

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ –ΣΤΕΦ
ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΜΕΛΕΤΗ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΣΤΕΡΕΟΦΩΝΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ 2/40 WATT**

**DESIGN AND CONSTRUCTION
STEREOAMPLIFIER 2/40 WATT**

Σπουδαστής	Μπουκιστιάνος Βασίλης
Αριθμός Μητρώου	37007
Εξάμηνο	Ιβ΄
Υπεύθυνος καθηγητής	Ηρακλής Βυλλιώτης

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	6
Γενικά περί ενισχυτών.....	9
Διαγράμματα βαθμίδων.....	9
Χαρακτηριστικά ενισχυτών ακουστικών σημάτων.....	11
(1) Απολαβή.....	11
(2) Η απόκριση.....	12
(3) Ωφέλιμη ισχύς εξόδου.....	12
(4) Βαθμός αποδόσεως.....	12
(5) Οι παραμορφώσεις.....	13
Βασικές συνδεσμολογίες των τρανζίστορ.....	15
Κύκλωμα πολώσεως σε συνδεσμολογία (CE).....	16
Ευθεία φόρτου και σημείο λειτουργίας.....	19
Ρεύμα κόρου του τρανζίστορ.....	20
Ρεύμα αποκοπής του τρανζίστορ.....	20
Επίδραση της θερμοκρασίας στην πόλωση.....	21

Κύκλωμα πολώσεως ανεξάρτητο του β σε συνδεσμολογία (CE).....	23
Ανάδραση / ανατροφοδότηση στους ενισχυτές.....	26
Γενικές αρχές της ανατροφοδοτήσεως.....	27
1. Ενισχυτές με ανατροφοδότηση τάσεως.....	29
2. Ενισχυτές με ανατροφοδότηση ρεύματος.....	32
3. Επίδραση της ανατροφοδοτήσεως στην απόκριση συχνότητας.....	35
4. Επίδραση της ανατροφοδοτήσεως στη μη γραμμική παραμόρφωση και στο θόρυβο.....	38
Ενισχυτές ισχύος	
Ταξινόμηση και κατηγορίες ενισχυτών ισχύος.....	39
Υπολογισμοί στους Ενισχυτές ισχύος.....	45
Απόδοση ισχύος η	45
Μέγιστη ισχύς καταναλισκόμενη από τρανζίστορ.....	46
Απορροφητής θερμότητας.....	46
Θερμική αντίσταση K	47
Ενισχυτής push-pull με μετασχηματιστή.....	48
Πλεονεκτήματα του ενισχυτή push-pull.....	51

Λειτουργία σε τάξη AB ενισχυτή push-pull.....	52
Ενισχυτές push-pull χωρίς μετασχηματιστή.....	56
Ενισχυτές συμπληρωματικής συμμετρίας.....	57
Περιγραφή κατασκευής	
ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗ.....	59
ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	64
ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ.....	69

Εισαγωγή :

Η Φυσιολογία της Ανθρώπινης Ακοής

Η απόκριση του ανθρώπινου αυτιού είναι μη γραμμική στα χαρακτηριστικά του ήχου στάθμη και συχνότητα. Το ανθρώπινο όργανο μπορεί να διακρίνει 280 διαφορετικές στάθμες και 1400 συχνότητες. Μάλιστα είναι πιο ευαίσθητο σε συχνότητες της ανθρώπινης ομιλίας και λιγότερο σε άλλες.

Η φυσιολογία του ανθρώπινου αυτιού φαίνεται στο διπλανό σχήμα όπου διακρίνεται το εξωτερικό αυτί, το τύμπανο (μεμβράνη) και το εσωτερικό αυτί που αποτελείται από τρία οστά τα οποία μεταφέρουν μηχανικά τη διέγερση στον κοχλία. Εκεί γίνεται η μετατροπή της μηχανικής διέγερσης σε νευρικό ερεθισμό μέσω των τριχιδίων που καλύπτουν το εσωτερικό του κοχλία.

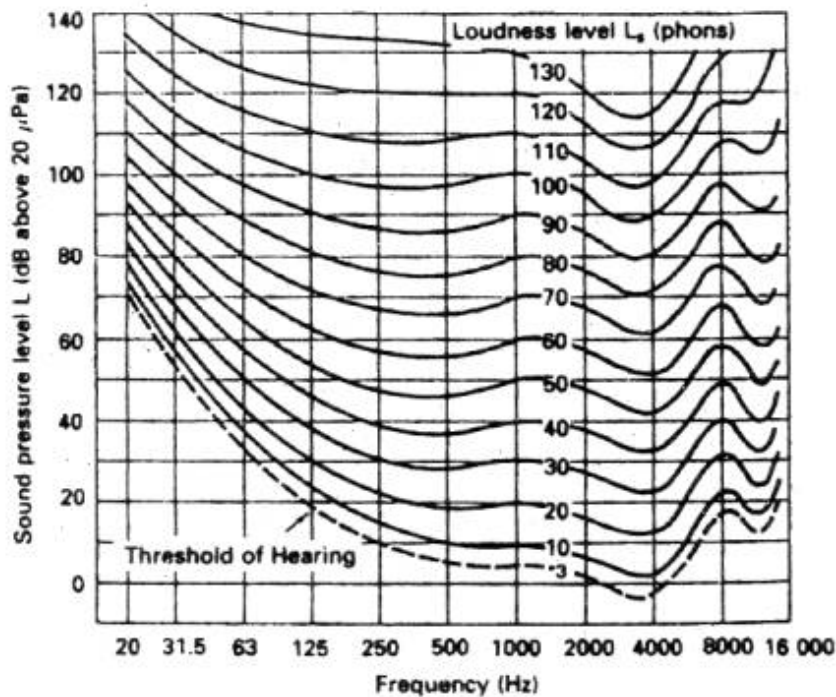


ανθρώπινο αυτί

Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου

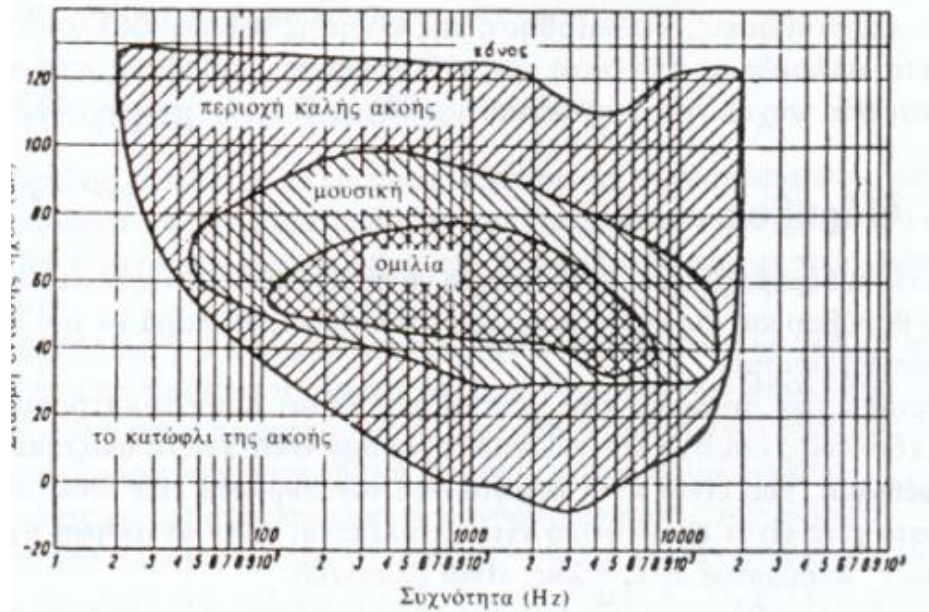
Ύψος είναι η υποκειμενική απόκριση του αυτιού στην συχνότητα. Μονάδα του είναι το Mel, μια μονάδα η οποία προκύπτει από στατιστική επεξεργασία των απαντήσεων ενός μεγάλου πλήθους ατόμων στους οποίους ζητείται να χαρακτηρισθούν ως προς το ύψος τους ορισμένοι ήχοι. Ήχος συχνότητας 1 KHz και στάθμης 60 dB έχει ύψος 1000 Mel. Ο ήχος που υποκειμενικά έχει διπλάσιο ύψος, ανεξάρτητα από τη συχνότητά του, έχει ύψος 2000 Mel κοκ. Η ικανότητα του αυτιού να ξεχωρίζει ήχους όσον αφορά την έντασή τους εξαρτάται από την συχνότητα που έχουν. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα παρακάτω το οποίο δίνει τις καμπύλες ίσης στάθμης ακουστότητας. Κάθε καμπύλη παριστάνει την υποκειμενική κρίση ενός μέσου ακροατή δηλαδή ότι η ένταση φαίνεται να είναι σταθερή καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα. Η στάθμη αναφοράς για κάθε καμπύλη είναι η πραγματική ένταση ενός

ηχητικού κύματος συχνότητας 1000 Hz μετρημένη σε decibels πάνω από το κατώφλι ακουστότητας. Σύμφωνα με αυτές τις καμπύλες ένας τόνος 100 Hz και L_p 40 dB είναι το ίδιο ακουστός όσο και ο τόνος των 1000 Hz με στάθμη L_p 20 dB και συνεπώς στάθμης ακουστότητας 20 Phon. Η χροιά σχετίζεται με το είδος της ηχητικής πηγής. Χροιά ονομάζουμε τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου τα οποία κάνουν δυνατό τον διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας αλλά διαφορετικών κυματομορφών. Ο κάθε άνθρωπος έχει ξεχωριστή χροιά που καθιστά δυνατή την διάκριση της φωνής του έναντι κάποιου άλλου. Διαφορετικά μουσικά όργανα έχουν επίσης διαφορετική χροιά. Μπορούμε λοιπόν να εικάσουμε ότι η χροιά είναι η «υπογραφή» της μουσικής πηγής.



Η ακουστότητα είναι το τελευταίο υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου και σχετίζεται με το πόσο έντονα ακούγεται ο ήχος. Είναι η απόκριση του αυτιού στη στάθμη του ήχου. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην χαμηλότερη στάθμη πίεσης του ήχου σε συνάρτηση με την συχνότητα που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος ονομάζεται κατώφλι ακουστότητας ενώ η καμπύλη που αντιστοιχεί στην υψηλότερη στάθμη του ήχου πάνω από την οποία επέρχεται πόνος ονομάζεται κατώφλι πόνου. Οι καμπύλες αυτές διακρίνονται στο σχήμα παρακάτω και είναι αντίστοιχα η κατώτερη και η ανώτερη καμπύλη. Η

περιοχή που περιορίζεται από τις παραπάνω καμπύλες περιλαμβάνει όλους τους ακουστούς ήχους από το ανθρώπινο όργανο. Τέλος, η περιοχή ακουστότητας των διαφόρων οργανισμών είναι διαφορετική με αυτή του ανθρώπου.



Πεδίο και όρια ακοής

Ο στερεοφωνικός ενισχυτής που κατασκευάσαμε πρέπει να αποδίδει ήχο ο οποίος να είναι στα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης φυσιολογικής ακοής, δηλαδή στα πλαίσια της ανθρώπινης ακουστικής συχνότητας χωρίς να του προκαλεί ενοχλήσεις ή να παραμορφώνει το αρχικό σήμα.

Γενικά περί ενισχυτών:

Η ενίσχυση ηλεκτρικών ταλαντώσεων (σημάτων) για συχνότητες 16-20.000Hz (ακουστικές συχνότητες) γίνεται με τους ενισχυτές χαμηλών ή ακουστικών συχνοτήτων. Οι ενισχυτές χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται στις διατάξεις εκπομπής και λήψεως σημάτων στην τηλεόραση ,στα συστήματα αυτομάτου έλεγχου και σε άλλες εφαρμογές της ηλεκτρονικής.

Οι ενισχυτές ακουστικών σημάτων διακρίνονται σε δυο βασικά τμήματα τον **προενισχυτή** και τον **τελικό ενισχυτή** ή **ενισχυτή ισχύος**.

Ο προενισχυτής χρειάζεται για την ενίσχυση της τάσεως ακουστικού σήματος που προέρχεται από κάποια πηγή δηλαδή μικρόφωνο, κεφαλή μαγνητοφώνου ηλεκτρόφωνο (πικ-απ) και οποιαδήποτε άλλη ηλεκτροακουστική συσκευή. Ο προενισχυτής κατασκευάζεται με τρανζίστορ και κυρίως με ολοκληρωμένα κυκλώματα και, εκτός από τις ενισχυτικές του βαθμίδες, περιέχει μια σειρά από άλλες διατάξεις, που ρυθμίζουν ποσοτικά και ποιοτικά το ενισχυόμενο σήμα .Η τάση εξόδου του προενισχυτή θα πρέπει φυσικά να είναι ικανή να διεγείρει την επόμενη βαθμίδα που είναι ο τελικός ενισχυτής .

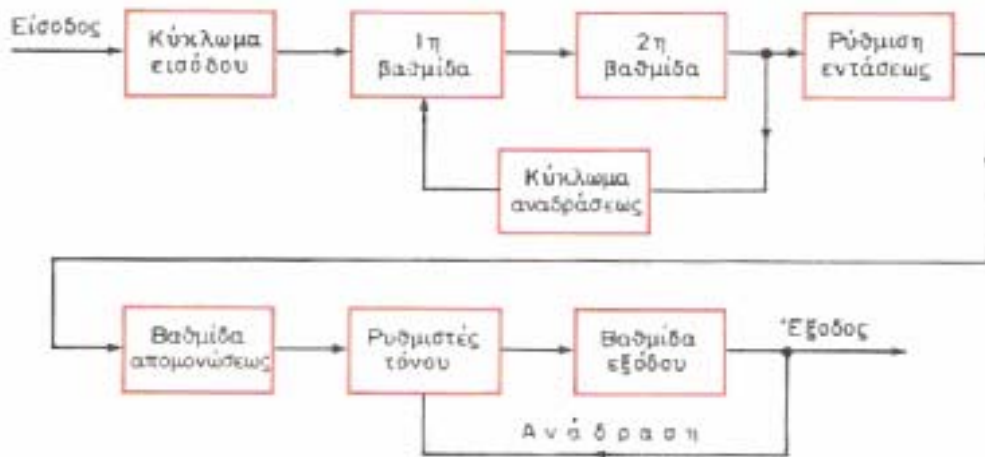
Ο τελικός ενισχυτής προορίζεται για την ενίσχυση, κατά ισχύ, του σήματος εξόδου του προενισχυτή έως τη στάθμη που χρειάζεται να λειτουργήσει το μεγάφωνο ή τα μεγάφωνα (φορτίο). Ο τελικός ενισχυτής κατασκευάζεται και πάλι με τρανζίστορ και με ολοκληρωμένα κυκλώματα .

Ο προενισχυτής και ο τελικός ενισχυτής μπορεί να αποτελέσει από μία ή περισσότερες **ενισχυτικές βαθμίδες**. Κάθε βαθμίδα κατασκευάζεται με ένα τρανζίστορ και ή τμήμα ολοκληρωμένου κυκλώματος ,που είναι συνδεδεσμένο κατάλληλα με άλλα ηλεκτρικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, μετασχηματιστές), ώστε να εξασφαλιστεί η ανάδειξη των ενισχυτικών τους ικανοτήτων.

Διαγράμματα βαθμίδων

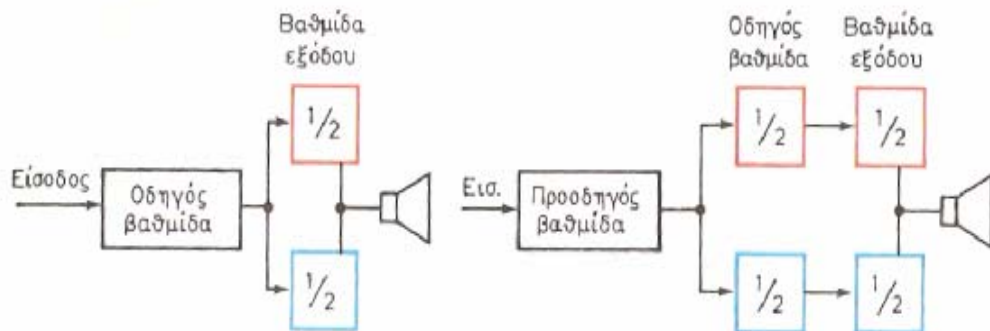
Παρακάτω παρουσιάζεται μια γενική συγκρότηση ενός *προενισχυτή* σε μπλοκ διάγραμμα. Στο διάγραμμα αυτό

περιλαμβάνονται τόσο οι ενισχυτικές βαθμίδες, όσο και τα ρυθμιστικά κυκλώματα του ήχου. Έτσι το σήμα οδηγείτε στην πρώτη ενισχυτική βαθμίδα μέσα από κύκλωμα εισόδου που εξασφαλίζει την προσαρμογή της αντιστάσεως της ηλεκτροακουστικής συσκευής προς την αντίσταση εισόδου της βαθμίδας. Ακολουθεί μια δεύτερη ενισχυτική βαθμίδα ενώ μεταξύ αυτής και της πρώτης, συναρμολογείτε ένα κύκλωμα αναδράσεως (αρνητικής αναδράσεως), για την βελτίωση της ποιότητας του ήχου. Στην συνέχεια της δεύτερης βαθμίδας έχουμε τους ρυθμιστές εντάσεως και τόνου που παρεμβάλλονται από μια βαθμίδα απομονώσεως που εξασφαλίζει την ανεξαρτησία των ρυθμίσεων των δυο αυτών χαρακτηριστικών του ήχου. Τέλος μία ακόμα ενισχυτική βαθμίδα που διαθέτει και αρνητική ανάδραση ενισχύει το σήμα που θα διεγείρει τον τελικό ενισχυτή ισχύος.



Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζουμε τον *ενισχυτή ισχύος*. Η συγκρότηση του ενισχυτή ισχύος είναι πιο απλή από την συγκρότηση του προενισχυτή. Οι ενισχυτές μικρής ισχύος (έως 10W) έχουν συνήθως δυο βαθμίδες: την οδηγό βαθμίδα και την βαθμίδα εξόδου σε συμμετρική διάταξη. Στους ενισχυτές ισχύς μεγαλύτερης των 15W προστίθεται μια ακόμα προοδηγός βαθμίδα, ενώ η οδηγός βαθμίδα παίρνει την μορφή συμμετρικής διατάξεως. Η οδηγός ή προοδηγός βαθμίδα διεγείρεται από τον προενισχυτή και εξασφαλίζει, με την σειρά της, την διέγερση του τελικού ενισχυτή με δύο σήματα τα όποια έχουν μεταξύ τους 180°.

Τέλος ο τελικός ενισχυτής ισχύος με την συμμετρική διάταξη (push-pull) τροφοδοτεί το μεγάφωνο.



Χαρακτηριστικά ενισχυτών ακουστικών σημάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ενισχυτικών διατάξεων τα χωρίζουμε σε 5 κατηγορίες:

(1) **Απολαβή.** Ο συντελεστής ενισχύσεως ενός ενισχυτή προσδιορίζετε από τον λόγο της τάσεως εξόδου $U_{εξ}$ του ενισχυτή προς την τάση εισόδου $U_{εισ}$ (για ενισχυτές τάσεως) ή από τον λόγο της ισχύος εξόδου $P_{εξ}$ προς την ισχύ εισόδου $P_{εισ}$ (ενισχυτές ισχύος). Στην πράξη, ο λογάριθμος του συντελεστή ενισχύσεως πολλαπλασιάζεται επί 20 για τάσης ενώ της ισχύος επί 10, και το αποτέλεσμα χαρακτηρίζετε σαν *απολαβή* G (Gain) και εκφράζεται σε decibels (dB).

$$G = 20 \log A_v \text{ (dB)} \quad \text{όπου } A_v = U_{εξ} / U_{εισ} \quad \text{για τάσεις}$$

$$G = 10 \log A_w \text{ (dB)} \quad \text{όπου } A_w = P_{εξ} / P_{εισ} \quad \text{για ισχύ}$$

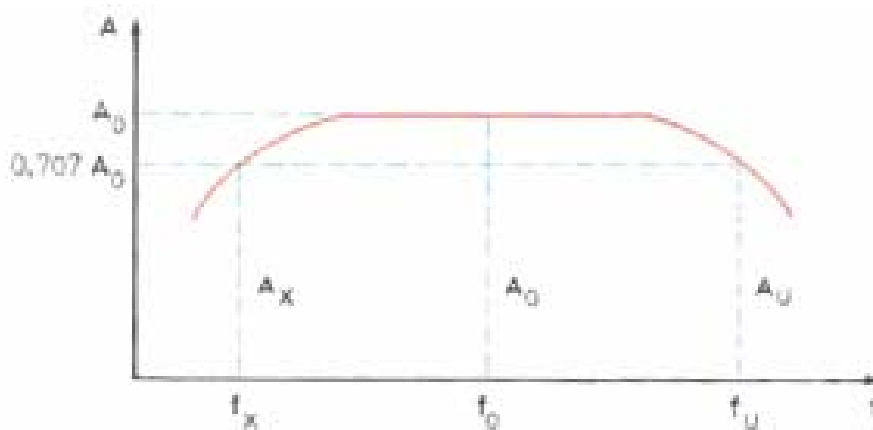
Οι πιο πάνω εκφράσεις δικαιολογούν ότι ο ήχος προκαλεί ερεθισμό των οργάνων ακοής που είναι ανάλογος προς το λογάριθμο της ισχύος που τα διεγείρει.

Για ενισχυτικές βαθμίδες που συνδέονται σε σειρά, η ολική ενίσχυση ισούται με το γινόμενο των συντελεστών ενισχύσεως των επιμέρους βαθμίδων και η ολική απολαβή, με το άθροισμα των απολαβών δηλαδή :

$$A_0 = A_1 * A_2 * A_3 * \dots * A_n$$

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n \text{ (dB)}$$

(2) **Η απόκριση.** Η συμπεριφορά του ενισχυτή ως προς την απολαβή σε όλες τις συχνότητες του ενισχυόμενου ακουστικού σήματος ονομάζεται απόκριση. Η απόκριση εξαρτάται κυρίως από τα στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές) που δρουν με το τρανζίστορ το οποίο κάνει την ενίσχυση. Ο συντελεστής ενισχύσεως A του ενισχυτή στις διάφορες συχνότητες f της ακουστικής περιοχής (20-20.000Hz) δίνεται από μια καμπύλη που ονομάζεται **καμπύλη αποκρίσεως** του ενισχυτή.



Οι δυο συχνότητες f_x (χαμηλή) και f_u (υψηλή), για τις οποίες ο συντελεστής ενισχύσεως είναι ίσος με τα 70.7% του συντελεστή A_0 μιας μέσης συχνότητας f_0 , ορίζουν την περιοχή συχνοτήτων που έχει ο ενισχυτής. Ο υποβιβασμός του συντελεστή ενισχύσεως στα 70.7% , δηλαδή υποβιβασμός κατά 29.3% αντιστοιχεί σε ελάττωση της απολαβής του ενισχυτή κατά 3 dB.

(3) **Ωφέλιμη ισχύς εξόδου.** Η ισχύς του σήματος που εμφανίζεται στην αντίσταση φορτίου του ενισχυτή ονομάζεται ωφέλιμη ισχύς P_o και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_o = \frac{U_{o\text{εν}}^2}{R_L} = \frac{U_o^2}{2R_L}$$

Όπου $U_{o\text{εν}}$ η ενεργός τιμή της τάσεως εξόδου του ενισχυτή ($U_{o\text{εν}}=U_o/\sqrt{2}$), U_o η μέγιστη τιμή (πλάτος) και R_L η αντίσταση φορτίου (μεγάφωνο).

