**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**
**Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ**
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΛΛΗΨΗΣ ΥΠΟΗΧΩΝ

## ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

**Αγαπάκης Γεώργιος Α.Μ 302**
**Ρακιντζής Νικόλαος Α.Μ 232**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Βενιέρης Εμμανουήλ**

**Ρέθυμνο ,Δεκέμβριος 2009**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρακάτω πτυχιακή εργασία αφορά την κατασκευή συστήματος λήψης υπόηχων από το περιβάλλον με σκοπό την καταγραφή και ανάλυση τους. Για να καταστεί αυτό δυνατόν υλοποιήσαμε την παρακάτω ηλεκτρονική συσκευή η οποία αποτελείτε από τα εξής μέρη:

**1.** Πηγή(τροφοδοτικό),
**2.** Ενισχυτής
**3.** Πηγή λήψης(ηχείο).

Στη συνεχεία μέσω ενός προγράμματος εξομοίωσης (spice) σχεδιάσαμε το κύκλωμα που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του ενισχυτή και προχωρήσαμε στην πραγματοποίηση μετρήσεων στο περιβάλλον τις οποίες και αποδώσαμε γραφικά.

Έτσι παραθέτοντας και τα τελικά συμπεράσματα μας έχουμε ολοκληρωμένο το πλάνο της πτυχιακής μας εργασίας.

# 1. ΥΠΟΗΧΟΙ

## 1.1 Εισαγωγή

Ο κλάδος που μελετά τέτοια ηχητικά κύματα μερικές φορές αναφέρεται σαν υποηχητική, και ασχολείται με ήχους που βρίσκονται μεταξύ του κατώτατου ορίου της ανθρώπινης ακοής (20 Hz) έως συχνότητες 0,001 Hz. Αυτή η περιοχή του ακουστικού φάσματος χρησιμοποιείται στη Σεισμολογία για την παρακολούθηση των σεισμών. Οι υπόηχοι μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις, ειδικά μέσα σε στερεά ή υγρά μέσα και να παρακάμψουν εμπόδια χωρίς σημαντική εξασθένιση. Οποιοσδήποτε ήχος κάτω από τα 20 HZ, αν και δεν γίνεται αντιληπτός υπάρχει σαν ένας κανονικός παλμός.

Η πρώτη καταγεγραμμένη παρατήρηση φυσικών υπόηχων σημειώθηκε μετά την έκρηξη του ηφαιστείου Κρακατόα το 1883, όταν τα ηχητικά κύματα που δημιουργήθηκαν περιέτρεξαν τη Γη πάνω από επτά φορές και καταγράφηκαν από βαρόμετρα σε όλο τον κόσμο.

## 1.2 Γενικά

Οι υπόηχοι μπορούν να παραχθούν και από φυσικά φαινόμενα, όπως η κακοκαιρία, οι χιονοστιβάδες, οι σεισμοί, τα ηφαίστεια, τα μετέωρα, οι καταρράκτες, το σπάσιμο των παγόβουνων, το σέλας και οι αστραπές. Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυμάτων κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας στον ωκεανό παράγει υπόηχους με συχνότητα περίπου 0.2 Hertz, που είναι γνωστοί και σαν φωνή της θάλασσας. Οι υπόηχοι μπορούν να παραχθούν επίσης από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως ο Υπερηχητικός Κρότος, οι εκρήξεις, μηχανές όπως οι κινητήρες Diesel και οι ανεμογεννήτριες ,καθώς και από ειδικά σχεδιασμένες δονούμενες τράπεζες και μεγάλα ηχεία subwoofer.

Ο Οργανισμός για την Εφαρμογή της Συνθήκης Πλήρους Απαγόρευσης των Πυρηνικών Δοκιμών χρησιμοποιεί τους υπόηχους για τον εντοπισμό τυχόν πυρηνικών εκρήξεων (σε συνδυασμό με σεισμικές και υδρακουστικές παρατηρήσεις όπως και μέτρηση των ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα).

Οι επιστήμονες κατά σύμπτωση ανακάλυψαν ότι η περιστρεφόμενη δίνη ενός τυφώνα δημιουργεί υποηχητικά κύματα. Όταν η δίνη είναι μεγάλη, οι συχνότητες είναι χαμηλότερες. Τα κύματα αυτά μπορούν να εντοπιστούν σε αποστάσεις έως και 160 χιλιομέτρων, κι έτσι να προειδοποιήσουν για την ύπαρξη κάποιου τυφώνα.

## 1.3 Αντιδράσεις των ζώων στους υπόηχους

Τα ζώα είναι γνωστό ότι αντιλαμβάνονται τους υπόηχους που μεταδίδονται μέσα στη γη ή στο νερό και υποστηρίζεται ότι αυτή τους η ικανότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προειδοποίηση για φυσικές καταστροφές που γεννούν υπόηχους.

Κατά τη διάρκεια του Σεισμού στην Ινδονησία και του τσουνάμι που ακολούθησε το 2004, παρατηρήθηκε ότι τα ζώα απομακρύνθηκαν από τις ακτές πολύ πριν το τσουναμι φτάσει σε αυτές, από άλλους όμως ερευνητές υποστηρίζεται ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και όχι οι υπόηχοι προειδοποίησαν τα ζώα. Αρκετοί άνθρωποι επίσης μπορούν να αισθανθούν έναν επερχόμενο σεισμό από το αρχικό αίσθημα ναυτίας που νιώθουν από τους προπορευόμενους υποήχους του. Μερικοί μάλιστα έχουν χρησιμοποιηθεί από τις κοινωνίες τους για την πρόγνωση των σεισμών.

Οι φάλαινες ,οι ελέφαντες ,οι ρινόκεροι ,οι καμηλοπαρδάλεις ,τα οκάπι και οι αλιγάτορες χρησιμοποιούν τους υπόηχους για να επικοινωνήσουν ακόμα και σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων, όπως συμβαίνει με τις φάλαινες. Οι τελευταίες χρησιμοποιούν μια συχνότητα περίπου στα 15 Hz, και κύματα αυτής της συχνότητας μπορούν να διαδοθούν σε τεράστιες αποστάσεις μέσα στο νερό. Η ηχητική μόλυνση όμως της θάλασσας, κυρίως από τα μηχανοκίνητα πλοία, μπλοκάρει αυτό το κανάλι επικοινωνίας, και το γεγονός αυτό έχει προταθεί ως μια από τις εξηγήσεις για τη μείωση του πληθυσμού των φαλαινών κατά τον εικοστό αιώνα. Οι ελέφαντες παράγουν υπόηχους με την προβοσκίδα και τη ρινική κοιλότητά τους, οι οποίοι μπορούν να διαδοθούν μέσα στο έδαφος και να γίνουν αισθητοί (μέσω των ποδιών) από μια άλλη ορδή ελεφάντων σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων. Έχει προταθεί επίσης ότι τα μεταναστευτικά πουλιά χρησιμοποιούν φυσικά παραγόμενους υπόηχους (όπως π.χ. η ταραχώδης ροή του αέρα πάνω από βουνοσειρές) για να βοηθηθούν στην ναυσιπλοϊα τους.

Ο υπόηχος μιας συγκεκριμένης συχνότητας μπορεί να διαρρήξει την ύλη και σε άλλες συχνότητες να ζαλίσει, αχρηστεύει ή να σκοτώσει. Ορισμένα έτσι ζώα χρησιμοποιούν αυτήν τη δύναμη για να ζαλίσουν ή σκοτώσουν το θήραμά τους. Υποστηρίζεται π.χ ότι οι τίγρεις προτού επιτεθούν εκτοξεύουν ένα βρυχηθμό 18Hz για να ζαλίσουν τα θηράματά τους. Τα μη ακουστά αυτά ξεσπάσματα υποήχων των ζώων έχουν σε μερικές περιπτώσεις επίπτωση και στους ανθρώπους. Φάλαινες π.χ. που έχουν προσαράξει σε αβαθή νερά, έχουν απωθήσει μερικές φορές τους κτηνιάτρους μακριά με τα ισχυρά κύματα πίεσης των υποηχητικών “κλήσεων βοήθειας” που εκπέμπουν. Άλλοι πάλι έχουν αναφέρει την αδυναμία τους να προσεγγίσουν μια περιοχή μικρών φαλαινών λόγω των

κυμάτων πιέσεως που ασκούνται στο σώμα τους από τις ισχυρές υποηχητικές προβολές τους.

## 1.4 Αντιδράσεις των ανθρώπων στους υπόηχους

Έχει διαπιστωθεί ότι οι υπόηχοι προκαλούν αισθήματα δέους ή φόβου στους ανθρώπους. Από τη στιγμή που δεν μπορούν να γίνουν συνειδητά αισθητοί, κάποιος που δέχεται την επίδραση υπόηχων μπορεί να νομίσει ότι είναι μάρτυρας υπερφυσικών φαινομένων. Οι υπόηχοι έχουν προστεθεί εσκεμμένα κατά καιρούς στην "ηχητική μπάντα" ορισμένων ταινιών προκειμένου να προκαλέσουν ανησυχία ή δυσφορία στους θεατές. Το πιο γνωστό παράδειγμα είναι η ταινία "Μη αναστρέψιμος" του 2002.

Οι υπόηχοι μπορούν να προκαλέσουν μια μεγάλη γκάμα αρνητικών φυσιολογικών και ψυχολογικών αποτελεσμάτων: ανησυχία, διαταραχή, οξυθυμία, πίεση, δυσφορία, ζάλη, ίλιγγο, ναυτία, εμετό, αποπροσανατολισμό, πόνο στα μάτια και τ’ αυτιά, πονοκέφαλο, κοιλόπονο, μυρμήγκιασμα, ερεθισμό του δέρματος, σφίξιμο, πνίξιμο, βήξιμο, δύσπνοια, ταχυκαρδία, διανοητική ανικανότητα, μειωμένη αντίληψη, εξάντληση, κατάπτωση, ακούσια αφόδευση, βλάβη των εσωτερικών οργάνων ακόμα και θάνατο. Χαρακτηριστική είναι η αίσθηση της ακραίας κούρασης μετά την έκθεση. Πολλά από τα παραπάνω φυσιολογικά αποτελέσματα παραμένουν για αρκετό χρόνο μετά την έκθεση. Η ζαλάδα π.χ. που θα ακολουθήσει μια έκθεση για λιγότερο από πέντε λεπτά σε έναν υπόηχο 10Hz χαμηλής έντασης, θα διαρκέσει για ώρες. Παρόμοια μια σύντομη έκθεση σε έναν υπόηχο 12Hz χαμηλής έντασης θα προκαλέσει μια σοβαρή και μεγάλης διάρκειας ναυτία.

Η ανακάλυψη ότι τα υπόηχα κύματα βρίσκονται σε μεγάλο βαθμό σε στοιχειωμένα σπίτια στη Μεγάλη Βρετανία έκανε τους επιστήμονες να ερευνήσουν τις αντιδράσεις των ανθρώπων κατά την επιρροή τους από τέτοια κύματα. Στις 31 Μαΐου 2003, μια ομάδα Βρετανών ερευνητών διεξήγαγαν ένα πείραμα όπου συνολικά περίπου 700 άνθρωποι άκουσαν μουσική στο υπόβαθρο της οποίας παρεμβάλλονταν ημιτονική ημιτονικά κύματα υπόηχων συχνότητας 17 Hz, που παράγονταν από ένα subwoofer που βρισκόταν στα δυο τρίτα της απόστασης από το άκρο ενός επτάμετρου πλαστικού σωλήνα. Το πειραματικό κονσέρτο (με την ονομασία Υποηχητικό) έγινε στην αίθουσα συναυλιών Purcell Room και αποτελούνταν από τέσσερα μουσικά κομμάτια. Δυο από τα κομμάτια περιείχαν στο υπόβαθρο υπόηχους. Στο δεύτερο κονσέρτο, οι υπόηχοι έπαιζαν στο υπόβαθρο των άλλων δυο κομματιών, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να μην εξαρτάται από κάποιο συγκεκριμένο κομμάτι. Η παρουσία του τόνου υποήχων προκάλεσε μια αύξηση περίπου 22% των

συμμετεχόντων που ένιωσαν άγχος, ανησυχία, έντονη θλίψη, αισθήματα αποστροφής ή φόβου, ανατριχίλες και βάρος στο στήθος σε σχέση με όσα κομμάτια δεν περιείχαν υποήχους, και επιπλέον αύξησε την ένταση των συναισθημάτων.

Το συμπέρασμα του πειράματος κατά τον επιστήμονα που το διοργάνωσε ήταν ότι οι ήχοι χαμηλής συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν ασυνήθιστα ή δυσάρεστα αισθήματα στους ανθρώπους παρά το γεγονός ότι δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτοί. Κατά την ίδια έρευνα, οι υπόηχοι μπορεί να είναι υπεύθυνοι για τα περίεργα φαινόμενα που παρουσιάζονται σε μέρη που θεωρούνται στοιχειωμένα.

Ο μουσικός Μπράιαν ("Λαστμορντ)" Γουίλιαμς της ντάρκ άμπιεντ (“περιβάλλον σκότος”), χρησιμοποιεί υποήχους για να προκαλέσει συναισθήματα φόβου και δέους στο ακροατήριό του. Ο υπόηχος δε χρειάζεται να έχει μεγάλο πλάτος (ένταση) για να προκαλέσει μια ασθένεια. Πολλοί έτσι ερευνητές είχαν στην αρχή της έρευνάς τους αρκετά ατυχήματα, μέχρι να καταλάβουν τι ακριβώς γινότανε και τι προφυλάξεις έπρεπε να πάρουν.

Ο Τέσλα χρησιμοποίησε δονούμενες εξέδρες, δικιάς του σύνθεσης, σαν μια μέθοδο ενίσχυσης της ζωτικότητας. Η χρήση τους για ένα λεπτό, μπορούσε να είναι ευχάριστη και δυναμωτική. Η υπερβολική όμως χρήση τους προκαλούσε σοβαρή ασθένεια, μια επικίνδυνη αύξηση της πιέσεως και ταχυκαρδία. Ο ίδιος ο Τέσλα εξήγησε πολλές φορές στους δημοσιογράφους τα αποτελέσματα των υποήχων, όταν αυτοί αρνιόντουσαν να πιστέψουν ότι ένας “τόσο μικρός ήχος” μπορούσε να έχει τόσο μεγάλα αποτελέσματα. Και όμως με έναν τέτοιο μικρό ήχο γκρέμισε σχεδόν το εργαστήριό του, όταν αυτό συντονίστηκε σε μέγιστο πλάτος ταλάντωσης με το ρυθμό της συσκευής του. Υποστηρίζεται ακόμα ότι σχεδίασε αργότερα όπλα (μηχανή τεχνικών σεισμών του Τέσλα) που μπορούσαν να γκρεμίσουν κτήρια και ολόκληρες πόλεις.

Ο Γουώλτ Ντίσνεϋ επίσης και μια ομάδα καλλιτεχνών του εκτέθηκαν σε υπερήχους και αρρώστησαν για μέρες από ναυτία, όταν ένα ηχητικό εφφέ (ηλεκτρικό κολλητήρι, 60Hz) που σκόπευαν να βάλλουν σε μια σκηνή των κοινούμενων σχεδίων τους επιβραδύνθηκε αρκετές φορές στο μαγνητόφωνο (στα 12Hz) και ενισχύθηκε από το ηχητικό σύστημα του θεάτρου. Η ναυτία οφείλεται στο γεγονός ότι οι υπόηχοι επηρεάζουν το μέσο νου, όπου βρίσκεται το κέντρο ισορροπίας. Η αποκατάσταση στη φυσιολογική κατάσταση έρχεται μετά από ώρες ή ακόμα μέρες. Αυξημένες εντάσεις μπορούν να προκαλέσουν το θάνατο. Η ανθρώπινη δραστηριότητα δημιουργεί συνεχώς υποήχους στο περιβάλλον, είτε πρόκειται για τα οχήματα, τις μηχανικές και ηλεκτρονικές συσκευές είτε για τις χημικές και πυρηνικές εκρήξεις. Η Περιεκτική Οργάνωση μάλιστα της Συνθήκης Απαγόρευσης των Πυρηνικών Δοκιμών χρησιμοποιεί τους υπόηχους, μαζί με άλλες

τεχνολογίες, για την ανίχνευση πιθανών πυρηνικών δοκιμών από τις συμβαλλόμενες χώρες, κατά παράβαση της Συνθήκης. Οι υπολογιστές επίσης παράγουν υποήχους κι έτσι μπορεί να εξηγηθεί το γεγονός ότι η παρατεταμένη εργασία σε αυτούς μπορεί να προκαλέσει ζάλη, ναυτία και τάση για εμετό ή ακόμα υπερβολική κούραση και κατάπτωση. Δεν είναι μόνον η “ακτινοβολία” του υπολογιστή που μας πειράζει, αλλά και οι υπόηχοί του.

Ανάλογα θα μπορούσαν να εξηγηθούν “επιστημονικά” τα “άρρωστα κτήρια” όπου διάφορες αρχιτεκτονικές ανωμαλίες ή συχνότητες ηλεκτρονικών συσκευών θα μπορούσαν να παράγουν σε ορισμένα σημεία τους “στάσιμα κύματα υποήχων”, στα οποία θα οφείλονταν τελικά τα παρατηρούμενα συμπτώματα. Το μουσικό συγκρότημα Θρόμπιν Γκρλίσλ πειραματίσθηκε το 1978 στο στούντιό του στο Λονδίνο με τους υπερήχους και υποήχους. Στη διάρκεια των δοκιμών με τους υποήχους, με τη βοήθεια μιας βιομηχανικής γεννήτριας συχνοτήτων, ο αέρας άρχισε να λαμπυρίζει και τα ενδύματά τους να "κυματίζουν κάτω από τα κύματα".

Τέλος το ναρκωτικό που αναμένεται να σημαδέψει τον εικοστό πρώτο αιώνα δεν θα μπορούσε παρά να κατασκευάζεται και να διακινείται μέσω Ιντερνετ. Ο λόγος για το iDoser, τη νέα εθιστική «ουσία» που κάνει θραύση σε όλο τον κόσμο και δεν λαμβάνεται με χάπια, ενέσεις ή εισπνοές, αλλά κυκλοφορεί σε ψηφιακά αρχεία, που οι χρήστες κατεβάζουν εύκολα από το Διαδίκτυο. Η «δόση» είναι βασισμένη σε ηχητικά κύματα, τα οποία έχουν ενσωματωθεί με ειδική επεξεργασία σε κοινά μουσικά αρχεία .mp3 και πωλούνται ως αρχεία .drg. Οι χρήστες δεν έχουν παρά να τα αναζητήσουν στις εκατοντάδες ιστοσελίδες-βαποράκια, να τα κατεβάσουν στον υπολογιστή τους και με ένα ειδικό πρόγραμμα, που διατίθεται δωρεάν στο Ιντερνετ, να τα αποσυμπιέσουν, να τα ακούσουν και να φτιάξουν κεφάλι στην κυριολεξία, αφού τα ηχητικά αυτά ναρκωτικά δρουν κατευθείαν στον εγκέφαλο. Όπως εξηγούν οι ειδικοί, πρόκειται για συγκεκριμένα κύματα συχνότητας 3 έως 30 Hertz που επηρεάζουν τη λειτουργία του εγκεφάλου προκαλώντας διάφορες αντιδράσεις. Για παράδειγμα, τα κύματα άλφα (τα οποία κυμαίνονται από 7 έως 13 Hertz) έχουν χαλαρωτική δράση, όμως υπάρχουν και άλλα που προκαλούν αντιθέτως υπερδιέγερση και ευφορία.

Ήδη οι αρχές έχουν εντοπίσει αμέτρητες ιστοσελίδες όπου μπορούν οι ενδιαφερόμενοι να βρουν τη δόση τους. Μάλιστα, υπάρχει και ιστοσελίδα όπου παρέχονται οδηγίες χρήσης του νέου ναρκωτικού για τους αρχάριους και πωλούνται CDs με τραγούδια-«δόσεις». Οπως συμβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις και με τα κοινά ναρκωτικά, οι πρώτες χαμηλές «δόσεις» παρέχονται δωρεάν, με στόχο την προσέλκυση νέων πελατών. Ακόμα όμως και οι πιο ισχυρές «δόσεις» προσφέρονται σε

πολύ χαμηλές τιμές (περίπου 5 ευρώ το τραγούδι), παρά το γεγονός ότι μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν αμέτρητες φορές. Την ίδια στιγμή, στο YouTube μπορεί να βρει κανείς πολλά σχετικά βιντεάκια και να δει νέους να παραληρούν από ευφορία τη στιγμή που δοκιμάζουν το ναρκωτικό της ψηφιακής εποχής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των υποηχητικών κυμάτων δεν είναι κάτι καινούργιο για τις αστυνομικές αρχές, οι οποίες στο εξωτερικό τα χρησιμοποιούν ως κατασταλτικά μέσα, για παράδειγμα, στις ντισκοτέκ ώστε να ηρεμούν τη νεολαία. Η χρήση τους έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν και σε στρατιωτικούς χώρους. Παρ' όλα αυτά, οι κίνδυνοι για την υγεία που σχετίζονται με τη χρήση των cyber-ναρκωτικών δεν έχουν διαπιστωθεί ακόμα. Οι ειδικοί έχουν αρχίσει έρευνες σχετικά με το μέγεθος και τις επιπτώσεις του εθισμού.

Πρόσφατα, Ιταλοί ερευνητές μελέτησαν και υπολόγισαν την αθροιστική επίδραση του ήχου και του ecstasy στον εγκέφαλο πειραματόζωων. «Χορηγήσαμε σε ποντίκια μία μικρή δόση ecstasy ανίκανη να προκαλέσει την παραμικρή νευρολογική επίδραση και στη συνέχεια χορηγήσαμε στα ίδια ποντίκια μία 'δόση' ήχου 95 ντεσιμπέλ, τη μέγιστη που επιτρέπεται στις ντισκοτέκ. Αμέσως διαπιστώσαμε ενίσχυση της επίδρασης του ecstasy. Και όχι μόνο: όταν αυξήσαμε την αρχική δόση του ecstasy, η μετέπειτα 'δόση' του ήχου προκάλεσε ενίσχυση της επίδρασης που διήρκεσε πέντε ολόκληρες ημέρες» εξήγησε ο Μικελάντζελο Ιανόνε, ερευνητής από το Ινστιτούτο Νευρολογικών Επιστημών του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καταντζάρο. «Αυτό εξηγεί γιατί ορισμένα είδη ναρκωτικών, όπως για παράδειγμα το ecstasy, καταναλώνονται σε ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες σε περιστάσεις όπως ρέιβ-πάρτι, όπου προφανώς η μουσική ενισχύει την επίδρασή τους».

## 1.5 Χρήση των υπόηχων για στρατιωτικούς σκοπούς

Δυστυχώς όμως υπάρχει και μια δυνατότητα χρήσης των υπόηχων κυμάτων για καταστροφικούς λόγους, για την κατασκευή δηλαδή όπλων. Μέχρι τη δεκαετία του '50 οι επιστήμονες είχαν ανακαλύψει συσκευές παραγωγής υπόηχων από 1 έως και 10HZ. Από τις μελέτες που είχαν κάνει διαπίστωσαν ότι τα κύματα αυτών των συχνοτήτων επηρεάζουν τα ζωτικά όργανα των ανθρώπων με αποτέλεσμα την εξουδετέρωση τους είτε για ώρες ή μέρες ή ακόμη και τη θανάτωση τους. Η κύρια δυσκολία για την κατασκευή τέτοιων όπλων είναι ότι πρέπει να έχουν πολύ μεγάλο πλάτος για να είναι αποτελεσματικά, και πολύ καλή εστίαση έτσι ώστε να στέλνουν το κύμα εκεί που πρέπει. Πέρα από τη χρήση τέτοιων όπλων από το στρατό, υπάρχει και η πιθανότητα χρήσης τους για τον έλεγχο του πλήθους (π.χ. των ανθρώπων μιας πόλης) αλλά και την προσωπική προστασία.

Η καταστροφική ικανότητα των όπλων αυτών μπορεί να συγκριθεί με τις ατομικές εκρήξεις. Έχουν πολύ μεγάλη εξάπλωση. Έτσι μετά από μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι ένα κύμα υπόηχων μπορεί να μετακινηθεί μέχρι και 2500-3500 χιλιόμετρα από το σημείο εκπομπής του σε λιγότερο από 2 ώρες.

Οι υπόηχοι χρησιμοποιήθηκαν επίσης από τις δυνάμεις της Αντάντ κατά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο για τον εντοπισμό του εχθρικού πυροβολικού. Χρησιμοποιώντας μικρόφωνα ευαίσθητα μόνο σε χαμηλές συχνότητες μπορούσε να διαχωριστεί ο ήχος της πυροδότησης του βλήματος (που παρήγαγε εκτός από τον ήχο της έκρηξης και υπόηχους) από τον υπερηχητικό κρότο που παρήγαγε το βλήμα καθώς έσπαζε το Φράγμα Ήχου, και να καθοριστεί έτσι με ακρίβεια η θέση μιας εχθρικής πυροβολαρχίας.

### 1.6 Υπόηχοι και έρευνα

Ένας από τους πρωτοπόρους στην έρευνα των υπόηχων ήταν ο Γάλλος Βλαντιμίρ Γαβρώ, που γεννήθηκε στη Ρωσία ως Βλαντιμίρ Γαβρόφσκι. Η ενασχόλησή του με τους υπόηχους ξεκίνησε όταν γύρω στο 1960 ο ίδιος και οι βοηθοί του αφενός ένιωθαν πόνο στα τύμπανα αφετέρου παρατήρησαν δονήσεις στον εξοπλισμό του εργαστηρίου, χωρίς ωστόσο τα μικρόφωνα του εργαστηρίου να συλλαμβάνουν κάποιον ήχο μέσα στο Ακουστικό Φάσμα. Έτσι ο Γαβρώ κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για τα φαινόμενα αυτά ευθύνονταν υπόηχοι, τους οποίους στη συνέχεια μελέτησε.

Η έρευνα του Βικ Τάντι (Vic Tandy, 1955-2005), λέκτορα στο "Πανεπιστήμιο του Κόβεντρι", κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπόηχοι σε συχνότητα περίπου 19 hertz είναι υπεύθυνοι για πολλές από τις θεάσεις φαντασμάτων. Ο Τάντι κάποιο βράδυ δούλευε μόνος σε ένα εργαστήριο στο Γουόργουικ, όπου μερικές βδομάδες πριν μια καθαρίστρια είχε αναφέρει ότι είδε ένα γκρίζο φάντασμα. Κάποια στιγμή ένιωσε έντονο άγχος και ανατριχίλες και είχε την αίσθηση ότι κάποιος τον παρακολουθεί, ενώ με τη γωνία του ματιού του έπιασε μια γκρίζα μορφή να έρχεται καταπάνω του. Όταν γύρισε να την αντιμετωπίσει, δεν είδε απολύτως τίποτα.

Την επόμενη μέρα μετέφερε στο εργαστήριο το ξίφος άσκησής του προκειμένου να προετοιμαστεί για έναν διαγωνισμό ξιφασκίας. Όταν στερέωσε τη λαβή του ξίφους στη μέγγενη του πάγκου, πρόσεξε ότι η λεπίδα παλλόταν έντονα, χωρίς να υπάρχει κάποιο αισθητό αίτιο. Ερευνώντας το φαινόμενο κατέληξε ότι στο χώρο υπήρχε ένας υπόηχος συχνότητας 18.98 Hz που δημιουργούσε ο ανεμιστήρας του απαγωγού. Η συχνότητα αυτή είναι πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα του ανθρώπινου ματιού (περίπου 18 Hz).Αυτή ήταν η εξήγηση για την εμφάνιση της

γκρίζας μορφής: ήταν μια οφθαλμαπάτη που προκαλούνταν καθώς το μάτι συντονιζόταν στον υπόηχο. Το δωμάτιο είχε μήκος ακριβώς το μισό από το Μήκος Κύματος του ηχητικού κύματος, έτσι δημιουργούνταν Στάσιμο Κύμα το οποίο και προκάλεσε την ταλάντωση της λεπίδας του ξίφους. Όταν ο ανεμιστήρας τέθηκε εκτός λειτουργίας η ταλάντωση σταμάτησε, και παράλληλα εξαφανίστηκε και το αίσθημα δυσφορίας που είχαν συνήθως όσοι δούλευαν στο συγκεκριμένο εργαστήριο.

Ο Τάντι διερεύνησε κι άλλα παρόμοια φαινόμενα και μαζί με τον ψυχολόγο Τόνι Λόρενς έγραψε τη μελέτη Το Φάντασμα στη Μηχανή (The Ghost in the Machine). Ανάμεσα στις περιπτώσεις που ερεύνησε ήταν αυτή του υπόγειου του Γραφείου Πληροφόρησης Τουριστών, δίπλα στον Καθεδρικό του Κόβεντρι, καθώς και ενός κελαριού στο Κάστρο του Εδιμβούργου.

Οι υπόηχοι (συχνότητες κάτω από 20 Hz) έχουν την ιδιότητα να επηρεάζουν τις βιολογικές διαδικασίες. Πειράματα που διεξήχθησαν κατά τη δεκαετία του ’80 στο Ερευνητικό Εργαστήριο Μηχανικών Ανωμαλιών του Princeton (Εργαστήριο PEAR) έδειξαν πως η ακουστική δύναμη των υποήχων, συνδυασμένη με υψηλή πίεση, κάνει το νερό που βρίσκεται συγκεντρωμένο σε μία κοιλότητα να βράζει σε διάστημα ενός νανοδευτερολέπτου.

Καθώς το νερό θερμαίνεται, διαστέλλεται, και, στην περίπτωση των φυτών και των γεμάτων νερό βλαστών τους, μία πιο κοντινή ματιά αποκαλύπτει μικροσκοπικές τρυπίτσες στους κόμπους τους (στις «αρθρώσεις» των φυτών), οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το υπερθερμασμένο νερό τινάχτηκε προς τα έξω. Οι βάσεις των βλαστών γίνονται μαλακές λόγω της θερμοκρασίας, κάνοντάς τα βαρύτερα στην κορυφή και έτοιμα να καταρρεύσουν στη νέα οριζόντια θέση τους.

Καθώς η δράση αυτή (η δημιουργία κοιλότητας λόγω εξάτμισης) δημιουργεί αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας κατά εκατοντάδες χιλιάδες βαθμούς για κλάσμα του δευτερολέπτου, δεν φαίνεται πλέον τόσο παράξενο πώς εκατομμύρια γαλόνια νερού, που κανονικά κατακρατούνται από το έδαφος, μπορούν να εξαφανιστούν στο εσωτερικό και στην περίμετρο ενός αγρογραφήματος, ή γιατί τα φυτά αποκτούν μία ελαφρά καμένη όψη. Πόσο μάλλον εάν συνδυαστούν τα παραπάνω με την ανακάλυψη μικροσκοπικών οπών στα τοιχώματα των κυττάρων των φυτών (οι οποίες δείχνουν τον γρήγορο βρασμό του νερού στο εσωτερικό του φυτού) από τον Levengood.

Οι υπόηχοι έχουν επίσης την ικανότητα να μετατρέπουν σε ατμό τα μόρια του νερού, δημιουργώντας μία ψιλή καταχνιά, δικαιολογώντας τις μαρτυρίες αγροτών στην Αγγλία και στον Καναδά, οι οποίες αναφέρουν στήλες καταχνιάς που υψώνονται από το εσωτερικό πρόσφατων σχηματισμών αγρογραφημάτων.

Τέλος, όσο πιο χαμηλή είναι η υποηχητική συχνότητα που επενεργεί, τόσο εντονότερο το αποτέλεσμα. Τα 18 Hz είναι το κατώτατο όριο ασφαλείας, πέρα από το οποίο η πίεση, που δημιουργείται από τους υποήχους, προκαλεί διάσπαση στα χρωμοσώματα. Κάθε καλοκαίρι, στο βόρειο ημισφαίριο, φυτά κάθε ποικιλίας προερχόμενα από αγρογραφήματα αποστέλλονται στον dr. Levengood για εξέταση (blind testing) και πολλά απ' τα δείγματα παρουσιάζουν σαφή διάσπαση των χρωμοσωμάτων τους. Αντίθετα, η εξέταση φυτών που έχουν υποστεί τροποποιήσεις από ανθρώπινο παράγοντα παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη διαφορά: τα αποτελέσματα δείχνουν απόλυτα φυσιολογικά φυτά!

# 2. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

## 2.1 Εισαγωγή

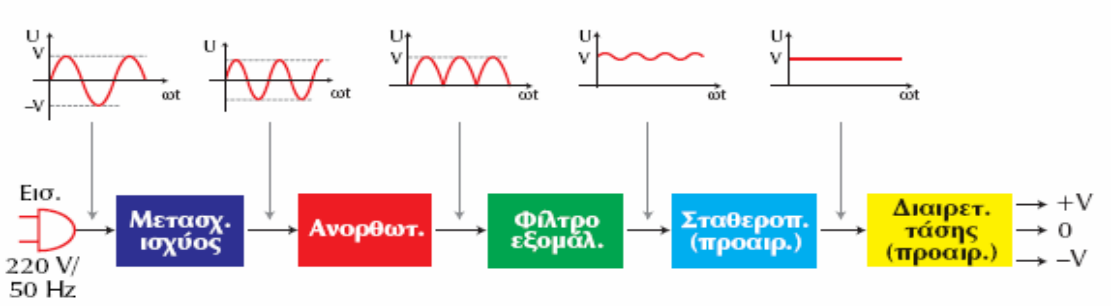
Όλες σχεδόν οι σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές εργάζονται τροφοδοτούμενες με συνεχή τάση (dc). Η τροφοδοσία αυτή επιτυγχάνεται παίρνοντας την εναλλασσόμενη (ac) τάση του δικτύου 220 V/50 Hz και συνήθως υποβιβάζοντάς την τη μετατρέπουμε σε dc. Οι διατάξεις που επιτελούν αυτή τη λειτουργία ονομάζονται τροφοδοτικές διατάξεις ή απλώς τροφοδοτικά**.**

Ορισμένοι μετατροπείς, όπως οι φωτοπολλαπλασιαστές και οι ανιχνευτές ιονισμού, χρειάζονται dc τάσεις τροφοδοσίας από εκατοντάδες έως χιλίαδες βολτ (kV), αλλά πολύ μικρά ρεύματα, συνήθως μικρότερα του mA (μιλλιαμπέρ). Αλλες διατάξεις, όπως π.χ. τα τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC), εργάζονται συνήθως με τάσεις τροφοδοσίας από 3 έως 30 V και ρεύματα από μερικά mA έως αρκετά A (αμπέρ). Η σταθερότητα της τάσης τροφοδοσίας, που τροφοδοτεί την ηλεκτρονική συσκευή, παίζει συχνά σημαντικό ρόλο, γιατί καθορίζει και τη σταθερότητα λειτουργίας της συσκευής.

Σήμερα υπάρχουν διάφοροι τύποι τροφοδοτικών**.** Ορισμένοι από αυτούς βασίζονται στο κλασσικό σχήμα ανόρθωσης συνδυασμένης με φίλτρα εξομάλυνσης. Ανάπτυξη αυτού του σχήματος γίνεται με τη χρήση ειδικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τροφοδοσίας. Επίσης, σε διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα παλμοτροφοδοτικά. Τέλος, όταν οι απαιτούμενες ισχείς δεν είναι μεγάλες, χρησιμοποιούνται τόσο μετατροπείς DC/DC όσο και μετατροπείς AC/DC. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι για την επίτευξη σταθερής τάσης εξόδου dc, είναι σήμερα σε χρήση διάφοροι σταθεροποιητές.

## 2.2 Βασικές βαθμίδες ενός τροφοδοτικού

Το Σχ.1 δείχνει το δομικό διάγραμμα ενός συνήθους τροφοδοτικού και τις διάφορες βαθμίδες που χρειάζονται για τη μετατροπή της ac τάσης σε dc. Το σχήμα δείχνει και τις διάφορες κυματομορφές κάθε βαθμίδας.




Σχήμα 1.Δομικό διάγραμμα τροφοδοτικού μετατροπής ac τάσης σε dc

Η πρώτη βαθμίδα είναι ένας μετασχηματιστής ισχύος που μετατρέπει το πλάτος της διαθέσιμης τάσης εισόδου ac, π.χ. τα 220 V του δικτύου, στην επιθυμητή ac τάση (με υποβιβασμό ή ανύψωση). Η δεύτερη βαθμίδα είναι ένας ανορθωτής ο οποίος μετατρέπει το ac σήμα της ήδη τροποποιημένης τάσης εισόδου σε συρμό ανορθοομένοον παλμών τάσης ή παλμοτάση dc. Στη συνέχεια η dc παλμοτάση μετατρέπεται πλήρως σε dc από ένα φίλτρο εξομάλυνσης**.** Η επόμενη βαθμίδα είναι ο σταθεροποιητής τάσης, ο οποίος βελτιώνει τη dc τάση εξόδου, δηλαδή υποβιβάζει την κυμάτωση. Τέλος, αρκετές ηλεκτρονικές διατάξεις τροφοδοσίας έχουν και ένα διαιρέτη τάσης που δίνει διάφορες στάθμες dc τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα διάφορα τμήματα τον τροφοδοτούμενων συσκευών.

## 2.3 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά μιας Τάσης Τροφοδοσίας

Για να είναι ιδανική η dc τάση που παράγεται από ένα τροφοδοτικό πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

**1.**Σταθερή dc στάθμη ανεξάρτητη από τις απαιτούμενες μεταβολές του ρεύματος του φόρτου, δηλ. καλή ρύθμιση και χαμηλή αντίσταση εξόδου.

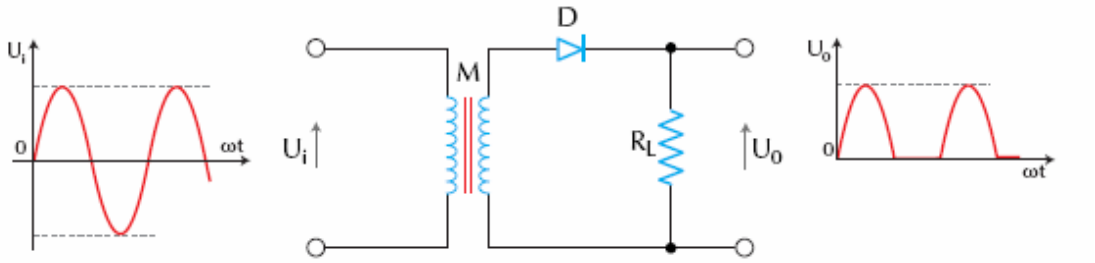
**2.**Σταθερή χρονικά τιμή ανεξάρτητη από τυχόν μεταβολές της θερμοκρασίας, της τάσης ac του δικτύου, της ηλικίας τον στοιχείοον του, κτλ. (καλή σταθερότητα).

**3.**Να μην ενέχει τάση θορύβου ή άλλη ac συνιστώσα στη συχνότητα κυμάτοοσης (γενικά, μικρή κυμάτωση).

Εξάλλου, ο όγκος του τροφοδοτικού πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερος και η απόδοσή του του όσο το δυνατό μεγαλύτερη.

## 2.4 Ημιανόρθωση

Η απλούστερη δυνατή διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή dc τάσης από ac είσοδο είναι η ημιανόρθωση**.** Το τυπικό βασικό κύκλωμα της ημιανόρθωσης εικονίζεται στο Σχ.2.




**Σχήμα 2.** Κύκλωμα ημιανόρθωσης

Η ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος αυτού έχει ως εξής: Το δευτερεύον του μετασχηματιστή Μ δίνει εναλλασσόμενη τάση, 50 Hz κατάλληλης τιμής πλάτους ώστε τελικά να παράγεται η επιθυμητή dc τάση. Κατά τη θετική ημιπερίοδο, η τάση του δευτερεύοντος κάνει την άνοδο της διόδου D πιο θετική από την κάθοδο κι έτσι η δίοδος άγει. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, η τάση του δευτερεύοντος είναι τέτοια ώστε η άνοδος της διόδου να είναι αρνητική ως προς την κάθοδο και η δίοδος δεν άγει (θεωρούμε αμελητέο το ανάστροφο ρεύμα). Αρα, το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσω της διόδου και της αντίστασης φόρτου $R_L$ κυκλοφορεί κατά τη μία μόνο φορά και συνεπώς είναι dc ρεύμα (με τη γενική έννοια του όρου), μολονότι δεν είναι σταθερά συνεχές αλλά παλμόρευμα. Το παλμόρευμα αυτό αναπτύσσει στα άκρα της $R_L$ μια dc παλμοτάση (ημιανορθωμένη), όπως δείχνει το Σχ.2. Επειδή σε κάθε αρνητική ημιπερίοδο, που διαρκεί επί χρόνο 10 ms (T=1/f=1/50=20 ms), δεν κυκλοφορεί ρεύμα, η ισχύς που αναπτύσσεται στο φόρτο είναι αρκετά μικρή.

