

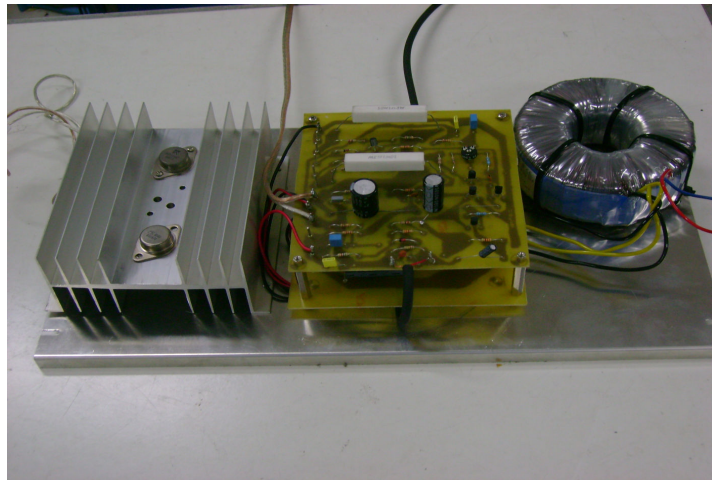


# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

**09322ΥΣ**

**Κατασκευή ενισχυτή ισχύος 100W**



**Φοιτητές : Μπέντση Μαρία (505306)**

**Τζαμπάζη Γεωργία (505055)**

**Καθηγητής : Δρακάκη Μαρία**

**Ημερομηνία ανάληψης : Μάρτιος 2010**

**Ημερομηνία περάτωσης : Σεπτέμβριος 2010**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενισχυτές εξόδου ή σκλάβοι (slaves) όπως λένε στον κόσμο της μουσικής, δεν παρουσιάζουν μόνο ενδιαφέρον στην κατασκευή, αλλά είναι και χρήσιμοι σχεδόν σε όλους.

Οι απόψεις για την απόδοση και γενικότερα για τα χαρακτηριστικά τους ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις και την αισθητική του καθενός. Ακόμα μεγαλύτερη διαφωνία είναι μεταξύ των υπερασπιστών της λυχνίας και των υπερασπιστών των τρανζίστορ.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται μια αναφορά στις πληροφορίες και στο θεωρητικό υλικό πάνω στο οποίο βασίστηκε η σχεδίαση της κατασκευής του ενισχυτή. Οι πληροφορίες σχετίζονται με τη λειτουργία και τα είδη των μετασχηματιστών και των τροφοδοτικών. Επίσης, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις βασικές αρχές και τις τάξεις των ενισχυτών ισχύος με τους οποίους και ασχολείται η συγκεκριμένη κατασκευή.

Βασικός στόχος είναι η κάλυψη όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών που βοηθούν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορεί κάποιος να μελετήσει ή να σχεδιάσει έναν ενισχυτή.

**Λέξεις κλειδιά** : ενισχυτής ισχύος, τροφοδοτικό, μετασχηματιστής

## SUMMARY

Power amplifiers or «slaves» as they say called in the world of music, they do not have interest only in the construction, but they are useful almost to everyone.

The aspects about the performance and generally about the characteristics of the amplifiers vary depending on the demands and the aesthetics of each individual. Even biggest variance is between the tube and the transistor advocates.

In the chapters that follow there is a reference to the information and the reading matter in which the whole design of the amplifier's construction was based on. The information is referring to the function and types of the transformers and feeders. Also, there is a special reference on the basic functioning and the classes of the power amplifiers.

The essential purpose is to provide as many information as possible that help to understand the way in which someone can study or design an amplifier.

**Key words** : power amplifier, supply/feeder, transformer

## Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b> .....	<b>7</b>
<b>Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή στον ήχο</b> .....	<b>8</b>
Ποιό στοιχείο αποδίδει τον καλύτερο ήχο; Οι λυχνίες ή τα στοιχεία στερεάς κατάστασης;.....	8
Ποιά είναι όμως η σπουδαιότητα των μουσικών αρμονικών;.....	9
Ακουστική μικρών χώρων.....	12
Βελτίωση – αναβάθμιση συσκευών ήχου.....	15
Αναβάθμιση ηχοσυστήματος.....	16
Συντήρηση συστήματος ήχου.....	17
Ηχείο. Ισχύς και ένταση.....	18
<b>Κεφάλαιο 2 – Ενισχυτές ισχύος</b> .....	<b>21</b>
Όροι ενισχυτών.....	21
Τάξεις λειτουργίας.....	21
Είδη σύζευξης.....	23
Περιοχές συχνοτήτων.....	23
Επίπεδα σήματος.....	24
Οι δύο γραμμές φορτίου.....	24
<i>DC γραμμή φορτίου</i> .....	25
<i>AC γραμμή φορτίου</i> .....	26
Ψαλιδισμός των μεγάλων σημάτων.....	27
Μέγιστη έξοδος.....	27
Λειτουργία τάξης A.....	28
<i>Κέρδος ισχύος</i> .....	29
<i>Ισχύς εξόδου</i> .....	30
<i>Απώλεια ισχύος του transistor</i> .....	30
<i>Ροή ρεύματος</i> .....	31
<i>Απόδοση</i> .....	31
Λειτουργία τάξης B.....	32
<i>Κύκλωμα push – pull</i> .....	32

<i>Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα</i> .....	33
<b>Πόλωση ενισχυτών τάξης B</b> .....	34
<i>Πόλωση διαιρέτη τάσης</i> .....	34
<i>Πόλωση με διόδους</i> .....	36
<b>Λειτουργία τάξης AB</b> .....	37
<i>Ακόλουθος εκπομπού push – pull τάξης B</i> .....	37
<i>Κύκλωμα push – pull</i> .....	37
<i>DC γραμμή φορτίου</i> .....	39
<i>AC γραμμή φορτίου</i> .....	40
<i>AC ανάλυση</i> .....	40
<i>Συνολική Λειτουργία</i> .....	40
<i>Παραμόρφωση διασταύρωσης</i> .....	41
<i>Τάξη AB</i> .....	41
<i>Τύποι ισχύος</i> .....	42
<b>Κατανάλωση ισχύος του transistor</b> .....	43
<b>Ο περιορισμός ισχύος του transistor</b> .....	43
<i>Θερμοκρασία περιβάλλοντος</i> .....	43
<i>Παράγοντας ελάττωσης</i> .....	44
<i>Απαγωγικοί θερμότητες</i> .....	46
<i>Θερμοκρασία θήκης</i> .....	47
<b>Παραμόρφωση στους ενισχυτές</b> .....	48
<b>Κεφάλαιο 3 – Μετασχηματιστές ήχου</b> .....	<b>51</b>
<b>Τι είναι οι μετασχηματιστές ήχου;</b> .....	51
<i>Μετασχηματιστές τροφοδοσίας</i> .....	52
<i>Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων</i> .....	56
<i>Αυτομετασχηματιστές</i> .....	57
<i>Μετασχηματιστές ρεύματος</i> .....	58
<i>Μετασχηματιστές υψηλής τάσης</i> .....	58
<i>Τοροειδής μετασχηματιστής</i> .....	59
<b>Ατέλειες του μετασχηματιστή</b> .....	62
<b>Θόρυβος μετασχηματιστών</b> .....	63

<b>Κεφάλαιο 4 - Σχεδιασμός και βασικές αρχές των τροφοδοτικών.....</b>	<b>64</b>
<i>Υποβιβασμός τάσης.....</i>	64
<i>Ανόρθωση.....</i>	65
<i>Φιλτράρισμα.....</i>	68
<i>Σταθεροποίηση.....</i>	70
Χαρακτηριστικά.....	80
Προβλήματα.....	81
Τύποι τροφοδοτικών.....	82
<b>Κεφάλαιο 5 – Κατασκευή του ενισχυτή ισχύος 100W.....</b>	<b>87</b>
Το κύκλωμα.....	87
Τεχνικές προδιαγραφές.....	90
Το τροφοδοτικό.....	91
Ρύθμιση του ενισχυτή.....	92
Κατασκευή πλακέτας.....	94
Κατάλογος υλικών του ενισχυτή.....	96
Κατάλογος υλικών του τροφοδοτικού.....	97
Διαδικασία κατασκευής.....	98
Μετρήσεις και διαγράμματα.....	100
Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα.....	104
<b>Επίλογος.....</b>	<b>105</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>106</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο ενισχυτής είναι μια συσκευή που αυξάνει σε χρήσιμη ισχύ την ισχύ ή την τάση που παράγουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το σήμα εξόδου μπορεί να είναι η ίδια ή διαφορετική κυματομορφή, αλλά σίγουρα το πλάτος του σήματος εξόδου είναι ενισχυμένο.

Η αποστολή των ενισχυτών ισχύος είναι η παροχή καθορισμένου κέρδους σε ένα επεξεργασμένο σήμα και η απόδοση ισχύος σε ένα φορτίο, όπως είναι τα ηχεία. Αυτό πρέπει να γίνει χωρίς να νοθεύεται το αρχικό σήμα με θόρυβο, ταλαντώσεις ή παραμορφώσεις, ενώ οδηγεί ένα πλήθος από φορτία. Επιπλέον, πρέπει να αντέχει στην κακομεταχείριση, όπως τα ανοιχτά κυκλώματα και τα βραχυκυκλώματα.

Η απόδοση υψηλής ισχύος δεν είναι απλό έργο για έναν ενισχυτή. Απαραίτητες προϋποθέσεις για να παρέχουμε ικανή ισχύς προς τα ηχεία που συνδέονται στον ενισχυτή, είναι η σημαντική ενίσχυση τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος. Ο λόγος είναι ότι η απόδοση των μεγαφώνων είναι μόλις μερικές μονάδες των εκατό, το οποίο σημαίνει ότι σίγουρα χρειάζονται αρκετά watt για να προκαλέσουν επαρκή στάθμη ηχητικής πίεσης μέσα στο σαλόνι μας. Στην περίπτωση μάλιστα συναυλιών ή εξωτερικών εκδηλώσεων, απαιτούνται πολύ περισσότερα watt και η απαιτούμενη ισχύς μπορεί εύκολα να φθάσει μέχρι και τα kilowatt.

Για την ενίσχυση ισχύος σε ένα τελικό ενισχυτή, έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχέδια που έχουν να κάνουν με την χρήση τρανζίστορ ή FET τα οποία αποσκοπούν στην παραγωγή σημάτων εξόδου υψηλής ποιότητας ή την βελτίωση της απόδοσης των βαθμίδων εξόδου.

Όταν λοιπόν ένας σχεδιαστής αναπτύσσει μια βαθμίδα εξόδου, θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν τα ειδικά χαρακτηριστικά των μονάδων με ημιαγωγούς που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Εάν είχαμε την δυνατότητα να δουλέψουμε με ιδανικά τρανζίστορ ή FET η ανάπτυξη ποιοτικών ενισχυτών θα ήταν πιο εύκολη. Δυστυχώς όμως όλες οι διατάξεις ημιαγωγών υποφέρουν από μη γραμμικότητα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά ενίσχυσης κι αυτό προκαλεί σημαντικά προβλήματα.

Ένας άλλος σημαντικός παράγων ο οποίος ειδικά στους μεγάλους ενισχυτές πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν, είναι η απαγόμενη θερμότητα. Η θερμότητα αυτή είναι δυνατόν να οδηγήσει σε φαινόμενα με σημαντικές επιπτώσεις όπως είναι η ολίσθηση του ρεύματος ηρεμίας και η παραμόρφωση θερμικής διαμόρφωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΗΧΟ

### **Ποιά στοιχείο αποδίδει τον καλύτερο ήχο; Οι λυχνίες ή τα στοιχεία στερεάς κατάστασης;**

Ένα από τα μεγαλύτερα ερωτήματα, όσον αφορά την κατασκευή συστημάτων αναπαραγωγής ή εγγραφής ήχου, είναι η επιλογή ανάμεσα στις λυχνίες και στα στοιχεία στερεάς κατάστασης. Οι λόγοι επιλογής μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, μπορεί να είναι και απλή ανθρώπινη ιδιοτροπία ή εμμονή. Πολλοί κατασκευαστές θεωρούν την επιλογή τους σαν αποτέλεσμα ψυχοακουστικής αιτίας.

Τα πλεονεκτήματα των τρανζίστορ σε σχέση με τις λυχνίες είναι πολλά. Όπως προαναφέρθηκε η καταναλισκόμενη ισχύς για την λειτουργία των λυχνιών είναι κατά πολύ μικρότερη στα στερεάς κατάστασης. Μια λυχνία εκτός της τάσης που απαιτείται για το νήμα θέρμανσης, απαιτεί και πολύ υψηλή τάση ανόδου συνήθως πάνω από 180V. Ενώ ένα απλό τρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με μερικά Volt στον συλλέκτη και στον εκπομπό για μια αξιόλογη τιμή ισχύος εξόδου. Επομένως, η αποδοτικότητα των λυχνιών είναι μειωμένη. Ο όγκος επίσης των λυχνιών είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από αυτό των τρανζίστορ, με αποτέλεσμα ο συνολικός όγκος της ενισχυτικής διάταξης να είναι υπερβολικός. Πολλές φορές χρειάζονται δύο διαφορετικά σασί για ένα στερεοφωνικό τελικό ενισχυτή ενώ, ένας στερεοφωνικός με στοιχεία στερεάς κατάστασης καταλαμβάνει το πολύ μια διάτρητη πλακέτα. Οι λυχνίες εκτός από τις κατασκευαστικές ατέλειες που μπορεί να παρουσιάσουν, όπως όλες οι βιομηχανικές κατασκευές (αυτό ισχύει και για τα τρανζίστορ), έχουν και την πιθανότητα ραγίσματος του γυάλινου κλωβού κατά την μεταφορά ή λόγο απροσεξίας. Είναι δηλαδή εύθραυστες και το κόστος τους δεν είναι αμελητέο, ώστε να θεωρηθεί μηδαμινό μειονέκτημα. Εν αντίθεση και πάλι με τα τρανζίστορ, τα mosfet και τους τελεστικούς όπου η τιμή τους μπορεί να είναι αμελητέα. Σημαντικό επίσης πρόβλημα είναι η μικρή διάρκεια ζωής των λυχνιών, όπου εξαναγκάζει την αλλαγή τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κυρίως των λυχνιών εξόδου, όπου μπορούν να υποστούν και την μεγαλύτερη φθορά αν λειτουργούν πάνω από τα ανεκτά όρια τους, για μεγαλύτερη απόδοση.

Παρόλα αυτά οι ενισχυτές με λυχνίες (παντός τύπου) έχουν πιστούς φίλους και μεταξύ τους βρίσκονται και οι περισσότεροι μουσικοί. Είναι σημαντικό που οι ένθερμοι



υποστηρικτές δεν είναι μηχανικοί. Αυτό γιατί ο μηχανικός κρίνει περισσότερο τα πράγματα από το αποτέλεσμα των μετρήσεων, ενώ ο μουσικός εμπιστεύεται περισσότερο το αυτί του. Τι είναι λοιπόν αυτό που όλοι ψάχνουν στον ήχο και το βρίσκουν στις λυχνίες; Όποιος και αν ερωτηθεί δίνει την ίδια απάντηση., « Ο ήχος είναι πιο γλυκός, πιο ζεστός, πιο απαλός .....». Τι σημαίνει λοιπόν αυτό;

Ψάχνοντας και μελετώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων πολλών τελικών ενισχυτών με λυχνίες, με τρανζίστορ και με τελεστικούς, πέρα από τις διαφορές που αναφέρθηκαν, οι μετρήσεις δεν διέφεραν δραματικά μεταξύ τους ώστε να θεωρηθεί ότι υπερέχει ο ένας ενισχυτής σε σχέση με τον άλλο. Υπήρχε όμως κάτι που θα μπορούσε να είναι και η απόδειξη για την διαφορά στην οποία αναφέρονται. Αυτό αφορούσε την παραμόρφωση των αρμονικών.

Στους ενισχυτές με λυχνίες το κυρίαρχο χαρακτηριστικό είναι η ισχυρή παρουσία της δεύτερης και τρίτης αρμονικής, μερικές φορές σε συμφωνία με την τέταρτη και πέμπτη, αλλά πάντοτε με πολύ μεγαλύτερο πλάτος. Αρμονικές μεγαλύτερες της πέμπτης δεν είναι σημαντικές μέχρι η υπερφόρτωση να ξεπεράσει τα 12dB. Η σημαντική διαφορά στους ενισχυτές με λυχνίες, είναι η εναλλαγή της θέσης της δεύτερης και της τρίτης αρμονικής.

Στους ενισχυτές με τρανζίστορ το ξεχωριστό χαρακτηριστικό είναι η εμφάνιση του στοιχείου της τρίτης αρμονικής. Όλες οι υπόλοιπες αρμονικές είναι παρούσες, αλλά με πολύ μικρότερο πλάτος από αυτό της τρίτης. Όταν η υπερφόρτωση φτάνει στο σημείο αποκοπής, όλες οι υψηλότερες αρμονικές αρχίζουν να μεγαλώνουν, ως προς το πλάτος, ταυτόχρονα. Αυτό το σημείο είναι γενικά μεταξύ των 3 - 6dB του 1% της τρίτης αρμονικής. Στους ενισχυτές με τελεστικούς όλες οι άρτιες αρμονικές είναι συμπιεσμένες.

### **Ποιά είναι όμως η σπουδαιότητα των μουσικών αρμονικών;**

Για να εντοπιστεί το νόημα τους πρέπει να καθοριστεί η σχέση τους με την ανθρώπινη ακοή. Υπάρχει μια κοντινή σχέση μεταξύ της ηλεκτρονικής παραμόρφωσης και του μουσικού χρωματισμού. Αυτή είναι και το πραγματικό κλειδί στη διαφορά της ακουστικής μεταξύ των ενισχυτών με λυχνίες και τρανζίστορ. Ίσως οι βασικότεροι γνώστες σε αυτήν την περιοχή είναι οι κατασκευαστές μουσικών οργάνων. Μέσα από χρόνιο πειραματισμό μπορούν να καθορίσουν πως οι αρμονικές επιδρούν στον χρωματισμό του τόνου του οργάνου.

Ο πρωταρχικός χρωματισμός ενός οργάνου καθορίζεται από την ισχύ των πρώτων αρμονικών. Κάθε μία από τις αρμονικές μπορεί να παράγει το δικό της χαρακτηριστικό αποτέλεσμα όταν είναι κυρίαρχη ή μπορεί να διαμορφώσει το αποτέλεσμα της κύριας αρμονικής όταν είναι σημαντικής τιμής. Στην απλούστερη ταξινόμηση η αρμονικές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις περιττές που παράγουν «απότομους» ή «καλυμμένους» ήχους και στις άρτιες που παράγουν «γεμάτους» ή «ωδικούς» ήχους.

Η δεύτερη και η τρίτη αρμονική είναι η πιο σημαντικές από την άποψη της παραμόρφωσης.

Μουσικά η δεύτερη αρμονική είναι μια οκτάβα πάνω από την θεμελιώδη και σχεδόν δεν ακούγεται, αν και μορφοποιεί τον ήχο, κάνοντας τον πιο γεμάτο. Η τρίτη αρμονική καθορίζεται σαν πεντάτονο ή μουσικό δωδέκατο. Παράγει έναν ήχο που οι μουσικοί τον αναφέρουν σαν «καλυμμένο». Αντί να κάνει τον τόνο πιο γεμάτο, μια ισχυρή τρίτη αρμονική, τον μαλακώνει. Προσθέτοντας μια πέμπτη σε μια τρίτη προσδίδει στον ήχο μια μεταλλική χροιά που γίνεται πολύ ενοχλητική όσο αυξάνεται το πλάτος των αρμονικών. Μια δυνατή τρίτη με μια δυνατή δεύτερη αρμονική τείνει να «ανοίξει» το φαινόμενο του «καλυμμένου» ήχου. Προσθέτοντας την τέταρτη με την πέμπτη στα προηγούμενα αλλάζει ο ήχος σε «ανοιχτής κόρνας». Οι υψηλότερες αρμονικές πάνω από την έβδομη, δίνουν στον ήχο «αιχμηρές άκρες» και απότομα κοψίματα. Εάν η άκρη είναι ισορροπημένη στο βασικό μουσικό τόνο, τείνει να ενισχύσει την θεμελιώδη, δίνοντας στον ήχο ανεβασμένο τον τόνο σε δίεση. Πολλές από αυτές τις αρμονικές είναι ασυσχέτιστα μουσικά τονίσματα, όπως η έβδομη, η ένατη και η ενδέκατη. Γι' αυτό πολλές άκρες μπορούν να αποδώσουν έναν οξύ και εκνευριστικό παράφωνο ήχο. Μιας και το αυτί είναι πολύ ευαίσθητο στις υψηλές αρμονικές, ο έλεγχος του πλάτους τους είναι υψίστης σημασίας. Οι προηγούμενες αναφορές δείχνουν, ότι το φαινόμενο των «άκρων» σχετίζεται άμεσα με την ένταση της νότας. Παίζοντας με μια τρομπέτα (με την μελέτη της οποίας έχουν γίνει οι παραπάνω αναφορές) την ίδια νότα με ένταση ή απαλά, έχει μικρή διαφορά στο πλάτος της θεμελιώδους και των χαμηλών αρμονικών. Όπως και αν έχει πάντως, πάνω από την έκτη αρμονική η αύξηση ή η μείωση στο πλάτος έχει σχεδόν άμεση αναλογία στην ένταση του ήχου. Αυτή η ισορροπία των άκρων (υψηλές αρμονικές) είναι ένα κριτικής σημασίας σήμα έντασης για το ανθρώπινο αυτί.

Η βασική διαφορά μεταξύ των ενισχυτών με λυχνιών και αυτών με στοιχεία στερεάς κατάστασης, όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, είναι η αναλογία των αρμονικών που παράγονται στην περιοχή της υπερφόρτωσης.

Οι ενισχυτές με τρανζίστορ εκθέτουν ισχυρά την παρουσία της τρίτης αρμονικής. Αυτή η αρμονική όπως αναφέρθηκε δίνει ένα «καλυμμένο» ήχο, δίνοντας στην εγγραφή ή στην αναπαραγωγή περιορισμένη ποιότητα. Αντιθέτως, οι λυχνίες παράγουν ολόκληρο φάσμα από αρμονικές. Ειδικά, όπως έχει προαναφερθεί, έχουν αισθητή παρουσία η δεύτερη, η τρίτη, η τέταρτη και η πέμπτη, δίνοντας ήχο χάλκινου πνευστού. Όσο ένας ενισχυτής μπαίνει στην περιοχή του κορεσμού, τόσο οι υψηλότερες αρμονικές ενισχύονται, δίνοντας ένταση στον ήχο.

Φέρνοντας σε κορεσμό έναν ενισχυτή με τελεστικούς, παράγει τόσο απότομη αύξηση των ακραίων αρμονικών, που γίνεται δυσάρεστος ο ήχος σε εύρος 5dB. Οι ενισχυτές με τρανζίστορ εκτείνουν αυτή την περιοχή του κορεσμού στα 10 dB και οι ενισχυτές με λυχνίες στα 20dB. Βασικά οι τελεστικοί παράγουν, τρίτη, πέμπτη και έβδομη αρμονική όταν οδηγηθούν σε κορεσμό με μόνο μερικά dB. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταλλικό ήχο, με πολύ σκληρές άκρες, που το αυτί τον αντιλαμβάνεται σαν παραμόρφωση. Εφόσον αυτός ο ήχος δεν είναι διακριτικός, ηχεί σαν καθαρό σήμα προειδοποίησης κορεσμού. Συνεπώς, οι τελεστικοί δεν δουλεύουν στην περιοχή του κορεσμού, με αποτέλεσμα ένα καθαρό ενισχυμένο ήχο με κανένα χρωματισμό.

Οι ενισχυτές με τρανζίστορ σημειώνουν ένα βόμβο ή λευκό θόρυβο και έλλειψη δύναμης. Ο βόμβος σχετίζεται με τις αιχμές που παράγονται με την στιγμιαία υπερφόρτωση. Η υποψία του λευκού θορύβου είναι συνέπεια του φαινομένου, ότι πολλές υψηλές αρμονικές δεν σχετίζονται μουσικά με την θεμελιώδη. Το αυτί ακούει αυτές τις παραφωνίες σαν είδος θορύβου συνοδευών σε κάθε ξεκίνημα. Η έλλειψη «δύναμης» είναι συνέπεια της ύπαρξης ισχυρής τρίτης, που είναι καλυμμένος μη ακουόμενος ήχος. Αυτό διορθώνεται (με peak inductors) αποτρέποντας όλες τις αιχμές (peaks) να φτάσουν στον κορεσμό.

Τέλος, οι ενισχυτές με λυχνίες διαφέρουν από τους άλλους ενισχυτές γιατί μπορούν να οδηγηθούν στο κορεσμό και να λειτουργήσουν χωρίς να προσθέσουν αισθητή παραμόρφωση.

Ο συνδυασμός της αργής αύξησης του πλάτους των υψηλών αρμονικών και η ανοικτή δομή των αρμονικών στον κορεσμό, διαμορφώνει ένα σχεδόν ιδεατό συμπιεστή καταγραφής ήχου. Στο εύρος των ασφαλή 20dB της περιοχής του κορεσμού, η έξοδος του ενισχυτή αυξάνεται μόλις 2 - 4dB, λειτουργώντας σαν περιοριστής. Εφόσον οι υψηλές ενισχύονται μέσα σε αυτή την περιοχή, η ουσιαστική ένταση παραμένει αμετάλλακτη στο αυτί. Αυτό το γεγονός αναγκάζει τα ενισχυμένα σήματα να έχουν φαινομενικά υψηλό επίπεδο, που δεν υποδεικνύεται σε ένα μετρητή έντασης. Οι λυχνίες ακούγονται με μεγαλύτερη ένταση και έχουν καλύτερη αναλογία σήματος προς θόρυβο. Έχουν δυνατό

ήχο, λόγω του φυσικού μπρούτζινου ήχου τους. Εφόσον τα δυνατά σήματα μπορούν να ηχογραφηθούν σε υψηλότερα επίπεδα, τα απαλότερα σήματα είναι επίσης με ένταση και έτσι δεν χάνονται μέσα στους θορύβους (κασετών ή πικ-απ), δίνοντας αποδοτικότερα πιο διαυγή ήχο. Η αίσθηση του ενισχυμένου μπάσου σχετίζεται με την παρουσία της δεύτερης και της τρίτης αρμονικής που ενισχύει το φυσικό μπάσο με συνθετικό.

Ουσιαστικά με βάση όλα τα παραπάνω οι λυχνίες χρωματίζουν τον ήχο, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία μπορούν να αποδώσουν μεγαλύτερη πιστότητα στην αναπαραγωγή και στην καταγραφή. Κάθε στοιχείο μπορεί να βρει το ρόλο του ανάλογα με την αισθητική του χρήστη.

## **Ακουστική μικρών χώρων**

Ένα ηχοσύστημα ακούγεται διαφορετικά σε κάθε χώρο. Το πόσο συμμετέχει ο χώρος στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα μπορούμε να πούμε ότι είναι περίπου 30 με 40%.

Το ζητούμενο για μια σωστή ακρόαση είναι η ισόποση κατανομή της ακουστικής πίεσης στο χώρο μας, σε όλο το ακουστικό φάσμα. Αυτό όμως σπανίως συμβαίνει. Συνήθως έχουμε μέγιστα και ελάχιστα σημεία πίεσης.



Για να δούμε γιατί συμβαίνει αυτό θα πρέπει να εξετάσουμε τη φύση του ήχου. Ο ήχος κατά βάση είναι ενέργεια. Ενέργεια που μεταφέρεται από μία παλλόμενη επιφάνεια (π.χ. τα μεγάφωνα) με τη βοήθεια ενός μέσου (π.χ. αέρα) και φτάνει σε κάποιο αισθητήριο όργανο (αυτιά). Αν τώρα η ενέργεια αυτή βρίσκεται σε περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων

(ακουστικό φάσμα) θα γίνει αντιληπτή από το αυτί μας. Απαραίτητο για τη δημιουργία ήχου είναι η ύπαρξη ενός μέσου, στη προκειμένη περίπτωση αέρας, διότι ο ήχος δε μεταδίδεται στο κενό. Σαν κύμα λοιπόν έχει κάποιες διαστάσεις το λεγόμενο μήκος κύματος. Το μήκος κύματος υπολογίζεται από τη σχέση  $\{ \lambda = c / f \}$ , όπου  $c = 340 \text{ m/sec}$  είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και  $f$  η συχνότητα. Δηλαδή, το ακουστικό φάσμα από 20 κύκλους έως 20000 κύκλους είναι από 17 μέτρα έως 1,7 εκατοστά περίπου.

Από την άλλη τώρα το δωμάτιο που βρίσκεται το σύστημα μας έχει κάποιες φυσικές διαστάσεις (πλάτος, μήκος και ύψος). Οι διαστάσεις αυτές σε κάθε περίπτωση θα συμπίπτουν με το μήκος κύματος μιας συγκεκριμένης συχνότητας. Για παράδειγμα, αν το ύψος του δωματίου είναι 2,8 μέτρα, αυτό αντιστοιχεί σε συχνότητα 123 κύκλων βάση της παραπάνω σχέσης. Οι συχνότητες στις οποίες ένας χώρος εμφανίζει έντονα μέγιστη και ελάχιστη ηχητική πίεση ονομάζονται Αξονικοί Ρυθμοί. Αλλά δεν είναι μόνο αυτές οι συχνότητες στις οποίες ο χώρος μας εμφανίζει μέγιστη και ελάχιστη πίεση αλλά και τα ακέραια πολλαπλάσια αυτών. Αν ας πούμε το πλάτος μας είναι 6,9 μέτρα και η συχνότητα που αντιστοιχεί είναι 50 κύκλοι πρόβλημα θα εμφανίζεται και στους 100 και στους 150 και στους 200 κύκλους κ.τ.λ. Βέβαια, όταν αυξηθεί πολύ η συχνότητα λόγω του μικρού μήκους κύματος η ενέργεια στο χώρο ομαλοποιείται. Φανταστείτε τώρα πόσο έντονο γίνεται το πρόβλημα όταν οι συχνότητες αυτές συμπίπτουν σε δύο διαστάσεις του χώρου μας ή ακόμα χειρότερα και στη τρίτη. Ιδανικά υπάρχουν κάποιες αναλογίες των διαστάσεων του χώρου ακρόασης (π.χ. μήκος = ύψος x 1,39 και πλάτος = ύψος x 1,14) όπου οι αξονικοί ρυθμοί δε συμπίπτουν, οπότε δεν έχουμε και έντονο πρόβλημα. Βέβαια εδώ πρέπει να σταθούμε τυχεροί ή να υπολογίσουμε το δωμάτιο πριν το χτίσουμε.

Βλέπουμε λοιπόν συνοψίζοντας, ότι οι αναλογίες των διαστάσεων του χώρου μας είναι ένας βασικός παράγοντας για διαφορετικό αποτέλεσμα.

Τώρα θα δούμε την επίδραση που έχουν στον ήχο τα υλικά που απαρτίζουν μια κατοικία. Γνωρίζοντας την επίδραση του καθενός στο ηχητικό αποτέλεσμα μπορούμε, με εύκολες παρεμβάσεις, να διορθώσουμε τυχόν προβλήματα και να βελτιώσουμε τον ήχο που ακούμε σπίτι μας.



1. Τα χαλιά, οι μοκέτες και οι κουρτίνες απορροφούν περισσότερο υψηλές συχνότητες από ότι μεσαίες, ενώ δεν έχουν σχεδόν καμία επίδραση στις χαμηλές και μεσοχαμηλές συχνότητες.
2. Οι κατασκευές από τούβλα και τσιμέντο και γενικά οι σκληρές επιφάνειες δεν απορροφούν καθόλου τις χαμηλές συχνότητες.
3. Αν στο χώρο μας υπάρχει πρόβλημα με τις χαμηλές συχνότητες (μπάσα) ο μόνος τρόπος αντιμετώπισης του είναι τα συντονισμένα διαφράγματα.
4. Τοίχοι και ταβάνια από γυψοσανίδα ή οι υαλοπίνακες απορροφούν πολύ περισσότερο τα μπάσα, ενώ δεν επιδρούν καθόλου στις υψηλές και μεσο-υψηλές συχνότητες.
5. Όσο πιο ανώμαλοι - άγριοι είναι οι τοίχοι μας (π.χ. από πέτρα) τόσο απορροφούν μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, οι λείοι τοίχοι (στοκαρισμένοι) δεν απορροφούν καθόλου αυτές τις συχνότητες.
6. Όταν το πάτωμα μας είναι το κλασικό ξύλινο, με το κενό μεταξύ τσιμεντένιας πλάκας και ξύλου, απορροφά πολύ καλύτερα τις χαμηλές συχνότητες. Προσοχή χρειάζεται εδώ στη τοποθέτηση των ηχείων που δεν πρέπει να είναι απευθείας πάνω στο ξύλο. Η καλύτερη λύση είναι η τοποθέτηση πλακών πάνω στο τσιμέντο στα σημεία που τοποθετούνται τα ηχεία.
7. Όταν το ξύλο είναι μεγάλου πάχους και κολλημένο στο πάτωμα ή στους τοίχους απορροφά κυρίως υψηλές συχνότητες.
8. Όλα τα υφασμάτινα έπιπλα (πολυθρόνες, καναπέδες, κλπ.) καθώς και τα μαξιλάρια απορροφούν υψηλές, μεσαίες και χαμηλομεσαίες συχνότητες.

9. Τα διαφορών χαρακτηριστικών υλικά πρέπει να είναι διασκορπισμένα στο χώρο και όχι μαζεμένα σε μία μεριά.

10. Τα πολλά άτομα σε ένα χώρο επενεργούν όπως τα υφασμάτινα έπιπλα απορροφώντας υψηλές, μεσαίες και χαμηλομεσαίες συχνότητες.

11. Αν ο χρόνος αντήχησης μας είναι μεγάλος θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε επιφάνειες και αντικείμενα με διαφορετικά χαρακτηριστικά που απορροφούν και υψηλές και χαμηλές συχνότητες.

12. Η διάχυση βοηθάει στην εξομάλυνση τυχόν ανωμαλιών του ήχου. Τα μικρά τραπεζάκια, τα φωτιστικά, τα λουλούδια, τα διακοσμητικά και οι βιβλιοθήκες με βιβλία, τα ράφια κ.α. βοηθούν σε αυτό το σκοπό.

Γενικά με έξυπνες, μικρές παρεμβάσεις στο χώρο μας μπορούμε να πετύχουμε ένα πολύ ικανοποιητικό ηχητικό αποτέλεσμα αρκεί να γνωρίζουμε το πως και το γιατί.

## **Βελτίωση – αναβάθμιση συσκευών ήχου**

Ένας από τους τρόπους να αναβαθμίσουμε τον ήχο του συστήματος μας είναι η βελτίωση ή και «πείραγμα» όπως λέγεται των συσκευών που το αποτελούν. Τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα τα αναμενόμενα, γι' αυτό πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Θα πρέπει να γίνονται από ηλεκτρονικό με πολλές γνώσεις γύρω από τα μηχανήματα αναπαραγωγής ήχου. Κυρίως να διαθέτει μεγάλη εμπειρία και να μπορεί να εγγυηθεί των αποτελεσμάτων. Οι βελτιώσεις επιτρέπονται αρκεί να γίνονται με γνώση των συνεπειών.

Βελτίωση συσκευής μπορεί να σημαίνει:

- ✓ Αντικατάσταση υλικών (πυκνωτών, τελεστικών, διόδων, καλωδίων κ.τ.λ.) με άλλα ανώτερης ποιότητας.
- ✓ Προσθήκη έξτρα υλικών σε ζωτικά σημεία, πυκνωτές απόζευξης για παράδειγμα, αν δε προβλέφθηκαν από το σχεδιαστή.
- ✓ Προσθήκη ολόκληρης βαθμίδας τροφοδοσίας για κάποια στάδια.
- ✓ Παράληψη ολόκληρης βαθμίδας αν κριθεί μη αναγκαία.

Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να γίνονται με γνώση του που, του πως και του γιατί αναβαθμίζουμε το μηχάνημα και όχι μόνο της οικονομικής πλευράς του θέματος.

Είναι βέβαιο ότι αν μια βελτίωση γίνει με γνώση, τεχνικά μέσα, λογική και συνέπεια μπορεί να συγκριθεί εύκολα με πανάκριβες συσκευές του εμπορίου.

## Αναβάθμιση ηχοσυστήματος

Εχθρός του καλού, όπως όλοι γνωρίζουμε, είναι το καλύτερο. Έτσι συμβαίνει και με τα συστήματα ήχου. Πάντα υπάρχει κάτι καλύτερο από το υπάρχον μας σύστημα. Πολλοί λοιπόν από εμάς, στην αναζήτηση της πιστότερης αναπαραγωγής, προχωράμε στην αναβάθμιση του συστήματος. Αναβάθμιση ενός συστήματος ήχου σημαίνει κάτι από τα παρακάτω ή και συνδυασμός αυτών.

