχουν μεγάλη ταχύτητα για να ξεπεράσουν το αρνητικό του δυναμικό και έτσι προσκολλώνται και πάλι στην επιφάνεια της ανόδου.



Σχήμα 35. Στοιχεία πεντόδου λυχνίας

Πλέον, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και παρακάτω (Σχήμα 36), για σταθερή τάση προστατευτικού πλέγματος  $V_{g_2} = 100V$  και σταδιακά αυξανόμενες τιμές τάσης ανόδου  $V_a$ , οι καμπύλες του ανοδικού ρεύματος δεν παρουσιάζουν καμία κατάδυση αλλά αντίθετα διαγράφουν ανοδική πορεία και έχουν τιμή κόρου αναλογική της τάσης πλέγματος ελέγχου  $V_{g_1}$ . Όπως συμβαίνει και στην τέτροδο λυχνία, το ανοδικό ρεύμα εξαρτάται άμεσα από την τάση προστατευτικού πλέγματος, κυρίως όμως εξαρτάται από την τάση του πλέγματος ελέγχου, και κατά πολύ λιγότερο από την τάση ανόδου.



Σχήμα 36. Χαρακτηριστική V-I ανόδου πεντόδου (Γενικά Ηλεκτρονικά)

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που συναντήσαμε και στις προηγούμενες λυχνίες, ορίζονται από τις ίδιες μαθηματικές σχέσεις. Για εσωτερική αντίσταση με συνήθεις τιμές **100KΩ – 1MΩ** ισχύει:

$$r_a = \frac{\Delta v_a}{\Delta i_a} \quad (9)$$

Για συντελεστή ενίσχυσης με συνήθεις τιμές **100-10000** ισχύει η μαθηματική σχέση:

$$\mu_1 = \frac{\Delta v_a}{\Delta v_{g1}} \quad (8)$$

Για τη διαγωγιμότητα της πεντόδου με συνήθεις τιμές 0.5 – 10 millimho ισχύει:

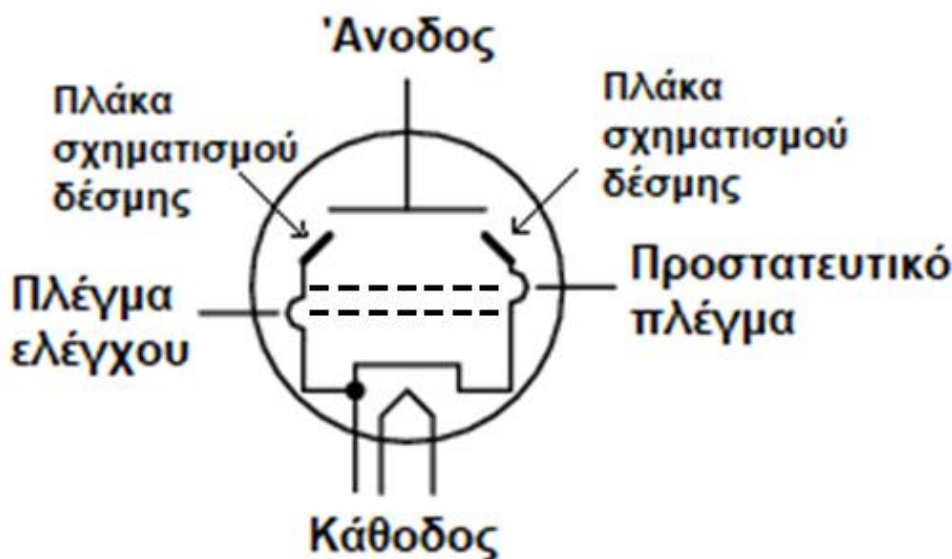
$$g_m = \frac{\Delta i_p}{\Delta v_g} \quad (7)$$

Λόγω του μεγάλου συντελεστή ενίσχυσης (σε σχέση με τις προηγούμενες λυχνίες) καθώς και της εξάλειψης του φαινομένου της αρνητικής αντίστασης λόγω δευτερεύουσας εκπομπής ηλεκτρονίων, η πέντοδος λυχνία χρησιμοποιείται ευρέως ως ενισχυτήρια λυχνία ισχύος σε κυκλώματα ενίσχυσης ακουστικών ηλεκτρικών σημάτων, κατά το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης, την τελική ή ενίσχυση ισχύος. Τα στάδια της ενίσχυσης καθώς και οι κλάσεις ενισχυτών θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

Το μειονέκτημα της πεντόδου, είναι πως ένας αριθμός ηλεκτρονίων από το χωρικό φορτίο της καθόδου παγιδεύεται ανάμεσα στα πλέγματα και συγκεκριμένα διαχωρίζεται στο προστατευτικό πλέγμα και την άνοδο. Αυτό οδηγεί στον λεγόμενο **θόρυβο διαχωρισμού (partition noise)**.

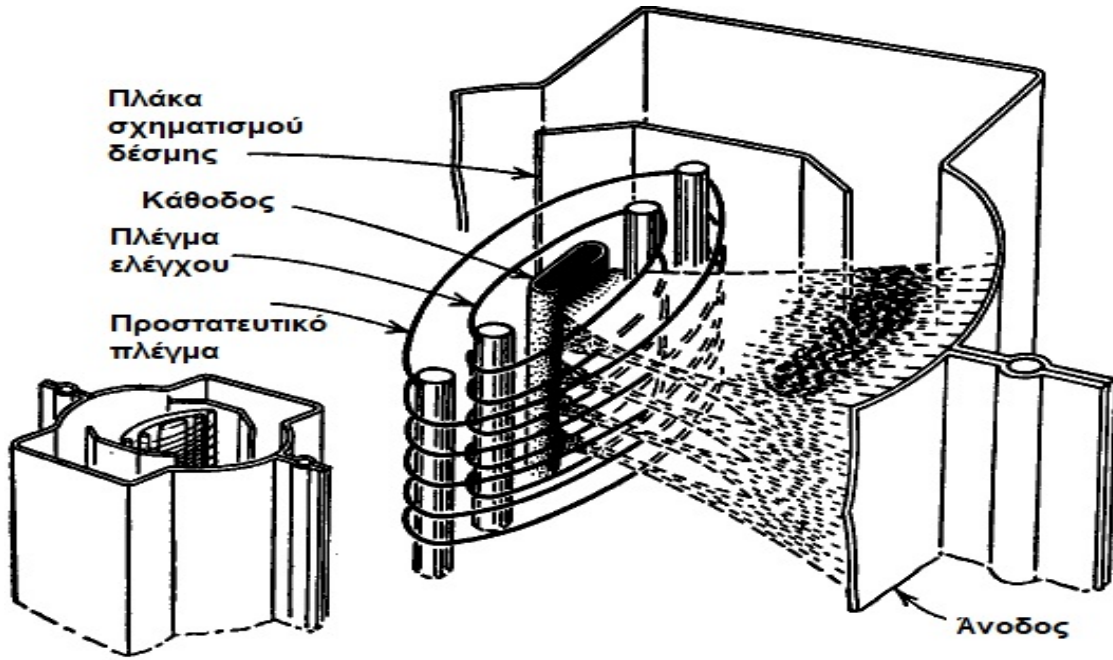
### 2.3.5 Τέτροδος λυχνία κατευθυνόμενης δέσμης

Ένας διαφορετικός τρόπος αντιμετώπισης της δευτερεύουσας εκπομπής και συνεπώς του φαινομένου της αρνητικής αντίστασης, αποτέλεσε η τέτροδος λυχνία κατευθυνόμενης δέσμης (beam-tetrode). Η διαφορά της από μια κοινή τέτροδο λυχνία είναι ότι στη συγκεκριμένη λυχνία, εκτός από τα τέσσερα γνωστά σε εμάς ηλεκτρόδια, υπάρχουν δυο επιπλέον πλάκες που σχηματίζουν μια δέσμη ηλεκτρονίων, οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα στο προστατευτικό πλέγμα και στην άνοδο.



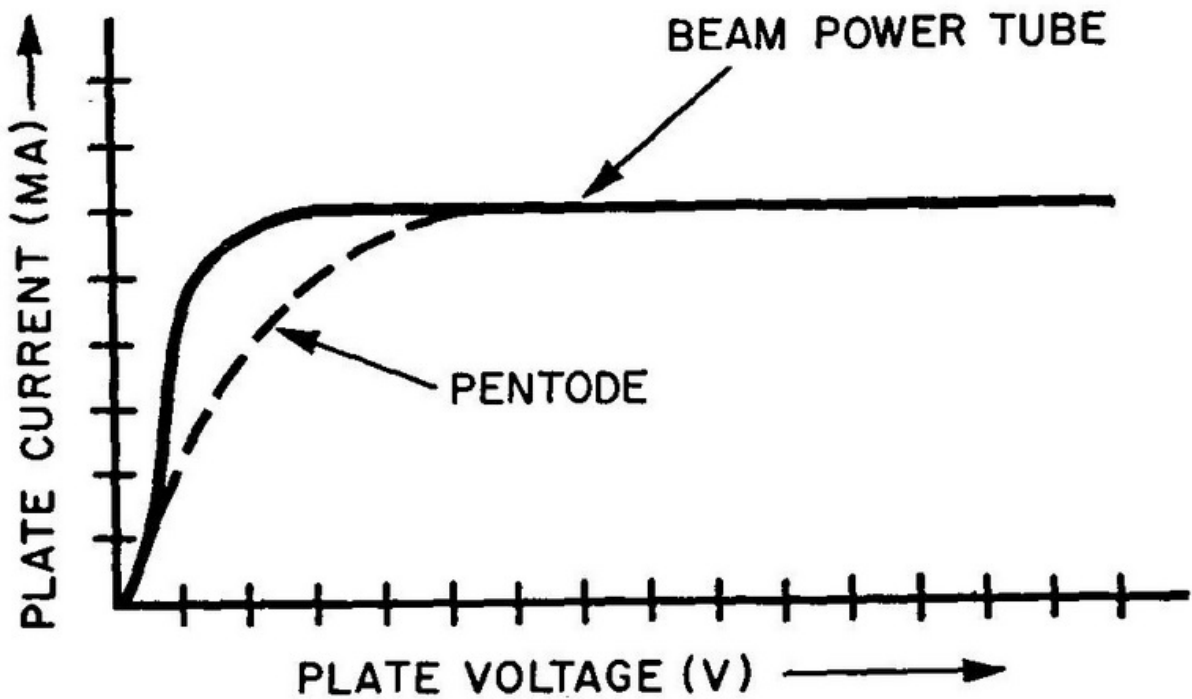
Σχήμα 37. Τέτροδος λυχνία κατευθυνόμενης δέσμης

Οι πλάκες σχηματισμού της δέσμης ηλεκτρονίων (εν συντομία πλάκες δέσμης), είναι συνδεδεμένες στην κάθοδο και συνεπώς έχουν αρνητικό δυναμικό. Το προστατευτικό πλέγμα είναι τυλιγμένο κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να βρίσκεται οπτικά ακριβώς πίσω από το πλέγμα ελέγχου, δίνοντας την ψευδαίσθηση ότι υπάρχει ένα μόνο πλέγμα στο εσωτερικό της λυχνίας. Η ευθυγράμμιση αυτή των δύο πλεγμάτων, επιτρέπει στο πλέγμα ελέγχου να διατηρήσει την ιδιότητά του να αποτρέπει τις παρασιτικές χωρητικότητες, και μάλιστα χωρίς να αποτελεί εμπόδιο στα ηλεκτρόνια που κατευθύνονται κατά δέσμες από την κάθοδο προς την άνοδο. Με τον βομβαρδισμό ηλεκτρονίων κατά δέσμες από την κάθοδο, δημιουργείται ένα νέφος ηλεκτρονίων στην άνοδο που ονομάζεται χωρικό φορτίο άνοδου. Έτσι, το αρνητικό δυναμικό των ηλεκτρονίων αποτρέπει το φαινόμενο της αρνητικής αντίστασης. Συνεπώς η λυχνία δέσμης πετυχαίνει παρόμοια αποτελέσματα με την πέντοδο και μάλιστα θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει πως είναι μια βελτιωμένη πέντοδος (Σχήμα 37).



Σχήμα 38. Στοιχεία τετρόδου λυχνίας κατευθυνόμενης δέσμης

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω χαρακτηριστική V-I, η καμπύλη του κόρου που εμφανίζει η λυχνία δέσμης είναι πολύ πιο απότομη από εκείνη της πεντόδου, υποδεικνύοντας την χρησιμότητά της σε κυκλώματα ισχύος.



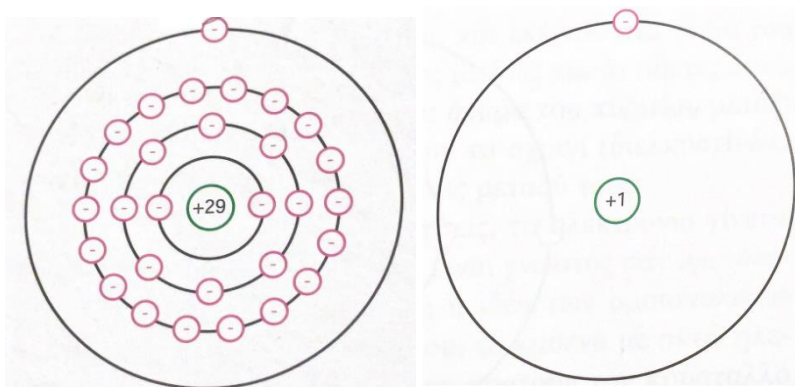
Σχήμα 39. Χαρακτηριστική V-I τετρόδου κατευθυνόμενης δέσμης

## 2.4 Τρανζίστορ

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, έρχεται στην επιφάνεια στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα ο αντικαταστάτης της ηλεκτρονικής λυχνίας, το τρανζίστορ, μια διάταξη που αποτελεί την σπουδαιότερη ίσως εφεύρεση του προηγούμενου αιώνα –και όχι άδικα– καθώς βρίσκει εφαρμογή ως διακόπτης, σταθεροποιητής τάσης αλλά και ως ενισχυτής τάσης ή ρεύματος. Το πρώτο λειτουργικό τρανζίστορ κατασκευάστηκε το 1947 και οφείλεται στους Josh Bardeen, Walter Brattain και William Shockley, χαρίζοντάς τους μάλιστα και το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1956.

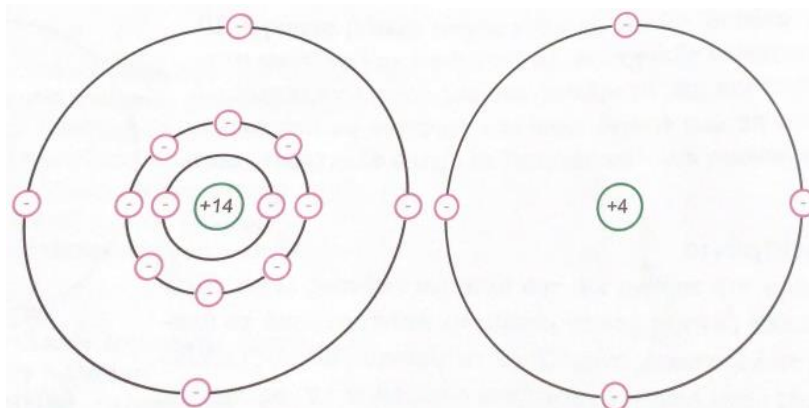
### Αρχή Λειτουργίας

Έστω άτομο χαλκού όπου στον πυρήνα περιέχονται 29 πρωτόνια και γύρω από αυτά σε διαφορετικές τροχιές (στοιβάδες) υπάρχουν 29 ηλεκτρόνια: 2 στην πρώτη στοιβάδα, 8 στη δεύτερη, 18 στην τρίτη και 1 στην εξωτερική στοιβάδα. Καθώς τα εσωτερικά ηλεκτρόνια είναι 28 και τα πρωτόνια 29, τελικά το φορτίο που έχει ο πυρήνας θα είναι  $29 - 28 = +1$ . Επομένως, υλικά όπως ο χαλκός, χαρακτηρίζονται (καλοί) **αγωγοί**, καθώς όταν υπάρχει ένα εξωτερικό (ελεύθερο) ηλεκτρόνιο σε μια μεγάλη τροχιά που περιστρέφεται γύρω από πυρήνα φορτίου ίσου με +1, η έλξη που δέχεται από το φορτίο είναι μηδαμινή, σχεδόν αμελητέα. Έτσι οποιαδήποτε εξωτερική διαφορά δυναμικού προκαλεί τη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από το ένα άτομο στο άλλο, δηλαδή προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα. Από την άλλη υλικά όπως το πλαστικό χαρακτηρίζονται **μονωτές**, καθώς στην εξωτερική στοιβάδα του ατόμου υπάρχουν –ιδανικά– 8 ηλεκτρόνια τα οποία είναι δεμένα στο άτομο και επομένως δεν υπάρχει ελεύθερο ηλεκτρόνιο το οποίο θα είναι επιρρεπές σε εξωτερική τάση, αποτρέποντας έτσι τη ροή οποιουδήποτε ηλεκτρονίου από το ένα άτομο στο άλλο.



Σχήμα 40. Άτομο χαλκού (Αγωγός)

Το τρανζίστορ αποτελεί ενεργό ηλεκτρονικό εξάρτημα και ημιαγωγική διάταξη που όπως φανερώνει και η λέξη βασίζεται πάνω στη θεωρία των ημιαγωγών. Ως **ημιαγωγός**, χαρακτηρίζεται ένα υλικό του οποίου η αγωγιμότητα βρίσκεται μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτή. Έτσι, ένας ιδανικός ημιαγωγός διαθέτει 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα. Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τους **ενδογενείς** και τους **εξωγενείς**. Οι ενδογενείς αποτελούν καθαρούς ημιαγωγούς χωρίς προσμίξεις άλλων ατόμων. Από την άλλη, οι εξωγενείς είναι ημιαγωγοί με προσμίξεις επιπλέον ατόμων τα οποία είτε έχουν πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα και αποσκοπούν στην αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων (*πεντασθενής πρόσμιξη*) είτε έχουν τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα και αποσκοπούν στην αύξηση των οπών (*τρισθενής πρόσμιξη*), των κενών δηλαδή που αφήνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα του ατόμου τους, όταν έλκονται από κάποια τάση. Οι ημιαγωγοί που έχουν επιδεχθεί πεντασθενή πρόσμιξη ονομάζονται ημιαγωγοί **τύπου n** και έχουν περισσότερα ηλεκτρόνια παρά οπές, ενώ εκείνοι που έχουν επιδεχθεί τρισθενή πρόσμιξη ονομάζονται ημιαγωγοί **τύπου p** και έχουν περισσότερες οπές παρά ηλεκτρόνια. Όταν το μισό μέρος ενός κρυσταλλικού σώματος τυριτίου είναι τύπου p και το υπόλοιπο μισό του είναι τύπου n, η περιοχή ανάμεσα στους δύο τύπους ονομάζεται **επαφή pn** και είναι εκείνη η οποία οδήγησε στην ανακάλυψη και ευρεία χρήση του τρανζίστορ.



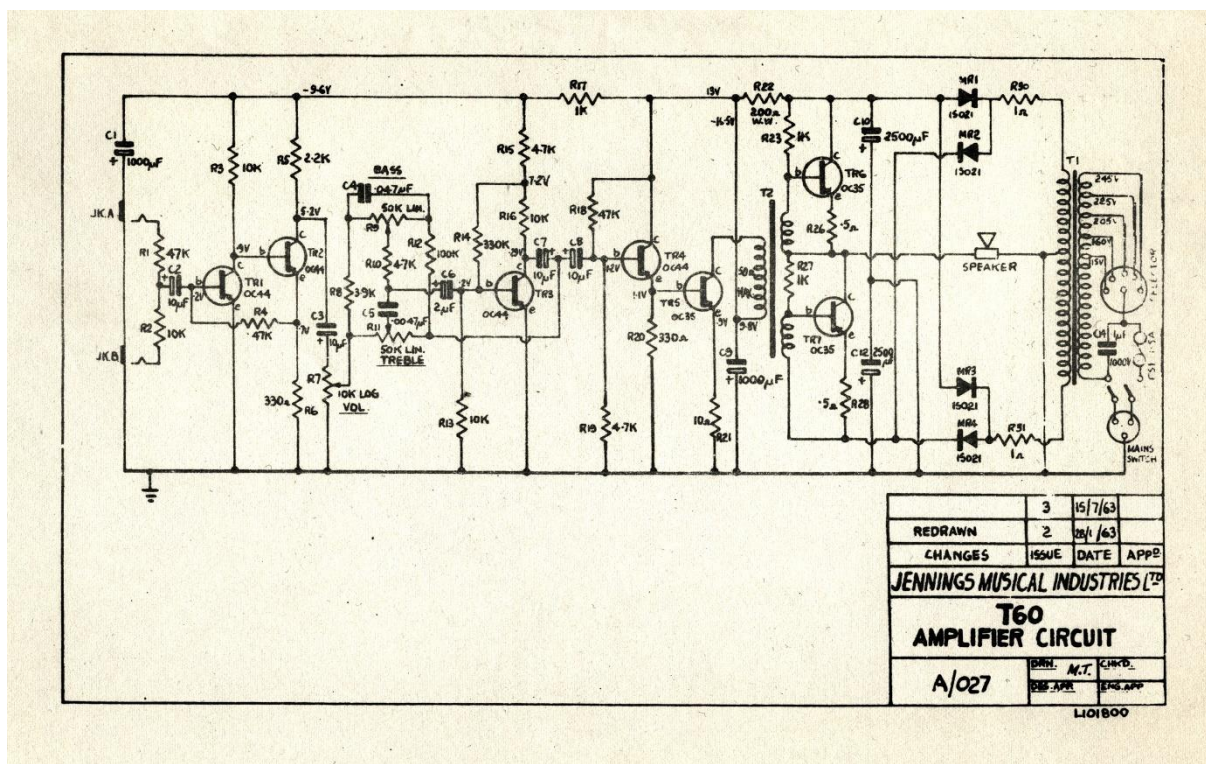
Σχήμα 41. Άτομο πυριτίου (Ημιαγωγός)

### Τύποι Τρανζίστορ

Ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους τρανζίστορ αποτελούν οι παρακάτω (ακολουθώντας τη χρονολογική σειρά):

- **JFET (Junction-gate Field Effect Transistor)**, το 1945 από τον Heinrich Welker
- **BJT (Bipolar Junction Transistor)**, το 1947 από τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley
- **MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)**, το 1959 από τους Mohamed Atalla και Dawon Kahng
- **IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)**, το 1968 από τους K. Yamagami and Y. Akagiri

Η επιτυχία που σημείωσε το πρώτο ραδιόφωνο με τρανζίστορ, το Regency TR-1 οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη των τρανζίστορ και την μαζική παραγωγή τους αλλά ταυτόχρονα σήμανε και την σταδιακή ύφεση στην παραγωγή και πώληση συσκευών με λυχνίες κενού, συμπεριλαμβανομένων και των ενισχυτών ηλεκτρικής κιθάρας και ηλεκτρικού μπάσου. Ένας εκ των πρώτων ενισχυτών με τρανζίστορ υπήρξε ο θρυλικός Vox T-60 (Σχήμα 42), χρησιμοποιώντας τρανζίστορ τύπου BJT γερμανίου, όπως το OC44 και το OC35, με μουσικούς όπως ο Paul McCartney των Beatles και ο Bill Wyman των Rolling Stones να τον προτιμούν. Η ανακάλυψη του τελεστικού ενισχυτή από τον Karl D. Swartzel Jr το 1967, ένα εξάρτημα που ουσιαστικά χρησιμοποιεί πολλά τρανζίστορ στο εσωτερικό του, έλυσε θέματα όπως το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων ενισχυτών, τα έκανε πιο αξιόπιστα, λιγότερο δαπανηρά στην κατασκευή τους και ταυτόχρονα ήταν μια πολύ καλή διέξοδος για την υλοποίηση καινοτόμων ιδεών από τους σχεδιαστές τόσο στα κυκλώματα ενισχυτών όσο και στα κυκλώματα διαμόρφωσης του ήχου, τα λεγόμενα **εφέ** (effects), για τα οποία θα μιλήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Τέλος, οδήγησε την παραγωγή ενισχυτών ηλεκτρικής κιθάρας με τρανζίστορ (solid-state amplifiers) στην κορυφή των πωλήσεων και σχεδόν εξαφάνισε τους ενισχυτές με λυχνίες κενού (tube amplifiers). Οι λάτρεις του ήχου (audiophiles) όπως και οι περισσότεροι επαγγελματίες κιθαρίστες, κινούμενοι αντίθετα από το ρεύμα, χρησιμοποιούν μέχρι και σήμερα ενισχυτές λυχνιών κενού και όχι solid-state ενισχυτές. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό καθώς και η σύγκριση των δύο κόσμων των ενισχυτών θα γίνει αφού εξετάσουμε τα στάδια ενίσχυσης, τους διάφορους τύπους ακουστικών ενισχυτών, τις κλάσεις και τις διαφορές τους.

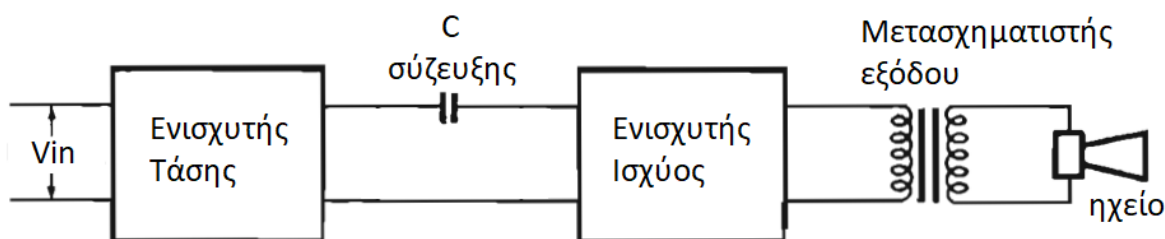


Σχήμα 42. Σχηματικό Vox T-60 (voxt60.org.uk)

## 2.5 Κλάσεις Ενισχυτών

Όπως έχει αποτυπωθεί και στην αρχή του κεφαλαίου της Ηλεκτρικής Ενίσχυσης (βλ. Σχήμα 5, σελ.7), τα στάδια μιας ενισχυτικής διάταξης ακουστικού σήματος μπορεί να διαφέρουν από κύκλωμα σε κύκλωμα, όμως υπάρχουν κάποια βασικά στάδια που υπάρχουν σε όλα τα κυκλώματα ενίσχυσης ανεξαιρέτως. Τα στάδια αυτά είναι η **παραγωγή** του ήχου από οποιαδήποτε πηγή (ανθρώπινη φωνή, χορδή ηλεκτρικής κιθάρας) και η μετατροπή τους σε ηλεκτρικό σήμα χαμηλού πλάτους από κάποιο όργανο μετατροπής (μικρόφωνο, μαγνήτες), η **προενίσχυση** (ή ενίσχυση πλάτους σήματος, τάσης), και η **ενίσχυση ισχύος** (ή τελική ενίσχυση). Έχοντας καλύψει το στάδιο παραγωγής και μετατροπής του ήχου σε ηλεκτρικό σήμα, όπως και τη λειτουργία των ενεργών ηλεκτρονικών στοιχείων που επιτρέπουν την ανόρθωση και ενίσχυση του σήματος, πλέον μπορούμε να αναλύσουμε τα στάδια προενίσχυσης και ενίσχυσης ισχύος.

Οι μαγνήτες μιας ηλεκτρικής κιθάρας, όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, παράγουν σήματα  $< 1V$  (κινούνται μεταξύ του εύρους 100-300mV κατά μέσο όρο). Η προενισχυτική διάταξη του εκάστοτε κυκλώματος είναι αρμόδια για την πρώτη ενίσχυση του σήματος και πιο συγκεκριμένα στοχεύει σε κέρδος τάσης τέτοιο, ώστε το σήμα να είναι διαχειρίσιμο για ηχογράφιση, μίξη από κονσόλες, περαιτέρω επεξεργασία από ειδικές μονάδες διαμόρφωσης ή παραμετροποίησης του σήματος, αλλά και για οδήγηση στο στάδιο της ενίσχυσης ισχύος. Το σήμα αφού περάσει το στάδιο προενίσχυσης τροφοδοτείται σαν είσοδος μέσω πυκνωτή σύζευξης στο στάδιο ενίσχυσης ισχύος. Ενώ πλέον βρίσκεται σε διαχειρίσιμο επίπεδο ως προς την τάση του (line level), δεν διαθέτει την απαραίτητη ισχύ για να οδηγήσει ένα ηχείο, καθώς το ρεύμα του είναι αρκετά χαμηλό. Αυτό το έργο αναλαμβάνει το κύκλωμα του ενισχυτή ισχύος, ο οποίος μεταξύ άλλων υπερυψώνει το σήμα που δέχεται σαν είσοδο βαθμίδας (χωρίς να το ενισχύει περαιτέρω), σε σημείο τέτοιο ώστε εκείνο να μπορεί να μετασχηματιστεί με τον ανάλογο λόγο **μετασχηματισμού** προς το κατάλληλο ηχείο, έχοντας εξασφαλίσει ήδη την επιθυμητή ισχύ που ορίζει ο σχεδιαστής του κυκλώματος.