Η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς της ανορθώτριας διόδου, $r_f$, δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το στιγμιαίο ρεύμα της διόδου $I_D$, κατά τη σχέση $r_f = 25/I_D$ (το $r_f$ σε Ω αν το $I_D$ σε mA). Έτσι, μπορούμε να υπολογίζουμε τη στιγμιαία ισχύ απωλειών του ημιανορθωτή από τον τύπο

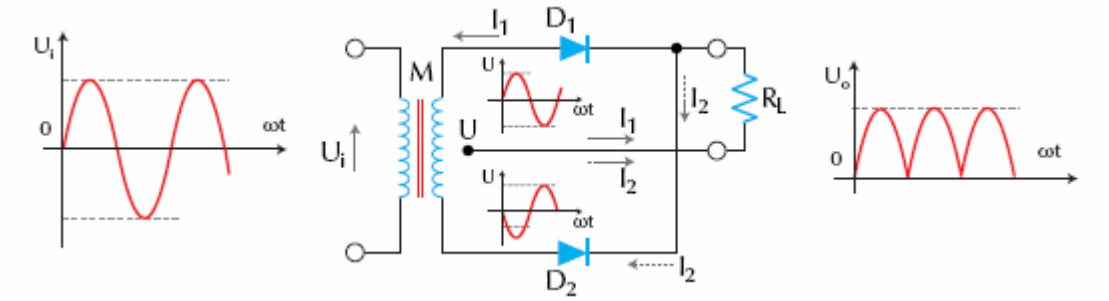
$$P_{\alpha,D} = I_D^2 r_f \cong 25 I_D \qquad (2.4.1)$$

Τα κύρια πλεονεκτήματα του ημιανορθωτή είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής του και τα μειονεκτήματα του το μεγάλο μέγεθος μετασχηματιστή, οι αυστηρές απαιτήσεις φιλτραρίσματος, το

χαμηλό ρεύμα εξόδου και η πενιχρή δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδυο.

## 2.5 Πλήρης ανόρθωση

Το κύκλωμα του Σχ.3 δείχνει τον πλήρη ανορθωτή. Είναι συνήθως το κύκλωμα που χρησιμοποιείται πιο πολύ από τα κυκλώματα των ανορθωτών. Ο μετασχηματιστής Μ έχει μεσαία λήψη και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου επιτρέπει να αναπτύσσεται (ανορθωμένη) τάση στο φόρτο και κατά τις δύο ημιπεριόδους του σήματος εισόδου. Λόγω της μεσαίας λήψης οι είσοδοι στις δύο διόδους έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180°.




**Σχήμα 3.**Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης

Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, η δίοδος $D_1$ άγει κι έτσι από το φόρτο διέρχεται το δικό της ρεύμα $I_1$. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγει η δίοδος $D_2$ και από το φόρτο περνάει το ρεύμα $I_2$. Το ολικό ρεύμα του φόρτου $I_L$ είναι το άθροισμα $I_1 + I_2$ των δύο ρευμάτων.

Η dc τάση εξόδου του πλήρους ανορθωτή είναι ίση με το πλάτος της τάσης που αναπτύσσεται σε κάθε μισό του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Για να επιτύχουμε τάση κορυφής της εξόδου ίση με $V_{0p}$, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μετασχηματιστή με μεσαία λήψη που έχει τάση εξόδου (rms τιμή)

$$V_M = \frac{2V_{op}}{\sqrt{2}} + 1\,\text{Volt} \qquad (2.5.1)$$

Το επιπλέον 1 V προστίθεται για να ληφθεί υπόψη η πτώση τάσης των ανορθωτριών διόδων.

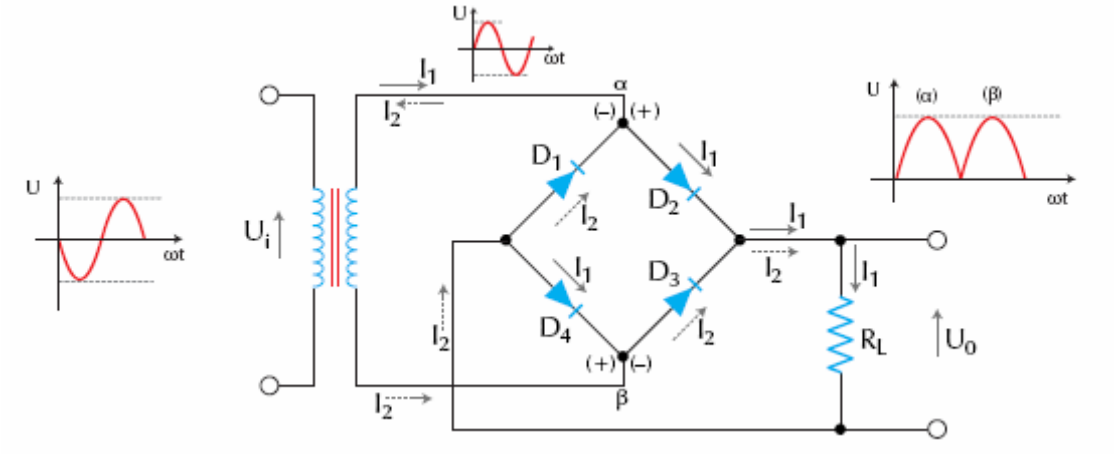
Με το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης αναπτύσσεται καλύτερη (πυκνότερη) μορφή παλμών dc τάσης, η οποία χρειάζεται πιο εύκολο φιλτράρισμα για να γίνει κανονική dc τάση, αλλά το κύκλωμα έχει μεγαλύτερο κόστος**.** Πράγματι, η συχνότητα κυμάτωσης, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, είναι διπλάσιας συχνότητας από ό,τι στην ημιανόρθωση κι

έτσι το φιλτράρισμα είναι πιο εύκολο. Σημειώνουμε επίσης, ότι ο μετασχηματιστής έχει μικρότερο μέγεθος από εκείνον της ημιανόρθωσης.

## 2.6 Ανόρθωση με γέφυρα

Ο ανορθωτής με γέφυρα μοιάζει σε αρκετά σημεία με τον πλήρη ανορθωτή που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Ως προς τη συχνότητα κυμάτωσης και την απόδοση, τα δυο κυκλώματα είναι όμοια και διαφέρουν ως προς τον αριθμό των διόδων και το επίπεδο της τάσης εξόδου.

Το Σχ. 4 δείχνει έναν τυπικό ανορθωτή με γέφυρα. Η γέφυρα είναι συνδεδεμένη στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και η τάση που φτάνει στο φόρτο οφείλεται σε όλη την τάση του δευτερεύοντος, εφόσον δεν υπάρχει μεσαία λήψη.




**Σχήμα 4.** Κύκλωμα ανόρθωσης με γέφυρα

Η λειτουργία του ανορθωτή αυτού έχει ως εξής:

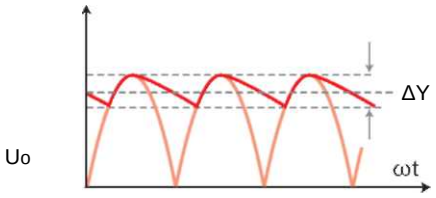
Όταν η τάση στο σημείο α είναι θετική, δηλ. κατά το πρώτο μισό (1η ημιπερίοδος) του σήματος εισόδου, άγουν οι δίοδοι $D_2$ και $D_4$, αφου οι άνοδοί τους είναι θετικές, και το ρευμα $I_1$ ακολουθεί το δρόμο που δείχνει το σχήμα, δηλ. μέσω της διόδου $D_2$, του φόρτου $R_L$, της διόδου $D_4$ του σημείου β και τέλος του σημείου α. Η τάση εξόδου έχει τότε τη μορφή της κυματομορφής που δείχνει το σχήμα.

Κατά το δεύτερο μισό (2η ημιπερίοδος) του σήματος εισόδου, όπως αυτό αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, το σημείο α γίνεται αρνητικό και άγουν οι δίοδοι $D_1$ και $D_3$, αφου οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρευμα $I_2$ ακολουθεί το δρόμο από το σημείο β μέσω της διόδου $D_3$, του φόρτου $R_L$, της διόδου $D_1$, του σημείου α και, τέλος, του σημείου β. Τα ρευματα $I_1$ και $I_2$ έχουν την ίδια φορά καθώς διέρχονται από το φόρτο $R_L$. Η τάση εξόδου έχει τη μορφή που αντιστοιχεί στον παλμό "β" της κυματομορφής που δείχνει το σχήμα.

Το κύριο πλεονέκτημα της ανόρθωσης με γέφυρα είναι ότι χρησιμοποιεί ολόκληρη την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή**,** ενώ ταυτόχρονα έχουμε πλήρη ανόρθωση**.** Το μειονέκτημά της είναι ότι χρησιμοποιούμε τέσσερις αντί δυο διόδους**,** άρα αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα.

## 2.7 Εξομάλυνση και φίλτρα

Η διαδικασία με την οποία απαλείφουμε μερικώς ή ολικώς την παραπάνω ac συνιστώσα από την ανορθωμένη κυματομορφή και συνεπώς ομαλοποιούμε ή εξομαλύνουμε την κυματομορφή ώστε να πλησιάζει όσο




**Σχήμα 9.** Τυπική ανορθωμένη κυματομορφή (α), μερικά εξομαλυμένη (β), και πλήρως εξομαλυμένη (γ)

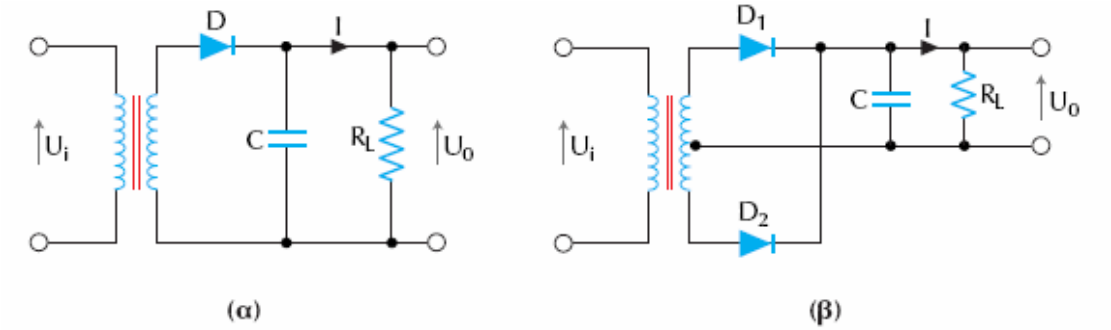
γίνεται περισσότερο προς μια σταθερή dc έξοδο, ονομάζεται εξομάλυνση. Στο Σχ.9 απεικονίζεται μια πλήρως ανορθωμένη κυματομορφή τάσης μαζί με μια αντίστοιχη μερικώς εξομαλυμένη (παχιά γραμμή) και μια τελείως εξομαλυμένη dc τάση (διακεκομένη γραμμή)

Στη γενική περίπτωση η εξομάλυνση δε θα είναι πλήρης, με αποτέλεσμα η τελική τάση $v_0$ να εμφανίζει περιοδική διακύμανση, όπως δείχνει το σχήμα. Το εύρος Vac=ΔV αυτής της διακύμανσης ονομάζεται κυμάτωση και αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τροφοδοτικής διάταξης. Συχνά η κυμάτωση εκφράζεται και σε ποσοστιαία μορφή, δηλ. από το συντελεστή:

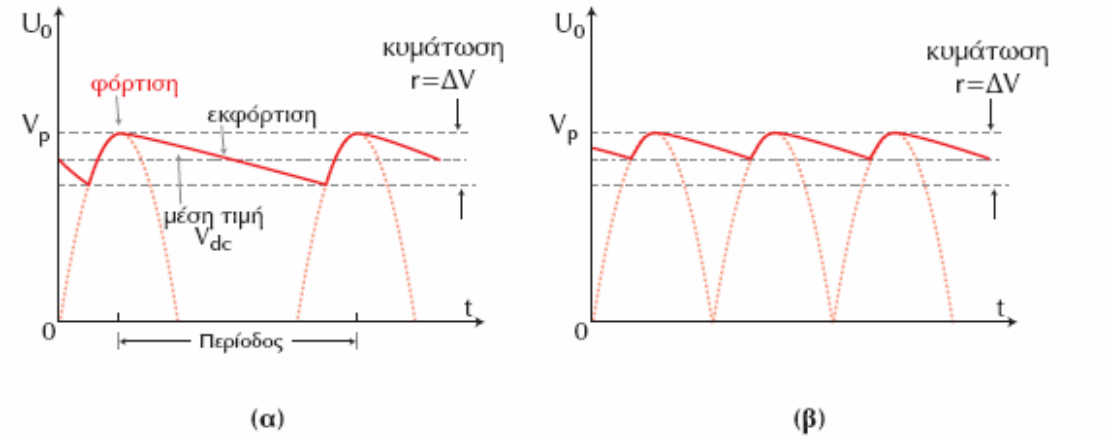
$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \qquad (2.7.1)$$

### 2.7.1 Εξομάλυνση με Πυκνωτή

Για να εξομαλύνουμε τις ανορθωμένες κυματομορφές και να τις μετατρέψουμε σε σταθερή dc τάση εξόδου, χρησιμοποιούμε ένα πυκνωτή C μεγάλης χωρητικότητας, συνδεδεμένο παράλληλα προς το φόρτο μετά τον ανορθωτή. Η τιμή του πυκνωτή αυτού, για τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz), κυμαίνεται από 100 έως 30000 μΓ και εξαρτάται από το ρεύμα φόρτου και από το βαθμό εξομάλυνσης που επιθυμούμε. Το Σχ.10 δείχνει τα κυκλώματα της απλής και της διπλής ανόρθωσης εφοδιασμένα με τον πυκνωτή εξομάλυνσης, το δε Σχ.11 εικονίζει τις κυματομορφές εξόδου των κυκλωμάτων αυτών. Οι εξομαλυμένες κυματομορφές είναι αυτές που αντιστοιχούν στις τάσεις φόρτισης και εκφόρτισης του σχήματος. Η τάση εξόδου με εξομάλυνση είναι η συνεχής γραμμή, ενώ η ανορθωμένη έξοδος είναι η διακεκομένη γραμμή η μέση dc τιμή αποδίδεται από την διακεκομμένη (κομματιασμένη) γραμμή.




**Σχήμα 10.** Κυκλώματα απλής (α) και διπλής ανόρθωσης (β) με φίλτρο πυκνωτή εξομάλυνσης




**Σχήμα11.** Κυματομορφές εξόδου ανορθωτών με φίλτρο πυκνωτή. Περιπτώσεις ημιανόρθωσης (α), πλήρους ανόρθωσης (β)

Η λειτουργία της εξομάλυνσης πραγματοποιείται με τον εξής τρόπο: Κατά το τελευταίο μέρος του πρώτου μισού κάθε παλμου ανορθωμένης τάσης εξόδου ο πυκνωτής φορτίζεται και η τάση του αυξάνεται μέχρι την τάση κορυφής $V_p$. Κατά το υπόλοιπο μέρος του κυκλου της ανορθωμένης εξόδου, ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του φόρτου $R_L$. Συνεπώς, τον περισσότερο χρόνο κάθε κυκλου απλώς παρέχει το φορτίο κορυφήςστον πυκνωτή κάθε φορά που κλείνει ο κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης. Αν το ρεύμα διαμέσου του φόρτου ήταν μηδέν, ο πυκνωτής θα διατηρείτο σταθερά φορτισμένος στην τάση κορυφής V του σήματος εισόδου.

Η ύπαρξη του ρεύματος φόρτου έχει σαν αποτέλεσμα να εκφορτίζεται -έστω και ελάχιστα- ο πυκνωτής κατά r = ΔV για κάθε κύκλο του σήματος εισόδου. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας περιοδικά ανώμαλης dc κυματομορφής της τάσης εξόδου που εμφανίζεται προσεγγιστικά σαν τριγωνική κυματομορφή.

Αποδεικνύεται, ότι για την περίπτωση της απλής ανόρθωσης, Σχ. 10, η κυμάτωση r δίνεται από τις σχέσεις:

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{I \cdot T}{C} = \frac{I}{C \cdot f} \tag{2.7.2}$$

όπου,$V_{ac}$ και $V_{dc}$ η ac και dc συνιστώσα αντίστοιχα της τάσης εξόδου, ενώ το I παριστάνει τη μέση dc τιμή του ρεύματος φόρτου ίση με:

$$I \cong \frac{V_{dc}}{R_L} \tag{2.7.3}$$

το T είναι η περίοδος και f η συχνότητα της ac τάσης εισόδου. Η μέση dc τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{dc} \cong V_p - \frac{I}{2Cf} \tag{2.7.4}$$

Για τον απλό ανορθωτή η κυμάτωση δίνεται από τις σχέσεις:

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{1}{2\sqrt{3}R_L Cf} \tag{2.7.5}$$

Για την πλήρη ανόρθωση η περίοδος της τριγωνικής εξόδου της κυμάτωσης είναι T=1/2f. Επομένως, η κυμάτωση στην πλήρη ανόρθωση δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}RCf} \tag{2.7.6}$$

και η τάση εξόδο του από τη σχέση:

$$V_{dc} \cong V_p - \frac{I}{4Cf} \tag{2.7.7}$$

Όπως φαίνεται στο Σχ.11, η κυμάτωση στη διπλή ανόρθωση είναι διπλάσιας συχνότητας ως προς την απλή ανόρθωση. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που προτιμάμε τη διπλή ανόρθωση.

## 2.8 Σταθεροποίηση τάσης

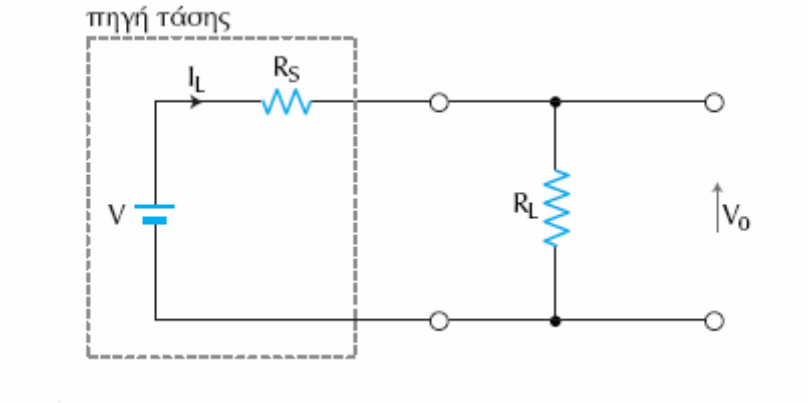
Όπως είδαμε, το φίλτρο εξομάλυνσης δίνει βελτιωμένη dc τάση εξόδου, αλλά κατά κανόνα οι μεταβολές του φόρτου έχουν σημαντική επίδραση σε αυτή την τάση εξόδου. Για να βελτιώσουμε ακόμα παραπέρα τη συμπεριφορά ενός τροφοδοτικού και να καταστήσουμε την τάση εξόδου του όσο το δυνατό πιο ανεπηρέαστη από τυχόν μεταβολές του φόρτου, χρησιμοποιούμε ειδικό κύκλωμα που λέγεται κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης. Πατρακάτω, θα δούμε το πιο απλό κύκλωμα σταθεροποίησης, που είναι ο σταθεροποιητής με δίοδο Zener και στη συνέχεια πιο σύνθετα κυκλώματα. Προηγουμένως όμως, θα εξετάσουμε τις γενικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία της σταθεροποίησης.

### 2.8.1 Αρχές Λειτουργίας της Σταθεροποίησης

Οποιαδήποτε πηγή τροφοδοσίας μπορεί να παρασταθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, Σχ.8.14, με φόρτο $R_L$ συνδεδεμένο στην έξοδο του. Η τάση $V_o$ στα άκρα του φόρτου είναι:

$$V_o = V - I_L R_s \tag{2.8.1}$$

όπου V είναι η τάση εξόδου του φίλτρου εξομάλυνσης και $R_s$ είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας.

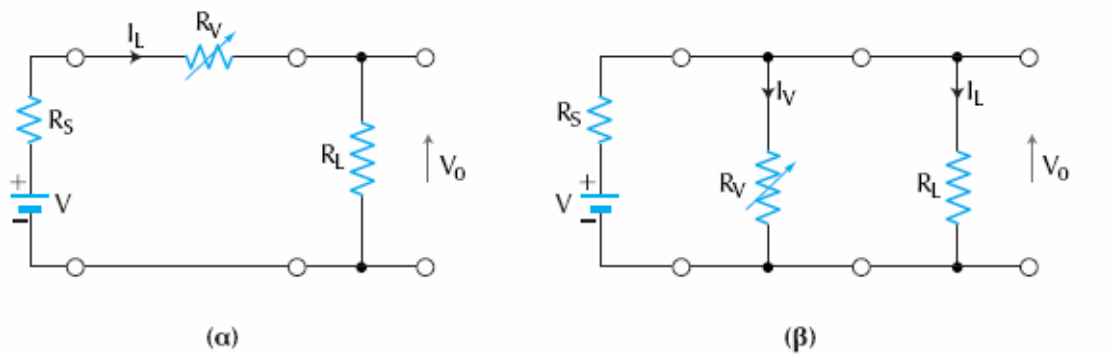



**Σχήμα14.** Πηγή τροφοδοσίας με ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin

Αν για οποιαδήποτε αιτία (π.χ. αλλαγή της τάσης του δικτύου) αλλάξει η τάση εξόδου V του φίλτρου εξομάλυνσης, θα μεταβληθεί το ρευμα $I_L$ και επομένως, σύμφωνα με την Εξ.(2.8.1) θα αλλάξει η τάση εξόδου $V_o$. Αλλά και αν μεταβληθεί ο φόρτος $R_L$, θα μεταβληθεί πάλι το ρευμα $I_L$, άρα

και η $V_o$, και η επίδραση στην τάση $V_o$ εξαρτάται από τη σχετική τιμή των $R_L$ και $R_S$. Συνεπώς, για να διατηρούμε σταθερή την τάση $V_o$ στα άκρα του φόρτου είναι απαραίτητο να αντισταθμίζουμε τις παραπάνω μεταβολές της τάσης ή του ρεύματος ή και των δύο ταυτόχρονα.

Ένας τρόπος για να σταθεροποιήσουμε σύμφωνα με τα πιο πάνω-την τάση $V_o$ είναι να εισάγουμε μια μεταβλητή αντίσταση $R_V$ σε σειρά με το φόρτο $R_L$, όπως δείχνει το Σχ.15. Τότε η τάση εξόδου θα είναι:




**Σχήμα 15.** Αρχή λειτουργίας της σταθεροποίησης τάσης: σειράς (α), παράλληλη (β)

$$V_o = V - I_L (R_s + R_v) \tag{2.8.2}$$

Η αντίσταση $R_V$ πρέπει να μεταβάλλεται αυτόματα, ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές της V και του $I_L$. Υπάρχουν διάφορα κυκλώματα σταθεροποίησης που μπορούν να μεταβάλλουν αυτόματα την ενεργό αντί-

σταση $R_v$ του στοιχείου σειράς, έτσι ώστε να ρυθμίζουν σταθεροποιητικά την τάση εξόδου συγκρίνοντάς την με μια σταθερή τάση αναφοράς.

Όταν το ενεργό στοιχείο είναι σε σειρά με το φόρτο η σταθεροποίηση λέγεται σταθεροποίηση σειράς, Σχ.15α, και ελέγχεται από την Εξ.(2.8.2). Το κόστος της σταθεροποίησης σειράς είναι πολύ χαμηλό και γι' αυτό χρησιμοποιείται αρκετά συχνά.

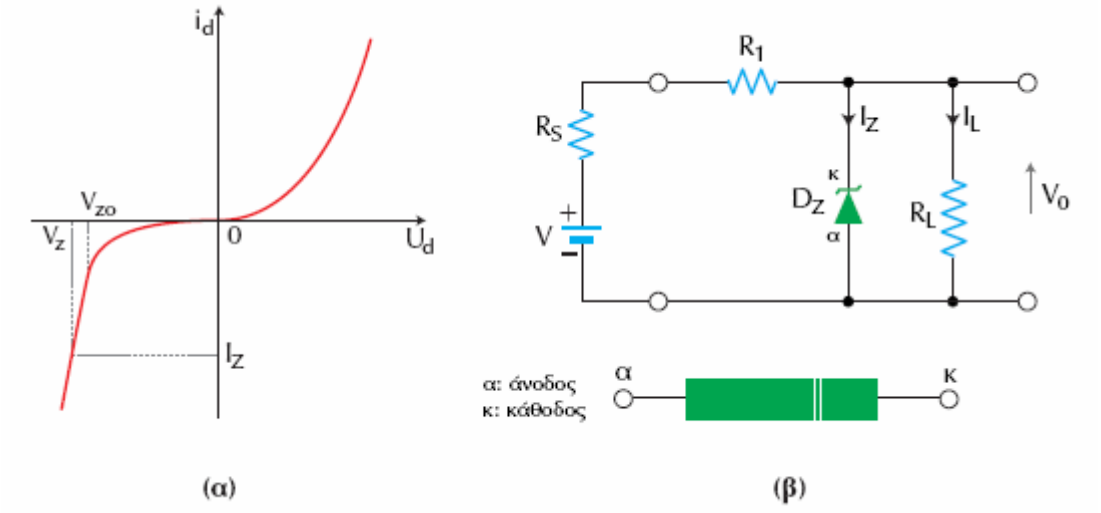
Ένας άλλος τρόπος σταθεροποίησης είναι η παράλληλη σταθεροποίηση**,** Σχ.15 β. Αποδεικνύεται ότι, σ' αυτή την περίπτωση η τάση εξόδου $V_o$ του κυκλώματος είναι:

$$V_o = V - I_L\left(1 + \frac{R_v}{R_L}\right) \qquad (2.8.3)$$

## 2.8.2 Απλή Σταθεροποίηση με Δίοδο Zener

Στα Ηλεκτρονικά του προηγούμενου έτους είδαμε την ιδιότητα της ανάστροφης θλάσης της χαρακτηριστικής μιας διόδου Zener. Οι δίοδοι Zener ή χιονοστιβάδας πρέπει να έχουν υψηλή στάθμη πρόσμιξης αν θέλουμε να έχουμε χαμηλές τάσεις θλάσης ή κατάρρευσης.

Το Σχ.16α δείχνει τη χαρακτηριστική της διόδου Zener, και το Σχ. 16β δείχνει έναν παράλληλο σταθεροποιητή χαμηλής ισχυος που χρησιμοποιεί μια Zener για ενεργό αντίσταση $R_V$.




**Σχήμα 16.** Χαρακτηριστική v-i της Zener (α) και κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης με Zener (β)

Εφόσον η τάση Zener $r_z = V_z / I_z$ παραμένει σχεδόν σταθερή, για μεγάλη περιοχή ρεύματος, η ισοδύναμη ενεργός αντίσταση $R_v=Vo/I_z$ θα μεταβάλλεται ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές της τάσης εξόδου του φίλτρου εξομάλυνσης, V, ή του ρεύματος φόρτου $I_L$.
Το παρόν κύκλωμα με δίοδο Zener δεν είναι τέλειος σταθεροποιητής, όπως δείχνει το Σχ.16α, αφου η τάση της, $V_Z$, αυξάνει ελαφρά όταν αυξάνει το ρευμα της $I_z$ (η χαρακτηριστική δεν είναι τελείως κατακόρυφη). Με βάση το νόμο του Ohm, το ολικό ρευμα I, δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{V - V_0}{R} \cong \frac{V - V_z}{R} \qquad (2.8.4)$$

όπου, $R = R_s + R_L$. Συνεπώς, για δεδομένη τάση εισόδου V, το ρεύμα I, θα είναι σταθερό. Σύμφωνα όμως με το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff το ρεύμα αυτό θα είναι:

$$I = I_z + I_L \qquad (2.8.5)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται, ότι αν αυξηθεί το ρεύμα φόρτου $I_L$ το ρεύμα της Zener $I_Z$ ελαττώνεται. Θα πρέπει λοιπόν, με το μέγιστο ρεύμα φόρτου να περνάει ένα ρεύμα από τη Zener τέτοιο ώστε αυτή να εργάζεται αριστερά από το «γόνατο» $V_{ZO}$ της χαρακτηριστικής.
Εξάλλου, όταν δεν υπάρχει φόρτος στα άκρα εξόδου του σταθεροποιητή, όλο το ρεύμα του σταθεροποιητή θα περνά μέσα από τη Zener. Κατά συνέπεια, η αντίστοιχη ισχύς απωλειών της Zener (που είναι τότε μέγιστη) θα είναι:

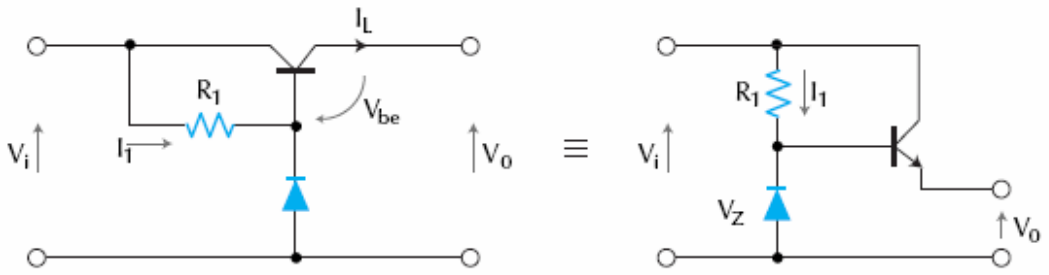
$$P_{z,\max} \cong V_z I_z = V_z I \qquad (2.8.6)$$

(Θεωρούμε αμελητέα τη δυναμική αντίσταση της Zener, $r_z=\Delta V_z/\Delta I_z$).

Η εκλογή της Zener, εκτός από την κατάλληλη τιμή της τάσης $V_z=V_0$ πρέπει να βασίζεται και στην παραπάνω μέγιστη ισχύ απωλειών. Οι συνήθεις ισχείς απωλειών των μικρών Zener είναι της τάξης των 400 mW, αλλά υπάρχουν και Zener μεγάλης ισχύος που φτάνουν μέχρι τα 10 W. Όπως όμως θα δούμε στη συνέχεια, αποφεύγουμε συνήθως τις Zener μεγάλης ισχύος για σταθεροποίηση.

### 2.8.3 Σταθεροποίηση με Μεγάλο Ρευμα Φόρτου

Τις περισσότερες φορές στην πράξη, το ρεύμα φόρτου χρειάζεται να είναι μεγάλο. Θα πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε Zener μεγάλης ισχύος. Αντί όμως, να υιοθετήσουμε αυτή τη λύση, που το κόστος της είναι μεγάλο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια Zener μικρής ισχύος κι ένα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης (CC), Σχ.17, γεγονός που θα δώσει ρεύμα εξόδου αυξημένο κατά το συντελεστή $h_{FE}$.




**Σχήμα 17.** Σταθεροποίηση με Zener και με τρανζίστορ (CC)

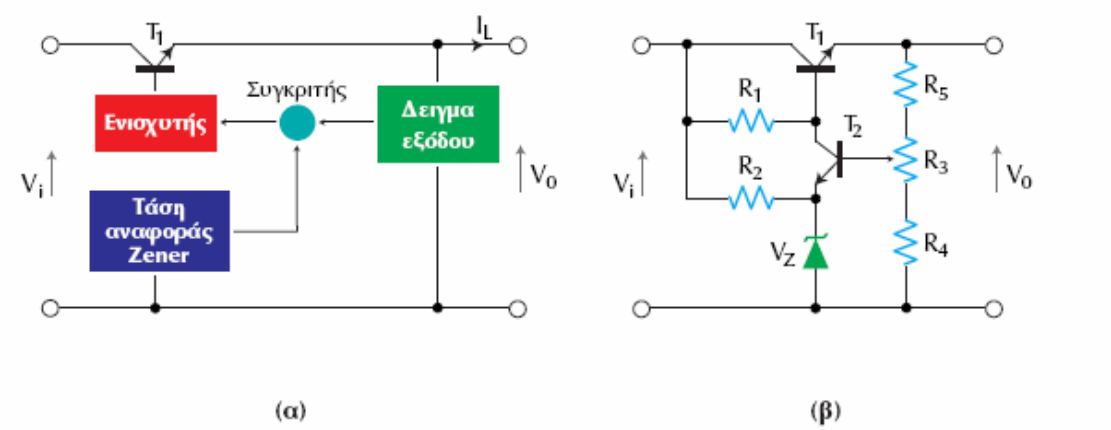
Το τρανζίστορ εκλέγεται, ώστε η λειτουργία του να βρίσκεται μέσα στα όρια των απωλειών ισχυος του. Η δίοδος Zener επιλέγεται για την επιθυμητή τάση εξόδου $V_o$, με βάση τη σχέση:

$$V_0 = V_z - V_{be} \quad (\mu\varepsilon\ V_{be} \cong 0.7\ V) \tag{2.8.7}$$

### 2.8.4 Βελτίωση της Σταθεροποίησης με Ανασύζευξη

Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου ενός τροφοδοτικού μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο εάν στο προηγούμενο κύκλωμα χρησιμοποιήσουμε έναν ενισχυτή, που θα συγκρίνει την τάση αναφοράς που δίνει μια Zener με ένα κλάσμα (δείγμα) της τάσης εξόδου.

Το δείγμα αυτό ανατροφοδοτείται προς την είσοδο του ενισχυτή, αφου υποστεί σύγκριση προς την τάση της Zener, Σχ.18α. Στο πρακτικό κύκλωμα, Σχ.18β, το κύκλωμα λήψης του δείγματος είναι ένας διαιρέτης τάσης, ενώ η τάση αναφοράς είναι απ' ευθείας η τάση Zener. Το τρανζίστορ $T_2$ είναι το στοιχείο ενίσχυσης, ενώ το τρανζίστορ $T_1$ είναι συνδεσμολογημένο ως ακόλουθος τάσης (CC).

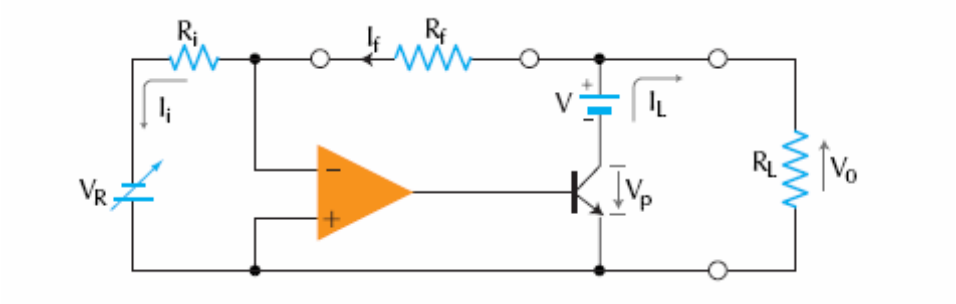



**Σχήμα 18.** Κύκλωμα σταθεροποίησης με ανασυζευξη:Αρχή λειτουργίας (α), πρακτική μορφή (β)

Επειδή το ρευμα της Zener είναι σχεδόν αναξάρτητο από το ρευμα του φόρτου, η σταθεροποίηση του κυκλώματος αυτου είναι πολυ καλή.

## 2.9. Σταθεροποίηση τάσης με ΤΕ

Τα συγχρονα τροφοδοτικά χρησιμοποιουν τελεστικους ενισχυτές (ΤΕ) ώστε να επιτυγχάνουν σταθεροποίηση με τη βοήθεια ανασυζευξης. Η σταθεροποίησης με τον τρόπο αυτόν είναι πολυ διαδεδομένη, επειδή δίνει σταθεροποιημένη τάση μεγάλης ακρίβειας. Το κύκλωμα του Σχ.19 δείχνει το τυπικό κύκλωμα της σταθεροποίησης τάσης με ΤΕ. Η ανασύζευξη γίνεται μέσω της $R_f$
Επειδή ο ΤΕ δε δίνει υψηλά ρεύματα εξόδου, συμπληρώνουμε το κύκλωμα με ένα τρανζίστορ ισχυος pnp, όπως δείχνει το σχήμα. Το τρανζίστορ ισχυος αυτό έχει τη δυνατότητα να δώσει το επιθυμητό ρευμα φόρτου $I_L$ συνδεδεμένο με την τάση V που θέλουμε να σταθεροποιήσουμε.




Σχήμα 19. Σταθεροποίηση τάσης με ΤΕ

Το τρανζίστορ αυτό συμπεριφέρεται σα μια μεγάλη αντίσταση $R_v$ όμοια με εκείνη του Σχ.15 β.

Αποδεικνύεται, με βάση την ανάλυση των ΤΕ, ότι η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_0 = -\left(\frac{R_f}{R_i}\right) V_R \qquad (2.9.1)$$

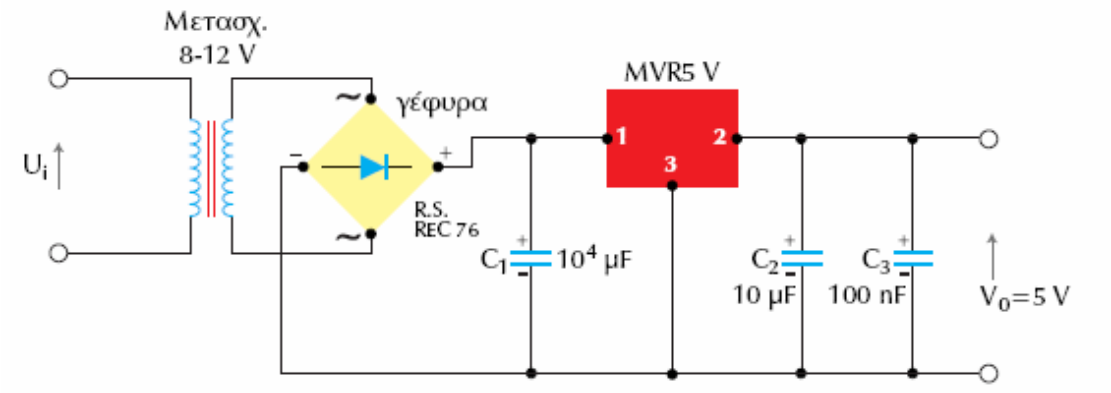
Συνεπώς, η στάθμη σταθεροποιημένης τάσης εξόδου $V_0$ μπορεί να ρυθμίζεται κατά βουληση μέσω της $R_f$ ή της $R_i$

## 2.10. Σταθεροποίηση με ολοκληρωμένο κύκλωμα

Γενικά, τα δυο βασικά μέρη ενός εξελιγμένου σταθεροποιητή είναι το στοιχείο που δίνει την τάση αναφοράς και ο ελεγχόμενος ενισχυτής τάσης. Τα μέρη αυτά μπορουν ευκολα να συνδυαστουν μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κυκλωμα με αποτέλεσμα να έχουμε πάρα πολύ καλή σταθεροποίηση και μικρό όγκο.

Στο εμπόριο υπάρχουν σταθεροποιητές τάσης με ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) για πολλές εφαρμογές και δίνουν σταθεροποίηση από 0.01 έως 1%. Συνήθως, το ολοκληρωμένο περιέχει έναν ενισχυτή ρύθμισης και μια δίοδο Zener στο ίδιο ολοκληρωμένο. Συχνά το τρανζίστορ δεν περιέχεται μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα για να μη δημιουργούνται μεγάλες αλλαγές της τάσης V και του ρεύματος $I_L$ λόγω θερμοκρασίας. Οι αλλαγές αυτές θα είχαν σαν αποτέλεσμα μεγάλο σφάλμα σταθεροποίησης.

Πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα σταθεροποίησης έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες σταθερές τάσεις εξόδου**,** π.χ. 5 V για λογικά κυκλώματα ή 15 V για τελεστικους ενισχυτές. Το Σχ.20 δείχνει ένα τέτοιο κύκλωμα, το MVR5V, για σταθεροποίηση της τάσης εξόδου του στα 5 V dc. Το μέγιστο δυνατό ρεύμα φόρτου είναι 600 mA και το ποσοστό σταθεροποίησης, S = ($\Delta V_i$ / $\Delta V_o$) x 100, είναι 1%.




**Σχήμα 20.** Ολοκληρωμένο κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης στα 5 V

Οι πυκνωτές απόζευξης $C_2$ και $C_3$ χρησιμοποιούνται για να έχει το κύκλωμα χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου σ' όλες τις συχνότητες. Σημειώστε, ότι η σύνθετη αντίσταση εξόδου όλων των σταθεροποιητών αυξάνει στις υψηλές συχνότητες, ενώ η ενίσχυση του ρυθμιστικού ενισχυτή (σφάλματος) ελαττώνεται. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής $C_2$ έχει χαμηλή αντίσταση στη μέση περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, ενώ ο πυκνωτής $C_3$ (πολυστερίνης ή κεραμικός) δρα στις υψηλές συχνότητες ώστε να ελαττώνει την αντίσταση εξόδου στην περιοχή αυτή.

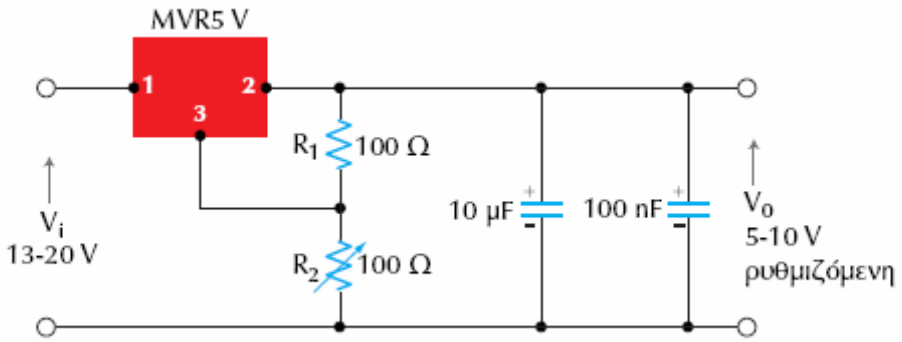
Με το MVR5V πρέπει να χρησιμοποιήσουμε εξωτερικό απαγωγέα θερμότητας αν θέλουμε να το αξιοποιήσουμε στην περιοχή του μέγιστου ρεύματος των 600 mA που έχει τη δυνατότητα να δώσει. Αν το ρευμα του φόρτου είναι κάτω από 100 mA ο πυκνωτής C1 μπορεί να γίνει 1000 μF· ο μετασχηματιστής μπορεί να γίνει ο κλασσικός μετασχηματιστής των 6.3 V και δε χρειάζεται απαγωγέα θερμότητας.

Αν θέλουμε τάση εξόδου 12V θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) MVR12V. Η τάση εισόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον 14.5 V. Το MVR15V δίνει τάση εξόδου 15 V με τάση εισόδου τουλάχιστον 17.5 V. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εισόδου για το MVR12V και MVR15V είναι 27 V και για το MVR5V είναι 20 V.

Το Σχ.21 δείχνει μια παραλλαγή του κυκλώματος του Σχ.20 με την οποία μπορούμε να έχουμε ρυθμιζόμενη σταθεροποιημένη τάση εξόδου. Το κύκλωμα χρησιμοποιεί το MVR5V, αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλα IC ώστε να έχουμε μεγαλύτερη περιοχή ρύθμισης της τάσης εξόδου. Ο σταθεροποιητής MVR5V διατηρεί σταθερή τάση 5 V στα άκρα της αντίστασης $R_1$ και μέσω του διαιρέτη τάσης $R_1$ και $R_2$, η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times 5\,V \qquad (2.10.1)$$

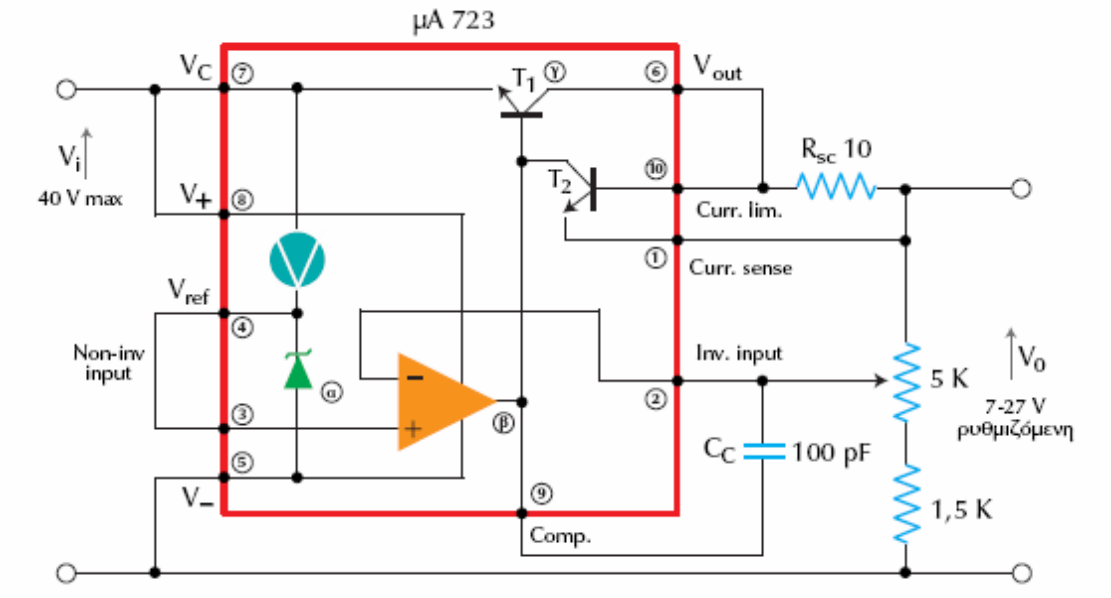
Αρα, με μεταβολή της αντίστασης του ποτενσιομέτρου $R_2$, μπορούμε να ρυθμίζουμε κατά βούληση τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου $V_o$.




**Σχήμα 21.** Κύκλωμα ρυθμιζόμενης σταθεροποίησης τάσης εξόδου με το IC MVR5V

Το Σχ.22 δείχνει ένα βασικό IC κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης, το μA723 (ή το L123), που δίνει στην έξοδο του ρυθμιζόμενη τάση εξόδου από 7 V έως 27 V. Το μA723 έχει τα εξής συστατικά μέρη:

**1.** Μια δίοδο Zener αναφοράς. Η δίοδος αυτή τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερού ρεύματος. Η δίοδος περιλαμβάνεται σ' ένα ενισχυτή με ανασυζευξη που χρησιμεύει για να υποβιβάζει την αντίσταση εξόδου.
**2.** Έναν ενισχυτή σφάλματος. Τόσο η αναστρέφουσα είσοδος όσο και η μη αναστρέφουσα έχουν δικους τους εξωτερικους ακροδέκετες. Ο πυκνωτής αντιστάθμισης $C_C$, υποβιβάζει την ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες για να αποφύγουμε την αστάθεια στις συχνότητες αυτές.




**Σχήμα 22.** Σταθεροποιητής ρυθμιζόμενης τάσης 7-27 Vμε το ICμA723 (L123)

**3.**Έναν ενισχυτή ακόλουθου τάσης μέσης ισχύος, με το $T_1$. Το τρανζίστορ αυτό περιορίζει την ισχυ απωλειών του ρυθμιστή, που αντιστοιχεί στο μέγιστο (600 mA) στην περίπτωση αυτή. Αυτό το όριο όμως μπορεί να αυξηθεί αν χρησιμοποιήσουμε εξωτερική αντίσταση.
**4.**Ένα τρανζίστορ, $T_2$, περιορισμού ρεύματος. Το τρανζίστορ αυτό «διακρίνει» τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίσταση $R_{SC}$ και αρχίζει να άγει όταν αυτή φθάσει τα 0.6 V. Καθώς άγει το $T_2$, βραχυκυκλώνει την επαφή βάσης-εκπομπου του ακόλουθου τάσης και τον κάνει αδρανή κόβοντας την τάση τροφοδοσίας του.

Μια άλλη κατηγορία μονολιθικών IC κυκλωμάτων είναι οι σειρές 78XX και 79XX οι οποίες δίνουν στην έξοδο τους σταθεροποιημένη τάση. Η μεν πρώτη σειρά, 78XX, δίνει στην έξοδο της σταθεροποιημένες

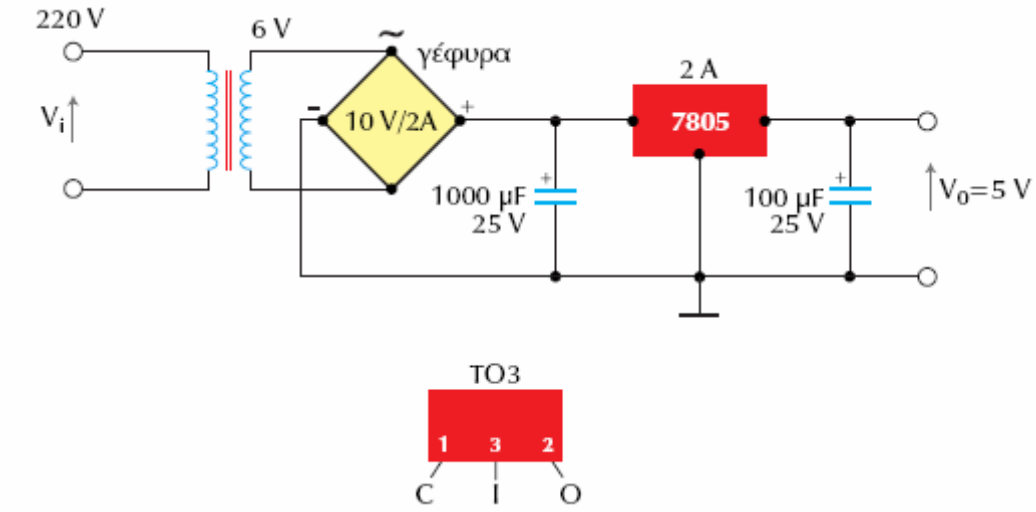
θετικές τάσεις, η δε δευτερη, η σειρά 79XX, δίνει αρνητική σταθεροποιημένη τάση.

Τα ολοκληρωμένα αυτά κυκλώματα έχουν τρεις ακροδέκτες, που είναι ο ακροδέκτης της εισόδου, της εξόδου και ο κοινός. Οι μονάδες αυτές μπορούν να συνδεθούν σ' ένα κύκλωμα χωρίς να χρειάζεται να συνδέσουμε εξωτερικά άλλα επιπρόσθετα υλικά εκτός από τους πυκνωτές εισόδου-εξόδου για το φιλτράρισμα της τάσης εξόδου του ανορθωτή.

Το Σχ.23 δείχνει τη μορφή του ολοκληρωμένου κυκλώματος σε βάση KC. Οι δυο επόμενοι αριθμοί του κώδικα δείχνουν τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου, π.χ. το 7805 σημαίνει ότι το IC δίνει στην έξοδο του σταθεροποιημένη τάση +5 V, ενώ το 7905 δίνει -5 V. Ομοίως, το 7812 δείνει + 12 V, ενώ το 7915 δίνει -15 V.

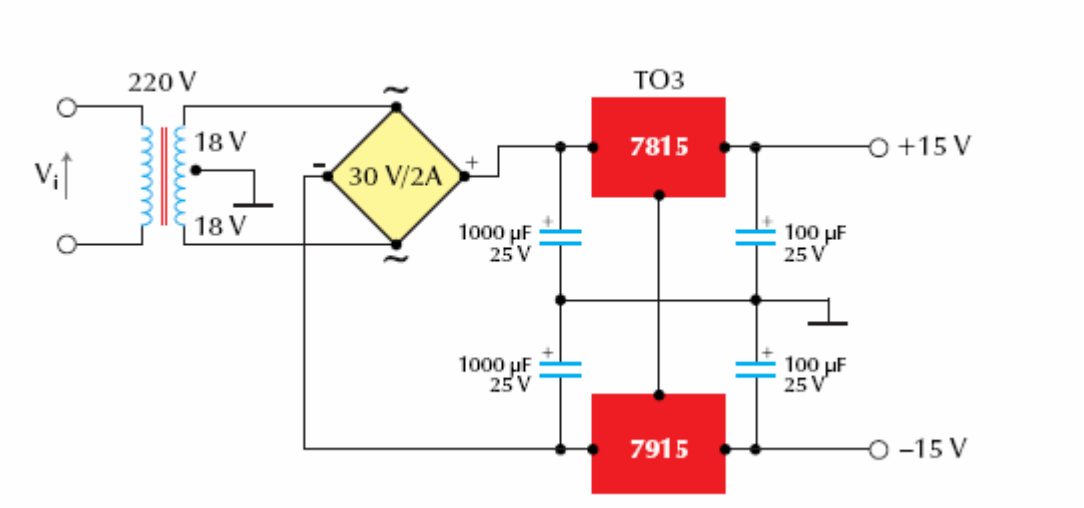

**Σχήμα 23.** IC σταθεροποίηση τάσης των σειρών 78XX και 79XX

Το Σχ.24 είναι το πλήρες κύκλωμα ενός τροφοδοτικού +5 V για τροφοδοσία ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.




**Σχήμα 24.**Τροφοδοτικό σταθεροποιημένης τάσης +5V

Το Σχ.25 δείχνει το πλήρες κύκλωμα ενός τροφοδοτικού ±15 V για τροφοδοσία γραμμικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.




**Σχήμα25.**Τροφοδοτικό σταθεροποιημένης τάσης ±15V

# 3. ΦΙΛΤΡΑ

## 3.1 Ορισμός του φίλτρου

Γενικά το ηλεκτρονικό φίλτρο είναι στοιχείο ή διάταξη που μπορεί να διαβιβάζει ή να διαχωρίζει σε μέρη, ή ανακόπτει ένα φάσμα συχνοτήτων, δηλ. μια συγκεκριμένη ομάδα συχνοτήτων. Το φάσμα αυτό μπορεί να είναι είτε συνεχές, είτε διακοπτόμενο, είτε διακριτό (γραμμικό).

Από τις πιο συνηθισμένες χρήσεις των φίλτρων είναι ο αποχωρισμός του σήματος από το θόρυβο. Σήμα είναι ένα πεπερασμένο σύνολο δεδομένων συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Θόρυβος είναι ένα σύνολο ανεπιθύμητων διαταραχών του σήματος, που καλύπτουν ένα φάσμα συχνοτήτων. Με το κατάλληλο ηλεκτρονικό φιλτράρισμα μπορούμε να απομακρύνουμε άλλα ανεπιθύμητα σήματα ή αυτές τις θορυβικές διαταραχές, αποκόπτοντας π.χ. το φάσμα του θορύβου όταν αυτό είναι δυνατό- και αφήνοντας να περάσει μόνο το φάσμα του επιθυμητού σήματος.

Κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός φίλτρου είναι η συνάρτηση μεταφοράς H(s) αυτού. Αυτή ορίζεται ως το μιγαδικό πηλίκο (λόγος) της τάσης εξόδου, $V_o(s)$ προς την αντίστοιχη τάση εισόδου, $V_i(s)$, δηλ.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \qquad (3.1.1)$$

Όπου s = jω, με ω = 2πf η κυκλική συχνότητα σήματος και f είναι η (γραμμική) συχνότητα αυτού, ενώ το j παριστάνει τη μιγαδική μονάδα ( $j = \sqrt{-1}$ )

Στην πράξη ενδιαφέρει ιδιαίτερα το μέτρο, |H(jω)|, της συνάρτησης μεταφοράς, το οποίο εκφράζει το επίπεδο της ενίσχυσης ή απολαβής τάσης (σε dB) που δίνει το φίλτρο. Η καμπύλη που εικονίζει την εξάρτηση της ενίσχυσης αυτής από τη συχνότητα, ω ή f, αποτελεί την καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων του φίλτρου.

### 3.1.1 Παθητικά και ενεργά φίλτρα

Τα ηλεκτρονικά φίλτρα χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τα παθητικά και τα ενεργά φίλτρα.

Τα παθητικά φίλτρα αποτελούνται μόνο από παθητικά στοιχεία, δηλ. αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία. Στην πράξη έχουν ένα σοβαρό

μειονέκτημα, ότι δηλαδή, στις χαμηλές συχνότητες χρειάζονται μεγάλες επαγωγικές αντιστάσεις, άρα απαιτούν ογκώδη πηνία. Επίσης, είναι μη γραμμικά και προκαλούν υποβιβασμό του σήματος, με μεγάλο συντελεστή απωλειών. Τέλος, δημιουργούν έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αποτελούν αιτία ενοχλητικότατων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Γι' αυτούς τους λόγους, η χρήση τους συνήθως αποφεύγεται και πραγματοποιείται μόνο εκεί, όπου τα ενεργά φίλτρα μειονεκτούν, δηλ. σε υψηλές συχνότητες και μεγάλες ισχύς.

Τα ενεργά φίλτρα αποτελούνται από ενεργά στοιχεία (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές, κτλ) συνδυασμένα με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και αντιστάσεις). Τα φίλτρα αυτά είναι απαλλαγμένα από τα μειονεκτήματα των παθητικών φίλτρων που αναφέραμε πιο πάνω, είναι αποδοτικά και κοστίζουν λίγο. Γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως, ιδίως σε χαμηλές συχνότητες και χαμηλές ισχύς. Ως εκ τούτου, είναι αυτά που θα μας απασχολήσουν στα περαιτέρω.

Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας των τελεστικών ενισχυτών μπορούμε να κατασκευάσουμε ενεργά φίλτρα στην περιοχή των MHz, αλλά το κόστος τους είναι υψηλό.

## 3.2 Κατηγορίες ενεργών φίλτρων

Ανάλογα με το φάσμα συχνοτήτων στις οποίες επιτρέπουν ή απαγορεύουν τη διέλευση, τα ενεργά φίλτρα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

### 3.2.1 Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων (ΦΧΣ)

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση σημάτων μόνο χαμηλών συχνοτήτων, ενώ ανακόπτουν τα σήματα υψηλοτέρων συχνοτήτων, Σχ.5.1. Η ζώνη διέλευσής τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλ. από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα που ονομάζεται συχνότητα αποκοπής, $f_1$ ή $f_c$. Από αυτήν και μετά η ενίσχυση μειώνεται δραστικά και το φίλτρο περνάει στη ζώνη αποκοπής, η συχνότητα της οποίας εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα


**Σχήμα 1.** Απόκριση φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων (ΦΧΣ)

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο (υψηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος, η δε ζώνη αποκοπής το φάσμα του θορύβου, κατά τον τρόπο που εικονίζει το Σχ.1.

### 3.2.2 Φίλτρα Υψηλών Συχνοτήτων (ΦΥΣ)

Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων και επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων υψηλών συχνοτήτων, Σχ.5.2. Η ζώνη αποκοπής τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλ. από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα από την οποία και πέρα η ενίσχυσή τους αυξάνεται γρήγορα. Στη συνέχεια, από μια συχνότητα $f_2$ και μετά, που καλείται συχνότητα αποκοπής**,** αρχίζει η ζώνη διέλευσης, η οποία εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα.

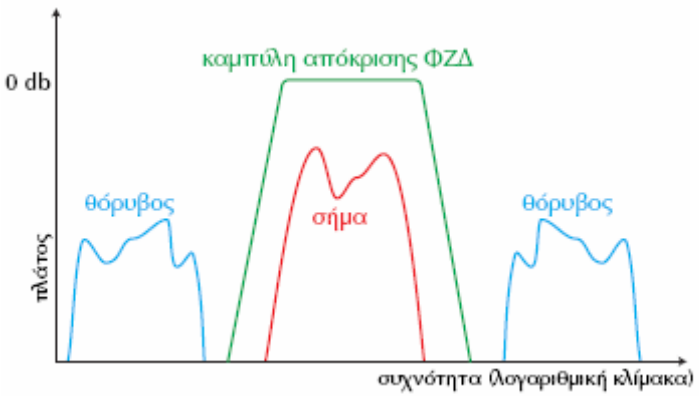

**Σχήμα 2.** Απόκριση φίλτρου υψηλών συχνοτήτων (ΦΥΣ)

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο (χαμηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη αποκοπής να καλύπτει το φάσμα του θορύβου, η δε

ζώνη διέλευσης το φάσμα του σήματος, κατά τον τρόπο που εικονίζει το Σχ.2.

### 3.2.3 Φίλτρα Ζώνης Διέλευσης (ΦΖΔ)

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων που η συχνότητα τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και ανακόπτουν όλες τις υπόλοιπες συχνότητες, Σχ.3. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη αποκοπής, από μηδενική συχνότητα (δηλ. από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής $f_1$, μετά ακολουθεί η ζώνη διέλευσης, από τη συχνότητα $f_1$ μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής $f_2$, και τέλος εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη αποκοπής, από τη συχνότητα $f_2$ μέχρι την άπειρη συχνότητα.



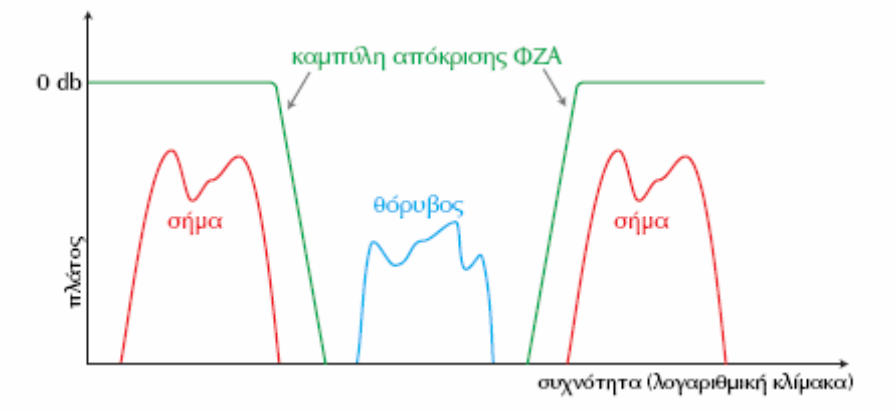

**Σχήμα 3.** Απόκριση φίλτρου ζώνης διέλευσης (ΦΖΔ)

Αν το ΦΖΔ χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο χαμηλής και υψηλής συχνότητας λαμβάνεται φροντίδα, ώστε η ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος και οι δύο ζώνες αποκοπής το φάσμα του θορύβου κατά τον τρόπο που δείχνει το Σχ.5.3.

### 3.2.4 Φίλτρα Ζώνης Αποκοπής (ΦΖΑ)

Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν μόνο σήματα που η συχνότητά τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και επιτρέπουν δε τη διέλευση όλων των υπόλοιπων συχνοτήτων, Σχ.4. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη διέλευσης, από μηδενική συχνότητα (δηλ. από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής $f_1$**,** μετά ακολουθεί η ζώνη αποκοπής, από τη συχνότητα $f_1$ μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής $f_2$**,** και τέλος

εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη διέλευσης, από τη συχνότητα $f_2$ μέχρι την άπειρη συχνότητα.



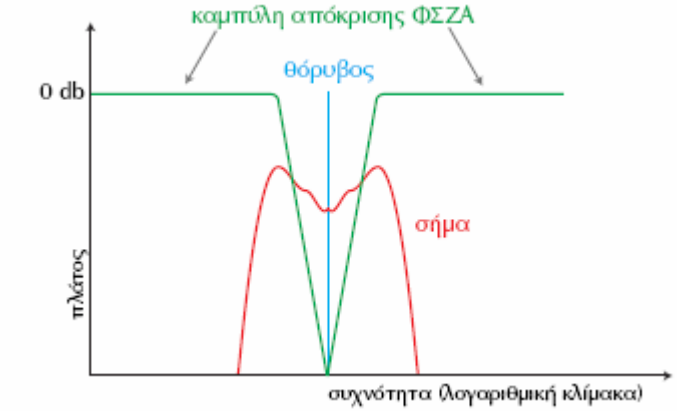

**Σχήμα 4**. Απόκριση φίλτρου ζώνης αποκοπής (ΦΖΑ)

Στο ίδιο σχήμα εικονίζεται η συσχέτιση των ζωνών αποκοπής και διέλευσης του φίλτρου με το φάσμα σήματος και το φάσμα θορύβου, για την περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο.

Το ΦΖΑ μπορεί να προκύψει αν συνδυάσουμε παράλληλα ένα ΦΧΣ με ένα ΦΥΣ και τα σήματά τους τα οδηγήσουμε σ' ένα αναλογικό αθροιστή.

### 3.2.5 Φίλτρα Στενής Ζώνης Διέλευσης (ΦΣΖΔ)

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μιας στενής ζώνης συχνοτήτων, εστιασμένης γύρω από μια κεντρική συχνότητα $f_0$, ενώ αποκόπτουν όλες τις άλλες συχνότητες, Σχ.5.




**Σχήμα 5.** Απόκριση στενής ζώνης διέλευσης (ΦΣΖΔ)

Είναι προφανές ότι τα φίλτρα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν το σήμα έχει φάσμα συγκεντρωμένο μέσα σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων γύρω από μια κεντρική συχνότητα $f_0$.

### 3.2.6 Φίλτρα Στενής Ζώνης Αποκοπής (ΦΣΖΑ)

Τα φίλτρα αυτά, που ονομάζονται και φίλτρα δοντιού αποκόπτουν μια στενή ζώνη συχνοτήτων, απορρίπτοντας μόνο τις συχνότητες που βρίσκονται σε μια στενή περιοχή γύρω από μια κεντρική συχνότητα $f_0$ ενώ επιτρέπουν τη διέλευση όλων των άλλων συχνοτήτων, Σχ.6.


**Σχήμα 6**. Απόκριση στενής ζώνης απόρριψης (ΦΣΖΑ)

Είναι προφανές, ότι τα φίλτρα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν θέλουμε να απαλλάξουμε το σήμα από θόρυβο ισχυρά εντοπισμένο και συγκεντρωμένο γύρω από μια συχνότητα /„.

Τα φίλτρα αυτά είναι χρήσιμα στο να κόβουμε τα 50 Hz του δικτύου που πολλές φορές είναι ανεπιθύμητα στις ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές.

### 3.3 Ιδανικά και πραγματικά φίλτρα

Πολλές φορές, για λόγους τυποποίησης και απλούστευσης, είναι βολικό να αντιμετωπίζουμε τα ενεργά φίλτρα με προσεγγιστικό τρόπο, ανάγοντας τα σε εξιδανικευμένα και απλοποιημένα θεωρητικά πρότυπα τα οποία ονομάζονται ιδανικά φίλτρα**.** Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, η προσφυγή σε αυτά τα πρότυπα είναι ανεπαρκής ή οδηγεί σε αξιοσημείωτα σφάλματα· τότε το φίλτρο πρέπει να αντιμετωπίζεται με βάση την ακριβή πραγματική του συμπεριφορά, δηλ. ως πραγματικό φίλτρο**.**

### 3.3.1 Ιδανικά Φίλτρα

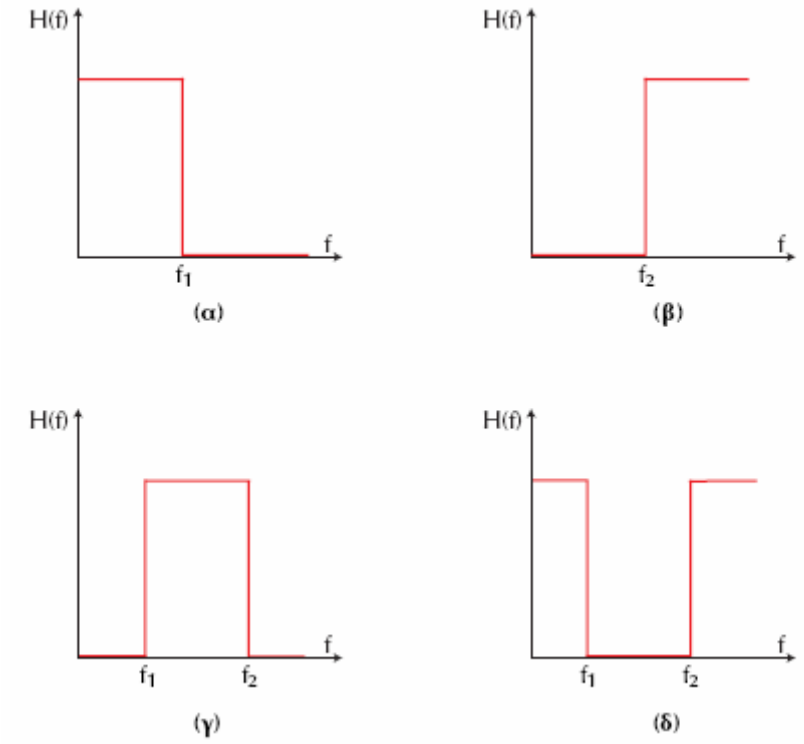
Ιδανικό θεωρείται το φίλτρο που ικανοποιεί τους εξής 4 βασικούς όρους:

- Έχει απολαβή (ενίσχυση) μονάδα, δηλ. δε δημιουργεί ούτε ενίσχυση ούτε υποβιβασμό του σήματος εισόδου σ' όλη την έκταση του ή των ζωνών διέλευσής του.
- Δημιουργεί πλήρη υποβιβασμό (100%) του σήματος εισόδου σε όλη την έκταση του ή των ζωνών αποκοπής του.

  Η μετάβαση της απόκρισης από τη μια ζώνη στην άλλη είναι τελείως απότομη.
- Δε δημιουργεί καμία παραμόρφωση στα σήματα που περνούν μέσα από τις ζώνες διέλευσης.

Τα παραπάνω οδηγούν στις καμπύλες απόκρισης του Σχ.5.7 για τις τέσσερις κύριες κατηγορίες ιδανικών φίλτρων, δηλ. ΦΧΣ (α), ΦΥΣ (β), ΦΖΔ (γ) και ΦΖΑ (δ).

Όπως παρατηρούμε, όλες αυτές οι ιδανικές καμπύλες απόκρισης είναι ορθογώνιες και η απολαβή τάσης στη ζώνη διέλευσης θεωρείται μονάδα.



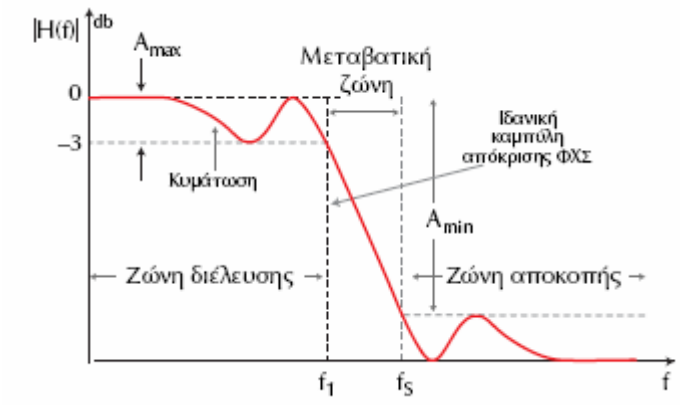

**Σχήμα 7.** Καμπύλες απόκρισης των ιδανικών φίλτρων:
ΦΧΣ (α), ΦΥΣ (β), ΦΖΔ (γ), ΦΖΑ (δ)

Στο ιδανικό ΦΧΣ, η ζώνη διέλευσης εκτείνεται από τη μηδενική συχνότητα μέχρι τη συχνότητα αποκοπής $f_1$. Στο ιδανικό ΦΥΣ, η ζώνη διέλευσης εκτείνεται από τη συχνότητα αποκοπής $f_2$ μέχρι την άπειρη συχνότητα. Στο ιδανικό ΦΖΔ, η ζώνη διέλευσης καλύπτει την περιοχή $f_1 < f < f_2$ . Τέλος, στο ιδανικό ΦΖΑ, η ζώνη διέλευσης εκτείνεται από τη μηδενική συχνότητα μέχρι την $f_1$ και από την $f_2$ μέχρι την άπειρη συχνότητα.

### 3.3.2 Πραγματικά Φίλτρα

Τα πραγματικά φίλτρα έχουν συμπεριφορά που μοιάζει με αυτή που προβλέπεται από τα ιδανικά φίλτρα μόνο κατά μεγάλη προσέγγιση. Έτσι, π.χ. η απότομη μετάβαση από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη αποκοπής και αντίστροφα, που θεωρείται ότι ισχύει στα ιδανικά φίλτρα, δεν είναι πραγματοποιήσιμη στα πραγματικά φίλτρα. Επίσης, ανέφικτη είναι η σταθερότητα τιμής της απολαβής τάσης καθ' όλη την έκτασή της ή των ζωνών διέλευσης. Τέλος, η ύπαρξη μηδενικής ενίσχυσης σ' όλη την έκτασή της ή των ζωνών αποκοπής είναι αδύνατη στα πραγματικά φίλτρα.

Συνήθως, σε αντίθεση με τις ιδανικές καμπύλες απόκρισης του Σχ.7, η τυπική πρακτική καμπύλη απόκρισης ενός πραγματικού φίλτρου, συγκεκριμένα ενός ΦΧΣ, έχει τη μορφή που εικονίζει το Σχ.8. (με απολαβή τάσης 1).




**Σχήμα 8.** Πρακτική καμπύλη απόκρισης ενός πραγματικού ΦΧΣ

Από το σχήμα αυτό μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής ιδιάζοντα χαρακτηριστικά της απόκρισης ενός πραγματικού φίλτρου.

· Στο καταληκτικό μέρος της ζώνης διέλευσης εμφανίζεται τοπική μείωση της ενίσχυσης σε τιμή απολαβής κάτω από 0 dB. Η μείωση αυτή είναι μικρή αλλά όχι αμελητέα και έχει μέγιστη τιμή που συμβολίζεται $A_{max}$

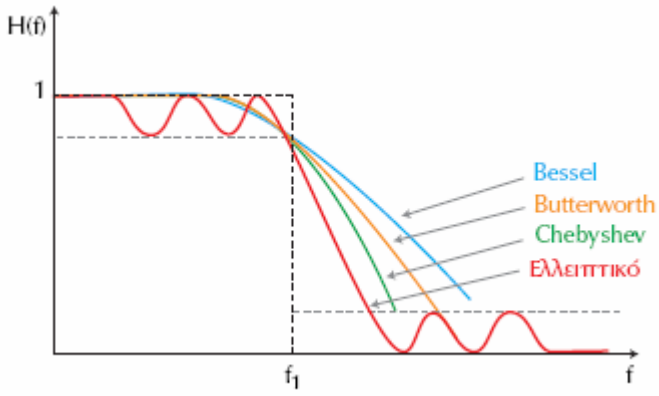
· Στη ζώνη αποκοπής ο υποβιβασμός της ενίσχυσης είναι μεγάλος αλλά όχι άπειρος (όπως στο ιδανικό φίλτρο). Συνήθως, στη ζώνη αυτή και κοντά στη συχνότητα αποκοπής παρατηρείται έξαρση της καμπύλης απόκρισης. Με αποτέλεσμα, ο υποβιβασμός της απολαβής να εμφανίζει μια ελάχιστη τιμή που συμβολίζεται με $A_{min}$.

· Μεταξύ της ζώνης διέλευσης και της ζώνης αποκοπής εμφανίζεται μια μεταβατική ζώνη μέσα στην οποία η απολαβή τάσης μειώνεται προοδευτικά και όχι απότομα. Η μεταβατική αυτή ζώνη εκτείνεται μεταξύ της συχνότητας αποκοπής f και μιας άλλης συχνότητας της $f_s$. Το πόσο απότομη είναι η πτώση της καμπύλης απόκρισης μέσα στη μεταβατική ζώνη εξαρτάται από την τιμή του λόγου συχνοτήτων $f_s$ /$f_1$. Αν η μετάβαση είναι τελείως απότομη θα έχουμε $f_s = f_1$ άρα $f_s/f_1 = 1$. Όσο πιο «απαλή» είναι η μετάβαση, δηλ. όσο πιο μικρή είναι η κλίση της καμπύλης απόκρισης μέσα στη μεταβατική ζώνη, τόσο μεγαλύτερος από 1 θα είναι ο λόγος αυτός.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η παραπάνω κλίση της καμπύλης, σε λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων, εξαρτάται άμεσα με τη λεγόμενη τάξη ή βαθμό του φίλτρου.

## 3.4 Οικογένειες των φίλτρων

Στη μαθηματική ανάλυση των φίλτρων έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα (πρότυπα) και κυκλώματα με τα οποία προσπαθούμε να επιτύχουμε μια όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς των ιδανικών φίλτρων. Τα μοντέλα αυτά ταξινομούνται στις εξής τέσσερις οικογένειες: Τα φίλτρα Butterworth, τα φίλτρα Chebyshev, τα φίλτρα Bessel και τα Ελλειπτικά φίλτρα. Το Σχ.9. εικονίζει τις τυπικές καμπύλες απόκρισης αυτών των φίλτρων.




**Σχήμα 9.** Καμπύλες απόκρισης οικογενειών φίλτρων

Τα φίλτρα Butterworth είναι πρότυπα φίλτρα τα οποία προσομοιώνουν ικανοποιητικά την πτώση της καμπύλης απόκρισης στη μεταβατική

ζώνη, αλλά δεν εμφανίζουν την κυμάτωση της απολαβής που παρατηρείται στη ζώνη διέλευσης και τη ζώνη αποκοπής των άλλων φίλτρων. Στα φίλτρα αυτά, η απόκριση στη ζώνη διέλευσης εμφανίζεται σταθερά επίπεδη καθ' όλη την έκτασή της *(*μεγιστοεπίπεδη*)*.

Στα φίλτρα αυτά, ως κάτω άκρη της μεταβατικής ζώνης, δηλ. ως συχνότητα $f_1$, θεωρείται η συχνότητα στην οποία (στο πραγματικό φίλτρο) το ύψος της καμπύλης απόκρισης, παρεχόμενο από το μέτρο |H(jω)| της συνάρτησης μεταφοράς, πέφτει από τη στάθμη των 0 dB, κατά $A_{max}$, Σχ.8. Η άλλη άκρη της μεταβατικής ζώνης είναι η συχνότητα $f_s$ για την οποία το επίπεδο της καμπύλης απόκρισης πέφτει κατά $A_{min}$ από τη στάθμη των 0 dB (στην αρχή της ζώνης αποκοπής).

Τα φίλτρα Chebyshev**,** αντίθετα με τα προηγούμενα, δίνουν τη δυνατότητα ύπαρξης και υπολογισμού κυμάτωσης μέσα στη ζώνη διέλευσης. Έχουν όμως, αυξομοίωση της απολαβής μέσα στη μεταβατική ζώνη και πιο απότομη από ότι τα φίλτρα Butterworth.

Τα φίλτρα Bessel δεν παρουσιάζουν κυμάτωση στην καμπύλη απόκρισης και η μεταβατική μετάπτωση της απολαβής είναι η χειρότερη από ότι στις άλλες οικογένειες φίλτρων. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι έχουν γραμμική φάση και χρησιμοποιούνται σε συστήματα που επεξεργάζονται παλμούς, επειδή λόγω της ιδιότητας αυτής, δεν αλλοιώνουν τη μορφή του παλμού.

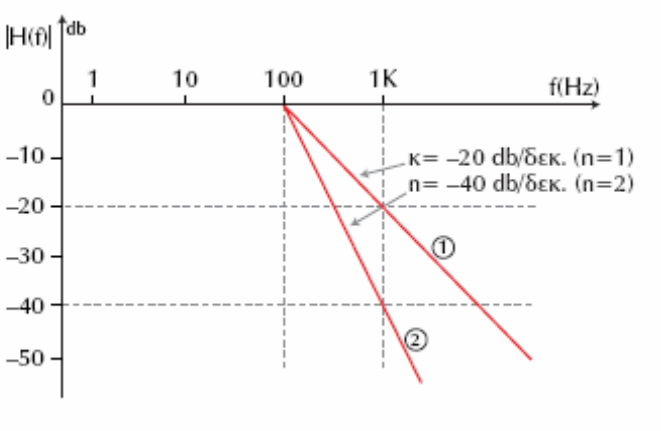
Τέλος, τα ελλειπτικά φίλτρα εμφανίζουν κυμάτωση της καμπύλης απόκρισης τόσο στη ζώνη διέλευσης όσο και στη ζώνη αποκοπής, ενώ η μετάπτωση απολαβής στη μεταβατική ζώνη είναι πιο απότομη από ότι σε όλες τις άλλες οικογένειες των φίλτρων, Σχ.8.