- Αντικατάσταση (ή και αναβάθμιση) μιας συσκευής με άλλη καλύτερη (όχι απαραίτητα ακριβότερη).
- Αντικατάσταση της καλωδίωσης, είτε αυτή είναι σήματος είτε ρεύματος.
- Αντικατάσταση του ικριώματος στήριξης των μηχανημάτων (βελτιώνει τις ακρόασεις με πικάπ).
- Βελτίωση του χώρου ακρόασης.

Ποιό από τα παραπάνω είναι το πιο αποδοτικό; Μετά βεβαιότητας η βελτίωση του χώρου ακρόασης και από εκεί οφείλεται να ξεκινήσετε.

Βελτίωση του χώρου ακρόασης μπορεί να σημαίνει αναδιάταξη των επίπλων ή των ηχείων ή ακόμα και προσθήκη κάποιων βελτιωτικών. Αυτό που γενικά θα πρέπει να έχουμε κατά νου είναι ότι ένα ηχοσύστημα είναι τόσο καλό όσο του επιτρέπει ο χώρος μέσα στον οποίο αυτό λειτουργεί.

Μια μετακίνηση των ηχείων κατά μερικά εκατοστά μπορεί να φέρει βελτίωση αντίστοιχη αρκετών εκατοντάδων (ή και χιλιάδων) ευρώ αν μιλάμε για μηχανήματα.

Η τοποθέτηση των ηχείων και η αλληλοεπίδραση τους με το χώρο είναι ένα πολύ μεγάλο κεφάλαιο.

Πριν προχωρήσουμε στην αντικατάσταση συσκευών θα πρέπει:

1. Να έχουμε εξαντλήσει τα περιθώρια του χώρου μας.
2. Να είμαστε εξοικειωμένοι για πολύ καιρό με τον ήχο του συστήματος μας (πάνω από έξι μήνες) ώστε να μπορούμε να αντιληφθούμε τις διαφορές πριν και μετά.
3. Να έχουμε κατασταλαγμένη άποψη για το σωστό ήχο που θα βασίζεται σε προσωπική εμπειρία.
4. Να γνωρίζουμε τον «αδύναμο κρίκο» του συστήματος μας και από εκεί να ξεκινήσουμε.



5. Να κάνουμε μία-μία τις αλλαγές και να αφήνουμε να μεσολαβήσουν αρκετοί μήνες μέχρι την επόμενη. Μια συσκευή χρειάζεται τουλάχιστον πενήντα ώρες λειτουργίας για να αποδώσει τα μέγιστα.
6. Να έχουμε εμπειρίες ζωντανής μουσικής και σωστά στημένων συστημάτων. Το διαφορετικό άκουσμα δε σημαίνει και καλύτερο γι' αυτό προσοχή και σύνεση στις επιλογές μας.

## **Συντήρηση συστήματος ήχου**

Ένα σύστημα ήχου αποτελείται από τις πηγές, τα ενισχυτικά, τα ηχεία και τα καλώδια. Ας τα δούμε ένα-ένα.

### α) Πηγές (πικάπ, CD, ραδιοφωνικός δέκτης)

Πικάπ. Απαιτεί την πιο σχολαστική συντήρηση και αυτός είναι ένας λόγος που πολλοί το έχουν απαρνηθεί αν και εξακολουθεί, σε πολλούς τομείς, να υπερέχει του CD. Απαραίτητο να γίνονται τουλάχιστον δύο φορές το χρόνο όλες οι ρυθμίσεις οι οποίες δεν είναι λίγες. Όσον αφορά το πλατό : ευθυγράμμιση, ρύθμιση της γεωμετρίας και της δυναμικής της ανάρτησης (αν είναι πικάπ ανάρτησης), λίπανση του πηγαδιού καθώς και ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα του. Όσον αφορά τη κεφαλή : ρύθμιση βάρους ανάγνωσης, δύναμης αντιολίσθησης, κατακόρυφης γωνίας ανάγνωσης (VTA), οριζόντιας γωνίας ανάγνωσης. Ελέγχουμε τη κεφαλή για φθορά, τον ιμάντα, τα ελατήρια (αν διαθέτει) και καθαρίζουμε τις επαφές των καλωδίων. Για να γίνουν σωστά όλα τα παραπάνω χρειαζόμαστε μια σειρά εργαλείων καθώς και οργάνων μέτρησης και βέβαια γνώση και εμπειρία.

CD player. Εδώ τα πράγματα είναι πολύ ευκολότερα. Αυτό που απαιτείται είναι η λίπανση του μηχανισμού ανάγνωσης κάθε πέντε χρόνια περίπου, ο καθαρισμός της κεφαλής του Laser, καθώς και ο καθαρισμός των επαφών του.

Ραδιοφωνικός δέκτης. Καθαρισμός επαφών των κεραιών του καθώς και των επαφών εξόδου του ήχου (RCA) κάθε χρόνο.

### β) Ενισχυτές.

Για ενισχυτές με τρανζίστορ κάνουμε τα εξής : καθαρίζουμε όλες τις επαφές (ρεύματος, RCA, ηχείων) μια φορά το χρόνο καθώς και εσωτερικά τα ποτενσιόμετρα όγκου φωνής

(volume), ισορροπίας καναλιών (balance) και τις επαφές των επιλογέων κάθε δύο με τρία χρόνια.

Για ενισχυτές με λυχνίες εκτός των παραπάνω κάνουμε τα εξής : ρυθμίζουμε μία φορά το χρόνο το ρεύμα πόλωσης των λυχνιών εξόδου. Ελέγχουμε, στα δύο με τρία χρόνια από την αρχική αγορά και κάθε χρόνο μετά, με ειδικό όργανο (λυχνιόμετρο) τη κατάσταση των λυχνιών.

γ) Ηχεία.

Καθαρισμός επαφών (μπόρνες), ρύθμιση ακίδων καθώς και σωστή τοποθέτηση τους μια φορά το χρόνο. Στα πέντε χρόνια περίπου από την αγορά μας και κάθε δύο αργότερα θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της εσωτερικής τους καλωδίωσης για οξείδωση και πιθανή αντικατάσταση αυτής αν κριθεί αναγκαίο καθώς και έλεγχος του κυκλώματος διαχωρισμού συχνοτήτων (crossover).

δ) Καλώδια.

Έλεγχος κάθε τρίμηνο για σωστή στερέωση (καλώδια ηχείων και ρεύματος), και οξείδωση καθώς και καθαρισμός όλων των βυσμάτων (RCA, μπανάνες).

Όλα τα παραπάνω θα έχουν σαν αποτέλεσμα το σύστημα ήχου μας να βρίσκεται σε καλή κατάσταση και να αποδίδει πάνω από το 85% των δυνατοτήτων (ποσοστό πολύ ικανοποιητικό) με τη προϋπόθεση βέβαια ότι η τοποθέτηση των ηχείων μας είναι σωστή.

## **Ηχείο. Ισχύς και ένταση**

Η ερώτηση που ακούγεται σχεδόν πάντα όταν αναφερόμαστε σε ηχεία είναι «Πόσα watt είναι;» εννοώντας, οι περισσότεροι από εμάς, πόση ένταση αποδίδει. Εδώ γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των δύο βασικών χαρακτηριστικών ενός ηχείου, την ένταση και την ισχύ. Καταρχήν η ισχύς ενός ηχείου δεν έχει απολύτως καμία σχέση με το πόσο δυνατά (ένταση ή όγκος) μπορεί αυτό να αποδώσει.



Η έννοια της ισχύος σε ένα ηχείο έχει να κάνει με τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να το τροφοδοτήσει χωρίς κάποια από τις μονάδες του (μεγάφωνα) να καταστραφεί. Οι λόγοι που οδηγούν τα μεγάφωνα σε καταστροφή είναι είτε οι θερμικές απώλειες στο πηνίο φωνής τους, είτε οι ανεξέλεγκτα μεγάλες διαδρομές του κώνου τους (συνήθως τα woofers) ή ακόμα και συνδυασμός των παραπάνω.

Η ένταση ενός ηχείου έχει να κάνει με την ικανότητα του να δημιουργεί μεγάλες στάθμες ακουστικής πίεσης. Αυτή η ικανότητα σχετίζεται με την ευαισθησία του κυρίως. Η ευαισθησία (μετριέται σε dB) μας πληροφορεί για τη στάθμη που το εν λόγω ηχείο μπορεί να αναπτύξει όταν τροφοδοτηθεί με ένα 1 Watt ισχύος, σε απόσταση ενός μέτρου από αυτό. Τα dB δίνονται από τη σχέση  $DB = 20 \log (P/P_0)$ , όπου P είναι η ένταση του μετρούμενου ηχείου και  $P_0$  το κατώφλι ακουστότητας κάτω από το οποίο δεν ακούγεται ο παραμικρός ήχος.

Επειδή η σχέση είναι λογαριθμική να πούμε εδώ ότι ένα ηχείο 90 dB έχει διπλάσιο όγκο φωνής από ένα ηχείο 87 dB. Να πούμε επίσης ότι για να πάρουμε την ίδια ένταση από ένα ηχείο μόλις 3 dB λιγότερα από ένα άλλο θα πρέπει να διαθέτουμε διπλάσια ισχύ από τον ενισχυτή μας.

Για να δώσουμε και ένα παράδειγμα αν κάποιος επιθυμεί μια στάθμη της τάξης των 108 db στο χώρο του (αρκετά ρεαλιστική για συναυλιακές στάθμες) και διαθέτει ηχείο 87 dB ο ενισχυτής του θα πρέπει να αποδίδει 128 Watt απαραμόρφωτα. (87 dB με ένα 1 Watt, 90 με 2 Watt, 93 με 4, 96 με 8 και ούτω καθεξής) και βέβαια το ηχείο του να μπορεί χωρίς πρόβλημα να απορροφήσει αυτή την ισχύ.

Για να κλείσουμε να πούμε ότι η ισχύς και η ευαισθησία ενός ηχείου δε μας παρέχουν απολύτως καμία ένδειξη για τη ποιότητα ήχου του. Εκεί η ακουστική εμπειρία είναι αυτή που θα βοηθήσει να ξεχωρίσουμε την ποιότητα.

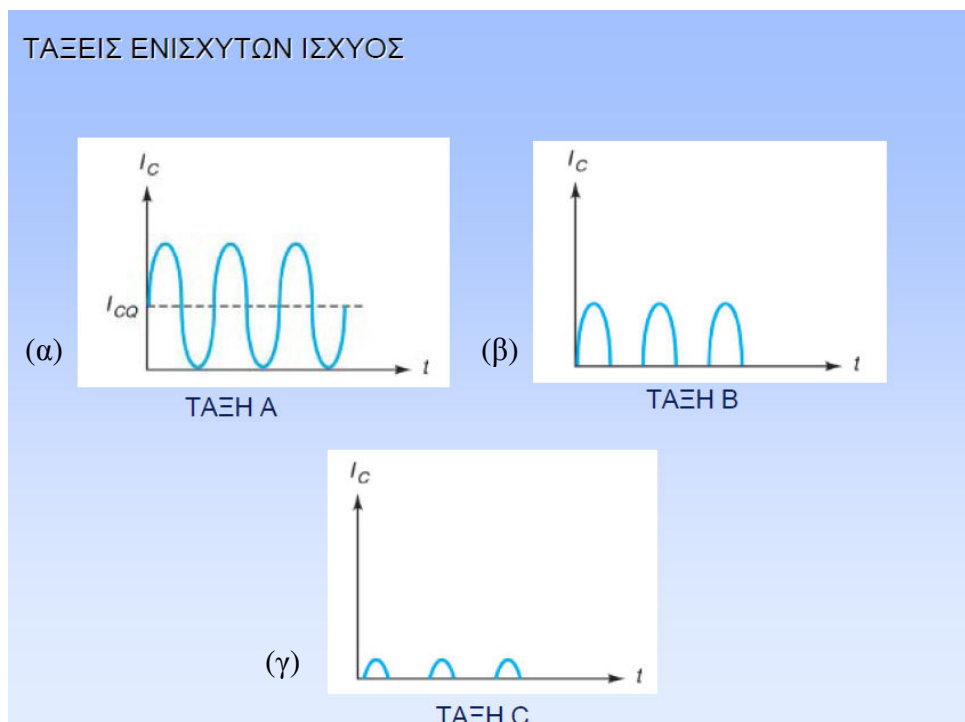
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

### Όροι ενισχυτών

Μπορούμε να περιγράψουμε τους ενισχυτές με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, μπορούμε να τους περιγράψουμε με βάση την τάξη λειτουργίας τους, με βάση την σύζευξη μεταξύ των βαθμίδων τους, ή με βάση την περιοχή συχνοτήτων τους.

### Τάξεις λειτουργίας

Η λειτουργία τάξης A ενός ενισχυτή σημαίνει ότι ο ενισχυτής αυτός λειτουργεί στην ενεργό περιοχή συνεχώς. Έτσι, το ρεύμα συλλέκτη ρέει για  $360^\circ$  της περιόδου ac, όπως δείχνει το σχήμα 1α. Με έναν ενισχυτή τάξης A, ο σχεδιαστής συνήθως προσπαθεί να τοποθετήσει το σημείο Q κάπου κοντά στο μέσο της γραμμής φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, το σήμα μπορεί να ταλαντεύεται το μέγιστο δυνατό χωρίς να επιφέρει κόρο ούτε αποκοπή στον ενισχυτή, που θα παραμόρφωνε το σήμα.

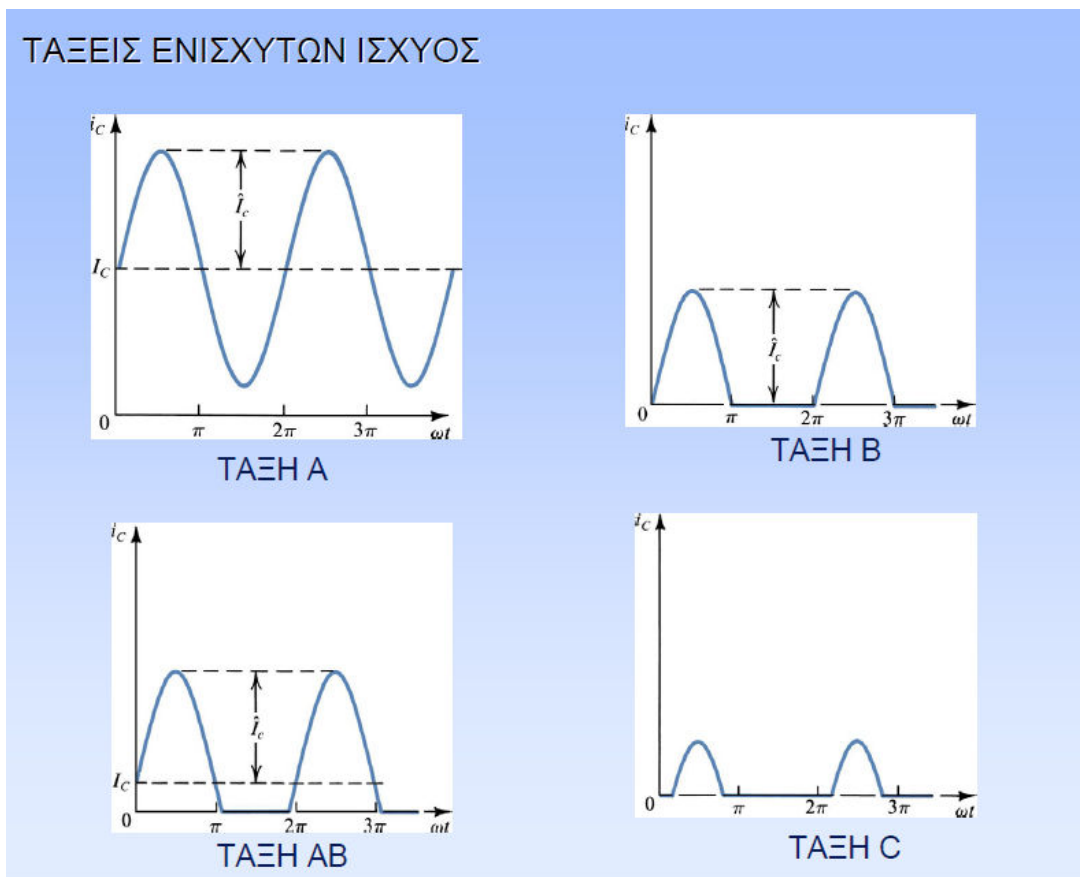


Σχήμα 1 : Ρεύμα συλλέκτη. (α) Τάξη A, (β) Τάξη B και (γ) Τάξη C.

Η λειτουργία τάξης B διαφέρει. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα συλλέκτη ρέει μόνο για τη μισή περίοδο (για  $180^\circ$ ), όπως δείχνει το σχήμα 1β. Για να έχουμε αυτού του είδους τη λειτουργία, ο σχεδιαστής συνήθως προσπαθεί να τοποθετήσει το σημείο Q στο σημείο αποκοπής. Τότε, μόνο η θετική ημιπερίοδος της ac τάσης της βάσης μπορεί να δημιουργήσει ρεύμα συλλέκτη. Αυτό μειώνει τη θερμότητα που χάνεται στα transistors ισχύος.

Η λειτουργία τάξης C ενός ενισχυτή σημαίνει ότι ρέει ρεύμα για λιγότερο από  $180^\circ$  της περιόδου ac, όπως δείχνει το σχήμα 1γ. Με τη λειτουργία τάξης C, μόνο ένα μέρος της θετικής ημιπεριόδου της ac τάσης της βάσης μπορεί να δημιουργήσει ρεύμα συλλέκτη. Σαν συνέπεια, παίρνουμε σύντομους παλμούς ρεύματος συλλέκτη σαν εκείνους του σχήματος 1γ.

Η λειτουργία τάξης AB ενός ενισχυτή σημαίνει ότι ο ενισχυτής λειτουργεί μεταξύ των δύο άκρων που ορίζονται από τις τάξεις A και B. Το σήμα εξόδου είναι μηδενικό για λιγότερο από το μισό του κύκλου του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου.



## Είδη σύζευξης

Η χωρητική σύζευξη. Ο πυκνωτής σύζευξης μεταφέρει την ενισχυμένη ac τάση στην επόμενη βαθμίδα.

Η σύζευξη μετασχηματιστή. Εδώ η ac τάση συζευγνύεται μέσω ενός μετασχηματιστή στην επόμενη βαθμίδα. Η χωρητική σύζευξη και η σύζευξη μετασχηματιστή αποτελούν παραδείγματα ac σύζευξης, οι οποίες παρεμποδίζουν την dc τάση.

Η άμεση σύζευξη. Εδώ έχουμε άμεση σύνδεση μεταξύ συλλέκτη του πρώτου transistor και της βάσης του δεύτερου transistor. Γι' αυτό, συζευγνύονται και η ac και η dc τάση. Αφού δεν υπάρχει χαμηλότερο όριο συχνότητας, ένας ενισχυτής άμεσης - σύζευξης ονομάζεται μερικές φορές ενισχυτής dc.

## Περιοχές συχνοτήτων

Ένας άλλος τρόπος να περιγράψουμε τους ενισχυτές είναι με βάση την περιοχή ενίσχυσης συχνοτήτων τους. Για παράδειγμα, ένας ακουστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής που λειτουργεί μεταξύ 20Hz και 20kHz. Από την άλλη, ένας ενισχυτής ραδιοσυχνοτήτων (RF) ενισχύει συχνότητες πάνω από τα 20kHz, (συνήθως πολύ μεγαλύτερες). Για παράδειγμα, οι ενισχυτές RF στα ραδιόφωνα AM ενισχύουν συχνότητες μεταξύ 535 και 1605 kHz, ενώ οι ενισχυτές RF στα ραδιόφωνα FM ενισχύουν συχνότητες μεταξύ 88 και 108 kHz.

Οι ενισχυτές χωρίζονται επίσης και σε στενής ζώνης συχνοτήτων (narrow band) και ευρείας ζώνης συχνοτήτων (wide band). Ένας ενισχυτής στενής ζώνης συχνοτήτων λειτουργεί σε μικρή περιοχή συχνοτήτων όπως μεταξύ 450 και 460 kHz. Ένας ενισχυτής ευρείας ζώνης συχνοτήτων λειτουργεί σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων όπως μεταξύ 0 και 1 MHz.

Οι ενισχυτές στενής ζώνης συχνοτήτων αποτελούν συνήθως συντονισμένους ενισχυτές RF, δηλαδή συντονίζουν σε υψηλό σημείο Q π.χ. σε έναν ραδιοφωνικό σταθμό ή σε ένα τηλεοπτικό κανάλι. Οι ενισχυτές ευρείας ζώνης συχνοτήτων συνήθως δεν είναι συντονισμένοι, δηλαδή, το ac φορτίο τους έχει χαμηλό Q, άρα μεγάλη αντίσταση.

## **Επίπεδα σήματος**

Περιγράψαμε ήδη τη λειτουργία μικρού - σήματος, όπου η διακύμανση p-p του ρεύματος συλλέκτη είναι μικρότερη από το 10% του ρεύματος ηρεμίας του συλλέκτη. Στη λειτουργία μεγάλου - σήματος, ένα σήμα p-p χρησιμοποιεί ολόκληρη ή το μεγαλύτερο μέρος της γραμμής φορτίου. Σε ένα στερεοφωνικό συγκρότημα, το μικρό σήμα ενός δέκτη, το κασετόφωνο, ή το cd player χρησιμοποιείται σαν είσοδος του προενισχυτή, ενός ενισχυτή ο οποίος δημιουργεί μεγάλη έξοδο, κατάλληλη για να οδηγήσει τους ελέγχους τόνου και έντασης. Το σήμα στη συνέχεια χρησιμοποιείται σαν είσοδος του ενισχυτή ισχύος, που δημιουργεί έξοδο ισχύος η οποία κυμαίνεται μεταξύ εκατοντάδων milliwatts και εκατοντάδων watts.

Στη συνέχεια, θα σχολιάσουμε τους ενισχυτές ισχύος και τα σχετικά με αυτούς ζητήματα, όπως την ac γραμμή φορτίου, το κέρδος ισχύος και την απόδοση.

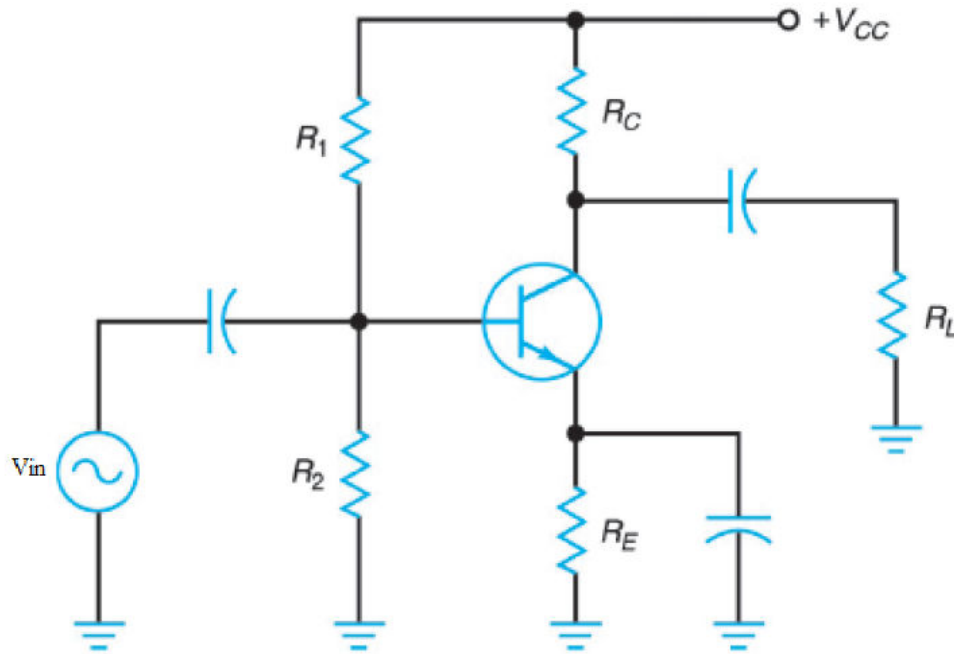
## **Οι δύο γραμμές φορτίου**

Κάθε ενισχυτής έχει ένα dc ισοδύναμο κύκλωμα και ένα ac ισοδύναμο κύκλωμα. Γι' αυτό, έχει δύο γραμμές φορτίου : μια dc και μια ac. Στη λειτουργία μικρού σήματος, η θέση του σημείου Q δεν είναι σημαντική. Όμως, στη λειτουργία μεγάλου σήματος, το σημείο Q θα πρέπει να βρίσκεται στη μέση της ac γραμμής φορτίου για να έχουμε τη μέγιστη δυνατή διακύμανση εξόδου.



## DC γραμμή φορτίου

Το σχήμα 2 δείχνει έναν ενισχυτή με πόλωση διαιρέτη τάσης (VDB).



Σχήμα 2 : Ενισχυτής VDB.

Ένας τρόπος να μετακινήσουμε το σημείο Q είναι να μεταβάλλουμε την τιμή της  $R_2$ . Αν η  $R_2$  έχει πολύ μεγάλες τιμές, το transistor φτάνει στον κόρο και το ρεύμα δίνεται από την εξίσωση :

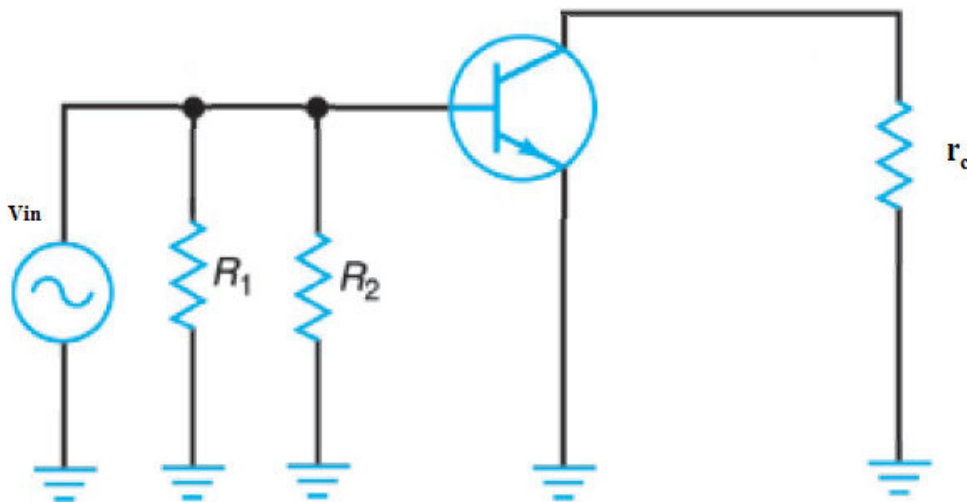
$$I_{c(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (1)$$

Αν η  $R_2$  έχει πολύ μικρές τιμές, το transistor φτάνει στην αποκοπή και η τάση δίνεται από την εξίσωση :

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC} \quad (2)$$

## AC γραμμή φορτίου

Το σχήμα 3 είναι το ac ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή VDB.



Σχήμα 3 : ac ισοδύναμο κύκλωμα.

Με τον εκπομπό στην ac γείωση, η  $R_E$  δεν επηρεάζει την ac λειτουργία. Ακόμη, η αντίσταση ac συλλέκτη είναι μικρότερη από την αντίσταση dc συλλέκτη. Επομένως, όταν εισέρχεται ένα ac σήμα, το στιγμιαίο σημείο λειτουργίας μετακινείται πάνω στην ac γραμμή φορτίου. Με άλλα λόγια, τα ημιτονοειδή ρεύμα και τάση p-p καθορίζονται από την ac γραμμή φορτίου.

Επειδή η ac γραμμή φορτίου παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από την dc γραμμή φορτίου, η μέγιστη έξοδος p-p (MPP) είναι πάντα μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας. Με τη μορφή τύπου :

$$MPP < VCC \quad (3)$$

Για παράδειγμα, αν η τάση τροφοδοσίας είναι 10V, η μέγιστη ημιτονοειδής τάση p-p θα είναι μικρότερη από 10V.

## Ψαλιδισμός των μεγάλων σημάτων

Όταν το σημείο Q βρίσκεται στο κέντρο της dc γραμμής φορτίου, το ac σήμα δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ολόκληρη την ac γραμμή φορτίου χωρίς ψαλιδισμό.

Αν το σημείο Q μετατοπιστεί πιο ψηλά, ένα μεγάλο σήμα θα οδηγήσει το transistor σε κόρο. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ψαλιδισμό στον κόρο. Και τα δύο είδη ψαλιδισμού (αποκοπής και κόρου) είναι ανεπιθύμητα, γιατί παραμορφώνουν το σήμα. Όταν ένα παραμορφωμένο σήμα σαν αυτό οδηγήσει ένα ηχείο, ο ήχος ακούγεται απαίσια.

Σε έναν καλοσχεδιασμένο ενισχυτή μεγάλου-σήματος το σημείο Q βρίσκεται στο μέσο της ac γραμμής φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, παίρνουμε μέγιστη έξοδο p-p χωρίς ψαλιδισμό.

## Μέγιστη έξοδος

Όταν το σημείο Q βρίσκεται πιο κάτω από το κέντρο της ac γραμμής φορτίου, η μέγιστη έξοδος κορυφής (MP) είναι  $I_{CQ} * r_C$ . Από την άλλη, αν το σημείο Q βρίσκεται πιο πάνω από το κέντρο της ac γραμμής φορτίου, η μέγιστη έξοδος κορυφής είναι  $V_{CEQ}$ . Επομένως, για κάθε σημείο Q, η μέγιστη έξοδος κορυφής είναι :

$$MP = I_{CQ} * r_C \quad \text{ή} \quad V_{CEQ}, \text{ η όποια είναι μικρότερη} \quad (4)$$

Και η μέγιστη έξοδος p-p είναι διπλάσια :

$$MPP = 2MP \quad (5)$$

Οι εξισώσεις (4) και (5) χρησιμεύουν στην ανίχνευση βλαβών για τον καθορισμό της μεγαλύτερης εξόδου χωρίς ψαλιδισμό που μπορούμε να πάρουμε.

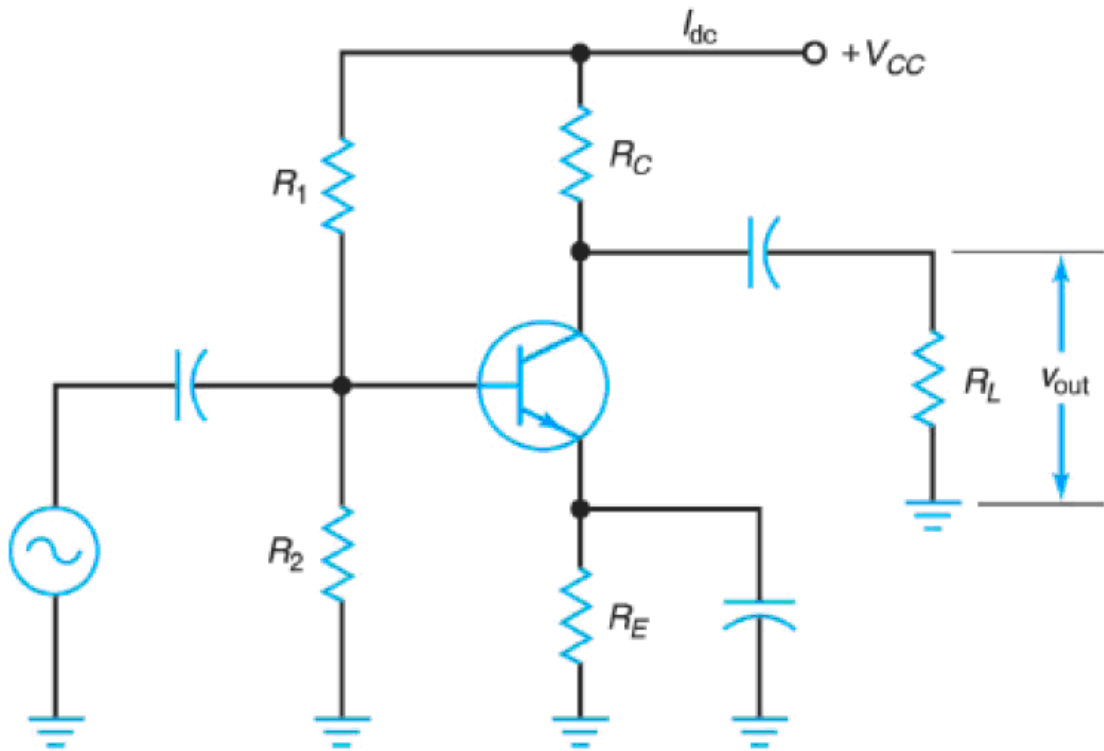
Όταν το σημείο Q βρίσκεται στο κέντρο της ac γραμμής φορτίου :

$$I_{CQ} * r_C = V_{CEQ} \quad (6)$$

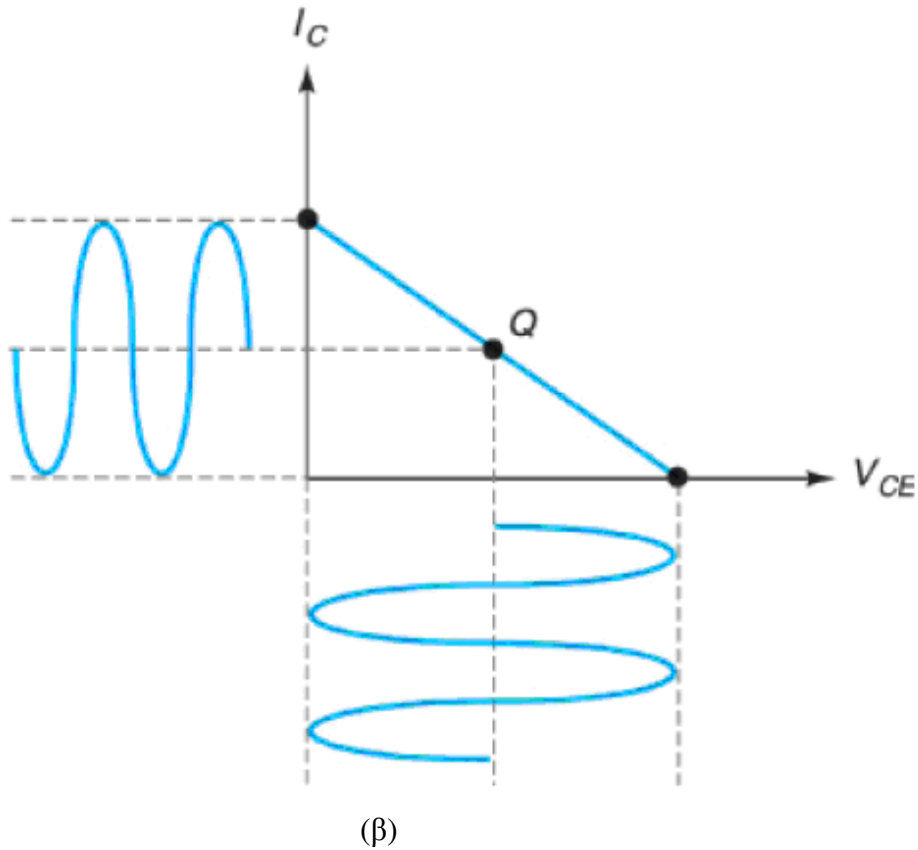
Ο σχεδιαστής θα προσπαθήσει να ικανοποιήσει αυτή τη συνθήκη όσο το δυνατό περισσότερο, με βάση την ανοχή των αντιστάσεων πόλωσης.

## Λειτουργία τάξης A

Ο ενισχυτής VDB του Σχήματος 1-α είναι ένας ενισχυτής τάξης A αρκεί το σήμα εξόδου να μην ψαλιδίζεται. Με αυτού του είδους τον ενισχυτή, το ρεύμα συλλέκτη ρέει σε όλη τη διάρκεια της περιόδου. Με άλλα λόγια, δεν έχουμε ψαλιδισμό του σήματος εξόδου ανά πάσα στιγμή κατά την περίοδο. Τώρα, θα σχολιάσουμε μερικές εξισώσεις που χρησιμεύουν στην ανάλυση των ενισχυτών τάξης A.



(α)



Σχήμα 1 : Ενισχυτής τάξης Α.

## Κέρδος ισχύος

Εκτός από κέρδος τάσης, κάθε ενισχυτής έχει και κέρδος ισχύος, που ορίζεται ως εξής :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (7)$$

Με λόγια, το κέρδος ισχύος ισούται με την ac ισχύ εξόδου δια την ac ισχύ εισόδου.

Για παράδειγμα, αν ο ενισχυτής στο Σχήμα 1 - α έχει ισχύ εξόδου 10 mW και ισχύ εισόδου 10μW, έχει κέρδος ισχύος :

$$G = \frac{10 \text{ mW}}{10\mu} = 1000$$

## Ισχύς εξόδου

Αν μετρήσουμε την τάση εξόδου στο Σχήμα 1-α σε rms volts, η ισχύς εξόδου δίνεται από την εξίσωση :

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} \quad (8)$$

Συνήθως, μετράμε την τάση εξόδου σε volts p-p με έναν παλμογράφο. Στην περίπτωση αυτή, μια ακόμη πιο βολική εξίσωση που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι :

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{8R_L} \quad (9)$$

Ο συντελεστής 8 στον παρονομαστή εμφανίζεται γιατί  $V_{P-P} = 2\sqrt{2}V_{rms}$ . Αν υπολογίσουμε το  $(2\sqrt{2})^2$  παίρνουμε 8.