Σχήμα 43. Block διάγραμμα ενισχυτικής διάταξης

Οι ενισχυτές ισχύος χωρίζονται σε κατηγορίες (τάξεις ή αλλιώς **κλάσεις**) οι οποίες ορίζουν μεταξύ άλλων τη γωνία αγωγής  $\theta$  του ενεργού ηλεκτρονικού στοιχείου (λυχνίας ή τρανζίστορ) για την περίοδο του σήματος εισόδου, όπως και τον συντελεστή ενίσχυσης ισχύος  $\eta$ . Οι συνηθέστερες κλάσεις ενισχυτών είναι οι A, B, AB, C, D και συμβολίζονται με κεφαλαία λατινικά γράμματα, παρόλα αυτά θα επικεντρωθούμε στις κλάσεις A, B και AB καθώς εκείνες αφορούν τις λυχνίες κενού όσον αφορά κυκλώματα ενισχυτών ηλεκτρικής κιθάρας.

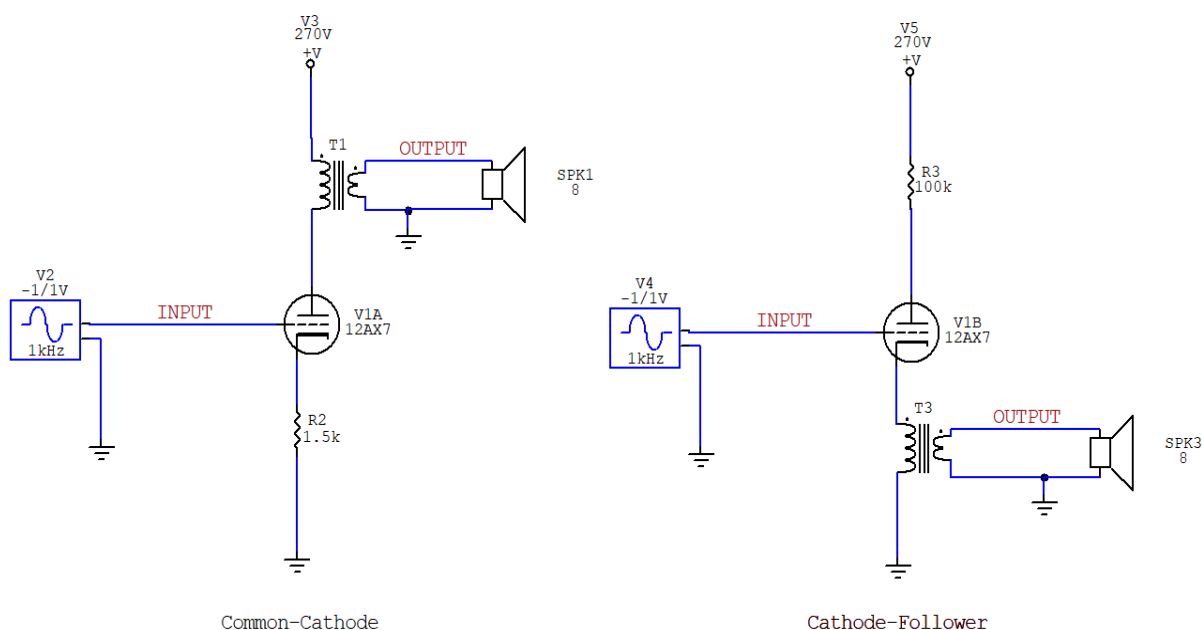
### Κλάση Α

Η κλάση Α χρησιμοποιεί μια λυχνία για την ενίσχυση της ισχύος, η οποία άγει για όλο τον κύκλο του σήματος εισόδου, επωμιζόμενη έτσι όλο του φορτίο της ενίσχυσης καθώς δεν υπάρχει δεύτερη λυχνία για να το μοιραστεί. Όπως φαίνεται και από την ευθεία φόρτου της λυχνίας 12AX7 στην ενότητα της τριόδου που αναλύθηκε (βλέπε σελ.26, Σχ.27), το ρεύμα ανόδου έχει τιμή ακόμα και όταν δεν υπάρχει σήμα εισόδου, δηλαδή όταν η τριόδος βρίσκεται στο σημείο ηρεμίας (σημείο Q). Αυτομάτως, αυτό σημαίνει ότι η λυχνία καταναλώνει ισχύ για όση διάρκεια είναι σε λειτουργία το κύκλωμα του ενισχυτή, ακόμα και αν δεν υπάρχει κάποιο σήμα προς ενίσχυση. Έτσι η κλάση Α έχει γωνία αγωγής  $\theta = 360^\circ$  (πλήρης κύκλος), και είναι αλλιώς γνωστή σαν κλάση **always on** (πάντα ανοιχτή, πάντα σε λειτουργία). Οι τρόποι συνδεσμολογίας ενός κυκλώματος ενισχυτή κλάσης Α με λυχνίες είναι παρόμοιοι με την συνδεσμολογία κοινού εκπομπού και κοινού συλλέκτη (αν χρησιμοποιούσαμε το τρανζίστορ ως ενεργό ηλεκτρονικό στοιχείο), και ονομάζονται συνδεσμολογία κοινής καθόδου (common-cathode amplifier) και κοινής ανόδου (cathode-follower amplifier) αντίστοιχα, στην οποία μάλιστα δεν υπάρχει αναστροφή φάσης του σήματος. Η μαθηματική σχέση που ορίζει τον συντελεστή ενίσχυσης ισχύος, όπου για **ωφέλιμη ισχύ εξόδου** (ή φορτίου)  $P_{OUT}$  και **ισχύ εισόδου** (ή τροφοδοτικού)  $P_{DC}$  ισχύει:

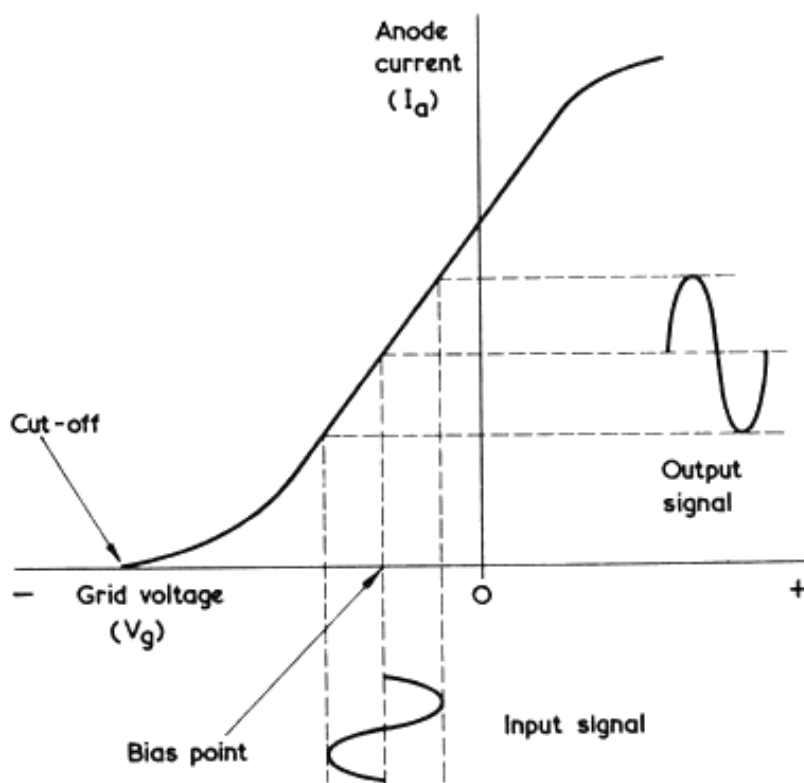
$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{DC}} \cdot 100\% \quad (15)$$

Η υψηλότερη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης ισχύος που μπορεί να φτάσει ένα κύκλωμα ενισχυτή στην κλάση Α είναι  $\eta \cong 25\%$ . Οι ενισχυτές κλάσης Α μπορούν να φτάσουν **πολύ υψηλές τιμές κέρδους τάσης  $A_v$** , εφόσον όμως η AC ευθεία φόρτου έχει πάντα μεγαλύτερη κλίση από τη DC ευθεία φόρτου, η μέγιστη τάση εξόδου p-p του ενισχυτή θα είναι πάντα μικρότερη της τάσης τροφοδοσίας:

$$MPP < V_{cc} \quad (16)$$



Σχήμα 44. Προσομοίωση κυκλωμάτων κοινής καθόδου και κοινής ανόδου (ονομαστικές τιμές στοιχείων)

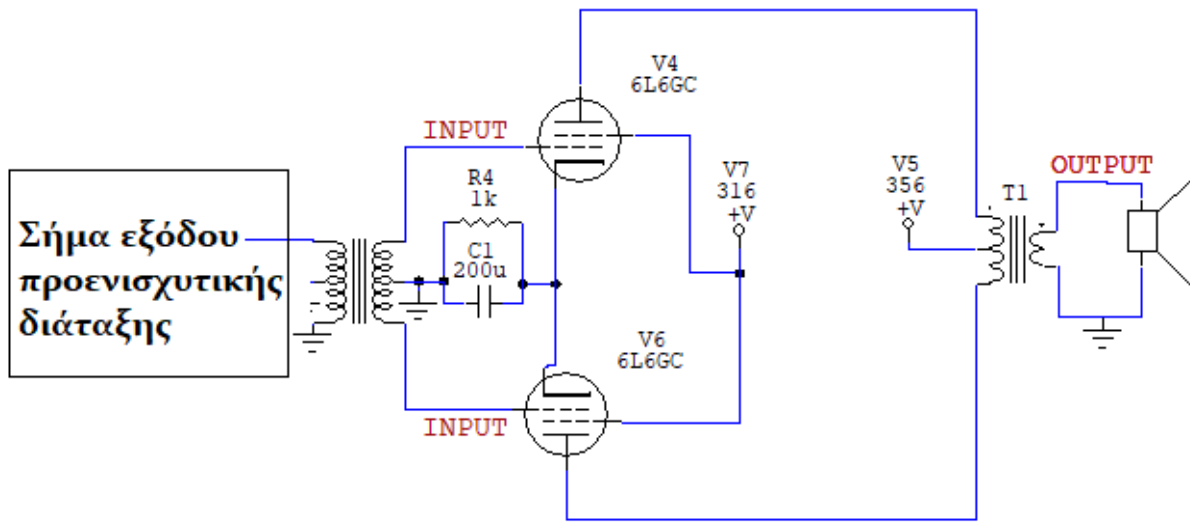


Διάγραμμα 1.

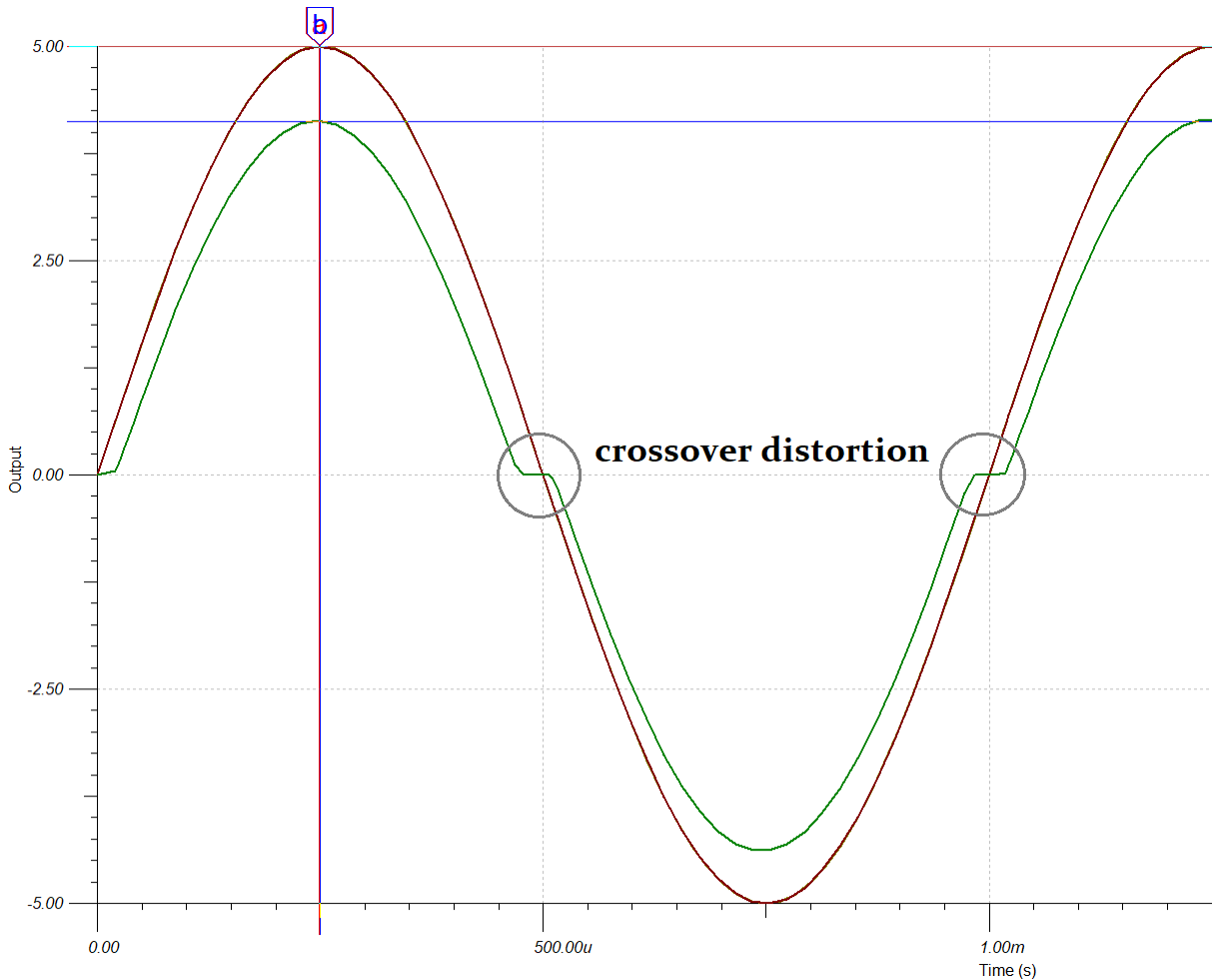
### Κλάση B

Η κλάση B χρησιμοποιεί δύο λυχνίες για την ενίσχυση της ισχύος, συνδεδεμένες κατά τρόπο τέτοιο (**push-pull**) ώστε κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος να άγει η μία λυχνία, ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο να άγει η δεύτερη λυχνία. Όταν δεν υπάρχει κάποιο σήμα εισόδου προς ενίσχυση, σε αντίθεση με την κλάση A, οι λυχνίες βρίσκονται στην αποκοπή (μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό ανοδικό ρεύμα) και άρα δεν άγουν. Επομένως, εφόσον η κάθε μια από τις λυχνίες άγει κατά μισή ημιπερίοδο, η κλάση B έχει γωνία αγωγής  $\theta = 180^\circ$ , ενώ η υψηλότερη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης ισχύος που μπορεί να φτάσει ένα κύκλωμα ενισχυτή στην κλάση B είναι  $\eta \cong 78.5\%$ .

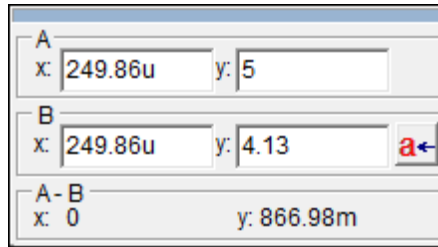
Ένα πρόβλημα που συναντάμε στα κυκλώματα ενισχυτών κλάσης B είναι η παραμόρφωση διασταύρωσης, ένα είδος παραμόρφωσης που συμβαίνει λόγω του χρόνου εναλλαγής του σήματος εξόδου από την άνοδο της μίας λυχνίας στην άνοδο της δεύτερης. Σε θεωρητικό πλαίσιο και κάτω από ιδανικές συνθήκες δεν θα έπρεπε να συμβαίνει κάτι τέτοιο καθώς, εφόσον οι συνθήκες είναι ιδανικές άρα μια εξ αυτών θα είναι και ο χρόνος εναλλαγής του σήματος στις ανόδους των δυο λυχνιών ο οποίος θεωρείται μηδενικός. Στην πράξη όμως, ο χρόνος αυτός δεν είναι μηδενικός, καθώς όταν η μία λυχνία έχει ενισχύσει την ημιπερίοδο που της αναλογεί (σύμφωνα πάντα με τη συνδεσμολογία της, χάριν παραδείγματος ας υποθέσουμε πως είναι η θετική), προχωράει στην αποκοπή ενώ η δεύτερη λυχνία αρχίζει να άγει και τελικά ενισχύει την δική της ημιπερίοδο του σήματος εισόδου (χάριν παραδείγματος την αρνητική). Το σημείο που η μία λυχνία έχει φτάσει σε αποκοπή και η δεύτερη λυχνία δεν έχει αρχίσει ακόμα να άγει (δηλαδή βρίσκεται ακόμη σε αποκοπή εν αναμονή της αγωγής της) ονομάζεται **παραμόρφωση διασταύρωσης (crossover-distortion)**.



Σχήμα 45. Προσομοίωση κυκλώματος κλάσης B (ονομαστικές τιμές ηλεκτρονικών στοιχείων)



Σχήμα 46. Κυματομορφές input output κυκλώματος κλάσης B με τρανζίστορ



Σχήμα 47. Διαφορά πλάτους (τάσης) στον άξονα y

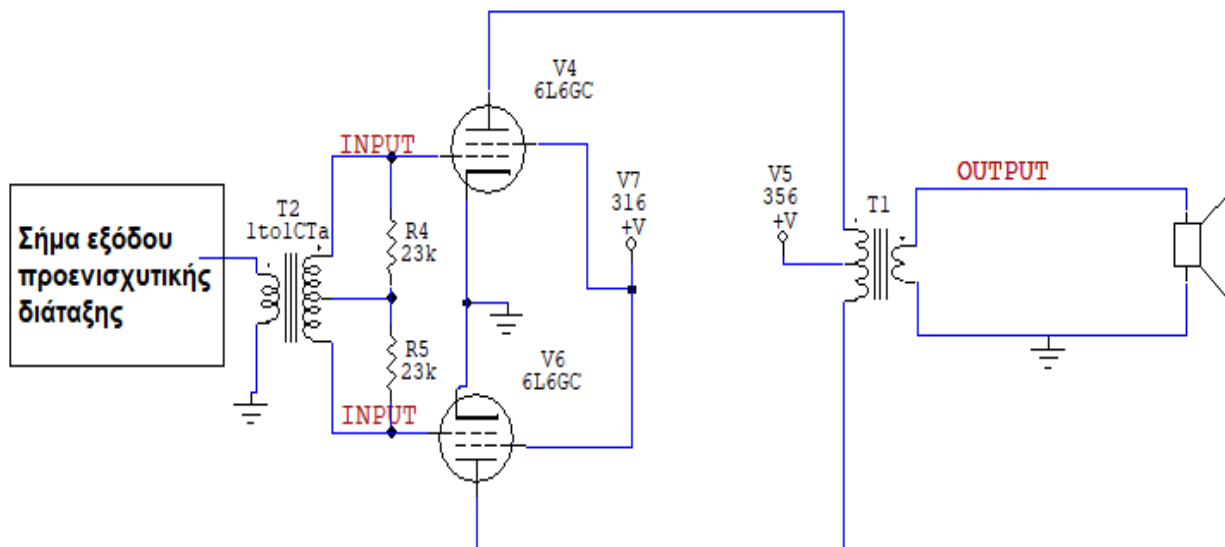
Όπως φαίνεται και παραπάνω (Σχήμα 46), εκτός από την παραμόρφωση διασταύρωσης που είναι εμφανής, το σήμα εξόδου (πράσινη κυματομορφή) είναι μικρότερο σε πλάτος από το σήμα εισόδου (κόκκινη κυματομορφή), γεγονός που γίνεται εμφανές από την μέτρηση της τάσης κορυφής των δυο σημάτων κατά την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή (Σχήμα 47), όπου η τάση κορυφής του σήματος εξόδου είναι κατά 0.87V μικρότερη της τάσης κορυφής του σήματος εισόδου, δηλαδή σχεδόν όσο το φράγμα δυναμικού μιας επαφής  $p_n \cong 0.75V$ . Οι δύο αυτές παθογένειες των κυκλωμάτων ενίσχυσης κλάσης B απορρέουν από την ίδια αιτία (βλ. σελ.43), και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτές ισχύος/ρεύματος και όχι σαν ενισχυτές τάσης καθώς το κέρδος τάσης είναι ίσο με  $A_v \cong 1$ .

### Κλάση AB

Η κλάση AB όπως υποδηλώνει και το όνομά της, συσχετίζει τις κλάσεις A και B με τρόπο τέτοιο ώστε το ανοδικό ρεύμα της κάθε λυχνίας να ρέει για παραπάνω από τη μισή ημιπερίοδο του σήματος εισόδου αλλά ταυτόχρονα για λιγότερο από έναν πλήρη κύκλο. Έτσι για κυκλώματα ενισχυτών που ανήκουν στην κλάση AB ισχύει:  $360^\circ > \theta > 180^\circ$ . Δυο υποκατηγορίες της κλάσης AB αποτελούν οι AB1 και AB2 (βλ. Πίνακα 5). Στην κλάση AB1, το πλέγμα ελέγχου δεν διαρρέεται από ρεύμα και η πόλωσή της βρίσκεται κάτω από το σημείο πόλωσης κλάσης A και πάνω από το σημείο αποκοπής (σημείο πόλωσης κλάσης B), τροφοδοτείται από ένα προηγούμενο στάδιο προενίσχυσης ενώ προσφέρει χαμηλή παραμόρφωση και χαμηλή ενίσχυση ισχύος. Σε αντίθεση με την κλάση AB1, στην κλάση AB2 το πλέγμα ελέγχου διαρρέεται από ρεύμα στις θετικές ημιπεριόδους του σήματος εισόδου και πολώνεται σχεδόν στο σημείο αποκοπής, συνήθως τροφοδοτείται από ένα προηγούμενο στάδιο ενίσχυσης ισχύος ενώ προσφέρει υψηλή παραμόρφωση και υψηλή ενίσχυση ισχύος. Ο συντελεστής ενίσχυσης ισχύος της κλάσης AB μπορεί να φτάσει μέχρι και  $\eta \cong 63\%$ .

Πίνακας 5. Σύγκριση κλάσεων AB1 και AB2

	ΚΛΑΣΗ AB1	ΚΛΑΣΗ AB2
Ρεύμα πλέγματος ελέγχου	0	Παρόν στις θετικές ημιπεριόδους
Τάση πόλωσης	Αρνητικότερη της τάσης πόλωσης κλάσης A και θετικότερη του σημείου αποκοπής	Σχεδόν στο σημείο αποκοπής
Απόδοση ισχύος	Χαμηλή	Υψηλή
Παραμόρφωση εξόδου	Χαμηλή	Υψηλή



Σχήμα 48. Προσομοίωση κυκλώματος κλάσης AB (ονομαστικές τιμές ηλεκτρονικών στοιχείων)

Παρακάτω φαίνονται οι τάσεις πόλωσης για κάθε κλάση ενισχυτών ισχύος. Όπως αναλύσαμε προηγουμένως, η κλάση A πολώνεται στη μέση της γραμμικής περιοχής της χαρακτηριστικής V-I και η κλάση B στο σημείο αποκοπής της λυχνίας. Η κλάση AB πολώνεται στη μέση των δυο σημείων πόλωσης των δυο προηγούμενων κλάσεων.

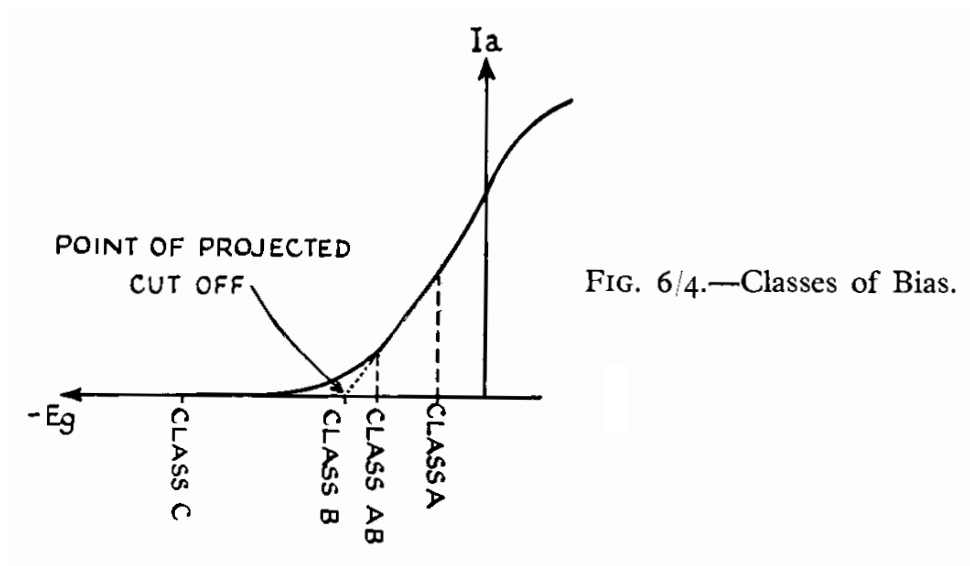


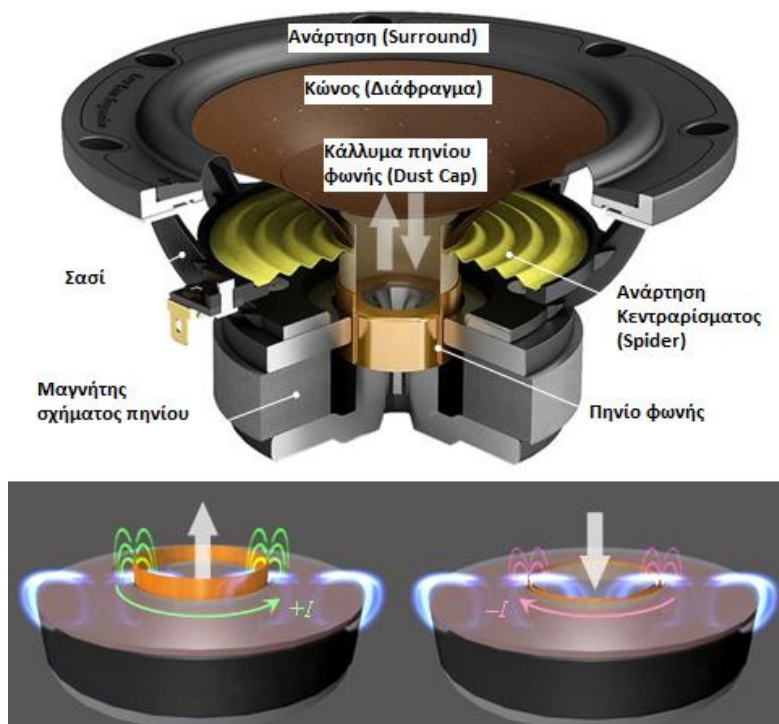
FIG. 6/4.—Classes of Bias.

