



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

“ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΕΡΕΟΦΩΝΙΚΟΥ  
ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΑ  
ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ”

ΜΩΡΙΑΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ (Α.Μ. 6832)

ΤΣΕΓΓΕΝΕ ΧΡΙΣΤΙΝΑ (Α.Μ. 6691)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2022

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά την περίοδο του Ακαδημαϊκών Ετών 2018 - 2020, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Σουλιώτη Γεώργιου και κ. Τσάκαλου Νικολάου, Καθηγητών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η κατασκευή ενός βασικού Προενισχυτή Γραμμής για ηχητικό σύστημα υψηλής πιστότητας (hi-fi).

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας. Οφείλουμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες, προς τον καθηγητή κ. Νικόλαο Τσάκαλο, για την καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διπλωματικής μας.

Μωριάτη Γεωργία

Τσεγγενέ Χριστίνα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι η κατασκευή ενός βασικού Προενισχυτή Γραμμής για ηχητικό σύστημα υψηλής πιστότητας (hi-fi).

Πρόκειται, δηλαδή, για κύκλωμα που συνδέεται μεταξύ ηχητικής πηγής και ενισχυτή ισχύος, προσαρμόζοντας κατάλληλα τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου ώστε να υπάρχει πλήρης απομόνωση και να παρέχει κάποια ενίσχυση χωρίς αλλοίωση του φασματικού περιεχομένου.

Η κατασκευή έγινε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών του Τμήματος. Χρησιμοποιήθηκαν διακριτοί ημιαγωγοί αντί για ολοκληρωμένα κυκλώματα και η σχεδίαση έγινε από «λευκό χαρτί», δεν αναλύεται και κατασκευάζεται, δηλαδή, κάποιο έτοιμο κύκλωμα από τη βιβλιογραφία. Εξετάστηκαν, ωστόσο, διάφορες λύσεις για τα επιμέρους στάδια από τη βιβλιογραφία, όσον αφορά τα πλεονεκτήματά τους και με στόχο να έχουν μία καλή συνεργασία μεταξύ τους. Τυπική τιμή ενίσχυσης τάσης για τέτοια κατηγορία συσκευών καθορίζεται με την εφαρμογή ολικής αρνητικής ανατροφοδότησης. Έγινε μελέτη όλων των επιμέρους σταδίων και έλεγχός τους με Η/Υ και με μετρήσεις κατόπιν υλοποίησής τους.

Καθώς βασιστήκαμε σε κυκλώματα όπου απαιτείται ταίριασμα των εξαρτημάτων και έχουμε και δυο κανάλια ήχου (για στερεοφωνικό σύστημα), έγινε προσεκτική διαλογή κατόπιν μετρήσεων, από τα διαθέσιμα, κυρίως, εξαρτήματα του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών ώστε να έχουμε καλύτερη ποιότητα. Για τον ίδιο λόγο, δεν περιλαμβάνονται τα κλασσικά ρυθμιστικά τόνου και ισορροπίας καναλιών, αλλά μόνο ρύθμιση στάθμης. Χρησιμοποιώντας εξοπλισμό και υλικά του Εργαστηρίου, παρέχουμε κατ' αρχήν τάση στα κυκλώματά μας από τα τροφοδοτικά που διατίθενται, ωστόσο, προσθέσαμε κάποια στάδια τροφοδοσίας για καλύτερη ποιότητα.

Στο γραπτό μέρος της Εργασίας περιλαμβάνεται και πρακτική περιγραφή διασυνδέσεων, δυνατότητες επέκτασης και τροποποίησης.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗIFI.....	1
1.1.1 ΠΗΓΕΣ.....	1
1.1.2 ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.....	2
1.1.2.1 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.....	3
1.1.3 ΗΧΕΙΑ.....	4
1.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	4
1.2.1 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΝΑΛΙΩΝ.....	5
1.3 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ.....	5
1.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ.....	6
1.4.1 ΕΥΡΟΣ ΤΑΣΗΣ.....	6
1.5 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ.....	7
1.5.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	7
1.5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (THD) .....	8
1.5.3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΔΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (TIMD) .....	8
1.6 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΞΟΔΟΥ (SLEW RATE) .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	10
2.1 ΕΝΕΡΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ.....	10
2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΕ ΚΥΚΛΩΜΑ.....	10

2.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.....	12
2.3.1 ΚΑΘΡΕΦΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	13
2.3.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	14
2.3.3 PUSH - PULL.....	15
2.4 ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ.....	15
2.5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ.....	16
2.6 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΑΝΤΩΝΤΑΙ ΣΕ ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.....	16
2.6.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ.....	18
2.7 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	18
2.8 ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	22
3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ.....	22
3.1.1 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ.....	22
3.1.2 ΧΡΗΣΗ ΚΑΘΡΕΦΤΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	24
3.1.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MILLER.....	25
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	27
4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ) .....	27
4.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	28
4.2.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑ ΒΑΘΜΙΔΑ.....	28
4.3 ΠΛΗΡΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑ.....	44

4.3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ SPICE.....	44
4.3.2 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	47
4.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ.....	56
4.5 ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ HI-FI

Ένα ηχοσύστημα hi-fi είναι ένα πακέτο συσκευών ήχου οι οποίες οι οποίες μπορούν να μας προσφέρουν μουσικές ακροάσεις σε ποιότητα που πλησιάζει αυτή μιας αυθεντικής μουσικής παράστασης.

Τα ηχοσυστήματα hi-fi σήμερα βασίζονται στη χρήση πολλών νέων τεχνολογιών, τα οποία δύσκολα μπορεί κανείς να κατανοήσει πλήρως πώς λειτουργούν, εκτός αν διαθέτει εξειδικευμένες γνώσεις. Ένα τυπικό ηχοσύστημα σήμερα αποτελείται συνήθως από τις εξής συσκευές: CD player ή DVD (ακόμα καλύτερα σήμερα μπορεί να υπάρχει μια συσκευή BluRay), ενισχυτής, ένα σετ δύο ηχείων και πιθανώς κάποιο πικάπ για όσους έχουν συλλογές δίσκων βινυλίου. Δίπλα σε αυτά όμως, μπορεί κανείς να συναντήσει σε πιο εξελιγμένα συστήματα και κάποιον προενισχυτή, έναν music server για τους «προχωρημένους» τεχνολογικά, αλλά και περισσότερα ηχεία για την απόδοση ήχου surround.

#### 1.1.1 ΠΗΓΕΣ

Η έννοια "ενισχυτής" είναι συνδεδεμένη με την έννοια "ελεγχόμενη πηγή σήματος". Δεν είναι δυνατή η ύπαρξη ενισχυτή χωρίς την παρουσία μίας, τουλάχιστον, ελεγχόμενης πηγής σήματος. Επίσης, η λειτουργία ενός ενισχυτή, ανεξάρτητα του πόσο πολύπλοκος μπορεί να είναι, μπορεί να αναχθεί σε λειτουργία μιας ελεγχόμενης πηγής τάσης.

##### ➤ Ιδανικές πηγές

Όλες οι ελεγχόμενες πηγές αντιμετωπίζονται ως δίθυρα κυκλώματα. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι ιδανικών ελεγχόμενων πηγών.

- a) Πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα
- b) Πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση
- c) Πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση
- d) Πηγή τάσης ελεγχόμενη από ρεύμα

Ορισμένα ηλεκτρονικά στοιχεία και κυκλώματα, κάτω από κάποιους περιορισμούς, συμπεριφέρονται ως σχεδόν ιδανικές πηγές. Ωστόσο, στην πράξη, τα ηλεκτρονικά στοιχεία και

οι ενισχυτές συμπεριφέρονται ως μη ιδανικές ελεγχόμενες πηγές. Η διαφοροποίηση συνίσταται στο ότι, η εμφανιζόμενη αντίσταση στην είσοδο και την έξοδο τους έχει ορισμένη τιμή.

➤ Πραγματικές πηγές

Υπάρχουν τέσσερις τύποι μη ιδανικών (πραγματικών) ελεγχόμενων πηγών.

a) Πραγματική πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα.

Χαρακτηριστικά: Χαμηλή αντίσταση εισόδου  $r_i$ , υψηλή αντίσταση εξόδου  $r_o$ .

b) Πραγματική πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση.

Χαρακτηριστικά: Υψηλή αντίσταση εισόδου  $r_i$ , υψηλή αντίσταση εξόδου  $r_o$ .

c) Πραγματική πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση.

Χαρακτηριστικά: Υψηλή αντίσταση εισόδου  $r_i$ , χαμηλή αντίσταση εξόδου  $r_o$ .

d) Πραγματική πηγή τάσης ελεγχόμενη από ρεύμα.

Χαρακτηριστικά: Χαμηλή αντίσταση εισόδου  $r_i$ , χαμηλή αντίσταση εξόδου  $r_o$ .

Οι ελεγχόμενες πηγές σήματος αποτελούν τη θεωρητική βάση για τη δημιουργία όλων των τύπων των ενισχυτών. Στην πράξη, οι ελεγχόμενες πηγές σήματος υλοποιούνται με διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως, τρανζίστορ και ολοκληρωμένοι ενισχυτές.

Οι ενισχυτές τοποθετούνται μεταξύ μιας πηγής σήματος (μπορεί να είναι μια πραγματική πηγή ή μια προηγούμενη ενισχυτική βαθμίδα) και ενός φορτίου (που μπορεί να είναι και μια επόμενη ενισχυτική βαθμίδα).

### 1.1.2 ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία αναλογικών σημάτων είναι η ενίσχυσή τους, δηλαδή η αύξηση της στάθμης ισχύος ηλεκτρικών σημάτων σε επιθυμητά επίπεδα, χωρίς την αλλοίωση αυτών.

Η ενίσχυση των σημάτων επιτυγχάνεται με τους ενισχυτές, που είναι δίθυρα ηλεκτρονικά κυκλώματα μιας κατεύθυνσης, από την είσοδο προς την έξοδο. Αυτό σημαίνει ότι, σήματα, από πηγές τάσης ή ρεύματος, εφαρμοζόμενα στην είσοδο κατάλληλου ενισχυτή, αναπαράγονται ενισχυμένα στην έξοδό του. Ο λόγος του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου καθορίζει το κέρδος (gain) ή αλλιώς την ενίσχυση (amplification) του ενισχυτή. Τα σήματα εισόδου και εξόδου, μπορεί να είναι τάσεις ή ρεύματα.



Στη διεθνή βιβλιογραφία κάτω από τον όρο "ενισχυτές" συναντά κανείς τεράστια ποικιλία κυκλωμάτων, με διαφορετική λειτουργία και προορισμό εφαρμογών, διαφορετική περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας, καθώς επίσης και διαφορετική τεχνολογία κατασκευής. Οι ενισχυτές διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα:

a) Με τη λειτουργία που επιτελούν σε

- Προενισχυτές ή ενισχυτές μικρών σημάτων (preamplifiers)
- Ενισχυτές ισχύος ή ενισχυτές μεγάλων σημάτων (power amplifiers)
- Ενισχυτές ειδικών χρήσεων, όπως λογαριθμικοί, παραμετρικοί, τελεστικοί ενισχυτές, ενισχυτές οργανολογίας κ.λ.π.

b) Με την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας σε

- Ενισχυτές συνεχούς
- Ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων
- Ενισχυτές ενδιάμεσων συχνοτήτων IF
- Ενισχυτές ραδιοσυχνοτήτων RF
- Ενισχυτές FM, TV, tuned or narrow band
- Ενισχυτές ευρείας περιοχής (broad or wide band)
- Μικροκυματικοί ενισχυτές
- Οπτοενισχυτές κ.λ.π.

c) Με την τεχνολογία κατασκευής και το είδος ενισχυτικών στοιχείων που χρησιμοποιούν σε

- Ενισχυτές λυχνιών (Electron-tube amplifiers)
- Ενισχυτές ημιαγωγών (Solid-state or semiconductor amplifiers)
- Ολοκληρωμένοι ενισχυτές (Integrated amplifiers)
- Ενισχυτές Klystron, Magnetron κ.λ.π.

d) Με τον τρόπο που πολώνονται και λειτουργούν σε

- Ενισχυτές σε τάξη A
- Ενισχυτές σε τάξη AB
- Ενισχυτές σε τάξη B, (push-pull) κ.λ.π.

Ωστόσο, ορισμένοι ενισχυτές μπορεί να χαρακτηρίζονται με πολλαπλό τρόπο, όπως π.χ. ολοκληρωμένος προενισχυτής ευρείας περιοχής.

### 1.1.2.1 ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Ο προενισχυτής είναι εκείνη η συσκευή που χειριζόμαστε περισσότερο από κάθε άλλη στο στερεοφωνικό μας σύστημα. Από εκεί ρυθμίζουμε την ένταση της φωνής, επιλέγουμε την πηγή που θα ακούσουμε και συντονίζουμε τις ηχογραφήσεις μας. Η συνεισφορά του στην ποιότητα του αναπαραγόμενου ήχου είναι ιδιαίτερα μεγάλη κι αυτό γιατί οποιαδήποτε παραμόρφωση εισάγεται στο σήμα από τόσο νωρίς, οδηγεί δυστυχώς σε δυσάρεστο αποτέλεσμα. Κάθε προενισχυτής που είναι υλοποιημένος με προσοχή και χρησιμοποιεί υλικά υψηλής ποιότητας διαθέτει αξιόλογο ήχο.

Ο ρόλος του προενισχυτή σε ένα σύστημα αξιόλογων ηχητικών επιδόσεων είναι εξίσου σημαντικός με κείνον των υπόλοιπων συσκευών (πηγή, τελικός ενισχυτής, ηχεία, καλώδια). Αυτός αναλαμβάνει να επιλέξει ποιά από τις συνδεδεμένους στις εισόδους του πηγές θα σταλεί στον τελικό ενισχυτή και ποιά στην έξοδο ηχογράφησης. Επίσης με τη βοήθεια ποτενσιομέτρου ή υποβιβαστή τάσης ρυθμίζεται και η ένταση αναπαραγωγής στο σημείο που εμείς επιθυμούμε. Εκτός από τις βασικές αυτές λειτουργίες, παρέχονται και άλλες πολύ χρήσιμες ευκολίες, όπως αυτή της σίγασης, του μεταβλητού κέρδους ενίσχυσης, της αναστροφής της φάσης του σήματος, καθώς και του τηλεχειρισμού.

Ένας προενισχυτής πρέπει να διαχειρίζεται όλα τα σήματα από οποιαδήποτε αναλογική πηγή. Οι προενισχυτές συναντώνται στην αγορά σε διάφορες μορφές με εξοπλισμό που ποικίλει, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται. Οι σημαντικότερες κατηγορίες είναι οι παρακάτω:

- Προενισχυτές στάθμης γραμμής
- Προενισχυτές φωνογραφικής κεφαλής
- Προ-προενισχυτές
- Προενισχυτές οπτικοακουστικών σημάτων
- Παθητικοί προενισχυτές

Οι προενισχυτές στάθμης γραμμής δέχονται μόνο σήματα υψηλής στάθμης από όλες τις αναλογικές πηγές, πλην του αναλογικού πικάπ. Έχουν συνήθως μικρό κέρδος ενίσχυσης, τόσο που να τροφοδοτούν σωστά οποιοδήποτε τελικό ενισχυτή.

### 1.1.3 ΗΧΕΙΑ

Ειδικές ηχογραφήσεις μουσικής με μικρόφωνα και μίξερ και μηχανές ταινιών που χρησιμοποιήθηκαν και μερικά στερεοφωνικά αρχεία "ring-pong" υπερέβησαν το στερεοφωνικό αποτέλεσμα, ώστε οι άνθρωποι να παρατηρήσουν πραγματικά την παρουσία ενός αριστερού και δεξιού ηχείου.

Το **ηχείο** αποτελεί μία διάταξη/συσκευή, η οποία έχει σκοπό τη μετατροπή της λαμβανόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (εισερχόμενο σήμα) σε ακουστική ενέργεια, δηλαδή σε στιγμιαίες μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα (διαμήκη κύματα), οι οποίες αντιστοιχούν σε όσο το δυνατόν περισσότερο φυσικό και αληθοφανή ήχο. Επομένως, το ηχείο δεν αποτελεί μία γνήσια ηλεκτρονική συσκευή, αλλά μία ηλεκτρομηχανική ή ηλεκτροακουστική διάταξη.

Το ηχείο δεν θα πρέπει να συγχέεται με το αντηχείο που συναντάται στα έγχορδα μουσικά όργανα και το οποίο έχει σκοπό την ενίσχυση του ήχου μέσω του συντονισμού του. Αντίθετα, η αρχή λειτουργίας των ηχείων που χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή της μουσικής είναι εντελώς διαφορετική. Η προσπάθεια των σχεδιαστών ηχείων είναι η όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόσβεση των μηχανικών συντονισμών της καμπίνας, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί και να απουσιάζει εντελώς.

Υπάρχουν πολλά είδη ηχείων, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία και τις αρχές λειτουργίας πάνω στις οποίες στηρίζεται το καθένα. Μία βασική διάκριση των ηχείων είναι τα ηλεκτροστατικά, τα ηλεκτροδυναμικά, τα μαγνητοστατικά, τα υβριδικά, κτλ. Άλλη επίσης βασική διάκριση είναι τα μονόπολα συμβατικά ηχεία, τα δίπολα (διπολικά) ηχεία και τα αμφιπολικά ηχεία. Όλες οι κατηγορίες παρουσιάζουν διάφορες υποδιαιρέσεις με κοινά μεταξύ τους χαρακτηριστικά, δυσκολεύοντας την αυστηρή κατάταξη των ηχείων.

## 1.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Ένας τρόπος για να γνωρίσουμε τους ενισχυτές είναι να δούμε πως συμπεριφέρονται όταν διεγείρονται από ημιτονικό σήμα. Στην περίπτωση αυτή, ενδιαφερόμαστε κυρίως να δούμε το πώς μεταβάλλεται το πλάτος και η φάση του σήματος εξόδου για διάφορες τιμές της συχνότητας του ημιτονικού σήματος εισόδου, του οποίου το πλάτος διατηρείται σταθερό. Επειδή, η κυματομορφή του σήματος στην έξοδο παραμένει ημιτονική, αφού, ένα γραμμικό κύκλωμα δεν μπορεί να αλλάξει το περιεχόμενο των αρμονικών στο σήμα, η γνώση του πλάτους και της φάσης του σήματος είναι επαρκής για την περιγραφή του σήματος στην έξοδο.

Με άλλα λόγια, προσδιορίζοντας το μέτρο και τη φάση του σήματος εξόδου, προσδιορίζουμε τον φάσορά του (phasor), ο οποίος και μόνον, είναι επαρκής να περιγράψει το σήμα, αφού γνωρίζουμε ότι, η κυματομορφή του ημιτονικού σήματος δεν αλλάζει. Αυτή η μελέτη είναι γνωστή στη θεωρία κυκλωμάτων ως ημιτονική ανάλυση.

Αν λοιπόν,  $y_o(t)$  είναι το σήμα εξόδου κυκλώματος για ημιτονική διέγερση  $x_i(t)$ , τότε, τα μέγιστα μεγέθη αυτά συνδέονται στο χώρο των συχνοτήτων με τη σχέση

$$Y_o(j\omega) = H(j\omega) * X_i(j\omega)$$

Όπου  $H(j\omega)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος και  $X_i(j\omega)$ ,  $Y_o(j\omega)$  είναι οι φάσορες των σημάτων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Θεωρώντας ως είσοδο την κρουστική συνάρτηση και η συνάρτηση μεταφοράς αποτελεί τον μετασχηματισμό Laplace, μπορούμε να πάρουμε το μέτρο και την φάση της συνάρτησης μεταφοράς  $H(s)$  αν θεωρήσουμε  $s = j\omega$ .

Απόκριση συχνότητας μέτρου  $|H(j\omega)|$

Απόκριση συχνότητας φάσης  $\arg\{H(j\omega)\}$

### 1.2.1 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της απόκρισης συχνότητας ενισχυτών πολλών βαθμίδων περιπλέκεται, ιδιαίτερα όταν οι βαθμίδες αυτές δεν είναι ίδιες μεταξύ τους. Όταν οι βαθμίδες είναι ίδιες μεταξύ τους, τότε, μπορούμε να προσδιορίσουμε αναλυτικά την ανώτερη και κατώτερη συχνότητα αποκοπής, όταν είναι γνωστή η απόκριση μιας βαθμίδας.

Αν θεωρήσουμε τη λειτουργία μιας βαθμίδας ξεχωριστά, στην περιοχή των χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, τότε, οι αποκρίσεις ενισχυτή μιας βαθμίδας και  $n$  βαθμίδων θα προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

α) Περιοχή χαμηλών συχνοτήτων

$$A = \frac{A_m}{1+j\frac{\omega}{\omega_L}}, A_n = \left(\frac{A_m}{1+j\frac{\omega}{\omega_L}}\right)^n$$

β) Περιοχή υψηλών συχνοτήτων

$$A = \frac{A_m}{1-j\frac{\omega}{\omega_H}}, A_n = \left(\frac{A_m}{1-j\frac{\omega}{\omega_H}}\right)^n$$

Επομένως για τον σχεδιασμό ενός ενισχυτή πολλών όμοιων βαθμίδων με ορισμένο εύρος συχνοτήτων απαιτείται όπως οι επιμέρους ενισχυτές έχουν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων από το σχεδιαζόμενο.

Το εύρος συχνοτήτων ενισχυτή πολλών ανόμοιων βαθμίδων καθορίζεται από τη βαθμίδα με το στενότερο εύρος συχνοτήτων.

### 1.3 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ

Τρόπος μέτρησης της ακρίβειας στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που έρχεται από τον ενισχυτή σε ακουστική ενέργεια από τα ηχεία (ή τα ακουστικά). Όσο πιο ευαίσθητα είναι τα ηχεία τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση ήχου που αποδίδουν. Μετριέται σε decibel (dB) και κάθε 3 dB αντιστοιχούν σε διπλάσια ποσότητα ενέργειας. Με βάση τα παραπάνω, εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι σε ένα ηχοσύστημα είναι προτιμότερη η αγορά πιο ευαίσθητων ηχείων από αυτή ενός πιο ισχυρού ενισχυτή.

### 1.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ

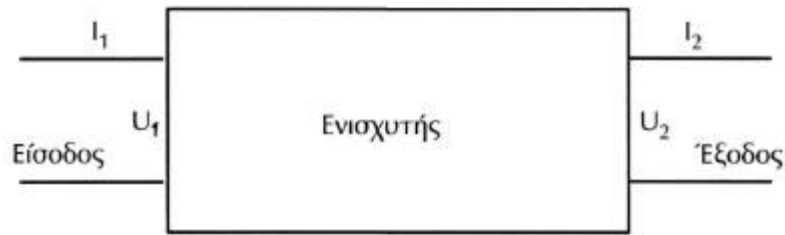
Ένας ενισχυτής ευρείας περιοχής μέσα στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων του χαρακτηρίζεται από τρία μεγέθη, που είναι ο παράγων ενίσχυσης αντίσταση εισόδου και η αντίσταση εξόδου. Σε μία εφαρμογή επιδιωκόμενο είναι η μέγιστη απομόνωση μεταξύ δύο βαθμίδων με παρεμβολή κάποιου ενισχυτή, τότε θα μπορούσε να πει κανείς ότι κυρίαρχος είναι ο ρόλος των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου. Όταν ένας ενισχυτής παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πηγής και ενός φορτίου, ή στην ανάλογη περίπτωση, όταν παρεμβάλλεται μεταξύ δύο βαθμίδων, η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή παίζει το ρόλο αντίστασης φορτίου για τη βαθμίδα που προηγείται, η δε αντίσταση εξόδου του ενισχυτή παίζει το ρόλο αντίστασης πηγής για τη βαθμίδα που έπεται.

- **Αντίσταση εισόδου** ( $r_{in}$ ) = καλείται το πηλίκο  $r_{in} = u_1/i_1$ .
- **Αντίσταση εξόδου** ( $r_o$ ) = καλείται το πηλίκο  $r_o = u_2/i_2$ , όταν στην είσοδο δεν εφαρμόζεται σήμα.

όπου:

$u_1, i_1$  η τάση και το ρεύμα του σήματος εισόδου (rms τιμές),

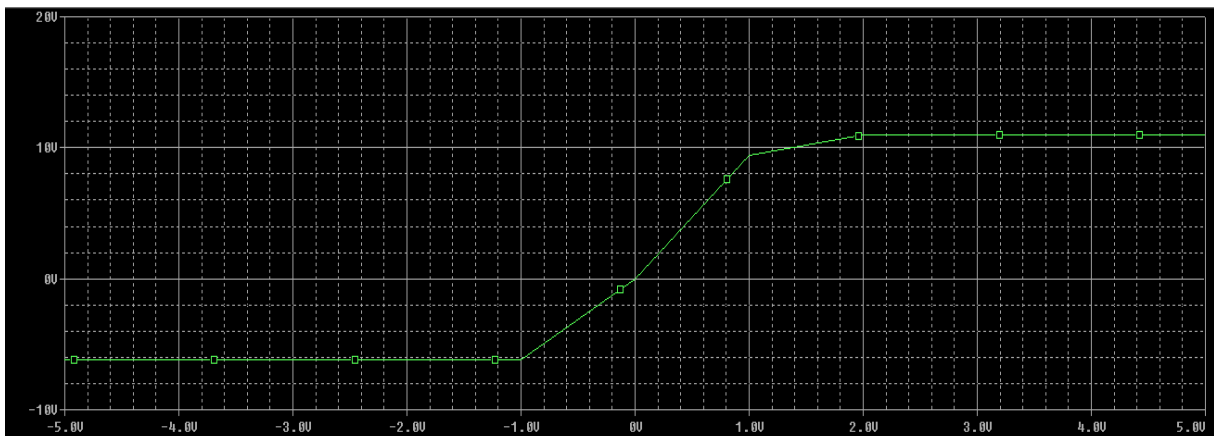
$u_2, i_2$  η τάση και το ρεύμα του σήματος εξόδου (rms τιμές).



