



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

Σχεδιασμός ακουστικού βαρηκοΐας

και

Υλοποίηση με τη βοήθεια μικροελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΞΥΔΙΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΚΑΛΥΒΑΣ

ΠΑΤΡΑ – ΙΟΥΝΙΟΣ 2022

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Παναγιώτης Ξυδιάς

© 2022 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Παναγιώτη Ξυδιά, και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από τον ίδιο, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ενώ παράλληλα βεβαιώνει πως στην περίπτωση χρήσης αυτού σιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κ.λπ., έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτού.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με τίτλο

Σχεδιασμός ακουστικού βαρηκοΐας

και

Υλοποίηση με τη βοήθεια μικροελεγκτή

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

ΞΥΔΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΤΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ

Αριθμός Μητρώου: 1059434

Παρουσιάστηκε δημόσια στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

01/07/2022

και εξετάστηκε από την ακόλουθη εξεταστική επιτροπή:

Γρηγόριος Καλύβας, ΔΕΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών (επιβλέπων)

Αλέξιος Μπίρμπας, ΔΕΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών (μέλος επιτροπής)

Μιχάλης Μπίρμπας, ΔΕΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών (μέλος επιτροπής)

Ο Επιβλέπων

Ο Διευθυντής του Τομέα

Γρηγόριος Καλύβας
ΔΕΠ

Αλέξιος Μπίρμπας
ΔΕΠ

*Κάθε τι πον η ψυχή
επιθυμεῖ, πολύ το πετυχαίνει*

“Σενέκας”

Πρόλογος

Η εργασία που αναπτύσσεται στη συνέχεια με τίτλο «*Σχεδιασμός ακουστικού βαρηκοϊας και Υλοποίηση με τη βοήθεια μικροελεγκτή*» υλοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών και διευθυντή της ερευνητικής ομάδας *Κυκλωμάτων και Συστημάτων Υψηλών Συχνοτήτων του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών εφαρμογών*, Γρηγόριου Καλύβα.

Η εργασία καθώς και η υλοποίησή της στο Πανεπιστήμιο Πατρών αποτελεί κατεξοχήν πρόταση του φοιτητή η οποία έγινε αποδεκτή. Στόχος της είναι η υλοποίηση συσκευής ακουστικού βαρηκοϊας η οποία προορίζεται για δοκιμαστική χρήση (prototype test) και όχι για εμπορευματοποίηση.

Η ανάλυση που ακολουθεί, στον κυρίως κορμό της εργασίας, αξιοποιεί θεωρητικές και πρακτικές γνώσεις που αποκομίσθηκαν κατά την πεμπτοετής φοίτηση στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Αποτελεί το τελευταίο έργο προς παράδοση πριν τη λήψη διπλώματος, ωστόσο είναι η αρχή μιας νέας πορείας προς την αγορά εργασίας του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Γρηγόριο Καλύβα για την συνεργασία μας, αλλά και για την καθοδήγησή του κατά την υλοποίηση της εργασίας. Επίσης σημαντική κρίνεται και η βοήθεια των συμφοιτητών μου, φίλων μου και λοιπών κοντινών ή συγγενικών προσώπων για την υποστήριξή τους κατά το διάστημα φοίτησής μου. Τέλος, επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους γονείς μου, Χαράλαμπο Ξυδιά και Βασιλική Παναγοπούλου, για την συνεχή τους ενθάρρυνση, την επίδειξη πίστης στις δεξιότητές μου και, ειδικότερα, στην αμέριστη βοήθειά τους χάριν της οποίας η φοίτηση στο Πανεπιστήμιο Πατρών έγινε πραγματικότητα.

Περίληψη

Σχεδιασμός ακουστικού βαρηκοΐας

και

Υλοποίηση με τη βοήθεια μικροελεγκτή

ΞΥΔΙΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΚΑΛΥΒΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μικροηλεκτρονικής συσκευής ικανή να προσομοιώνει την λειτουργία ενός ακουστικού βαρηκοΐας. Σκοπός της εργασίας είναι η πρακτική αξιοποίηση των θεμελιωδών θεωρητικών γνώσεων μικροηλεκτρονικών και ενσωματωμένων συστημάτων. Αρχικά, αναλύθηκαν οι παράμετροι οι οποίες καθορίζουν τις τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος προς υλοποίηση, σύμφωνα με παγκοσμίως αποδεκτά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί σε προηγούμενες έρευνες, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις σε ακοή ενός βαρήκου ατόμου, και συγκεκριμένα του συγγραφέα αυτής της διπλωματικής. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν ο μικροελεγκτής και τα απαραίτητα ολοκληρωμένα κυκλώματα από τα οποία θα αποτελείται η συσκευή στην τελική έκδοσή της. Το στάδιο το οποίο ακολούθησε ήταν αυτό των προσομοιώσεων και της εκτέλεσης μετρήσεων σε δοκιμαστική πλακέτα με τη βοήθεια εργαστηριακού εξοπλισμού. Τέλος, έγινε ο φυσικός σχεδιασμός και η ολοκλήρωση του έργου σε μία μοναδική πλακέτα PCB. Τα αποτελέσματα κατά τη λειτουργία του ακουστικού ήταν ικανοποιητικά και έρχονται σε συμφωνία με αυτά που προέκυψαν κατά την εξομοίωση.

Λέξεις – Κλειδιά : μικροηλεκτρονική, ενσωματωμένα συστήματα, ακουστικό βαρηκοΐας

Abstract

Hearing aid design and implementation with microcontroller

PANAGIOTIS XYDIAS

GRIGORIOS KALIVAS

The topic of this dissertation is the design and implementation of a microelectronic device capable of simulating the operation of a hearing aid. The purpose of this work is the practical utilization of the basic theoretical knowledge of microelectronic and embedded systems. Initially, the parameters that determine the technical specifications of the system to be implemented were analyzed, according to globally accepted data collected in previous research, in combination with the hearing requirements of a hearing-impaired person, namely the author of this dissertation. Then the microcontroller and the necessary integrated circuits were selected, of which the device will consist in its final version. The next step was that of simulations and performing measurements on a test board with the help of laboratory equipment. Finally, the physical design and completion of the project was done on a unique PCB board. The results during the operation of the hearing aid device were satisfactory and are in line with what emerged during the simulation

Keywords : microelectronics, embedded systems, hearing aid

Περιεχόμενα

Πρόλογος	V
Περίληψη	VI
Abstract	VII
Περιεχόμενα Πινάκων.....	X
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 : Αρχές σχεδίασης ακουστικών βαρηκοΐας.....	3
1.1 Τα είδη βαρηκοΐας, οι τρόποι λειτουργίας της ακοής και η παραγωγή της ανθρώπινης ομιλίας.....	3
1.2 Σύγχρονες λύσεις της πάθησης της βαρηκοΐας στον τομέα της τεχνολογίας	6
1.3 Η αρχιτεκτονική υλοποίησης του ακουστικού βαρηκοΐας στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων	15
2.1 Η τροφοδοσία των κυκλωμάτων.....	15
2.2 Παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία	16
2.2.1 Αντίσταση	16
2.2.2 Πυκνωτής	19
2.2.3 Επαγωγός	20
2.3 Ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία	21
2.3.1 Τρανζίστορ	21
2.3.2 Δίοδος	22
2.3.3 Τελεστικός ενισχυτής.....	23
2.4 Μικροελεγκτές	27
2.5 Αναλογικά και ψηφιακά συστήματα.....	30
Κεφάλαιο 3 : Μελέτη ακουστικών σημάτων.....	32

3.1 Ηχητικά κύματα	32
3.2 Διαμερισμός κρίσιμων ζωνών.....	36
3.3 Επιλογή μικροφώνου	40
3.4 Ακουστική έξοδος.....	45
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση του κυκλώματος.....	48
4.1 Επιθυμητές διεργασίες του ενσωματωμένου συστήματος	48
4.2 Προσομοίωση του συστήματος	49
4.2.1 Σχεδιασμός πόλωσης	49
4.2.2 Σχεδιασμός αναλογικού συγκριτή	51
4.2.3 Προενίσχυση ακουστικών σημάτων.....	53
4.2.4 Τράπεζα φίλτρων	54
4.2.5 Στάδιο προγραμματιζόμενης αναλογικής ενίσχυσης.....	58
4.2.6 Στάδιο εξόδου και οδήγηση φορτίου συνδεμένο σε audio jack	60
4.3 Συμπεράσματα από την εκτέλεση των εξομοιώσεων	61
Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση της συσκευής	62
5.1 Σχεδιασμός PCB	62
5.2 Σχεδιασμός του κυκλώματος στο λογισμικό Altium Designer	66
5.3 Λειτουργία της συσκευής και αποτελέσματα	77
5.3.1 Ανάλυση σε επίπεδο Hardware.....	77
5.3.2 Ανάλυση σε επίπεδο Firmware	82
Κεφάλαιο 6: Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοΐας και τελικά συμπεράσματα	87
6.1 Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοΐας	87
6.2 Συμπεράσματα και βελτίωση του πρωτότυπου στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας	89
Βιβλιογραφία	91

Ελληνόγλωσση	91
Ξενόγλωσση	92
URLs	92
Παράρτημα	94
Κατασκευαστικά φυλλάδια.....	94
Πηγαίος κώδικας.....	107
Φύλλα κυκλωματικών διαγραμμάτων, PCB Layout και BoM	110

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 : Βαθμοί βαρηκοΐας σε ενήλικες και παιδιά.....	7
Πίνακας 2.1 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU	28
Πίνακας 3.1 : Τράπεζα φίλτρων των κρίσιμων ζωνών στο κοχλία	35
Πίνακας 3.2 : Αναλογικά φίλτρα διαμερισμού κρίσιμων ζωνών.....	37

Εισαγωγή

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Σχεδίασμός ακουστικού βαρηκοϊας και Υλοποίηση με τη βοήθεια μικροελεγκτή» στοχεύει στην πρακτική υλοποίηση ενός μικτού αναλογικού/ψηφιακού κυκλώματος το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία ενός ακουστικού βαρηκοϊας και δεν αποτελεί, στη παρούσα έκδοση, προϊόν το οποίο να προορίζεται για την αγορά. Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται τεχνικές σχεδίασης κυκλωμάτων οι οποίες αποτελούν σημαντικό γνωστικό εφόδιο για την επαγγελματική πορεία οποιουδήποτε μηχανικού ενσωματωμένων συστημάτων στην αγορά εργασίας. Οι τεχνικές αυτές, κάποιες απλές και άλλες πιο σύνθετες, θα αναλυθούν στα κεφάλαια που ακολουθούν, με λεπτομέρεια, από το στάδιο της θεωρητικής ανάλυσης και σχεδιασμού έως το στάδιο της πρακτικής υλοποίησης της συσκευής.

Το **Κεφάλαιο 1 : Αρχές σχεδίασης ακουστικών βαρηκοϊας** αναλύει βασικά χαρακτηριστικά της πάθησης και κάνει αναφορά στα επιτεύγματα της τεχνολογίας για την αντιμετώπιση του προβλήματος τη σημερινή εποχή. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθεται η λογική σχεδίασης της συσκευής, οι παράμετροι που θα καθορίσουν τη λειτουργία της και τα βήματα που θα μεσολαβήσουν έως την ολοκλήρωση του έργου.

Στο **Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων**, γίνεται επισκόπηση των βασικών υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο τελικό κύκλωμα. Σκοπός του είναι ο αναγνωστής να έρθει σε πρώτη επαφή με την βασική θεωρία που διέπει την σχεδίαση κυκλωμάτων. Τέλος, γίνεται μία σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών της θεωρίας σημάτων.

Στο **Κεφάλαιο 3 : Μελέτη ακουστικών σημάτων**, αρχικά, προσδιορίζονται, σε θεωρητική βάση, οι αρχές διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στο χώρο και η τεχνική επιμερισμού του συχνοτικού φάσματος, σε κρίσιμες ζώνες, από τον κοχλία. Επίσης, αναλύονται τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν το μικρόφωνο και το βύσμα audio jack τα οποία χρησιμοποιούνται στη κατασκευή.

Το **Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση των κυκλώματος** πραγματεύεται τη προσομοίωση του τελικού κυκλώματος και των υπομονάδων του. Με τη βοήθεια του λογισμικού LTspice και κατάλληλων παραμετροποιήσεων, επιτυγχάνεται η αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας της συσκευής και επαληθεύονται τα ζητούμενα αποτελέσματα μέσω των αντίστοιχων γραφημάτων.

Το **Κεφάλαιο 5 : Υλοποίηση της συσκευής** αναλύει τις βασικές αρχές σχεδίασης ολοκληρωμένων πλακετών PCB και δίνονται διευκρινήσεις σχετικές με την layout σχεδίαση του τελικού κυκλώματος στο λογισμικό Altium Designer. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή του υλισμικού της συσκευής και παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα της λειτουργίας της.

Στο **Κεφάλαιο 6 : Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοϊας και τελικά συμπεράσματα**, δίνονται τα συμπεράσματα και οι πιθανές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν σε επόμενη έκδοση της συσκευής. Επιπλέον, ακολουθεί μια συνοπτική ενημέρωση και τα πιθανά σενάρια τα οποία είναι σχετικά με την εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοϊας.

Η εργασία αυτή συνοδεύεται από επιπλέον υποστηρικτικό υλικό, όπως βιβλιογραφικές πηγές, ιστοσελίδες, πίνακες μετρήσεων και αναλυτικά φύλλα κατασκευαστών σχετικά με τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται. Όλα τα παραπάνω, καθώς και τα τελικά κυκλωματικά διαγράμματα, ευρίσκονται στις αντίστοιχες ενότητες στο παράρτημα.

Κεφάλαιο 1 : Αρχές σχεδίασης ακουστικών βαρηκοΐας

1.1 Τα είδη βαρηκοΐας, οι τρόποι λειτουργίας της ακοής και η παραγωγή της ανθρώπινης ομιλίας

Ο άνθρωπος φέρει, εκ γενετής, χαρακτηριστικά τα οποία είναι χρήσιμα στις καθημερινές δραστηριότητές του και σε αυτά συμπεριλαμβάνονται οι αισθήσεις όπως είναι η όραση, η γεύση, η όσφρηση, η αφή και η ακοή. Η τελευταία αποτελεί το κεντρικό θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενώ συνδυάζεται άμεσα και με την ομιλία. Η ακοή είναι απαραίτητη προκειμένου ο άνθρωπος να βιώνει ακουστικά ερεθίσματα από το περιβάλλον, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις προμηνύουν κάποιο κίνδυνο. Με αυτή καθίσταται επιτυχής η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω της ομιλίας και κρίνεται αναγκαία ως μέσο καθημερινής ψυχαγωγίας, όπως για παράδειγμα είναι η ακρόαση ασμάτων ή λοιπών οπτικοακουστικών έργων. Σε ορισμένες περιπτώσεις ανθρώπων, ωστόσο, η ακοή δεν λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές των βιοιατρικών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από δείγματα πληθυσμών. Η απώλεια ακοής (hearing loss) ενός ανθρώπου αποτελεί ιδιόμορφο χαρακτηριστικό όπως, επίσης, και το ακουόγραμμα (audiogram) το οποίο προκύπτει από αυτή. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των μετρητικών οργάνων ακουστικών σημάτων είναι, πλέον, εφικτή η αντιμετώπιση του προβλήματος μερικής απώλειας ακοής με την χρήση ειδικών ακουστικών ενίσχυσης του ήχου, σχεδιασμένων σύμφωνα με τις ανάγκες του εκάστοτε ατόμου. Τα άτομα τα οποία φέρουν μερική απώλεια ακοής χαρακτηρίζονται ως βαρήκοα άτομα και οι μικροηλεκτρονικές συσκευές ενίσχυσης της ακοής, στις οποίες έγινε αναφορά, ονομάζονται ακουστικά βαρηκοΐας.

Η βαρηκοΐα συναντάται, συνήθως, σε τρεις κατηγορίες. Αρχικά, η νευροαισθητηριακού τύπου βαρηκοΐα, η οποία οφείλεται σε υπολειτουργικότητα των τριχωτών κυττάρων στο κοχλία στο εσωτερικό του αυτιού. Είναι αποτέλεσμα της καταστροφής των εν λόγω κυττάρων, εξαιτίας παρατεταμένης έκθεσης σε ισχυρές ηχοστάθμες, τραυματισμό στο ακουστικό νεύρο ή τον κοχλία, λοιμώξεις στο εσωτερικό του αυτιού ή κληρονομείται. Ως εκ τούτου, τα ηχητικά κύματα είτε δεν δέχονται σωστή επεξεργασία είτε δεν φθάνουν στον εγκέφαλο. Μία ακόμα κατηγορία αποτελεί η βαρηκοΐα τύπου αγωγιμότητας, η οποία προκαλείται λόγω βλαβών στο εξωτερικό και μέσο αυτή. Γι' αυτό ακριβώς, ο ήχος καταφθάνει αδύναμος. Τέλος, η βαρηκοΐα μικτού τύπου προκαλείται από βλάβες σε διαφορετικά σημεία του αυτιού (εξωτερικό, μέσο και εσωτερικό) και, έτσι, ο ήχος σε ορισμένες περιπτώσεις τείνει να είναι κατά πολύ ανίσχυρος έως και μη αντιληπτός εξαιτίας αλλοιώσεων που προκαλεί η νευροαισθητήριος βαρηκοΐα¹.

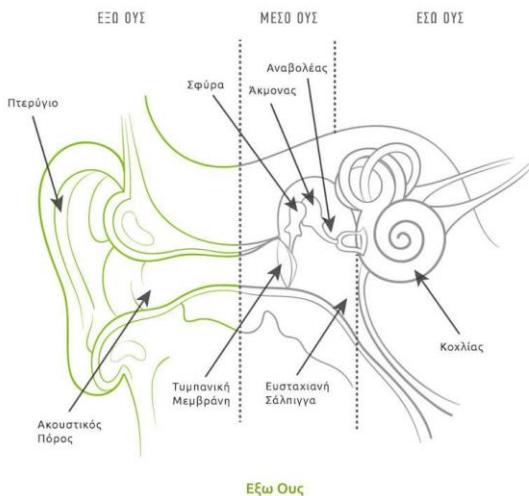
Όπως έγινε σαφές, σε κάθε περίπτωση βαρηκοΐας το πρόβλημα εντοπίζεται στην έλλειψη ισχύος των ηχητικών σημάτων. Προκειμένου να επιλεχθούν τα επιθυμητά τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής ενίσχυσης του ήχου, θα πρέπει να γνωρίζει κανείς με ποιό τρόπο τα ηχητικά κύματα γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο αυτή

¹ Κόντου Β., (2009). *Βαρηκοΐα – Κώφωση*, Ιωάννινα, σελ.21 – 23

Κεφάλαιο 1 : Αρχές σχεδίασης ακουστικών βαρηκοΐας

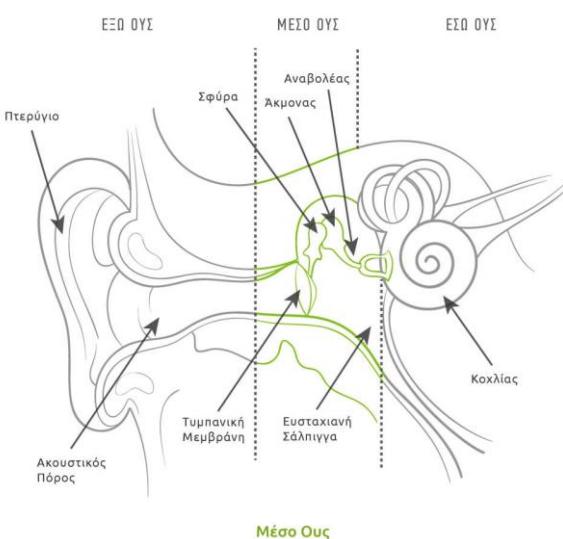
και πώς παράγεται η ανθρώπινη ομιλία η οποία αποτελεί το βασικό μέσο άμεσης επικοινωνίας των ατόμων και θα πρέπει να αποκαθίσταται κατά τη χρήση του ακουστικού βαρηκοΐας.

Το αυτί είναι το αισθητήριο όργανο το οποίο συλλέγει και επεξεργάζεται τον ήχο. Τα κεντρικά υποσυστήματα του αυτιού είναι το έξω ους, το μέσο ους και το έσω ους²



Εικόνα 1.1 : Έξω Ους

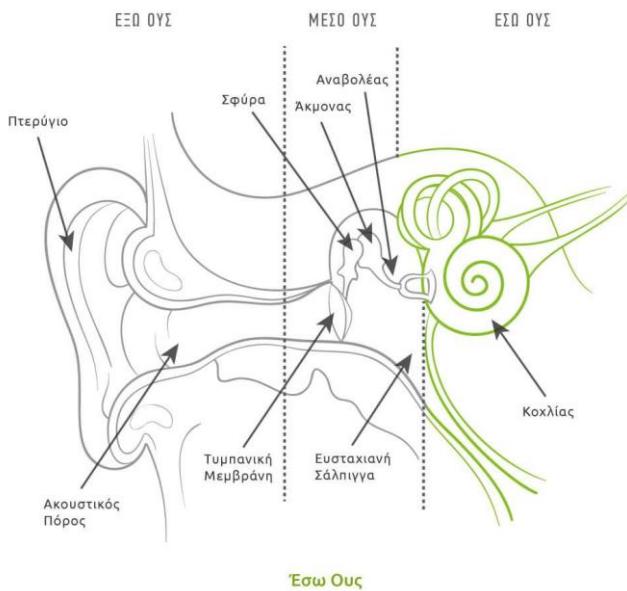
Στο εξωτερικό αυτί βρίσκεται το πτερύγιο το οποίο συλλέγει τα ηχητικά κύματα από το περιβάλλον προκειμένου να τα προωθήσει προς το μέσο και εσωτερικό αυτί. Η διαμόρφωσή του είναι τέτοια ώστε η ηχοστάθμη των ηχητικών σημάτων να αυξάνεται κατά 5dB προσομοιώνοντας, κατά αυτό το τρόπο, την λειτουργία ενός συστήματος προενισχυτή σήματος.



Εικόνα 1.2 : Μέσο Ους

² URL:<https://akouson.gr/enimerotheteite/afti/>

Το μέσο ους βρίσκεται κοντά στο έσω ους και συνδέει τα οστά της σφύρας, του άκμονα και του αναβολέα με τον τυμπανικό υμένα. Κοντά στο σημείο όπου βρίσκεται ο αναβολέας υπάρχει μια μικρή ωπή η οποία ονομάζεται στρογγυλή θυρίδα. Αυτή συνδέεται με ένα λεπτό υμένα ο οποίος μετακινεί τη βάση του αναβολέα ανάλογα με τις μεταβολές της πίεσης που οφείλονται στην λήψη ηχητικών κυμάτων. Αυτές οι μεταβολές μεταδίδονται μέσω υγρού στο εσωτερικό ους.



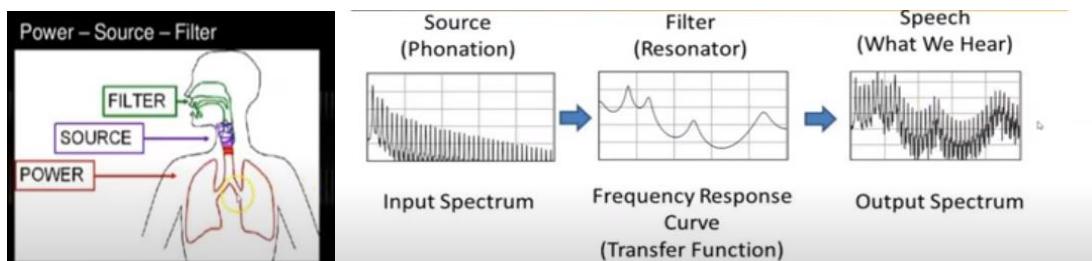
Εικόνα 1.3 : Έσω Ους

Το σύστημα το οποίο διαμορφώνεται στο έσω ους προσομοιώνει την λειτουργία ενός μορφομετατροπέα. Συγκεκριμένα, ο ήχος μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο οδηγείται στον εγκέφαλο μέσω του ακουστικού νεύρου. Ακόμη ένα όργανο, το οποίο βρίσκεται στο υποσύστημα του έσω ους και κατέχει σημαντικό ρόλο, είναι ο κοχλίας. Ο κοχλίας έχει σπειροειδή μορφή και είναι σωληνοειδές με δύο βασικούς υποθαλάμους οι οποίοι φέρουν υγρό και εκτείνονται σε όλο το μήκος του. Η ισοδύναμη εμπέδησή του διαφοροποιείται σε συνάρτηση με την απόσταση και, επομένως, κάθε μήκος ηχητικού κύματος αντιστοιχίζεται σε σημείο του κοχλία το οποίο ταλαντώνεται μηχανικά. Στο ηλεκτρικό ισοδύναμο σύστημα, ο κοχλίας προσομοιώνει την επεξεργασία Fast Fourier Transform (FFT), δηλαδή αποτελεί τον μηχανισμό με τον οποίο μετατρέπεται το ηχητικό κύμα σε χρήσιμη πληροφορία αποτελούμενη από συχνότητες προκειμένου να γίνει αντιληπτή από τον εγκέφαλο³.

Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να αντιληφθεί συχνότητες από 20 έως 20,000 Hz. Ωστόσο, η ανθρώπινη ομιλία συναντάται κάτω από τα 3,500 Hz. Για να παραχθεί ένα ηχητικό σήμα ομιλίας αρκούν τρία βασικά στάδια επεξεργασίας. Αρχικά απαιτείται μια πηγή ισχύος, δηλαδή ένας μηχανισμός ο οποίος δίνει την απαιτούμενη ενέργεια για παραγωγή ηχητικών κυμάτων. Οι πνεύμονες αποτελούν, στην πράξη, αυτό το μηχανισμό καθώς ασκούν δύναμη στις φωνητικές χορδές αναγκάζοντας αυτές να εκτελέσουν εξαναγκασμένη ταλάντωση. Στη συνέχεια χρειάζεται μία πηγή ηχητικών κυμάτων η οποία να παράγει την φώνηση. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του λάρυγγα σε

³ Stephen J E. & A Shera C., (2013). *The cochlea as a smart structure*

συνδυασμό με τις φωνητικές χορδές. Κατά την ροή αέρα, μέσω του αναπνευστικού συστήματος, δημιουργείται ένα κενό μεταξύ των φωνητικών χορδών οι οποίες για μικρό χρονικό διάστημα διαχωρίζονται και στη συνέχεια έλκονται μεταξύ τους⁴. Με αυτό το τρόπο ρυθμίζεται η ροή του αέρα, καθώς αποκτάει πυκνώματα και αραιώματα, με αποτέλεσμα να παράγονται ηχητικά κύματα. Τέλος, για την παραγωγή κατανοητής ομιλίας και φωνημάτων, απαιτείται ένα φίλτρο ηχητικών κυμάτων. Ο λάρυγγας είναι ένα τέτοιο σύστημα καθώς διαμορφώνει και αυξάνει το ακουστικό σήμα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές περιοχές στη φωνητική οδό οι οποίες, ανάλογα με την διαμόρφωσή τους, ενισχύουν ορισμένες ακουστικές συχνότητες και τις ανώτερες αρμονικές τους. Το σήμα της ομιλίας, επομένως, είναι ένα σήμα πολύπλοκο σε συχνοτικό περιεχόμενο και η διαδικασία επακριβούς εντοπισμού των συχνοτήτων είναι αρκετά δύσκολη. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ομιλία διαφέρει αναμεταξύ των ατόμων διότι εξαρτάται από βιολογικά χαρακτηριστικά όπως είναι η ηλικία, το φύλο ή τα χαρακτηριστικά του προσώπου αλλά και από εξωγενείς παράγοντες όπως η τοπική διάλεκτος ή οι ιδιομορφίες κάποιας εθνικής γλώσσας.



Εικόνα 1.4 : Παραγωγή ανθρώπινης ομιλίας

1.2 Σύγχρονες λύσεις της πάθησης της βαρηκοΐας στον τομέα της τεχνολογίας

Με την ευρεία εξέλιξη της τεχνολογίας σε τομείς όπως η κατασκευή ημιαγωγών, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συστημάτων σε chips (System on Chip, SoC), αρκετές εταιρείες έχουν επιτύχει να παρουσιάσουν ολοκληρωμένες λύσεις προκειμένου να καταπολεμήθει η απώλεια ακοής σε βαρήκοα άτομα. Σε πολλές περιπτώσεις, ενώ ο σχεδιασμός και η κατασκευή των ακουστικών βαρηκοΐας ακολουθούν τυποποιημένες διαδικασίες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά διαφέρουν από συσκευή σε συσκευή είτε επειδή διαφέρει το πρόβλημα της ακοής μεταξύ των ατόμων είτε επειδή διαφέρει ο βαθμός της βαρηκοΐας.

Ο βαθμός βαρηκοΐας είναι το μέγεθος το οποίο διακρίνει την σοβαρότητα της ασθένειας από άτομο σε άτομο. Το μετρούμενο μέγεθος ονομάζεται απώλεια της ακοής (Hearing Loss, HL) και μετρείται σε dB. Σε φυσιολογικές περιπτώσεις ανθρώπων, η απώλεια της ακοής φθάνει το πολύ τα -16 dB HL. Σε μεγαλύτερες απώλειες γίνεται

⁴ Βαρανάκη Μ. Ε. & Τραγομαλά Ι. & Τσουλέλη Μ., (2019). Αντικειμενικές ακουστικές μετρήσεις φωνής σε καπνιστές και μη και των δυο φύλων, ηλικίας 25-35, Πάτρα, σελ. 7, 9-11

λόγος για βαθμό βαρηκοϊάς. Στο πίνακα 1.1 διακρίνονται τα διαστήματα dB HL και οι κατηγορίες βαρηκοϊάς στις οποίες αντιστοιχούν⁵. Σε κάθε περίπτωση, ακόμη και σε μικρού βαθμού βαρηκοϊά, είναι πιθανό ο ασθενής να αντιμετωπίσει δυσκολία και στην ομιλία, με αποτελέσμα η καθημερινή επικοινωνία να καθίσταται ακόμη δυσκολότερη.

Πίνακας 1.1 : Βαθμοί βαρηκοϊάς σε ενήλικες και παιδιά

	Πολύ μικρή βαρηκοϊά	Μικρή βαρηκοϊά	Μέτρια βαρηκοϊά	Μέτρια έως μεγάλη βαρηκοϊά	Μεγάλη βαρηκοϊά	Πολύ μεγάλη βαρηκοϊά
Ενήλικες	-	26-40 dB HL	41-55 dB HL	56-70 dB HL	71-90 dB HL	91+ dB HL
Παιδιά	16-25 dB HL	26-40 dB HL	41-55 dB HL	56-70 dB HL	71-90 dB HL	91+ dB HL

Είναι σημαντικό ένα ακουστικό βαρηκοϊάς να ενισχύει τα ακουστικά σήματα τα οποία λαμβάνει σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε ατόμου. Ωστόσο, ένα ηχητικό σήμα, όπως θα εξηγηθεί λεπτομερώς και στο Κεφάλαιο 3, αποτελείται από πολλές διαφορετικές συχνότητες στο διάστημα 20 έως 20,000 Hz. Συνεπώς θα πρέπει, αρχικά, να γίνει καταγραφή των απωλειών σε ακοή ανά συχνότητα. Το διάγραμμα το οποίο προκύπτει από τα δεδομένα αυτά ονομάζεται ακουόγραμμα (audiogram) και επισημαίνει την απώλεια HL εκφρασμένη σε μονάδες dB σε σχέση με την συχνότητα. Επειδή το φάσμα συχνοτήτων είναι αρκετά διευρυμένο, ο έλεγχος γίνεται σε διακριτές συχνότητες οι οποίες ακολουθούν κλίμακα οκτάβας, δηλαδή αυξάνονται ως εκθετικές δυνάμεις του δύο.

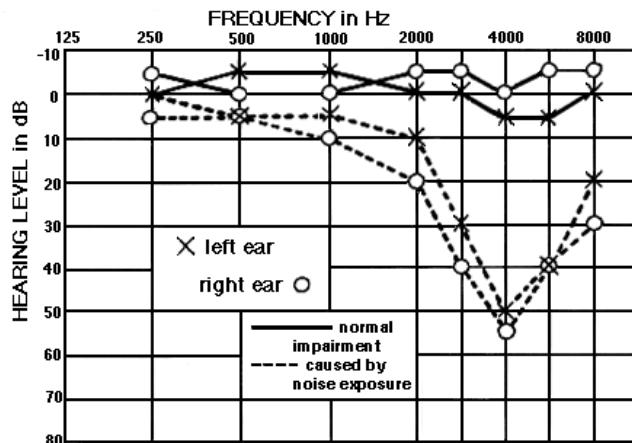
Το ακουόγραμμα είναι σημαντικό να φέρει ακριβή δεδομένα για τον εκάστοτε ασθενή και, συνεπώς, η διαδικασία εξαγωγής του είναι αρκετά τυπική⁶. Αρχικά θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός ενός ηχομονωμένου δωματίου ή θαλάμου. Στη συνέχεια, και σε όλη την διάρκεια της εκτέλεσης των μετρήσεων, ο ασθενής οφείλει να παραμείνει ακίνητος και να μην ομιλήσει. Με την βοήθεια ειδικών ακουστικών ακύρωσης εξωτερικών θορύβων (Active Noise Cancelling Headphones), αποστέλλονται στο ηχείο ημιτονοειδή σήματα, τόνοι, με συχνότητες οι οποίες ακολουθούν την κλίμακα οκτάβας ξεκινώντας από αυτή των 125 Hz. Έπειτα ζητείται από τον ασθενή να πατηθεί ένα ειδικό πλήκτρο με το οποίο δηλώνει πως αντιλήφθηκε την ελάχιστη ένταση ήχου για τη δεδομένη συχνότητα. Η μέτρηση επαναλαμβάνεται

⁵ URL:<https://www.speechhearingcenter.com/degreehearingloss>

⁶ URL:<https://orltsounis.gr/%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CF%85%CF%8C%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1/>

δύο φορές, μία για κάθε αυτί, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η βαρηκοϊά συναντάται μόνο στο ένα από αυτά.

Στην εικόνα 1.5 διακρίνει κανείς δύο τυχαίες περιπτώσεις ατόμων όπου στη πρώτη η ακοή είναι φυσιολογική, ενώ στην δεύτερη περίπτωση γίνεται εμφανής η μέτρια προς μεγάλη βαρηκοϊά για τις συχνότητες κοντά στα 4,000 Hz.



Εικόνα 1.5 : Σύγκριση ακουογραμμάτων υγειούς και βαρήκοου ατόμου

Έχοντας λάβει τα δεδομένα αυτά, είναι πλέον εφικτός ο σχεδιασμός του ακουστικού βαρηκοϊάς. Ως συσκευές, μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικά σημεία κοντά στο αυτί. Οι κατηγορίες ακουστικών βαρηκοϊάς⁷ ως προς τη τοποθέτησή τους είναι : α) τα οπισθωτιαία (B.T.E.) τα οποία εφαρμόζονται στο πίσω μέρος του αυτιού, β) τα ενδωτιαία (I.T.E.) τα οποία εφαρμόζονται κοντά στον ακουστικό πόρο ενώ καλύπτουν τον εξωτερικό και, τέλος, γ) τα ενδοκαναλικά – αθέατα (C.I.C.) τα οποία είναι αρκετά μικρά και εφαρμόζονται εντός του ακουστικού πόρου. Τα τελευταία είναι ευρύτατα διαδεδομένα λόγω της διαφάνειας της οποίας προσφέρουν καθώς αρκετά βαρήκοα άτομα προτιμούν να μην γνωστοποιούν την πάθησή τους.

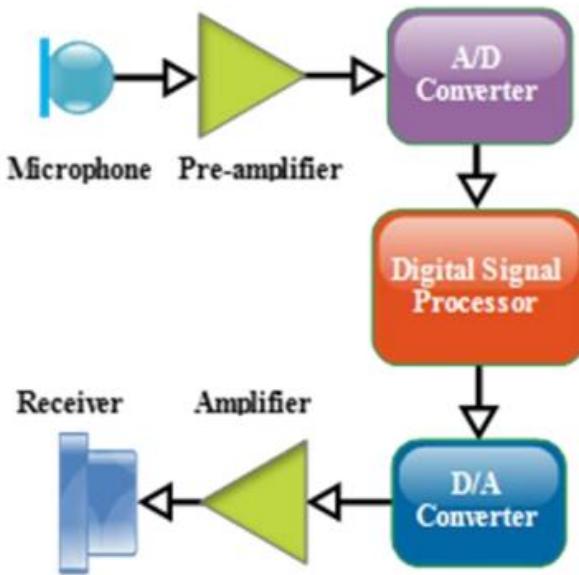


Εικόνα 1.6 : α) Οπισθωτιαία , β) ενδωτιαία και γ) ενδοκαναλικά ακουστικά βαρηκοϊάς

Εντός του κελύφους του εκάστοτε ακουστικού περιλαμβάνονται τα βασικά υλικά με τα οποία παρέχεται ενισχυμένος ήχος στον βαρήκοο. Οι απαραίτητες υπομονάδες του είναι το σύστημα της παροχής τροφοδοσίας, δηλαδή η αποθήκευση της μπαταρίας, το

⁷ URL: <https://www.akouste.gr/index.php/varikoia/typoi-akoustikon-varikoiyas>

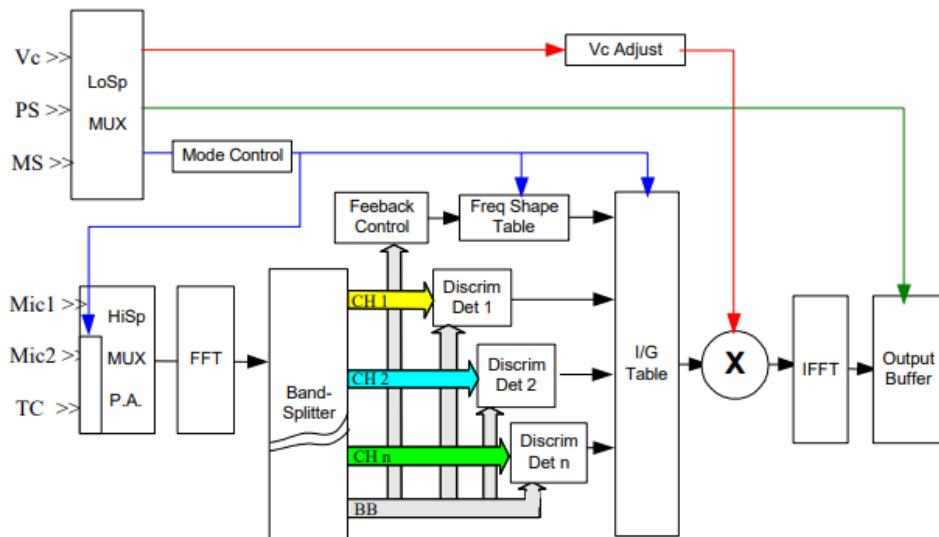
μικρόφωνο το οποίο λαμβάνει τους εξωτερικούς ήχους, το μεγάφωνο το οποίο παράγει το επεξεργασμένο ακουστικό σήμα το οποίο θα διαδοθεί προς τον ακουστικό πόρο και, τέλος, το κύριο σύστημα επεξεργασίας. Τα παραπάνω έχουν υλοποιηθεί σε πολύ περιορισμένο χώρο από εξειδικευμένους μηχανικούς στο τομέα των ενσωματωμένων και μικροηλεκτρονικών συστημάτων. Η αρχιτεκτονική σχεδίασμού η οποία προτείνεται από κάθε εταιρεία κατασκευής ακουστικών βαρηκοΐας διαφέρει για λόγους πρωτοτυπίας και κατοχύρωσης δικαιωμάτων ευρεσιτεχνίας. Ωστόσο, είναι κοινώς αποδεκτό πως ένα απλό μοντέλο ακουστικού βαρηκοΐας ακολουθεί το διάγραμμα της εικόνας 1.7.



Εικόνα 1.7 : Γενικευμένο διάγραμμα συστήματος ακουστικού βαρηκοΐας⁸

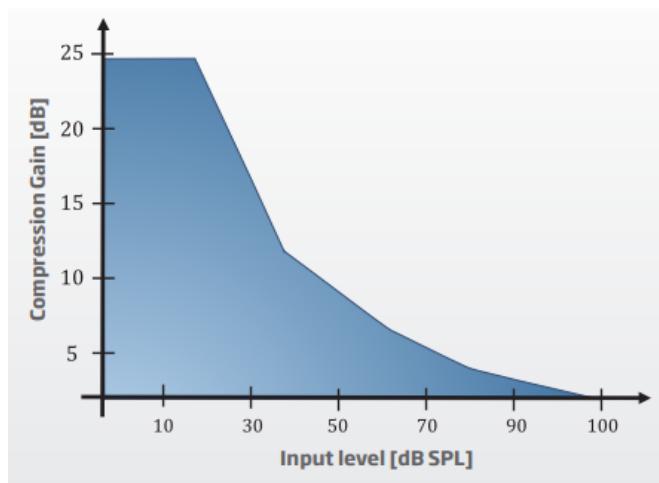
Αρχικά, απαιτείται ένα τουλάχιστον μικρόφωνο το οποίο να λαμβάνει τα ηχητικά σήματα του περιβάλλοντος. Έπειτα ακολουθεί το στάδιο της προενίσχυσης όπως ακριβώς γίνεται στο εξωτερικό ους. Στη συνέχεια το σήμα από συνεχές γίνεται διακριτό και οδηγείται σε ένα ψηφιακό επεξεργαστή ειδικού σκοπού στον οποίο διεκπεραιώνεται η επιπλέον ανάλυσή του. Τέλος διαμορφώνεται το επεξεργασμένο, πλέον, ακουστικό σήμα σε αναλογική μορφή και οδηγείται στο μεγάφωνο. Σε πιο προχωρημένες εφαρμογές, η βιολογική λειτουργία του αυτιού προσδομοιώνεται μέσω της συσκευής του ακουστικού βαρηκοΐας. Δηλαδή, εκτός της αρχικής προενίσχυσης του σήματος, εντός του ψηφιακού επεξεργαστή λαμβάνουν χώρα ο μετασχηματισμός Fast Fourier (FFT), όπως συναντάται στο κοχλία, και αποκωδικοποιείται σωστά η χρήσιμη ακουστή πληροφορία σε σχέση με τους εξωτερικούς ανεπιθύμητους θορύβους, όπως ακριβώς λειτουργεί το ακουστικό νεύρο.