Σχήμα 49. Πόλωση πλέγματος για κάθε κλάση ενισχυτών (Briggs)

## 2.6 Ηχεία

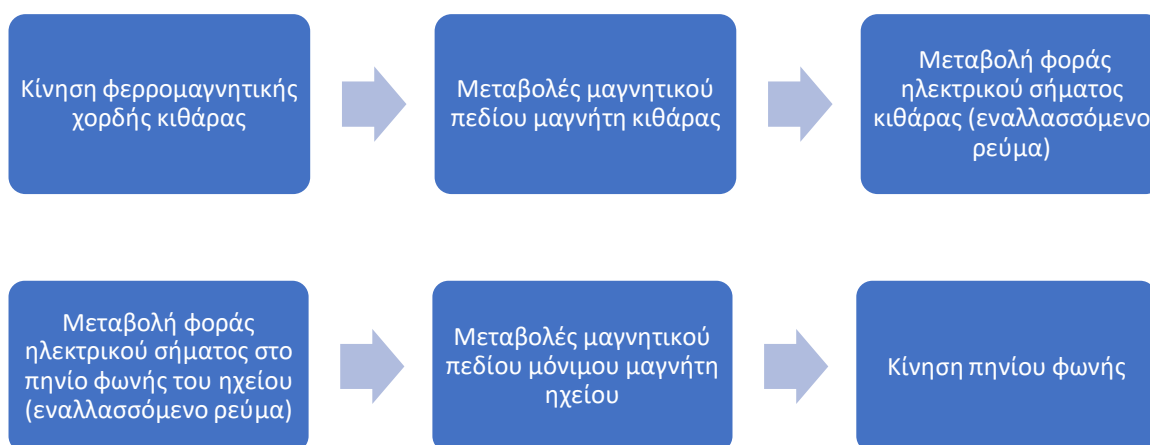
Έχοντας αναλύσει τα στάδια προενίσχυσης και ενίσχυσης ισχύος του σήματος καθώς και τις διάφορες κλάσεις ενισχυτών, πλέον είμαστε σε θέση να μετατρέψουμε το πλέον ενισχυμένο σήμα της κιθάρας σε ήχο, την αντίστροφη δηλαδή λειτουργία από εκείνη των μαγνητών που καλύψαμε στην αρχή του κεφαλαίου. Το σκοπό αυτό αναλαμβάνουν τα **ηχεία (speakers)**, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στις συσκευές εκείνες που ορίζονται ως μεταφορείς ή μορφομετατροπείς (*transducers*), συσκευές δηλαδή που μετατρέπουν κάποιο φυσικό μέγεθος (όπως φως, ήχος, πίεση κτλ.) σε ηλεκτρικό σήμα.

Τα ηχεία χωρίζονται κυρίως σε ηλεκτροστατικά, μαγνητοστατικά, χοάνης (κωνικά) και ηλεκτροδυναμικά τα οποία καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς ηχείων και για αυτό το λόγο θα αναλύσουμε τη λειτουργία τους. Ένα ηλεκτροδυναμικό ηχείο αποτελείται μεταξύ άλλων από ένα πηνίο φωνής, ουσιαστικά ένα τύλιγμα το οποίο διαρρέεται από το μετασχηματισμένο ρεύμα του ενισχυτή ήχου, δημιουργώντας έτσι μαγνητικό πεδίο γύρω από το πηνίο και φυσικά μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνήτη. Λόγω της θέσης του (στο διακένου που δημιουργείται μεταξύ των άκρων του μόνιμου μαγνήτη, Σχήμα 50), το πηνίο δημιουργεί μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη, κάνοντάς το να κινείται αξονικά, καθώς όντας ηλεκτρομαγνήτης, τότε έλκεται και τότε απωθείται από τον μόνιμο μαγνήτη. Τις αξονικές κινήσεις αυτές αξιοποιεί το διάφραγμα του ηχείου το οποίο βρίσκεται εφραπτόμενο στο πηνίο φωνής, και τις μεταφράζει σε πυκνώματα και αραιώματα των μορίων του αέρα που υπάρχουν στον χώρο που βρίσκεται το ηχείο, δημιουργώντας έτσι ήχο. Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά η αντίθετη λειτουργία ηχείου και μαγνήτη κιθάρας (επάνω αλληλουχία μαγνήτης, κάτω αλληλουχία ηχείο).



Σχήμα 50. Ηλεκτροδυναμικό ηχείο (Spector Sci-Tech LLC)

Ο ισχυρισμός που κάναμε στην προηγούμενη παράγραφο για αντίθετη λειτουργία των ηχείων ως προς τους μαγνήτες ηλεκτρικής κιθάρας επιβεβαιώνεται, καθώς στους μαγνήτες η κίνηση της ηλεκτρομαγνητικής χορδής μιας κιθάρας προκαλεί μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη και κατ' επέκταση δημιουργία εναλλασσόμενου ρεύματος (με μεταβολές στη φορά<sup>1</sup>). Στην αντίθετη περίπτωση του ηχείου, η διαρροή του πηνίου φωνής από εναλλασσόμενο ρεύμα (ενισχυμένο σήμα κιθάρας με μεταβολές στη φορά) προκαλεί μεταβολή στο μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη του ηχείου και συνεπώς αξονικές κινήσεις του πηνίου με κατεύθυνση που υπαγορεύει ουσιαστικά η φορά του ίδιου του σήματος (νόμος Lenz, βλέπε υποκεφάλαιο 2.2).



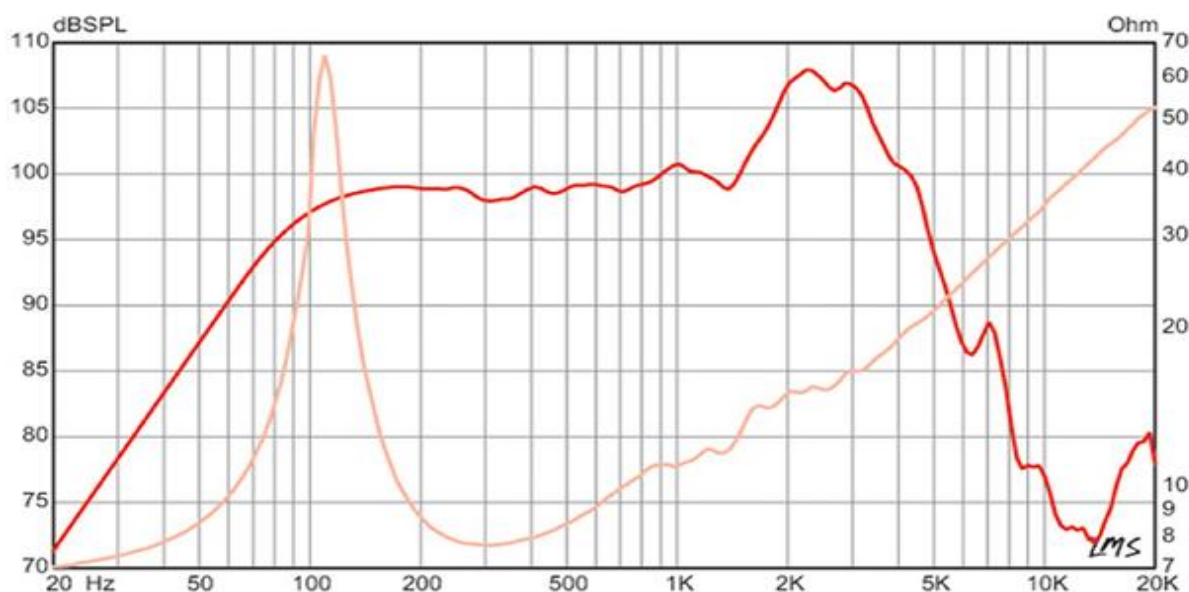
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχείου που πρέπει να γνωρίζει ο σχεδιαστής ενός ολοκληρωμένου ενισχυτή ήχου (κύκλωμα ενισχυτή, καμπίνα, μεγάφωνο κτλ.) καθώς και ο τελικός χρήστης ενός τέτοιου ενισχυτή είναι τα εξής:

- Συχνοτική Απόκριση:** το εύρος συχνοτήτων (ή με άλλα λόγια μουσικών τόνων) που μπορεί να αναπαράγει ένα ηχείο. Απεικονίζεται από ένα διάγραμμα το λεγόμενο διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης (**frequency response chart**). Ο άξονας Y του Σχήματος απεικονίζει τα επίπεδα ηχητικής πίεσης δηλαδή με απλά λόγια την «ένταση» του ήχου με μονάδα μέτρησης τα **dB**, ενώ ο άξονας X απεικονίζει τις συχνότητες που αποδίδει το ηχείο (θεωρητικά το ακουστό φάσμα του ανθρώπινου αυτιού) με μονάδα μέτρησης **Hz**. Ένα θεωρητικά άριστο ηχείο θα υποθέταμε ότι απεικονίζει όλες τις συχνότητες στα ίδια επίπεδα έντασης έτσι ώστε να αποδίδονται το ίδιο καλά στον ακροατή. Αυτό ισχύει σε κάποιες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στα ηχεία τύπου monitor που χρησιμοποιούνται σε studios ηχογράφησης και παραγωγής έτσι ώστε ο ηχολήπτης να αντιλαμβάνεται όλες τις μουσικές νότες το ίδιο διακριτά. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για ένα ηχείο ενισχυτή ηλεκτρικής κιθάρας καθώς ο ήχος θα έβγαине μουντός, επίπεδος (flat) και χωρίς ταυτότητα. Το Σχήμα 12 παρακάτω, απεικονίζει μια τυπική συχνοτική απόκριση ενός τέτοιου ηχείου, όπου παρατηρούμε αυξομειώσεις στην καμπύλη της συχνοτικής απόκρισης (ή χρωματισμούς του ήχου). Ακόμη, εφόσον η κιθάρα παράγει κυρίως χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, βλέπουμε πως το ηχείο σε εκείνο το εύρος συχνοτήτων έχει μια σχεδόν ομοιόμορφη απόκριση. Ακόμη, αξίζει να αναφέρουμε την **συχνότητα συντονισμού** ως κύριο χαρακτηριστικό των ηχείων. Από τη Φυσική γνωρίζουμε ότι η συχνότητα συντονισμού  $f_0$  ή  $f_r$  ένα σώμα είναι το φαινόμενο όπου η συχνότητα της αιτίας που διέγειρε το σώμα καθώς και η ιδιοσυχνότητα του ίδιου το σώματος είναι ίσες. Ιδιοσυχνότητα ορίζεται (*συνέχεια πίσω σελίδα*)

<sup>1</sup> Η αναφορά στη μεταβολή της φοράς του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι μεν πλεονασμός αλλά γίνεται προς επεξήγηση του νόμου Lenz για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του ηχείου και/ή των μαγνητών.

η συχνότητα ενός σώματος κατά την οποία τείνει να ταλαντώνεται χωρίς να του ασκηθεί κάποια εξωτερική διέγερση. Όταν παρατηρείται συντονισμός τότε μπορούμε να βρούμε εύκολα τη συχνότητά του, καθώς είναι εκείνη κατά την οποία η σύνθετη αντίσταση κορυφώνεται. Στο Σχήμα 51, βλέπουμε πως η συχνότητα συντονισμού του συγκεκριμένου ηχείου βρίσκεται περίπου στα 110Hz με την σύνθετη αντίσταση να είναι περίπου στα 65Ω. Όσο η συχνότητα αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η σύνθετη αντίσταση του ηχείου και αυτό επαληθεύεται αν αναλογιστούμε ότι το ηχείο διαθέτει ένα πηνίο φωνής. Όπως γνωρίζουμε τα πηνία παρουσιάζουν επαγωγική αντίδραση στο εναλλασσόμενο ρεύμα η οποία δίνεται από τη σχέση:

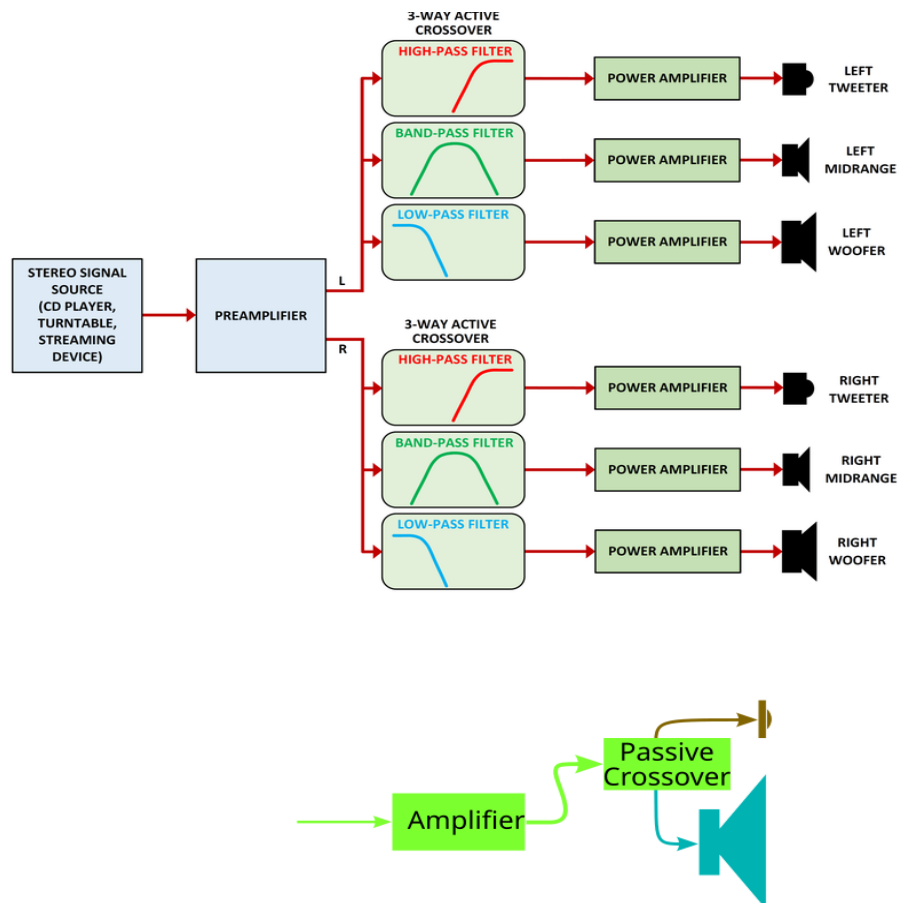
$$X_L = 2\pi fL \quad (17)$$



Σχήμα 51. Συχνότητα (κόκκινη γραμμή), Σύνθετη αντίσταση (πορτοκαλί γραμμή) (Sweetwater)

Μάλιστα, για την βέλτιστη απόδοση των συχνοτήτων από ένα ηχοσύστημα, και στην περίπτωση μας από ένα ηχείο, εφαρμόζεται η τεχνική **crossover**. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια αλληλουχία ηλεκτρονικών παθητικών φίλτρων (passive crossover) που χρησιμοποιούν παθητικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα (πυκνωτές, πηνία, αντιστάσεις) τα οποία αποσκοπούν στο διαχωρισμό συχνοτήτων ανάλογα με το συχνοτικό εύρος στο οποίο ανήκουν. Όπως έχουμε ήδη αναλύσει σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα ηλεκτροακουστικό σήμα συντελείται από ένα πλήθος συχνοτήτων. Ένα τέτοιο σήμα, εφόσον εξέρχεται από έναν ενισχυτή ήχου και εισάγεται σε ένα ηχείο με παθητικά φίλτρα crossover, αρχικά αποδομείται συχνοτικά από τα φίλτρα. Στη συνέχεια οι πλέον διαχωρισμένες συχνότητες τροφοδοτούνται σε ξεχωριστά μεγάφωνα, περικλειόμενα από την ίδια (στην πλειοψηφία τους ξύλινη) καμπίνα. Πλέον, οι υψηλές συχνότητες θα ακουστούν από το **tweeter** μεγάφωνο, χρησιμοποιώντας υψιπερατό φίλτρο (high-pass filter), οι μεσαίες από το **midrange** μεγάφωνο, χρησιμοποιώντας φίλτρο διέλευσης ζώνης (band-pass filter), ενώ οι χαμηλές συχνότητες από το **woofer** μεγάφωνο χρησιμοποιώντας χαμηλοπερατό φίλτρο (low-pass filter). Η διαφορά μιας παθητικής και μιας ενεργής διάταξης crossover είναι ότι στην περίπτωση των ενεργών φίλτρων χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων και ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές). Ακόμη, σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ενισχυτή ήχου, τα ενεργά φίλτρα βρίσκονται μεταξύ του προενισχυτή και του ενισχυτή ισχύος.

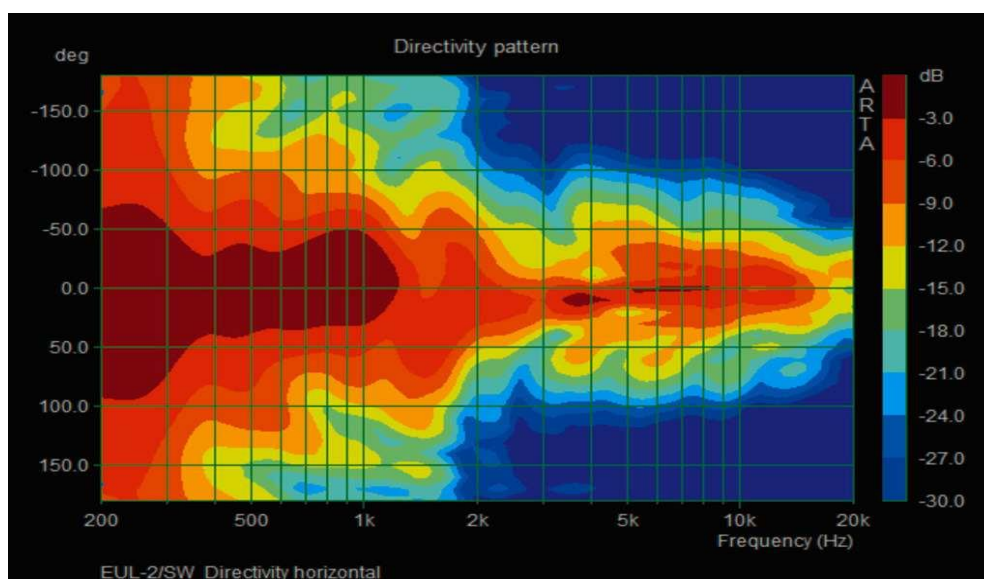
Στην πραγματικότητα ο ενισχυτής ήχου δεν είναι ένας αλλά τόσοι όσα και τα ενεργά φίλτρα, καθώς για κάθε ξεχωριστό μεγάφωνο (tweeter, woofer κοκ) χρειάζεται ξεχωριστός ενισχυτής ισχύος. Στο παρακάτω Σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε τη διαφορετική διάταξη των ενεργών και παθητικών crossover αντίστοιχα.



Σχήμα 52. Active crossover και passive crossover (wiki)

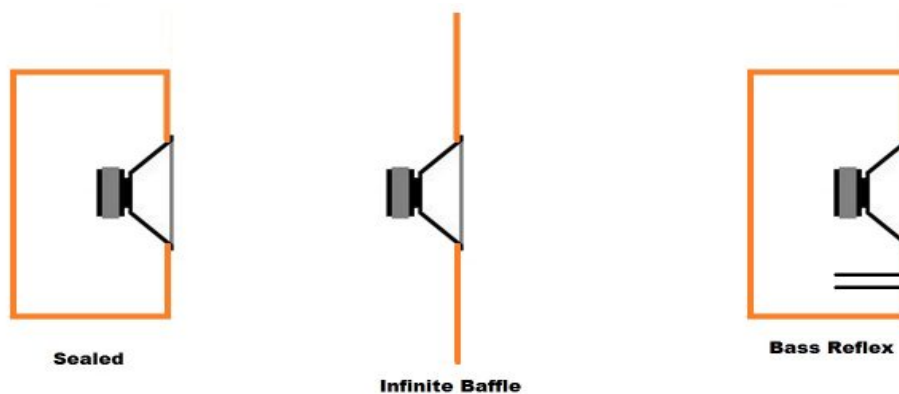
- Ονομαστική Ισχύς:** Χωρίζεται σε δυο μεγέθη, την **μέγιστη μέση συνεχή ισχύ** (max average continuous power) και την **ισχύ προγράμματος** (program power), με μονάδα μέτρησης το **W**. Η μέγιστη μέση συνεχής ισχύς είναι το ανώτατο όριο ισχύος που μπορεί να καταναλώσει ένα ηχείο πριν φτάσει σε κορεσμό, πριν ξεπεράσει δηλαδή τα μηχανικά ή θερμικά του όρια. Ένα ηλεκτρικό φορτίο, καταναλώνει τόση ισχύ όση υπαγορεύει το ίδιο το σήμα, στην περίπτωση ενός ηχείου για παράδειγμα η ισχύς μεταβάλλεται όσο μεταβάλλεται και το σήμα της κιθάρας, λόγω διαφορετικών παραγόντων που προκύπτουν από τους μαγνήτες ως τις ρυθμίσεις του ενισχυτή. Η ισχύς προγράμματος από την άλλη, αποτελεί ισχύ ανώτερη της μέγιστης μέσης συνεχής ισχύος (σχεδόν διπλάσια τιμή), η οποία μπορεί να διαρκέσει για πολύ μικρό χρονικό περιθώριο (burst). Ένας τελικός χρήστης ενισχυτή-ηχείων μπορεί να κινείται σε ασφαλή όρια αν ο ενισχυτής έχει για παράδειγμα ισχύ εξόδου 10W και τα ηχεία έχουν ισχύ προγράμματος 20W.

- Ονομαστική Σύνθετη Αντίσταση (Εμπέδηση):** Το ρεύμα που οδηγείται στο ηχείο από την έξοδο του ενισχυτή ισχύος είναι εναλλασσόμενο, επομένως το ηχείο όντας ουσιαστικά φορτίο, προβάλλει σύνθετη αντίσταση (ή εμπέδηση) στο σήμα. Με τον ίδιο τρόπο όπου το πλάτος και η συχνότητα του σήματος διαρκώς μεταβάλλονται, έτσι μεταβάλλεται και η σύνθετη αντίσταση του ηχείου το οποίο εξαρτάται άμεσα και από τα δυο μεγέθη, για την σωστή απόδοση του ενισχυμένου σήματος. Η σύνθετη αντίσταση έχει μονάδα μέτρησης το  $\Omega$ , ενώ είναι επαγωγική στις υψηλές και χωρητική στις χαμηλές συχνότητες. Οι τιμές σύνθετης αντίστασης των ηχείων στην αγορά κυμαίνονται από 4-16  $\Omega$ , και περιγράφουν κατά μέσο όρο την τιμή της σύνθετης αντίστασης για ένα εύρος συχνοτήτων. Συνήθως η ονομαστική τιμή της μπορεί να διακριθεί από ένα διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης, όντας η χαμηλότερη τιμή σύνθετης αντίστασης μετά τη συχνότητα συντονισμού. Είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί ένα ηχείο με τη σωστή τιμή σύνθετης αντίστασης, καθώς όσο αυτή μικραίνει τόσο περισσότερο ρεύμα τραβάει το ηχείο, καταναλώνοντας έτσι περισσότερη ισχύ. Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι το ηχείο κινδυνεύει με θερμική ή μηχανική βλάβη, αν η ισχύς που καταναλώνει υπερβαίνει την ονομαστική του ισχύ.
- Κατευθυντικότητα:** Ορίζει τη συχνοτική απόκριση ενός ηχείου σε γωνίες πέρα από το νοητό άξονά του. Ένα ιδανικό ηχείο διατηρεί προς κάθε κατεύθυνση και για όλες τις συχνότητες, τις οποίες πραγματεύεται ο ενισχυτής που προηγείται, την ίδια διακριτή ένταση ήχου (sound pressure level), κάτι που στην πραγματικότητα είναι φυσικά ανέφικτο. Τα ηχεία κατηγοριοποιούνται σε ηχεία μικρού ή μεγάλου κατευθυντικού εύρους, ενώ υπάρχουν αρκετοί τρόποι να απεικονιστεί η κατευθυντικότητα ενός ηχείου. Ένας από αυτούς είναι το ισοβαρές διάγραμμα, στο οποίο ο άξονας Y εκπροσωπεί την γωνία σε μοίρες, ενώ ο άξονας X την συχνότητα σε Hz. Δεξιά συνήθως, απεικονίζεται η ένταση του ήχου σε dB. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει τιμές μικρότερες από την εκάστοτε ένταση αναφοράς για κάθε ηχείο (μια τιμή έντασης η οποία αντιπροσωπεύει ευδιάκριτα τον ήχο), και μάλιστα υπάρχει χρωματική κατηγοριοποίηση για μεγαλύτερη ευκολία στην ανάγνωση του διαγράμματος. Στο συγκεκριμένο ηχείο οι συχνότητες πριν τα 350 Hz (οι οποίες γνωρίζουμε ότι αποτελούν μπάσες και χαμηλά μεσαίες συχνότητες) έχουν υψηλό επίπεδο απόδοσης από το ηχείο καθώς η απώλεια που παρατηρείται, ακόμα και στις συχνότητες της τάξεως των 175°, δεν ξεπερνά τα -6 dB. Ένα σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι οι χαμηλές συχνότητες έχουν από τη φύση τους μεγαλύτερο μήκος κύματος από τις υψηλές, και άρα διασπείρονται συχνότερα και σε μεγαλύτερο εύρος από ότι οι υψηλές συχνότητες.



Σχήμα 53. Ισοβαρές διάγραμμα

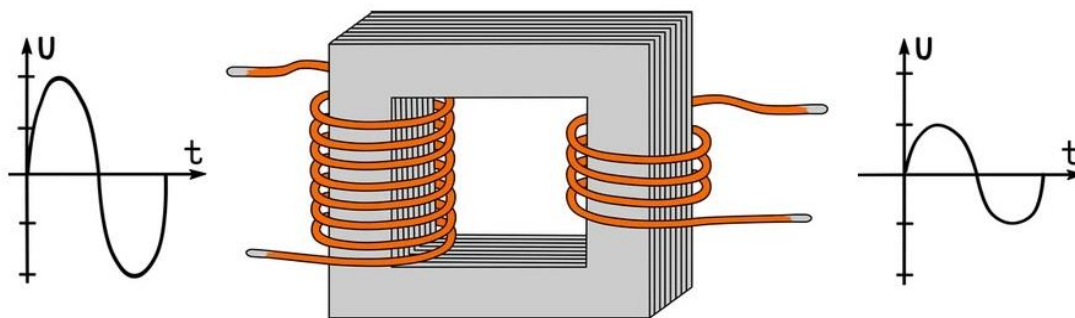
- Καμπίνα:** Μερικοί από τους πιο διαδεδομένους τύπους καμπινών είναι οι καμπίνες κλειστού τύπου (**sealed**), ανοικτού τύπου ή απείρου διαφράγματος (**infinite-baffle**) και ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων (**bass-reflex**), το όνομα του οποίου προκύπτει από τον λόγο που θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Παράλληλα με τον ήχο που παράγεται από ένα μεγάφωνο και ακτινοβολείται από το μπροστά μέρος του μεγάφωνου (όπου βρίσκεται το διάφραγμα του ηχείου), παράγονται ηχητικά κύματα και από το πίσω μέρος του μεγάφωνου. Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, οι συχνότητες με μεγαλύτερο μήκος κύματος είναι οι χαμηλές, επομένως και έχουν τη δυνατότητα να ανακλαστούν μέσα στο χώρο μιας καμπίνας -ή και μη-, και τα ηχητικά κύματα από το μπροστινό και το πίσω μέρος του μεγάφωνου να συναντηθούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναίρεσή τους καθώς διαφέρουν φασικά κατά  $180^\circ$ . Εδώ έρχεται η συμβολή της καμπίνας και η κρισιμότητα της επιλογής της, για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι καμπίνες bass-reflex, εκτός από το μεγάφωνο και την καμπίνα, διαθέτουν μια οπή που στην πραγματικότητα αποτελεί ένα σωλήνα, και αποσκοπεί στον συντονισμό της ιδιοσυχνότητάς του με τις συχνότητες που παράγονται στο εσωτερικό της καμπίνας από το πίσω μέρος του μεγάφωνου. Η αρχή λειτουργίας πίσω από αυτή την ιδέα προέρχεται από τον συντονισμό Helmholtz, ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί τον συντονισμό του αέρα μέσα σε μια οπή, όπως για παράδειγμα συναντάμε όταν φυσάμε μέσα στην οπή ενός μπουκαλιού. Ο αέρας στο εσωτερικό του σωλήνα έχει μια ορισμένη μάζα και ο αέρας στο εσωτερικό της καμπίνας έχει μια ελαστικότητα (δηλαδή λόγω εξωτερικών παραγόντων μεταβάλλεται το σχήμα ή ο όγκος του με δυνατότητα επαναφοράς τους στην αρχική τους θέση). Όταν το μεγάφωνο παράγει ήχο ορισμένης συχνότητας η οποία είναι ίδια με την ιδιοσυχνότητα του σωλήνα, τότε ο αέρας μέσα στο σωλήνα ταλαντώνεται, και ο σωλήνας λειτουργεί σαν ένα δεύτερο μεγάφωνο. Συχνότητες μεγαλύτερες από τη συχνότητα συντονισμού δεν αναπαράγονται από το σωλήνα καθώς ο αέρας μέσα στην οπή του έχει πολύ μεγάλη μάζα για να διαπεραστεί από ένα ηχητικό κύμα τέτοιας συχνότητας. Από την άλλη, συχνότητες μικρότερες από τη συχνότητα συντονισμού μπορούν να διαπεράσουν το σωλήνα καθώς η μάζα του αέρα στο εσωτερικό του δεν είναι αρκετή για να εγκλωβίσει το ηχητικό κύμα στο εσωτερικό της καμπίνας. Η συχνότητα συντονισμού του σωλήνα έχει άμεση σχέση με το υλικό, το σχήμα, τη διάμετρο και το μήκος του, και επομένως αν μεταβάλλουμε τις διαστάσεις του σωλήνα ή της καμπίνας, μπορούμε να μεταβάλλουμε και τη συχνότητα συντονισμού της κατασκευής. Στις καμπίνες ανοικτού τύπου, οι μόνες συχνότητες του μπροστινού και του πίσω μέρους του μεγάφωνου που μπορούν να αλληλοεπιδράσουν είναι οι πολύ χαμηλές, καθώς όπως είναι φυσικό, έχουν ακόμα μεγαλύτερο μήκος κύματος από τις χαμηλές συχνότητες. Στις καμπίνες κλειστού τύπου, η καμπίνα έχει κατασκευαστεί με στεγανότητα έτσι ώστε να εγκλωβίζει τον αέρα στο εσωτερικό της, χωρίς όμως να υπάρχει απομόνωση των δυο κυμάτων και άρα εξάλειψη του φαινομένου της αναίρεσής τους.