Έχουμε μέγιστη ισχύ εξόδου όταν ο ενισχυτής δημιουργεί τη μέγιστη τάση εξόδου p-p, όπως δείχνει το Σχήμα 1-β. Στην περίπτωση αυτή, η  $V_{P-P}$  ισούται με τη μέγιστη ισχύ εξόδου p-p και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι :

$$P_{out(max)} = \frac{MPP^2}{8R_L} \quad (10)$$

## Απώλεια ισχύος του transistor

Όταν δεν εισέρχεται σήμα στον ενισχυτή του Σχήματος 1-α, η απώλεια ισχύος ηρεμίας είναι :

$$P_{DQ} = V_{CEQ} * I_{CQ} \quad (11)$$

Αυτή είναι λογική. Η απώλεια ισχύος ηρεμίας ενός transistor ισούται με την dc τάση επί το ρεύμα dc.

Όταν έχουμε σήμα, η απώλεια ισχύος του transistor μειώνεται επειδή το transistor μετατρέπει μια ποσότητα της ισχύος ηρεμίας σε σχήμα ισχύος. Γι' αυτό, η απώλεια ισχύος ηρεμίας αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση. Επομένως, η ονομαστική τιμή ισχύος ενός transistor σε έναν ενισχυτή τάξης A θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την  $P_{DQ}$ . Διαφορετικά, το transistor θα καταστραφεί.

## **Ροή ρεύματος**

Όπως δείχνει το Σχήμα 1-α, η dc πηγή τάσης τροφοδοτεί με συνεχές ρεύμα  $I_{DC}$  τον ενισχυτή. Αυτό το dc ρεύμα έχει δύο συνιστώσες : το ρεύμα πόλωσης μέσω του διαιρέτη τάσης και το ρεύμα συλλέκτη μέσω του transistor. Το dc ρεύμα ονομάζεται ροή ρεύματος της βαθμίδας. Αν έχετε έναν πολυβάθμιο ενισχυτή, θα πρέπει να προσθέσετε τις επιμέρους ροές ρεύματος για να πάρετε την ολική ροή ρεύματος.

## **Απόδοση**

Η dc ισχύς που παρέχει σ' έναν ενισχυτή η dc πηγή είναι :

$$P_{dc} = V_{CC} * I_{dc} \quad (12)$$

Για να συγκρίνουμε τον σχεδιασμό δύο ενισχυτών, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την απόδοση, που ορίζεται ως εξής :

$$n = \frac{P_{out}}{P_{dc}} * 100\% \quad (13)$$

Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι η απόδοση ισούται με το πηλίκο της ac ισχύος φορτίου προς τη dc ισχύ της τροφοδοσίας.

Η απόδοση ενός ενισχυτή έχει τιμή μεταξύ 0-100%.

Η απόδοση αποτελεί τρόπο σύγκρισης δύο διαφορετικών σχεδιασμών, κι αυτό γιατί δηλώνει πόσο καλά ο ενισχυτής μετατρέπει την dc ισχύ σε ac ισχύ. Όσο μεγαλύτερη είναι

η απόδοση, τόσο πιο καλά ο ενισχυτής μετατρέπει την dc ισχύ σε ac ισχύ. Αυτό είναι πολύ σημαντικό σε εξαρτήματα που λειτουργούν με μπαταρίες, επειδή η υψηλή απόδοση σημαίνει ότι η μπαταρίες διαρκούν περισσότερο.

Αφού όλες οι αντιστάσεις εκτός από την αντίσταση φορτίου σπαταλούν ισχύ, η απόδοση είναι μικρότερη από 100% σε έναν ενισχυτή τάξης A. Στην πραγματικότητα, μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέγιστη απόδοση ενός ενισχυτή τάξης A με dc αντίσταση συλλέκτη και ξεχωριστή αντίσταση φορτίου είναι 25%.

Σε ορισμένες εφαρμογές, η μικρή απόδοση της τάξης A είναι αποδεκτή. Για παράδειγμα, οι βαθμίδες μικρού - σήματος στην είσοδο ενός συστήματος συνήθως λειτουργούν πολύ καλά με χαμηλή απόδοση, επειδή η dc ισχύς εισόδου είναι μικρή. Στην πραγματικότητα, αν η τελική βαθμίδα ενός συστήματος χρειάζεται να μεταφέρει μόνο μερικές εκατοντάδες milliwatts, η ροή ρεύματος στην τροφοδοσία ισχύος μπορεί να είναι ακόμη πιο χαμηλή, ώστε να είναι αποδεκτή. Όμως, όταν η τελική βαθμίδα χρειάζεται να μεταφέρει watts ισχύος, η ροή ρεύματος γίνεται συνήθως πολύ μεγάλη με λειτουργία τάξης A.

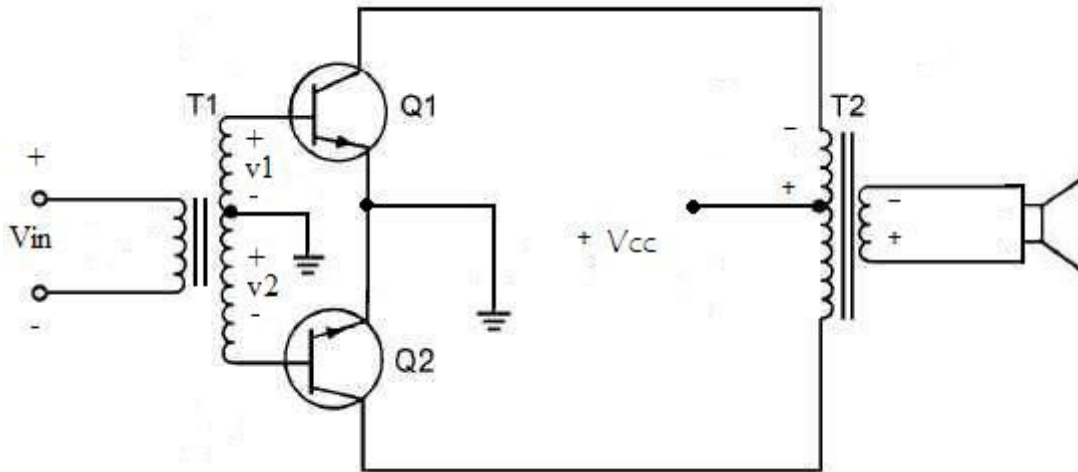
## **Λειτουργία τάξης B**

Η τάξη A είναι ο συνηθισμένος τρόπος λειτουργίας ενός transistor στα γραμμικά κυκλώματα επειδή έχουμε πιο απλά και πιο σταθερά κυκλώματα πόλωσης. Όμως, η τάξη A δεν είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος λειτουργίας ενός transistor. Σε ορισμένες εφαρμογές, όπως τα συστήματα που τροφοδοτούνται με μπαταρία, η ροή ρεύματος και η απόδοση της βαθμίδας αποτελούν πολύ σημαντικές προϋποθέσεις του σχεδιασμού. Η ενότητα αυτή εισάγει την βασική ιδέα της λειτουργίας τάξης B.

## **Κύκλωμα push - pull**

Το σχήμα 1 δείχνει την βασική ιδέα του ενισχυτή τάξης B. Όταν ένα transistor λειτουργεί σε τάξη B, ψαλιδίζει τη μισή περίοδο. Για ν' αποφύγουμε την παραμόρφωση που προκύπτει, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο transistors σε διάταξη push – pull, όπως εκείνα του σχήματος 1.





Σχήμα 1 : Ενισχυτής push – pull τάξης B.

Push – pull σημαίνει ότι το ένα transistor άγει κατά τη διάρκεια της μιας ημιπεριόδου, ενώ το άλλο δεν λειτουργεί, και το αντίθετο. Το κύκλωμα λειτουργεί ως εξής : Κατά την θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, το δευτερεύον τυλίγμα του T1 έχει τάση  $v_1$  και  $v_2$ , όπως φαίνεται. Επομένως, το πάνω transistor άγει και το κάτω βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Το ρεύμα συλλέκτη μέσω του Q1 διαρρέει το πάνω μισό του πρωτεύοντος τυλίγματος εξόδου. Αυτό δημιουργεί ενισχυμένη και αναστραμμένη τάση, η οποία συζευγνύεται μέσω του μετασχηματιστή με το ηχείο.

Κατά την επόμενη ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, οι πολικότητες αντιστρέφονται. Τώρα άγει το κάτω transistor ενώ το πάνω βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Το κάτω transistor ενισχύει το σήμα, και η άλλη ημιπερίοδος εμφανίζεται στα άκρα του ηχείου.

Αφού κάθε transistor ενισχύει μισή περίοδο εισόδου, το ηχείο λαμβάνει μια ολόκληρη περίοδο του ενισχυμένου σήματος.

### Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Αφού δεν υπάρχει πόλωση στο σχήμα 1, κάθε transistor βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής όταν δεν έχουμε σήμα εισόδου, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα, αφού δεν υπάρχει ροή ρεύματος όταν το σήμα είναι μηδενικό.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η βελτιωμένη απόδοση όταν έχουμε σήμα εισόδου. Η μέγιστη απόδοση ενός ενισχυτή push-pull τάξης B είναι 78.5%, επομένως, είναι απόλυτα φυσικό να χρησιμοποιείται αυτό το κύκλωμα πιο συχνά για μια βαθμίδα εξόδου, απ' ότι ένας ενισχυτής ισχύος τάξης A.

Το κύριο μειονέκτημα του ενισχυτή που δείχνει το σχήμα 1 είναι η χρήση μετασχηματιστών. Οι ακουστικοί μετασχηματιστές είναι ογκώδης και ακριβοί. Παρόλο που κάποτε χρησιμοποιούνταν ευρύτατα, ένας ενισχυτής σύζευξης μέσω μετασχηματιστή, όπως αυτός στο σχήμα 1, δεν είναι πια δημοφιλής. Οι νεώτεροι σχεδιασμοί δεν χρειάζονται πια μετασχηματιστές στις περισσότερες εφαρμογές. Το επόμενο κεφάλαιο σχολιάζει αυτούς τους νέους σχεδιασμούς.

## **Πόλωση ενισχυτών τάξης B**

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το πιο δύσκολο στη σχεδίαση ενός ενισχυτή τάξης B είναι η τοποθέτηση ενός σταθερού σημείου Q κοντά στην αποκοπή. Στην ενότητα αυτή σχολιάζεται το πρόβλημα και η λύση του.

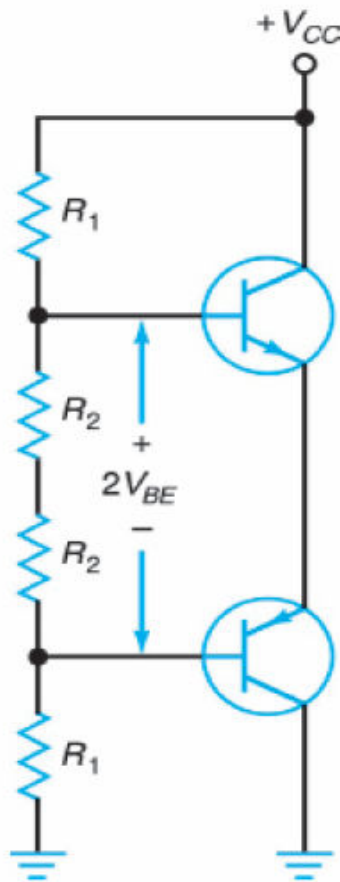
## **Πόλωση διαιρέτη τάσης**

Το σχήμα 2 δείχνει την πόλωση διαιρέτη-τάσης για ένα κύκλωμα push-pull τάξης B. τα δύο transistors πρέπει να είναι συμπληρωματικά, δηλαδή να έχουν όμοιες καμπύλες  $V_{BE}$ , μέγιστους περιορισμούς, κλπ. Για παράδειγμα, τα 2N3904 και 2N3906 είναι συμπληρωματικά. Από αυτά, το πρώτο είναι ένα transistor npn και το δεύτερο pnp και έχουν όμοιες καμπύλες  $V_{BE}$ , μέγιστους περιορισμούς, κλπ. Συμπληρωματικά ζεύγη σαν αυτά διατίθενται για σχεδόν οποιοδήποτε σχεδιασμό push – pull τάξης B.

Προς αποφυγή παραμόρφωσης crossover στο σχήμα 2, θέτουμε το σημείο Q ελαφρώς πάνω από την αποκοπή, με τη σωστή  $V_{BE}$  κάπου μεταξύ 0.6 και 0.7V. Αλλά εδώ είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα : Το ρεύμα συλλέκτη είναι πολύ ευαίσθητο σε μεταβολές της  $V_{BE}$ . Τα φυλλάδια προδιαγραφών δίνουν ότι η αύξηση 60 mV στην  $V_{BE}$  παράγει 10 φορές μεγαλύτερο ρεύμα συλλέκτη. Λόγω αυτού, σχεδόν πάντα απαιτείται μια ρυθμιζόμενη αντίσταση για τοποθέτηση του σωστού σημείου Q.

Αλλά μια ρυθμιζόμενη αντίσταση δεν λύνει το πρόβλημα της θερμοκρασίας. Ακόμη και αν το σημείο Q μπορεί να είναι τέλειο στη θερμοκρασία δωματίου, θα μεταβληθεί όταν αλλάξει η θερμοκρασία. Όπως είδαμε στα προηγούμενα, η  $V_{BE}$  ελαττώνεται περίπου 2 mV ανά βαθμό αύξησης. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία στο σχήμα 2, η συγκεκριμένη τάση σε κάθε δίοδο εκπομπού αναγκάζει το ρεύμα συλλέκτη να αυξηθεί γρήγορα. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί  $30^\circ$ , το ρεύμα συλλέκτη αυξάνεται κατά ένα παράγοντα 10, επειδή

η πόλωση εφαρμόζεται κοντά στα 60mV. Άρα το σημείο Q είναι πολύ ασταθές με πόλωση διαιρέτη – τάσης.



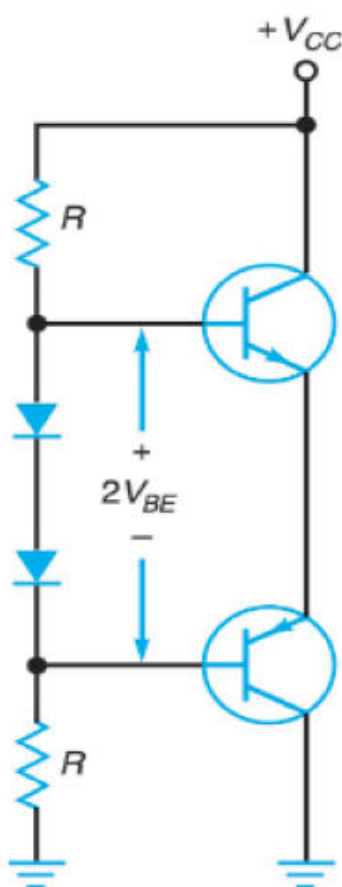
Σχήμα 2 : Πόλωση διαιρέτη τάσης ενός ενισχυτή push – pull τάξης B.

Ο μεγάλος κίνδυνος στο σχήμα 2 είναι «να ξεφύγει η θερμοκρασία». Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται το ρεύμα συλλέκτη. Καθώς αυξάνεται το ρεύμα συλλέκτη η θερμοκρασία επαφής αυξάνεται ακόμη περισσότερο, ελαττώνοντας περαιτέρω τη σωστή  $V_{BE}$ . Αυτή η κλιμακούμενη κατάσταση σημαίνει ότι το ρεύμα συλλέκτη μπορεί να «ξεφύγει» αυξανόμενο και λόγω υπερβολικής ισχύος να καταστραφεί το transistor.

Αν θα συμβεί αυτό εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του transistor και από τον τρόπο που αυτό ψύχεται, δηλαδή από το τύπο απαγωγού θερμότητας (ψύκτρα) που χρησιμοποιεί. Πολύ συχνά, όταν χρησιμοποιείται πόλωση διαιρέτη – τάσης όπως στο σχήμα 2, καταστρέφεται το transistor λόγω του φαινομένου κατά το οποίο «ξεφεύγει η θερμοκρασία» (thermal runaway).

## Πόλωση με διόδους

Ένας τρόπος για να μην «ξεφεύγει η θερμοκρασία», είναι η πόλωση με διόδους, που φαίνεται στο σχήμα 3. Η ιδέα είναι η χρησιμοποίηση *διόδων αντιστάθμισης* για να παράγουν την τάση πόλωσης για τις διόδους εκπομπών. Για να λειτουργήσει αυτό το κύκλωμα, οι καμπύλες των διόδων πρέπει να ταιριάζουν με τις καμπύλες  $V_{BE}$  των transistors. Επομένως, οποιαδήποτε αύξηση στη θερμοκρασία ελαττώνει την τάση πόλωσης που αναπτύσσεται από τις διόδους αντιστάθμισης κατά το ίδιο ποσό ακριβώς.



Σχήμα 3 : πόλωση διόδου ενός ενισχυτή push – pull τάξης B.

Για παράδειγμα, έστω ότι μια τάση πόλωσης  $0.65V$  δίνει ένα ρεύμα συλλέκτη  $2mA$ . Αν η θερμοκρασία αυξηθεί  $30^{\circ}C$ , η πτώση τάσης στα άκρα κάθε διόδου αντιστάθμισης είναι  $60mV$ . Εφόσον η απαιτούμενη  $V_{BE}$  ελαττώνεται επίσης κατά  $60mV$ , το ρεύμα συλλέκτη παραμένει στα  $2mA$ .

Η πόλωση με διόδους για να είναι διασφαλισμένη σε μεταβολές της θερμοκρασίας, πρέπει οι καμπύλες των διόδων να ταιριάζουν με τις καμπύλες  $V_{BE}$  μέσα σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών. Αυτό δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί με διακριτά κυκλώματα λόγω της ανοχής των στοιχείων. Αλλά η πόλωση με διόδους πραγματοποιείται εύκολα με ολοκληρωμένα κυκλώματα επειδή οι διόδοι και τα transistors είναι στο ίδιο chip, που σημαίνει ότι έχουν σχεδόν ίδιες καμπύλες.

Στην πόλωση με διόδους, το ρεύμα πόλωσης μέσω των διόδων αντιστάθμισης στο σχήμα 3 είναι :

$$I_{bias} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{2R} \quad (14)$$

Όταν οι διόδοι αντιστάθμισης έχουν όμοιες καμπύλες  $V_{BE}$  με εκείνες των transistors, το  $I_{CQ}$  έχει την ίδια τιμή με το  $I_{bias}$ . Όπως είπαμε νωρίτερα, το  $I_{CQ}$  θα πρέπει να είναι μεταξύ 1 και 5% του  $I_{C(sat)}$ , για να αποφύγουμε παραμόρφωση διασταύρωσης.

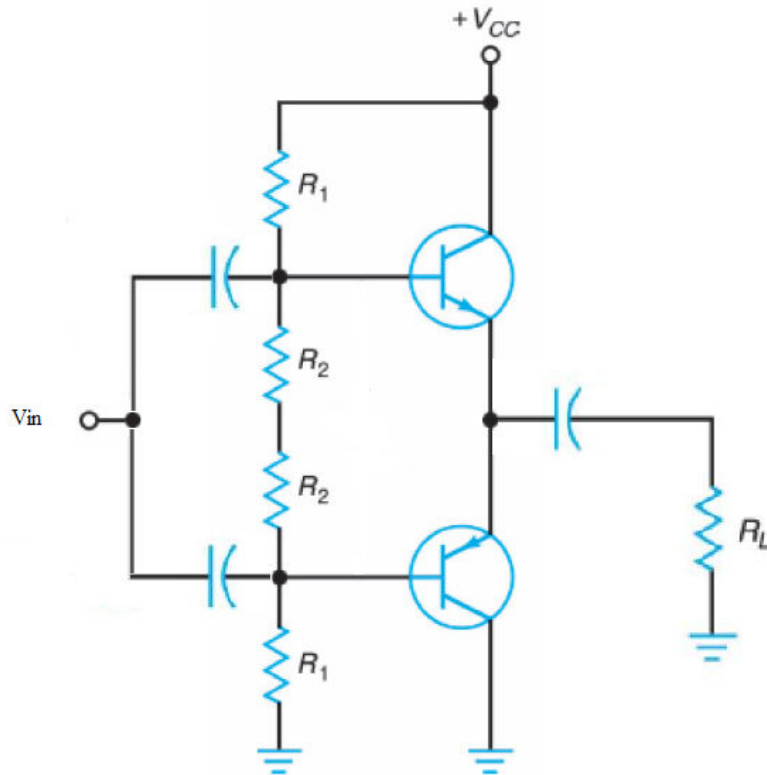
## **Λειτουργία τάξης AB**

### **Ακόλουθος εκπομπού push – pull τάξης B**

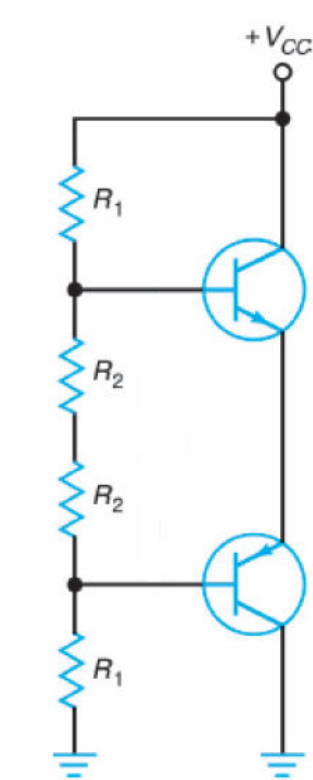
Λειτουργία τάξης B σημαίνει ότι το ρεύμα συλλέκτη ρέει μόνο για  $180^\circ$  του ac κύκλου. Για να συμβαίνει αυτό, το σημείο Q τοποθετείται στην αποκοπή και στις δύο γραμμές φορτίου, dc και ac. Το πλεονέκτημα των ενισχυτών τάξης B είναι λιγότερη ροή ρεύματος και μεγαλύτερη απόδοση.

### **Κύκλωμα push – pull**

Ένας τρόπος σύνδεσης ενός ακόλουθου εκπομπού push – pull τάξης B είναι η σύνδεση ενός ακόλουθου εκπομπού npn και ενός ακόλουθου εκπομπού pnp σ' ένα κύκλωμα push – pull.



Σχήμα : Ακόλουθος εκπομπού push – pull τάξης Β (α) πλήρες κύκλωμα.



Σχήμα : (β) dc ισοδύναμο κύκλωμα.

Ας αρχίσουμε την ανάλυση με το dc ισοδύναμο κύκλωμα του. Ο σχεδιαστής επιλέγει αντιστάσεις πόλωσης για να θέσει το σημείο Q στην αποκοπή. Αυτό πολώνει τη δίοδο εκπομπού κάθε transistor μεταξύ 0.6 και 0.7 V, έτσι ώστε να βρίσκεται στο κατώφλι της αγωγιμότητάς του. Στην ιδανική περίπτωση :

$$I_{CQ} = 0$$

Επειδή οι αντιστάσεις πόλωσης είναι ίσες, κάθε δίοδος εκπομπού πολώνεται με την ίδια τάση. Το αποτέλεσμα είναι η μισή τάση τροφοδοσίας να πέφτει στα άκρα συλλέκτη – εκπομπού κάθε transistor. Δηλαδή :

$$V_{CEQ} = V_{CC} / 2 \quad (15)$$

## DC γραμμή φορτίου

Εφόσον δεν υπάρχει dc αντίσταση στα κυκλώματα συλλέκτη και εκπομπού, το dc ρεύμα κόρου είναι άπειρο. Αυτό σημαίνει ότι η dc γραμμή φορτίου είναι κατακόρυφη. Αν αυτό σας φαίνεται επικίνδυνο, έχετε δίκιο. Το δυσκολότερο πράγμα στη σχεδίαση ενός ενισχυτή τάξης B είναι η τοποθέτηση ενός σταθερού σημείου Q στην αποκοπή. Οποιαδήποτε σημαντική ελάττωση στην  $V_{BE}$  με τη θερμοκρασία μπορεί να μετακινήσει το σημείο Q προς τα πάνω στην dc γραμμή φορτίου σε επικίνδυνα υψηλά ρεύματα. Προς στιγμή, έστω ότι το σημείο Q είναι πολύ σταθερό στην αποκοπή.



## AC γραμμή φορτίου

Όταν ένα από τα δύο transistors άγει, το σημείο λειτουργίας του κινείται προς τα πάνω κατά το μήκος της ac γραμμής φορτίου. Το σημείο λειτουργίας στο άλλο transistor παραμένει στην αποκοπή. Η μεταβολή τάσης του transistor που άγει μπορεί να κάνει όλη τη διαδρομή από την αποκοπή ως τον κόρο. Στον επόμενο μισό κύκλο, το άλλο transistor κάνει το ίδιο. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο p-p αψαλίδιστο σήμα ισούται με :

$$MPP = V_{CC} \quad (16)$$

## AC ανάλυση

Το ac ισοδύναμο του transistor που άγει είναι σχεδόν ίδιο με τον ακόλουθο εκπομπού τάξης A. Το κέρδος τάσης με φορτίο είναι :

$$A = 1 \quad (17)$$

Και η σύνθετη αντίσταση εισόδου βάσης είναι :

$$Z_{in(\text{base})} = \beta R_L \quad (18)$$

## Συνολική λειτουργία

Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, το πάνω transistor άγει και το κάτω είναι σε αποκοπή. Το πάνω transistor ενεργεί ως ένας κοινός ακόλουθος εκπομπού και επομένως η τάση εξόδου ισούται κατά προσέγγιση με την τάση εισόδου.

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, το πάνω transistor είναι σε αποκοπή και το κάτω transistor άγει. Το κάτω transistor ενεργεί σαν ένας κοινός ακόλουθος εκπομπού και παράγει μια τάση φορτίου κατά προσέγγιση ίση με την τάση εισόδου.



Το πάνω transistor χειρίζεται τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου και το κάτω transistor την αρνητική ημιπερίοδο. Κατά τη διάρκεια καθεμιάς ημιπεριόδου, η πηγή «βλέπει» μια υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου σε κάθε βάση.

## **Παραμόρφωση διασταύρωσης**

Αν στο ac ισοδύναμο κύκλωμα ενός ακόλουθου εκπομπού push – pull τάξης B δεν εφαρμόζεται πόλωση στις διόδους εκπομπών, τότε η εισερχόμενη ac τάση πρέπει να υψωθεί στα 0.7V περίπου για να υπερνικηθεί το φράγμα δυναμικού των διόδων εκπομπών. Λόγω αυτού, δεν ρέει ρεύμα μέσω του Q1 όταν το σήμα είναι μικρότερο από 0.7V.

Το ίδιο γίνεται κατά την άλλη ημιπερίοδο, όπου δεν ρέει ρεύμα στο Q2 ώσπου η ac τάση εισόδου να γίνει πιο αρνητική από -0.7V.

Το σήμα παραμορφώνεται. Λόγω της ψαλίδισης μεταξύ ημιπεριόδων, η έξοδος δεν είναι πλέον ένα ημιτονικό σήμα. Εφόσον η ψαλίδιση συμβαίνει μεταξύ του χρόνου που το ένα transistor είναι σε αποκοπή και του χρόνου που το άλλο άγει, την καλούμε παραμόρφωση διασταύρωσης (crossover distortion). Για να εξαλειφθεί η παραμόρφωση crossover, πρέπει να εφαρμόσουμε μια μικρή ορθή πόλωση σε κάθε δίοδο εκπομπού. Αυτό σημαίνει τοποθέτηση του σημείου Q λίγο πιο πάνω από την αποκοπή. Γενικά, ένα  $I_{CQ}$  1-5% του  $I_{C(sat)}$  είναι αρκετό για να εξαλείψει την παραμόρφωση διασταύρωσης.

## **Τάξη AB**

Η ελαφρά ορθή πόλωση σημαίνει ότι η γωνία αγωγιμότητας θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από 180°, επειδή το transistor θα άγει για λίγο περισσότερο από μια ημιπερίοδο. Για την ακρίβεια, δεν έχουμε πια λειτουργία τάξης B. Γι' αυτό, η λειτουργία μερικές φορές ονομάζεται τάξης AB, και ορίζεται σαν η γωνία αγωγιμότητας μεταξύ 180° και 360°. Όμως, δεν είναι ακριβώς τάξη AB. Για τον λόγο αυτό, οι περισσότεροι αναφέρονται στο κύκλωμα σαν ενισχυτής push – pull τάξης B, επειδή η λειτουργία είναι τάξης B αν κάνουμε την προσέγγιση με μεγαλύτερη ακρίβεια.

## Τύποι ισχύος

Οι ακόλουθοι τύποι εφαρμόζονται σε όλες τις τάσεις λειτουργίας, συμπεριλαμβανόμενης και της λειτουργίας push – pull :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{κέρδος ισχύος})$$

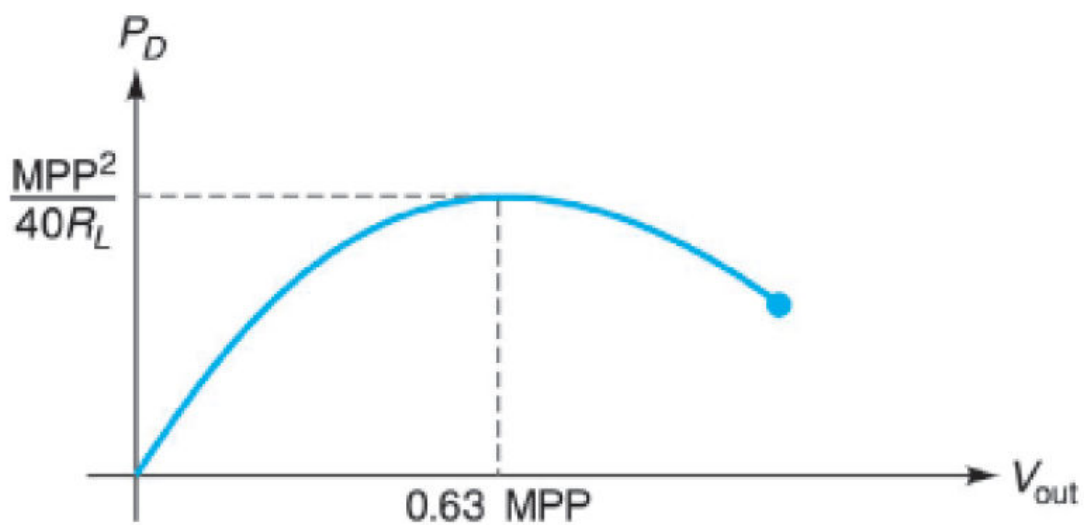
$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{8R_L} \quad (\text{AC ισχύς εξόδου})$$

$$P_{out}(\max) = \frac{MPP^2}{8R_L} \quad (\text{Μέγιστη AC ισχύς εξόδου})$$

$$P_{dc} = V_{CC} * I_{dc} \quad (\text{DC ισχύς εξόδου})$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_{dc}} * 100\% \quad (\text{Απόδοση})$$

Όταν χρησιμοποιούμε τους τύπους αυτούς για την ανάλυση του ακόλουθου εκπομπού push – pull τάξης B, να θυμάστε ότι στον ενισχυτή push – pull τάξης B, κάθε transistor παρέχει μια ημιπερίοδο.



## Κατανάλωση ισχύος του transistor

Στην ιδανική περίπτωση, η κατανάλωση ισχύος του transistor είναι μηδενική όταν δεν υπάρχει σήμα εισόδου, επειδή και τα δύο transistor βρίσκονται σε αποκοπή. Αν υπάρχει μικρή ορθή πόλωση, που απαιτείται για αποφυγή της παραμόρφωσης crossover, η κατανάλωση ισχύος ηρεμίας σε κάθε transistor είναι πολύ μικρή.

Όταν υπάρχει σήμα εισόδου, η κατανάλωση ισχύος του transistor γίνεται σημαντική. Η κατανάλωση ισχύος του transistor εξαρτάται από το πόσο χρησιμοποιείται η ac γραμμή φορτίου. Η μέγιστη κατανάλωση ισχύος του transistor είναι :

$$P_{D(\max)} = \frac{MPP^2}{40R_L} \quad (19)$$

Η  $P_D$  φθάνει ένα μέγιστο όταν η p-p τάση φορτίου είναι 63% της MPP. Αφού αυτή είναι η χειρότερη περίπτωση, κάθε transistor στον ενισχυτή τάξης B θα πρέπει να έχει περιορισμό ισχύος τουλάχιστον  $MPP^2/40R_L$ .

## Ο περιορισμός ισχύος του transistor

Η θερμοκρασία στην επαφή συλλέκτη θέτει ένα όριο στην επιτρεπόμενη απώλεια ισχύος  $P_D$ . Ανάλογα με τον τύπο του transistor, μια θερμοκρασία επαφής από 150 ως 200oC καταστρέφει το transistor. Τα φυλλάδια προδιαγραφών καθορίζουν αυτή τη μέγιστη θερμοκρασία επαφής σαν  $T_J(\max)$ . Για παράδειγμα, για ένα 2N3904 δίνεται μια  $T_J(\max)$  ίση με 150oC, ενώ για ένα 2N3719 δίνεται μια  $T_J(\max)$  ίση με 200oC.

## Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η θερμότητα που παράγεται στην επαφή διέρχεται μέσω της θήκης του transistor (μεταλλικό ή πλαστικό περίβλημα) και ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα αέρα. Η θερμοκρασία του αέρα αυτού, γνωστή σαν θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι περίπου 25°C, αλλά μπορεί να είναι μεγαλύτερη στις θερμές ημέρες. Επίσης η θερμοκρασία

περιβάλλοντος μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη στο εσωτερικό ενός τμήματος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

## **Παράγοντας ελάττωσης**

Τα φυλλάδια προδιαγραφών καθορίζουν συχνά την  $P_{D(max)}$  ενός transistor σε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}C$ . Για παράδειγμα, το 2N1936 έχει μια  $P_{D(max)}$  ίση με 4W για μια θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}C$ . Αυτό σημαίνει ότι ένα 2N1936 που χρησιμοποιείται σ' έναν ενισχυτή τάξης A μπορεί να έχει απώλεια ισχύος σε κατάσταση ηρεμίας μέχρι και 4W. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $25^{\circ}C$  ή μικρότερη, το transistor είναι μέσα στο καθορισμένο περιορισμό ισχύος του.

Τι κάνουμε αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από  $25^{\circ}C$ ; Πρέπει να ελαττώσουμε (derate) τον περιορισμό ισχύος. Τα φυλλάδια προδιαγραφών μερικές φορές περιλαμβάνουν μια καμπύλη ελάττωσης όπως αυτή του σχήματος 1. Όπως μπορείτε να δείτε, ο περιορισμός ισχύος ελαττώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, σε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος  $100^{\circ}C$ , ο περιορισμός ισχύος είναι 2W.