⁸ Isiaka A. Alimi, (2015). *Performance Improvement of Digital Hearing Aid Systems*, σελ. 28



Εικόνα 1.8 : Εξειδικευμένο διάγραμμα συστήματος ακουστικού βαρηκοΐας με χρήση τράπεζας φίλτρων και αλγορίθμου βασισμένου σε FFT

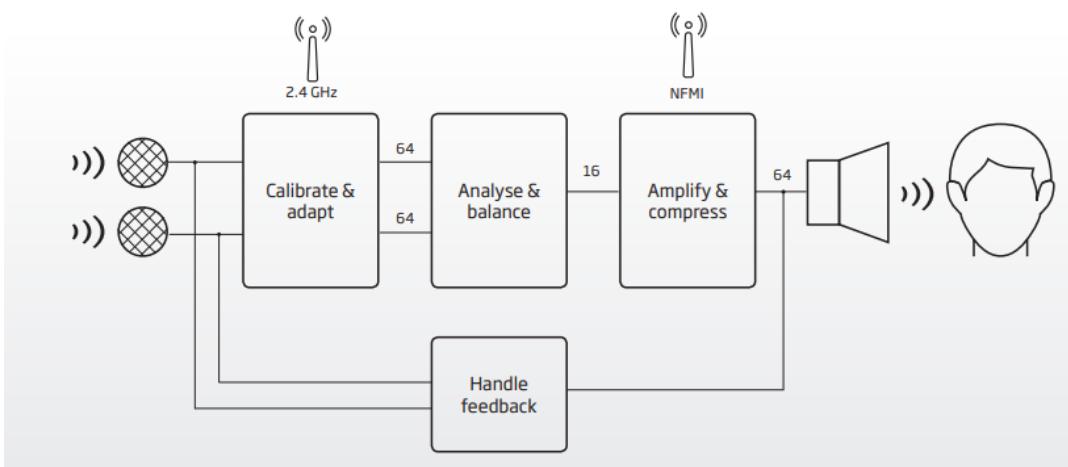
Για να επιτευχθεί σωστά η επεξεργασία και για να διακριτοποιηθούν τα σήματα της πληροφορίας σύμφωνα με τη συχνότητά τους, εφαρμόζεται μια αλυσίδα από φίλτρα, η χαρακτηριζόμενη ως τράπεζα φίλτρων (Filter Bank). Έτσι το συνολικό ακουστό εύρος ζώνης συχνοτήτων τεμαχίζεται σε επιμέρους ζώνες. Έπειτα, εφαρμόζεται η επεξεργασία σύμφωνα με το ακουόγραμμα του ασθενή καθώς ενισχύονται μόνο οι συχνότητες οι οποίες χρειάζονται επιπλέον ισχύ. Αυτή η διαδικασία ενίσχυσης αποτελεί σημείο αναφοράς της εταιρείας Oticon⁹ καθώς αξιοποιείται η τεχνική του Compression Gain. Εάν το κέρδος ήταν σταθερό σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, ακόμη και σε αυτές που ο ασθενής αντιλαμβάνεται ως ακουστές, τότε ο ήχος θα γινόταν μη φυσιολογικός καθώς θα ήταν ικανοποιητικά ακουστός στις συχνότητες αυξημένης απώλειας ακοής και υπερβολικά εκκωφαντικός στις συχνότητες χαμηλής έως καθόλου απώλειας ακοής. Έτσι προτείνεται ένα μοντέλο ενίσχυσης η οποία επικεντρώνεται σε απαλούς ήχους και όχι τόσο στους ισχυρούς.



Εικόνα 1.9 : Διάγραμμα εφαρμογής Compression Gain σε σχέση με την ηχοστάθμη SPL

⁹ Le Goff N., (2015). *Amplifying soft sounds – a personal matter*, Oticon, σελ. 3

Τέλος, είναι αρκετά σημαντικό τέτοια συστήματα, όπως το ακουστικό βαρηκοΐας, να λειτουργούν με ιδιαίτερα μικρή έως μηδενική καθυστέρηση από την στιγμή λήψης του σήματος έως την οδήγησή του στην έξοδο (Latency). Αυτή η καθυστέρηση, είναι ανάλογη της ποιότητας των ημιαγωγικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται αλλά και της συνολικής επεξεργασίας η οποία διαδραματίζεται σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη θα πρέπει η συσκευή να αναγνωρίζει άμεσα τυχαίες μεταβολές στο περιβάλλον όπως τους μη αναμενόμενους θορύβους. Επομένως, σε εξελιγμένα μοντέλα αρχιτεκτονικών ακουστικών βαρηκοΐας, προτείνεται χρήση δύο μικροφώνων και σύστημα ανάδρασης η οποία αφενός καταστέλει ανεπιθύμητους θορύβους και αφετέρου εκτιμώνται αρκετά γρήγορα οι σωστές στάθμες ήχου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας αρχιτεκτονικής είναι η χρήση του καινοτόμου άλγορίθμου OpenSound Navigator από την εταιρεία Oticon στο μοντέλο ABFS¹⁰ (single-mode Anti-FeedBack System) της εικόνας 1.6.



Εικόνα 1.10 : Εξειδικευμένο διάγραμμα συστήματος ακουστικού βαρηκοΐας ABFS

1.3 Η αρχιτεκτονική υλοποίησης του ακουστικού βαρηκοΐας στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας

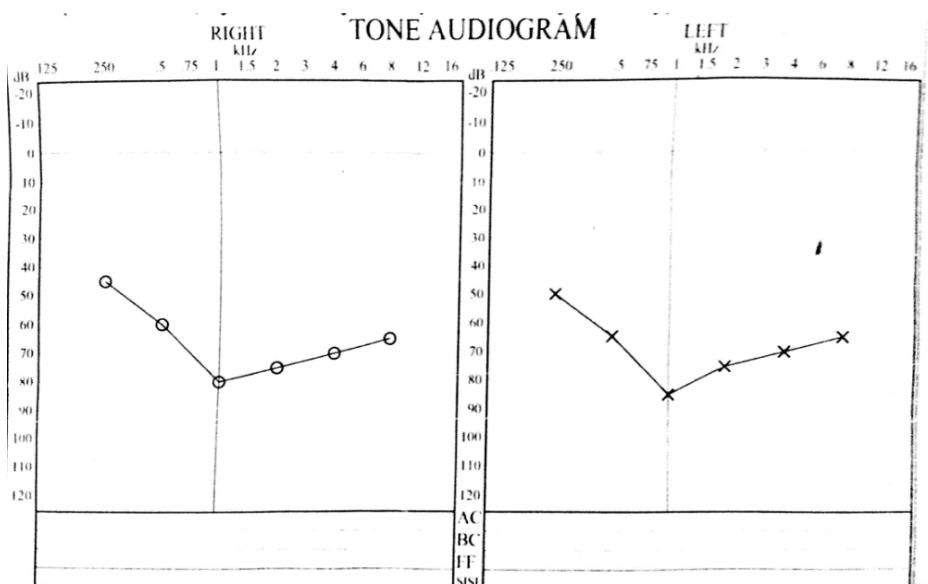
Στη παρούσα διπλωματική εργασία, υπενθυμίζεται πως ο σκοπός της είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση συσκευής ακουστικού βαρηκοΐας με θεμελιώδεις τεχνικές, όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από εταιρείες οι οποίες προτείνουν ολοένα πιο σύγχρονες λύσεις και μεθόδους παραγωγής καλύτερης ποιότητας ήχου.

Επίσης, πρέπει να τονισθεί πως η συσκευή προς υλοποίηση από τον συγγραφέα της διπλωματικής φέρει τεχνικές προδιαγραφές οι οποίες ακολουθούνται βάσει του ακουογράμματός του. Έπειτα, με τη βοήθεια βασικών γνώσεων μικροηλεκτρονικής, θα πρέπει να υλοποιηθεί η αρχιτεκτονική και το κυκλωματικό μοντέλο του συστήματος. Μετά την επιτυχή του προσομοίωση, ακολουθεί το στάδιο επιβεβαίωσης της λειτουργίας του κυκλώματος σε δοκιμαστική πλακέτα (verification test). Τέλος,

¹⁰ Love Callaway S., (2016). *Feedback shield LX and Feedback Analyser*, Oticon, σελ. 2

ακολουθεί ο φυσικός σχεδιασμός του κυκλώματος σε PCB ώστε να αποκτήσει πιο ολοκληρωμένη μορφή.

Το ακουόγραμμα του συγγραφέα αποτελεί το εναρκτήριο σημείο μελέτης προκειμένου να επιλεχθούν τα κέρδη ενίσχυσης για το ακουστικό σήμα. Τα δεδομένα, για την περίπτωση αυτή, έχουν ληφθεί από ιατρικές εξετάσεις που έγιναν σε παρελθοντικό χρόνο και έχουν ισχύ ακόμη και σήμερα διότι η βαρηκοΐα η οποία ανιχνεύθηκε είναι η νευροαισθητήρια. Στην εικόνα 1.11 διακρίνεται το ακουόγραμμα για τα δύο αυτιά, το οποίο είναι περίπου ίδιο. Η μέγιστη απώλεια σε ήχο εμφανίζεται περί τα 1,000 Hz και είναι, επίσης, αρκετά μεγάλη στις υψηλές συχνότητες. Σύμφωνα με τον πίνακα 1.1, σημειώνεται μέτρια βαρηκοΐα στις χαμηλές συχνότητες και μέτριου προς μεγάλου βαθμού βαρηκοΐα στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Η μέγιστη απώλεια σε dB HL είναι κοντά στα 80 dB, για την 1,000 Hz συχνότητα συγκεκριμένα, και θα πρέπει να δοθεί κέρδος περίπου αντίστοιχο προκειμένου η στάθμη HL να φθάσει στα φυσιολογικά επίπεδα μεταξύ 0 και 15 dB HL.



Εικόνα 1.11 : Ακουόγραμμα του συγγραφέα της διπλωματικής εργασίας.

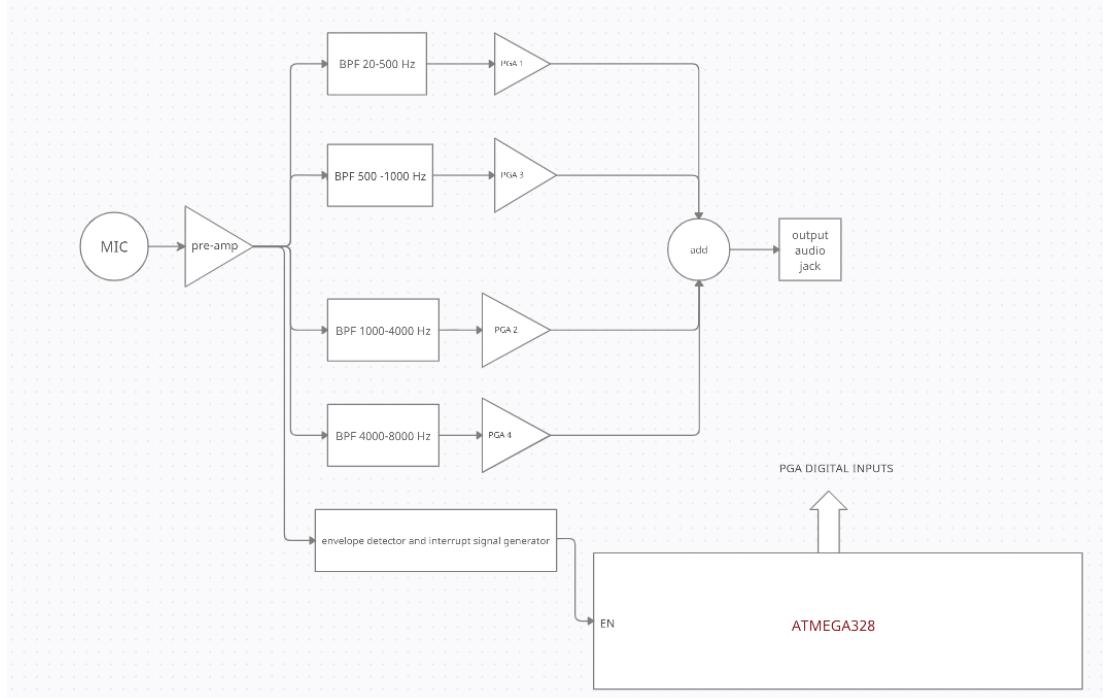
Η αρχιτεκτονική του ακουστικού βαρηκοΐας η οποία προτείνεται ακολουθεί μια πιο απλουστευμένη μορφή εξ αυτών των οποίων οι σύγχονοι κατασκευαστές. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται η τεχνική του Compression Gain ενώ ανιχνεύονται οι συχνότητες του σήματος. Το σήμα το οποίο καταφθάνει από το μικρόφωνο θα πρέπει, αρχικά, να προενισχυθεί ώστε να γίνει αντιληπτή η χρήσιμη πληροφορία σε σχέση με τον θόρυβο. Το κέρδος αυτό θα πρέπει να είναι συγκεκριμένο ώστε να μην αυξηθεί εξίσου σημαντικά και ο θόρυβος.

Στην συνέχεια παρεμβάλλονται αναλογικά φίλτρα τα οποία έχουν αρκετά μικρή καθυστέρηση από είσοδο σε έξοδο. Το αρνητικό είναι πως τα φίλτρα αυτά δεν φέρουν την επιθυμητή ακρίβεια που απαιτείται καθώς αυτό επιτυγχάνεται είτε με την προσθήκη πολλών ηλεκτρονικών υλικών, προκειμένου να αυξηθεί η τάξη του φίλτρου, είτε συνηθίζεται να υλοποιούνται ψηφιακά ως FIR/IIR φίλτρα. Σε κάθε περίπτωση,

αυτά έχουν στόχο να τεμαχίσουν το ακουστικό σήμα σε συχνοτικές ζώνες. Έτσι θα γίνει επεξεργασία σε κάθε τμήμα συχνοτήτων χωριστά και θα εφαρμοσθεί ενίσχυση με Compression Gain όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή μέσω ρυθμιζόμενης ενίσχυσης ή απόσβεσης του ακουστικού σήματος από ψηφιακά ελεγχόμενους αναλογικούς ενισχυτές. Αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα θα πρέπει να επιλεχθούν ώστε να αποδίδουν σταθερό κέρδος στο διάστημα συχνοτήτων όπου υπάρχει το ενδιαφέρον, συγκεκριμένα από 20 έως 10,000 Hz.

Ο έλεγχός τους γίνεται με την βοήθεια του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU ο οποίος προγραμματίσθηκε έτσι ώστε να διακριτοποιεί το αναλογικό σήμα ήχου το οποίο έχει προεισχυθεί και να ανιχνεύει, σε πραγματικό χρόνο, τη πρώτη αρμονική του σήματος με την μέθοδο των zero crossings. Με το τρόπο αυτό, αποφεύγεται η χρήση FFT για λόγους καθυστέρησης διάδοσης του σήματος από είσοδο σε έξοδο, ενώ γίνεται χρήση λιγότερης επεξεργαστικής ισχύος. Επίσης, επιλέγεται το απαιτούμενο κέρδος ενίσχυσης το οποίο απαιτείται ανά συχνοτική ζώνη, οι οποίες είναι ίσες σε πλήθος με τα φίλτρα (τέσσερα σε αριθμό) και επιτυγχάνεται η ψηφιακή κωδικοποίηση των προγραμματιζόμενων αναλογικών ενισχυτών.

Στο τελευταίο στάδιο της αρχιτεκτονικής, γίνεται άθροιση των επιμέρους συνιστωσών που προκύπτουν από κάθε φίλτρο ώστε να παραχθεί και πάλι το αρχικό σήμα το οποίο έχει πια δεχθεί επεξεργασία στις συχνότητές του. Τέλος, μία ακόμη λειτουργία η οποία υλοποιείται για λόγους μικρότερης κατανάλωσης, είναι η κατάσταση ύπνου του μικροελεγκτή. Αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση που ο ανιχνεύσιμος ήχος διατηρεί περίπου σταθερή και αρκετά χαμηλή στάθμη στο χρόνο, όπως για παράδειγμα, όταν ο βαρήκοος βρίσκεται μόνος εντός ενός δωματίου χωρίς να συνομιλεί ή σε ώρες κοινής ησυχίας.



Εικόνα 1.12 : Γενικευμένο διάγραμμα των συστήματος ακουστικού βαρηκοϊάς το οποίο θα υλοποιηθεί στην διπλωματική εργασία

Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν οι βασικές λειτουργίες των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται, ενώ θα επεξηγηθούν οι τεχνικές με τις οποίες γίνεται η επεξεργασία και η ανίχνευση των συχνοτήτων με την μέθοδο των zero crossings. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να υπογγραμισθεί πως τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των προσομοιώσεων των κυκλωμάτων και του φυσικού σχεδιασμού τους είναι τα LTspice και Altium Designer αντίστοιχα.



Εικόνα 1.13 : Λογότυπα των λογισμικών των οποίων γίνεται χρήση, α) LTspice β) Altium Designer

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

2.1 Η τροφοδοσία των κυκλωμάτων

Ένα οποιοδήποτε κύκλωμα αποτελείται από επιμέρους υλικά και το κάθε ένα από αυτά απαιτεί συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, προκειμένου να λειτουργήσει όπως αναμένεται από την σχεδίαση. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, η οποία παρέχεται στο ηλεκτρονικό κύκλωμα, καλείται ισχύς. Η θεμελιώδης μαθηματική σχέση της με την τάση και το συνολικό ρεύμα του κυκλώματος είναι η κάτωθι :

$$P_{dc} = \frac{dE}{dt} = V_{dc} I_{dc}$$

Η τροφοδοσία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, δηλαδή, η παροχή ισχύος σε αυτά, είναι δυνατό να συμβεί με διαφορετικές μεθόδους. Σε ενσωματωμένα επαναπρογραμματιζόμενα συστήματα η τροφοδοσία γίνεται μέσω θυρών USB, σε αυτόνομα συστήματα αξιοποιούνται μπαταρίες (επαναφορτιζόμενες ή μη) και σε πολλά συστήματα με μεγάλη απαίτηση σε ισχύ, χρησιμοποιούνται ανορθωτικές διατάξεις, δηλαδή κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος τα οποία λαμβάνουν στην είσοδο την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και παρέχουν σταθερή ισχύ στην έξοδο.

Στην περίπτωση της συσκευής του ακουστικού βαρηκοΐας, η τροφοδοσία θα παρέχεται από μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία των 3.7V – 3300 mAh τύπου 18650. Κατά τη σχεδίαση της συσκευής και την επιλογή των υλικών που θα απαρτίζουν το συνολικό κύκλωμα, πρέπει να σημειωθούν οι απαιτήσεις σε ρεύμα και τάση για το κάθε ένα από αυτά. Όπως θα επισημανθεί και στην συνέχεια, η τάση είναι σε ικανή στάθμη ώστε να λειτουργήσουν τα ICs και θα πρέπει να υπολογισθεί αθροιστικά το ρεύμα που καταναλώνεται. Ο υπολογισμός του ρεύματος κατανάλωσης μπορεί να εκτιμήσει, με κάποιο σφάλμα, την διάρκεια ζωής της μπαταρίας διότι είναι γνωστή η χωρητικότητά της.



Εικόνα 2.1 : Επαναφορτιζόμενη μπαταρία τύπου 18650 – 3.7V/3300mAh

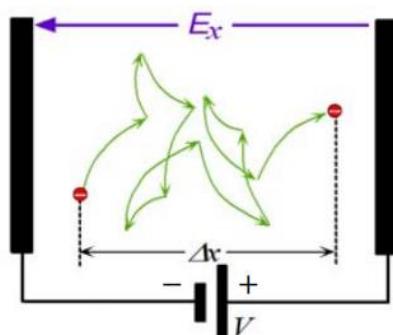
Σε αρκετά συστήματα, όπου απαιτείται διαφορετική στάθμη τάσης, συχνά χρησιμοποιείται ρυθμιστής τάσης (regulator). Το κύκλωμα αυτό αποτελεί ένα μετατροπέα dc/dc , ο οποίος αλλάζει τις στάθμες τάσης/ρεύματος της εισόδου και της εξόδου, χωρίς να αλλάζει το ποσό της ισχύος το οποίο προσφέρεται προς το κύκλωμα. Μάλιστα πρέπει να σημειωθεί, πως εισάγονται επιπλέον απώλειες ισχύος κατά την μετατροπή. Το κύκλωμα, το οποίο σχεδιάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, δεν απαιτεί αλλαγή στην τάση τροφοδοσίας. Υπάρχει ανάγκη, ωστόσο, για την χρήση κάποιας ενδιάμεσης στάθμης τάσης προκειμένου να υπάρξει σωστή πόλωση του ακουστικού σήματος. Αυτό λύνεται εύκολα με την χρήση ενός διαιρέτη τάσης, ένα κύκλωμα το οποίο επεξηγείται λεπτομερώς στην επόμενη υποενότητα. Σε κάθε περίπτωση, όσο περισσότερα υλικά τοποθετούνται σε ένα κύκλωμα τόσο αυξάνεται η συνολική κατανάλωση. Ιδιαίτερα, κατά την μετάδοση ενός σήματος πληροφορίας από ένα σημείο του κυκλώματος σε ένα άλλο, είναι πιθανό να υπάρχουν αρκετές απώλειες στην ισχύ του, ενώ, παράλληλα, εισάγεται θόρυβος που μειώνει κατά πολύ την απόδοση του συστήματος. Προκειμένου να γίνει αποδοτική μεταφορά του σήματος από άκρο σε άκρο και με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες, λαμβάνεται υπόψη η τεχνική impedance matching σύμφωνα με την οποία οι ισοδύναμες αντιστάσεις πριν και μετά από ένα κόμβο θα πρέπει ιδανικά να είναι ίσες. Συνεπώς, είναι επιτακτική ανάγκη να γίνει μελέτη των παθητικών στοιχείων, ιδιαίτερα των αντιστάσεων.

2.2 Παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία

Παθητικά ονομάζονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία λειτουργούν, χωρίς να απαιτηθεί χρήση τροφοδοσίας. Αυτά χωρίζονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες φορτίων: Ωμικά φορτία (αντιστάσεις), Χωρητικά φορτία (πυκνωτές), Επαγωγικά φορτία (πηνία).

2.2.1 Αντίσταση

Η αντίσταση είναι ένα είδος αγωγού που επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συσκευής και μετρείται σε Ohm (Ω). Στην πράξη, η έννοια της αντίστασης δηλώνει την δυσκολία στην ροή των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό της προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ας θεωρηθεί, αρχικά, το μοντέλο της παρακάτω εικόνας:



Εικόνα 2.2 : Περιγραφή κίνησης ενός ηλεκτρονίου στο εσωτερικό μιας αντίστασης

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

Οι δύο ακροδέκτες του αντιστάτη δέχονται ορισμένη διαφορά δυναμικού από μια πηγή τροφοδοσίας. Ένα τυχαίο ηλεκτρόνιο δέχεται επίδραση από το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και αποκτά ορισμένη κινητικότητα μ και ταχύτητα ν καθώς μετακινείται κατά ένα συνολικό μήκος Δx . Κατά την τυχαία κίνησή του, το ηλεκτρόνιο συγκρούεται με γειτονικά σωματίδια και ιόντα (σκεδάσεις) με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία. Έτσι, η κινητική του ενέργεια είναι στην πράξη ίση με την θερμότητα που οφείλεται στις σκεδάσεις και ισχύουν :

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$v = \mu E$$

Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ροής ρεύματος κατά την επιφάνεια S που αποτελεί διατομή του αγωγού. Η πυκνότητα ρεύματος για ένα τέτοιο υλικό σχετίζεται γραμμικά με το ρεύμα που το διαρρέει :

$$I = \iint_S \bar{J} d\bar{S} = JS \Rightarrow J = \frac{I}{S}$$

Και ισχύει πως το ρεύμα είναι η μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου στο χρόνο :

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{N_e de}{dt} = \frac{N_e e}{\Delta V} \frac{S \Delta x}{\Delta t} = n_e e v = n_e e \mu E S \Rightarrow J = n_e \mu e E \Rightarrow \\ J = \sigma E$$

Η τελευταία εξίσωση προέκυψε ως συνδυασμός των προηγούμενων σχέσεων, κάνοντας ορισμένες μετατροπές στο τρόπο γραφής της χρονικής παραγώγου με chain rule. Η παράμετρος σ ονομάζεται ειδική αγωγιμότητα και η διατύπωση αυτή δίνει τον αυστηρό ορισμό του νόμου του Ohm. Η ποσότητα $1/\sigma$ καλείται ειδική αντίσταση του αγωγού. Υποθέτοντας πως η σχέση ισχύει για ένα μήκος διαφοράς δυναμικού l και επιφάνεια διατομής S , ο υπολογισμός της αντίστασης σε μονάδες Ω γίνεται:

$$R = \frac{\rho l}{S} \Omega$$

Για μια διαφορά δυναμικού V και ρεύμα I , η εξίσωση του Ohm λαμβάνει τη πιο συνηθισμένη της μορφή :

$$R = \frac{V}{I}$$

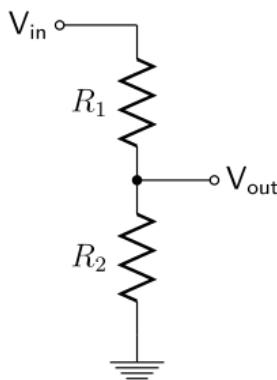
Η αντίσταση, όπως είναι αντιληπτό, αποτελεί ένα μέσο κατανάλωσης ισχύος, καθώς η ενέργεια λαμβάνει την μορφή θερμότητας. Συχνά, η αύξηση της θερμοκρασίας της

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

οδηγεί στην ύπαρξη επιπρόσθετου θερμικού θορύβου στα ηλεκτρονικά κυκλώματα σύμφωνα με την εξίσωση¹¹ :

$$\frac{v^2}{\Delta f} = 4kTR$$

Συνεπώς, η επιλογή αντιστατών μεγάλης τιμής αντίστασης αφενός μειώνει το ρεύμα, το οποίο καταναλώνεται από το κύκλωμα, αφετέρου επιδρά αρνητικά στην ύπαρξη αυξημένου θερμικού θορύβου. Οι αντιστάσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στο τελικό κύκλωμα εκτελούν αναλογικές διεργασίες, όπως η διαίρεση της τάσης στη μπαταρία, η ενίσχυση του σήματος στους τελεστικούς ενισχυτές, η υλοποίηση αναλογικών φίλτρων και η πόλωση συγκεκριμένων σημάτων¹². Οι αναλογικές επεξεργασίες σήματος θα αναλυθούν στις αντίστοιχες υποενότητες, ωστόσο στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να δωθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης.



Στο κύκλωμα αυτό η τάση V_{out} υπολογίζεται ως :

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Με το τρόπο αυτό είναι εφικτό να σχεδιασθούν γραμμές τάσης με οποιαδήποτε ενδιάμεση στάθμη μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης της τροφοδοσίας. Το κύκλωμα αυτό, ωστόσο, δεν είναι αποδοτικό στη παρούσα του μορφή, διότι η σχέση που υπολογίσθηκε ισχύει στην περίπτωση που το κύκλωμα, το οποίο ακολουθεί παράλληλα συνδεμένο την αντίσταση R_2 , είναι ανοιχτοκυκλωμένο. Αυτό σημαίνει, πως στο κόμβο εξόδου της τάσης V_{out} η ισοδύναμη αντίσταση ως προς τη γείωση θα πρέπει να είναι ίση με R_2 . Όμως σύμφωνα με το κανόνα παραλληλίας αντιστατών, όσο περισσότερα φορτία οδηγούνται παράλληλα τόσο περισσότερο μικραίνει η τιμή της αντίστασης:

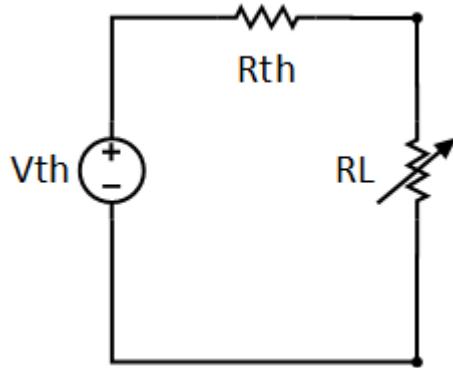
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

¹¹ Gray P.R, Hurst P.J, Lewis S.H & Meyer R.G, (2006). *Ανάλυση και Σχεδίαση Αναλογικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων*

¹² Alexander C.K. & Sadiku M.N.O, (2017). *Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα*

Το πρόβλημα διατήρησης της ενδιάμεσης στάθμης σε σταθερό επίπεδο επιλύεται με τη χρήση ενός πυκνωτή και του κυκλώματος *voltage buffer*.

Τέλος, η ισχύς η οποία παρέχεται από την τροφοδοσία, θα πρέπει να μεταδοθεί στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό προς την έξοδο προκειμένου το σύστημα να είναι αποδοτικό¹³. Εστω ένα φορτίο RL το οποίο οδηγείται από μια γραμμή αντίστασης R_{th} και τάση πηγής V_{th} :



Το κύκλωμα αυτό είναι και πάλι ένας διαιρέτης τάσης. Η ισχύς του φορτίου είναι :

$$P = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{1}{R_L} \left(V_{th} \frac{R_L}{R_L + R_{th}} \right)^2$$

Υπολογίζοντας τη μερική παράγωγο της ισχύος ως προς την αντίσταση R_{th} και μηδενίζοντάς την, προκειμένου να βρεθεί η μέγιστη ισχύς, η οποία προσφέρεται από την πηγή, προκύπτει πως θα πρέπει :

$$R_L = R_{th} \text{ και } P = \frac{V_{in}^2}{4R_{th}}$$

Το πόρισμα το οποίο προκύπτει από την ανάλυση ισχύος, είναι, πως κάθε κόμβος ενός κυκλώματος μεταφέρει μέγιστο ποσό ισχύος, από την είσοδο προς την έξοδο, εάν και μόνο εάν, οι ισοδύναμες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου είναι ίσες. Η τεχνική αυτή καλείται *impedance matching*.

2.2.2 Πυκνωτής

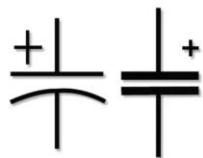
Ο πυκνωτής είναι ένα χωρητικό παθητικό στοιχείο. Η ισοδύναμη αντίδρασή του, δηλαδή η ωμική αντίσταση, η οποία αλλάζει με μεταβολές της συχνότητας του σήματος, ορίζεται ως :

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \text{ όπου } C \text{ είναι η χωρητικότητά του}$$

¹³ Μάργαρης Ν.Ι, (2017). Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

Τα στοιχεία αυτά αποκόπτουν την ροή dc σημάτων και επιτρέπουν την διέλευση των ac σημάτων, καθώς, όπως γίνεται διακριτό από το μαθηματικό τύπο της χωρητικής αντίδρασης, η συνολική εμπέδηση απειρίζεται στη συχνότητα μηδέν (dc σήματα προκαλούν ανοιχτό κύκλωμα) και μηδενίζεται στις μεγάλες συχνότητες (ac σήματα προκαλούν βραχυκύκλωμα).



Εικόνα 2.3 : Κυκλωματικό σύμβολο πυκνωτή

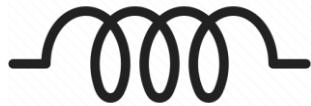
Στο κύκλωμα της συσκευής οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό φίλτρων, αποκοπή της dc συνιστώσας από στάδιο σε στάδιο (coupling) και επιτρέπουν την απαλοιφή κυματώσεων στη τροφοδοσία, όταν τοποθετούνται παράλληλα στις γραμμές τροφοδοσίας (decoupling).

2.2.3 Επαγωγός

Ο επαγωγός είναι ένα παθητικό στοιχείο, του οποίου η ύπαρξη οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζει το μεταβαλλόμενο στο χρόνο ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι, εμφανίζεται στην περίπτωση ac σημάτων και φέρει επαγωγική αντίδραση ίση με :

$$X_L = \omega L \text{ óπου } L \text{ είναι η αυτεπαγωγή του}$$

Τα στοιχεία αυτά αποκόπτουν τη ροή των ac σημάτων, επειδή, αυξάνεται αρκετά η αντίδραση στις υψηλές συχνότητες και προκύπτει ανοικτό κύκλωμα. Αντίθετα, επιτρέπουν τη διέλευση dc σημάτων, καθώς στην οριακή περίπτωση, όπου η συχνότητα τείνει να μηδενιστεί, η αντίδραση, επίσης, μηδενίζεται και η συμπεριφορά του επαγωγού μοντελοποιείται ως βραχυκύκλωμα.



Εικόνα 2.4 : Κυκλωματικό σύμβολο επαγωγού

Στο κύκλωμα της συσκευής δεν τοποθετούνται επαγωγοί. Ωστόσο, κατά το σχεδιασμό του PCB, είναι συχνή η ύπαρξη παρασιτικών επαγωγιμοτήτων, οι οποίες εκτείνονται

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

κατά τη γραμμή διάδοσης των σημάτων¹⁴. Είναι απαραίτητο, να υπάρχει η θεμελιώδης γνώση σχετικά με τη λειτουργία τους, προκειμένου να αναπτυχθούν καλές τεχνικές φυσικού σχεδιασμού ηλεκτρονικών πλακετών.

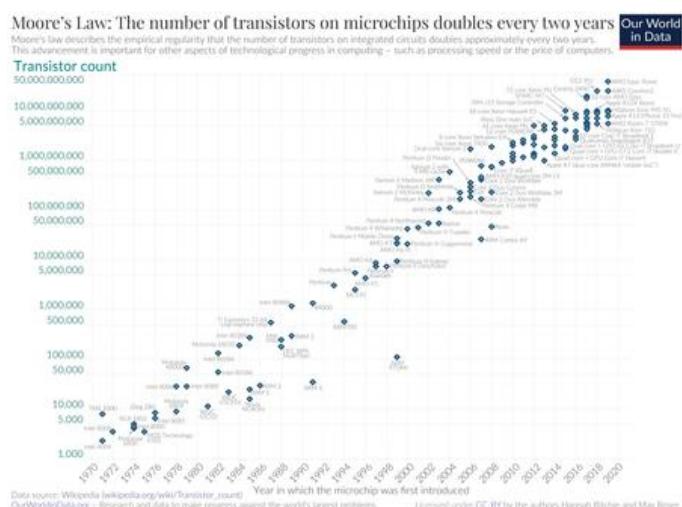
2.3 Ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία

Ενεργά χαρακτηρίζονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία, τα οπία λειτουργούν απαραίτητα με τη χρήση τροφοδοσίας. Τα στοιχεία αυτά είναι πολυάριθμα και βασίζονται σε ημιαγωγικές διατάξεις. Στην συνέχεια, αναλύονται τα πιο σημαντικά εξ αυτών και όσα περιλαμβάνονται στο τελικό κυκλωματικό διάγραμμα.

2.3.1 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ αποτελεί το βασικό ηλεκτρονικό στοιχείο από το οποίο αποτελούνται όλα τα ημιαγωγικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs). Οι χρήσεις αυτών των υλικών είναι πολλές και μερικές από τις σημαντικότερες είναι: η αναλογική ενίσχυση σημάτων, η υλοποίηση ψηφιακών – λογικών συναρτήσεων και η χρήση της διακοπτικής λειτουργίας τους σε πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές ισχύος.

Τα πιο διαδεδομένα είδη τρανζίστορ αποτελούν τα *MOSFETs*. Η τεχνολογία *CMOS* επιτρέπει τον σχεδιασμό τρανζίστορ νανομετρικών διαστάσεων και οδήγησε στην αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών συσκευών τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με την καμπύλη του Moore, εκτιμάται πως το πλήθος των τρανζίστορ που απαιτούνται για τα μικροτσίπ διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια, έχοντας φθάσει σε πλήθος περίπου 50 δισεκατομμύρια μετά τον σχεδιασμό των, τελευταίας γεννιάς, επεξεργαστών με κυρίαρχους αυτών της εταιρείας AMD.



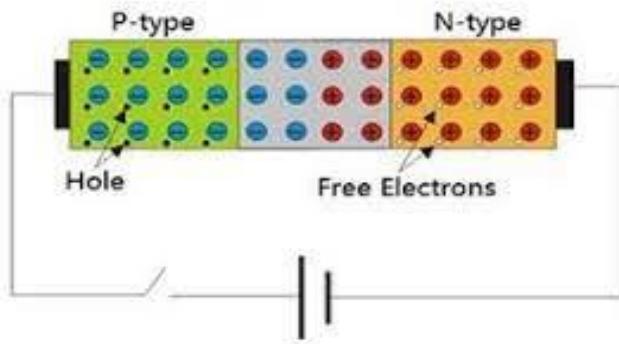
¹⁴ Rabaey J.N, Chandrakasan A. & Nikolic B., (2006). Ψηφιακά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα - Μια σχεδιαστική προσέγγιση

¹⁵ URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law

Το τελικό κύκλωμα δεν φέρει μεμονωμένα τρανζίστορ, ωστόσο αρκετά ICs, όπως: οι operational amplifiers (OPAMPS), οι Programmable Gain Amplifiers (PGAs) και ο μικροελεγκτής (ATMEGA328-PU) που χρησιμοποιούνται, έχουν βασιστεί στην τεχνολογία των MOSFETs.

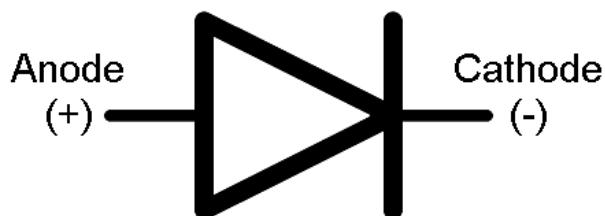
2.3.2 Δίοδος

Η δίοδος είναι μία από τις θεμελιώδεις ημιαγωγικές συσκευές όπως το τρανζίστορ¹⁶. Αποτελείται από δύο στρώματα ημιαγωγού όπου το ένα έχει εγχυθεί με φορείς ελλειπούς αρνητικού φορτίου (ιόντα που προσφέρουν οπές) και το άλλο έχει εγχυθεί με φορείς αρνητικού φορτίου (ιόντα που προσφέρουν ηλεκτρόνια). Ετσι στην διάταξη αυτή, η μισή περιοχή καλύπτεται από οπές και η υπόλοιπη από ηλεκτρόνια σχηματίζοντας μια ενδιάμεση περιοχή αραίωσης με μηδενικό συνολικό φόρτιο. Έπειτα, με χρήση κατάλληλης εξωτερικής πηγής τάσης και με ορθή φορά, είναι δυνατό η δίοδος να άγει, δηλαδή ρέει ρεύμα από την περιοχή φορέων οπών (περιοχή p) προς την περιοχή των φορέων ηλεκτρονίων (περιοχή n).



Εικόνα 2.6 : Ημιαγωγική επαφή p - n

Το κυκλωματικό σύμβολο δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

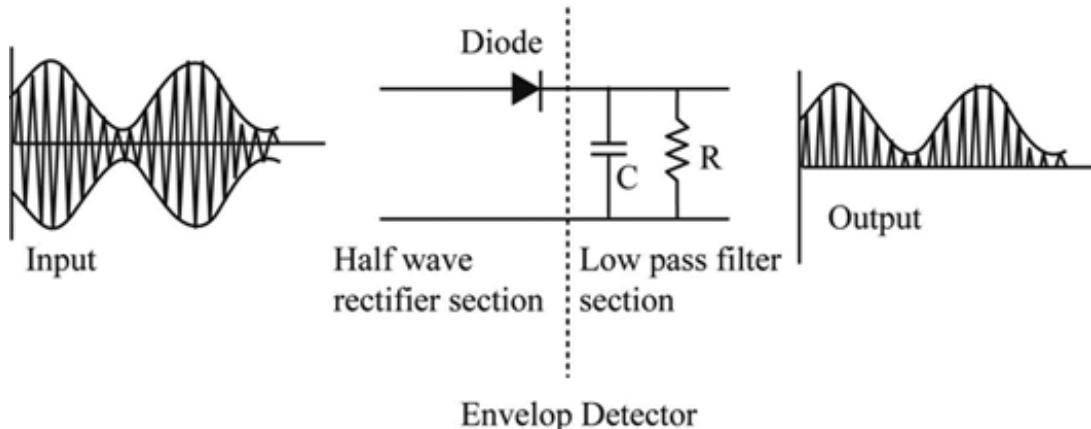


Εικόνα 2.7 : Κυκλωματικό σύμβολο διόδου

Όπως γίνεται αντιληπτό, η δίοδος επιτρέπει ροή ρεύματος προς τη μία και μόνο κατεύθυνση, δηλαδή από την άνοδο προς την κάθοδο, καθώς στην αντίθετη περίπτωση η περιοχή αραίωσης αυξάνεται δραματικά διακόπτοντας την ροή ρεύματος.