(4) **Βαθμός αποδόσεως.** Ο βαθμός αποδόσεως του ενισχυτή ορίζεται από το λόγο της ωφέλιμης ισχύος εξόδου P_o προς τη συνεχή ισχύ P που παρέχει στον ενισχυτή η τροφοδοτική πηγή

$$n = (P_o / P) \cdot 100\%$$

(5) **Οι παραμορφώσεις.** Ονομάζουμε κάθε αλλοίωση που προκαλεί ένας ενισχυτής στα χαρακτηριστικά του σήματος που εφαρμόζετε στην είσοδο του. Οι σημαντικότερες παραμορφώσεις που δημιουργούνται είναι η **αρμονική** ή «**μη γραμμική**» παραμόρφωση.

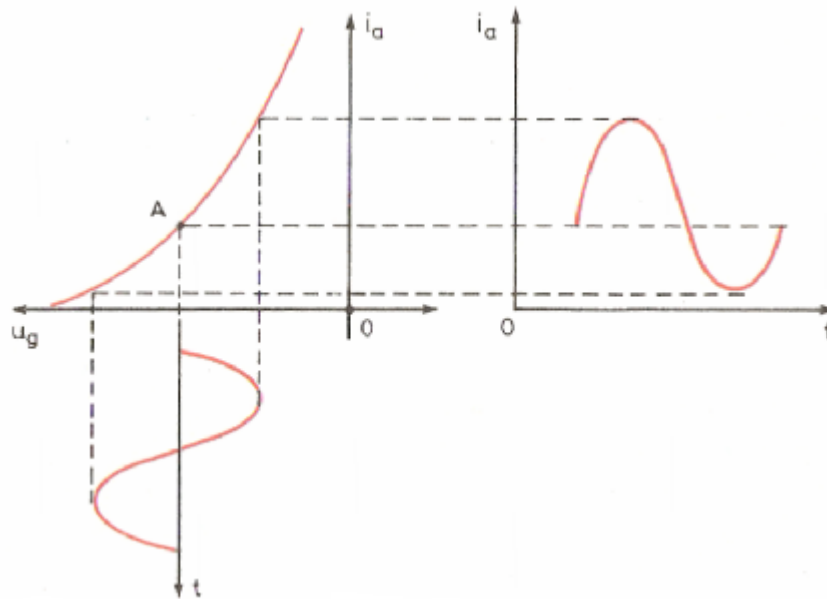
Η βασική αιτία που προκαλεί την παραμόρφωση αυτή είναι η καμπυλότητα των χαρακτηριστικών των ενισχυτικών στοιχείων (τρανζίστορ). Το ρεύμα εξόδου των ενισχυτικών στοιχείων, που εργάζονται σε καμπύλα τμήματα των χαρακτηριστικών τους, περιέχει αρμονικές συνιστώσες οι οποίες δεν ενεργούν στην είσοδο του ενισχυτή. Το μέγεθος της αρμονικής παραμόρφωσης εκτιμάτε από τον συντελεστή γ , ο οποίος ισούται με τον λόγο της ενεργούς τιμής του ρεύματος που σχηματίζετε από τη δεύτερη και τρίτη και ανώτερες αρμονικές, προς της κύριας συνιστώσας ρεύματος (πρώτη αρμονική)

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1}$$

Συνήθως τα πλάτη των μεγαλύτερων αρμονικών από τρίτη και πάνω είναι μικρά και γι' αυτό τα παραλείπουμε οπότε ο τύπος παίρνει την μορφή:

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η χαρακτηριστική λειτουργίας ενισχυτή και η μεταβολή του ρεύματος εξόδου του i_a που προκαλείτε από την μεταβολή μιας ημιτονικής τάσεως u_g που εφαρμόζεται στην είσοδο του. Με αφετηρία το σημείο A, φαίνεται πώς παραμορφώνεται το ρεύμα εξόδου i_a σε σχέση με την τάση εισόδου του u_g . Το ρεύμα αυτό δεν είναι ημιτονοειδές και επομένως περιέχει αρμονικές δηλαδή παραμορφώνεται το σήμα ενίσχυσης.



Ένα ακόμα είδος παραμόρφωσης που δημιουργεί ο ενισχυτής οι παραμορφώσεις συχνότητας που προκύπτουν από την αδυναμία του να έχει την ίδια απόκριση σε όλες τις συχνότητες του ενισχυόμενου σήματος. Το μέγεθος των παραμορφώσεων συχνότητας εκτιμάται από τον συντελεστή M που ισούται με το λόγο του συντελεστή ενισχύσεως A_0 στις μέσες προς τον συντελεστή ενισχύσεως A στις ακραίες συχνότητες της περιοχής

$$M = \frac{A_0}{A}$$

Από το διάγραμμα καταλαβαίνουμε ακόμα ότι έχουμε ανομοιομορφίες στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων (M_u) όσο και των χαμηλών συχνοτήτων (M_x) από τους τύπους παρακάτω εκτιμάτε η τιμή της :

$$M_x = \frac{A_0}{A_x}$$

$$M_u = \frac{A_0}{A_u}$$

Ο ολικός συντελεστής παραμορφώσεων συχνότητας ενός πολυβαθμικού ενισχυτή ισούται με το γινόμενο των συντελεστών των επιμέρους βαθμίδων:

$$M_0 = M_1 * M_2 * M_3 * \dots$$

Οι παραμορφώσεις συχνότητας δεν γίνονται αντιληπτές από την ακοή μας, όταν οι συντελεστές βρίσκονται στα όρια $M_x =$

$M_u = 1.25-1.3$. οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μεταβολή 2-3 dB δηλαδή πολύ μικρή για να γίνει αντιληπτή.

Βασικές συνδεσμολογίες των τρανζίστορ

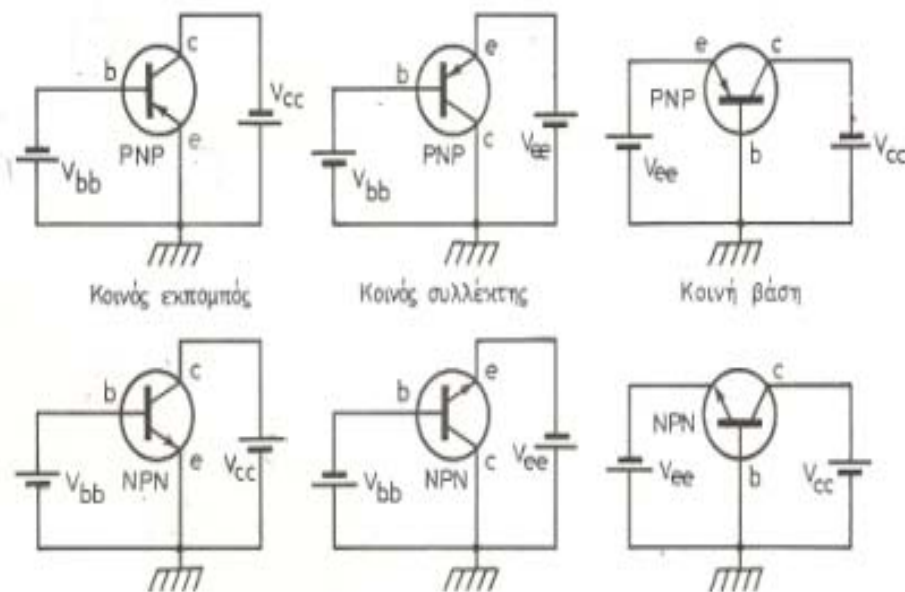
Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να συνδεθεί ένα τρανζίστορ σ' ένα κύκλωμα :

- με κοινή βάση
- με κοινό εκπομπό
- με κοινό συλλέκτη

Γενικά θα συμβολίζουμε με I_e ,το ρεύμα του εκπομπού ,με I_c το ρεύμα του συλλέκτη και με I_b το ρεύμα βάσεως. Την τάση ανάμεσα στους ακροδέκτες εκπομπού – βάσεως με V_{eb} και συλλέκτη – βάσεως με V_{cb} για το κύκλωμα κοινής βάσεως. Και για το κύκλωμα κοινού εκπομπού με V_{be} και με V_{ce} για το κύκλωμα κοινού συλλέκτη με V_{bc} και V_{ec} .

Με V_{ee} , V_{bb} , V_{cc} θα συμβολίζουμε τις τάσεις των πηγών που τροφοδοτούν κυκλώματα εκπομπού, βάσεως και συλλέκτη αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζουμε αυτές τις συνδεσμολογίες και για τρανζίστορ N-P-N και P-N-P.



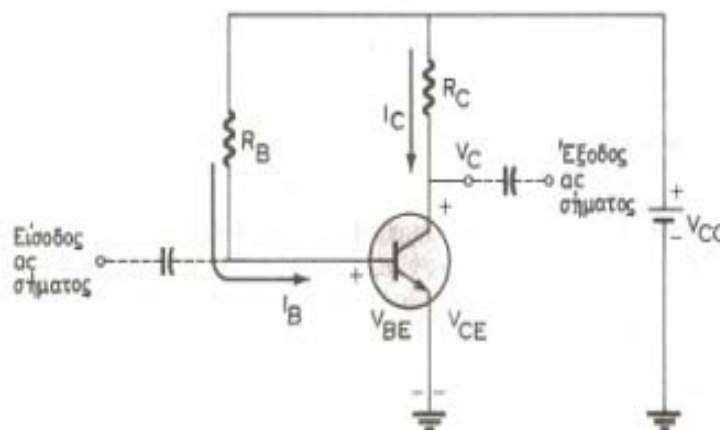
Παρακάτω γίνεται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών των τριών αυτών κυκλωμάτων το πιο χαρακτηριστικό είναι οι αντιστάσεις, εισόδου και εξόδου σε κάθε περίπτωση, και οι ενισχύσεις τάσεως και ρεύματος:

	Κοινή βάση	Κοινός εκπομπός	Κοινός συλλέκτης
Αντίσταση εισόδου	Χαμηλή (~ 50Ω)	Μέση (~ 1 kΩ)	Μεγάλη (300 kΩ)
Ενίσχυση ρεύματος	Χαμηλή (< 1)	Μεγάλη (50)	Μεγάλη (50)
Ενίσχυση τάσεως	Τυπική (20)	Μεγάλη (200)	Χαμηλή (< 1)
Ενίσχυση ισχύος	Τυπική τιμή (20)	Μεγάλη (10 000)	Μέση (50)
Αντίσταση εξόδου	Μεγάλη (~ 500 kΩ)	Μέση (50 kΩ)	Χαμηλή (~ 300Ω)
Αναστροφή φάσεως	Όχι	Ναι	Όχι

Για την κατασκευή στερεοφωνικού ενισχυτή γενικά, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούμε το κύκλωμα κοινού εκπομπού γιατί έχει τα ιδανικότερα χαρακτηριστικά. Δηλαδή παρόμοια αντίσταση εισόδου εξόδου με άλλα λόγια έχει πιο άμεση συνδεσιμότητα μεταξύ μίας ενισχυτικής βαθμίδας με μια άλλη και ακόμα έχουμε μεγάλη ενίσχυση ρεύματος, τάσεως εξόδου και ισχύος.

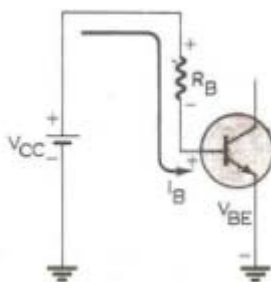
Κύκλωμα πολώσεως σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (CE)

Στην συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, ο εκπομπός είναι κοινός στο κύκλωμα εισόδου και εξόδου. Ένα τυπικό κύκλωμα πολώσεως σε συνδεσμολογία (CE) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Στο κύκλωμα αυτό θα υπολογίσουμε τις τάσεις V_{BE} και V_{CE} που απαιτούνται για την σωστή λειτουργία του, καθώς και το σημείο Q (σημείο ηρεμίας) γύρω από το οποίο πραγματοποιείτε η λειτουργία.

Ανάλυση του κυκλώματος εισόδου.



Για το κύκλωμα εισόδου όπως φαίνεται από το σχήμα , ο 2^{ος} κανόνας του Kirchhoff δίνει :

$$+V_{CC} - I_B \cdot R_B - V_{BE} = 0$$

Λύνουμε ως προς I_B :

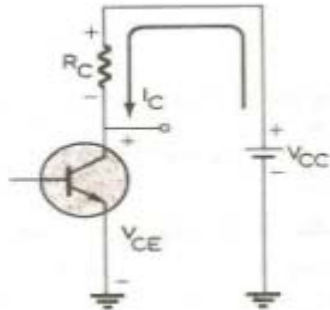
$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$$

Επειδή όμως η V_{BE} είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την V_{CC} , τότε προσεγγιστικά $V_{BE} = 0$ άρα έχουμε :

$$I_B \approx V_{CC} / R_B$$

Από την σχέση αυτήν υπολογίζουμε το I_B

Ανάλυση του κυκλώματος εξόδου.



Αρχικά να αναφερθεί ότι α θα θεωρήσουμε μια παράμετρο που θα την ονομάσουμε *απολαβή ρεύματος* του τρανζίστορ σε συνδεσμολογία (CE). Γενικά θα ισχύει ότι :

$$\alpha = I_c / I_E \quad 0.9 < \alpha < 1$$

I_c : ρεύμα εκπομπού

I_E : ρεύμα συλλέκτη

Γενικά στα κυκλώματα (CE) πολώσεως μπορούμε να θέσουμε ότι $I_c \approx I_E$, αφού $\alpha \approx 1$. Γνωρίζουμε ακόμα ότι ισχύει $I_c = \beta * I_B$, όπου β είναι μια κατασκευαστική σταθερά γνωστή για το συγκεκριμένο τρανζίστορ καθώς και το ρεύμα I_B , συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε το I_c το οποίο είναι και ανεξάρτητο της αντίστασης R_C .

Από τον 2^ο κανόνα Kirchhoff έχουμε :

$$V_{CC} - I_c * R_C - V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_c * R_C$$

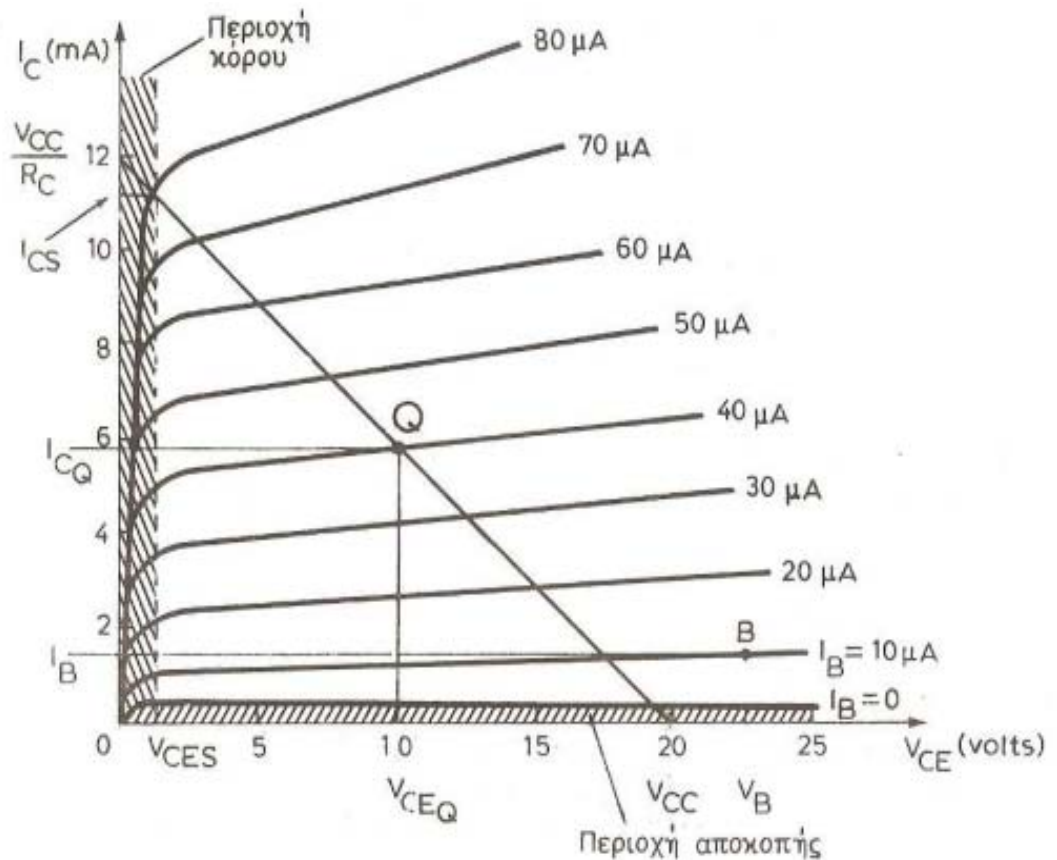
από την παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την V_{CE} καθώς όλα τα άλλα μεγέθη θα μας είναι γνωστά.

Ευθεία φόρτου και σημείο λειτουργίας

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου, καταρχάς θα χρησιμοποιήσουμε το κλασικό διάγραμμα της χαρακτηριστικής συνδεσμολογίας (CE) η οποία έχει άξονες $V_{CE} \rightarrow x$ και $I_C \rightarrow y$ σε βαθμολογημένους άξονες. Στην συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση $V_{CC} - I_C \cdot R_C - V_{CE} = 0$ και λύνουμε ως προς $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$, παρατηρούμε εύκολα ότι είναι ευθεία της μορφής $y = a \cdot x + \beta$ και συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τα σημεία τομής με τους άξονες x, y . Δηλαδή για να βρούμε το σημείο τομής με τον άξονα x θα μηδενίσουμε το ρεύμα I_C οπότε έχουμε $V_{CC} = V_{CE}$. Ανάλογα για να βρούμε το σημείο τομής με τον άξονα y θα μηδενίσουμε το $V_{CE} = 0$, άρα λύνουμε και ως προς $I_C = V_{CC} / R_C$.

Συνεπώς, μέχρι τώρα χαράξαμε την ευθεία φόρτου, για τον προσδιορισμό του σημείου ηρεμίας θα το υπολογίσουμε από το ρεύμα I_B , το οποίο όμως είναι γνωστό από την προηγούμενη σχέση $I_B \approx V_{CC} / R_B$.

Έστω ότι το $I_B = 40 \mu A$ τότε το σημείο ηρεμίας θα είναι όπως ακριβώς στο παρακάτω σχήμα :



Ρεύμα κόρου του τρανζίστορ.

Για την κανονική λειτουργία ενός τρανζίστορ χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής του και επί πλέον της πιστής αποδόσεως του σήματος εισόδου στην έξοδο (χωρίς παραμορφώσεις), θα πρέπει να μην είναι πολύ μεγάλο το ρεύμα του συλλέκτη I_c . το μέγιστο ρεύμα συλλέκτη υπολογίζεται από την σχέση :

$$I_{cs} \approx V_{cc} / R$$

αυτό επιτυγχάνεται, όταν: $V_{CE} \approx 0$

Το ρεύμα αυτό, λέγεται **ρεύμα κόρου** του τρανζίστορ, ταυτίζεται με το επάνω ακρότατο της ευθείας φόρτου (γραμμοσκιασμένη περιοχή), για παρόμοιο λόγο, η τάση V_{CES} λέγεται **τάση κόρου** και πρακτικά είναι της τάξεως μερικών δεκάτων βολτ.

Όταν το I_c είναι πολύ μεγάλο, η επαφή το συλλέκτη του τρανζίστορ θερμαίνεται υπερβολικά και το τρανζίστορ καταστρέφεται. Επίσης, όταν το I_c είναι πολύ μεγάλο, στην περίπτωση που το κύκλωμα εργάζεται ως ενισχυτής, δεν θα έχουμε πιστή αναπαραγωγή του σήματος εισόδου στην έξοδο.

Δηλαδή, θα έχουμε παραμόρφωση του σήματος στην έξοδο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι το κύκλωμα εργάζεται στα μη γραμμικά τμήματα των χαρακτηριστικών καμπυλών του που βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα

Για την βελτίωση ή αποφυγή της λειτουργίας του τρανζίστορ στην περιοχή του κόρου θα πρέπει να ισχύει κατά προσέγγιση:

$$V_{CE} > 0.5 \text{ V} , \text{ οπότε και } I_c < V_{cc} / R_C$$

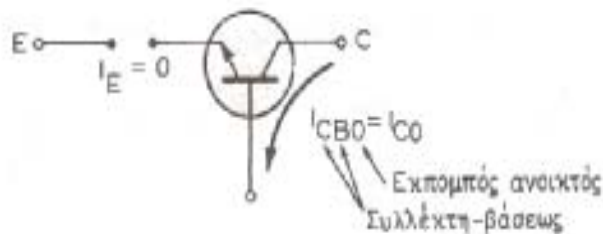
Ρεύμα αποκοπής του τρανζίστορ.

Για να γίνει το ρεύμα συλλέκτη I_c μηδέν, πρέπει, με βάση τη σχέση $I_c = \beta * I_B$, να γίνει και το I_B μηδέν. Το ρεύμα τότε $I_B = 0$, για το οποίο $I_c \approx 0$, ονομάζεται ρεύμα αποκοπής του τρανζίστορ.

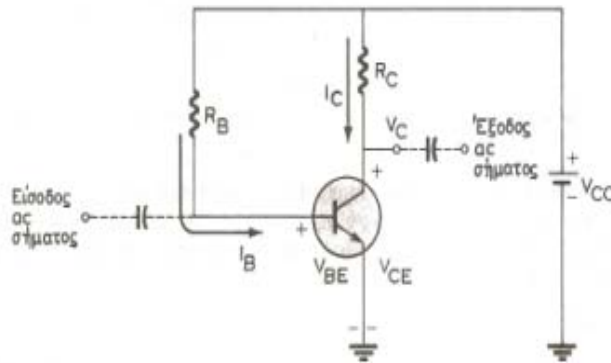
Η εξίσωση όμως $I_c = \beta * I_B$, ισχύει με προσέγγιση και συγκεκριμένα όταν το I_B γίνει μηδέν, το I_c δεν είναι μηδέν. Αποδεικνύεται ότι η ακριβής έκφραση της $I_c = \beta * I_B$ είναι:

$$I_C = \frac{I_{CO}}{1-\alpha} + \beta I_B = \frac{I_{CO}}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B$$

Το μέγεθος I_{CO} αποτελεί μια νέα παράμετρο του τρανζίστορ και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου. Το ρεύμα αυτό στην ουσία είναι το ρεύμα που ρέει από τον συλλέκτη στην βάση, όταν η είσοδος του εκπομπού είναι ανοικτή δηλαδή, $I_E = 0$.



Επίδραση της θερμοκρασίας στην πόλωση.



Το κύκλωμα σταθερής πολώσεως του σχήματος μπορεί να δώσει μεγάλη απολαβή αν εργασθεί ως ενισχυτής. Υπάρχουν όμως δυσκολίες στο να διατηρηθεί η πόλωση σταθερή, π.χ. να παραμείνει αμετάβλητο, το σημείο ηρεμίας Q . Αυτό οφείλεται στο ότι το I_C μεταβάλλεται μαζί με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, το I_C μεταβάλλεται επειδή μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και τα τρία παρακάτω μεγέθη, με τα οποία σχετίζεται:

- 1) Το ανάστροφο ρεύμα κόρου, I_{CO} , το οποίο διπλασιάζεται σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C .