Εικόνα 1.1

### 1.4.1 ΕΥΡΟΣ ΤΑΣΗΣ

Σε έναν πραγματικό ενισχυτή η χαρακτηριστική μεταφοράς μπορεί να παρουσιάσει μη γραμμικότητες διαφόρων πλατών ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής του ενισχυτή και την προσπάθεια που έχει καταβληθεί κατά τη φάση της σχεδίασης, ώστε να εξασφαλιστεί η γραμμικότητα της λειτουργίας. Στην Εικόνα 1.2 είναι ένα παράδειγμα χαρακτηριστικής μεταφοράς. Όταν η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι γραμμική με σταθερή κλίση διερχόμενη από την αρχή των αξόνων, προς θετικές και αρνητικές τιμές υπάρχει γραμμικότητα. Όταν αρχίζει να χαλάει η γραμμικότητα τότε έχουμε κάποιο ημίτονο (ή σήμα) στην είσοδο αλλά παραμορφωμένο σήμα στην έξοδο. Σαν ενεργός τιμή ορίζεται το εύρος τάσης που έχουμε στην έξοδο είναι το μέγιστο πλάτος που έχουμε πριν αρχίσει η παραμόρφωση δια  $\sqrt{2}$  (η ενεργός τιμή που αντιστοιχεί στην τιμή αυτή).



Εικόνα 1.2

## 1.5 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Ένας πραγματικός ενισχυτής δεν αναπαράγει πάντοτε απόλυτα το σήμα εισόδου, πολλαπλασιάζοντάς το απλώς επί μία σταθερά. Αντίθετα, ορισμένες φορές το σήμα εξόδου δεν μοιάζει απόλυτα με το σήμα εισόδου. Αυτή η αλλοίωση της κυματομορφής του σήματος εξόδου αναφέρεται ως παραμόρφωση. Η παραμόρφωση του σήματος εξόδου του ενισχυτή μπορεί να οφείλεται, είτε στη μη γραμμική συμπεριφορά του ενισχυτή, είτε στην περιορισμένη απόκριση συχνότητας του ενισχυτή. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για μη γραμμική παραμόρφωση (nonlinear distortion), ενώ στη δεύτερη περίπτωση για παραμόρφωση συχνότητας.

### 1.5.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Εάν η παραμόρφωση συχνότητας ενός ενισχυτή δεν καλύπτει το φάσμα συχνοτήτων ενός σήματος, τότε, οι συχνότητες που βρίσκονται έξω από τη ζώνη ενισχυμένων συχνοτήτων του ενισχυτή θα τύχουν μικρής ή καθόλου ενίσχυσης, με αποτέλεσμα να περιέχονται στο σήμα εξόδου λιγότερο ή καθόλου. Αφού, λοιπόν, η συνεισφορά τους στο σήμα εξόδου δε θα είναι ανάλογη αυτής, που υπήρχε στο σήμα εισόδου, η κυματομορφή του σήματος εξόδου θα είναι παραμορφωμένη. Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για παραμόρφωση σήματος (frequency distortion).

Ένας ενισχυτής για να μην παρουσιάζει παραμόρφωση συχνότητας θα πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

- α) Να εμφανίζει σταθερή ενίσχυση σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων εισόδου.
- β) Η διαφορά φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου να είναι, είτε 0 ή  $k\pi$ , όπου  $k$  ακέραιος αριθμός, θετικός ή αρνητικός, είτε η απόκριση φάσης του να είναι γραμμική σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων εισόδου.

### 1.5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (THD)

Στο πιο γενικό πλαίσιο αυτό αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το σήμα εξόδου από κάποιο τμήμα της αλυσίδας χειρισμού σήματος διαφέρει από εκείνο που υπάρχει στην είσοδό του εκτός από αυτό που οφείλεται αποκλειστικά στην ομοιόμορφη και ανεξάρτητη από τη συχνότητα ενίσχυση ή εξασθένηση. Σε κανονική χρήση ο όρος αυτός αναφέρεται στην παραμόρφωση της κυματομορφής μιας συνεχούς ομοιόμορφης ημιτονοειδούς κυματομορφής

(σταθερής κατάστασης), είτε ως αποτέλεσμα των συνηθισμένων συστροφών είτε κάμψεων σε αυτή την κυματομορφή (αρμονική παραμόρφωση – έτσι αποκαλείται επειδή τα προϊόντα παραμόρφωσης εμφανίζονται σε συχνότητες που συσχετίζονται αρμονικά με τη βασική συχνότητα) ή ως αποτέλεσμα της ανεπιθύμητης αλληλεπίδρασης λόγω ατελειών του καναλιού χειρισμού του σήματος δύο ή περισσότερων συχνοτήτων που υπάρχουν ταυτόχρονα (παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης).

Η αρμονική παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί από ένα απλό όργανο, γνωστό και ως μετρητής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD meter) στο οποίο το εισερχόμενο σήμα μετρείται από ένα μιλιβολτόμετρο εναλλασσόμενου ρεύματος, είτε απευθείας, είτε μέσω ενός ακριβώς ρυθμισμένου φίλτρου “notch”. Αν ο μετρητής είναι ρυθμισμένος να διαβάζει σε πλήρη κλίμακα χωρίς φίλτρο, και ύστερα αυτή η ένδειξη να συγκρίνεται με τη μικρότερη ένδειξη η οποία αποκτάται αφότου το “notch” φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί για να αφαιρέσει τη βασική, αυτό που απομένει, σαν κομμάτι της αρχικής, είναι η συνολική αρμονική παραμόρφωση, συν όμως το θόρυβο και το βουητό που συνοδεύει το αρχικό σήμα.

### **1.5.3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΔΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (TIMD)**

Αν η ταχύτητα μεταβολής της εξόδου είναι αρκετά χαμηλή εμφανίζεται ένα είδος παραμόρφωσης που ονομάζεται μεταβατική παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (transient intermodulation distortion, TIM) και μπορεί να προκαλέσει σοβαρότατες παραμορφώσεις στο σήμα εξόδου. Πο συγκεκριμένα η παραμόρφωση θα εμφανιστεί αν ο ρυθμός μεταβολής της εξόδου είναι μεγαλύτερος από το SR.

Η ανθρώπινη ακοή δεν είναι τόσο ευαίσθητη σε αρμονικές παραμορφώσεις όσο σε παραμορφώσεις διάβασης και μεταβατικής ενδοδιαμόρφωσης (TIM). Με απλά λόγια ένας ενισχυτής με ολική αρμονική παραμόρφωση (THD) 0.3% και παραμόρφωση μεταβατικής ενδοδιαμόρφωσης (TIMD) 0.003% θα ακούγεται πάντοτε καλύτερα από έναν ενισχυτή με THD 0.003% και TIMD 0.3%.

Ανεξάρτητα από το κέρδος ανοικτού βρόγχου, οι διάφορες βαθμίδες ενός ενισχυτή υψηλής πιστότητας πρέπει να διαθέτουν αρκετά εκτεταμένο εύρος ζώνης, ώστε να εξασφαλίζουν κατά το δυνατόν ένα συνολικό εύρος ζώνης ανοικτού βρόγχου, μεγαλύτερο από την ακουστή περιοχή του φάσματος. Η βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης και της φασικής συμπεριφοράς είναι δυνατή οπουδήποτε είναι απαραίτητο μέσα στον ενισχυτή, με τη βοήθεια αντιστάθμισης προπορείας. Το είδος αυτό της αντιστάθμισης γίνεται με τη χρήση δικτύων που



αυξάνουν τοπικά την ενίσχυση πάνω από μια δεδομένη συχνότητα. Η σωστή χρήση της αντιστάθμισης συχνότητας, περιορίζει το εύρος ζώνης ανοικτού βρόγχου και είναι γνωστή σαν αντιστάθμιση επιπορείας. Έτσι ρυθμίζεται ο ρυθμός ανύψωσης σήματος του ενισχυτή και συνεπώς είναι καλό να εφαρμοσθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στην είσοδο ώστε να εξασφαλίζει τον περιορισμό του σήματος πριν αυτό οδηγηθεί στις επόμενες βαθμίδες.

## 1.6 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΞΟΔΟΥ (SLEW RATE)

Ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της εξόδου για διέγερση ορθογωνικού παλμού (θεωρητικά άπειρος ρυθμός μεταβολής κατά την αλλαγή στάθμης) με αρκετά μεγάλο πλάτος.

Ο πυκνωτής συνδέει το ρεύμα που τον διαρρέει με την τάση στα άκρα του με μια σχέση μορφής:

$$\pm i_{\text{out(max)}} = \pm C_c \frac{\Delta U_c}{\Delta t} = \pm C_c \frac{\Delta U_{\text{out}}}{\Delta t}$$


που σημαίνει ότι το μέγιστο ρεύμα εξόδου του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζει, τελικά το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της τάσης εξόδου, έτσι ορίζουμε ταχύτητα μεταβολής της εξόδου, SR,  $SR = (\Delta U_{\text{out}}) / (\Delta t)$  και μετριέται σε Volt/sec.

Προκειμένου να αυξηθεί το SR είτε το μέγιστο ρεύμα εξόδου του διαφορικού πρέπει να αυξηθεί, είτε η χωρητικότητα του πυκνωτή αντιστάθμισης  $C_c$ , να μειωθεί, είτε και τα δύο ταυτόχρονα. Αποδεικνύεται πως τέτοιες μεταβολές μειώνουν το εύρος ζώνης ισχύος του ενισχυτή, το οποίο εξαρτάται από τη διαγωγιμότητα των ενεργών στοιχείων του διαφορικού και τον πυκνωτή αντιστάθμισης. Αυξάνοντας το ρεύμα εξόδου του διαφορικού αυξάνεται και η διαγωγιμότητά του και αυξάνεται το εύρος ζώνης, αυξάνοντας παράλληλα την πιθανότητα για (ανεπιθύμητη) ταλάντωση με σχετικά χαμηλές απολαβές κλειστού βρόγχου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 ΕΝΕΡΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Οι μόνες ενισχυτικές βαθμίδες μέχρι το 1950 ήταν οι διάφορες λυχνίες. Έκτοτε, το διπολικό τρανζίστορ αντικατέστησε τις λυχνίες στο μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονικών εφαρμογών. Το βασικότερο πλεονέκτημα των τρανζίστορ είναι το πολύ μικρό τους μέγεθος. Το χαρακτηριστικό αυτό έδωσε τη δυνατότητα της ανάπτυξης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, στα οποία εκατομμύρια τρανζίστορ συνυπάρχουν σε μία ψηφίδα (chip).

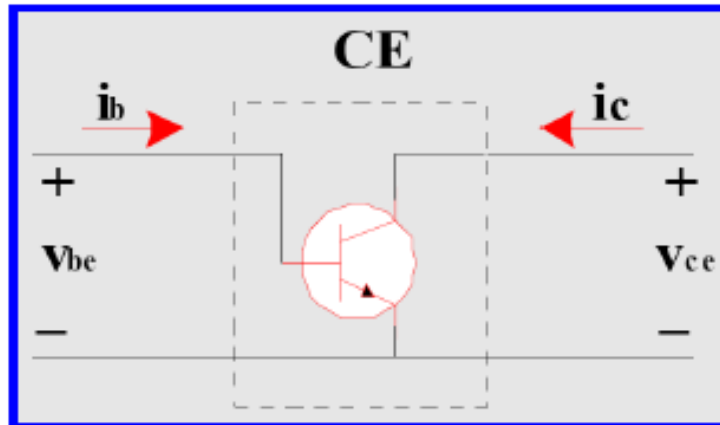
<b>Ενεργητικά στοιχεία</b>			
			
<b>Τρανζίστορ διπλής επαφής</b>	<b>Τρανζίστορ FET</b>	<b>Τρανζίστορ JFET</b>	<b>Τελεστικός ενισχυτής</b>

Εικόνα 2.1

### 2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΕ ΚΥΚΛΩΜΑ

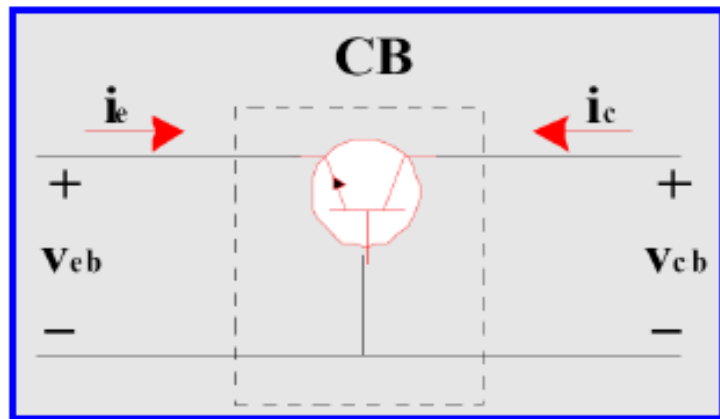
Η μελέτη κυκλωμάτων με τρανζίστορ διευκολύνεται ιδιαίτερα αν το στοιχείο θεωρηθεί ως δίθυρο κύκλωμα. Δεδομένου ότι, το τρανζίστορ είναι ένα τριπολικό στοιχείο, οι πρακτικά χρήσιμες συνδέσεις του σε κύκλωμα είναι τρεις:

1. Σύνδεση κοινού εκπομπού
2. Σύνδεση κοινής βάσης
3. Σύνδεση κοινού συλλέκτη



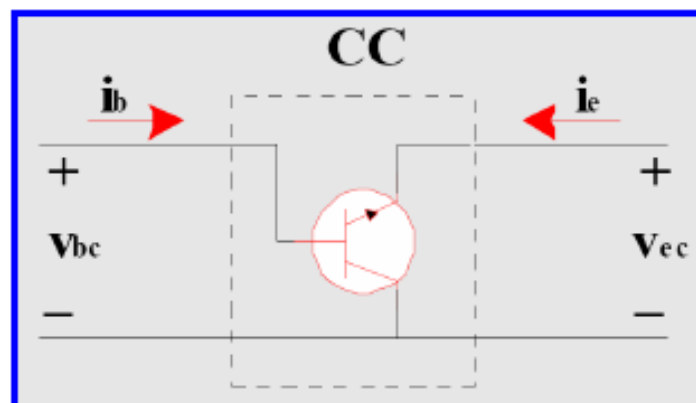
Σύνδεση κοινού εκπομπού

Εικόνα 2.2



Σύνδεση κοινής βάσης

Εικόνα 2.3



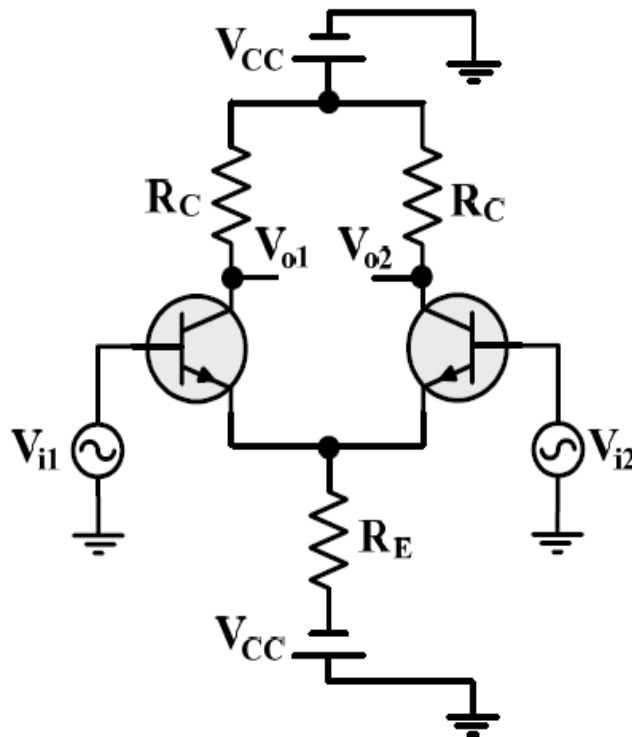
Σύνδεση κοινού συλλέκτη

Εικόνα 2.4

### 2.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Η διαφορική βαθμίδα έχει αποτελέσει το κύριο δομικό στοιχείο όλων, πρακτικά, των μονολιθικών γραμμικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και έχει τεράστια αξία.

Το βασικό κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.5

Πρόκειται για έναν σύνθετο ενισχυτή, αποτελούμενο από δύο όμοιες βαθμίδες ΚΕ με κοινή την αντίσταση εκπομπού, η οποία έχει υψηλή τιμή. Οι δύο αντιστάσεις συλλέκτη γίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο όμοιες. Όταν δεν υπάρχει είσοδος σήματος, το κύκλωμα ισορροπεί. Τα ρεύματα των δύο τρανζίστορ είναι ίσα, τα δυναμικά των συλλεκτών είναι ίσα και δεν υπάρχει διαφορική τάση μεταξύ των ακροδεκτών των εξόδων. Αν σημειωθεί κάποια μεταβολή στη θερμοκρασία ή στην τάση τροφοδότησης και τα δύο τρανζίστορ θα επηρεαστούν με τον ίδιο τρόπο. Η μεταβολή κάθε ρεύματος πρέπει να είναι ίδια για κάθε τρανζίστορ. Η μεταβολή τάσεως των δύο συλλεκτών θα είναι ίδια και θα εξακολουθεί να μην υπάρχει διαφορική τάση μεταξύ των ακροδεκτών της εξόδου.

Όταν ένα θετικό σήμα εφαρμοστεί σε μία από τις δύο εισόδους, το ρεύμα που διαρρέει το αντίστοιχο τρανζίστορ αυξάνεται και επειδή το ολικό ρεύμα πρέπει να παραμένει σταθερό,

ελαττώνεται κατά ίσο ποσό το ρεύμα στο άλλο τρανζίστορ. Η τάση του πρώτου συλλέκτη γίνεται λιγότερο θετική και του δεύτερου γίνεται περισσότερο θετική. Έτσι μπορούμε να λάβουμε ένα σήμα εξόδου από οποιοδήποτε συλλέκτη (ανάλογα με τη φάση, που απαιτείται) ή μεταξύ συλλεκτών, οπότε έχουμε διαφορική έξοδο.

Τα πλεονεκτήματα του διαφορικού ενισχυτή είναι:

- Υψηλή διαφορική ενίσχυση
- Απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου
- Ενίσχυση συνεχούς
- Μεγάλη αντίσταση εισόδου
- Αποφυγή πυκνωτή διαρροής
- Δυνατότητα διαφορικής εξόδου
- Σταθερότητα του σημείου λειτουργίας
- Καταλληλότητα για ολοκληρωμένο κύκλωμα

### 2.3.1 ΚΑΘΡΕΦΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Ένα διπολικό τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ο απλούστερος μετατροπέας ρεύματος προς ρεύμα, αλλά ο λόγος μεταφοράς του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, τις ανοχές β, κ.λπ. Για την εξάλειψη αυτών των ανεπιθύμητων διαταραχών, ένας καθρέφτης ρεύματος αποτελείται από δύο διαδοχικά ρεύματα προς τάση και μετατροπείς τάσης σε ρεύμα τοποθετημένα στις ίδιες συνθήκες και με αντίστροφα χαρακτηριστικά. Δεν είναι υποχρεωτικό να είναι γραμμικά, η μόνη απαίτηση είναι τα χαρακτηριστικά τους να είναι σαν καθρέφτες. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο πανομοιότυποι μετατροπείς, αλλά το χαρακτηριστικό του πρώτου αντιστρέφεται εφαρμόζοντας αρνητική ανατροφοδότηση. Έτσι, ένας καθρέφτης ρεύματος αποτελείται από δύο ισοδύναμους μετατροπείς (ο πρώτος - αντίστροφος και ο δεύτερος - άμεσος).

Ένας καθρέφτης ρεύματος είναι ένα κύκλωμα που έχει σχεδιαστεί για να αντιγράφει ένα ρεύμα μέσω μιας ενεργής συσκευής ελέγχοντας το ρεύμα σε μια άλλη ενεργή συσκευή ενός κυκλώματος, διατηρώντας το ρεύμα εξόδου σταθερό ανεξάρτητα από τη φόρτωση. Το ρεύμα που "αντιγράφεται" μπορεί να είναι, και μερικές φορές είναι, ένα διαφορετικό ρεύμα σήματος. Ένας ιδανικός καθρέφτης ρεύματος είναι απλά ένας ιδανικός ενισχυτής ρεύματος

αναστροφής που αντιστρέφει και την τρέχουσα κατεύθυνση ή μπορεί να αποτελείται από μια τρέχουσα ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Ο καθρέφτης ρεύματος χρησιμοποιείται για να παρέχει ρεύματα πόλωσης και ενεργά φορτία στα κυκλώματα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μιας πιο ρεαλιστικής πηγής ρεύματος δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ιδανικές πηγές ρεύματος.

- Καθρέφτης ρεύματος BJT

Εάν μια τάση εφαρμόζεται στη σύνδεση BJT-emitter ως ποσότητα εισόδου και το ρεύμα συλλέκτη λαμβάνεται ως ποσότητα εξόδου, το τρανζίστορ θα λειτουργεί ως εκθετικός μετατροπέας τάσης-προς-ρεύμα. Εφαρμόζοντας μια αρνητική ανάδραση (απλά συνδέοντας τη βάση και τον συλλέκτη) το τρανζίστορ μπορεί να "αντιστραφεί" και θα αρχίσει να λειτουργεί ως ο αντίθετος λογαριθμικός μετατροπέας ρεύματος σε τάση. Τώρα θα ρυθμίσει την τάση εκπομπού βάσης "εξόδου" έτσι ώστε να περάσει το εφαρμοζόμενο ρεύμα συλλέκτη "εισόδου".

- Βασικός καθρέφτης MOSFET

Ο βασικός καθρέφτης ρεύματος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας τρανζίστορ MOSFET. Το τρανζίστορ M1 λειτουργεί με κορεσμό ή ενεργό τρόπο, όπως και το M2. Σε αυτήν τη ρύθμιση, το ρεύμα εξόδου IOUT σχετίζεται άμεσα με το IREF.

- Καθρέφτης Widlar

Ο Καθρέφτης ρεύματος Widlar μοιάζει με τον απλό καθρέφτη ρεύματος. Ο κλάδος του κυκλώματος που έρχεται το ρεύμα αναφοράς είναι ο ίδιος. Στο τρανζίστορ που βρίσκεται στον κλάδο του ρεύματος εξόδου έχει προστεθεί μια αντίσταση στον εκπομπό. Η αντίσταση αυτή πρέπει να έχει μικρή τιμή γενικά και με την προσθήκη της επιτυγχάνεται αυξημένη αντίσταση εξόδου και σταθεροποίηση ρεύματος. Αυτός ο καθρέφτης ρεύματος είναι εύκολα υλοποιήσιμος σε IC. Ενδείκνυται για χαμηλά ρεύματα κυρίως, αλλά μια παραλλαγή του που θα συναντήσουμε στην εργασία αυτή, η οποία περιλαμβάνει αντίσταση εκπομπού και στα δυο τρανζίστορ, μπορεί να δώσει και λίγο μεγαλύτερα ρεύματα.

- Καθρέφτης Wilson

Μια άλλη τοπολογία είναι ο τρέχων καθρέφτης του Wilson. Ο καθρέφτης Wilson επιλύει το πρόβλημα τάσης Early Effect σε αυτόν τον σχεδιασμό.

Ο Καθρέφτης ρεύματος Wilson περιλαμβάνει και ένα τρίτο τρανζίστορ στον κλάδο που παίρνουμε το ρεύμα εξόδου. Ο τρόπος σύνδεσης των άλλων δυο τρανζίστορ είναι αντίθετος σε σχέση με τον απλό καθρέφτη ρεύματος, δηλαδή το τρανζίστορ που βρίσκεται στον κλάδο που έρχεται το ρεύμα αναφοράς έχει βραχυκυκλωμένη βάση με συλλέκτη και, επίσης, με τη βάση του τρίτου τρανζίστορ. Και σε αυτόν τον καθρέφτη ρεύματος επιτυγχάνεται αυξημένη αντίσταση εξόδου.

Early Effect είναι η διακύμανση του πραγματικού πλάτους της βάσης σε ένα διπολικό τρανζίστορ διασταύρωσης (BJT) λόγω μιας διακύμανσης στην εφαρμοζόμενη τάση βάσης προς συλλέκτη. Μια μεγαλύτερη αντίστροφη μεροληψία κατά μήκος της σύνδεσης συλλέκτη-βάσης, για παράδειγμα, αυξάνει το πλάτος εξάντλησης συλλέκτη-βάσης, μειώνοντας έτσι το πλάτος του τμήματος φορέα φορτίου της βάσης.

### **2.3.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ**

Ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό μιας ενισχυτικής διάταξης είναι η μεταβολή της ενίσχυσης τάσης  $A_v$  συνάρτηση της συχνότητας του σήματος εισόδου. Η ενίσχυση τάσης μειώνεται στις χαμηλές συχνότητες λόγω του ότι η χωρητική αντίσταση των πυκνωτών σύζευξης και απόζευξης αυξάνεται όσο μειώνεται η συχνότητα του σήματος εισόδου. Η ενίσχυση τάσης μειώνεται και στις υψηλές συχνότητες λόγω της επίδρασης των εσωτερικών παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ. Σε καμία περίπτωση η ενίσχυση τάσης μίας βαθμίδας δεν μπορεί να υπερβεί το  $\beta$  του τρανζίστορ, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 100 και 300 (για τρανζίστορ ασθενών ρευμάτων).

Το στάδιο τάσης-ενισχυτή συχνά θεωρείται ως το πιο κρίσιμο μέρος ενός ενισχυτή ισχύος, δεδομένου ότι δεν παρέχει μόνο όλη την αύξηση τάσης αλλά πρέπει να δώσει και την πλήρη τάση εξόδου.

### **2.3.3 PUSH – PULL**

Η διάταξη PUSH-PULL δεν εμφανίζει στην έξοδο του ενισχυτή αρμονικές άρτιας τάξης (δεύτερη αρμονική, τέταρτη αρμονική, έκτη αρμονική και ου το καθ' εξής) κάτι που είναι πολύ σημαντικό αφού η δεύτερη αρμονική είναι πάντα η ισχυρότερη (με διαφορά) απ' όλες τις άλλες.

Ανάλογα με τον τρόπο πόλωσης των τρανζίστορ ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες ή τάξεις λειτουργίας. Οι τάξεις αυτές είναι η τάξη A, η τάξη B και η τάξη C, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που ένας ενισχυτής σχεδιάζεται να λειτουργεί σε κάποια ενδιάμεση τάξη μεταξύ της A και της B, η οποία ονομάζεται τάξη AB. Η τάξη λειτουργίας καθορίζει το ποσοστό της περιόδου ενός σήματος εισόδου στο οποίο δραστηριοποιείται (άγει).