## 3.5 Βαθμός ή τάξη ενός φίλτρου

Στα φίλτρα η συνάρτηση μεταφοράς H(s) ή H(jf) εκφράζεται από μια παράσταση στην οποία ο παρονομαστής είναι ένα πολυώνυμο ως προς s ή jf. Ο (αλγεβρικός) βαθμός αυτού του πολυωνύμου ονομάζεται βαθμός ή τάξη, n, του φίλτρου.

Στην πράξη, τα μεγέθη Amax, Amin, f1 ή f2 και fs επηρεάζουν το βαθμό του φίλτρου. Στην πραγματικότητα, το n καθορίζει άμεσα την κλίση (κ) της μεταβατικής περιοχής (μετάπτωση) της καμπύλης απόκρισης του φίλτρου, Σχ.10. Σε λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων, η κλίση αυτή σχετίζεται με το βαθμό του φίλτρου με βάση τον προσεγγιστικό τύπο

$$\kappa = \mp \text{ (dB/δεκάδα)} = \mp 6 \cdot n \text{ (dB/οκτάβα)} \qquad (3.5.1)$$



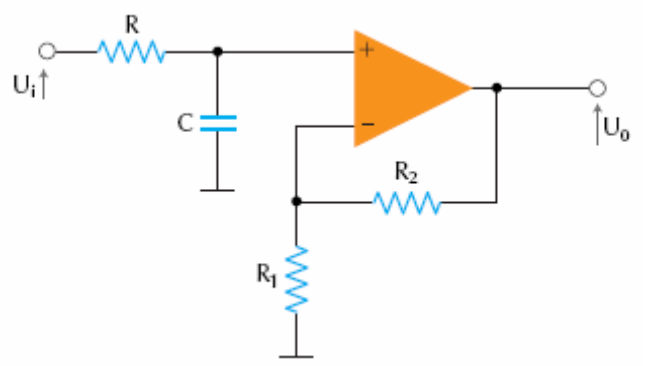

**Σχήμα 10.** Βαθμός φίλτρου και κλίση του

Σημειώνεται ότι δεκάδα είναι το διάστημα μεταξύ δύο συχνοτήτων από τις οποίες η μεγαλύτερη είναι 10-πλάσια της μικρότερης, ενώ οκτάβα είναι το διάστημα στο οποίο η μεγαλύτερη συχνότητα είναι 2-πλάσια της μικρότερης. Εξ' άλλου, το (-) στην Εξ.5.5.1 υποδηλώνει αρνητική κλίση, άρα κατερχόμενη καμπύλη (περίπτωση ΦΧΣ*)* και το ( + ) θετική κλίση, άρα ανερχόμενη καμπύλη (περίπτωση ΦΥΣ).

Συνεπώς, κατά την Εξ.3.5.1, σε ένα ΦΧΣ 1ης τάξης η κλίση θα είναι κ= 20 · 1 = - 20 dB/δεκάδα ή - 6 dB/οκτάβα (ευθεία "1" του σχήματος), ενώ σε ένα ΦΥΣ 2ης τάξης, η κλίση θα είναι κ = + 20 · 2 = + 40 dB/δεκάδα = + 12 dB/οκτάβα.

## 3.6 ΦΧΣ 1ης τάξης

Το Σχ.11. δείχνει το κύκλωμα ενός ενεργού ΦΧΣ 1ης τάξης με ενίσχυση K. Ο τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ) είναι συνδεμένος σαν ενισχυτής ελεγχόμενης τάσης (VCVS) και ονομάζεται όμως και φίλτρο Sallen-Key 1ης τάξης προς τιμή των δύο ερευνητών που το αναπτύξανε.




**Σχήμα 11.** ΦΧΣ Sallen-Key 1ης τάξης

Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου δίνεται από τη σχέση:

$$H(jf) = \frac{K}{1 + j\left(\frac{f}{f_1}\right)} \qquad (3.6.1)$$

Όπου:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (3.6.2)$$

είναι η ενίσχυση (απολαβή τάσης) στο dc, δηλ. για f = 0 και

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (3.6.3)$$

η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου. Η συχνότητα είναι εκείνη για την οποία ο λόγος Στην Εξ.(3.6.1) γίνεται μονάδα, οπότε το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς γίνεται $|H(j\omega)| = K/\sqrt{2}$ ή 0.707 K ή 20 log K-3dB, δηλ. 3 dB κάτω από τη μέγιστη απολαβή (σε dB).

Ο υπολογισμός του φίλτρου αυτού, γίνεται με τη βοήθεια των Εξ.(3.6.2) και (3.6.3), μετασχηματιζόμενες, ώστε να πάρουν την πιο κάτω μορφή:

$$R = \frac{1}{2\pi f_1 C} \qquad (3.6.4)$$

$$R_2 = (K - 1)\, R_1 \qquad (3.6.5)$$

Για να υπολογίσουμε το φίλτρο, με δεδομένη την ενίσχυση K και η συχνότητα αποκοπής $f_1$, δεχόμαστε (έστω και αυθαίρετα) μια κατάλληλη τιμή για τη χωρητικότητα C και μια κατάλληλη τιμή της $R_1$ και μετά υπολογίζουμε τις αντιστάσεις R και $R_2$.

## 3.7 ΦΥΣ 1ης τάξης

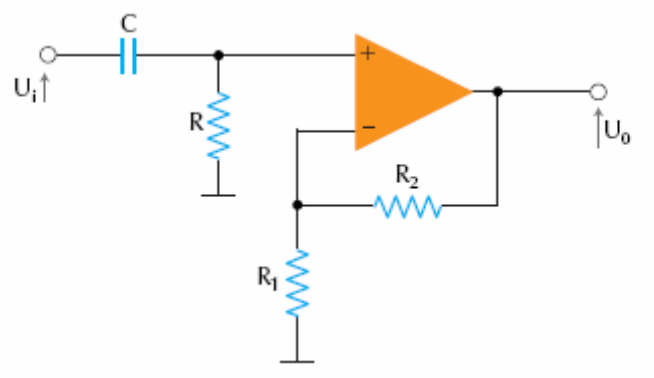
Αν αντιμεταθέσουμε τη θέση του πυκνωτή C και της αντίστασης R στο κύκλωμα του Σχ.5.11, προκύπτει ΦΥΣ Sallen-Key, Σχ.13. Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου αυτού, δίνεται από τη σχέση:

$$H(jf) = \frac{K\frac{jf}{f_2}}{1+\frac{jf}{f_2}} \qquad (3.7.1)$$

όπου

$$f_2 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (3.7.2)$$

είναι η συχνότητα αποκοπής. Η απολαβή τάσης K εξακολουθεί να δίνεται από την Εξ. (3.6.2).

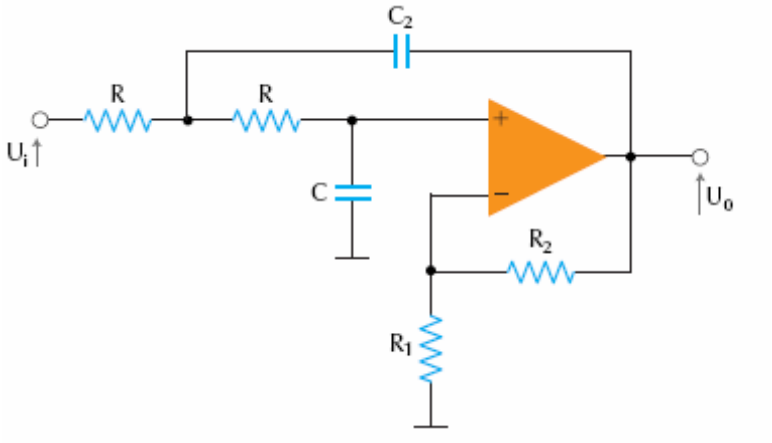



**Σχήμα 12**. ΦΥΣ 1ης τάξης

Ο υπολογισμός του φίλτρου γίνεται όπως ακριβώς και με το αντίστοιχο ΦΧΣ.

## 3.8 ΦΧΣ 2ης Τάξης

Το Σχ.13. δείχνει το κύκλωμα ενός ενεργού ΦΧΣ 2ης τάξης, τύπου Sallen-Key. Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του δίνεται από τη σχέση:




**Σχήμα 13.** ΦΧΣ 2ης τάξης

$$H(jf) = \frac{K}{\left(\frac{jf}{f_1}\right)^2 + \alpha\left(\frac{jf}{f_1}\right) + 1} \qquad (3.8.1)$$

όπου α είναι ένας συντελεστής που η τιμή του βρίσκεται από ειδικό πίνακα - (συντελεστών Butterworth) - και $f_1$ είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R\sqrt{C_1 C_2}} \qquad (3.8.2)$$

Το φίλτρο αυτό είναι 2ης τάξης, επειδή ο παρονομαστής της συνάρτησης μεταφοράς, όπως βλέπουμε από την Εξ.(3.8.1) είναι πολυώνυμο δεύτερου βαθμού. (Αυτό οφείλεται στο ότι το κύκλωμα έχει δυο στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, δηλ. τους δυο πυκνωτές). Η κλίση του φίλτρου είναι -40 dB/δεκ. ή -12 dB/οκτ, βλ. Εξ.(3.5.1).
Αποδεικνύεται ότι το τυπολόγιο υπολογισμού του φίλτρου αυτού δίνεται από τις σχέσεις:

$$C_1 = \frac{\lambda}{4\omega_1 R} \qquad (3.8.3)$$

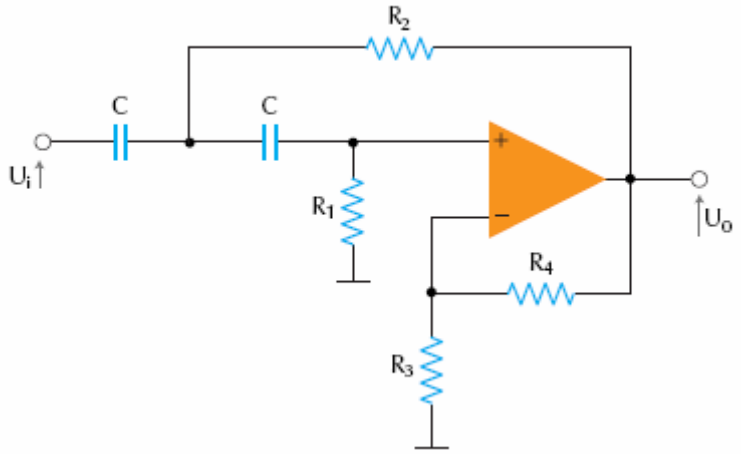
$$C_2 = \frac{4}{\lambda \omega_1 R} \tag{3.8.4}$$

όπου:

$$\lambda = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(K-1)} \tag{3.8.5}$$

## 3.9 ΦΥΣ 2ου βαθμού Sallen-Key

Το Σχ.14. δείχνει το κύκλωμα ενός ενεργού ΦΥΣ 2ης τάξης, τύπου Sallen-Key. Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου αυτού είναι:




**Σχήμα 14.** ΦΥΣ 2ης τάξης

$$H(jf) = \frac{K\left(\frac{jf}{f_2}\right)^2}{\left(\frac{jf}{f_2}\right)^2 + \alpha\left(\frac{jf}{f_2}\right) + 1} \tag{3.9.1}$$

και

$$f_2 = \frac{1}{2\pi C\sqrt{R_1 R_2}} \tag{3.9.2}$$

όπου $f_2$ είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου και α ο συντελεστής του φίλτρου. Το τυπολόγιο υπολογισμού του φίλτρου δίνεται από τις σχέσεις:

$$R_1 = \frac{4}{\lambda \omega_2 C} \tag{3.9.3}$$

$$R_2 = \frac{\lambda}{4\omega_2 C} \tag{3.9.4}$$

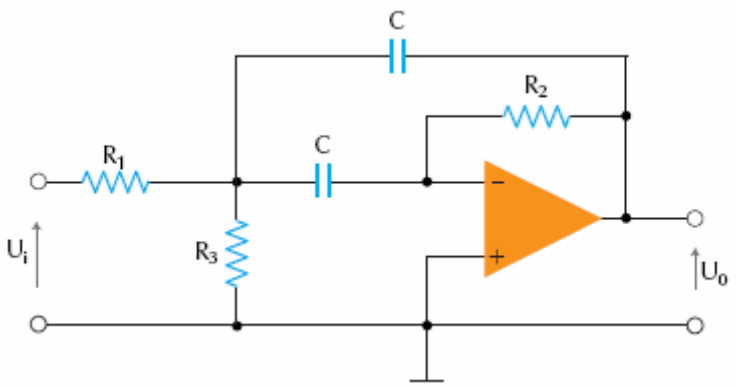
Όπου:

$$\lambda = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(K-1)} \tag{3.9.5}$$

Η dc ενίσχυση K εξακολουθεί να δίνεται από την Εξ.(3.6.2).

## 3.10 Φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης

Για να επιτύχουμε στενή ζώνη σ' ένα ΦΣΖΔ, προσφορότερος τρόπος είναι να εφοδιάσουμε το κύκλωμα με πολλές ανασυζεύξεις. Η τεχνική αυτή λέγεται μέθοδος πολλαπλής ανασύζευξης (ΠΑ) από την έξοδο στην είσοδο του φίλτρου. Ειδικότερα, ανατροφοδοτείται η αναστρέφουσα (-) είσοδος του ΤΕ, Σχ.15, πράγμα που δημιουργεί διαφορά φάσης 180° στο σήμα εισόδου και γι' αυτό η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου αυτού έχει αρνητικό πρόσημο.




**Σχήμα 15.** ΦΣΖΔ πολλαπλών ανασυζεύξεων

Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου δίνεται από τη σχέση:

$$H(jf) = -\frac{\frac{K}{Q}\left(\frac{jf}{f_0}\right)}{\left(\frac{jf}{f_0}\right)^2 + \frac{1}{Q}\left(\frac{jf}{f_0}\right) + 1} \qquad (3.10.1)$$

όπου K είναι η ενίσχυση του φίλτρου στην κεντρική συχνότητα $f_o$ (συχνότητα συντονισμού) και Q είναι ο συντελεστής ποιότητας ή συντελεστής μεγέθυνσης (ο γνωστός μας από τα κυκλώματα συντονισμού συντελεστής επιλεκτικότητας).

Θα πρέπει να πούμε ότι μ' αυτό το φίλτρο μπορούμε να έχουμε Q μέχρι 10, αν θέλουμε να δουλεύει σωστά.

Η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου βρίσκεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C}\sqrt{\frac{1}{R_2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)} \qquad (3.10.2)$$

Το τυπολόγιο υπολογισμού του φίλτρου αυτού είναι το πιο κάτω:

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_0 CK} \qquad (3.10.3)$$

$$R_2 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \qquad (3.10.4)$$

$$R_3 = \frac{Q}{\omega_0 C\left(2Q^2 - K\right)} \qquad (3.10.5)$$

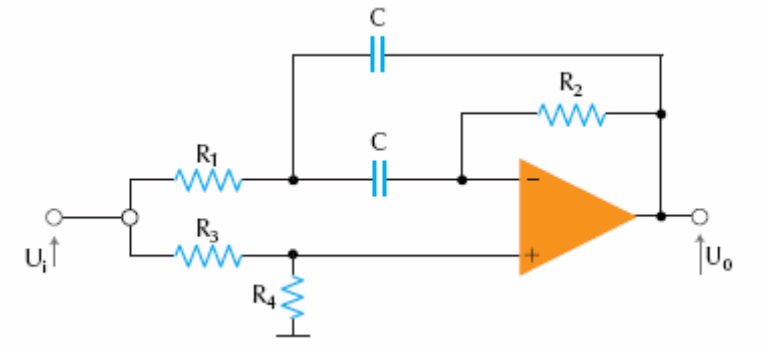
όπου $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

Η ενίσχυση του φίλτρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \frac{R_2}{2R_1} \qquad (3.10.6)$$

## 3.11 Φίλτρο στενής ζώνης αποκοπής

Το Σχ.16 δείχνει το φίλτρο στενής ζώνης αποκοπής ή φίλτρο δοντιού**.** Στη ζώνη αποκοπής εξασθενίζονται οι ανεπιθύμητες συχνότητες. Π.χ. πολλές φορές είναι απαραίτητο να εξασθενήσουμε τα 50 Hz ή τα 400 Hz που προέρχονται από το δίκτυο ή στη δεύτερη περίπτωση από έναν κινητήρα.




**Σχήμα 16.** ΦΖΑ (στενής) ή δοντιού

Η συνάρτηση μεταφορά ενός φίλτρου στενής ζώνης αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$H(jf) = \frac{\left(\frac{jf}{f_0}\right)^2 + 1}{\left(\frac{jf}{f_0}\right)^2 + \frac{1}{Q}\left(\frac{jf}{f_0}\right) + 1} \qquad (3.11.1)$$

όπου Q είναι ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου και $f_0$ η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου. Η συχνότητα $f_0$, του φίλτρου δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C\sqrt{R_1 R_2}} \qquad (3.11.2)$$

Οι τύποι υπολογισμού του φίλτρου αποδεκνύεται ότι δίνονται από τους τύπους:

$$R_1 = \frac{1}{2Q\,\omega_0 C} \qquad (3.11.3)$$

$$R_2 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \qquad (3.11.4)$$

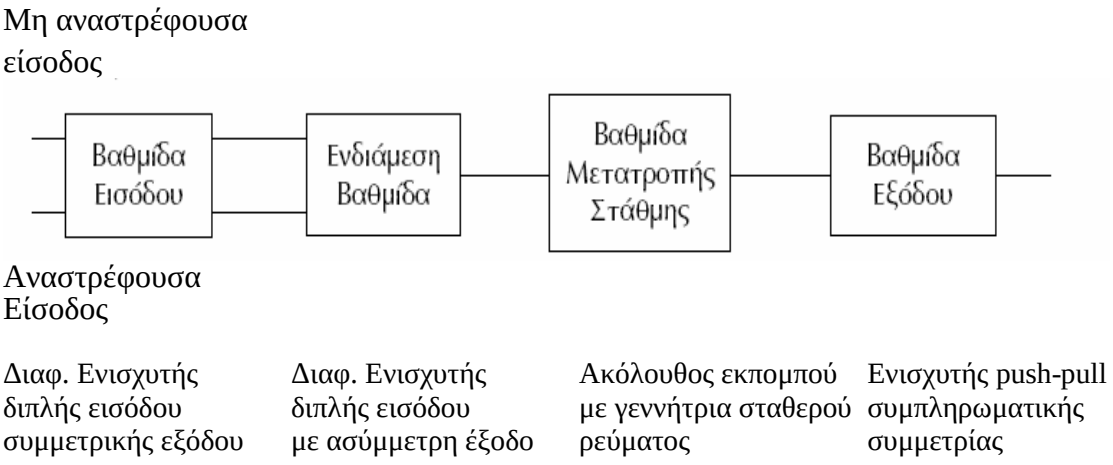
$$R_4 = 2Q^2 R_3 \qquad (3.11.5)$$

δεχόμενοι κατάλληλες τιμές των C και $R_3$.

# 4. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

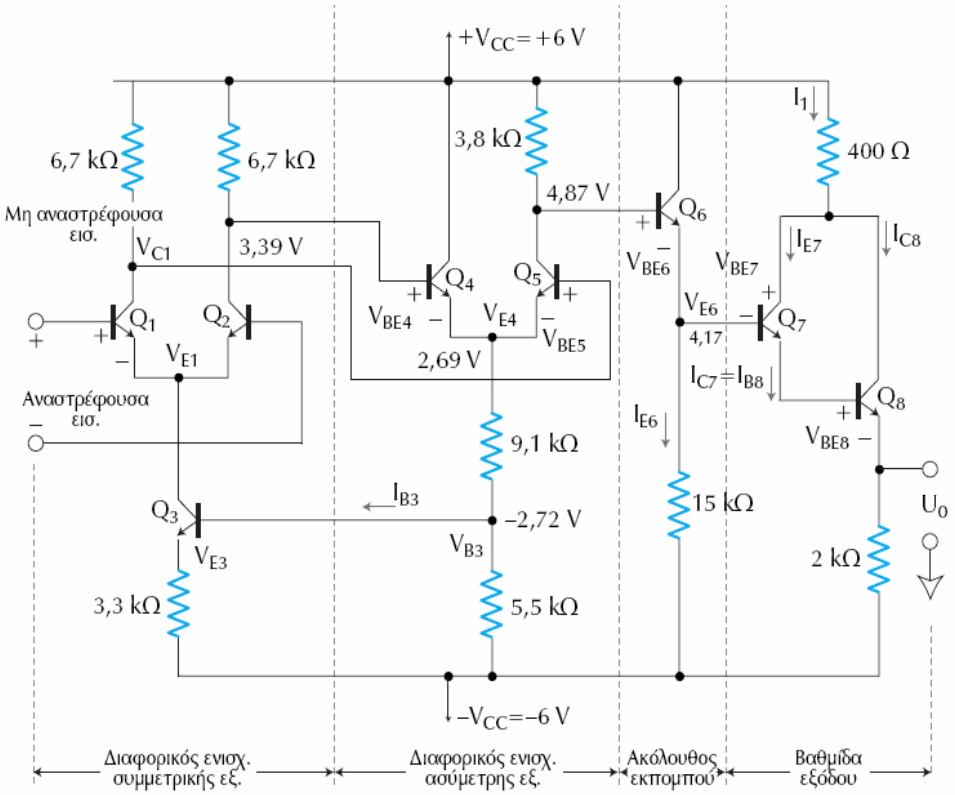
## 4.1 Εισαγωγή

Ο Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ) είναι ένα από τα πιο χρήσιμα ηλεκτρονικά ενεργά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα στις χαμηλές και μέσες συχνότητες. Οι τελεστικοί ενισχυτές οφείλουν το όνομά τους στο γεγονός ότι συνδυαζόμενοι με έναν ελάχιστο αριθμό εξωτερικών στοιχείων (αντιστάσεις, πυκνωτές, κτλ.) μπορούν να τελούν δηλ. να πραγματοποιούν μια ποικιλία γραμμικών και μη γραμμικών λειτουργιών. Βρίσκουν εφαρμογές σε διατάξεις σημάτων όπως ενισχυτές, φίλτρα, περιοριστές, συνθέτες [synthesizers], κτλ., σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών (ταλαντωτές, διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές, βρόχοι κλείδωσης φάσης, κτλ.), μετατροπείς αναλογικών και ψηφιακών σημάτων (τόσο A/D όσο και D/A) και κυκλώματα που εκτελούν διάφορες μαθηματικές πράξεις (ολοκληρωτές, πολλαπλασιαστές, προσθετές, αφαιρέτες, κτλ.).
Τυπικά, ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής dc μεγάλης ενίσχυσης που συνήθως αποτελείται από έναν ή περισσότερους διαφορικούς ενισχυτές που ακολουθούνται από μια βαθμίδα μετατροπής στάθμης και τέλος από τη βαθμίδα εξόδου. Το Σχ.1. δείχνει το δομικό διάγραμμα ενός τελεστικού ενισχυτή. Η πρώτη βαθμίδα είναι διαφορικός ενισχυτής με διπλή είσοδο και παρέχει την περισσότερη ενίσχυση του ΤΕ. Στους περισσότερους ενισχυτές η ενδιάμεση βαθμίδα είναι κι' αυτή με διπλή είσοδο, αλλά ασύμμετρη στην έξοδο (δηλ. με μια έξοδο). Επειδή είναι ενισχυτής dc, η dc τάση ηρεμίας στην έξοδο της βαθμίδας αυτής είναι πολύ πάνω από το δυναμικό της γης και γι' αυτό ο μετατροπέας στάθμης χρησιμοποιείται για να επαναφέρει αυτή την τάση στο μηδέν ως προς τη γη.




**Σχήμα 1.** Δομικό διάγραμμα ενός τυπικού ΤΕ

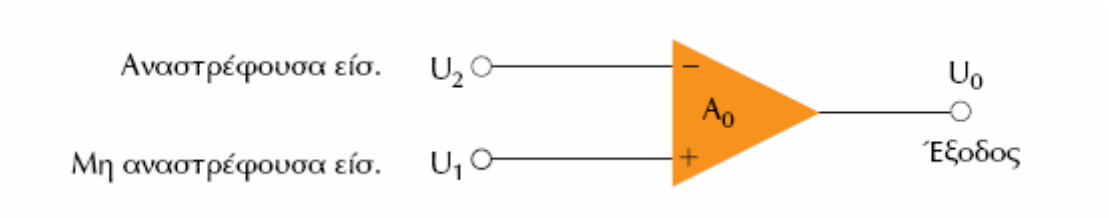
Όλες οι παραπάνω βαθμίδες είναι κατασκευασμένες σε μικροποιημένη δομή, με αρκετά τρανζίστορ, ο δε ΤΕ έχει τη μορφή μικροκυκλώματος (τσιπ) με διάφορες ακροληψίες ή ακροδέκτες που καταλήγουν σε αντίστοιχα "ποδαράκια".




**Σχήμα 2.** Εικόνα εμφάνισης και ισοδύναμο κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή MC1435

## 4.2 Συμβολισμοί - Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής

Το Σχ.3. εικονίζει το σύμβολο ενός ΤΕ, που έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Στο σχήμα δε δείχνονται οι ακροδέκτες της τάσης τροφοδοσίας ούτε οι υπόλοιποι ακροδέκτες. Επειδή η πρώτη βαθμίδα του ΤΕ είναι διαφορικός ενισχυτής, οι διαφορικές είσοδοι συμβολίζονται η μία με το ( + ) και η άλλη με το (-). Η ( + ) είσοδος είναι η μη αναστρέφουσα είσοδος. Αν στην είσοδο αυτή εφαρμόζεται ένα ac σήμα (ή μία dc τάση), στην έξοδο εμφανίζεται ένα ενισχυμένο σήμα που έχει την ίδια φάση (την ίδια πολικότητα) με την τάση εισόδου. Αν όμως το ίδιο αυτό σήμα εφαρμόζεται στην είσοδο (-), άρα στην έξοδο εμφανίζεται σήμα εξόδου ενισχυμένο και με διαφορά φάσης 180° (αντίθετη πολικότητα) ως προς την είσοδο.




**Σχήμα 3.** Σχηματικό σύμβολο του ΤΕ

Όπου:
$u_1$ = η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο
$u_2$ = η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο
$u_0$=η τάση εξόδου

(Όλες αυτές οι τάσεις μετρώνται ως προς γη).

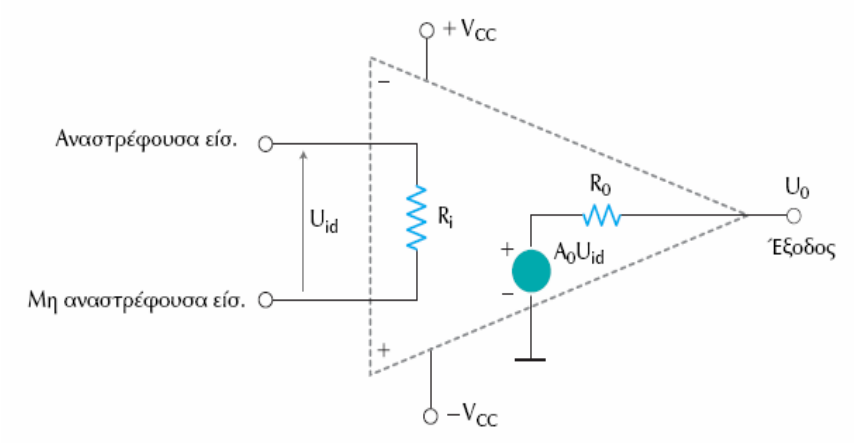
$A_0$ = η διαφορική ενίσχυση μεγάλων σημάτων του ΤΕ, η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

Ο ιδανικός ΤΕ είναι ένα (εξιδανικευμένο) θεωρητικό μοντέλο ΤΕ με τα εξής χαρακτηριστικά:

**1.** Άπειρη διαφορική ενίσχυση $A_0$.
**2.** Άπειρη αντίσταση εισόδου $R_i$, ώστε οποιοδήποτε σήμα να ενισχύεται κανονικά, χωρίς να υπάρχει πρόβλημα προσαρμογής με την προηγούμενη βαθμίδα.
**3.** Μηδενική αντίσταση εξόδου $R_0$, ώστε η έξοδος να μπορεί να οδηγήσει χωρίς πρόβλημα προσαρμογής οποιαδήποτε επόμενη βαθμίδα.
**4.** Μηδενική τάση εξόδου για μηδενική τάση εισόδου.
**5.** Άπειρο εύρος διέλευσης συχνοτήτων, ώστε να ενισχύεται οποιοδήποτε σήμα συχνότητας από 0 έως $\infty$ Hz χωρίς υποβιβασμό.
**6.** Άπειρο λόγο κοινού τρόπου, ώστε ο θόρυβος της τάσης εξόδου κοινού τρόπου να είναι μηδέν.
**7.** Άπειρο ρυθμό κλίσης (slew rate), ώστε η αλλαγή της τάσης εξόδου να γίνεται ταυτόχρονα με την αλλαγή της τάσης εισόδου.

Υπάρχουν πάντως πρακτικοί ΤΕ που μπορούν να προσεγγίσουν αρκετά όλα τα χαρακτηριστικά του ιδανικού ΤΕ χρησιμοποιώντας αρνητική ανασύζευξη. Ιδιαίτερα η αντίσταση εισόδου, εξόδου και το εύρος διέλευσης συχνοτήτων μπορούν να προσεγγίσουν πολύ τις ιδανικές αυτές τιμές.

Το Σχ.4 δείχνει το απλό ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού ΤΕ. Το κύκλωμα περιλαμβάνει σημαντικά στοιχεία από τα δεδομένα του κατασκευαστή: $A_0$, $R_i$ και $R_0$. Η $A_0u_{id}$ είναι η ισοδύναμη τάση της πηγή Thevenin και $R_0$ είναι η αντίστοιχη ισοδύναμη αντίσταση που βλέπουμε στην έξοδο του ΤΕ.




**Σχήμα 4.** Ισοδύναμο κύκλωμα ΤΕ

### 4.2.1 Πραγματικός Τελεστικός Ενισχυτής

Στην πράξη, οι πραγματικοί τελεστικοί ενισχυτές πλησιάζουν προσεγγιστικά τα χαρακτηριστικά που ισχύουν για τον ιδανικό ΤΕ. Δηλαδή έχουν μεγάλη (αντί ∞) διαφορική ενίσχυση $A_0$ μεγάλη (αλλά όχι ∞), αντίσταση εισόδου $R_i$ μεγάλη (αλλά όχι ∞) αντίσταση εξόδου, $R_0$ μικρή (αλλά όχι ∞) εύρος διέλευσης συχνοτήτων BW μικρό (αλλά όχι ∞). Άρα η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$u_0 = A_0 u_{id} = A_0 (u_2 - u_1) \qquad (4.2.1)$$

όπου:

$A_0$= η ενίσχυση τάσης ή διαφορική απολαβή ανοικτού βρόχου

$u_{id}$ = η διαφορική τάση εισόδου

$u_1$ = η τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου ως προς τη γη

$u_2$ = η τάση της αναστρέφουσας εισόδου ως προς τη γη

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η τάση εξόδου $u_0$ είναι ανάλογη της(αλγεβρικής) διαφοράς των δυο τάσεων εισόδου. Δηλαδή ο ΤΕ ενισχύει τη διαφορά μεταξύ των δυο τάσεων εισόδου και όχι τις ίδιες τις τάσεις αυτές. Για τον λόγο αυτό η πολικότητα της τάσης εξόδου εξαρτάται από την πολικότητα της διαφοράς των τάσεων εισόδου.

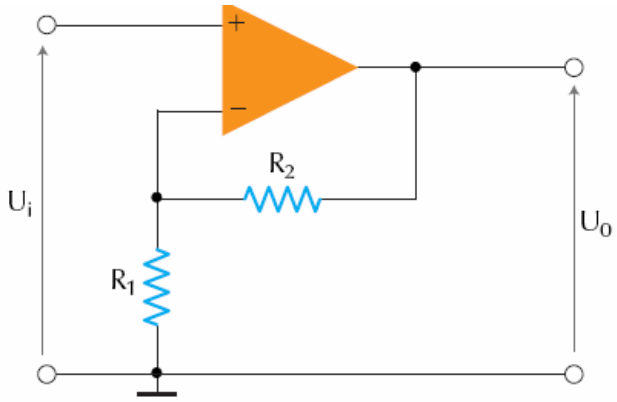
## 4.3 Μη αναστρέφων ενισχυτής

Η ενίσχυση ανοικτού βρόχου $A_0$ του πραγματικού ΤΕ είναι πολύ μεγάλη. Για αυτό το λόγο τα πολύ μικρά σήματα (της τάξης του μV ή και μικρότερα) με χαμηλή συχνότητα μπορούν να ενισχύονται άνετα χωρίς παραμόρφωση. Τα σήματα όμως αυτά είναι πολύ επιδεκτικά στο θόρυβο.

Εκτός αυτού, η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου του ΤΕ δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την τάση τροφοδοσίας λόγω της μεγάλης παραγωγής των ΤΕ από τους κατασκευαστές.

Επιπλέον, το εύρος διέλευσης συχνοτήτων (δηλ. η ζώνη των συχνοτήτων για την οποία η ενίσχυση διατηρείται σταθερή) για τους περισσότερους ΤΕ είναι σχεδόν αμελητέα (πολύ μικρή). Για το λόγο αυτό πρακτικά οι ΤΕ με ανοικτό βρόχο δε χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ac. Π.χ. το εύρος διέλευσης του 741C είναι περίπου 5 Hz, πράγμα που σημαίνει ότι αυτός ο ΤΕ δεν είναι χρήσιμος για καμιά ουσιαστικά πρακτική εφαρμογή.

Για τους πιο πάνω λόγους εφαρμόζεται συνήθως στον ΤΕ αρνητική ανασύζευξη, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ac. Το Σχ.5. δείχνει τον ΤΕ με συνδεσμολογία μη αναστρέφουσα και ανασύζευξη.




**Σχήμα 5.** Μη αναστρέφων ενισχυτής με ΤΕ

Τότε αποδεικνύονται, ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$A_f = \frac{V_0}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (4.3.1)$$

$$R_{if} = R_i\,(1 + \beta\, A_0) \qquad (4.3.2)$$

$$R_{0f} = \frac{R_0}{1 + \beta\, A_0} \qquad (4.3.3)$$

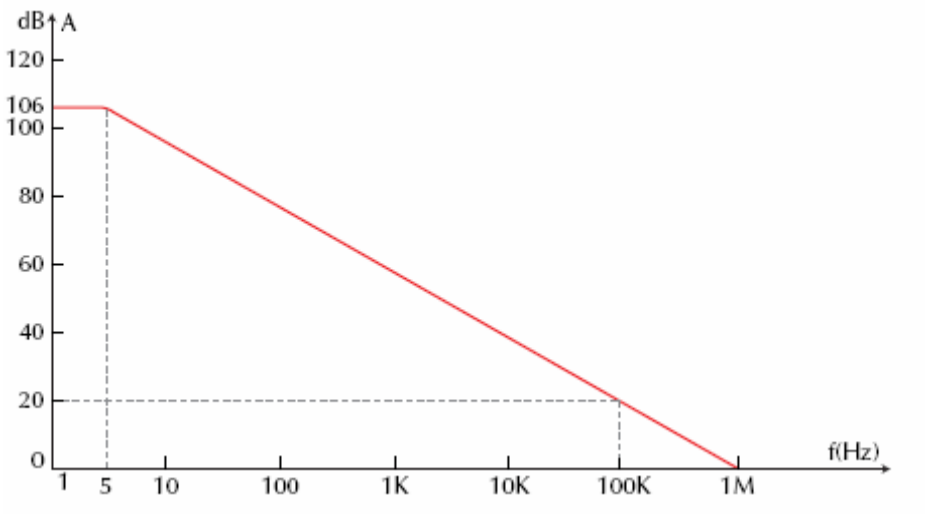
όπου $A_f$ = η ενίσχυση τάσης κλειστού βρόχου
$R_{if}$ = η ολική αντίσταση εισόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη
$R_{0f}$ = η ολική αντίσταση εξόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη
και β = το ποσοστό ή συντελεστής ανασύζευξης, που είναι ίσο με

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \qquad (4.3.4)$$

### 4.3.1 Εύρος Διέλευσης Συχνοτήτων με Ανασύζευξη

Το εύρος διέλευσης συχνοτήτων (BW) ενός ενισχυτή, ορίζεται ως η ζώνη (περιοχή) συχνοτήτων για την οποία η ενίσχυση παραμένει σταθερή. Οι κατασκευαστές γενικά είτε καθορίζουν το γινόμενο ενίσχυση x εύρος διέλευσης είτε δίνουν την καμπύλη απόκρισης της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου $A_0$ ως προς τη συχνότητα f. Το Σχ.6. δείχνει την εξάρτηση της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου ως προς τη συχνότητα για τον TE 741C. Από την καμπύλη αυτή φαίνεται ότι η ενίσχυση ($A_0$) είναι 200000 (106 dB) και το εύρος διέλευσης περίπου 5 Hz, άρα το γινόμενο ενίσχυση x εύρος διέλευσης είναι 1 MHz (200000 x 5 Hz). Στο άλλο άκρο της καμπύλης η ενίσχυση είναι 1 και η συχνότητα 1 MHz, άρα το εύρος διέλευσης είναι πάλι 1 MHz. Επομένως, το γινόμενο ενίσχυση x εύρος διέλευσης είναι σταθερό. Για τον TE 741, η συχνότητα αποκοπής $f_1$, στην οποία η ενίσχυση $A_0$ είναι 3 dB κάτω από την τιμή της στα 0 Hz είναι ίση με 5 Hz. Αποδεικνύεται ότι η συχνότητα αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$f_{1f} = (1 + \beta\ A_0)\ f_1 \qquad (4.3.7)$$

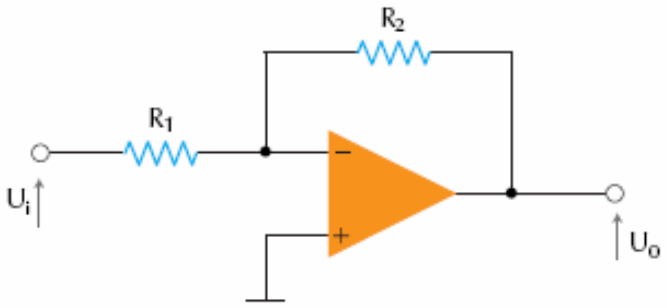



**Σχήμα 6.** Καμπύλη απόκρισης κατά συχνότητα για τον ΤΕ 741

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι το εύρος διέλευσης μη-αναστρέφοντα ενισχυτή με ΤΕ και ανασύζευξη αυξάνει πολλαπλασιαζόμενο επί το συντελεστή $(1 + \beta A_0)$.

## 4.4 Ενισχυτής με αναστροφή

Το Σχ.7. δείχνει το κύκλωμα του (κλειστού βρόχου) ΤΕ συνδεσμολογημένος ως αναστρέφων ενισχυτής. Το κύκλωμα αυτό δημιουργεί διαφορά φάσης 180° μεταξύ του σήματος της εισόδου και της εξόδου, άρα αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης εισόδου. Αποδεικνύεται, ότι ισχύουν οι εξής σχέσεις:




**Σχήμα 7.** ΤΕ συνδεσμολογίας ως αναστρέφων ενισχυτής

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (4.4.1)$$

$$R_{if} = R_1 + \frac{R_2}{1 + A_0} // R_i \cong R_1 \tag{4.4.2}$$

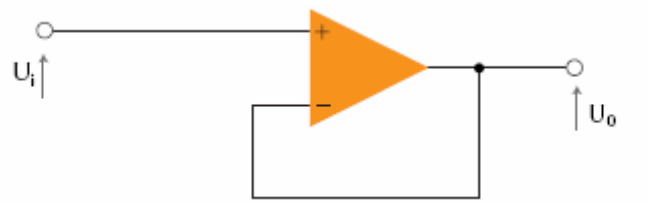
$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + \beta A_0} \tag{4.4.3}$$

$$f_{1f} = (1 + \beta A_0) f_1 \tag{4.4.4}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{4.4.5}$$

## 4.5 Ακόλουθος τάσης

Όπως φαίνεται από την Εξ.(4.3.1) η μικρότερη ενίσχυση που μπορεί να επιτευχθεί με το μη-αναστρέφοντα ενισχυτή και είναι ίση με 1. Αυτή η περίπτωση, που συμβαίνει, όταν $R_2 = 0$, ο ενισχυτής όμως αυτός έχει την ικανότητα να κάνει καλή προσαρμογή αντιστάσεων. Όταν ο ενισχυτής συνδεσμολογείται με ενίσχυση μονάδα, όπως στο Σχ.8, ονομάζεται ακόλουθος τάσης, επειδή η τάση εξόδου είναι τότε ίση και συμφασική με την τάση εισόδου, δηλαδή η τάση εξόδου "ακολουθεί" συνεχώς και επακριβώς την τάση εισόδου του.