2) Η τάση πολώσεως βάσεως - εκπομπού, V_{BE} , η οποία, με αύξηση της θερμοκρασίας κατά $1^{\circ}C$, ελαττώνεται κατά $2,5\text{ mV}$ οπότε σύμφωνα με την σχέση $I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$ προκύπτει αύξηση του I_B .

3) Η απολαβή του τρανζίστορ β , η οποία αυξάνει με τη θερμοκρασία.

Οι τιμές των μεγεθών αυτών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για ένα τυπικό τρανζίστορ πυριτίου, φαίνονται στο παρακάτω Πίνακα.

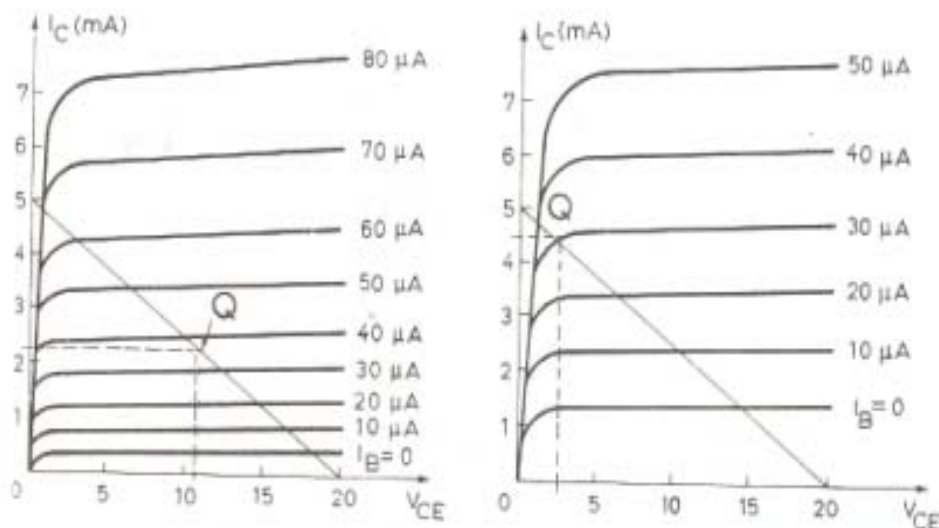
$T \rightarrow ^{\circ}C$	$I_{CO} \rightarrow \mu A$	β	$V_{BE} \rightarrow V$
-65	$0,2 \times 10^{-3}$	20	0,85
25	0,1	50	0,65
100	20	80	0,48
175	$3,3 \times 10^3$	120	0,3

Αν λάβομε υπόψη τις τιμές του πίνακα και την εξίσωση:

$$I_C = \frac{I_{CO}}{1-\alpha} + \beta I_B = \frac{I_{CO}}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B$$

συμπεραίνομε, ότι αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλει τις αρχικές συνθήκες πολώσεως. Συγκεκριμένα, μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικές του τρανζίστορ και το ρεύμα συλλέκτη I_C , που αντιστοιχεί στο σημείο ηρεμίας Q.

Για να επιδείξουμε την επίδραση που επιφέρουν τα I_{CO} και β στις συνθήκες πολώσεως, όταν αυτά μεταβάλλονται μαζί με τη θερμοκρασία, θεωρούμε τις χαρακτηριστικές του παρακάτω σχήματος. Οι χαρακτηριστικές αυτές έχουν ληφθεί σε θερμοκρασίες $25^{\circ}C$ και $100^{\circ}C$ για το ίδιο τρανζίστορ.



(α)

(β)

Από το σχήμα αυτό, βλέπομε ότι το σημείο ηρεμίας Q μετατοπίσθηκε πάνω στην ευθεία φόρτου σε μεγαλύτερες τιμές του I_C και ότι μάλιστα βρίσκεται κοντά στην περιοχή κόρου. Αυτό οφείλεται στο ότι το I_{CO} , καθώς επίσης και το β , αυξήθηκαν με τη θερμοκρασία. Η αύξηση του β μαζί με τη θερμοκρασία, φαίνεται από την αύξηση των αποστάσεων των χαρακτηριστικών κατά μήκος της ευθείας φόρτου. Για να πιστοποιήσομε αυτό, θεωρούμε το γενικό ορισμό του β , οπότε θα έχουμε:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

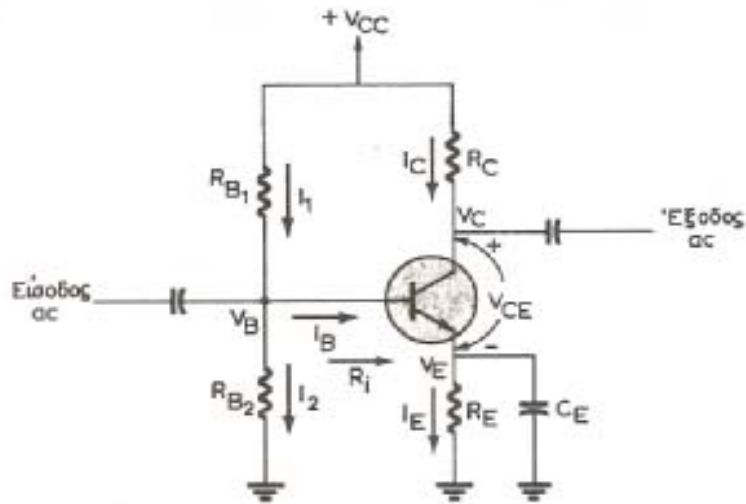
Για την ίδια μεταβολή ΔI_B στις χαρακτηριστικές (α) και (β), το ΔI_C στις (β) είναι μεγαλύτερο από ό,τι στις (α). Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση του β μαζί με τη θερμοκρασία, όπως άλλωστε δείχνει και ο Πίνακας.

Η μεταβολή του V_{BE} μαζί με τη θερμοκρασία δεν έχει μεγάλη επίδραση στις συνθήκες πολώσεως (π.χ. σημείο Q), όπως έχει η μεταβολή του β . Αναφέρομε μόνο, ότι, για να περιορίσομε την επίδραση του V_{BE} στις συνθήκες πολώσεως, συνδέομε μία αντίσταση R_E μεταξύ εκπομπού και γειώσεως.

Κύκλωμα πολώσεως ανεξάρτητο του β σε συνδεσμολογία (CE).

Όπως είδαμε στα προηγούμενως, το ρεύμα I_C , καθώς και οι συνθήκες πολώσεως γενικά μεταβάλλονται, όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία, γιατί τότε μεταβάλλονται κυρίως τα I_{CO} , V_{BE} και β . Με τη σύγχρονη όμως τεχνική, έχει επιτευχθεί ώστε το I_{CO} , το οποίο αποτελεί και μία παράμετρο, να είναι μηδαμινό σε καλής κατασκευής τρανζίστορ. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($\sim 100^\circ\text{O}$, να θεωρηθεί ότι έχει ελάχιστη επίδραση στις αρχικές συνθήκες πολώσεως. Η τάση πολώσεως V_{BE} μπορεί να καταστεί ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, αν ο εκπομπός γειωθεί μέσω της αντιστάσεως R_E . Επομένως το β είναι το μέγεθος εκείνο, το οποίο ουσιαστικά μεταβάλλει τις συνθήκες πολώσεως, όταν μεταβληθεί. Το β όπως είναι γνωστό, αυξάνει μαζί με τη θερμοκρασία, αλλά, και για τρανζίστορ που έχουν καταχωρηθεί με τον ίδιο αριθμό στους καταλόγους, μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικό. Για παράδειγμα έχει παρατηρηθεί ότι τρανζίστορ με τον ίδιο αριθμό καταχωρήσεως, μπορεί να έχουν $\beta = 125$ και $\beta = 300$ στην ίδια θερμοκρασία. Ιδιαίτερα μάλιστα για τρανζίστορ πυριτίου, το β παρουσιάζει μαζί με τη θερμοκρασία μεγαλύτερες μεταβολές από ότι στα τρανζίστορ γερμανίου.

Για να περιορισθεί η επίδραση του β στις συνθήκες πολώσεως, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ή αντικαθίσταται το τρανζίστορ, χρησιμοποιούμε το κύκλωμα του σχήματος:

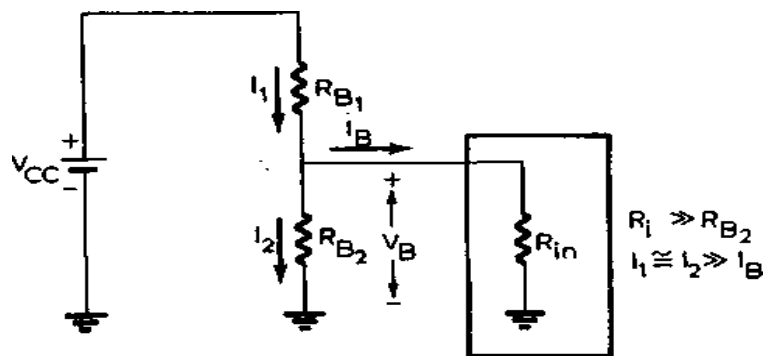


Σχήμα 1

Για να βρούμε τις τάσεις και τα ρεύματα πολώσεως, θεωρούμε το κύκλωμα εισόδου βάσεως - εκπομπού που δείχνει το παρακάτω σχήμα.

Για να αναλύσουμε το κύκλωμα αυτό θεωρούμε, ότι η αντίσταση εισόδου R_i είναι πολύ μεγαλύτερη της R_{B2} , δηλαδή $R_i \gg R_{B2}$.

Η αντίσταση εισόδου είναι ουσιαστικά η αντίσταση που θα μετρούσαμε με ένα ωμόμετρο μεταξύ βάσεως - γειώσεως στο κύκλωμα του σχήματος 1, η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2

Η παραπάνω υπόθεση ισχύει και στην πράξη. Με την παραδοχή αυτή, δεν ρέει κανένα ρεύμα προς τη βάση του τρανζίστορ ($I_B \approx 0$) και συνεπώς $I_1 \approx I_2$. Επομένως, οι αντιστάσεις R_{B1} και R_{B2} θεωρούνται συνδεδεμένες σε σειρά και ενεργούν σαν διαιρέτες τάσεως της V_{CC} . Έτσι, η τάση

V_B , που επικρατεί μεταξύ του κοινού σημείου συνδέσεως των R_{B1} και R_{B2} , είναι η ίδια μεταξύ βάσεως - γειώσεως ή, αλλιώς, ισούται με την τάση στα άκρα της R_{B2} . Οπότε, μπορούμε να γράψουμε:

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

Αν τώρα η V_E παριστάνει την τάση στα άκρα της R_E και η V_{BE} την τάση μεταξύ βάσεως - εκπομπού, μπορούμε να θέσουμε:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Το ρεύμα εκπομπού I_E υπολογίζεται από την τάση αυτή:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

Επειδή το $I_B \approx 0$

$$I_C \approx I_E$$

Η τάση V_{RC} στα άκρα της αντίστασης R_C θα είναι :

$$V_{RC} = I_C R_C$$

Η τάση μεταξύ συλλέκτη - γειώσεως θα είναι :

$$V_C = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - I_C R_C$$

Η τάση μεταξύ συλλέκτη εκπομπού (V_{CE}) θα είναι :

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

ή

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Σε όλη την προηγούμενη ανάλυση δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου το β . Συνεπώς, το κύκλωμα αυτό πολώσεως είναι στην πράξη ανεξάρτητο του τρανζίστορ καθώς και των μεταβολών της θερμοκρασίας. Γιατί, όπως είδαμε, η τάση της βάσεως V_B καθορίζεται από τις R_{B1} , R_{B2} και από την τάση της πηγής V_{CC} . Η τάση

εκπομπου V_E είναι σταθερή, επειδή και η V_B είναι σταθερή και περίπου ίση με αυτή, καθόσον $V_B \gg V_{BE}$. Είδαμε ότι $V_{BE} \approx 0,3 \text{ V}$ και $V_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$.

Η αντίσταση R_E καθορίζει τις τιμές των ρευμάτων I_E και I_C . Τέλος, η αντίσταση R_C καθορίζει την τάση του συλλέκτη και συνεπώς την τάση πολώσεως συλλέκτη - εκπομπου V_{CE} .

Η τάση της βάσεως V_B ρυθμίζεται από την R_{B2} , το ρεύμα συλλέκτη I_C από την H_E και η τάση συλλέκτη - εκπομπου από την R_C . Μεταβολή οποιουδήποτε άλλου στοιχείου του κυκλώματος, θα έχει μικρή επίδραση στις αρχικές συνθήκες πολώσεως. Ο πυκνωτής C_E αποτελεί μέρος του κυκλώματος, όταν το κύκλωμα εργάζεται ως ενισχυτής, δηλαδή με *εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο*. Η παρουσία του δεν μεταβάλλει τις συνθήκες πολώσεως. Το κύκλωμα αυτό λέγεται και **κύκλωμα πολώσεως με διαιρέτη τάσεως**.

Ανάδραση / ανατροφοδότηση στους ενισχυτές

Ανατροφοδότηση (feedback) ονομάζεται το φαινόμενο, κατά το οποίο ένα μέρος του σήματος εξόδου αφήνεται να επιστρέψει από την έξοδο και να εφαρμοσθεί στην είσοδο του ενισχυτή.

Υπάρχουν δύο τύποι ανατροφοδοτήσεως, η *αρνητική* και η *θετική*.

Αρνητική ανατροφοδότηση έχουμε, όταν όλο ή μέρος του σήματος εξόδου (τάσεως ή ρεύματος) επιστρέφει με κατάλληλη συνδεσμολογία στην είσοδο του ενισχυτή, κατά τρόπο ώστε το σήμα ανατροφοδοτήσεως (επιστροφής) να αφαιρείται από το αρχικό σήμα εισόδου.

Άρα το ολικό σήμα, που εφαρμόζεται κάθε φορά στην είσοδο ενός ενισχυτή με αρνητική ανατροφοδότηση, είναι το αρχικό σήμα εισόδου μείον το σήμα ανατροφοδοτήσεως.

Επειδή το αρχικό σήμα εισόδου μειώνεται με την αρνητική ανατροφοδότηση, ανάλογα μειώνεται και το σήμα εξόδου.

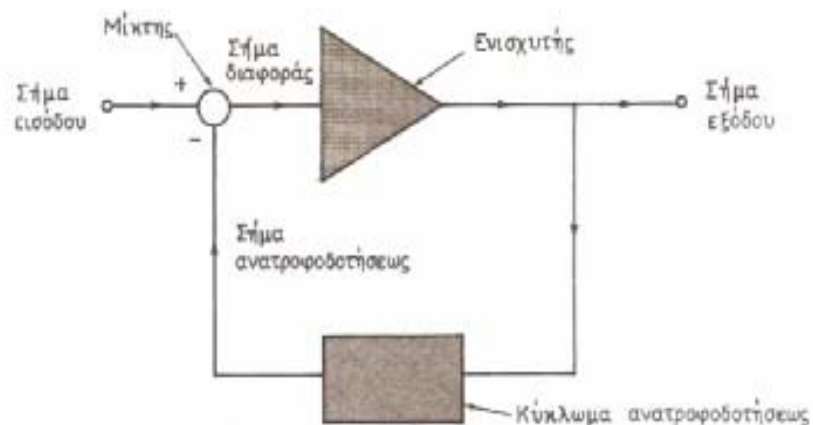
Για το λόγο αυτό, οι ενισχυτές με αρνητική ανατροφοδότηση χαρακτηρίζονται από μικρή απολαβή (κέρδος), σε σχέση με τους ενισχυτές χωρίς αρνητική ανατροφοδότηση.

Θετική ανατροφοδότηση έχουμε, όταν όλο ή μέρος του σήματος εξόδου (τάσεως ή ρεύματος) επιστρέφει με κατάλληλη συνδεσμολογία στην είσοδο του ενισχυτή κατά

τρόπο, ώστε το σήμα ανατροφοδότησεως (επιστροφής) να προστίθεται στο αρχικό σήμα εισόδου.

Γενικά στους ενισχυτές η θετική ανατροφοδότηση είναι ανεπιθύμητη, καθόσον ο ενισχυτής καθίσταται ασταθής και εργάζεται τότε σαν ταλαντωτής.

Η θετική ανατροφοδότηση χρησιμοποιείται σε ενισχυτές υψηλών συχνοτήτων όταν δηλαδή θέλουμε να μετατραπούν σε ταλαντωτές. Παρακάτω παρουσιάζουμε ένα γενικής μορφής διάγραμμα ενισχυτή με ανατροφοδότηση γενικά



Γενικές αρχές της ανατροφοδότησεως.

Το φαινόμενο της ανατροφοδότησεως βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Μία σημαντική εφαρμογή είναι στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Ειδικότερα, η αρνητική ανατροφοδότηση σε ένα ενισχυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους εξής λόγους:

α) Για να επιφέρει σταθεροποίηση στην απολαβή τάσεως ή ρεύματος.

β) Για να επιφέρει λειτουργία σε μεγαλύτερο γραμμικό μέρος των χαρακτηριστικών καμπυλών.

γ) Για να διευρύνει τη ζώνη διελεύσεως συχνοτήτων.

δ) Για να ελαττώσει ή να αυξήσει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου.

ε) Για να μειώσει το θόρυβο (παραμορφώσεις).

ζ) Για να περιορίσει τη μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του ενισχυτή από τα θερμικά αποτελέσματα.

Όταν αναφερόμαστε στη σταθεροποίηση της απολαβής, εννοούμε το να καταστήσουμε την απολαβή τάσεως ή ρεύματος λιγότερο εξαρτώμενη από τις παραμέτρους των τρανζίστορ.

Επιζητούμε γραμμικότητα στη λειτουργία των ενισχυτών, καθόσον θέλουμε να έχουμε στην έξοδο σήματα με μικρή παραμόρφωση.

Σε όλους γενικά τους ενισχυτές δημιουργούνται, λόγω θερμικών φαινομένων, ηλεκτρικά σήματα διαταραχής τυχαίας συμπεριφοράς, τα οποία ονομάζονται θόρυβοι.

Ο θόρυβος σε ενισχυτές με πολύ μικρό σήμα εισόδου, δημιουργεί ενοχλητικές καταστάσεις στην εξαγωγή πληροφοριών από το σήμα εξόδου. Η εξαγωγή πληροφοριών καθίσταται πολύ δύσκολη, όταν η τάξη μεγέθους του σήματος εξόδου δεν υπερβαίνει την τάξη μεγέθους του θορύβου. Το σήμα τότε εξόδου καλύπτεται από τους θορύβους.

Στην περίπτωση αυτή η ενίσχυση δεν έχει νόημα, αφού ενισχύοντας το σήμα, ενισχύεται εξίσου και ο θόρυβος. Για να περιορίσουμε τους θορύβους, χρησιμοποιούμε αρνητική ανατροφοδότηση.

Στους ενισχυτές ακουστικών σημάτων δημιουργούνται πολλές φορές παρασιτικές θετικές αναδράσεις, οι οποίες ακούγονται στο μεγάφωνο. Για την κατάργησή τους, κάθε στοιχείο του κυκλώματος (τροφοδοτική πηγή, αντιστάσεις), που μπορεί να δημιουργήσει παρασιτική θετική ανάδραση, παραλληλίζουμε με έναν πυκνωτή μεγάλης σχετικά χωρητικότητας.

Ανάλογα με την επένεργεια της ανατροφοδοτήσεως στην απολαβή, έχουμε τους εξής δύο βασικούς τύπους ανατροφοδοτήσεως.

α) Ανατροφοδότηση ρεύματος (current feedback).

β) Ανατροφοδότηση τάσεως (voltage feedback).

Το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό των δύο αυτών τύπων αρνητικής ανατροφοδοτήσεως είναι ότι έχουμε μείωση στην απολαβή.

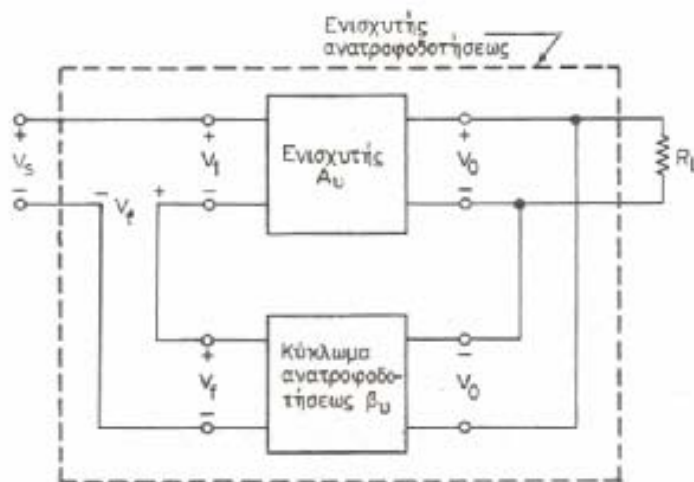
Μπορούμε επίσης να έχουμε και δύο άλλους τύπους ανατροφοδοτήσεως. Ο ένας ονομάζεται *ανατροφοδότηση*

παράλληλης διακλαδώσεως (shunt feedback) και ο άλλος ανατροφοδότηση σειράς (series feedback).

1. Ενισχυτές με ανατροφοδότηση τάσεως.

Στο σχήμα παρακάτω μπορούμε να παραστήσουμε αναλυτικά ένα ενισχυτή με ανατροφοδότηση τάσεως.

Η αρνητική ανατροφοδότηση τάσεως επιτυγχάνεται, όταν το μέρος που επιστρέφει από τη τάση εξόδου στην είσοδο του ενισχυτή είναι τέτοιο, ώστε να αφαιρείται από την τάση εισόδου.



Απολαβή τάσεως.

Στο σχήμα η τάση εξόδου V_o λαμβάνεται στα άκρα της αντιστάσεως φορτίου R_L , καθώς και του κυκλώματος ανατροφοδοτήσεως.

Ορίζουμε σαν ανάστροφη απολαβή τάσεως β_v του κυκλώματος ανατροφοδοτήσεως τον εξής λόγο:

$$\beta_v = \frac{V_f}{V_o}$$

όπου: V_f είναι η τάση του σήματος ανατροφοδοτήσεως ή αλλιώς η τάση του σήματος που επιστρέφει από την έξοδο στην είσοδο του ενισχυτή. Το β_v ονομάζεται και συντελεστής ανατροφοδοτήσεως τάσεως. Ορίζομε επίσης

σαν απολαβή τάσεως A_u του ανοικτού κυκλώματος του ενισχυτή χωρίς ανατροφοδότηση, το λόγο:

$$A_u = \frac{V_o}{V_f}$$

Όπου V_f η τάση εισόδου του ενισχυτή.

Εκτός από τις τάσεις V_f , V_1 υπάρχει και η τάση V_s του σήματος εισόδου, από το σχημα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$V_s = V_f + V_1$$

Οπότε η απολαβή της τάσεως A_{uf} του ενισχυτή ανοικτού κυκλώματος με ανατροφοδότηση θα ορίζεται από την σχέση:

$$A_{uf} = \frac{V_o}{V_f} = \frac{V_o}{V_1 + V_f} = \frac{\frac{V_o}{V_1}}{1 + \frac{V_f}{V_1} * \frac{V_o}{V_1}}$$

Από αντικατάσταση προκύπτει ότι :

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + \beta_v A_v}$$

Η σχέση αυτή είναι γενικής μορφής και ισχύει σε όλα τα κυκλώματα με ανατροφοδότηση. Πιο συγκεκριμένα, η αρνητική και η θετική ανατροφοδότηση ορίζονται ,όταν ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια.