¹⁶ Kasap.S.O., (2004). Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων

Το κύκλωμα του ακουστικού αξιοποιεί την δίοδο προκειμένου να ανιχνεύσει την περιβάλλουσα του ηχητικού σήματος και να την αξιοποιήσει σε μια διαδικασία σύγκρισης με προηγούμενες αναλογικές τιμές. Η περιβάλλουσα ενός ασ σήματος είναι το γράφημα, το οποίο προκύπτει από τις κορυφές του, καθώς εξελίσσεται η κυματομορφή του στο χρόνο. Ο κορυφοφωρατής (envelope detector) είναι το κύκλωμα ανίχνευσης της περιβάλλουσας και φαίνεται στο κάτωθι κυκλωματικό διάγραμμα :



Εικόνα 2.8 : Διαδικασία ανίχνευσης περιβάλλουσας με envelope detector

Η λειτουργία του κυκλώματος βασίζεται, αρχικά, στο τρόπο με τον οποίο εισέρχεται το σήμα στην είσοδο. Ένα σήμα, όπως είναι αυτό στα αριστερά στην εικόνα 2.8, πιθανόν να φέρει και αρνητικές τιμές σε σχέση με το χρόνο. Η δίοδος άγει εφόσον η dc τάση εισόδου, ή της ac συνιστώσας, βρίσκεται πάνω από μια οριακή τιμή κατωφλίου, συνήθως πέριξ των 0.6 V. Οι συνιστώσες, οι οποίες έχουν αρνητική τιμή, επομένως, δεν εξέρχονται από την κάθοδο της διόδου. Εν συνεχείᾳ, η ανίχνευση της περιβάλλουσας γίνεται με την χρήση ενός 1^{ης} τάξης χαμηλοπερατού φίλτρου για το ρεύμα αποτελούμενο από ένα παράλληλο ωμικό - χωρητικό φορτίο. Οι τιμές των στοιχείων στο κύκλωμα είναι $C = 1\mu F$, $R = 1M\Omega$.

Με το τρόπο αυτό αποκόπτεται συχνοτική πληροφορία κοντά στην τάση της πόλωσης του μικροφώνου, η οποία είναι απαραίτητη, όπως θα επεξηγηθεί στη συνέχεια στο κεφάλαιο 3. Το κύκλωμα αξιοποιεί την στάθμη αυτή προκειμένου να γίνει άμεση σύγκριση με το σήμα εξόδου σε πραγματικό χρόνο. Έτσι θα παραχθεί ένα σήμα ενεργοποίησης του μικροελεγκτή, ώστε να αφυπνιστεί σε περίπτωση που ήδη λειτουργεί με χαμηλή κατανάλωση. Η τελευταία λειτουργία είναι καλή πρακτική προκειμένου ο μικροελεγκτής να καταναλώνει λιγότερο ρεύμα, παρατείνοντας τη ζωή της μπαταρίας, όταν δεν υφίσταται κάποια ομιλία ή ο χρήστης βρίσκεται σε κάποιο ήσυχο δωμάτιο.

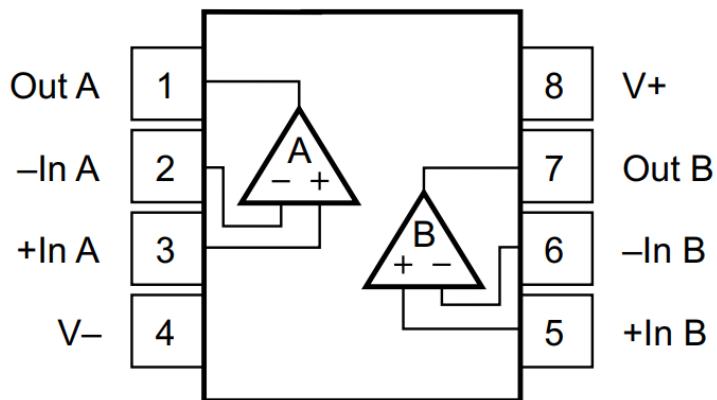
2.3.3 Τελεστικός ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα ολοκληρωμένο κυκλώμα, το οποίο εκτελεί αρκετές αναλογικές πράξεις σε σχέση με τη τοπολογία του κυκλώματος¹⁷. Το κύκλωμα του φέρει στο εσωτερικό μια τοπολογία διαφορικού ζεύγους ενίσχυσης και για το λόγο

¹⁷ Razavi B., (2018). Βασικές αρχές Μικροηλεκτρονικής

αυτό η είσοδος, επίσης εισέρχεται διαφορικά από τα pins + και – του IC. Το πακέτο που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται OPA2134PA και φέρει στο εσωτερικό του δύο OPAMPs, ειδικά, σχεδιασμένους για audio εφαρμογές με μικρή επίπτωση στον θόρυβο.

OPA2134: P and D Packages 8-Pin PDIP and 8-Pin SOIC Top View

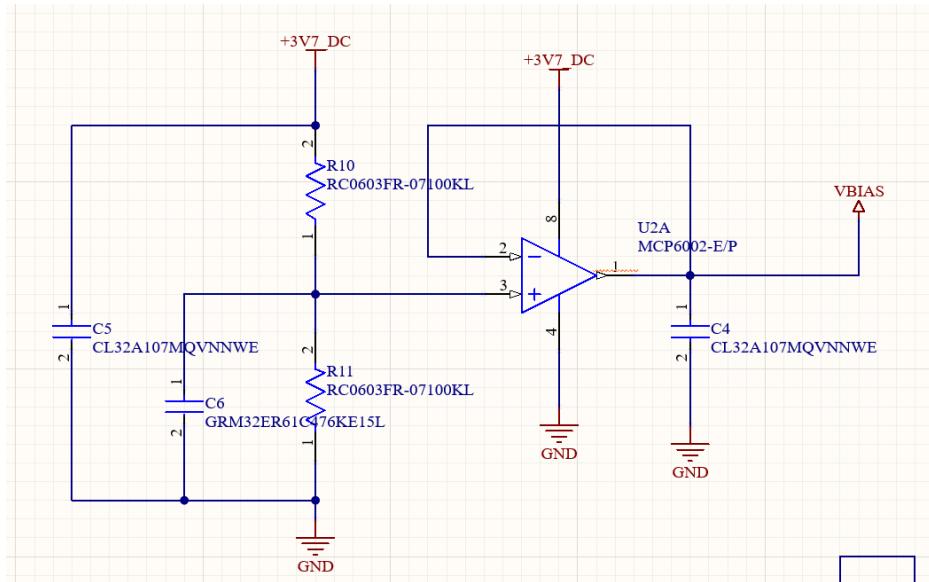


Εικόνα 2.9 : Pinout διάγραμμα του IC OPA2134PA

Οι βασικότερες τοπολογίες του τελεστικού ενισχυτή στο τελικό κύκλωμα αφορούν την προ-ενίσχυση των ακουστικών σημάτων, τον σχεδιασμό των αναλογικών φίλτρων και την άθροιση των σημάτων.

Η ενίσχυση ενός σήματος με το τελεστικό ενισχυτή γίνεται είτε με θετική είτε με αρνητική ανάδραση¹⁸. Στην πρώτη περίπτωση, η τοπολογία προσφέρει καλύτερη απομόνωση από την είσοδο προς την έξοδο για λόγους θορύβου, ωστόσο, υπάρχει ο κίνδυνος το κύκλωμα να οδηγηθεί σε ταλάντωση, αν δε σχεδιασθεί σωστά, και το σήμα εξόδου να παράγει θόρυβο σε συγκεκριμένη συχνότητα. Στην δεύτερη περίπτωση, υπάρχουν μεγαλύτερα περιθώρια ενίσχυσης όμως ο θόρυβος του κυκλώματος είναι σχετικά μεγαλύτερος λόγω άμεσης ζεύξης της εξόδου με την είσοδο. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει καλή απομόνωση των σημάτων είναι, πως η ισοδύναμη αντίσταση εισόδου είναι ιδιαίτερα μεγάλη (περίπου $2M\Omega$ στις τυπικές εφαρμογές), ενώ η αντίσταση εξόδου είναι χαμηλή. Μια πολύ χρήσιμη τοπολογία του ενισχυτή αποτελεί το κύκλωμα *buffer* τάσης, όπου η τάση εξόδου είναι όση στην είσοδο, ωστόσο τα φορτία εισόδου και εξόδου διαφέρουν. Στο τελικό κύκλωμα, προκειμένου να γίνει σωστά το impedance matching και να μην χαθεί επιπλέον ισχύς που να οδηγήσει σε δυνατότητα ή ακουστικής παραγωγής, το κύκλωμα *buffer* τάσης χρησιμοποιείται στο σημείο λήψης της τάσης πόλωσης από το διαιρέτη τάσης που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.1.

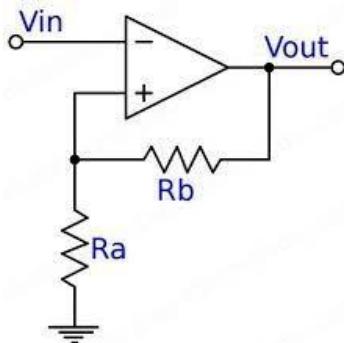
¹⁸ Jaeger R.C & Blalock T.N., (2019). *Μικροηλεκτρονική Σχεδίαση Κυκλωμάτων*



Εικόνα 2.10 : Κυκλωματικό διάγραμμα διαιρέτη τάσης και χρήση buffer τάσης για την παραγωγή της στάθμης πόλωσης

Με το τρόπο αυτό μπορεί πλέον ο διαιρέτης τάσης να οδηγήσει οποιοδήποτε φορτίο, χωρίς να αλλάζει η στάθμη της τάσης πόλωσης VBIAS. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έγινε χρήση decoupling πυκνωτών προκειμένου να απομακρυνθούν οι κυματώσεις που υπάρχουν γύρω από την τάση dc τροφοδότησης.

Το κύκλωμα ενίσχυσης σήματος το οποίο αξιοποιεί θετική ανάδραση φαίνεται στην συνέχεια :



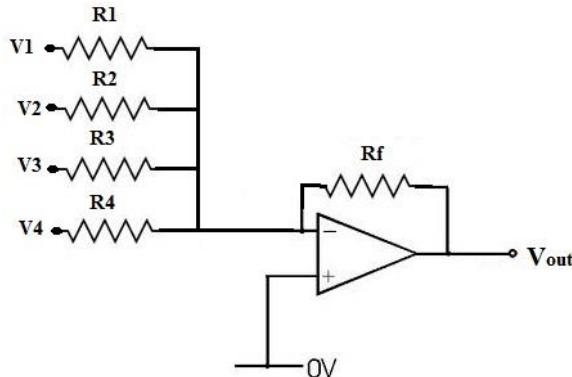
Οι κανόνες λειτουργίας των OPAMPS αναφέρουν πως το ρεύμα των ακροδέκτων + και - είναι μηδενικό, ενώ οι τάσεις τους είναι ισάξιες. Παρατηρώντας, λοιπόν, την τοπολογία άνωθεν, η τάση εισόδου εμφανίζεται και στο σημείο του ακροδέκτη + ενώ, η απουσία ρεύματος προς τον ακροδέκτη αυτό, επιτρέπει στην ανάλυση που γίνεται να υπολογισθεί η τάση εξόδου με την χρήση διαιρέτη τάσης στις δύο αντιστάσεις :

$$V_{in} = \frac{V_{out}R_a}{R_a + R_b} \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

Έτσι, για την επιλογή τιμών αντιστάσεων $1M\Omega$ προς $10k\Omega$, το κέρδος ενίσχυσης ισούται με 101.

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

Μια περίπτωση χρήσης των OPAMPs, με ανάλυση όμοιας λογικής, είναι η άθροιση σημάτων :



Στην τοπολογία αυτή, της οποίας η ανάδραση είναι αρνητική, μπορεί να υποτεθεί πως οι τιμές όλων των αντιστάσεων είναι ίσες και έχουν τιμή R . Επειδή, το ρεύμα εισόδου στον ακροδέκτη – είναι μηδενικό, τότε θα ισούται με το ρεύμα εξόδου, δηλαδή αυτό που διαρρέει την αντίσταση R_f . Τα ρεύματα υπολογίζονται ως διαφορές τάσης ως προς τις τιμές των αντιστάσεων. Δεδομένου πως ο ακροδέκτης - φέρει ίδια τάση με τον ακροδέκτη +, τότε στην πράξη θα είναι :

$$V_- = V_+ = 0V$$

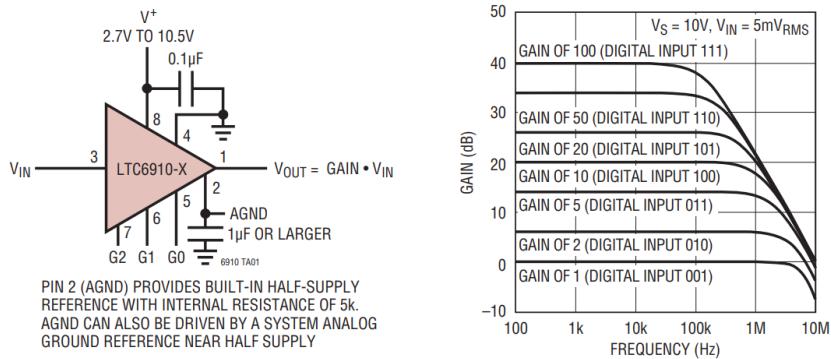
$$I_{in} = \frac{V_1 - V_-}{R_1} + \frac{V_2 - V_-}{R_2} + \frac{V_3 - V_-}{R_3} + \frac{V_4 - V_-}{R_4} =>$$

$$I_{in} = \frac{1}{R}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) = I_{out} = \frac{V_- - V_{out}}{R_f} =>$$

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

Έτσι είναι πολύ απλή η κατασκευή σημάτων που είναι γραμμικός συνδυασμός άλλων θεμελιωδών σημάτων. Βέβαια, η ανάλυση αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες τοπολογίες με χρήση διαφορετικών παθητικών στοιχείων, όπως στην περίπτωση του σχεδιασμού αναλογικών φίλτρων.

Εν κατακλείδι, υπάρχει μία κατηγορία αναλογικών ενισχυτών ελεγχόμενων από ψηφιακές εισόδους. Αυτοί οι ενισχυτές είναι προγραμματιζόμενοι από στάθμες υψηλού/χαμηλού δυναμικού και ονομάζονται PGAs (Programmable Gain Amplifiers). Η χρήση αυτών των ενισχυτών είναι απαραίτητη, προκειμένου να γίνεται ρύθμιση στην ενίσχυση του ήχου της τελικής συσκευής σε πραγματικό χρόνο. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το IC LTC6910-2 το οποίο φέρει σταθερά κέρδη στο διάστημα ενδιαφέροντος (έως και 10kHz).



Εικόνα 2.11 : Pinout διάγραμμα του IC LTC6910-2 και χαρακτηριστικές καμπύλες κέρδους ανά ψηφιακή κωδικοποίηση $G2G1G0$

Όπως είναι εμφανές και από το φύλλαδιο των κατασκευαστών, κάθε ψηφιακή κωδικοποίηση των 3 bits αντιστοιχεί σε ανάλογο κέρδος ενίσχυσης.

2.4 Μικροελεγκτές

Οι μικροελεγκτές¹⁹ είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία προσφέρουν πολλές υπολογιστικές δυνατότητες και προορίζονται για πολύπλοκες διεργασίες. Στο εσωτερικό αυτών περιλαμβάνονται πυρήνες επεξεργαστικής ισχύος, κύτταρα μνήμης τύπου RAM, αναλογικές και ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου (I/O pins) και υποκυκλώματα, τα οποία επιτρέπουν να γίνουν συγκεκριμένες επεξεργασίες σημάτων²⁰. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει κύκλωμα μετρατροπέα αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (ADC), κύκλωμα διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM), κύκλωμα ταλαντωτή (XTAL) και εντοπίζονται επιπρόσθετες αρχιτεκτονικές πρωτοκόλλων, προκειμένου να γίνει επικοινωνία μεταξύ συσκευών ή να φορτωθεί κώδικας, ο οποίος θα περιγράφει την λειτουργία του μικροελεγκτή. Στο κύκλωμα της διπλωματικής εργασίας γίνεται η χρήση του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU, ένα IC το οποίο συναντάται στο module ARDUINO UNO. Στο παρακάτω πίνακα σημειώνονται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του.



Εικόνα 2.12 : Ο μικροελεγκτής ATMEGA328-PU

¹⁹ URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>

²⁰ Πεκμεστζή Κ., (2009). Συστήματα Μικροϋπολογιστών II - Μικροελεγκτές AVR και PIC, Αθήνα

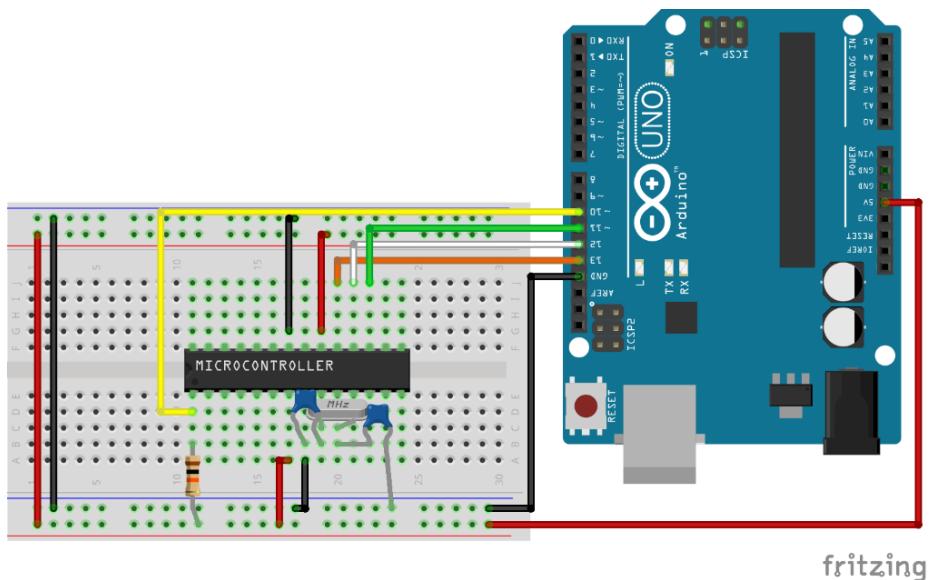
Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων

Πίνακας 2.1 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Έχει σχετικά μικρή απαίτηση σε χώρο	Δεν έχει μεγάλη ακρίβεια στα bits του PWM, προκειμένου να ανακατασκευασθούν σήματα με συχνότητες πάνω από 1000Hz (όπως τα audio signals)
Έχει σχετικά μικρή απαίτηση σε ισχύ ενώ επιτρέπεται η χρήση Low Power Mode για ελάττωση της συνολικής κατανάλωσης	Ο αποθηκευτικός χώρος της μνήμης είναι περιορισμένος, οπότε το μέγεθος του κώδικα έχει όριο
Είναι εύκολα προγραμματίσιμος μικροελεγκτής, καθώς, γίνεται burn του πηγαίου κώδικα, είτε από το Arduino IDE είτε από εξωτερικό κύκλωμα	Προσφέρονται αρκετές διεργασίες, οι οποίες δεν είναι πάντα απαραίτητο να αξιοποιηθούν. Έτσι, η μη απενεργοποίησή τους οδηγεί σε περεταίρω κατανάλωση ισχύος.
Ανιχνεύει αναλογικά σήματα με αρκετή ακρίβεια, καθώς φέρει 10 bit ADC	Φέρει ιδιαίτερα περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ καθώς πολύπλοκες διεργασίες, όπως ο μετασχηματισμός FFT, δεν λαμβάνουν την επιθυμητή ακρίβεια για τις περισσότερες εφαρμογές ανάλυσης συχνοτήτων.
Αποκρίνεται πολύ γρήγορα και το ρολόι μπορεί να αλλάξει με εξωτερικό κρύσταλλο	-
Είναι σχετικά οικονομικός	-

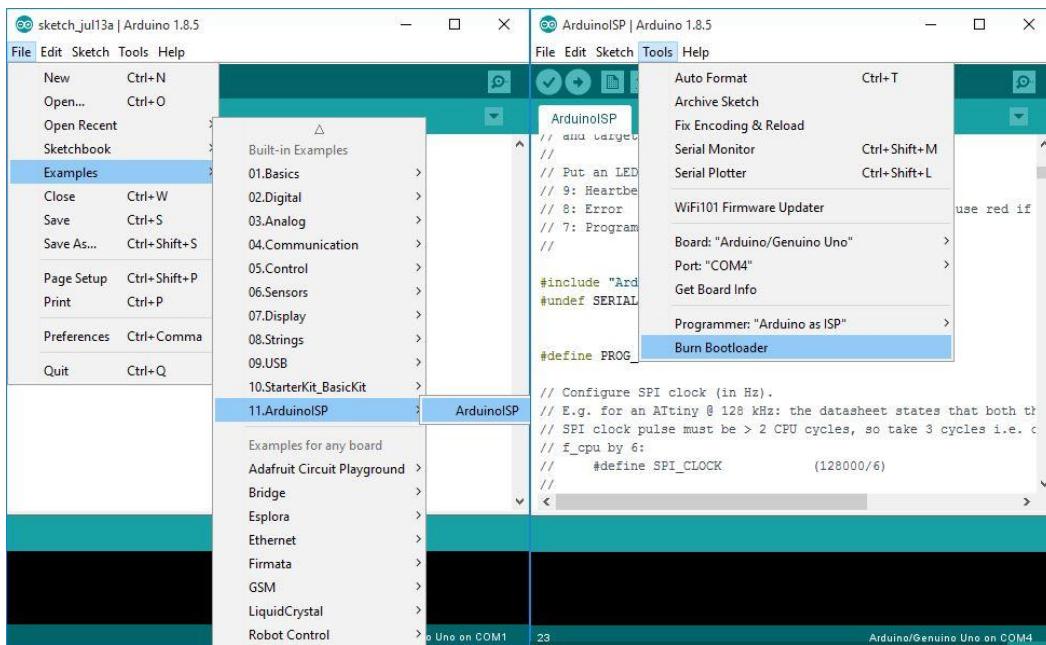
Προκειμένου το τελικό κύκλωμα να υλοποιηθεί σε μόλις μία πλακέτα PCB και να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος της συσκευής, η μέθοδος που υλοποιήθηκε καλείται *code burn*. Συγκεκριμένα, αφού γραφεί ένα αρχείο πηγαίου κώδικα στο *Arduino IDE*, είναι έτοιμο να περαστεί στον μικροελεγκτή μετά το compilation. Σε μια δοκιμαστική πλακέτα, αρχικά, υλοποιείται το κύκλωμα που φαίνεται στην εικόνα :

Κεφάλαιο 2 : Βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και επεξεργασίας σημάτων



Εικόνα 2.13 : Καλωδίωση σε δοκιμαστική πλακέτα για το code burn²¹

Έπειτα, με χρήση κατάλληλου αρχείου, το Arduino IDE λειτουργεί ως ο προγραμματιστής της συσκευής, δηλαδή λαμβάνει το ρόλο του ISP Programmer. Μόλις εντοπισθεί το αρχείο, μπορεί να επιλεχθεί η εντολή “Burn Bootloader”. Μετά, επιστρέφοντας στο αρχείο του πηγαίου κώδικα που περιγράφει τις λειτουργίες που είναι επιθυμητές, μπορεί να φορτωθεί ο κώδικας επιλέγοντας “Upload”, ενώ παραμένει πατημένο το πλήκτρο Shift από το πληκτρολόγιο.



Εικόνα 2.14 : Επιλογές στο μενού πλοήγησης του Arduino IDE για να ορισθεί το Arduino Uno ως ISP Programmer και να γίνει burn bootloader

²¹ **URL:** <https://www.electronics-lab.com/project/installing-the-arduino-bootloader-on-the-atmega328p-microcontroller/>

2.5 Αναλογικά και ψηφιακά συστήματα

Τα σήματα τα οποία συναντώνται στη φύση είναι διαταραχές αντιληπτές συνεχώς στο χρόνο. Για το λόγο αυτό, χαρακτηρίζονται ως αναλογικά σήματα και προσφέρουν πληροφορία σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αντίθετα, ψηφιακά σήματα χαρακτηρίζονται όσα είναι διακριτά σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή προσφέρουν μη μηδενική πληροφορία μόνο ανά ακέραια πολλαπλάσια μονάδων χρόνου. Τα αναλογικά σήματα μπορούν να μετασχηματιστούν σε ψηφιακά μέσω της διαδικασίας της δειγματοληψίας, η οποία εκτελείται από το κύκλωμα του μετατροπέα *ADC* (Analog to Digital Converter). Βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί και η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή να ανακατεσκευαστεί ένα αναλογικό σήμα από κάποιο ψηφιακό σήμα με τη χρήση του μετατροπέα *DAC* (Digital to Analog Converter). Κάθε μορφή σήματος, είναι απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή επεξεργασία με ακρίβεια, αμεσότητα και ευκολία.

Στο συνεχή χρόνο, αποδεικνύεται πως κάθε σήμα μπορεί να προκύψει ως γραμμικός συνδυασμός συναρτήσεων από ορθογώνια οικογένεια. Έτσι προέκυψε η περιγραφή των αναλογικών σημάτων με τη χρήση της σειράς Fourier:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, τα συνημίτονα και τα ημίτονα αποτελούν ορθογώνιες μεταξύ τους συναρτήσεις και αποτυπώνουν την ας συνιστώσα του αναλογικού σήματος $x(t)$. Επιπλέον, η σταθερά a_0 υποδηλώνει την ύπαρξη dc συνιστώσας. Έτσι κάθε σήμα φέρει διαφορετικές συχνότητες. Για $n=1$ υπολογίζεται η βασική αρμονική, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές n συναντώνται οι ανώτερες αρμονικές. Η ίδια περιγραφή του σήματος είναι εφικτή και στο πεδίο της συχνότητας με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Η γενικευμένη εξίσωση είναι :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

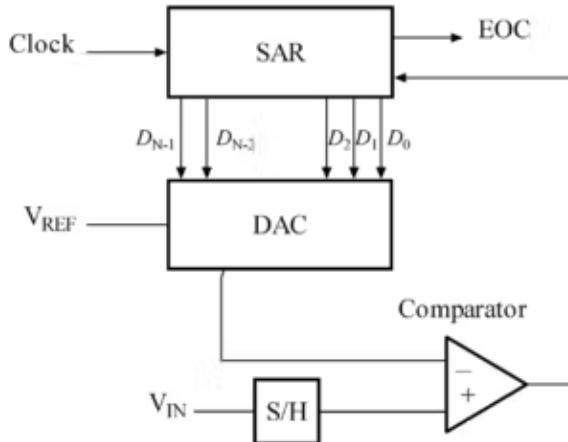
Οι παραπάνω βασικές ιδιότητες αναλογικών σημάτων είναι θεμελιώδεις για την υλοποίηση της τελικής συσκευής ενίσχυσης ακουστικού σήματος. Μάλιστα γίνεται εμφανές, πως ένα ακουστικό σήμα, πιθανόν να φέρει περισσότερες από μία συχνότητα, καθώς το σήμα εξελίσσεται στο χρόνο. Αυτό επιβάλλει την χρήση ορισμένων φίλτρων, τα οποία θα βοηθήσουν στην διαλογή της ακουστικής πληροφορίας ανά εύρος συχνοτήτων, προκειμένου ο αλγόριθμος ενίσχυσης να βασιστεί στην τεχνική του Compression Gain.

Τα αναλογικά σήματα μπορούν, επίσης, να δειγματοληπτηθούν με τη χρήση του κυκλώματος του *ADC*. Για την περίπτωση του ATMEGA328-PU, η ακρίβεια κωδικοποίησης ανέρχεται στα 10 bits με εύρος τάσης από 0V έως την τάση τροφοδοσίας (3.7V). Επομένως, το διακριτό βήμα της κβάντισης, δηλαδή το πλάτος σε Volts μεταξύ δύο διαδοχικών κωδικοποιημένων στάθμεων είναι :

$$L = 2^{10} - 1 = 1023 \text{ στάθμες}$$

$$\Delta = \frac{V_{peak+} - V_{peak-}}{L} = \frac{3.7 - 0}{1023} = 3.62mV$$

Ο θόρυβος της κβάντισης είναι μια αμελητέα ποσότητα στην παρούσα εφαρμογή, καθώς ο μικροελεγκτής δεν αξιοποιείται για επανακατασκευή του ηχητικού σήματος στην έξοδο. Για την τροφοδοσία των 3.7V, η ταχύτητα του ρολογιού ανέρχεται στα 15.5 MHz, η οποία είναι και ίση με τη συχνότητα της δειγματοληψίας.



Εικόνα 2.15 : Αρχιτεκτονική ADC στο εσωτερικό του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU²²

Τέλος, αρκετά χρήσιμη αποδεικνύεται πως είναι η χρήση ψηφιακών φίλτρων τα οποία εκτελούνται ως αποτέλεσμα αριθμητικών πράξεων. Υπάρχουν δύο είδη φίλτρων τα οποία εξαρτώνται από την συμπερίληψη της προηγούμενης τιμής εξόδου στην εξίσωση. Στη γενική περίπτωση οι εξισώσεις έχουν τη μορφή :

$$y(n) = \sum b_i x(i) + \sum a_i y(n-i)$$

Εάν οι συντελεστές των εξόδων γίνονται μηδενικοί, δηλαδή το σήμα εξόδου από το φίλτρο εξαρτάται μόνο από την είσοδο, τότε το σύστημα φθάνει γρήγορα σε μόνιμη κατάσταση (λόγω BIBO ευστάθειας) και καλείται FIR φίλτρο. Στην αντίθετη περίπτωση η ευστάθεια ίσως καθυστερήσει, απαιτώντας άθροιση πολλών (σχετικά άπειρων) διαδοχικών όρων. Τότε το σύστημα, το οποίο εξαρτάται τόσο από τις τρέχουσες τιμές της εισόδου όσο και από τις παρελθοντικές τιμές της εξόδου, καλείται IIR φίλτρο. Η χρήση ψηφιακού φίλτρου είναι απαραίτητη προκειμένου να εντοπισθεί το συγχοντικό εύρος με την περισσότερη πληροφορία (στο εύρος αυτό η ισχύς του σήματος είναι πλεονάζουσα οπότε και το πλάτος του σήματος πιο μεγάλο) και να επιλεχθούν τα κέρδη, τα οποία ρυθμίζονται στα κυκλώματα των ψηφιακά προγραμματιζόμενων αναλογικών ενισχυτών

²²**URL:** https://create.arduino.cc/projecthub/yeshvanth_muniraj/analog-to-digital-converter-module-of-atmega328p-e255ea

Κεφάλαιο 3 : Μελέτη ακουστικών σημάτων

3.1 Ηχητικά κύματα

Προκειμένου να αναπτυχθούν οι λειτουργίες του συστήματος του ακουστικού βαρηκοϊας, θα πρέπει πρώτα να γίνουν κατανοητές οι βασικές αρχές που διέπουν τα ηχητικά σήματα. Αυτά παράγονται εξαιτίας της διάδοσης ηχητικών κυμάτων στο χώρο. Σε μια ταλαντούμενη επίπεδη επιφάνεια, τα μόρια του αέρα που είναι σε επαφή με αυτή, δέχονται ώθηση προς μια κατεύθυνση. Έτσι αποκτούν ορμή και συγκρούονται με γειτονικά μόρια αέρα ωθώντας τα προς την ίδια κατεύθυνση. Με αυτό το τρόπο μεταφέρεται ένα ποσό ενέργειας το οποίο αυξάνει την ατμοσφαιρική πίεση διότι αυξάνεται η συνολική δύναμη η οποία ασκείται προς την επιφάνεια της ίδιας κατεύθυνσης κίνησης των μορίων. Τελικά, η επιφάνεια αυτή επιστρέφει στην αρχική της θέση και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται. Με το παραπάνω τρόπο παράγονται μηχανικά κύματα τα οποία φθάνουν στο ανθρώπινο αυτί όπου λαμβάνονται ως ηχητικά σήματα²³.

Θεωρώντας πως η ταχύτητα διάδοσης του ήχου είναι c και πως το χρονικά – χωρικά μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι η ακουστική πίεση p , η εξίσωση που περιγράφει το παραπάνω κυματικό φαινόμενο στη γενική περίπτωση είναι :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p$$

Η παραπάνω κυματική εξίσωση μπορεί να επιλυθεί σε διάφορες περιπτώσεις συμμετρίας στο χώρο, όπως η σφαιρική και η κυλινδρική. Σε κάθε περίπτωση η τελική λύση φέρει τη μορφή :

$$p(r, t) = \frac{p_0}{r^\alpha} \cos(\omega t - kr)$$

Όπου $\alpha = 1$ για σφαιρική συμμετρία και $\alpha = 1/2$ για κυλινδρική συμμετρία. Η ταχύτητα του ήχου στη θερμοκρασία των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ υπολογίζεται πως είναι ίση με 331 m/s.

Παρατηρώντας την λύση της κυματικής εξίσωσης, είναι ευδιάκριτο πως τα ηχητικά σήματα περιγράφονται και αυτά από ημιτονοειδείς όρους όπως η ακουστική πίεση. Η ενέργεια η οποία διαδίδεται μέσω του μηχανικού κύματος, και κατ'επέκταση, η ισχύς του, είναι τα μεγέθη τα οποία πάντοτε διατηρούνται ποσοτικά αλλά μπορούν να αλλάξουν μορφή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική όταν ο κοχλίας αποκωδικοποίησει τις ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία θα διαδοθούν μέσω των νευρώνων προς τον εγκέφαλο.

²³ Σκαρλάτος Δ., (2018). *Εφαρμοσμένη ακουστική - Ηχοπροστασία*, σελ.3-19

Η ταχύτητα των σωματιδίων u , εξαρτάται από την ακουστική εμπέδηση $z = \rho c$ και την ακουστική πίεση. Δίνοντας απλώς ημιτονοειδής μορφή στην λύση της κυματικής εξίσωσης, προκύπτει ότι :

$$u(x, t) = \frac{p(x, t)}{z} = \frac{1}{\rho c} p(x, t) = \frac{p_0}{\rho c} \cos(\omega t - kx)$$

Η ένταση του ήχου I είναι η μέση τιμή της ροής ισχύος κατά τη διάδοση του μηχανικού κύματος. Επομένως :

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_0^2}{\rho c} \cos^2(\omega t - kx) dt = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

Επειδή η ενέργεια η οποία περικλείεται κατά τη διάδοση ενός στοιχειώδους όγκου ισούται με w , η ένταση του ήχου σε μια απόσταση r είναι επίσης ίση με :

$$I = \frac{w}{4\pi r^2}$$

Τελικά, προκύπτει η γενική εξίσωση συσχέτισης της ενέργειας του ήχου και της πίεσης η οποία εφαρμόζεται σε ορισμένη απόσταση r^{24} :

$$\frac{w}{4\pi r^2} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

Ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη μέτρησης της έντασης του ήχου σε σχέση με την απόσταση αλλά και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής του σήματος, αποτελεί η ηχοστάθμη (Sound Pressure Level – SPL). Η ηχοστάθμη μετρείται σε μονάδες dB και έχει αναφορά την περίπτωση ακουστικής πίεσης ίσης με $20 \text{ } \mu\text{Pa}$:

$$L_{SPL} = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right), p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

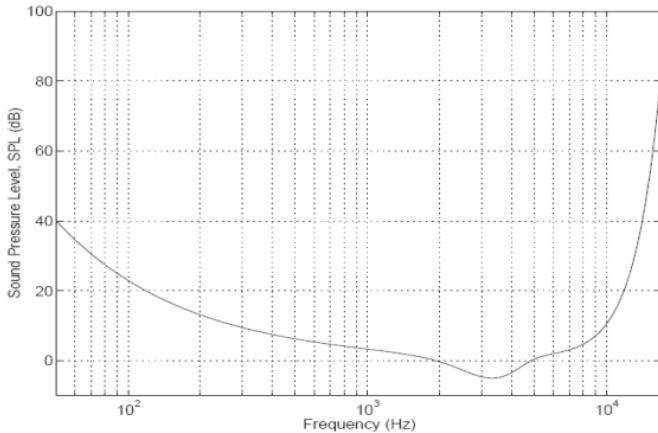
Τα ακουστικά σήματα τα οποία δημιουργούν ηχοστάθμη άνω των 85 dB θεωρούνται επικίνδυνα για το ανθρώπινο αυτή καθώς η παρατεταμένη έκθεση σε αυτά μπορεί να οδηγήσει σταδιακά σε απώλεια ακοής (Noise Induced Hearing Loss). Μάλιστα, σε υψηλότερες ηχοστάθμες, είναι πιθανό να ξεπεραστεί το κατώφλι πόνου και να προκληθούν ακόμη σημαντικότερες βλάβες.

Μία σημαντική περίπτωση χρήσης της μέτρησης ηχοστάθμης είναι η εύρεση του απόλυτου κατωφλίου ακοής για τα ακουογράμματα. Η καμπύλη αυτή προσδιορίζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται ένας τόνος προκειμένου να ανιχνευθεί ως ήχος από ένα άτομο το οποίο ακούει φυσιολογικά ακόμη και εάν υπάρχει θόρυβος στο χώρο²⁵ :

²⁴ Σκαρλάτος Δ., (2018). *Εφαρμοσμένη ακουστική - Ηχοπροστασία*, σελ.33-35

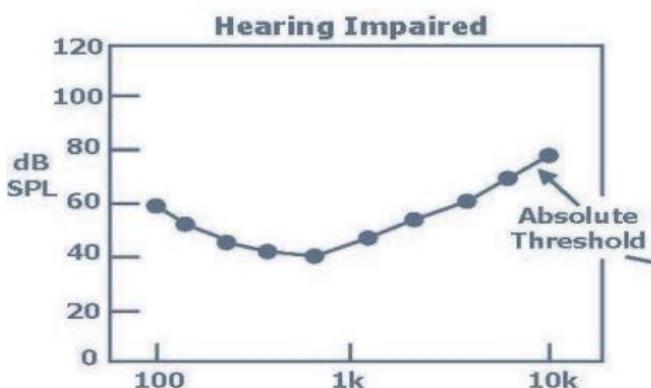
²⁵ Ματσούκα Π., (2007). *Τεχνικές Συμπίεσης για Άτομα με Πρόβλημα Βαρηκοΐας*, σελ.15-16

$$T_q(f) = 3.64 \left(\frac{f}{1000} \right)^{-0.8} - 6.5e^{-0.6\left(\frac{f}{1000}-3.3\right)^2} + \frac{1}{1000} \left(\frac{f}{1000} \right)^4 \text{ dB}$$



Εικόνα 3.1 : Απόλυτο κατώφλι ακοής για φυσιολογικό άνθρωπο σε συνθήκες απουσίας θορύβου

Ωστόσο, για ένα άτομο το οποίο πάσχει από απώλεια ακοής όπως η βαρηκοΐα, η καμπύλη αυτή μετατοπίζεται προς υψηλότερες ηχοστάθμες :



Εικόνα 3.2 : Απόλυτο κατώφλι ακοής σε άτομο με πρόβλημα ακοής

Κάθε άτομο, βέβαια, φέρει διαφορετική χαρακτηριστική καμπύλη και τα διαγράμματα εξάγονται κατά την εκτέλεση πειραματικών μετρήσεων. Προκειμένου να γίνει σωστά η επεξεργασία του ήχου, και της ενίσχυσής του ανά συχνοτική ζώνη, αρκεί να σχεδιασθεί το αντίστοιχο σύστημα το οποίο μοντελοποιεί την λειτουργία του κοχλία. Ο κοχλίας, προσδομοιώνει μία τράπεζα επικαλυπτόμενων ζωνοπερατών φύλτρων τα οποία έχουν εύρος ζώνης μεταβαλλόμενο ανάλογα με την συχνότητα. Στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα έχουν βρεθεί 25 κρίσιμες ζώνες οι οποίες διαχωρίζουν το συνολικό ακουστικό φάσμα²⁶.

²⁶ Ματσούκα Π., (2007). Τεχνικές Συμπίεσης για Άτομα με Πρόβλημα Βαρηκοΐας, σελ.22

Πίνακας 3.1 : Τράπεζα φίλτρων των κρίσιμων ζωνών στο κοχλία

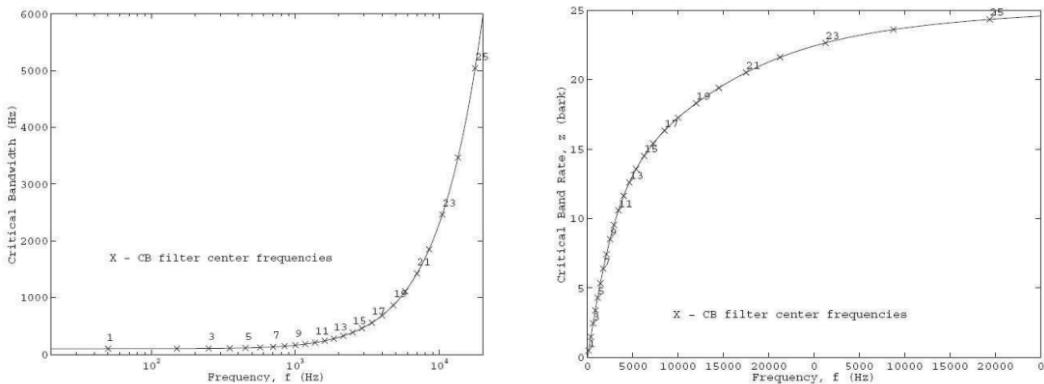
No.	Freq.(Hz)	Bandwidth	No.	Freq.(Hz)	Bandwidth
1	50	20-100	14	2150	2000-2320
2	150	100-200	15	2500	2320-2700
3	250	200-300	16	2900	2700-3150
4	350	300-400	17	3400	3150-3700
5	450	400-510	18	4000	3700-4400
6	570	510-630	19	4800	4400-5300
7	700	630-770	20	5800	5300-6400
8	840	770-920	21	7000	6400-7700
9	1000	920-1080	22	8500	7700-9500
10	1175	1080-1270	23	10500	9500-12000
11	1370	1270-1480	24	13500	12000-15500
12	1600	1480-1720	25	19500	15500 -
13	1850	1720-2000			

Το εύρος μίας κρίσιμης ζώνης γύρω από μια κεντρική συχνότητα, προσεγγίζεται από την πειραματική εξίσωση :

$$BW_c(f) = 25 + 75 \left(1 + 1.5 \left(\frac{f}{1000} \right)^2 \right)^{0.69} \text{ Hz}$$

Δύο γειτονικές κρίσιμες ζώνες απέχουν μία μονάδα Bark. Η μετατροπή της συχνότητας σε μονάδες Bark βασίζεται στη μαθηματική έκφραση :

$$z(f) = 13 \tan^{-1}(0.00076f) + 3.5 \tan^{-1}\left(\left(\frac{f}{7500}\right)^2\right) \text{ Bark}$$



Εικόνα 3.3 : Εύρος ζώνης σε σχέση με την κεντρική συχνότητα – Αντιστοίχιση συχνοτήτων με μονάδες Bark

Η παραπάνω ανάλυση έγινε προκειμένου να γίνει κατανοητή η μέθοδος επεξεργασίας των ακουστικών σημάτων από τον κοχλία. Έτσι, η συσκευή του ακουστικού βαρηκοΐας θα πρέπει να δίνει ένα κέρδος ακουστικής ενίσχυσης αντίστοιχο με την απώλεια που σημειώνεται ανά κρίσιμη ζώνη προκειμένου το απόλυτο κατώφλι ακοής του βαρήκου ατόμου να φθάσει σε χαμηλότερες ηχοστάθμες, κοντά στις περιπτώσεις κατωφλίου για άτομα φυσιολογικής ικανότητας σε ακοή.