Μερικά φυλλάδια προδιαγραφών δεν δίνουν καμπύλη ελάττωσης όπως αυτή του σχήματος 1. Αντί αυτής, περιλαμβάνουν ένα παράγοντα ελάττωσης D. Για παράδειγμα, ο παράγοντας ελάττωσης ενός 2N1936 είναι  $26.7 \text{ mW}/^{\circ}C$ . Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αφαιρούν  $26.7 \text{ mW}$  για κάθε βαθμό θερμοκρασίας περιβάλλοντος πάνω από  $25^{\circ}C$ . Δηλαδή,

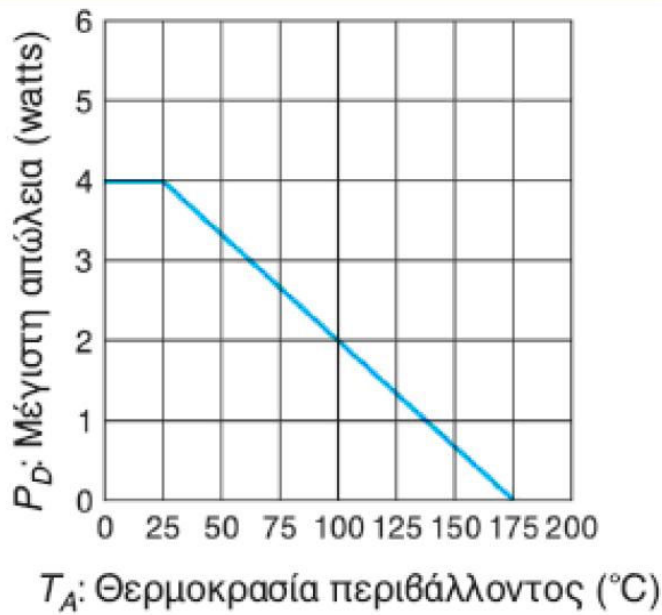
$$\Delta P = D(TA - 25^{\circ}C) \quad (1)$$

Όπου  $\Delta P$  = ελάττωση του περιορισμού ισχύος

D = παράγοντας ελάττωσης

TA = θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (2N1936)



Σχήμα 1 : Περιορισμός ισχύος σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Σαν ένα παράδειγμα, αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξηθεί στους  $75^{\circ}\text{C}$ , πρέπει να ελαττωθεί ο περιορισμός ισχύος κατά

$$\Delta P = 26.7\text{mW} \cdot (75 - 25) = 1.34\text{W}$$

Εφόσον ο περιορισμός ισχύος είναι  $4\text{W}$  στους  $25^{\circ}\text{C}$ , ο νέος περιορισμός ισχύος είναι

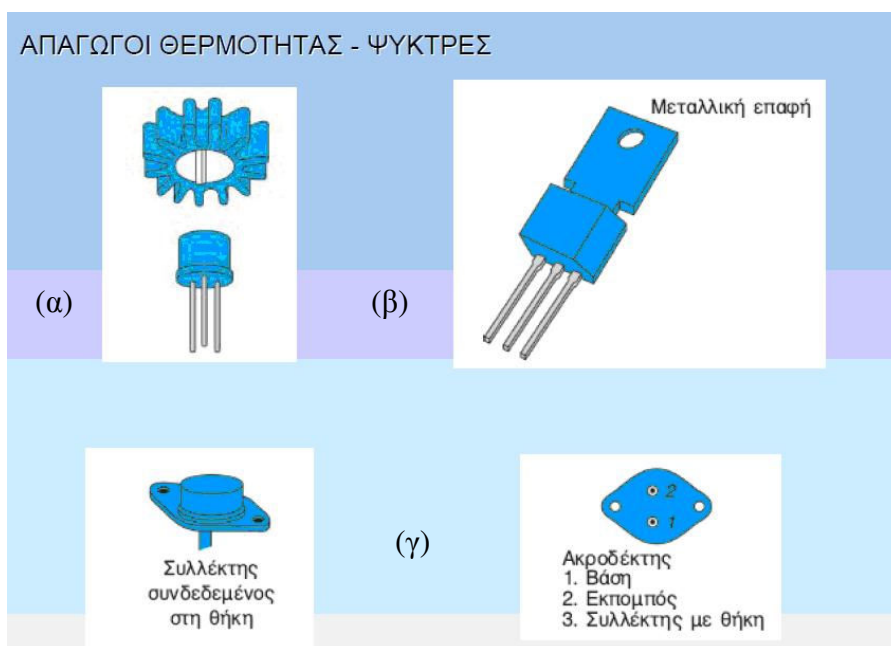
$$P_{D(\text{max})} = 4\text{W} - 1.34\text{W} = 2.66\text{W}$$

Αυτή η τιμή συμφωνεί με την καμπύλη ελάττωσης του σχήματος 1.

Είτε παίρνετε τον ελαττωμένο περιορισμό ισχύος από μια καμπύλη ελάττωσης όπως αυτή στο σχήμα 1 είτε από ένα τύπο όπως αυτόν στην Εξίσωση 1, το σημαντικό που πρέπει να προσέχουμε είναι η ελάττωση του περιορισμού ισχύος καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το γεγονός ότι ένα κύκλωμα λειτουργεί καλά στους  $25^{\circ}\text{C}$  δεν σημαίνει ότι θα λειτουργεί το ίδιο καλά μέσα σε μια μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών. Συνεπώς, όταν σχεδιάζετε κυκλώματα, πρέπει να παίρνετε υπόψη την περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας ελαττώνοντας τις επιδόσεις ισχύος όλων των transistor για τη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## Απαγωγοί θερμότητας

Ένας τρόπος αύξησης του περιορισμού ισχύος ενός transistor είναι η ταχύτερη απαλλαγή της θερμότητας. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται απαγωγοί θερμότητας. Αν αυξήσουμε την επιφάνεια της θήκης του transistor, επιτρέπουμε στη θερμότητα να διαφεύγει ευκολότερα στον περιβάλλοντα αέρα. Κοιτάξτε το σχήμα 2α. Όταν στη θήκη του transistor εφαρμοσθεί αυτός ο τύπος απαγωγού θερμότητας, η θερμότητα ακτινοβολείται ταχύτερα λόγω της αυξημένης επιφάνειας των πτερυγίων.



Σχήμα 2 : (α) Ψύκτρα push – pull, (β) Transistor ισχύος με μεταλλική επαφή (power-tab) και (γ) Transistor ισχύος με το συλλέκτη συνδεδεμένο στη θήκη.

Το σχήμα 2β δείχνει το power – tab transistor. Η μεταλλική λαβή παρέχει μια διέξοδο της θερμότητας του transistor. Αυτή η μεταλλική λαβή μπορεί να εφαρμοστεί στο «σασί» της ηλεκτρονικής διάταξης. Επειδή το σασί είναι ένας μεγάλος απαγωγός θερμότητας, η θερμότητα μπορεί εύκολα να διαφύγει από το transistor προς το σασί.

Μεγάλα transistor ισχύος όπως του σχήματος 2γ έχουν το συλλέκτη συνδεδεμένο κατ' ευθείαν στη θήκη για την όσο το δυνατό ευκολότερη διαφυγή της θερμότητας. Στη συνέχεια η θήκη του transistor εφαρμόζεται στο σασί. Προς αποφυγή βραχυκυκλώματος του συλλέκτη με το γειωμένο σασί, χρησιμοποιείται μια λεπτή ροδέλα από μαρμαρυγία

(μίκρα) μεταξύ της θήκης του transistor και του σασί. Η βασική ιδέα εδώ είναι ότι η θερμότητα μπορεί να διαφύγει από το transistor γρηγορότερα, που σημαίνει ότι το transistor έχει έναν υψηλότερο περιορισμό ισχύος στην ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## **Θερμοκρασία θήκης**

Όταν η θερμότητα ρέει εκτός ενός transistor, διέρχεται μέσω της θήκης του transistor προς τον απαγωγό θερμότητας, ο οποίος κατόπιν ακτινοβολεί τη θερμότητα στον περιβάλλοντα αέρα. Η θερμοκρασία της θήκης του transistor, TC, θα είναι ελαφρώς υψηλότερη από τη θερμοκρασία του απαγωγού θερμότητας, TS, η οποία στη συνέχεια είναι λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, TA.

Τα φυλλάδια προδιαγραφών μεγάλων transistors ισχύος δίνουν καμπύλες ελάττωσης για τη θερμοκρασία θήκης αντί για την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, το σχήμα 3 δείχνει μια καμπύλη ελάττωσης ενός 2N5877. Ο περιορισμός ισχύος είναι 150W σε μια θερμοκρασία θήκης 25°C και στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά με τη θερμοκρασία έως ότου γίνει μηδέν για μια θερμοκρασία θήκης 200°C.

Μερικές φορές δίνεται ένας παράγοντας ελάττωσης αντί μιας καμπύλης ελάττωσης. Σ' αυτή την περίπτωση, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την ακόλουθη εξίσωση για να υπολογίσετε την μείωση του περιορισμού ισχύος :

$$\Delta P = D(TC - 25^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

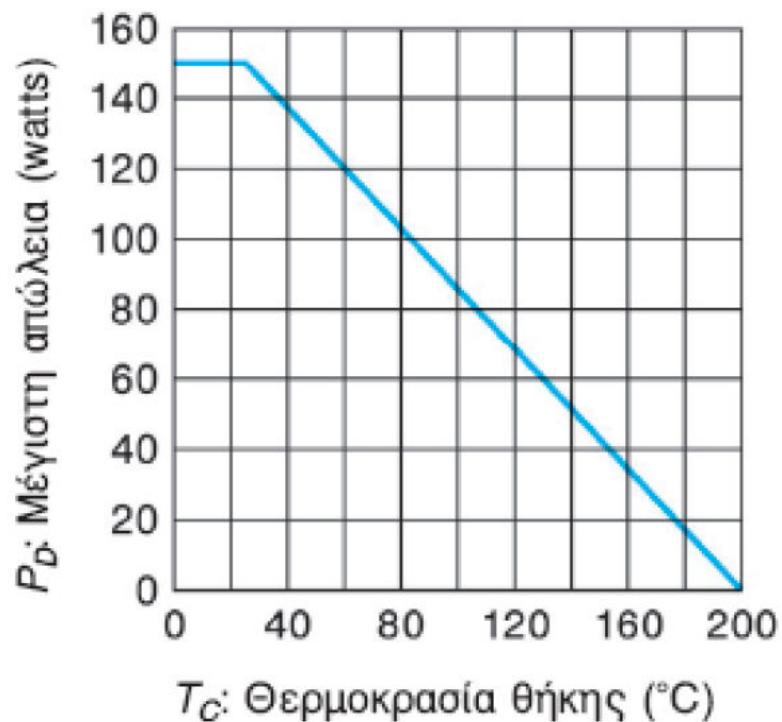
Όπου  $\Delta P$  = η ελάττωση στον περιορισμό ισχύος

D = παράγοντας ελάττωσης

TC = θερμοκρασία θήκης.

Για να χρησιμοποιήσετε την καμπύλη ελάττωσης ενός μεγάλου transistor ισχύος, πρέπει να γνωρίζετε πόση θα είναι η θερμοκρασία θήκης στη χειρότερη περίπτωση. Κατόπιν μπορείτε να ελαττώσετε τον περιορισμό ισχύος του transistor για να φθάσει στη μέγιστη τιμή της.

## ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (2N5877)



Σχήμα 3 : Περιορισμός ισχύος σε σχέση με τη θερμοκρασία θήκης.

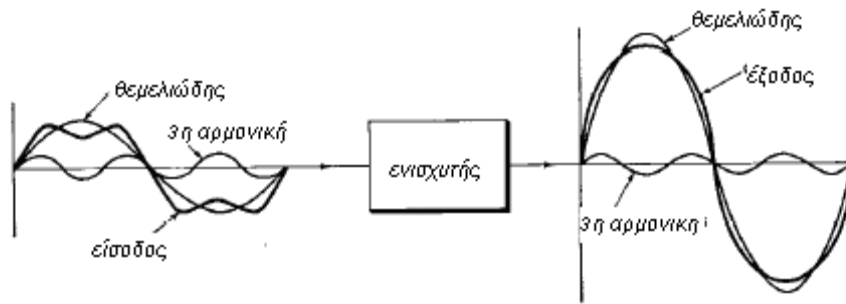
### Παραμόρφωση στους ενισχυτές

Η κυματομορφή κάθε σήματος εξαρτάται από την περιεκτικότητα της σε αρμονικές- το σχετικό πλάτος και τη φάση των στοιχείων της αρμονικής συχνότητας του σήματος . Οποιαδήποτε συσκευή αλλάζει το σχετικό πλάτος και τη φάση αυτών των αρμονικών παραμορφώνει το σήμα Αντίστροφα οποιαδήποτε συσκευή προσθέτει νέες συχνότητες που δεν υπάρχουν στο αρχικό σήμα το παραμορφώνει. Οι ενισχυτές προκαλούν και τις δύο παραμορφώσεις.

Οι τύποι της παραμόρφωσης είναι :

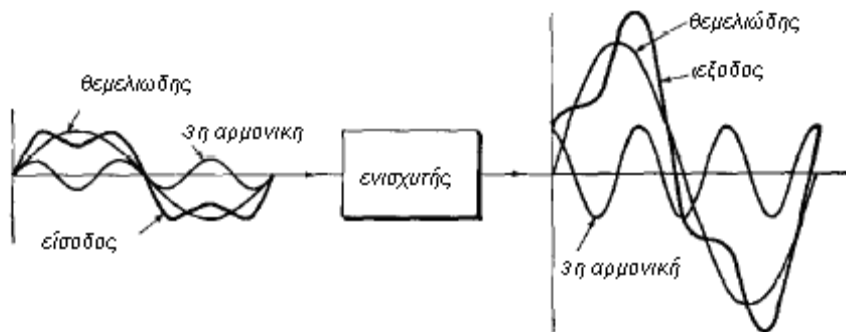
Παραμόρφωση συχνότητων. Συμβαίνει όταν κάποια στοιχεία από ένα πολύπλοκο σήμα ενισχύονται περισσότερο από άλλα. Το αποτέλεσμα είναι στην έξοδο να έχουμε ένα εντελώς διαφορετικό σήμα.





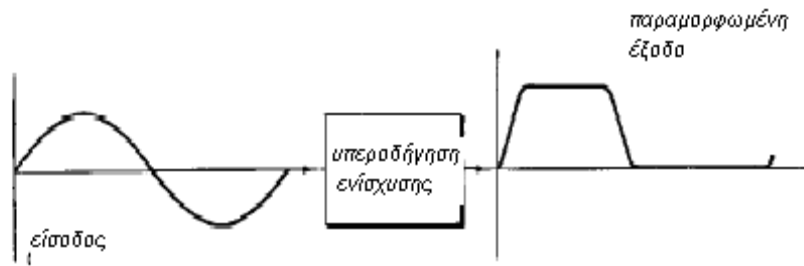
Σχήμα 1. Παραμόρφωση Συχνοτήτων

Παραμόρφωση Φάσης. Όταν το σήμα περνάει από ένα ενισχυτή και καθυστερεί, γνωστή ως καθυστέρηση φάσης ή παραμόρφωση, η οποία μεταβάλλεται με την συχνότητα. Προκαλείται κυρίως από την αντίδραση των κυκλωμάτων ζεύξης μεταξύ των σταδίων ενός ενισχυτή



Σχήμα 2. Παραμόρφωση Φάσης

Παραμόρφωση Πλάτους. Αν ένας ενισχυτής λειτουργεί σε μία μη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής του στοιχείου του, μια αλλαγή στην στιγμιαία τάση του πλέγματος επιφέρει αλλαγή στο ρεύμα που ρέει στο στοιχείο η οποία δεν είναι σε αναλογία. Με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του πλάτους. Αρμονικά στοιχεία παράγονται στον ενισχυτή και παρουσιάζονται στο σήμα εξόδου.



Σχήμα 3. Παραμόρφωση Πλάτους

Ενδοδιαμορφωμένη Παραμόρφωση. Ένα πολύπλοκο σήμα περιέχει τουλάχιστον δύο στοιχεία συχνοτήτων, αν ένα τέτοιο σήμα εφαρμοστεί σε ένα ενισχυτή που λειτουργεί στη μη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής, τότε παρουσιάζεται ενδοδιαμόρφωση. Στη ενδοδιαμόρφωση προκαλούνται αρμονικά στοιχεία στην κυματομορφή εξόδου, άθροισμα και διαφορά συχνοτήτων σε κάθε ζευγάρι των στοιχείων της κυματομορφής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΗΧΟΥ

Η αποστολή των ενισχυτών ισχύος είναι η παροχή καθορισμένου κέρδους σε ένα επεξεργασμένο σήμα και η απόδοση ισχύος σε ένα φορτίο, όπως είναι τα ηχεία. Αυτό πρέπει να γίνει χωρίς να νοθεύεται το αρχικό σήμα με θόρυβο, ταλαντώσεις ή παραμορφώσεις ενώ οδηγεί ένα πλήθος από φορτία. Επιπλέον πρέπει να αντέχει στην κακομεταχείριση, όπως τα ανοιχτοκυκλώματα και τα βραχυκυκλώματα.

Ο καθοριστικός παράγοντας είναι το στάδιο εξόδου. Η επιλογή του καθορίζει την τοπολογία και των υπόλοιπων σταδίων του ενισχυτή. Σκόπιμο λοιπόν είναι να ξεκινήσει κάποιος από αυτό το στάδιο για την έρευνα και την σχεδίαση.

Τα τυπικά ηχεία των 4 - 8Ω απαιτούν μερικές δεκάδες βολτ και αμπέρ για να λειτουργήσουν. Η προφανής λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η παρεμβολή μεταξύ εξόδου και φορτίου ενός μετασχηματιστή.

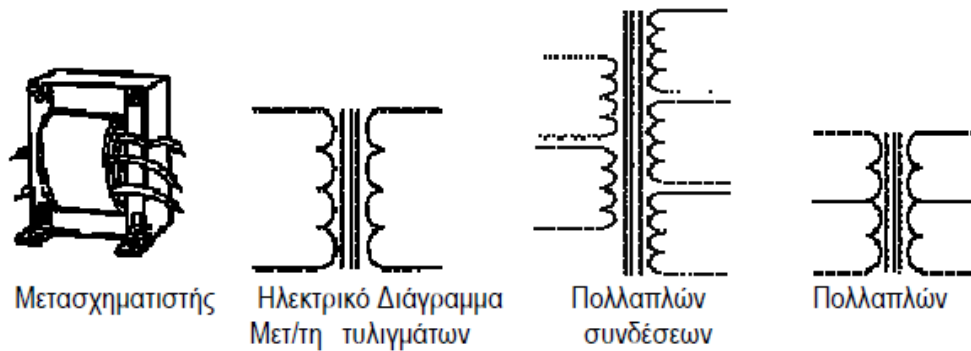
Δυστυχώς εδώ ξεκινάνε τα προβλήματα, γιατί ο μετασχηματιστής δεν είναι ένα ιδανικό στοιχείο και η ποιότητα του ενισχυτή περιορίζεται από την ποιότητα του μετασχηματιστή. Παρά ταύτα, ο μετασχηματιστής είναι μια καλή μηχανική επιλογή για την σύζευξη του σταδίου εξόδου με το φορτίο.

### **Τι είναι οι μετασχηματιστές ήχου;**

Μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που επιτρέπει σε ένα AC σήμα να παράγει ένα άλλο εναλλασσόμενο σήμα εξόδου, χωρίς η είσοδος και η έξοδος να συνδέονται φυσικά. Αυτό επιτυγχάνεται έχοντας δύο ή περισσότερα πηνία μονωμένου σύρματος γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα. Όταν ένα σήμα περνάει από το τύλιγμα εισόδου (πρωτεύον), ένα σχετικό σήμα εξόδου παρουσιάζεται στο δεύτερο τύλιγμα (δευτερεύον), μέσω ενός φαινομένου που ονομάζεται επαγωγική σύζευξη. Αλλάζοντας τον αριθμό των στροφών του σύρματος σε κάθε τύλιγμα, ο μετασχηματιστής μπορεί να κατασκευαστεί έχοντας συγκεκριμένες τιμές εισόδου, εξόδου. Η αναλογία μεταξύ εισόδου/εξόδου παρέχει ένα κέρδος ή απώλεια του επιπέδου του σήματος. Λόγω της δυνατότητας του μετασχηματιστή να λειτουργεί σε δύο κατευθύνσεις, όταν έχει σαν είσοδο το ένα τύλιγμα και το σήμα ενισχύεται θετικά, αν το σήμα εφαρμοστεί στο άλλο τύλιγμα τότε το σήμα ενισχύεται αρνητικά. Οι μετασχηματιστές μπορούν να κατασκευαστούν με ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα ή πρωτεύοντα τυλίγματα. Επίσης

ένα τύλιγμα μπορεί να έχει μία ή περισσότερες ηλεκτρικές επαφές. Οι πολλαπλές επαφές προσφέρουν διαφορετικές τιμές κατά μήκος του σύρματος και διαφορετικό κέρδος.

Μερικοί τύποι μετασχηματιστών παρουσιάζονται στο σχήμα 1.



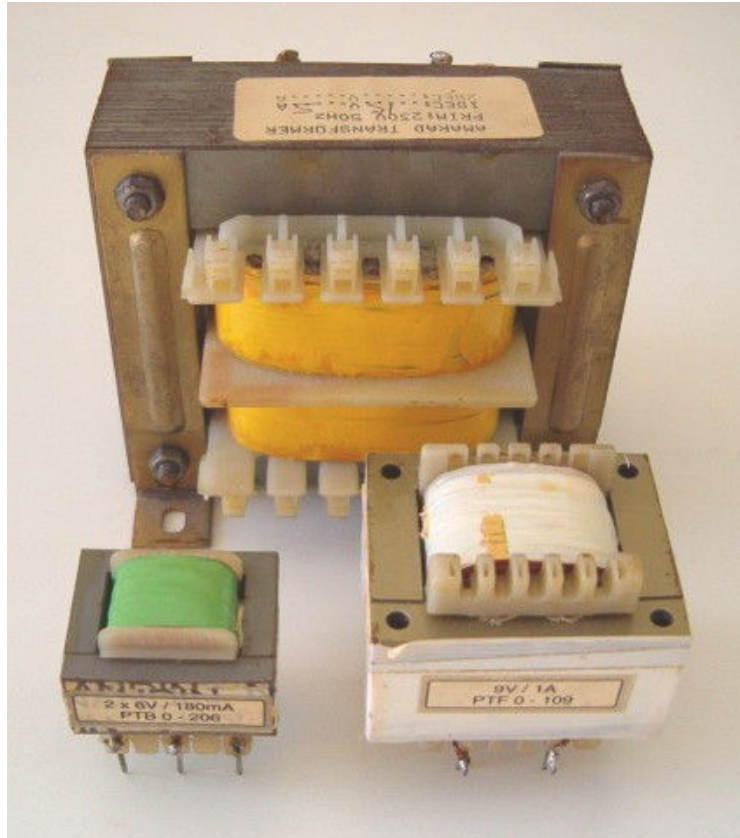
Σχήμα 1. Τύποι Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- α) μετασχηματιστές τροφοδοσίας,
- β) μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων,
- γ) μετασχηματιστές ρεύματος,
- δ) αυτομετασχηματιστές, και
- ε) μετασχηματιστές υψηλής τάσης.

## Μετασχηματιστές τροφοδοσίας

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας είναι διατάξεις οι οποίες παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και την αποδίδουν στην έξοδό τους μεταβάλλοντας του βασικούς παράγοντες που είναι η τάση και το ρεύμα. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω ένας απλός μετασχηματιστής τροφοδοσίας αποτελείται από δύο πηνία το πρωτεύον και το δευτερεύον, τα οποία βρίσκονται σε μαγνητική ζεύξη μεταξύ τους, με την βοήθεια σιδηροπυρήνα.

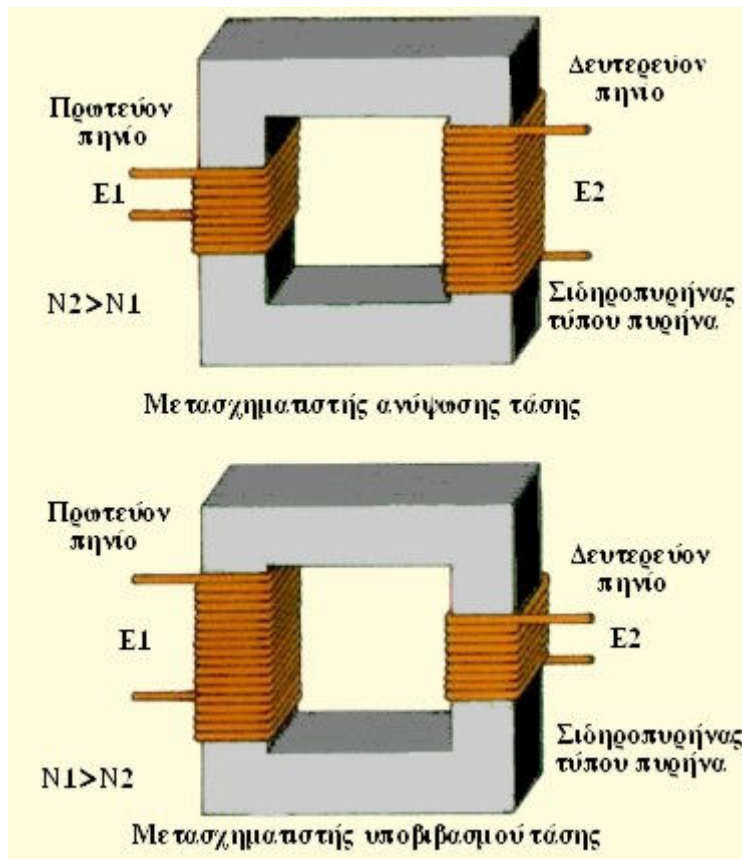


Επειδή ο σιδηροπυρήνας είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσονται σε αυτόν επαγωγικά ρεύματα (ρεύματα φουκώ), τα οποία προκαλούν την θερμότητά του. Η θέρμανση αυτή σημαίνει απώλεια ενέργειας και θα πρέπει αυτή η ενέργεια που χάνεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αν θεωρήσουμε έναν μετασχηματιστή χωρίς απώλειες (ιδανικός μετασχηματιστής), τότε το ρεύμα που κυκλοφορεί στο πρωτεύον αναπτύσσει στο δευτερεύον μια ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_2$ . Αν  $E_1$  είναι η τάση του πρωτεύοντος τότε οι μεταβολές της κοινής ροής θα είναι ανάλογες προς τον αριθμό στροφών  $N_1$  και  $N_2$  του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.

Δηλαδή θα ισχύει η σχέση :

$E_1/E_2 = N_1/N_2$ . Ο λόγος  $N_1/N_2$  ονομάζεται λόγος μετασχηματισμού.

Άρα λοιπόν αν  $N_1 > N_2$ , τότε θα έχουμε  $E_1 > E_2$ . Με άλλα λόγια ο μετασχηματιστής θα είναι μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης. Αν η  $E_2 > E_1$ , τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης.



Ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή εκφράζει τις απώλειες ενέργειας ενός μετασχηματιστή τροφοδοσίας και δίνεται από την σχέση :

$\eta = P_1/P_2$ , όπου  $P_1$  είναι η ισχύς εισόδου του μετασχηματιστή και  $P_2$  η ισχύς εξόδου του. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή θα έχουμε  $\eta = 1$  που σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Κάτι τέτοιο πρακτικά δεν συμβαίνει λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή που θα αναφερθούμε παρακάτω.

Αν  $P_1 = P_2$  τότε  $E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$  οπότε  $I_1/I_2 = E_2/E_1 = N_2/N_1$ . Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στο δευτερεύον ανυψώνεται, όταν η τάση στο δευτερεύον υποβιβάζεται και αντίστροφα.

Ο λόγος  $E_1/I_1$  εκφράζει την σύνθετη αντίσταση  $Z_1$  του πρωτεύοντος οπότε θα έχουμε:

$$Z_1 = E_1/I_1 = (E_1/I_2) \cdot (I_2/I_1) \cdot (E_2/I_2) = (N_1/N_2)^2 \cdot E_2/I_2 = (N_1/N_2)^2 \cdot Z_2.$$

Αυτό σημαίνει ότι η επαγωγική ή ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος μπορεί να αναχθεί στο πρωτεύον με πολλαπλασιασμό επί το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού.

#### α) Απώλειες μετασχηματιστών τροφοδοσίας.

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω ιδανικός μετασχηματιστής δεν υπάρχει, με αποτέλεσμα ένα μέρος της ενέργειάς του να μετατρέπεται στον σιδηροπυρήνα σε θερμότητα. Έτσι, η

ισχύς που αποδίδεται στην έξοδο είναι μικρότερη της εισόδου. Τα αίτια των απωλειών σε ένα μετασχηματιστή είναι τα εξής :

1. Απώλειες σιδήρου. Οφείλονται στο υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή και προέρχονται από τα ρεύματα φουκώ και την μαγνητική υστέρηση.
2. Απώλειες χαλκού. Το σύρμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, έχει μεγάλο μήκος και κατά συνέπεια κάποια υπολογίσιμη ωμική αντίσταση. Οι ωμικές αντιστάσεις των πηνίων σχηματίζουν μια επιπλέον απώλεια ισχύος στα τυλίγματα των πηνίων.

#### β) Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Οι απώλειες ενός σιδηροπυρήνα περιορίζονται με την επιλογή κατάλληλου υλικού, το οποίο έχει κύκλο υστέρησης με μικρό εμβαδόν. Πρέπει επίσης να έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση  $\rho$  για τον περιορισμό των δεινορευμάτων. Οι απώλειες αυτές περιορίζονται κατασκευάζοντας τον πυρήνα από λεπτά πυριτιούχα ελάσματα, πάχους 0,3 - 0,5 cm ή από μίγμα σκόνης σιδήρου με μονωτικό υλικό που είναι μονωμένα από την μία όψη τους.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή μπορεί να είναι είτε τύπος μανδύα, είτε τύπος πυρήνα. Ο τύπος μανδύα συνηθίζεται σε μετασχηματιστές πολύ μεγάλης ισχύος. Τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγονται στο κεντρικό στέλεχος αυτού, η δε όλη περιέλιξη προφυλάσσεται από δύο απέναντι στελέχη.

Στους μετασχηματιστές με τύπο πυρήνα, τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατανέμονται ομοιόμορφα στα δύο ακραία στελέχη και χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων. Οι περιελίξεις διαιρούνται εξίσου στα δύο σκέλη του πυρήνα και στον καθένα περιελίσσεται το μισό κάθε πηνίου. Η περιέλιξη χαμηλής τάσης μπαίνει κοντά στον πυρήνα και η περιέλιξη υψηλής τάσης εξωτερικά της περιέλιξης χαμηλής τάσης, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μόνωσης.

Οι συνδέσεις ενός σιδηροπυρήνα γίνονται με συνδετήρες ή βίδες. Οι καλές συνδέσεις περιορίζουν τον μαγνητικό θόρυβο.

Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή εξαρτάται περισσότερο από τις μονώσεις του και από τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Τα μονωτικά υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το εμποτισμένο χαρτί, η μίκα και ειδικό λάδι.

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή γίνονται συνήθως με σύρμα κυκλικής διατομής, μονωμένο με ειδικό μονωτικό υλικό. Συνήθως στην περιέλιξη τα κενά που δημιουργούνται κατά το τύλιγμα γεμίζονται από ειδικό σκληρυντικό βερνίκι.

### γ) Χρήση μετασχηματιστών τροφοδοσίας.

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα τροφοδοτικών σε ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίοι υποβιβάζουν την υψηλή τάση του δικτύου σε χαμηλές τάσεις για τα κυκλώματα των συσκευών. Παράλληλα παρέχουν γαλβανική απομόνωση των κυκλωμάτων των συσκευών για προστασία από κινδύνους ηλεκτροπληξίας.

Πολλοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν περισσότερες από μία εξόδους για διάφορες τάσεις και ρεύματα σε ηλεκτρονικές συσκευές ενώ σε κυκλώματα παλμοτροφοδοτικών οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι για υψηλότερες συχνότητες από τα 50Hz, με εντελώς διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά από τους απλούς μετασχηματιστές των 50 - 60 Hz.

### **Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων**

Οι μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν σωστά σε όλο το ακουστικό φάσμα από 16HZ έως 16KHZ. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως μετασχηματιστές εξόδου σε ενισχυτές τάξης Α μεγάλης ισχύος, ενώ σε πολύ μικρές ισχύς μπορούμε να συναντήσουμε μικρούς μετασχηματιστές σε ραδιόφωνα με ενισχυτή push - pull για προσαρμογή της χαμηλής αντίστασης του μεγαφώνου. Η κατασκευή ενός μετασχηματιστή ήχου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς λαμβάνονται πολλοί παράγοντες, όπως όρια συχνοτήτων, παρασιτικές χωρητικότητες, μαγνητικές διαφυγές, κτλ.





## Αυτομετασχηματιστές

Οι αυτομετασχηματιστές αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον αυτομετασχηματιστή από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του.



Αν η λήψη του αυτομετασχηματιστή είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του. Το πλεονέκτημα που έχει αυτός ο μετασχηματιστής είναι ότι είναι φθηνότερος σε κόστος, διότι διαθέτει μόνο ένα τύλιγμα άρα λιγότερος χαλκός, καθώς επίσης και λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό.

Επίσης, ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχει. Η χρήση του όμως είναι πάρα πολύ περιορισμένη διότι δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση και υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης της φάσης στην έξοδό του. Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα που έχει καθιστά την χρήση του σε πολύ ειδικές εφαρμογές.

## Μετασχηματιστές ρεύματος

Οι μετασχηματιστές ρεύματος αποτελούνται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον και έναν σιδηροπυρήνα, όπως και οι μετασχηματιστές τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος έχουν λίγες σπείρες στο πρωτεύον τους και το χάλκινο σύρμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ χοντρό. Το δευτερεύον πηνίο τους έχει περισσότερες σπείρες και το σύρμα που χρησιμοποιείται είναι ψιλότερης διατομής. Στο δευτερεύον πηνίο συνδέεται ένα αμπερόμετρο σαν φορτίο για την μέτρηση του ρεύματος.

Η χρήση των μετασχηματιστών ρεύματος είναι στα αμπερόμετρα καθώς με αυτό το τρόπο αυξάνεται η ευαισθησία τους.

## Μετασχηματιστές υψηλής τάσης

Οι μετασχηματιστές υψηλής τάσης είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται στους δέκτες τηλεοράσεως για την τροφοδότηση των πηνίων απόκλισης του καθοδικού σωλήνα. Η κατασκευή αυτών των μετασχηματιστών έχει διαφορές καθώς απαιτούνται μονώσεις υψηλής ποιότητας και συμπαγής πυρήνας. Ο πυρήνας στους μετασχηματιστές υψηλής τάσης αποτελείται από δύο κομμάτια φερριτή σχήματος Π.

Στο ένα σκέλος του πυρήνα περιελίσσονται το πρωτεύον και δύο άλλα δευτερεύοντα πηνία, ενώ στο άλλο σκέλος του περιελίσσετε το δευτερεύον, δηλαδή το τύλιγμα υψηλής τάσης.



Κατά την περιέλιξη του δευτερεύοντος παρεμβάλλονται μεταξύ των στρωμάτων φύλλα από πλαστική ταινία μεγάλης μόνωσης και η όλη περιέλιξη γίνεται συμπαγής χωρίς να

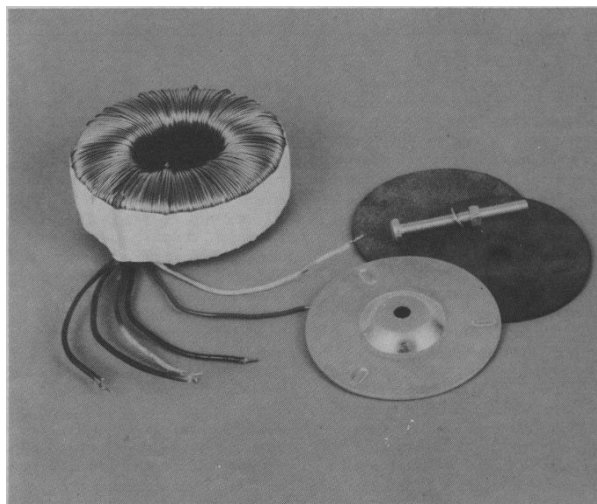
υπάρχουν κενά. Μετά τοποθετείται σε φούρνο με θερμοκρασία από 200°C έως 300°C και ψήνεται. Τέλος, εμποτίζεται σε πολυεστέρα και τοποθετείται μέσα σε θήκη από πολυκαρβονικό υλικό. Στην τελική μορφή του καλύπτεται ξανά με πολυεστέρα.

Η υπέρ υψηλή τάση που φτάνει τα 16KV επιτυγχάνεται με την βοήθεια διόδων (καταρράκτης), που στους σύγχρονους μετασχηματιστές υψηλής τάσης περιέχεται και το κύκλωμα του καταρράκτη.

## Τοροειδής μετασχηματιστές

Ένας τοροειδής μετασχηματιστής ανήκει στην κατηγορία των μετασχηματιστών τροφοδοσίας, όπου η κατασκευαστική του μορφή είναι διαφορετική από την συνήθη κατασκευή των μετασχηματιστών με σιδηροπυρήνα. Οι μετασχηματιστές αυτοί έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα από έναν μετασχηματιστή τροφοδοσίας με σιδηροπυρήνα, διότι έχουν μικρότερο μέγεθος και δημιουργούν μικρότερο μαγνητικό πεδίο γύρω τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εξαλείφεται ο θόρυβος που μπορεί τυχόν να δημιουργηθεί σε κυκλώματα, από την κοντινή απόσταση του μετασχηματιστή. Γι' αυτό σε κυκλώματα ήχου υψηλής ποιότητας, (προενισχυτές, ενισχυτές, κτλ.), χρησιμοποιούν τοροειδής μετασχηματιστές στα κυκλώματα τροφοδοσίας τους. Το μόνο μειονέκτημά τους είναι το υψηλότερο κόστος τους.

Οι τοροειδής μετασχηματιστές είναι ότι καλύτερο υπάρχει σήμερα στην περιοχή των μετασχηματιστών εναλλασσομένου ρεύματος και για ισχύ μέχρι 5KVA. Ο όγκος του είναι σχεδόν το ένα τρίτο και το βάρος του το ένα δεύτερο ενός κοινού μετασχηματιστή. Τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά είναι σχεδόν ιδανικά.