Κριτήρια για αρνητική ανατροφοδότηση.

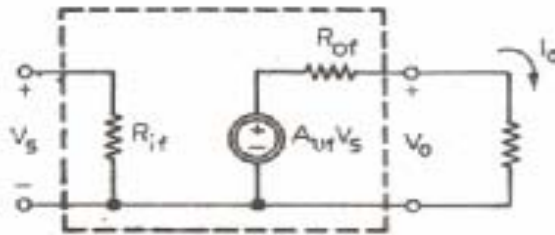
Θα πρέπει να ισχύει : $1 + \beta_v A_v > 1$

Κριτήρια για θετική ανατροφοδότηση.

Θα πρέπει να ισχύει : $1 + \beta_v A_v < 1$

Αντίσταση εισόδου

Θεωρούμε το παρακάτω κύκλωμα ως το ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή με ανατροφοδότηση τάσεως :



Οπότε για την αντίσταση εισόδου R_{if} ισχύει ότι :

$$R_{if} = R_i (1 + \beta_v A_v)$$

R_i : αντίσταση εισόδου χωρίς ανατροφοδότηση

R_{if} : αντίσταση εισόδου με ανατροφοδότηση

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αρνητικής ανατροφοδοτήσεως τάσεως, η αντίσταση εισόδου R_{if} είναι μεγαλύτερη της αντιστάσεως εισόδου R_i χωρίς ανατροφοδότηση. Αυτό οφείλεται στο ότι ικανοποιείται το πιο πάνω κριτήριο της αρνητικής ανατροφοδοτήσεως και, συνεπώς, η παρένθεση της παραπάνω σχέσεως είναι μεγαλύτερη της μονάδας.

Όταν ο ενισχυτής λειτουργεί με θετική ανατροφοδότηση, τότε ικανοποιείται το πιο πάνω κριτήριο της θετικής ανατροφοδοτήσεως και, συνεπώς, η R_{if} είναι μικρότερη της R_i .

Αντίσταση εξόδου

Για την αντίσταση εξόδου R_{of} ισχύει ότι :

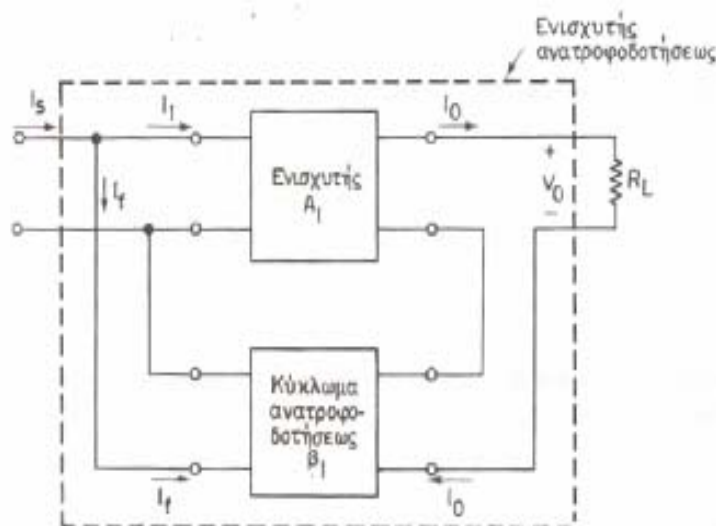
$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta_v A_v}$$

R_{of} : αντίσταση εξόδου με ανατροφοδότηση
 R_o : αντίσταση εξόδου χωρίς ανατροφοδότηση

Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση αρνητικής ανατροφοδοτήσεως, η αντίσταση εξόδου R_{of} είναι μικρότερη της αντιστάσεως εξόδου R_o χωρίς ανατροφοδότηση.

2. Ενισχυτές με ανατροφοδότηση ρεύματος.

Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά το κύκλωμα ενός ενισχυτή με ανατροφοδότηση ρεύματος, για αν είναι αρνητική θα πρέπει το ρεύμα που επιστρέφει από την έξοδο, να αφαιρείται από αυτό της εισόδου.



Απολαβή ρεύματος

Παρατηρούμε, ότι το ρεύμα εξόδου I_o τροφοδοτεί και την αντίσταση φορτίου R_L , και το κύκλωμα ανατροφοδοτήσεως.

Ορίζουμε σαν ανάστροφη απολαβή ρεύματος β_1 του κυκλώματος ανατροφοδοτήσεως τον εξής λόγο:

$$\beta_1 = \frac{I_f}{I_o}$$

Το β_1 ονομάζεται και συντελεστής ανατροφοδότησης ρεύματος. Η συνιστώσα ρεύματος που φθάνει στην είσοδο θα είναι:

$$I_f = \beta_1 * I_o$$

I_f : ρεύμα ανατροφοδοτήσεως

$$I_s = I_1 + \beta_1 * I_o$$

I_s : ρεύμα του σήματος εισόδου

Θα ορίσουμε τη απολαβή ρεύματος A_I του ενισχυτή χωρίς ανατροφοδότηση και με βραχυκυκλωμένη την έξοδο :

$$A_I = \frac{I_o}{I_1}$$

Με ανάλογο τρόπο θα ορίσουμε την απολαβή ρεύματος A_{IF} του ενισχυτή με ανατροφοδότηση και με βραχυκυκλωμένη την έξοδο :

$$A_{IF} = \frac{A_I}{1 + \beta_1 * A_I}$$

Η σχέση μας συνδέει την απολαβή ρεύματος με ανατροφοδότηση και βραχυκυκλωμένη έξοδο, με την απολαβή ρεύματος χωρίς ανατροφοδότηση και βραχυκυκλωμένη έξοδο.

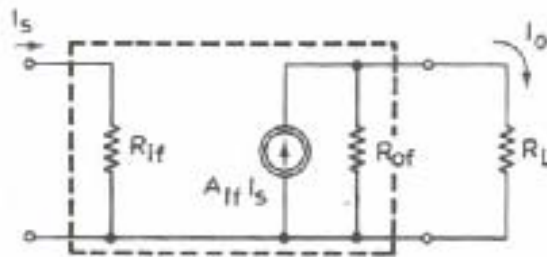
Επειδή στην πράξη $|A| \gg 1$, μπορούμε στην περίπτωση αυτή να παραλείψουμε τη μονάδα στον παρονομαστή της. Θα έχουμε τότε με προσέγγιση τη σχέση:

$$A_{IF} \approx \frac{1}{\beta_1}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι πολύ βασική, καθώς μας εκφράζει ότι η απολαβή ρεύματος με ανατροφοδότηση και βραχυκυκλωμένη έξοδο μπορεί να καταστεί ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του ενισχυτή και να εξαρτάται μόνο από τα στοιχεία του κυκλώματος ανατροφοδοτήσεως.

Αντίσταση εισόδου

Θεωρούμε το παρακάτω κύκλωμα ως το ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή με ανατροφοδότηση εντάσεως :



Για την αντίσταση εισόδου R_{if} ισχύει:

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \beta_1 * A_1}$$

Για να έχουμε αρνητική ανατροφοδότηση, θα πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο $(1 + \beta_1 A_1) > 1$.

Συνεπώς, η αντίσταση εισόδου ενός ενισχυτή με αρνητική ανατροφοδότηση καθίσταται μικρότερη της αντιστάσεως εισόδου χωρίς ανατροφοδότηση. Δηλαδή η αρνητική ανατροφοδότηση υποβιβάζει την υπάρχουσα αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

Αντίσταση εξόδου

Για την αντίσταση εξόδου R_{of} ισχύει ότι :

$$R_{of} = R_o * (1 + \beta_1 * A_1)$$

R_{of} : αντίσταση εξόδου με ανατροφοδότηση

R_o : αντίσταση εξόδου χωρίς ανατροφοδότηση

Από την εξίσωση αυτή, συμπεραίνουμε ότι ο ενισχυτής αρνητικής ανατροφοδοτήσεως έχει την αντίσταση εξόδου του αυξημένη κατά τον παράγοντα $(1 +$

$\beta_1 \cdot A_1$), συγκριτικά με τον ενισχυτή χωρίς ανατροφοδότηση.

Γενικά παρουσιάζουμε σε πίνακα τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης για την ανατροφοδότηση στις παραμέτρους του ενισχυτή:

Τύπος ανατροφοδοτήσεως	Απολαβή		Αντίσταση	
	Τάσεως (2)	Ρεύματος (3)	Εισόδου	Εξόδου
Τάσεως (σχ. 4.2α)	ελάττωση	αμετάβλητη	αύξηση	ελάττωση
Ρεύματος (σχ. 4.3α)	αμετάβλητη	ελάττωση	ελάττωση	αύξηση

3. Επίδραση της ανατροφοδοτήσεως στην απόκριση συχνότητας.

Διαπιστώσαμε ως τώρα ότι η ανατροφοδότηση σε έναν ενισχυτή μεταβάλλει την απολαβή (ρεύματος και τάσεως) καθώς και τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Συνεπώς, θα πρέπει η ανατροφοδότηση να μεταβάλλει και την απόκριση συχνότητας του ενισχυτή.

Για να βρούμε πώς μεταβάλλεται η συχνότητα ενός ενισχυτή, λόγω της ανατροφοδοτήσεως, θεωρούμε δύο βασικές συχνότητες, που αναφέρονται στο κύκλωμα του ενισχυτή χωρίς ανατροφοδότηση.

Οι δύο αυτές βασικές συχνότητες ονομάζονται αντίστοιχα κατώτερη συχνότητα αποκοπής f_1 και ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_2 . Οι συχνότητες αυτές καθορίζονται από την καμπύλη αποκρίσεως του ενισχυτή για απολαβή 3 dB λιγότερη από τη μέγιστη απολαβή, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.

Για τον ίδιο ενισχυτή με ανατροφοδότηση, ονομάζονται αντίστοιχα κατώτερη συχνότητα αποκοπής f_{1f} και ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_{2f} . Οι συχνότητες αυτές καθορίζονται από την καμπύλη αποκρίσεως του ενισχυτή με ανατροφοδότηση για απολαβή 3 dB λιγότερη από τη μέγιστη απολαβή, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Οι συχνότητες αυτές αποκοπής, με ανατροφοδότηση και χωρίς ανατροφοδότηση, συνδέονται μεταξύ τους με τις πιο κάτω σχέσεις:

$$f_{1f} = \frac{f_1}{1 + \beta * A} \quad 1$$

$$f_{2f} = f_2(1 + \beta A) \quad 2$$

Για απλούστευση στο συμβολισμό, έχουμε παραλείψει τους δείκτες I και u στις παραμέτρους β και A, ανάλογα με το αν αναφερόμαστε σε ανατροφοδότηση ρεύματος ή τάσεως. Από τις σχέσεις (1) και (2), συμπεραίνουμε ότι η αρνητική ανατροφοδότηση επιφέρει μείωση στην κατώτερη συχνότητα αποκοπής f_1 ενώ επιφέρει αύξηση στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_2 . Δηλαδή:

$$f_{1f} < f_1 \quad \text{και} \quad f_{2f} > f_2 \quad \text{εφόσον} \\ 1 + \beta * A > 1$$

ενώ για θετική ανατροφοδότηση έχουμε:

$$f_{1f} > f_1 \quad \text{και} \quad f_{2f} < f_2 \quad \text{εφόσον} \\ 1 + \beta * A < 1$$

Συνεπώς, όταν ο ενισχυτής εργάζεται με ανατροφοδότηση αρνητική ή θετική, θα μεταβάλλεται και το εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων

Ορίζουμε, σαν εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων (Band-Width) η διαφορά των συχνοτήτων f_2 μείον f_1 , για απολαβή μέχρι 3 dB κάτω της μέγιστης απολαβής. Δηλαδή:

$$BW = f_2 - f_1$$

Όταν ο ενισχυτής εργάζεται με ανατροφοδότηση, τότε το εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων προκύπτει από τη διαφορά των σχέσεων (2) και (1). Δηλαδή:

$$BW_f = f_{2f} - f_{1f} \Rightarrow BW = \frac{f_2(1 + \beta A)^2 - f_1}{1 + \beta A} \quad 3$$

Η σχέση (3) μπορεί να γραφεί με προσέγγιση, υποθέτοντας ότι η κατώτερη συχνότητα αποκοπής f_{1T} , είναι πολύ μικρή, σχετικά με την ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_2 . Τότε θα έχουμε:

$$BW = f_2 - f_1 \approx f_2$$

Συνεπώς η (3) γίνεται :

$$BW_f = f_{2f} - f_{1f} \approx f_2 (1 + \beta * A)$$

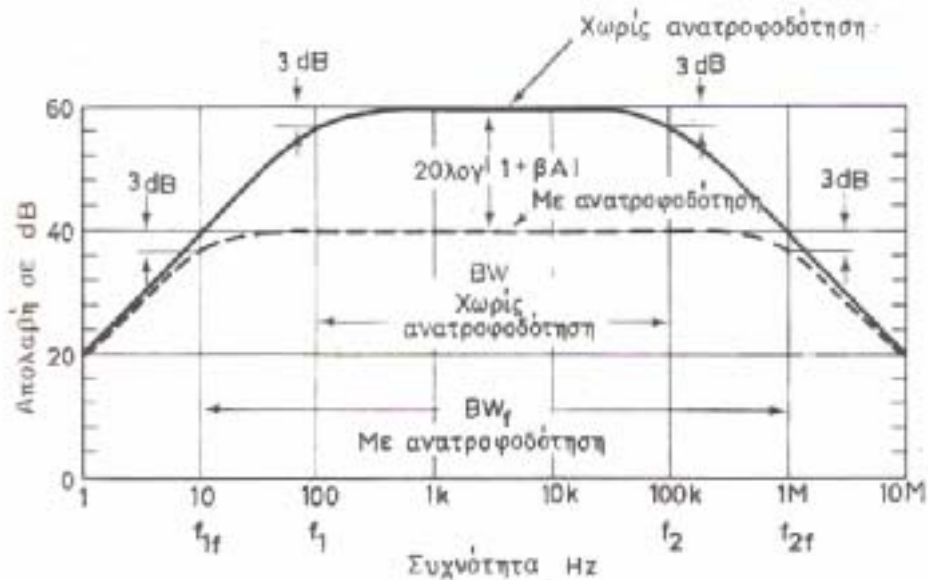
Δηλαδή:

$$BW_f \approx BW (1 + \beta * A) \quad 4$$

Η σχέση (4) συνδέει το εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων από ένα ενισχυτή, που λειτουργεί με ανατροφοδότηση, με το εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων του ίδιου ενισχυτή, που λειτουργεί χωρίς ανατροφοδότηση.

Από την (4), παρατηρούμε ότι το εύρος της ζώνης διελεύσεως συχνοτήτων αυξάνεται κατά τον παράγοντα $(1 + \beta A)$, όταν ο ενισχυτής εργάζεται με αρνητική ανατροφοδότηση.

Αν ο ενισχυτής εργάζεται με θετική ανατροφοδότηση, τότε έχουμε μείωση του BW_f , συγκριτικά με το BW κατά τον παράγοντα $(1 + \beta A)$. Το σχήμα παρακάτω απεικονίζει την απόκριση συχνότητας ενός ενισχυτή. Δείχνει δηλαδή, τι συχνότητες διέρχονται μέσα από τον ενισχυτή και πώς μεταβάλλεται η απολαβή με τη συχνότητα. Η συμπαγής καμπύλη αναφέρεται στην περίπτωση χωρίς ανατροφοδότηση και η διακεκομμένη με ανατροφοδότηση.



Παρατηρούμε ότι το εύρος της ζώνης διελύσεως συχνοτήτων BW_f με ανατροφοδότηση αυξήθηκε κατά 10 φορές, συγκριτικά με το εύρος BW χωρίς ανατροφοδότηση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον ίδιο παράγοντα (10) ελαττώθηκε η απολαβή του ενισχυτή με ανατροφοδότηση, συγκριτικά με την απολαβή χωρίς ανατροφοδότηση.

Συνεπώς ότι κερδίζουμε σε διεύρυνση στο εύρος συχνοτήτων κατά τον ίδιο παράγοντα, το χάνουμε σε απολαβή, όταν ο ενισχυτής εργάζεται με ανατροφοδότηση.

4. Επίδραση της ανατροφοδοτήσεως στη μη γραμμική παραμόρφωση και στο θόρυβο.

Η αρνητική ανατροφοδότηση στους ενισχυτές, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μη γραμμικής παραμορφώσεως. Συγκεκριμένα, η ανατροφοδότηση συμβάλλει στη μείωση του πλάτους του παραμορφωμένου σήματος.

Αν συμβολίσουμε με D_f και D τα πλάτη των παραμορφωμένων σημάτων με ανατροφοδότηση και χωρίς ανατροφοδότηση, τότε η σχέση που τα συνδέει είναι η εξής:

$$D_f = \frac{D}{1 - \beta A}$$

όπου: β και A αναφέρονται στην ανατροφοδότηση τάσεως.

Επειδή $(1 + \beta A) > 1 \Rightarrow D_f > D$

Γενικά, σε κάθε ενισχυτή με ανατροφοδότηση, επειδή μέρος του σήματος εξόδου επιστρέφει στην είσοδο του ενισχυτή, το πλάτος του σήματος εξόδου είναι μικρότερο, συγκριτικά με εκείνο χωρίς ανατροφοδότηση. Αυτό έχει σαν συνέπεια, σήματα παραμορφώσεως, καθώς και θόρυβοι που παράγονται στα κυκλώματα του ενισχυτή, να υφίστανται σημαντική μείωση στο πλάτος τους όταν ο ενισχυτής εργάζεται με ανατροφοδότηση. Αυτό άλλωστε φανερώνει και η παραπάνω σχέση.

Ενισχυτές ισχύος

Ταξινόμηση και κατηγορίες ενισχυτών ισχύος.

Οι ενισχυτές ισχύος μπορούν να χωρισθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με την τάξη στην οποία λειτουργούν. Οι βασικές τάξεις λειτουργίας ενός ενισχυτή είναι τρεις:

α) Τάξη Α. β) Τάξη Β και γ) Τάξη C. Μερικές όμως φορές, ένας ενισχυτής υποχρεώνεται να λειτουργήσει σε κάποια ενδιάμεση τάξη η οποία αποτελεί συνδυασμό δύο βασικών τάξεων. Έτσι, έχουμε περιπτώσεις λειτουργίας ενός ενισχυτή σε τάξη ΑΒ.

Οι ενισχυτές μικρού σήματος λειτουργούν κυρίως σε τάξη Α.

Όταν ένας ενισχυτής λειτουργεί σε τάξη Α, έχει σήμα στην έξοδο καθ' όλη τη διάρκεια που εφαρμόζεται σήμα στην είσοδο.

Ένας ενισχυτής λειτουργεί σε τάξη Β, όταν το σήμα εισόδου υφίσταται απλή ανόρθωση, δηλαδή η έξοδος είναι ένα μισό ανορθωμένο σήμα.

Συνεπώς, για να λειτουργήσει ένας ενισχυτής σε τάξη Β και να έχουμε το πλήρες σήμα στην έξοδο, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε δύο τρανζίστορ σε διάταξη συμμετρικής συνδεσμολογίας.

Ενισχυτές σε τάξη ΑΒ, όπως άλλωστε φανερώνει και το όνομα της τάξεως, αποτελούν ένα συνδυασμό της λειτουργίας των τάξεων Α και Β. Στην περίπτωση αυτή το σήμα εξόδου μοιάζει με το σήμα εισόδου κατά το περισσότερο μέρος.

Οι ενισχυτές που λειτουργούν σε τάξη C εμφανίζουν στην έξοδο τους ένα μόνο τμήμα της ημιπεριόδου του σήματος εισόδου και έχουν συνήθως σαν φορτίο ένα συντονιζόμενο κύκλωμα.

Ένας ενισχυτής σε τάξη C χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη απόδοση ισχύος. Οι ενισχυτές σε τάξη C βρίσκουν εφαρμογές στους πομπούς τηλεόρασης και ραδιοφωνίας.

Η τάξη λειτουργίας ενός ενισχυτή καθορίζεται από την εκλογή του σημείου λειτουργίας του, ή, όπως λέγεται, σημείου ηρεμίας Q.

Η εκλογή του σημείου λειτουργίας εξαρτάται από την ολική μεταβολή του σήματος, δηλαδή από τη μεταβολή από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak) και τη μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος του τρανζίστορ.

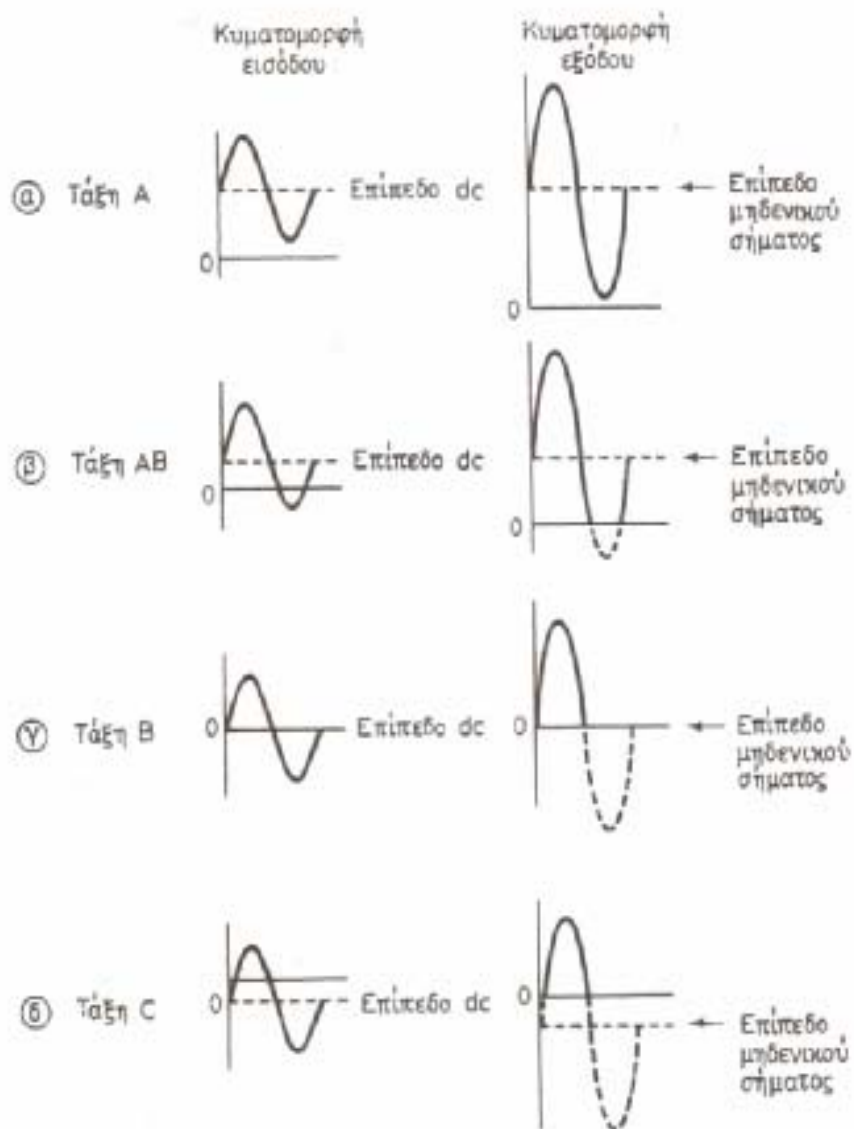
Οι ενισχυτές ισχύος παρουσιάζουν δύο κοινά χαρακτηριστικά:

α) Είναι όλοι ενισχυτές μεγάλων σημάτων και

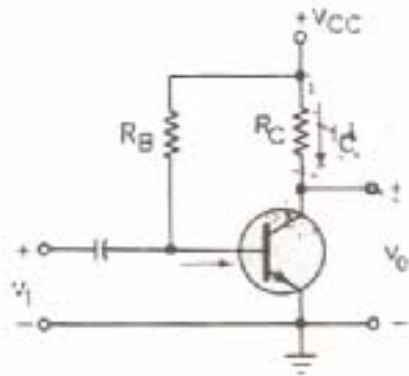
β) η λειτουργία τους δεν είναι γενικά γραμμική.