3.2 Διαμερισμός κρίσιμων ζωνών

Η τεχνική του Gain Compression επιβάλλει την εφαρμογή κατάλληλου κέρδους ενίσχυσης ανά κρίσιμη συχνοτική ζώνη σύμφωνα με το ακουόγραμμα του ασθενή. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνει διαμερισμός των ζωνών του bandwidth των ακουστικών σημάτων τα οποία εισέρχονται μέσω του μικροφώνου όταν οδηγηθούν στο σύστημα επεξεργασίας σημάτων της συσκευής του ακουστικού. Η κατάτμηση αυτή είναι εφικτή με τη χρήση πολλών ζωνοπερατών φίλτρων, ιδανικά όσα και οι κρίσιμες ζώνες. Στο τέλος της αντίστοιχης ενίσχυσης του σήματος ανά ζώνη με κριτήριο την καμπύλη του ακουογράμματος, το σήμα ανακατασκευάζεται με αναλογικό αθροιστή, το κύκλωμα του οποίου λαμβάνει τα επιμέρους σήματα και τα

υπερθέτει σε ένα σήμα με ενιαίο συχνοτικό περιεχόμενο στο φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων (20 Hz – 10,000 Hz).

Στην παρούσα εφαρμογή, η χρήση πολλών ψηφιακών φίλτρων είναι ανέφτικτη λόγω αδυναμίας του μικροελεγκτή που χρησιμοποείται. Η χρήση πολλών φίλτρων αρκετά μεγάλης ακρίβειας απαιτεί υπολογιστική ισχύ η οποία δεν παρέχεται, δηλαδή υπάρχει έλλειψη σε αρκετό χώρο μνήμης RAM. Επίσης, η διαδικασία μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά και το αποτέλεσμα δεν θα προκύψει σε πραγματικό χρόνο, ενώ, η έλλειψη ακρίβειας ανακατασκευής σημάτων με PWM σε μεγάλες συχνότητες, μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία σημάτων με αρκετό θόρυβο και εμφάνιση aliasing λόγω αναδίπλωσης φασματικής πληροφορίας αφού δεν τηρείται το κριτήριο του Nyquist.

Έτσι, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση αναλογικών φίλτρων. Επειδή θα γίνει μέγιστη χρήση των ψηφιακών θυρών I/O του μικροελεγκτή, επιλέχθηκαν τέσσερα αναλογικά φίλτρα όπου το κέρδος καθενός από αυτά ρυθμίζεται με ψηφιακά προγραμματιζόμενους αναλογικούς ενισχυτές (PGAs) οι οποίοι συνδέονται σε σειρά με τις εξόδους των φίλτρων. Οι θύρες οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι 12 σε πλήθος και έτσι, επειδή κάθε PGA χρειάζεται τρεις ψηφιακές εισόδους για ρύθμιση, γίνονται τέσσερις διαμερίσεις.

Τα τέσσερα, σε αριθμό, φίλτρα δεν παρέχουν ιδανική χαρακτηριστική σε κάποιες περιπτώσεις επειδή είναι αναλογικά, έχουν περιορισμένες δυνατότητες, είναι δεύτερης τάξης και τα περιθώρια των ζωνών είναι αρκετά στενά καθώς οι ακουστικές συχνότητες απέχουν λιγότερο από μια τάξη μεγέθους (δηλαδή λιγότερο από μια λογαριθμική δεκάδα συχνοτήτων). Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή είναι αρκετή για να γίνει διαχωρισμός των ζωνών και να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση της διάδοσης του ακουστικού σήματος από την είσοδο έως την έξοδο (latency) με αποτέλεσμα η εναλλαγή των κερδών των PGAs να συμβαίνει σε πραγματικό χρόνο διότι έχει μειωθεί αρκετά ο φόρτος του μικροελεγκτή. Τα φίλτρα που επιλέχθηκαν και τα bandwidths που καλύπτουν παρατίθενται στο πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2 : Αναλογικά φίλτρα διαμερισμού κρίσμαν ζωνών

No. of Zones Occupied	Frequency Range (Hz)
1 - 5	20 - 500
5-9	500 - 1000
10-18	1000 - 4000
18-23	4000 – 10000

Ο διαμερισμός των κρίσιμων συχνοτικών ζωνών έγινε με τη χρήση των αναλογικών φίλτρων, ωστόσο παραμένει ένα βασικό πρόβλημα η ρύθμιση των PGAs καθώς δεν γίνεται να ανιχνεύσουν εάν το σήμα το οποίο εισέρχεται στην είσοδο χρειάζεται περισσότερη ή λιγότερη ενίσχυση. Σε πραγματικές συνθήκες, η χρήση σταθερού κέρδους ενίσχυσης αποτελεί σοβαρό πρόβλημα της λειτουργίας του ακουστικού βαρηκοΐας καθώς η συσκευή στη πράξη ενισχύει τον ήχο σταθερά και ανεξάρτητα από τις μεταβολές ηχοστάθμης που παρατηρούνται στο περιβάλλον. Έτσι, αφενός οι ήχοι οι οποίοι είναι δύσκολα ανιχνεύσιμοι από τον βαρήκο θα ενισχυθούν σε κατάλληλη στάθμη ώστε να γίνουν αντιληπτοί, αφετέρου οι ήχοι οι οποίοι είναι ήδη αντιληπτοί θα ενισχυθούν περισσότερο από όσο πρέπει με αποτέλεσμα η εμπειρία της ακοής να γίνει αφύσικη. Θα πρέπει, επομένως, να σχεδιασθεί ένας νόμος ελέγχου του κέρδους ενίσχυσης των PGAs κάνοντας χρήση της στάθμης του σήματος ανά συχνοτική ζώνη.

Για να γίνει ανίχνευση του πλάτους σήματος ως προς συχνότητα, το βασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται από εξειδικευμένους ψηφιακούς μικροεπεξεργαστές (DSPs) είναι ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform – FFT). Ο μετασχηματισμός αυτός είναι ένα είδος ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων όπου τα δείγματα σήματος αποθηκεύονται στη μνήμη και υπολογίζεται με αρκετά γρήγορο αλγόριθμο ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform – DFT)²⁷ :

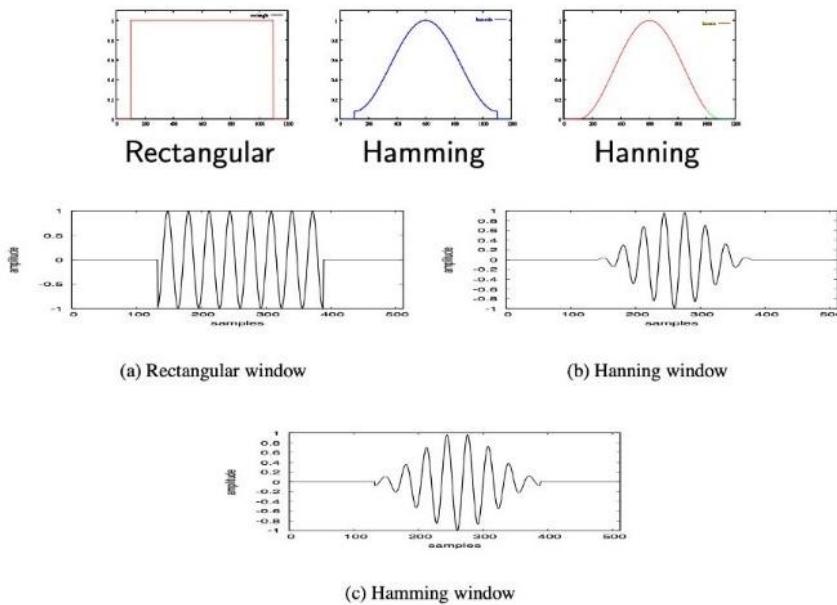
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi}{N} kn}$$

Ο αλγόριθμος FFT, ωστόσο, αποδεικνύεται πως είναι περιορισμένος από το πλήθος των δειγμάτων N του σήματος. Η χρήση πολλών δειγμάτων αυξάνει κατά πολύ την ακρίβεια του σήματος, όμως ο χρόνος latency αυξάνεται αρκετά περισσότερο και γίνεται ίσος με το πλήθος N. Για παράδειγμα, θεωρώντας πως ο υπολογισμός μιας πράξης FFT καλύπτεται σε ένα κύκλο ρολογιού, τότε για ένα πλήθος 1024 δειγμάτων το αποτέλεσμα της ακρίβειας του υπολογισμού είναι μετρίως ικανοποιητικό ενώ η καθυστέρηση είναι ίση με 1024 κύκλους, δηλαδή μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την διάρκεια μιας περιόδου. Αυτό το πρόβλημα φαίνεται από την άμεση σύγκριση του σήματος εισόδου με το σήμα εξόδου και έχει την μορφή καθυστέρησης φάσης (Jitter). Έτσι η επεξεργασία του ήχου δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ειδικά για την περίπτωση αδύναμων μικροελεγκτών όπως ο ATMEGA328-PU.

Το πρόβλημα λύνεται μερικώς με τη χρήση λιγότερων δειγμάτων N και παραθυροποίηση (windowing)²⁸. Με την μέθοδο αυτή, εφαρμόζεται FFT σε επιμέρους δείγματα τα οποία ορίζονται από ένα χρονικά κινητό παράθυρο. Το παράθυρο είναι μια συνάρτηση η οποία πολλαπλασιάζεται με το επιθυμητό κβαντισμένο σήμα και διατηρεί μη μηδενικές τιμές για όσα δείγματα βρίσκονται εντός των ορίων του. Είναι σημαντικό οι μεταβολές των άκρων του παραθύρου να είναι αργές σχετικά και να μη μηδενίζονται ακαριαία προκειμένου να μην διακόπτεται επανηλλειμένα ο ήχος καθώς αυτό οδηγεί σε ύπαρξη επιπλέον θορύβου.

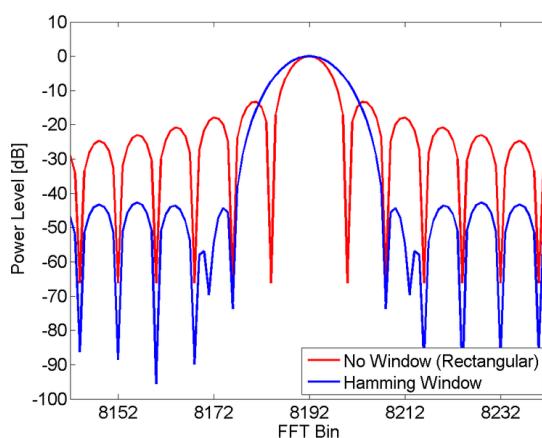
²⁷ Μάργαρης Α.Ι, (2019). Σήματα & Συστήματα - Συνεχούς & Διακριτού Χρόνου

²⁸ Καφεντζής Γ.Π., (2019). Επεξεργασία σήματος συνεχούς & διακριτού χρόνου - Μια πρώτη εισαγωγή



Εικόνα 3.4 : Τεχνικές παραθυροποίησης

Από τα παράθυρα τα οποία φαίνονται στην εικόνα 3.4, το Hamming²⁹ είναι το πιο αποδοτικό ως προς τις μεταβάσεις που προκαλεί στο χρονικό σήμα. Με την μέθοδο της παραθυροποίησης και της τεχνικής threading που παρέχουν οι εξειδικευμένοι ψηφιακοί μικροεπεξεργαστές για σκοπούς pipelining, είναι δυνατό να ενισχυθεί το σήμα στις συχνοτικές περιοχές με την υψηλότερη ενέργεια, οπότε θα υπολογισθεί πιο σωστά ο μετασχηματισμός Fourier χωρίς να απαιτείται μεγάλο πλήθος δειγμάτων. Η τεχνική αυτή, ωστόσο, προσθέτει φασματικό περιεχόμενο σε συχνότητες στις οποίες προηγουμένως δεν υπήρχε πληροφορία. Αυτό φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί καθώς μετά τη χρήση παραθύρου, αφενός η κεντρική συχνότητα φέρει περισσότερη ενέργεια, αφετέρου γίνεται πιο αργή η μεταβάση προς τις χαμηλές στάθμες ισχύος γύρω από τον κεντρικό λοβό. Έτσι εμφανίζεται αυξημένη συχνοτική πληροφορία πολύ κοντά στη κεντρική συχνότητα, μεταξύ κεντρικού λοβού και εκατέρωθεν αυτού.



Εικόνα 3.5 : Σύγκριση φασματικού περιεχομένου με και χωρίς παραθυροποίηση Hamming

²⁹ Μουστακίδης Γ.Β, (2019). Βασικές Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων

Από την θεωρία επεξεργασίας αναλογικών σημάτων, η οποία αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.5, έγινε κατανοητό πως κάθε ακουστικό σήμα μπορεί να λάβει την μορφή μιας σειράς Fourier. Αυτό σημαίνει πως το σήμα, το οποίο αλλάζει μορφή με τη πάροδο του χρόνου, φέρει την μέγιστη ενέργειά του σε διαφορετική θεμελιώδη συχνότητα σε κάθε περίπτωση. Στην εφαρμογή η οποία αναπτύσσεται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, εξαιτίας των αδυναμιών του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται, ήταν επιθυμητή η ανίχνευση της θεμελιώδους συχνότητας και μόνο, καθώς είναι αρκετή προκειμένου να γνωρίζει το σύστημα ενίσχυσης σε ποιό φίλτρο, από τα τέσσερα διαθέσιμα, να αποδώσει το κατάλληλο κέρδος χωρίς να μεταβάλλει την ενίσχυση στα υπόλοιπα. Η μέθοδος εύρεσης της θεμελιώδους συχνότητας βασίζεται στην ανίχνευση των διαδοχικών μηδενισμών του πλάτους (zero crossings). Σύμφωνα με το φυλλάδιο των κατασκευαστών και τη συχνότητα τυπικής λειτουργίας του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU, η περίοδος ενός κύκλου ρολογιού ισούται με :

$$T_{cycle} = \frac{1}{f} = \frac{1}{16MHz} = 62.5\text{ ns}$$

Έτσι, είναι εφικτό να υπολογισθεί η θεμελιώδης συχνότητα υπολογίζοντας, αρχικά, εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος, το πλήθος των επαναλήψεων του κώδικα που εκτελεί ο μικροελεγκτής, διότι κάθε μία από αυτές ισούται με την περίοδο ενός κύκλου ρολογιού. Παράλληλα, υπολογίζονται εναλλαγές προσήμου της κυματομορφής μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων δειγματοληψίας. Επειδή θα χρησιμοποιηθεί η μισή τάση σε σχέση με τη τροφοδοσία ως στάθμη αναφοράς, οι αλλαγές προσήμου ανιχνεύονται γύρω από αυτή. Όταν βρεθούν δύο διαδοχικά σημεία όπου το πρώτο βρίσκεται πάνω από την στάθμη αναφοράς και το δεύτερο βρίσκεται κάτω από αυτή, τότε συμβαίνει zero crossing και η καμπύλη του ακουστικού σήματος κατέρχεται. Στην αντίθετη περίπτωση, συμβαίνει zero crossing κατά την άνοδο της καμπύλης του σήματος σε σχέση με τη στάθμη αναφοράς. Τελικά, η θεμελιώδης συχνότητα για το block δειγμάτων υπολογίζεται ως :

$$f_0 = \frac{N_{zero_crossings}}{2N_{block_size}} f_{cycle}$$

Η τεχνική αυτή υλοποιείται πολύ εύκολα, δεν απαιτεί πολύπλοκες διεργασίες από τον ελεγκτή πέραν της χρήσης μεταβλητών ως μετρητές και, τέλος, εκτιμάται εύκολα η συχνοτική ζώνη όπου εμφανίζεται η περισσότερη ενέργεια σήματος. Σε συνδυασμό με το ακουόγραμμα του βαρήκου, η ενίσχυση που παρέχουν οι PGAs γίνεται, πλέον, ψηφιακά ελεγχόμενη.

Η παραπάνω ανάλυση ήταν θεμελιώδης για την ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού το οποίο θα ελέγχει την λειτουργία ενίσχυσης της ακοής από την τελική συσκευή και θα παρέχει την ποιοτικότερη εμπειρία στο βαρήκο άτομο.

3.3 Επιλογή μικροφώνου

Τα μικρόφωνα είναι μετατροπείς (transducers) των ηχητικών κυμάτων σε ηλεκτρικό σήμα και χωρίζονται σε κατηγορίες σύμφωνα με το τρόπο λειτουργίας τους και την

κατευθυντικότητά τους³⁰. Ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, τα βασικότερα είδη συνοψίζονται παρακάτω :

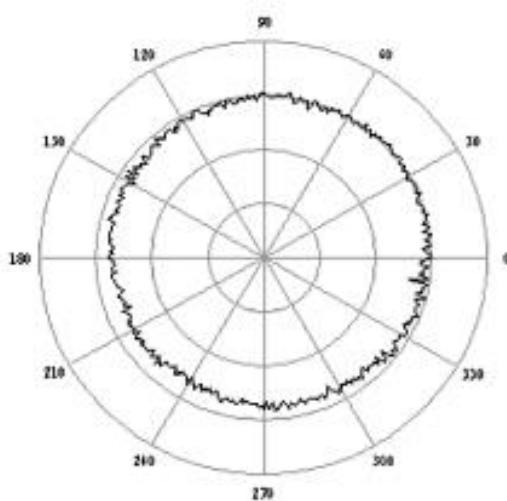
Το **πυκνωτικό μικρόφωνο**, το οποίο φέρει ενσωματωμένο πυκνωτή που αλλάζει χωρητικότητα εξαιτίας μεταβολών της ακουστικής πίεσης που ασκούν τα ηχητικά κύματα.

Το **δυναμικό μικρόφωνο**, το οποίο φέρει μόνιμο μαγνήτη και τύλγμα πηνίου μεταξύ των πόλων του προκειμένου να κινείται ελύθερα. Έτσι, όταν τα ηχητικά κύματα ασκούν ακουστική πίεση στο διάφραγμα, το πηνίο ταλαντεύεται στο πεδίο του μαγνήτη με αποτέλεσμα οι μαγνητικές γραμμές να τέμνονται και να επάγεται τάση στα άκρα του πηνίου.

Το **μικρόφωνο ταινίας**, το οποίο φέρει μια λεπτή ταινία με πτυχές από αλουμίνιο και πάλλεται εξαιτίας ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται από μαγνήτη. Η ποιότητα της λήψης ακουστικών σημάτων είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική για δύο αντίθετες κατευθύνσεις και, σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν δύο ομιλητές.

Τέλος, το **μικρόφωνο κρυστάλλων** φέρει μια λωρίδα πιεζοηλεκτρικού υλικού το οποίο είναι συνδεμένο με διάφραγμα.

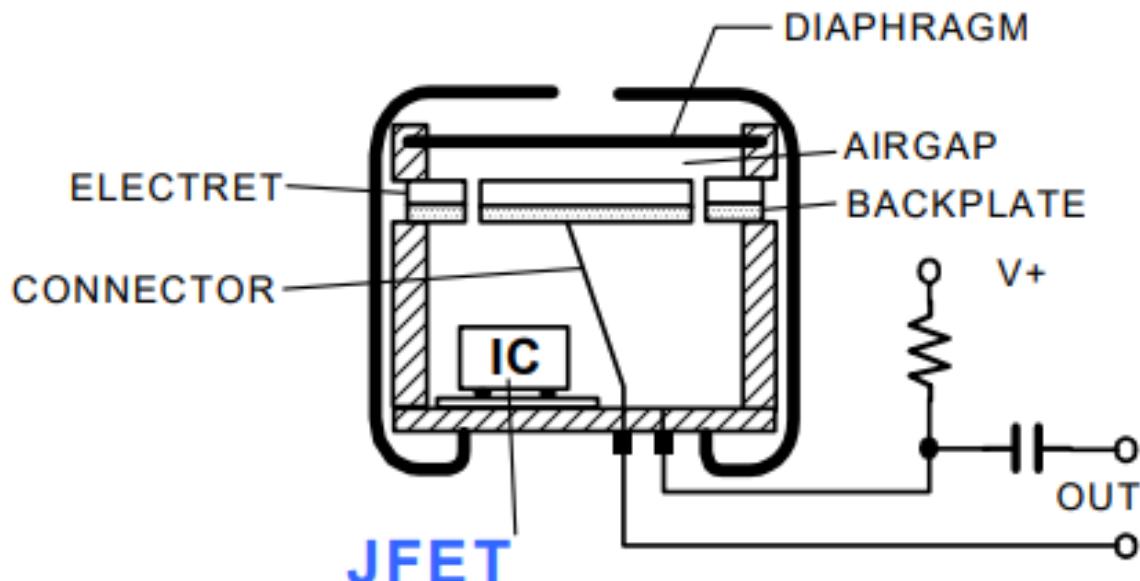
Η κατευθυντικότητα ενός μικροφώνου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τις εκάστοτε εφαρμογές και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση των ακουστικών βαρηκοΐας, το μικρόφωνο θα πρέπει να είναι **παντοκατευθυντικό** καθώς υπάρχει η ανάγκη για λήψη ακουστικών σημάτων από όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο. Ακόμη ένας σημαντικός λόγος χρήσης του, είναι πως εξυπηρετεί σε καλύτερη τρισδιάστατη αντίληψη του χώρου από το βαρήκο άτομο διότι το ακουστικό σύστημα εξυπηρετεί και στην σωστή ισορροπία του ανθρώπου.



Εικόνα 3.6 : Τυπικό διάγραμμα παντοκατευθυντικού μικροφώνου

³⁰ Σκιαδάς Ν. Εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των μικροφώνων, σελ.1-2

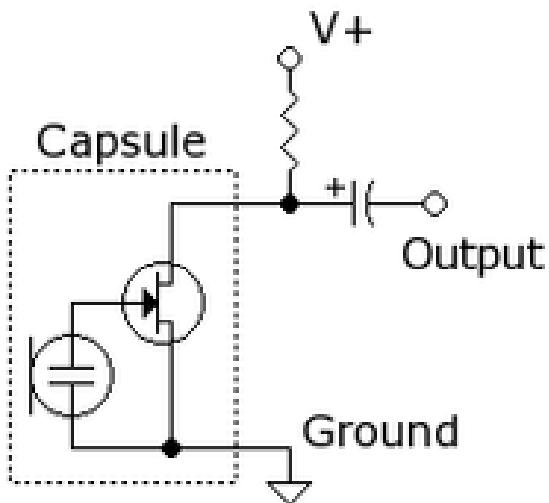
Στην παρούσα εφαρμογή, θα χρησιμοποιηθεί ένα πυκνωτικό παντοκατευθυντικό (omnidirectional) μικρόφωνο τύπου Electret Condenser Microphone (ECM). Τα ECMs χρησιμοποιούνται στις περισσότερες συσκευές και φέρουν ικανοποιητική ευαισθησία σε ήχο (sensitivity) περί τα -40 dB στη συχνότητα των 1000 Hz, ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και διατηρούν μικρό ρεύμα κατανάλωσης ενώ εξασφαλίζουν γραμμικότητα στο ακουστικό σήμα. Το μικρόφωνο αυτό φέρει το διάφραγμα, μία μεμβράνη η οποία ανιχνεύει μεταβολές της ακουστικής πίεσης με αποτέλεσμα να πάλλεται. Εξαιτίας του κενού μεταξύ του διαφράγματος και του ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού το οποίο βρίσκεται στην πλευρά του transistor πόλωσης (JFET ή MOSFET), εμφανίζεται ορισμένη χωρητικότητα η οποία συνεχώς μεταβάλλεται. Η ύπαρξη του transistor εξυπηρετεί στην προενίσχυση του σήματος ώστε να φέρει μετρήσιμη στάθμη τάσης στην έξοδο η οποία, συνήθως, υπολογίζεται πέριξ 1 - 100 mVolts.



Εικόνα 3.7 : Σύνθεση του μικροφώνου τύπου ECM³¹

Το κυκλωματικό διάγραμμα το οποίο συναντάται σε φύλλαδια κατασκευαστών αναφέρεται σε μια αντίσταση πόλωσης, δηλαδή μια pullup αντίσταση συνδεμένη από το ένα άκρο του μικροφώνου έως την τροφοδοσία. Η χρήση της είναι σημαντική προκειμένου να πολωθεί το transistor στο εσωτερικό του μικροφώνου. Σε περίπτωση που αυτό παραλειφθεί να γίνει, το transistor θα βρίσκεται σε αποκοπή και τελικά δεν θα εμφανίζεται ακουστικό σήμα στην έξοδο.

³¹ Rhijn A. (2003). *Integrated Circuits for High Performance Electret Microphones*, USA, σελ.2



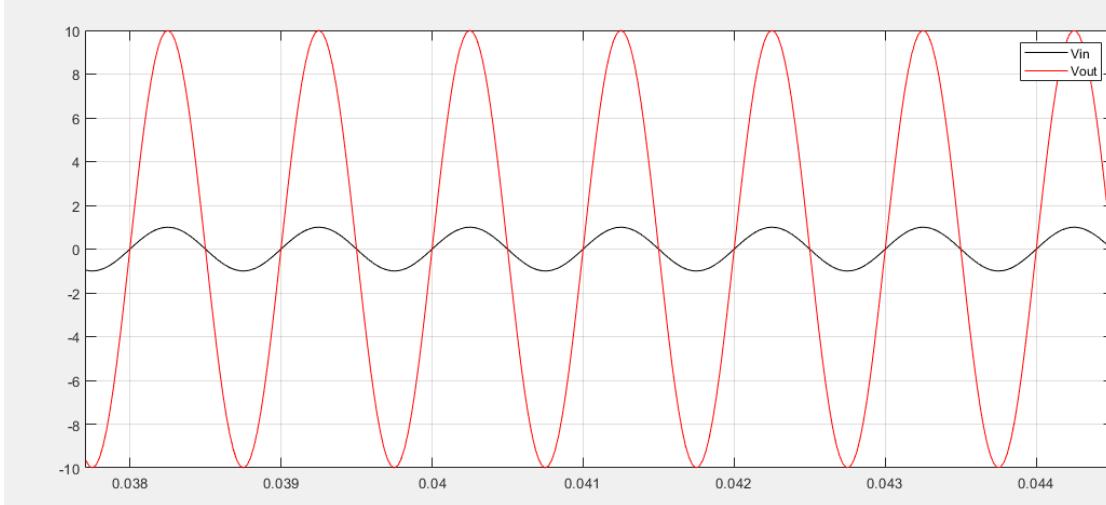
Εικόνα 3.8 : Κυκλωματικό ισοδύναμο της πόλωσης του μικροφώνου τύπου ECM

Τυπικά, οι κατασκευαστές αναφέρονται σε μια ονομαστική τιμή τάσης τροφοδοσίας και αντίστασης στο φυλλάδιο του μικροφώνου όπου επιτυγχάνεται ένα ρεύμα πόλωσης της τάξης των 0.5 mA. Εάν θεωρηθεί πως η ονομαστική τάση ισούται με Vs, τότε η εφαρμογή αυτή επεκτείνεται και σε άλλες τιμές τάσης πόλωσης με διαφορετική τιμή αντίστασης η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$R = \frac{V_{cc} - V_s}{0.5 \text{ mA}}$$

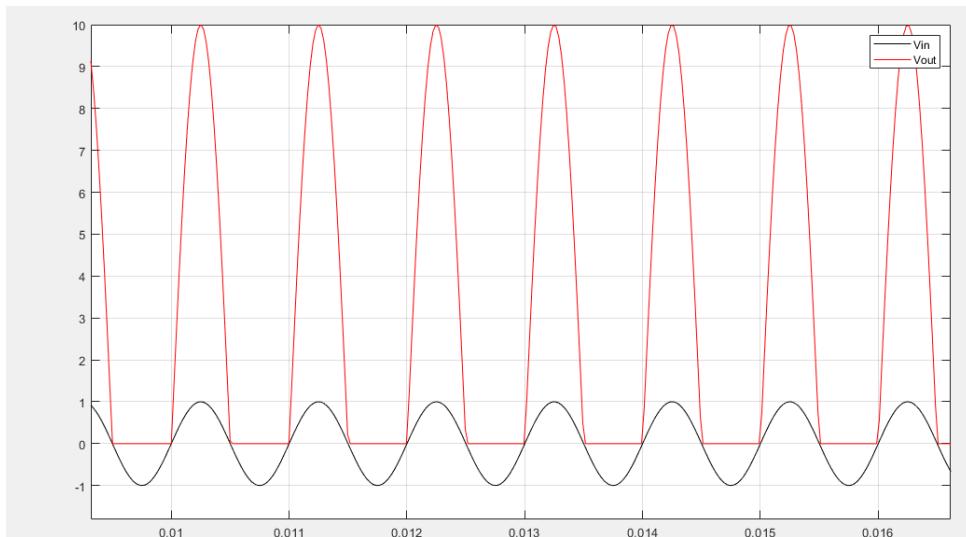
Το ηλεκτρικό σήμα, βέβαια, ακόμη και μετά την προενίσχυση στο εσωτερικό του μικροφώνου, δεν φέρει αρκετή ισχύ προκειμένου να οδηγήσει κάποια έξοδο. Επιπλέον, για την περίπτωση της παρούσας εργασίας, θα πρέπει να δεχθεί επεξεργασία και επιπλέον ενίσχυση. Η ενίσχυση είναι ικανή, εάν είναι αρκετά μεγάλη, να οδηγήσει το σήμα σε τάσεις μερικών Volts. Εάν η τροφοδοσία του συστήματος φέρει μεγάλο εύρος σε σχέση με τη γείωση, το ακουστικό σήμα θα μπορέσει να υπάρξει αναλλοίωτο αλλά ενισχυμένο. Ωστόσο, επειδή η τάση στην οποία παρέχεται ισχύς συνηθίζεται να είναι μικρότερη για λόγους χαμηλότερης κατανάλωσης, ένα υπερβολικά ενισχυμένο ακουστικό σήμα πιθανόν να ψαλιδίζεται (clipping) στα άκρα αποκτώντας την τιμή της μέγιστης επιτρεπτής τάσης από το σύστημα, δηλαδή αυτή της τροφοδοσίας. Ο ψαλιδισμός του σήματος αλλοιώνει το σήμα της πληροφορίας και προσθέτει επιπλέον θόρυβο. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό θα πρέπει το σήμα να πολωθεί σε μια dc τάση, ιδανικά στο μισό εύρος της τροφοδοσίας, προκειμένου να υπάρχουν κατάλληλα περιθώρια ενίσχυσης ενώ παράλληλα το κέρδος δεν υπερβαίνει την οριακή τιμή που οδηγεί σε ψαλιδισμό.

Για να γίνει αντιληπτή η σημασία της ενδιάμεσης τάσης πόλωσης των ακουστικών σημάτων, γίνεται η ακόλουθη εξομοίωση. Στην περίπτωση που η τροφοδοσία φέρει συμμετρικές θετικές και αρνητικές τιμές, η στάθμη πόλωσης είναι αυτή των 0V. Σε κανονικές συνθήκες ενίσχυσης ενός τόνου στα 1000 Hz, το σήμα λαμβάνει την μορφή



Εικόνα 3.9 : Τυπική ενίσχυση τόνου

Ωστόσο, εάν δεν χρησιμοποιηθεί αρνητική τάση στη τροφοδοσία, όπως στην παρούσα εφαρμογή, η ενίσχυση λαμβάνει την παρακάτω μορφή :

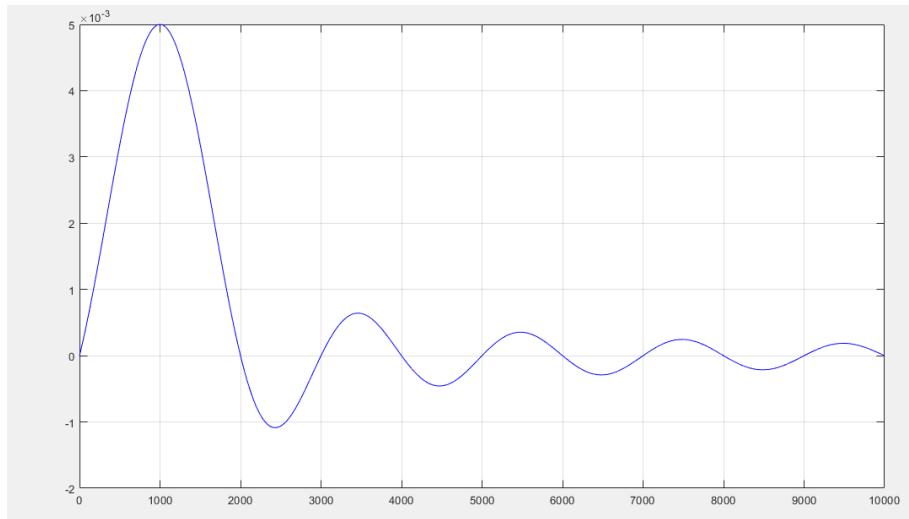


Εικόνα 3.10 : Ενίσχυση τόνου χωρίς αρνητικές τιμές τάσης τροφοδότησης

Το ενισχυμένο σήμα φαίνεται πως διατηρεί την περιοδικότητά του, δηλαδή φέρει την ίδια πληροφορία όπως και πριν, όμως έχει διαφορετική μορφή στο χρόνο. Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier στο παραπάνω σήμα προκύπτει η έκφραση :

$$F(\omega) = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} A \cos(\omega_0 t) e^{-j\omega t} dt = \operatorname{Re} \left\{ \int_0^{\frac{T_0}{2}} A e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt \right\} = \frac{A \sin\left(\frac{(\omega_0 - \omega)T_0}{2}\right)}{\omega_0 - \omega}$$

Το φάσμα του νέου σήματος, δηλαδή, έχει την μορφή :



Εικόνα 3.11 : Φάσμα ψαλιδισμένου σήματος

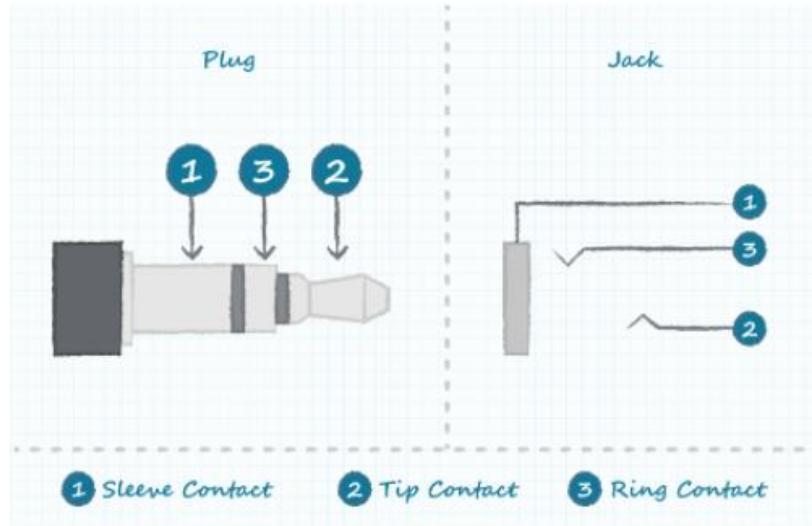
Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, η χρήσιμη πληροφορία παραμένει γύρω από τη συχνότητα των 1000 Hz, ωστόσο εμφανίζεται περιεχόμενο και σε ανώτερες αρμονικές. Αυτό εμφανίζεται στο συνολικό σήμα ως προστιθέμενος θόρυβος κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Έτσι, με την χρήση πόλωσης, το ηλεκτρικό ακουστικό σήμα μπορεί να ανυψωθεί στην ενδιάμεση τάση του ενρους τροφοδότησης αντιμετωπίζοντας το παραπάνω φαινόμενο διότι διατηρούνται τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές μεταβολές του σήματος κατά την ενίσχυση.

3.4 Ακουστική έξοδος

Με το πέρας της αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας, τα ακουστικά σήματα οδηγούνται σε μια ακουστική έξοδο. Η έξοδος αυτή εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ως ακουστική έξοδος αναφέρεται η συσκευή η οποία λαμβάνει το ηλεκτρικό σήμα και αναπαράγει ηχητικά κύματα, όπως για παράδειγμα τα ηχεία. Στην συσκευή του ακουστικού βαρηκοΐας που αναπτύσσεται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, τα ακουστικά σήματα διαδίδονται ενσύρματα με τη χρήση απλών headphones όπως αυτά τα οποία συνδέονται σε κινητά τηλέφωνα.

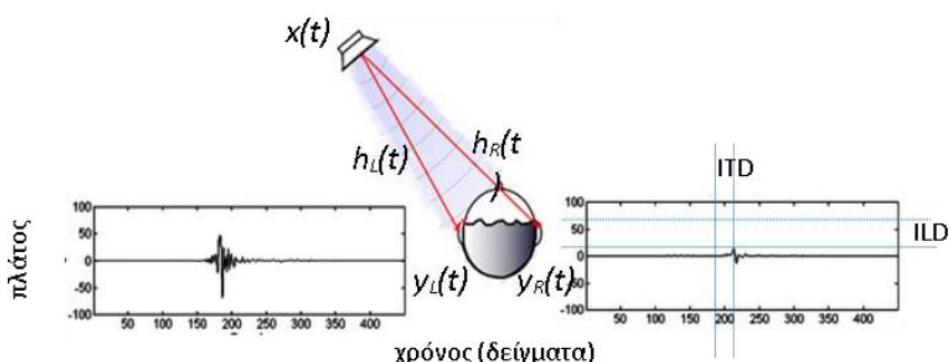
Τα ακουστικά αυτά φέρουν εμπέδηση μεταξύ 20 – 40 Ohms, δηλαδή παράγουν ένα σχετικά ικανοποιητικό ήχο στην έξοδο. Η σύνδεση με αυτά επιτυγχάνεται με τη χρήση βύσματος audio jack. Το audio jack συνήθως φέρει τον βασικό σύνδεσμο (sleeve contact), την αιχμή (tip contact) και την επαφή δακτυλίου (ring contact)³².

³² URL : <https://www.cuidevices.com/blog/understanding-audio-jack-switches-and-schematics>



Εικόνα 3.12: Συνδεσμολογία σε audio jack

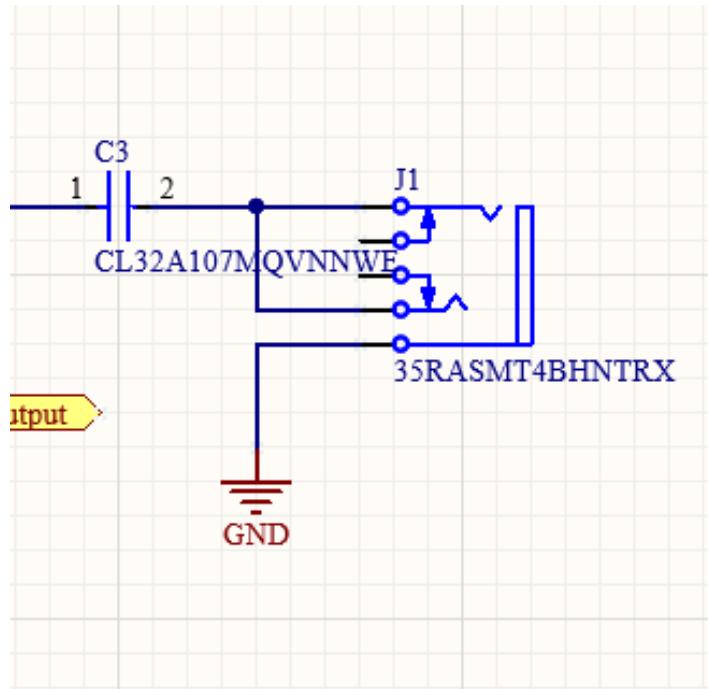
Ο βασικός σύνδεσμος αποτελεί την αναφορά του ακουστικού σήματος και για το λόγο αυτό εκεί συνδέεται η στάθμη πόλωσής του ή η γείωση. Οι επαφές 2 και 3 της εικόνας 3.12 συνδέονται με το αριστερό και δεξί κανάλι του ακουστικού το οποίο συνδέεται στο audio jack. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα μικρόφωνο το οποίο καταγράφει ήχο από όλες τις κατευθύνσεις του χώρου και, συνεπώς, θα πρέπει να αναπαραχθεί ομοίως και στα δύο κανάλια του ακουστικού. Σε πραγματικές εφαρμογές, για λόγους αντικειμενικής αίσθησης του χώρου, η γωνία με την οποία προσπίπτουν τα ηχητικά κύματα στο μικρόφωνο θα πρέπει να καθορίζει την ένταση του ήχου στα δύο κανάλια εξόδου. Για παράδειγμα ένα άτομο το οποίο ακούει ήχους από τα αριστερά, σε φυσιολογικές συνθήκες λαμβάνει τα ίδια ακουστικά σήματα και στο δεξί αυτί με λιγότερη ένταση. Αυτό είναι λογικό να συμβεί λόγω σκεδάσεων ή ανακλάσεων του ήχου σε επιφάνειες και λοιπά εμπόδια που υπάρχουν στην διαδρομή μετάδοσής του προς το αυτί που βρίσκεται πιο μακριά από την πηγή ηχητικών κυμάτων³³.