**Σχήμα 8.** Ο ΤΕ συνδεσμολογημένος ως ακόλουθος τάσης

Αποδεικνύεται, ότι ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

$$A_f = \frac{A_0}{1 + A_0} \cong 1 \tag{4.5.1}$$

$$R_{if} = (1 + A_o)\, R_i \cong A_o R_i \tag{4.5.2}$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_o} \cong \frac{R_o}{A_o} \tag{4.5.3}$$

$$f_{1f} = (1 + A_o)\, f_1 \cong A_o f_1 \tag{4.5.4}$$

Παρατηρούμε, από τις Εξ.(4.5.2) και (4.5.3), ότι (αφού πάντα $Ri >> R_o$) η αντίσταση εισόδου του ακόλουθου τάσης θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση εξόδου του. Άρα, ο ακόλουθος τάσης απομονώνει μια μεγάλη αντίσταση από μια μικρή. Γι' αυτό ο ακόλουθος τάσης ονομάζεται και απομονωτής (buffer). Έτσι, όταν παρεμβάλλεται μεταξύ δύο κυκλωμάτων, εξουδετερώνει τη μεγάλη αντίσταση εξόδου του πρώτου κυκλώματος και επιτρέπει τη φόρτωση του με πολύ μικρή αντίσταση φόρτου.

## 4.6 Λόγος κοινού τρόπου

Κανονικά ο ΤΕ χρησιμοποιείται για να ενισχύει τη διαφορά μεταξύ των σημάτων των δυο εισόδων του. Επομένως, λειτουργεί με το διαφορικό τρόπο. Δε θα πρέπει λοιπόν να ενισχύει τα σήματα, π.χ. τάσεις θορύβου, που εμφανίζονται ταυτόχρονα και στις δυο εισόδους του και συνεπώς αυτά δεν εμφανίζονται στην έξοδο του.

Το κύκλωμα του Σχ.19. δείχνει τις δυο εισόδους του ΤΕ συνδεδεμένες μαζί και διεγειρόμενες από το κοινό σήμα $u_{cm}$. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης λέγεται "κοινός τρόπος". Στην ιδανική περίπτωση η αντίστοιχη έξοδος θα είναι μηδέν. Στην πράξη όμως αυτό δε συμβαίνει. Ο λόγος της τάσης εξόδου κοινού τρόπου, ενός πραγματικού ΤΕ, προς την αντίστοιχη τάση εισόδου είναι η ενίσχυση τάσης κοινού τρόπου, $A_{cm} = u_0 / u_{cm}$. Για να χαρακτηρισθεί το πόσο πολύ πλησιάζει ένας πραγματικός ΤΕ τη συμπεριφορά ενός ιδανικού ΤΕ από πλευράς λειτουργίας κοινού τρόπου χρησιμοποιείται ο λόγος κοινού τρόπου (Common Mode Rejection Ratio), που ορίζεται ως ο λόγος της ενίσχυσης dc ανοικτού βρόχου, $A_0$, προς την ενίσχυση κοινού τρόπου, δηλ.

$$CMRR = \frac{|A_0|}{|A_{cm}|} \tag{4.6}$$

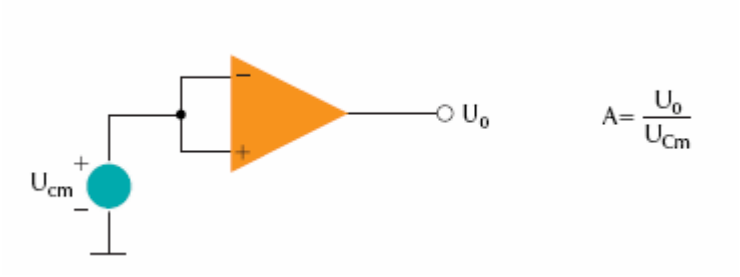
ή, σε dB,

$$CMRR = 20\log\left(\frac{|A_0|}{|A_{cm}|}\right) \qquad (4.6.1)$$

Τυπικές τιμές του CMRR είναι μεταξύ 80 έως 100 dB.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος CMRR τόσο περισσότερο ιδανικός είναι ο ΤΕ.

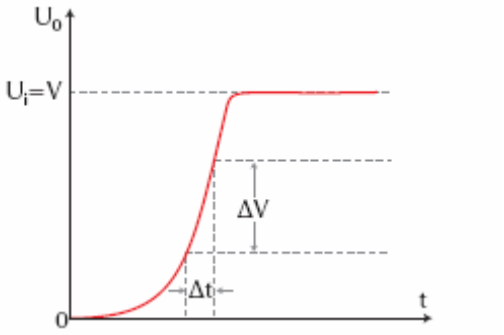
Με κατάλληλη κυκλωμάτωση είναι δυνατό να αυξηθεί πολύ ο λόγος CMRR. Τέτοια είναι η περίπτωση του διαφορικού ενισχυτή του Σχ.10, όπου ο λόγος κοινού τρόπου αναμένεται να είναι άπειρος. Στην πράξη όμως, επειδή οι αντιστάσεις έχουν ανοχή στις τιμές τους, ο CMRR δεν είναι άπειρος, αλλά απλώς μεγάλος.




**Σχήμα 19.** ΤΕ συνδεσμολογημένος σαν κοινού τρόπου

## 4.7 Ρυθμός κλίσης

Επειδή ο πρακτικός ΤΕ έχει απόκριση συχνότητας που εξαρτάται από τη συχνότητα, η έξοδος του δεν είναι βηματική τάση, όταν η είσοδος του, είναι βηματική, Σχ.20. Αυτό οφείλεται στη μικρή εσωτερική χωρητικότητα του ΤΕ.




**Σχήμα 20.** Ρυθμός κλίσης ΤΕ

Ο ρυθμός κλίσης (Slew Rate, SR) ορίζεται από το πιο πάνω σχήμα και είναι:

$$SR = \frac{\Delta u_0}{\Delta u_i} \tag{4.7}$$

Αποδεικνύεται, ότι η μέγιστη συχνότητα με την οποία δουλεύει ικανοποιητικά ο ΤΕ δίνεται από τη σχέση:

$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi \times K \times u_i} \tag{4.7.1}$$

όπου,

SR = είναι ο ρυθμός κλίσης

K = είναι η ενίσχυση του ενισχυτή

$u_i$ = η τάση εισόδου από κορυφή σε κορυφή (p-p).

# 5. SPICE

## 5.1 Εισαγωγή

Το Orcad-PSpice είναι ένα ευρέως διαδεδομένο και διεθνώς αποδεκτό πρόγραμμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξομοίωσητης συμπεριφοράς των κυκλωμάτων σε επίπεδο μοντέλων. Με τον τρόπο αυτόεπιτυγχάνεται η ανάλυση πολύπλοκων κυκλώματων σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, οδηγώντας σε αποτελέσματα πολύ ακριβή, πάντα μέσα στα πλαίσια τωνπροσεγγίσεων. Από τη στιγμή που ο σχεδιασμός ενός κυκλώματος έχει γίνει σε πρώτη προσπάθεια με κλασσικές διαδικασίες, η επαλήθευση της λειτουργίας του
κυκλώματος, μπορεί να γίνει με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω τουπρογράμματος ανάλυσης PSpice. Επαναληπτικές τροποποιήσεις και αναλύσεις τουκυκλώματος μπορεί να οδηγήσουν γρήγορα και εύκολα στον τελικό σχεδιασμό. Έτσι πραγματοποιείται ο σχεδιασμός κυκλωμάτων, μέσω προγραμμάτων ανάλυσης.

Η εξοικείωση με τα προγράμματα ανάλυσης κυκλώματων, συμπεριλαμβανομένου και του προγράμματος PSpice, δημιουργεί την αυτοπεποίθηση για τη μελέτη πολύπλοκων κυκλωμάτων και συστημάτων.Ταυτόχρονα παρέχει τη βεβαιότητα ότι, τα αποτελέσματαεξομοίωσης των κυκλωμάτων θα βρίσκονται κοντά στα προσδοκώμενα αποτελέσματα στην πράξη.

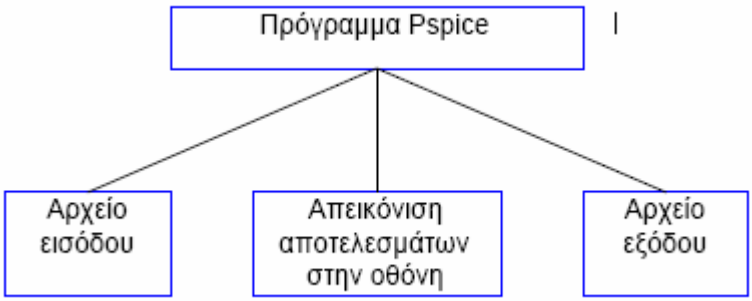
Ένας επιπλέον λόγος που συνηγορεί στο σχεδιασμό κυκλωμάτων με τη χρήση προγραμμάτων ανάλυσης είναι, ότι ο σχεδιαμός στον πάγκο δεν παρέχει στο χρήστη τα διαθέσιμα στοιχεία ως διακριτά, με αποτέλεσμα στη σημερινή εποχή να είναι αδιανόητο να προχωρήσει κανείς στο σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων χωρίς τη χρήση υπολογιστών.

Έτσι λοιπόν το Orcad-PSpice Lite Edition, αλλά και κάθε έκδοση του προγράμματος Spice, έχει ως σκοπό την εξομοίωση κυκλωμάτων για μη γραμμικές dc, μη γραμμικές transient και γραμμικές ac αναλύσεις. Τα κυκλώματα μπορεί να περιλαμβάνουν αντιστάτες, πυκνωτές, πηνία, αμοιβαίους επαγωγείς, ανεξάρτητες και εξαρτημένες πηγές ρεύματος και τάσεως, όπως επίσης και ημιαγωγά στοιχεία, λόγου χάρη διόδους και τρανζίστορ.

## 5.2. Φιλοσοφία του PSpice

Αρχικά γίνεται η εγκατάσταση του προγράμματος Orcad-PSpice και συγκεκριμένα της έκδοσης Lite Edition σε περιβάλλον PSpice AD και σε

περιβάλλον Capture Cis. Με την έναρξη της διαδικασίας ανάλυσης ο χρήστηςεισάγει στον υπολογιστή τα δεδομένα της τοπολογίας, είτε υπό τη μορφή κειμένου ή υπό τη μορφή σχηματικού, καθώς και το είδος ανάλυσης, που επιδιώκει. Έτσι δημιουργείται το λεγόμενο αρχείο εισόδου. Μετά την εισαγώγη της τοπολογίας του κυκλώματος, η μαθηματική περιγραφή του γίνεται με μήτρες περιγραφής, μέσω του προγράμματος, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Οι μήτρες περιγραφής προσδιορίζονται με βάση την ανάλυση των κόμβων. Από τη στιγμή, που η μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος έχει ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα αναλαμβάνει τον προσδιορισμό των τάσεων όλων των κόμβων και των ρευμάτων όλων των κλάδων. Αυτό επιτυγχάνεται με επίλυση, μέσω αριθμητικής ανάλυσης, του συστήματος των γραμμικών ή μη γραμμικών εξισώσεων, που περιγράφει το κύκλωμα. Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής του αρχείου εισόδου και της εκτέλεσης του προγράμματος, ο χρήστης έχει στη διάθεσή του το γραφικό περιβάλλον (όπου αναλαμβάνει την απεικόνιση των αποτελεσμάτων κατά ποικίλο τρόπο) και το αρχείο εξόδου (όπου περιλαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες, που αφορουν τη λειτουργία του κυκλώματος). Μια σχηματική παράσταση της δομής του προγράμματος Pspice παρουσιάζεται στο σχήμα 1.



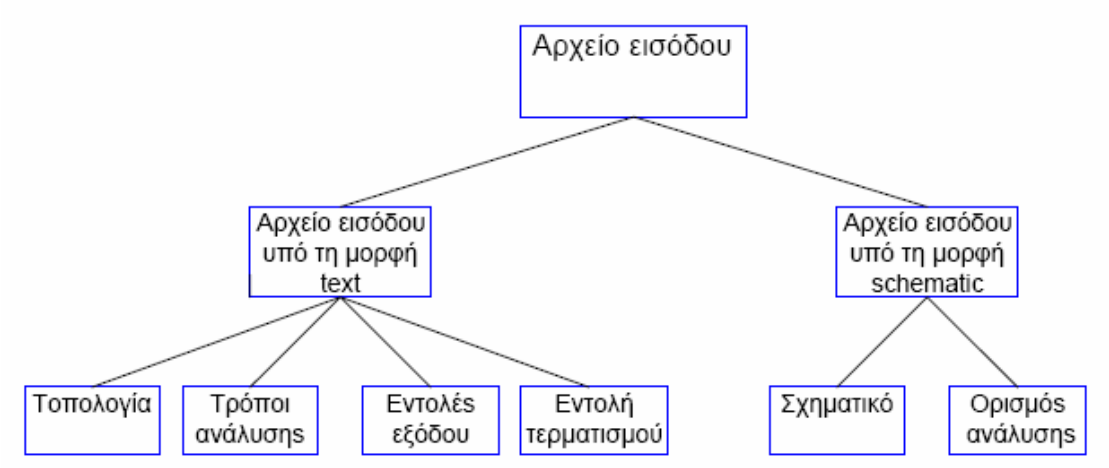

**Σχήμα 1.**Σχηματική παράσταση του προγράμματος Pspice.

## 5.3 Αρχείο εισόδου ενός κυκλώματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε το αρχείο εισόδου αποτελεί την έναρξη της διαδικασίας ανάλυσης. Το αρχείο αυτό μπορεί να εισαχθεί στον υπολογιστή, είτε με τη μορφή κειμένου (text) μέσω του προγράμματος PSPICE AD, είτε με σχηματικό τρόπο (schematic) μέσω του προγράμματος PSPICE CIS (capture).

Η εισαγωγή του αρχείου εισόδου που γίνεται με τη μορφή κειμένου περιλαμβάνει κάποια βήματα, προκειμένου να είναι αναγνωρίσιμο από το ίδιο το πρόγραμμα. Τα βήματα αυτά εστιάζονται στην εισαγωγή της

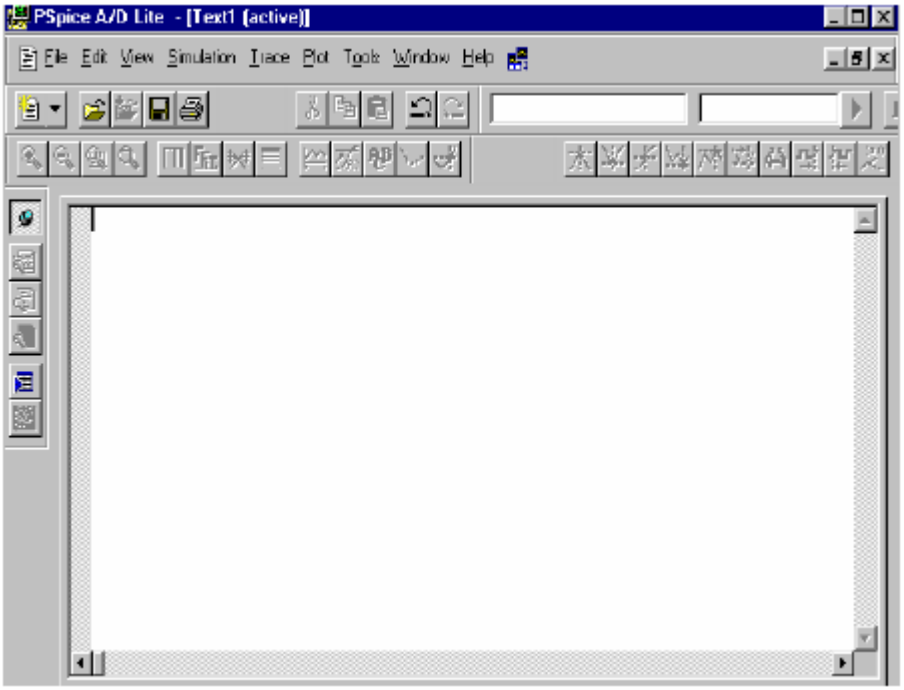
τοπολογίας του κυκλώματος, στην εισαγωγή του είδους ανάλυσης που επιδιώκει ο χρήστης, όπως επίσης και στην εισαγωγή των εντολών εξόδου και της εντολής τερματισμού. Κατά αναλογία και η εισαγωγή του αρχείου εισόδου που πραγματοποιείται με τη μορφή σχηματικού περιλαμβάνει, το σχηματικό και τον ορισμό του είδους ανάλυσης. Για να γίνουν σαφέστερα όλα αυτά ακολουθουν στις επόμενες σελίδες του κεφαλαίου αυτού, η αναλυτικήπαρουσίασή τους. Το σχήμα 2 αποτέλει μια αναπαράσταση της ανάπτυξης που έπεται να ακολουθήσει.




**Σχήμα 2.** Σχηματική παράσταση του αρχείου εισόδου.

### 5.3.1 Αρχείο εισόδου υπο τη μορφή text

Αρχικά γίνεται η εγκατάσταση του προγράμματος Orcad-PSpice Lite Edition.Ο χρήστης πλέον είναι σε θέση να εισάγει την τοπολογία του κυκλώματος, αφού μπει στο περιβάλλον PSpice AD. Για το σκοπό αυτό εισέρχεται στο πρώτο παράθυρο του προγράμματος επιλέγοντας διαδοχικά από το κεντρικό menu, file,new, text file και θα παρουσιαστεί το παράθυρο του σχήματος 3.




**Σχήμα 3.** Κεντρικό παράθυρο του περιβάλλοντος Pspice AD.

Στο παράθυρο αυτό ο χρήστης γράφει το αρχείο εισόδου. Η τοπολογία ενός κυκλώματος πρέπει να γράφεται σε συγκεκριμένη μορφή και να τηρεί κάποιες βασικές προυποθέσεις προκειμένου να μπορεί να διαβαστεί από το πρόγραμμα PSpice. Έτσι ο χρήστης πρέπει να έχει κατά νου ότι:
**1)** Η πρώτη γραμμή ενός αρχείου εισόδου δεσμεύεται υποχρεωτικά για τον τίτλο του αρχείου.
**2)** Ακολουθεί η εισαγωγή των στοιχείων του κυκλώματος και των πηγών. Αυτά χαρακτηρίζονται και διακρίνονται μεταξύ τους από το πρώτο γράμμα που τα ορίζει.
**3)** Για τα ηλεκτρονικά στοιχεία πρέπει να οριστεί υποχρεωτικά το μοντέλο, που τα περιγράφει. π.χ για το BJT τρανζίστορ Q1, με όνομα μοντέλου Qtest, που είναι τύπου npn, ορίζουμε το μοντέλο του με μία εντολή ελέγχου,ως: . model qtest npn (……..)
Μέσα στην παρένθεση τίθενται οι ηλεκτρικές παράμετροι του τρανζίστορ, που είτε είναι γνωστές από τον κατασκευαστή του στοιχείου είτε τίθενται αυθαίρετα από το χρήστη για πειραματισμό. Αν δεν

οριστούν παράμετροι του τρανζίστορ, τότε, για όσες εξ'αυτών δεν υπάρχουν, το πρόγραμμα καλεί τις εξ'ορισμού τιμές που έχει καταχωρημένες. Μία τελεία (.) πρέπει να υπάρχει πριν τον ορισμό κάθε μοντέλου. Τα σημαντικότερα στοιχεία που μπορούν να υπάρχουν στο κύκλωμα είναι :

R : αντιστάτης (resistor)
C :πυκνωτής (capacitor)
L : επαγωγός (inductor)
D : δίοδος (diode)
Q : τρανζίστορ
V : ανεξάρτητη πηγή τάσης
I : ανεξάρτητη πηγή ρεύματος

Αυτά ορίζονται ως ακολούθως :

Αντιστάτης : R N1 N2 τιμή (N1, N2: οι κόμβοι του κυκλώματος ανάμεσα στους οποίους υπάρχει η αντίσταση).
Πυκνωτής : C N1 N2 τιμή
Επαγωγός : L N1 N2 τιμή
Δίοδος : D N1 (ανόδου) N2 (καθόδου) όνομα μοντέλου
.model όνομα μοντέλου (παράμετροι μοντέλου)
τρανζίστορ : Q N1 (συλλέκτη) N2 (βάσης) N3 (εκπομπού) όνομα μοντέλου
Πηγή τάσεως : V N+ N- (DC) ή (AC) τιμή (ανάλογα με το αν έχουμε συνεχή ή εναλασσομένη πηγή τάσεως)
Πηγή ρεύματος : I N- N+ (DC) ή (AC) τιμή (ανάλογα με το αν έχουμε συνεχή ή εναλασσομένη πηγή ρεύματος)

Οι αριθμητικές τιμές που παίρνουν τα στοιχεία του κυκλώματος, μπορεί να είναι ένα ακέραιο πεδίο (12, -44), ένα πεδίο κινητής υποδιαστολής (3.14159), είτε ένας ακέραιος ή κινητής υποδιαστολής αριθμός ακολουθούμενος από έναν ακέραιο εκθέτη (1e-14, 2.65e3), είτε ένα ακέραιος ή κινητής υποδιαστολής αριθμός ακολουθούμενος από συντελεστές κλίμακας. Γράμματα τα οποία δεν είναι συντελεστές κλίμακας και που αμέσως ακολουθούν έναν αριθμό αγνοούνται και γράμματα που αμέσως ακολουθούν ένα συντελεστή κλίμακας αγνοούνται. Ως εκ τούτο, 10, 10V, 10 Volts και 10Hz όλα αναπαριστάνουν τον ίδιο αριθμό και M, MA και Msec, όλα αναπαριστάνουν τον ίδιο συντελεστή κλίμακας. Για την κατανόηση της τοπολογίας εισάγονται μερικές εντολές με σχόλια, που εκκινούν με (*). Επίσης ως σχόλια θεωρούνται όλοι οι χαρακτήρες που ακολουθουν το σύμβολο (;). Κενές γραμμές στη δομή ενός αρχείου εισόδου αγνοούνται κατά την εκτέλεση. Επίσης, δεν υπάρχει διάκριση στη χρήσηκεφαλαίων ή μικρών γραμμάτων στο πρόγραμμα. Παρατήρηση: Δεν επιτρέπονται κόμβοι στον αέρα σ'ένα αρχείο εισόδου SPICE. Γι'αυτό, κάθε κόμβος

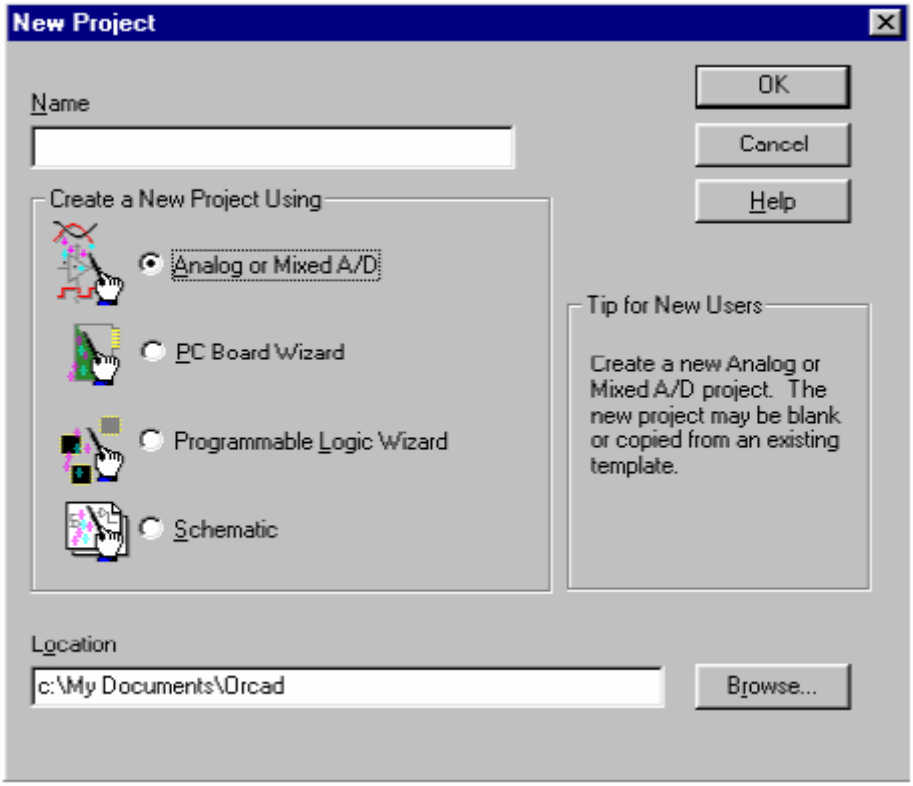
πρέπει να βρίσκεται σε κλείστο βρόχο. Επίσης, κάθε κόμβος πρέπει να έχει δρόμο προς τον κόμβο αναφοράς, που να επιτρέπει τη ροή συνεχούς ρεύματος.

### 5.3.2 Αρχείο εισόδου με σχηματικό τρόπο

Πέρα από την εισαγωγή του κυκλώματος υπό τη μορφή κειμένου, υπάρχει και η εισαγωγή αυτού με σχηματικό τρόπο. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται το περιβάλλον Capture Cis. Μόνο μέσα σε αυτό το χώρο μπορεί ο χρήστης να φτιάξει σχηματικό.

#### 5.3.2.1 Πως φτιάχνεται ένα σχηματικό χωρίς εξομοίωση

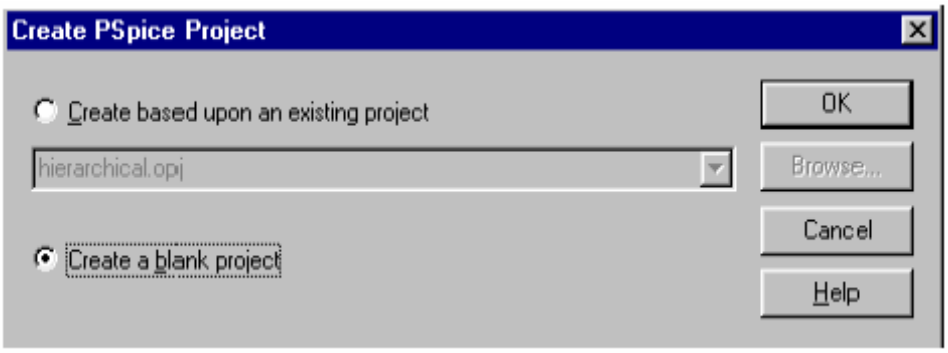
Αφού ο χρήστης εισέλθει στο πρώτο παράθυρο του περιβάλλοντος Capture Cis επιλέγει διαδοχικά από το κεντρικό menu, file, new, project και τότε θα εμφανιστεί το παράθυρο του σχήματος 4.



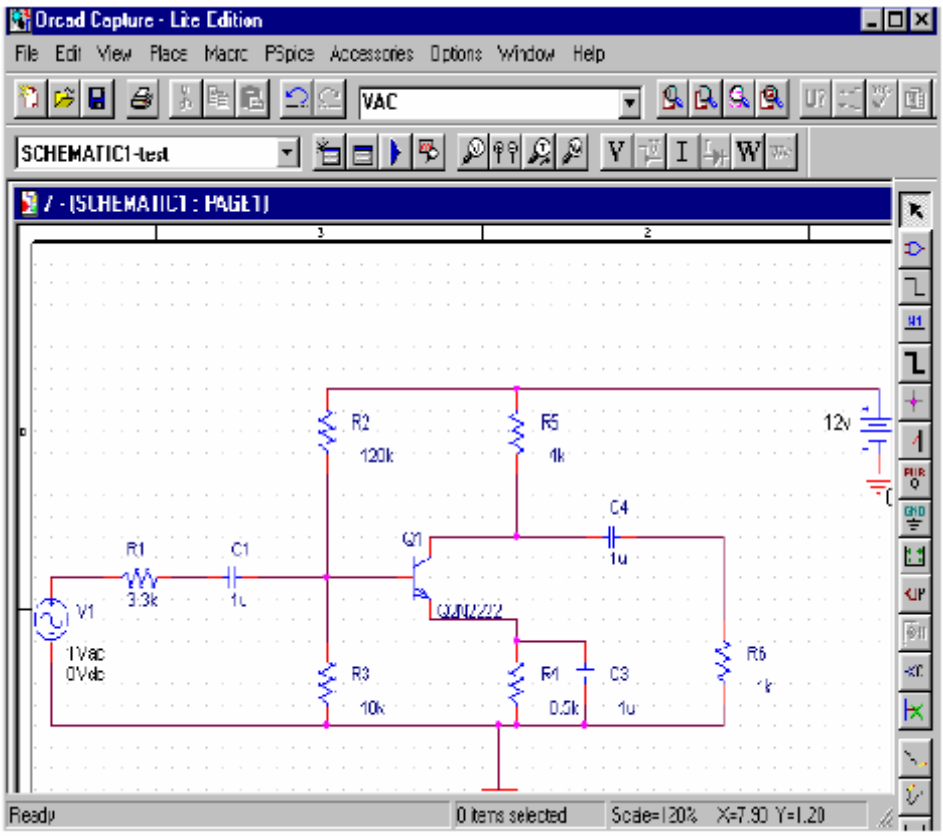

**Σχήμα 4.** Παράθυρο εισαγωγής ονόματος της εργασίας καθώς και του χώρου αποθήκευσης αυτής.

Ζητείται στο χρήστη να δώσει ένα όνομα στο σχηματικό καθώς και το χώρο που επιθυμεί να αποθηκευτεί. Κλικάροντας την επιλογή Analog or Mixed A/D και εν συνε-χεία πατώντας OK εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5, όπου εκεί επιλέγοντας την ένδειξη Creat a blank project

παρουσιάζεται το κεντρικό παράθυρο του Capture Cis (σχήμα 6). Βέβαια το κεντρικό παράθυρο δύναται να παρουσιαστεί με απευθείας κλικάρισμα στην επιλογή Schematic του σχήματος 4. Όταν όμως πρόκειται το σχεδια-ζόμενο κύκλωμα να χρησιμοποιηθεί για εξομοίωση τότε επιλέγεται απαραιτήτως η πρώτη διαδικασία.




**Σχήμα 5.**




**Σχήμα 6.** Κεντρικό παράθυρο του σχηματικού.

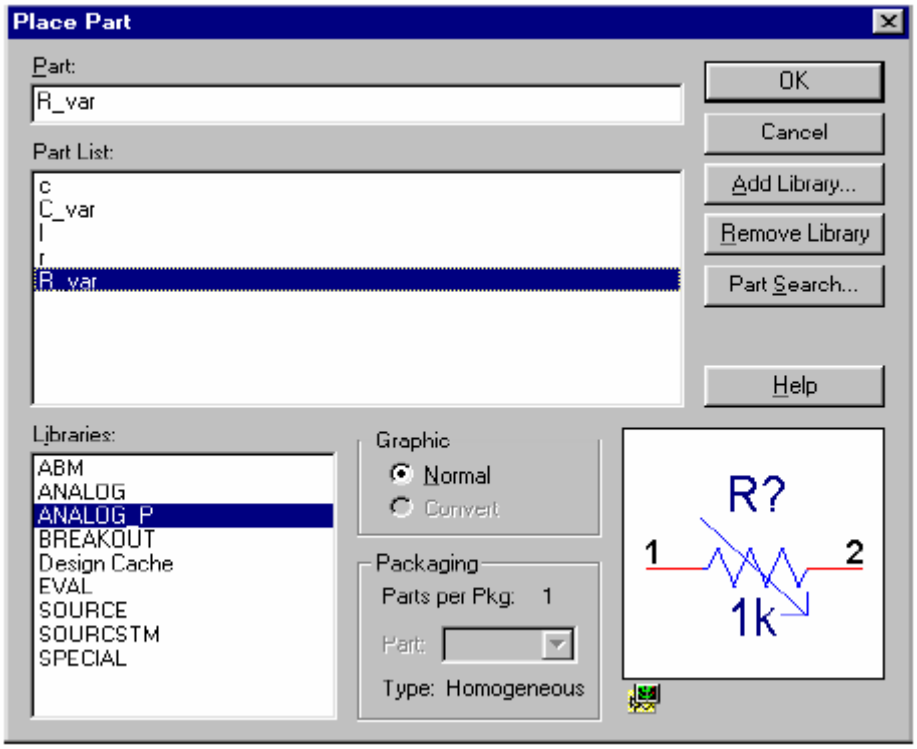
Δεξιά της οθόνης υπάρχει μία μπάρα όπου βρίσκονται όλες σχεδόν οι λειτουργίες του σχηματικού.Η μπάρα αυτή αποτελείται από συγκεκριμένα πλήκτρα, τα οποία φαί-νονται καλύτερα στο σχήμα 7. Το πρώτο πλήκτρο είναι ένα βελάκι, το οποίο πρέπει να είναι πατημένο όταν ο χρήστης δουλεύει στον κεντρικό χώρο του σχηματικού. Όταν αυ-τός

θελήσει να εισάγει στοιχείο του κύκλωμα πατάει το δεύτερο κουμπί. Τότε στο κέντρο της οθόνης εμφανίζεται ένα τετράγωνο όπως αυτό του σχήματος 8. Παρακάτω θα εξηγηθεί η όλη διαδικασία για την εύρεση στοιχείων που χρειάζονται στο κύκλωμα. Το τρίτο κατά σειρά πλήκτρο είναι για την καλωδίωση. Όταν είναι πατημένο μπορεί ο χρήστης να ενώσει με καλώδιο τα στοίχεια που ήδη έχει τοποθετήσει στο χώρο του σχηματικού. Με τα πλήκτρα PWR και GND γίνεται η δήλωση της ύπαρξης τροφοδοσίας και γείωσης. Τα έξι τελευταία πλήκτρα της δεξιάς αυτής μπάρας χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση σχημάτων και την εισάγωγή τίτλου (τελευταίο κουμπί).


**Σχήμα 7.** Δεξιά μπάρα του κεντρικού παραθύρου του Capture Cis.

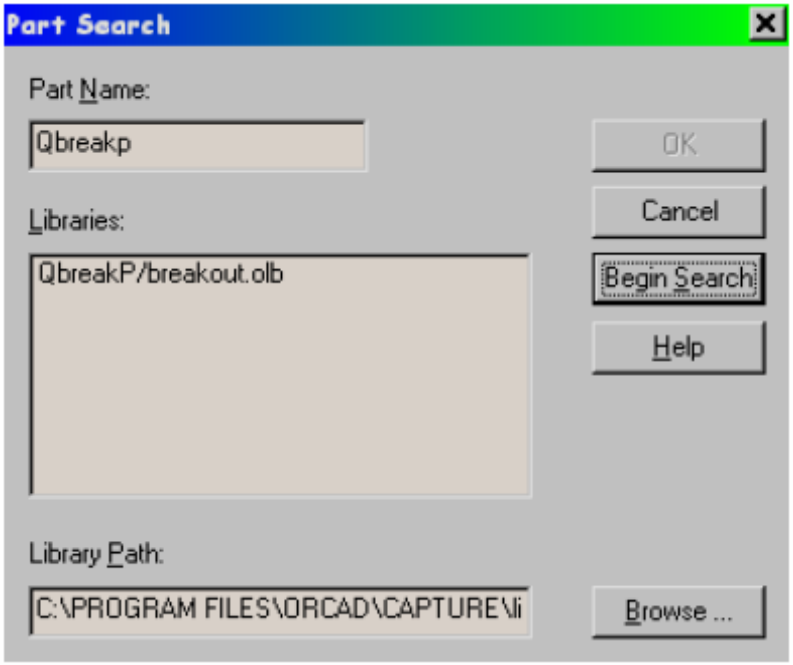
### 5.3.2.2 Επιλογή και εισαγωγή στοιχείου του κυκλώματος

Με την επιλογή του δεύτερου πλήκτρου της δεξιάς μπάρας, εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο του σχήματος 8.



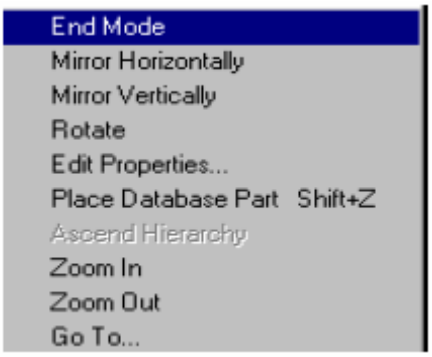

**Σχήμα 8.** Εύρεση στοιχείου.

Στο χώρο αυτό εμφανίζονται τρία μικρότερα τετράγωνα. Στο κάτω αριστερά είναι η λίστα με τις υπάρχουσες βιβλιοθήκες. Με το πρώτο άνοιγμα του παραθύρου δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη βιβλιοθήκη στο χρήστη, ενώ αυτές εμφανίζονται μέσω της επιλογής Add Library. Με την ενεργοποίηση της ένδειξης Remove Library δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς βιβλιοθηκών από το δεξί τετράγωνο του παραθύρου σε άλλο χώρο του προγράμματος. Στο κεντρικό τετράγωνο υπάρχουν τα στοιχεία που περιεχεί η βιβλιοθήκη που επέλεξε ο χρήστης, ενώ στο κάτω δεξιά τετράγωνο εμφανίζεται το αντίστοιχο σχηματικό κάθε στοιχείου. Με την εύρεση του επιθυμητού στοιχείου και επιλέγοντας την ένδειξη OK μεταφέρεται το στοιχείο στο σχηματικό. Με το Part Search μπορεί ο χρήστης αν γνωρίζει τον κωδικό ενός στοιχείου να το αναζητήσει σε όλες τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες του προγράμματος. Με το πάτημα του πλήκτρου εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο του σχήματος 9. Στο πεδίο Part Name ζητείται από το χρήστη να εισάγει το κωδικό όνομα του στοιχείου που αναζητά. Η διαδικασία εύρεσης του στοιχείου ενεργοποιείται με την επιλογή Begin Search. Αν το στοιχείο είναι διαθέσιμο τότε κάτω από την ένδειξη Libraries παρουσιάζεται το όνομα της βιβλιοθήκης που το διαθέτει. Με διπλό δεξί κλικάρισμα πάνω στο όνομα της βιβλιοθήκης γίνεται αυτόματα η μεταφορά του στοιχείου στο χώρο του σχηματικού. Τέλος με την επιλογή Browse, δίδεται η δυνατότητα αναζήτησης σε διαφορετικό χώρο στον υπολογιστή, όπου ενδεχομένως να υπάρχουν αποθηκευμένες βιβλιοθήκες.