Η μη γραμμική λειτουργία σημαίνει, ότι οι κυματομορφές εξόδου δεν έχουν την ίδια μορφή με τις κυματομορφές εισόδου. Εκτός δηλαδή από την ενίσχυση, έχει επέλθει και παραμόρφωση στην κυματομορφή.

Παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές εισόδου εξόδου στις διάφορες τάξεις λειτουργίας:



Παρακάτω βλέπουμε την διάταξη τρανζίστορ με σταθερή πόλωση και θα δείξουμε πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτής ισχύος τάξεως Α.



Αν για το κύκλωμα αυτό μας δίνονται :

$$R_C = 4 \Omega$$

$$R_B = 470 \Omega$$

$V_{CC} = 10 \text{ V}$, καθώς και οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του τρανζίστορ

Αρχικά θα πρέπει να βρούμε την ευθεία φόρτου και το σημείο ηρεμίας -λειτουργίας Q. Στη συνέχεια, θεωρούμε ότι ένας παλμός ημιτονοειδούς μορφής εφαρμόζεται στην είσοδο, με ρεύμα κορυφής της βάσεως $I_b = 20 \text{ mA}$ (40 mA $\rho - \rho$) και επιζητούμε να υπολογίσουμε την κυματομορφή του ρεύματος συλλέκτη, δηλαδή το I_c .

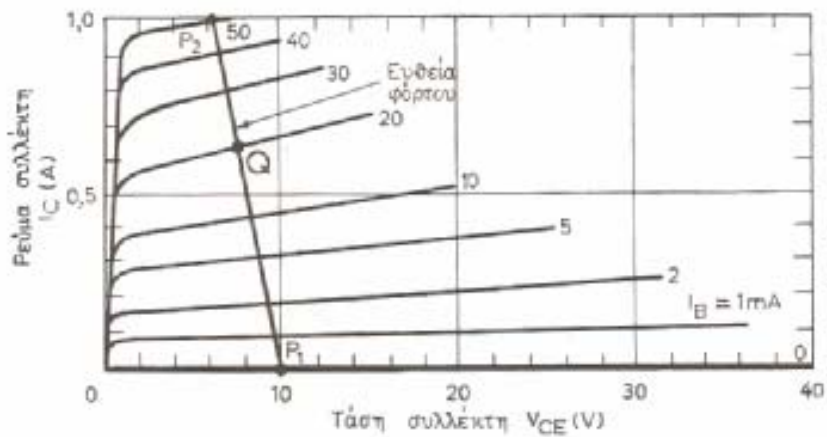
$$\text{Γνωρίζουμε ότι : } V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου, παρατηρούμε ότι όταν $I_c = 0$, τότε $V_{CC} = V_{CE} = 10 \text{ V}$, δηλαδή το ένα σημείο είναι το P1. Το άλλο σταθερό σημείο P2 της ευθείας φόρτου αντιστοιχεί σε ρεύμα συλλέκτη $I_C = 1 \text{ A}$. Η πτώση τάσεως τότε στα άκρα της R_C είναι 4 V . Συνεπώς: Δηλαδή, το P2 έχει συντεταγμένες $V_{CE} = 6 \text{ V}$, $I = 1 \text{ A}$. Η ευθεία φόρτου ενώνει στην περίπτωση αυτή τα σημεία P1 και P2.

Για να βρούμε το σημείο λειτουργίας Q θα πρέπει να βρούμε το ρεύμα βάσεως I_B .

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$$

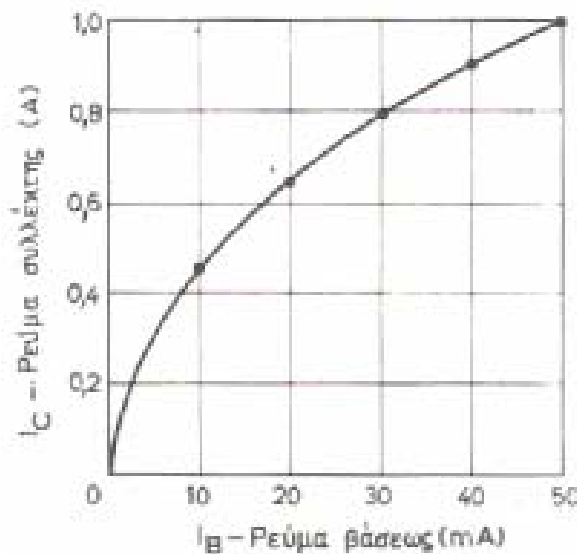
Για τρανζίστορ πυριτίου η πτώση τάσεως μεταξύ βάσεως και εκπομπού θα είναι $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$ άρα από τον τύπο το $I_B = 20 \text{ mA}$.



Η τομή της ευθείας φόρτου με την καμπύλη $I_B = 20 \text{ mA}$ μας προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας Q. Το σημείο λειτουργίας έχει συντεταγμένες $I_C \approx 0.65 \text{ A}$, $V_{CE} \approx 7.4 \text{ V}$. Προσδιορίζουμε τώρα γραφικά τη σχέση μεταξύ του ρεύματος βάσεως I_B και του ρεύματος συλλέκτη I_C .

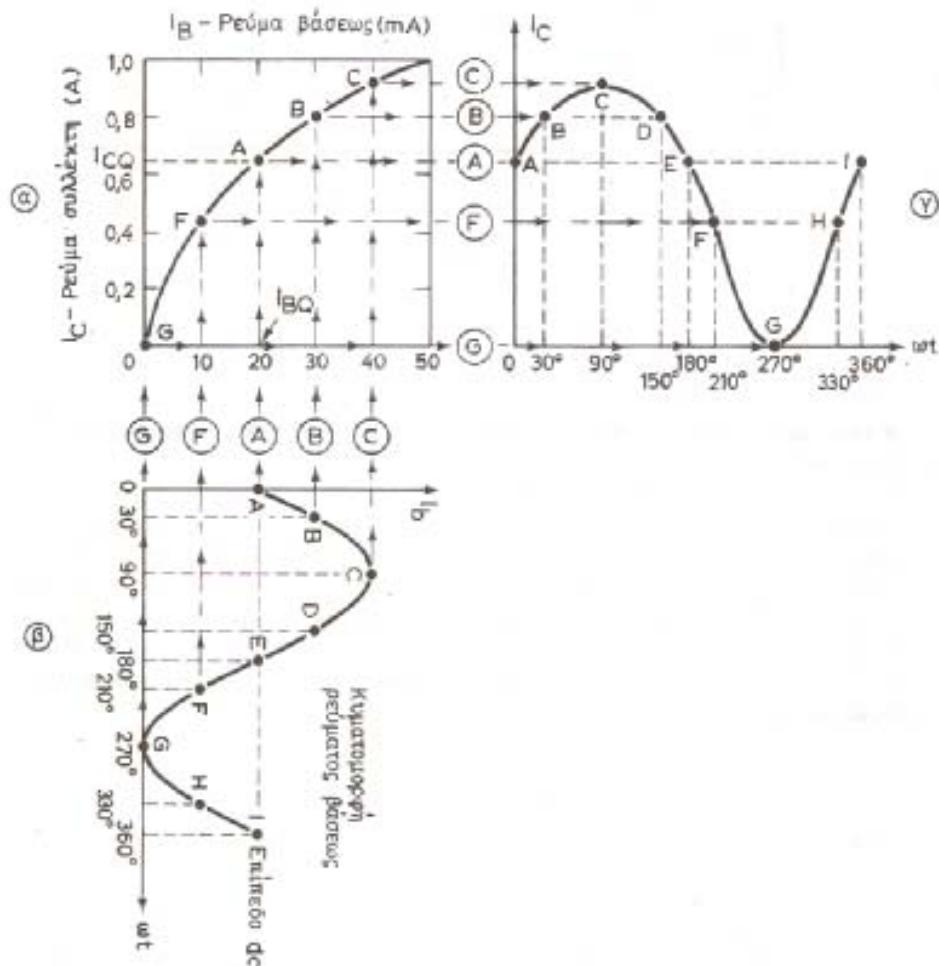
Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζουμε ένα πίνακα τιμών με δύο στήλες. Στη μια θέτουμε σαν τιμές του $I_B = 0, 1, 2, \dots, 50 \text{ mA}$ και στην άλλη τιμές του I_C , που αντιστοιχούν στα σημεία τομής των I_B με την ευθεία φόρτου.

Η ομαλή ένωση όλων αυτών των σημείων σε συντεταγμένες I_B και I_C θα μας δώσει την καμπύλη του παρακάτω σχήματος. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη μεταφοράς ρεύματος.



Στη συνέχεια, κάτω από την καμπύλη μεταφοράς σχεδιάζουμε την ημιτονοειδή κυματομορφή του I_b , σαν συνάρτηση του χρόνου, στην περίπτωση μας της φάσεως ωt (β).

Δεξιά της καμπύλης μεταφοράς σχεδιάζουμε τις αντίστοιχες τιμές του I_c σαν συνάρτηση της φάσεως (ωt), (γ). Η όλη γραφική διαδικασία φαίνεται παρακάτω.



Παρατηρούμε ότι η καμπύλη εισόδου (β) είναι μια καμπύλη πλήρως ημιτονοειδής με μέγιστο $I_B = 40$ mA. Η καμπύλη εξόδου είναι ένα ημιτονοειδές σήμα όχι τέλειο ημίτονο το οποίο όμως είναι ενισχυμένο σε σχέση με της εισόδου με τιμή στα $I_C = 0.9$ A. Συνεπώς η κυματομορφή εξόδου έχει υποστεί παραμόρφωση.

Υπολογισμοί στους Ενισχυτές ισχύος.

Στους ενισχυτές ισχύος μας ενδιαφέρει κυρίως η απολαβή ισχύος, ενώ στους ενισχυτές μικρών σημάτων η απολαβή στην τάση ή στο ρεύμα.

Στους ενισχυτές ισχύος μας ενδιαφέρει επίσης και η απόδοση με την οποία παίρνουμε ισχύ στην έξοδο.

Ένα άλλο στοιχείο, που μας απασχολεί στους ενισχυτές ισχύος είναι η *ισχύς που καταναλώνεται από το τρανζίστορ*. Η ισχύς αυτή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, γιατί σε αντίθετη περίπτωση επέρχεται καταστροφή του τρανζίστορ.

Απόδοση ισχύος η .

Σαν απόδοση ισχύος η ορίζουμε το λόγο της εναλλασσόμενης ισχύος $P_{o(ac)}$ που αποδίδεται στο φορτίο διά της συνεχούς ισχύος $P_{i(dc)}$, που παρέχουν οι πηγές συνεχούς τάσεως. Δηλαδή, η επί της % απόδοση είναι:

$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} * 100$$

Η ισχύς του συνεχούς $P_{i(dc)}$, η οποία μπορεί να θεωρηθεί και σαν ισχύς εισόδου, είναι ίση με:

$$P_{dc} = V_{CC} * I_{CQ}$$

Όπου V_{CC} η συνεχής τάση πολώσεως του συλλέκτη και I_{CQ} το ρεύμα συλλέκτη που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας Q.

Η ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος $P_{o(ac)}$, που αποδίδεται στο φορτίο, δηλαδή στην έξοδο.

$$P_{ac} = \frac{(I_{p-p})^2 * R_C}{8}$$

Όπου I_{p-p} συμβολίζει το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή

Με τις πιο πάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση ισχύος οποιουδήποτε ενισχυτή ισχύος.

Ο υπολογισμός της αποδόσεως ισχύος η είναι ένα στοιχείο που θα πρέπει να μας απασχολεί στους ενισχυτές ισχύος, καθόσον οι ισχύς στους ενισχυτές ισχύος είναι της τάξεως αρκετών (W), ενώ στους ενισχυτές μικρών σημάτων είναι μερικών μόνο εκατοντάδων (mW).

Μέγιστη ισχύς καταναλισκόμενη από τρανζίστορ

Με προσεγγίσεις η ολική ισχύς P_T , που καταναλώνεται μέσα σε ένα τρανζίστορ είναι:

$$P_T \approx P_C \approx I_C * V_{CE}$$

Ένας κατασκευαστής τρανζίστορ μας παρέχει την τιμή της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος για το τρανζίστορ στους 25°C. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύ του τρανζίστορ χωρίς απορροφητή θερμότητας. Προφανώς, αν τοποθετηθούν απορροφητές θερμότητας (ψύχτρες), τότε η τιμή της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύς θα μεγαλώσει.

Στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας ενός τρανζίστορ, το ρεύμα που περνά μέσα από αυτό είναι κυρίως το ρεύμα εκπομπού-συλλέκτη. Κατά τη διέλευση του μέσα από το τρανζίστορ, το ρεύμα αυτό περνά από περιοχές που έχουν διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση. Επομένως παράγει διαφορετικά ποσά θερμότητας στη μονάδα του χρόνου, στα διάφορα σημεία του τρανζίστορ.

Η επαφή του εκπομπού παρουσιάζει μικρή ηλεκτρική αντίσταση και, συνεπώς, η θερμότητα που παράγεται στην επαφή αυτή είναι μικρή.

Η επαφή όμως του συλλέκτη παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση και άρα στην επαφή αυτή παράγεται μεγάλη θερμότητα, για αυτόν τον λόγο τοποθετούμε ψύχτρες στα τρανζίστορ έτσι ώστε να διασφαλίσουμε την σωστή λειτουργία τους.

Απορροφητής θερμότητας.

Η θερμότητα που αναπτύσσεται στις ενώσεις συλλέκτη και βάσεως στο τρανζίστορ μεταφέρεται στο μεταλλικό περίβλημα του τρανζίστορ και μετά διά αγωγής και ακτινοβολίας διασκορπίζεται στο περιβάλλον.

Όταν η ισχύς που καταναλώνεται στο συλλέκτη υπερβεί κάποιο όριο, η επιφάνεια του τρανζίστορ δεν επαρκεί για να αποβάλλει στο περιβάλλον τη θερμότητα που αναπτύσσεται κρατώντας τη θερμοκρασία της ενώσεως συλλέκτη μέσα στα επιτρεπτά όρια. Είναι τότε ανάγκη να χρησιμοποιήσουμε έναν απορροφητή θερμότητας απορροφητής θερμότητας είναι ένα μεταλλικό σώμα με μικρή θερμική αντίσταση σε σχήμα κατάλληλα μελετημένο. Ο απορροφητής αυτός τοποθετείται σε θερμική επαφή (αγωγή) με το τρανζίστορ και έτσι βοηθά

στην απαγωγή και την ακτινοβολία της θερμότητας στο περιβάλλον.

Κάθε απορροφητής θερμότητας χαρακτηρίζεται επίσης και από τη θερμική αντίσταση μεταξύ της επιφάνειας του και του περιβάλλοντος.

Στην πράξη καταβάλλεται προσπάθεια, ώστε η θερμική επαφή μεταξύ της επιφάνειας του τρανζίστορ και του απορροφητή θερμότητας να είναι τέλεια. Συνεπώς, στην επαφή αυτή παρουσιάζεται μικρή πτώση (μεταβολή) θερμοκρασίας.

Για το λόγο αυτό, μεταξύ της βάσεως στηρίξεως του τρανζίστορ και του απορροφητή παρεμβάλλεται ένα ειδικό γράσο σιλικόνης. Το γράσο αυτό γεμίζει τα διάκενα αέρα και έτσι εξασφαλίζεται βελτιωμένη θερμική επαφή (αγωγή) μεταξύ τους.

Υλικά όμως που έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα, έχουν επίσης και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πρακτικές δυσκολίες, όταν χρειάζεται ηλεκτρική μόνωση του συλλέκτη. Στα τρανζίστορ ισχύος η θήκη του τρανζίστορ αποτελεί και το συλλέκτη, οπότε το μεταξύ τους μονωτικό, που συνήθως είναι μίκα, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτότερο.

Θερμική αντίσταση K

Η θερμική αντίσταση K αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος του τρανζίστορ και συμβολίζεται με K. Γενικά, για τα τρανζίστορ πυριτίου η μέγιστη θερμοκρασία αντοχής της επαφής του συλλέκτη είναι γύρω στους 150 °C, ενώ για τα τρανζίστορ γερμανίου γύρω στους 75 °C.

Η μέγιστη αυτή θερμοκρασία καθορίζει γενικά και την αντοχή του υλικού του τρανζίστορ, γι' αυτό σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να την υπερβαίνουμε.

Η θερμοκρασία αυτή καθορίζει και τη μέγιστη ισχύ που καταναλίσκεται από το τρανζίστορ χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του.

Η μέγιστη θερμοκρασία T_j της επαφής του συλλέκτη συνδέεται με την ολική καταναλισκόμενη ισχύ P_T , με την εξής σχέση:

$$P_T \approx P_C \approx \frac{T_j - T_a}{K}$$

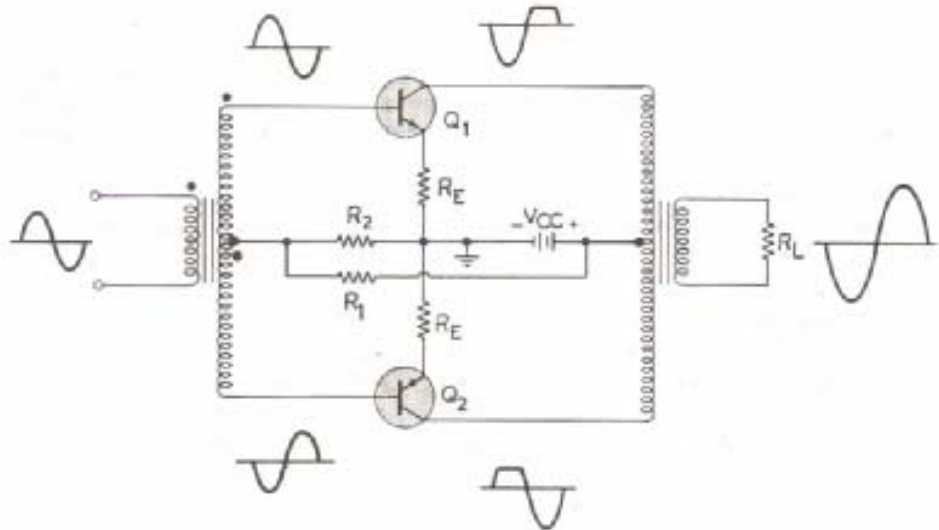
όπου: T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και K η θερμική αντίσταση.

Η θερμική αντίσταση K εκφράζει την άνοδο της θερμοκρασίας της επαφής του συλλέκτη πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για κάθε μονάδα ισχύος. Η θερμική αντίσταση K μετρείται σε $^{\circ}\text{C} / \text{W}$, ενώ οι θερμοκρασίες T_j και T_a σε βαθμούς $^{\circ}\text{C}$. Συνήθως σαν θερμοκρασία περιβάλλοντος (δωματίου) θεωρούμε τους 25°C , δηλαδή $T_a = 25^{\circ}\text{C}$.

Ενισχυτής push-pull με μετασχηματιστή

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται το κύκλωμα ενός ενισχυτή push-pull με μετασχηματιστή.

Για να μελετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του κυκλώματος αυτού, υποθέτουμε ότι εφαρμόζουμε ένα ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο του μετασχηματιστή εισόδου. Ο μετασχηματιστής εισόδου διαβιβάζει το σήμα και στα δύο τρανζίστορ. Τα σήματα όμως αυτά, που εφαρμόζονται στις βάσεις των τρανζίστορ, εμφανίζουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως 180° .



Σχήμα 1

Ας υποθέσουμε ότι τα τρανζίστορ είναι πολωμένα και λειτουργούν σε τάξη Β. Θεωρούμε δηλαδή ότι έχει αφαιρεθεί η R_1 , ενώ η R_2 έχει βραχυκυκλωθεί.

Όταν η βάση του τρανζίστορ Q_1 , αρχίζει να γίνεται θετική, τότε το τρανζίστορ αυτό άγει και συνεπώς ενισχύει το σήμα εισόδου.

Στον ίδιο χρόνο, η βάση του τρανζίστορ Q_2 αρχίζει να γίνεται αρνητική και επομένως το τρανζίστορ αυτό δεν άγει - θεωρείται σαν να έχει αποκοπεί.

Συνεπώς, στο πρώτο μισό της περιόδου του σήματος, η έξοδος συνίσταται από το ενισχυμένο σήμα του τρανζίστορ Q_1 .

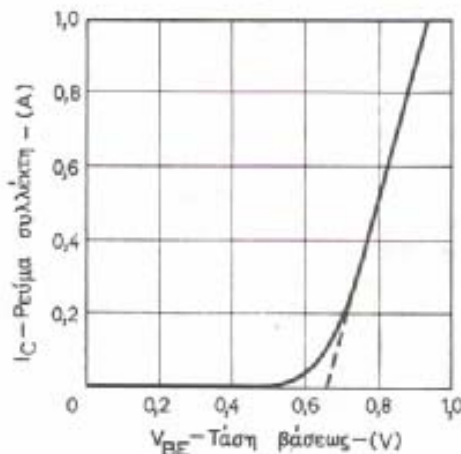
Κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημιπεριόδου του σήματος, η βάση της Q_1 αρχίζει να γίνεται αρνητική, ενώ η βάση της Q_2 θετική. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ακριβώς το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή η Q_1 έχει αποκοπεί και η Q_2 άγει.

Η έξοδος στο μετασχηματιστή εξόδου και συνεπώς στο φορτίο, αποτελείται από το άθροισμα των σημάτων στους δύο συλλέκτες.

Οι κυματομορφές που απεικονίζονται στο σχήμα 1 αντιστοιχούν σε τάξη λειτουργίας AB. Προτού όμως μελετήσουμε τη λειτουργία του **push-pull** σε τάξη AB, θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ σε τάξη B. Με τον τρόπο αυτό θα φανεί η ανάγκη λειτουργίας σε τάξη AB.

Ας υποθέσουμε, ότι το σήμα εισόδου προέρχεται από μία πηγή χαμηλής σύνθετης αντιστάσεως. Με αυτό τον τρόπο, μιλούμε σαν να έχουμε ένα σήμα τάσεως στην είσοδο.