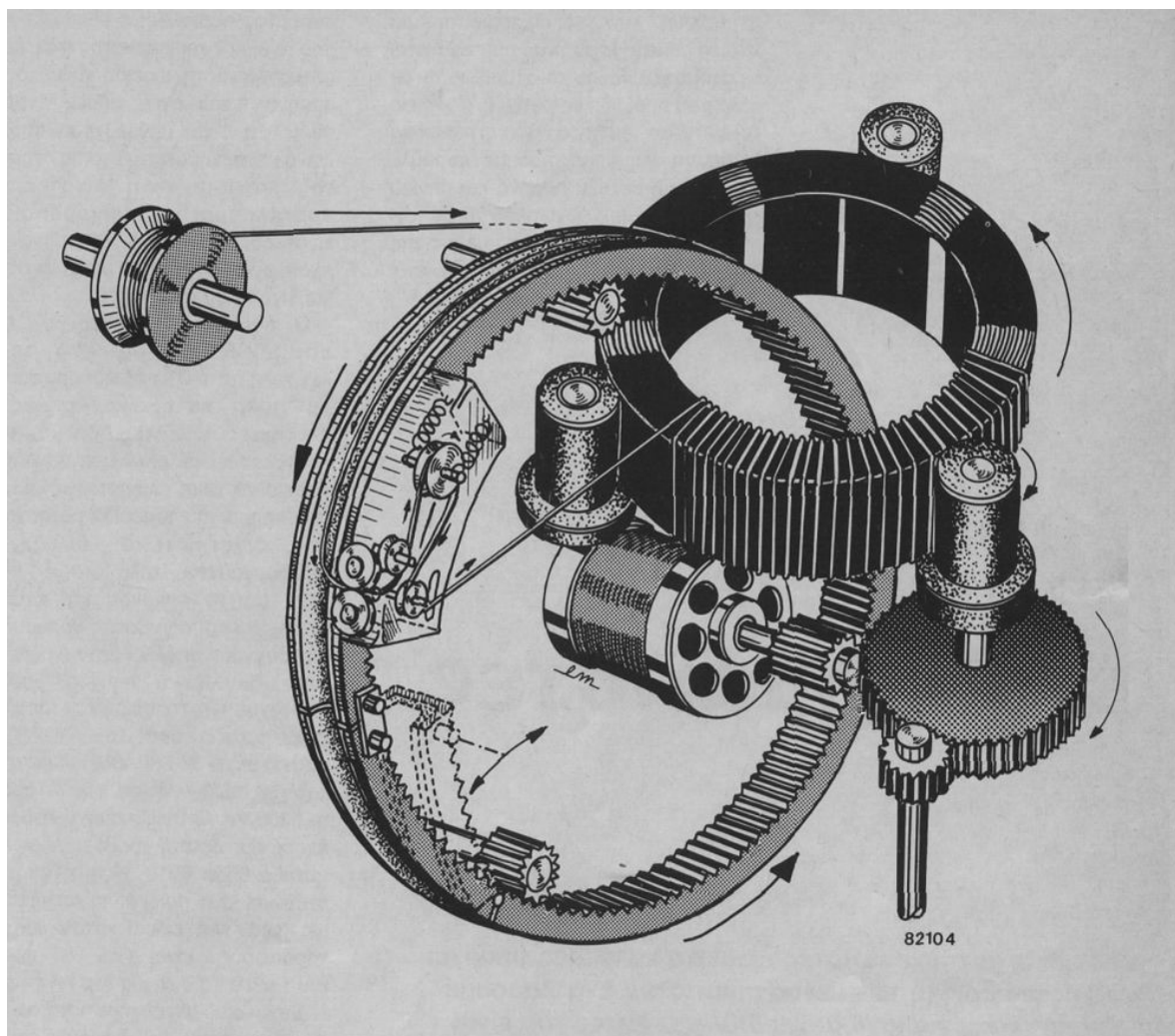
Ο τοροειδής μετασχηματιστής έχει σχήμα κοίλου κυλίνδρου. Για την κατασκευή του χρησιμοποιείται μια λωρίδα ειδικής λαμαρίνας που τυλίγεται σε σχήμα κυλίνδρου και στερεώνεται με κόλλα από εποξυδικές ρυτίνες. Το πηνίο τυλίγεται απ' ευθείας πάνω στο πυρήνα χωρίς να χρησιμοποιήσουμε καρούλι. Για μόνωση μεταξύ πυρήνα και πηνίου χρησιμοποιούμε μονωτική ταινία. Η περιέλιξη γίνεται σε όλο το μήκος της περιφέρειας του κυλίνδρου και έτσι έχουμε μια χαμηλή θερμοκρασία και μικρή σκέδαση πεδίου. Το μήκος του σύρματος περιελίξεως είναι μικρότερο από το μήκος του σύρματος ενός κοινού μετασχηματιστή, επειδή το μήκος του πυρήνα πάνω στον οποίο γίνεται η περιέλιξη είναι μεγαλύτερο από ένα κοινό μετασχηματιστή έτσι τα στρώματα του πηνίου είναι λιγότερα με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε λιγότερο χαλκό και επομένως να έχουμε μικρότερη ωμική αντίσταση και λιγότερες απώλειες.

Ο πυρήνας δεν έχει γωνίες και επομένως και διάκενα αέρος. Αποτελείται από υλικό σιδήρου πυριτίου με πολύ καλές μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι απώλειες μαγνητικού πεδίου να είναι ελάχιστες. Ένα άλλο προτέρημα του τοροειδή μετασχηματιστή είναι ότι σ' αυτόν δεν δημιουργούνται ταλαντώσεις επειδή είναι σφιχτά δεμένος και έτσι δεν ακούγεται ο γνωστός θόρυβος που δημιουργούν οι άλλοι μετασχηματιστές όταν δεν είναι σφιχτά δεμένοι.

Η ισχύς των τοροειδών μετασχηματιστών αρχίζει από 15VA (Watt) και φτάνει μέχρι τα 680VA. Η μέγιστη ισχύς κατόπιν παραγγελίας φτάνει περίπου τα 5000VA. Οι συνηθισμένοι τοροειδής έχουν δύο δευτερεύουσες περιελίξεις μεταξύ 6 και 60V. Η τοποθέτηση και στερέωση είναι πολύ απλή και γίνεται με μία βίδα. Μια ειδική κατασκευή ενός τοροειδούς είναι και ο γνωστός αυτομετασχηματιστής Variac.

Στον κοινό μετασχηματιστή τυλίγεται το πηνίο πάνω στο καρούλι και μετά τοποθετούνται τα ελάσματα. Στο τοροειδή μετασχηματιστή έχουμε τελείως διαφορετική διαδικασία. Το σχήμα 1 δείχνει πώς τυλίγεται ένας τέτοιος μετασχηματιστής.

Κατ' αρχήν χρησιμοποιείται μια στεφάνη που ανοίγει σε ένα σημείο. Έπειτα περνάμε τον πυρήνα μέσα από το άνοιγμα και το κλείνουμε. Στην στεφάνη μπορούμε να τυλίξουμε όσο σύρμα μας χρειάζεται και αφού στερεώσουμε το ένα άκρο πάνω στο πυρήνα αρχίζουμε το τυλίγμα. Τη στεφάνη την γυρίζουμε τώρα αντίστροφα με τεντωμένο σύρμα και τον πυρήνα αργά γύρω από τον άξονά του. Ο τοροειδής μετασχηματιστής έχει συνήθως το μισό βάρος ενός κοινού μετασχηματιστή.



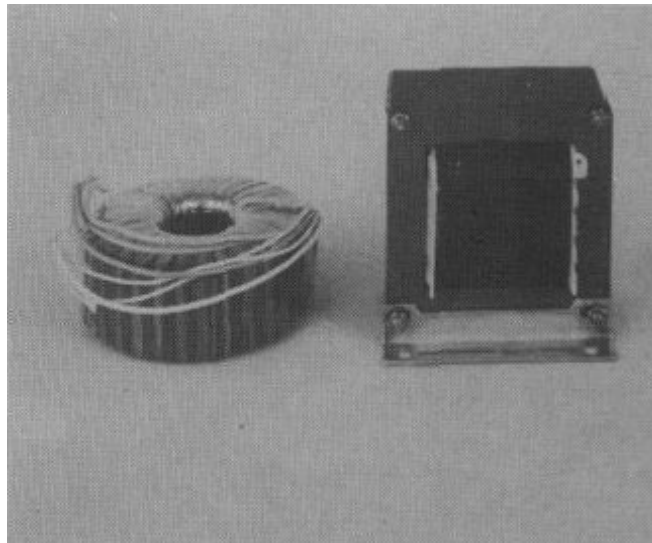
Σχήμα 1.

Σε μερικές περιπτώσεις το βάρος μπορεί να είναι και το ένα τρίτο του κοινού. Ο όγκος του τοροειδή είναι το ένα τρίτο και οι απώλειες σιδήρου είναι το ένα δέκατο του κοινού με την ίδια ισχύ. Η διαφορά γίνεται αισθητή σε μηδενικό φορτίο όταν συγκρίνουμε τα πεδία σκεδάσεως. Στον κοινό μετασχηματιστή το πεδίο είναι μέγιστο ενώ στο τοροειδή ελάχιστο. Όταν αυξήσουμε το φορτίο τότε το πεδίο μικραίνει στον κοινό και μεγαλώνει στον τοροειδή αλλά πάλι παραμένει μικρότερο του πεδίου του κοινού.

Η ιδιότητα του τοροειδή να μην εμφανίζει σχεδόν καθόλου πεδίο σκεδάσεως όταν δεν έχει φορτίο, μας είναι πολύ χρήσιμη στους ενισχυτές και γενικά στα ηλεκτρονικά επειδή όταν δεν υπάρχει φορτίο το πεδίο σκεδάσεως θα δημιουργούσε έναν πολύ αισθητό θόρυβο.

Το κόστος του με αυτές τις ιδιότητες δεν ήταν δυνατόν παρά να είναι μεγαλύτερο από του κοινού μετασχηματιστή, πρέπει όμως να πούμε ότι πραγματικά το αξίζει. Στον τοροειδή μετασχηματιστή πρέπει να προσέξουμε το αρχικό ρεύμα επειδή είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα ενός κοινού μετασχηματιστή και για αυτό τον λόγο οι ασφάλειες στο

πρωτεύον πρέπει να είναι βραδείας τήξεως. Το ονομαστικό ρεύμα πρέπει να επιλεγεί κατά 50 έως 100% πιο πάνω από το ρεύμα του κοινού μετασχηματιστή.



### **Ατέλειες του μετασχηματιστή**

Η αναφορά στο μετασχηματιστή, φέρνει την ιδέα μιας ιδανικής συμπεριφοράς. Δυστυχώς όμως, από το πρωτεύον του μετασχηματιστή εξόδου περνάει ένα συνεχές μαγνητικό ρεύμα ( $I$  ηρεμία,  $I_q$ ). Για να μην φτάσει σε κορεσμό ο πυρήνας, προκαλώντας διαταραχή περιττών αρμονικών, θα πρέπει να έχει μεγάλο πυρήνα. Άλλη μέθοδος για να αποφύγουμε τον κορεσμό είναι η μείωση του αριθμού των τυλιγμάτων στο πρωτεύον, ελαττώνοντας έτσι το μαγνητικό φαινόμενο του ρεύματος ηρεμίας.

Συνήθως χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μετασχηματιστή. Επειδή όμως ο μετασχηματιστής είναι μεγάλος έχει πολύ μεγάλες παρασιτικές χωρητικότητες. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται με αυτό τον τρόπο είναι μεγάλοι και ακριβοί και έχουν μειωμένη απόδοση στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες.

Οι καμπύλες υστέρησης του μετασχηματιστή μπορούν να θεωρηθούν σαν την χαρακτηριστική μεταφοράς, δείχνοντας την σχέση μεταξύ  $V_{in}$  και  $V_{out}$ . Αν δεν υπήρχε συνεχές ρεύμα, τότε το ac σήμα θα ταλαντώνονταν συμμετρικά γύρω από την αρχή των αξόνων. Στα μικρά σήματα παρατηρείται ένα γόνατο στην χαρακτηριστική γύρω από την αρχή των αξόνων όπου η κλίση της καμπύλης ελαττώνεται. Η αιτία για αυτό το γόνατο είναι ότι τα ανεξάρτητα μαγνητικά πεδία που σχηματίζονται από τον πυρήνα

αντιστρέφουν την πολικότητα του μαγνητισμού τους. Περνώντας το ρεύμα ηρεμίας δια μέσου του μετασχηματιστή, αποφεύγουμε αυτή την περιοχή διασταύρωσης και η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι πιο γραμμική. Γι' αυτό ίσως υπάρχουν αναφορές για την εξαιρετική συμπεριφορά στη μεσαία περιοχή στην τάξη A των single - ended ενισχυτών.

Αν και ο μετασχηματιστής έχει μικρή επαγωγή στο πρωτεύον, που περιορίζει την καλή συμπεριφορά στα μπάσα, ο πυρήνας δεν φτάνει σε κορεσμό στις χαμηλές συχνότητες, εφόσον πρέπει να είναι υπερμεγέθης για να εξομαλύνει το ρεύμα ηρεμίας. Εξαιτίας αυτού, η επαγωγή σε πλήρη ac ισχύ εξόδου είναι περίπου η ίδια σε μηδενικό ac σήμα εξόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε σημαντικά καλή ποιότητα στα μπάσα εφόσον δεν αλλάζει με το επίπεδο. Το πρόβλημα όμως είναι με τις υψηλές συχνότητες όπου η απόδοση είναι φτωχή.

### **Θόρυβος μετασχηματιστών**

Ο θόρυβος των μετασχηματιστών οφείλεται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, δηλαδή στην μεταβολή των διαστάσεων των σιδερένιων ελασμάτων του πυρήνα από την επίδραση του πεδίου. Αυτή η μαγνητική επιμήκυνση παρατηρείται σε κλάσματα που περιέχουν πυρίτιο και είναι ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής καθώς και του τρόπου επεξεργασίας του υλικού.

Σε κάθε ημιπερίοδο του μαγνητικού πεδίου δημιουργείται μια πλήρη μηχανική ταλάντωση του πυρήνα και των ζυγωμάτων. Έτσι, η συχνότητα των μηχανικών ταλαντώσεων είναι διπλάσια της συχνότητας του πεδίου εκτός από αυτήν την ταλάντωση υπάρχουν οι ανώτερες ταλαντώσεις των οποίων η συχνότητα είναι πολλαπλάσια της βασικής.

Η αντιμετώπιση του θορύβου γίνεται ως εξής :

- ✓ Βελτίωση των ελασμάτων.
- ✓ Με προσοχή στην κατασκευή του πυρήνα στην τοποθέτηση των ελασμάτων και την σύνδεση των στελεχών με τα ζυγωματικά.
- ✓ Με κατάλληλο σχεδιασμό. Έχει διαπιστωθεί ότι κατασκευάζοντας τον πυρήνα από τρία ξεχωριστά υλικά η μαγνητική και ακουστική σύζευξη μεταξύ τους μειώνει αρκετά την ένταση του ήχου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΧΕΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ**

Τα γραμμικά τροφοδοτικά χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται σήμερα σε ένα πλήθος εφαρμογών αφού συναντώνται στις περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές. Η θεωρητική και πρακτική ανάλυσή τους θα αποτελέσει ένα βασικό οδηγό για την επιλογή, τον σχεδιασμό, καθώς και την αξιολόγηση ενός τροφοδοτικού.

Κατά την τροφοδότηση μιας ηλεκτρονικής συσκευής από το δίκτυο της ΔΕΗ, τις περισσότερες φορές παρεμβάλλεται ένα τροφοδοτικό χαμηλής ισχύος, αφού οι περισσότερες συσκευές λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, ενώ η τάση λειτουργίας του είναι αρκετά μικρότερη από τα 220V που παρέχει το δίκτυο. Για την παρασκευή των ανωτέρων τροφοδοτικών απαραίτητη είναι η χρήση της αρχής λειτουργίας τους, η οποία ακολουθεί τα εξής στάδια :

- Υποβιβασμός της τάσης
- Ανόρθωση
- Φιλτράρισμα
- Σταθεροποίηση

Το τελευταίο στάδιο δεν είναι απαραίτητο, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συσκευής που θα τροφοδοτηθεί.

### **Υποβιβασμός της τάσης**

Ο υποβιβασμός της τάσης από τα 220 V του δικτύου σε μια επιθυμητή χαμηλή τιμή (π.χ. 10V), είναι η πρώτη διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή ενός τροφοδοτικού. Η διαδικασία αυτή προηγείται των υπολοίπων, αφενός για μεγαλύτερη ασφάλεια, αφετέρου γιατί μια μικρή τάση είναι σαφώς πιο εύκολη με ένα απλό μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής είναι το εξάρτημα εκείνο που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, σε εναλλασσόμενη τάση επιλογής του χρήστη. Αποτελείται από δύο τουλάχιστον πηνία τοποθετημένα σε ένα σιδηροπυρήνα. Το πηνίο στο οποίο συνδέεται το δίκτυο λέγεται πρωτεύον, ενώ το άλλο δευτερεύον ή δευτερεύοντα, αν υπάρχουν περισσότερα από ένα. Χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη :



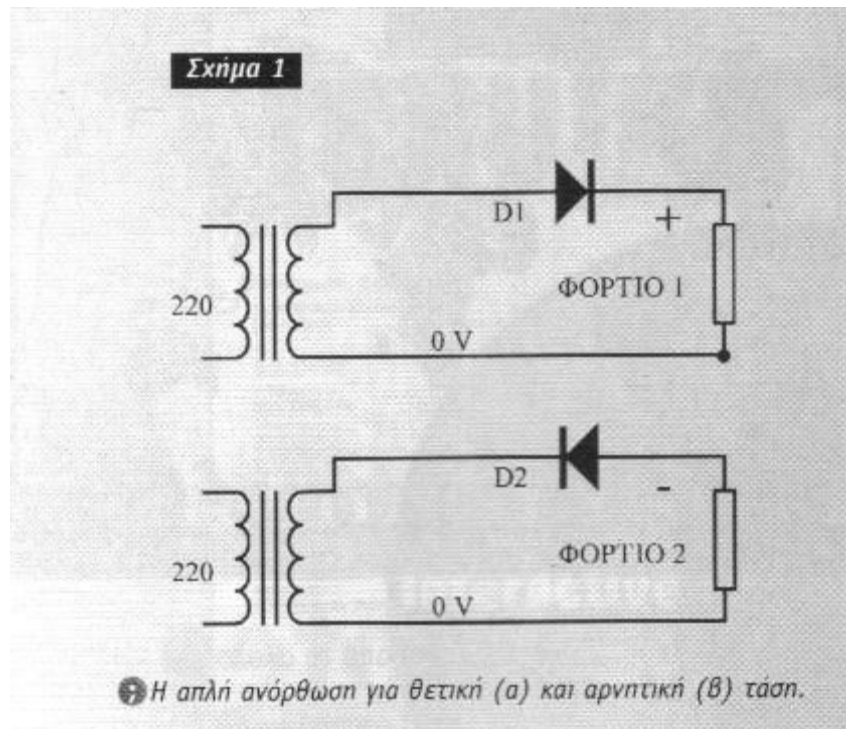
- Την ονομαστική τάση εισόδου, δηλαδή την τιμή της τάσης με την οποία πρέπει να τροφοδοτηθεί ο μετασχηματιστής.
- Την ονομαστική τάση εξόδου, δηλαδή την τιμή της τάσης που παράγεται στο δευτερεύον πηνίο, όταν ο μετασχηματιστής τροφοδοτηθεί.
- Την μέγιστη τάση ρεύματος την οποία μπορεί να δώσει ο μετασχηματιστής.
- Την μέγιστη ισχύς την οποία μπορεί να δώσει ο μετασχηματιστής. Η τιμή αυτή μετριέται σε Watt ( $1\text{Watt} = 1\text{V} \times 1\text{A}$ ) και εξαρτάται κυρίως από τον όγκο του σιδηροπυρήνα και την ποιότητα του.
- Κάθε μετασχηματιστής είναι κατασκευασμένος για μία συχνότητα λειτουργίας. Επειδή στην Ελλάδα έχουμε μόνο ένα δίκτυο με συχνότητα 50 Hz, η συχνότητα αυτή δεν αναφέρεται. Ένας μετασχηματιστής όμως μελετημένος για 50 Hz δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο με άλλη συχνότητα. Αν γίνει κάτι τέτοιο, τα αποτελέσματα θα είναι από απόκλιση στις τιμές εξόδου, μέχρι καταστροφή.

Έτσι στους μικρούς μετασχηματιστές οι οποίοι και μας ενδιαφέρουν περισσότερο, χρησιμοποιούνται μόνο τα τρία πρώτα μεγέθη δηλαδή η τάση εισόδου, η τάση εξόδου και το μέγιστο ρεύμα ( π.χ. 220/12V - 1A, 220/2 X 15V - 0,5A).

Ένας άλλος τρόπος υποβιβασμού της τάσης είναι με αντίσταση. Όμως αυτός ο τρόπος δεν ενδείκνυται, αφού είναι γνωστό ότι με την αντίσταση θα έχουμε μεγάλη κατανάλωση σε μικρή ισχύ άρα μεγαλύτερες θερμικές απώλειες, ακόμα και σε μικρά ρεύματα.

## **Ανόρθωση**

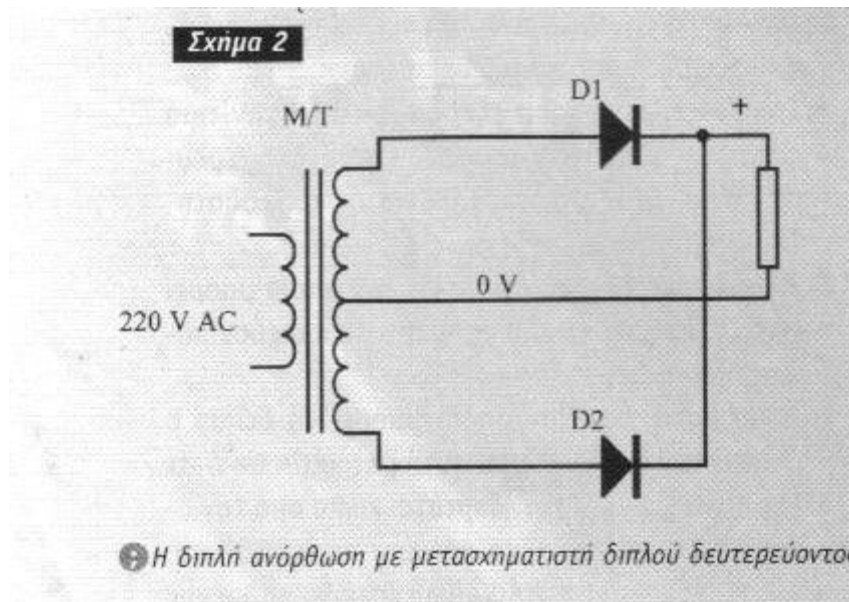
Το βασικότερο στάδιο της κατασκευής ενός τροφοδοτικού είναι αυτό της ανόρθωσης, κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα της εισόδου μετατρέπεται σε συνεχές. Η ανόρθωση επιτυγχάνεται με διόδους ανόρθωσης. Οι διόδοι γενικά είναι εξαρτήματα κατασκευασμένα από ημιαγώγιμο υλικό, που επιτρέπουν τη διέλευση μόνο της θετικής ή της αρνητικής φοράς του ρεύματος, ανάλογα με την πόλωση τους. Μια άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα των διόδων, είναι ότι διατηρούν σταθερή την τάση στα άκρα τους, ανεξάρτητα από το υπόλοιπο κύκλωμα. Η τιμή της τάσης εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό που είναι κατασκευασμένο η διάδος. Έτσι η διάδος πυριτίου (Si) αναπτύσσει διάφορα δυναμικού 0.7V, ενώ η διάδος γερμανίου (Ge) 0.2V. Οι διόδοι ανόρθωσης, δεν είναι τίποτα περισσότερο από διόδους, που είναι κατασκευασμένες ειδικά για αυτή διαδικασία.



Αν λοιπόν συνδέσουμε μια δίοδο στην έξοδο ενός μετασχηματιστή (Σχ. 1α), τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα μόνο κατά μία ημιπερίοδο του εναλλασσομένου ρεύματος. Το φορτίο μας λοιπόν (συσκευή) θα τροφοδοτείται με ρεύμα μίας κατεύθυνσης. Είναι προφανές ότι αν η δίοδος συνδεθεί αντίστροφα, τότε το ρεύμα θα είναι αντίθετης φοράς δηλαδή θα έχουμε αντίστροφη πολικότητα (Σχ. 1β). Τα δύο αυτά κυκλώματα ονομάζονται κυκλώματα απλής ανόρθωσης. Η ανόρθωση λέγεται απλή, γιατί εκμεταλλεύεται μόνο τη μία ημιπερίοδο του διαθέσιμου ρεύματος, αφού το υπόλοιπο σήμα δεν διέρχεται από τη δίοδο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα τόσο στην απόδοση, όσο και στη σταθερότητα της λειτουργίας της συσκευής.

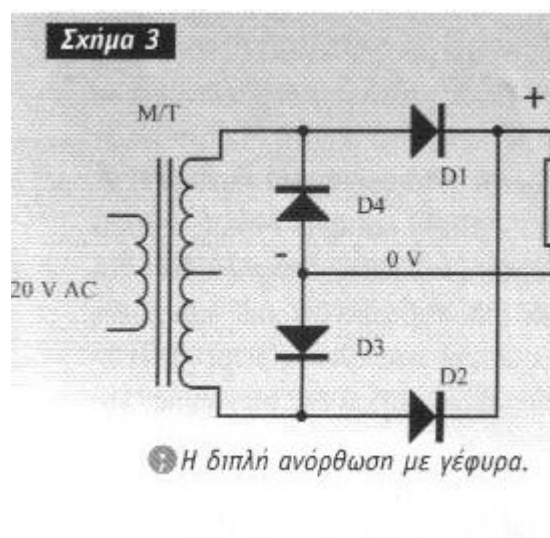
Τα κυκλώματα που εκμεταλλεύονται και τις δύο ημιπεριόδους του εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζονται κυκλώματα διπλής ανόρθωσης. Υπάρχουν δύο τεχνικές για να επιτύχουμε διπλή ανόρθωση και άρα και δύο κυκλώματα.

Η πρώτη τεχνική βασίζεται στον μετασχηματιστή με διπλό δευτερεύον τύλιγμα και απεικονίζεται στο Σχ. 2.



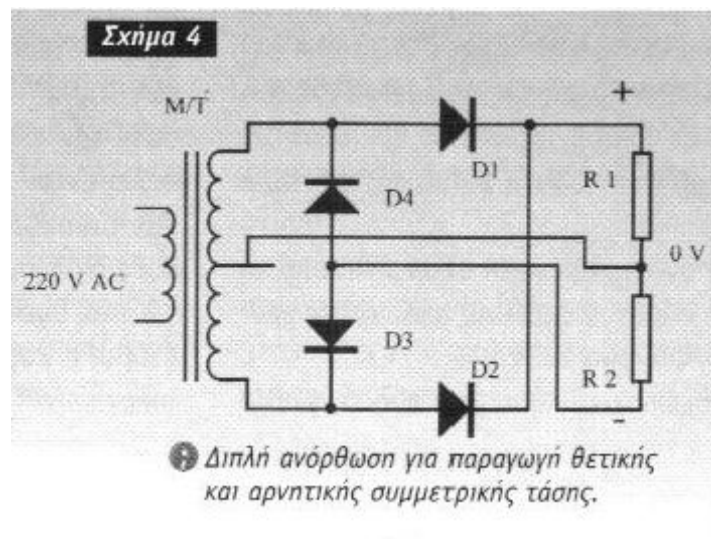
Η λειτουργία της είναι αρκετά απλή : Οι δύο διόδους του κυκλώματος είναι συνδεδεμένες με αντίστροφη πολικότητα. Έτσι η θετική ημιπερίοδος του ρεύματος που διέρχεται από την μία diode, απορρίπτεται από την άλλη, ενώ για την αρνητική συμβαίνει το αντίστροφο. Πάντως και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα διέρχεται με την ίδια φορά από την αντίσταση φορτίου (συσκευή).

Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με ένα πηνίο και γέφυρα ανόρθωσης (ή 4 ξεχωριστές diodes συνδεδεμένες σε διάταξη γέφυρας). Ας σχολιάσουμε τη λειτουργία σύμφωνα με το Σχ. 3.



Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή ο επάνω αγωγός του μετασχηματιστή είναι θετικότερος του κάτω. Το ρεύμα λοιπόν περνά από την D1, στην συνέχεια μέσα από την συσκευή και

συμπληρώνει την πορεία του μέσα από την D3 με άλλο αγωγό. Στην άλλη ημιπερίοδο, το ρεύμα περνά με τον ίδιο τρόπο από τις D2 και D4. Και στις δύο ημιπεριόδους λοιπόν το ρεύμα μέσα από την συσκευή έχει την ίδια φορά. Οι διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών επικεντρώνονται στον τύπο του μετασχηματιστή, στον αριθμό των διόδων και κυρίως στο ότι στην γέφυρα έχουμε διπλάσια πτώση τάσης και άρα μεγαλύτερη απώλεια ισχύος, αφού σε κάθε ημιπερίοδο διαρρέονται από ρεύμα οι δύο διόδοι, αντί για την μία του πρώτου κυκλώματος. Κριτήριο για την επιλογή του κυκλώματος και των διόδων, αποτελεί το μέγιστο ρεύμα και η μέγιστη τάση λειτουργίας της συσκευής.



Μία άλλη τεχνική, είναι αυτή του Σχ. 4, που στην ουσία είναι συνδυασμός των δύο τεχνικών που αναπτύξαμε παραπάνω. Σε ένα μετασχηματιστή με διπλό δευτερεύον πηνίο, γειώνουμε (-) τη μεσαία λήψη και συνδέουμε μια γέφυρα. Το κύκλωμα δεν είναι παρά μια διπλή ανόρθωση ανάλογη με αυτή του Σχ. 2, μόνο που σε κάθε πηνίο χρησιμοποιούμε δύο διόδους, έτσι ώστε να πάρουμε και τη θετική και την αρνητική τάση. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται σε συμμετρικές τροφοδοσίες (π.χ. -15, +15).

## Φιλτράρισμα

Η έξοδος από την ανόρθωση, ακόμα και την διπλή, παρότι θεωρείται DC, συνήθως συνοδεύεται από μεγάλες μεταβολές τάσης, κάτι που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητο. Συγκεκριμένα η τάση μεταβάλλεται από 0 με ημιτονικό ρυθμό, αφού η αρνητική ημιπερίοδος έχει απορριφθεί από τα κυκλώματα ανόρθωσης, δηλαδή

αποθηκεύουμε ενέργεια όσο η τάση ανεβαίνει, προκειμένου να την χρησιμοποιήσουμε όταν η τάση θα πέφτει. Βασικό εξάρτημα αποθήκευσης ενέργειας είναι ο πυκνωτής. Στην ουσία εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο της φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή συνδέοντας τον πυκνωτή στην έξοδο του κυκλώματος, η έξοδος πλέον εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση στα άκρα του. Όσο η τάση εξόδου αυξάνεται ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια, δηλαδή φορτίζεται και η έξοδος ακολουθεί την γνωστή καμπύλη φόρτισης του. Όταν τώρα η τάση εισόδου μειώνεται, ο φορτιστής εκφορτίζεται. Η φόρτιση του πυκνωτή πρέπει να επιτυγχάνεται όσο το ρεύμα αυξάνει. Έτσι η χρήση πυκνωτή με πολύ μεγάλη χωρητικότητα δεν είναι η κατάλληλη, αφού πριν προλάβει να φορτιστεί ο πυκνωτής το ρεύμα θα έχει αρχίσει να μειώνεται. Αν ο πυκνωτής είναι μικρός, για τις απαιτήσεις της συσκευής, τότε θα φορτίζεται και θα ξαναφορτίζεται αρκετά, δημιουργώντας μεγάλες μεταβολές στην τάση (κυμάτωση ή ripple).

Ένα άλλο πρόβλημα παρουσιάζεται όταν η συσκευή για την λειτουργία της χρειάζεται δεδομένο ρεύμα π.χ. 1A και ο μετασχηματιστής μπορεί να δώσει π.χ. 1,2A.

Τότε, το διαθέσιμο επιπλέον ρεύμα που θα πρέπει να αποθηκεύσει ο πυκνωτής σε μορφή ενέργειας δεν θα είναι αρκετό, με αποτέλεσμα η συσκευή να μην λειτουργεί σωστά. Πρέπει λοιπόν ο μετασχηματιστής να έχει μεγαλύτερη ικανότητα σε ρεύμα πρακτικά τουλάχιστον 50% μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται η συσκευή. Η επιλογή λοιπόν του πυκνωτή εξαρτάται από την συχνότητα του σήματος εισόδου, αλλά και το ρεύμα λειτουργίας της συσκευής. Εκτός από την θεωρητική λύση που απαιτεί μαθηματικούς υπολογισμούς, υπάρχει και αντίστοιχη και πρακτική λύση, η οποία επιτυγχάνεται σε δύο στάδια :

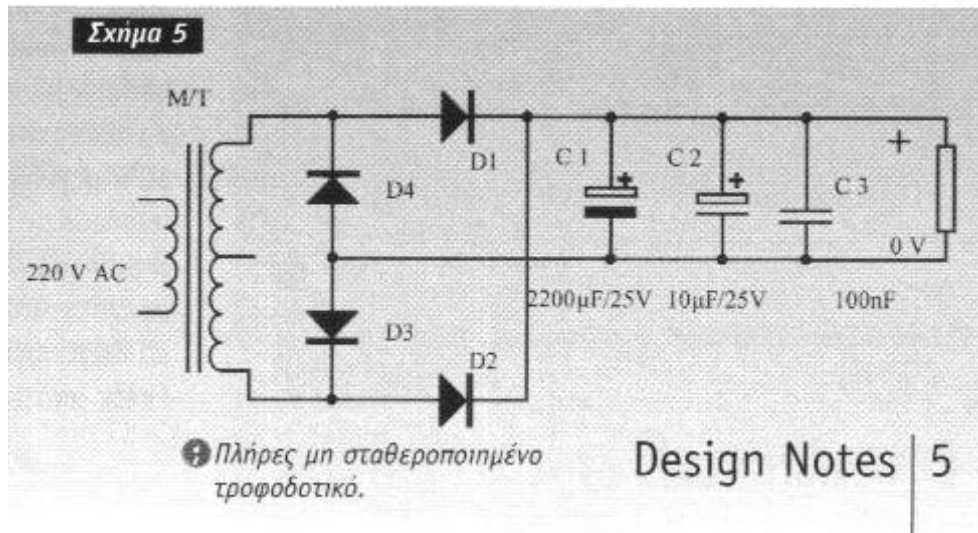
- Αν το τροφοδοτικό δεν έχει σταθεροποίηση. Ο πυκνωτής πρέπει να έχει χωρητικότητα 2000μF, για κάθε 1A που απαιτεί η συσκευή. Αν έχει σταθεροποίηση τότε αρκούν 1000μF ανά 1A.
- Συνδέουμε τον κατάλληλο πυκνωτή στο κύκλωμα και ελέγχουμε με πολύμετρο την AC τάση στον πυκνωτή. Αν η AC τάση είναι πάνω από το 10% της DC, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο πυκνωτή.

Εκτός όμως από την ομαλοποίηση της τάσης, υπάρχει και το πρόβλημα των παρασιτικών σημάτων που επικάθονται στο κύριο σήμα και μεταδίδονται μαζί του.

Παρότι ο πυκνωτής που χρησιμοποιούμε έχει συνήθως μεγάλη χωρητικότητα και τα παράσιτα θα έπρεπε να απορροφώνται, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει γιατί πρακτικά οι μεγάλοι πυκνωτές έχουν μια σχετική «αδράνεια» στη συμπεριφορά τους. Γι' αυτό και

παράλληλα συνδέουμε μικρότερο ή μικρότερους πυκνωτές (της τάξης των 100nF), που έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αυτόν τον τομέα. Η απόλυτη σωστή λύση πάντως θέλει εκτός από τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή έναν τανταλίου (1-10 $\mu$ F) και δύο - τρεις κεραμικούς ή άλλου τύπου (3x100nF). Επίσης, θέλει πάνω στη συσκευή διάσπαρτους μικρούς πυκνωτές (100nF), κυρίως κοντά στα ολοκληρωμένα.

Η επιλογή είναι θέμα σχεδιασμού της συσκευής.



Στο σχήμα 5 απεικονίζεται ένα μη σταθεροποιημένο τροφοδοτικό DC τάσης μαζί με τους απαραίτητους πυκνωτές για την αποφυγή των παρασίτων. Η τάση των πυκνωτών πρέπει φυσικά να είναι μεγαλύτερη από την τάση στην οποία θα λειτουργούν, κατά τουλάχιστον 15%, δεν χρειάζεται όμως να το παρακάνουμε, ειδικά στους ηλεκτρολυτικούς ή τους τανταλίου που είναι και σχετικά ακριβότεροι. Σε τάση 20V, για παράδειγμα, δε χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτές 63V, τόσο οι 40άρηδες όσο και οι 25άρηδες είναι απόλυτα κατάλληλοι.

## Σταθεροποίηση

Η σταθεροποίηση είναι ένα στάδιο που παρεμβάλλεται μεταξύ της εξόδου της ανόρθωσης και της συσκευής. Σκοπός της είναι να διατηρεί την τάση εξόδου, σε μια συγκεκριμένη σταθερή τιμή και να περιορίζει ακόμα και τις ελάχιστες αποκλίσεις.

Είναι προφανές ότι για να υπάρχουν περιθώρια σταθεροποίησης, η τάση εισόδου στο σταθεροποιητή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τάση εξόδου.