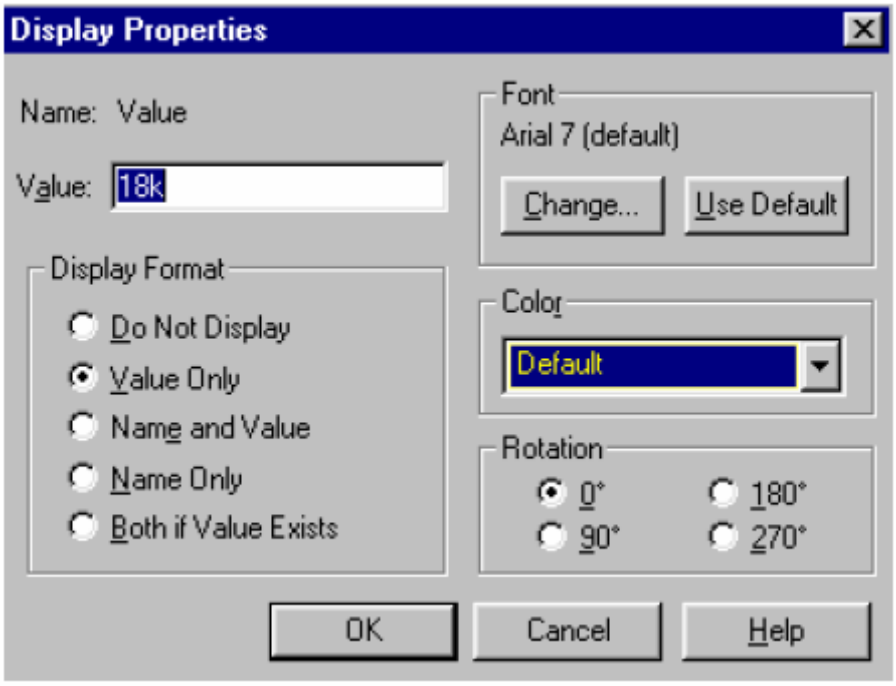

**Σχήμα 9.** Αναζήτηση στοιχείου μέσω του κωδικού ονοματός του.

Αν ο χρήστης επιθυμεί το ίδιο στοιχείο πολλές φορές στο χώρο του σχηματικού, τότε κάνει τόσα κλικ στο στοιχείο όσες και οι φορές που το χρειάζεται. Για να σταθεροποιήσει το στοίχειο αυτό στο κεντρικό παράθυρο θα πρέπει να κάνει δεξί κλικ πάνω σε αυτό και αφού προκυψει το ακόλουθο παράθυρο, που είναι ένα πολύ χρήσιμο menu (σχήμα 10), να επιλέξει την επιγραφή End Mode. Έτσι σταματάει πλέον να εμφανίζεται το στοιχείο.




**Σχήμα 10.**

Στοιχεία όπως πυκνωτές και αντιστάσεις εισέρχονται στο σχηματικό με προκαθορισμένες τιμές, π.χ οι αντιστάσεις εισέρχονται με τιμή 1ΚΩ, οι πυκνωτές με τιμή 1n κ.ο.κ. Για να αλλάξει ο χρήστης την τιμή αυτή, κάνει διπλό κλικ πάνω στην αρχική τιμή του στοιχείου, οπότε εμφανίζεται το κάτωθι παράθυρο. (σχήμα 11). Κάνοντας κλικ στο βέλος που υπάρχει δεξιά της επιλογής Default, μπορεί ο χρήστης του προγράμματος να αλλάξει το χρώμα της τιμής του στοιχείου. Ενώ με την ένδειξη Change, ο χρήστης ορίζει άλλη γραμματοσειρά και διαφορετικό μέγεθος, στην τιμή του στοιχείου, από αυτή που δίνει από μόνο του το πρόγραμμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι το ίδιο παράθυρο θα εμφανιστει σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμει να αλλάξει τον κωδικό του στοιχείου, δηλαδή σε περίπτωση που επιδιώκει μια αντίσταση R1 να την μετονομάσει σε αντίσταση R5.

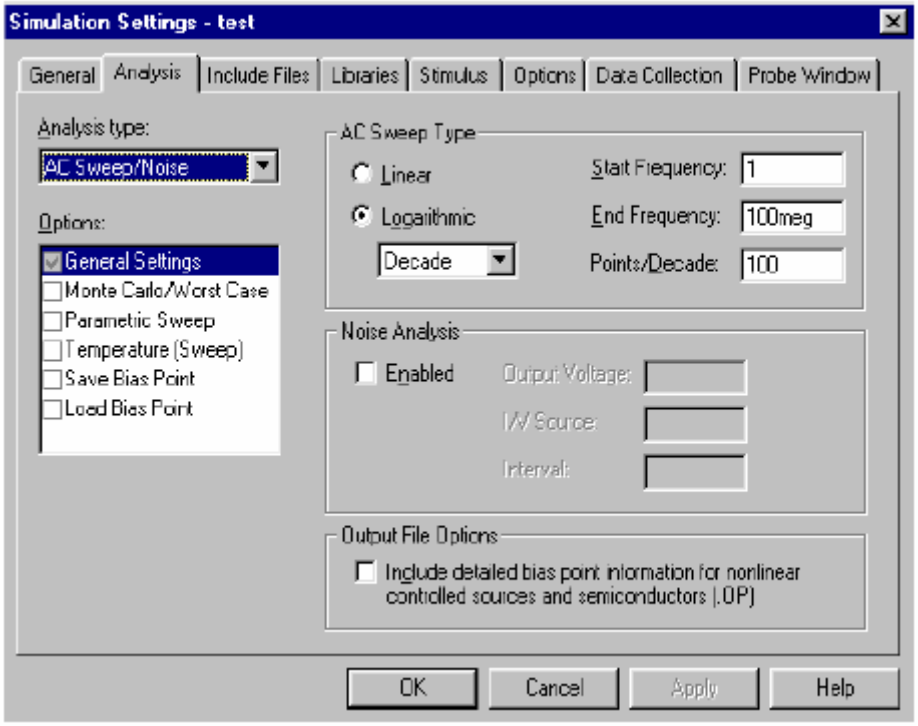



**Σχήμα 11.** Αλλαγή τιμών εξαρτήματος.

Τα στοιχεία του κυκλώματος δε θα πρέπει να έχουν το ίδιο κωδικό όνομα, γιατί αν συμβαίνει κάτι τέτοιο δε θα είναι δυνατή η εξομοίωση του κυκλώματος και θα εμφανιστεί μήνυμα λάθους από τον υπολογιστή. Δε μπορούν να δηλωθούν σε καμία περίπτωση δύο αντιστάσεις με το ίδιο όνομα παρόλο που μπορεί να έχουν ίδιες τιμές.

### 5.3.2.3 Ορισμός ανάλυσης

Αφού ο χρήστης πραγματοποίησε όλη την διαδικασία του προηγούμενου βήματος, είναι σε θέση τώρα να κάνει εξομοίωση του κυκλώματος. Αυτό που επιβάλλεται να κάνει σε πρώτη φάση είναι να ορίσει τί είδους εξομοίωση θέλει να πραγματοποιήσει. Έτσι από το κεντρικό μενού επιλέγει PSpice και εν συνεχεία Edit Simulation Profile και αυτόματα οδηγείται στο παράθυρο του σχήματος 12. Είναι το παράθυρο που ο χρήστης θα ορίσει τον τύπο της ανάλυσης που επιθυμεί να πραγματοποιηθεί. Το παράθυρο αυτό βέβαια παρέχει και άλλες σημαντικές ρυθμίσεις,. Έτσι μέσω της επιλογής Probe Window-> Last Plot, δύναται ο χρήστης να κρατήσει προηγούμενες γραφικές παραστά-σεις. Μετά από αυτή τη μικρή παρέμβαση θα γίνει επεξήγηση των δυνατοτήτων αυτού του παραθύρου γύρω από τους τύπους ανάλυσης που προσφέρει. Έτσι μέσα από την επιλογή Analysis Type προσφέρονται οι εξής επιλογές :

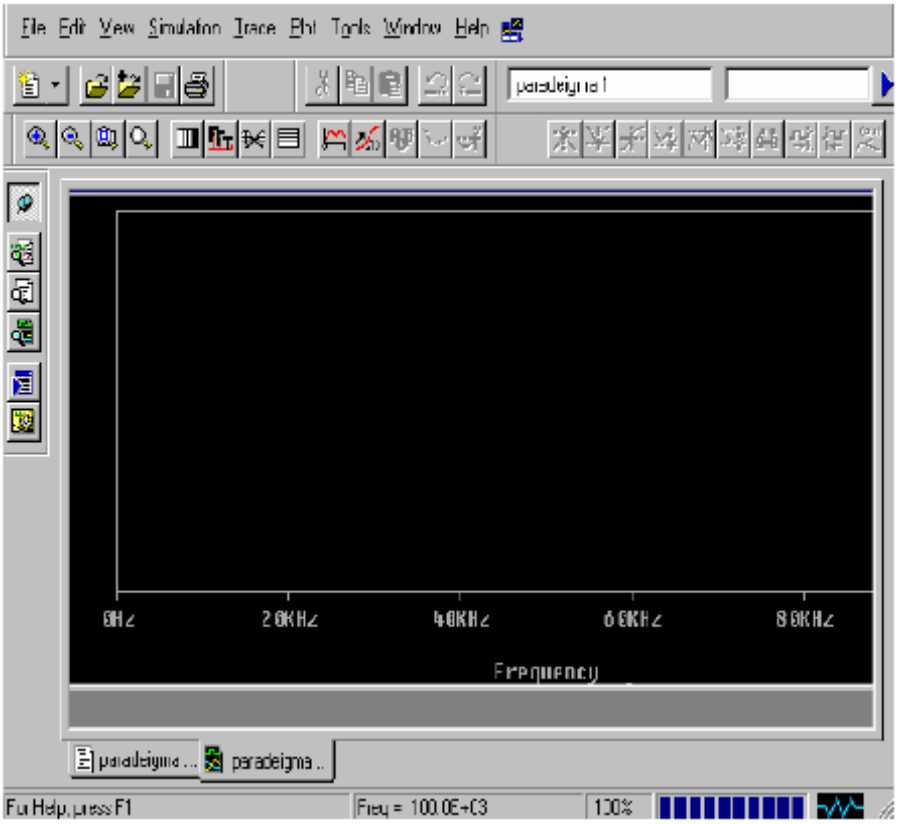



**Σχήμα 12.** Επιλογή τρόπου εξομοίωσης .

**α) Bias Point**, όπου υπολογίζει τις τιμές των ρευμάτων, των τάσεων και της ισχύος σε όλους τους κόμβους και τα αποτελέσματα τα αποθηκεύει σε αρχείο. Η διαδικασία αυτή δεν ενεργοποιεί το κεντρικό παράθυρο εξομοίωσης του PSpice.
**β) Time Domain**, απ'όπου ο χρήστης μπορεί να πάρει γραφικές παραστάσεις συναρτήσει του χρόνου. Εδώ πρέπει να ορίσει τον χρόνο εξομοίωσης, τη χρονική καθυστέρηση εκκίνησης του σήματος, όπως επίσης και το βήμα σάρωσης.
**γ) AC Analysis,** απ'όπου ο χρήστης μπορεί να πάρει γραφήματα σε συναρτήση με τη συχνότητα. Για να πάρει το συγκεκριμένο γράφημα, πρέπει να ορίσει αρχική και τελική συχνότητα σάρωσης, όπως επίσης και το βήμα σάρωσης το οποίο θα είναι ορισμένο κατά οκτάδες ή κατά δεκάδες. Επίσης υπάρχει δυνατότητα ο άξονας της συνάρτησης να είναι σε γραμμική ή λογαριθμική μορφή. Η εισαγωγή των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε ξεχωριστό αρχείο.
**δ) DC/Sweep Analysis**, όπου ο χρήστης μπορεί να κάνει και παραμετρική ανάλυση αρκεί να δηλώσει την μεταβλητή της ανάλυσης, την αρχική και τελική τιμή που θέλει να λάβει καθώς και το βήμα μεταβολής. Ακόμη μπορεί να δηλώσει αν ο άξονας των τιμών θέλει να έχει γραμμική ή λογαριθμική μορφή.

## 5.4 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων στην οθόνη

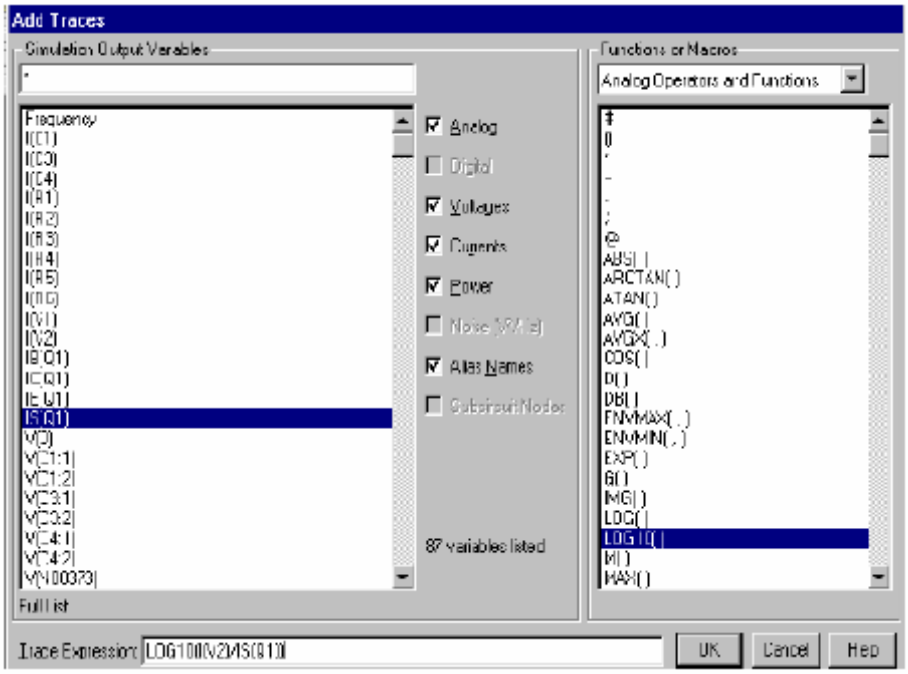
Η απεικόνιση αποτελεσμάτων στην οθόνη, είναι τα αποτελέσματα της εξομοίωσης του κυκλώματος, η οποία ενεργοποιείται με την επιλογή Run από το κεντρικό menu ή απο το μπλε βελάκι από τη γραμμή εργαλείων του βασικού menu ή ακόμα και από το πληκτρολόγιο μέσω του κουμπιού F11. Αυτόματα ανοίγει και το παράθυρο του PSpice το οποίο έχει τη μορφή του σχήματος 13. Η αριστερή του μπάρα βοηθάει το χρήστη να επιστρέψει στο αρχείο εισόδου ή να προχωρήσει στο αρχείο εξόδου, ενώ η μπάρα κάτω από το παράθυρο δείχνει την ολοκλήρωση της εξομοίωσης, εφ'όσον βέβαια παρουσια-στεί το ποσοστό 100%, που φαίνεται ακολούθως.




**Σχήμα 13.** Το παράθυρο του χώρου εξομοίωσης.

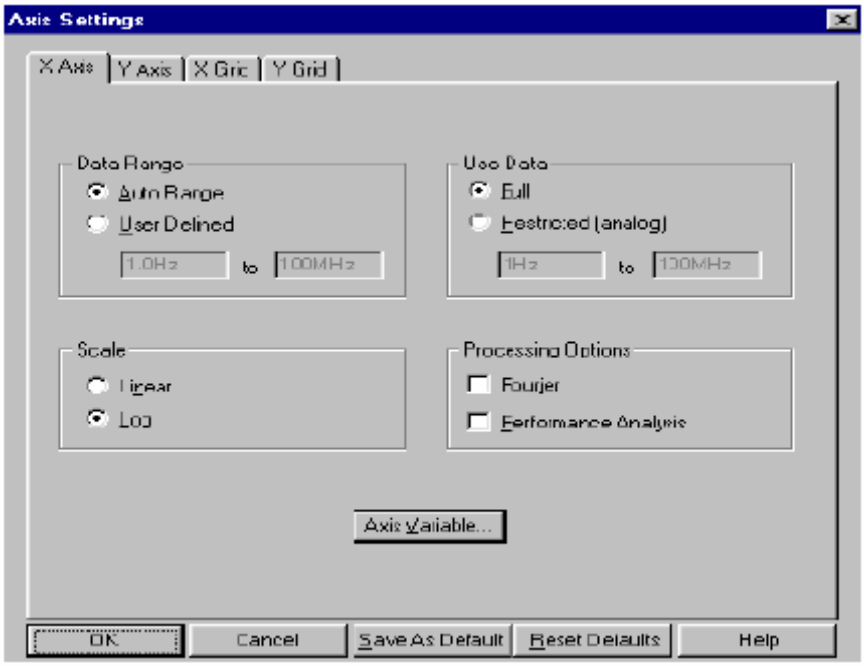
Από το κεντρικό menu επιλέγεται Trace και κατόπιν Add Trace, οπότε και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 14. Παρατηρούμε ότι το παράθυρο χωρίζεται σε δύο επιμέρους παραθυράκια. Στο αριστερό παραθυράκι είναι όλες οι μεταβλητές του κυκλώματος, όπως τάσεις, ρεύματα, κ.α. Στη μέση των δύο παραθύρων είναι γραμμένος ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών, με ταυτόχρονη ομαδοποίησή τους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα κάνοντας κλικ δίπλα από την λέξη Currents, να εξαφανίσει από τη λίστα τα ρεύματα, δε μπορεί όμως να εξαφανίσει ορισμένα μόνο ρεύματα. Στο δεξί παραθυράκι και στην

επιλογή Analog Operators and Functions υπάρχει μία λίστα από μαθηματικές συναρτήσεις. Επιλέγοντας πρώτα μια συνάρτηση από το δεξί παράθυρο και εν συνεχεία μία ή περισσότερες μεταβλητές από το αριστερό παράθυρο και κάνοντας κλικ στο OK, εμφανίζεται η γραφική παράσταση στο κεντρικό παράθυρο του PSpice.



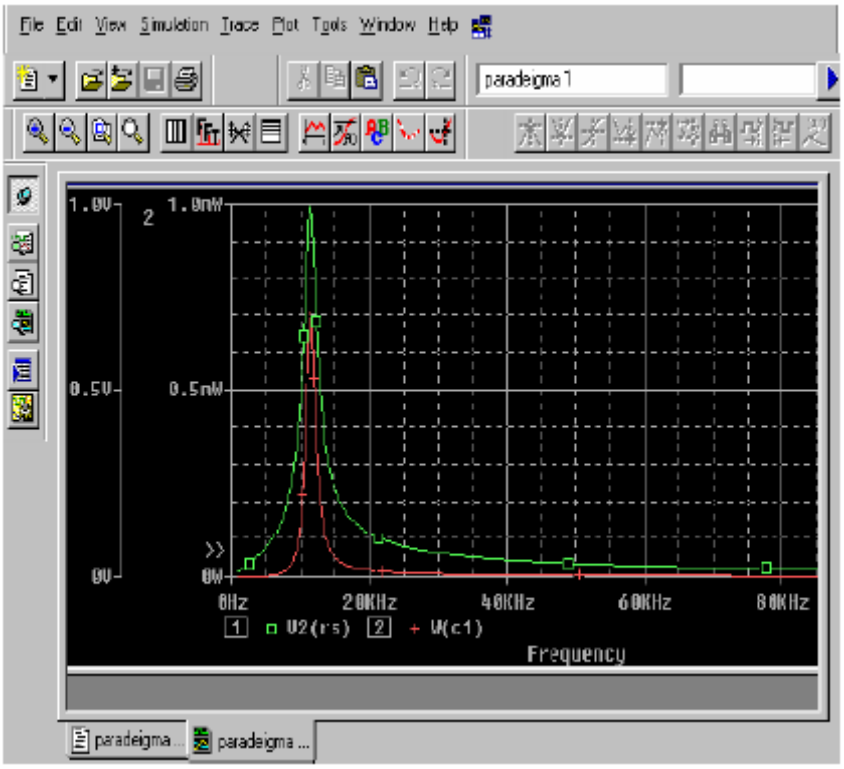

**Σχήμα 14.** Παράθυρο επιλογής μεταβλητών και συναρτήσεων.

Ο κάθετος άξονας έχει ως μεταβλητή αυτή που όρισε ο χρήστης, ενώ ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμολογημένος στις μονάδες της μεταβλητής που σαρώνεται, σύμφωνα πάντα με την εντολή ανάλυσης. Δίνεται βέβαια στο χρήστη η δυνατότητα αλλαγής της μεταβλητής του οριζόντιου άξονα, αλλά και του καθέτου μέσω της επιλογής Plot από το κεντρικό menu Pspice και κατόπιν Axis Settings και User Defined, οπότε εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 15.




**Σχήμα 15.** Προσαρμογή κλίμακας αξόνων.

Τέλος παρέχεται δυνατότητα επιλογής γραμμικής ή λογαριθμικής κλίμακας για τον κάθε άξονα. Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να έχει δύο γραφικές διαφορετικών μεταβλητών στην ίδια γραφική παράσταση, μπορεί να το πραγματοποιήσει επιλέγοντας Plot από το κεντρικό menu και εν συνεχεία Add Y. Μια εικόνα του γραφικού σε συνδυασμό με δύο κάθετους άξονες που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές μεταβλητές, παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.(σχήμα 16).




**Σχήμα 16.** Συνδυασμός δύο μεταβλητών σε ξεχωριστούς Y άξονες.

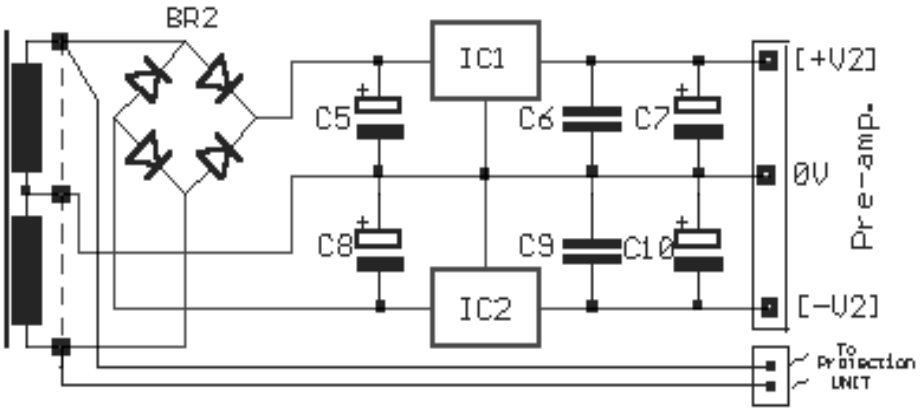
## 5.5 Αρχείο εξόδου του PSpice

Το αρχείο εξόδου του PSpice είναι άμεσα προσπελάσιμο από το χρήστη. Εκεί καταχωρούνται χρήσιμες πληροφορίες, που αφορούν τη λειτουργία του κυκλώματος και είναι χρήσιμες κατά τη φάση της ανάλυσης ή του σχεδιασμού. Επίσης, περιγράφονται τα πιθανά λάθη, σε περίπτωση, που το αρχείο εισόδου είτε υπό τη μορφή κειμένου, είτε υπό τη σχηματική μορφή δεν είναι σωστό. Τέλος στο χώρο αυτό καταχωρούνται τα αποτελέσματα από τη δήλωση της εντολής .op, .print και .plot.

# 6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

## 6.1 Τροφοδοτικό

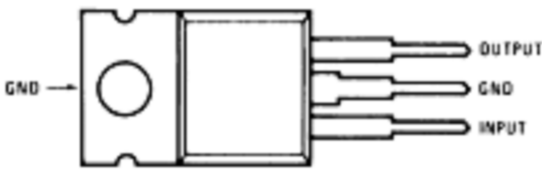
Το κύκλωμα που πρέπει να υλοποιήσουμε για την κατασκευή του τροφοδοτικού μας είναι το εξής:




**Σχήμα 1.** Κύκλωμα τροφοδοτικής διάταξης

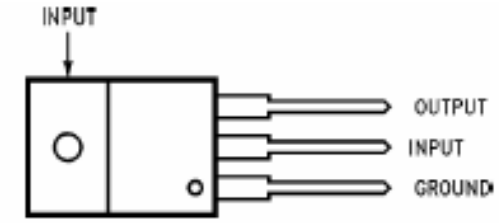
Οι τιμές για τα αντίστοιχα εξαρτήματα είναι οι εξής:

+V2 = +12V
-V2 = -12V
C5 - C8 = 2200uF 25V
IC1 = 7812:



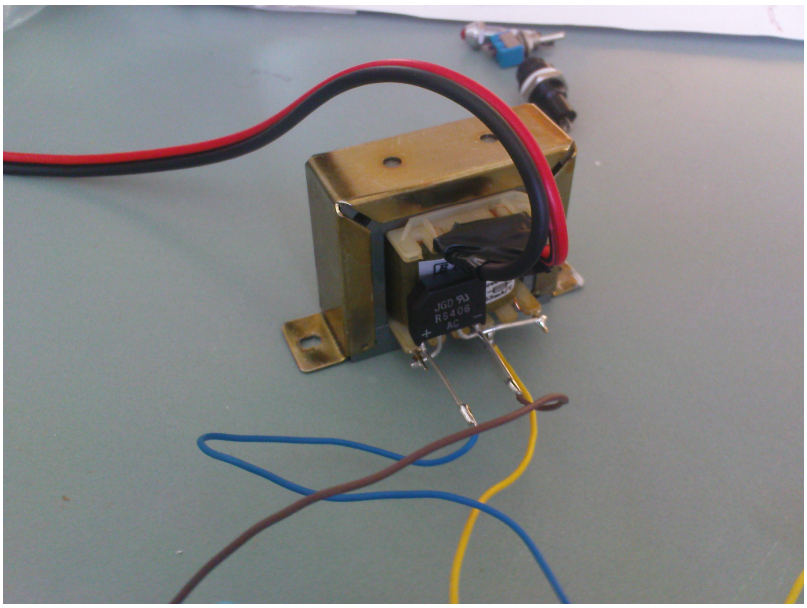

**Σχήμα 2.** Ολοκληρωμένο 7812

IC2 = 7912:



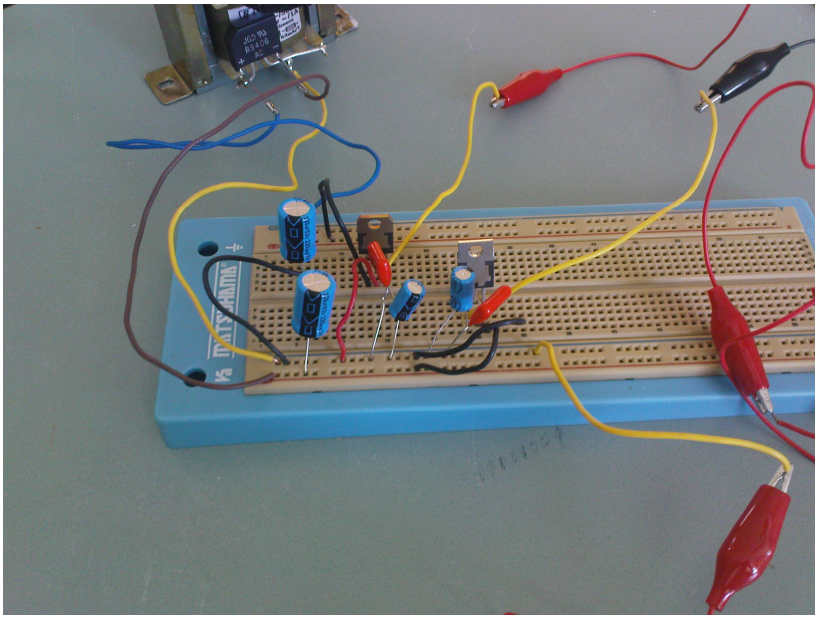

**Σχήμα 3.** Ολοκληρωμένο 7912

C6 - C9 = 100nF 100V
BR2 = Bridge 250V 3A
C7 - C10 = 47uF 25V
F1 = Fuse 2A slow
Διακόπτης On/Off
Λαμπάκι 220V



**Σχήμα 4.** Μετασχηματιστής τροφοδοτικής διάταξης

Πριν την υλοποίηση του κυκλώματος μας ήταν αναγκαίο να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές σε δοκιμαστική πλακέτα (Breadboard).



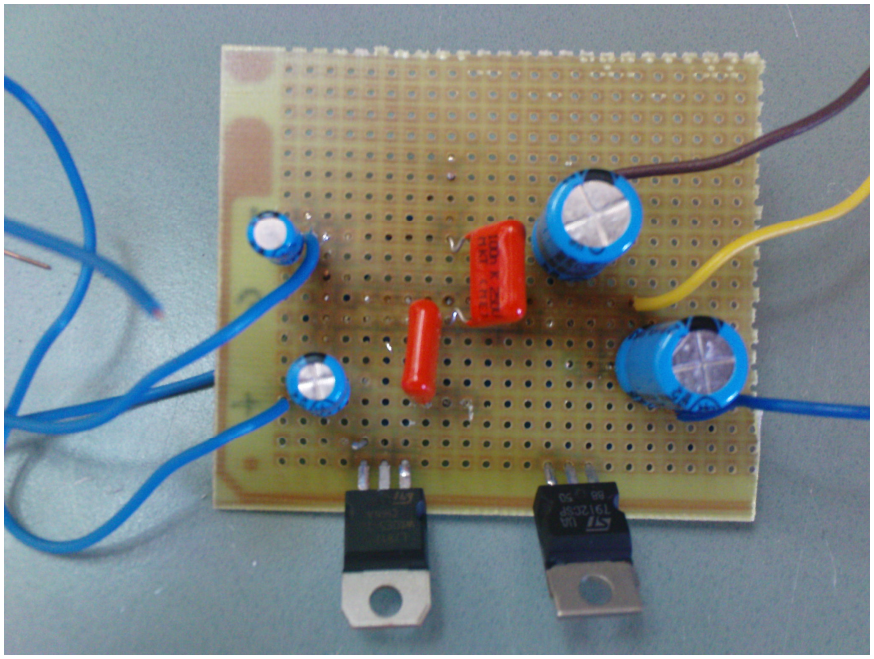
**Σχήμα 5.** Δοκιμαστική πλακέτα (Breadboard)

Έχοντας υλοποιήσει την κατασκευή μας στη δοκιμαστική πλακέτα και παρατηρώντας ότι όλα λειτουργούν ορθά και χωρίς επιπλοκές μετρήσαμε τις τάσεις εξόδου του τροφοδοτικού και παρατηρήσαμε ότι συμβαδίζουν με τις τιμές που περιμέναμε ($\pm 12V$).

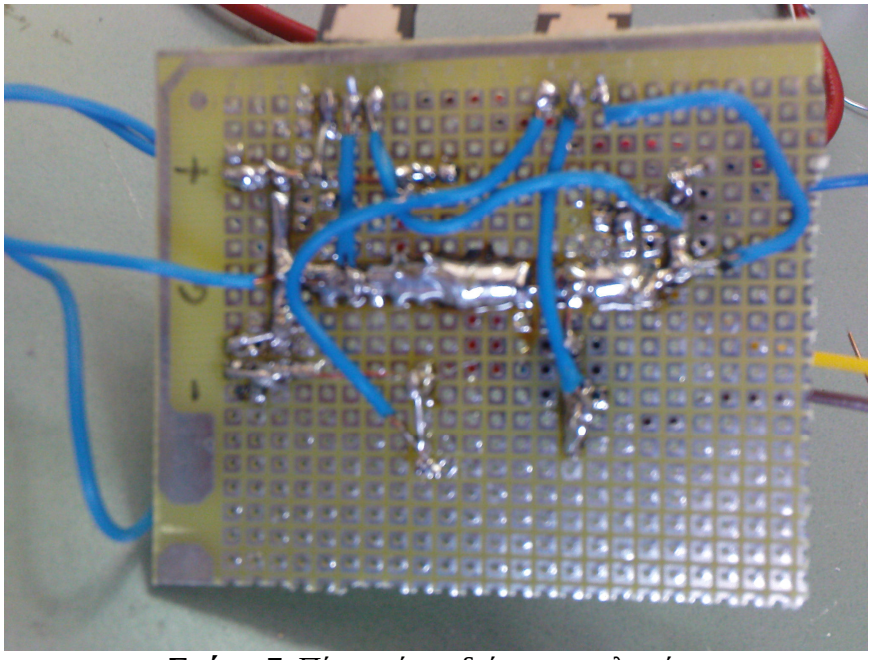
Επόμενο βήμα για την υλοποίηση του τροφοδοτικού μας έτσι ώστε να πάρει την τελική του μορφή είναι η κατασκευή του σε διάτρητη πλακέτα και τέλος έχοντας διαπιστώσει ότι η λειτουργία του είναι σωστή προχωρήσαμε στην τοποθέτηση του σε κατάλληλο κουτί.

Τα όργανα και τα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής:

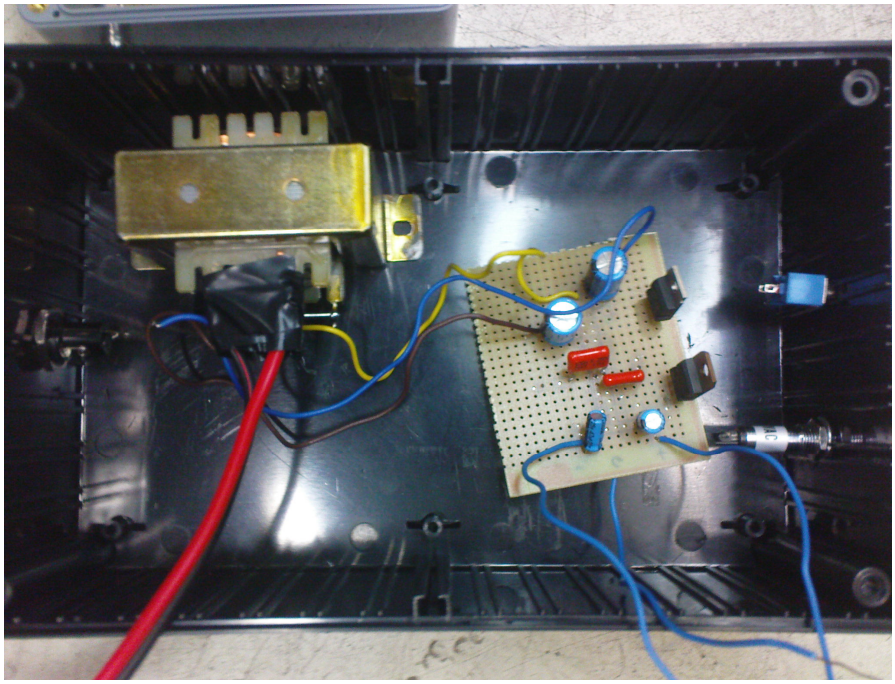
1. διάτρητη πλακέτα
2. καλώδια
3. μυτοτσίμπιδο
4. πένσα
5. κατσαβίδια
6. εργαλείο για το γδύσιμο των καλωδίων
7. κόφτης
8. κολλητήρι
9. πολύμετρο
10. πρίζα
11. καρφί αρσενικό ¼ στερεοφωνικό



**Σχήμα 6.** Μπροστινό μέρος διάτρητης πλακέτας



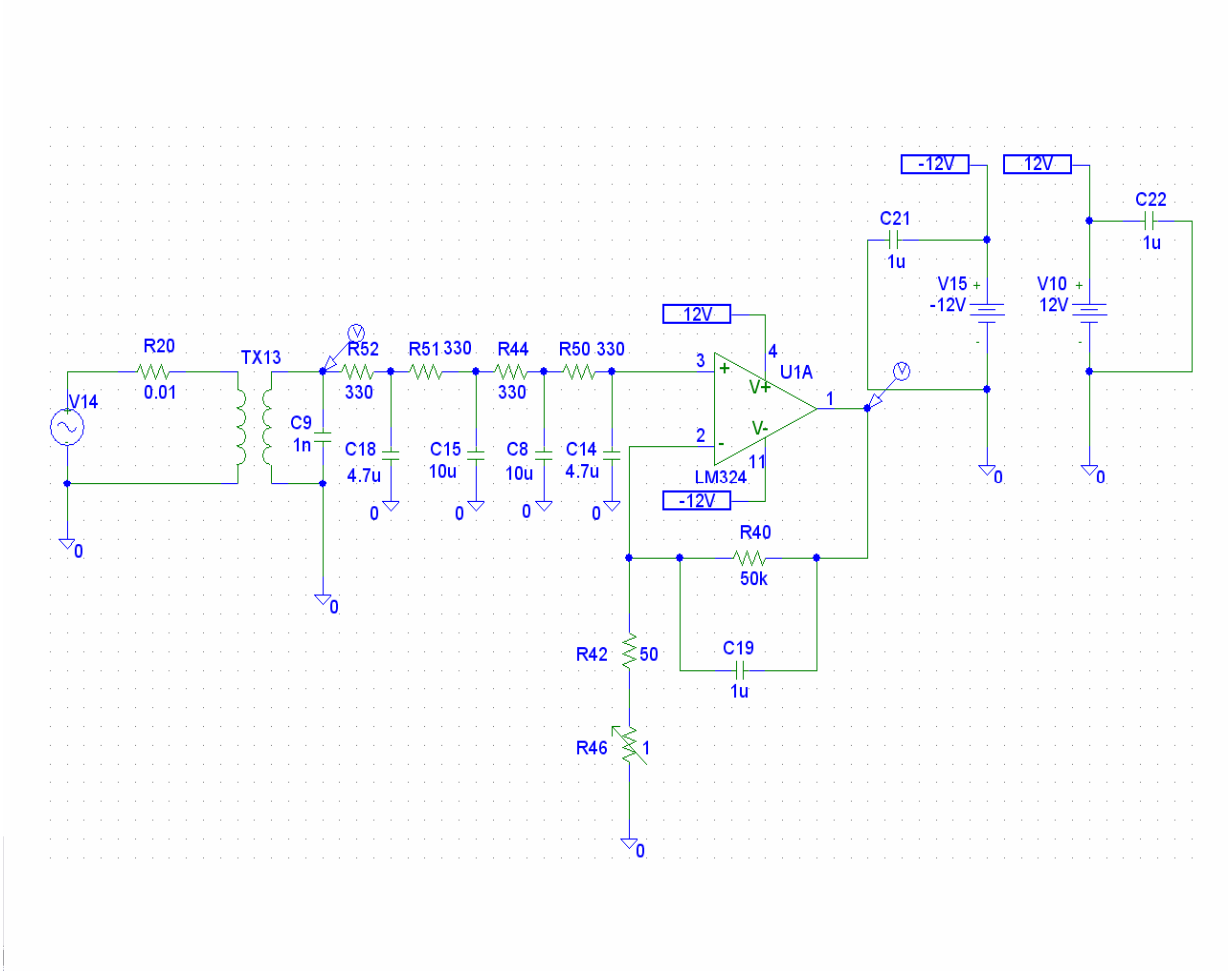
**Σχήμα 7.** Πίσω μέρος διάτρητης πλακέτας



**Σχήμα 8.** Εσωτερικό μέρος κουτιού

## 6.2 Ενισχυτής

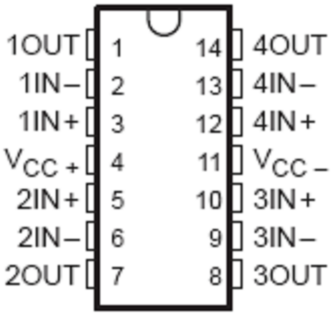
Το κύκλωμα που πρέπει να υλοποιήσουμε για την κατασκευή του ενισχυτή μας είναι:




**Σχήμα 1.** Κύκλωμα ενισχυτή χαμηλών συχνοτήτων (υπόηχων)

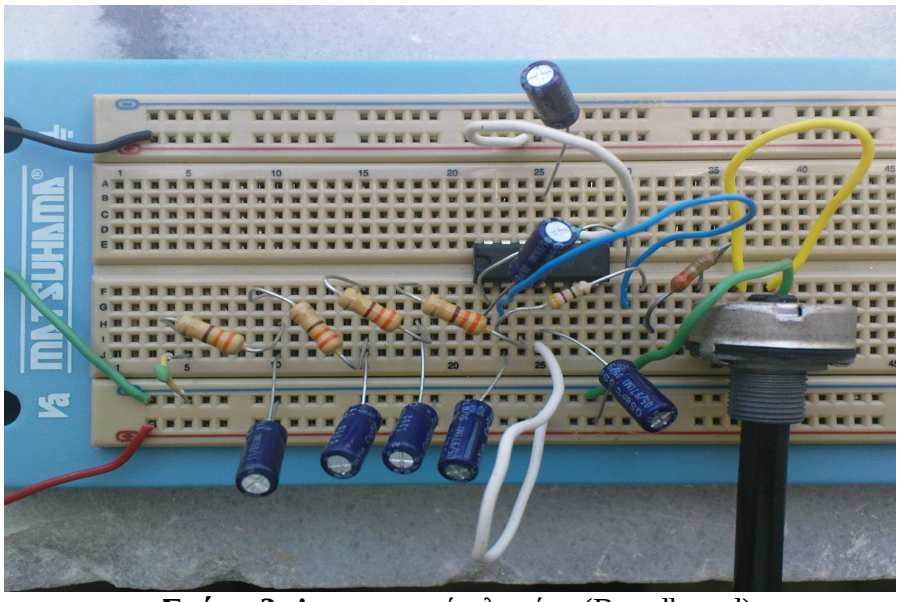
Οι τιμές για τα αντίστοιχα εξαρτήματα είναι οι εξής:

LM 324 (Στην κατασκευή μας χρησιμοποιήσαμε το ολοκληρωμένο TL074)
R20 = 0.01Ω
R52 - R51 - R44 - R50 = 330Ω
R42 = 50Ω
R40 = 50KΩ
R46 = μεταβλητή αντίσταση (0-100KΩ)
C9 = 1n
C18 - C14 = 4.7u
C15 - C8 = 10u
C19 - C22 - C21 = 1u



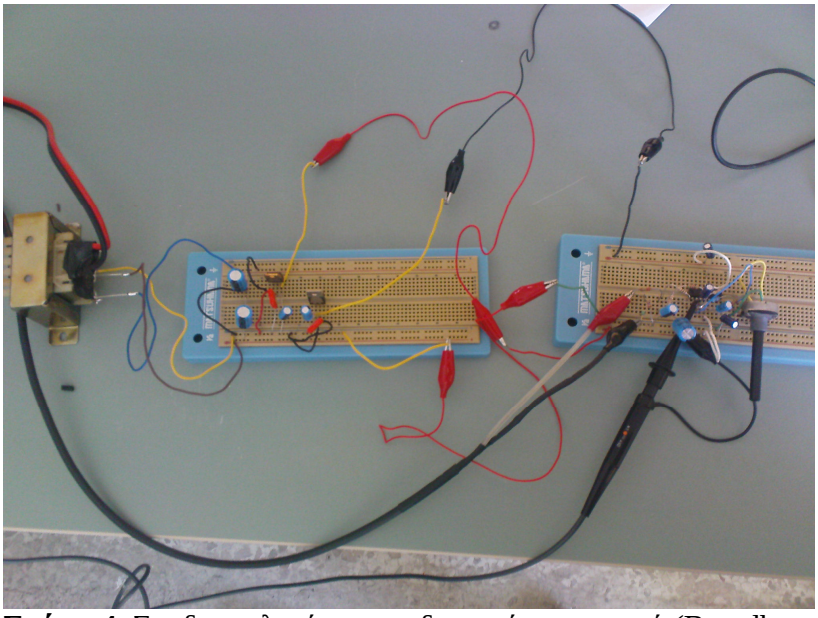

**Σχήμα 2.** Ολοκληρωμένο TL074

Πριν την υλοποίηση του κυκλώματος μας ήταν αναγκαίο να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές σε δοκιμαστική πλακέτα (Breadboard).