Στην τάξη A η πόλωση του τρανζίστορ ορίζεται έτσι ώστε το σημείο ηρεμίας Q να βρίσκεται στο μέσο τα ευθείας φόρτου. Με αυτόν τον τρόπο το ρεύμα βάσης  $i_B$  πάλλεται εκατέρωθεν του ρεύματος ηρεμίας  $I_B$  σε όλη τη διάρκεια της περιόδου ενός AC σήματος εισόδου και επομένως και το ρεύμα συλλέκτη πάλλεται εκατέρωθεν του σημείου Q. Στην τάξη A το ρεύμα (βάσης και συλλέκτη) να ρέει σε όλη τη διάρκεια της περιόδου του σήματος εισόδου. Ωστόσο χρειάζεται προσοχή κατά την σχεδίαση ενός ενισχυτή, το ρεύμα ηρεμίας  $I_B$  να έχει οριστεί με τρόπο ώστε σε όλη τη διάρκεια της περιόδου του σήματος να υπάρχει κίνηση σε γραμμικά τμήματα της χαρακτηριστικής μεταφοράς του τρανζίστορ για την ελαχιστοποίηση των αρμονικών παραμόρφωσης.

Στην τάξη B η πόλωση του τρανζίστορ ορίζεται έτσι ώστε το σημείο ηρεμίας Q να βρίσκεται στο μηδέν, σε τέτοια θέση δηλαδή ώστε το ρεύμα βάσης (άρα και του συλλέκτη) να ρέει μόνο κατά την μία ημιπερίοδο του σήματος εισόδου.

Η ενδιάμεση τάξη AB ορίζεται έτσι ώστε το σημείο ηρεμίας Q να βρίσκεται λίγο πάνω από το μηδέν ώστε το ρεύμα βάσης (άρα και του συλλέκτη) να ρέει λίγο παραπάνω από μία ημιπερίοδο του σήματος εισόδου.

Τέλος, στην τάξη C το σημείο λειτουργίας Q ορίζεται σε τέτοια θέση ώστε το ρεύμα βάσης (άρα και του συλλέκτη) να ρέει σε μικρότερο χρονικό διάστημα από μία ημιπερίοδο του σήματος εισόδου και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε διατάξεις υψηλών συχνοτήτων.

## 2.4 ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ

Οι ενισχυτές είναι δίθυρα κυκλώματα στα οποία εμπλέκονται τέσσερα μεγέθη (ρεύμα και τάση εισόδου, ρεύμα και τάση εξόδου). Είναι αναλογικά κυκλώματα, κάποιο από τα μεγέθη εξόδου είναι ανάλογο ενός μεγέθους εισόδου. Στον ενισχυτή τάσης η τάση εξόδου είναι ανάλογη της τάσης εισόδου, ενώ στον ενισχυτή ρεύματος το ρεύμα εξόδου είναι ανάλογο του ρεύματος εισόδου. Οι δύο αυτοί λόγοι είναι καθαροί αριθμοί και αποτελούν την ενίσχυση τάσης ( $A_v$ ) και την ενίσχυση ρεύματος ( $A_i$ ), αντίστοιχα.



Μια τρίτη κατηγορία είναι ο ενισχυτής διαγωγιμότητας, στον οποίο το ρεύμα εξόδου είναι ανάλογο της τάσης εισόδου και ο λόγος αυτός αναφέρεται ως διαγωγιμότητα ( $G_m$ ) του ενισχυτή (και έχει διαστάσεις αγωγιμότητας,  $S$ :  $A/V$ , δηλαδή δεν είναι καθαρός αριθμός). Επίσης μια τέταρτη κατηγορία είναι ο ενισχυτής διεμπέδησης, στον οποίο η τάση εξόδου είναι ανάλογη του ρεύματος εισόδου και ο λόγος αυτός αναφέρεται ως διεμπέδηση ( $R_m$ ) του ενισχυτή (και έχει διαστάσεις αντίστασης,  $\Omega$ :  $V/A$ ).

Ανατροφοδότηση (ανασύζευξη, ανάδραση) μιας ενισχυτικής διάταξης ονομάζεται η μεταφορά ενός μέρους (ποσοστού) του σήματος εξόδου πίσω στην είσοδό της. Το μέρος αυτό του σήματος εξόδου αθροίζεται ή αφαιρείται με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο σήμα εισόδου και το αποτέλεσμα της άθροισης ή της αφαίρεσης οδηγείται στην είσοδο της ενισχυτικής διάταξης. Όταν το μέρος του σήματος εξόδου προστίθεται με το εξωτερικό εφαρμοζόμενο σήμα εισόδου τότε έχουμε θετική ανατροφοδότηση, ενώ όταν αφαιρείται έχουμε αρνητική ανατροφοδότηση. Η θετική ανατροφοδότηση συνήθως αξιοποιείται σε κυκλώματα ταλαντωτών και η αρνητική ανατροφοδότηση σε ενισχυτικές και τροφοδοτικές διατάξεις.

Η συμπεριφορά κάθε ηλεκτρονικού κυκλώματος, που καθορίζεται από τη σχέση ανάμεσα στην διέγερση (είσοδο) και την απόκριση (έξοδο) του, είναι επιθυμητό να παραμένει σταθερή και προβλέψιμη ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας. Στην πράξη η, συμπεριφορά των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μεταβάλλεται λόγω φθοράς των στοιχείων τους ή λόγω των συνθηκών του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργούν.

Επειδή οι παραπάνω παράγοντες είναι απρόβλεπτοι, θα πρέπει τα κυκλώματα ενίσχυσης να έχουν τη δυνατότητα αυτορρύθμισης, έτσι ώστε η συμπεριφορά τους να παραμένει όσο το δυνατόν αναλλοίωτη και να πληρούν τις επιθυμητές προδιαγραφές. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται στους ενισχυτές μέσω της εφαρμογής αρνητικής ανατροφοδότησης, κατά την οποία μέρος του σήματος εξόδου ανατροφοδοτείται στην είσοδο, έτσι ώστε να αντισταθμίζονται οι μεταβολές του σήματος εξόδου.

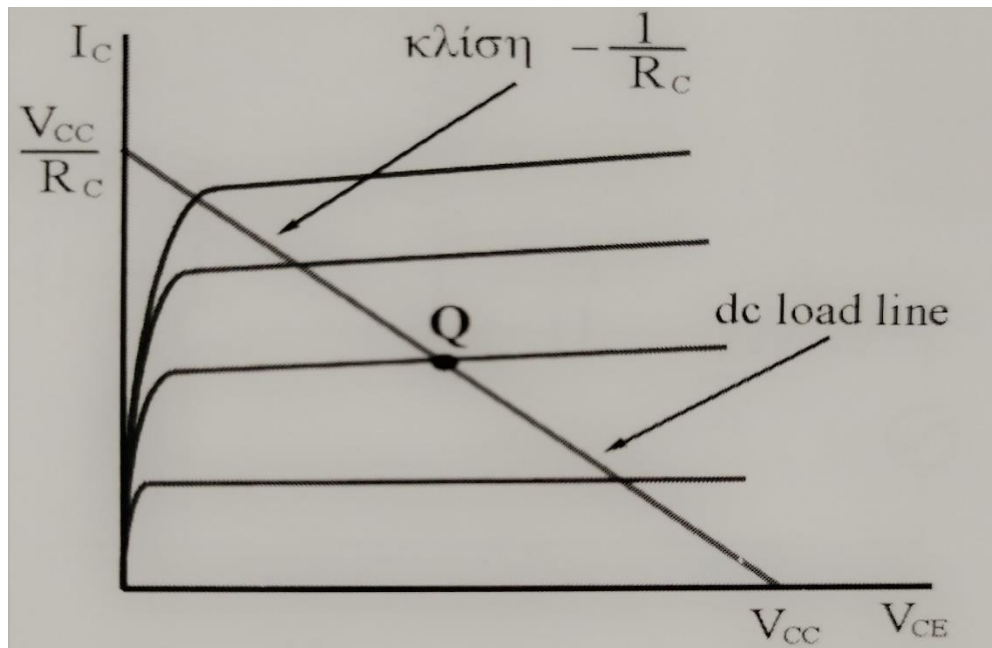
Η αρνητική ανατροφοδότηση παρέχει στους ενισχυτές:

- Σταθεροποίηση της ενίσχυσής τους.
- Αύξηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων (δηλαδή μείωση της χαμηλής συχνότητας αποκοπής και αύξηση της υψηλής συχνότητας αποκοπής).
- Δυνατότητα τροποποίησης των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου.
- Μείωση της παραμόρφωσης και του θορύβου στο σήμα εξόδου.

Βασικό μειονέκτημα της αρνητικής ανατροφοδότησης αποτελεί η μείωση της ενίσχυσης.

## 2.5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

Το σήμα εισόδου προκαλεί μεταβολή του ρεύματος βάσης το οποίο με την σειρά του μετακινεί το σημείο λειτουργίας Q και έτσι προκύπτει μεταβολή του ρεύματος εξόδου.



Εικόνα 2.6

## 2.6 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΑΝΤΩΝΤΑΙ ΣΕ ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Για την κατασκευή μιας βαθμίδας χαμηλού θορύβου είναι απαραίτητη η επιλογή ημιαγωγών που παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά στον τομέα του θορύβου. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη φροντίδα ώστε αυτοί οι ημιαγωγοί να «συνεργάζονται» καλά τόσο με την πηγή του σήματος όσο με τα δικτυώματα ανάδρασης του κυκλώματος.

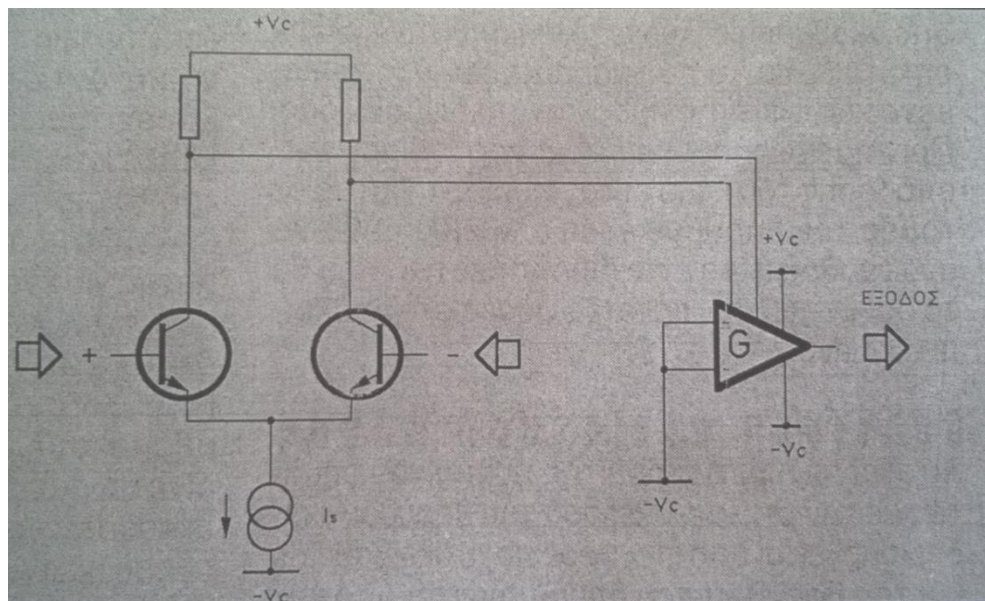
Πέρα από την προσεκτική επιλογή των ημιαγωγών ο σχεδιαστής έχει να διαλέξει ανάμεσα σε αρκετές τοπολογίες που όμως σχεδόν καμία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί σαν η απόλυτη λύση.

Η κλασική λύση που για χρόνια χρησιμοποιείται από καταξιωμένους κατασκευαστές είναι η χρησιμοποίηση πολλών ημιαγωγών παράλληλα συνδεδεμένων προσφέροντας άριστα ηχητικά αποτελέσματα. Βασικό μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι αυτό του

ισομοιρασμού του ρεύματος σε κάθε ημιαγωγό. Η χρησιμοποίηση μικρών αντιστάσεων στον εκπομπό του κάθε τρανζίστορ θα ήταν μια λύση αλλά η πρόθεση αυτών των αντιστάσεων θα αύξανε αρκετά τον θόρυβο της βαθμίδας.

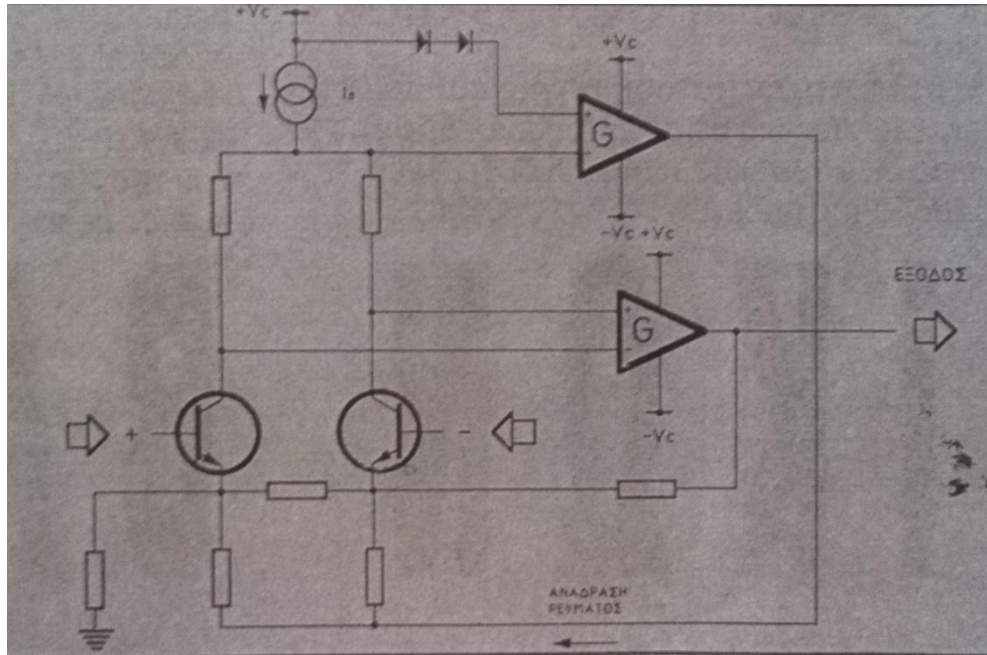
Μια άλλη επιλογή που έχουμε είναι να συζεύξουμε ένα ζευγάρι τρανζίστορ χαμηλού θορύβου στην είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή. Σε αυτήν την περίπτωση όμως αντιμετωπίζουμε προβλήματα ευστάθειας του κυκλώματος και η χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης φάσης είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Η χρήση όμως αυτών των πυκνωτών κάθε άλλο παρά επιθυμητή είναι σ' ένα κύκλωμα υψηλής πιστότητας.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να παρακαμφθούν αντικαθιστώντας (αν υπάρχει δυνατότητα) το διαφορικό ζευγάρι εισόδου του τελεστικού με ένα άλλο χαμηλού θορύβου που συνδέεται στα ποδαράκια του τελεστικού που χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση της τάσης εκτροπής ενώ η αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα είσοδος του τελεστικού συνδέονται στην αρνητική γραμμή τροφοδοσίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.7

Μια τοπολογία που παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα είναι ένα υπέρ ολοκληρωμένο που έχει θόρυβο συναγωνίσιμο με τα καλύτερα διακριτά εξαρτήματα και σχεδόν την απλότητα ενός τελεστικού ενισχυτή στην εφαρμογή. Το κύκλωμα αυτό εργάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει ένα εύρος ζώνης σχετικά ανεξάρτητο από το κέρδος κλειστού βρόγχου του κυκλώματος. Ακόμα στο συγκεκριμένο κύκλωμα μπορούν σχετικά εύκολα να επιτευχθούν μεγάλοι ρυθμοί ανύψωσης. Το κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.8

### 2.6.1 ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Η σύζευξη δύο βαθμίδων, μέσω πυκνωτή, προσδίδει στους ενισχυτές τα εξής χαρακτηριστικά:

Οι δύο βαθμίδες είναι απομονωμένες μεταξύ τους ως προς το συνεχές και ως εκ τούτου, η πόλωση κάθε μίας από τις βαθμίδες δεν επηρεάζεται από την άλλη. Οι βαθμίδες, επομένως μπορεί να είναι ίδιες μεταξύ τους. Έτσι, σχεδιάζοντας την πρώτη βαθμίδα αποφεύγεται ο σχεδιασμός των άλλων.

Ανόμοιες βαθμίδες και μάλιστα με ανόμοια ενισχυτικά στοιχεία μπορούν να συζευχθούν μεταξύ τους.

Η παρουσία του πυκνωτή σύζευξης επηρεάζει την απόκριση των ενισχυτών, καθώς επίσης, δεν αποφεύγονται οι αντιστάσεις πόλωσης για κάθε τρανζίστορ. Απλούστερες δομές μπορεί να προκύψουν με απ' ευθείας σύζευξη βαθμίδων.

### 2.7 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόγχου  $A(s)$  ενός ενισχυτή, ο οποίος έχει τρεις ή περισσότερους πόλους, έτσι ώστε ο ενισχυτής κλειστού βρόγχου να είναι ευσταθής για οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή του κέρδους του κλειστού βρόγχου.

Η απλούστερη μέθοδος για την αντιστάθμιση συχνότητας υλοποιείται με την εισαγωγή ενός νέου πόλου στη συνάρτηση  $A(s)$  σε μια ικανοποιητική χαμηλή συχνότητα  $f_D$ , έτσι ώστε η καμπύλη του τροποποιημένου κέρδους ανοιχτού βρόγχου  $A'(s)$  να τέμνει την καμπύλη  $20\log(1/|\beta|)$  με διαφορά κλίσης  $20\text{dB}/\text{δεκάδα}$ .

Το κύκλωμα του ενισχυτή συνήθως αποτελείται από έναν αριθμό σταδίων κέρδους συνδεδεμένων σε σειρά, με κάθε στάδιο να είναι υπεύθυνο για έναν ή περισσότερους πόλους της συνάρτησης μεταφοράς.

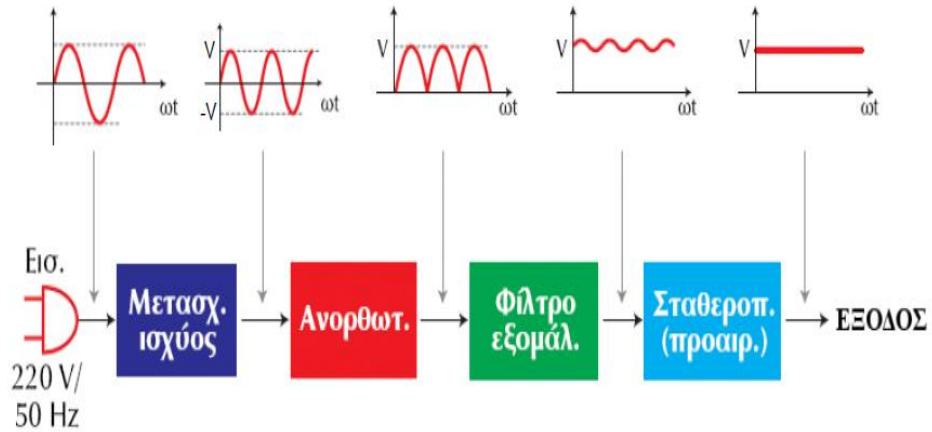
Ένα σοβαρό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αντιστάθμισης είναι ότι το κέρδος ανοιχτού βρόγχου μειώνεται δραστικά στις περισσότερες συχνότητες. Αυτό σημαίνει ότι στις περισσότερες συχνότητες το ποσό της ανάδρασης που είναι διαθέσιμο είναι μικρό. Εφόσον όλα τα πλεονεκτήματα της αρνητικής ανάδρασης είναι ανάλογα με το ποσό της ανάδρασης, η επίδοση του αντισταθμισμένου ενισχυτή είναι χειρότερη από πριν.

## 2.8 ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

Σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως για λόγους πρακτικούς και οικονομικούς προσφέρεται από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η) με τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης (230 Volts AC). Για να τροφοδοτήσουμε μία σειρά από ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις (ενισχυτές, ταλαντωτές, συγκριτές, τηλεόραση, υπολογιστές και άλλα) που περιέχουν παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ) χρειαζόμαστε ηλεκτρική ενέργεια με την μορφή συνεχούς τάσης. Τις περισσότερες φορές μάλιστα χρειάζεται η συνεχής τάση αυτή να έχει και σταθερή τιμή.

Οι διατάξεις που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή λέγονται Ανορθωτικές Διατάξεις ή απλά τροφοδοτικά.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μία σχηματική απεικόνιση των επιμέρους βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό.



Εικόνα 2.9

- 1) Ο Μετασχηματιστής μεταφέρει από το εναλλασσόμενο δίκτυο της ΔΕΗ την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχοντας γαλβανική απομόνωση από αυτό. Ταυτόχρονα παρέχει την κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση στο Δευτερεύον του ώστε στην έξοδο της Τροφοδοτικής Διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC τάση. Γαλβανική απομόνωση μεταξύ δύο «ηλεκτρικών διατάξεων» ονομάζεται η μη ύπαρξη ηλεκτρικού δρόμου ανάμεσά τους (άπειρη αντίσταση). Αυτό είναι κάτι πολύ απαραίτητο στις τροφοδοτικές διατάξεις γιατί αυξάνει τον βαθμό ασφαλείας (από θέμα ηλεκτροπληξίας) όσον αφορά τους χρήστες της ηλεκτρονικής συσκευής που τροφοδοτεί η τροφοδοτική διάταξη.
- 2) Το κύκλωμα ανόρθωσης εμπεριέχει διόδους και μεταφέρει την εναλλασσόμενη τάση που εμφανίζεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, σε τάση μιας πολικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της βασικής ιδιότητας των διόδων που είναι ότι επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος μέσα τους μόνο κατά μία πολικότητα.  
Σήμερα στα κυκλώματα ανόρθωσης των τροφοδοτικών χαμηλής ισχύος χρησιμοποιούνται διόδοι ημιαγωγοί οι οποίοι ονομάζονται και ανορθωτές.
- 3) Το φίλτρο εξομάλυνσης έχει στόχο την ελάττωση των AC συνιστωσών. Η συνεχής τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης δεν έχει σταθερή τιμή. Παρουσιάζει μία διακύμανση (κυμάτωση) γύρω από μία συγκεκριμένη τιμή (τη μέση τιμή της τάσης εξόδου).  
Κυμάτωση ονομάζεται η περιοδική διακύμανση που εμφανίζει η τάση εξόδου. Δηλαδή η συνεχής (αλλά μεταβαλλόμενη) τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης ουσιαστικά αναλύεται σε ένα αριθμό από εναλλασσόμενες συνιστώσες

(ανάλυση κατά Fourier) και από την DC μέση τιμή της. Επειδή όμως τα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα χρειάζονται για την τροφοδοσία τους μια σταθερή DC τάση όμοια με αυτή που παράγει μια μπαταρία, η τυχόν εμφάνιση AC συνιστωσών στην έξοδο της τροφοδοτικής διάταξης δημιουργεί πρακτικά προβλήματα (π.χ. σε έναν ενισχυτή ήχου θα έχει σαν αποτέλεσμα να ακουστεί στα μεγάφωνα ένας βόμβος που θα οφείλεται στην κυμάτωση της DC τάσης τροφοδοσίας).

Τα φίλτρα υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).

- 4) Οι διατάξεις σταθεροποίησης τάσης, οι λεγόμενοι σταθεροποιητές, τοποθετούνται στην έξοδο του φίλτρου διότι παρά την τοποθέτηση των φίλτρων εξομάλυνσης, η συνεχής τάση στην έξοδό τους δεν είναι ακόμα απολύτως σταθερή, έχει μια μικρή κυμάτωση. Επιπλέον η DC μέση τιμή της τάσης εξόδου δεν είναι σταθερή. Για κάποιες συσκευές αυτό μπορεί να μην δημιουργεί προβλήματα οπότε μπορούμε να πούμε ότι το τροφοδοτικό με το φίλτρο που έχουμε βάλει είναι ικανοποιητικό για την δουλειά που το θέλουμε. Για πολλές όμως άλλες εφαρμογές (ηλεκτρονικά κυκλώματα ακριβείας, ψηφιακά κυκλώματα, διάφορες συσκευές), οι μεταβολές των τάσεων τροφοδοσίας δεν είναι ανεκτές, δημιουργούν προβλήματα.

Ο ρόλος των σταθεροποιητών είναι να βγάλουν στην έξοδό τους μία απολύτως σταθερή τάση ανεξαρτήτως της τιμής φορτίου (μέσα στα όρια των δυνατοτήτων του τροφοδοτικού).

Τα τροφοδοτικά που περιέχουν και σταθεροποιητή τάσης ονομάζονται σταθεροποιημένα τροφοδοτικά και είναι πιο δαπανηρά από τα απλά τροφοδοτικά που έχουν μόνο φίλτρο εξομάλυνσης.

Πριν από μερικά χρόνια τα κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης αποτελούνταν από διακριτά εξαρτήματα, όπως δίοδοι zener, transistor. Σήμερα όμως στην εποχή της μικροηλεκτρικής υπάρχει μεγάλη ποικιλία φθηνών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που επιτυγχάνουν καλύτερη σταθεροποίηση με λιγότερο κόστος.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός τροφοδοτικού είναι:

- Η DC τάση εξόδου του τροφοδοτικού (χωρίς φορτίο στην έξοδο)
- Το μέγιστο ρεύμα εξόδου
- Η κυμάτωση της τάσης εξόδου σε Volt ή σε ποσοστιαία τιμή.

Η κυμάτωση σε ποσοστιαία τιμή δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{\text{Κυμάτωση } (\Delta V)}{\text{Μέση τιμή (DC) τάσης εξόδου}}$$

Η εσωτερική αντίσταση της τροφοδοτικής διάταξης

$$R_{εσ} = \frac{\Delta V_{εξόδου}}{\Delta I_{εξόδου}}$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

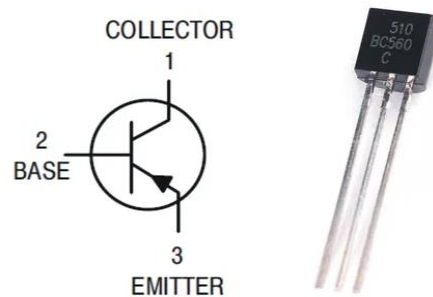
### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

#### 3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Ο προενισχυτής γραμμής που επιλέχθηκε για κατασκευή ξεκίνησε με δεδομένο ότι στην έξοδο θα έχει ενίσχυση τάσης  $A_v=10$ . Το κύκλωμα του προενισχυτή που κατασκευάστηκε αποτελείται από 4 βαθμίδες, συγκεκριμένα αποτελείται από δύο διαφορετικές βαθμίδες, μία βαθμίδα οδήγησης φορτίου και τέλος μία βαθμίδα εξόδου, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος ενός καλού αποτελέσματος.