Εικόνα 3.13 : Η γωνία λήψης ηχητικών κυμάτων επηρεάζει την ένταση με την οποία καταφθάνει σε κάθε αυτί το ίδιο ακουστικό σήμα

³³ Μουρτζόπουλος Γ., (2021). Ηλεκτροακουστική – 1. Ακουστική, ακοή, τεχνολογία ήχου, σελ.17-18

Στο σχηματικό του κυκλώματος της τελικής συσκευής τοποθετείται ένας coupling πυκνωτής ο οποίος απομονώνει το εναλλασσόμενο σήμα από την dc συνιστώσα πόλωσης. Έτσι το ακουστικό σήμα οδηγείται στο audio jack όπου οι επαφές tip και ring είναι βραχυκυκλωμένες προκειμένου να φθάσει ο ίδιος ήχος στα κανάλια. Η επαφή sleeve συνδέεται με την γείωση όπου υπάρχει χαμηλή κυμάτωση και μειώνεται αρκετά η στάθμη θορύβου.



Εικόνα 3.14 : Συνδεσμολογία ακουστικής εξόδου στο τελικό κυκλωματικό διάγραμμα

Με το τέλος αυτού του κεφαλαίου γίνεται κατανοητός ο τρόπος διαχείρησης και επεξεργασίας των ακουστικών σημάτων, μπορεί να επιλεχθεί μικρόφωνο το οποίο ακολουθεί τις προδιαγραφές του συστήματος του ακουστικού βαρηκοΐας και είναι σαφής η συνδεσμολογία που διέπει το audio jack, το οποίο συνδέεται με το αρσενικό βύσμα που βρίσκεται στο καλώδιο των ακουστικών τύπου headphones.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση του κυκλώματος

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής ανάλυση του κυκλώματος του ακουστικού βαρηκοΐας σε στάδια και εκτελούνται προσομοιώσεις για την επαλήθευση της λειτουργίας τους (verification stage). Η ανάλυση των λειτουργιών του συνολικού συστήματος είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και για το λόγο αυτό θα πρέπει να δομηθεί κατάλληλα σε υποσυστήματα τα οποία εκτελούν μεμονωμένες επεξεργασίες. Η κατάτμηση αυτή είναι εφικτή μετά τον προσδιορισμό των επιθυμητών διεργασιών της συσκευής.

4.1 Επιθυμητές διεργασίες του ενσωματωμένου συστήματος

Η βασική λειτουργία της συσκευής στοχεύει στην ενίσχυση του ήχου σε κατάλληλη στάθμη ανά συχνοτική ζώνη προκειμένου να εφαρμοσθεί η τεχνική Compression Gain. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό να συμπεριληφθούν τα παρακάτω υποσυστήματα στη τελική συσκευή :

1. Κύκλωμα κατάλληλης πόλωσης μικροφώνου για αποφυγή ψαλιδισμού
2. Κύκλωμα προενίσχυσης της στάθμης του μικροφώνου σύμφωνα με την ευαισθησία που σημειώνεται στο φυλλάδιο των κατασκευαστών.
3. Κυκλώματα αναλογικών ζωνοπερατών φίλτρων τα οποία διαχωρίζουν τις κρίσιμες συχνοτικές ζώνες.
4. Κυκλώματα κατάλληλης ενίσχυσης ανά συχνοτική ζώνη με την χρήση PGAs και έλεγχο από τον μικροελεγκτή.
5. Κύκλωμα ανακατασκευής του τελικού σήματος και οδήγησή του στην ακουστική έξοδο.
6. Κύκλωμα ρύθμισης της λειτουργίας του μικροελεγκτή, καθώς είναι επιθυμητό να υπάρχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος και να επεκταθεί η ζωή της μπαταρίας.

Οι παραπάνω λειτουργίες αφορούν τα ενσωματωμένα συστήματα της συσκευής (Hardware). Αντίστοιχες προδιαγραφές έχουν ορισθεί και για το λογισμικό το οποίο εκτελεί ο μικροελεγκτής (Firmware) :

1. Ανάγνωση της αναλογικής θύρας όπου δειγματοληπτείται το τελικά ενισχυμένο σήμα ήχου.
2. Εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας σήματος και zero crossing μοντέλου για την εύρεση της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος εντός ορισμένου χρονικού πλαισίου.
3. Χρήση της θεμελιώδους συχνότητας για ταυτοποίηση του αναλογικού φίλτρου το οποίο διατηρεί το περισσότερο φασματικό περιεχόμενο. Έτσι θα είναι εφικτό να προγραμματισθεί σωστά μόνο ο PGA του συγκεκριμένου κλάδου ενώ οι υπόλοιποι διατηρούν τη προηγούμενη ρύθμισή τους.
4. Ανάπτυξη λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης του μικροελεγκτή (Power Save Mode – PSM) για τα χρονικά διαστήματα όπου η στάθμη ήχου

παραμένει σχετικά χαμηλή και δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές, όπως κατά την διάρκεια τυχόν συνομιλίας.

5. Χρήση σήματος interrupt, το οποίο παράγεται στο ενσωματωμένο κύκλωμα, το οποίο αφυπνίζει τον μικροελεγκτή και επαναφέρει την κατάσταση ανίχνευσης πιθανής μελλοντικής λειτουργίας σε PSM. Η αφύπνιση γίνεται σχεδόν ακαριαία ώστε να μην υπάρχουν προβήματα διακοπτόμενης ακρόασης ήχου στην έξοδο.

Τα στάδια της προσομοίωσης τα οποία ακολουθούν στη συνέχεια επαληθεύονται τις παραπάνω διεργασίες. Με το τέλος του simulation verification test, μπορεί να γίνει επιλογή των ηλεκτρονικών συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν, γίνεται έλεγχος σε δοκιμαστική πλακέτα και, τελικά, σχεδιάζεται το πρωτότυπο κύκλωμα σε PCB.

4.2 Προσομοίωση του συστήματος

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύονται οι επιμέρους λειτουργίες του γενικευμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος σε διακριτά υποσυστήματα σύμφωνα με τη σειρά με την οποία δώθηκαν οι προδιαγραφές. Η επαλήθευση των λειτουργιών αυτών γίνεται με τη χρήση του λογισμικού εξομοίωσης κυκλωμάτων LTspice.

4.2.1 Σχεδιασμός πόλωσης

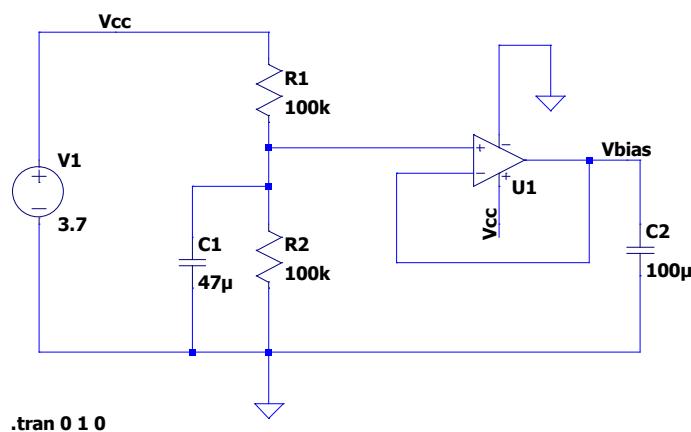
Η τάση πόλωσης είναι απαραίτητη για τα ακουστικά σήματα όπως αποδείχθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.3 καθώς αποφεύγεται ο ψαλιδισμός. Το κύκλωμα με το οποίο υλοποιείται βασίζεται στο διαιρέτη τάσεως. Η τάση πόλωσης οδηγεί αρκετά φορτία στη συνέχεια και θα πρέπει να παραμείνει σε σταθερή στάθμη ανεξάρτητα της ισοδύναμης εμπέδησης εξόδου. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί ένας τελεστικός ενισχυτής συνδεμένος ως buffer τάσης ώστε να γίνεται σωστό impedance matching εισόδου – εξόδου. Η χρήση του πυκνωτή στην έξοδο είναι επίσης καθοριστική για τη μείωση τυχόν κυματώσεων γύρω από την dc τροφοδοσία. Ομοίως, χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής και στην είσοδο με τιμή 47 uF. Εάν παραληφθεί, οι κυματώσεις που υπάρχουν στην γραμμή τροφοδοσίας Vcc είναι πιθανό να οδηγηθούν έως την έξοδο μέσω του τελεστικού ενισχυτή. Στη παρούσα του μορφή, το κύκλωμα διαμορφώνει ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής :

$$f = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1 R_2 C_1} = 0.06 \text{ Hz.}$$

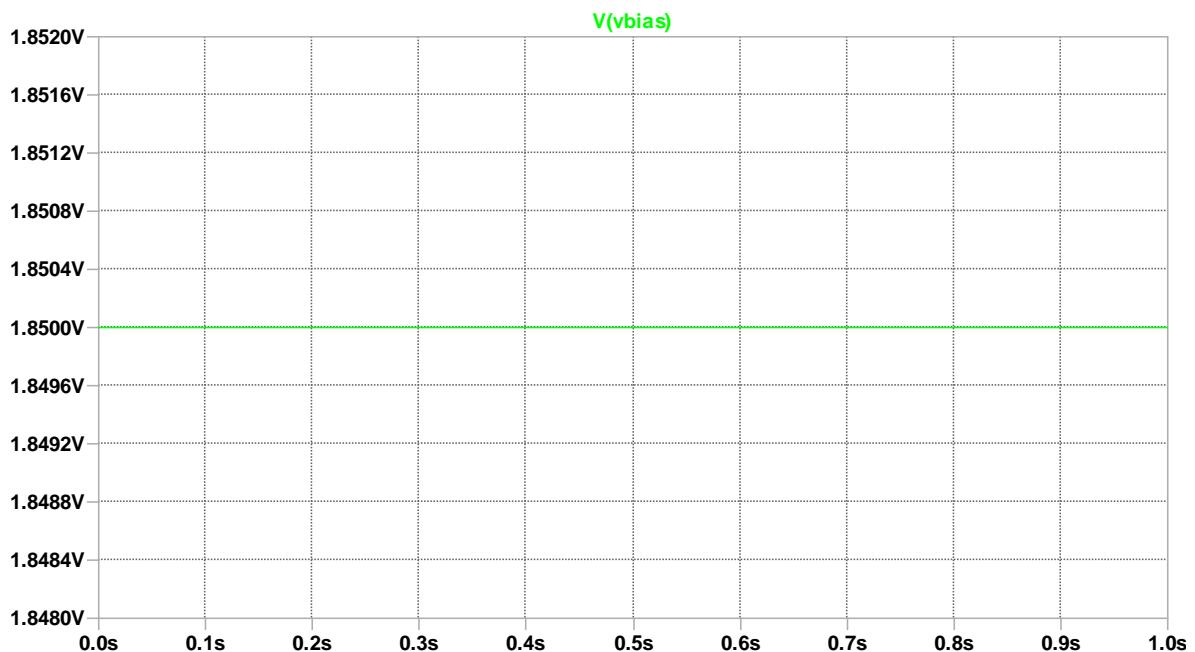
Επομένως, υπάρχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια στην επιλογή της dc συνιστώσας και μόνον.

Η επιλογή των τιμών αντιστάσεων είναι τυπική προκειμένου να διαιρείται η τάση στο μισό της τροφοδοσίας ενώ παράλληλα καταναλώνεται το ελάχιστο δυνατό ρεύμα. Δεδομένου πως το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή είναι μηδενικό, η κατανάλωση στο κλάδο των αντιστάσεων υπολογίζεται ως :

$$I_{bias} = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} = 18.5 \mu A$$



Εικόνα 4.1 : Κύκλωμα πόλωσης



Εικόνα 4.2 : Η τάση πόλωσης διατηρείται σταθερή σε σχέση με το χρόνο χωρίς κυματώσεις

4.2.2 Σχεδιασμός αναλογικού συγκριτή

Η χρήση αναλογικού συγκριτή είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτευχθεί σωστή ανίχνευση απότομων μεταβολών στην τάση του ακουστικού σήματος εξόδου. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης λειτουργεί ως σήμα αφύπνισης του μικροελεγκτή από την κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Έτσι, σε χώρους όπου η στάθμη ήχου είναι αρκετά χαμηλή και δεν απαιτείται χρήση του μικροελεγκτή, ο τελευταίος οδηγείται σε PSM λειτουργία αναμένοντας τυχόν μεταβολές της ηχοστάθμης. Κατά την λειτουργία αυτή, απενεργοποιούνται οι αναλογικές θύρες και το κύκλωμα του ADC μετατροπέα. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ως σήμα ENABLE ένα ψηφιακό σήμα εισόδου το οποίο έχει προκαθοριστεί να αφυπνίζει το μικροελεγκτή είτε σε υψηλά είτε σε χαμηλά δυναμικά.

Για το κύκλωμα αυτό, αξιοποιείται η λογική του envelope detector. Βασική προϋπόθεση είναι να χρησιμοποιηθεί δίοδος με αρκετά γρήγορους χρόνους ON/OFF. Με το τρόπο αυτό, υλοποιείται ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής περίπου ίση με :

$$f \cong \frac{1}{2\pi R_d C}$$

Η τάση που παράγεται στον αρνητικό ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή, συγκρίνεται με την αρχική τάση στην είσοδο. Το χαμηλοπερατό φίλτρο καθυστερεί το σήμα εισόδου έτσι ώστε να γίνεται εφικτή η σύγκριση. Μέσω του αντίστοιχου διακριτού συστήματος γίνεται κατανοητή η παραπάνω λειτουργία. Το φίλτρο φέρει συνάρτηση μεταφοράς :

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

Επομένως, το αντίστοιχο ψηφιακό σύστημα υπολογίζεται :

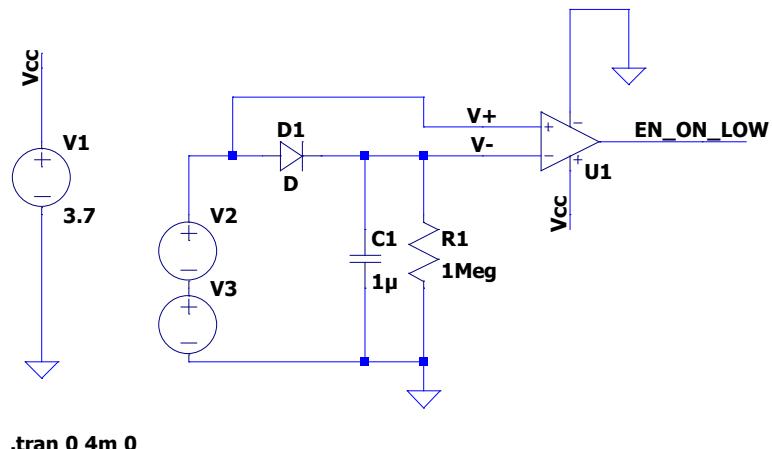
$$\begin{aligned} G(z) &= (1 - z^{-1})Z \left\{ S_T \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \right\} \right\} \\ &= (1 - z^{-1})Z \left\{ S_T \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{1}{s^2} \right\} \right\} \right\} = (1 - z^{-1})Z \{ S_T \{ t \} \} \\ &= (1 - z^{-1})Z \{ nT \} = T(1 - z^{-1})Z \{ n \} = \frac{T(1 - z^{-1})z}{(z - 1)^2} => \\ &\quad \mathbf{G(z)} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{z - 1}} \end{aligned}$$

Η σταθερά Τ είναι η συχνότητα δειγματοληψίας για τα διακριτά συστήματα αλλά στη προκειμένη περίπτωση αποτελεί το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αναλογικών συγκρίσεων. Η συνάρτηση μεταφοράς που υπολογίστηκε συνδέει την είσοδο του κυκλώματος με την έξοδο η οποία παράγεται στον αρνητικό ακροδέκτη του συγκριτή. Τελικά, η εξίσωση διαφορών, δύο διαδοχικών δειγμάτων στο χρόνο, είναι :

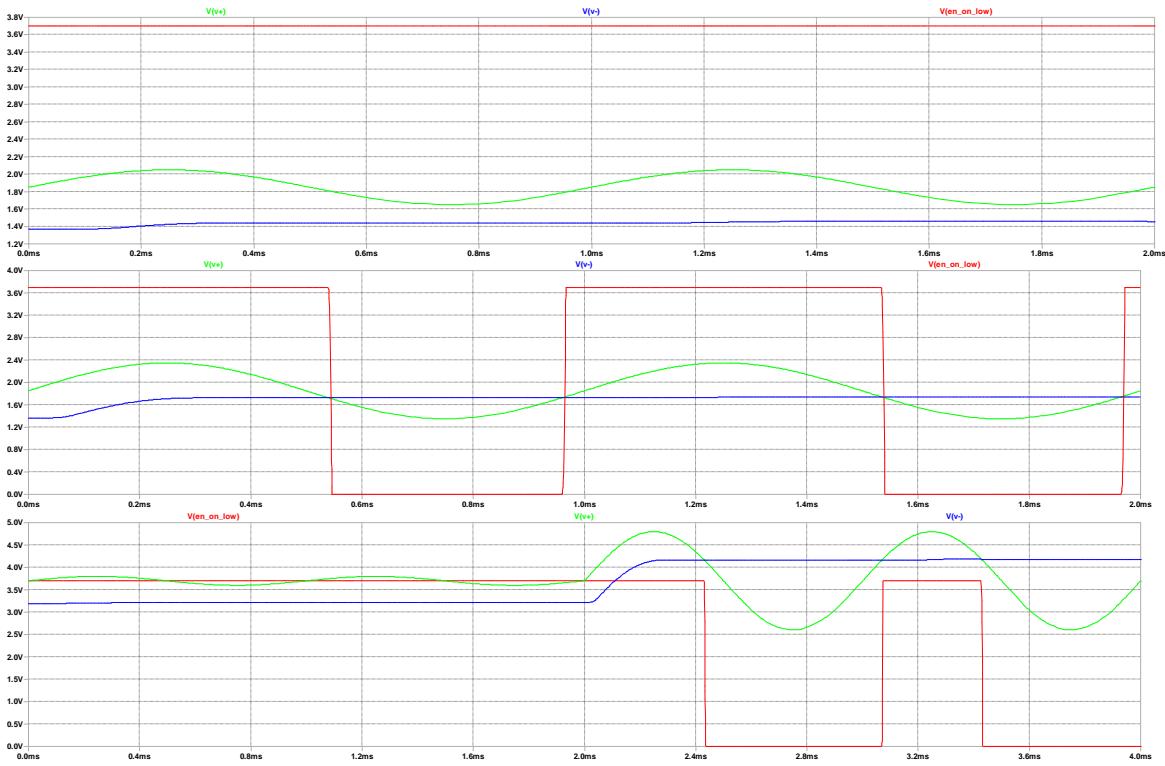
$$V_-(n) = V_-(n-1) + TV_{in}(n-1) \text{ and } V_{in}(n) = V_+(n)$$

Έτσι, η σύγκριση γίνεται μεταξύ των σημάτων V_- και V_+ . Στην περίπτωση που το δεύτερο σήμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το πρώτο, η έξοδος του κυκλώματος είναι υψηλό δυναμικό (λογικό HIGH) ενώ σε αντίθετη περίπτωση η έξοδος είναι χαμηλό δυναμικό (λογικό LOW). Οι μεταβολές χαμηλού δυναμικού αφυπνίζουν τον μικροελεγκτή στη παρούσα εφαρμογή.

Στη προσομοίωση δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές πλάτους σε ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου στη συγχύτητα των 1000 Hz. Αρχικά φαίνεται πως για μεταβαλλόμενο πλάτος 0.4 V peak-peak δεν υπάρχει σήμα αφύπνισης το οποίο είναι επιθυμητό διότι σημαίνει πως η ηχοστάθμη είναι σχετικά χαμηλή και η τάση διατηρείται σταθερή γύρω από την τάση πόλωσης. Στην συνέχεια, για πλάτος 1 V peak- peak, παρατηρείται πως εμφανίζεται παλμός στην έξοδο, δηλαδή το σήμα enable ενεργοποιεί τον μικροελεγκτή. Το πλάτος της τάσης στο σήμα δεν απαιτείται, ωστόσο, να φέρει μεγάλες τιμές καθώς στην εξομοίωση επαληθεύεται η λειτουργία αυτή και για μικρότερο εύρος peak-peak.



Εικόνα 4.3: Κύκλωμα αναλογικού συγκριτή



Εικόνα 4.4 : α) Αρχικά δοκιμάζεται πλάτος 0.4 V peak-peak, ωστόσο η στάθμη εξόδου παραμένει σταθερή στο υψηλό δύναμικό, β) Στη συνέχεια εφαρμόζεται πλάτος 1V peak-peak στην είσοδο, με αποτέλεσμα να παραχθούν παλμοί ενεργοποίησης του μικροελεγκτή, γ) Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται μια περίπτωση λειτουργίας του κυκλώματος κατά την εναλλαγή ηχοστάθμης στο χώρο.

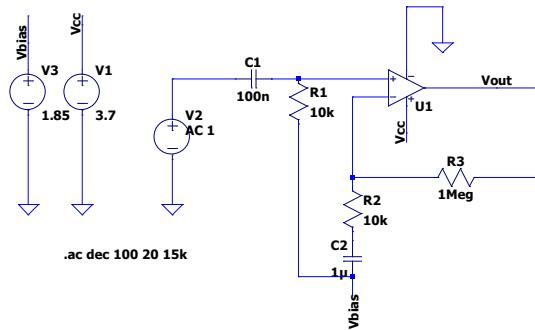
Στην εικόνα 4.4 φαίνονται τα γραφήματα των εξομοιώσεων που επαληθεύουν την διαδικασία σύγκρισης και παραγωγής παλμών στην έξοδο. Στο τελευταίο γράφημα προσομοιώνεται η περίπτωση όπου η ηχοστάθμη σε ένα χώρο αυξάνεται μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται οι μεταβολές και να παράγονται παλμοί αφύπνισης.

4.2.3 Προενίσχυση ακουστικών σημάτων

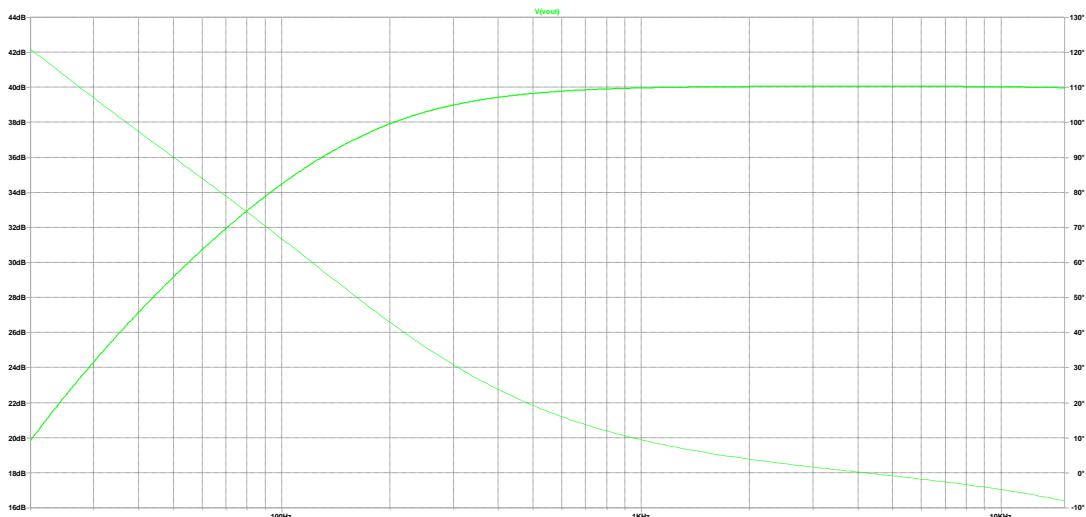
Δεδομένου του χαμηλού εύρους τιμών τάσης του ακουστικού σήματος, είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί μια αρχική ενίσχυση σε αυτό. Κατά το τρόπο αυτό, τα αναλογικά δείγματα πληθαίνουν σημαντικά και γίνεται ακόμη πιο ευδιάκριτο το σήμα από το υπόλοιπο σύστημα, διότι οι μεταβολές της τάσης, εξαιτίας της ακουστικής πίεσης που ασκείται στο μικρόφωνο, γίνονται αντιληπτές με τη πάροδο του χρόνου.

Το κύκλωμα της προενίσχυσης βασίζεται στην τοπολογία θετικής ανάδρασης των τελεστικών ενισχυτών. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη απομόνωση της εισόδου και της εξόδου με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται υπερβολικά το noise floor. Όπως φαίνεται και στην εξομοιώση που ακολουθεί, χρησιμοποιείται η τάση αναφοράς V_{bias} προκειμένου η ενίσχυση να γίνει γύρω από αυτό το σημείο λειτουργίας. Ακολουθούν τα

αποτελέσματα της ασανάλυσης όπου φαίνεται το διάγραμμα Bode (σε μέτρο και φάση) της συνάρτησης μεταφοράς του κυκλώματος προενίσχυσης :



Εικόνα 4.5 : Κύκλωμα προενίσχυσης ακουστικού σήματος



Εικόνα 4.6 : Διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς εισόδου-εξόδου του κυκλώματος

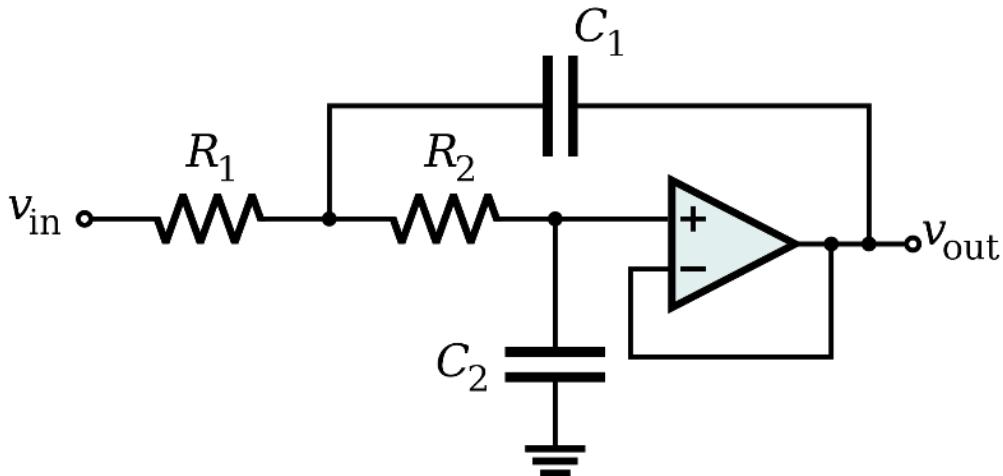
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.6, το κέρδος αποκτάει σταθερή τιμή στα 40 dB (δηλαδή είναι ίσο με 100 μονάδες) από την συχνότητα αποκοπής 150 Hz και πάνω, διότι χρησιμοποιείται χαμηλοπερατό φίλτρο το οποίο απομονώνει την dc συνιστώσα από την ac στο ακουστικό σήμα.

4.2.4 Τράπεζα φίλτρων

Τα αναλογικά φίλτρα, όπως εξηγήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι τα κυκλώματα τα οποία θα διακρίνουν τις κρίσιμες συχνοτικές ζώνες στο φάσμα του

ακουστικού σήματος και με αυτό το τρόπο θα επιτευχθεί η σωστή εφαρμογή του αλγόριθμου Compression Gain. Φέρουν το πλεονέκτημα πως έχουν άμεση ,σχεδόν, χρονική απόκριση, ωστόσο δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια στις συχνότητες αποκοπής. Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα θα πρέπει να σχεδιαστούν φίλτρα αρκετά μεγάλης τάξης κάτι το οποίο δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, διότι αυξάνεται η πολυπλοκότητα του κυκλώματος και ο όγκος του λόγω χρήσης περισσότερων ηλεκτρονικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό, σχεδιάσθηκαν ζωνοπερατά φίλτρα $4^{\text{ης}}$ τάξης ως συνδυασμός υψηλοπερατών και χαμηλοπερατών φίλτρων $2^{\text{ης}}$ τάξης.

Τα κυκλώματα τα οποία σχεδιάσθηκαν φέρουν την τοπολογία Sallen-Key³⁴ διότι συνιστώνται στην περίπτωση οδήγησης ακουστικών σημάτων. Ένα χαμηλοπερατό φίλτρο Sallen-Key φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί :



Εικόνα 4.7 : Χαμηλοπερατό φίλτρο Sallen-Key τοπολογίας

Η συνάρτηση μεταφοράς για μοναδιαίο κέρδος ενίσχυσης υπολογίζεται :

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2as + \omega_0^2}$$

Όπου :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, a = \frac{1}{C_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \text{ και } Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1 (R_1 + R_2)}$$

Επειδή η πολυπλοκότητα των υπολογισμών είναι αρκετά αυξημένη εξαιτίας των ηλεκτρονικών υλικών, ακολουθείται συχνά η ακόλουθη τακτική επίλυσης του προβλήματος βάσει ορισμένων προδιαγραφών :

$$R_1 = mR, R_2 = \frac{R}{m}, C_1 = nC, C_2 = \frac{C}{n}$$

³⁴ Texas Instruments, (2002). *Analysis of the Sallen-Key Architecture*

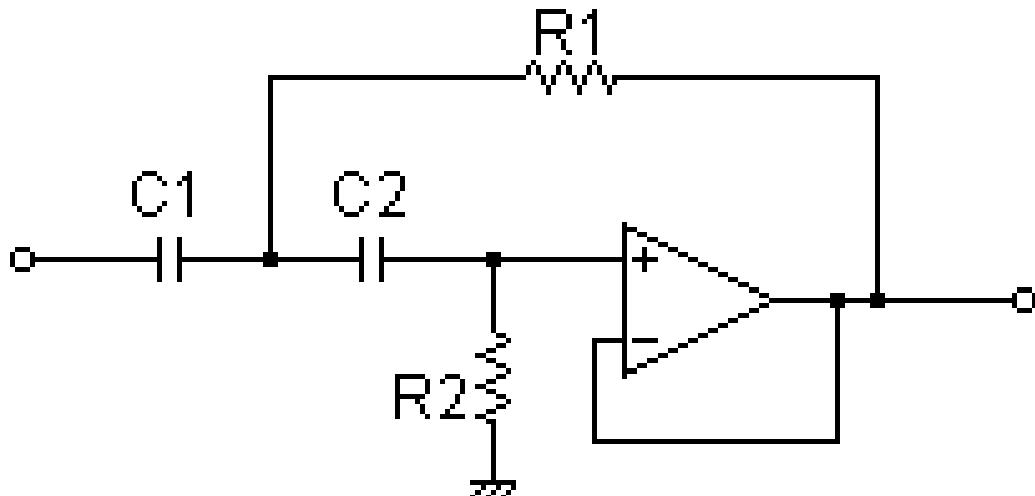
Έτσι, τα μεγέθη της συχνότητας αποκοπής ω_0 και του συντελεστή Q λαμβάνουν τις τιμές :

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, Q = \frac{mn}{m^2 + 1}$$

Εάν, για παράδειγμα, είναι επιθυμητό να σχεδιαστεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο Butterworth 2^{ης} τάξης με συχνότητα αποκοπής στα 500 Hz, γνωρίζοντας πως φέρει επίπεδη συνάρτηση μεταφοράς για Q ίσο με 0.707, οι προδιαγραφές του συστήματος είναι :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 3141.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Με αντίστοιχο τρόπο, σχεδιάζονται τα υψηπερατά φίλτρα τοπολογίας Sallen-Key :



Εικόνα 4.8 : Υψηπερατό φίλτρο Sallen-Key τοπολογίας

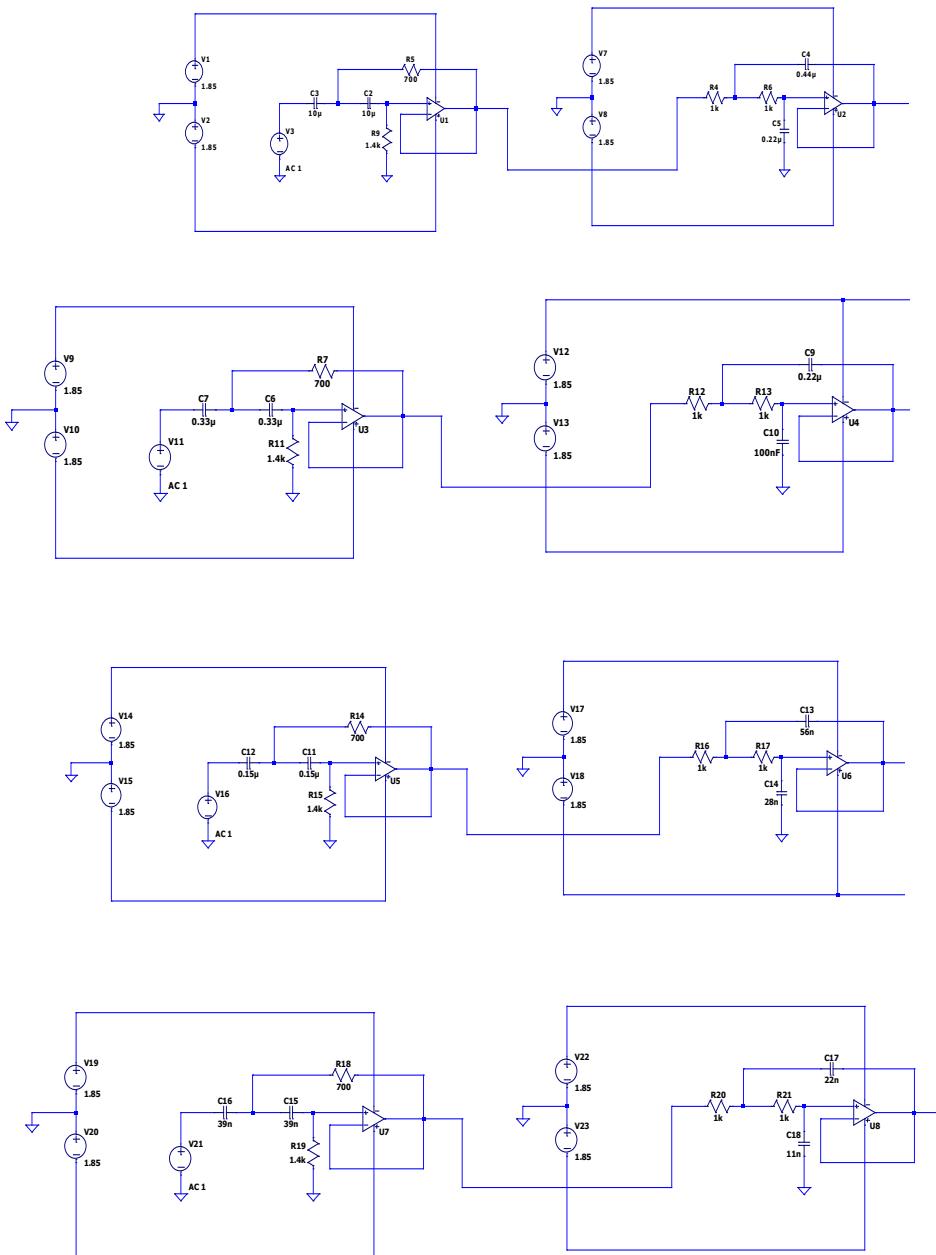
Στα φίλτρα αυτά γίνεται και πάλι η παραδοχή πως τα μεγέθη συσχετίζονται με τις ποσότητες m, n, R και C . Έτσι προκύπτουν η συχνότητα αποκοπής και ο συντελεστής Q :

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, Q = \frac{n}{m(n^2 + 1)}$$

Στη συνέχεια, οι παράμετροι επιλέγονται ίσες με τις τιμές των προδιαγραφών που είναι επιθυμητές για τη λειτουργία του κυκλώματος και τελικά υπολογίζονται οι τιμές των ηλεκτρονικών στοιχείων.

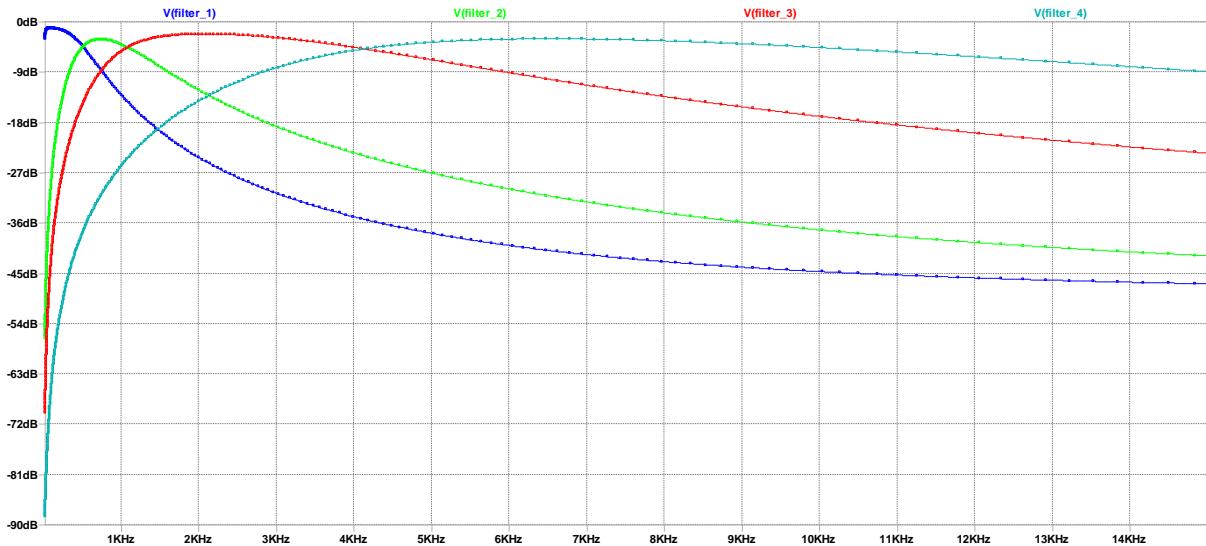
Τα φίλτρα αυτά λειτουργούν, στη τελική συσκευή, σε παραλληλία μεταξύ τους. Με το τρόπο αυτό λαμβάνουν ως είσοδο το ίδιο ακουστικό σήμα και απομονώνουν

πληροφορία η οποία υπάρχει μόνο στο bandwidth που υποστηρίζουν. Στην εξομοίωση που ακολουθεί, έχουν υλοποιηθεί τέσσερα ζωνοπερατά φίλτρα αποτελούμενα από ένα στάδιο υψηπερατού και ένα στάδιο χαμηλοπερατού συνδεμένα σε σειρά μεταξύ τους.



Εικόνα 4.9 : Ζωνοπερατά φίλτρα Sallen-Key στις κρίσιμες συχνοτικές ζώνες : a) 20-500 Hz, β) 500 – 1000 Hz, γ) 1000 – 4000 Hz, δ) 4000 – 10000 Hz

Έτσι, υλοποιήθηκαν τέσσερις επικαλυπτόμενες κρίσιμες ζώνες στο συνολικό εύρος ακουστικών συχνοτήτων:



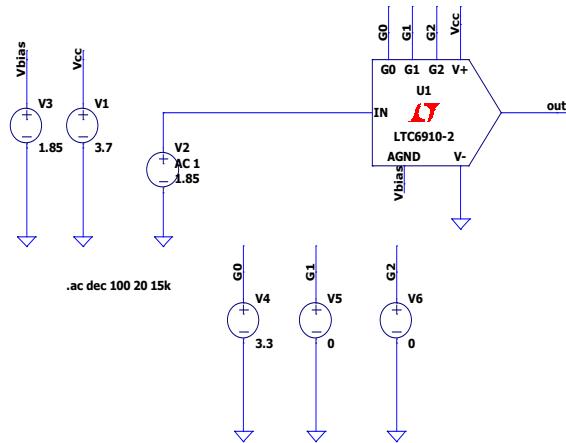
Εικόνα 4.10 : Απόκριση συχνότητας των φίλτρων

Είναι εμφανές πως οι αποκρίσεις των φίλτρων δεν είναι ιδανικές διότι έχουν υλοποιηθεί από αναλογικά κυκλώματα. Ωστόσο, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι αρκετά ικανοποιητικά τα αποτελέσματα.

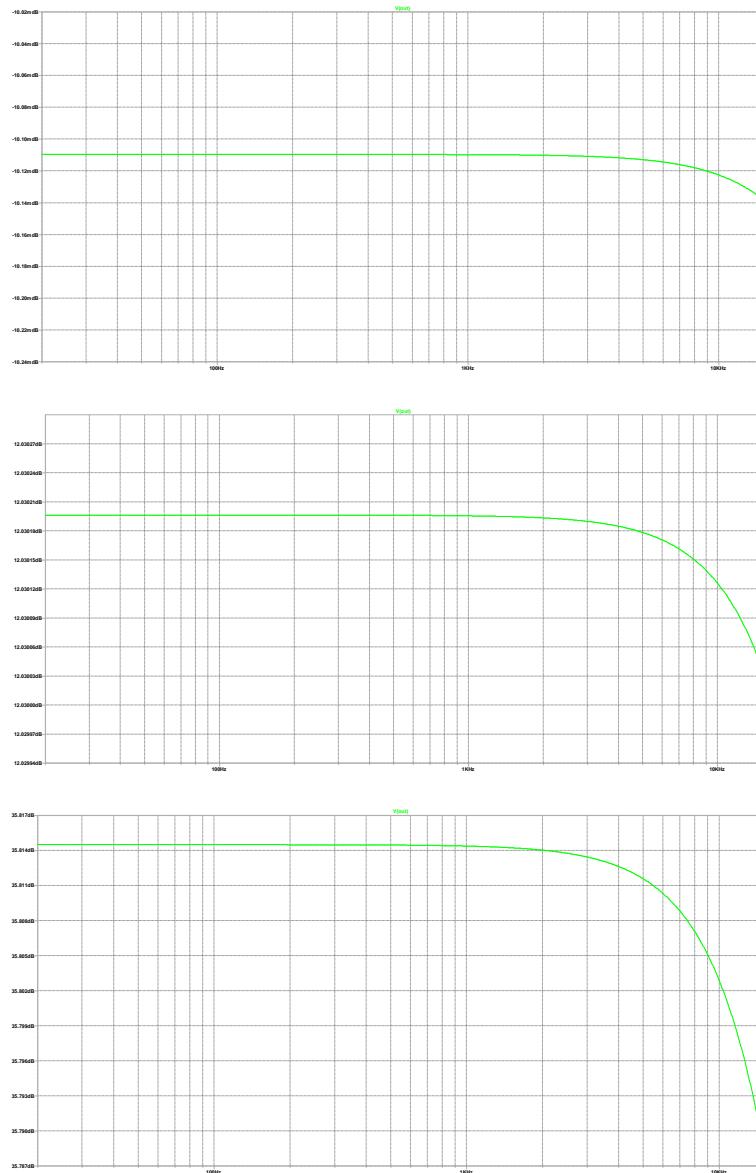
4.2.5 Στάδιο προγραμματιζόμενης αναλογικής ενίσχυσης

Το τελευταίο στάδιο ενίσχυσης πλάτους της αναλογικής εισόδου βασίζεται στη λειτουργία των προγραμματιζόμενων αναλογικών ενισχυτών με χρήση ψηφιακών εισόδων (PGAs). Ο σκοπός τους είναι να ενισχυθούν κατάλληλα τα ακουστικά σήματα σύμφωνα με το ακουόγραμμα του ασθενούς και τη κρίσιμη συχνοτική ζώνη στην οποία εντοπίζεται η πληροφορία. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται συνολικά τέσσερα τέτοια ICs, όπου το καθένα συνδέεται σε σειρά με το κλάδο που δημιουργείται από το φίλτρο που αντιστοιχεί στην κάθε κρίσιμη ζώνη.