Σχήμα 54. Τύποι καμπινών ηχείου (audio judgement)

## 2.7 Μετασχηματισμός Σήματος

Καθώς το σήμα στην έξοδο ενός ενισχυτή ισχύος με λυχνίες έχει μεγάλο πλάτος και μικρό ρεύμα, είναι αδύνατο να οδηγηθεί κατευθείαν στους ακροδέκτες ενός ηχείου, τα οποία όπως έχουμε αναφέρει παρουσιάζουν σύνθετη αντίσταση της τάξεως των 2-16 Ω. Είναι εμφανές, όπως γνωρίζουμε από τον νόμο του Ohm (βλ. σελ. 23) και σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω, πως το ηχείο θα χρειάζεται μια υψηλή τιμή ρεύματος, με αποτέλεσμα τη θερμική ή μηχανική του βλάβη. Έτσι, χρειαζόμαστε μια συσκευή (είτε σπανιότερα μια διάταξη) η οποία ουσιαστικά θα μεταφέρει το ηλεκτρικό σήμα από το κύκλωμα του ενισχυτή, στο κύκλωμα του ηχείου. Το έργο αυτό, που ονομάζεται **ηλεκτρική σύζευξη (coupling)**, αναλαμβάνει ο **μετασχηματιστής εξόδου (output transformer)**, και επιτυγχάνεται αντισταθμίζοντας τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον, με τη σύνθετη αντίσταση που χρειάζεται μια λυχνία ισχύος στην έξοδο του ενισχυτή για να δώσει την επιθυμητή για εμάς ισχύ.



Σχήμα 55. Μετασχηματιστής (Shutterstock)

### Αρχή Λειτουργίας

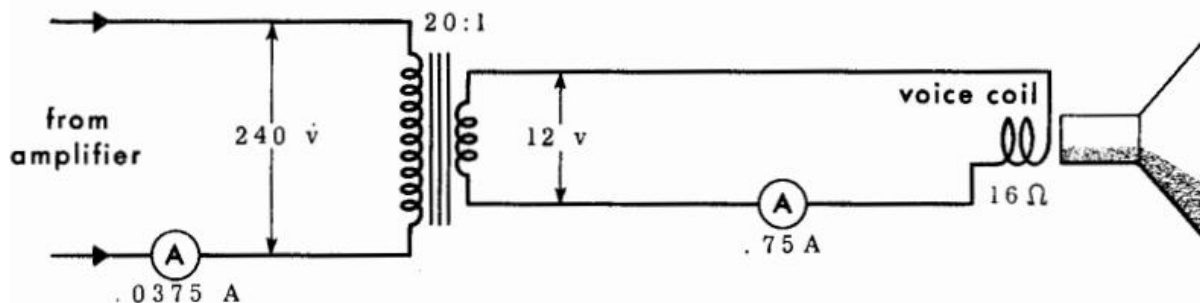
Ο μετασχηματιστής βασίζεται στις θεωρίες του ηλεκτρομαγνητισμού και της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (βλ. σελ. 8). Αποτελείται από έναν σιδηρομαγνητικό πυρήνα, στα δύο άκρα του οποίου υπάρχουν τυλίγματα από χαλκό, το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα. Εφόσον το πρωτεύον διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, μεταβάλλει συγχρόνως τη μαγνητική ροή του πυρήνα. Η μεταβαλλόμενη αυτή ροή διαπερνάει το δευτερεύον τύλιγμα και επάγει σε αυτό ηλεκτρεγερτική δύναμη. Στην πραγματικότητα, το πρωτεύον και το δευτερεύον δεν είναι ένα, αλλά πολλά διαδοχικά τυλίγματα (ή περιελίξεις) γύρω από τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα (Σχήμα 55). Ο αριθμός των διαδοχικών τυλιγμάτων στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, σε σχέση πάντα με τον αριθμό των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος, καθορίζει το πλάτος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που θα του επαχθεί, όπως ορίζει η παρακάτω σχέση (18), όπου για  $P$  ισχύει πρωτεύον,  $S$  ισχύει δευτερεύον,  $V$  ισχύει ΗΕΔ ή τάση και  $N$  ισχύει αριθμός τυλιγμάτων:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (18)$$

Ακόμη, το τετράγωνο του λόγου τυλιγμάτων  $N$  επί της αντίστασης του συνδεδεμένου φορτίου στα άκρα του δευτερεύοντος ισούται με τη σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζεται στο πρωτεύον, όπως φανερώνει η παρακάτω σχέση (19), όπου για φορτίο  $L$ , αντίσταση  $R$  και σύνθετη αντίσταση  $Z$  ισχύει:

$$Z_P = N^2 \cdot R_L \quad (19)$$

Χρησιμοποιώντας τις δύο προαναφερθείσες μαθηματικές σχέσεις καθώς και το νόμο του Ohm, ενώ παράλληλα γνωρίζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά αλλά και όρια των εξαρτημάτων που θα επιλέξουμε ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες ενίσχυσης, μπορούμε εύκολα πλέον σχεδιάσουμε μια διάταξη έτσι ώστε να οδηγήσουμε το ενισχυμένο σήμα προς το ηχείο. Ένα σημαντικό στοιχείο των μετασχηματιστών είναι ότι η ισχύς διατηρείται στην ίδια τιμή και στα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή, λόγω του νόμου της **αρχής διατήρησης της ενέργειας**. Έτσι, έχοντας επιλέξει ένα ηχείο σύνθετης αντίστασης  $16 \Omega$  και έχοντας υπολογίσει ότι θέλουμε να καταναλώνει ισχύ  $9 \text{ W}$ , επιλέγουμε αρχικά μια λυχνία ισχύος ικανή – όντας ενεργό ηλεκτρονικό στοιχείο - να αποδώσει  $9 \text{ W}$  ισχύος χωρίς παραμορφώσεις και θορύβους, κάτι που θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα. Εφόσον γνωρίζουμε την ισχύ που θα καταναλώνει το φορτίο **στο δευτερεύον** αλλά και τη σύνθετη του αντίσταση, υπολογίζουμε με το νόμο του Ohm ότι το ηχείο θα χρειαστεί  $12 \text{ V}$  και  $0.75 \text{ A}$ . Στα φύλλα δεδομένων των λυχνιών, αναγράφονται – συνήθως τρεις – τιμές σύνθετης αντίστασης που χρειάζεται η λυχνία σαν φορτίο (load impedance) έτσι ώστε να αποδίδει την ανάλογη ισχύ στην έξοδο. Έτσι εφόσον γνωρίζουμε την ισχύ που θα αποδίδεται από την λυχνία ισχύος καθώς και τη σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος, όπως αυτή αναγράφεται στα φύλλα δεδομένων της λυχνίας, μπορούμε να υπολογίσουμε πως για ισχύ  $9 \text{ W}$  και σύνθετη αντίσταση  $6400 \Omega$  **στο πρωτεύον** του μετασχηματιστή, η λυχνία ισχύος θα λειτουργεί με  $240 \text{ V}$  και  $37.5 \text{ mA}$ . Με τον τρόπο αυτό στο παραπάνω παράδειγμα, έχουμε αντισταθμίσει τη σύνθετη αντίσταση δευτερεύοντος και πρωτεύοντος ενώ έχουμε διατηρήσει την ισχύ στην ίδια τιμή και για τα δύο τυλίγματα (ΑΔΕ), έχοντας υποβαθμίσει την τάση και αναβαθμίζοντας το ρεύμα του δευτερεύοντος σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του πρωτεύοντος. Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι το κύκλωμα του ενισχυτή και το κύκλωμα του ηχείου έχουν υποστεί επιτυχή σύζευξη (coupling), ενώ ίσως το σημαντικότερο από όλα είναι ότι ο μετασχηματιστής που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει λόγο τυλιγμάτων 20 προς 1.



Σχήμα 56. Μετασχηματισμός (Crowhurst)

## 2.8 Θόρυβος και Παραμόρφωση

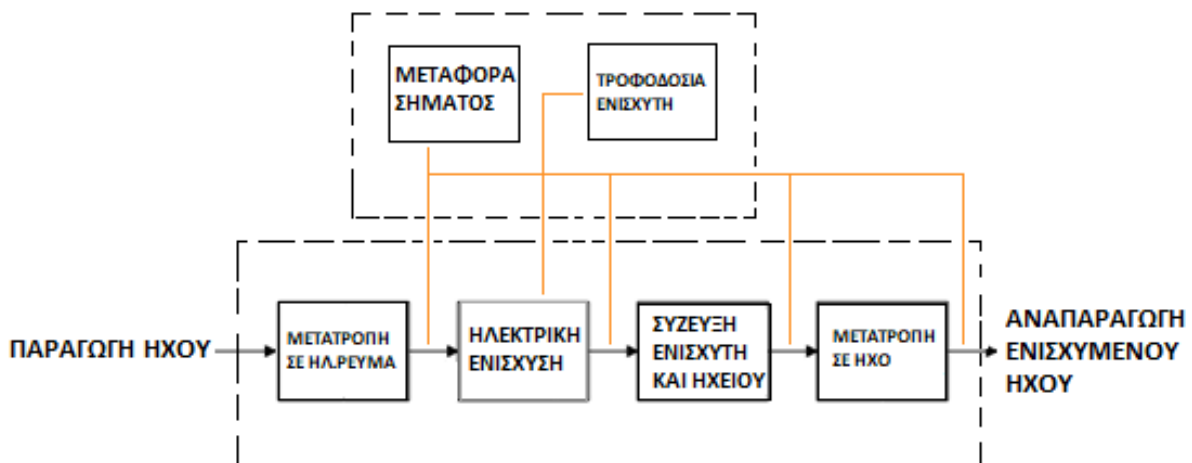
Το σημαντικότερο πρόβλημα που συναντάμε στους ακουστικούς ενισχυτές είναι ο **θόρυβος**, καθώς εφόσον υπάρχει, ενισχύεται μαζί με το καθαρό σήμα προς ενίσχυση. Στην καθημερινότητά μας, ορίζουμε κάθε ανεπιθύμητο ή δυσάρεστο ήχο ως θόρυβο. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να αποτελεί κανόνα, καθώς αν ένας ήχος είναι ευχάριστος ή όχι υπόκειται στην υποκειμενικότητα του κάθε ανθρώπου. Για αυτό το λόγο και για τις επιστήμες της Φυσικής, της Ακουστικής και της Ηλεκτρονικής, ο θόρυβος στην επεξεργασία σήματος χωρίζεται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του σήματος που τον επιδέχεται (AF, RF, εικόνας κ.α.). **Ακουστικός θόρυβος** ορίζεται ο ήχος εκείνος που συχνά είναι ανομοιόμορφα συχνοτικά δομημένος, δυσαρμονικός, με υψηλή συνήθως ένταση και ενοχλητικός στην ακοή ή συγκέντρωση του ανθρώπου. Από την άλλη, **ηλεκτρονικός θόρυβος** ορίζεται η διαταραχή ή παρεμβολή (και όχι επεξεργασία ή διαμόρφωση) του ηλεκτρικού σήματος σε ένα κύκλωμα με οποιονδήποτε τρόπο. Στα κυκλώματα ενισχυτών ακουστικού σήματος συγκεκριμένα, απώτερος σκοπός είναι η υψηλή πιστότητα (high-fidelity), δηλαδή η απεγάδιαστη, σε όλες τις πτυχές της, αναπαραγωγή του αρχικού σήματος στην έξοδο του ενισχυτή. Οι κατασκευαστές high-end ενισχυτών προσπαθούν να πετύχουν αναπαραγωγή ήχου τέτοια, η οποία θα είναι ένα ακριβές αντίγραφο του ήχου μιας ζωντανής συναυλίας.

Ακολουθώντας την Αρχή της Επαλληλίας, η οποία ορίζει ότι όταν δύο κύματα που ταξιδεύουν στο ίδιο μέσο συμβάλλουν, υπερθέτονται δημιουργώντας ένα νέο κύμα μεγαλύτερου πλάτους, μπορούμε να διαχωρίσουμε κάποιους τύπους ακουστικών θορύβων. Ο **βόμβος (hum)** και το **βουητό (buzz)** είναι οι δύο συχνότεροι τύποι θορύβου και αποτελούν συνεχείς τόνους μιας συχνότητας (μονότονοι). Τους συναντούμε στους ενισχυτές ήχου και η διαφορά μεταξύ των δύο υπόκειται στο γεγονός ότι ο βόμβος, εμφανίζεται ως **ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI)** υπό τη μορφή υπέρθεσης στις συχνότητες των 50/60 Hz, ενώ το βουητό ως υπέρθεση στις συχνότητες των 100/120 Hz. Αυτό συμβαίνει διότι η θεμελιώδης συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο της κάθε χώρας βρίσκεται στα 50/60 Hz ενώ η πρώτη αρμονική αυτών βρίσκεται στα 100/120 Hz. Ακόμη εκτός από πολλές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω εμφάνισης EMI αποτελεί ο φωτισμός φθορισμού ή οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές (πχ σε περιβάλλον συναυλιών ή studio ηχογραφήσεων)

Οι λόγοι εμφάνισης θορύβου στους ενισχυτές κιθάρας είναι πολλοί. Ενδεικτικά, ακολουθώντας τη φυσική ροή του σήματος (signal flow), ο θόρυβος, εκτός από φθαρμένα, παλιά ή κακής ποιότητας παθητικά και ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μπορεί να προέρχεται και από μια κακώς γειωμένη χορδή ή από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή η οποία λαμβάνεται από τους μαγνήτες της ηλεκτρικής κιθάρας (**μετατροπή ήχου σε ηλεκτρικό ρεύμα**), από κακής ποιότητας καλωδίωση είτε μεταξύ κιθάρας και ενισχυτή είτε μεταξύ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων εντός του ενισχυτή ή από τα επαγωγικά ρεύματα που αναπτύσσονται λόγω κοντινής απόστασης των καλωδίων στο εσωτερικό του ενισχυτή (**μεταφορά σήματος**), από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή λόγω πρόχειρου φιλτραρίσματος του μετασχηματιστή τροφοδοσίας, από την ηλεκτρομαγνητική σύζευξή του με κάποιο άλλο εξάρτημα όπως ένα φίλτρο choke ή κάποιος άλλος μετασχηματιστής, κάτι που συμβαίνει από τη σύγκρουση των μαγνητικών πεδίων τους λόγω της τοποθεσίας τους στο κύκλωμα ή από διαφορές δυναμικού σε σημεία κοινής γείωσης του ενισχυτή (ground loop) (**τροφοδοσία ενισχυτή**), από διαρροή ρεύματος μεταξύ καθόδου και θερμαινόμενου κυλίνδρου της λυχνίας (heater), από λειτουργία του θερμαινόμενου κυλίνδρου σαν άνοδος λόγω θετικής τάσης στην κάθοδο σε σύγκριση πάντα με την τάση στον κύλινδρο ή από διαμόρφωση της ταχύτητας ροής ηλεκτρονίων από την κάθοδο προς την άνοδο της λυχνίας, λόγω

τοποθέτησης της λυχνίας σε σημείο τέτοιο ώστε τα μαγνητικά πεδία του μετασχηματιστή τροφοδοσίας να παρεμβάλλουν την κανονική ροή των ηλεκτρονίων (**ηλεκτρική ενίσχυση**). Ακόμη, ο θόρυβος είναι συχνό φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που λαμβάνει ο μετασχηματιστής εξόδου αλλά και της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης του με το ηχείο (**σύζευξη ενισχυτή και ηχείου**). Τέλος, λόγω εμφάνισης θορύβου αποτελεί η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή λόγω κακής ή μηδενικής θωράκισης (EMI shielding) των ακροδεκτών του ηχείου (**μετατροπή ηλεκτρικού ρεύματος σε ήχο**).

Όπως καταλαβαίνουμε, ο θόρυβος μπορεί να προκύψει σε οποιοδήποτε στάδιο της ροής του ακουστικού ηλεκτρικού σήματος (Σχήμα 57), είτε μεμονωμένα είτε σε πλήθος σταδίων ταυτόχρονα.



Σχήμα 57. Block διάγραμμα ροής σήματος (signal flow) από την παραγωγή στον ενισχυμένο ήχο

Δύο τύποι θορύβου που αξίζει να αναφερθούν ξεχωριστά, είναι ο **θερμικός θόρυβος (thermal noise)** γνωστός και ως Johnson-Nyquist noise, ο **θόρυβος βολής (shot noise)** γνωστός και ως Poisson noise.

Ο θερμικός θόρυβος σε έναν αγωγό, προκύπτει από τη θερμική διαταραχή (thermal agitation) του ηλεκτρικού φορτίου σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας (equilibrium) με την θερμική κίνηση των ατόμων του αγωγού<sup>2</sup>. Εφόσον η ροή ηλεκτρικού ρεύματος είναι πραγματικά ένα σύνολο (ηλεκτρικό φορτίο) από μικρά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια), ο θερμικός θόρυβος προκαλεί χαμηλού πλάτους διαφορά δυναμικού τυχαίας συχνότητας σε έναν αγωγό από την εξίσου τυχαία κίνηση (Brownian motion) μέρους των σωματιδίων του ηλεκτρικού φορτίου του αγωγού, η οποία προκύπτει λόγω θερμοκρασίας.

$$V_n = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (20)$$

<sup>2</sup> Thermal noise definition by John Bertrand Johnson, 1926, Bell Laboratories σε ελεύθερη μετάφραση

Στην παραπάνω εξίσωση του Johnson για το θερμικό θόρυβο (*σχέση 20*), όπου  $V_n$  η ενεργή τάση θορύβου ( $V_{rms}$ ) με μονάδα μέτρησης το Volt,  $k$  η σταθερά Boltzmann σε Joule/Kelvin,  $T$  η θερμοκρασία με σε Kelvin,  $R$  η αντίσταση σε Ohm και  $\Delta f$  το εύρος ζώνης σε Hz, απεικονίζεται μαθηματικά ο ορισμός του θερμικού θορύβου. Σχεδιάζοντας έναν ακουστικό ενισχυτή και εισάγοντας τα πραγματικά δεδομένα (θερμοκρασία, ωμική αντίσταση, εύρος ζώνης) μπορούμε να βρούμε την τάση θερμικού θορύβου στο κύκλωμά μας.

Ο θόρυβος βολής, (όπως και ο θερμικός θόρυβος), έχει άμεση σχέση με τη διακριτικότητα των ηλεκτρονίων, τα οποία στο σύνολό τους συνθέτουν ένα ηλεκτρικό φορτίο. Η διαφορά στους δύο τύπους θορύβου, υπόκειται στην αιτία εμφάνισής τους, καθώς ο θόρυβος βολής δεν εμφανίζεται λόγω θερμοκρασίας αλλά λόγω της διαδικασίας της διαδρομής των ηλεκτρονίων από την κάθοδο στην άνοδο μιας λυχνίας κενού. Η τυχαία διασπορά των διακριτών ηλεκτρονίων και άρα η εμφάνιση χαμηλού πλάτους διαφοράς δυναμικού, παρατηρείται έντονα όσο το ρεύμα τροφοδοσίας της λυχνίας αυξάνει από το μηδέν, και μέχρι να φτάσει στην περιοχή του χωρικού φορτίου (space-charge). Εκεί, ο θόρυβος βολής φτάνει στην κορυφή του και αρχίζει να αποκλίνει φτάνοντας μια τιμή που πλέον θεωρείται αμελητέα, καθώς τα διακριτά ηλεκτρόνια, σημαντικά πλέον στον αριθμό, έχουν σχηματίσει ηλεκτρικό φορτίο με σημαντική ηλεκτρική ροή. Εφόσον ο θόρυβος βολής εμφανίζεται στα πολύ πρώιμα στάδια της ενίσχυσης ενός σήματος και για πολύ μικρά ρεύματα, είναι φυσικό ότι σε κάποιον ενισχυτή υψηλού κέρδους (high-gain) θα είναι πολύ πιο διακριτός.

Τέλος, ένα ακόμη φαινόμενο που προκαλεί ακουστικό θόρυβο είναι η **θετική ανάδραση (positive feedback)**, η οποία συμβαίνει λόγω της ροής ενός ακουστικού σήματος μεταξύ των μορφομετατροπέων που χρησιμοποιούνται στην έξοδο και την είσοδο του εκάστοτε κυκλώματος. Στην προκειμένη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση ενός ενισχυτή ηλεκτρικής κιθάρας, η ροή συμβαίνει μεταξύ του ηχείου και των μαγνητών της κιθάρας, όπου ουσιαστικά ο ενισχυμένος ήχος που βγαίνει από το μεγάφωνο, όντας ίδιας φάσης, λαμβάνεται από τους μαγνήτες και εισέρχεται ξανά σαν σήμα προς ενίσχυση, δημιουργώντας έτσι βρόχο θετικής ανάδρασης (positive-feedback loop). Ο χαρακτηριστικός ακουστικός θόρυβος που προκύπτει είναι συνήθως υψίσυχνος<sup>3</sup> και διαπεραστικός.

Ο τρόπος με τον οποίο ένας σχεδιαστής κυκλωμάτων ενισχυτών μπορεί να υπολογίσει το θόρυβο στην έξοδο του ενισχυτή, είναι ακολουθώντας την **αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal-to-noise ratio, SNR)** με μονάδα μέτρησης το decibel, δηλαδή τη μαθηματική σχέση που προκύπτει από τον ορισμό της αναλογίας, όπου για μέση ισχύ σήματος  $P_{signal}$  και μέση ισχύ θορύβου  $P_{noise}$  ισχύει:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (21)$$

Αναλογίες 1:1 υποδεικνύουν ισορροπία σήματος και θορύβου (0 dB) ενώ οποιαδήποτε χαμηλότερη αναλογία υποδεικνύει χαμηλότερο θόρυβο από ότι σήμα, το οποίο όχι μόνο είναι θεμιτό αλλά χρειαζόμαστε την μεγαλύτερη αναλογία που μπορούμε ρεαλιστικά να έχουμε, έτσι ώστε η έξοδος του ενισχυτή να αποδίδει το καθαρότερο πιθανό σήμα.

<sup>3</sup> Υψηλής συχνότητας ήχος (*high-pitched sound*)

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης του θορύβου σε ένα κύκλωμα ενισχυτή, είναι ο **συντελεστής θορύβου (Noise Figure, NF)**, ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί την αναλογία σήματος και θορύβου εξόδου-εισόδου, όπως φαίνεται και από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$NF = 10 \log_{10} \left( \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \right) \quad (22)$$

**Παραμόρφωση (distortion)** ονομάζεται η αλλοίωση της κυματομορφής εξόδου ενός ακουστικού ηλεκτρικού σήματος σε συνάρτηση με την κυματομορφή εισόδου, φαινόμενο που αποτελεί υποβάθμιση της πιστότητας (fidelity) ενός ενισχυτή καθώς στις περισσότερες προκύψεις της είναι ανεπιθύμητη, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις αναπτύσσεται σκόπιμα ανάλογα με το μουσικό είδος ή την προτίμηση των μουσικών. Η αλλοίωση της κυματομορφής αρχικά εμφανίζεται υπό τη μορφή ήπιου ψαλιδισμού (soft-clipping) του πλάτους της ενώ στη συνέχεια μπορεί να εξελιχθεί σε ολική παραμόρφωση οδηγώντας σε τετραγωνισμό του σχήματός της (hard-clipping). Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι τύποι παραμόρφωσης είναι η μη-γραμμική παραμόρφωση (**non-linear or amplitude distortion**), από την οποία προκύπτει η αρμονική παραμόρφωση (**harmonic distortion**) αλλά και η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (**intermodulation distortion**), καθώς και οι παραμορφώσεις συχνότητας (**frequency distortion**) και φάσης (**phase distortion**).

Η μη-γραμμική παραμόρφωση στα κυκλώματα ενισχυτών με λυχνίες κενού, προκύπτει από την μη-γραμμική φύση των λυχνιών, η οποία αποδεικνύεται και από τις χαρακτηριστικές καμπύλες που βρίσκονται στα φύλλα δεδομένων τους. Σε συνέχεια των όσων αναφέρθηκαν στη σελίδα 27 της υποενότητας 2.3, η ανομοιομορφία του peak-to-peak πλάτους της τάσης ανόδου  $V_a$  λόγω αυξομείωσης της τάσης εισόδου στο πλέγμα ελέγχου  $V_g$  της τριόδου (στην προκειμένη περίπτωση), είναι παράδειγμα μη-γραμμικής παραμόρφωσης λόγω των χαρακτηριστικών καμπυλών.

Αποτέλεσμα της μη-γραμμικής παραμόρφωσης αποτελεί η **αρμονική παραμόρφωση**, καθώς λόγω των χαρακτηριστικών καμπυλών δημιουργούνται συχνότητες που δεν υπάρχουν πραγματικά στο αρχικό σήμα, αλλά είναι ακέραια πολλαπλάσια, δηλαδή αρμονικές θεμελιωδών συχνοτήτων που το συνθέτουν. Οι αρμονικές αυτές μπορούν να αγγίξουν ως και την πέμπτη αρμονική, δίνοντας έτσι την αίσθηση ενός γεμάτου ήχου, σε αντίθεση με την **παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης**, η οποία προκύπτει εξίσου από τη μη-γραμμικότητα των λυχνιών, αλλά παράγει δυσαρμονικές συχνότητες ως προς το αρχικό σήμα. Έτσι, η αρμονική παραμόρφωση είναι συνήθως ευχάριστη στον ήχο (warm sound) και είναι η αιτία που οι περισσότεροι audiophiles προτιμούν **ενισχυτές λυχνιών αντί solid-state**, ενώ από την άλλη, η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης είναι δυσάρεστη στον ήχο.