Υπάρχει μάλιστα μια ελάχιστη, η οποία λέγεται drop out voltage. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά εισόδου – εξόδου τόσο μεγαλύτερα περιθώρια σταθεροποίησης υπάρχουν. Από την άλλη όμως αυτό οδηγεί και σε μεγαλύτερες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες εμφανίζονται ως θερμότητα πάνω στο σταθεροποιητή. Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του κυκλώματος του σταθεροποιητή, θα εξετάσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μη σταθεροποιημένη τάση εξόδου και καθιστούν απαραίτητη την χρήση του.

Μετασχηματιστής : Η τάση στη έξοδο του εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας του, δηλαδή από την ΔΕΗ. Διακυμάνσεις στο δίκτυο συνεπώς προκαλούν ανάλογες διακυμάνσεις στην τάση εξόδου του. Για παράδειγμα, πτώση της τάσης του δικτύου στα 200V περίπου σημαίνει πτώση από τα π.χ. 12 σε 10.9V. Επίσης, η τάση στη έξοδο του μετασχηματιστή επηρεάζεται (πτωτικά) από το φορτίο, τόσο γιατί αλλάζει ο συντελεστής απόδοσης του, όσο και γιατί υπάρχει πτώση τάσης λόγω της ωμικής αντίστασης του πηνίου.

Ανόρθωση : Στο στάδιο αυτό υπάρχει μια ελάχιστη πτώση τάσης ανάλογα με το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα π.χ. επιπλέον πτώση 0,1V σε αύξηση ρεύματος 1A.

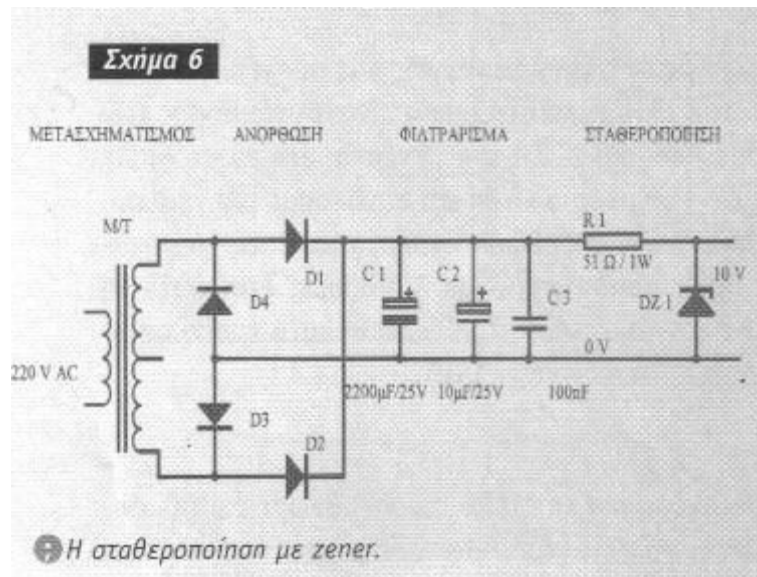
Φίλτρο : Ακόμα και το καλύτερο σχεδιασμένο φίλτρο δεν μπορεί να μηδενίσει την κυμάτωση.

Ακροδέκτες : Η ωμική αντίσταση των αγωγών σύνδεσης ή του τυπωμένου, προκαλεί μια μεταβαλλόμενη πτώση τάσης στην έξοδο ανάλογα με το ρεύμα.

Όπως είναι λογικό κάθε κύκλωμα σταθεροποίησης, ανάλογα με τον σχεδιασμό του, είναι σε θέση να μειώσει έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες.

#### 1. Σταθεροποίηση με δίοδο Zener.

Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται συνδέοντας στη έξοδο του κυκλώματος μια δίοδο Zener, η οποία έχει την ιδιότητα να διατηρεί μια σχετικά σταθερή τάση στα άκρα της, όταν πολώνεται ανάστροφα, εφόσον βέβαια η τάση τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή. Στο Σχ. 6 φαίνεται μια τυπική συνδεσμολογία σταθεροποίησης με δίοδο Zener.



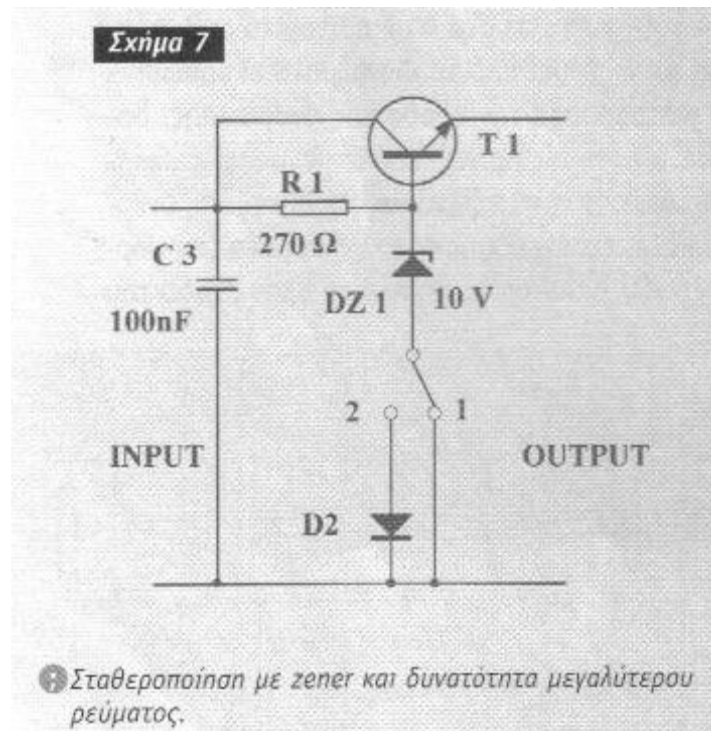
Ας υποθέσουμε ότι επιθυμούμε να τροφοδοτήσουμε μια συσκευή με τάση λειτουργίας 10V, με ρεύμα που η μέγιστη τιμή του είναι 0,1A. Έστω επίσης ότι χρησιμοποιούμε μετασχηματιστή με ένα πηνίο, ο οποίος δίνει στην έξοδο του ημιτονική τάση ονομαστικής τιμής, ίσης με 12V. Άρα, η τιμή κορυφής του εναλλασσόμενου είναι :  $\sqrt{2 \times 12V} = 16,8V$ . Μετά τη γέφυρα η τάση μειώνεται λόγω των διόδων με πτώση τάσης σε κάθε δίοδο 0,7V. Άρα, η τάση στη έξοδο της γέφυρας θα είναι  $16,8 - (2 \times 0,7V) = 15,4V$ .

Εφόσον επιθυμούμε η τάση εξόδου του συνολικού κυκλώματος μας να είναι 10V, πρέπει η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση να είναι  $\{15,4 - 10 = 5,4V\}$ . Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση φορτίου που θα χρησιμοποιήσουμε σύμφωνα με τον νόμο του Ohm. Άρα η αντίσταση θα είναι  $R = V/I = 5,4V/0,1A = 54\Omega$  και η ισχύς που καταναλώνει  $P = V \times I = 5,4V \times 0,1A = 0,54W$ . Σε πραγματική κατάσταση πρέπει να χρησιμοποιηθεί λίγο μικρότερη τιμή αντίστασης, με περίπου διπλάσια τιμή σε ισχύ δηλαδή 51 (ή 47) $\Omega/1W$ . Όταν δεν έχουμε φορτίο, το ρεύμα θα περνά μέσα από την δίοδο και είναι όσο το ρεύμα μέσα από την αντίσταση δηλαδή  $5,4V/51(ή 47)\Omega = 106$  (ή 115)mA.

Αυτό σημαίνει ότι η δίοδος πρέπει να αναπτύσσει τάση 10V και πρέπει να αντέχει σε ρεύμα τουλάχιστον 150mA, ή να έχει ισχύ  $10V \times 0,15A = 1,5W$ . Η μεγάλη ισχύς την οποία καταναλώνει η Zener είναι και το βασικό μειονέκτημα αυτού του κυκλώματος.

Γι' αυτό και στις περισσότερες περιπτώσεις, που τοποθετείται δίοδος Zener, χρησιμοποιείται το κύκλωμα του Σχ. 7, το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερο ρεύμα χρησιμοποιώντας μικρότερης ισχύος Zener που οδηγεί το τρανζίστορ. Τα πράγματα είναι τώρα πολύ πιο απλά.



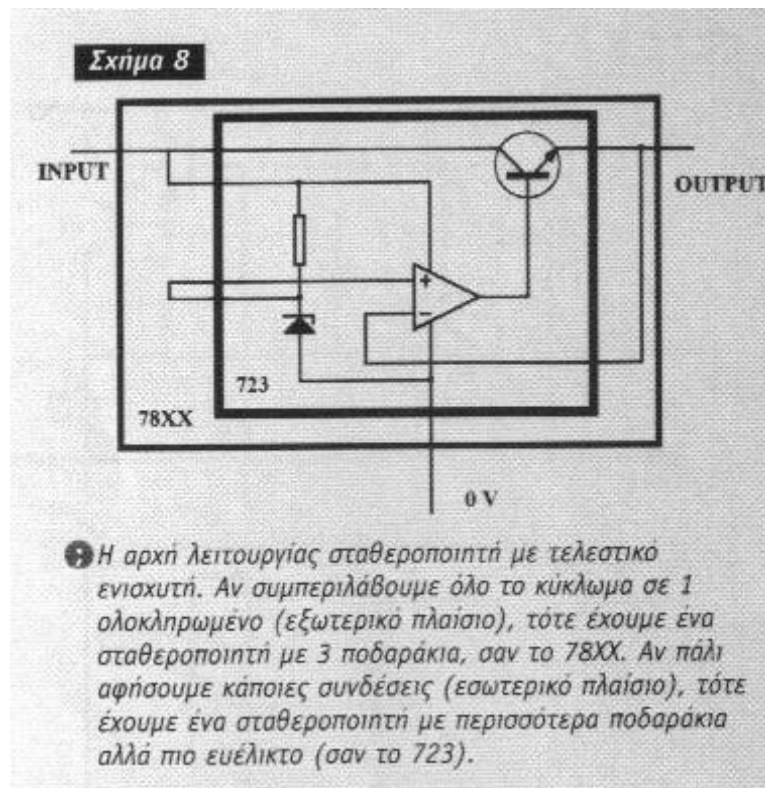


Χρησιμοποιώντας μια μικρή Zener 0,5W και εφόσον η τάση λειτουργίας της συσκευής παραμένει 10V, πρακτικά σημαίνει ότι μπορούμε σίγουρα να έχουμε ρεύμα Zener 25mA. Τοποθετώντας τώρα στο κύκλωμα ένα τυπικό τρανζίστορ με συντελεστή ενίσχυσης 100, μπορούμε άνετα να πάρουμε ρεύμα 2,5A. Λειτουργικά να αναφέρουμε ότι η δίοδος Zener κρατάει σταθερή την τάση βάσης του τρανζίστορ, οπότε η τάση στον εκπομπό είναι σταθερή. Σταθερή μεν αλλά με το εξής πρόβλημα : είναι μειωμένη κατά 0,6 - 1V λόγω της πτώσης τάσης επάνω στη δίοδο του τρανζίστορ. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό με την προσθήκη μιας διόδου, σε σειρά με την Zener, αλλά με ορθή πόλωση [η κάθοδος στο (-)]. Αυτό θα ανεβάσει την τάση της βάσης κατά μία τάση ορθής πόλωσης (δηλ. στα 10,6V - 11V) κάτι που θα αντισταθμίσει την πτώση τάσης στην επαφή βάσης εκπομπού ( μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μικρή δίοδος π.χ. 1N4148, 1N40001 κλπ).

## 2. Σταθεροποίηση με ολοκληρωμένο .

Η εμφάνιση των ολοκληρωμένων στον χώρο των ηλεκτρονικών συσκευών συνοδεύτηκε με αλλαγή πλεύσης και στο χώρο των τροφοδοτικών, αφού οι συσκευές που χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα για τη σταθεροποίησή τους, απαιτούν ειδικά κυκλώματα

με διακριτά εξαρτήματα, τα οποία ήταν δυνατόν να κατασκευαστούν μόνο με ολοκληρωμένα.



Στο σχήμα 8 διακρίνεται ένας σταθεροποιητής με ολοκληρωμένο. Στην είσοδο (+) του τελεστικού ενισχυτή συνδέουμε μία Zener, η οποία εξασφαλίζει την τάση αναφοράς του τελεστικού. Στην είσοδο (-) εισέρχεται ένα δείγμα της τάσης εξόδου, με τη γνωστή μέθοδο της ανάδρασης. Αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση Zener, τότε ο ενισχυτής αυξάνει την έξοδό του, οδηγεί περισσότερο το τρανζίστορ και η τάση εξόδου του σταθεροποιητή αυξάνεται μέχρι οι δύο είσοδοι του ενισχυτή να έχουν την ίδια τιμή. Το αντίστροφο γίνεται όταν η τάση εξόδου είναι μικρότερη.

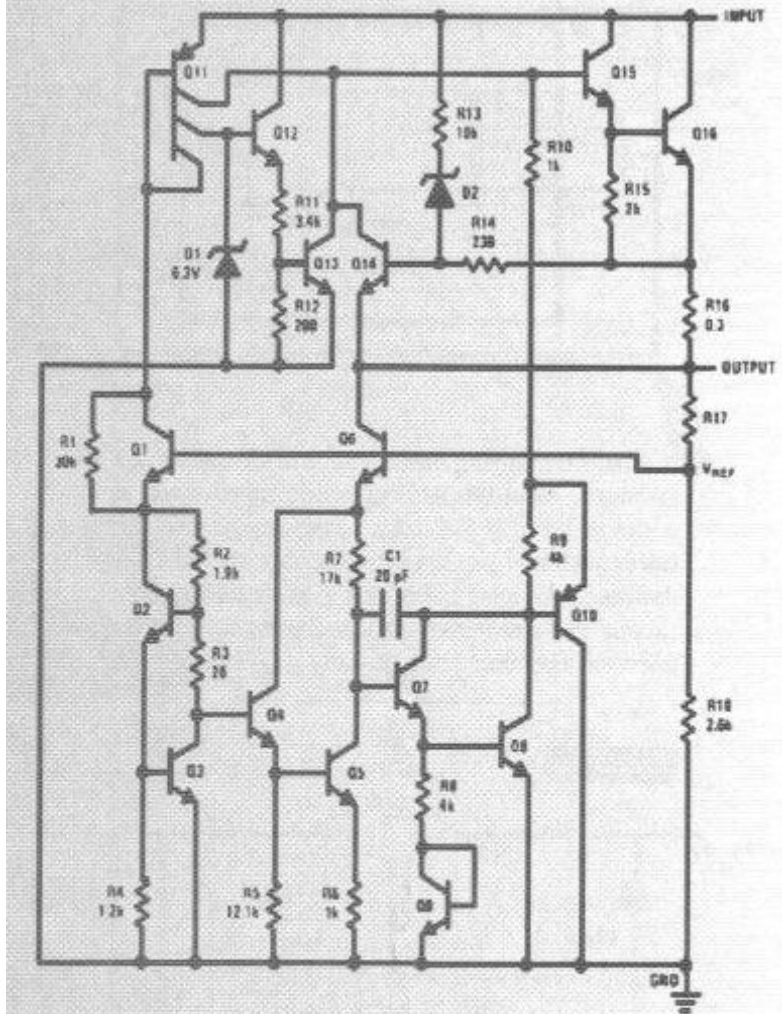
Από αυτό το βασικό κύκλωμα λειτουργίας, που μπορεί να υλοποιηθεί με διακριτά εξαρτήματα, προκύπτουν δύο μεγάλες κατηγορίες ολοκληρωμένων σταθεροποιητών. Η πρώτη, χρησιμοποιεί όλα τα εξαρτήματα μέσα σε ένα ολοκληρωμένο και συνδέει την (-) είσοδο με τον εκπομπό του τρανζίστορ. Έτσι προκύπτει ένας ολοκληρωμένος (-) σταθεροποιητής που έχει 3 ακροδέκτες : την είσοδο, την γείωση (GND) και την έξοδο. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων σταθεροποιητών είναι η σειρά 78XX, όπου XX η συγκεκριμένη (fixed) τάση εξόδου.

Η δεύτερη χρησιμοποιεί τα ίδια εξαρτήματα, αφήνει όμως διαθέσιμες συνδέσεις σε ανάλογα ποδαράκια. Έτσι, για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να δώσει το δείγμα του όχι από το σημείο εξόδου του σταθεροποιητή αλλά από σημείο πιο κοντά από την τροφοδοτούμενη συσκευή, με αποτέλεσμα να επιτύχει καλύτερη αντιστάθμιση τάσης, αφού στον υπολογισμό εισέρχεται και η πτώση τάσης των καλωδίων σύνδεσης. Το ολοκληρωμένο δηλαδή κρατάει σταθερά π.χ. 5V στις μπόρνες ενός εργαστηριακού τροφοδοτικού και όχι στο ποδαράκι της εξόδου του. Τυπικός αντιπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι το LM723, το οποίο έχει ενσωματωμένες και πρόσθετες δυνατότητες, όπως περιορισμός ρεύματος.

Οι σταθεροποιητές 78XX.

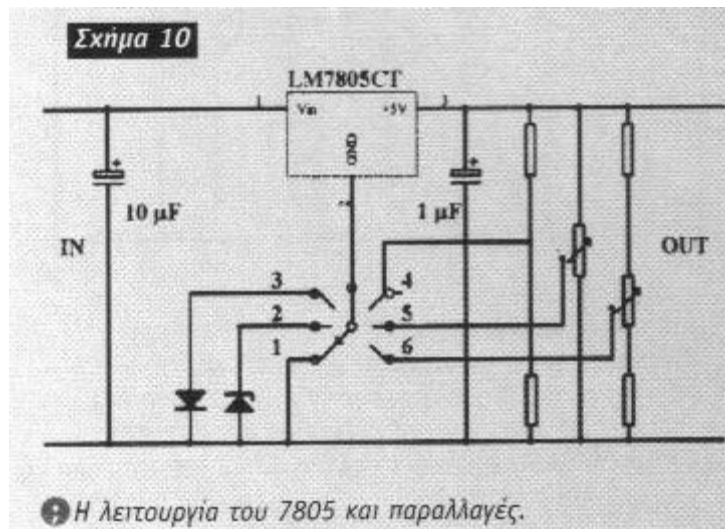
Οι σταθεροποιητές 78XX που είναι κατασκευασμένοι για θετικές τάσεις, όπως και τα αδέρφια τους 79XX που χρησιμοποιούνται για τις αρνητικές, είναι οι πλέον δημοφιλείς. Όπως γίνεται αντιληπτό οι δύο αυτές σειρές σταθεροποιητών διαφέρουν μεταξύ τους στα ποδαράκια σύνδεσης. Οι 78XX χαρακτηρίζονται από το ελάχιστο κόστος τους, ενώ είναι σε θέση να προσφέρουν απλότητα στην κατασκευή. Έχουν ενσωματωμένη προστασία και υπάρχουν σε διάφορες τυποποιημένες τάσεις εξόδου (π.χ. 5, 12, 15, 18, 24), καθώς και σε διάφορες εκδόσεις από πλευράς δυνατότητας σε ρεύμα. Το νούμερο XX αντιπροσωπεύει την τάση εξόδου του ενισχυτή, έτσι, ο 78L12 (σε κέλυφος TO92) έχει έξοδο 12V και ρεύμα 100mA, ο 78L12 (TO202) 12V/0,5A, ο 78212 (TO220) 12V/1A και ο 78K12 (T03) 12V/1,5A. Η drop out τάση είναι 2,5V και εδώ θα πρέπει να προσέξετε τις παρατηρήσεις που αναπτύσσονται σε θέματα απαγωγής θερμότητας που περιγράφονται στην ενότητα 9. Αν όμως δεν έχετε περιθώρια drop out μπορείτε να αναζητήσετε κάποιο drop out σταθεροποιητή (0,2 - 1V) π.χ. από τη σειρά LM29XX (προσοχή, εδώ το XX δεν αντιπροσωπεύει την τάση εξόδου).

Σχήμα 9



• Το εσωτερικό των 78XX. Παρατηρήστε την πηγή τάσης αναφοράς με τη Zener αριστερά, και τη διαίρεση τάσης, που τροφοδοτεί τη μία είσοδο του ενισχυτή (τρανζίστορ). Η αντίσταση πάνω από την έξοδο είναι για sense περιορισμού ρεύματος (εσωτερική προστασία)

Στο Σχ. 9 απεικονίζεται η εσωτερική δομή ενός 78XX. Ας δούμε όμως την ευελιξία αυτών των σταθεροποιητών. Το Σχ. 10 δίνεται ένα τυπικό κύκλωμα σταθεροποιητή με 7805 και έστω ότι ο διακόπτης είναι στη θέση 1. Το ολοκληρωμένο θα λειτουργήσει όπως περιγράφηκε νωρίτερα και θα δώσει έξοδο 5V.



Ας βάλουμε τώρα το διακόπτη στη θέση 2. Ο σταθεροποιητής θα κρατήσει σταθερή την ονομαστική τιμή τάσης 5V, ανάσα στα ποδαράκια εξόδου και GND. Εφόσον όμως το ποδαράκι GND δεν είναι στα 0V, αλλά στην τάση zener (έστω 10V) η πραγματική τιμή της τάσης εξόδου θα είναι  $5 + 10 = 15V$  αυτός είναι ένας τρόπος να μετατρέψουμε τη fixed τάση του σταθεροποιητή σε άλλη τιμή.

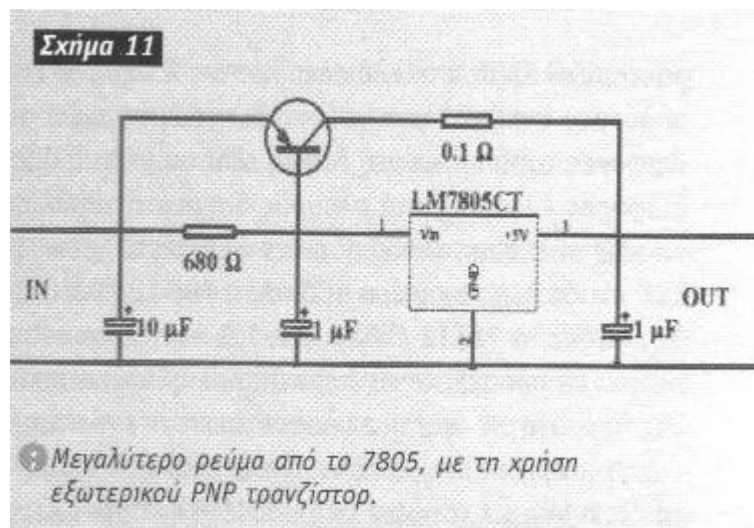
Ανάλογη είναι η περίπτωση με τον διακόπτη στη θέση 3. Εδώ η αύξηση θα είναι 0,6V - 1V επιπλέον της ονομαστικής τιμής του σταθεροποιητή ανάλογα με τη δίοδο.

Στη θέση 4, το ποδαράκι GND έρχεται σε ένα διαιρέτη τάσης. Αν αλλάξουμε το λόγο των αντιστάσεων του διαιρέτη, θα αλλάξει και η τάση εξόδου. Σε σχέση με τη zener, η λύση αυτή πλεονεκτεί στο ότι μπορούμε να επιτύχουμε οποιαδήποτε τιμή και να μην βασιζόμαστε στην τυποποίηση των τιμών zener. Με τον διακόπτη στη θέση 5, το ποδαράκι GND το φέρνουμε στο δρομέα ενός ποτενσιόμετρου. Η λύση είναι παρόμοια με την προηγούμενη, επιτρέπει όμως ρύθμιση ανά πάσα στιγμή, οπότε προτείνεται για ρυθμιζόμενα τροφοδοτικά. Αν θέλουμε να μην υπάρχει μεγάλη μεταβολή (π.χ. να ρυθμίζει από 10 μέχρι 11V), αρκεί να προσθέσουμε δύο αντιστάσεις (διακόπτης στη θέση 6). Η τάση στο πάνω και κάτω άκρο του ποτενσιόμετρου να δίνουν τη περιοχή κάλυψης.

Σε όλες τις προηγούμενες τροποποιήσεις θα παρατηρήσατε ότι είχαμε αύξηση της τάσης εξόδου. Για να έχουμε μείωση (π.χ. έξοδο 3,6V) θα πρέπει το ποδαράκι GND να βρεθεί σε τάση  $3,6 - 5 = 1,4V$ . Αν θέλουμε κάτι τέτοιο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα τροφοδοτικό αρνητικής τάσης, κάτι όμως που είναι αντισυμβατικό. Γι' αυτό καταφεύγουμε σε ένα «αδελφό» ολοκληρωμένο το LM317, το οποίο είναι fixed αλλά με τάση εξόδου μόλις 1,7V. Μπορούμε λοιπόν στις τυποποιημένες τιμές τάσεις εξόδου να

χρησιμοποιούμε τα 78XX και στις υπόλοιπες το 317, αυξάνοντάς του την έξοδό του με τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω στο 78XX.

Καλά με τη τάση, είδαμε ότι μπορούμε να κάνουμε σχεδόν ότι θέλουμε. Τι γίνεται όμως με το ρεύμα; Μπορούμε με κάποια προσθήκη να ξεπεράσουμε τα όρια του ολοκληρωμένου ή πρέπει να αναζητήσουμε κάτι άλλο; Η απάντηση είναι ότι υπάρχουν αρκετοί τρόποι να συνδέσουμε ένα εξωτερικό τρανζίστορ, το οποίο οδηγούμενο από τον 78XX να μας δώσει το επιπλέον ρεύμα. Μια τέτοια λύση με 7805 δίνεται στο Σχ. 11 και η λειτουργία έχει έως εξής :



Αρχικά το εξωτερικό τρανζίστορ ενόησε αποκοπή. Το 7805 εμφανίζει στην έξοδό του τα 5V. Η συσκευή (φορτίο) αρχίζει να τραβάει ρεύμα, δημιουργώντας μια πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση R, η οποία παρατηρήστε ότι είναι συνδεδεμένη παράλληλα στην επαφή βάσης - εκπομπού του εξωτερικού τρανζίστορ. Όταν το ρεύμα αποκτήσει τη κατάλληλη τιμή που η πτώση τάσης στην R να είναι 0,6 - 1V (εξαρτάται από το τρανζίστορ), τότε αυτό αρχίζει να άγει παρέχοντας στο φορτίο το επιπλέον ρεύμα. Αν συμβεί να ανοίξει περισσότερο απ' ότι χρειάζεται, τότε το 7805 θα δει την αύξηση της τάσης στην έξοδο και θα περιορίσει το ρεύμα του, δηλαδή θα μειώσει το ρεύμα που διέρχεται από την R και άρα την οδήγηση του τρανζίστορ, επαναφέροντας την έξοδο στα 5V.

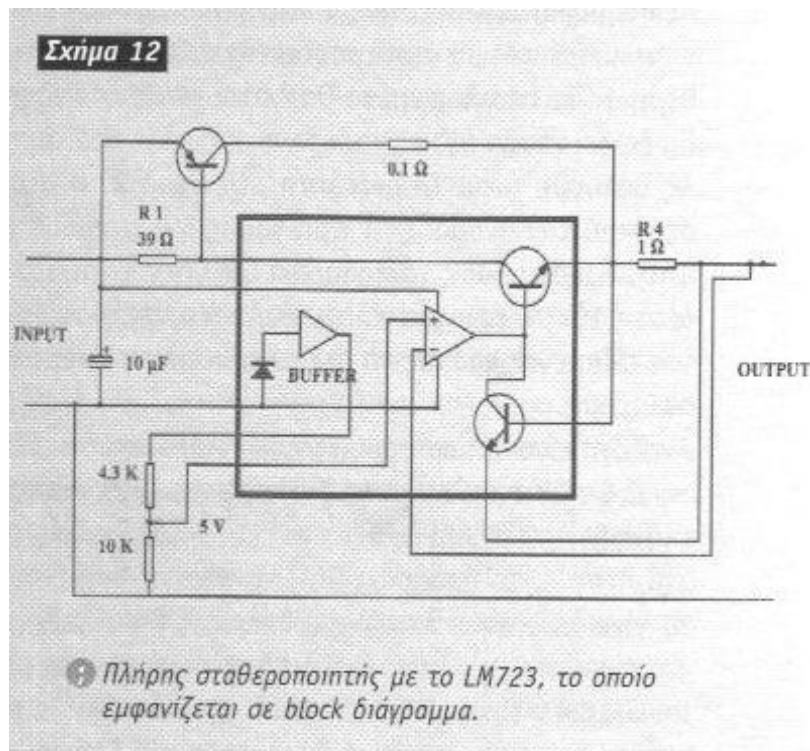
Με την αντίσταση ρυθμίζουμε ουσιαστικά την κατώτερη στάθμη ρεύματος, στην οποία αρχίζει να άγει το εξωτερικό τρανζίστορ. Για παράδειγμα, ένα ρεύμα της τάξης των 50 - 200 από το 7805 είναι ικανοποιητικό για να εξασφαλίσει σταθερή λειτουργία. Αν το εξωτερικό τρανζίστορ έχει συντελεστή ενίσχυσης 50, τότε με τα 100mA θα μπορούμε να

πάρουμε μέχρι 5A περίπου. Για να έχουμε τα 0,6 - 1V (με 100mA) πρέπει η R να είναι 600 - 1000Ω. Τοποθετούμε λοιπόν μία αντίσταση οποιασδήποτε τιμής σε αυτήν την περιοχή (έστω 680 Ω) που σωμένη ότι το τρανζίστορ θα ανοίγει με ρεύμα από 90 μέχρι 140mA περίπου, κάτι το οποίο είναι αποδεκτό.

Στο κύκλωμα επίσης μπορούμε προσθέτοντας ένα - δύο ακόμα τρανζίστορ να έχουμε και περιορισμό στην τιμή του ρεύματος. Τέτοια κυκλώματα υπάρχουν στα σχετικά application notes.

### Ο σταθεροποιητής 723

Πρόκειται για ένα παλιό ολοκληρωμένο, που έχει όμως αποδείξει με τα χρόνια την αξιοπιστία του, σε βαθμό που σήμερα να κατασκευάζεται και σε σύγχρονα κελύφη με στρατιωτικές προδιαγραφές. Είναι ένας σταθεροποιητής με μεγάλη ευελιξία που επιτρέπει τον σχεδιασμό τροφοδοτικών με έξοδο από 0 μέχρι 35V, αν και σε πολυπλοκότερα κυκλώματα μπορεί να φτάσει και τα 70V. Μπορεί να δώσει ρεύμα μέχρι 100mA και έχει δυνατότητα για περιορισμό ρεύματος. Το ολοκληρωμένο περιλαμβάνει πηγή τάσης αναφοράς, διαφορετικό ενισχυτή, τρανζίστορ εξόδου, τρανζίστορ sense για τον περιορισμό ρεύματος κλπ.



Στο Σχ. 12 δίνεται ένα τυπικό κύκλωμα σταθεροποιητή 5V, όπου το 723 εμφανίζεται σε block διάγραμμα. Ένα μέρος 5V από την τάση αναφοράς (7,15V) συνδέεται στην (+) είσοδο του ενισχυτή, ο οποίος οδηγεί το ενσωματωμένο τρανζίστορ, έτσι ώστε η τάση εξόδου, που ανατροφοδοτείται στην (-) είσοδο εξωτερικά, να γίνει 5V. Παρατηρήστε ότι η λήψη της εξόδου δεν γίνεται στο συλλέκτη του τρανζίστορ εξόδου, αλλά στο ποιο κοντινό προς το φορτίο σημείο. Έτσι η τάση εξόδου μένει ανεπηρέαστη από την πτώση τάσης στα καλώδια μέχρι το τελικό σημείο εξόδου. Αυτό είναι κάτι που στα 78XX θυσιάστηκε υπέρ της απλούστευσης σε 3 pin. Η R1 έχει υπολογιστεί ώστε να άγει το εξωτερικό τρανζίστορ σε ρεύμα μικρότερο των 100mA (έστω 20mA), με τον τρόπο που περιγράψαμε για το 7805.

Όσον αφορά την τάση εξόδου, είναι φανερό ότι ο χρήστης μπορεί να την αλλάξει, είτε μεταβάλλοντας το δείγμα από την τάση αναφοράς (μέχρι τα 7V), είτε παίρνοντας το δείγμα όχι κατευθείαν από την έξοδο στο "0", θα πάρει τη μισή τάση για ανατροφοδότηση, οπότε το ολοκληρωμένο θα ισορροπήσει στη διπλάσια, δηλαδή στο περιγραφόμενο κύκλωμα η τάση εξόδου θα είναι 10V ώστε στην (-) είσοδο του ενισχυτή να υπάρχουν τα 5V που θα αντισταθμίσουν τα 5V της πηγής αναφοράς.

Η R4 χρησιμοποιείται για τον περιορισμό ρεύματος. Αν, για παράδειγμα, είναι 1Ω, τότε στα περίπου 0,6 – 0,7A θα εμφανιστεί στα άκρα της μίας τάσης, ικανή να κάνει το εσωτερικό τρανζίστορ να άγει. Αυτό ερχόμενο με αγωγιμότητα περιορίζει την οδήγηση του τρανζίστορ εξόδου, ώστε το τελικό ρεύμα να μην αυξηθεί περισσότερο.

## **Χαρακτηριστικά**

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το πως αξιολογείται ένα τροφοδοτικό, έτσι ώστε να μπορούμε να ξεχωρίσουμε την ποιότητα και την οικονομία, από την υπερβολή ή να γνωρίζουμε πότε μια τροποποίηση έδωσε καλύτερα ή χειρότερα αποτελέσματα. Τα σημαντικότερα λοιπόν χαρακτηριστήκα είναι :

Load regulation : Αναφέρεται στο πόσο μεταβάλλεται η τάση εξόδου σε μία συγκεκριμένη αλλαγή στο ρεύμα. Στο 7805 για παράδειγμα, είναι max 50mV για μεταβολή ρεύματος από 5mA σε 1A.



Line regulation : Αναφέρεται στο πόσο μεταβάλλεται η τάση εξόδου, όταν με σταθερό ρεύμα μεταβληθεί η τάση εξόδου. Στο 7805 για παράδειγμα είναι 3mV, (max 50) για μεταβολή στην τάση εισόδου 7 - 25V σε σταθερό ρεύμα 500mA.

Ripple rejection : Αναφέρεται στην ικανότητα του σταθεροποιητή να απορρίπτει την κυμάτωση. Δίνεται σε dB, που αντιπροσωπεύουν το λόγο  $\Delta V_{in} / \Delta V_{out}$  σε συγκεκριμένη συχνότητα και ρεύμα. Στα ολοκληρωμένα είναι πάνω από 70dB.

Output noise : Ο θόρυβος στην έξοδο. Στο 7805 είναι 40μV.

## **Προβλήματα**

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα τροφοδοτικά είναι η θερμότητα, η οποία εκλύεται από ...παντού.

Πρώτα - πρώτα από την ανόρθωση. Κάθε δίοδος προκαλεί μία πτώση τάσης  $V_D$  της τάξης του 0,6 - 1V. Αυτό σημαίνει ότι καταναλώνει μια ισχύ με μορφή θερμότητας. Σε μικρά φορτία βέβαια είναι ασήμαντη, ας δούμε όμως τι ισχύει στα 10A με ανόρθωση γέφυρας. Σε κάθε ημιπερίοδο υπάρχει μία κατανάλωση ισχύος  $P = V \times I = 2 \times V_D \times I = 2 \times 1V \times 10A = 20W$ . Αυτό σημαίνει ότι η γέφυρα χρειάζεται ψύξη.

Στο σταθεροποιητή τα πράγματα είναι παρόμοια, αν και πολλοί τα παραβλέπουν, βασιζόμενοι στη μέγιστη δυνατότητα για ρεύμα του ολοκληρωμένου ή του εξωτερικού τρανζίστορ. Λένε για παράδειγμα ότι αφού το 7805 μπορεί να δώσει 1A και το φορτίο τραβάει 0.1A, αντέχει. Λάθος.!

Η ισχύς που καταναλώνεται δεν εξαρτάται μόνο από το ρεύμα, εξαρτάται και από τη διαφορά τάσεων εισόδου - εξόδου. Αν δηλαδή η τάση εισόδου είναι μικρή π.χ. 8V, τότε η κατανάλωση είναι  $P = \Delta V \times I = (8-5)V \times 0,1A = 0,3W$ . Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται ψύξη. Αντίθετα, αν η τάση εισόδου είναι μεγάλη π.χ. 30V τότε η καταναλισκόμενη ισχύς είναι :  $P = \Delta V \times I = (30-5)V \times 0,1A = 2,5W$ . Σε αυτήν την περίπτωση η ψύξη είναι απαραίτητη.

Τι είναι όμως αυτό που θα κάνει τον σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει ψύξη ή όχι, και πόση; Υπάρχει ένα μέγεθος που λέγεται Thermal Resistance (TR) και εκφράζει το πόσο θα αυξηθεί η θερμοκρασία στο εξάρτημα, για κάθε Watt ισχύος που αυτό καταναλώνει.