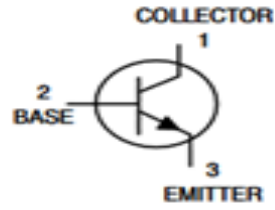
##### 3.1.1 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Στην πρώτη βαθμίδα γίνεται χρήση τρανζίστορ BC560C τα οποία διαθέτουν PNP πόλωση, δημιουργώντας έναν καθρέπτη ρεύματος και στα ποδαράκια των εκπομπών τοποθετήθηκε ο συλλέκτης ενός εκ των δύο τρανζίστορ από το διαφορετικό ζευγάρι χαμηλού θορύβου (χρήση ίδιου τύπου τρανζίστορ). Έγινε χρήση PNP τρανζίστορ για καλό σήμα λόγω θορύβου.



Εικόνα 3.1

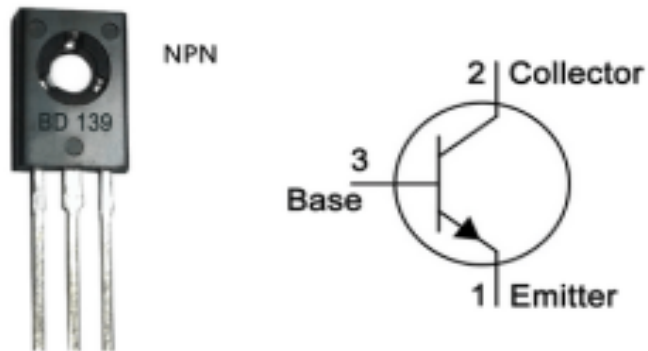
Στην δεύτερη βαθμίδα έγινε χρήση των τρανζίστορ BC550C τα οποία διαθέτουν NPN πόλωση και χρησιμοποιήθηκε ίδια συνδεσμολογία όπως και στην πρώτη βαθμίδα με καθρέπτη ρεύματος και σύνδεση με διαφορετικό ζευγάρι. Σε αυτή τη βαθμίδα χρησιμοποιήθηκαν τρανζίστορ με NPN πόλωση για μεγάλη ενίσχυση.



Εικόνα 3.2

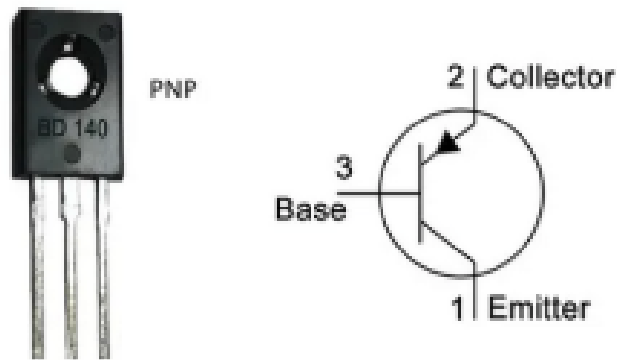
Στην τρίτη βαθμίδα, η βαθμίδα οδήγησης, χρησιμοποιήθηκε ένα τρανζίστορ PNP (BC560C) και ένα NPN (BC550C).

Τέλος, στην τέταρτη βαθμίδα, το στάδιο της εξόδου, με τοπολογία push-pull, επιλέχθηκαν τρανζίστορ BD139 με NPN πόλωση



Εικόνα 3.3

και τρανζίστορ BD140 με PNP πόλωση.



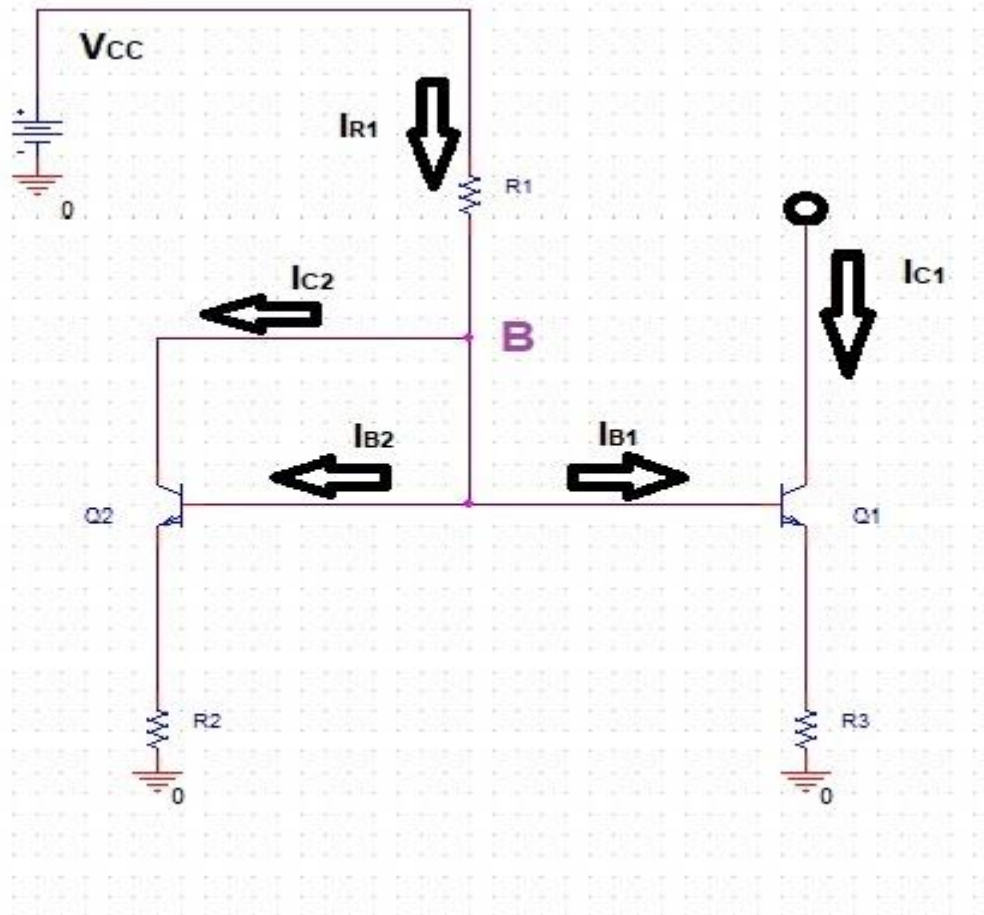
Εικόνα 3.4

Όσον αφορά τον τρόπο σύζευξης των βαθμίδων θα γίνει αναφορά παρακάτω. Τέλος, οι τάσεις από τις πηγές του κυκλώματος επιλέχθηκαν στα  $\pm 24V$  DC.

### 3.1.2 ΧΡΗΣΗ ΚΑΘΡΕΦΤΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στο κύκλωμα έχει γίνει επιλογή χρήσης καθρέφτη ρεύματος στην πρώτη και στην δεύτερη βαθμίδα με χρήση παραλλαγής Widlar.

Ο καθρέφτης ρεύματος είναι το πιο βασικό κύκλωμα στο σχεδιασμό πηγών ρεύματος και κυκλωμάτων οδήγησης ρεύματος σε τεχνολογία IC. Ο καθρέφτης ρεύματος αποτελείται από δύο ταιριασμένα τρανζίστορ  $Q_1$  και  $Q_2$  με τις βάσεις και τους εκπομπούς του κοινά συνδεδεμένους έχοντας έτσι την ίδια  $U_{BE}$ . Επιπρόσθετα το  $Q_1$  είναι συνδεδεμένο ως δίοδος με βραχυκυκλωμένα τον συλλέκτη και τη βάση του. Ο καθρέφτης ρεύματος τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερού ρεύματος  $I_{REF}$  και το ρεύμα εξόδου παίρνεται από το συλλέκτη του  $Q_2$ . Το τροφοδοτούμενο από το συλλέκτη του  $Q_2$  στην ενεργό περιοχή. Τα τρανζίστορ έχουν μεγάλο  $\beta$ , έτσι ώστε τα ρεύματα βάσης τους να είναι αμελητέα. Το ρεύμα εισόδου  $I_{REF}$  ρέει διαμέσου του συνδεδεμένου ως δίοδου τρανζίστορ  $Q_1$  και έτσι δημιουργεί μια πτώση τάσης πάνω στο  $Q_1$  που αντιστοιχεί στην τιμή του  $I_{REF}$ . Αυτή η τάση με τη σειρά της εμφανίζεται μεταξύ της βάσης και του εκπομπού  $Q_2$ . Αφού το  $Q_2$  είναι ταυτόσημο με το  $Q_1$ , το ρεύμα του εκπομπού  $Q_2$  θα πρέπει να είναι ίσο με το  $I_{REF}$ . Έτσι όσο το  $Q_2$  παραμένει στην ενεργό περιοχή, το ρεύμα συλλέκτη του  $I_O$  θα είναι προσεγγιστικά ίσο με το  $I_{REF}$ . Η λειτουργία του καθρέφτη ρεύματος είναι ανεξάρτητη από την τιμή της τάσης  $V_{EE}$  όσο το  $Q_2$  παραμένει στην ενεργό περιοχή. Αφού τα  $Q_1$  και  $Q_2$  είναι ταιριασμένα και αφού έχουν ίσες  $U_{BE}$ , θα έχουν ίσα ρεύματα εκπομπού. Αυτό είναι το σημείο κλειδί.



Εικόνα 3.5

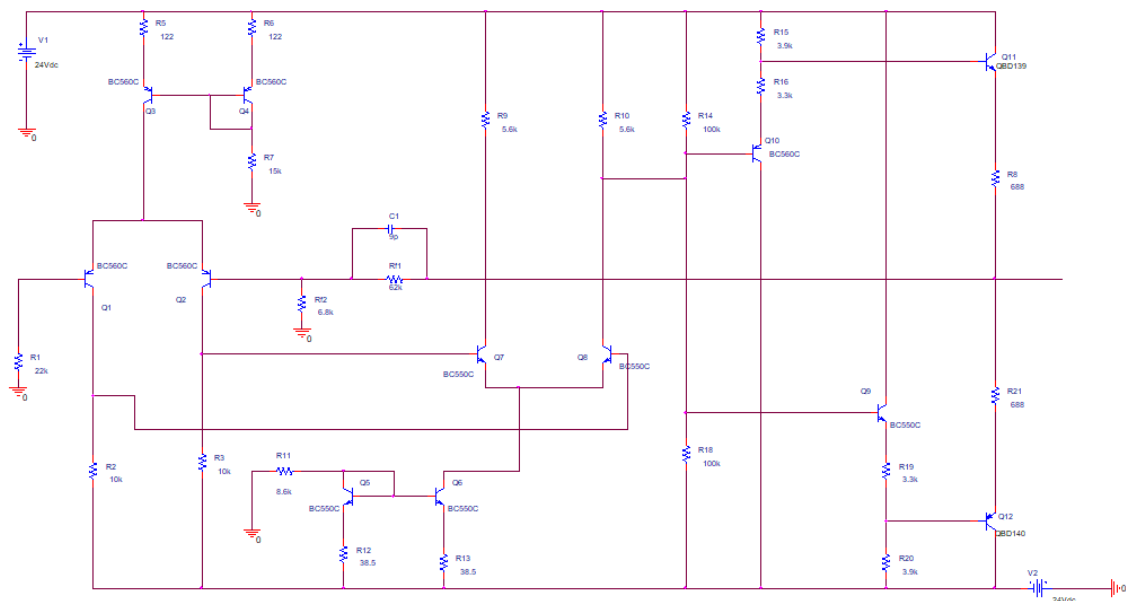
Η πηγή σταθερού ρεύματος υλοποιείται με κύκλωμα καθρέφτη ρεύματος που αποτελείται από δύο διπολικά τρανζίστορ.

### 3.1.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MILLER

Το φαινόμενο Miller περιγράφει τον τρόπο σύνδεσης μιας χωρητικότητας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ενός αναστρέφοντα ενισχυτή το κάνει να συμπεριφέρεται σαν ένας πολύ μεγαλύτερος πυκνωτής. Όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος του ενισχυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα. Είναι πολύ χρήσιμο για την αντιστάθμιση του ενισχυτή επειδή μια σχετικά χαμηλή κυρίαρχη συχνότητα πόλων μπορεί να εφαρμοστεί διατηρώντας ταυτόχρονα τα ρεύματα στον πυκνωτή μικρά.

### 3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Κατά την διαδικασία υλοποίησης του κυκλώματος του προενισχυτή γραμμής υπήρξαν διάφορες σκέψεις και αλλαγές λόγω προβλημάτων. Όπως προαναφέρθηκε επιλέχθηκαν τέσσερις βαθμίδες στο κύκλωμα. Η κάθε βαθμίδα έχει τον δικό της χαρακτήρα στο κύκλωμα.



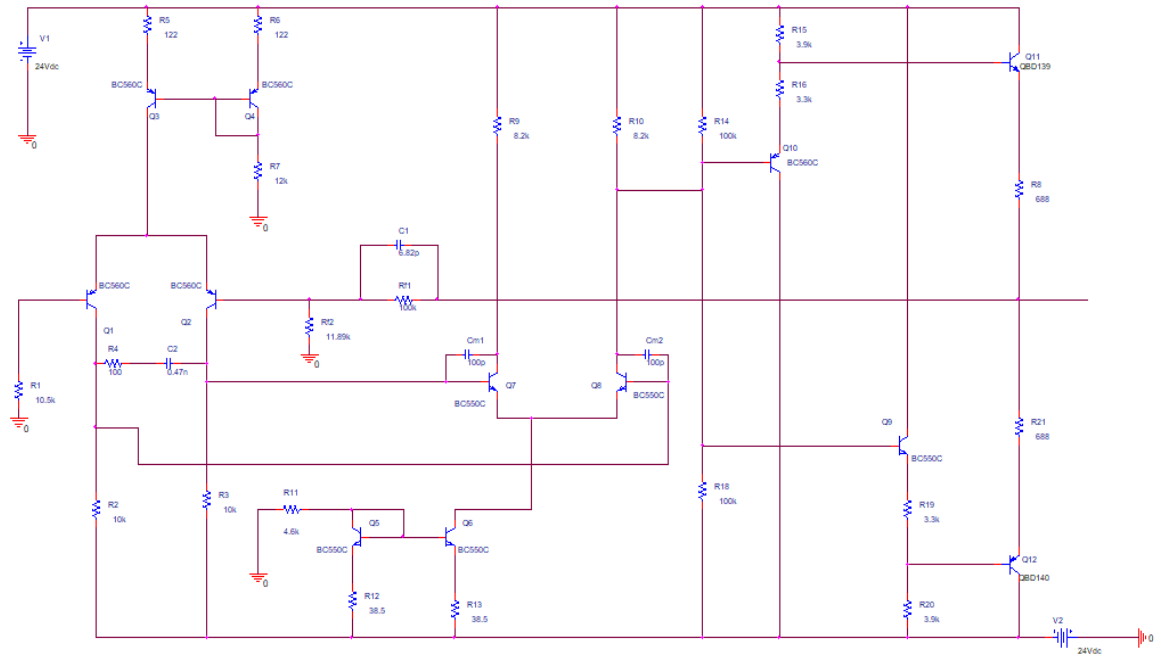
Εικόνα 3.6

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα έγινε απευθείας σύζευξη των βαθμίδων και όχι μέσω πυκνωτών εφόσον η παρουσία τους επηρεάζει την απόκριση των ενισχυτών.

Στις δύο πρώτες βαθμίδες γίνεται η ενίσχυση του σήματος ενώ στις επόμενες δύο όχι. Στις δύο αυτές βαθμίδες χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στον τύπο των τρανζίστορ τα οποία δημιουργούν το κύκλωμα καθώς η τάση εξόδου χρειάζεται να είναι ρυθμισμένη στα 0 (μηδέν) Volt στο AC. Ένας παραπάνω λόγος που έγινε η επιλογή αυτών των τρανζίστορ στις δύο πρώτες βαθμίδες, σε συνέχεια με τα παραπάνω, είναι διότι τα NPN τρανζίστορ ανεβάζουν την τιμή της στάθμης όπου υπάρχει μηδενικό σήμα ενώ τα PNP την μειώνουν με αποτέλεσμα να αλληλοσυμπληρώνονται. Η τρίτη βαθμίδα είναι η βαθμίδα οδήγησης φορτίου κοινού συλλέκτη και η τέταρτη βαθμίδα, η βαθμίδα εξόδου, σε συνδεσμολογία push-pull κοινού συλλέκτη. Στην τέταρτη βαθμίδα η ενίσχυση που προκύπτει είναι από τις δύο πρώτες βαθμίδες.

Ωστόσο ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που υπήρξαν ήταν η εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων και η μη συμμετρία αυτών.

Στην αμέσως επόμενη εικόνα βρίσκεται το τελικό σχέδιο – κύκλωμα ύστερα από διάφορες διορθώσεις. Μία βασική διαφορά είναι ότι μεταξύ συλλεκτών στον πρώτο διαφορικό έχει τοποθετηθεί RC δικτύωμα μεταξύ των συλλεκτών, όπου υπάρχει χαμηλή σταθερά συχνότητας, για τον περιορισμό ανεπιθύμητης ταλάντωσης. Μία ακόμη διαφορά είναι η προσθήκη πυκνωτών με χρήση του φαινομένου Miller στον δεύτερο διαφορικό.



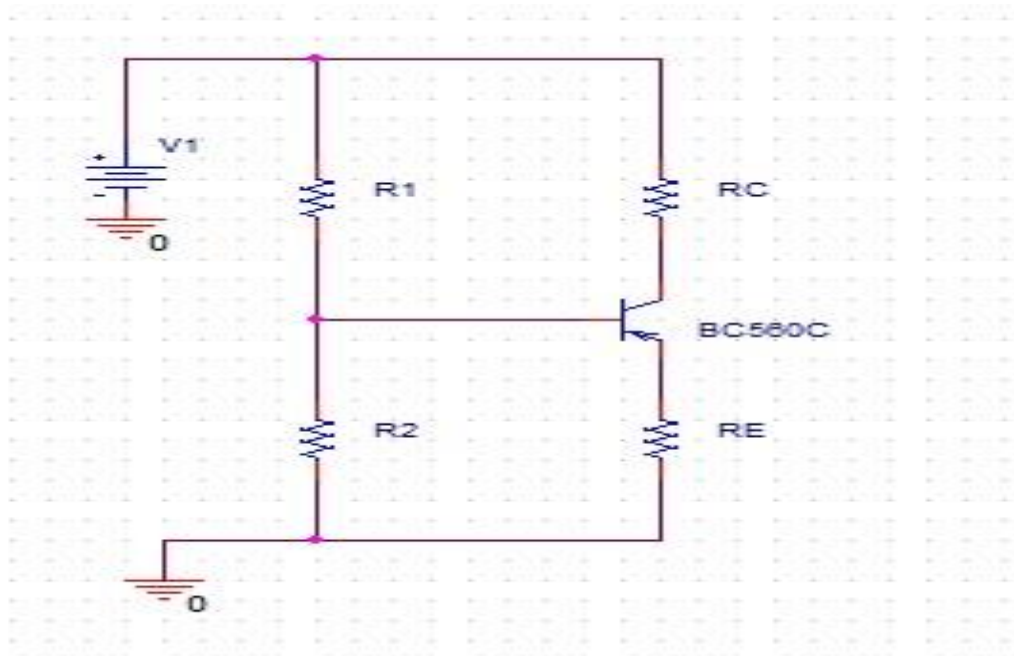
Εικόνα 3.7

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

#### 4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ)

Για την ορθή λειτουργία του κυκλώματος είναι πολύ σημαντικό να γίνει προσεκτική επιλογή των στοιχείων που τοποθετούνται στην κατασκευή. Για αυτό το λόγο δόθηκε βάση στο ταίριασμα των τρανζίστορ της κάθε βαθμίδας. Πάρθηκε μία ποσότητα από κάθε τύπου τρανζίστορ και τοποθετώντας τα σε κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή και μετρήθηκε η τάση  $V_{RC}$ . Παρακάτω απεικονίζεται ενδεικτικά το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις. Οι αντιστάσεις σε κάθε τύπο στοιχείου άλλαζαν.



Εικόνα 4.1

Παρακάτω έχουν καταγραφεί οι τιμές των αντιστάσεων και στους πίνακες κάποιες ενδεικτικές τιμές που πάρθηκαν από μερικά στοιχεία τα οποία ζευγαρώθηκαν. Τα ζευγάρια έγιναν με βάση αυτές τις μετρήσεις, ταιριάζοντας δύο στοιχεία τα οποία έχουν ίδιες ή σχεδόν ίδιες μετρήσεις.

- BC560C

Όπου  $V_1=20V$ ,  $R_1=82k\Omega$ ,  $R_2=6,2k\Omega$ ,  $R_C=10k\Omega$ ,  $R_E=0,82k\Omega$

Q1	10,79V
Q2	10,78V
Q3	10,76V
Q4	10,76V
Q10	10,8V

Πίνακας 4.1

- BC550C

Όπου  $V_1=20V$ ,  $R_1=47k\Omega$ ,  $R_2=6,8k\Omega$ ,  $R_C=3,3k\Omega$ ,  $R_E=0,55k\Omega$

Q5	10,71V
Q6	10,81V
Q7	10,8V
Q8	10,8V
Q9	10,82V

Πίνακας 4.2

- BD139 και BD140

Οι τιμές των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τα τρανζίστορ BD139 και BD140 είναι οι  $V_1=24V$ ,  $R_1=R_2=67,7k\Omega$ ,  $R_C=0,77k\Omega$ ,  $R_E=0,56k\Omega$ .

Q11(BD139)	7,71V
Q12(BD140)	7,74V

Πίνακας 4.3

## 4.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Προτού γίνει ολοκλήρωση του κυκλώματος ήταν αναγκαίο να γίνει έλεγχος στην κάθε βαθμίδα χωριστά ώστε να υπάρχει πλήρης έλεγχος αυτών και να γίνουν διορθώσεις σε τυχόν προβλήματα.

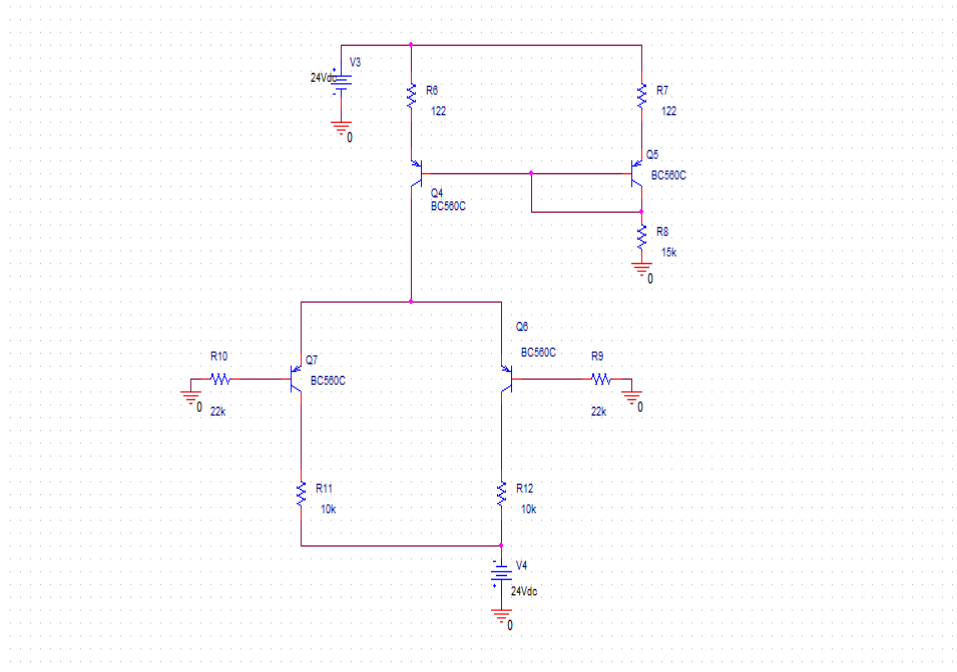
Οι δοκιμές έγιναν σε πλακέτα δοκιμών breadboard όπως και το τελικό κύκλωμα.



## 4.2.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑ ΒΑΘΜΙΔΑ

### 1. Πρώτη βαθμίδα προενισχυτή

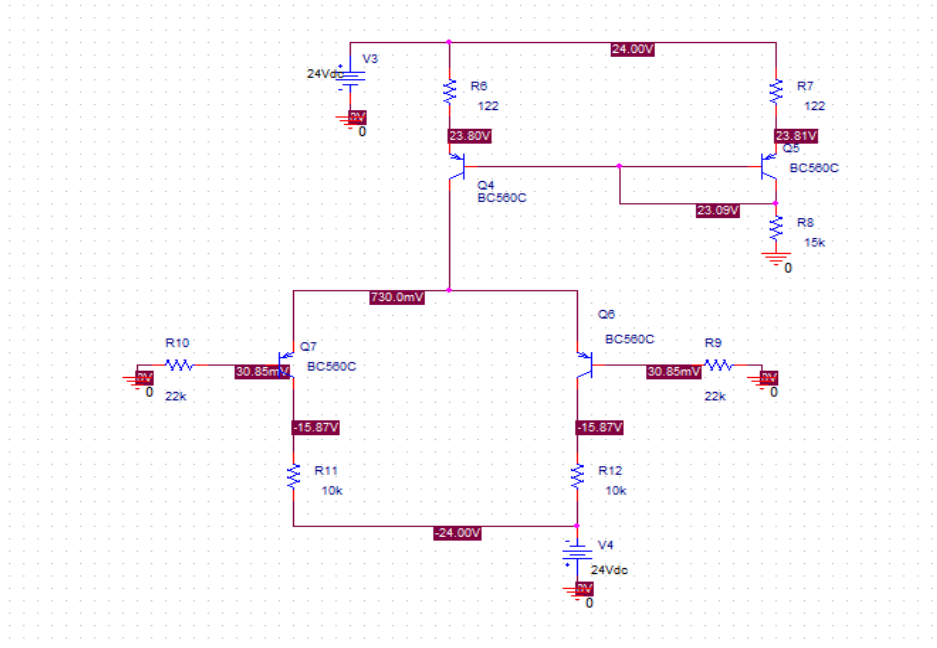
Εδώ φαίνεται η πρώτη βαθμίδα όπως χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχό της.