Κατά την εξομοίωση χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές τάσης (dc) οι οποίες αντιστοιχούν στις ψηφιακές λογικές στάθμες HIGH (3.3V) και LOW (0V). Το σχηματικό του κυκλώματος της εξομοίωσης φαίνεται στη συνέχεια μαζί με τα αποτελέσματα στην απόκριση συχνότητας για διαφορετικούς συνδυασμούς ψηφιακών εισόδων :



Εικόνα 4.11 : Ψηφιακά προγραμματιζόμενη αναλογική ενίσχυση με το IC LTC6910-2

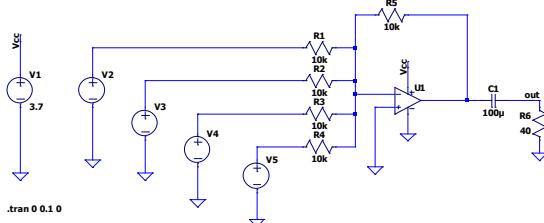


Εικόνα 4.12 : Διαγράμματα ενίσχυσης για ψηφιακή είσοδο : α) 001, β) 011, γ) 111

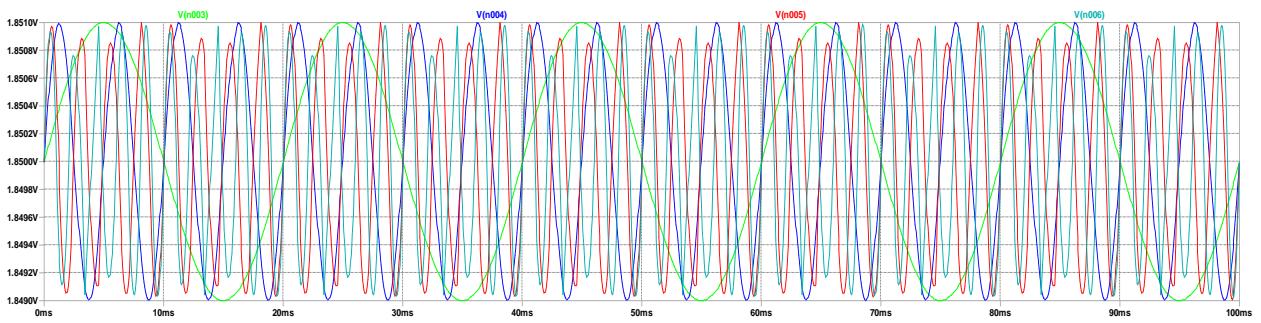
Όπως είναι εμφανές και στην εικόνα 4.12, η ενίσχυση μπορεί να φθάσει έως και τα 35 dB, περίπου, για την κωδικοποίηση 111. Με τη χρήση αυτού του ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι εφικτός ο έλεγχος της στάθμης του ακουστικού σήματος καθώς ενισχύονται επιλεκτικά και δυναμικά οι κρίσιμες συχνοτικές ζώνες στο πέρασμα του χρόνου.

4.2.6 Στάδιο εξόδου και οδήγηση φορτίου συνδεμένο σε audio jack

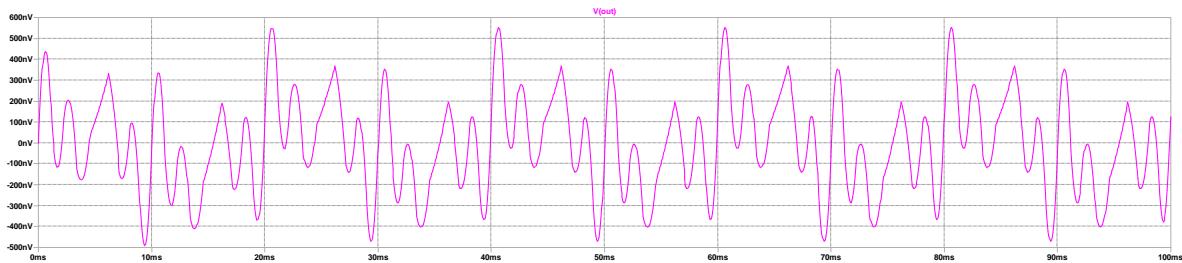
Μετά το πέρας της επεξεργασίας του ακουστικού σήματος ανά συχνοτική ζώνη, το τελικό σήμα εξόδου ανακατασκευάζεται με τη βοήθεια της αναλογικής άθροισης. Είναι σημαντικό να επιλεχθούν αντιστάσεις εισόδου οι οποίες να τηρούν τις προδιαγραφές της μεθόδου impedance matching και, επομένως, θα πρέπει να ισούται με την ονομαστική αντίσταση εξόδου των PGAs. Από το κατασκευαστικό φυλλάδιο φαίνεται πως η τιμή αυτή είναι 10k Ohm. Επιπλέον δεν είναι επιθυμητή περαιτέρω ενίσχυση για να αποφευχθούν φαινόμενα ψαλιδισμού στο σήμα. Έτσι, επιλέγεται αντίσταση αρνητικής ανάδρασης επίσης ίση με 10k Ohm. Τέλος, το audio jack συνδέεται με αναφορά ως προς την γείωση, οπότε θα πρέπει να αφαιρεθεί η dc συνιστώσα πόλωσης στο σήμα εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σχετικά μεγάλο πυκνωτή coupling.



Εικόνα 4.13 : Κύκλωμα αναλογικής άθροισης



Εικόνα 4.14 : Δοκιμαστικά τονικά σήματα εισόδου : a) 50 Hz, β) 200 Hz, γ) 400 Hz, δ) 500 Hz



Εικόνα 4.15 : Τελικό σήμα εξόδου στο σημείο λήψης της θύρας audio jack

Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά και συμβαδίζουν με όσα ειπώθηκαν στην θεωρητική ανάλυση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στην εκτέλεση της εξομοίωσης, το audio jack, στο οποίο συνδέεται το ακουστικό, έχει μοντελοποιηθεί ως μια αντίσταση εξόδου ίση με 40 Ohm , μια τιμή η οποία είναι αρκετά συνηθισμένη για headphones του εμπορίου.

4.3 Συμπεράσματα από την εκτέλεση των εξομοιώσεων

Στο λογισμικό LTspice είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί πληθώρα κυκλωμάτων και να εξαχθούν απαραίτητα γραφήματα και τιμές μεγεθών που εκτιμούν την πραγματική λειτουργία αυτών. Για την υλοποίηση μιας συσκευής, όπως το ακουστικό βαρηκοΐας εν προκειμένω, απαιτείται αρχικά η μελέτη των αποτελεσμάτων εξομοίωσης της λειτουργίας των σχεδιασμένων κυκλωμάτων.

Ο σχεδιασμός γίνεται ιδιαίτερα απλός όταν επιμερίζεται σε μικρότερα στάδια με βασικό γνώμονα την λειτουργία των κυκλωμάτων και την επεξεργασία του ακουστικού σήματος. Έτσι, στο υποκεφάλαιο 4.2 παρουσιάσθηκαν τα στάδια αυτά, ξεκινώντας από το στάδιο της πόλωσης του κυκλώματος και καταλήγοντας στο στάδιο οδήγησης του σήματος στο ακουστικό. Καθένα από αυτά επαληθεύθηκαν πλήρως μέσω χρονικά μεταβαλλόμενων γραφημάτων και διαγραμμάτων Bode στο πεδίο της συχνότητας. Είναι σημαντικό να αναλύεται ένα κύκλωμα τόσο στην dc όσο και στην ac συνιστώσα των σημάτων εισόδου, προκειμένου να αποκτηθεί πλήρης γνώση για την συμπεριφορά του.

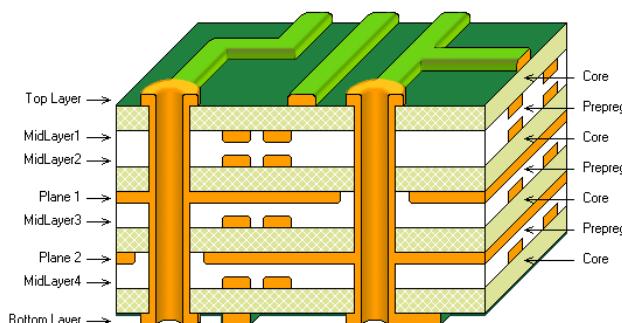
Με το τέλος του σχεδιασμού του κυκλώματος, έχοντας επαληθεύσει την λειτουργία του στο λογισμικό, θα πρέπει να υλοποιηθεί σε πρωτότυπη μορφή. Η κατασκευή του στην πράξη απαιτεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία η οποία επεξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο με λεπτομέρεια.

Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση της συσκευής

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η διαδικασία υλοποίησης του ακουστικού βαρηκοΐας. Η εφαρμογή της πρωτότυποποίησης, όπως καλείται διεθνώς η διαδικασία αυτή, στοχεύει στο πρακτικό σχεδιασμό συσκευών, οι οποίες ελέγχονται ως προς την αναμενόμενη λειτουργία τους και διορθώνονται επιπλέον προβλήματα που είναι πιθανό να εμφανιστούν. Επομένως, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, σχεδιάζεται η πρωτότυπη συσκευή και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που απορρέουν κατά τη λειτουργία της.

5.1 Σχεδιασμός PCB

Οι πλακέτες PCB (Printed Circuit Board) είναι τα ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα οποία καθορίζουν την λειτουργία των περισσότερων σύγχρονων συσκευών³⁵. Η κατασκευή τους στοχεύει στην διασύνδεση των ηλεκτρονικών υλικών σε μικρό χώρο, ενώ παράλληλα, αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά εξωτερικές πηγές θορύβου. Οι πλακέτες αυτές δομούνται σε επιμέρους αγώγιμα στρώματα από φύλλο χαλκού και στρώματα διηλεκτρικού υλικού. Επίσης, καλύπτονται από υλικό συγκόλλησης (solder mask), το οποίο δίνει το χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα στις πλακέτες PCB. Τα διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται στα ενδιάμεσα στρώματα, ποικίλουν και λαμβάνονται υπόψη, λόγω της διαφορετικής σύστασής τους και της διηλεκτρικής σταθεράς τους. Μεταξύ των αγώγιμων στρωμάτων, εξαιτίας των διηλεκτρικών υλικών, αναπτύσσονται παρασιτικές χωρητικότητες αρκετά μεγάλης τιμής, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία του κυκλώματος που έχει σχεδιασθεί.



Εικόνα 5.1 : Κάτοψη ενός πολύπλοκου PCB με 8 στρώματα³⁶

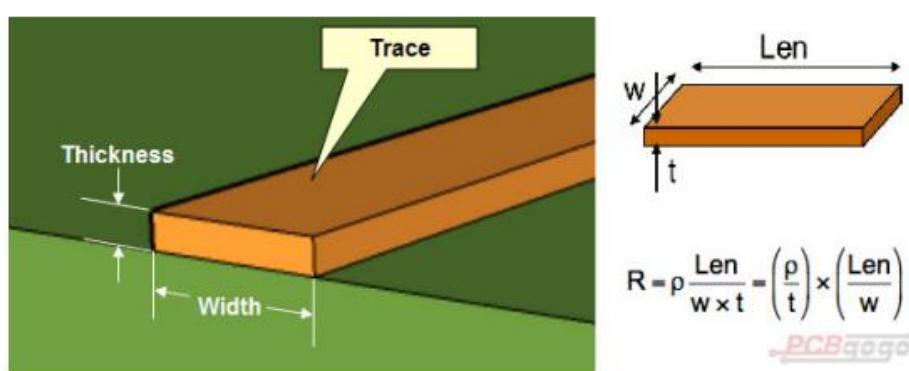
Η διαδικασία σχεδιασμού των κυκλωματικών συνδέσεων μεταξύ των ηλεκτρονικών υλικών, είναι αρκετά περίπλοκη και θα πρέπει να ληφθούν πολλές παράμετροι

³⁵ URL : <https://vlab.amrita.edu/?sub=3&brch=106&sim=241&cnt=1>

³⁶ URL : <https://www.altium.com/documentation/altium-nexus/understanding-printed-circuit-board-makeups?version=1.1>

υπόψη³⁷. Πρώτα απ' όλα, θα πρέπει να γίνει έλεγχος του όγκου που καταλαμβάνουν τα στοιχεία και να σχεδιασθεί η πλακέτα σύμφωνα με βασικές προδιαγραφές χωροταξίας. Έπειτα, είναι σύνηθες να τοποθετούνται τα συσχετιζόμενα υλικά, σχετικά κοντά μεταξύ τους, προκειμένου οι συνδέσεις, οι οποίες φαίνονται από το λογισμικό σχεδίασης που χρησιμοποιείται, να τέμνονται όσο το δυνατό λιγότερες φορές. Ιδιαίτερα, ουσιαστικές είναι οι συνδέσεις με πυκνωτές decoupling των πηγών τροφοδοσίας και των pins στα ολοκληρωμένα κυκλώματα που δέχονται τροφοδοσία. Οι πυκνωτές αυτοί εξυπηρετούν στην εξομάλυνση του σήματος ισχύος, το οποίο, ενδεχομένως, να φέρει ac συνιστώσα κυμάτωσης, λόγω παρεμβολών και πηγών θορύβου. Είναι, εξίσου σημαντικό, να γνωρίζει ο σχεδιαστής τις βασικές αρχές λειτουργίας των ηλεκτρονικών υλικών που χρησιμοποιεί. Για παράδειγμα, ένα button που διεγείρεται με επαφή, μπορεί να βρίσκεται σχετικά μακριά από τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία, γιατί το σήμα που παράγεται δεν απαιτείται να είναι αρκετά γρήγορο. Ωστόσο, μια επικοινωνία UART, η οποία βασίζεται σε συνδέσεις τύπου USB πρωτοκόλλου, επειδή είναι απαραίτητο να διαχειρίζεται σειριακά δεδομένα σε υπερβολικά υψηλές ταχύτητες, επιβάλλεται να γίνουν οι συνδέσεις σε πολύ μικρές αποστάσεις. Τέλος, οι βασικές υπομονάδες με τις περισσότερες συνδέσεις τοποθετούνται σε κεντρικό σημείο στην πλακέτα, προκειμένου να ακολουθήσει ένα σχετικά ευκολότερο layout design.

Οι γραμμές που σχεδιάζονται στην πλακέτα PCB ονομάζονται ίχνη (traces) και στην ουσία, αποτελούν διασυνδέσεις χαλκού. Μετά την τοποθέτηση των υλικών, ο σχεδιασμός των συνδέσεων ακολουθεί ορισμένους βασικούς κανόνες, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Καταρχάς, τα ίχνη, ανάλογα με το μήκος τους και το πλάτος τους, φέρουν διαφορετική ωμική αντίσταση. Ακόμα, είναι εμφανή πολλά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων, εξαιτίας, των ιχνών, των παρασιτικών στοιχείων μεταξύ αυτών και των υπόλοιπων στρωμάτων. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι συμφέρον να σχεδιάζονται οι γραμμές αυτές σχετικά μακριά μεταξύ τους, όταν η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος αυξάνεται. Τέλος, η αύξηση του μήκους των ιχνών προκαλεί μεγαλύτερη καθυστέρηση στη διάδοση των σημάτων, ενώ η αύξηση του πλάτους μειώνει την ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

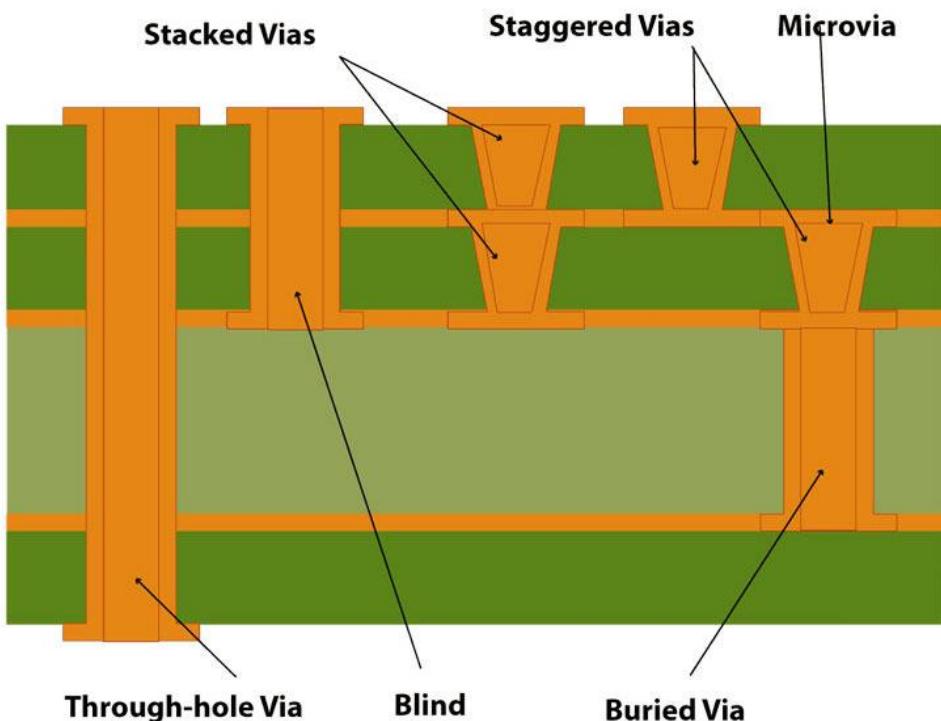


Εικόνα 5.2 : Υπολογισμός αντίστασης σε ίχνος χαλκού³⁸

³⁷ URL : <https://education.altium.com/>

³⁸ URL : https://www.pcbgogo.com/Blog/PCB_Trace__Everything_You_Need_To_Know

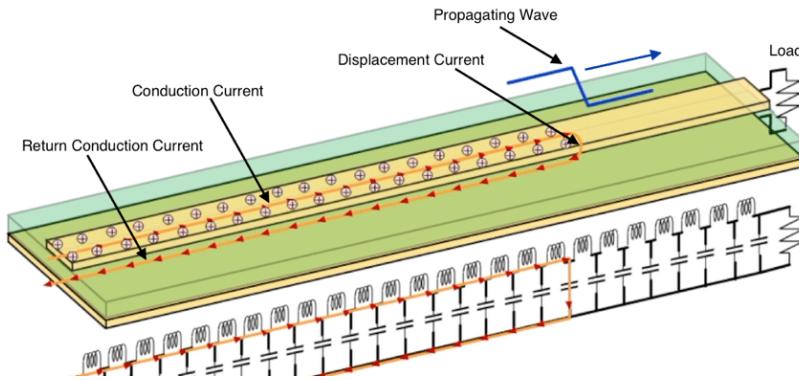
Ένα συνηθισμένο PCB layout design, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των συνδέσεων, απαιτεί αρκετό χρόνο από το σχεδιαστή όταν οι συνδέσεις που απομένουν γίνονται ολοένα λιγότερες. Οι κανόνες σχεδίασης των κατασκευαστών PCB πλακετών που ορίζουν αν η πλακέτα είναι υλοποιήσιμη ή όχι (DRC – Design Rule Check), οι ελάχιστες αποστάσεις όπου αποφεύγονται ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα (clearances), η χωροταξία των υλικών στην πλακέτα (είτε στο πάνω είτε στο κάτω στρώμα) και οι κανόνες σχεδιασμού με ίχνη, αποτελούν ένα μεγάλο σετ παραμέτρων, τα οποία λαμβάνει υπόψη ο μηχανικός κατά τη σχεδίαση και είναι δύσκολο να ικανοποιήσει, όταν οι απαιτούμενες συνδέσεις είναι αρκετά λίγες, την στιγμή που ήδη υπάρχουν εκατοντάδες συνδέσεις που γίνονται στην υπόλοιπη πλακέτα. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τα vias. Αυτά είναι ειδικά ελάσματα τα οποία συνδέουν ηλεκτρικά ένα ή περισσότερα στρώματα και τοποθετούνται σε τρύπες στην πλακέτα οι οποίες έχουν ανοιχθεί από εξειδικευμένα τρυπάνια. Τα vias χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες αναφορικά με τα στρώματα τα οποία διασυνδέουν. Τα πιο συνηθισμένα καλούνται *through-hole vias* και συνδέουν τα πάνω και κάτω στρώματα. Υπάρχουν, επίσης, *blind vias*, που συνδέουν ενδιάμεσα στρώματα μεταξύ τους και *microvias*, όπου κάνουν σύνδεση μεταξύ δύο γειτονικών στρωμάτων και μόνο. Τέλος, χρησιμοποιούνται τα *staggered vias* τα οποία φέρουν ειδική διαμόρφωση, προκειμένου η αντίσταση να μεταβάλλεται κατά την κάθετη διάδοση των σημάτων από στρώμα σε στρώμα.



Εικόνα 5.3 : Είδη συνδέσμων vias μεταξύ στρωμάτων

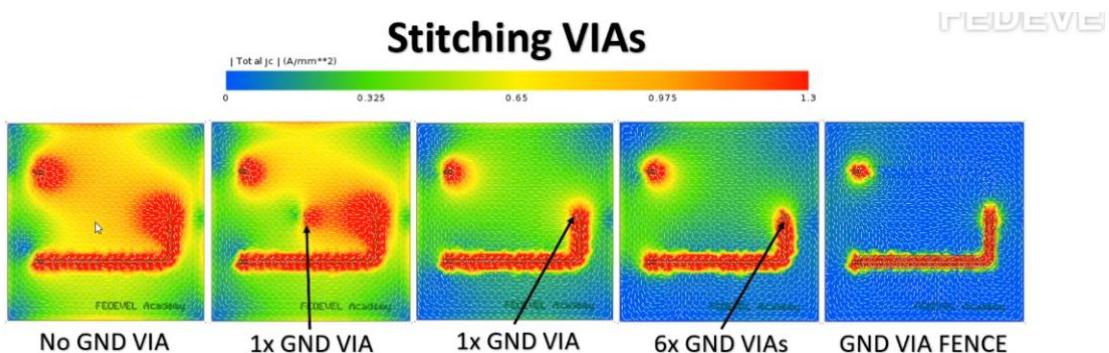
Είναι καλή πρακτική, η σχεδίαση να ξεκινά από τις διασυνδέσεις της τροφοδοσίας. Επειδή, η τροφοδοσία είναι dc τάση, θα πρέπει να διαδοθεί σε όλα τα επιμέρους ενεργά κυκλώματα με την ελάχιστη δυνατή απώλεια ισχύος. Έτσι, επιλέγονται σχετικά μεγάλου πλάτους γραμμές ιχνών ή πολύγωνα, τα οποία στην πράξη είναι εκχυλίσεις χαλκού που ορίζονται σε συγκεκριμένα πλαίσια, προκειμένου η αντίσταση της

γραμμής μετάδοσης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Παράλληλα, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται αρκετά vias συνδεμένα στη γείωση κοντά σε γραμμές που διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις ή στα σημεία όπου η διάδοση του σήματος αλλάζει στρώμα μέσω άλλου via. Η παράλλειψή τους είναι πιθανό να διασκορπίσει την κατανομή πυκνότητας ρεύματος επάνω στην πλακέτα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται παρεμβολές και η πλακέτα να θερμαίνεται, καθώς δεν υπάρχει επιστροφή των ρευμάτων στην γείωση. Τα return currents, όπως αναφέρονται, εμφανίζονται κατά την διάδοση των σημάτων σε ένα ίχνος PCB με τον ακόλουθο τρόπο :



Εικόνα 5.4 : Return Currents

Τα ρεύματα αυτά, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4 για το μοντέλο γραμμής επιστρέφουν στην γείωση μέσω των παρασιτικών χωρητικοτήτων που εμφανίζονται αναμεταξύ των στρωμάτων. Η πυκνότητα ρεύματος φαίνεται στη συνέχεια για την περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται ground via και συγκρίνεται με την περίπτωση όπου τοποθετείται ground via πολύ κοντά στο μονοπάτι του ίχνους PCB.



Εικόνα 5.5 : Η χρήση πολλών ground vias βελτιώνει την κατανομή της πυκνότητας ρεύματος και την λειτουργία της πλακέτας PCB³⁹

Μετά την τοποθέτηση των ground vias στο layout και το σχεδιασμό ιχνών τροφοδοσίας, ακολουθεί ο σχεδιασμός ιχνών για τα υπόλοιπα σήματα των ηλεκτρονικών υλικών. Τυπικά, θα πρέπει σήματα του ίδιου τύπου να σχεδιασθούν στο ίδιο στρώμα, αλλά επιτρέπονται εναλλαγές στρωμάτων μέσω των vias. Βασικοί κανόνες που ακολουθούνται αφορούν στην χρήση ιχνών τυπικού πάχους 10mil και αποφεύγεται η παράλληλη διάδοση δύο σημάτων σε μεγάλα μήκη ή, τουλάχιστον, θα

³⁹ URL : <https://www.youtube.com/watch?v=nPx2iqmVAHY&t=996s>

πρέπει να διατηρείται μια απόσταση μεταξύ αυτών των γραμμών. Επιπλέον, θα πρέπει να συνδεθούν πολύ κοντά στα pins τροφοδοσίας οι πυκνωτές decoupling. Οι γραμμές των ιχνών είναι καλό να φέρουν πάχος ίσο με τα pins των ηλεκτρονικών υλικών και όχι μεγαλύτερο για να μην λειτουργήσουν ως ηλεκτρομαγγητικοί παρεμβολείς. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται, συνήθως, χαρακτηρίζονται ως through holes –όπου διαπερνούν τα στρώματα του PCB- ή SMD (Surface Mount Devices) τα οποία είναι υλικά πολύ μικρών διαστάσεων που κολλούνται στις επιφάνειες των πλακετών, χωρίς να απαιτούν εσωτερική διασύνδεση στα στρώματα. Τα pins των δύο αυτών κατηγοριών διαφέρουν μεταξύ τους και χρειάζονται ειδική μεταχείριση και τοποθέτηση από τον μηχανικό κατά την σχεδίαση. Τέλος, θα πρέπει ο μηχανικός να συμβουλεύεται πάντα το κυκλωματικό σχηματικό για την υλοποίηση των συνδέσεων και να εκτελεί ελέγχους DRC προκειμένου να επιλύονται τα προβλήματα σχεδίασης αρκετά νωρίς, αφού, στην συνέχεια, αυξάνεται η πολυπλοκότητα και η δυσκολία.

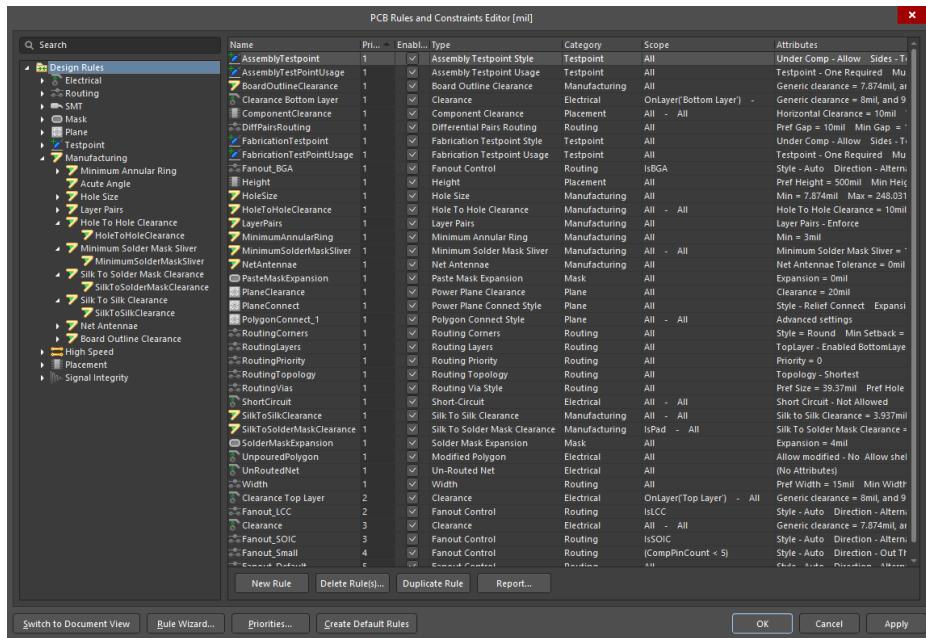
5.2 Σχεδιασμός του κυκλώματος στο λογισμικό Altium Designer

Ο σχεδιασμός της τελικής πρωτότυπης έκδοσης της πλακέτας PCB του κυκλώματος έγινε με τη βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου Altium Designer, το οποίο ενδείκνυται για αρκετά υψηλού επιπέδου υλοποίησεις. Το λογισμικό αυτό αξιοποιήθηκε στην απλή έκδοσή του για δωρεάν δοκιμή 6 μηνών, η οποία απευθύνεται σε φοιτητές. Το πακέτο περιλαμβάνει δωρεάν εκμάθηση του λογισμικού μέσω ορισμένων tutorials, τα οποία αναλύουν σε βάθος τη σχεδίαση PCB.

Αρχικά, ήταν σημαντικό να ορισθεί κάποιος κατασκευαστής για την πλακέτα. Η εταιρεία JLCPCB είναι μία από τις πιο δημοφιλείς στο χώρο αυτό για την κατασκευή απλών πλακετών σε περιπτώσεις πρωτοτυποποίησης, όπου δεν είναι σημαντικό να ληφθούν υπερβολικά πολλές παράμετροι ως περιορισμοί. Η πλακέτα που συζητείται επί της παρούσης θα λειτουργεί σε συχνότητες το πολύ 20 kHz και, επομένως, δεν χρειάζεται να τεθούν υπερβολικές απαιτήσεις ως προς την κατασκευή. Ωστόσο, η διαδικασία σχεδιασμού ακολουθείται αυστηρά και το πρώτο βήμα αυτής είναι η δημιουργία του Layer Stackup, δηλαδή ορίζονται τα στρώματα του PCB και η διηλεκτρική σταθερά των ενδιάμεσων στρωμάτων μόνωσης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται πρώτα να εντοπιστούν όλες οι δυνατότητες και οι παροχές της εταιρείας JLCPCB, προκειμένου η σχεδίαση της πλακέτας να είναι εγγυημένη και εφικτή.

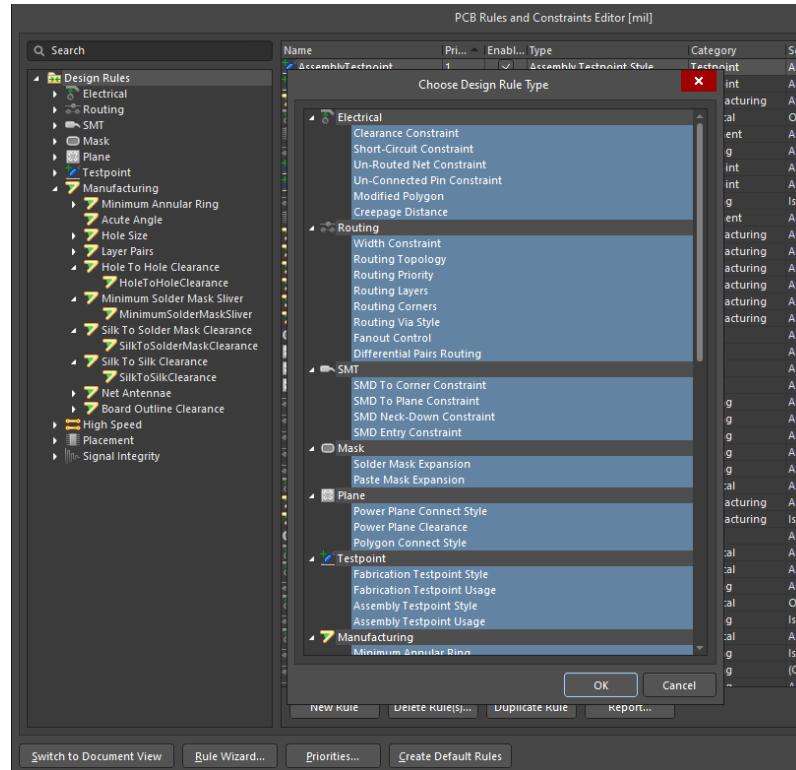
Στην ιστοσελίδα της εταιρείας έχουν αναρτηθεί οι κατασκευαστικές δυνατότητες σχετικά με το σχεδιασμό PCB και έχει υλοποιηθεί ένα αρχείο τύπου .rul , το οποίο περιέχει κανόνες ελάχιστων αποστάσεων. Αυτό το αρχείο θα πρέπει να τοποθετηθεί στην επιλογή DRC του σχεδίου πριν ξεκινήσει η συνδεσμολογία των ηλεκτρονικών υλικών. Στο project που έχει δημιουργηθεί στο Altium Designer, αρχικοποιείται πρώτα ένα αρχείο PCB σχεδίου. Έπειτα επιλέγεται το μενού DRC όπως στην εικόνα που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 5 : Υλοποίηση της συσκευής



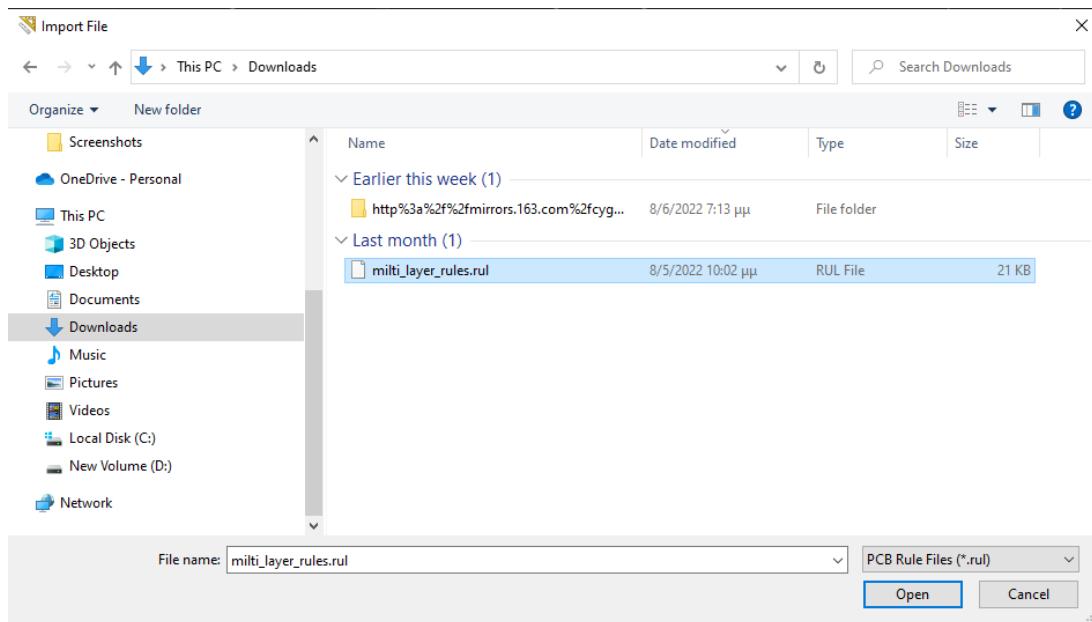
Εικόνα 5.6 : Μενού DRC

Επιλέγοντας τα Design Rules, μπορεί να τοποθετηθεί νέο αρχείο τύπου **.rul** ως σύνολο κανόνων. Θα πρέπει να δεχθούν αλλαγή όλοι οι κανόνες και για αυτό επιλέγονται με **CTRL+A**.



Εικόνα 5.7 : Επιλογή κανόνων

Τέλος, γίνεται import του αρχείου **.rul** με απλή αναζήτηση στο σημείο του υπολογιστή όπου είναι αποθηκευμένο.



Εικόνα 5.8 : Φόρτωση των κανόνων της κατασκευαστικής εταιρείας JLCPCB

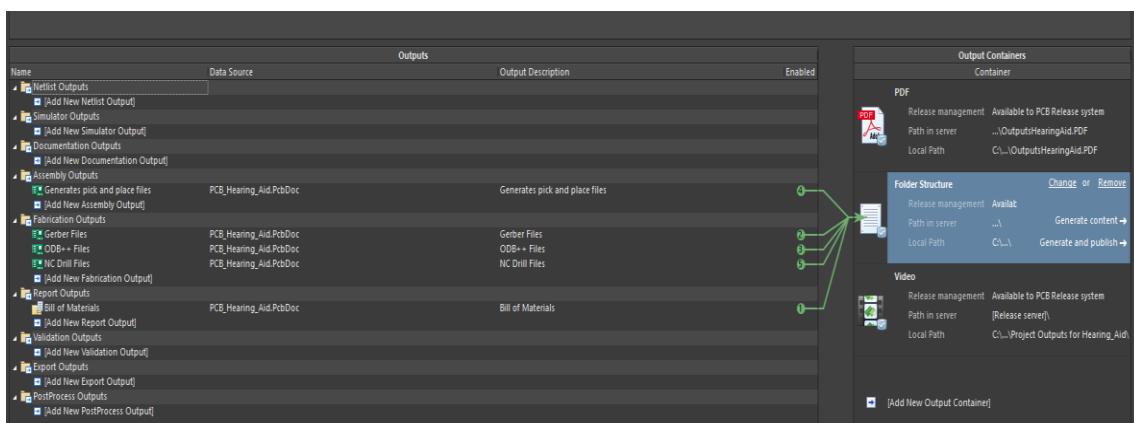
Μετά από την παραπάνω διαδικασία, ο σχεδιασμός PCB είναι πλέον σύμφωνος με τα κατασκευαστικά δεδομένα της εταιρείας και, εκτελώντας ελέγχους DRC, μπορεί κανείς να σχεδιάσει πλακέτες, οι οποίες να είναι υλοποιήσιμες στην πράξη. Βέβαια, ακόμη ένα σημαντικό βήμα είναι να αρχικοποιηθούν τα στρώματα. Με την επιλογή Layer Stackup, αρχικοποιούνται 3 στρώματα στην πλακέτα εκτός των εξωτερικών (overlays και solder mask layers). Ειδικότερα, υπάρχει το πάνω στρώμα (top layer), ένα στρώμα διηλεκτρικού σταθεράς 4.5 και το κάτω στρώμα (bottom layer). Τα πάνω και κάτω στρώματα φέρουν διηλεκτρική σταθερά 3.8. Τα δεδομένα αυτά συμφωνούν, επίσης, με τις κατασκευαστικές δυνατότητες της εταιρείας. Τελικά, η πλακέτα που επρόκειται να σχεδιασθεί είναι τύπου 2-layer, δηλαδή δύο βασικών στρωμάτων ηλεκτρικών σημάτων (top και bottom), όπου τα υλικά θα τοποθετηθούν από την μία και μόνο πλευρά της, διότι, η εταιρεία JLCPCB υποστηρίζει αυτοματοποιημένη τοποθέτηση (PCBA,PCB Assembly) μόνο σε top ή bottom layer ανά PCB.

+ Add	Modify	Delete	#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
				Top Overlay		Overlay				
			1	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask	0.5mil	3.8		
				Top Layer		Signal	1oz	1.378mil		
			2	Dielectric 1	FR-4	Dielectric		35.433mil	4.5	
				Bottom Layer		Signal	1oz	1.378mil		
				Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask	0.5mil	3.8		
				Bottom Overlay		Overlay				

Εικόνα 5.9 : Layer Stackup

Η εξαγωγή των αρχείων γίνεται με την επιλογή Output Job File Export, δηλαδή μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που προσφέρει το λογισμικό Altium Designer προκειμένου να παράγονται σε ένα κοινό φάκελο όλα τα επιθυμητά αποτελέσματα της σχεδίασης. Τα σημαντικότερα αρχεία σχετικά με την κατασκευή της πλακέτας, τα οποία θα αποσταλούν στην JLCPCB, είναι :

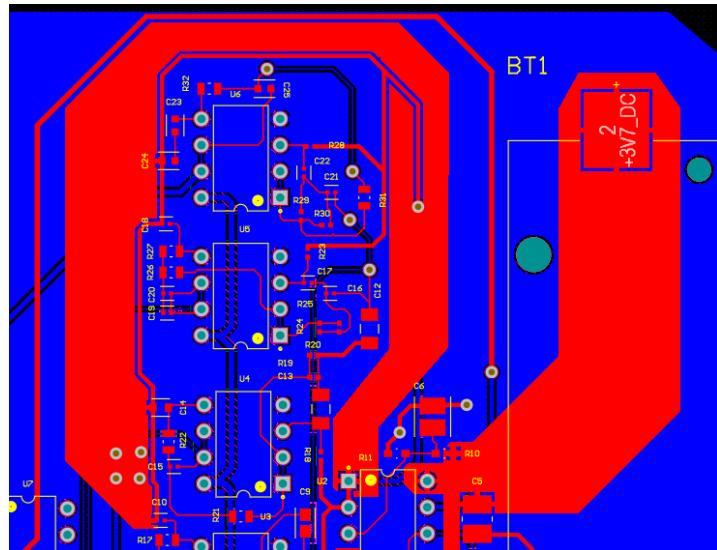
1. **Gerber Files** : Αρχεία στα οποία υπάρχει το PCB σχηματικό του κυκλώματος
2. **NC Drill Files** : Αρχεία στα οποία υπάρχουν συντεταγμένες όλων των τρυπών για through holes και vias στη πλακέτα
3. **ODB++ Files** : Πακέτο αρχείων που φέρει τα προηγούμενα δύο και πολλές ακόμα πληροφορίες που είναι χρήσιμες για τους κατασκευαστές και μπορούν να τα συμβουλευτούν, σε περίπτωση προβλημάτων ή δυσκολιών κατά τη παραγωγή των PCBs.
4. **BOM (Bill Of Materials)** : Αρχείο το οποίο εμφανίζει το σύνολο των ηλεκτρονικών υλικών που χρησιμοποιούνται, τις ενδεικτικές τιμές τους στην αγορά, καθώς μπορούν να συμπεριληφθούν και ιστοσελίδες για προμήθεια αυτών.
5. **Pick And Place** : Αρχείο το οποίο είναι σημαντικό να αποσταλεί στους κατασκευαστές, όταν είναι επιθυμητή η αυτοματοποιημένη τοποθέτηση των υλικών. Σε αυτό περιλαμβάνονται συντεταγμένες και κατευθύνσεις υπό γωνία για όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται. Είναι πιθανό να προκύπτουν σφάλματα στο προσομοιωτή της JLCPCB, ωστόσο, το αρχείο ελέγχεται από άτομα της εταιρείας και γίνονται επιπλέον διορθώσεις, εάν απαιτούνται.