Θεωρούμε τώρα τη χαρακτηριστική καμπύλη μεταφοράς τάσεως - ρεύματος για ένα γνωστό τρανζίστορ. Μία τέτοια καμπύλη για κάποιο τρανζίστορ ισχύος φαίνεται στο σχήμα 2 :



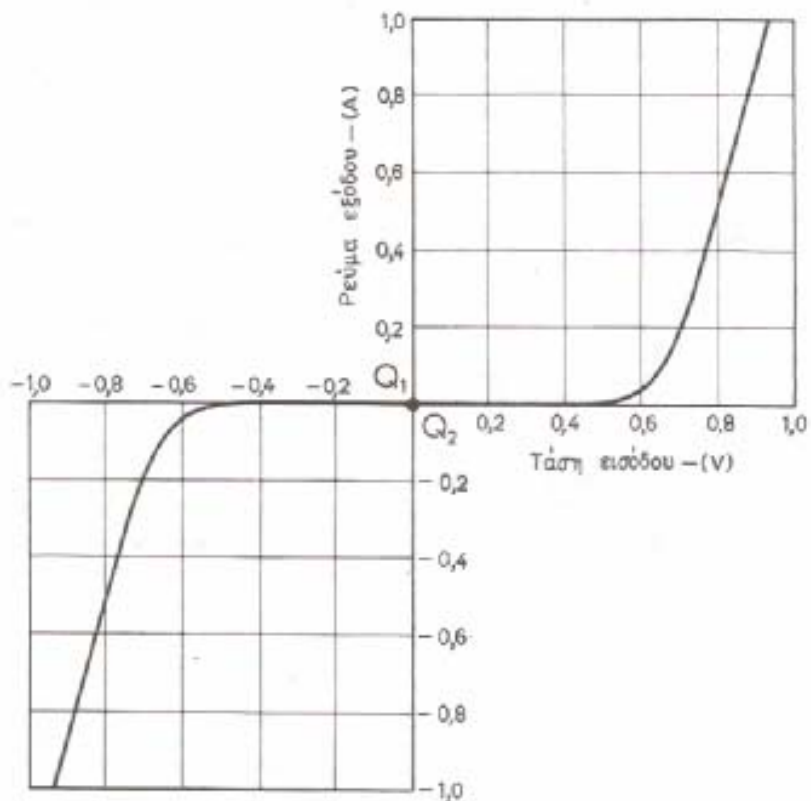
Σχήμα 2

Υποθέτουμε επίσης, ότι και τα δύο τρανζίστορ στο push-pull είναι πανομοιότυπα από απόψεως χαρακτηριστικών καμπυλών και λειτουργίας.

Συνεπώς, αν η πιο πάνω καμπύλη αναφέρεται στο ένα τρανζίστορ, η γενική (και για τα δυο τρανζίστορ ταυτόχρονα)

τότε καμπύλη μεταφοράς για τα τρανζίστορ του push-pull σαν σύνολο, όταν λειτουργεί σε τάξη Β, θα απεικονίζεται από την καμπύλη μεταφοράς του σχήματος 3. Η γενική αυτή χαρακτηριστική καμπύλη μεταφοράς αποτελεί συνδυασμό δύο επί μέρους καμπυλών μεταφοράς του σχήματος 2.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο οριζόντιος άξονας στο σχήμα 2 παριστάνει την τάση βάσεως - εκπομπού V_{BE} του ενός ή του άλλου τρανζίστορ (εφόσον τα τρανζίστορ είναι όμοια). Στο σχήμα όμως 3, ο οριζόντιος άξονας παριστάνει την τάση εισόδου όλου του κυκλώματος, δηλαδή του ενισχυτή push-pull.



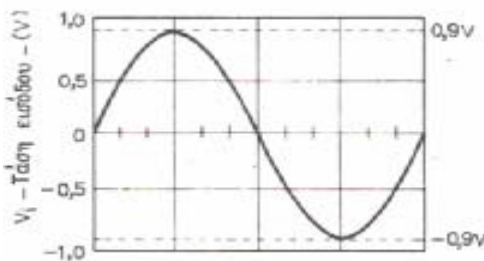
Σχήμα 3

Το θετικό μέρος του κατακόρυφου ημιάξονα στο σχήμα 3 παριστάνει το ρεύμα συλλέκτη του Q_1 , ενώ ο αρνητικός ημιάξονας το ρεύμα συλλέκτη του Q_2 . Το ρεύμα εξόδου είναι η αλγεβρική διαφορά των δύο ρευμάτων στους συλλέκτες. Στο ρεύμα αυτό εξόδου λαμβάνεται υπόψη και η αναστροφή του ρεύματος, που επιφέρει το τρανζίστορ Q_2 . Συνεπώς, ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει το ρεύμα εξόδου του ενισχυτή push-pull.

Πλεονεκτήματα του ενισχυτή push-pull.

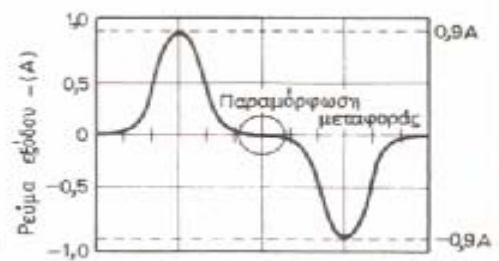
Ένα βασικό πλεονέκτημα του ενισχυτή push-pull είναι, ότι οι αρμονικές παραμορφώσεις δεύτερης και τέταρτης τάξεως στα δύο τρανζίστορ Q_1 και Q_2 είναι σε φάση και αλληλοαναιρούνται στο μετασχηματιστή εξόδου. Συνεπώς, το ρεύμα εξόδου περιέχει μόνο την αρμονική παραμόρφωση τρίτης τάξεως. Για το λόγο αυτό θα περιμέναμε ο ενισχυτής push-pull να εισάγει μικρή παραμόρφωση στο σήμα εισόδου. Όπως όμως θα δείξει το παράδειγμα που ακολουθεί, η παραμόρφωση δεν είναι και τόσο μικρή

Υποθέτουμε ότι ο ενισχυτής ισχύος με μετασχηματιστή push-pull του σχήματος 1 λειτουργεί σε τάξη Β. Η καμπύλη μεταφοράς τάσεως - ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 3. Την τάση εισόδου αποτελεί ένα ημιτονοειδές σήμα, πλάτους 0,9 V, του οποίου η συνεχής συνιστώσα είναι μηδέν σχήματος (4,α).



ημιτονοειδής τάση εισόδου

Σχήμα (4,α)



κυματομορφή εξόδου

Σχήμα (4,β)

Χρησιμοποιούμε τη γραφική μέθοδο, που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο: Σχεδιάζουμε, δηλαδή την κυματομορφή εισόδου κάτω από την καμπύλη μεταφοράς του push-pull (σχ. 3). Στη συνέχεια, μέσω της καμπύλης μεταφοράς, προβάλλουμε (μεταφέρομε) την κυματομορφή εισόδου, για να πάρουμε (πάνω και δεξιά) την κυματομορφή εξόδου σχήμα 4,β. Συγκρίνοντας τις κυματομορφές εισόδου και εξόδου, παρατηρούμε ότι η κύματομορφή εξόδου δεν έχει το ίδιο σχήμα με την κυματομορφή εισόδου συνεπώς υπάρχει παραμόρφωση.

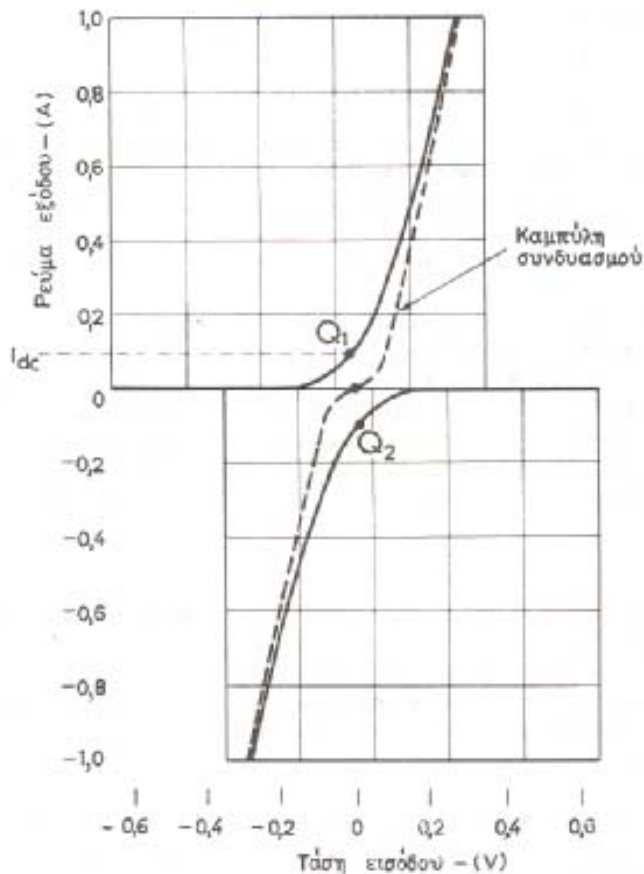
Η παραμόρφωση αυτή συνίσταται στη διαπλάτυνση της κυματομορφής εισόδου, η οποία γίνεται στην αρχή και στο τέλος κάθε υποπεριόδου.

Η παραμόρφωση αυτή ονομάζεται παραμόρφωση μεταφοράς από το ένα τρανζίστορ στο άλλο.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι, όταν το push-pull λειτουργεί σε τάξη Β, υπάρχει παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή μεταφοράς αποτελεί την αρμονική παραμόρφωση τρίτης τάξεως. Οι αρμονικές παραμορφώσεις δεύτερης και τέταρτης τάξεως είναι μικρές. Για να περιορίσουμε την παραμόρφωση αυτή, λειτουργούμε τα τρανζίστορ σε τάξη ΑΒ, εφαρμόζοντας μικρή πόλωση.

Λειτουργία σε τάξη ΑΒ ενισχυτή push-pull

Η τάση πόλωσης βάσεως - εκπομπού $V_{BE} = 0,65 \text{ V}$ προκύπτει αν φέρουμε την ασύμπτωτη της καμπύλης μεταφοράς του σχήματος 2. Η τομή της ασύμπτωτης ευθείας με τον άξονα V_{BE} μας προσδιορίζει την τιμή $0,65 \text{ V}$. Για να βρούμε τώρα την καμπύλη συνδυασμού της καθολικής(και για τα δύο τρανζίστορ) καμπύλης μεταφοράς του push-pull σε τάξη ΑΒ, υπολογίζουμε το αλγεβρικό άθροισμα των επί μέρους καμπυλών μεταφοράς για συγκεκριμένη τιμή της τάσεως εισόδου. Το αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτού φαίνεται στο σχήμα 5 παρακάτω.



Σχήμα 5

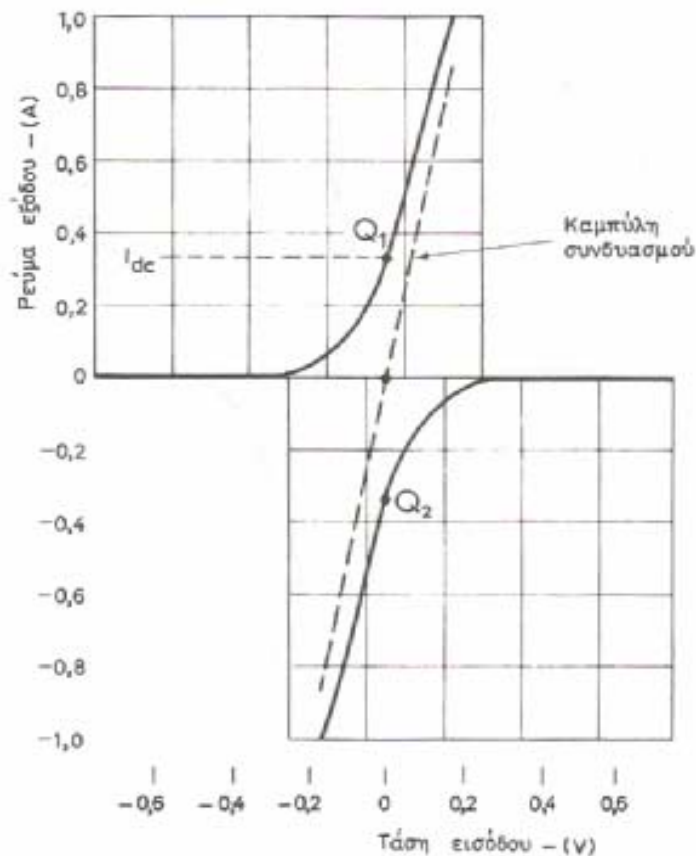
Η καμπύλη συνδυασμού των δύο επί μέρους καμπυλών μεταφοράς του push-pull, που λειτουργεί σε τάξη ΑΒ,

παριστάνεται από τη διακεκομμένη καμπύλη. Η καμπύλη αυτή είναι περίπου ευθεία γραμμή ή τουλάχιστον προσεγγίζει περισσότερο την ευθεία γραμμή, από ότι η καθολική καμπύλη μεταφοράς του σχήματος 3, η οποία αντιστοιχεί σε τάξη Β.

Συνεπώς, όταν το push-pull λειτουργεί σε τάξη ΑΒ, η καμπύλη συνδυασμού αποτελεί την καθολική καμπύλη μεταφοράς του push-pull.

Αν τώρα πολώσουμε τις βάσεις των τρανζίστορ σε ακόμη πιο θετικό δυναμικό, μπορούμε να κάνουμε την καμπύλη συνδυασμού ευθεία γραμμή, σχήμα 6. Η ειδική αυτή τάξη λειτουργίας της τάξεως ΑΒ, ονομάζεται μερικές φορές **τάξη ΑΒΒ**.

Η εξασφάλιση της γραμμικότητας της καμπύλης συνδυασμού φανερώνει, ότι η παραμόρφωση θα είναι εξαιρετικά μικρή.



Σχήμα 6

Παρατηρούμε όμως ότι, για να πετύχουμε καλή γραμμικότητα στην καμπύλη συνδυασμού, θα πρέπει να πολώσουμε τα τρανζίστορ σε σχετικά μεγάλες τάσεις (dc). Έτσι, τα σημεία λειτουργίας Q_1 και Q_2 βρίσκονται αρκετά υψηλά. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση

στην απόδοση-ισχύος. Γενικά, οι ενισχυτές που λειτουργούν σε τάξη B έχουν την καλύτερη απόδοση ισχύος, αλλά εισάγουν μεγάλη παραμόρφωση.

Οι ενισχυτές, που λειτουργούν σε τάξη AB, έχουν αρκετά καλή απόδοση ισχύος, μικρότερη βέβαια των ενισχυτών τάξεως B, και εισάγουν πολύ μικρή παραμόρφωση.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, ανάλογα με εκείνο που επιζητούμε κάθε φορά, θα πρέπει να κάνουμε και την κατάλληλη εκλογή, σε ότι αφορά απόδοση ισχύος και παραμόρφωση.

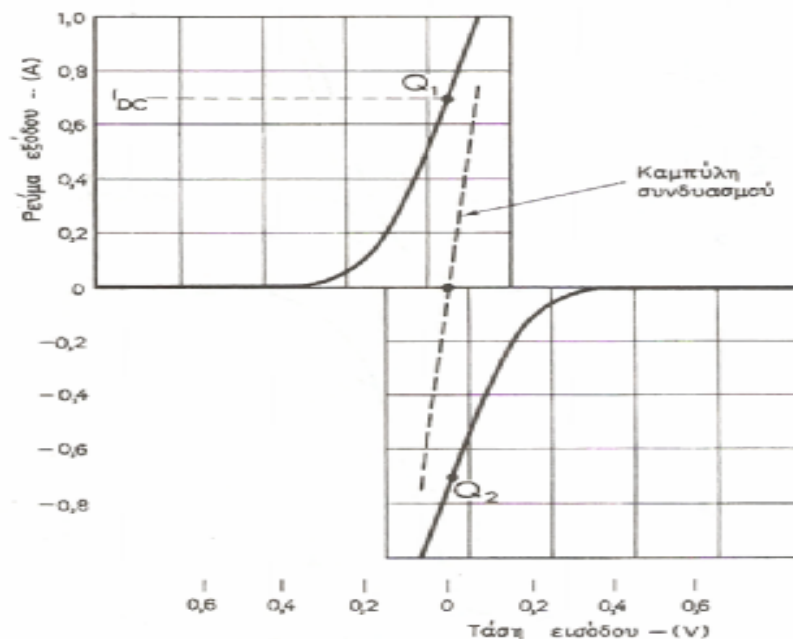
Μία άλλη διαφορά μεταξύ των ενισχυτών τάξεως B και AB είναι η εξής:

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6, όταν η τάση κορυφής εισόδου είναι 0,2 V, προκαλείται ρεύμα εξόδου 0,5 A περίπου. Για να προκαλέσουμε το ίδιο ρεύμα εξόδου, όταν λειτουργούμε σε τάξη B (σχήμα. 3), θα πρέπει η τάση κορυφής εισόδου να είναι 0,8 V.

Όσο λοιπόν αυξάνεται η τάση πλώσεως των τρανζίστορ, τόσο η απολαβή αυξάνεται. Μπορούμε ακόμη να πετύχομε μεγαλύτερη απολαβή και να έχουμε μικρότερη αρμονική παραμόρφωση, όταν τα σημεία λειτουργίας Q_1 και Q_2 μετατεθούν σε μεγαλύτερη μεταξύ τους απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται, όταν ο ενισχυτής εργάζεται σε τάξη A.

Στην περίπτωση όμως αυτή, η απόδοση ισχύος είναι πολύ μικρή και, συνεπώς, λειτουργία του push-pull σε τάξη A είναι οικονομικά ασύμφορη.

Η καμπύλη συνδυασμού των καμπυλών μεταφοράς του push-pull σε τάξη A φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7

Συμπεράσματα.

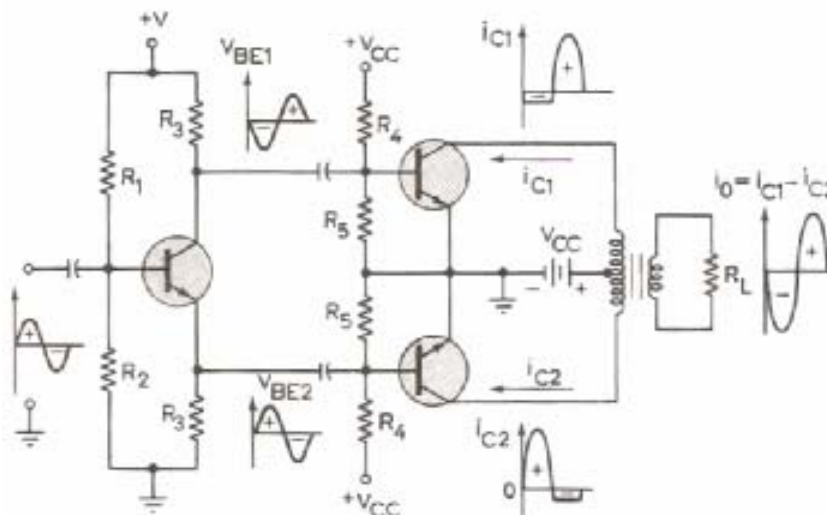
Από τη μελέτη του push-pull συμπεραίνουμε ότι, από τις καμπύλες συνδυασμού (των καμπυλών μεταφοράς) των σχημάτων 3, 5, 6 και 7, ο καλύτερος συνδυασμός για αρκετά μεγάλη ισχύ εξόδου και αμελητέα παραμόρφωση απεικονίζεται στο σχήμα 5.

Συνεπώς, όταν το push-pull λειτουργεί σε τάξη AB, έχουμε καλή απολαβή, καλή απόδοση και αμελητέα παραμόρφωση. Για το λόγο αυτό το push-pull σε τάξη AB βρίσκει αρκετές εφαρμογές, π.χ. σαν στερεοφωνικός ενισχυτής.

Περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας του push-pull μπορούμε να επιφέρουμε χρησιμοποιώντας αρνητική ανατροφοδότηση. Ενισχυτές push-pull με μετασχηματιστή παρουσιάζουν βελτιωμένη λειτουργία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν τελική βαθμίδα ενισχυτών ακουστικών συχνοτήτων και σέρβο - ενισχυτών. Έχουν όμως ένα μειονέκτημα, καθόσον απαιτούνται μεγάλοι μετασχηματιστές, τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδο. Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι συνήθως μεγάλοι σε μέγεθος, βαριοί και ακριβοί.

Υπάρχει όμως τρόπος να απαλλαγούμε από το μετασχηματιστή εισόδου, χρησιμοποιώντας στη θέση του το πιο κάτω κύκλωμα του σχήματος 8.

Για να μην εισάγει, το κύκλωμα του διχασμένου αναστροφέα φάσεως παραμόρφωση στο push-pull, λειτουργούμε το τρανζίστορ του σε τάξη A.



Σχήμα 8

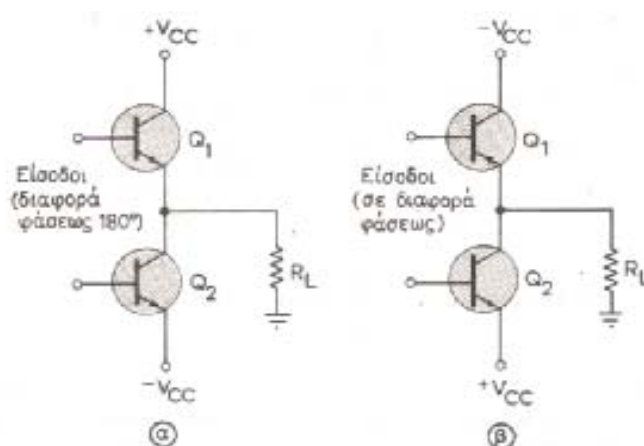
Ενισχυτές push-pull χωρίς μετασχηματιστή.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι, με τους οποίους μπορούμε να απαλλαγούμε από τους μετασχηματιστές εισόδου και εξόδου στο push-pull.

A) Ενισχυτές push-pull, που χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο τρανζίστορ στη βαθμίδα εξόδου, δηλαδή και τα δύο τρανζίστορ είναι τύπου N P N ή και τα δύο τύπου P N P.

B) Ενισχυτές push-pull με συμπληρωματική συμμετρία.

Το σχήμα παρακάτω δείχνει τα δύο βασικά κυκλώματα ενισχυτών push-pull χωρίς M/T



Σχήμα 9.α

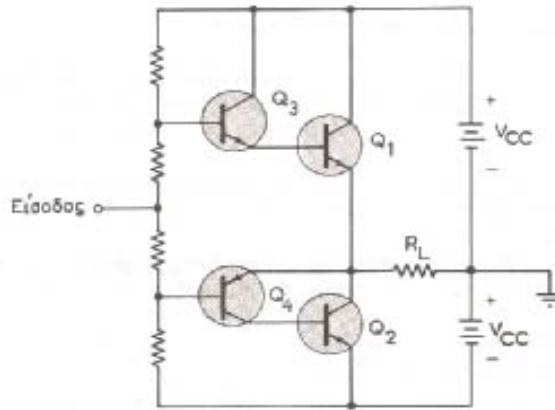
α: με τρανζίστορ τύπου N P N

β: με τρανζίστορ τύπου P N P

Οι ενισχυτές push-pull του σχήματος 9. α έχουν (dc) σύζευξη φορτίου. Θα υπάρχει δηλαδή συνιστώσα του συνεχούς στο φορτίο μόνο στην περίπτωση που θα διαταραχθεί η ισορροπία λειτουργίας των δύο τρανζίστορ.