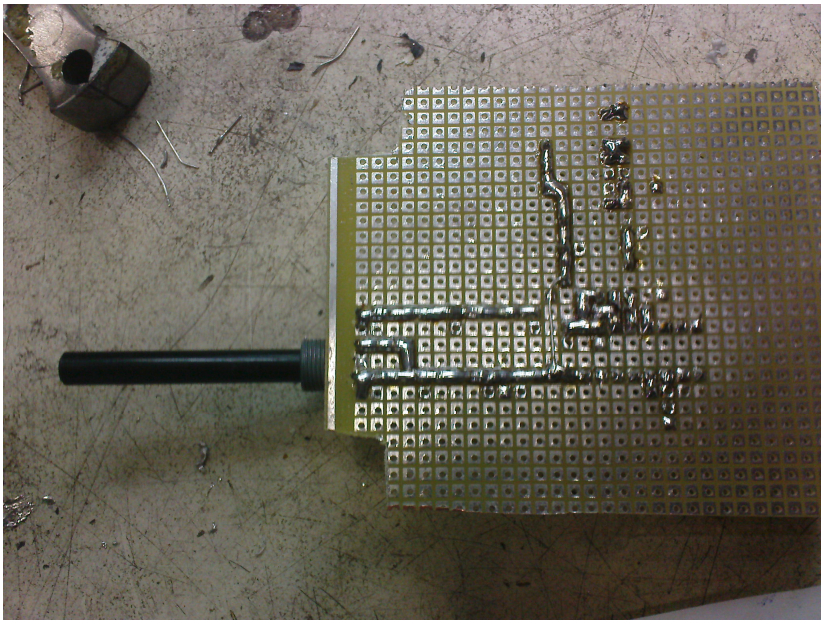
**Σχήμα 3.** Δοκιμαστική πλακέτα (Breadboard)

Έχοντας υλοποιήσει την κατασκευή μας στη δοκιμαστική πλακέτα συνδέσαμε το τροφοδοτικό και έπειτα συνδέοντας την γεννήτρια συχνοτήτων στην είσοδο του ενισχυτή μας παρατηρήσαμε στον παλμογράφο ότι τα αποτελέσματα ήταν αυτά που περιμέναμε.

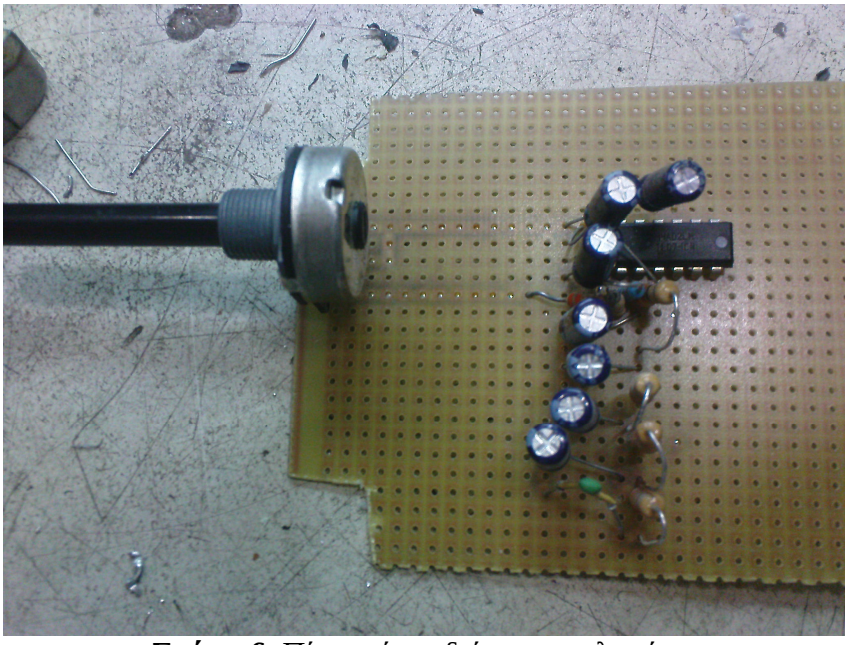


**Σχήμα 4.** Συνδεσμολογία τροφοδοτικού – ενισχυτή (Breadboard)

Επόμενο βήμα για την υλοποίηση του ενισχυτή μας έτσι ώστε να πάρει την τελική του μορφή είναι η κατασκευή του σε διάτρητη πλακέτα.



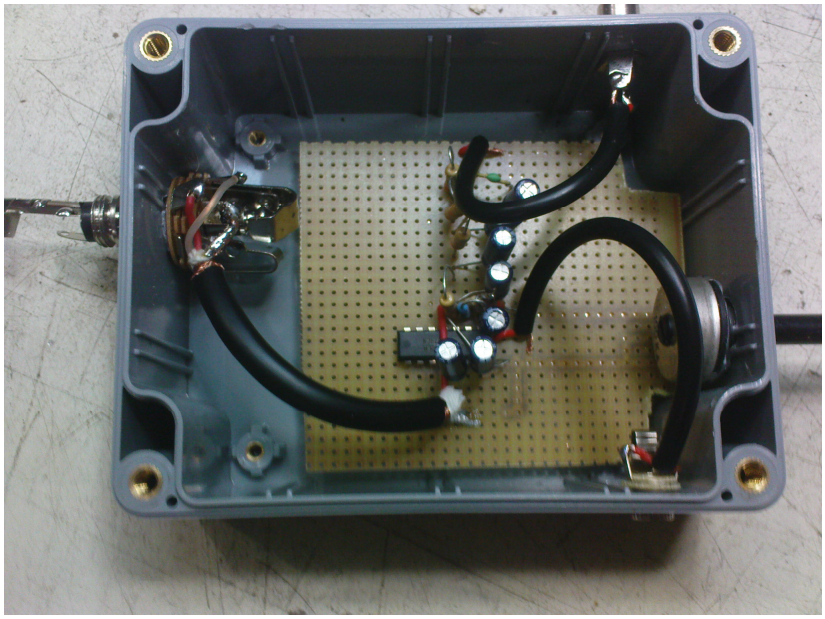
**Σχήμα 5.** Μπροστινό μέρος διάτρητης πλακέτας



**Σχήμα 6.** Πίσω μέρος διάτρητης πλακέτας

και τέλος έχοντας διαπιστώσει ότι η λειτουργία του είναι σωστή προχωρήσαμε στην τοποθέτηση του σε κατάλληλο κουτί.

**Σχήμα 7.** Εσωτερικό μέρος κουτιού



**Σχήμα 8.** Τελική μορφή ενισχυτή

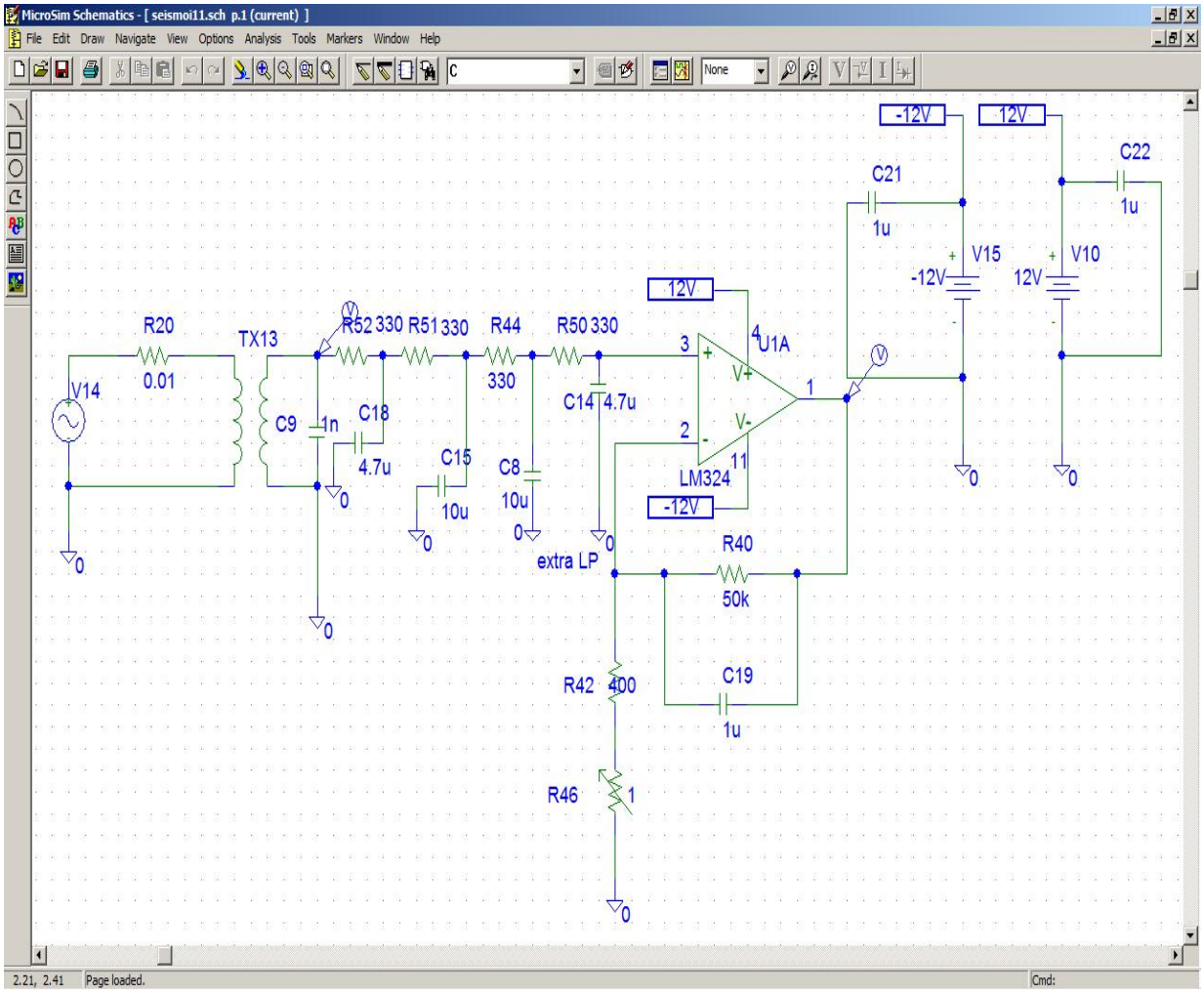
Τα όργανα και τα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής:

1. διάτρητη πλακέτα
2. καλώδια
3. μυτοτσίμπιδο
4. πένσα
5. κατσαβίδια
6. εργαλείο για το γδύσιμο των καλωδίων
7. κόφτης
8. κολλητήρι
9. πολύμετρο
10. θηλυκό RCA
11. θηλυκό mono mini jack
12. θηλυκό jack ¼

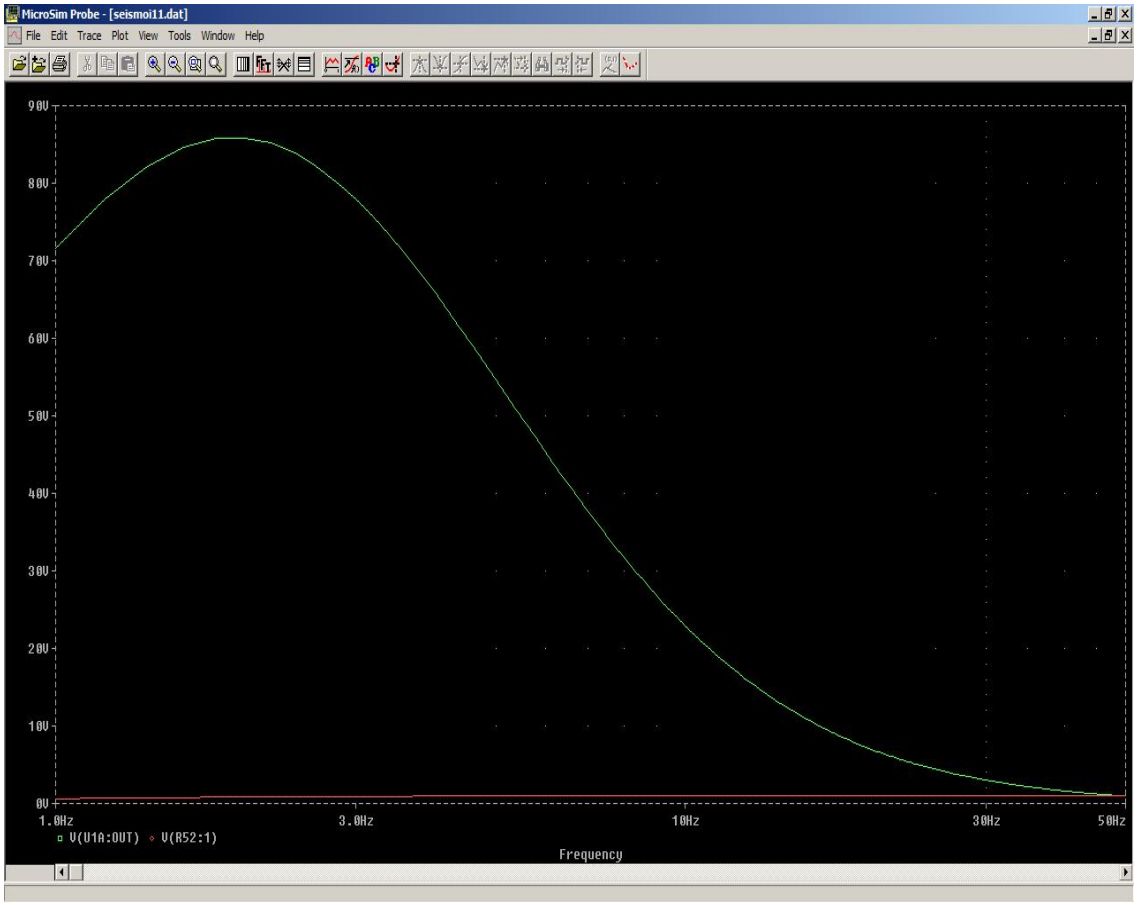
# 7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

## 7.1 Σχεδίαση και εξομοίωση του κυκλώματος

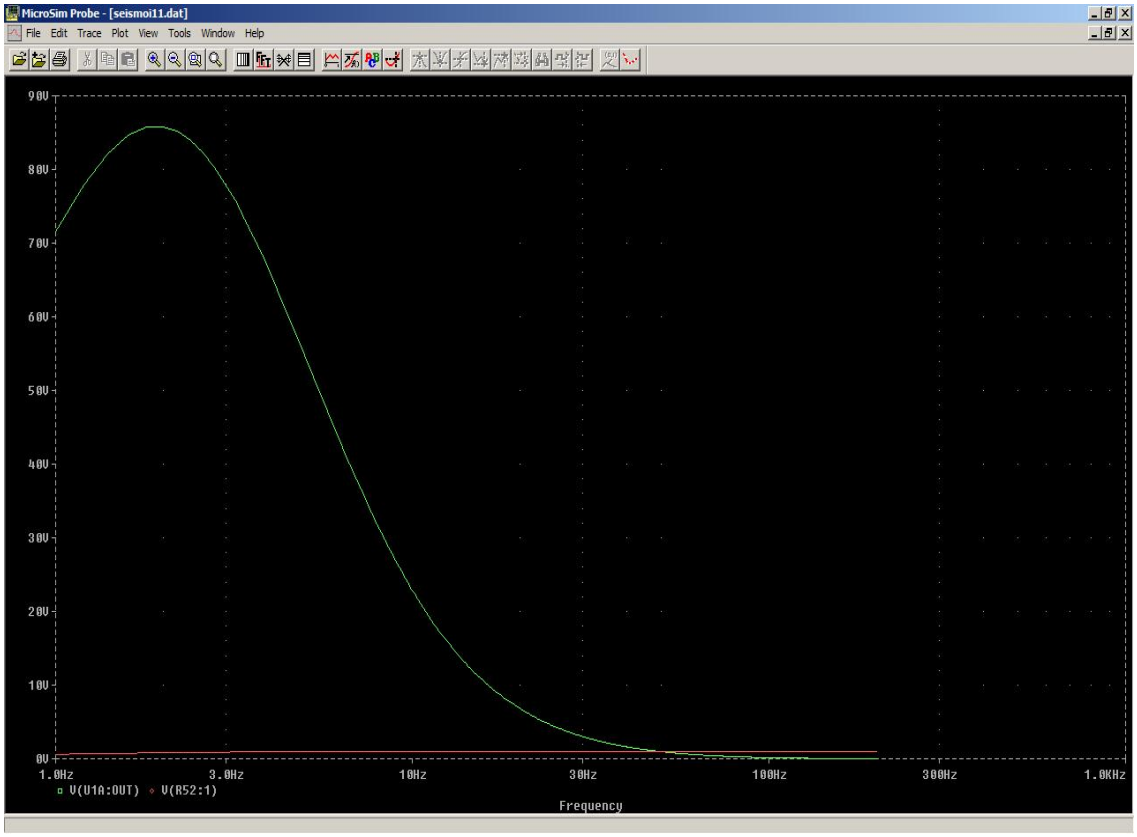
Σχεδιάσαμε το κύκλωμα μας στο πρόγραμμα εξομοίωσης P-SPICE και πήραμε τα εξής αποτελέσματα:



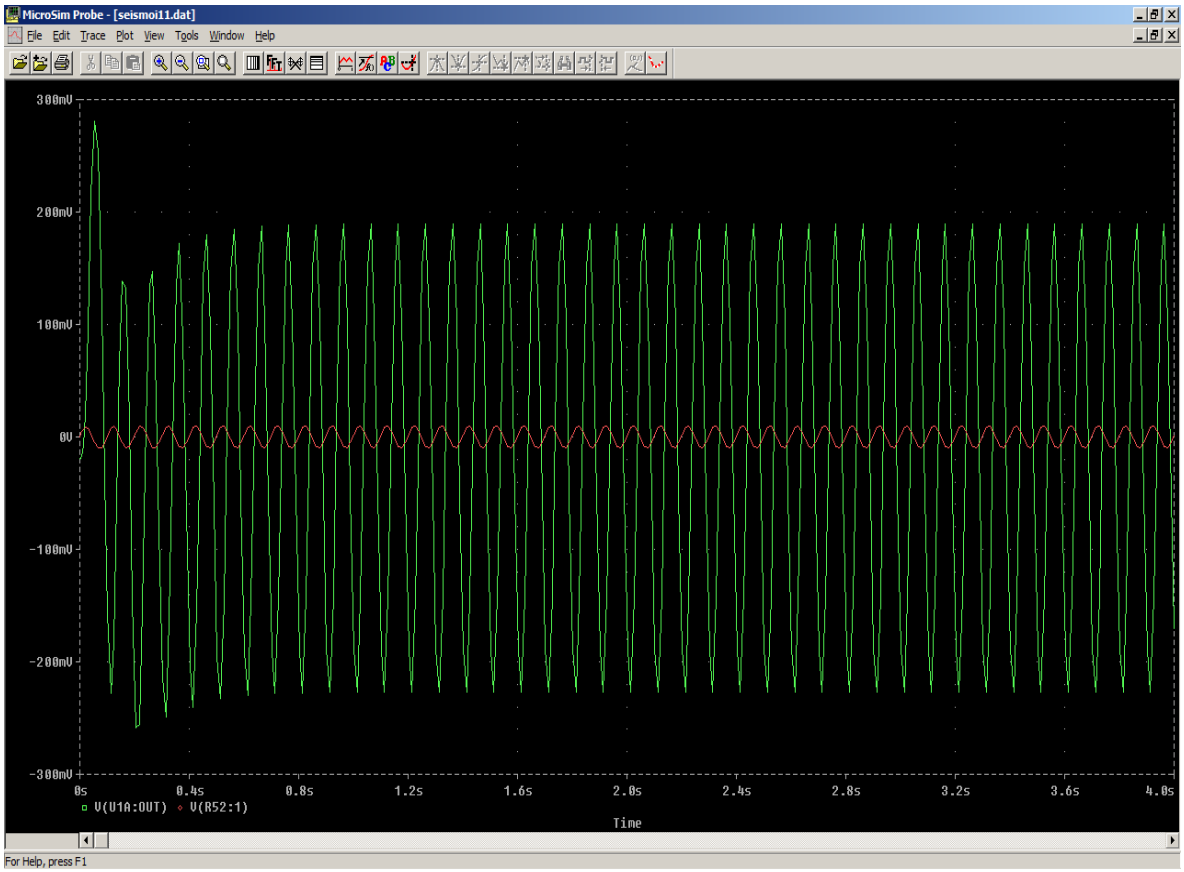

**Σχήμα 1.** Κύκλωμα ενισχυτή στο πρόγραμμα εξομοίωσης P-Spice




**Σχήμα 2.** Γραφική παράσταση ενισχυτή ( συχνότητα ως προς τάση)




**Σχήμα 3.** Γραφική παράσταση ενισχυτή ( συχνότητα ως προς τάση)




**Σχήμα 4.** Γραφική παράσταση ενισχυτή ( χρόνος ως προς τάση)

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις βλέπουμε ότι είσοδος μας ξεκινάει από 0.6 V και ανεβαίνει σταδιακά όπου και σταθεροποιείτε στο 1 volt. Η έξοδος μας έχει αρχική τιμή τα 71 V στο 1 Hz και ανεβαίνει σταδιακά έως τα 2 Hz οπού έχουμε και την υψηλότερη ενίσχυση 86 V Στη συνέχεια αρχίζει να πέφτει σταδιακά έτσι ώστε στα 49Hz να έχουμε κέρδος τάσης 1.

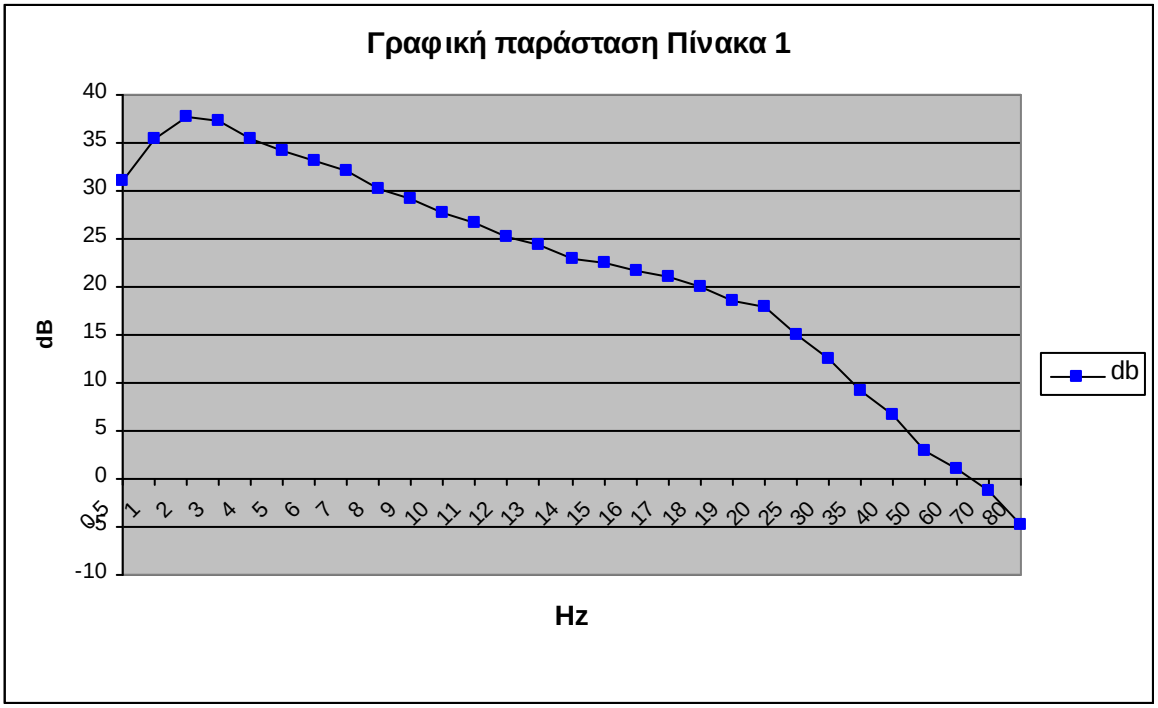
## 7.2 Μετρήσεις και αποτελέσματα

### 7.2.1 Δοκιμαστική πλακέτα (breadboard)

Αρχικά συνδέσαμε την γεννήτρια συχνοτήτων στην είσοδο του ενισχυτή και αφού τροφοδοτήσαμε με ± 12V τον ενισχυτή παρατηρήσαμε στον παλμογράφο τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

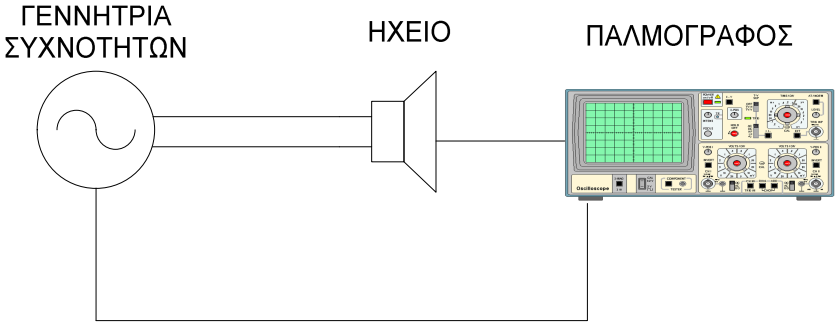
| **A\A** | **F(Hz)** | **Vin** | **Vout** | **Decibel(dB)** |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.5 | 0.14 | 5.0 | 31.0 |
| **2** | 1 | 0.14 | 8.4 | 35.5 |
| **3** | 2 | 0.14 | 10.8 | 37.7 |
| **4** | 3 | 0.14 | 10.2 | 37.2 |
| **5** | 4 | 0.14 | 8.4 | 35.5 |
| **6** | 5 | 0.14 | 7.2 | 34.2 |
| **7** | 6 | 0.14 | 6.4 | 33.2 |
| **8** | 7 | 0.14 | 2.6 | 32.0 |
| **9** | 8 | 0.14 | 4.6 | 30.3 |
| **10** | 9 | 0.14 | 4.0 | 29.1 |
| **11** | 10 | 0.14 | 3.4 | 27.7 |
| **12** | 11 | 0.14 | 3.0 | 26.6 |
| **13** | 12 | 0.14 | 2.6 | 25.3 |
| **14** | 13 | 0.14 | 2.3 | 24.3 |
| **15** | 14 | 0.14 | 2.0 | 23.0 |
| **16** | 15 | 0.14 | 1.9 | 22.6 |
| **17** | 16 | 0.14 | 1.7 | 21.6 |
| **18** | 17 | 0.14 | 1.6 | 21.1 |
| **19** | 18 | 0.14 | 1.4 | 20.0 |
| **20** | 19 | 0.14 | 1.2 | 18.6 |
| **21** | 20 | 0.14 | 1.1 | 17.9 |
| **22** | 25 | 0.14 | 0.8 | 15.1 |
| **23** | 30 | 0.14 | 0.6 | 12.6 |
| **24** | 35 | 0.14 | 0.4 | 9.10 |
| **25** | 40 | 0.14 | 0.3 | 6.60 |
| **26** | 50 | 0.14 | 0.2 | 3.00 |
| **27** | 60 | 0.14 | 0.16 | 1.10 |
| **28** | 70 | 0.14 | 0.12 | -1.30 |
| **29** | 80 | 0.14 | 0.08 | -4.80 |

**Πίνακας 1**. Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμαστικής πλακέτας.


Γραφική παράσταση Πίνακα 1
dB
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
0,5
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
25
30
35
40
50
60
70
80
Hz
db

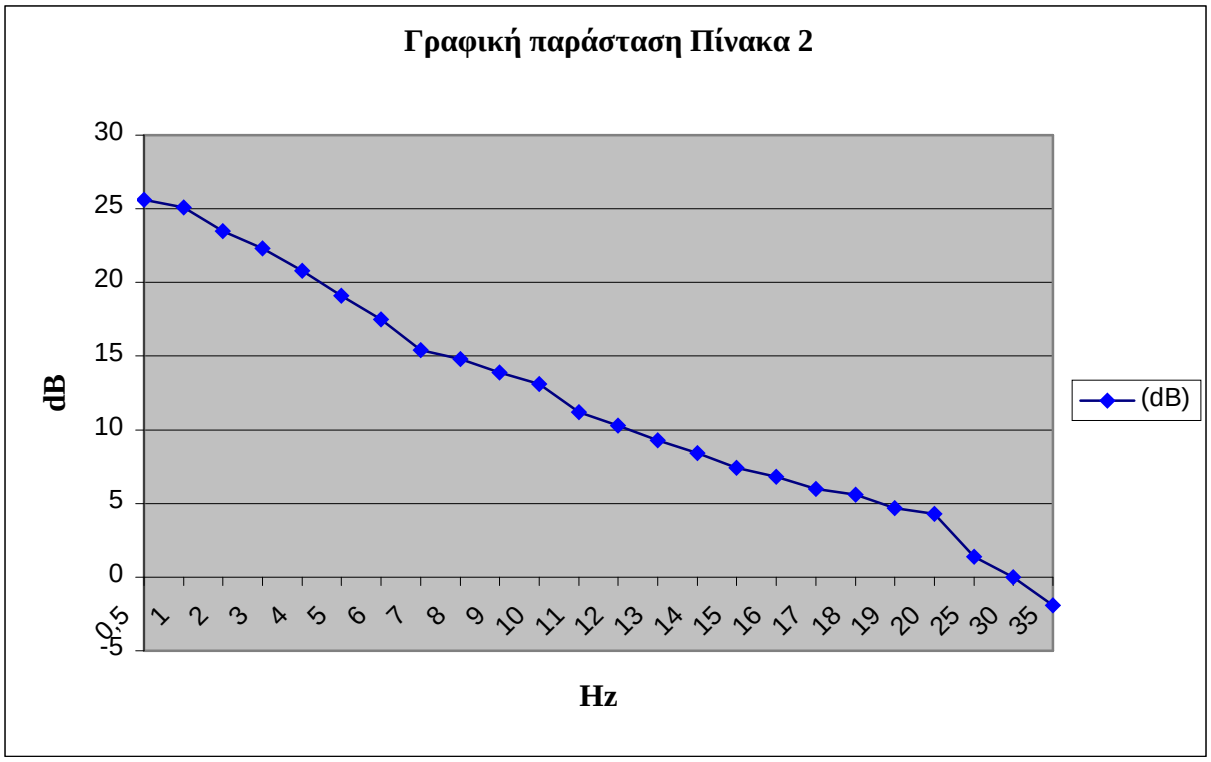
### 7.2.2 Ενισχυτής υπόηχων

Συνδέσαμε την γεννήτρια συχνοτήτων στην είσοδο του ενισχυτή και αφού τροφοδοτήσαμε με ± 12 V τον ενισχυτή παρατηρήσαμε στον παλμογράφο τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.




| **A\A** | **F(Hz)** | **Vin** | **Vout** | **Decibel(dB)** |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.5 | 1.0 | 19 | 25.6 |
| **2** | 1 | 1.0 | 18 | 25.1 |
| **3** | 2 | 1.0 | 15 | 23.5 |
| **4** | 3 | 1.0 | 13 | 22.3 |
| **5** | 4 | 1.0 | 11 | 20.8 |
| **6** | 5 | 1.0 | 9.0 | 19.1 |
| **7** | 6 | 1.0 | 7.5 | 17.5 |
| **8** | 7 | 1.1 | 6.5 | 15.4 |
| **9** | 8 | 1.1 | 6.0 | 14.8 |
| **10** | 9 | 1.1 | 5.5 | 13.9 |
| **11** | 10 | 1.1 | 5.0 | 13.1 |
| **12** | 11 | 1.1 | 4.0 | 11.2 |
| **13** | 12 | 1.1 | 3.6 | 10.3 |
| **14** | 13 | 1.1 | 3.2 | 9.3 |
| **15** | 14 | 1.1 | 2.9 | 8.4 |
| **16** | 15 | 1.1 | 2.6 | 7.4 |
| **17** | 16 | 1.1 | 2.4 | 6.8 |
| **18** | 17 | 1.1 | 2.2 | 6.0 |
| **19** | 18 | 1.1 | 2.1 | 5.6 |
| **20** | 19 | 1.1 | 1.9 | 4.7 |
| **21** | 20 | 1.1 | 1.8 | 4.3 |
| **22** | 25 | 1.1 | 1.3 | 1.4 |
| **23** | 30 | 1.0 | 1.0 | 0 |
| **24** | 35 | 1.0 | 0.8 | -1.9 |

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα μετρήσεων ενισχυτή




### 7.2.3 Ηχείο KEF B200

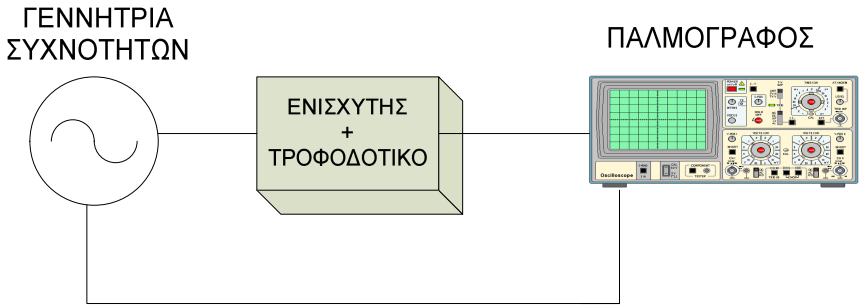
Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε ένα ηχείο ως μικρόφωνο καταγραφής υπόηχων είναι ο εξής:

Ένα ηχείο αποτελείται ουσιαστικά από τρία βασικά λειτουργικά μέρη: Ο κώνος, το πηνίο φωνής, και ένας μαγνήτης. Το πηνίο φωνής είναι συνδεμένο με τον κώνο και αποτελείται από πολλές σπείρες λεπτού σύρματος. Αυτά τα μέρη προσαρτώνται στο πλαίσιο του ηχείου με ένα εύκαμπτο σύστημα ανάρτησης που επιτρέπει στο σύστημα μεταξύ κώνου και πηνίου να κινηθεί μπρος πίσω. Το πηνίο φωνής τοποθετείται έτσι ώστε να βρίσκεται μέσα στο πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη άκαμπτα στο πλαίσιο. Το ηλεκτρικό σήμα από μια ακουστική πηγή συχνότητας εφαρμόζεται στις άκρες του καλωδίου του πηνίου φωνής όπου δημιουργεί ένα κυμαινόμενο μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το πηνίο. Αυτό το συνεχώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αντιδρά στο σταθερό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη με μια τρέχουσα επίδραση φαινόμενου έλξης/απώθησης που κάνει τον κώνο του ηχείου να ωθείται

μπρος πίσω σε συντονισμό με την εφαρμοσμένη συχνότητα ακουστικού σήματος. Η μετακίνηση του κώνου του ηχείου ασκεί μια ισοδύναμη κυμαινόμενη δύναμη στον περιβάλλοντα αέρα και έτσι δημιουργούνται τα ηχητικά κύματα. Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να αντιστραφεί ως εξής:

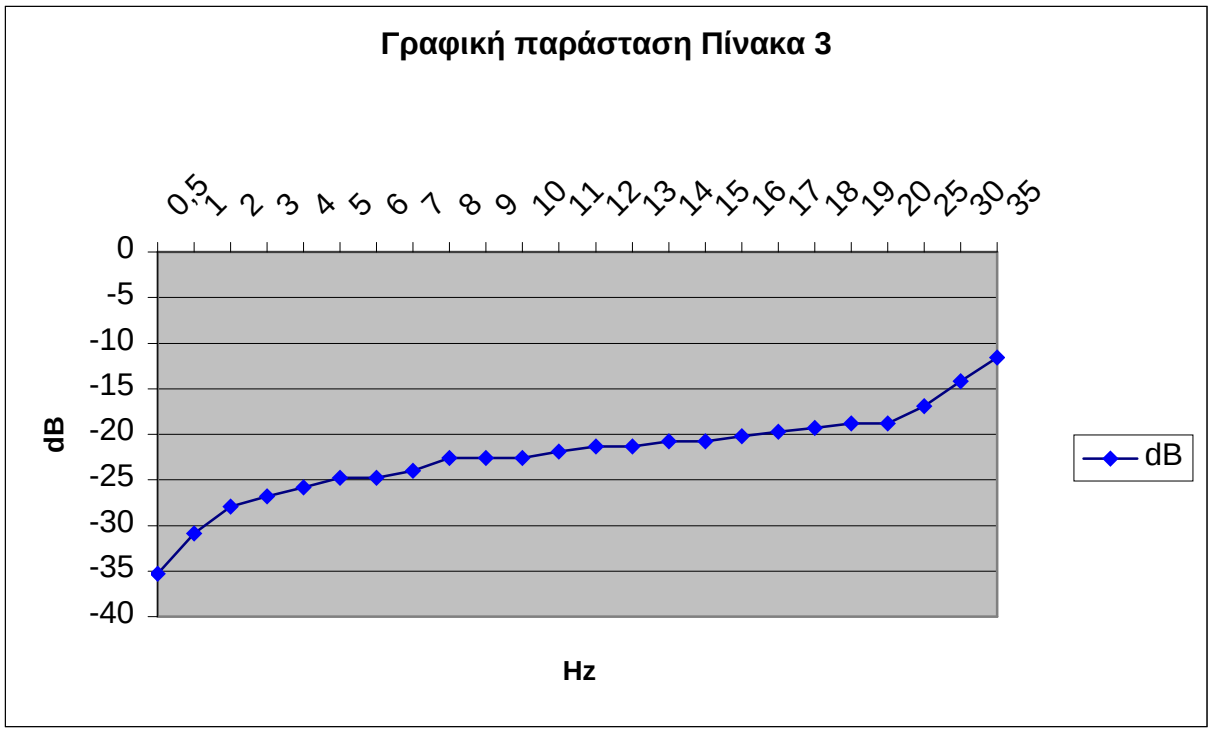
Η κίνηση του κώνου θα κινήσει στη συνέχεια το πηνίο φωνής μέσω του πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και ένα μικρό ρεύμα θα παραχθεί στο πηνίο. Έτσι, ένα ηχείο μπορεί να χρησιμεύσει ως μικρόφωνο με τα περιβάλλοντα ηχητικά κύματα να δημιουργούν ηχηρές δονήσεις στον κώνο με αποτέλεσμα να έχουμε κίνηση στο πηνίο φωνής σε σχέση με το μαγνήτη. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ένα κυμαινόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που αντιστοιχεί στις διακυμάνσεις των συναφών ηχητικών κυμάτων. Η ίδια βασική αρχή χρησιμοποιείτε από όργανα ανίχνευσης δονήσεων.