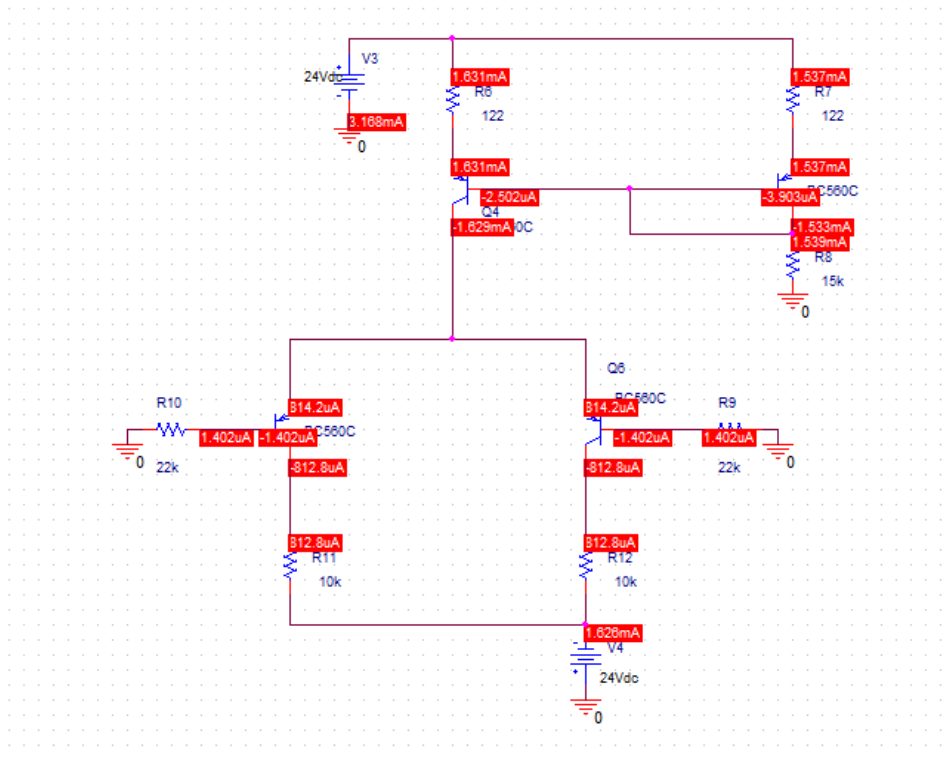
Εικόνα 4.2

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα οι αντιστάσεις στους εκπομπούς του καθρέφτη ρεύματος που τοποθετήθηκαν είναι στα  $122\Omega$ , η αντίσταση για την πηγή ρεύματος στα  $15k\Omega$  ενώ στους συλλέκτες του διαφορικού κυκλώματος επιλέχθηκαν στα  $10k\Omega$  και για αντίσταση εισόδου, αντίσταση στα  $22k\Omega$ . Η τάση βρίσκεται στα  $+24V$  με  $-24V$ .

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται τάσεις και ρεύματα μέσω του προγράμματος εξομοίωσης SPICE.

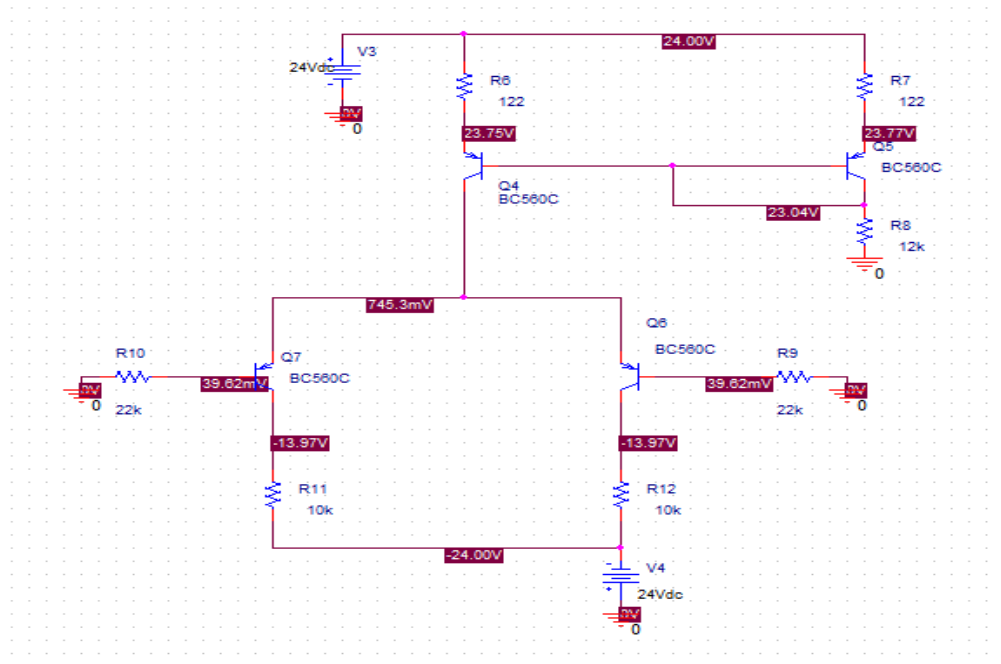


Εικόνα 4.3

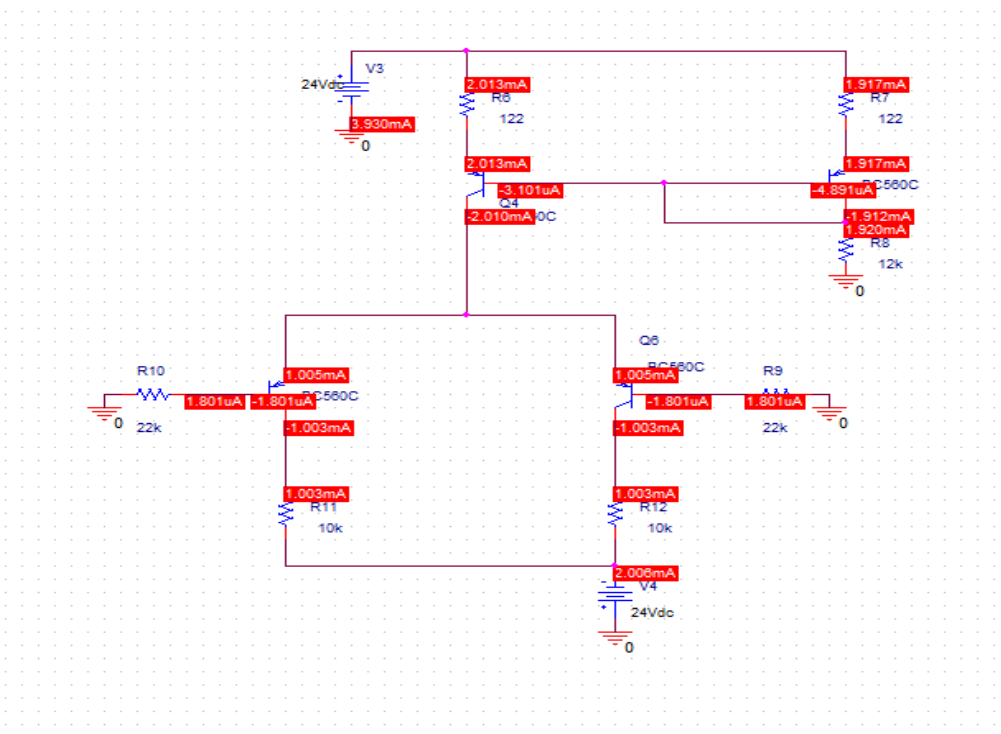


Εικόνα 4.4

Στην αρχή της δοκιμής είχε επιλεγεί αντίσταση  $15k\Omega$  για την πηγή ρεύματος ενώ στην συνέχεια έγινε αλλαγή σε μικρότερη, στα  $12k\Omega$  λόγω ύπαρξης μικρού ρεύματος. Λόγω της αλλαγής αυτής στις επόμενες εικόνες βρίσκονται οι τιμές των τάσεων και των ρευμάτων με την νέα τιμή της αντίστασης της πηγής ρεύματος.



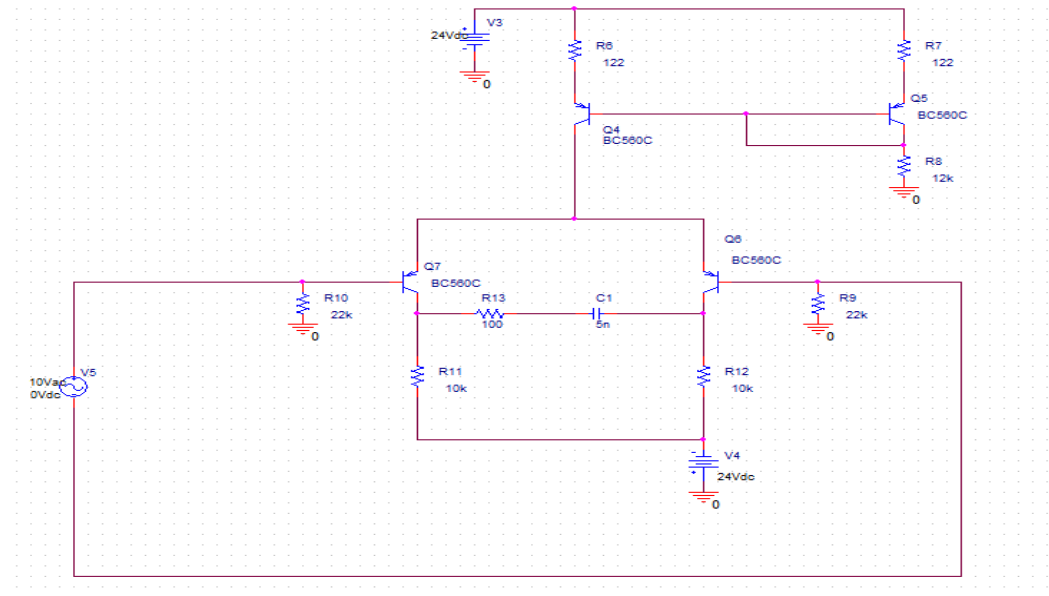
Εικόνα 4.5



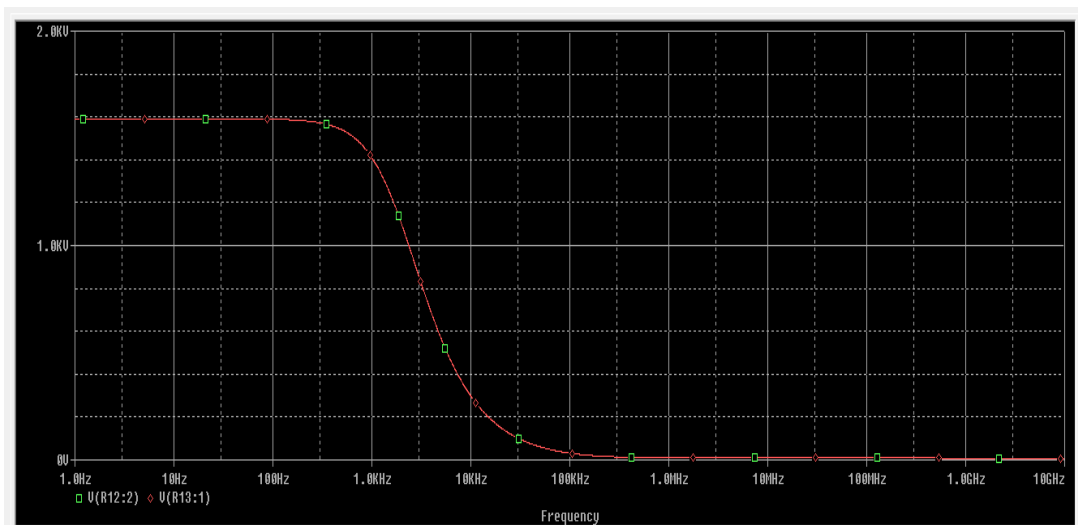
Εικόνα 4.6

Παρατηρώντας τις καινούργιες μετρήσεις ρεύματος φαίνεται πως με την αλλαγή της αντίστασης υπάρχει ένα μεγαλύτερο ρεύμα το κύκλωμα, αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει καλή συμμετρία ρεύματος.

Κατόπιν αυτού έγινε προσθήκη δικτύωματος RC στους εκπομπούς των τρανζίστορ του διαφορικού κυκλώματος ώστε να βρεθεί η απόκριση συχνότητας. Στις επόμενες εικόνες βρίσκεται το κύκλωμα με το δικτύωμα αυτό και αμέσως μετά η εικόνα της απόκρισης.

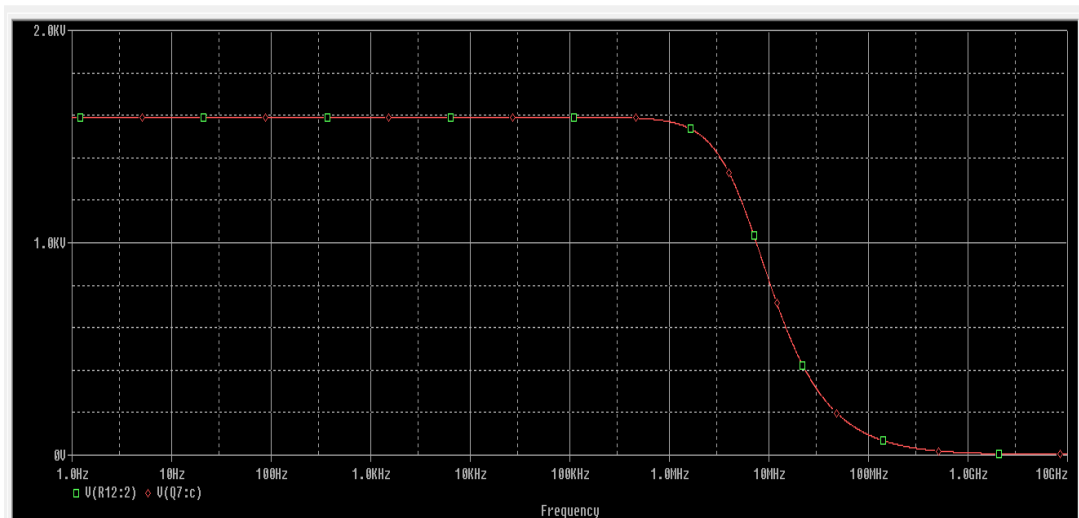


Εικόνα 4.7



Εικόνα 4.8

Ωστόσο στην αμέσως επόμενη εικόνα φαίνεται η απόκριση συχνότητας χωρίς δικτύωμα RC στους εκπομπούς των τρανζίστορ του διαφορικού κυκλώματος.



Εικόνα 4.9

Όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω παράγραφο έγιναν προσπάθειες τα τρανζίστορ να είναι όσο δυνατόν πιο καλά ταιριασμένα και να υπάρχει συμμετρία μεταξύ τους για την πρακτική κατασκευή. Κατά την διάρκεια της δοκιμής της πρώτης βαθμίδας το ζεύγος BC560C που επιλέχθηκε για τον καθρέφτη ρεύματος φάνηκε να μην έχει καλή συμμετρία οπότε και έγινε αλλαγή ζεύγους. Στην δεύτερη προσπάθεια παρατηρήθηκε πως ένα εκ των δύο τρανζίστορ δεν έδειχνε να άγει, με αποτέλεσμα να αφαιρεθεί το συγκεκριμένο και να τοποθετηθεί άλλο, τυχαίας επιλογής αλλά κοντά στις μετρήσεις του δεύτερου τρανζίστορ του ζεύγους.

Στη συνέχεια έγινε μέτρηση μέσω βολτομέτρου στις αντιστάσεις των 10kΩ του διαφορικού κυκλώματος και οι τιμές από αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχισαν σε 10.6V και 10.8V.

Έπειτα έγινε δοκιμή με σύνδεση παλμογράφου και γεννήτριας συχνοτήτων όπου δοκιμαστικά επιλέχθηκε πυκνωτής εισόδου  $C_{in}=4.7\mu F$ , όπου έχουμε σταθερά χρόνου  $\tau=R*C=22k\Omega*4.7\mu F=103.4 msec$  και **CMRR=1900**.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η τιμή της ενίσχυσης (Av) για διαφορετικές τιμές συχνότητας (f) και Δt/T.

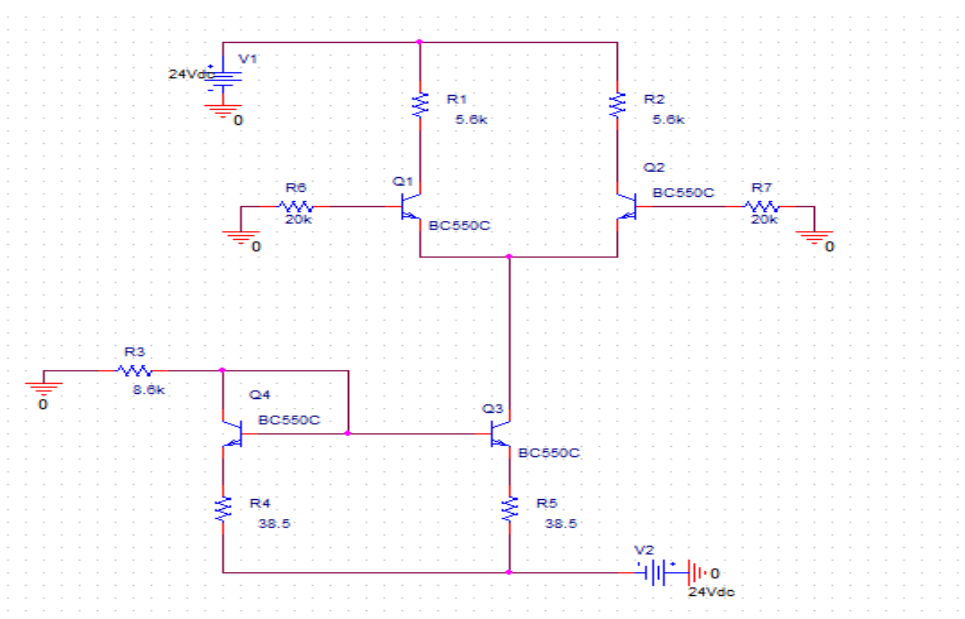
f (kHz)	A <sub>v</sub>	Δt/T
5	95	0,0166
11	90	0,444
13	88	0,053
16	85	0,073
20	80	0,09
25	78	0,08125

Πίνακας 4.4

Αξίζει να σημειωθεί πως για συχνότητες  $f < 2\text{KHz}$  η διαφορά φάσης είναι μηδενική ( $\Delta\Phi=0^\circ$ ) ενώ για συχνότητες  $f > 150\text{KHz}$ , υπάρχει  $\Delta\Phi=90^\circ$ .

## 2. Δεύτερη βαθμίδα προενισχυτή

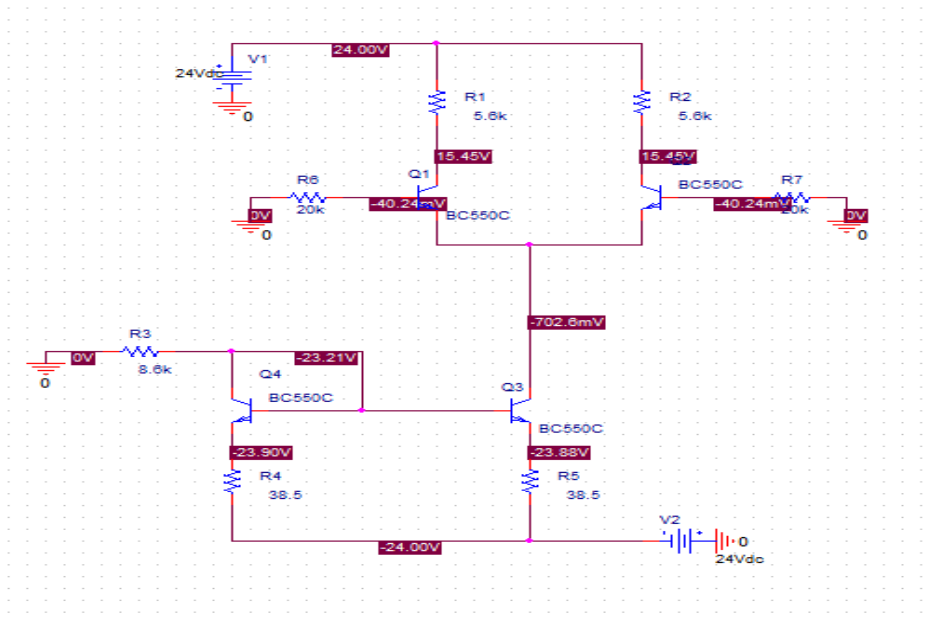
Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η δεύτερη βαθμίδα όπως χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της.



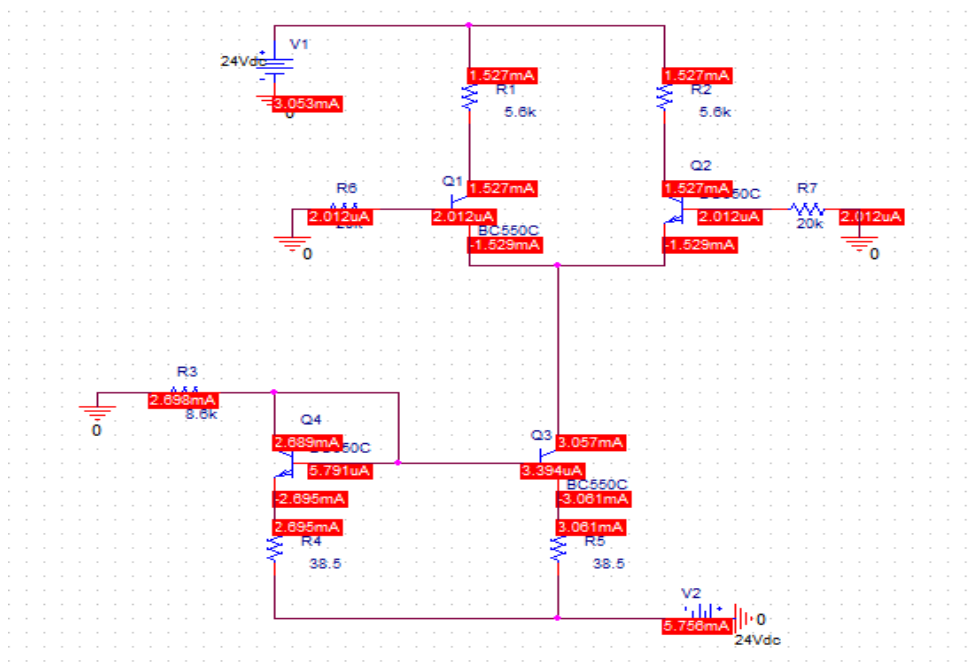
Εικόνα 4.10

Στη δεύτερη βαθμίδα στους εκπομπούς του καθρέφτη ρεύματος τοποθετήθηκαν αντιστάσεις στα 38.5Ω, η αντίσταση για την πηγή ρεύματος στα 8.6kΩ ενώ στους συλλέκτες του διαφορικού κυκλώματος επιλέχθηκαν στα 5.6kΩ και για αντίσταση εισόδου στα 20kΩ. Η τάση βρίσκεται στα +24V με -24V.

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι τιμές των τάσεων και των ρευμάτων αντίστοιχα.

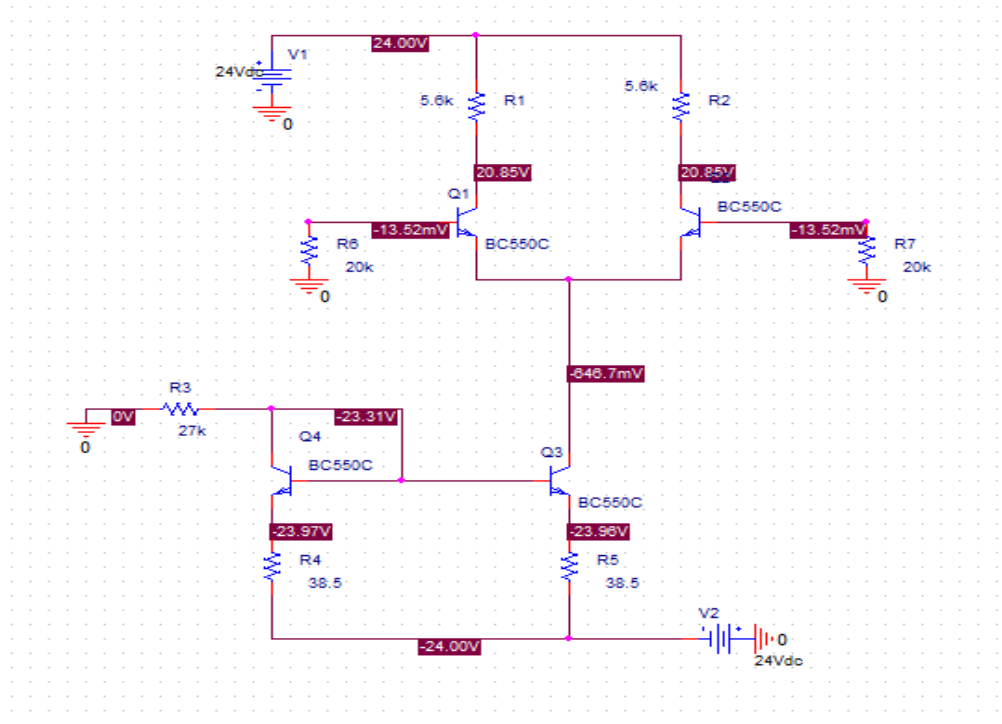


Εικόνα 4.11

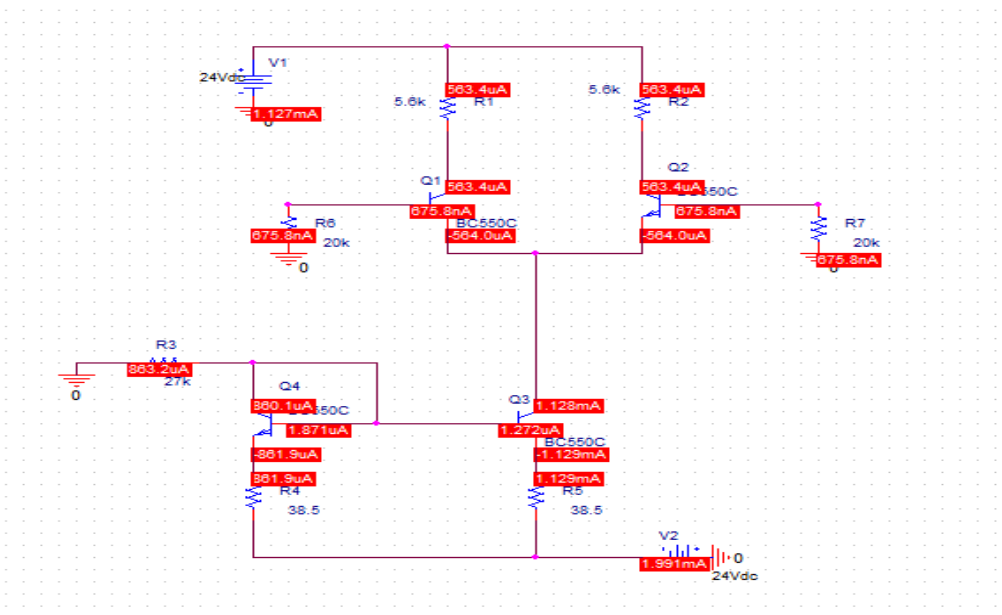


Εικόνα 4.12

Στη συνέχεια έγινε δοκιμή με μεγαλύτερη αντίσταση πηγής ρεύματος στα 27k $\Omega$ , της οποίας οι μετρήσεις βρίσκονται στην παρακάτω εικόνα, καθώς στο κύκλωμα δοκιμής στην πλακέτα Breadboard υπήρξε εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων.