Οι ενισχυτές push-pull χωρίς μετασχηματιστή απαιτούν επίσης ένα διπλό τροφοδοτικό με (+) και (-), ενώ εκείνοι με μετασχηματιστή απαιτούν ένα απλό τροφοδοτικό.

Τα σήματα εισόδου στα δύο τρανζίστορ θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως 180°, όπως ακριβώς στον ενισχυτή push-pull με σύζευξη μετασχηματιστή. Σήματα με διαφορά φάσεως 180°, μπορούμε να πετύχουμε, χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή με κεντρική λήψη, ή το κύκλωμα του σχήματος 9.β.



Σχήμα 9.β

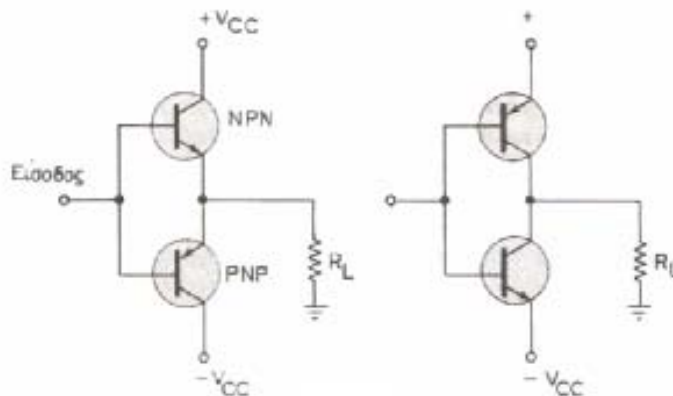
Τα τρανζίστορ οδηγήσεως Q_3 και Q_4 του σήματος εισόδου είναι συμπληρωματικού τύπου, καθόσον το ένα είναι τύπου N P N και το άλλο P N P.

Με τον τρόπο αυτό, το κύκλωμα οδηγήσεως της εισόδου χωρίζει το σήμα εισόδου σε δύο ίσα σήματα, τα οποία παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως.

Ενισχυτές συμπληρωματικής συμμετρίας.

Ένας ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει σαν push-pull, χρησιμοποιώντας τρανζίστορ συμπληρωματικής συμμετρίας.

Η συμπληρωματική συμμετρία συνίσταται στο ότι το ένα τρανζίστορ είναι τύπου N P N και το άλλο P N P. Ένας τέτοιος ενισχυτής φαίνεται στο σχήμα 10.α.



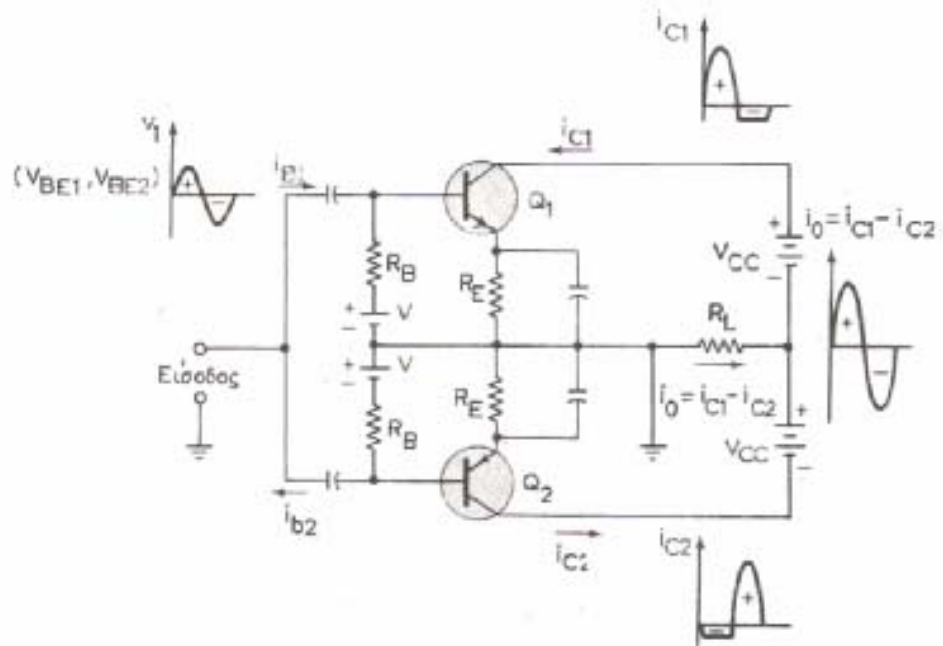
Σχήμα 10.α

Η συμπληρωματική συμμετρία των τρανζίστορ σε ενισχυτές push-pull μας δίνει τη δυνατότητα να χρειαζόμαστε ένα μόνο σήμα εισόδου.

Όπως όμως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν τα τρανζίστορ είναι του ίδιου τύπου, τότε απαιτούνται δύο εισόδοι σημάτων, τα οποία παρουσιάζουν διαφορά φάσεως.

Στους ενισχυτές push-pull συμπληρωματικής συμμετρίας, όταν το σήμα εισόδου πάει να γίνει θετικό, το τρανζίστορ Q_1 , που είναι θετικά πολωμένο, άγει, ενώ το Q_2 ουσιαστικά είναι αποκομμένο.

Όταν τώρα εφαρμόζεται το αρνητικό μέρος του σήματος στην είσοδο, το Q_2 άγει, ενώ το Q_1 είναι αποκομμένο. Επομένως το αρνητικό μέρος του σήματος εξόδου προέρχεται από το τρανζίστορ Q_2 . Ένα βελτιωμένο κύκλωμα ενισχυτή push-pull συμπληρωματικής συμμετρίας, το οποίο λειτουργεί σε τάξη AB, φαίνεται στο σχήμα 10.β.



Σχήμα 10.β

Περιγραφή κατασκευής

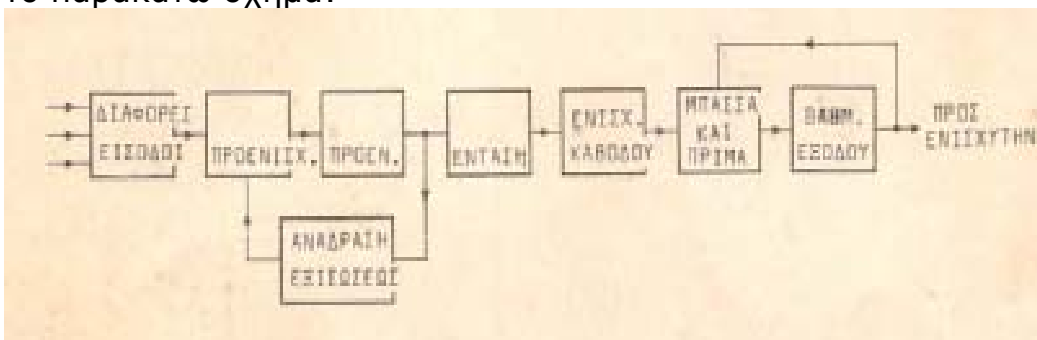
ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Ο ενισχυτής που κατασκευάσαμε μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη τον προενισχυτή, που περιλαμβάνει τα κυκλώματα εισόδου τα οποία είναι: είσοδος μικρόφωνου, είσοδος ΠΙΚ-ΑΠ (δυναμικό και κρυσταλλικό), είσοδο μαγνητοφώνου, είσοδο τιουνερ και τέλος μια είσοδο AUXILIARY. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω εισόδων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΕΙΣΟΔΟΣ	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (mV)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (KΩ)	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	ΣΗΜΑ/ΘΟΡΥΒΟΥ (dB)
ΚΡΥΣΤ. ΠΙΚ-ΑΠ	300	1000	10HZ - 35kHz	>80
ΜΑΓΝΤ. ΠΙΚ-ΑΠ	4	47	ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗ ΡΙΑΑ	>90
ΤΙΟΥΝΕΡ	150	500	10HZ - 35kHz	>80
ΜΑΓΝΗΤΟΦΩΝΟ	300	500	10HZ - 45kHz	>85
ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ	3,5	22	10HZ - 65kHz	>80
AUX	300	1000	10HZ - 35kHz	>80

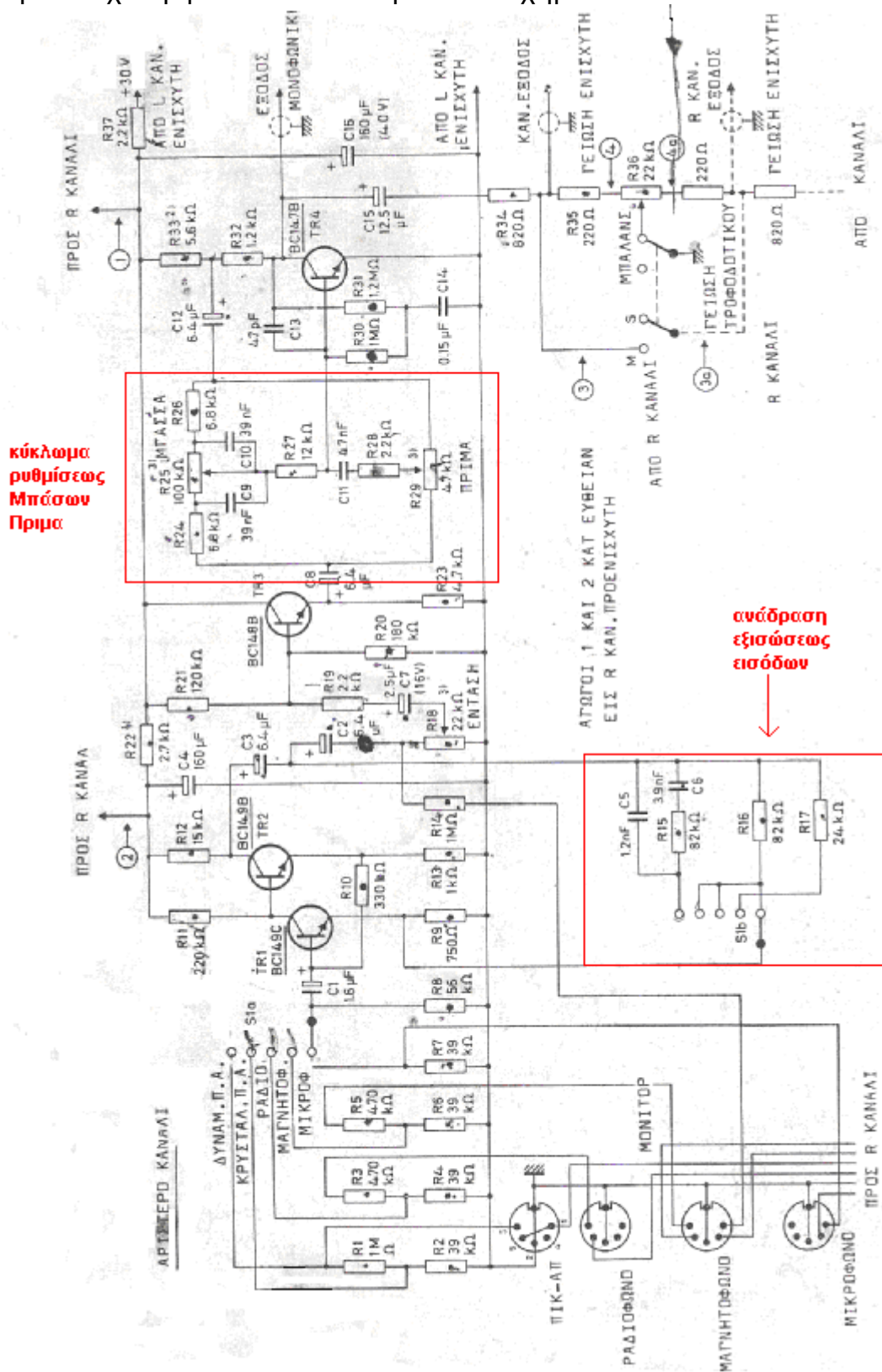
Η επιλογή των παραπάνω εισόδων μαζί με την αναγκαία ανάδραση εξίσωσης γίνεται στο 1^ο τρανζίστορ του προενισχυτή με έναν διακόπτη 2x6 θέσεων. Επιπροσθέτως υπάρχει έξοδος 350mV/1kΩ, για ηχογραφήσεις, η οποία εμφανίζεται με βίσμα πενταπολικό (θηλυκό) REC/PB, στο πίσω μέρος του ενισχυτή.

Η έξοδος του προενισχυτή είναι 440 mV/ 1 KΩ και συνδέεται απευθείας με την είσοδο του ενισχυτή ισχύος για κάθε κανάλι. Ένα παραστατικό διάγραμμα των βαθμίδων του προενισχυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Μπλοκ διάγραμμα προενισχυτή

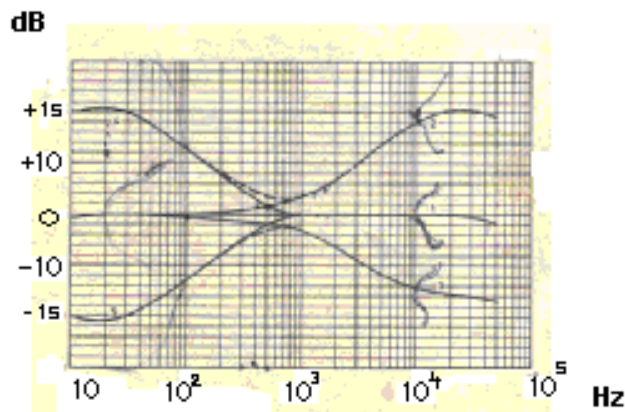
Το ηλεκτρονικό σχεδιάγραμμα του αριστερού καναλιού του προενισχυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Για να επιτευχθεί χαμηλή στάθμη θορύβου χρησιμοποιείται σαν τρανζίστορ εισόδου ένα BC149 C και σαν δεύτερο τρανζίστορ BC149 B. Και τα δυο είναι ενισχυτές με κοινό εκπομπό με άμεση σύζευξη του 1^ο τρανζίστορ με το 2^ο, επίσης χρησιμοποιείται αρνητική ανάδραση από τον εκπομπο του 2^ο τρανζίστορ στην βάση του 1^ο, με την ανάσταση $R_{10}=330\text{ K}\Omega$.

Επίσης χρησιμοποιείτε ανάδραση εξίσωσης εισόδων από τον συλλέκτη του 2^ο BC149 B ,στον εκπομπό του 1^ο (BC149 C). Μετά την έξοδο του δευτέρου τρανζίστορ παρεμβάλλεται το ποτενσιόμετρο έντασης του οποίου η μεσαία λήψη συνδέεται στην βάση του τρίτου τρανζίστορ προενισχύσεως BC 148 B , το οποίο είναι σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού με έξοδο απο τον εκπομπό του, για να εξασφαλίσουμε υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι η λειτουργία του κυκλώματος ρυθμίσεως τόνου να είναι ανεξάρτητη της θέσεως του δρομέα του ποτενσιομέτρου εντάσεως.

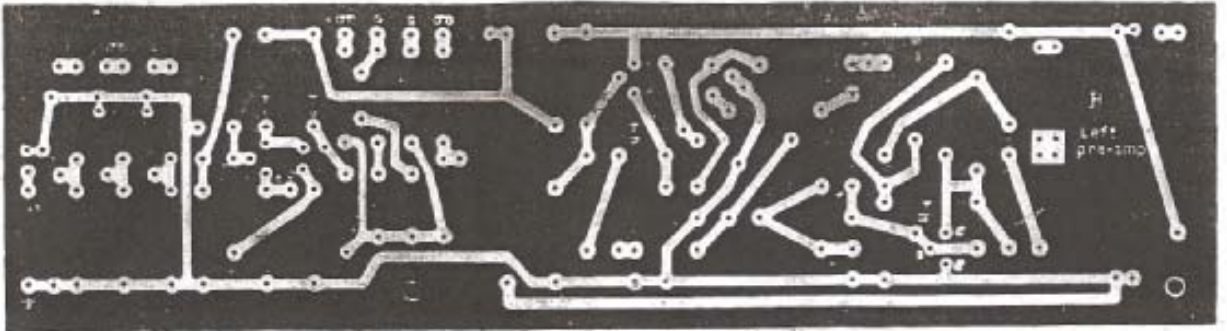
Το κύκλωμα ρυθμίσεως τόνων που φαίνεται στο διάγραμμα του προενισχυτή εξασφαλίζει ελάττωση του σήματος στις μεσαίες συχνότητες κατά 10 dB περίπου. Έτσι με τα ποτενσιόμετρα 100KΩ για τα Μπάσα και 47 KΩ για τα Πρίμα μπορούμε να ρυθμίζουμε την μεταφορά των χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων εξασφαλίζοντας την ανύψωση τους όσο και την μείωση τους σε σχέση με τις μεσαίες συχνότητες. Η τελική απόκριση του κυκλώματος τόνου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



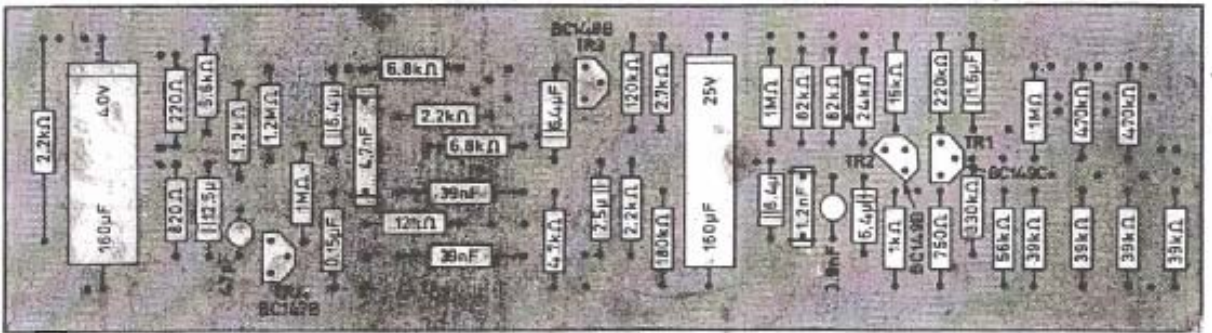
Η τελική βαθμίδα του προενισχυτή αποτελείται από το τρανζίστορ BC 147 B σε συνδεσμολογία ,πάλι, κοινού εκπομπού. Στην έξοδο του προενισχυτή από τον συλλέκτη του BC 147 B συνδέεται και το ποτενσιόμετρο ισοστάθμισης καναλιών (BALANCE) $R_{36}=22\text{ k}\Omega$ ανάμεσα στις εξόδους του αριστερού και δεξιού καναλιού. Το δεξιό κανάλι του προενισχυτή είναι πανομοιότυπο με το αριστερό.

Η τροφοδοσία με συνεχή τάση (dc) των δυο καναλιών του προενισχυτή γίνεται με 30 volts που λαμβάνονται από το τροφοδοτικό. Η ένταση τροφοδοσίας του κάθε καναλιού είναι περίπου 10 mA.

Το τυπωμένο κύκλωμα του αριστερού καναλιού του προενισχυτή φαίνεται παρακάτω:



Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ)



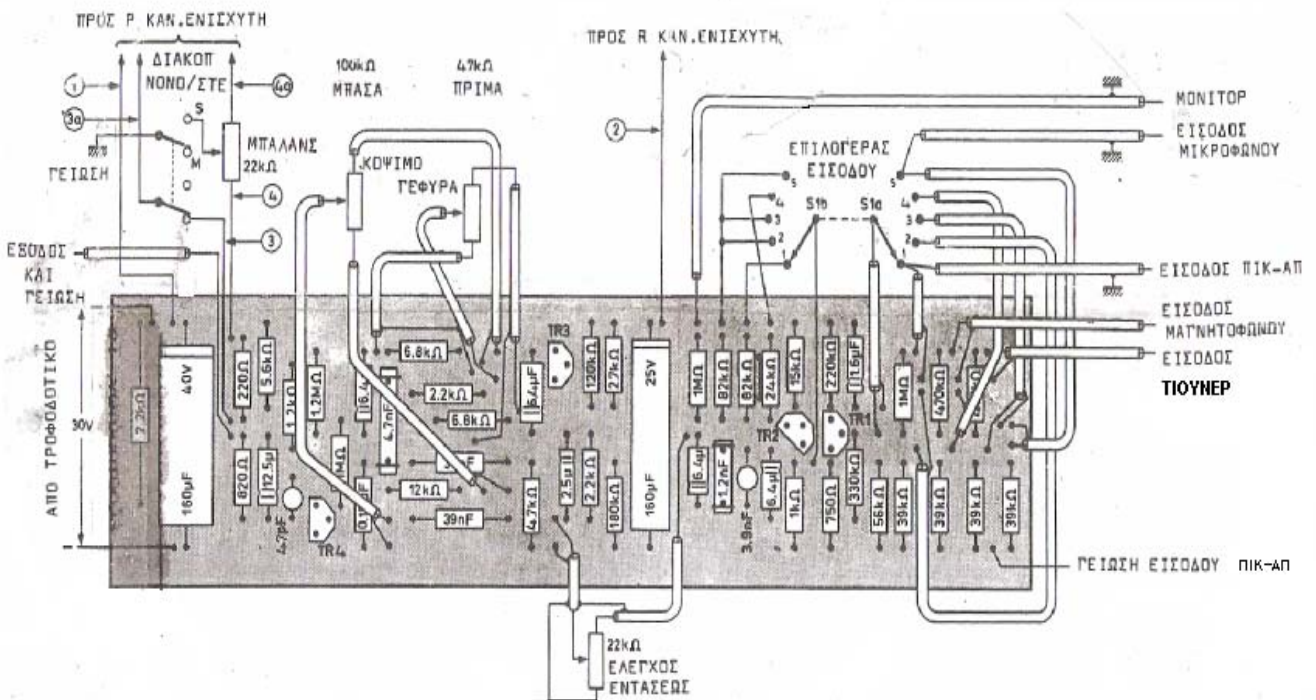
Η κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος όλου του προενισχυτή και των δύο καναλιών, έγινε σε πλακέτα χαλκού βακελίτη 20 x 11cm. Την πλακέτα την επεξεργαστήκαμε με διάλυμα υπερχλωριούχου σιδήρου ($FeCl_3$). Η διαδικασία αποχάλκωσης φαίνεται παρακάτω



Διαδικασία αποχάλκωσης της πλακέτας στο διάλυμα υπερχλωριούχου σιδήρου:

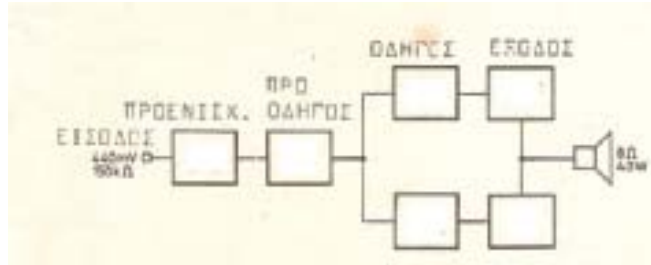


Η τελική εμφάνιση του ενός καναλιού (αριστερού) προενισχυτή με τις συνδεσμολογίες όλων των ποτενσιόμετρων και των εισόδων και εξόδου και του επιλογέα εισόδων φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο:



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο ενισχυτής των 40 W του οποίου διάγραμμα βαθμίδων βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα:



Αποτελείται από τα τρανζίστορ: BC557 προενισχυτής, BD139 σε τάξη A προοδηγός βαθμίδα, BD139 N P N και BD140 P N P ως οδηγοί βαθμίδες των δύο τρανζίστορ εξόδου τα οποία είναι τρανζίστορ ισχύος (πέταλα) 2N3055 σε συνδεσμολογία Push-Pull.