Συνδέσαμε το ηχείο μας με την γεννήτρια συχνοτήτων και στη συνέχεια με τον παλμογράφο παρατηρώντας τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

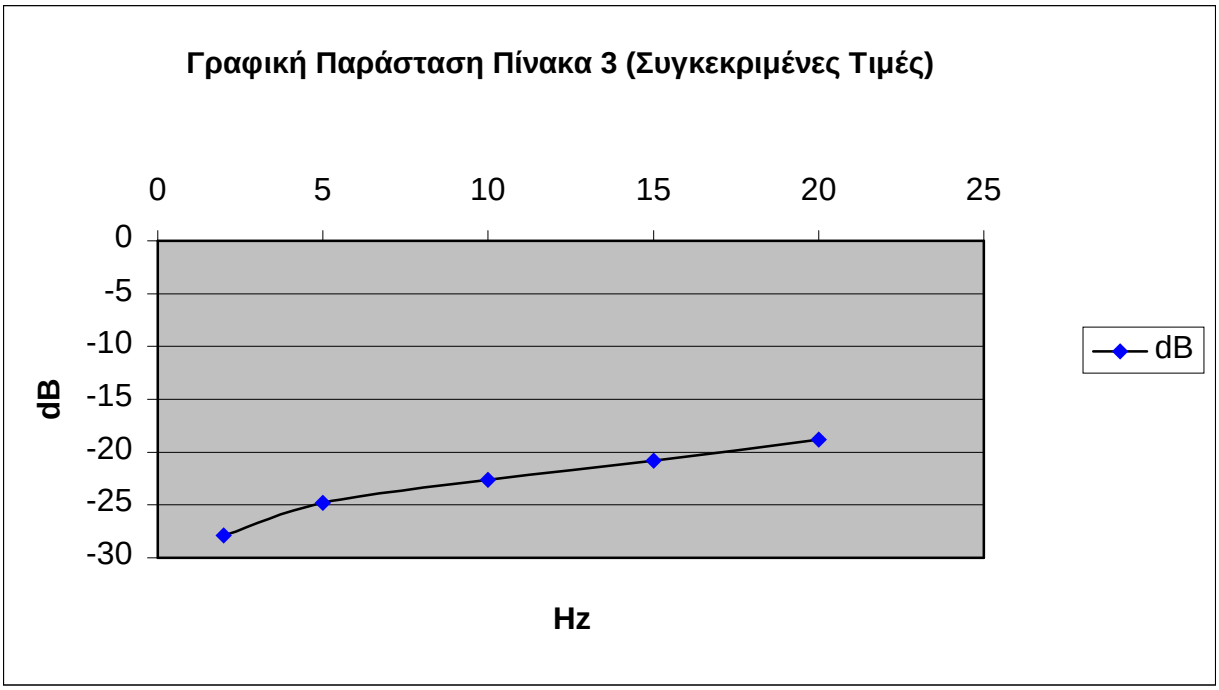



| **A\A** | **F(Hz)** | **Vin** | **Vout** | **Decibel(dB)** |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.5 | 1.75 | 0.03 | -35.3 |
| **2** | 1 | 1.75 | 0.05 | -30.9 |
| **3** | 2 | 1.75 | 0.07 | -27.9 |
| **4** | 3 | 1.75 | 0.08 | -26.8 |
| **5** | 4 | 1.75 | 0.09 | -25.8 |
| **6** | 5 | 1.75 | 0.10 | -24.8 |
| **7** | 6 | 1.75 | 0.10 | -24.8 |
| **8** | 7 | 1.75 | 0.11 | -24.0 |
| **9** | 8 | 1.75 | 0.13 | -22.6 |
| **10** | 9 | 1.75 | 0.13 | -22.6 |
| **11** | 10 | 1.75 | 0.13 | -22.6 |
| **12** | 11 | 1.75 | 0.14 | -21.9 |
| **13** | 12 | 1.75 | 0.15 | -21.3 |
| **14** | 13 | 1.75 | 0.15 | -21.3 |
| **15** | 14 | 1.75 | 0.16 | -20.8 |
| **16** | 15 | 1.75 | 0.16 | -20.8 |
| **17** | 16 | 1.75 | 0.17 | -20.2 |
| **18** | 17 | 1.75 | 0.18 | -19.7 |
| **19** | 18 | 1.75 | 0.19 | -19.3 |
| **20** | 19 | 1.75 | 0.20 | -18.8 |
| **21** | 20 | 1.75 | 0.20 | -18.8 |
| **22** | 25 | 1.75 | 0.25 | -16.9 |
| **23** | 30 | 1.75 | 0.34 | -14.2 |
| **24** | 35 | 1.75 | 0.46 | -11.6 |

**Πίνακας 3.** Αποτελέσματα μετρήσεων ηχείου




Επειδή δεν είναι δυνατόν να γίνει ηχοβόλιση του κώνου μας με γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων προδιαγεγραμμένη να λειτουργεί σε συχνότητες από 2 έως 20Hz δώσαμε σταθερή τάση από γεννήτρια χαμηλών συχνοτήτων παρατηρώντας την αλλαγή της τάσης στα άκρα του πηνίου που στην ουσία βλέπαμε τις μεταβολές της αντίδρασης του πηνίου του κώνου.

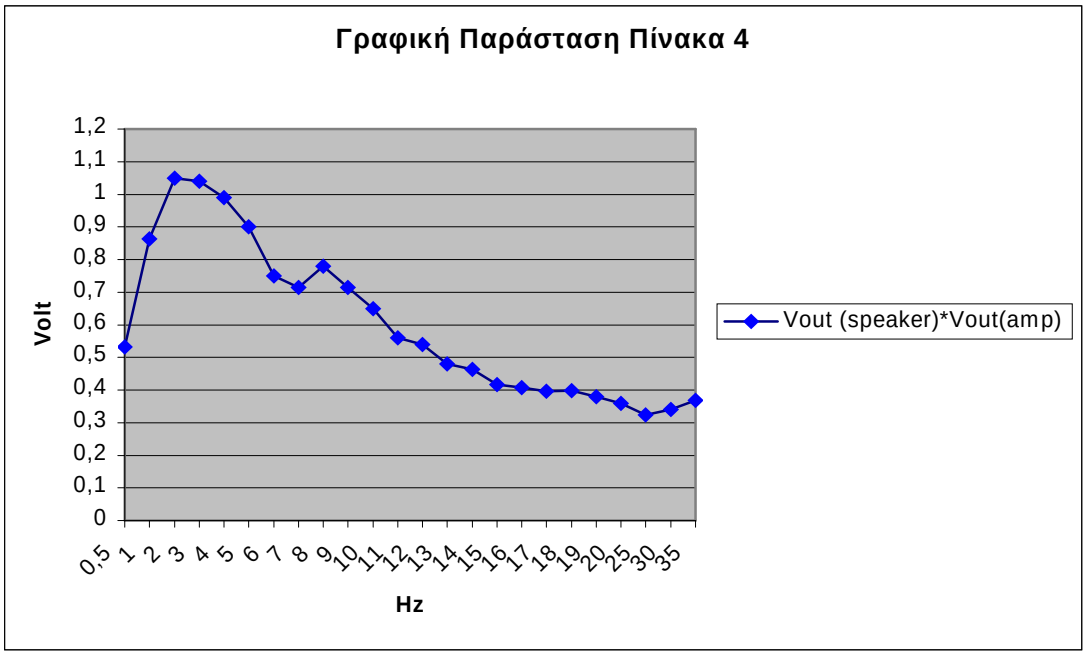


Από την παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο κώνος του ηχείου στο φάσμα συχνοτήτων που θα πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις μας λειτουργεί γραμμικά έχοντας μικρές αποκλίσεις. Οπότε είναι δυνατό να ισχυριστούμε ότι ο κώνος μας μπορεί να λειτουργήσει και σε αυτές τις συχνότητες.

Ο παρακάτω πίνακας είναι αποτέλεσμα του γινομένου των τάσεων εξόδου του ηχείου και του ενισχυτή με τις αντίστοιχες συχνότητες.

| **A\A** | **F(Hz)** | **Vout ($s_{peaker)}$** | **$Vout_{(amp)}$** | **Vout ($s_{peaker)}$*$Vout_{(amp)}$** |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.5 | 0.03 | 19 | 0.532 |
| **2** | 1 | 0.05 | 18 | 0.864 |
| **3** | 2 | 0.07 | 15 | 1.05 |
| **4** | 3 | 0.08 | 13 | 1.04 |
| **5** | 4 | 0.09 | 11 | 0.99 |
| **6** | 5 | 0.10 | 9.0 | 0.9 |
| **7** | 6 | 0.10 | 7.5 | 0.75 |
| **8** | 7 | 0.11 | 6.5 | 0.715 |
| **9** | 8 | 0.13 | 6.0 | 0.78 |
| **10** | 9 | 0.13 | 5.5 | 0.715 |
| **11** | 10 | 0.13 | 5.0 | 0.65 |
| **12** | 11 | 0.14 | 4.0 | 0.56 |
| **13** | 12 | 0.15 | 3.6 | 0.54 |
| **14** | 13 | 0.15 | 3.2 | 0.48 |
| **15** | 14 | 0.16 | 2.9 | 0.464 |
| **16** | 15 | 0.16 | 2.6 | 0.416 |
| **17** | 16 | 0.17 | 2.4 | 0.408 |
| **18** | 17 | 0.18 | 2.2 | 0.396 |
| **19** | 18 | 0.19 | 2.1 | 0.399 |
| **20** | 19 | 0.20 | 1.9 | 0.38 |
| **21** | 20 | 0.20 | 1.8 | 0.36 |
| **22** | 25 | 0.25 | 1.3 | 0.3235 |
| **23** | 30 | 0.34 | 1.0 | 0.34 |
| **24** | 35 | 0.46 | 0.8 | 0.368 |

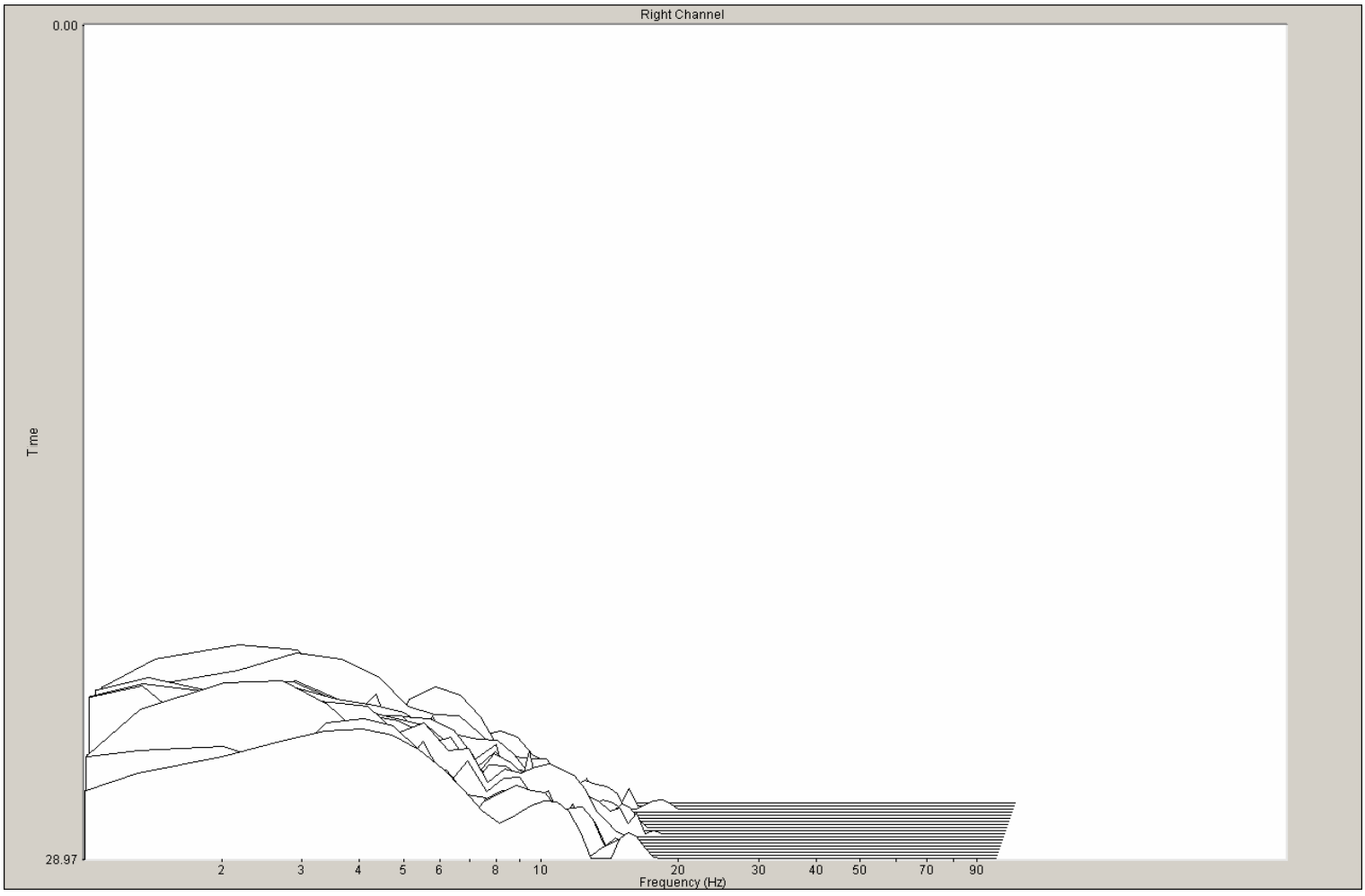
**Πίνακας 4.** Αποτελέσματα γινομένου τάσεων εξόδου ηχείου - ενισχυτή


Γραφική Παράσταση Πίνακα 4
Volt
1,2
1,1
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0,5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 25 30 35
Hz
Vout (speaker)*Vout(amp)

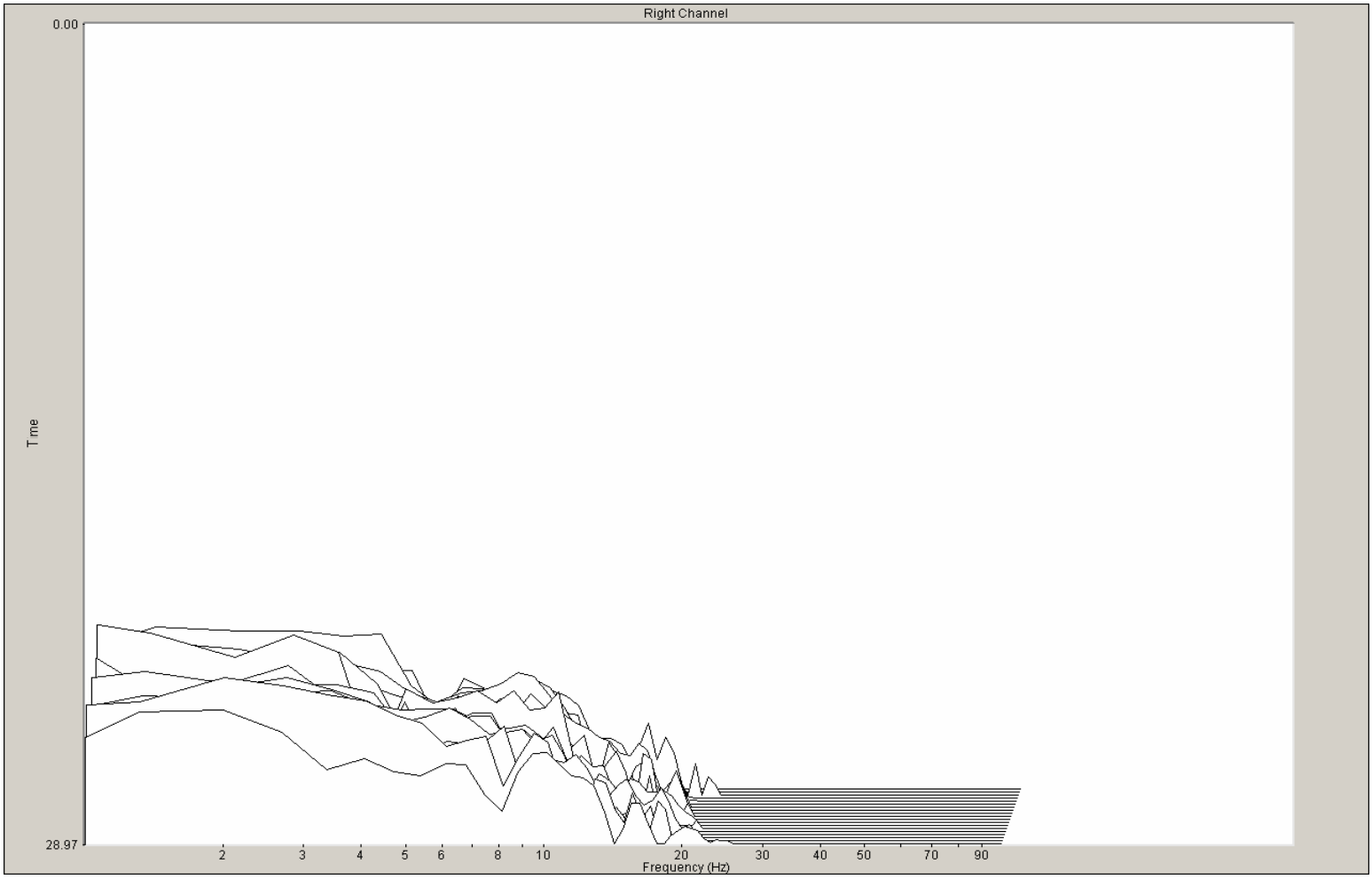
## 7.3 Καταγραφή υπόηχων

Μετά την υλοποίηση της κατασκευής μας σκοπός μας είναι η καταγραφή υπόηχων σε διαφορετικές συνθήκες και καταστάσεις.

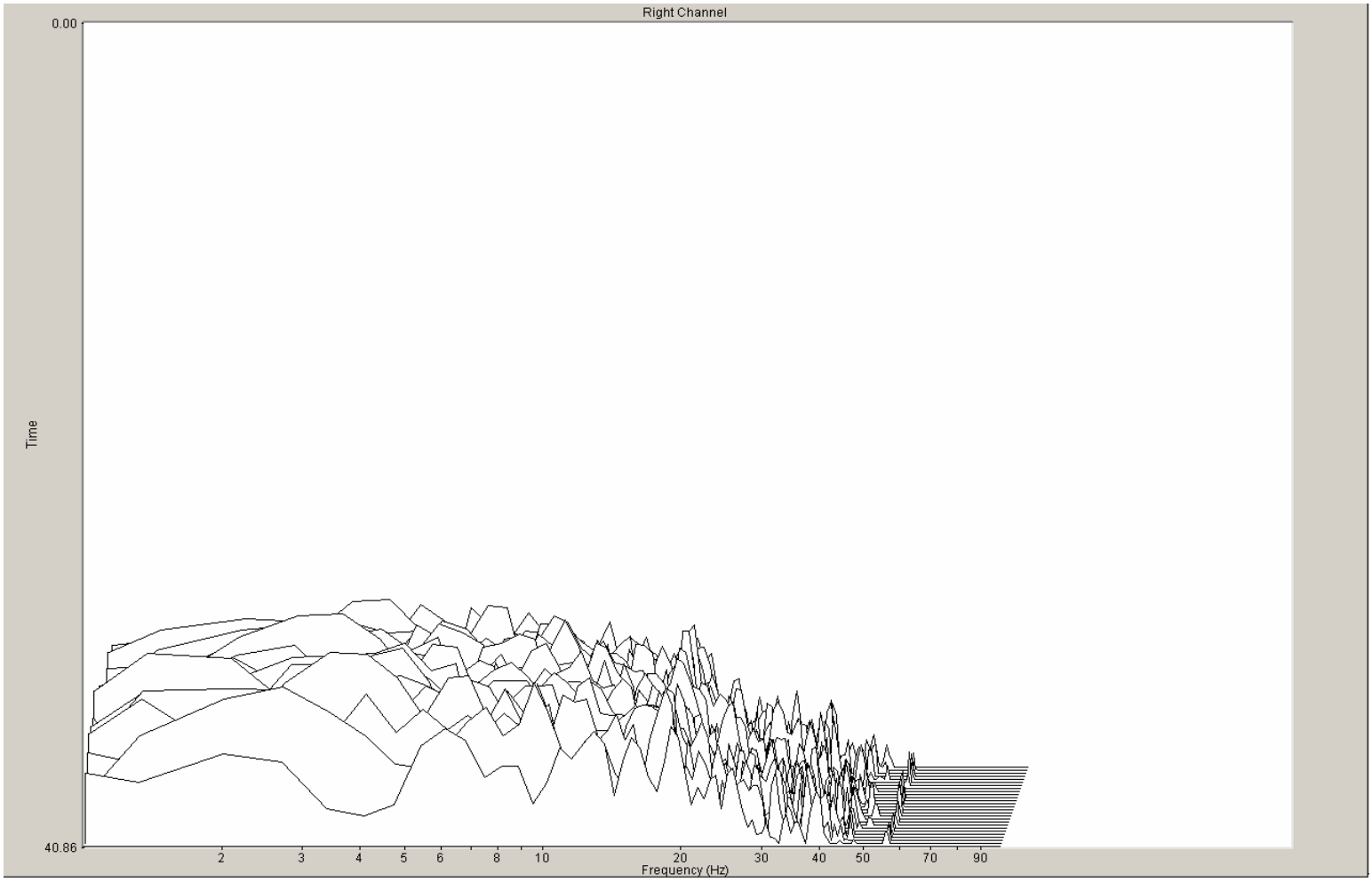
1. Το πρώτο πείραμα που κάναμε ήταν η κίνηση του χεριού κοντά στον κώνο του ηχείου μας. Το αποτέλεσμα της καταγραφής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



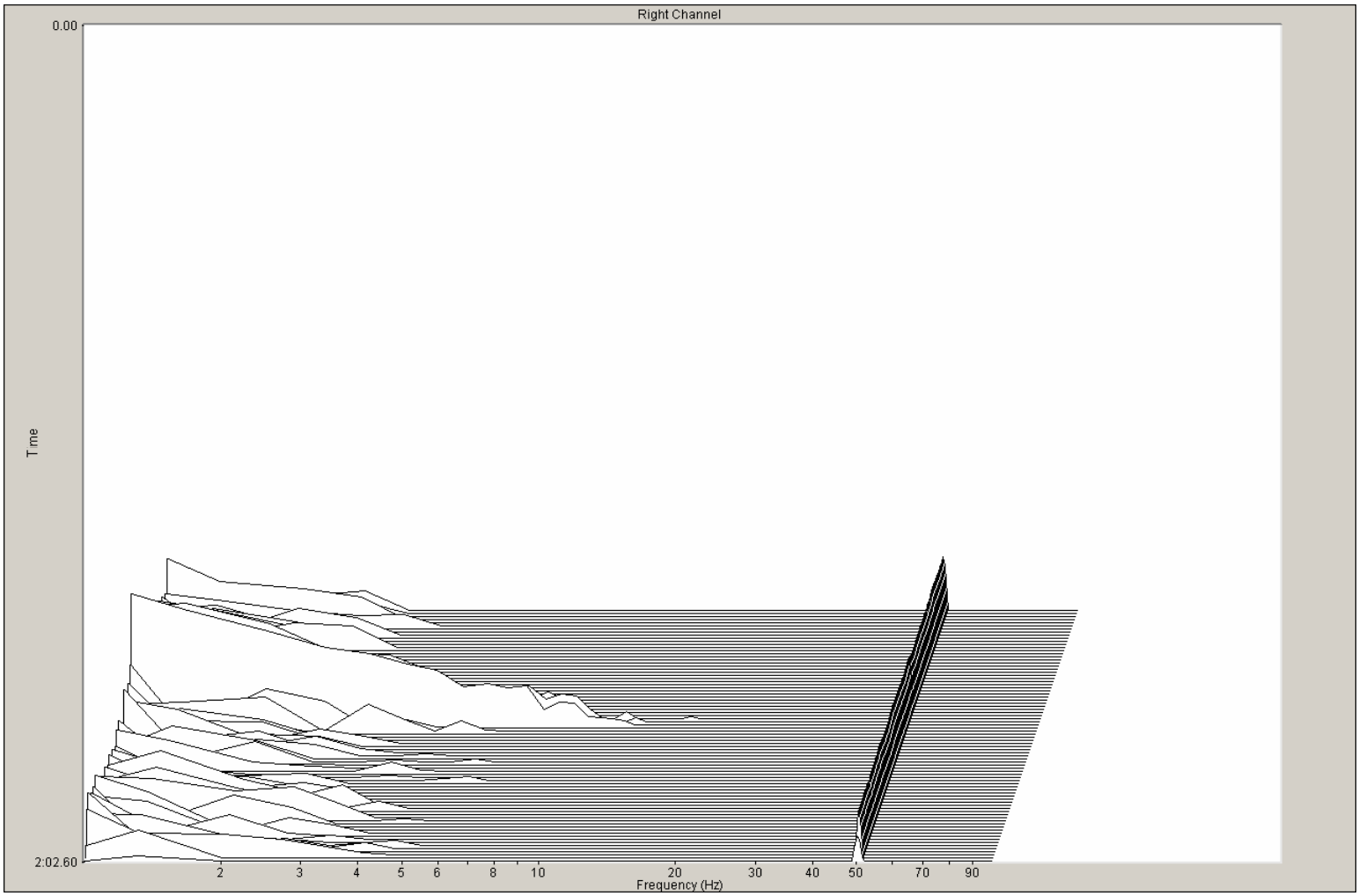
2. Το επόμενο πείραμα που κάναμε ήταν να τοποθετήσουμε το ηχείο μας στην καρδιά ενός ανθρώπου. Το αποτέλεσμα της καταγραφής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



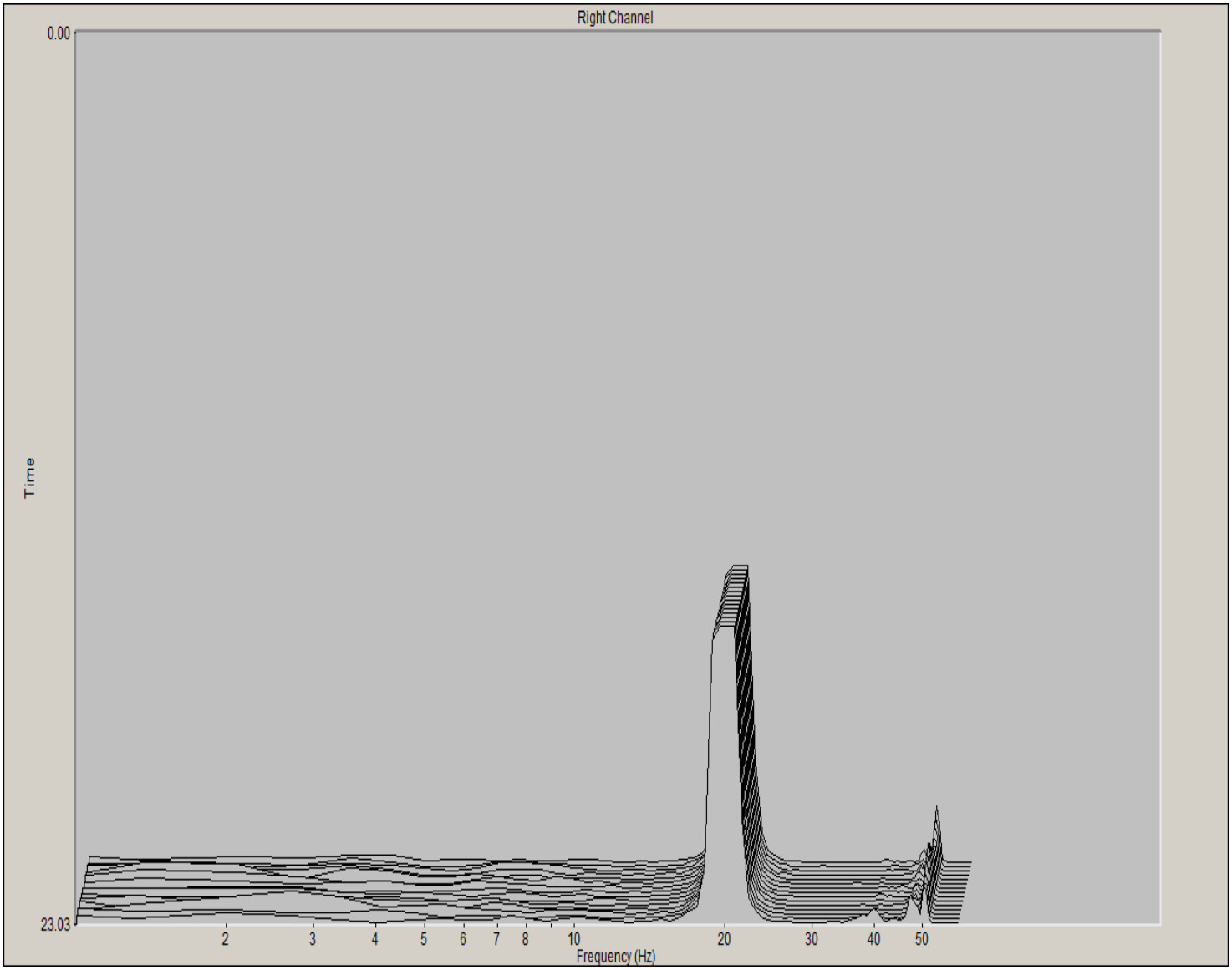
3. Στη συνέχεια βάλαμε σε λειτουργία έναν ανεμιστήρα κοντά στο κώνο του ηχείου και καταγράψαμε τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα



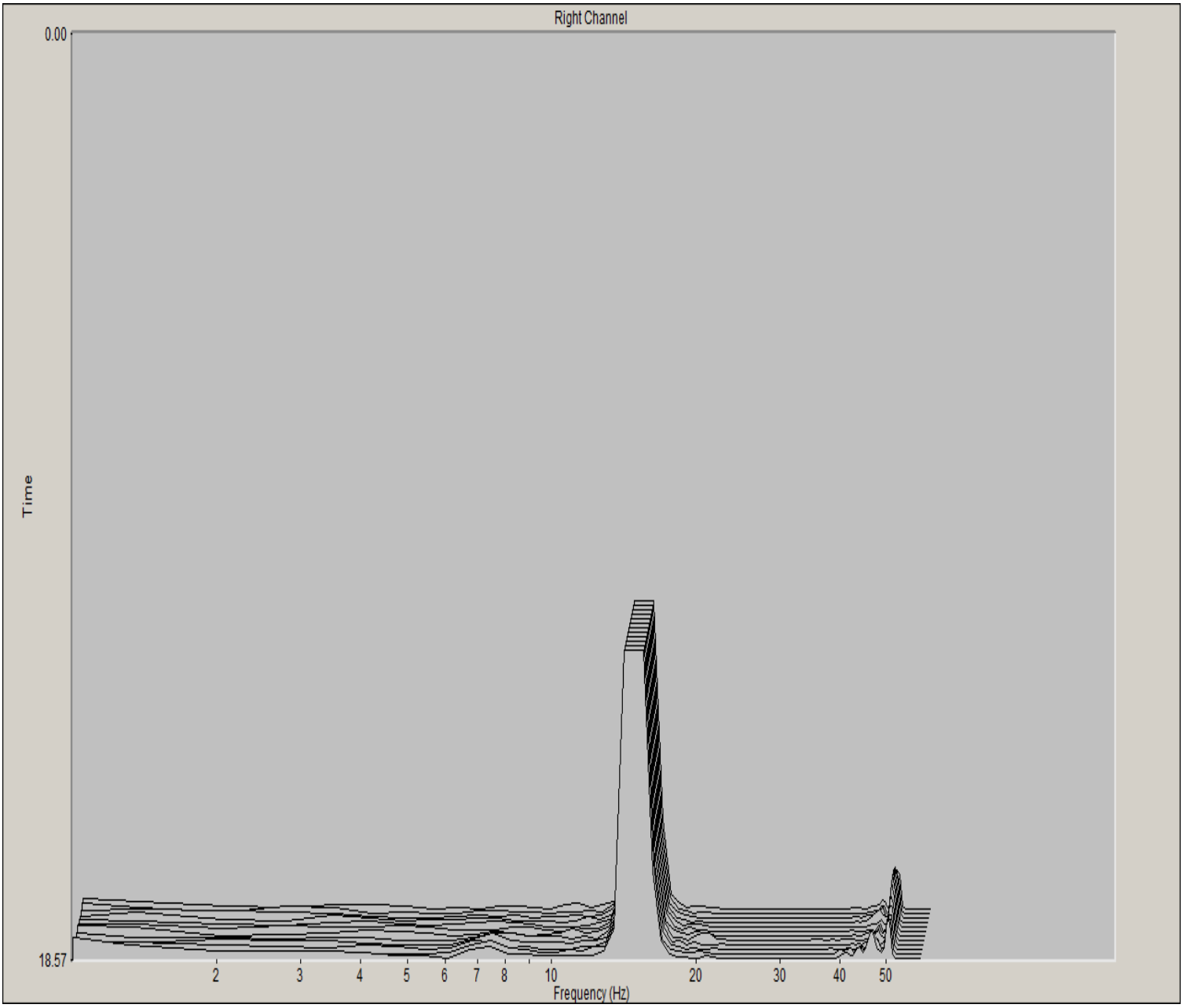
4. Το επόμενο πείραμα ήταν το εξής. Τοποθετήσαμε το ηχείο μας με τον κώνο να κοιτάζει προς το έδαφος προσπαθώντας να καταγράψουμε υπόηχους. Για την επίτευξη του σκοπού μας επιλέξαμε ένα μουσικό κομμάτι το οποίο να είναι πλούσιο σε χαμηλές συχνότητες. Το αποτέλεσμα της καταγραφής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



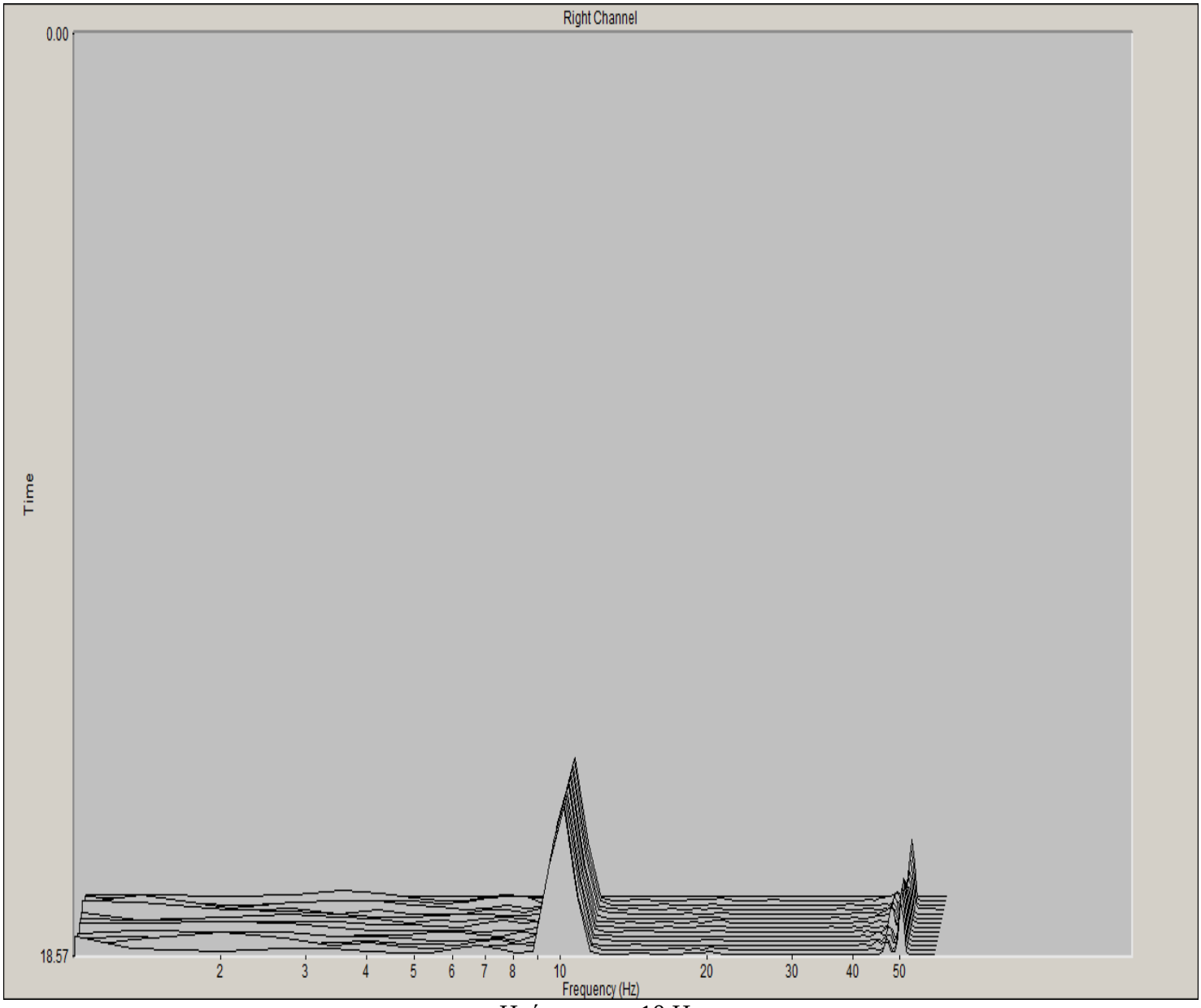
5. Τοποθετήσαμε το σύστημα μας με τον κώνο σε απόσταση 10cm από την πηγή (ηχείο) και αφού αναπαράγαμε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή τις παρακρατώ συχνότητες (20Hz - 15Hz - 10Hz) καταγράψαμε τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



Ημίτονο των 20Hz




Ημίτονο των 15Hz



Ημίτονο των 10 Hz

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα (καταγραφή, ενίσχυση και pitch shifting) διαπιστώνουμε ότι η συσκευή λειτουργεί ορθά.

Βάση λοιπόν της πειραματικής μας διαδικασίας διαπιστώνουμε ότι το κύκλωμα ενίσχυσης καθώς και το τροφοδοτικό λειτουργούν σε γενικές γραμμές βάση του θεωρητικού μέρους. Αυτό αποδεικνύεται στο τελικό μέρος της πειραματικής μας διαδικασίας με την καταγραφή ενίσχυση και εξομοίωση των υπόηχων από το περιβάλλον

Το κύκλωμα μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση παραγωγής ηπόηχων από μια πηγή ή και για την αναπαραγωγή αυτών .

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Βασική Ηλεκτρονική, Albert Paul Malvino, Ph.D.
[2] Εγχειρίδιο Ηλεκτρονικής, Kaufman-Seidman
[3] The Art Of Electronics, Paul Horowitz – Windfield Hill

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΗΝΣΕΙΣ

[1]http://el.science.wikia.com/
[2] http://www.nexushellas.gr/
[3] http://www.ceid.upatras.gr/
[4] http://www.focusmag.gr/
[5] http://www.skepdic.gr/
[6] http://www.boards.ie/
[7] http://users.otenet.gr/~athsam/database.htm
[8] http://denethor.wlu.ca/PSpice/pspice_tutorial.html#IIA