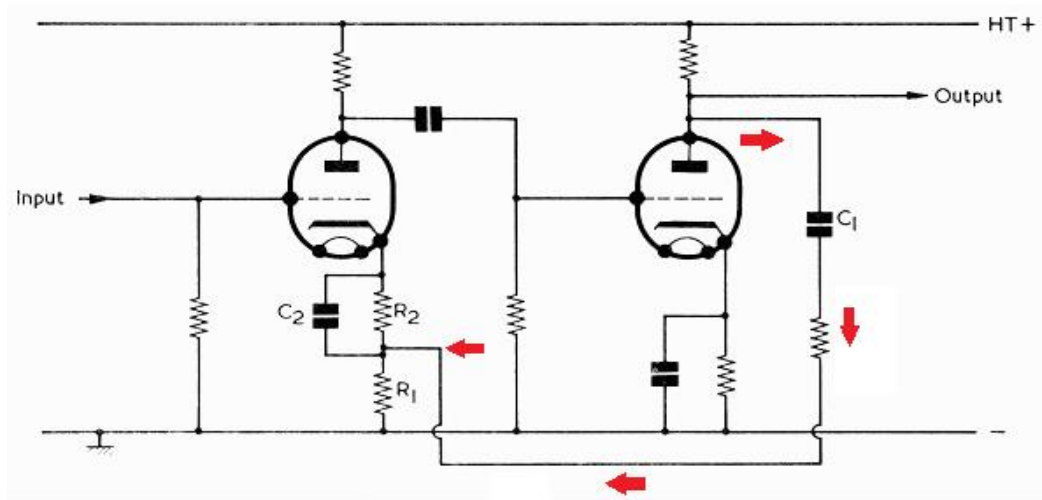
Η **παραμόρφωση συχνότητας** συμβαίνει λόγω μεταβαλλόμενης αντίστασης ηλεκτρονικών στοιχείων του κυκλώματος (πυκνωτές, πηνία, μετασχηματιστές) ή δικτυωμάτων αυτών (φίλτρα), η οποία σχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα του σήματος που τα διαρρέει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση μόνο κάποιων εκ των συχνοτήτων που συνθέτουν ένα ακουστικό ηλεκτρικό σήμα και άρα την ανομοιομορφία συνολική ενίσχυση των συχνοτήτων. Η **παραμόρφωση φάσης** από την άλλη, συμβαίνει λόγω αντιστροφής φάσης του ηλεκτρικού σήματος που διέρχεται από ηλεκτρικά εξαρτήματα που εμφανίζουν αυτό το φαινόμενο, όπως οι πυκνωτές και τα πηνία.

Η αρμονική παραμόρφωση μετρείται σε ποσοστό % χρησιμοποιώντας την αναλογία του αθροίσματος των ενεργών τιμών της τάσης όλων των αρμονικών, προς την ενεργή τιμή τάσης της θεμελιώδους συχνότητας. Η μέτρηση αυτή είναι ονομάζεται **Total Harmonic Distortion (THD)** και όπως φανερώνει το όνομά της, εκφράζει την ολική αρμονική παραμόρφωση σε ένα κύκλωμα. Η μαθηματική σχέση που προκύπτει, όπου για  $V_F$  τάση θεμελιώδους συχνότητας και  $V_n^2$  τετράγωνο τάσης για την εκάστοτε αρμονική συχνότητα, είναι η παρακάτω, :

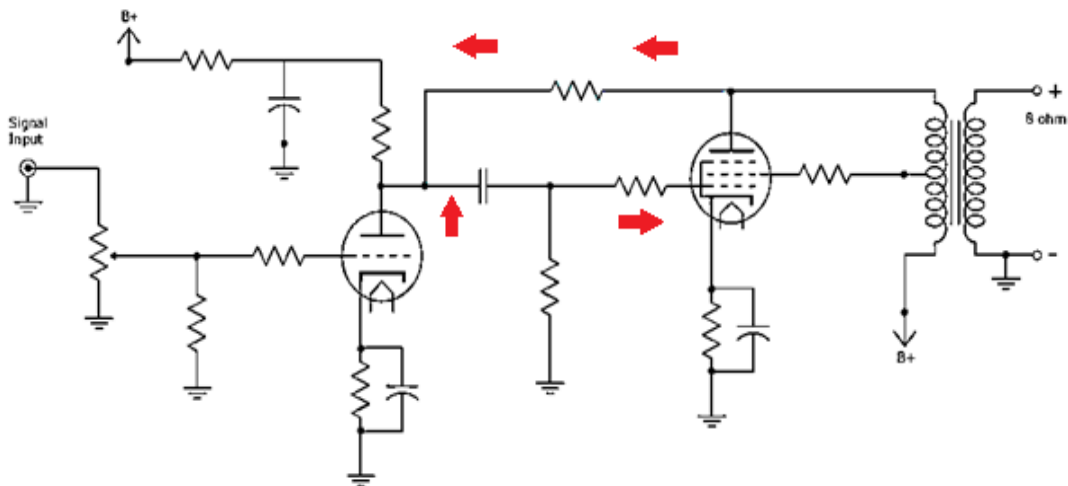
$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_F} \quad (23)$$

Η μέτρηση THD μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μετρητικά όργανα όπως ο αναλυτής φάσματος (spectrum analyzer) ή ο παλμογράφος (oscilloscope) ο οποίος θα πρέπει να έχει δυνατότητα ανάλυσης FFT (Fast Fourier Transform) δηλαδή ικανότητα μετατροπής της απεικόνισης ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου (time-domain) στο πεδίο της συχνότητας (frequency-domain). Ουσιαστικά η ανάλυση αυτή, αποδίδει χαρακτηριστικά ενός αναλυτή φάσματος στον παλμογράφο. Ο λόγος που μας είναι απαραίτητη η ανάλυση ως προς τη συχνότητα, είναι γιατί ένα πραγματικό ακουστικό ηλεκτρικό σήμα ήχου, όπως το σήμα μιας ηλεκτρικής κιθάρας, είναι ένα σύνολο των διαφορετικών συχνοτήτων που το αποτελούν. Στο πεδίο του χρόνου το σήμα αυτό απεικονίζεται ως ένα συνονθύλευμα συχνοτήτων οι οποίες υπερθέτονται μεταξύ τους, οπότε η αποδόμηση τους κατά το πεδίο της συχνότητας και η απεικόνισή τους ως ξεχωριστά σήματα μπορεί να μας δώσει πολύ χρήσιμες πληροφορίες, όπως το πλάτος των επιμέρους αρμονικών συχνοτήτων σε dB σε σχέση με το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος (relative measurement).

Η τεχνική που βρίσκει πιο συχνά εφαρμογή στα κυκλώματα ενισχυτών ήχου και αποσκοπεί σε μείωση ή εξάλειψη της παραμόρφωσης είναι η **αρνητική ανάδραση (negative-feedback)**. Ουσιαστικά, ένα μικρό μέρος του τελικού σήματος εξόδου (σχεδόν όσο το σήμα εισόδου) καθώς και ένα μεγάλο μέρος της παραμόρφωσης, μεταφέρονται μέσω καθολικού (global loop) ή τοπικού βρόχου (local loop) στη βαθμίδα εισόδου του ενισχυτή. Οι τρόποι σύνδεσης του βρόχου ανάδρασης διαφέρουν ανάλογα με τον αριθμό των λυχνιών καθώς, όπως έχουμε ήδη αναλύσει, το σήμα στην άνοδο της λυχνίας παρουσιάζει αντιστροφή φάσης σε σχέση με το πλέγμα ελέγχου της. Για να επιτευχθεί αρνητική ανάδραση θα πρέπει το σήμα εξόδου που τροφοδοτείται στην άνοδο της βαθμίδας εισόδου να έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  με το σήμα εισόδου, διότι όπως γνωρίζουμε από τη Φυσική, τα δύο σήματα θα πραγματοποιήσουν έτσι αποσβεστική συμβολή. Κατά τη συνδεσμολογία ανάδρασης (β) του Σχήματος 59, το σήμα στην άνοδο της πεντόδου τροφοδοτείται στην άνοδο της τριόδου, και εφόσον το συνολικό κύκλωμα διαθέτει μόνο δύο λυχνίες, ικανοποιείται η συνθήκη για αντιστροφή φάσης σημάτων εισόδου-εξόδου. Από την άλλη, κατά τη συνδεσμολογία ανάδρασης (α) του Σχήματος 58, εφόσον το κύκλωμα διαθέτει επίσης δύο μόνο λυχνίες και καθώς γνωρίζουμε πως το σήμα στην κάθοδο μιας λυχνίας είναι συμφασικό με το σήμα εισόδου στο πλέγμα ελέγχου της., το σήμα τροφοδοτείται από την άνοδο της δεύτερης τριόδου στην κάθοδο της πρώτης. Όταν για παράδειγμα το σήμα εισόδου βρίσκεται στη θετική του ημιπερίοδο, το σήμα ανόδου της δεύτερης τριόδου και το σήμα καθόδου της πρώτης θα βρίσκονται επίσης στη θετική τους ημιπερίοδο. Με αυτόν τον τρόπο, η αλλαγή στην τάση καθόδου-πλέγματος ελαττώνεται πετυχαίνοντας έτσι αρνητική ανάδραση.



Σχήμα 58. Συνδεσμολογία (α), σύνδεση στην κάθοδο του προενισχυτή (Valve Museum)



Σχήμα 59. Συνδεσμολογία (β), σύνδεση στην άνοδο του προενισχυτή (Analog Ethos)

Έστω κύκλωμα προενισχυτή με σήμα εισόδου 1mV, συντελεστή ενίσχυσης 10000 και σήμα εξόδου 10V. Χάριν παραδείγματος ας υποθέσουμε ακόμη πως με αυτές τις συνθήκες το σήμα παραμόρφωσης στην έξοδο θα είναι 0.5V ή αλλιώς το 5% του σήματος εξόδου. Μέσω αντίστασης ανάδρασης, τροφοδοτούμε τη βαθμίδα εισόδου με το 90% του σήματος εισόδου, δηλαδή με 9mV. Αν στα 10mV έχουμε 0.5V παραμόρφωση, στα 9mV θα έχουμε 0.45V παραμόρφωση. Έτσι, σύμφωνα με όσα έχουμε αναλύσει παραπάνω, το σήμα ανάδρασης αφαιρείται από το σήμα εισόδου και έτσι θα έχουμε νέα είσοδο 1mV. Καθώς η παραμόρφωση δεν έχει αρχικό σήμα από το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί, ενισχύεται ξανά, αλλά αυτή τη φορά το σήμα της στην έξοδο θα είναι περίπου 0.05V ή 50mV, ή αλλιώς το 0.5% του σήματος εξόδου, ποσοστό που είναι παραπάνω από ικανοποιητικό σε κυκλώματα ενισχυτών ήχου.

Στους Πίνακες 6, 7 και 8, απεικονίζονται τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στο παραπάνω παράδειγμα, τα οποία αποδεικνύονται μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις (24, 25, 26, 27, 28, 29):

$$\beta = \frac{V_{feedback}}{V_{out}} \quad (24)$$

$$A_f = \frac{A}{1+A\beta} \quad (25)$$

$$1 + A\beta \quad (26)$$

**Πίνακας 6. Αποτελέσματα παραδείγματος βρόχου ανάδρασης.**

$V_{in}$	Σήμα εισόδου	<b>1</b>	$mV$
$V_{out}$	Σήμα εξόδου	<b>10</b>	$V$
$A$	Συντελεστής ενίσχυσης κυκλώματος	<b>10.000</b>	(καθαρός αριθμός)
$\beta$	Κλασματική μερίδα ανάδρασης σήματος εξόδου	$\frac{9}{10000}$	$mV$
$1+A\beta$	Συντελεστής ανάδρασης	<b>10</b>	(καθαρός αριθμός)
$A\beta$	Συντελεστής ενίσχυσης βρόχου ανάδρασης	<b>9</b>	(καθαρός αριθμός)
$A_f$	Συντελεστής ενίσχυσης κυκλώματος (με βρόχο ανάδρασης)	<b>1000</b>	(καθαρός αριθμός)

$$V_{in_F} = (1 + A\beta)V_{in} \quad (27)$$

$$V_{out_F} = V_{in_F}A_f \quad (28)$$

**Πίνακας 7. Αποτελέσματα τελικής εισόδου-εξόδου παραδείγματος βρόχου ανάδρασης.**

$V_{in_F}$	Σήμα εισόδου (με βρόχο ανάδρασης)	<b>10</b>	$mV$
$V_{out_F}$	Σήμα εξόδου (με βρόχο ανάδρασης)	<b>10</b>	$V$

Ο υπολογισμός της παραμόρφωσης  $D_f$  του κυκλώματος με βρόχο ανάδρασης, γίνεται από το λόγο της παραμόρφωσης  $D$  προς τον συντελεστή ανάδρασης και δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$D_f = \frac{D}{1+A\beta} \quad (25)$$

**Πίνακας 8. Αποτέλεσμα τελικής παραμόρφωσης παραδείγματος βρόχου ανάδρασης.**

$D_f$	Παραμόρφωση κυκλώματος (με βρόχο ανάδρασης)	<b>0.05</b>	<b>V</b>
-------	---	-------------	----------

### 3. Σχεδίαση

Έχοντας αναλύσει την έννοια του ήχου όπως και διάφορα μεγέθη που αναφέρονται σε αυτόν, τους τρόπους ηλεκτρικής ενίσχυσης των ακουστικών κυμάτων μιας ηλεκτρικής κιθάρας, τους κυριότερους τύπους λυχνιών κενού και τις εφαρμογές τους, τις μεταξύ τους διαφορές όπως και τις διαφορές τους με τα τρανζίστορ, τις διάφορες κλάσεις ενισχυτών, τη λειτουργία των ηχείων και των μετασχηματιστών, και εφόσον μελετήσαμε την σημασία των φαινομένων του θορύβου, της παραμόρφωσης και της ανάδρασης, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στο κομμάτι της υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου αναλογικού ενισχυτή χρησιμοποιώντας λυχνίες κενού.

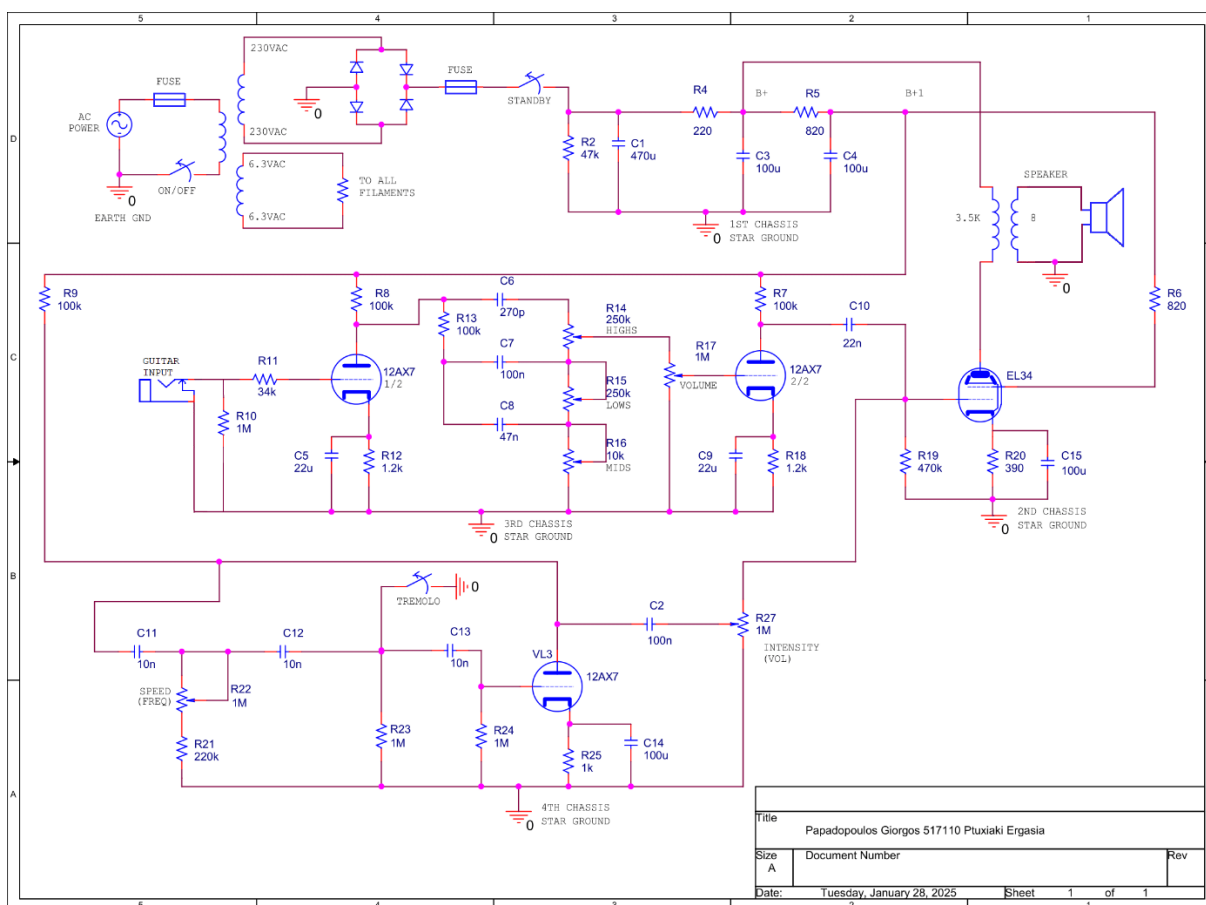
Τα κύρια στάδια της διαδικασίας υλοποίησης οποιουδήποτε κυκλώματος είναι ίδια ανεξάρτητα από το είδος αυτού. Φυσικά, τα στάδια της ασφάλειας και των νομικών προδιαγραφών πολλές φορές δεν αναφέρονται αλλά δεν θα πρέπει ποτέ να παραμελούνται, τουλάχιστον στο κατασκευαστικό κομμάτι. Αναφορικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά σειρά όπως και η νοοτροπία των αποφάσεων που λήφθηκαν παραθέτονται παρακάτω:

- **Επιλογή κλάσης ισχύος ενισχυτή:** Κλάση A (Single-Ended Class A). Η επιλογή έγινε με γνώμονα το οικονομικό κόστος και τον βαθμό δυσκολίας πρώτης απόπειρας υλοποίησης.
- **Επιλογή λυχνιών κενού:** Λυχνία προενίσχυσης και ταλαντωτή αντιστροφής φάσης 12AX7 (Twin Triode), λυχνία ισχύος EL34 (Power Pentode). Η επιλογή της λυχνίας προενίσχυσης έγινε με γνώμονα το κόστος, τον εύκολο εντοπισμό της στην αγορά, τον υψηλό συντελεστή ενίσχυσης (για μια τρίοδο προενίσχυσης) και τον κοινώς ομολογούμενο «ζεστό» της ήχο. Η λυχνία ενίσχυσης ισχύος επιλέχθηκε εξίσου με γνώμονα τον εύκολο εντοπισμό της στην αγορά, αλλά κυρίως επιλέχθηκε λόγω του υψηλού κέρδους ισχύος σε κύκλωμα κλάσης A όπως και για τα υψηλά της περιοριστικά ηλεκτρικά όρια, τα οποία συγχωρούν σχεδιαστικά λάθη.
- **Σχεδίαση κυκλώματος:** Η σχεδίαση του κυκλώματος έγινε με γνώμονα την ασφάλεια και τους σχεδιαστικούς κανόνες που ακολουθούνται στη σχεδίαση ακουστικών ενισχυτών, και την ισορροπία μεταξύ κόστους, εργονομίας και ικανοποιητικής απόδοσης ισχύος.
- **Θεωρητικός υπολογισμός μεγεθών:** Θεωρητική αποτύπωση, υπολογίζοντας την τάση, το ρεύμα, τη συχνотική απόκριση και ισχύ σε διάφορα σημεία του κυκλώματος καθώς και τη συνολική αρμονική παραμόρφωση.
- **Προσομοίωση κυκλώματος:** Επαλήθευση των θεωρητικών υπολογισμών των διάφορων μεγεθών του κυκλώματος και εικονική αποτύπωση των κυματομορφών.
- **Σχεδιασμός τυπωμένης πλακέτας:** Σχεδιασμός PCB του κυκλώματος ανορθωτή και σταθεροποιητή με γνώμονα το όσο δυνατόν μικρότερο μέγεθος, την διάχυση θερμότητας για προστασία των εξαρτημάτων ισχύος και την ευκολία κατά τη συνδεσμολογία.
- **Αναζήτηση εξαρτημάτων:** Έρευνα αγοράς εξαρτημάτων, των οποίων η ονομαστική τιμή να είναι ίση ή παραπλήσια με τη θεωρητική τιμή που επιλέχθηκε κατά τη διάρκεια της σχεδίασης. Ακόμη, ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στα ηλεκτρικά όρια των εξαρτημάτων, κυρίως εκείνων του κυκλώματος ανορθωτή και σταθεροποιητή λόγω των υψηλών τιμών τάσεως και ισχύος.
- **Κατασκευή:** Συναρμολόγηση εξαρτημάτων στο εσωτερικό του σασί (chassis) με γνώμονα την εργονομία, την ασφάλεια και τον μέγιστο περιορισμό ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και θορύβων προσπαθώντας να πετύχουμε όσο δυνατόν βέλτιστη πιστότητα στον ήχο.

### 3.1 Σχεδίαση και ανάλυση κυκλώματος

Το κύκλωμα χωρίζεται σε τέσσερα κύρια στάδια, κάθε ένα από τα οποία μελετήθηκε και σχεδιάστηκε ξεχωριστά, λαμβάνοντας όμως υπόψιν τις παραμέτρους κάθε σταδίου, έτσι ώστε συνολικά να δομούν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα αναλογικού ενισχυτή ακουστικών σημάτων. Τα τέσσερα στάδια αυτά αποτελούν το στάδιο τροφοδοσίας, ανόρθωσης και σταθεροποίησης τάσης, το στάδιο προενίσχυσης και ισοστάθμισης συχνότητας, το στάδιο του ταλαντωτή χαμηλών συχνοτήτων μετατόπισης φάσης (low frequency phase-shift oscillator) και το στάδιο ενίσχυσης ισχύος.

Η σειρά που ακολουθήθηκε όσον αφορά καθαρά τη σχεδίαση του κυκλώματος είναι αρκετά περίπλοκη και συνιστά προσοχή σε όλα τα στάδιά της. Εφόσον έχουμε επιλέξει ήδη την κλάση ισχύος και τις λυχνίες κενού που θα χρησιμοποιήσουμε, το πρώτο βήμα είναι η πόλωση των λυχνιών προενίσχυσης, ταλαντωτή και ισχύος. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας (σημείο λειτουργίας), γίνεται μέσω χάραξης της ευθείας φόρτου πάνω στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών V-I που βρίσκουμε στα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή της αντίστοιχης λυχνίας. Ακόμη, μέσω της ευθείας φόρτου υπολογίζουμε την τάση και το ρεύμα της καθόδου όπως και τα ανώτατα ηλεκτρικά όρια σύμφωνα με το σημείο λειτουργίας της λυχνίας που επιλέξαμε. Η μεθοδολογία που ακολουθείται κατά τη χάραξη της ευθείας φόρτου για λυχνία προενίσχυσης έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ.σελ.24).



Σχήμα 60. Κύκλωμα ενισχυτή

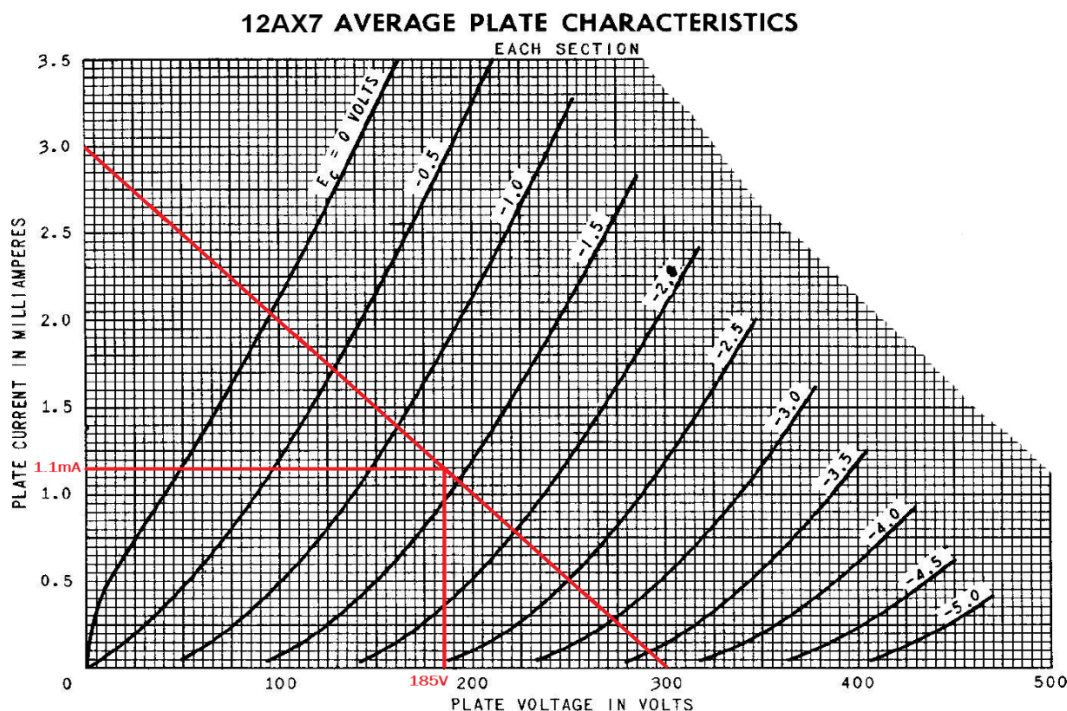
Παρακάτω απεικονίζεται η ευθεία φόρτου για τις λυχνίες προενίσχυσης που χαράχθηκε για εφαρμογή στο κύκλωμα του ενισχυτή. Η ευθεία φόρτου είναι ίδια και για τα δύο στάδια προενίσχυσης καθώς έχουμε επιλέξει ίδια λειτουργική συμπεριφορά και για τις δύο τριόδους, ενώ η πόλωση του ταλαντωτή μετατόπισης φάσης είναι παρόμοια και δεν χρίζει ξεχωριστής διευκρίνησης, καθώς διαφέρει ελάχιστα στην τιμή της αντίστασης καθόδου, γεγονός που θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω.

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε, η άνοδος πολώνεται μέσω μιας αντίστασης  $100\text{K}\Omega$ , με ηλεκτρικά όρια φυσικά την τάση τροφοδοσίας των  $300\text{V}$ , και το ανώτατο ρεύμα που υπολογίζεται στα  $3\text{mA}$  με εφαρμογή του νόμου του Ohm. Το σημείο λειτουργίας που επιλέχθηκε είναι τα  $185\text{V}$  και  $1.1\text{mA}$ , με τάση πλέγματος περίπου  $-1.4\text{V}$  σε σχέση με την τάση καθόδου. Εφόσον ξέρουμε ότι το ρεύμα ανόδου ισούται περίπου με το ρεύμα καθόδου και ότι η τάση καθόδου (σύμφωνα με το σημείο λειτουργίας που επιλέξαμε) θα είναι  $1.4\text{V}$ , η αντίσταση καθόδου υπολογίζεται στα  $1.27\text{K}\Omega$ . Η μέγιστη ενίσχυση ισχύος που μπορούμε να πετύχουμε χρησιμοποιώντας τη λυχνία  $12\text{AX7}$  είναι περίπου το  $1\text{W}$  άρα η απόδοση ισχύος του δικού μας κυκλώματος είναι αρκετά κάτω από αυτό το όριο, καθώς όπως υπολογίζεται από το σημείο λειτουργίας, βρίσκεται στα  $0.2\text{W}$ . Η σύνθετη αντίσταση εξόδου  $Z_{out}$  της λυχνίας υπολογίζεται περίπου στα  $54.79\text{K}\Omega$  χρησιμοποιώντας την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$Z_{out} = R_a \parallel r_k \quad (26)$$

Όπου  $r_k$  ισχύει εσωτερική αντίσταση καθόδου και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$r_k = (1+\mu) \cdot R_k \quad (27)$$



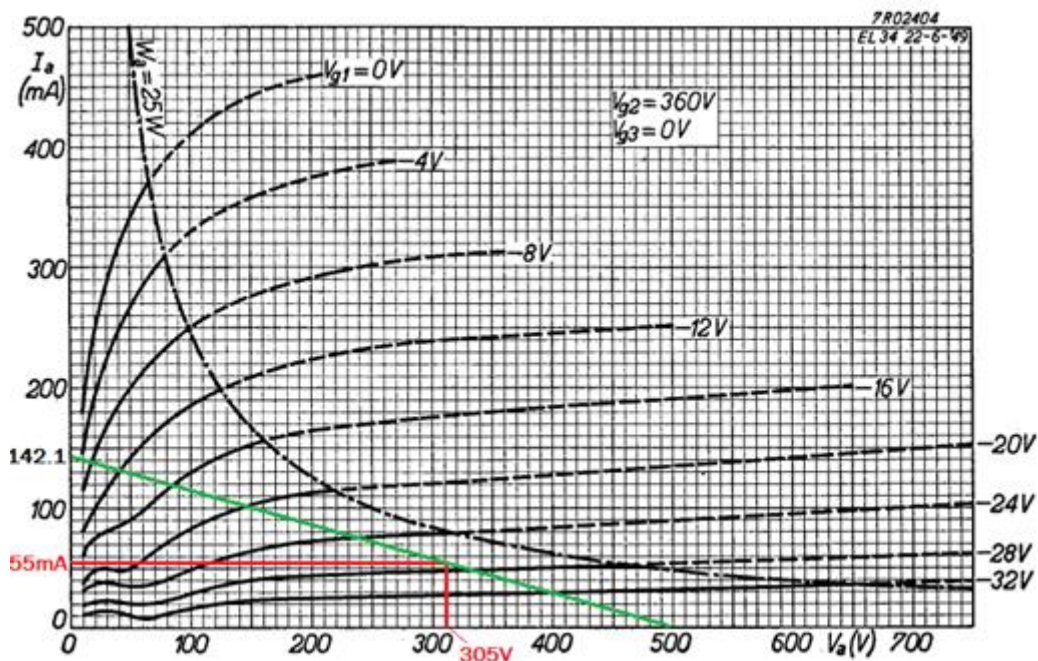
Σχήμα 61. Ευθεία φόρτου  $12\text{AX7}$

Εφόσον πλέον, οι ανάγκες των λυχνιών προενίσχυσης σε ρεύμα και τάση είναι ξεκάθαρες, μπορούμε να προχωρήσουμε στη χάραξη της ευθείας φόρτου της λυχνίας ενίσχυσης.