Υπάρχει επίσης και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του εξαρτήματος, που χωρίς να προβληματιστούμε με πίνακες και συνθήκες, ας δεχτούμε ότι είναι περίπου 100 βαθμοί. Για παράδειγμα, στο 7805 και συγκεκριμένα στο κέλυφος TO220 αναγράφεται TP 50. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία ανεβαίνει κατά 50 βαθμούς κελσίου για κάθε Watt που καταναλώνεται από το εξάρτημα. Στην περίπτωση λοιπόν των 0,3W θα έχουμε μία αύξηση  $50 \times 0,3 = 15$  βαθμοί κελσίου, δηλαδή σε συνθήκες δωματίου η τελική θερμοκρασία θα είναι περίπου  $25 + 15 = 40$  βαθμούς κελσίου. Αυτή είναι η μικρότερη από τους 100 βαθμούς κελσίου που ορίσαμε ως μέγιστο, άρα το 7805 δε χρειάζεται ψύξη. Στην περίπτωση όμως των 2,5W οι αντίστοιχες πράξεις θα δώσουν αύξηση 125 βαθμούς κελσίου και τελική θερμοκρασία 150 βαθμούς κελσίου.! Το συγκεκριμένο 7805 είναι παρελθόν. Τι μπορούμε να κάνουμε σε αυτήν την περίπτωση; Να το τοποθετήσουμε σε μία ψύκτρα με ικανότητα TR 10 (ή 20) έτσι ώστε τα 2,5W να δώσουν άνοδο περίπου 25 βαθμούς κελσίου ή 50 βαθμούς κελσίου και το 7805 να λειτουργήσει τελικά στους 50 βαθμούς κελσίου ή 75 βαθμούς κελσίου (<100).

Αν λοιπόν θέλετε να γλιτώσετε ή να περιορίσετε την ψύκτρα χρησιμοποιήστε όσο το δυνατόν μικρότερη τάση εισόδου, χωρίς βέβαια να πέσετε κάτω από την ελάχιστη τάση εισόδου που δίνει ο κατασκευαστής (τάση εισόδου + drop out).

Τα ίδια σε γενικές γραμμές ισχύουν και με τα τρανζίστορ ισχύος που θα τοποθετηθούν εξωτερικά για αύξηση του ρεύματος. Όπως είναι γνωστό τα τρανζίστορ ισχύος υπάρχουν σε πολλά κελύφη. Από αυτά τη μεγαλύτερη ικανότητα για απομάκρυνση θερμότητας έχει το γνωστό TO3. Είναι όμως και το πιο δύσκολο στην τοποθέτηση, αφού απαιτεί 4 τρύπες στην ψύκτρα, μονωτικά κλπ. Μπορείτε λοιπόν να βρείτε κάποιο άλλο τρανζίστορ σε κέλυφος TO220 ή σε SOT93 (στην ίδια μορφή με το 220, αλλά μεγαλύτερο), που θα σας εξυπηρετήσει περισσότερο στην τοποθέτηση, χωρίς σημαντική υποχώρηση στα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, αντί για 2N2955 (TO3 - 15A - 115W) μπορείτε να χρησιμοποιήσετε TIP2955 (SOT93 - 15A - 90W) ή BD744 (TO220 - 15A - 90W).

## **Τύποι τροφοδοτικών**

Υπάρχουν πολλοί τύποι τροφοδοτικών. Τα περισσότερα είναι σχεδιασμένα να μετατρέπουν υψηλή τάση AC σε μία κατάλληλη χαμηλότερη ώστε να τροφοδοτήσουμε ηλεκτρονικά κυκλώματα και συσκευές. Το σύνολο του τροφοδοτικού μπορεί να απεικονιστεί σε μπλοκ διάγραμμα όπως φαίνεται παρακάτω.



**Μπλοκ Διάγραμμα ενός συστήματος σταθεροποιημένου τροφοδοτικού**

**Μετασχηματιστής :** Ρυθμίζει την στάθμη AC μετασχηματίζοντας την κυρίως τάση (220V) σε μικρότερη ή μεγαλύτερη.

**Ανορθωτής :** Μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση (AC) σε συνεχή τάση (DC)

**Εξομάλυνση :** Μειώνει την κυμάτωση της DC τάσης που εμφανίζεται μετά την ανόρθωση.

**Σταθεροποιητής :** Εξαλείφει την κυμάτωση διατηρώντας σταθερή τάση εξόδου ανεξάρτητα από τις μεταβολές του ρεύματος.

Ας ξεκινήσουμε να κατασκευάζουμε θεωρητικά ένα τροφοδοτικό, να δούμε από ποιά εξαρτήματα αποτελείται και ποιός ο ρόλος του καθενός.

### Μετασχηματιστής

Ο μετασχηματιστής εκμεταλλεύεται τους νόμους της επαγωγής και μετασχηματίζει τα στοιχεία του ρεύματος, την τάση V και την ένταση I. Λειτουργεί μόνο με τάση AC και αποτελείται από δύο ή περισσότερα τυλίγματα, το πρωτεύον που τροφοδοτείται από την τάση του δικτύου και το δευτερεύον ή τα δευτερεύοντα τα οποία δίνουν μικρότερες ή μεγαλύτερες τάσεις. Τα τυλίγματα τυλίγονται γύρω από ένα υλικό με βάση το σίδηρο, τον πυρήνα, που βοηθάει τον μετασχηματισμό αυξάνοντας την αυτεπαγωγή. Αν το δευτερεύον δίνει μεγαλύτερη τάση έχουμε μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης, αν το δευτερεύον δίνει μικρότερη τάση έχουμε τους μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης και τέλος αν τα δευτερεύοντα δίνουν και μεγαλύτερες και μικρότερες τάσεις από την τάση του δικτύου τότε έχουμε τους μικτούς μετασχηματιστές. Οι μετασχηματιστές σπαταλούν πολύ λίγη ενέργεια οπότε η ενέργεια εξόδου είναι σχεδόν ίση με την ενέργεια εισόδου. Η απόδοση ενός μετασχηματιστή φτάνει από 80% μέχρι 95% ενώ το υπόλοιπο είναι απώλειες (δινορεύματα, υστέρησης, σκέδασης κ.ά.). Η αναλογία των σπειρών κάθε τυλίγματος καθορίζει τις τάσεις του μετασχηματιστή. Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης έχει πολλές σπείρες στο πρωτεύον τύλιγμα που συνδέεται στην κυρίως τάση (220V), και λίγες σπείρες στο δευτερεύον που παρέχει την χαμηλή τάση εξόδου.

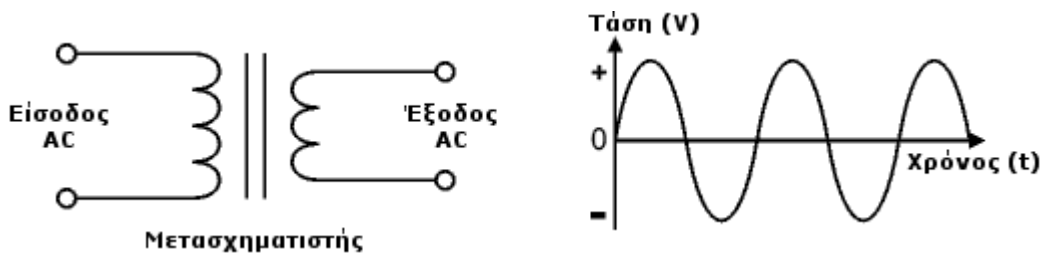
$$n = \frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$$

V1 : Τάση στο πρωτεύον.

V2 : Τάση στο δευτερεύον.

N1 : Αριθμός σπειρών στο πρωτεύον.

N2 : Αριθμός σπειρών στο δευτερεύον.

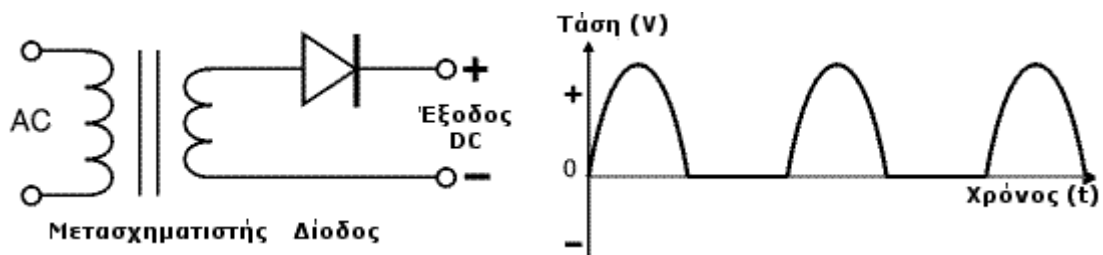


### Ανορθωτής

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι συνδεσμολογίας διόδων για να πραγματοποιηθεί ένας ανορθωτής. Ο πιο σημαντικός και συνηθισμένος είναι η "διπλή ανόρθωση με γέφυρα" και προσφέρει ανόρθωση πλήρους κύματος. Ανόρθωση πλήρους κύματος επιτυγχάνεται επίσης και με δύο διόδους σε έναν μετασχηματιστή με μεσαία λήψη αλλά αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια.

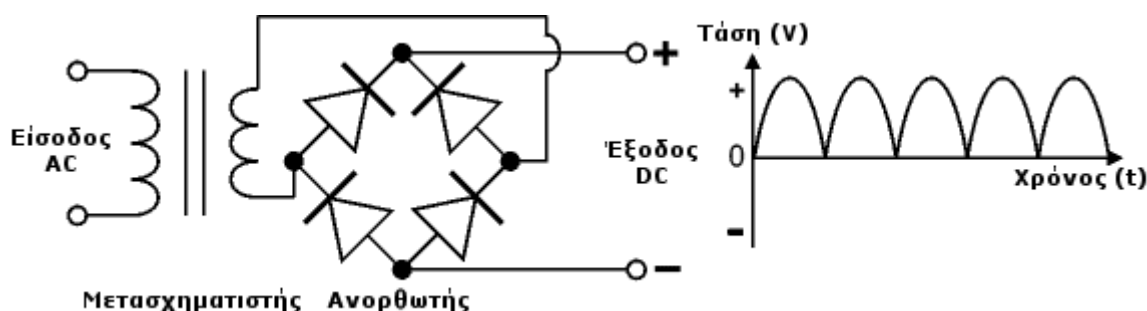
Απλή ανόρθωση :

Μία μόνο διάδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ανορθωτής, αλλά η διάδος άγει μόνο κατά την διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ρεύμα μόνο για το μισό της περιόδου και το κύκλωμα ονομάζεται ανορθωτής μισού κύματος.



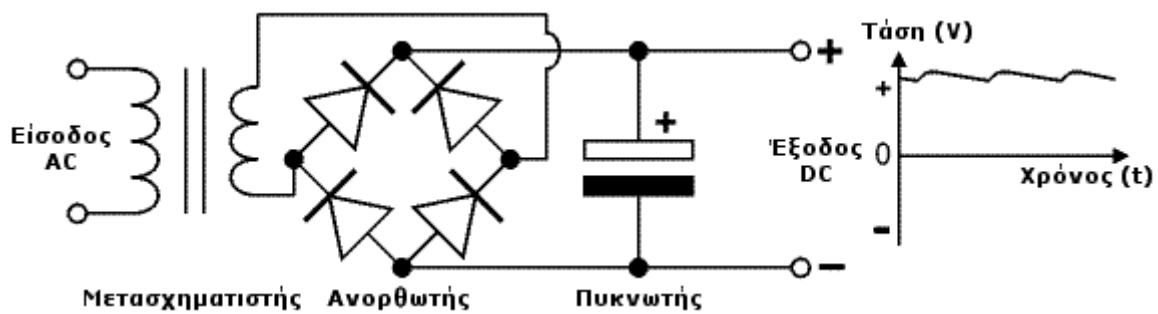
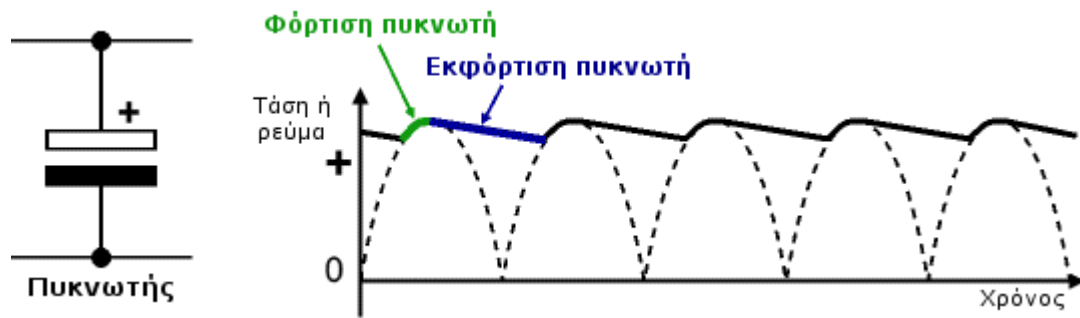
Διπλή ανόρθωση με γέφυρα :

Η ανόρθωση με γέφυρα αποτελείται από 4 διόδους και κυκλοφορεί στον εμπόριο σαν ένα εξάρτημα αλλά μπορεί επίσης να κατασκευαστεί με 4 διόδους. Ονομάζεται ανορθωτής πλήρους κύματος γιατί οι διόδοι άγουν ανά δύο σε κάθε ημιπερίοδο (αρνητική και θετική) του σήματος εισόδου. Το κύριο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ανόρθωσης είναι ότι χρησιμοποιείται μετασχηματιστής χωρίς μεσαία λήψη. Επίσης, κάθε diόδος έχει στα άκρα της κατά την ανάστροφη περίοδο την τάση του μετασχηματιστή.



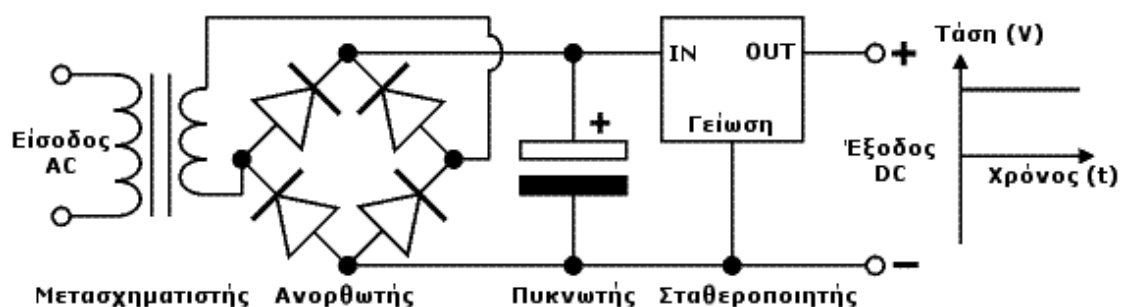
Εξομάλυνση:

Η εξομάλυνση (φιλτράρισμα) επιτυγχάνεται με ένα ηλεκτρολυτικό πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας συνδεδεμένο παράλληλα με το φορτίο. Ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια (γρήγορη φόρτιση) κατά τη διάρκεια της περιόδου αγωγής και την αποδίδει την ενέργεια στο φορτίο (εκφόρτιση) κατά τη διάρκεια της περιόδου μη αγωγής. Η εξομάλυνση αυξάνει την μέση τάση DC ( $1.41 \times \text{RMS}$ ). Για παράδειγμα, 12V RMS AC μετά από ανορθωτή πλήρους κύματος θα μειωθούν περίπου σε 10.6V RMS DC (τα 1.4V θα χαθούν λόγω πτώση τάσης στις διόδους - 0.66V ανά diόδο πιο συγκεκριμένα). Με την τοποθέτηση του πυκνωτή εξομάλυνσης θα έχουμε  $10.6 \times 1.41 = 14.9\text{V DC}$ . Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την μη φιλτραρισμένη κυμάτωση DC (διακεκομμένη γραμμή) και την φιλτραρισμένη (έντονη γραμμή).



### Σταθεροποιητής

Οι σταθεροποιητές τάσης είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα προρυθμισμένα σε κάποιες τάσεις εξόδου (συνήθως 5 έως 24V) και ως μία συγκεκριμένη ένταση ρεύματος. Οι περισσότεροι σταθεροποιητές περιέχουν κυκλώματα προστασίας υπερφόρτωσης και υπερθέρμανσης. Αρκετοί σταθεροποιητές έχουν τρεις επαφές ή περισσότερες, μοιάζοντας σαν τρανζίστορ ισχύος, και έχουν και μία τρύπα με σκοπό να βιδωθούν πάνω σε ψύκτρα εάν είναι απαραίτητο. Είναι σημαντικό η τάση εισόδου τους να είναι μερικά Volts παραπάνω από την σταθεροποιημένη τάση εξόδου. Ο ρόλος του σταθεροποιητή είναι να εξαλείφει κάθε κυμάτωση που απομένει από τον πυκνωτή εξομάλυνσης και να αποδίδει μία σταθερή τάση εξόδου. Πλέον η τάση εξόδου του σταθεροποιητή είναι κατάλληλη για να τροφοδοτήσουμε οποιαδήποτε συσκευή ή κύκλωμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

### 100 WATT

Η απειρία στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενισχυτών ήταν ένας σημαντικός λόγος για να ξεκινήσει το εργασιακό μέρος από την μελέτη ήδη υπάρχοντων σχεδίων και σίγουρα ελεγμένων διατάξεων.

Το σημαντικότερο από τα βήματα μια κατασκευής είναι η σωστή επιλογή της διάταξης. Η επιλογή αυτή δεν πρέπει να έχει αναφορά το επιθυμητό αποτέλεσμα αλλά τις ικανότητες, τις γνώσεις και την εμπειρία του κατασκευαστή. Ένας αρχάριος είναι αρκετά δύσκολο να εντοπίσει τις διαφορές και να επιλέξει την απλούστερη οδό η οποία είναι και ουσιαστικά η επιθυμητή, για να δώσει τελικά την εμπειρία που ψάχνει με τα λιγότερα δυνατά προβλήματα.

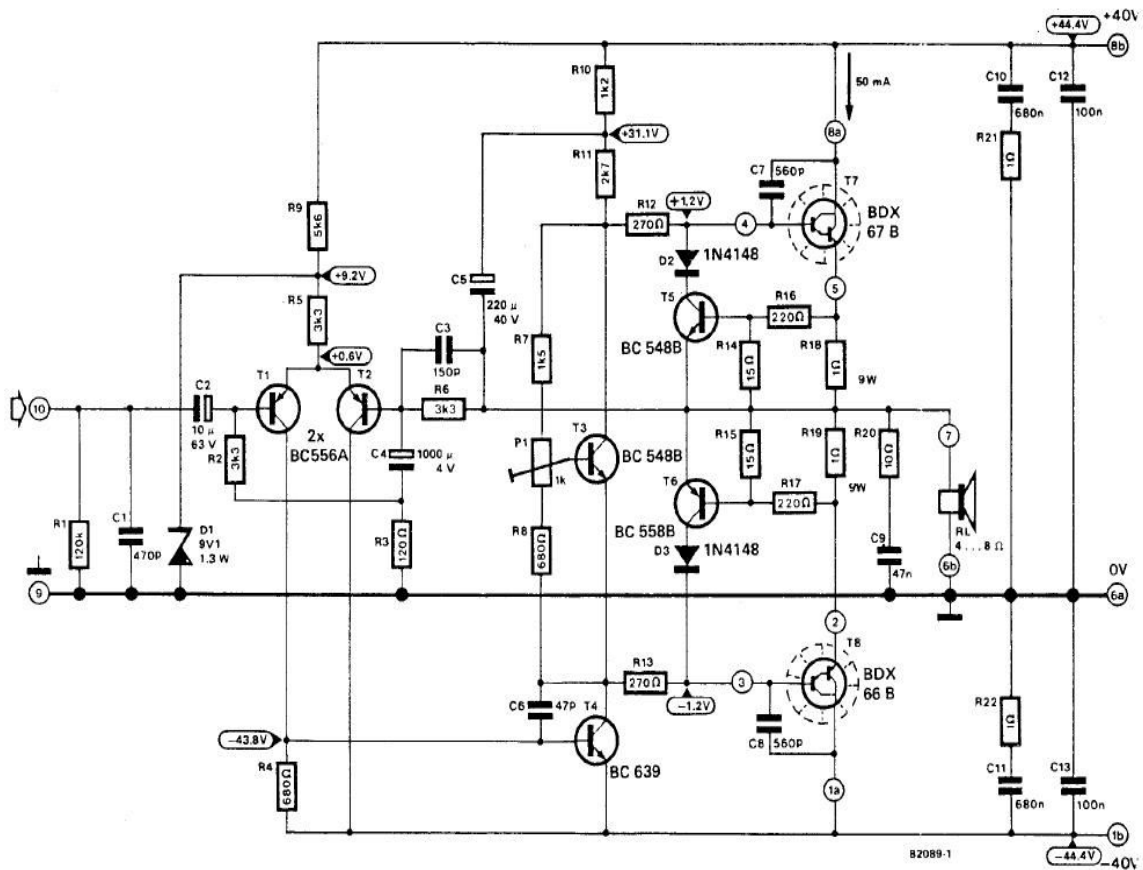
Έτσι καταλήξαμε στο να κατασκευάσουμε τον ενισχυτή ισχύος 100Watt από το τεύχος 1 του Σεπτεμβρίου 1982 του περιοδικού Ελέκτορ. Παρακάτω παρουσιάζονται το κύκλωμα του ενισχυτή, τα χαρακτηριστικά του, καθώς και η κατασκευή του.

#### Το κύκλωμα

Το σχήμα 1 δείχνει το κυκλωματικό διάγραμμα του ενισχυτή. Η είσοδος είναι ένας διαφορικός ενισχυτής με κύρια στοιχεία τα τρανζίστορ T1 και T2. Στη συνέχεια έχουμε μία οδηγό βαθμίδα με το T4 του οποίου ο συλλέκτης συνδέεται με τον εκπομπό του T3. Αυτό λειτουργεί σαν μία ρυθμιζόμενη Zener δίοδος και ρυθμίζει το ρεύμα ηρεμίας. Ακολουθεί η τελική βαθμίδα με τα δύο τελείως συμπληρωματικά τρανζίστορ T7 και T8 (Darlington).

Ένα προτέρημα της συμμετρικής τροφοδοσίας είναι ότι αποφεύγεται ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής στην έξοδο.

Ο ενισχυτής έχει μία αρκετά μεγάλη αντίσταση εισόδου που ξεπερνά τα 100KΩ αφού πριν από τον C4 έχουμε την R2, και αφού η αντίσταση εισόδου του T1 είναι και αυτή πολύ μεγάλη.



Σχήμα 1 : Κυκλωματικό διάγραμμα του ενισχυτή 100W. Η παραμόρφωση είναι μικρή και σε μεγάλη ισχύ εξόδου.

Αρνητική ανάδραση (και για DC και για AC) έχουμε με την αντίσταση R6. Το DC τμήμα της αρνητικής ανάδρασης δημιουργεί στην έξοδο σχεδόν μηδενικό δυναμικό. Το τμήμα AC της ανάδρασης προσδιορίζει την ενίσχυση και εξαρτάται από την R6 (C4) και R3.

Με τα μεγέθη του κυκλώματος 1 η ενίσχυση είναι :

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R3 + R6}{R3} = \frac{3420}{120} = 28,5$$

Η βαθμίδα με το T4 οδηγεί τα T7 και T8, επειδή όμως αυτά είναι Darlington χρειάζονται πολύ λίγο ρεύμα βάσεως, έτσι για τον T4 δεν χρειαζόμαστε ψύκτη.

Το τρανζίστορ T3 μαζί με τις R18 και R19 σταθεροποιεί το ρεύμα ηρεμίας των τρανζίστορ εξόδου. Η πτώση τάσεως πάνω στις R18 και R19 προσδιορίζεται από τη θέση



του P1 επειδή αυτό ελέγχει την κατάσταση συλλέκτου - εκπομπού του T3. Η R11 σε συνδυασμό με τον πυκνωτή C5 αυξάνει την ενίσχυση στα AC της βαθμίδας οδηγήσεως. Η καρδιά της βαθμίδας εξόδου είναι τα Darlington τρανζίστορ BDX66 και BDX67. Στους 25°C η σειρά αυτή έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Η μέγιστη τάση συλλέκτου - εκπομπού : 100V
- Μέγιστο ρεύμα συλλέκτου : 16 A
- Μέγιστη απορροφούμενη ισχύς : 150W

Εάν το ρεύμα συλλέκτου γίνει 10A τότε η τάση συλλέκτου - εκπομπού γίνεται 2V και η ενίσχυση στα DC είναι περίπου 1000. Όταν το ρεύμα συλλέκτου είναι 5A τότε η τάση κυμαίνεται μεταξύ 0,4 και 0,5V και η ενίσχυση είναι περίπου 4000.

Με αυτά τα χαρακτηριστικά αυτά τα τρανζίστορ είναι ιδανικά για τέτοιου είδους κυκλώματα.

Ανεξάρτητα από το πόσο «αντοχής» είναι τα τρανζίστορ χρειάζονται προστασία από τα βραχυκυκλώματα.

Η πτώση τάσεως πάνω στις αντιστάσεις συλλέκτη R18 και R19 μας δίνει το μέγεθος του ρεύματος συλλέκτη - εκπομπού. Εάν το ρεύμα που περνά μέσα από τις αντιστάσεις R18 και R19, περάσει ένα ορισμένο όριο τότε θα αρχίσουν να άγουν τα τρανζίστορ T5 και T6 αφού όπως φαίνεται θα μεγαλώσει η τάση πάνω στους διαιρέτες R16, R14 και R15, R17 που είναι παράλληλοι στις R18 και R19. Έτσι τα ρεύματα που θα περάσουν μέσα από τις διόδους D2 και D3 θα μειώσουν τα ρεύματα βάσεως των T7 και T8, που αυτό θα έχει σαν συνέπεια να ελαττωθούν και τα ρεύματα συλλέκτη.

Τα διάφορα άλλα στοιχεία R και C εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς. Ο C1 περιορίζει το εύρος της ζώνης εισόδου.

Έτσι αποφεύγεται ένα μέρος θορύβου. Ο C3 είναι υπεύθυνος για τα 3 dB στα 100 KHz, δηλαδή δημιουργεί την κλίση χαρακτηριστική της αποκρίσεως συχνότητας. Οι C6, C7 και C8 είναι χωρητικότητες Miller. Οι C9 και R20 σταθεροποιούν την έξοδο. Οι C10/R21, C12, C11/R22 και C13 αποκόβουν τις διάφορες αιχμές στις συχνότητες RF που προέρχονται από το τροφοδοτικό.

## Τεχνικές προδιαγραφές

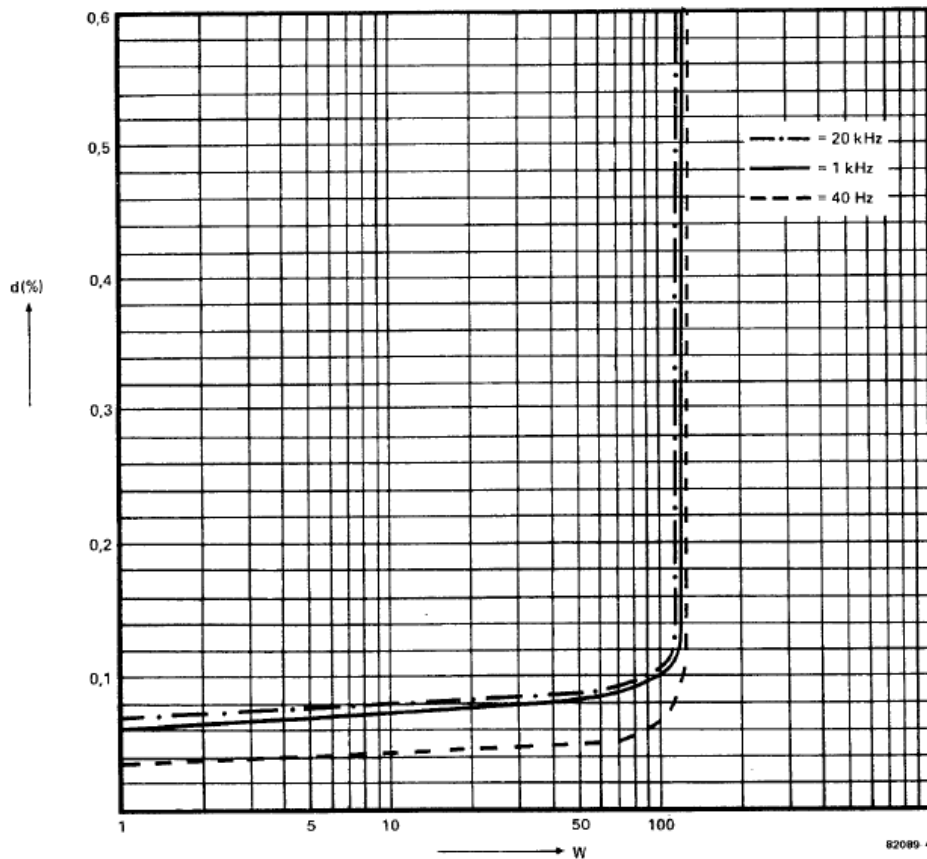
Το όλο κύκλωμα δεν παρουσιάζει δυσκολίες και η κατασκευή του είναι σχετικά εύκολη. Με λίγη τύχη ο ενισχυτής μπορεί να δώσει 120W ισχύ στα 4Ω, αλλά δυστυχώς η παραμόρφωση φθάνει περίπου στο 1%. Στα 100W (πάλι σε 4Ω) η παραμόρφωση είναι μικρότερη του 0,1%.

Οι τεχνικές προδιαγραφές του ενισχυτή είναι στον πίνακα 1. Από το σχήμα 5 βλέπουμε ότι η παραμόρφωση παραμένει σταθερή και είναι μικρότερη από 0,1% στις συχνότητες από 40Hz μέχρι 20KHz.

Για πλήρη απόδοση η είσοδος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,775V. Αυτή τη στάθμη τη δίνουν σχεδόν όλοι οι προενισχυτές. Εάν χρησιμοποιηθεί συσκευή που δίνει μεγαλύτερη έξοδο τότε πρέπει να τοποθετηθεί στην είσοδο του ενισχυτή ισχύος ποτενσιόμετρο των 10KΩ.

### Πίνακας 1

Ισχύς εξόδου :	100 W (RL = 4Ω, K = 0,1%)
(συνεχές ημιτονοειδές σήμα)	70 W (RL = 8Ω, K = 0,1%)
Ισχύς σε συνάρτηση με την συχνότητα :	< 10 Hz... 20 KHz στα 100 W < 10 Hz... 100 KHz στα 100 W
Απόκριση συχνότητας :	0,1 % σε 20 Hz... 20 KHz στα 100 W
Παραμόρφωση :	0,28 % μετρημένα στα 40 Hz και 10 KHz σε λόγο εύρους 4 : 1
Ενδοδιαμόρφωση :	Pa = 100 W
Σήμα / θόρυβος (S/N) :	70 dB
Ευαισθησία εισόδου :	0,775 V
Αντίσταση εισόδου :	100 KΩ
Αντίσταση εξόδου :	0,052 Ω (στο 1 KHz)
Ελάχιστο φορτίο :	4 Ω
Τροφοδοσία :	80 V συμμετρικά (+40V, 0, -40V)
Κατανάλωση ρεύματος :	2,5 A max στα RL = 4 Ω
Ρεύμα ηρεμίας :	50mA

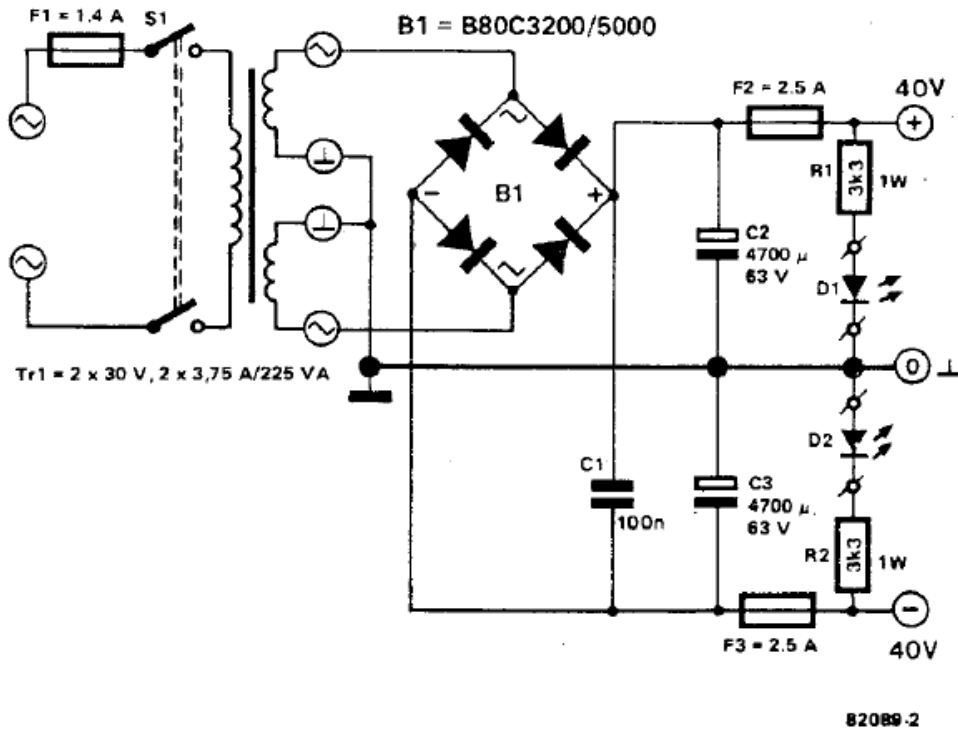


Σχήμα 5 : Το διάγραμμα αυτό δείχνει την ποιότητα του ενισχυτή.

## Το τροφοδοτικό

Είναι γνωστό ότι η απόδοση του ενισχυτή εξαρτάται από την ποιότητα του τροφοδοτικού. Ο ενισχυτής χρειάζεται μία συμμετρική τάση  $\pm 40V$ . Σε πλήρη απόδοση (100W στα 4Ω) το ρεύμα είναι 2,5 A και σε φορτίο 8Ω με ισχύ 70W το ρεύμα είναι 1,1 A. για λόγους οικονομίας και απλότητας χρησιμοποιούμε ένα μη σταθεροποιημένο τροφοδοτικό. Από τη φύση του όμως ένα τέτοιο τροφοδοτικό θα έχει μία αυξομείωση της τάσης. Εάν η τάση τροφοδοσίας σε πλήρη απόδοση ισχύος πρέπει να είναι 40V σημαίνει ότι με μικρότερη ισχύ η τάση τροφοδοσίας θα τείνει να αυξηθεί. Επειδή όμως τα στοιχεία εξόδου έχουν μέγιστη τάση λειτουργίας 100V που σημαίνει  $\pm 50V$  η σχεδίαση πρέπει να γίνει έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν αυτά τα όρια. Γι' αυτό το λόγο ορίζουμε την τάση τροφοδοτικού στα  $\pm 46V$  ώστε να έχουμε και ένα περιθώριο ασφάλειας. Τα  $\pm 46V$  αφήνουν όμως ένα περιθώριο διακυμάνσεως 6V μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου φορτίου. Αυτό όμως σημαίνει ότι η εσωτερική αντίσταση του τροφοδοτικού πρέπει να είναι πολύ μικρή. Ένας

καλός τρόπος για να πετύχουμε μικρή αντίσταση είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν καλό μετασχηματιστή.



Σχήμα 2 : Χάρη σε ένα καλής ποιότητας μετασχηματιστή αυτό το απλό τροφοδοτικό αρκεί για τις απαιτήσεις μας. Η έξοδος του είναι  $\pm 40\text{V}$ , 2,5A.

Με δεδομένο τον καλό μετασχηματιστή, με το ανορθωτικό σε συνδεσμολογία γέφυρας και με μερικούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές έχουμε το τροφοδοτικό που μας χρειάζεται. Οι ασφάλειες σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν το κύκλωμα από βραχυκυκλώματα μεγάλης διάρκειας, επειδή τα κυκλώματα προστασίας των T7 και T8 είναι μόνο για μικρή χρονική διάρκεια μέχρι να «καούν» οι ασφάλειες. Για στερεοφωνική απόδοση χρειαζόμαστε δύο ενισχυτές και επομένως και δύο τροφοδοτικά.