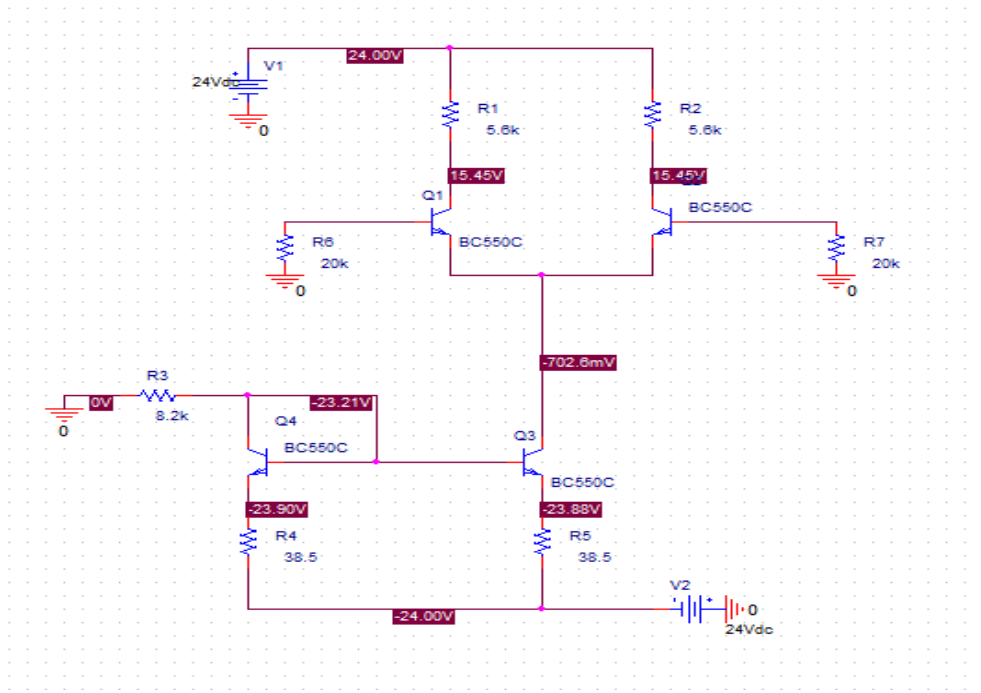
Εικόνα 4.13



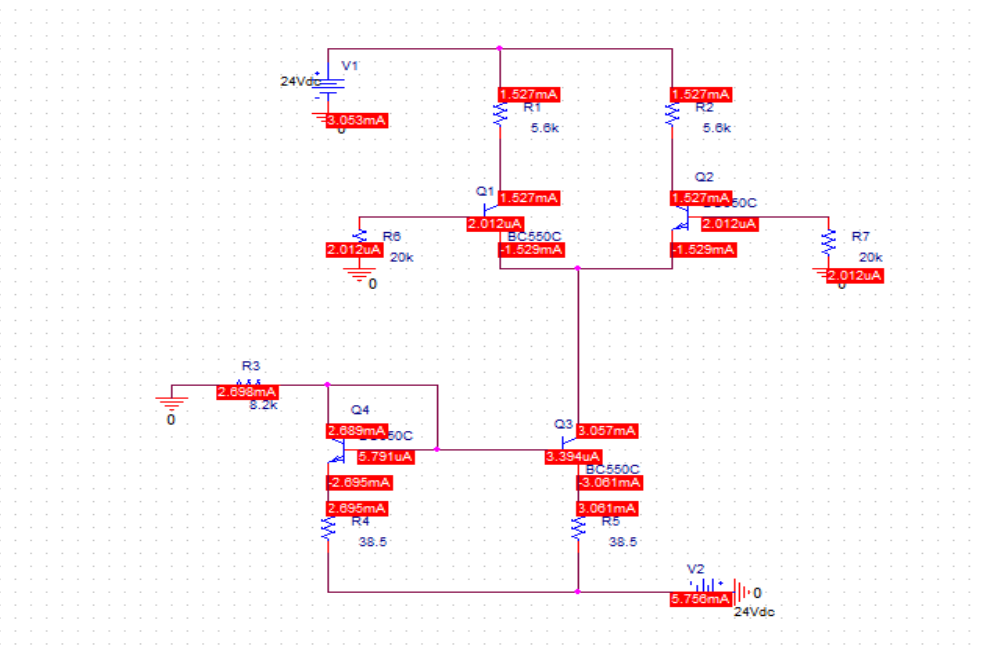
Εικόνα 4.14

Με την αλλαγή αυτή, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, υπάρχει μεγάλη μείωση του ρεύματος που διέρχεται από τα τρανζίστορ και αυτό δεν εξυπηρετεί. Για αυτό το λόγο έγινε και άλλη αλλαγή στην τιμή της αντίστασης της πηγής ρεύματος στα 8.2kΩ και οι νέες μετρήσεις βρίσκονται στις παρακάτω εικόνες.





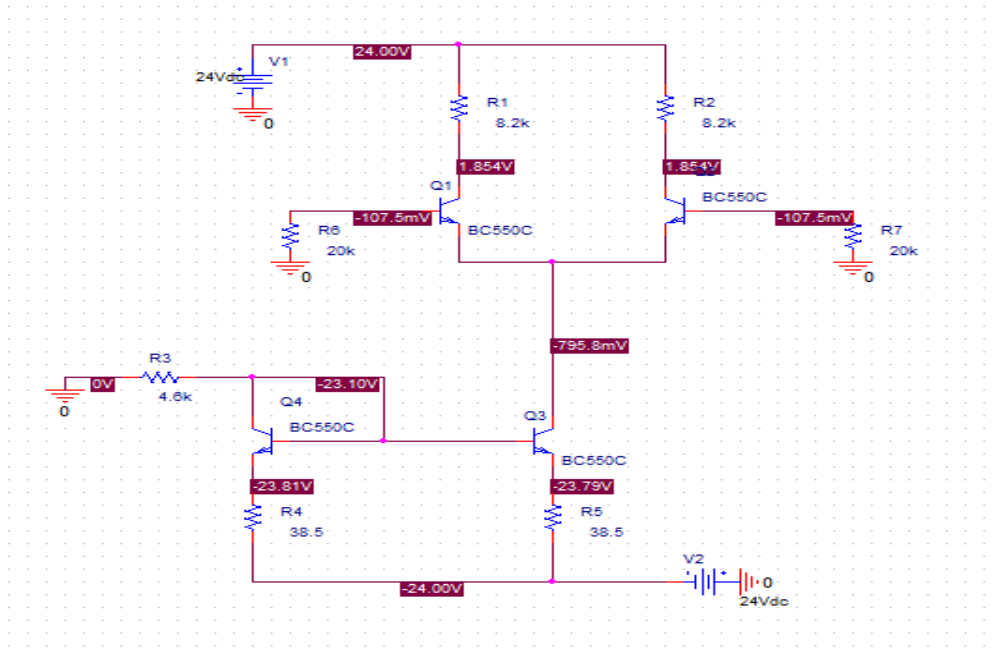
Εικόνα 4.15



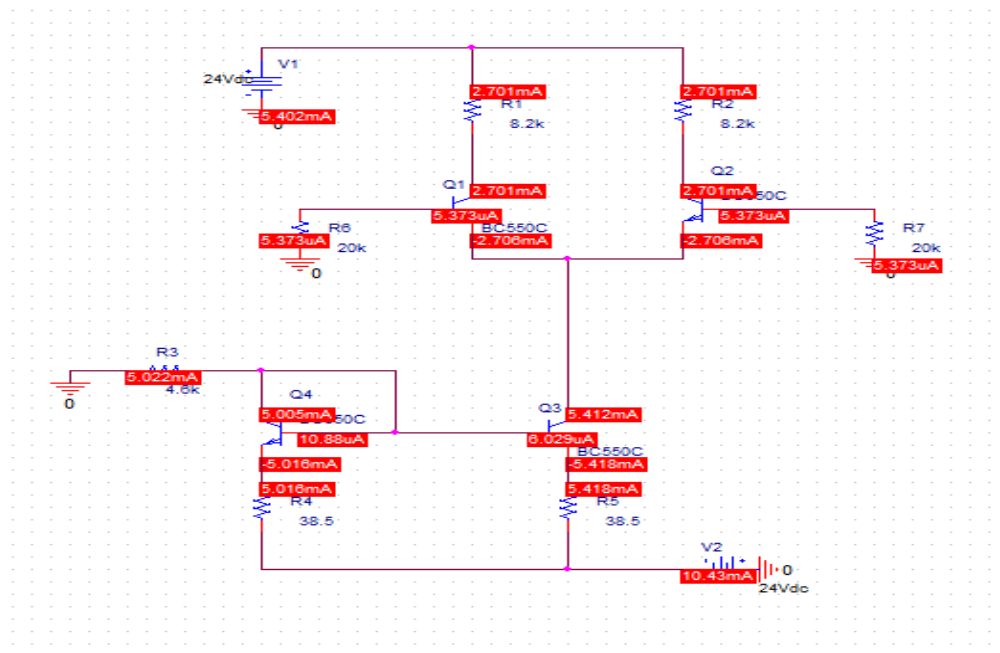
Εικόνα 4.16

Παρατηρώντας τις μετρήσεις αυτές φαίνεται πως οι τιμές τάσεων και ρευμάτων είναι στα ίδια επίπεδα με τις τιμές όταν τιμή της αντίστασης πηγής ρεύματος είναι στα 8.6kΩ (Εικόνες 4.10 και 4.11), οι οποίες δεν ήταν ικανοποιητικές. Αποτέλεσμα αυτού είναι περαιτέρω αλλαγή, με μείωση της τιμής, στην αντίσταση της πηγής ρεύματος στα 4.6kΩ καθώς επίσης έγινε αλλαγή στις αντιστάσεις που βρίσκονται στους συλλέκτες του διαφορικού κυκλώματος

από 5.6kΩ στα 8.2kΩ. Στις δύο επόμενες εικόνες φαίνονται οι νέες μετρήσεις με τις νέες τιμές αντιστάσεων.



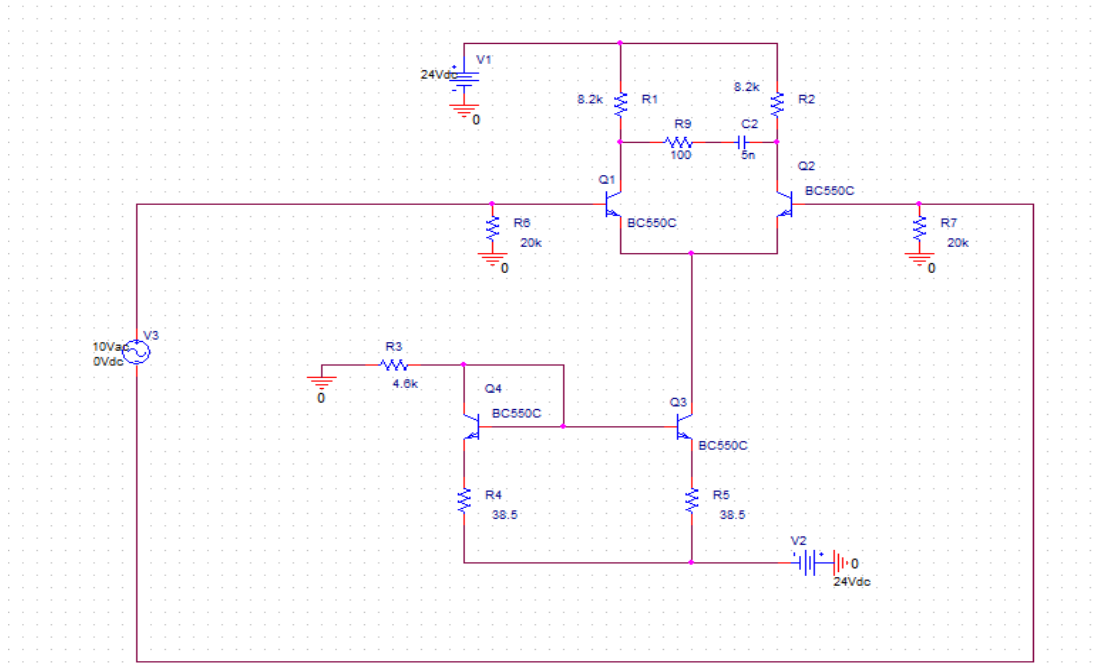
Εικόνα 4.17



Εικόνα 4.18

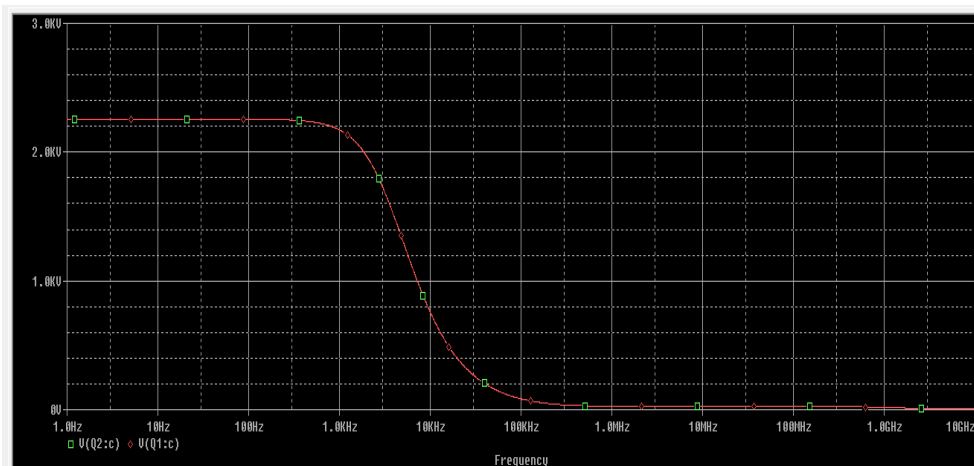
Κάνοντας έναν έλεγχο στη τιμή του ρεύματος, εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κανείς, ότι με την αλλαγή που προηγήθηκε έχει σχεδόν διπλασιαστεί. Στην συνέχεια έγινε προσθήκη δικτύματος RC ( $R=100\Omega$ ,  $C=5nF$ ) στους συλλέκτες των τρανζίστορ του διαφορικού

κυκλώματος ώστε η απόκριση συχνότητας να είναι κατάλληλη για την χρήση του κυκλώματος σαν ενισχυτής. Στην αμέσως επόμενη εικόνα βρίσκεται το κύκλωμα με την προσθήκη του δικτύωματος αυτού.



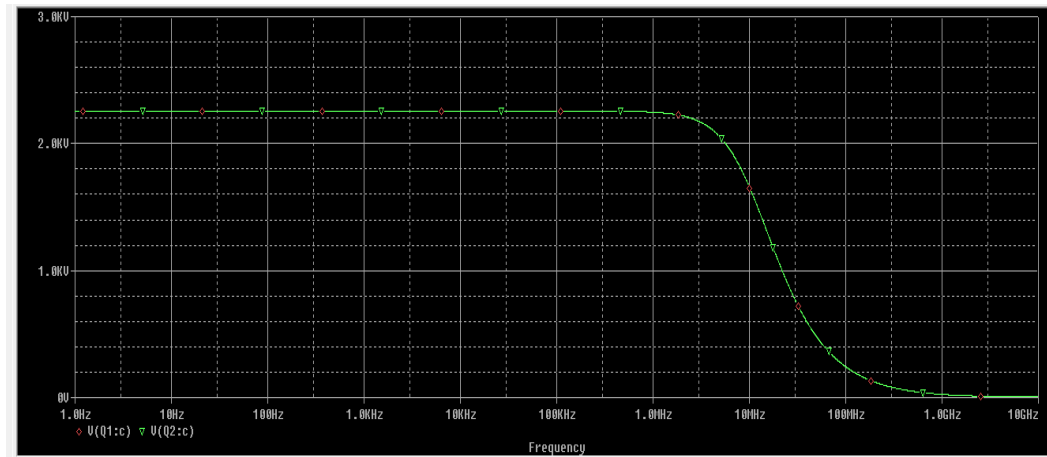
Εικόνα 4.19

Παρακάτω φαίνεται απόκριση συχνότητας με το δικτύωμα RC στο κύκλωμα.



Εικόνα 4.20

Στην αμέσως επόμενη εικόνα φαίνεται απόκριση συχνότητας χωρίς δικτύωμα RC στους εκπομπούς των τρανζίστορ του διαφορικού κυκλώματος.



Εικόνα 4.21

Παρακάτω φαίνεται η τιμή της ενίσχυσης ( $A_v$ ) για διαφορετικές τιμές συχνότητας ( $f$ ) και  $\Delta t/T$ , όπως μετρήθηκαν στην δοκιμή με σύνδεση παλμογράφου και γεννήτριας συχνοτήτων, όπου επιλέχθηκε πυκνωτής εισόδου  $C_{in}=10\mu F$ , όπου έχουμε σταθερά χρόνου  $\tau=R*C=10k\Omega*10\mu F=100msec$  και  $CMRR>4000$ , δηλαδή στα όριο του θορύβου.

f (kHz)	$A_v$	$\Delta t/T$
5	200	0,025
11	195	0,06
13	190	0,08
16	175	0,098
20	160	0,12
25	140	0,15

Πίνακας 4.5

Για συχνότητες  $f<2KHz$  η διαφορά φάσης είναι μηδενική ( $\Delta\Phi=0^\circ$ ) ενώ για συχνότητες  $f>150KHz$ , υπάρχει  $\Delta\Phi=90^\circ$ .

Στον επόμενο πίνακα βρίσκονται οι τιμές της ενίσχυσης και  $\Delta t/T$  με βάση τις μετρήσεις που πάρθηκαν για την κάθε βαθμίδα ξεχωριστά.

f (kHz)	$A_{v_{550C}} * A_{v_{560C}}$	$\frac{\Delta t_{550C}}{T} + \frac{\Delta t_{560C}}{T}$
5	19000	0
11	17550	0
13	16720	0,00424
16	14875	0,007154
20	12800	0,0108
25	10920	0,0121875

Πίνακας 4.6

Στα **80kHz** υπάρχει διαφορά φάσης **180°**. Η συχνότητα αποκοπής προκύπτει περίπου στα 18kHz.

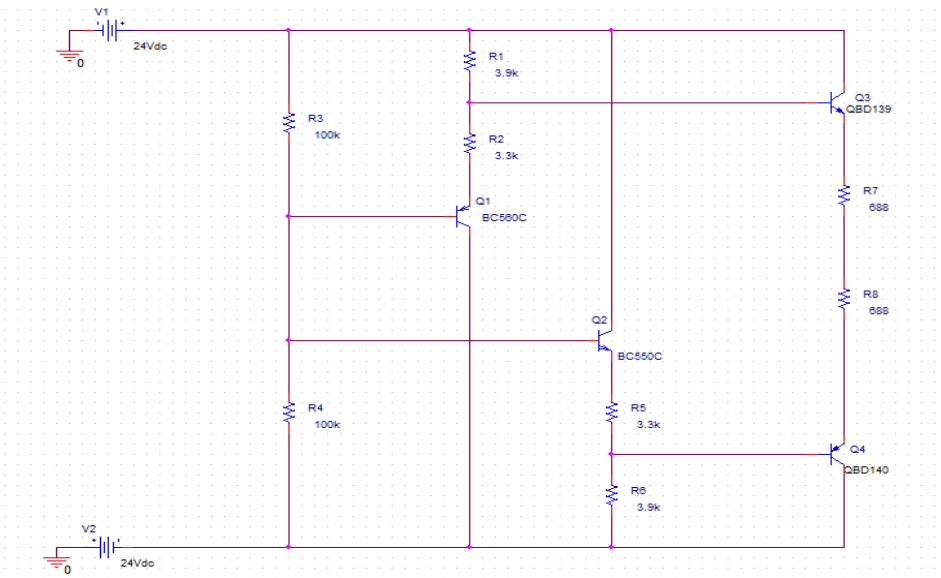
### 3. Τρίτη βαθμίδα προενισχυτή

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η Τρίτη βαθμίδα του προενισχυτή.

Η τρίτη βαθμίδα του προενισχυτή αποτελείται από μία βαθμίδα οδήγησης προς την έξοδο με χρήση ενός τρανζίστορ BC560C και ενός BC550C. Στις βάσεις των τρανζίστορ αυτών έχουν τοποθετηθεί αντιστάσεις της τάξεως των 100kΩ ενώ στους εκπομπούς και των δύο αυτών τρανζίστορ βρίσκονται δύο αντιστάσεις σε σειρά, 3.3kΩ και 3.9kΩ. Ωστόσο η βαθμίδα αυτή εξετάζεται μαζί με την τέταρτη βαθμίδα, την βαθμίδα εξόδου.

### 4. Τέταρτη βαθμίδα προενισχυτή

Η βαθμίδα της εξόδου του τελικού κυκλώματος, όπου βρίσκεται η διάταξη “push-pull” και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα μαζί με την βαθμίδα οδήγησης εξόδου.



Εικόνα 4.22

Όπως φαίνεται, στους εκπομπούς των τρανζίστορ BD139 και BD140 είναι οι αντιστάσεις εξόδου οι οποίες μετρήθηκαν στα 688Ω. Η τάση βρίσκεται στα +24V με -24V.

Στον επόμενο πίνακα βρίσκονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν με τη βοήθεια ενός πολυμέτρου κατά την πρώτη δοκιμασία χρήσης της τελικής βαθμίδας ως ανεξάρτητη.

VCE(BC560C)	24,6V
VCE(BC550C)	24,64V
VCE(BD139)	14,06V
VCE(BD140)	13,08V
VRE(BD139)	10,45V
VRE(BD140)	10,45V
IE(BC560C)	3,21mA
IE(BC550C)	3,2mA
IE(BD139)	15,19mA
IE(BD140)	15,21mA

Πίνακας 4.7

Παρατηρώντας τις μετρήσεις του Πίνακα 4.7 φαίνεται πως υπάρχει συμμετρία στις μετρήσεις αυτές και βρέθηκε  $U_{out} = -0.42V$ . Στη συνέχεια συνδέθηκε παλμογράφος όπου ελέγχθηκε το  $U_{out}$  πολύ κοντά στο **μηδέν**. Έπειτα, για να επιβεβαιωθούν οι μετρήσεις, έγινε εκ νέου διαδικασία μέτρησης αφού πρώτα το κύκλωμα αποσυνδέθηκε και έγινε έλεγχος πως όλα τα στοιχεία στην πλακέτα Breadboard είναι τοποθετημένα καλά. Οι νέες μετρήσεις βρίσκονται στον Πίνακα 4.8.

VCE(BC560C)	24,5V
VCE(BC550C)	24,65V
VCE(BD139)	13,7V
VCE(BD140)	13,7V
VRE(BD139)	10,51V
VRE(BD140)	10,51V
IE(BC560C)	3,25mA
IE(BC550C)	3,19mA
IE(BD139)	15,27mA
IE(BD140)	15,27mA

Πίνακας 4.8

Και σε αυτή τη δοκιμασία μετρήθηκε  $U_{out}$  περίπου ίσο με το **μηδέν**. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις του Πίνακα 4.7 και του Πίνακα 4.8 φαίνεται πως υπάρχει μία μικρή διαφορά στις μετρήσεις η οποία είναι σχεδόν μηδαμινή και με βάση αυτό υπάρχει συμμετρία στο κύκλωμα. Εν συνεχεία, έγινε σύνδεση παλμογράφου και γεννήτριας συχνοτήτων. Έως τα 100kHz η διαφορά φάσης ήταν ίση με το μηδέν και για συχνότητα  $f=600kHz$ , ενίσχυση  $A_v=0.5$  με  $\Delta t/T=0.048$ . Επομένως η άνω συχνότητα αποκοπής καθορίζεται από τις δύο πρώτες βαθμίδες του κυκλώματος, τις διαφορικές.

Αφότου ολοκληρώθηκε η διαδικασία με τις μετρήσεις στην τρίτη βαθμίδα έγινε αντικατάσταση όλων των τρανζίστορ με άλλα ζεύγη και πάρθηκαν εκ νέου μετρήσεις, οι οποίες είναι αποτυπωμένες στον επόμενο πίνακα.

VCE(BC560C)	24,59V
VCE(BC550C)	24,72V
VCE(BD139)	13,63V
VCE(BD140)	13,63V
VRE(BD139)	10,46V
VRE(BD140)	10,54V
IE(BC560C)	3,22mA
IE(BC550C)	3,21mA
IE(BD139)	15,2mA
IE(BD140)	15,31mA

Πίνακας 4.9

Και σε αυτή την περίπτωση το  $U_{out}$  μετρήθηκε πολύ κοντά στο **μηδέν**.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις των Πινάκων 4.7, 4.8 και 4.9, ακόμα και με την αλλαγή ζευγαριών υπάρχει μια πολύ καλή συμμετρία στην τρίτη βαθμίδα του προενισχυτή.