Εικόνα 5.10 : Εξαγωγή των αρχείων

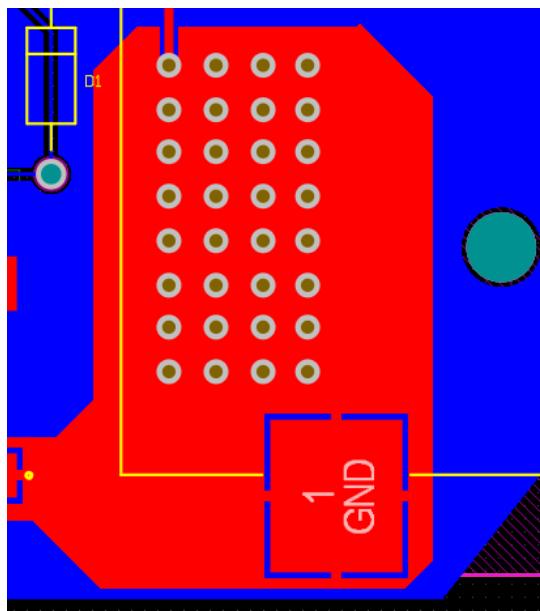
Το στάδιο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ της αρχικοποίησης των κανόνων σχεδίασης και της εξαγωγής των αποτελεσμάτων, αφορά την καθαυτή σχεδίαση του PCB layout. Για την δημιουργία των διασυνδέσεων ιχνών χαλκού μεταξύ των ηλεκτρονικών συσκευών, ακολουθούνται οι βασικοί κανόνες που επεξηγήθηκαν στο υποκεφάλαιο 5.1. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα βασικότερα σημεία σχεδίασης του κυκλώματος που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία.

Ο σχεδιασμός ξεκίνησε από τις γραμμές τροφοδοσίας, οι οποίες συνηθίζεται να τοποθετούνται ως πολύγωνα χαλκού. Οι βασικές dc συνιστώσες τροφοδοσίας είναι η τάση των 3.7V, η γείωση GND και η τάση πόλωσης Vbias στο μισό του εύρους τροφοδοσίας (1.85V). Τα πολύγωνα στο σχέδιο στοχεύουν στην ελάττωση της αντίστασης στη γραμμή μετάδοσης, έτσι ώστε και η πτώση τάσης να είναι αμελητέα.



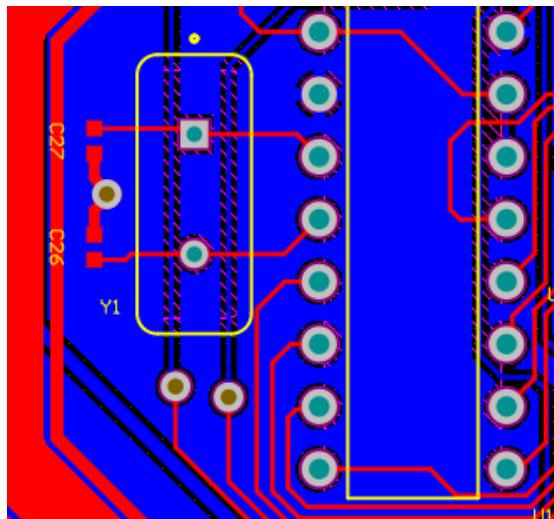
Εικόνα 5.11 : Πολύγωνα για τις τροφοδοσίες 3.7V και V_{bias}

Στην γείωση είναι εξίσου σημαντική η τοποθέτηση πολυγώνων, αλλά, επειδή, η θήκη της μπαταρίας φέρει SMD pins, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλά vias προκειμένου να γίνει διασύνδεση της γείωσης του top layer με το bottom layer.



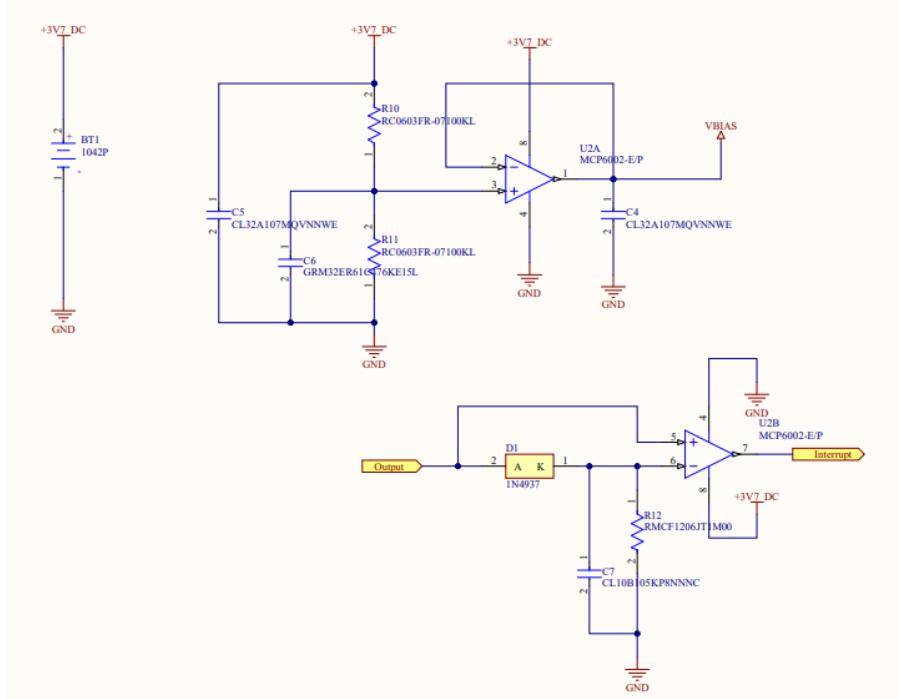
Εικόνα 5.12 : Πολύγωνο και vias για την γείωση. Με το τρόπο αυτό, η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος εγκλωβίζεται στις γραμμές του πολυγώνου και ρέει προς το bottom layer.

Αξιοσημείωτη, επίσης, είναι η τοποθέτηση του κρύσταλλου του ATMEGA328-PU. Θα πρέπει να τοποθετηθεί όσο δυνατό πιο κοντά στα pins του μικροελεγκτή, διότι, σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθούν σήματα παρεμβολής που υπερθέτονται με τα αναλογικά σήματα ήχου κατά την διάδοσή τους στις γραμμές που υπάρχουν κοντά.



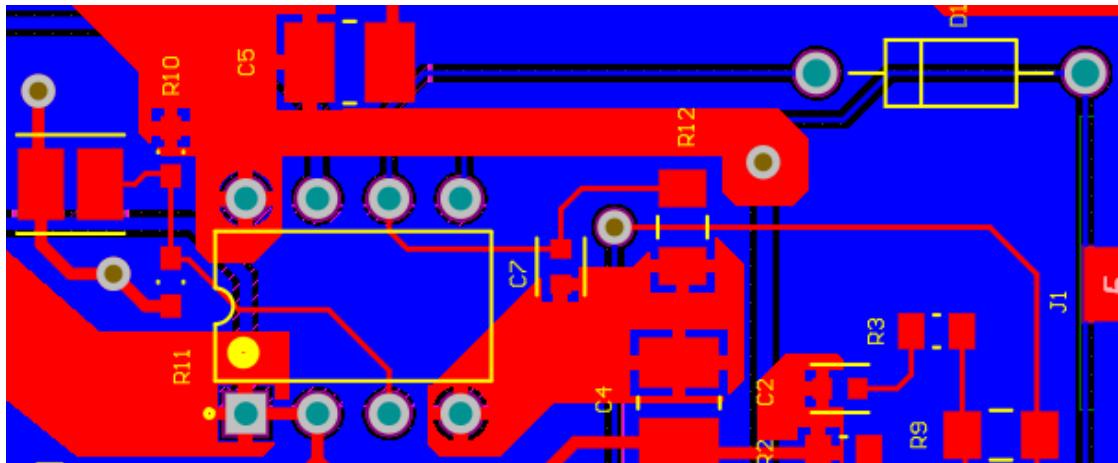
Εικόνα 5.13: Τοποθέτηση του κρύσταλλου κοντά στο μικροελεγκτή

Το σχέδιο της πλακέτας PCB βασίστηκε, κατά κόρον, στην τοπολογία των κυκλωματικών σχηματικών. Αυτό σημαίνει, πως τα υλικά τα οποία είχαν σχετικά άμεση σύνδεση, τοποθετήθηκαν σε σχετικά κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις. Το πρώτο βασικό κύκλωμα αφορά την εξομάλυνση της τάσης από την μπαταρία, την παραγωγή του dc σήματος πόλωσης με χρήση buffer τάσης και το σχεδιασμό του συγκριτή πλάτους (envelope detector) για τη παραγωγή σήματος αφύπνισης στο μικροελεγκτή.



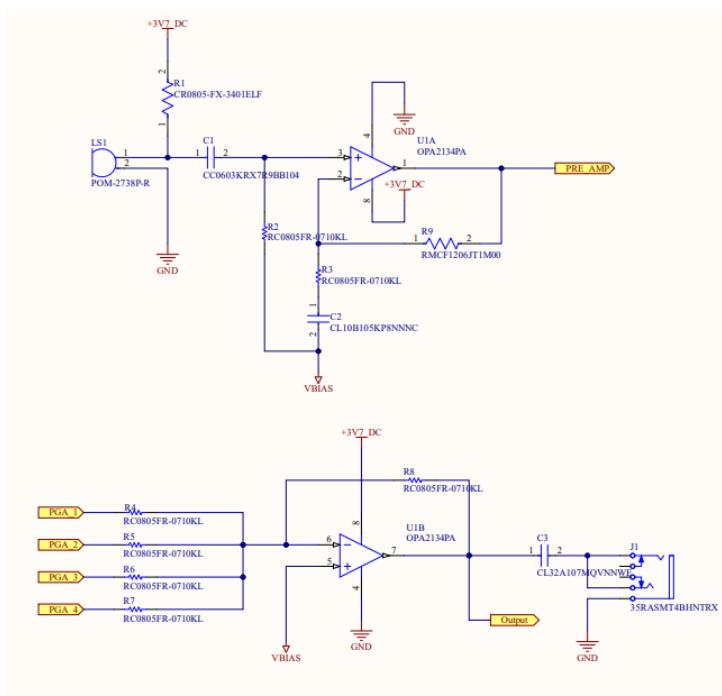
Εικόνα 5.14: Πρώτο κυκλωματικό σχηματικό

Τα υλικά που απαιτούνται για την υλοποίηση του κυκλώματος στην εικόνα 5.14 τοποθετούνται και συνδέονται στο layout με τον ακόλουθο τρόπο :



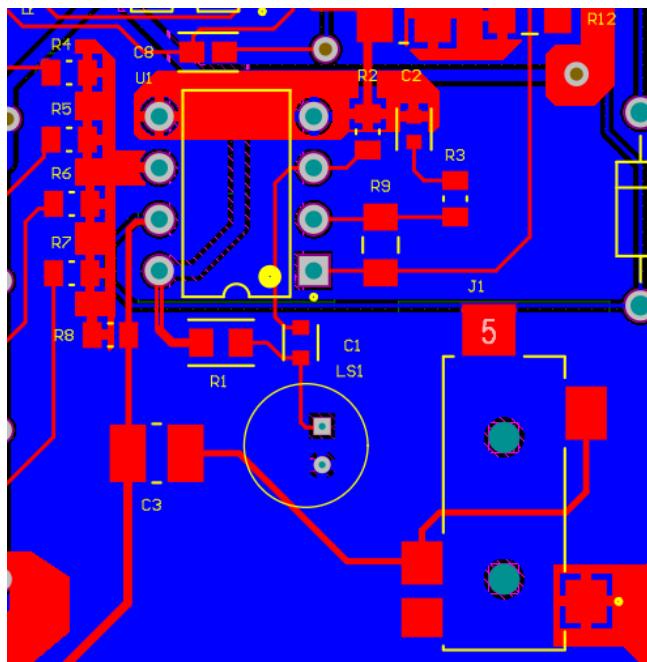
Εικόνα 5.15: Αριστερά συνδέεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP6002 και δεξιά φαίνεται πως συνδέεται η δίοδος με τα υπόλοιπα αναγκαία ηλεκτρονικά στοιχεία.

Το δεύτερο φύλλο της σχεδίασης αφορά στην υλοποίηση του προενισχυτή του ακουστικού σήματος και την ανακατασκευή του για οδήγηση προς το ακουστικό της θύρας audio jack.



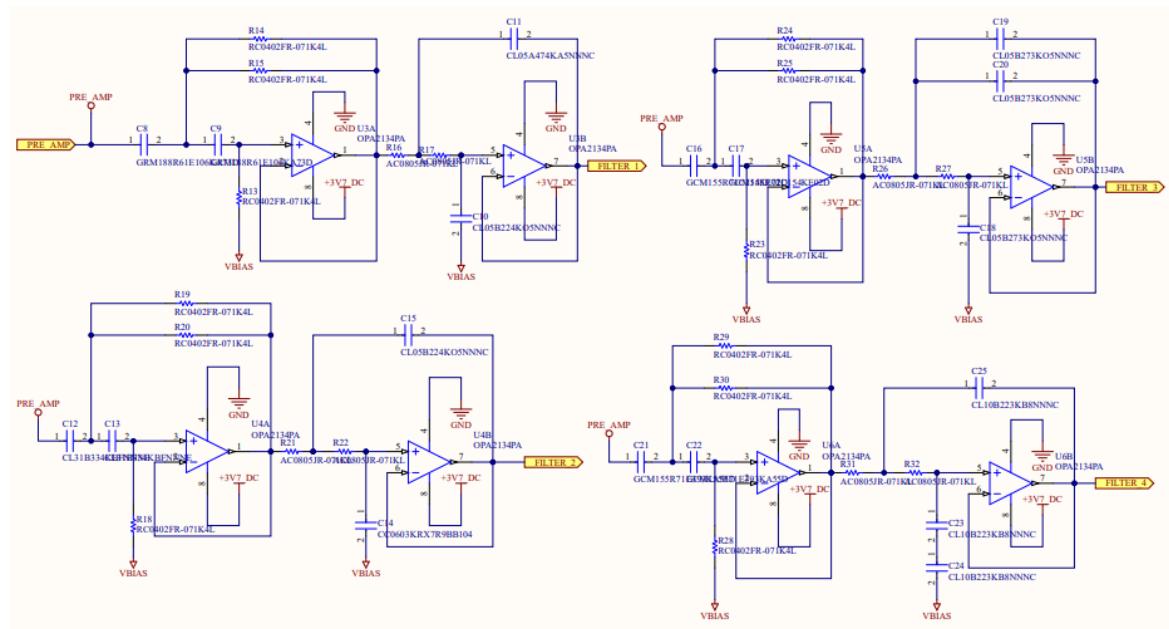
Εικόνα 5.16: Δεύτερο κυκλωματικό σχηματικό

Τα υλικά τοποθετούνται σχετικά κοντά μεταξύ τους. Έτσι, μειώνονται όποιες απώλειες ισχύος και παρεμβολές πιθανόν να συμβούν για σήματα τα οποία σε άλλες περιπτώσεις καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις.

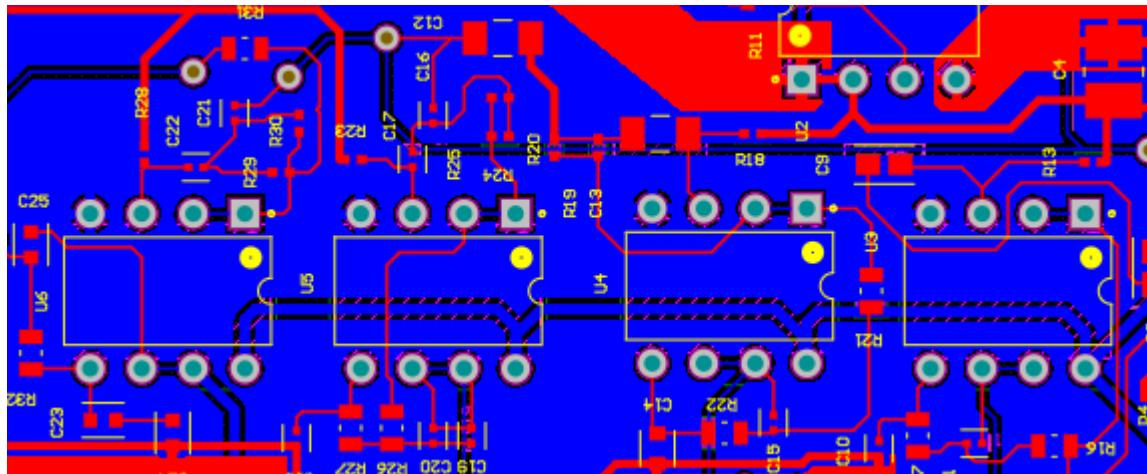


Εικόνα 5.17: PCB σχεδιασμός του δεύτερου φύλλου σχεδίασης. Στην εικόνα είναι ευδιάκριτα το μικρόφωνο, το audio jack, το IC OPA2134PA και τα λοιπά ηλεκτρονικά στοιχεία που απαιτούνται για τη λειτουργία του.

Στο τρίτο φύλλο τοποθετούνται τα αναλογικά φίλτρα 4^{ης} τάξης με τοπολογία Sallen-Key. Όπως και τα προηγούμενα κυκλώματα, έτσι και στη περίπτωση αυτή ακολουθείται με ακρίβεια το σχηματικό των προσομοιώσεων και η λογική τοποθέτησης των υλικών σε κοντινές αποστάσεις για μείωση των απωλειών.

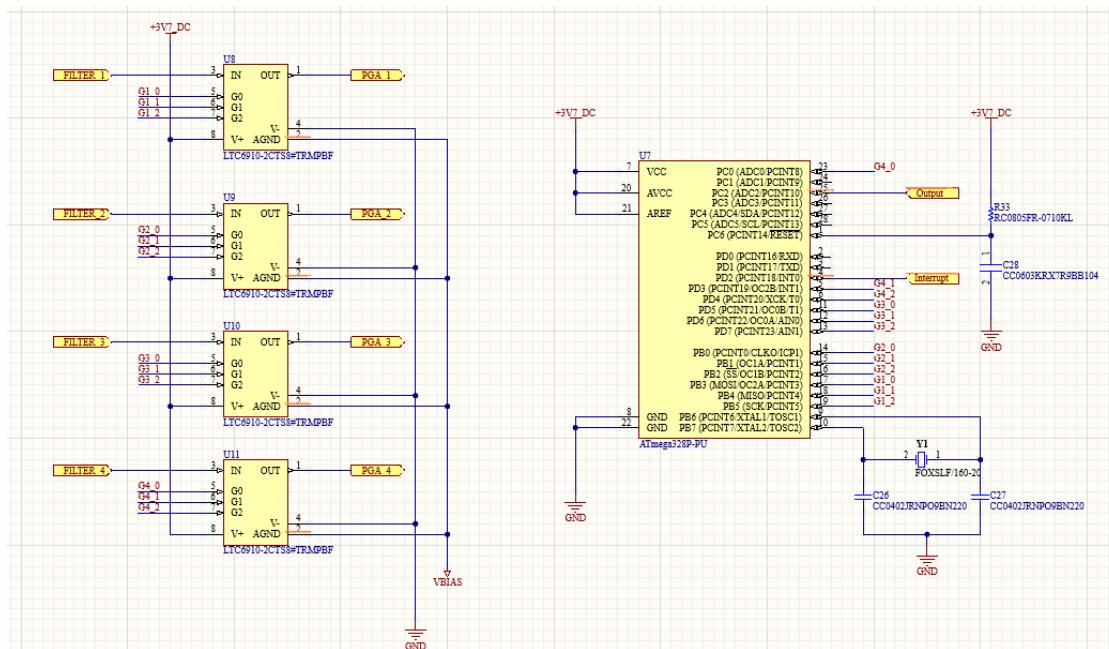


Εικόνα 5.18: Τρίτο κυκλωματικό σχηματικό

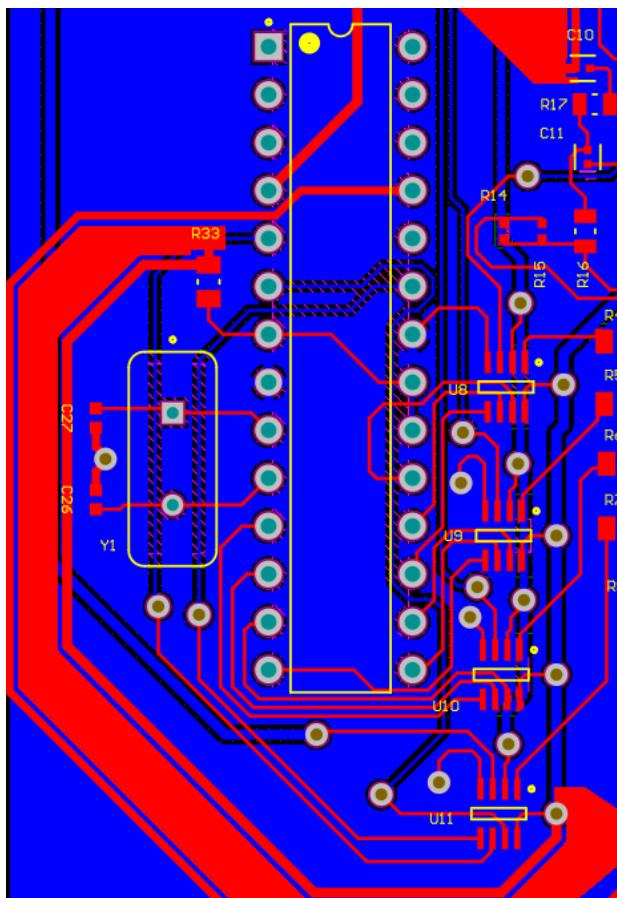


Εικόνα 5.19: PCB σχεδίαση των φίλτρων. Σημειώνεται πως κάθε IC OPA2134PA φέρει δύο τελεστικούς ενισχυτές, συνεπώς κάθε φίλτρο υλοποιείται σε ένα chip.

Τέλος, στο τέταρτο φύλλο της σχεδίασης υλοποιείται η συνδεσμολογία των PGAs και του μικροελεγκτή. Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί πως κατά την σχεδίαση του κυκλώματος προέκυψε σφάλμα στην διασύνδεση των pins 1,7,20 και 21. Τα pins 7,20,21 αρχικά, δεν τοποθετήθηκαν στην τροφοδοσία απευθείας, αλλά μέσω μιας αντίστασης των 10k Ohm, η οποία επιφέρει μεγάλη πτώση τάσης, με αποτέλεσμα να υπολειτουργεί ο μικροελεγκτής. Η αντίσταση αυτή έπρεπε να έχει συνδεθεί στο pin 1 (RESET) με την ίδια ακριβώς λογική, όμως, στο λανθασμένο σχέδιο το συγκεκριμένο pin είναι ανοικτοκυκλωμένο. Τα προβλήματα αυτά έγιναν αντιληπτά μετά την καταχώρηση της παραγγελίας της πλακέτας, ωστόσο, μπορούν πολύ εύκολα να επιλυθούν με τη μέθοδο που αναλύεται στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί.

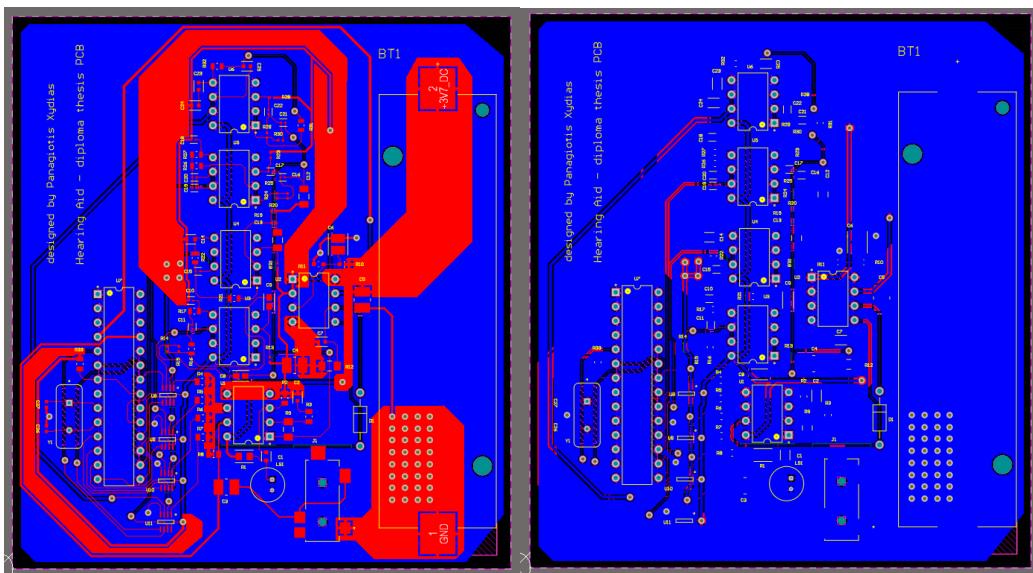


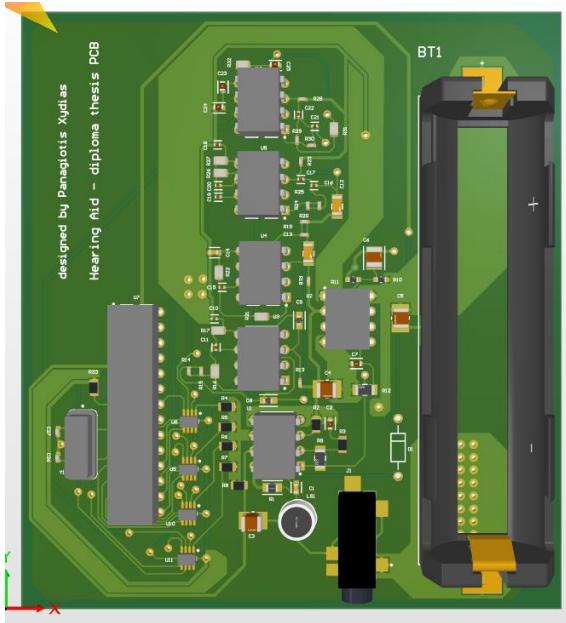
Εικόνα 5.20: Στην εικόνα αυτή φαίνεται το διορθωμένο κυκλωματικό σχηματικό του τέταρτου και τελευταίου φύλλου της σχεδίασης



Εικόνα 5.21: Layout σχεδίαση των μικροελεγκτή και των PGAs με λανθασμένες διασυνδέσεις στα pins 1,7,20,21.

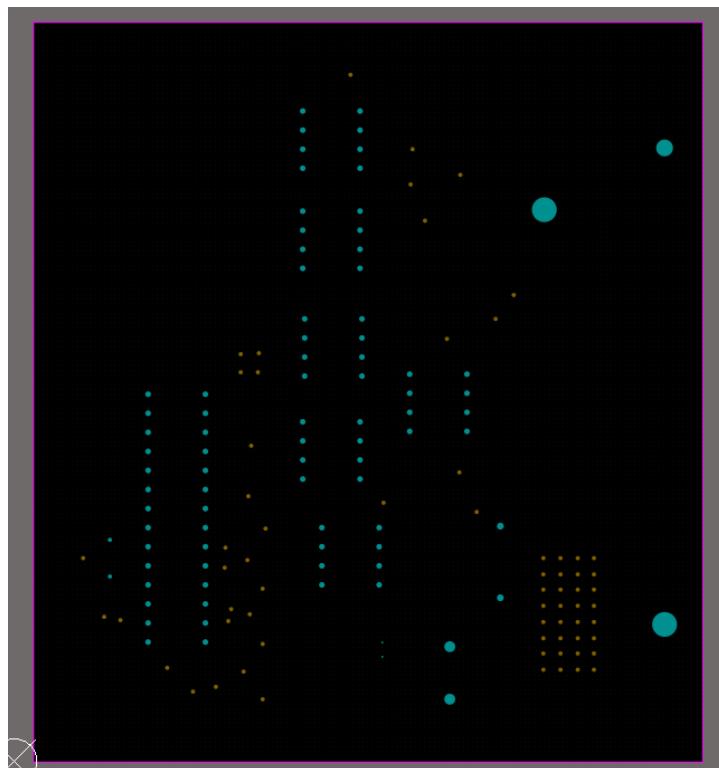
Η κάτωψη του κυκλώματος PCB τελειοποιήθηκε στην κάτωθι μορφή μέσω του λογισμικού Altium Designer.





Εικόνα 5.22: Στην εικόνα φαίνονται τα σχέδια σε διαστάσεις 2D (α) αριστερά βρίσκεται το top layer, β) δεξιά βρίσκεται το bottom layer) και 3D.

Το τελευταίο βήμα της σχεδίασης αφορά την δημιουργία του λογότυπου στο Top Overlay layer και την οριοθέτηση της πλακέτας στο Keep-Out layer με την βοήθεια παραλληλογράμου. Η οριοθέτηση είναι αναγκαία πληροφορία για την κατασκευή της πλακέτας, καθώς δίνονται αυτόματα και με ακρίβεια οι διαστάσεις της στο εργαλείο σχεδίασης των κατασκευαστικών εταιρειών. Στο στρώμα αυτό είναι, επίσης, ορατές και οι θέσεις των τρυπών για τα through hole υλικά και τα vias.

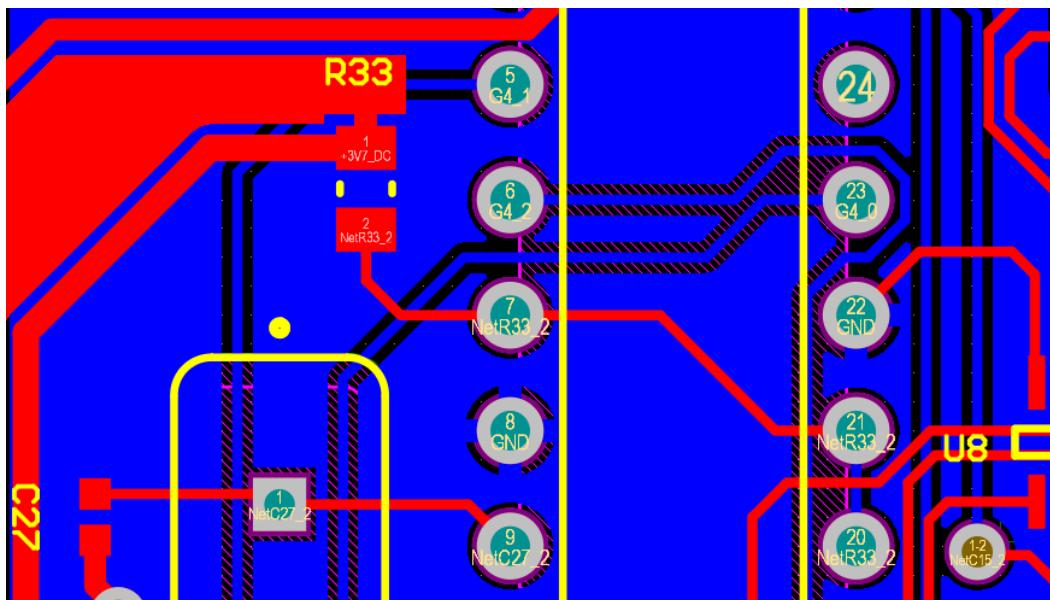


Εικόνα 5.23: Keep-Out layer

5.3 Λειτουργία της συσκευής και αποτελέσματα

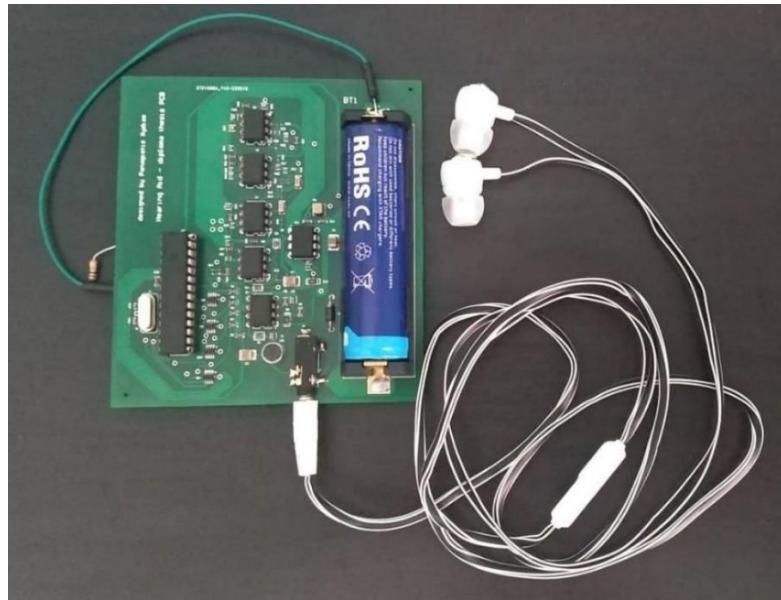
5.3.1 Ανάλυση σε επίπεδο Hardware

Στην φάση της πρωτοτυποποίησης συχνά συμβαίνουν σφάλματα λογικά ή μη, τα οποία αντιμετωπίζονται με μια σειρά τεχνικών. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος στην περίπτωση αυτή, επειδή, είναι επιπλέον αναγκαίος ο επαναπρογραμματισμός του μικροελεγκτή μέσω του Arduino Uno, χρησιμοποιείται μια DIP θήκη των 28 pins σύμφωνη με τις διαστάσεις του ATMEGA328-PU. Έπειτα, με τη βοήθεια εξωτερικής πλακέτας breadboard δοκιμάζεται η λειτουργία της συσκευής. Διατηρώντας τις συνδέσεις της εικόνας 5.20 με το διορθωμένο σχηματικό, ενώ αποφεύγεται η σύνδεση των pins 1,7,20,21 με την PCB πλακέτα, παρατηρήθηκε πως το πρόβλημα πράγματι επιλύθηκε. Για μια πιο ολοκληρωμένη λύση, τοποθετούνται κατάλληλα καλώδια και υλικά με τη βοήθεια κόλλησης στους κόμβους του PCB, όπου είναι απαραίτητο, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή σωστή λειτουργία.



Εικόνα 5.24: Λανθασμένες συνδέσεις ιχνών στα pins 7,20,21.

Η επίλυση του προβλήματος που σημειώνεται στην εικόνα 5.24 είναι η χρήση εσκεμμένου βραχυκυκλώματος του pin 7 με την τροφοδοσία. Τα pins 20,21 είναι επίσης βραχυκυκλωμένα με το pin 7 και, έτσι, δεν χρειάζεται να γίνουν άλλες αλλαγές. Με το βραχυκύκλωμα αυτό, η αντίσταση που είχε τοποθετηθεί προηγουμένως δεν επηρεάζει πλέον τη λειτουργία του κυκλώματος, διότι, δεν ρέει ρεύμα από αυτή. Τέλος, θα πρέπει το pin 1 να συνδεθεί μέσω μιας αντίστασης pullup των 10k Ohm προς την τροφοδοσία και να μην βρίσκεται ακόμη ανοικτοκυκλωμένο. Ένας πυκνωτής 100 nF συνδεμένος προς τη γείωση είναι, γενικά, απαραίτητος κοντά στο pin αυτό για καλύτερη εξομάλυνση του dc σήματος, στην περίπτωση αυτή, όμως, η αντίσταση γραμμής είναι ιδιαίτερα μικρή, οπότε ο πυκνωτής παραλείπεται. Είναι καλή πρακτική τα υλικά που θα προστεθούν να βρίσκονται σχετικά κοντά στα pins του μικροελεγκτή και οι συνδέσεις που θα γίνουν να είναι σχετικά σύντομες. Αφού υλοποιήθηκαν οι τροποποιήσεις αυτές, η συσκευή λειτουργησε σύμφωνα με τις αρχικές προδιαγραφές, λαμβάνοντας πλέον την ακόλουθη μορφή.

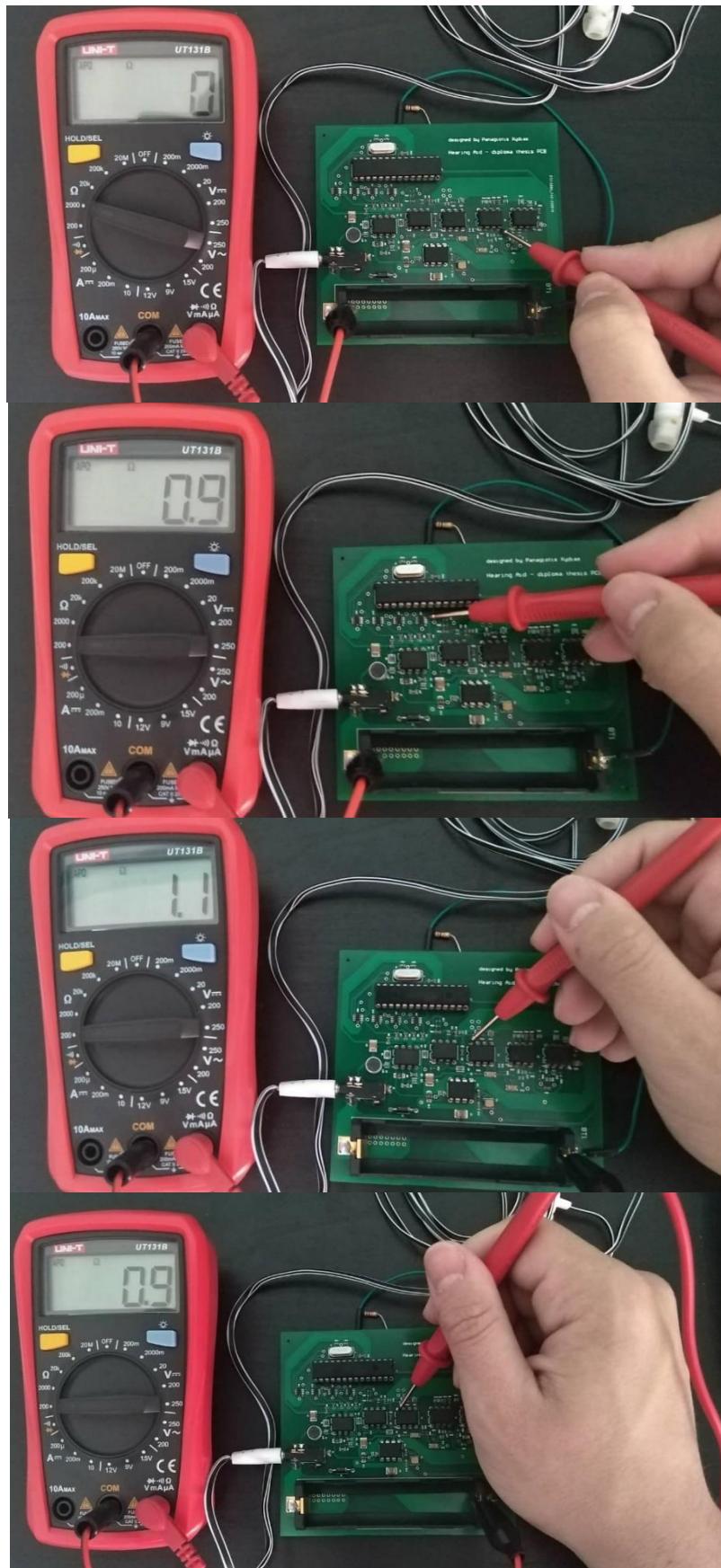


Εικόνα 5.25: Τελική πρωτότυπη μορφή της συσκευής ακουστικού βαρηκοΐας

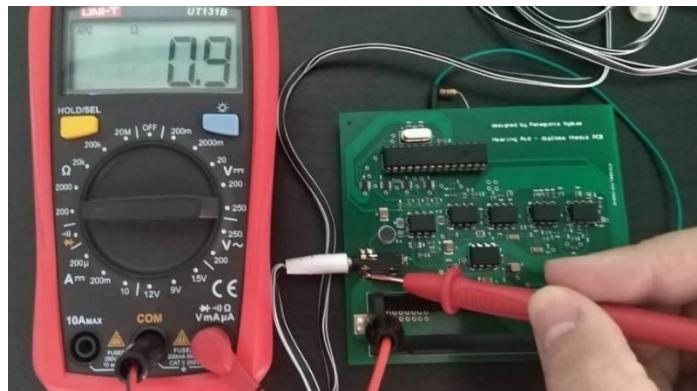


Εικόνα 5.26: Η πλακέτα PCB σε μεγέθυνση

Πολύ σημαντική μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων είναι η διαδικασία μέτρησης ισοδύναμων αντιστάσεων των κόμβων του κυκλώματος. Με την βοήθεια κατάλληλου πολυμέτρου και των ακίδων του, μπορούν να μετρηθούν ενδεικτικά σημεία του κυκλώματος και ελέγχονται βραχυκυκλώματα (μικρές τιμές αντιστάσεων) ή ανοικτοκυκλώματα (πολύ μεγάλες τιμές αντιστάσεων). Τα ηλεκτρικά tests αυτής της μορφής εφαρμόζονται κυρίως στις συνδέσεις της τροφοδοσίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν αναγκαίο να επαναληφθεί η διαδικασία της **κόλλησης** ορισμένων pins που δεν βραχυκυκλώνονταν με τα αντίστοιχα through holes τους. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται ο έλεγχος των βραχυκυκλωμάτων με την γείωση και την τροφοδοσία στα pins των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων OPA2134 και LTC6910-2 (pin 4 είναι η γείωση και pin 8 είναι η τροφοδοσία).