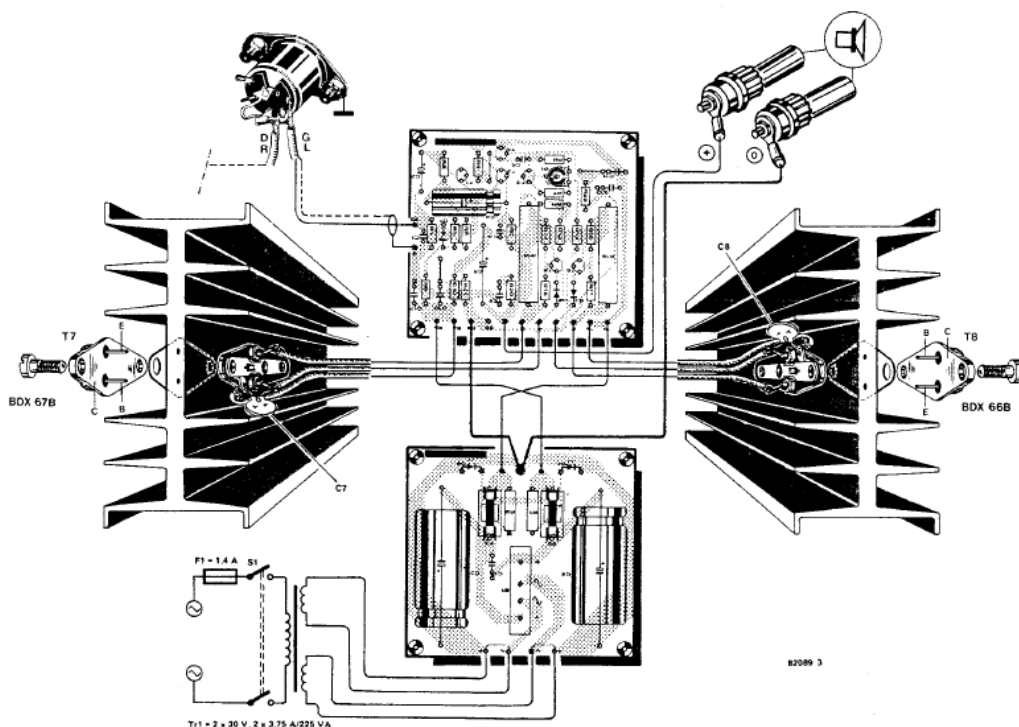
### Ρύθμιση του ενισχυτή

Αφαιρούμε την ασφάλεια F2 από το τροφοδοτικό αφού προηγουμένως βραχυκυκλώσουμε την είσοδο και έχουμε βεβαιωθεί ότι η έξοδος δεν είναι συνδεδεμένη

με οτιδήποτε άλλο. Έπειτα βάζουμε ένα πολύμετρο με περιοχή 1A DC στα άκρα της ασφαλειοθήκης και με το (+) στην ένωσή τους με τον C2.

Γυρίζουμε το ποτενσιόμετρο στο τέρμα του με κατεύθυνση αντίθετη προς τους δείκτες του ρολογιού. Ελέγχουμε όλες τις συνδέσεις και συνδέουμε το τροφοδοτικό στο δίκτυο. Το πολύμετρο πρέπει να δείχνει γύρω στο 0A. Εάν η ένδειξη είναι μεγαλύτερη τότε κάποιο λάθος πρέπει να υπάρχει και πρέπει να διακόψουμε αμέσως το δίκτυο. Σε καλή κατάσταση το ρεύμα πρέπει να είναι περίπου 100mA που με τη βοήθεια του P1 πρέπει να το ρυθμίσουμε στα 80mA. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα ηρεμίας στα τρανζίστορ ισχύος θα είναι περίπου 50mA.

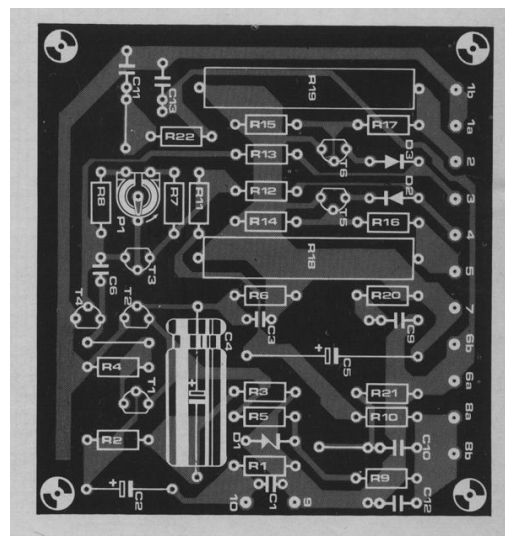
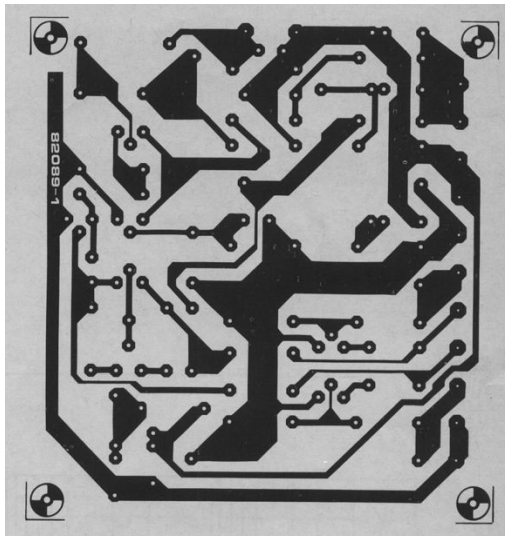
Αυτή είναι όλη η διαδικασία ρυθμίσεως του ενισχυτή. Την ασφάλεια F2 την επανατοποθετούμε αφού έχουμε πρώτα διακόψει το δίκτυο. Εάν έχει γίνει κάποιο σφάλμα μπορούμε να το διορθώσουμε εύκολα αφού συγκρίνουμε τις τάσεις σε διάφορα σημεία του κυκλώματος με αυτές του σχήματος 1. Οι τάσεις αυτές έχουν μετρηθεί με το μεγάφωνο συνδεδεμένο και την είσοδο αποσυνδεδεμένη.



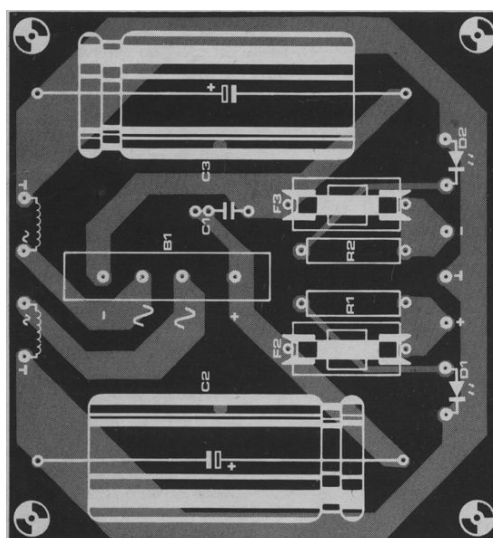
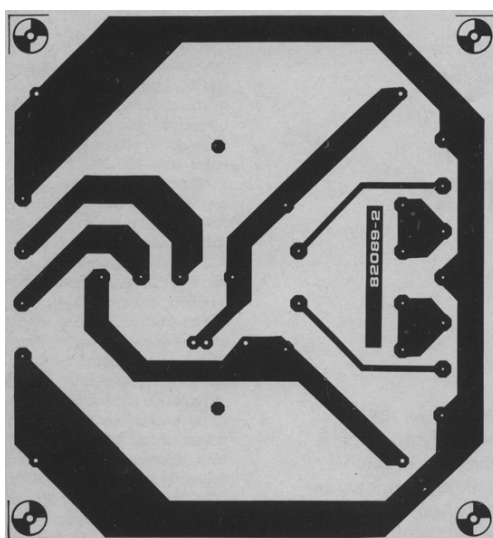
Σχήμα 3 : Το κατασκευαστικό σχήμα της διατάξεως.

## Κατασκευή πλακέτας

Το σχήμα 6 δείχνει το τυπωμένο κύκλωμα του ενισχυτή. Οι αντιστάσεις R18 και R19 πρέπει να έχουν μία απόσταση από αυτό τουλάχιστον 5 χιλ. Αυτό δημιουργεί μία καλή εξαέρωση και επομένως και καλή απαγωγή της θερμότητας.



Σχήμα 6 : Το τυπωμένο κύκλωμα του ενισχυτή.



Σχήμα 7 : Το τυπωμένο κύκλωμα του τροφοδοτικού.

Το τρανζίστορ T7 και T8 όπως και οι πυκνωτές C7 και C8 συναρμολογούνται πάνω στους ψύκτες.

Οι ψύκτες πρέπει να έχουν δυνατότητα  $1,2^{\circ} \text{ C/W}$  όπως π.χ. οι μαύροι SK 84. Εάν βάλουμε και στις δύο πλευρές της μίκα θερμοαγώγιμη πάστα τότε αρκεί ένας ψύκτης με  $1,8^{\circ} \text{ C/W}$  όπως π.χ. ο μαύρος SK03 με μήκος 100 χιλ. Είναι γνωστό ότι εάν τοποθετηθούν περισσότερα από ένα τρανζίστορ πάνω σε έναν ψύκτη τότε πρέπει να διαιρέσουμε την θερμική αντίσταση του ψύκτη με τον αριθμό των τρανζίστορ. Εάν επομένως τοποθετηθούν και τα δύο τρανζίστορ (T7 και T8) πάνω σε ένα ψύκτη τότε πρέπει ο τύπος να είναι  $0,6^{\circ} \text{ C/W}$  (SK84) ή  $0,9^{\circ} \text{ C/W}$  (SK03).

Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υπάρχει απ' ευθείας επαφή του τρανζίστορ με τον ψύκτη, επειδή ο συλλέκτης είναι συνδεδεμένος με το κάλυμμα του τρανζίστορ και έτσι θα δημιουργούσε βραχυκυκλώματα. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθούν μονωτικά όπως π.χ. μίκες.

Πριν συνδέσουμε τους πυκνωτές C7 και C8 μονώνουμε τους ακροδέκτες τους (ποδαράκια) βάζοντας π.χ. μακαρόνι.

Οι συνδέσεις προς το τυπωμένο κύκλωμα πρέπει να γίνουν με όσο το δυνατόν πιο κοντό χάλκινο σύρμα. Επειδή όπως είναι γνωστό τα θηλυκά βύσματα κατά DIN για την έξοδο δεν είναι εύχρηστα θα σας συστήναμε να βάλετε ιαπωνικά καλής ποιότητας.

Το βύσμα εισόδου πρέπει να συνδεθεί με καλώδιο AF στο τυπωμένο κύκλωμα. (Το μπλεντάζ να γειωθεί). Το καλύτερο σημείο για να ενώσουμε τη γείωση του τυπωμένου με το κάλυμμα (κουτί) του ενισχυτή είναι η γείωση του βύσματος εισόδου. Το καλώδιο και το βύσμα εισόδου πρέπει να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν πιο μακριά από τα άλλα στοιχεία και καλώδια, για να μειώσουμε την πιθανότητα αναδράσεως και το θόρυβο δίκτυο των 220V.

Οι δύο περιελίξεις του δευτερεύοντος είναι τελείως ξεχωριστές. Αυτό σημαίνει ότι θα μείνουν τέσσερα άκρα στα χέρια μας. Για να δούμε που θα συνδέσουμε το κάθε ένα παίρνουμε δύο στην τύχη και τα ενώνουμε. Έπειτα μετρούμε την τάση στα άλλα δύο. Εάν η τάση μεταξύ τους είναι 60V AC τότε συνδέουμε τα δύο ενωμένα σύρματα με την γη του τροφοδοτικού και τα άλλα δύο στα υπόλοιπα ελεύθερα σημεία. Εάν όμως η τάση είναι 0V τότε πρέπει να αλλάξουμε ένα από τα άκρα που έχουμε ενώσει με ένα ελεύθερο.

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές πρέπει να στερεωθούν (λόγω μεγέθους) πάνω στο τυπωμένο με πλαστικό κολάρο ή κάτι παρόμοιο.

## Κατάλογος υλικών του ενισχυτή

### Αντιστάσεις :

$$R1 = 120K$$

$$R2, R5, R6 = 3K3$$

$$R3 = 120\Omega$$

$$R4, R8 = 680\Omega$$

$$R7 = 1K5$$

$$R9 = 5K6$$

$$R10 = 1K2$$

$$R11 = 2K7$$

$$R12, R13 = 270\Omega$$

$$R14, R15 = 15\Omega$$

$$R16, R17 = 220\Omega$$

$$R18, R19 = 1\Omega/9W$$

$$R20 = 10\Omega$$

$$R21, R22 = 1\Omega$$

$$P1=1K$$

### Πυκνωτές :

$$C1 = 470p$$

$$C2 = 10\mu/63V$$

$$C3 = 150p$$

$$C4 = 1000\mu/4V$$

$$C5 = 220\mu/40V$$

$$C6 = 47p$$

$$C7, C8 = 560p$$

$$C9 = 47n$$

$$C10, C11 = 680n$$

$$C12, C13 = 100n$$



Ημιαγωγοί :

T1, T2 = BC 556A

T3, T5 = BC 547B

T4 = BC 639

T6 = BC 557B

T7 = BDX67B, BDX67C

T8 = BDX66B, BDX66C

D1 = 9V1/1.3W

D2, D3 = 1N4148, 1N914, BAW62

Διάφορα :

2 ψύκτες 1,2ο C/W

ή 1,8ο C/W

Μονωτικά για τα τρανζίστορ ισχύος (μίκε) κλπ.

**Κατάλογος υλικών του τροφοδοτικού**

Αντιστάσεις :

R1, R2 = 3K3/1W

Πυκνωτές :

C1 = 100nF

C2, C3 = 4700μF/63V

Ημιαγωγοί :

D1, D2 = LED

B1 = B80 C3200/5000 Ανορθωτικό (Γέφυρα)

Ασφάλειες :

F1 = 1,4A (περίπου)

F2, F3 = 2,5A (περίπου)

### Διάφορα :

Δευτερεύον 2x (225VA, 3,75, 30V)

τοροειδής μετασχηματιστής (ILP 620 17)

S1 = διπολικός διακόπτης

Δύο ασφαλειοθήκες για το τυπωμένο

Μία ασφαλειοθήκη για τα 220V

## **Λιαδικασία κατασκευής**

### Εκτύπωση διαφάνειας

Αρχικά εκτυπώσαμε σε διαφάνεια τα τυπωμένα κυκλώματα του ενισχυτή και του τροφοδοτικού με σκοπό τη χρήση της για τη δημιουργία των τυπωμένων κυκλωμάτων σε πλακέτα με φωτοευαίσθητη επιφάνεια.

### Έκθεση σε υπεριώδες φως

Αφού εκτυπώσαμε το φιλμ, το τοποθετήσαμε πάνω στην επιφάνεια της πλακέτας και το ευθυγραμμίσαμε. Στη συνέχεια, τοποθετήσαμε ένα κομμάτι γυαλί από πάνω για να υπάρχει άριστη επαφή της διαφάνειας και της πλακέτας. Αφήσαμε την πλακέτα να φωτιστεί για 6 – 7 λεπτά με λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας. Η έκθεση σε υπεριώδες φως γίνεται για να φωτιστούν τα σημεία εκείνα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας που πρέπει να αφαιρεθούν, ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλα οι αγωγοί στην πλακέτα.

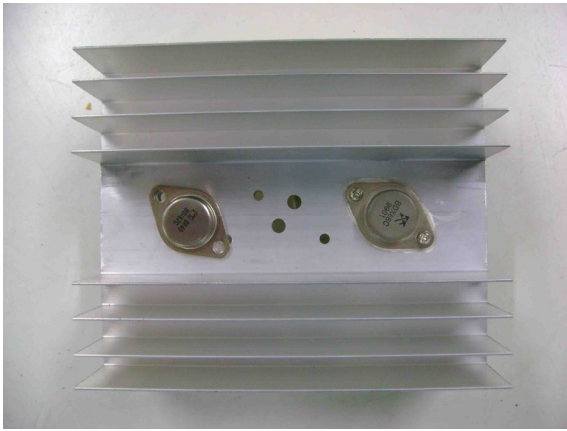
### Εμφάνιση και αποχάλκωση

Η εμφάνιση του σχεδίου γίνεται με τη τοποθέτηση της πλακέτας σε διάλυμα καυστικής σόδας (NaOH), όπου αφαιρείται το τμήμα της επιφάνειας που έχει φωτιστεί και όταν γίνει αυτό ξεπλένουμε με νερό.

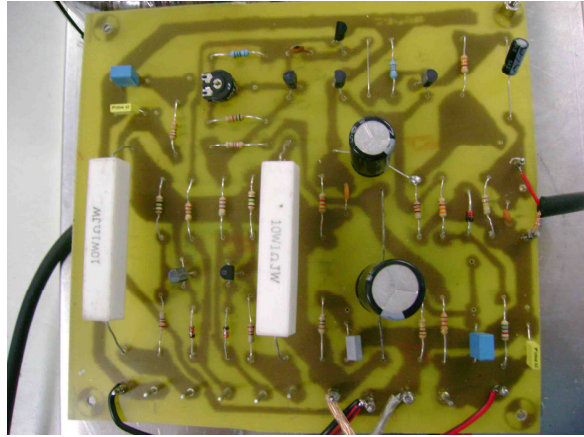
Η αποχάλκωση γίνεται με υδροχλωρικό οξύ σε ανάμειξη με peridrol (υπεροξείδιο του υδρογόνου – H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Κατά τη χημική αντίδραση που δημιουργείται απομακρύνεται ο πλεονάζων χαλκός με τελικό αποτέλεσμα την ύπαρξη μόνο των χάλκινων αγωγών στην πλακέτα μας.

## Διάτρηση και τοποθέτηση υλικών

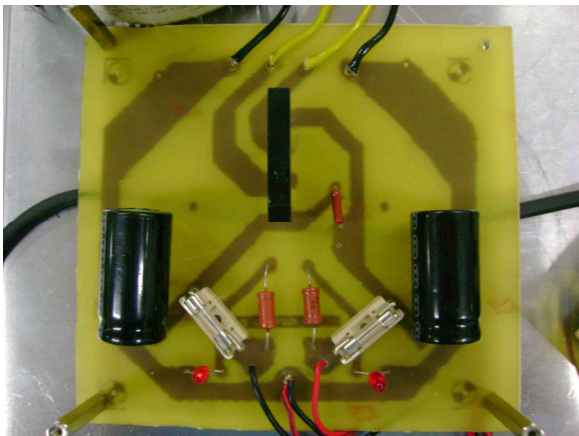
Σε αυτό το στάδιο τρυπάμε την πλακέτα μας και προσαρμόζουμε τα υλικά.



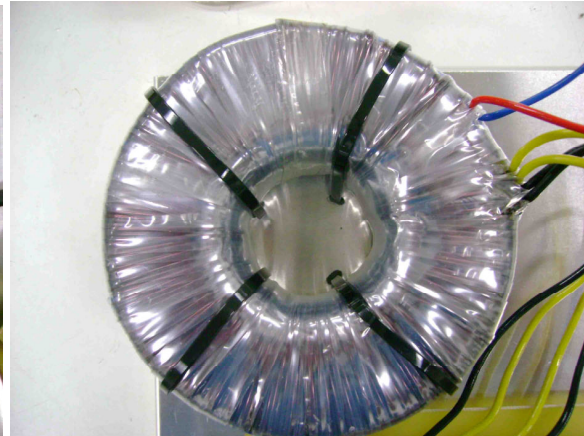
Προσαρμογή των τρανζίστορ  
πάνω στην ψύκτρα.



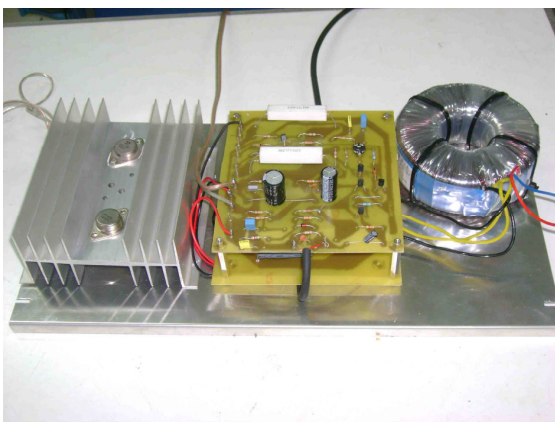
Τοποθέτηση υλικών πάνω στην πλακέτα  
του ενισχυτή.



Τοποθέτηση των υλικών πάνω στην  
πλακέτα του τροφοδοτικού.



Προσαρμογή του μετασχηματιστή.



Τοποθέτηση όλων των τμημάτων πάνω  
στη λαμαρίνα.



Προσαρμογή στο εσωτερικό του κουτιού  
και έλεγχος σωστής λειτουργίας.

## Μετρήσεις και διαγράμματα

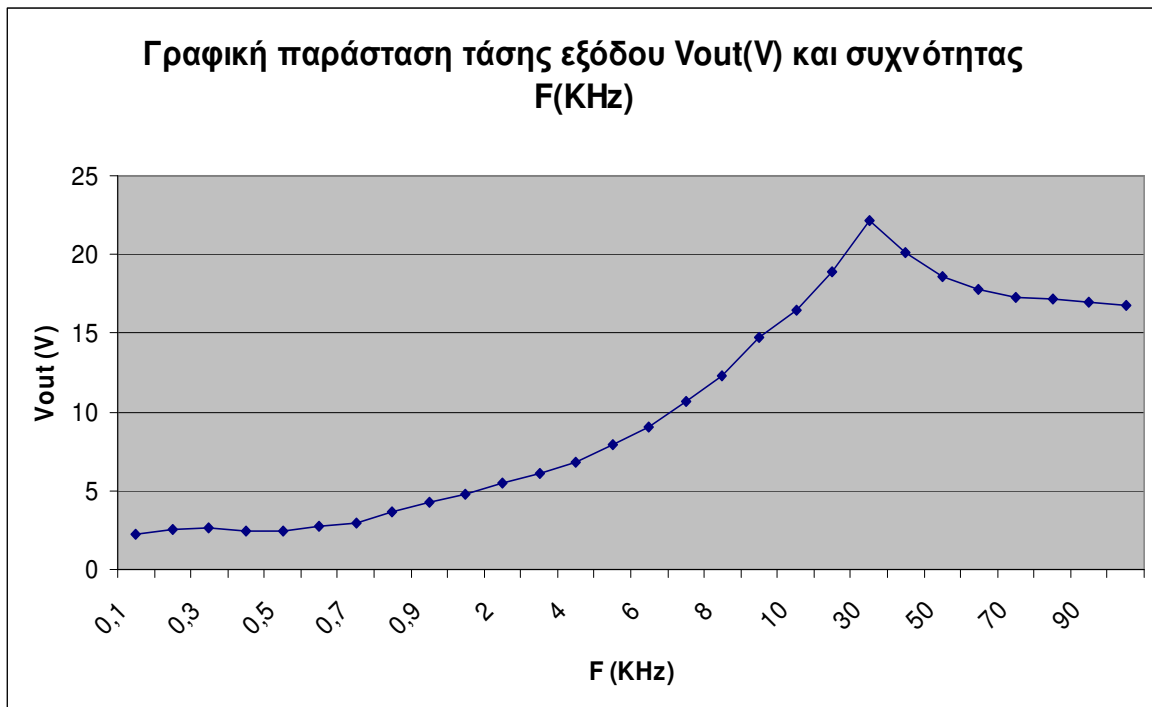
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα στο σύνολο της ενισχυτικής διάταξης.

Οι μετρήσεις για την απόκριση της συχνότητας πραγματοποιήθηκαν με τάση εισόδου στο 1V και παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

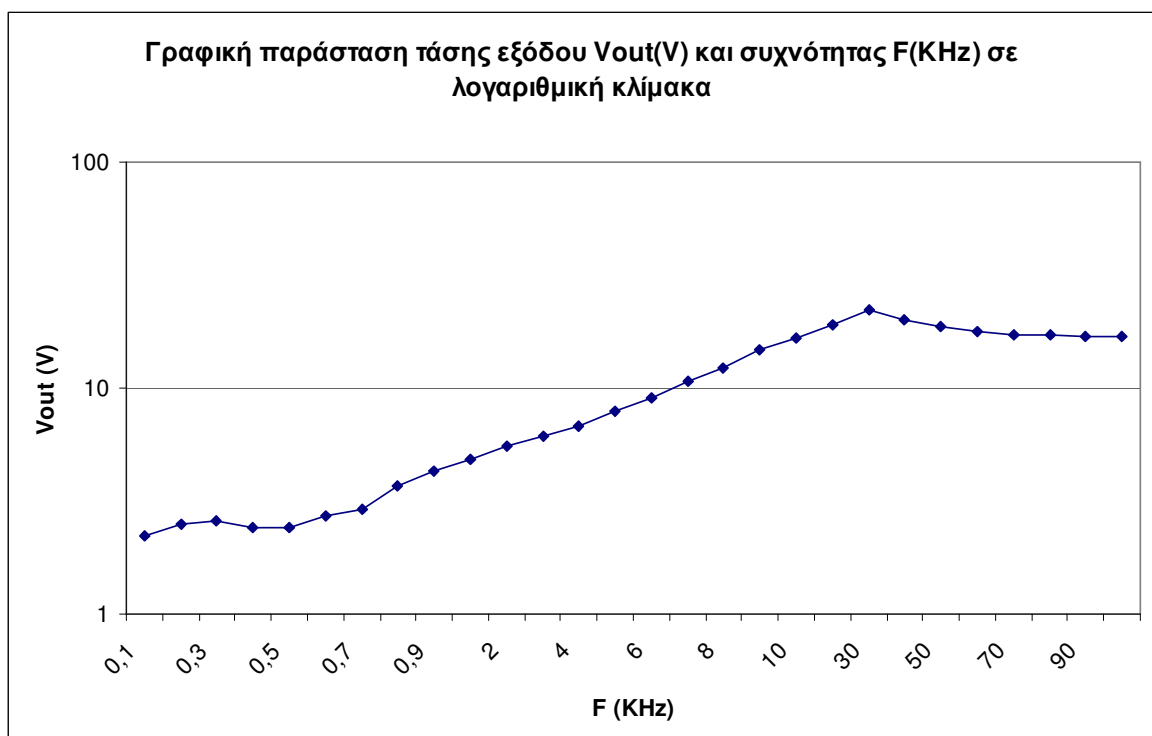
Συχνότητα F (KHz)	Τάση Vout (V)	Συχνότητα F (KHz)	Τάση Vout (V)
0,1	2,2	6	9
0,2	2,5	7	10,7
0,3	2,6	8	12,3
0,4	2,4	9	14,7
0,5	2,4	10	16,5
0,6	2,7	20	18,9
0,7	2,9	30	22,2
0,8	3,7	40	20,1
0,9	4,3	50	18,6
1	4,8	60	17,8
2	5,5	70	17,3
3	6,1	80	17,2
4	6,8	90	17
5	7,9	100	16,8

Πίνακας 1 : Εύρος συχνοτήτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης εξόδου σε συνάρτηση με την συχνότητα. Στο διάγραμμα 1 παρατηρούμε την συμπεριφορά του ενισχυτή σε διάφορες συχνότητες, ενώ στο διάγραμμα 2 βλέπουμε την ίδια κυματομορφή σε λογαριθμική κλίμακα.



Διάγραμμα 1.



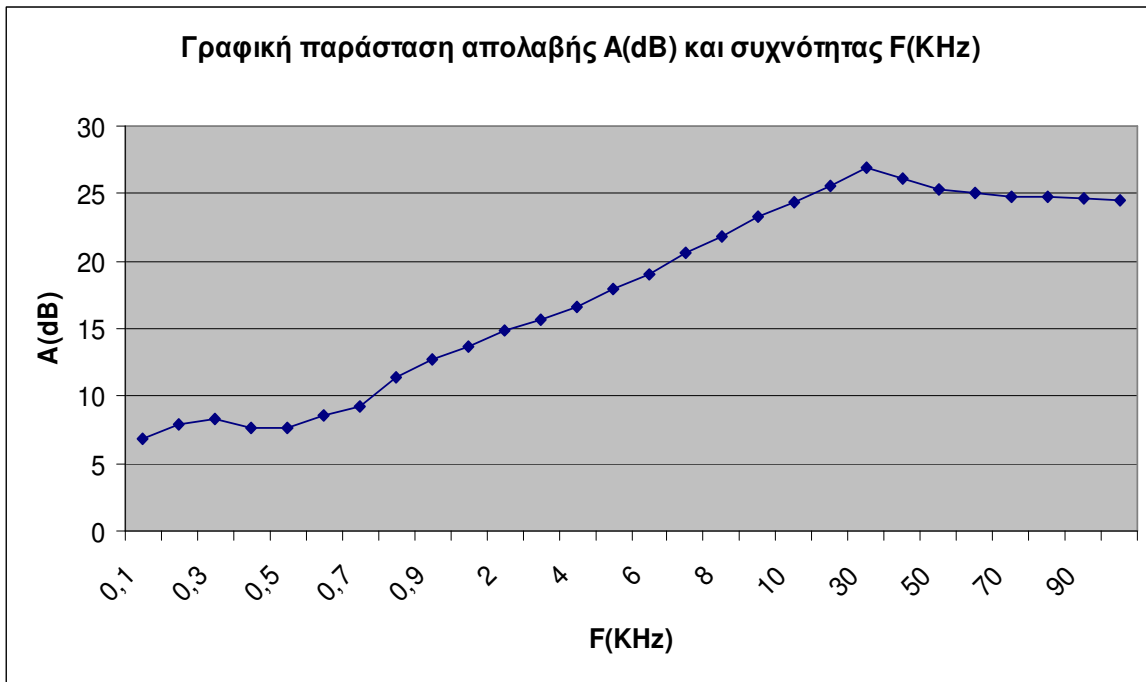
Διάγραμμα 2.

Στον πίνακα 2 υπολογίστηκε η απολαβή τάσης του ενισχυτή από τη σχέση  $A = V_{out}/V_{in}$  (για  $V_{in} = 1V$ ) και η απολαβή σε dB σύμφωνα με τη σχέση  $A_{(dB)} = 20 * \log A$ .

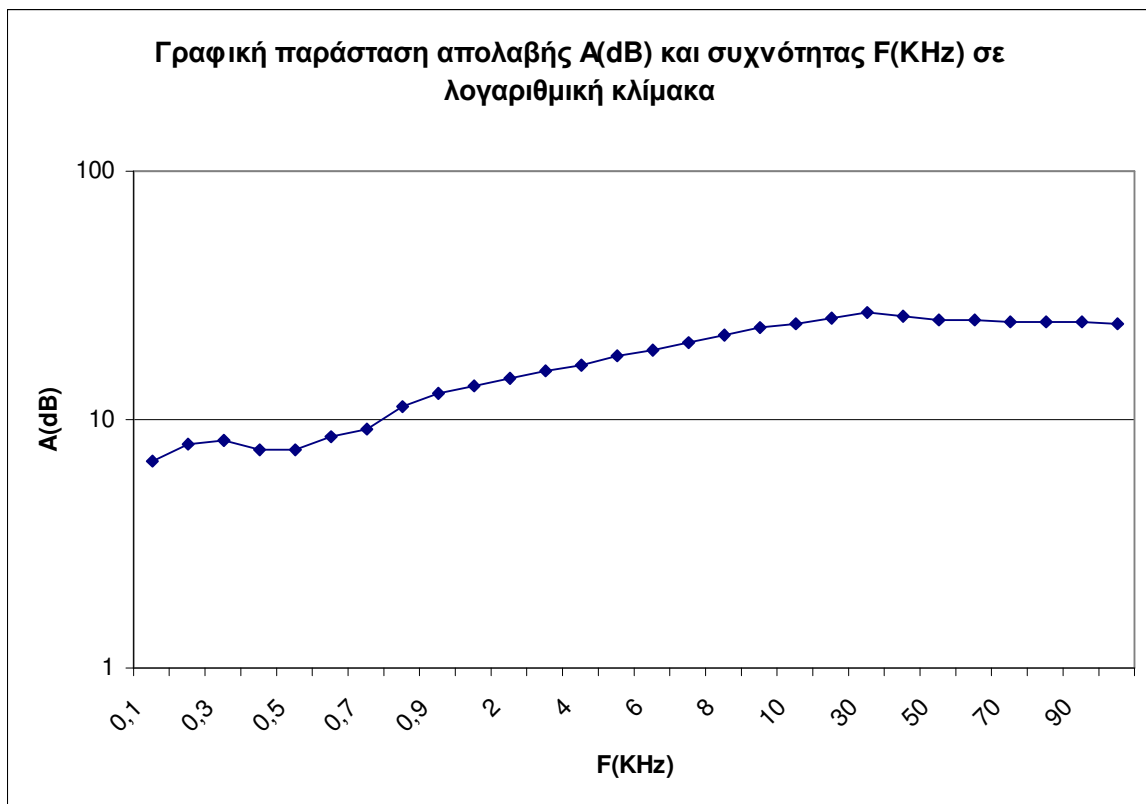
Απολαβή τάσης A	$A_{(dB)}$	Απολαβή τάσης A	Ενίσχυση $A_{(dB)}$
2,2	6,84	9	19,08
2,5	7,95	10,7	20,58
2,6	8,29	12,3	21,79
2,4	7,60	14,7	23,34
2,4	7,60	16,5	24,34
2,7	8,62	18,9	25,52
2,9	9,24	22,2	26,92
3,7	11,36	20,1	26,06
4,3	12,66	18,6	25,3
4,8	13,62	17,8	25,00
5,5	14,80	17,3	24,76
6,1	15,70	17,2	24,71
6,8	16,65	17	24,60
7,9	17,95	16,8	24,50

Πίνακας 2 : Απολαβή τάσης

Παρακάτω έχουμε τις κυματομορφές  $A(dB) - F(KHz)$  σε κανονική και λογαριθμική μορφή.



Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 4.

## Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Στα διαγράμματα παρουσιάσαμε γραφικά την απόκριση της συχνότητας του ενισχυτή. Χρησιμοποιήσαμε διάγραμμα Bode, επειδή αυτού του είδους η γραφική παράσταση χρησιμοποιεί decibel και μπορεί να μας δώσει περισσότερες πληροφορίες για την απόκριση του ενισχυτή. Παρατηρούμε ότι για τάση εισόδου  $V_{in} = 1V$  στην τιμή συχνότητας 30 KHz έχουμε την μέγιστη τιμή τάσης εξόδου που είναι  $V_{out} = 22,2V$ . Σε αυτή τη τιμή έχουμε και τη μέγιστη ενίσχυση  $A = 22,2$ . Όπως βλέπουμε έχουμε μία απόκλιση από την τιμή του που θα έπρεπε να έχουμε στην μέγιστη ενίσχυση, δηλαδή για φορτίο  $R_L = 8\Omega$  έχουμε μέγιστη ισχύ  $P_{max} = 70W$  άρα  $V_{out} = 23,66V$  και  $A = 23,66$ .

Αυτή η απόκλιση της τιμής είναι λογική και μπορεί να οφείλεται στο σχέδιο, στις πολώσεις ή και στον θόρυβο. Επίσης, μπορεί να οφείλεται στην συμπεριφορά και κατασκευή κάποιων υλικών, καθώς η θεωρητική τιμή κάποιες φορές διαφέρει από την πραγματική.



## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Μετά από συστηματική μελέτη και κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος του ενισχυτή, καταφέραμε να τον κατασκευάσουμε. Αν και φαινομενικά προέκυπτε ως απλό κύκλωμα για έναν τεχνικό, αντιμετωπίσαμε πολλές δυσκολίες (εύρεση και κόστος κάποιων υλικών, τρόπος κατασκευής, μη εύρεση οργάνου μέτρησης αρμονικής παραμορφώσεως), και χρειάστηκε αρκετή προσπάθεια για να μπορέσουμε να έχουμε ως τελικό αποτέλεσμα έναν καλής ποιότητας ενισχυτή. Παρατηρήσαμε ότι η απόδοση του ήχου είναι πολύ καλή χωρίς παράσιτα για τις ακουστικές συχνότητες (20Hz με 20KHz). Στην ουσία το όλο κύκλωμα βασίζεται πάνω στα δύο Darlington transistors εξόδου που με τη βοήθεια των κυκλωμάτων εισόδου δίνουν τέτοια αποτελέσματα που ξεπερνούν σχεδόν σε όλα τα σημεία άλλες προηγούμενες κατασκευές.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <http://artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Display/artemis.ntua.ece/DT2005-0157?abstract=%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%85%CF%84%CF%89%CE%BD>
- <http://sound-speakers.pblogs.gr/2008/04/enishyths-hhoy.html>
- <http://diaylos.terapad.com/index.cfm?fa=contentGeneric.sfkxqjznqrrxdzhf>
- <http://www.hlektronika.gr/files/uploads/100w%20amp.pdf>
- <http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/840/aprousalι.pdf?sequence=1>
- <http://www.electroniccircuits.gr/metaximatistes.html>
- [http://www.somsmecatronica.net/2009\\_02\\_01\\_archive.html](http://www.somsmecatronica.net/2009_02_01_archive.html)
- [www.marad.gr/view](http://www.marad.gr/view)
- [maradclub.blogspot.com/2010/01/blog-port-7051.html](http://maradclub.blogspot.com/2010/01/blog-port-7051.html)
- [www.hellascams.gr/grc/products/power-supply/index.html](http://www.hellascams.gr/grc/products/power-supply/index.html)
- <http://sfhmy3.sfhmy.gr/cd/data/19.pdf>
- <http://user.sch.gr/jabot<o/files/articles/sxediasmos-trofodotikwn.pdf>
- <http://sound-speakers.pblogs.gr/tags/power-amplifier.html>
- <http://www.scribd.com/doc/6385276/-001>
- Ηλεκτρονική Malvino (6η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα
- Ηλεκτρονικά Ισχύος Ι. Κιοσκερίδης, Εκδόσεις Τζιόλα