Στον επόμενο πίνακα βρίσκονται οι τελικές μετρήσεις προτού ενωθούν μεταξύ τους οι βαθμίδες.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRE(Q5)	23,11V
VRE(Q6)	10,65V
VRE(Q7)	10,7V

Πίνακας 4.10

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q1)	21,5V
VRC(Q2)	25,1V
VRE(Q3)	0,24V
VREF(Q4)	23,1V

Πίνακας 4.11

→ **Τρίτη βαθμίδα**

VR1	12,8V
VR2	10,64V
VR5	10,58V
VR6	12,81V
VR7	10,55V
VR8	10,61V

Πίνακας 4.12

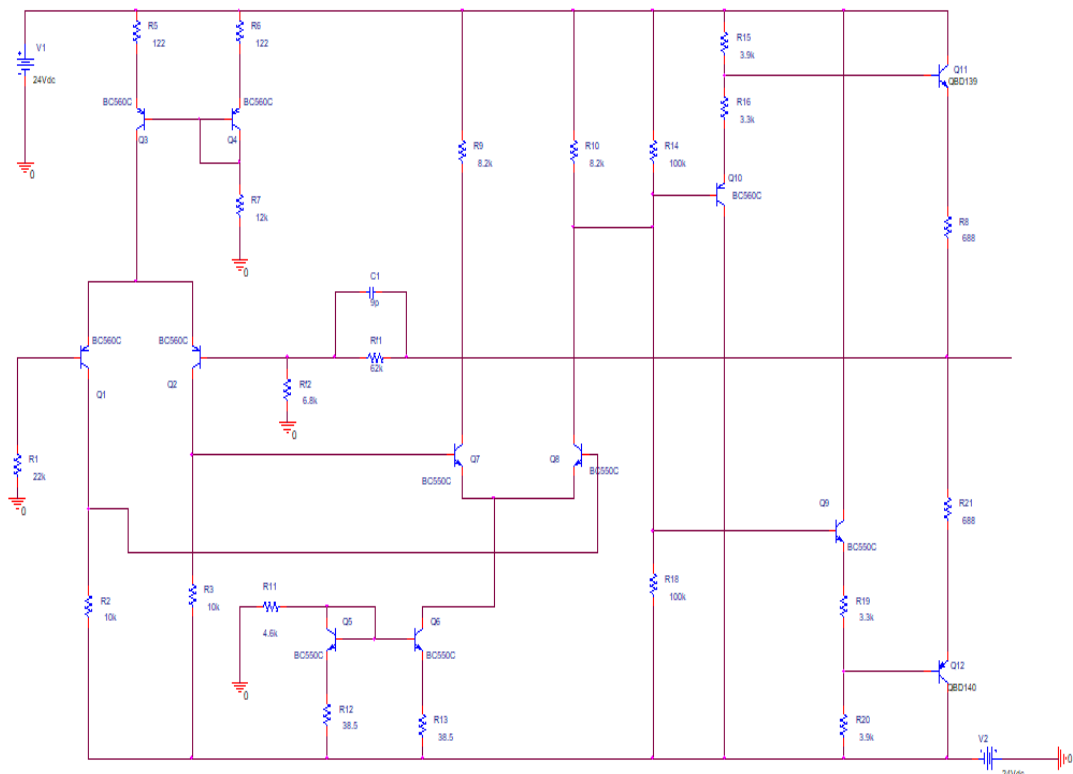
Η συνολική ενίσχυση ανοιχτού βρόγχου προκύπτει  $19000 * 0,5 = 9500$  και το γινόμενο εύρος ζώνης επί την ενίσχυση  $9500 * 18000 = 171000000$ .



## 4.3 ΠΛΗΡΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑ

### 4.3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ SPICE

Παρακάτω φαίνεται το πλήρες κύκλωμα του προενισχυτή γραμμής ακουστικών συχνοτήτων με συνδεδεμένες τις βαθμίδες σε σειρά και με ανατροφοδότηση τάσης σε σειρά με την είσοδο. Το δίκτυο αρνητικής ανατροφοδότησης αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:  $R_{f1}=62k\Omega$ ,  $R_{f2}=6.8k\Omega$  και  $C1=9pF$ .



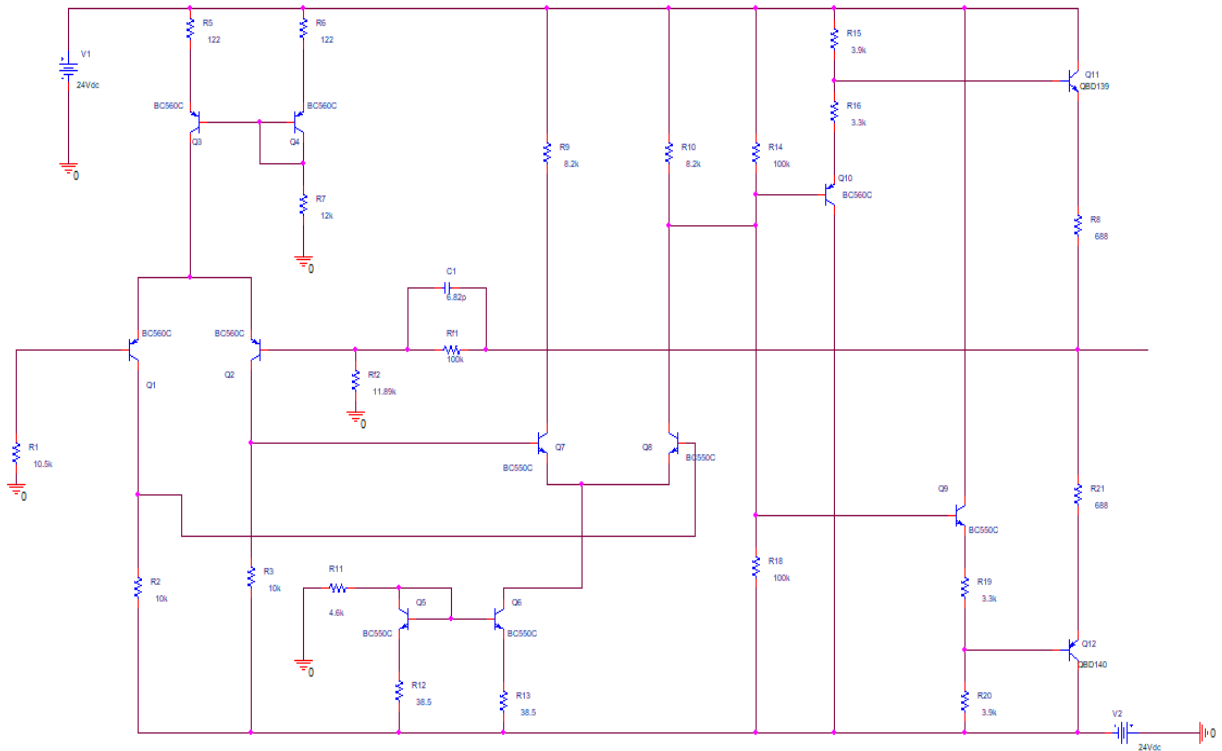
Εικόνα 4.23

Σε αυτή την περίπτωση υπήρξε ανομοιομορφία στο ρεύμα του κυκλώματος με αποτέλεσμα να γίνουν παραπάνω δοκιμές στις τιμές του φίλτρου, δηλαδή στα  $R_{f1}$ ,  $R_{f2}$  και  $C1$ . Αρχικά έγιναν δοκιμές αυξάνοντας τις τιμές των αντιστάσεων  $R_{f1}$  και  $R_{f2}$  με αποτέλεσμα την επιλογή τιμών στα  $100k\Omega$  και  $12k\Omega$  (πραγματική τιμή στην πλακέτα δοκιμών είναι στα  $11.89k\Omega$ ) αντίστοιχα. Στη συνέχεια έγιναν αρκετές δοκιμές είτε με αύξηση είτε με μείωση της τιμής του πυκνωτή  $C1$ . Κάποια παραδείγματα τιμών τα οποία δεν έφεραν μεγάλες αλλαγές στο κύκλωμα και παρατηρήθηκε πως συνεχιζόταν ανομοιομορφία είναι τα  $8nF$ ,  $10nF$ ,  $3.3pF$ ,  $47pF$ . Τελικά επιλέχθηκε τιμή του πυκνωτή  $C1$  στα  $6.8pF$  (πραγματική τιμή στην πλακέτα δοκιμών είναι  $6.82pF$ ). Ωστόσο, καθ' όλη την διάρκεια προσπάθειας διόρθωσης του ρεύματος στο

κύκλωμα έγινε και αλλαγή στην αντίσταση εισόδου από 22kΩ στα 10.5kΩ. Με τα στοιχεία αυτά η ενίσχυση Av είναι:

$$A_v = \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f2}} = 9,9445$$

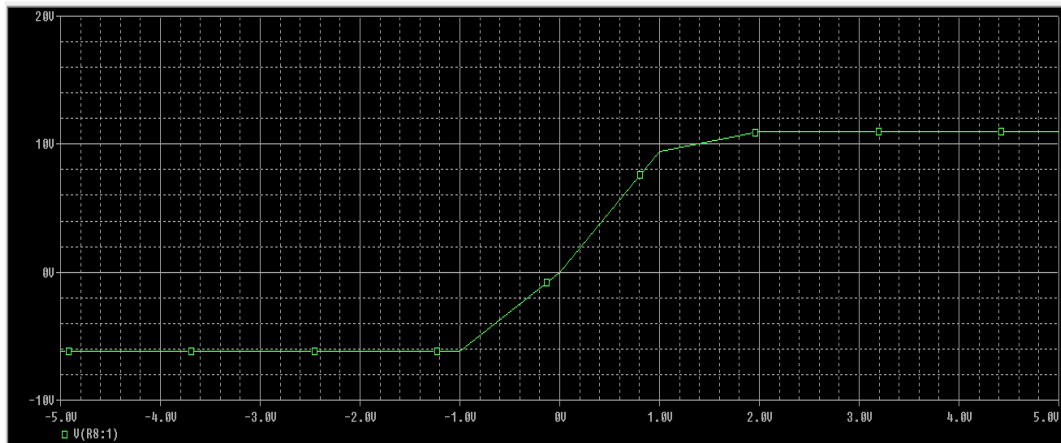
Το κύκλωμα διαμορφώθηκε ως εξής:



Εικόνα 4.24

Στις νέες τιμές φάνηκε πως τιμή του ρεύματος διορθώθηκε σε αρκετά σημεία και η τάση στην έξοδο επίσης.

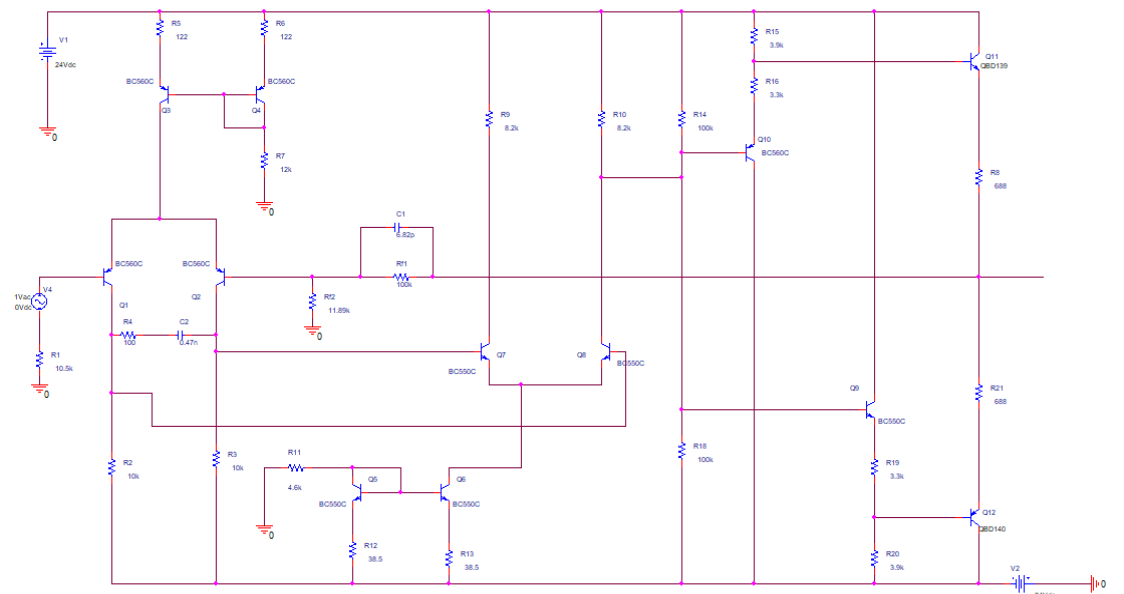
Στις παρακάτω εικόνες αποτυπώνεται η DC Sweep ανάλυση με τοποθετημένο το probe τάσης στην έξοδο



Εικόνα 4.25

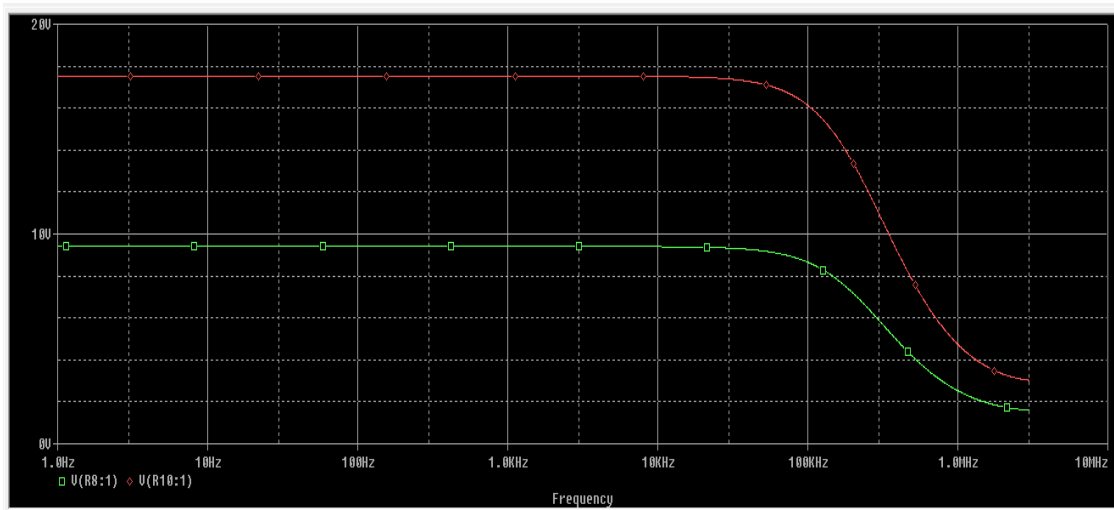
Με βάση την εικόνα 4.25 υπάρχει γραμμικότητα της τάσης από την είσοδο προς την έξοδο από  $-6\text{V}$  έως  $9,5\text{V}$ . Από τα  $9,5\text{V}$ , από το σημείο κορεσμού και πάνω, η καμπύλη παραμορφώνεται και οριζοντιώνεται, σε αυτό το σημείο είναι η τάση εξόδου που μπορεί να παρθεί σαν ενεργός τιμή της rms. Πάνω από τα  $9,5\text{V}$ , όπου είναι το μέγιστο πλάτος, υπάρχει ευαισθησία στην είσοδο με αποτέλεσμα την υπερφόρτωση. Η ενεργός τιμή είναι  $U_{rms} = \frac{9,5}{\sqrt{2}} = 6,7\text{V}$ . Στα  $6\text{V}$ , πλάτος τάσης, εμφανίζεται ο περιορισμός και το μέγιστο είναι  $\frac{6}{\sqrt{2}} = 4,24\text{V}$ .

Η επόμενη εικόνα δείχνει την συνδεσμολογία για την απόκριση συχνότητας (AC sweep). Έχει γίνει προσθήκη δικτύωματος RC στους συλλέκτες του διαφορικού της πρώτης βαθμίδας με  $R=100\Omega$  και  $C=0.47\text{nF}$ .



Εικόνα 4.26

Το ένα probe τάσης είναι τοποθετημένο στην έξοδο του προενισχυτή.



Εικόνα 4.27

### 4.3.2 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής του κυκλώματος εμφανίστηκαν προβλήματα ταλαντώσεων ή θορύβων τα οποία αντιμετωπίστηκαν όταν έγινε η σύνδεση όλων των βαθμίδων στη πλακέτα δοκιμών breadboard.

Στο κατασκευαστικό μέρος αποφασίστηκε να υπάρχουν δύο κανάλια προενισχυτή γραμμής ακουστικών συχνοτήτων με ίδια στοιχεία τα οποία εξετάζονται σε αυτή την ενότητα.

- **ΠΡΩΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

Όταν το κύκλωμα χωρίστηκε σε στάδια έτσι ώστε να καταγραφεί και να ελεγχθεί η λειτουργικότητα του καθενός ξεχωριστά, έβγαιναν τα επιθυμητά αποτελέσματα για τη λειτουργία ενός προενισχυτή γραμμής ακουστικών συχνοτήτων, έπειτα συνεχίστηκε το επόμενο στάδιο, αυτό της σύνδεσης των βαθμίδων σε σειρά. Ολοκληρώνοντας τη σύνδεση παρατηρήθηκαν ορισμένα σφάλματα τα οποία δεν γινόταν να αγνοηθούν έτσι ώστε να λειτουργήσει σωστά το σύνολο της γραμμής του κυκλώματος.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία διόρθωσης ρεύματος και σφαλμάτων έγινε η πρώτη δοκιμή στην πλακέτα δοκιμών Breadboard με ενωμένες και τις τρεις βαθμίδες χωρίς όμως συνδεδεμένο τον πυκνωτή C1 του φίλτρου. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν στο DC. Οι ονομασίες των στοιχείων αντιστοιχούν στην Εικόνα 4.22.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q4)	33,01V
VRC(Q1)	15,86V
VRC(Q2)	15,79V

Πίνακας 4.13

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	25,44V
VRE(Q6)	0,17V
VRE(Q5)	0,14V
VRC(Q7)	2,19V
VREF(Q5)	13,18V

Πίνακας 4.14

→ **Τρίτη βαθμίδα**

VR15	13,6V
VR16	11,73V
VR19	9,85V
VR20	12,04V
VR8	10,46V
VR21	10,5V

Πίνακας 4.15

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις φαίνεται πως υπάρχει μία αρκετά καλή συμμετρία στην έξοδο όμως στην ροή του κυκλώματος πριν την έξοδο φαίνεται να υπάρχει ανομοιομορφία. Ωστόσο στους επόμενους πίνακες αναγράφονται οι μετρήσεις με την σύνδεση στο κύκλωμα του πυκνωτή C1 παράλληλο στην αντίσταση Rf1.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q4)	23,16V
VRC(Q1)	11,6V
VRC(Q2)	11,55V

Πίνακας 4.16

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	24,06V
VRE(Q6)	0,219V
VRE(Q5)	0,199V
VRC(Q7)	23,6V
VREF(Q5)	23,19V

Πίνακας 4.17

→ **Τρίτη βαθμίδα**

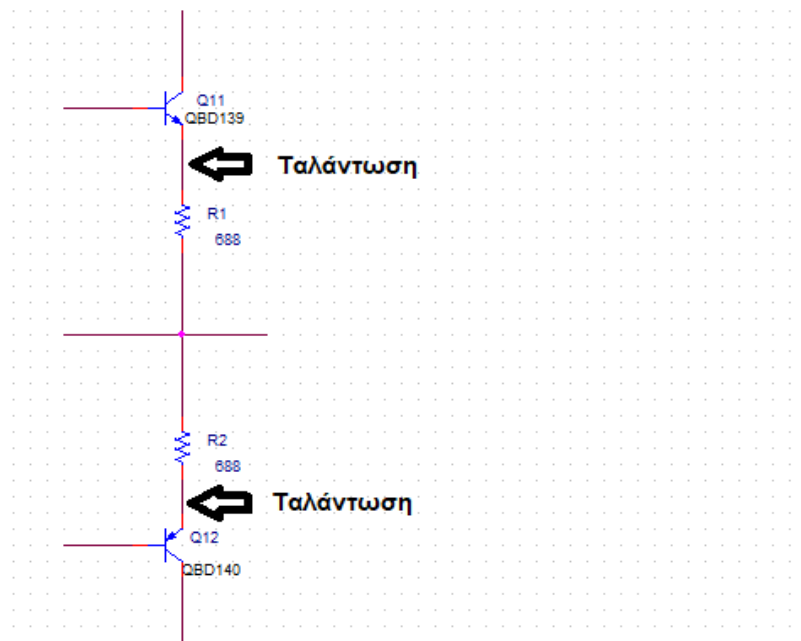
VRC(Q4)	10,5V
VRC(Q1)	10,5V

Πίνακας 4.18

Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται πως με την προσθήκη του πυκνωτή C1 διορθώθηκαν οι τιμές των τάσεων στο κύκλωμα και στην έξοδο υπάρχει συμμετρία. Αξίζει να σημειωθεί πως έγινε μέτρηση από το σημείο εξόδου με την Γη και υπήρξε μισό (0.5) Volt διαφορά.

Στην συνέχεια έγινε μέτρηση της εξόδου στο AC και μετρήθηκε στα 0.03V.

Έπειτα συνδέθηκε γεννήτρια συχνοτήτων και παλμογράφος στο κύκλωμα και παρατηρήθηκε η ύπαρξη ταλάντωσης στην έξοδο. Στην δοκιμή χωρίς σήμα στην είσοδο εξακολούθησε να υπάρχει στα 3MHz. Αποσυνδέθηκε ο πυκνωτής C1 όμως η ταλάντωση δεν εξαλείφθηκε οπότε συνδέθηκε εκ νέου. Έγινε δοκιμή και με αφαίρεση του πυκνωτή C2 όμως το αποτέλεσμα παρέμεινε ίδιο. Παρακάτω υπάρχει ένα σχέδιο για το σημείο όπου εμφανίστηκε η ταλάντωση.



Εικόνα 4.28

Αφού έγιναν μικρές αλλαγές στο κύκλωμα όσον αφορά τις γειώσεις και επανέλεγχος του κυκλώματος πάρθηκαν εκ νέου μετρήσεις στο DC οι οποίες φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q4)	23,11V
VRC(Q1)	11,79V
VRC(Q2)	11,98V

Πίνακας 4.19

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	24,3V
VRE(Q6)	0,223V
VRE(Q5)	0,197V
VRC(Q7)	33,28V

Πίνακας 4.20

→ **Τρίτη βαθμίδα**

VRE(Q11)	10,55V
VRE(Q12)	10,57V

Πίνακας 4.21

Στην δεύτερη βαθμίδα φαίνεται να υπάρχει μία αρκετά αυξημένη τάση ωστόσο η έξοδος έχει μία καλή συμμετρία σε αυτή την δοκιμή. Στην προσπάθεια να συνδεθεί εκ νέου ο παλμογράφος για να ελεγχθεί η ταλάντωση, η αντίσταση εξόδου του τρανζίστορ Q11 κάρηκε. Ως αποτέλεσμα αυτού έγινε αντικατάσταση των δύο αντιστάσεων εξόδου στα 682Ω και πάρθηκαν εκ νέου μετρήσεις.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q1)	12V
VRC(Q2)	11,9V

Πίνακας 4.22

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	24,06V
VRE(Q6)	0,22V
VRE(Q5)	0,19V
VRC(Q7)	25,7V

Πίνακας 4.23

→ **Τρίτη βαθμίδα**

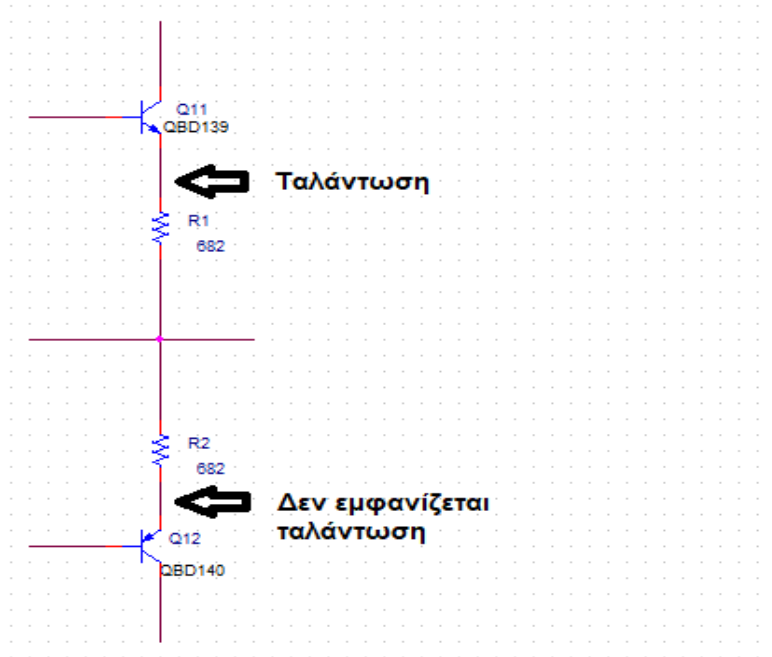
VRE(Q11)	10,5V
VRE(Q12)	10,5V

Πίνακας 4.24

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις υπάρχει συμμετρία σε όλες τις βαθμίδες όπως και στην έξοδο. Στη συνέχεια έγινε σύνδεση του παλμογράφου, για μέτρηση στο DC, με το ένα καλώδιο στη γείωση και το άλλο στην έξοδο της Rf1, όπου δεν εμφανίζεται κάποια ταλάντωση, όμως, ύστερα από πέντε λεπτά εμφανίζεται εναλλασσόμενη ταλάντωση. Στις παρακάτω

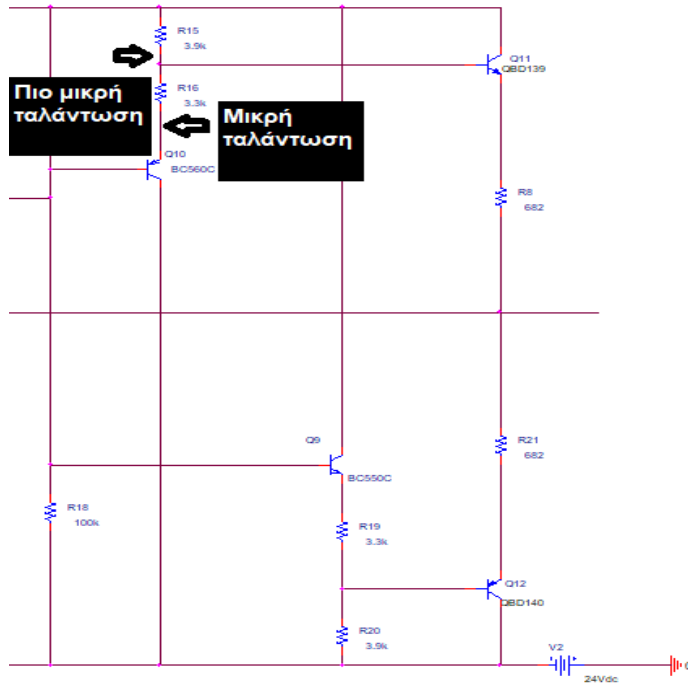


εικόνες απεικονίζονται το σημείο όπου εμφανίζεται η ταλάντωση αυτή και σημεία από τις ενώσεις των βαθμίδων όπου εμφανίζεται ταλάντωση αντίστοιχα.



Εικόνα 4.29

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται το σημείο όπου εμφανίζεται αρχικά η ταλάντωση στην τρίτη βαθμίδα στην ένωσή της με την τέταρτη.