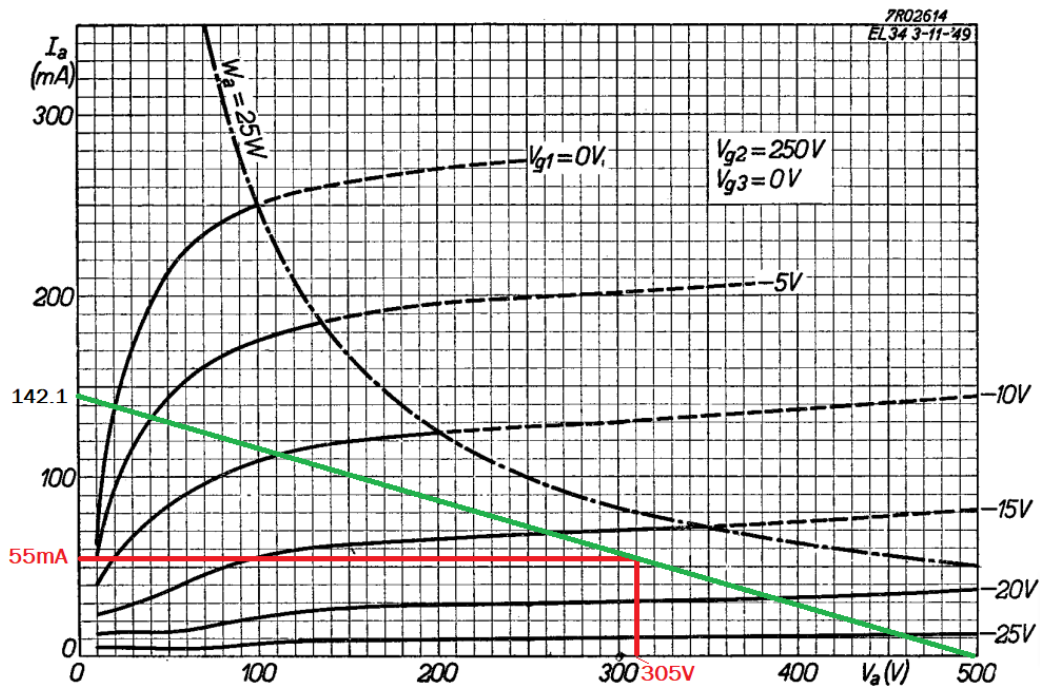
Η μεθοδολογία χάραξης της ευθείας φόρτου μιας λυχνίας ισχύος, διαφέρει σε κάποια σημεία με τη μεθοδολογία σε μία λυχνία προενίσχυσης. Αυτό συμβαίνει λόγω του φορτίου που συνδέεται στην άνοδο της λυχνίας, καθώς στις λυχνίες προενίσχυσης το φορτίο είναι μια αντίσταση (resistive load), ενώ στις τελικές λυχνίες ισχύος το φορτίο είναι το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή (reactive load). Ακόμη, τα επιπλέον πλέγματα των λυχνιών ισχύος περιπλέκουν περισσότερο την χάραξη ευθείας φόρτου, καθώς στα φύλλα δεδομένων των λυχνιών τα γραφήματα V-I των τιμών της τάσης και του ρεύματος ανόδου απεικονίζονται με γνώμονα όχι μόνο το πλέγμα ελέγχου αλλά και του πλέγματος ελέγχου (screen grid), για το οποίο δίνονται από μία έως δύο ή τρεις τιμές τάσης. Οι τιμές αυτές ίσως δεν καλύπτουν τις ανάγκες ενός σχεδιαστή, ο οποίος θα πρέπει να βρει έναν δικό του τρόπο προσαρμογής των υπαρχόντων γραφημάτων στις τιμές που ο ίδιος έχει επιλέξει.

Στο κύκλωμα που σχεδιάστηκε για τη συγκεκριμένη πτυχιακή, επιλέχθηκε η λυχνία ισχύος EL34, η χαρακτηριστική V-I της οποίας βρίσκεται στα δύο παρακάτω Σχήματα. Βλέπουμε πως η διαφορά βρίσκεται στην τάση του πλέγματος προστασίας  $V_{g2}$ , καθώς στο πρώτο Σχήμα η τάση αυτή βρίσκεται στα 360V ενώ στο δεύτερο βρίσκεται στα 250V. Αυτό που δεν αλλάζει είναι το σημείο λειτουργίας που έχουμε επιλέξει, το οποίο βρίσκεται στα 305V και 55mA. Εφόσον δεν υπάρχει αντίσταση φορτίου παρά μόνο το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, η τάση τροφοδοσίας B+ τροφοδοτεί καθολικά την άνοδο της λυχνίας ισχύος. Βλέπουμε πως στο σημείο λειτουργίας, η τάση του πλέγματος ελέγχου στην πρώτη περίπτωση βρίσκεται περίπου στα -27V ενώ στη δεύτερη περίπτωση στα -17V. Αν συγκρίνουμε τις δύο αυτές τιμές, διαφέρουν κατά **10V** ενώ αν δούμε την ονομαστική τάση του πλέγματος προστασίας για τα δύο Σχήματα, διαφέρουν περίπου κατά **100V**. Η προσέγγιση πως για τάση πλέγματος περίπου 300V, όπως δηλαδή έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε στο κύκλωμά μας, η τάση του πλέγματος ελέγχου θα είναι περίπου **η μισή απόσταση** μεταξύ των 27V και 17V είναι αρκετά καλή και πλησιάζει την πραγματικότητα. Έτσι, η τάση πλέγματος ελέγχου για τάση πλέγματος προστασίας 300V υπολογίστηκε περίπου στα 22V. Η ευθεία φόρτου που χαράσσεται υπολογίζεται αν διαιρέσουμε την τάση τροφοδοσίας των 305V προς την σύνθετη αντίσταση (impedance) του φορτίου. Αυτή, είναι φυσικά το πρωτεύον του μετασχηματιστή, η οποία επιλέχθηκε στα 3.5KΩ. Έτσι το ρεύμα που έχουμε είναι 87.1mA. Αν προσθέσουμε σε αυτά το ρεύμα ανόδου ακριβώς στο σημείο λειτουργίας, δηλαδή τα 55mA, τότε ανώτατο όριο ρεύματος για τη λυχνία ισχύος μας υπολογίζονται τα 142.1mA. Από το σημείο αυτό, αρχίζουμε να χαράσσουμε την ευθεία φόρτου τέμνοντας το σημείο λειτουργίας μέχρι να φτάσουμε στον οριζόντιο άξονα x που αντιπροσωπεύει τις τάσεις V, βρίσκοντας έτσι το ανώτατο όριο της τάσης. Η ισχύς που προσδίδει η λυχνία, σύμφωνα με το σημείο λειτουργίας που επιλέξαμε, υπολογίζεται με το νόμο του Ohm στα 16.77W.

Ακόμη, στα Σχήματα των χαρακτηριστικών που βρίσκονται παρακάτω, απεικονίζεται και η καμπύλη του ανώτατου ορίου ισχύος της λυχνίας EL34, δηλαδή τα 25W. Η λειτουργική περιοχή που επιλέξαμε και η θεωρητική απόδοση ισχύος της λυχνίας βρίσκονται αρκετά κάτω από αυτό το όριο, γεγονός που σημαίνει πως θα λειτουργεί σε ασφαλή επίπεδα.



Σχήμα 62. Προσέγγιση α ευθείας φόρτου EL34



Σχήμα 63. Προσέγγιση β ευθείας φόρτου EL34

Εφόσον έχουμε χαράξει επιτυχώς τις ευθείες φόρτου για τις όλες τις λυχνίες, μπορούμε μέσα από τα φύλλα δεδομένων να βρούμε τις τάσεις και τα ρεύματα τροφοδοσίας που χρειάζεται η εκάστοτε λυχνία για να λειτουργήσει. Η τάση και το ρεύμα αυτό συνδέονται στους ακροδέκτες του νήματος (filament) της λυχνίας. Οι πιο συνηθισμένες τιμές τάσης τροφοδοσίας των λυχνιών προενίσχυσης είναι τα 6.3V (παράλληλη σύνδεση) ή τα 12.6V (σύνδεση σε σειρά), ενώ στα ρεύματα τροφοδοσίας βρίσκουμε αντίστοιχα 0.3A και 0.15A. Οι τάσεις τροφοδοσίας των λυχνιών ισχύος παραμένουν ίδιες με τις παραπάνω τιμές, αλλά διαφέρουν στις τιμές του ρεύματος, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές ρευμάτων τροφοδοσίας των λυχνιών προενίσχυσης. Η λυχνία 12AX7 του κυκλώματός μας χρειάζεται τροφοδοσία 6.3V και 0.3A, ενώ η λυχνία ισχύος EL34 τροφοδοτείται με 6.3V και 1.5A.

Πλέον μπορούμε να αναζητήσουμε στην αγορά, τον κατάλληλο μετασχηματιστή τροφοδοσίας, ο οποίος μπορεί να προσφέρει τις τιμές τάσεων και ρεύματος που χρειαζόμαστε για το κύκλωμά μας. Ο μετασχηματιστής που συμπεριλήφθηκε στην υλοποίηση του κυκλώματος δέχεται  $230V_{rms}$  στο πρωτεύον τυλίγμα του ενώ προσφέρει τρία δευτερεύοντα τυλίγματα. Το ένα από αυτά, προσφέρει είτε  $235V_{rms}$  είτε  $275V_{rms}$  και έως 200mA, ενώ τα υπόλοιπα δύο τυλίγματα είναι πανομοιότυπα, και το καθένα από αυτά προσφέρει 6.3V και έως 2.5A. Μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα, ότι ο μετασχηματιστής που επιλέξαμε είναι μια πολύ καλή και ασφαλής επιλογή.

Ο σχεδιασμός του κυκλώματος τροφοδοσίας, ανόρθωσης και σταθεροποίησης τάσης είναι ένα από τα πιο σημαντικά στάδια στη σχεδίαση ενός αναλογικού ενισχυτή ακουστικών σημάτων, καθώς τα φίλτρα που θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να μειώσουν την τάση κυμάτωσης σε επίπεδα μικρότερα ή ίσα του 2% της τάσης που βρίσκεται στην έξοδο του ανορθωτή. Όσο μικρότερο είναι το ποσοστό κυμάτωσης, τόσο καλύτερο φιλτράρισμα έχουμε στο κύκλωμά μας. Αυτό είναι σημαντικό διότι θέλουμε όσο το δυνατόν σταθερότερη τάση πόλωσης στις λυχνίες οι οποίες πραγματεύονται ακουστικά σήματα, και άρα θα έχουμε καθαρότερο σήμα στην έξοδο του ενισχυτή. Έτσι, επιλέγουμε το τυλίγμα του μετασχηματιστή με τα  $235V_{rms}$ , τα οποία τροφοδοτούμε στην γέφυρα ανόρθωσης. Στην έξοδό της παίρνουμε θεωρητικά 325V, η οποία είναι μια τιμή λίγο χαμηλότερη από την τάση κορυφής του δευτερεύοντος τυλίγματος ( $332V_p$ ), γεγονός που στηρίζεται στις απώλειες κατά τον μετασχηματισμό και την ανόρθωση της τάσης. Έτσι, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την τιμή του πυκνωτή εισόδου (reservoir capacitor), ο οποίος φιλτράρει την τάση κυμάτωσης. Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της τιμής του δίνεται παρακάτω, όπου για πυκνωτή εισόδου  $C_r$ , συχνότητα  $f$  και συνολικό ρεύμα φορτίου  $I_L$  ισχύει:

$$C_r = \frac{I_L}{2fV_{ripple}} \quad (28)$$

Το συνολικό ρεύμα φορτίου  $I_L$  για το συγκεκριμένο κύκλωμα, θα υπολογιστεί από τη μαθηματική σχέση  $I_L = (3I_{bias}) + (I_c)$ . Η πρώτη παρένθεση στη μαθηματική σχέση, αναφέρεται στα ρεύματα των λυχνιών προενίσχυσης, ενώ η δεύτερη παρένθεση αναφέρεται στο ρεύμα καθόδου της λυχνίας ενίσχυσης, το οποίο ισούται με  $I_a + I_{sc}$ . Το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος (screen) είναι συνήθως το 5-10% του ρεύματος καθόδου, κατά γενική ομολογία. Επομένως, το συνολικό ρεύμα φορτίου  $I_L$  του κυκλώματος είναι ίσο με  $3 \cdot 1.1 + 55 + (55 \cdot 0.05) = 61.05\text{mA}$ .

Αντικαθιστώντας την σχέση 28 με τα δεδομένα του κυκλώματος, και εφόσον η συχνότητα της τάσης δικτύου στην Ελλάδα είναι 50Hz, έχουμε:

$$C_r = \frac{61.05}{2 \cdot 50 \cdot 6.5} = 94\mu\text{F}$$

Ωστόσο, μια γενική πρακτική είναι ο πυκνωτής εισόδου να έχει μεγάλη χωρητικότητα, από **470μF** και πάνω, όπως και υψηλή αντοχή σε μεγάλες τάσεις, για καλύτερο φιλτράρισμα της τάσης κυμάτωσης. Ακόμη, μια αντίσταση συνδέεται στα άκρα του πυκνωτή, έτσι ώστε να εκφορτίζει το ρεύμα του πυκνωτή που βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση, όταν ο ενισχυτής σταματήσει να λειτουργεί ή υπάρχει κάποια διαρροή στο κύκλωμα του σταθεροποιητή. Αν υποθέσουμε πως για χρόνο εκφόρτισης  $\tau$  10 δευτερολέπτων προς την τιμή χωρητικότητας του πυκνωτή, η τιμή αντίστασης που θα χρειαστούμε θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 22KΩ. Εμείς επιλέξαμε αντίσταση 47KΩ για μια πιο ασφαλή προσέγγιση. Η τάση κυμάτωσης θα βρίσκεται θεωρητικά περίπου στα **318.5V**.

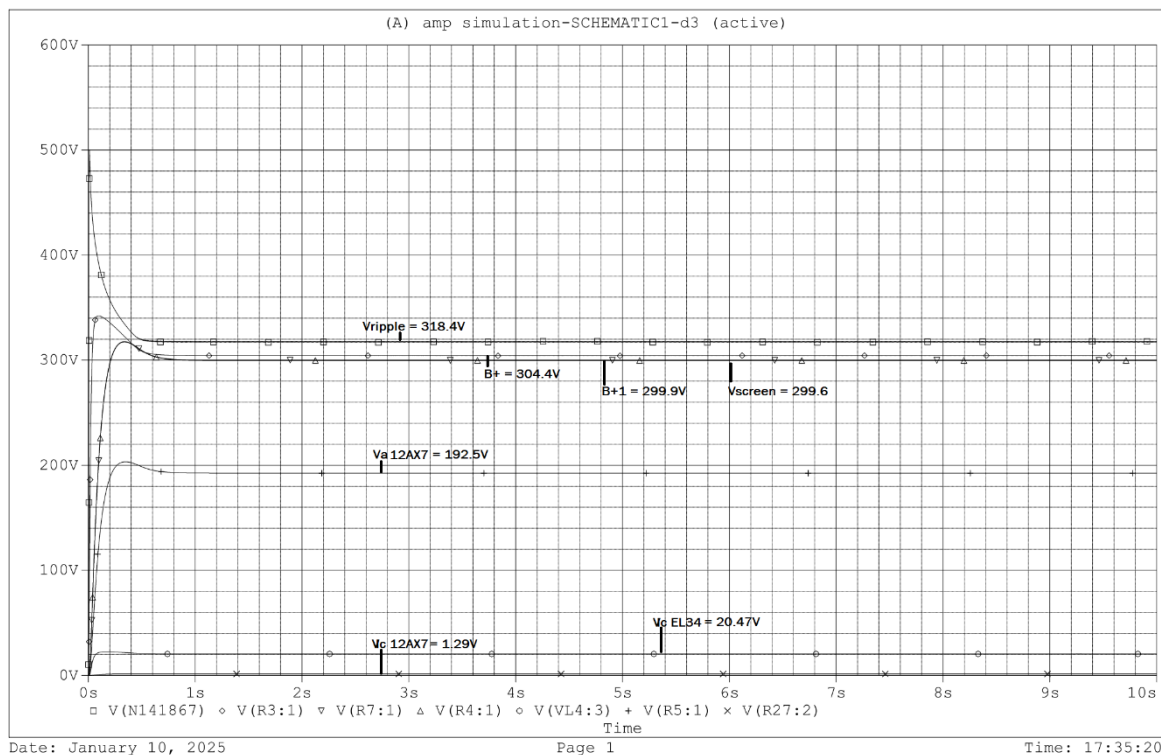
Στο κύκλωμα του σταθεροποιητή, έχουμε συμπεριλάβει δύο διαδοχικά κυκλώματα χαμηλοπερατών φίλτρων αντιστάσεων και πυκνωτών (low-pass RC filter), τα οποία αναλαμβάνουν την περαιτέρω εξομάλυνση της τάσης κυμάτωσης, την πτώση τάσης στα επιθυμητά επίπεδα έτσι ώστε να τροφοδοτηθούν οι λυχνίες με την κατάλληλη τάση αλλά και το κατάλληλο ρεύμα, και την ρύθμιση της συχνότητας αποκοπής σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή, έτσι ώστε να προσομοιώνεται με τον βέλτιστο τρόπο μια καθαρά συνεχής τάση (DC). Μια συνθήκη που αφορά την τιμή της συχνότητας αποκοπής για αυτό το στάδιο αναφέρει πως  $f_{cutoff} < 10\text{Hz}$ . Τα σημεία με ονομασία B+ και B+1 στο Σχήμα 33 είναι οι κόμβοι του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου, και τροφοδοτούν την άνοδο της λυχνίας EL34 μέσω του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εξόδου, και τις ανόδους των λυχνιών 12AX7 μέσω των αντιστάσεων ανόδων τους. Η τιμή της αντίστασης R2 υπολογίζεται στα **212Ω** αν διαιρέσουμε την πτώση τάσης των **13V** πάνω στην αντίσταση (η οποία υπολογίζεται αν αφαιρέσουμε την επιθυμητή τάση B+ από την φιλτραρισμένη τάση κυμάτωσης από τον πυκνωτή εισόδου C1) προς το συνολικό ρεύμα φορτίου του κυκλώματος, δηλαδή τα 61.05mA που έχουμε ήδη υπολογίσει. Από την άλλη, η τιμή της αντίστασης R3 υπολογίζεται στα **826Ω** αν διαιρέσουμε την πτώση τάσης των **5V** πάνω στην αντίσταση (η οποία υπολογίζεται αν αφαιρέσουμε την επιθυμητή τάση B+ 1 από την τάση B+) προς το συνολικό ρεύμα που προκύπτει αν προσθέσουμε τα ρεύματα πόλωσης των λυχνιών προενίσχυσης, ταλαντωτή μετατόπισης φάσης και το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος της λυχνίας ισχύος. Οι τιμές των πυκνωτών C2 και C3 επιλέχθηκαν στα **100μF**, καθώς υπήρχαν ήδη σε διαθεσιμότητα. Έτσι, ακολουθώντας την παρακάτω μαθηματική σχέση η συχνότητα αποκοπής του πρώτου φίλτρου υπολογίστηκε περίπου στα 7.5Hz, ενώ η συχνότητα του δεύτερου φίλτρου υπολογίστηκε περίπου στα 1.94Hz ικανοποιώντας την συνθήκη που αναφέρθηκε παραπάνω:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (29)$$

Οι τιμές αντιστάσεων που επιλέξαμε είναι οι κοντινότερες ονομαστικές τιμές που βρέθηκαν στην αγορά, επομένως R1 = 220Ω και R2 = 820Ω

Εφόσον υποθέσαμε παραπάνω ότι το ρεύμα του πλέγματος προστασίας της λυχνίας EL34 είναι περίπου το 5% του ρεύματος ανόδου της, άρα πλησιάζει θεωρητικά τα 2.75mA. Μια κοινή πρακτική είναι το ρεύμα αυτό να τροφοδοτείται στο προστατευτικό πλέγμα μέσω μιας αντίστασης, για να αποφευχθεί η απότομη υπερφόρτωσή του. Έτσι θυσιάζοντας μια σχετικά μικρή πτώση τάσης, προστατεύουμε το πλέγμα και παράλληλα τροφοδοτούμε το επιθυμητό ρεύμα. Έτσι, μέσω του νόμου του Ohm, επιλέξαμε μια αντίσταση των 120Ω για να τροφοδοτήσει τα 2.75mA στο προστατευτικό πλέγμα, θυσιάζοντας περίπου 0.33V πάνω στην αντίσταση αυτή.

Ένα στοιχείο του κυκλώματος σταθεροποίησης που παραλήφθηκε σκοπίμως έως τώρα, είναι ο διακόπτης STANDBY (αναμονής). Όταν το κύκλωμα του ενισχυτή αρχίσει να λειτουργεί για πρώτη φορά, ένα ρεύμα πολύ παραπάνω από τα υπολογισμένα επίπεδα εμφανίζεται στο κύκλωμα τροφοδοσίας (inrush current). Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι το γεγονός πως στο κύκλωμα του σταθεροποιητή υπάρχουν ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές υψηλής χωρητικότητας, οι οποίοι ζητούν πολύ υψηλές τιμές ρεύματος ούτως ώστε να φορτίσουν πλήρως και να αρχίσουν τη λειτουργία σταθεροποίησης και εξομάλυνσης. Ένας ακόμη λόγος είναι πως οι λυχνίες κενού, χρειάζονται κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να «ζεσταθούν» και να αρχίσουν να ζητούν τις τιμές ρεύματος που περιμένουμε. Συνεπώς ο διακόπτης αναμονής προστίθεται στο κύκλωμα, δίνοντας τον απαραίτητο χρόνο στις λυχνίες να έρθουν σε φυσιολογικά λειτουργικά επίπεδα, αποτρέποντας την τροφοδοσία τους με ρεύματα πολύ παραπάνω από τα ηλεκτρικά τους όρια, και άρα την μερική ή ολική καταστροφή τους. Σημαντικό είναι, τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του κυκλώματος τροφοδοσίας να έχουν ονομαστική τιμή αντοχής σε τάση και ισχύ παραπάνω από τα λειτουργικά όρια του κυκλώματος, λόγω του φαινομένου που μόλις αναλύθηκε. Παρακάτω, απεικονίζονται οι κυματομορφές του κυκλώματος σταθεροποιητή όπως αυτές προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice της OrCAD. Οι τιμές της προσομοίωσης βρίσκονται πολύ κοντά στις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε.



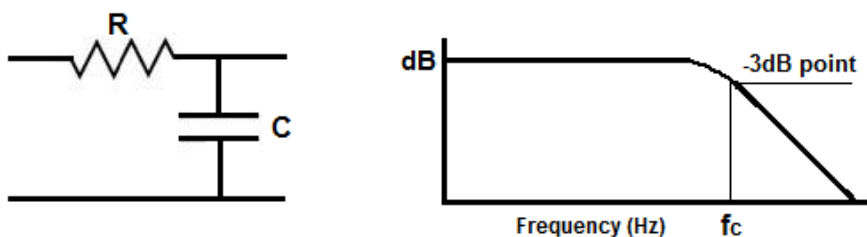
**Σχήμα 64. Κυματομορφές σταθεροποιητή στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice της OrCAD**

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε το κύκλωμα του ισοσταθμιστή συχνοτήτων (tone stack) που συμπεριλαμβάνεται στο γενικότερο στάδιο προενίσχυσης του σήματος. Εφόσον το ακουστικό ηλεκτρικό σήμα έχει επιδεχθεί μια πρώτη ενίσχυση και βρίσκεται σε διαχειρίσιμο επίπεδο, πλέον μπορούμε να απομονώσουμε συγκεκριμένες συχνότητες, τονίζοντας έτσι κάποιες άλλες. Μια απλή εφαρμογή είναι τα παθητικά ηλεκτρονικά φίλτρα, χρησιμοποιώντας δικτυώματα αντιστάσεων και πυκνωτών (RC filters). Ενώ φαινομενικά το κύκλωμα του ισοσταθμιστή φαντάζει απλό, στην πραγματικότητα είναι αρκετά περίπλοκο και αποτελείται από διάφορα είδη παθητικών φίλτρων. Για την καλύτερη κατανόηση των κυκλωμάτων αυτών, αρκεί να αναλυθεί η βασική λειτουργία των χαμηλοπερατών και υψιπερατών φίλτρων, καθώς από τη σύμπτυξη των δύο και κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, προκύπτει ένα ζωνοπερατό φίλτρο.

Ένα απλό χαμηλοπερατό φίλτρο, προκύπτει από την διαδοχική σύνδεση αντίστασης και πυκνωτή κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 65. Εκτός από τη ρύθμιση της συχνότητας αποκοπής μέσω της μαθηματικής σχέσης 29, η αντίσταση και ο πυκνωτής σχηματίζουν ένα διαιρέτη τάσης, η λειτουργία του οποίου αλλάζει σύμφωνα με τη μεταβαλλόμενη ωμική χωρητική αντίδραση  $X_C$  του πυκνωτή, η οποία αποτυπώνεται από τη μαθηματική σχέση 30. Εφόσον μιλάμε για εναλλασσόμενα σήματα, ο πυκνωτής προβάλλει μηδαμινή αντίσταση στα σήματα υψηλής συχνότητας, οδηγώντας τα στη γείωση, ενώ για σήματα χαμηλής συχνότητας ο πυκνωτής αποτελεί εμπόδιο και έτσι εκείνα δεν οδηγούνται στη γείωση αλλά συνεχίζουν προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Έτσι, αν σε κάποιο απλό παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τη μαθηματική σχέση για υπολογισμό της τάσης εξόδου ενός διαιρέτη τάσης (Σχέση 31), αντικαταστήσουμε την αντίσταση  $R_2$  με τη χωρητική αντίδραση  $X_C$ , θα παρατηρήσουμε πως για υψηλή τιμή χωρητικής αντίδρασης (**σήματα χαμηλής συχνότητας**), η τάση εξόδου θα είναι **περίπου ίση με την τάση εισόδου**. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή για χαμηλή τιμή χωρητικής αντίδρασης (**σήματα υψηλής συχνότητας**), η τάση εξόδου θα είναι **περίπου ή ίση με μηδέν**. Συνεπώς, με αυτό τον τρόπο επαληθεύεται η συμπεριφορά του χαμηλοπερατού φίλτρου. Το σημείο κατά τη γραφική αναπαράσταση της συχνοτικής απόκρισης του φίλτρου σε σχέση με το πλάτος του σήματος σε dB, όπου μπορούμε να διακρίνουμε τη συχνότητα αποκοπής του, ονομάζεται σημείο καμπής ή σημείο -3dB. Αυτό σημαίνει πως σε εκείνο το σημείο, το πλάτος του σήματος έχει ελαττωθεί στο 70.7% του αρχικού πλάτους του, και οριοθετεί ουσιαστικά την αρχή της εξασθένησής οποιασδήποτε συχνότητας μεγαλύτερης της  $f_c$ .