Τεχνικά χαρακτηριστικά του ενισχυτή ισχύος:

Ισχύς 40 W σε φορτίο εξόδου 8 Ω

Ευαισθησία εισόδου: (1000HZ/ 40 W) 440mV

Απόκριση συχνοτήτων: 12Hz – 95000 Hz

Παραμόρφωση: 0,2%

Τροφοδοσία: 60 V

Κατανάλωση: (για 40 W) 1.1 A

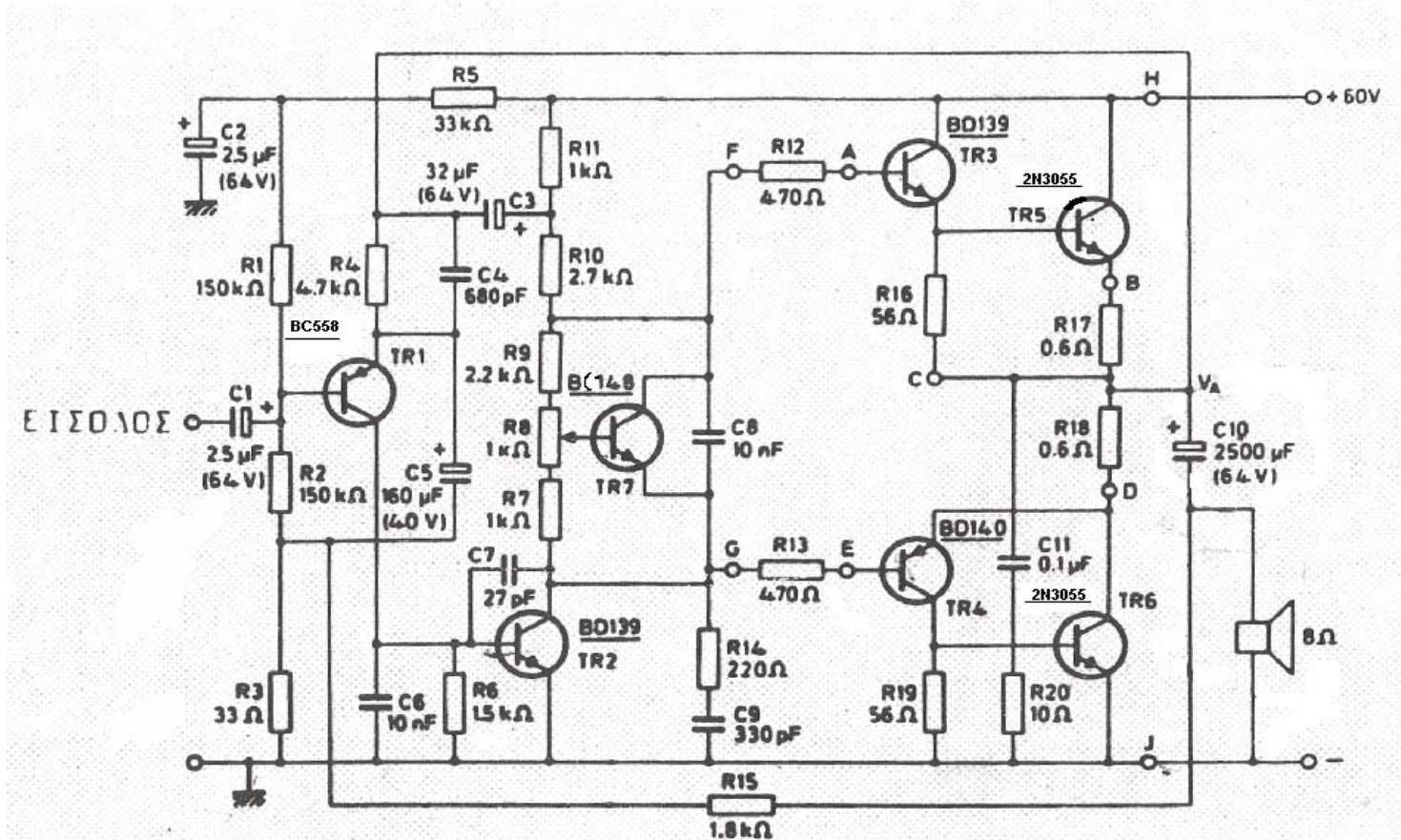
Ρεύμα ηρεμίας τρανζίστορ εξόδου : 40 mA

Στην βαθμίδα του προενισχυτή του κυκλώματος ισχύος, χρησιμοποιείται τρανζίστορ P N P BC558, σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, εφαρμόζεται αρνητική ανάδραση μέσω των αντιστάσεων R_3 , R_4 και R_{15} . Το ρεύμα ηρεμίας του τρανζίστορ BC558 είναι 0,5 mA η βαθμίδα χρησιμοποιείται ακόμα για την σταθεροποίηση της μέσης τάσεως του τρίμερ R_8 η οποία ρυθμίζει το ρεύμα ηρεμίας των τρανζίστορ εξόδου. Στην οδηγό βαθμίδα BD139, σε συνδεσμολογία και αυτή με κοινού εκπομπού, έχει προβλεφθεί αρνητική ανάδραση μεταξύ συλλέκτη –βάσεως με τον πυκνωτή C_7 . το τρανζίστορ BC 148 ρυθμίζει το ρεύμα ηρεμίας των τρανζίστορ εξόδου, ρυθμίζοντας τις πολώσεις των βάσεων των τρανζίστορ οδηγών BD139 και BD 140. το κύκλωμα θυμικής εξισορρόπησης των τρανζίστορ εξόδου (2N3055) περιλαμβάνει το τρανζίστορ TR7 το

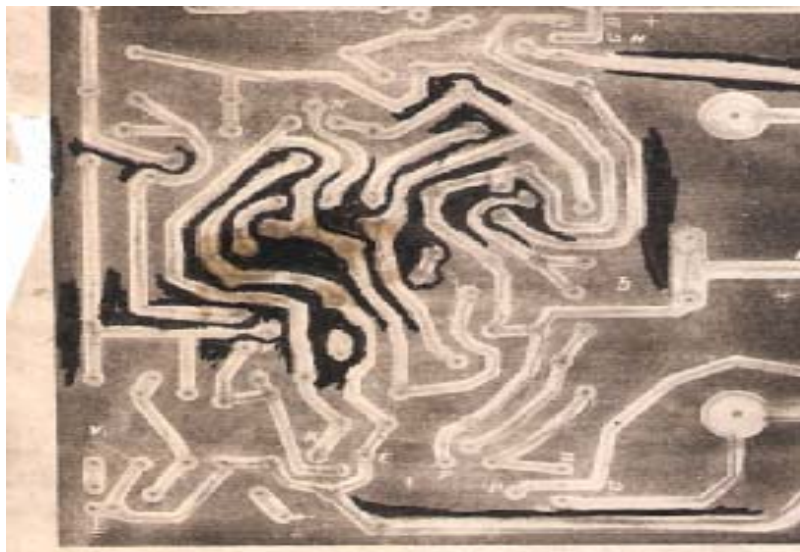
οποίο λειτουργεί σαν δίοδο ρυθμίσεως της τάσεως σε συνεργασία με τις αντιστάσεις R_7 , R_8 και R_9 . Με συνέπεια την ρύθμιση του ρεύματος ηρεμίας των τρανζίστορ 2N3055.

Για την ψύξη των τρανζίστορ 2N3055 χρησιμοποιείται ένας κατακόρυφος σιλιβωμένος ψυκτήρας αλουμινίου πάχους 2mm και επιφανείας 80cm^2

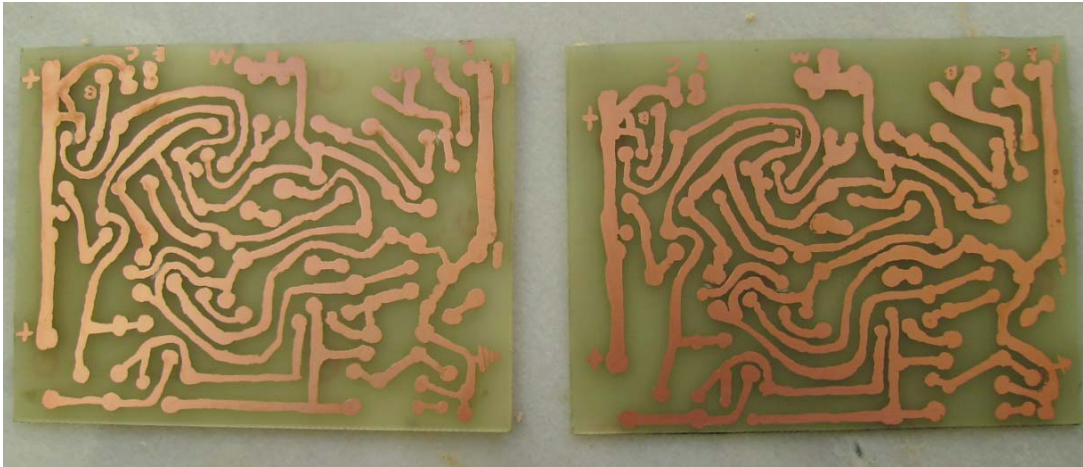
Το ηλεκτρονικό διάγραμμα του ενός καναλιού του ενισχυτή ισχύος φαίνεται:



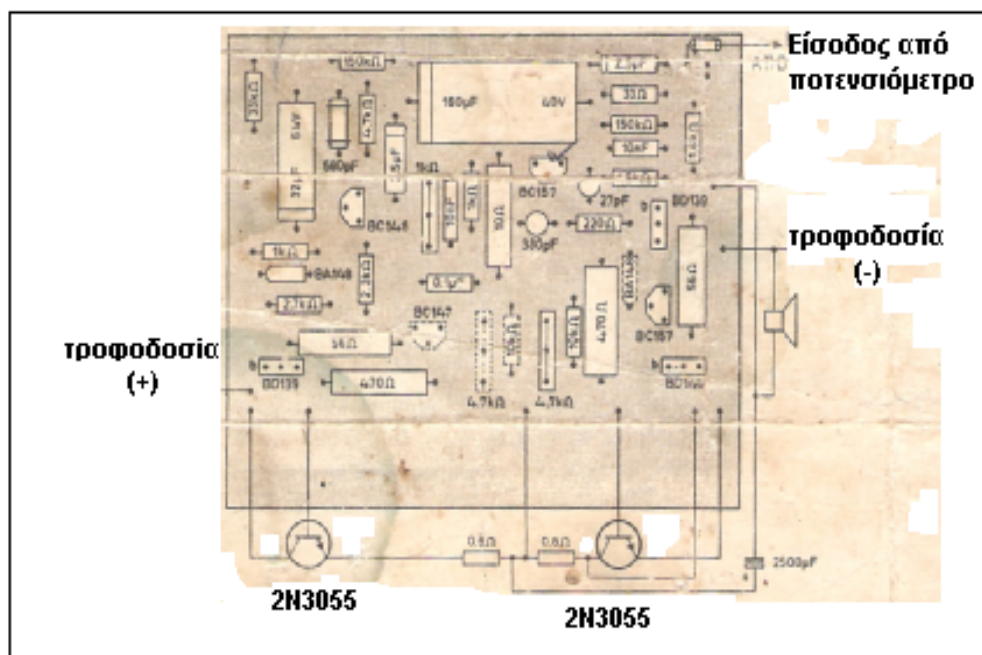
Το τυπωμένο κύκλωμα του παραπάνω ενισχυτή φαίνεται παρακάτω



Η κατασκευή των πλακετών χαλκού βακελίτη όπως τις κατασκευάσαμε φαίνεται παρακάτω, μετά από επεξεργασία με υπερχλωριούχο σίδηρο:

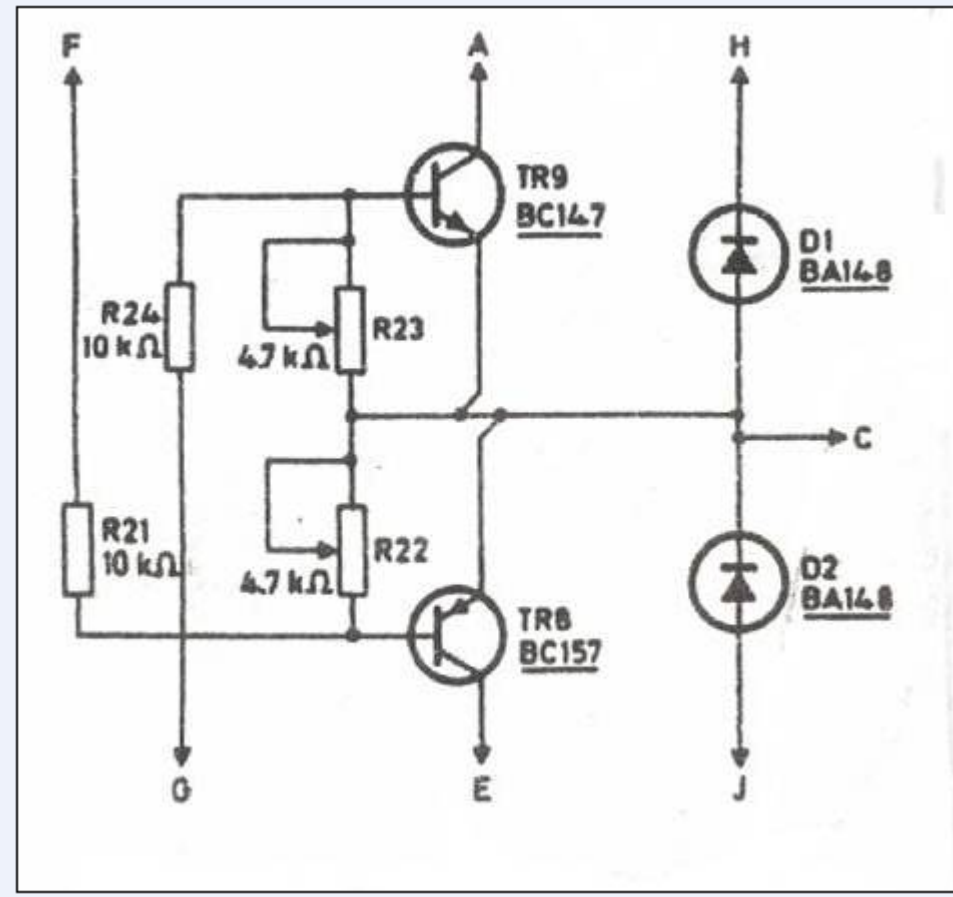


Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων στην πλακέτα φαίνεται παρακάτω:



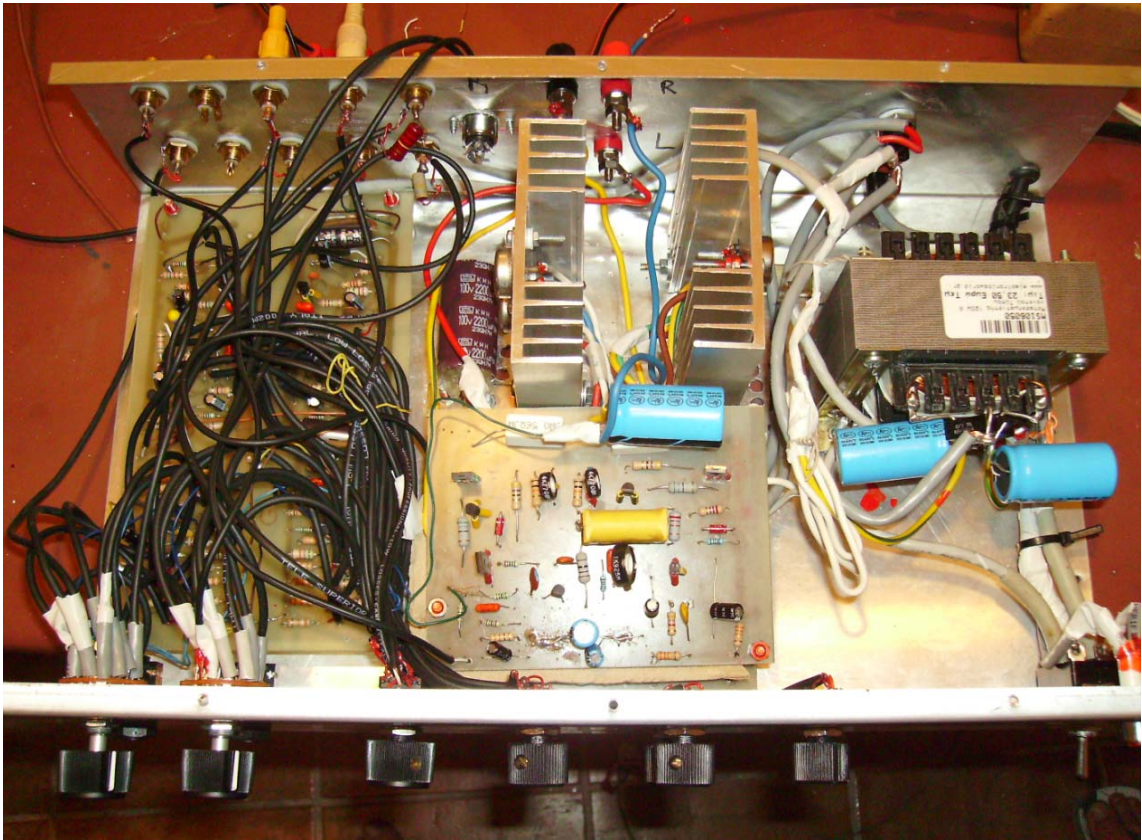
Τα δυο τρανζίστορ εξόδου (2N3055), είναι βιδωμένα στις ψύχτρες.

Στους παραπάνω ενισχυτές ισχύος έχουν χρησιμοποιηθεί κυκλώματα προστασίας από βραχυκυκλώματα στην έξοδο. το κύκλωμα του δικτυώματος προστασίας φαίνεται στο παρακάτω ηλεκτρονικό διάγραμμα:



Τα σημεία A,C,E,G,J,F και H αντιστοιχούν με τα ομώνυμα σημεία του ηλεκτρονικού κυκλώματος του ενισχυτή ισχύος και συμπεριλαμβάνονται στην πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος που κατασκευάστηκε και ο ενισχυτής ισχύος.

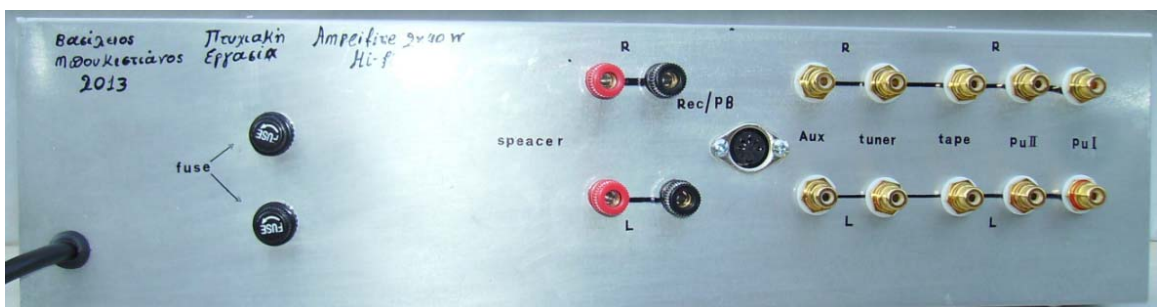
Ο ενισχυτής ολοκληρωμένος με όλα του τα ηλεκτρονικά μέρη μονταρισμένα μέσα στο κουτί του:



(κάτοψη)



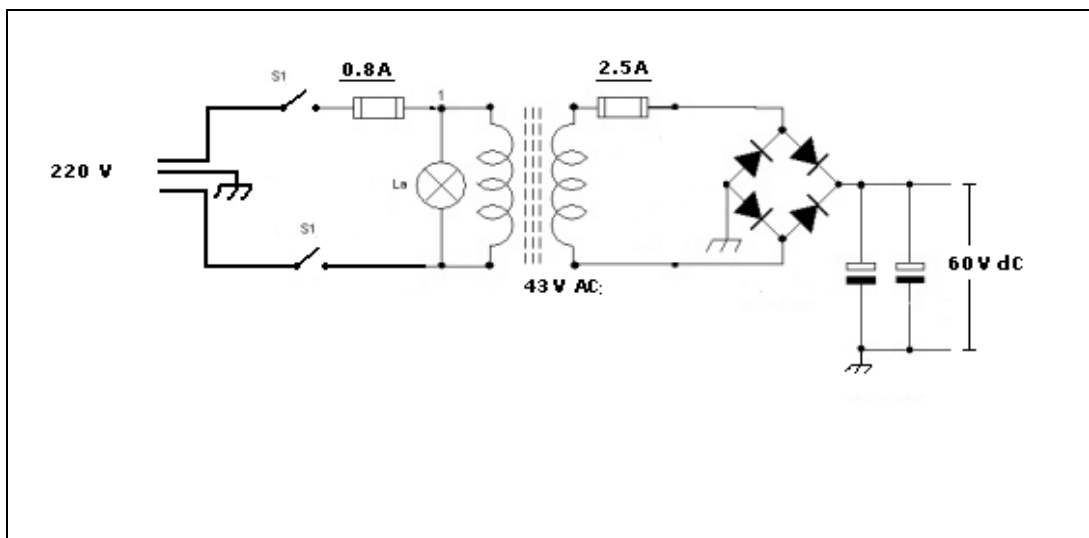
(πρόσοψη)



(πίσω όψη)

ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ

Το τροφοδοτικό του ενισχυτή έχει κατασκευαστεί με ένα μετασχηματιστή 220/43 V (AC) , 120VA. Η γέφυρα ανόρθωσης πυριτίου είναι 100 Volts /8 A, η τάση (43 Volts AC) μετά την ανόρθωση και την εξομάλυνση με τους πυκνωτές γίνεται 60 Volts (dC), με τα οποία τροφοδοτούμε τον ενισχυτή ισχύος. Ο προενισχυτής τροφοδοτείται με τάση 30 Volts (dC) τα οποία τα παίρνουμε από μια αντίσταση (3 kΩ), συνδεδεμένη εν σειρά μετά την γέφυρα ανόρθωσης. Οι πυκνωτές εξομάλυνσης είναι 3300 mF/63 Volts. Οι ασφάλειες στο πρωτεύων είναι 0.8A και στο δευτερεύον είναι 2.5A. Η γείωση του καλωδίου τροφοδοσίας γειώνει το σασί του ενισχυτή. Τέλος, ο προενισχυτής τροφοδοτείται με τάση 30 Volts/10 mA την οποία λαμβάνουμε μέσω μιας αντιστάσεως 3KΩ από τα (+) 60 volts του τροφοδοτικού. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του τροφοδοτικού φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΓΕΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ (ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΤΣΑΓΚΑΚΗ, ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ).

ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΑ (ΧΡΗΣΤΟΥ Ε. ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΥ, ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ).

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ (ΧΑΡΑΛ. Δ. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΥ, ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι. ΓΑΛΙΩΤΟΥ, ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Π. ΑΤΜΑΤΣΙΔΗ, ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Ν. ΠΑΛΑΙΟΚΡΑΣΣΑ).

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΙΣΧΥΟΣ-ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ, ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΛΟΓΗ)

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΝΕΑ

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΛΟΓΗ

ΙΝΤΕΡΝΕΤ