Εικόνα 4.30

Εκείνη τη στιγμή αποφασίστηκε να βρεθεί ο λόγος από τον οποίο προκαλείται η ταλάντωση αυτή, οπότε και απομονώθηκε η τρίτη βαθμίδα βγάζοντας το καλώδιο ένωσης της δεύτερης και τρίτης βαθμίδας, και της ένωσης με την Rf1, ώστε να φανεί αν λειτουργεί ορθά χωρίς ταλαντώσεις. Το αποτέλεσμα αυτού ήταν πως δεν εμφανίζεται κάποια ταλάντωση.

Έπειτα συνδέθηκε εκ νέου το κύκλωμα και πάρθηκαν οι ακόλουθες μετρήσεις.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q1)	10,69V
VRC(Q2)	10,55V

Πίνακας 4.25

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	23,87V
VRE(Q6)	0,25V
VRE(Q5)	0,22V
VRC(Q7)	26,9V

Πίνακας 4.26

→ **Τρίτη βαθμίδα**

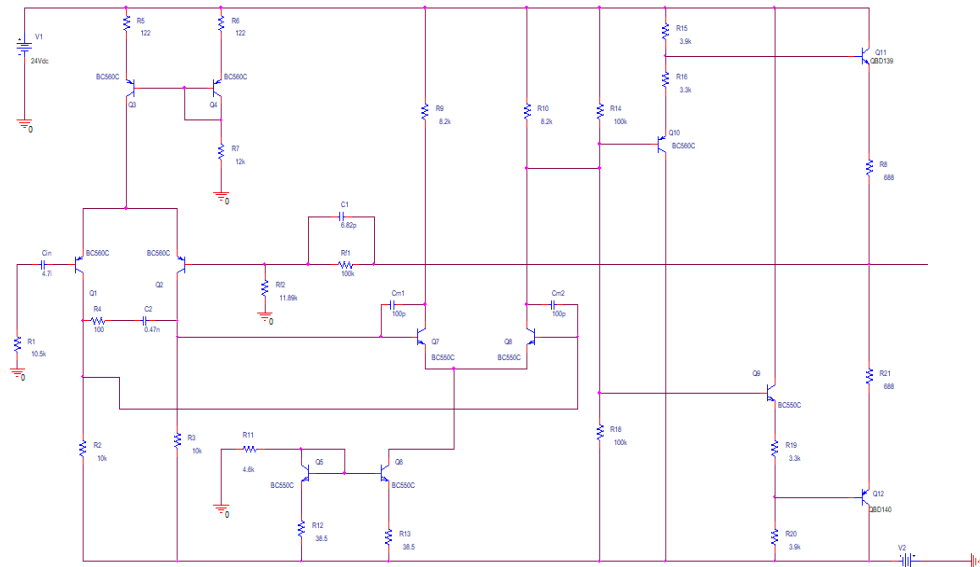
VRE(Q11)	10,52V
VRE(Q12)	10,56V

Πίνακας 4.27

Τα ρεύματα ηρεμίας στην τρίτη βαθμίδα έχοντας κάποια τάση η οποία αποτυπώνεται στον Πίνακα 4.27 για τα τρανζίστορ Q11 και Q12 είναι 15,2mA και 15,3mA αντίστοιχα.

Εφόσον υπήρξε καλή συμμετρία προστέθηκε μία αντίσταση  $R_{Cout}=5\Omega$  και ένας πυκνωτής  $C_{out}=10nF$  στην έξοδο προς τη γη, ώστε να φιλτράρει ότι σήμα υπάρχει με έχει υψηλές συχνότητες και φάνηκε να μην εμφανίζεται πλέον ταλάντωση. Ύστερα από λίγο χρόνο συνδέθηκε παλμογράφος στο DC, χωρίς είσοδο και η εναλλασσόμενη ταλάντωση εμφανίστηκε και πάλι.

Αφού αφαιρέθηκαν  $R_{c_{out}}$  και  $C_{out}$  έγινε δοκιμή με προσθήκη πυκνωτών Miller στο διαφορικό της δεύτερης βαθμίδας (σύνδεση βάση συλλέκτη) για την εξάλειψη της ταλάντωσης. Με  $9pF$  συνεχίζει να υπάρχει ταλάντωση αλλά λίγο μικρότερη με  $100pF$  πάλι συνεχίζει να υπάρχει αλλά ακόμα μικρότερη. Το κύκλωμα διαμορφώθηκε όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.31

Στην σύνδεση του παλμογράφου με είσοδο στο DC κάτω από  $20Hz$  αρχίζει να υπάρχει διαφορά φάσης  $36^\circ$  ( $f=100KHz$ ,  $T=0.0001s$ ). Έξοδος περίπου στα  $0.6V$  rms.

Έπειτα συνδέθηκε αντίσταση  $27\Omega$  σε σειρά με τον κάθε πυκνωτή Miller, με τάση  $1.35mV$  το ρεύμα είναι  $0.05mA$ . Έχοντας το ρεύμα αυτό και τάση  $0.6V$  βγαίνει μία αντίσταση στα  $12k\Omega$ .

Με μέτρηση τάσεων στην έξοδο  $V_{out}=5.56V$  και στην είσοδο  $V_{in}=0.602$  το τελικό  $A_v=9.23$ . Το εύρος τάσης είναι  $5,6V$  rms. Το οποίο δείχνει πως ο προενισχυτής έχει μεγάλα περιθώρια για να δώσει έξοδο, δηλαδή δίνει ένα μεγάλο περιθώριο τάσης στην έξοδο.

- **ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΑΝΑΛΙ**

Με βάση το πρώτο κανάλι δημιουργήθηκε και δεύτερο κανάλι με ακριβώς ίδια στοιχεία όπως προαναφέρθηκε. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν στο DC χωρίς προσθήκη πυκνωτών Miller.

Λόγω ότι και τα δύο κανάλια είναι ίδια, στους πίνακες των μετρήσεων η ονομασία των στοιχείων είναι με βάση την Εικόνα 4.22.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q1)	10,85V
VRC(Q2)	10,11V

Πίνακας 4.28

→ **Δεύτερη βαθμίδα**

VRC(Q8)	24,07V
VRE(Q6)	0,2V
VRE(Q5)	0,17V
VRC(Q7)	23,24V

Πίνακας 4.29

→ **Τρίτη βαθμίδα**

VRE(Q11)	10,52V
VRE(Q12)	10,56V

Πίνακας 4.30

Όπως φαίνεται στη έξοδο υπάρχει καλή συμμετρία. Ωστόσο και σε αυτό το κανάλι εμφανίζεται ταλάντωση χωρίς σήμα στην είσοδο και χωρίς πυκνωτές Miller στα 5MHz. Όταν βέβαια έγινε προσθήκη των πυκνωτών αυτών στην μέτρηση στο DC η ταλάντωση εξαλείφθηκε και παρακάτω είναι οι σχετικές μετρήσεις.

→ **Πρώτη βαθμίδα**

VRC(Q1)	10,7V
VRC(Q2)	10,7V

Πίνακας 4.31

→ Δεύτερη βαθμίδα

VRC(Q8)	24,09V
VRE(Q6)	0,19V
VRE(Q5)	0,17V
VRC(Q7)	21,24V

Πίνακας 4.32

→ Τρίτη βαθμίδα

VRE(Q11)	10,51V
VRE(Q12)	10,5V

Πίνακας 4.33

Οι πυκνωτές Miller που επιλέχθηκαν έχουν τιμή 150pF.

- **Ολοκλήρωση**

Στον επόμενο πίνακα έχουν καταγραφεί οι τελικές μετρήσεις του κυκλώματος με σήμα στην είσοδο.

f (Hz)	V <sub>in</sub> (V)	V <sub>out</sub> (V)	A <sub>v</sub> (V <sub>out</sub> /V <sub>in</sub> )	Δt/T	Time/div
20	0,21	1,97	9,38	0,35	5ms
50	0,21	1,98	9,43	0,1	2ms
200	0,21	2	9,52	0	100μs
1000	0,21	1,99	9,47	0	100μs
5000	0,21	1,96	9,33	0,05	20μs
10000	0,21	1,96	9,33	0,05	20μs
20000	0,21	1,95	9,29	0,2	5μs
40000	0,21	1,89	9	0,2	5μs
50000	0,21	1,86	8,86	0,2	5μs
100000	0,21	1,62	7,71	0,4	2μs
140000	0,21	1,4	6,66	0,75	1μs

Πίνακας 4.34

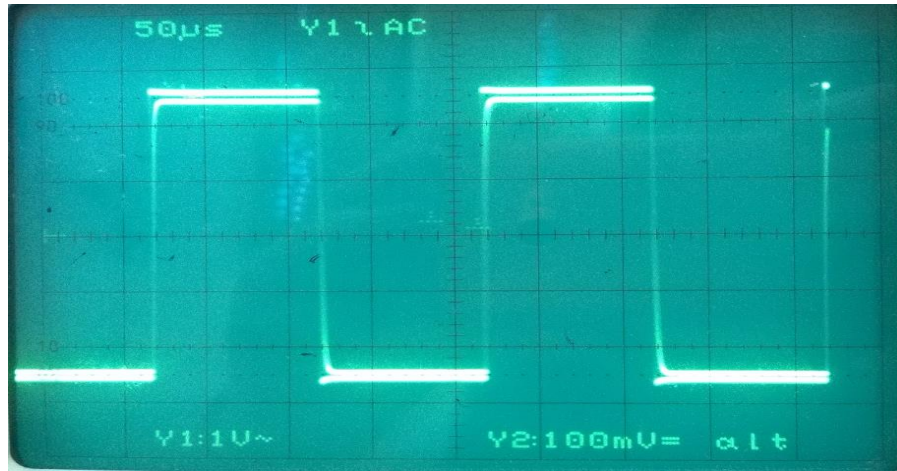
Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα πάρθηκαν μετρήσεις και για αυξημένη συχνότητα, έως 140KHz, όπου στα 140KHz γίνεται αποκοπή.

Με την νέα αντίσταση εισόδου στα 10,5kΩ η σταθερά χρόνου υπολογίζεται  $\tau=R*C=10,5k\Omega*4,7\mu F=49,35\text{ msec}$  που αντιστοιχεί σε μία κάτω συχνότητα αποκοπής στα 3,2Hz.

Στην συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή στο κύκλωμα ανοιχτού βρόγχου με 688Ω. Για κλειστού βρόγχου ο βαθμός ανατροφοδότησης είναι  $\frac{9500}{9,23} = 1029,3$  άρα η αντίσταση εξόδου θα είναι  $\frac{688}{1029,3} = 0,668\Omega$ .

Οι δυνατότητες ρεύματος που έχουν τα τρανζίστορ εξόδου σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος τάσης και την χαμηλή αντίσταση εξόδου, αποδεικνύουν ότι ο προενισχυτής μπορεί να οδηγήσει οποιονδήποτε τελικό ενισχυτή με όποιες αντιστάσεις κι αν υπάρχουν.

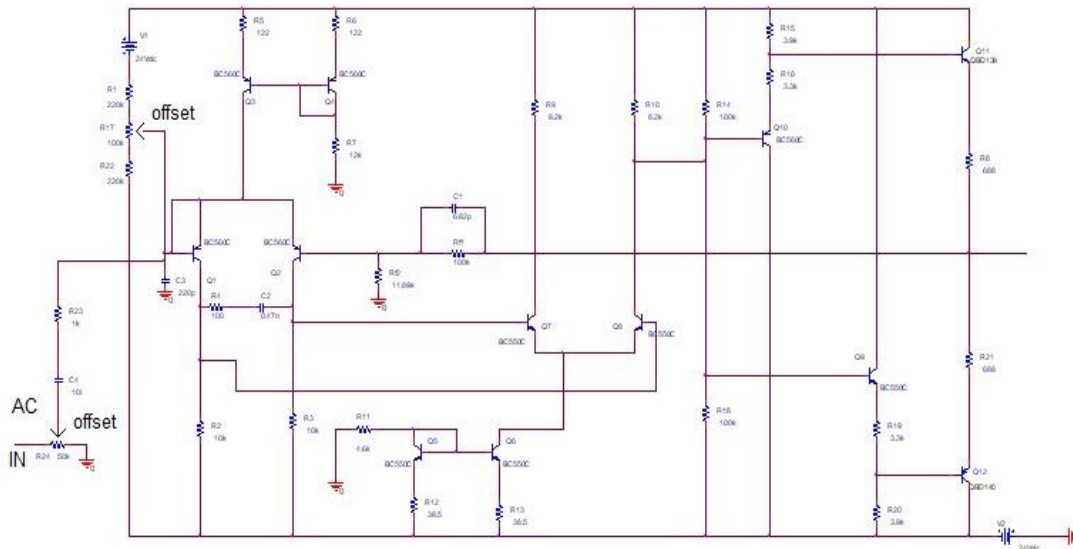
Στην φωτογραφία που ακολουθεί είναι τετραγωνικός παλμός στα 5KHz με περίπου 3μsec χρόνος ανόδου. Η Vin(p-p) είναι ίση με 5Volt τετραγωνική.



Εικόνα 4.32

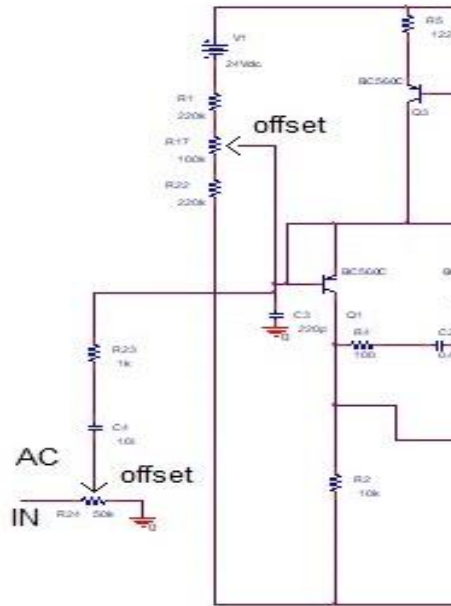
#### 4.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται μία πιθανή τροποποίηση που θα μπορούσε να γίνει στο κύκλωμα.



Εικόνα 4.33

Με μεγέθυνση στην είσοδο.



Εικόνα 4.34

Σύμφωνα με τις δύο προηγούμενες εικόνες έχει γίνει προσθήκη στοιχείων και τοπολογιών.

Στο άνω offset δημιουργείται δρομέας με μέση τιμή 0V και ο διαιρέτης τάσεως είναι μεταβαλλόμενος ώστε να μπορούμε να ρυθμίζουμε την τάση στην έξοδο (offset) του ενισχυτή. Ο πυκνωτής 220pF και αντίσταση 1kΩ δημιουργούν ένα low pass filter που σκοπός του είναι να κόβει τα υψηλά σήματα που παρουσιάζονται στην είσοδο. Ο πυκνωτής 10μF κόβει την DC τάση απόζευξης. Το κάτω δικτύωμα με αντίσταση 50KΩ είναι διαιρέτης τάσεως, ο οποίος ρυθμίζει την ενίσχυση.

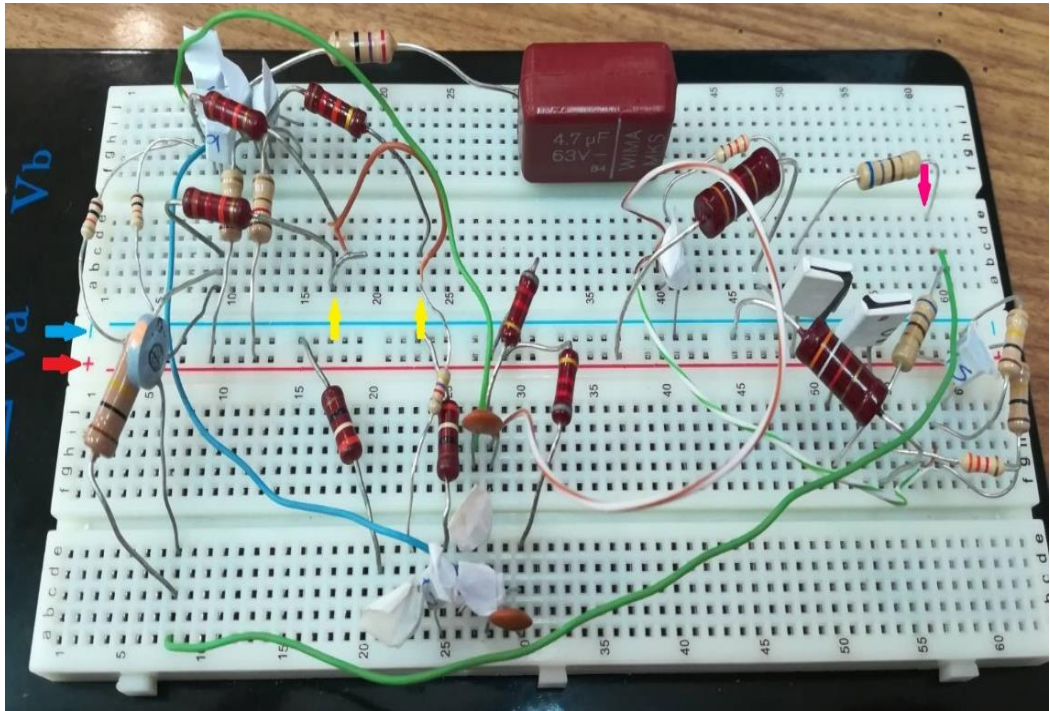
#### 4.5 ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για να μπορέσει το κύκλωμα να λειτουργήσει ορθά και να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα στην έξοδο πρέπει πρώτα να γίνουν κάποιες ενέργειες.

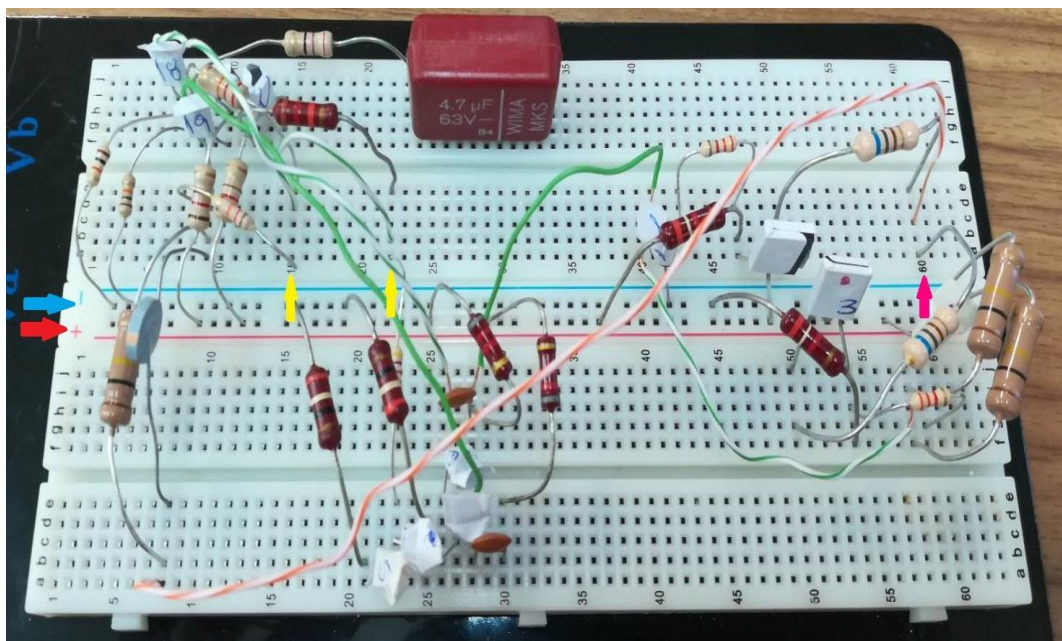
Λόγω ότι το κύκλωμα βρίσκεται σε πλακέτα δοκιμών Breadboard, θα πρέπει να ελεγχθεί αρχικά αν όλα τα στοιχεία και τα καλώδια είναι τοποθετημένα καλά και δεν έχουν κουνηθεί από την θέση τους. Στη συνέχεια ρυθμίζετε τις DC πηγές τάσης στα 24Volt και -24Volt με την βοήθεια ενός βολτομέτρου για ακρίβεια, κλείνετε τον διακόπτη και τοποθετείτε τα καλώδια τάσης στα σωστά σημεία. Ύστερα συνδέετε την γεννήτρια συχνοτήτων η οποία τοποθετείται στην είσοδο και στην έξοδο τον παλμογράφο.



Στις ακόλουθες εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται οι πλακέτες δοκιμών Breadboard με τα κυκλώματα και των δύο καναλιών, επισημαίνονται τα σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να υπάρξει ορθή λειτουργία.



Εικόνα 4.35



Εικόνα 4.36

Στην εικόνα 4.35 απεικονίζεται το κανάλι 1. Στην στήλη του + συνδέονται τα +24 Volt από την πηγή και στην στήλη του – συνδέονται τα – 24 Volt (κόκκινο και μπλε βέλος αντίστοιχα). Από την αριστερή πλευρά της πλακέτας στις σειρές Νο 17 και Νο 23 από το a έως το e, συνδέεται η γείωση (κίτρινα βέλη στην εικόνα) και στην σειρά Νο 60 από a έως e (ροζ βέλος) βρίσκεται η έξοδος του κυκλώματος, όπου εκεί μπορεί να τοποθετηθεί το κροκοδειλάκι του παλμογράφου ώστε να απεικονιστεί το σήμα εξόδου στην οθόνη του.

Στην εικόνα 4.36 απεικονίζεται το κανάλι 2. Όπως και στο κανάλι 1 τα +24 Volt και τα -24 Volt συνδέονται στην στήλη + και – (κόκκινο και μπλε βέλος) αντίστοιχα τα πλακέτας Breadboard. Από την αριστερή και πάλι πλευρά της πλακέτας στις σειρές Νο 15 και Νο 22 από το a έως το e συνδέεται η γείωση (κίτρινα βέλη στην εικόνα) και στην σειρά Νο 60 από a έως e (ροζ βέλος) είναι η έξοδος του κυκλώματος, όπου εκεί μπορεί να συνδεθεί ο παλμογράφος.

Έπειτα από αυτά δίνετε τάση στο κύκλωμα. Με την χρήση βολτομέτρων και αμπερομέτρων μπορείτε να ελέγχετε τάση ή ρεύμα αντίστοιχα σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμείτε. Αλλάζοντας το σήμα στην είσοδο φαίνεται και αντίστοιχη αλλαγή στην έξοδο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γιάννη Χαριτάντη, “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ Ι”, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ

Γιάννη Χαριτάντη, “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΙ”, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ

Α. Χατζόπουλος, Δ. Κωνσταντίνου, Γ. Μπόντζιος, Σ. Αμπού Φάρχα, “SPICE Ανάλυση και Σχεδίαση Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

Σ. Αναστασόπουλος, “ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ Ι”

Λ. Μπισδούνης, Χ. Κωνσταντέλλος-Κοντρογούρης, Α. Κατσαίτης, “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΙ - ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ-“, 2011

[https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-749455056-x25-bc560-bc560c-transistor-bajo-ruido-pnp-50v-100ma-500mw-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-749455056-x25-bc560-bc560c-transistor-bajo-ruido-pnp-50v-100ma-500mw-_JM?quantity=1)

<https://www.datasheetq.com/BC550C-doc-ON-Semiconductor>

[https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-671138200-bd140-transistor-bd140-pnp-80v-15a-mv-electronica-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-671138200-bd140-transistor-bd140-pnp-80v-15a-mv-electronica-_JM)

<https://www.componentsinfo.com/bd139-transistor-pinout-equivalent/>

<http://www.douglas-self.com/ampins/dipa/dipa.htm#3>

<https://www.electroschematics.com/9344/diy-operational-amplifier/>

<http://www.circuit-finder.com/categories/audio/audio-preamplifier/280/symmetrical-class-a-preamplifier>

<http://www.avmentor.gr/downloads/amplifiers.pdf>

<http://www.douglas-self.com/ampins/dipa/dipa.htm#3>

<https://www.electroschematics.com/diy-operational-amplifier/>

<http://www.circuit-finder.com/categories/audio/audio-preamplifier/280/symmetrical-class-a-preamplifier>

<https://electronics.stackexchange.com/questions/206299/op-amp-what-is-internal-frequency-compensation>

<https://www.avsite.gr/forum/threads/%CE%A4%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%B7->

[%CE%91%CF%80%CF%8C%CE%BA%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CE%A3%CF%85%CF%87%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82-%CE%89%CF%87%CE%BF%CF%85.151436/](#)

[https://www.avsite.gr/forum/threads/%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CF%8C%CF%82-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-](#)

[%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%85%CF%84%CE%AD%CF%82-hi-fi-pa-%CE%9C%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CE%9F%CF%81%CE%B3%CE%AC%CE%BD%CF%89%CE%BD.149850/](#)

[https://www.avsite.gr/forum/threads/%CE%9F%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%91%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BC%CF%8C%CF%81%CF%86%CF%89%CF%83%CE%B7-%CE%95%CE%BD%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%85%CF%84%CE%AE-thd.150666/](#)

[https://www.hlektronika.gr/forum/showthread.php?t=61061](#)

[https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwim8aSH5NzwAhXZhf0HHe6ZDmIQFnoECBMQAA&url=https%3A%2F%2Fvhrbiblio.nl%2Fbiblio%2Fboek%2FSelf%2520-%2520Audio%2520Power%2520Amplifier%2520Design.pdf&usg=AOvVaw3w9sA8bcbcGC\\_3JfBUkKvB](#)

[audioXpress | audioXpress Magazine. Advancing the Evolution of Audio Technology - Since 1970](#)

[https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj4xMbm5NzwAhVxhP0HHfNKCAIQFnoECAMQAA&url=https%3A%2F%2Ffxdevs.com%2Fdoc%2F\\_Books%2FASIC\\_Design%2Fdesign%2520of%2520analog%2520cmos%2520inegrated%2520circuits%2520%2528razavi-2001%2529.pdf&usg=AOvVaw3cmt4T2xAmLGxLM3UNd8br](#)

[https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj4xMbm5NzwAhVxhP0HHfNKCAIQFnoECAMQAA&url=https%3A%2F%2Ffxdevs.com%2Fdoc%2F\\_Books%2FASIC\\_Design%2Fdesign%2520of%2520analog%2520cmos%2520inegrated%2520circuits%2520%2528razavi-2001%2529.pdf&usg=AOvVaw3cmt4T2xAmLGxLM3UNd8br](#)

[Read interesting stories about Audio, Video & Home Entertainment Technologies \[avmentor.gr\]](#)

[https://docplayer.gr/11824993-Mikroelektronika-kyklomata.html](#)

[https://docplayer.gr/86382516-6-telestikoi-enishytes.html](#)

[https://el.wikipedia.org/wiki](#)