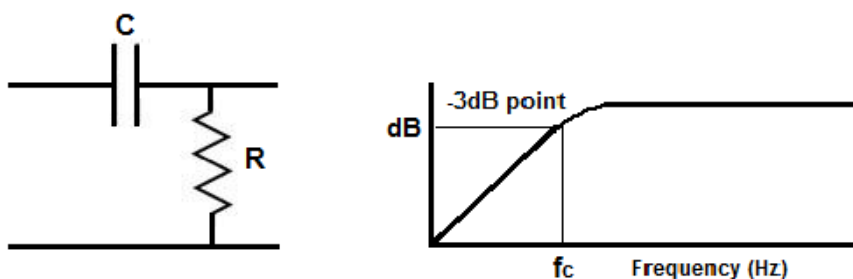
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (30)$$

$$V_O = V_I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (31)$$



Σχήμα 65. LPF

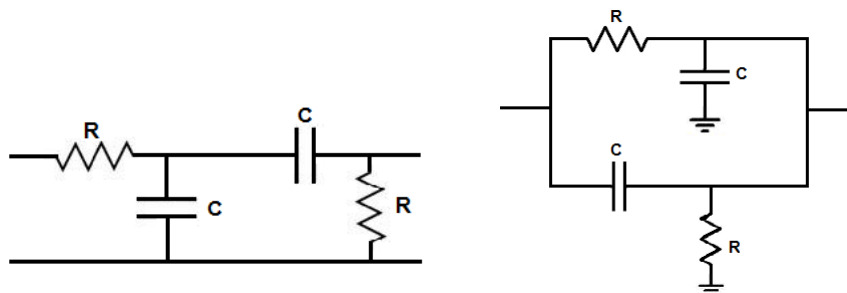
Αντίστοιχα, στη συνδεσμολογία ενός απλού υψιπερατού φίλτρου, όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 66 από τη διαδοχική συνδεσμολογία πυκνωτή και αντίστασης, σήματα χαμηλότερης συχνότητας της συχνότητας αποκοπής του φίλτρου (όπως αυτή ρυθμίστηκε από την επιλογή των κατάλληλων τιμών της αντίστασης και του πυκνωτή), απορρίπτονται ενώ σήματα μεγαλύτερα ή ίσα από αυτή οδηγούνται προς την αντίσταση. Όπως και στο παραπάνω κύκλωμα, έτσι και στο κύκλωμα υψιπερατού φίλτρου, η αντίσταση και ο πυκνωτής σχηματίζουν διαιρέτη τάσης, με τη διαφορά πως αν χάριν παραδείγματος αντικαταστήσουμε τα δεδομένα με την ίδια ακριβώς μεθοδολογία όπως στο παραπάνω παράδειγμα του διαιρέτη τάσης, θα παρατηρήσουμε πως κατά υψηλές τιμές χωρητικής αντίδρασης (**σήματα χαμηλής συχνότητας**), η τάση εξόδου θα είναι **περίπου ή ίση με μηδέν**, ενώ κατά χαμηλές τιμές χωρητικής αντίδρασης (**σήματα υψηλής συχνότητας**), η τάση εξόδου θα είναι **περίπου ίση με την τάση εισόδου**. Έτσι, το σημείο καμπής, οριοθετεί το σημείο της συχνότητας αποκοπής, συχνότητες κάτω από την οποία απορρίπτονται.



Σχήμα 66. *HPF*

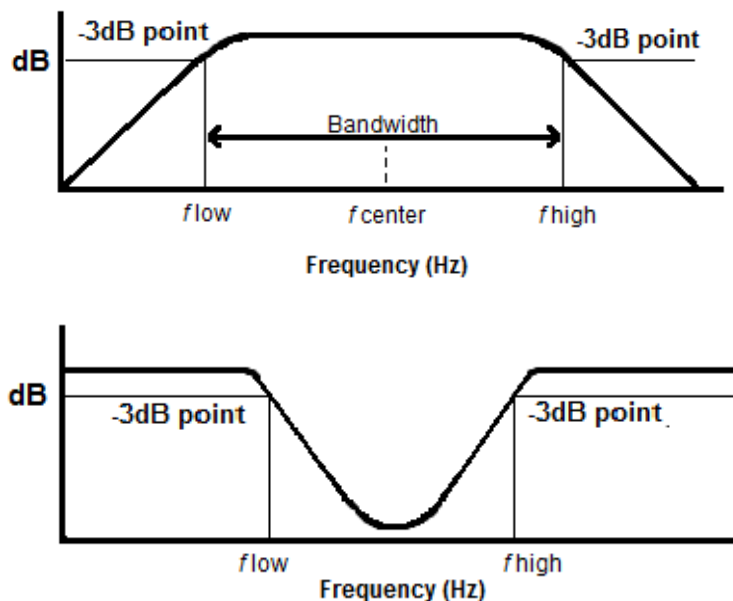
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σύμπτυξη των δύο οδηγεί στο σχηματισμό ενός ζωνοπερατού φίλτρου. Συνήθως, ο συνδυασμός αυτός έχει ως πρώτο στάδιο το υψιπερατό φίλτρο και έπειτα ως δεύτερο στάδιο το χαμηλοπερατό φίλτρο. Μια λογική εξήγηση για αυτό, είναι πως αν συνέβαινε το αντίθετο, δηλαδή αν απορρίπτονταν πρώτα οι χαμηλές συχνότητες, τότε το στάδιο του υψιπερατού φίλτρου θα ήταν περιττό. Στην πραγματικότητα όμως, η συνδεσμολογία αυτή μπορεί να λειτουργήσει αν ικανοποιείται το κριτήριο που περιγράφει η παρακάτω μαθηματική σχέση, όπου για αντίσταση χαμηλοπερατού φίλτρου  $R_{LPF}$  και αντίσταση υψιπερατού φίλτρου  $R_{HPF}$  ισχύει:

$$R_{LPF} < R_{HPF} \quad (32)$$



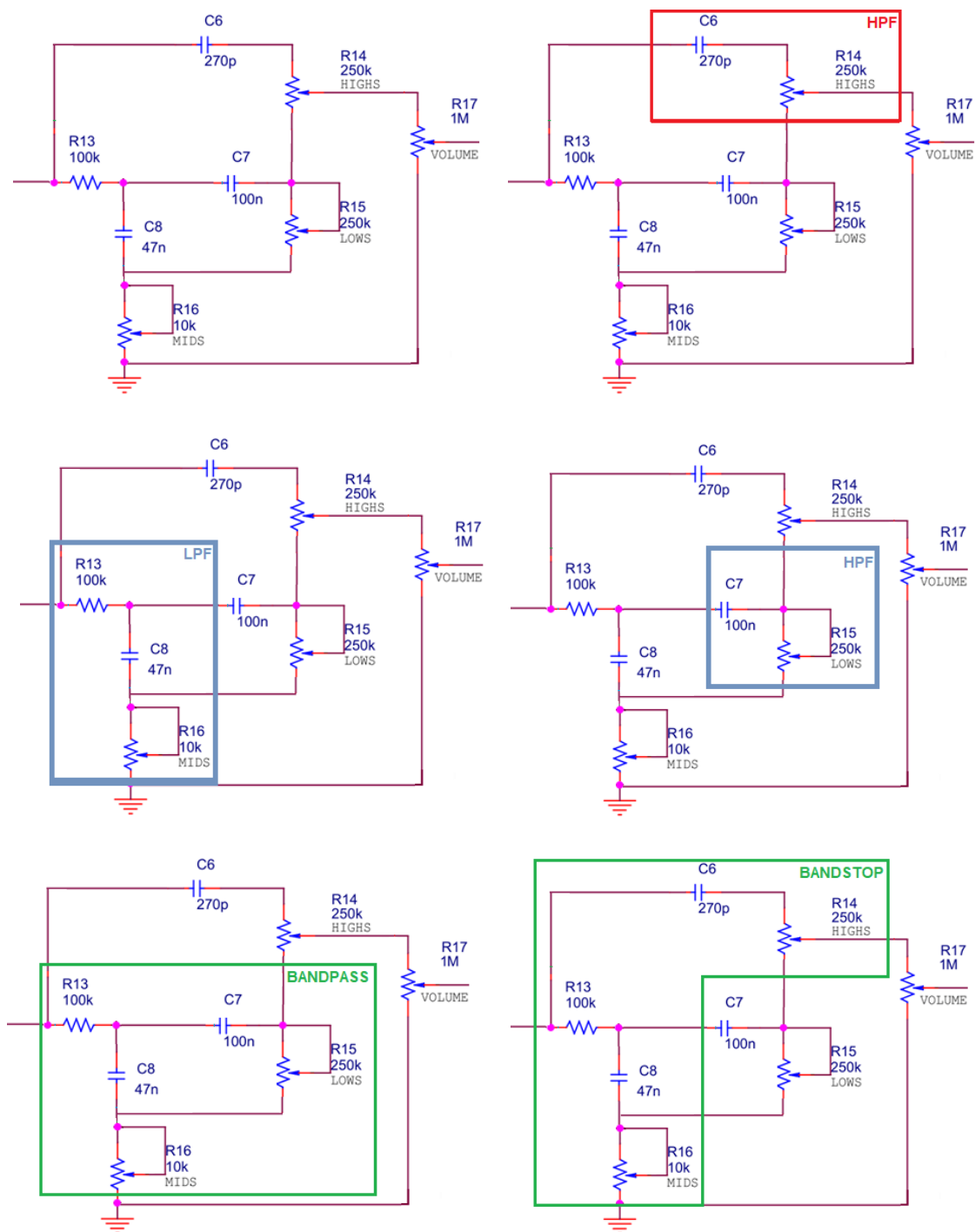
Σχήμα 67. Συνδεσμολογία bandpass (αριστερά), συνδεσμολογία bandstop (δεξιά)

Ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων ή ζωνοπερατό φίλτρο, απορρίπτει τόσο τις χαμηλές όσο και τις υψηλές συχνότητες, όπως υπαγορεύουν οι δύο συχνότητες αποκοπής  $f_{low}$  και  $f_{high}$  που βρίσκονται στο σημείο των  $-3\text{dB}$ , διατηρώντας έτσι ακέραιες τις συχνότητες ζώνης του σήματος. Αντίθετα, ένα φίλτρο απόρριψης ζώνης, απορρίπτει τη μεσαία ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των συχνοτήτων αποκοπής  $f_{low}$  και  $f_{high}$ , διατηρώντας παράλληλα ακέραιες τις χαμηλές και υψηλές συχνότητες.



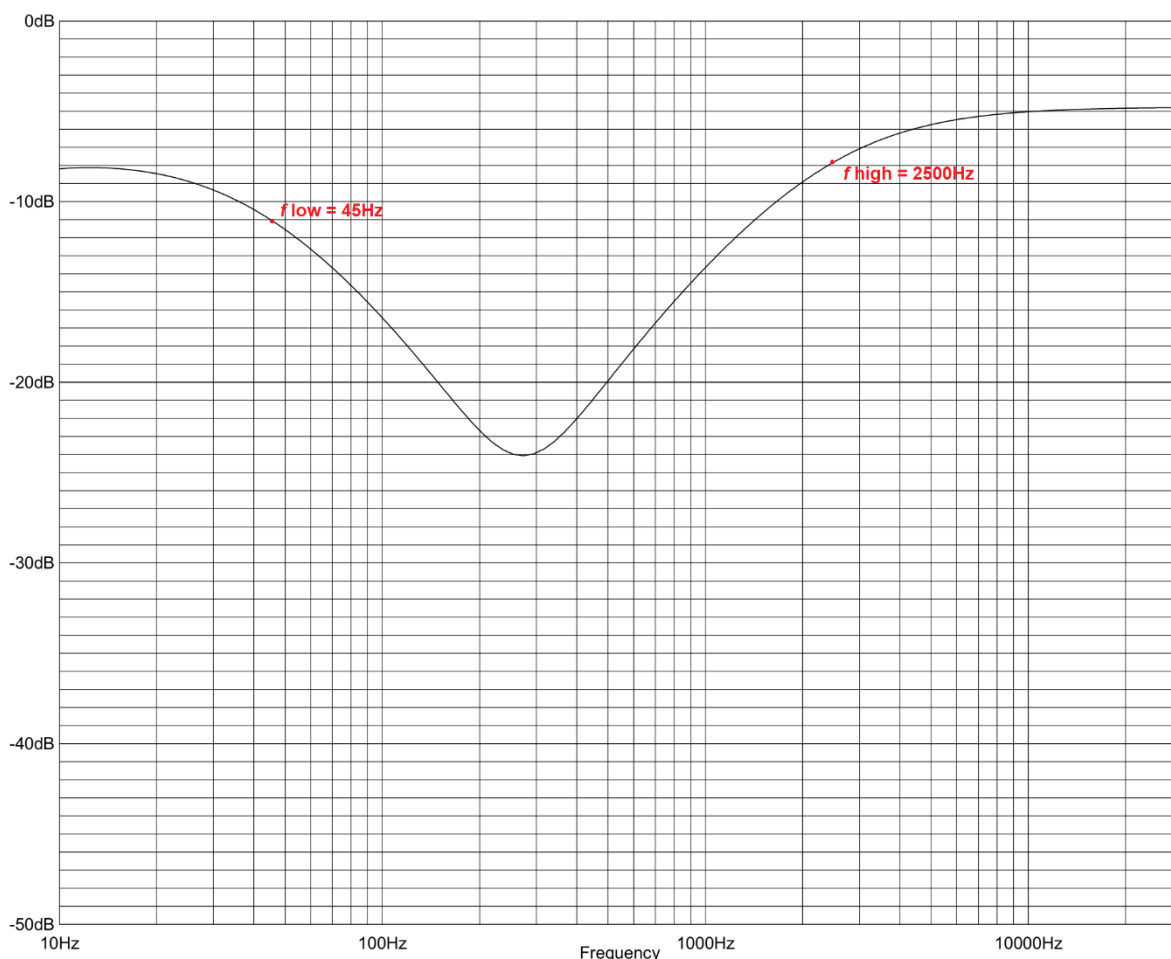
Σχήμα 68. Φίλτρο διέλευσης ζώνης (πάνω), φίλτρο απόρριψης ζώνης (κάτω)

Στο κύκλωμα του ενισχυτή της συγκεκριμένης πτυχιακής, σχεδιάστηκε το κύκλωμα ισοσταθμιστή συχνοτήτων, όπως ακριβώς απεικονίζεται στο Σχήμα 60. Το προενισχυμένο σήμα, εισέρχεται στο κύκλωμα του ισοσταθμιστή από τον κόμβο της αντίστασης R13 και του πυκνωτή C6. Ο πυκνωτής σε συνεργασία με το ποτενσιόμετρο R14 σχηματίζουν ένα **υψιπερατό φίλτρο (HPF)**, μέσα από το οποίο βρίσκουν δίοδο οι υψηλές συχνότητες του σήματος και τονίζονται ή εξασθενούνται, ανάλογα με τη θέση του ποτενσιόμετρου. Η αντίσταση R13 (tone slope resistor), σχηματίζει ένα **χαμηλοπερατό φίλτρο (LPF)** με τον πυκνωτή C8 και το ποτενσιόμετρο R16. Ο πυκνωτής C7 και το ποτενσιόμετρο R15 σχηματίζουν ένα **υψιπερατό φίλτρο (HPF)**. Τα δύο τελευταία φίλτρα που αναφέρθηκαν παραπάνω σχηματίζουν ένα **φίλτρο διέλευσης ζώνης (bandpass)**, ενώ τα δύο πρώτα φίλτρα που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχηματίζουν ένα **φίλτρο απόρριψης ζώνης (bandstop)**. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω φίλτρων, μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτός, αν το σχήμα του ισοσταθμιστή συχνοτήτων σχεδιαστεί με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, όπως αυτός απεικονίζεται στο Σχήμα 69.



Σχήμα 69. Συνδυασμοί φίλτρων του κυκλώματος ισοσταθμιστή

Η τελική μορφή της συχνотικής απόκρισης του ισοσταθμιστή συχνотήτων που σχεδιάσαμε, απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα, όπου η συχνотότητα σε Hz απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα ενώ το κέρδος σε dB απεικονίζεται στον κάθετο άξονα. Το κέρδος, έχει ως μέγιστη τιμή τα 0dB, διότι το κύκλωμα του ισοσταθμιστή όπως έχουμε ήδη αναλύσει είναι παθητικό, και άρα εξασθενεί συχνотητες με σκοπό κάποιες οι υπόλοιπες να τονίζονται τεχνητά, χωρίς δηλαδή να ενισχύονται. Έτσι, το αρνητικό πρόσημο στις τιμές του κέρδους αναπαριστά την εξασθένηση του σήματος ως προς την αρχική του τιμή. Οι υπολογισμοί για τις δύο συχνотητες αποκοπής  $f_{low}$  και  $f_{high}$  του φίλτρου απόρριψης ζώνης, έγιναν αντικαθιστώντας τις τιμές των εξαρτημάτων στη μαθηματική σχέση 29. Έτσι, για το σημείο -3dB του μέγιστου πλάτους, αρχικά για το χαμηλοπερατό φίλτρο, αντικαταστήσαμε τις τιμές της αντίστασης R13 και του πυκνωτή C8, ενώ όσον αφορά το υψηροατό φίλτρο, αντικαταστήσαμε την τιμή του πυκνωτή C6 και τη μέγιστη τιμή αντίστασης του ποτενσιομέτρου R14. Έτσι, η χαμηλή συχνотτητα αποκοπής του φίλτρου απόρριψης ζώνης υπολογίστηκε περίπου στα 33.8Hz, ενώ η υψηλή συχνотτητα αποκοπής υπολογίστηκε περίπου στα 2359Hz. Στο Σχήμα 70, που σχεδιάστηκε μέσω του προγράμματος της Duncan Amplification, βλέπουμε πως οι τιμές των συχνотήτων αποκοπής είναι πολύ κοντά σε εκείνες που υπολογίσαμε. Το φίλτρο απόρριψης ζώνης, επιλέχθηκε για να εξισορροπεί το τελικό ακουστικό σήμα, καθώς οι ηλεκτρικές κιθάρες τείνουν να τονίζουν τις μεσαίες συχνотητες.



**Σχήμα 70. Συχνотική απόκριση ισοσταθμιστή**

Τέλος, σχεδιάστηκε το κύκλωμα του ταλαντωτή μετατόπισης φάσης, θέλοντας να εντάξουμε στο κύκλωμα του ενισχυτή την επιλογή της διαμόρφωσης του πλάτους του προενισχυμένου σήματος. Το κύκλωμα της διαμόρφωσης αυτής, ονομάζεται αλλιώς και **tremolo effect**.

Τα κριτήρια που χρειάζεται να πληροί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, έτσι ώστε να παρουσιάζει διαρκή ταλάντωση για συγκεκριμένο χρόνο, παραθέτονται για πρώτη φορά από τον Γερμανό φυσικό Heinrich Barkhausen, από τον οποίο πήραν και το όνομά τους. Το πρώτο κριτήριο Barkhausen, αναφέρει πως η διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου ενός ταλαντωτή ισούται με  $0^\circ$  (Σχέση 33), ενώ το δεύτερο κριτήριο αναφέρει πως το κέρδος του βρόχου ανάδρασης (feedback loop gain) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με τη μονάδα (Σχέση 34).

$$\Delta\varphi(V_{OUT} - V_{IN}) = 0^\circ \quad (33)$$

$$|A_V B| \geq 1 \quad (34)$$

Το συγκεκριμένο κύκλωμα ταλαντωτή, εφόσον, διαθέτει επιπλέον κριτήρια τα οποία εξασφαλίζουν τη σωστή του λειτουργία. Το πρώτο από αυτά, θέτει ότι το κέρδος της λυχνίας κενού που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 29, όπως μπορεί να βρει κανείς αν υπολογίσει τη συνάρτηση μεταφοράς του δικτύωματος μετατόπισης φάσης. Η λυχνία 12AX7 που επιλέχθηκε, κρίθηκε κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς διαθέτει ονομαστική τιμή κέρδους  $\mu = 100$ . Σύμφωνα με την μαθηματική σχέση 35, για αντίσταση ανόδου  $R_a$  και εσωτερική αντίσταση ανόδου  $r_a$ , το πραγματικό κέρδος  $A_V$  της λυχνίας υπολογίζεται **61.5**, ικανοποιώντας το παραπάνω κριτήριο. Μιας και πρόκειται για ταλαντωτή χαμηλών συχνοτήτων (LFO), η **συχνότητα ταλάντωσης** ενός τέτοιου κυκλώματος βρίσκεται συνήθως μεταξύ 1-10Hz, και για το συγκεκριμένο κύκλωμα υπολογίζεται από τη μαθηματική σχέση 36 περίπου στα **6.5Hz**, ενώ η σύνθετη αντίσταση εισόδου του δικτύωματος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση εξόδου, προς αποφυγή υπερδότησης του σταδίου του ταλαντωτή, η οποία θα είχε αντίκτυπο στο συνολικό κέρδος του. Όπως έχουμε ήδη αναλύσει, στο υποκεφάλαιο των λυχνιών κενού, παρατηρείται μετατόπιση φάσης της τάξης των  $180^\circ$ , μεταξύ του πλέγματος ελέγχου και της ανόδου. Το δικτύωμα ανάδρασης, χρησιμοποιώντας τρία διαδοχικά χαμηλοπερατά φίλτρα, προσδίδει συνολικά  $180^\circ$  μετατόπισης φάσης ( $60^\circ$  από το κάθε ένα φίλτρο) στην είσοδο του ταλαντωτή. Έτσι, αν αντικαταστήσουμε τα δεδομένα στην μαθηματική σχέση 33, θα δούμε ότι ικανοποιείται το εν λόγω κριτήριο. Ο έλεγχος της συχνότητας ταλάντωσης γίνεται μέσω του ποτενσιόμετρου που βρίσκεται σε σειρά με μια αντίσταση η οποία βρίσκει εφαρμογή καθώς αν το ποτενσιόμετρο βρισκόταν στη χαμηλότερή του ρύθμιση, δεν θα υπήρχε ταλάντωση στο κύκλωμα, ενώ η ένταση του κυκλώματος ρυθμίζεται μέσω του συνδεδεμένου στην άνοδο ποτενσιόμετρου, το οποίο οδηγεί το σήμα του LFO ταλαντωτή στο πλέγμα ελέγχου της λυχνίας ισχύος, όπου εκεί αλληλεπιδρά με το προενισχυμένο σήμα, δημιουργώντας το tremolo effect.

$$A_V = \frac{\mu \cdot R_a}{R_a + r_a} > 29 \quad (35)$$

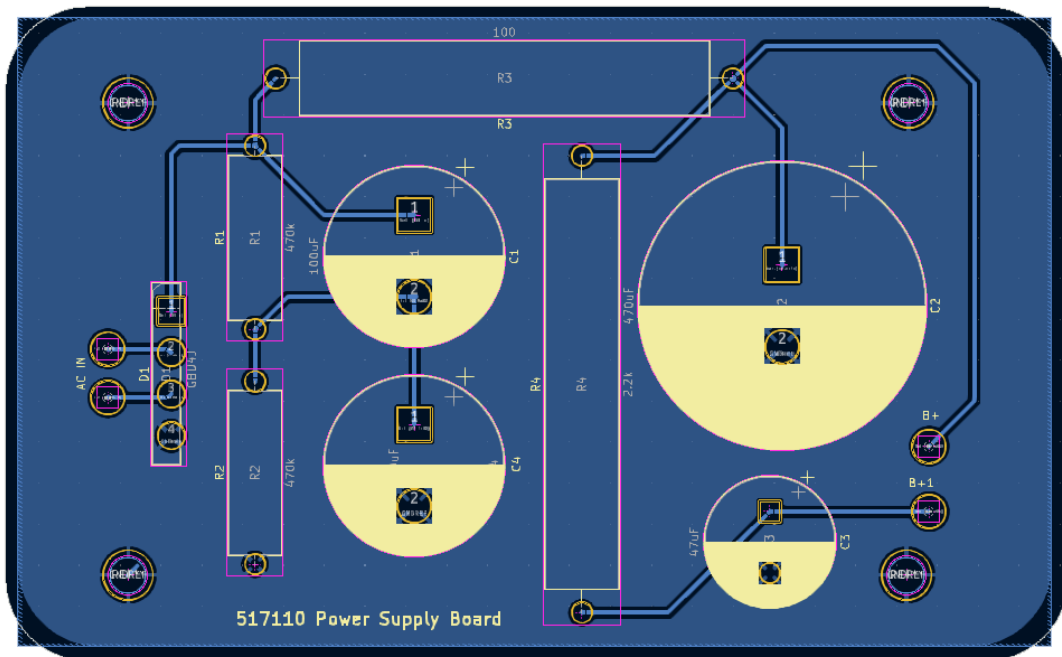
$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{6} RC} \quad (36)$$

## 4. Κατασκευή

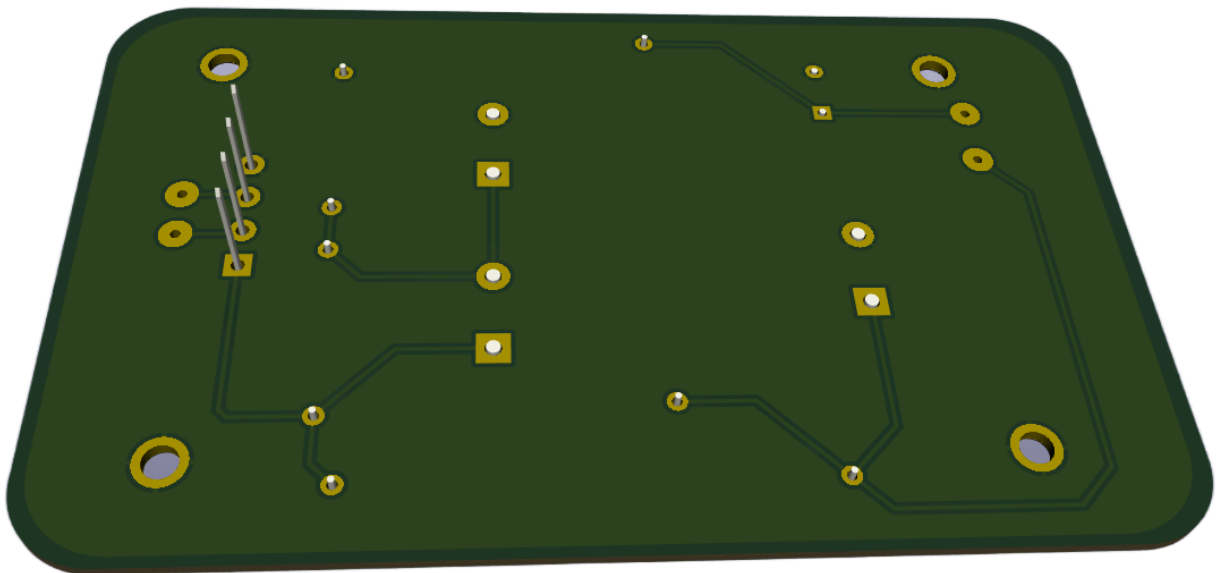
Η κατασκευή έγινε με γνώμονα το χαμηλότερο δυνατό οικονομικό κόστος, την ποιότητα κατασκευής και ένα όμορφο οπτικά αποτέλεσμα. Τα υλικά της κατασκευής επιλέχθηκαν με βάση την ποιότητα αλλά και το μέγεθός τους καθώς τα μεγαλύτερα σε μέγεθος μεταλλικά κουτιά κατασκευών τα οποία θα επέτρεπαν μεγαλύτερη άνεση στην υλοποίηση, είναι δυσεύρετα και ακριβότερα. Οι τιμές των παθητικών εξαρτημάτων του κυκλώματος, επιλέχθηκαν στις κοντινότερες δυνατές τιμές σε σύγκριση με εκείνες των θεωρητικών υπολογισμών και της προσομοίωσης του κυκλώματος. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ονομαστική τιμή αντοχής σε τάση ή ισχύ αρκετών εξαρτημάτων (κυρίως στο στάδιο τροφοδοσίας, ανόρθωσης και σταθεροποίησης), τα οποία επιδέχονται μεγάλα ρεύματα ή αναμένονται να έχουν μεγάλες απώλειες ισχύος και άρα να λειτουργούν υπό ανεβασμένες θερμοκρασίες. Ακόμη, καθώς το κύκλωμα πραγματεύεται ακουστικά σήματα, έγιναν οι κατάλληλες κινήσεις για το χαμηλότερο δυνατό θόρυβο στο κύκλωμα (διεύρυνση απόστασης μεταξύ σταδίου προενίσχυσης και εξόδου, συστροφή καλωδίων τροφοδοσίας λυχνιών προς αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, διαφορά 180° μεταξύ μετασχηματιστών τροφοδοσίας και εξόδου, μικρή απόσταση συνδέσεων μεταξύ εξαρτημάτων, συνδεσμολογία star-ground σημείων γείωσης).

Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του κυκλώματος, έγινε η επιλογή σχεδίασης τυπωμένων πλακετών για τις συνδέσεις του κυκλώματος, αρχίζοντας από την πλακέτα του κυκλώματος ανόρθωσης και σταθεροποίησης. Η επιλογή αυτή έγινε, καθώς οι τυπωμένες πλακέτες προσδίδουν απλότητα, ελαττώνουν την πιθανότητα λάθους στη συνδεσμολογία, και προσφέρουν ένα όμορφο οπτικό αποτέλεσμα. Η σχεδίαση της παρακάτω πλακέτας έγινε μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος KiCad. Η διαδικασία ήταν χρονοβόρα αλλά ταυτόχρονα πολύ ενδιαφέρουσα, καθώς πέρα από τις σωστές συνδέσεις όπως ορίζουν οι κανόνες σχεδίασης τυπωμένων πλακετών, έπρεπε να δοθεί προσοχή στη λεπτομέρεια (αποστάσεις, μεγέθη εξαρτημάτων που ανταποκρίνονται στα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε, λειτουργικότητα, διάχυση θερμότητας, σωστές γειώσεις, μέγεθος πλακέτας). Επικοινωνώντας με διάφορους κατασκευαστές τυπωμένων πλακετών σε Ελλάδα και εξωτερικό, διαπίστωσα πως δεν υπάρχει δυνατότητα κατασκευής μίας πλακέτας παρά μόνο ενός αριθμού από αυτές. Ο στόχος ήταν να σχεδιαστούν τυπωμένες πλακέτες για το κύκλωμα προενίσχυσης, το κύκλωμα ενίσχυσης ισχύος αλλά και το κύκλωμα του ταλαντωτή, όμως η επικοινωνία με τους κατασκευαστές κατέστησε το κόστος απαγορευτικό για τα δεδομένα της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας.

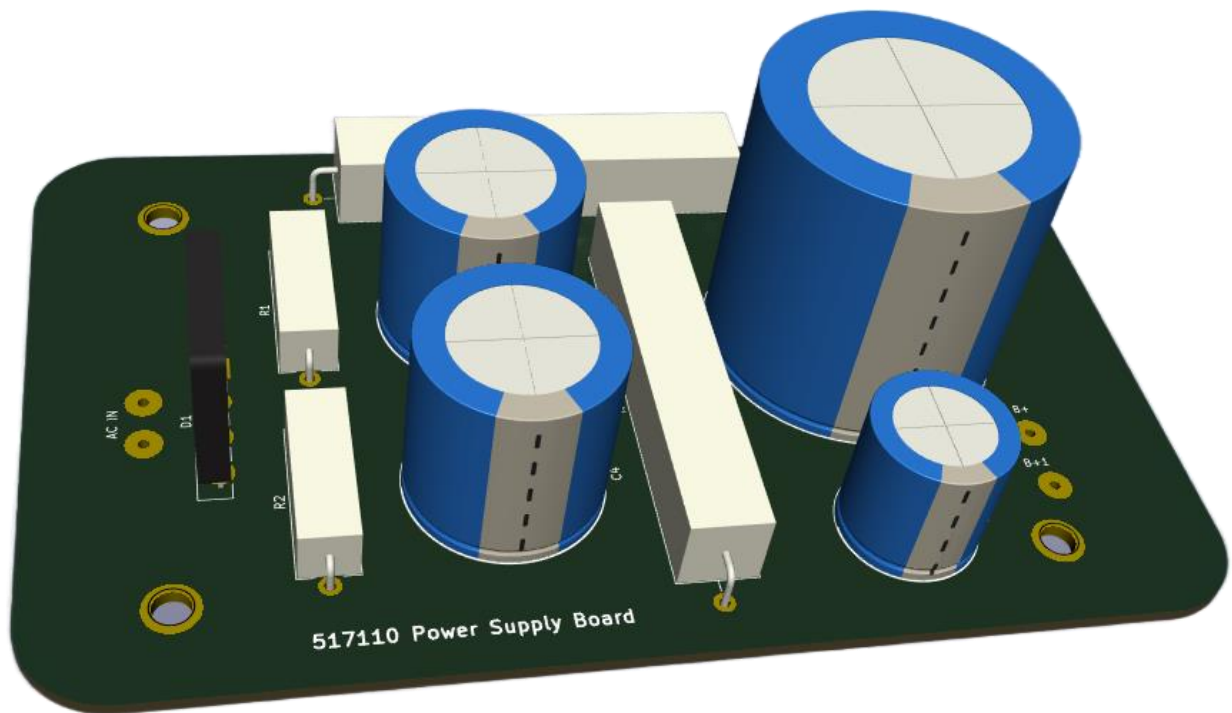
Συνεπώς, επιλέχθηκε η συνδεσμολογία από σημείο σε σημείο (point-to-point), καθώς ήταν η πλέον απλή, λιγότερο χρονοβόρα και οικονομικότερη επιλογή. Προς αποφυγή περαιτέρω περιπλοκής των συνδέσεων αλλά και μεγαλύτερης ασφάλειας, χρησιμοποιήθηκαν δεματικά καλωδίων (tie-wraps) και θερμοσυστελλόμενα λάστιχα καλωδίων σε αρκετά σημεία της κατασκευής. Ακόμη, ο αγωγός της γείωσης του καλωδίου τροφοδοσίας συνδέθηκε στο μεταλλικό σασί, το οποίο χρησιμοποιείται για τη γείωση του κυκλώματος (chassis ground), ενώ ενσωματώθηκε ψήκτρα στη γέφυρα ανόρθωσης προς αποφυγή υπερθέρμανσής της. Παρακάτω απεικονίζεται η τυπωμένη πλακέτα του κυκλώματος ανόρθωσης και σταθεροποίησης, σε διςδιάστατη και τριςδιάστατη μορφή.



Σχήμα 71. Τοπομένη πλακέτα σε 2D



Σχήμα 72. Κάτω όψη τοπομένης πλακέτας σε 3D



Σχήμα 73. Πάνω όψη τυπωμένης πλακέτας σε 3D

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή, έγιναν μετρήσεις συνεχούς ρεύματος (DC) για όλα τα στάδια του ενισχυτή. Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζονται οι τιμές των μετρήσεων για κάθε στάδιο ξεχωριστά.

Πίνακας 9. Στάδιο ανόρθωσης και σταθεροποίησης

Τάση πυκνωτή εισόδου $C_r$	317 V
Τάση B+	305.3 V
Τάση B+1	299.3 V

Πίνακας 10. Στάδιο πρώτης προενίσχυσης

Τάση ανόδου $V_{a1}$	155.5 V
Τάση καθόδου $V_{k1}$	1.26 V
Ρεύμα ανόδου $I_{a1}$	0.88 mA
Θερμική απώλεια ισχύος ανόδου	0.136 W

**Πίνακας 11. Στάδιο δεύτερης προενίσχυσης**

Τάση ανόδου $V_{a2}$	154.5 V
Τάση καθόδου $V_{k2}$	1.25 V
Ρεύμα ανόδου $I_{a2}$	0.89 mA
Θερμική απώλεια ισχύος ανόδου	0.137 W

**Πίνακας 12. Στάδιο ταλαντωτή μετατόπισης φάσης**

Τάση ανόδου $V_a$	148.6 V
Τάση καθόδου $V_k$	1.14 V
Ρεύμα ανόδου $I_a$	0.92 mA
Θερμική απώλεια ισχύος ανόδου	0.136 W

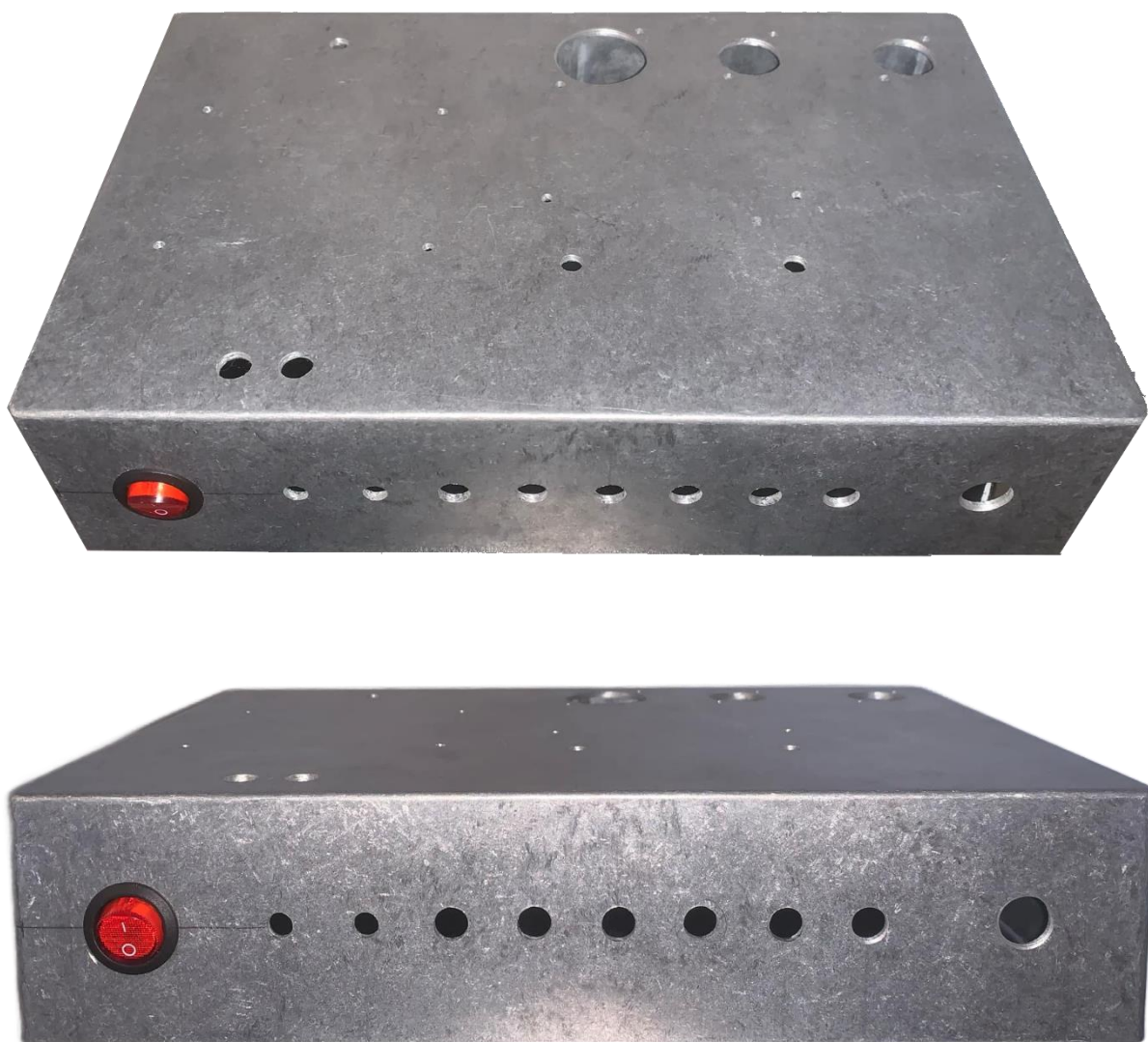
**Πίνακας 13. Στάδιο ενίσχυσης ισχύος (ταλαντωτής εκτός λειτουργίας)**

Τάση ανόδου $V_a$	299.2 V
Τάση καθόδου $V_k$	21.3 V
Τάση πλέγματος προστασίας $V_{sc}$	295.6 V
Ρεύμα ανόδου $I_a$	58 mA
Θερμική απώλεια ισχύος ανόδου	16.11 W

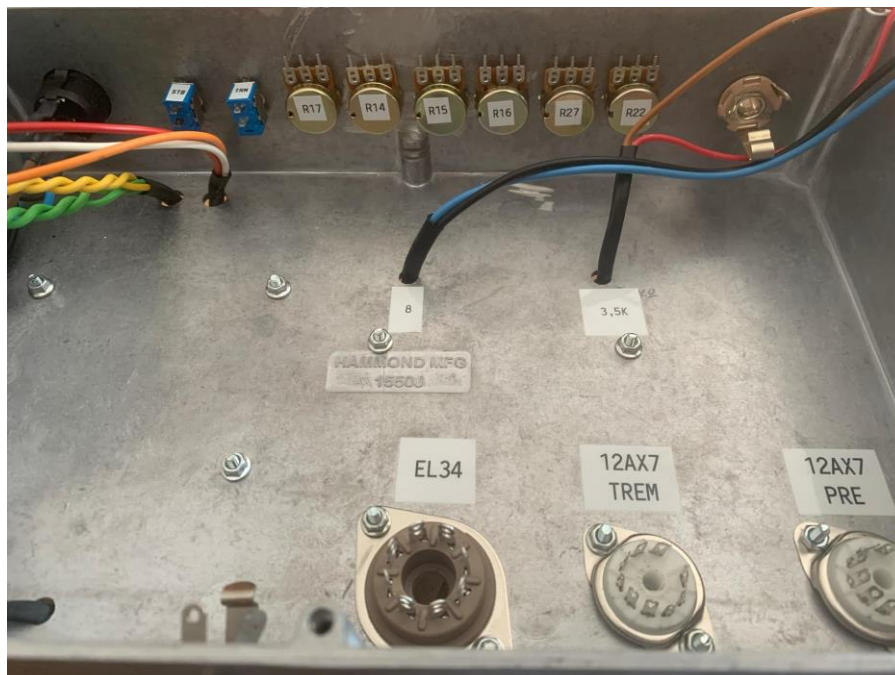
**Πίνακας 14. Στάδιο ενίσχυσης ισχύος (ταλαντωτής σε λειτουργία)**

Εύρος τάσης ανόδου $V_a$	292.8 V – 300.7 V
Εύρος τάσης καθόδου $V_k$	20.8 V – 23 V
Εύρος τάσης πλέγματος προστασίας $V_{sc}$	291.3 V - 292.8 V
Ρεύμα ανόδου $I_a$	58 mA – 42 mA
Θερμική απώλεια ισχύος ανόδου	16.98 W - 12.62 W

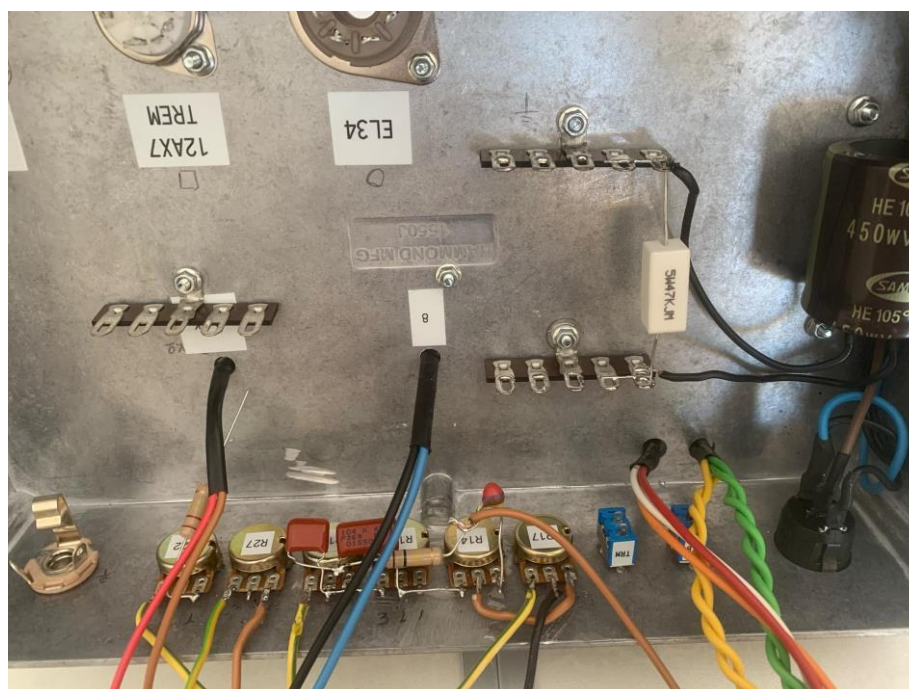
Οι μετρήσεις για σταθερό σήμα εισόδου εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) δεν πραγματοποιήθηκαν καθώς δεν υπήρχε διαθεσιμότητα των απαραίτητων ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης (γεννήτρια συχνοτήτων, παλμογράφος). Έτσι, εφόσον οι μετρήσεις συνεχούς ρεύματος είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε κατά τη σχεδίαση και προσομοίωση του κυκλώματος, ο ενισχυτής που κατασκευάσαμε κρίνεται ασφαλής για χρήση, ενώ εφόσον χαρακτηρίζεται ως κύκλωμα κλάσης A, αναμένεται να λειτουργεί στο 25% της συνολικής ισχύος που προσφέρει ο μετασχηματιστής τροφοδοσίας. Σύμφωνα με τα λειτουργικά όρια που θέσαμε, τα οποία επιβεβαιώνονται και από τις παραπάνω μετρήσεις, ο ενισχυτής αποδίδει περίπου 3-4W ισχύος, ενώ αν χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά λειτουργικά όρια, έχει τη δυνατότητα να φτάσει έως και 11-12W.



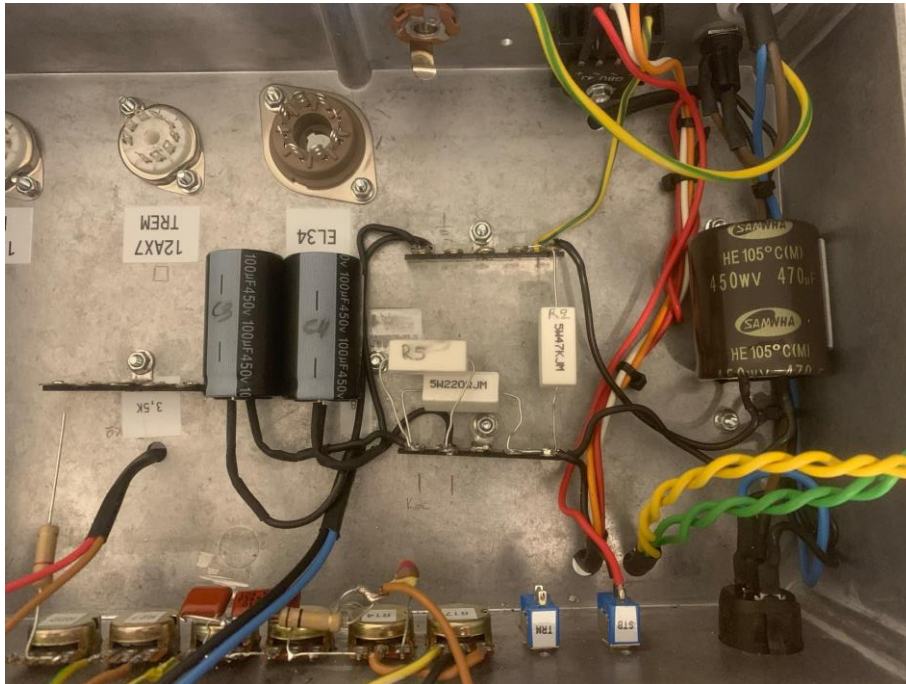
**Εικόνα 1.** Κουτί κατασκευής από αλουμίνιο μετά τη διάτρηση



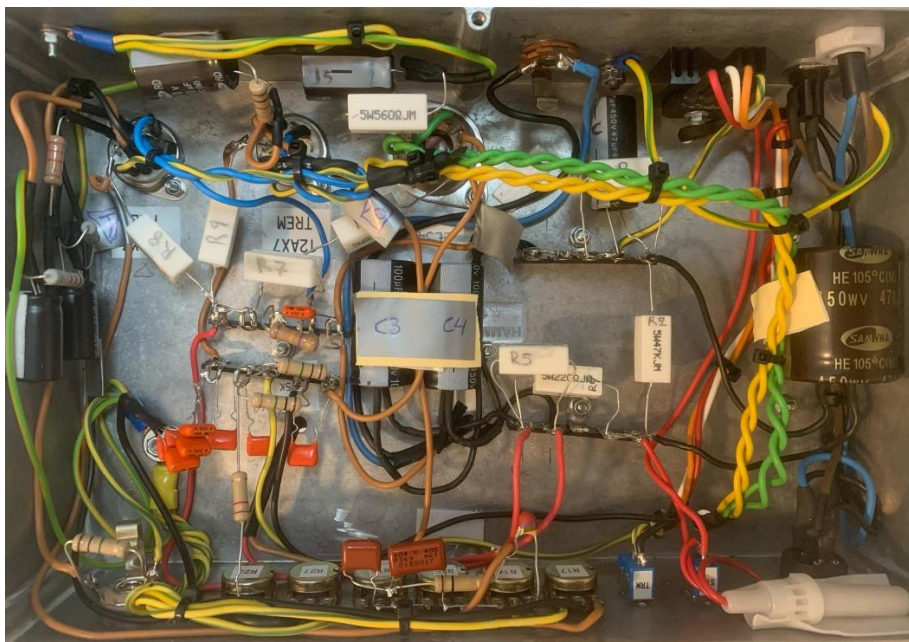
**Εικόνα 2.** *Επισήμανση σημείων της κατασκευής με αυτοκόλλητα*



**Εικόνα 3.** *Εγκατάσταση βοηθητικών κλεμών για τη συνδεσμολογία του κυκλώματος*



**Εικόνα 4.** Εγκατάσταση εξαρτημάτων σταδίου τροφοδοσίας, ανόρθωσης και εξομάλυνσης



**Εικόνα 5.** Τελικό στάδιο κατασκευής

## Συμπεράσματα και Προτάσεις

Το ταξίδι ως την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας ήταν συναρπαστικό σε όλα τα στάδιά του. Δαπανήθηκε πολύς χρόνος στη μελέτη ολόκληρης της διαδρομής του σήματος ηλεκτρικής κιθάρας, από τους μαγνήτες και την μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό σήμα, στην προενίσχυση, διαμόρφωση και ενίσχυση ισχύος μέσω λυχνιών κενού, έως την μετατροπή του ξανά σε ήχο μέσω των ηχείων. Η διαδικασία αυτή, αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς η επανάσταση των ηλεκτρονικών ξεκίνησε από τις λυχνίες κενού, επομένως η ανακάλυψη ενός -καινούριου για εμένα- ιστορικού κόσμου όσον αφορά τα κυκλώματα ενισχυτών ακουστικών σημάτων (*Fender, Marshall, Mullard κ.α.*), ήταν πολύ ενδιαφέρουσα. Ακόμη, μέσω της μελέτης αυτής, είναι πλέον αρκετά πιο εύκολο να κατανοήσω τα ήδη διδαχθέντα κυκλώματα με τρανζίστορ του σύγχρονου κόσμου, όπως επίσης συνδεσμολογίες φίλτρων και τη σημασία τους στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης, χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα προσομοίωσης (PSpice της OrCAD, Circuit Maker της Protel) όπως και πρόγραμμα σχεδίασης τυπωμένων πλακετών (KiCad), η χρήση των οποίων ήταν μια πρόκληση λόγω της ανάγκης ενσωμάτωσης μοντέλων και παραμέτρων λυχνιών κενού. Η διαδικασία προσομοίωσης ήταν πολύ σημαντική στην κατανόηση της συμπεριφοράς των επιμέρους κυκλωμάτων του ενισχυτή, όπως και στην επαλήθευση των μετρήσεων μετά την κατασκευή του. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, παρατηρήθηκαν μικρά σχεδιαστικά και κατασκευαστικά λάθη από μέρους μου, τα οποία βρέθηκαν και διορθώθηκαν εύκολα. Η επιλογή της λυχνίας ισχύος EL34 αποδείχθηκε καίρια, καθώς συγχωρεί τέτοιου είδους λάθη, λόγω των υψηλών ηλεκτρικών ορίων της. Στο τέλος της κατασκευής, παρατηρήθηκε θόρυβος σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα από τα αποδεκτά. Η διαδικασία εύρεσης της αιτίας του θορύβου ήταν ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα, καθώς δεν παρατηρήθηκε κάποιο σχεδιαστικό ή κατασκευαστικό λάθος. Τελικά, η ποιότητα των ποτενσιόμετρων ρύθμισης των εντάσεων και του ισοσταθμιστή, αποδείχθηκε κάκιστη και έτσι αντικαταστάθηκαν με καινούρια υψηλής ποιότητας, μειώνοντας τα επίπεδα θορύβου στο ελάχιστο δυνατό σύμφωνα με τα δεδομένα της κατασκευής.

Τέλος, προς βέλτιστη μείωση του θορύβου στο ελάχιστο, μείωση του οικονομικού κόστους της κατασκευής και βελτίωση της ποιότητας του ήχου στην έξοδο του ενισχυτή, προτείνονται κάποιες τροποποιήσεις. Η μείωση του θορύβου, θα είναι περισσότερο αισθητή αν οι αγωγοί μεταφοράς του σήματος είναι μικρότεροι σε μήκος και το καλώδιο είναι θωρακισμένο. Ακόμα, όπως διαπιστώθηκε, η ποιότητα κατασκευής των εξαρτημάτων που έχουν άμεση σχέση με το σήμα προς ενίσχυση θα πρέπει να έχει προτεραιότητα και όχι το οικονομικό τους κόστος ή η ευκολία στην εύρεσή τους. Η περαιτέρω απομόνωση των κυκλωμάτων και καλωδίων τροφοδοσίας των λυχνιών και της βαθμίδας εξόδου, καθώς και επιχρυσωμένες βάσεις σύνδεσης των λυχνιών ή λυχνίες με επιχρυσωμένους ακροδέκτες μπορούν επίσης να μειώσουν το θόρυβο, ιδιαίτερα στις λυχνίες προενίσχυσης. Η μείωση του οικονομικού κόστους μπορεί να επιτευχθεί, αν το μέγεθος της κατασκευής είναι μικρότερο ή η σχεδίαση γίνει με μεγαλύτερη εμπειρία. Η βελτίωση της ποιότητας του ήχου μπορεί να επιτευχθεί αν το κύκλωμα των φίλτρων του ισοσταθμιστή είναι ενεργό (active-filter) και δεν χρησιμοποιεί παθητικά εξαρτήματα, ή αν ενσωματωθούν διακόπτες που προσδίδουν διαδρομές για αυτούσιο το σήμα της κιθάρας από το ένα στάδιο προενίσχυσης στο άλλο, όταν δεν θέλουμε την επιλογή της εξασθένησης και τόνωσης κάποιων συγκεκριμένων συχνοτήτων. Προσθήκες όπως ένα VU meter, ενσωμάτωση καμπίνας ή εναλλαγή της κλάσης του ενισχυτή είναι ενδιαφέροντα εγχειρήματα που θα πραγματοποιηθούν στο μέλλον.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H.D. Young and R.A. Freedman, *University Physics with Modern Physics*, 2004
- [2] G.A. Briggs and H.H. Garner, *Amplifiers, The Why and How of Good Amplification*, 1952
- [3] H. Lewis York, *Amplifiers*, 1964
- [4] Ε.Γ. Τσαγάκης, *Γενικά Ηλεκτρονικά*, 1982
- [5] Γ.Β. Ζορμπάς, *Ηλεκτρονικά*, 1977
- [6] F. Langford-Smith, *Radiotron Designer's Handbook*, 1953
- [7] N. H. Crowhurst, *Basic Audio*, 1959
- [8] N. H. Crowhurst and G. F. Cooper, *High-Fidelity Circuit Design*, 1956
- [9] A. V. Eastman, *Fundamentals of Vacuum Tubes*, 1949
- [10] J. Darr, *Electric Guitar, Amplifier handbook*, 1973
- [11] A. Malvino and D. Bates, *Electronic Principles 8<sup>th</sup> Edition*, 2017
- [12] [r-type.org](http://r-type.org)
- [13] [valvewizard.co.uk](http://valvewizard.co.uk)
- [14] [d-labelectronics.com](http://d-labelectronics.com)
- [15] [aikenamps.com](http://aikenamps.com)