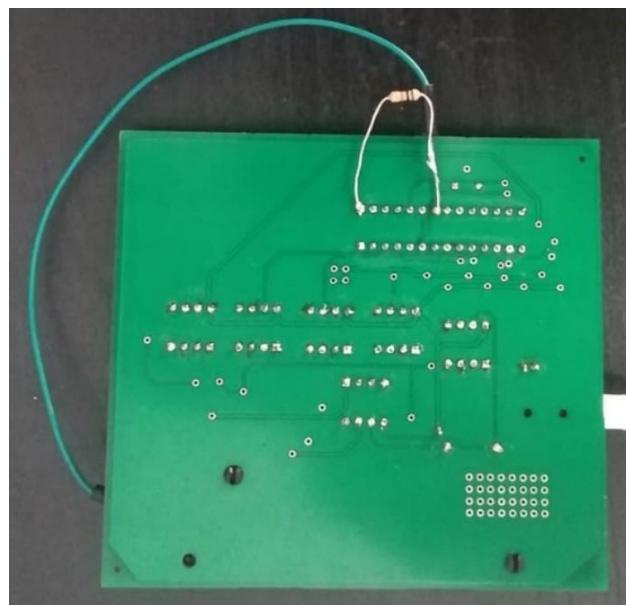
Εικόνα 5.27: Ελεγχος βραχυκυκλώματος, ενδεικτικά για δύο κόμβους γείωσης και δύο κόμβους τροφοδοσίας



Εικόνα 5.28: Έλεγχος βραχυκυκλώματος γείωσης για την θύρα εξόδου στο audio jack

Όπως είναι επιθυμητό, το κύκλωμα σχεδιάστηκε σωστά στην PCB έκδοσή του και οι διασυνδέσεις φέρουν πολύ μικρές αντιστάσεις γραμμής (περίπου 1 Ohm όπως φαίνεται στην ένδειξη του πολύμετρου στις εικόνες 5.26 και 5.27). Ένα από τα κύρια ζητήματα που έπρεπε να επιλυθούν είναι η τοποθέτηση των ICs LTC6910-2, καθώς ήταν αρκετά μικρές οι διαστάσεις μεταξύ των pins και η κόλλησή τους ήταν αμφιλεγόμενης επιτυχίας. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο εργαστηριακό προσωπικό του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, συγκεκριμένα, του τομέα Ηλεκτρονικής και Ενσωματωμένων Συστημάτων, που ενασχολήθηκαν με την κόλληση των ICs αυτών. Η καθοδήγηση των κυρίων Γ.Τζουρά και Π.Μητρόπουλου ήταν καθοριστικής σημασίας στην ανάπτυξη τεχνικών κόλλησης σε εργαστηριακό πάγκο με τον αντίστοιχο υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.26, ενδεικτικά ελέγχεται το pin της γείωσης του chip και πράγματι έχει επιτευχθεί το επιθυμητό βραχυκύκλωμα.

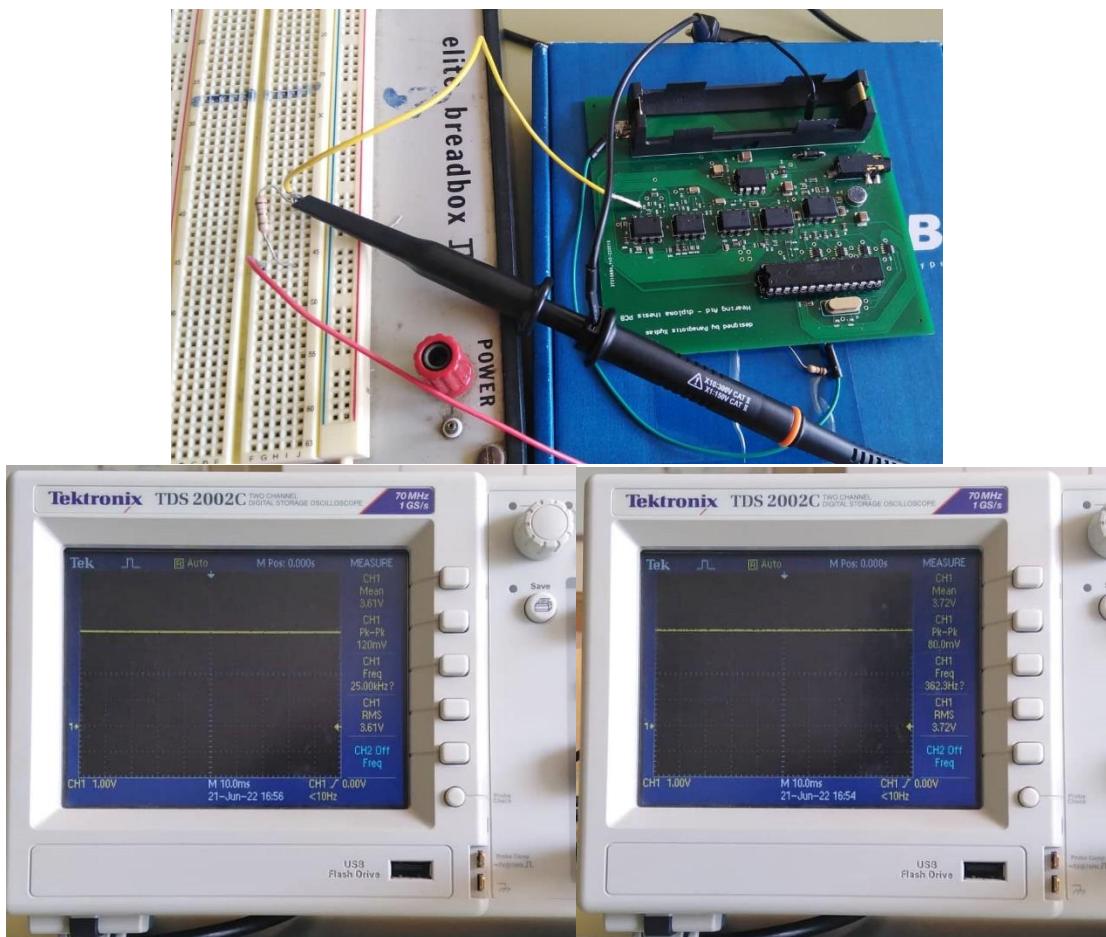
Ακόμα, το πρόβλημα της λάθος διασύνδεσης που είχε προκύψει στον μικροελεγκτή αντιμετωπίσθηκε επιτυχώς με την κόλληση ενός καλωδίου και της αντίστασης pullup των 10k Ohm όπως φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 5.29: Διόρθωση της πλακέτας στο σημείο των pins 1,7,20 και 21 του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU

Ένα βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί αφορά την κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος. Μία απλή εμπειρική μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της πτώσης τάσης σε μία αντίσταση μικρής, αλλά γνωστής, τιμής η οποία είναι συνδεμένη σε σειρά με την μπαταρία του κυκλώματος. Με την βοήθεια παλμογράφου, ο οποίος ανιχνεύει τιμές τάσης με μεγάλη ακρίβεια υπλογίσθηκε διαφορά δυναμικού ίση με (3.72V - 3.61V) = 0.11V. Συνεπώς, για τιμή αντίστασης ίση με 1.8 Ω, το ρεύμα είναι :

$$I_{in} = \frac{0.11}{1.8} = 61.1 \text{ mA}$$



Εικόνα 5.30: Πειραματική διάταξη μέτρησης του ρεύματος όπου η τροφοδοσία εισέρχεται από τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον φαίνονται οι μετρήσεις στο παλμογράφο ως ενδείξεις *mean* τιμών.

Δεδομένης της χωρητικότητας της μπαταρίας, υπολογίζεται πως ο μέσος χρόνος ζωής της είναι :

$$\text{battery life} = \frac{3300 \text{ mAh}}{61.1 \text{ mA}} = 54 \text{ hrs} = 2.25 \text{ days}$$

Φαίνεται πως η ζωή μιας φορτισμένης μπαταρίας όπως του παραδείγματος μπορεί να φθάσει έως και τις 2 ημέρες συνεχόμενης χρήσης, κάτι το οποίο φύσικα μπορεί να επεκταθεί, εάν αναλογιστεί κανείς, πως ο χρήστης πιθανόν να απενεργοποιεί τη συσκευή για ορισμένες ώρες ανά ημέρα. Ωστόσο, η μέτρηση δεν φέρει τη πλήρη εικόνα

της κατανάλωσης ισχύος, καθώς συμβαίνουν μεταβατικά φαινόμενα με τη πάροδο του χρόνου, όπως η εντολή ύπνου για το μικροελεγκτή, όπου απενεργοποιούνται οι ADCs και λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερο ρεύμα έως ότου αφυπνιστεί. Αυτή η μέτρηση είναι εφικτή σε παλμογράφους οι οποίοι συνδέονται -μέσω Ethernet- σε τοπικό δίκτυο και με υπολογιστή, όπου καταχωρούνται οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Παλμογράφοι όπως της εταιρείας Keysight είναι ικανοί για την παραπάνω διεργασία, όμως, δεν ήταν δυνατή η έγκαιρη διάθεση του κατάλληλου εξοπλισμού για να εκτελεστούν οι μετρήσεις σε βάθος χρόνου.

5.3.2 Ανάλυση σε επίπεδο Firmware

Μετά την επιτυχή υλοποίηση των ηλεκτρονικών συνδέσεων των υλικών πάνω στην PCB πλακέτα, με τη βοήθεια της κόλλησης, θα πρέπει να αναπτυχθεί το λογισμικό το οποίο θα εγγραφεί στο μικροελεγκτή ATMEGA328-PU. Η διαδικασία του code burn επεξηγείται στο υποκεφάλαιο 2.4, όπου δίνονται τα βήματα για την επιτυχή εγγραφή κώδικα στο μικροελεγκτή μέσω του Arduino IDE. Ο κεντρικός στόχος του κώδικα είναι να υλοποιεί τις λειτουργίες που τέθηκαν ως προδιαγραφές στο υποκεφάλαιο 4.1.

Αρχικά, πρέπει να ορισθούν οι global μεταβλητές του συστήματος. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τους ακόλουθους ορισμούς :

1. ***const float Vbias*** : δίνεται η αναμενόμενη τιμή της τάσης πόλωσης
2. ***int countSamplingTime*** : δίνεται η ακέραια τιμή των δειγμάτων που ορίζονται στο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας των 44100 Hz, η τιμή της οποίας αποτελεί standard για δειγματοληψία ηχητικών σημάτων. Επειδή ο κρύσταλλος φέρει συχνότητα συντονισμού των 16 MHz, τα δείγματα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου δειγματοληψίας είναι 363.
3. ***int countBiasCrossings*** : δίνεται η ακέραια τιμή των δειγμάτων που έχουν παρέλθει το σημείο πόλωσης. Στην περίπτωση που η πόλωση γινόταν γύρω από τα 0 Volts, θα υπολογίζονταν τα zero crossings.
4. ***float fundamental*** : δίνεται η τιμή της βασικής συχνότητας σε Hz, όπως υπολογίζεται μέσω των countBiasCrossings.
5. ***int countWorkingTime*** : δίνεται η ακέραια τιμή των δειγμάτων του ρολογιού, όπως ορίζεται από την εκτέλεση μιας επανάληψης του βρόχου στη συνάρτηση void loop. Επισημαίνεται πως δεν έχουν τοποθετηθεί καθυστερήσεις στο κώδικα, συνεπώς όποιο delay εμφανιστεί αφορά τις ίδιες τις επεξεργασίες που εκτελούνται.

Έπειτα, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός των pins που λειτουργούν ως έξοδοι και ως είσοδοι. Τα pins εξόδου είναι τα ψηφιακά I/Os και το αναλογικό PC0, το οποίο είναι ικανό να γράψει ψηφιακή στάθμη. Ως είσοδοι έχουν ορισθεί το αναλογικό pin PC2, το οποίο διαβάζει την τιμή του ADC μετατροπέα κατά την είσοδο του ακουστικού σήματος, και το pin PD2, το οποίο λειτουργεί ως θύρα αφύπνισης του μικροελεγκτή από την λειτουργία του σε χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Τα pins εξόδου αρχικοποιούνται σε ένα κέρδος της τάξης των 20 dB, ωστόσο δίνεται η επιλογή να αλλάξουν οι ενδείξεις καθώς τρέχει ο αλγόριθμος στη συνάρτηση void loop.

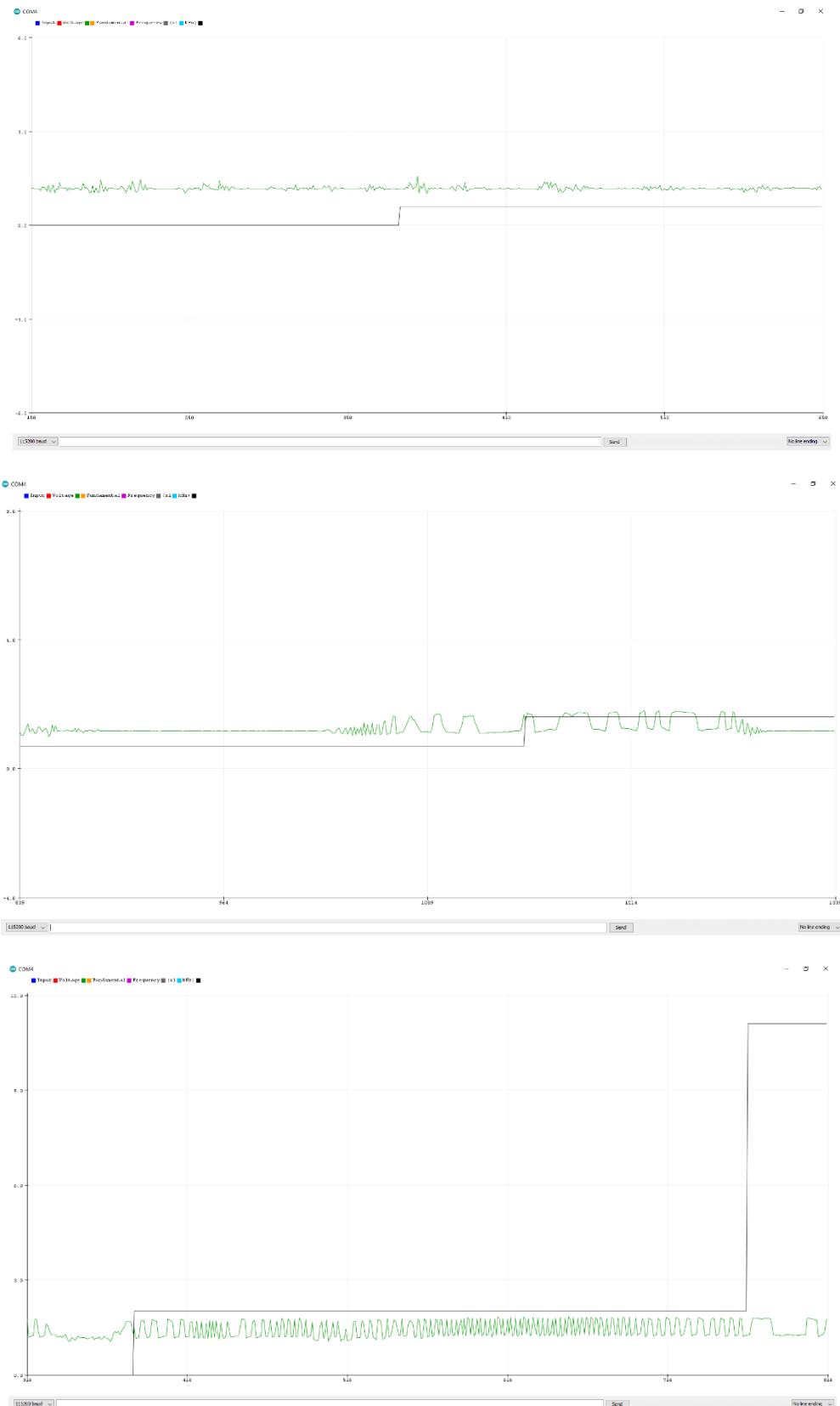
Στο βασικό κορμό του προγράμματος, έχουν προστεθεί, επιπλέον, οι συναρτήσεις :

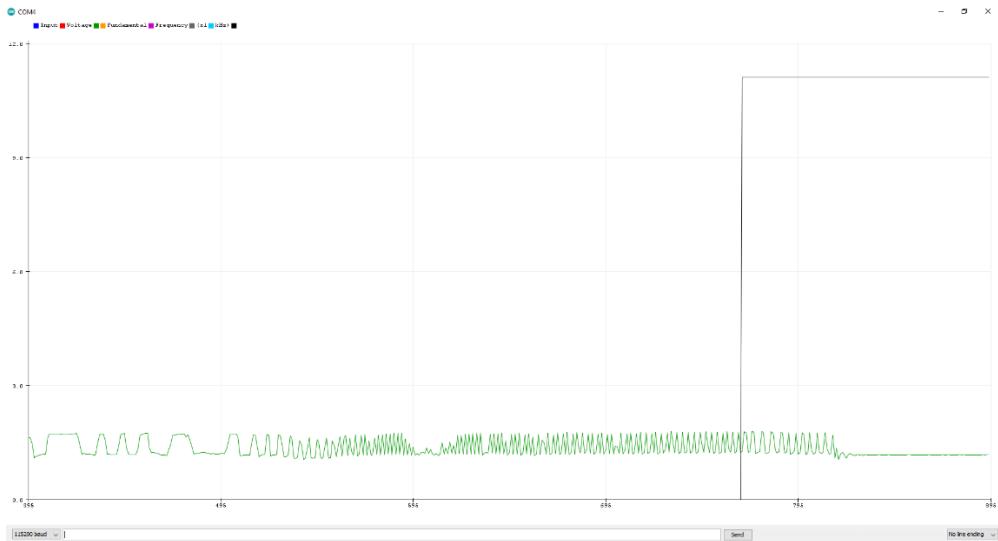
- **void wakeUpCallback()** : καλείται κατά την αφύπνιση του μικροελεγκτή και συνδέεται άμεσα με την εντολή attachInterrupt. Η συνάρτηση αυτή πρέπει πάντοτε να υπάρχει, ακόμη και αν δεν εκτελεί κάποια διεργασία, προκειμένου να λειτουργήσει σωστά το interrupt. Εν προκειμένω, γίνεται ξανά attach του pin PD2 ως interrupt και μηδενίζεται ο χρόνος countWorkingTime, έτσι ώστε να επαναληφθεί το φαινόμενο ύπνου όποτε χρειαστεί.
- **void LowerAudio(int filter)** : καλείται έτσι ώστε να ελλατωθεί το κέρδος στο φίλτρο που αντιστοιχεί ο αριθμός της κλήσης, δηλαδή η μεταβλητή filter. Το κέρδος ελλατώνεται ισάξια κατά 5 dB.
- **void UpperAudio(int filter)** : καλείται, όμοια με την LowerAudio, για να αυξηθεί το κέρδος του ακουστικού σήματος. Η ενίσχυση είναι, επίσης, ισάξια κατά 5 dB.

Η συνάρτηση void loop τρέχει, πλέον, τον βασικό αλγόριθμο κάνοντας χρήση των παραπάνω μεταβλητών, ορισμών και συναρτήσεων. Στην αρχή του αλγόριθμου υπολογίζεται η τιμή του σήματος εισόδου και των δειγμάτων. Ελέγχεται, με το τρόπο αυτό, εάν έχει τελειώσει ένα κύκλος δειγματοληψίας 363 σημείων και συνεχίζεται ο υπολογισμός της βασικής συχνότητας. Όσο η συσκευή δεν ανιχνεύει 363 σημεία, συνεχίζει να υπολογίζει το πλήθος των ενεργών κύκλων. Υπάρχει πιθανότητα, λόγω θορύβου, η στάθμη του ήχου να μην αλλάζει, ωστόσο να γίνονται άσκοπες διελεύσεις από το σημείο της τάσης πόλωσης. Επειδή, το κριτήριο λειτουργίας της συσκευής είναι η αλλαγή στην ηχοστάθμη, τοποθετείται ένα εύρος 0.4V peak-peak εντός του οποίου θεωρούνται σχετικά μηδενικές οι μεταβολές ηχοστάθμης. Εφόσον ανιχνευθούν τιμές εκτός του εύρους αυτού, θεωρείται πως συμβαίνει κάποια σημαντική αλλαγή στην ηχοστάθμη του χώρου, οπότε μηδενίζεται ο μετρητής, παρατείνοντας την ενεργή λειτουργία σε σχέση με αυτή της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Εάν, ωστόσο, παρέλθουν 10 χιλιάδες δείγματα των οποίων η στάθμη ήχου δεν αλλάζει, η συσκευή απενεργοποιεί τον ADC μετατροπέα και εισέρχεται σε κατάσταση ύπνου. Τέλος, ανά τακτά διαστήματα η συσκευή καταφέρνει να ολοκληρώσει ένα κύκλο δειγματοληψίας. Στο σημείο εκείνο, υπολογίζεται η συχνότητα δειγματοληψίας, ενώ παράλληλα, θέτονται μηδενικές οι τιμές των δειγμάτων και του χρόνου προκειμένου να ολοκληρωθεί ο επόμενος κύκλος. Με την εύρεση της θεμελιώδους συχνότητας, μπορεί να επιλεχθεί το αντίστοιχο φίλτρο εκ των τέσσερων διαθέσιμων, οπότε προγραμματίζεται το αντίστοιχο PGA. Υπενθυμίζεται πως το πρώτο φίλτρο φέρει συχνότητες μικρότερες των 500 Hz, το δεύτερο μεταξύ 500- 1000 Hz, το τρίτο μεταξύ 1000-4000 Hz, και το τέταρτο άνω των 4000 Hz. Παράλληλα, υπολογίζεται η στάθμη του ήχου σε σχέση με την πόλωση, έτσι ώστε να επιλεχθεί είτε ανύψωση είτε ελάττωσή του.

Ο υπολογισμός της βασικής συχνότητας, όπως φαίνεται στα παραδείγματα που ακολουθούν, διατηρεί σταθερή τιμή, σε σχέση με το πιο πρόσφατο υπολογισμό, έως ότου ολοκληρωθεί ένας νέος κύκλος δειγματοληψίας. Όπως αναμένεται, παρατηρείται δραματική αύξηση της συχνότητας όταν το ακουστικό σήμα φέρει υψηλές αρμονικές, ενώ περιορίζεται κάτω από 4000 Hz για περίπτωση απλής ομιλίας :

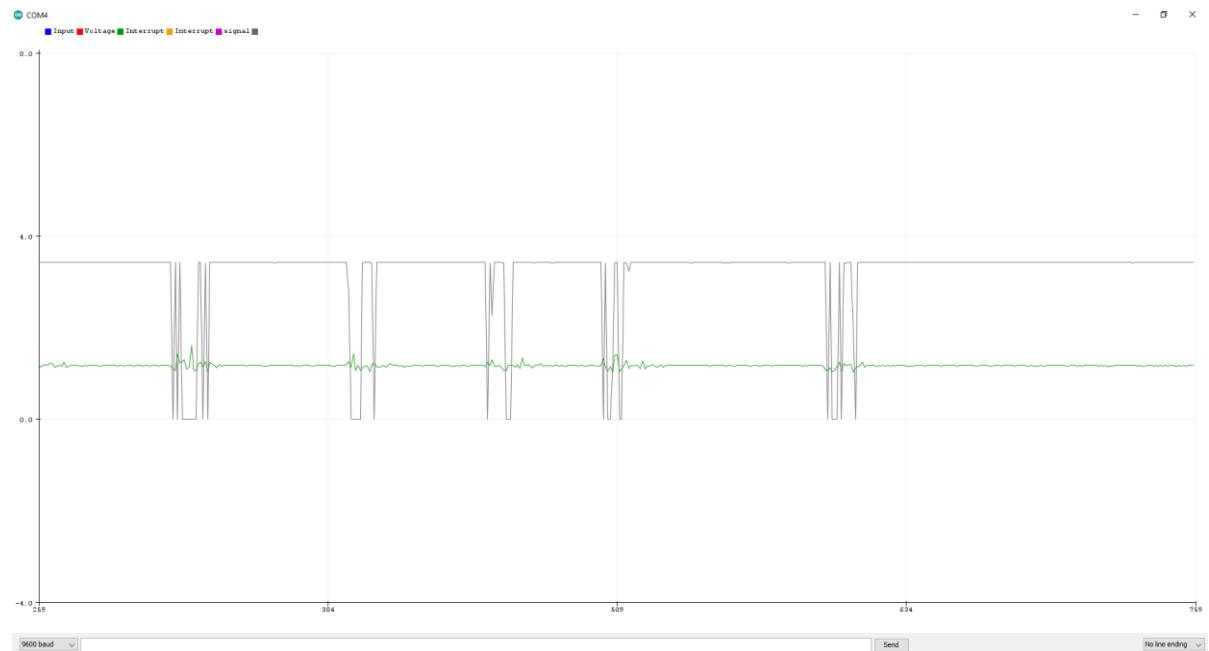
Κεφάλαιο 5 : Υλοποίηση της συσκευής

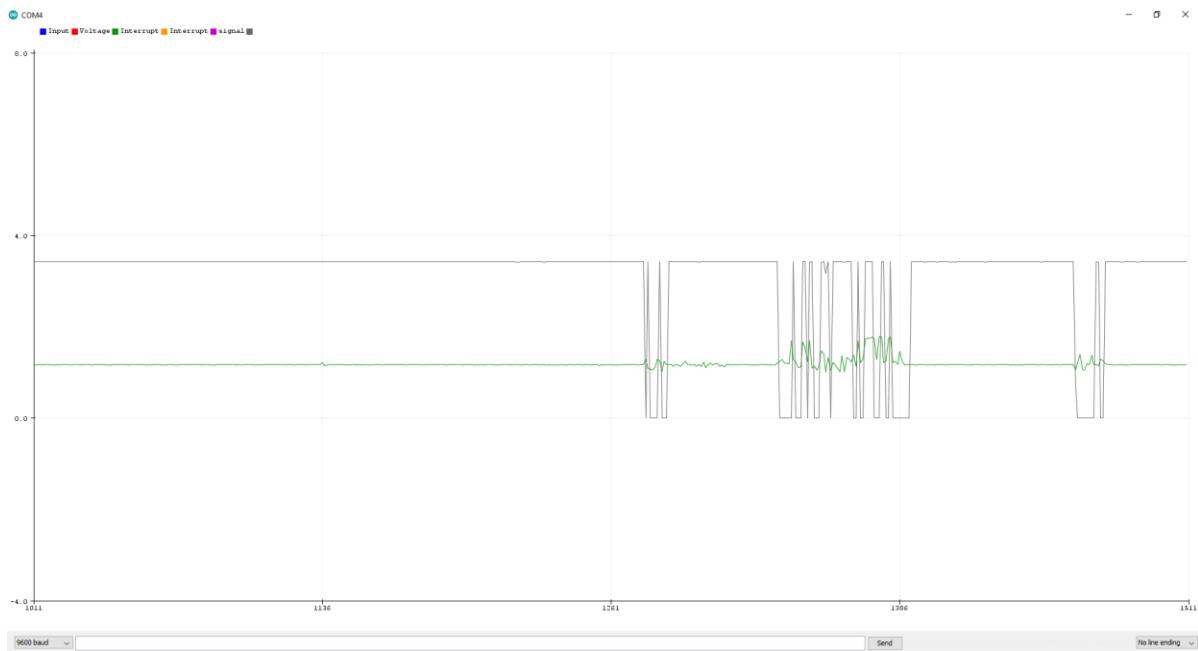




Εικόνα 5.31: Υπολογισμός της κεντρικής συχνότητας σε σχέση με τις μεταβολές του ακουστικού σήματος εισόδου. Σημειώνεται πως ο κατακόρυφος άξονας δίνει την τιμή της συχνότητας σε kHz.

Η λειτουργία αφύπνισης επαληθεύεται μετρώντας τις μεταβολές της τάσης στο pin PD2. Όπως είναι επιθυμητό, το pin διατηρεί υψηλή στάθμη για το διάστημα λειτουργίας της συσκευής και μεταβολές σε χαμηλή στάθμη αφυπνίζουν τον μικροελεγκτή. Οι μεταβολές αυτές προκύπτουν κατά την λειτουργία του συγκρητή στο κύκλωμα του envelope detector.

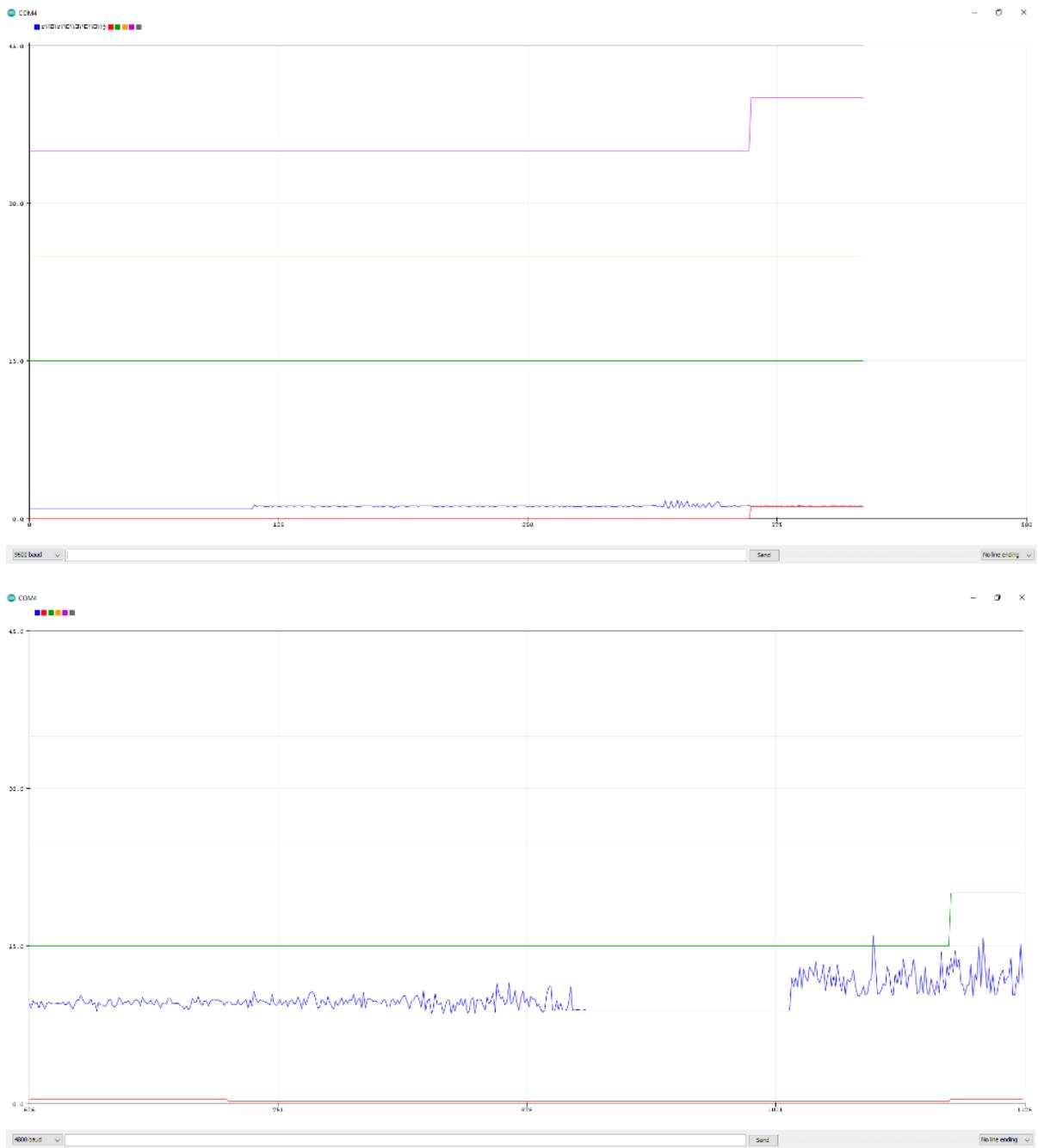




Εικόνα 5.32: Παρατηρείται μετάβαση σε *LOW* όταν ανιχνεύεται σημαντικό επίπεδο ηχοστάθμης.

Τελικά, η συσκευή λειτουργεί δυναμικά στο χρόνο, αλλάζοντας τα κέρδη των PGAs ανάλογα με την βασική αρμονική του σήματος. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, έχουν σκόπιμα τοποθετηθεί τα κέρδη των ενισχυτών σε διαφορετικές στάθμες, έτσι ώστε να γίνονται εμφανείς όποιες μεταβολές ακολουθήσουν.





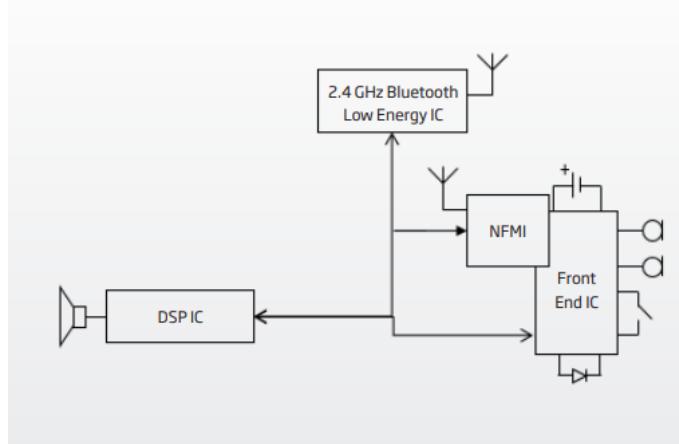
Εικόνα 5.33: Μεταβατικά στάδια των κερδών. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται να υπάρχει μία αρκετά μεγάλη συχνότητα, στη δεύτερη εικόνα μια σχετικά ενδιάμεση και στη τελευταία, είναι εμφανής πως η συχνότητα είναι πολύ μικρή, διότι παρέρχεται ένα διάστημα ύπουν των μικροελεγκτή, όπου η συνιστώσα είναι, κατά κόρο, *dc*.

Κεφάλαιο 6: Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοΐας και τελικά συμπεράσματα

6.1 Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοΐας

Τα ακουστικά βαρηκοΐας έχουν δεχθεί δραματική πρόοδο, ως προς τη δομή και τη λειτουργία τους, τη τελευταία δεκαετία. Στις νέες αρχιτεκτονικές σχεδίασης έχουν αξιοποιηθεί τεχνικές ασύρματης διάδοσης, αλγόριθμοι ακύρωσης ενεργού θορύβου (ANC – Active Noise Cancellation) και μια πληθώρα αρχιτεκτονικών ψηφιακής επεξεργασίας, η οποία αποσκοπεί στην καλύτερη ποιότητα ήχου. Επιπλέον, παρέχονται λειτουργίες οι οποίες είναι user-friendly. Έτσι, ο χρήστης ρυθμίζει την ένταση που παρέχεται στον ήχο και επιλέγει την λειτουργία του ακουστικού σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο. Στο τομέα αυτό, έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα οι εταιρείες κατασκευής ακουστικών βαρηκοΐας Resound, Phonak και Oticon. Η τελευταία, είναι η πρώτη που ενσωματώνει πρωτόκολλα ασύρματης διάδοσης, όπως το Bluetooth⁴⁰, προκειμένου να γίνει μεταφορά δεδομένων, όπως η μουσική, από κινητές συσκευές.

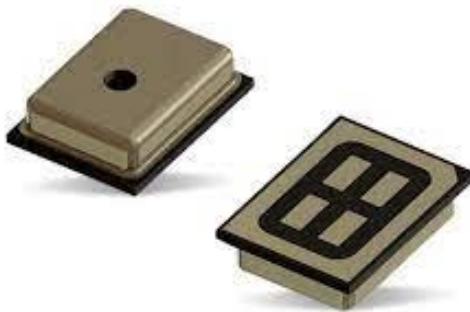
Στο προσεχές μέλλον, αναμένονται περισσότερες εξελίξεις στο συγκεκριμένο τεχνολογικό κλάδο. Με την ανάπτυξη νέων τεχνικών επεξεργασίας, μικροεπεξεργαστών ειδικού σκοπού και της τεχνολογίας FPGA, είναι εφικτή η κατασκευή ολοένα πιο αποδοτικών ακουστικών βαρηκοΐας. Παράλληλα, σχεδιάζονται τύπου MEMS⁴¹ μικρόφωνα και μεγάφωνα, ικανά να ενσωματωθούν εντός πολύ μικρού χώρου. Τα τελευταία, είναι μικρόφωνα και μεγάφωνα, τα οποία, συνήθως, φέρουν εσωτερικό προενισχυτή σήματος και ADC/DAC μετατροπέα, παρέχοντας τις καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα αναλογικά εξαρτήματα.



Εικόνα 6.1: Η αρχιτεκτονική Velox αξιοποιεί το πρωτόκολλο Bluetooth

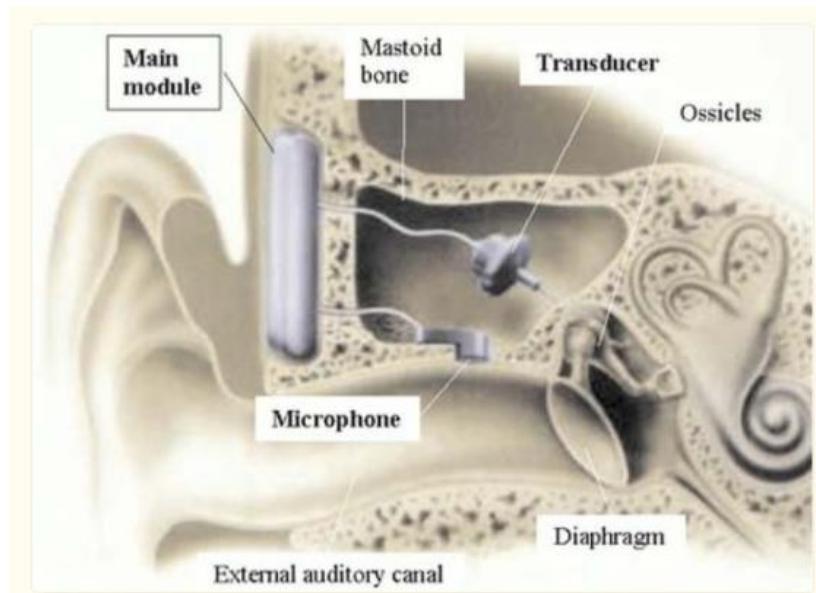
⁴⁰ Weile J.N & Bach R., (2016). *The Velox Platform*

⁴¹ Siti A.Z, Azrul Z.H, Burhanuddin Y.M. & Faisal M.Y. 3, (2020). *A Review of MEMS Capacitive Microphones*



Εικόνα 6.2: Μικρόφωνα τύπου MEMS

Τέλος, αναμένεται μεγάλη εξέλιξη στο τομέα αυτό, εξαιτίας της εφαρμογής της χειρουργικής και των εμφυτευμάτων. Αυτή τη στιγμή, εκτελούνται επεμβάσεις στο επίπεδο του κοχλία, όπου συνδέονται ακουστικά βαρηκοΐας υπό τη μορφή εμφυτεύματος. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως είναι μια πρώιμη μορφή τεχνολογίας, η οποία δεν φέρει πάντοτε τα επιθυμητά αποτελέσματα, και τουναντίον, μπορεί να είναι επικίνδυνη για το βαρήκοο άτομο⁴². Ορισμένες έρευνες σχετίζονται με την εμφύτεψη ακουστικών βαρηκοΐας και στο μέσο ους. Σύμφωνα με αυτές, υπάρχουν ενδείξεις για την επιτυχή αντιμετώπιση δυσκολιών στην επικοινωνία με τη χρήση των γνωστών τεχνικών ενίσχυσης.



Εικόνα 6.3: Εμφύτευμα ενισχυτή στο κοχλία⁴³

⁴² URL : <https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/cochlear-implant-surgery>

⁴³ Haynes D.S, Young J.A., Wanna G.B. & Glasscock M.E., (2009). *Middle Ear Implantable Hearing Devices: An Overview*

6.2 Συμπεράσματα και βελτίωση του πρωτότυπου στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας

Τα αποτελέσματα της συσκευής ακουστικού βοηθήματος της διπλωματικής, αυτής, εργασίας ήταν σχετικά αναμενόμενα, όχι όμως πλήρως ικανοποιητικά. Η συσκευή, πράγματι, λειτουργεί στο εύρος των ακουστικών συχνότητων που επιβάλλεται και τα γραφήματα πραγματικού χρόνου αποδεικνύουν την ορθή λειτουργία του κυκλώματος. Ωστόσο, η ποιότητα του ήχου, είναι σχετικά μέτρια έως χαμηλή. Η απόσταση κάλυψης βρίσκεται περίπου στα 2 μέτρα για τις υψηλές συχνότητες και 0.5 μέτρα για τις χαμηλές. Επιπλέον, είναι αισθητή μικρή στάθμη θορύβου, η οποία δεν είναι ενοχλητική.

Η κάλυψη του μικροφώνου εξαρτάται κυρίως από τις προδιαγραφές του και την επιμέρους ενίσχυση. Το μικρόφωνο υπενθυμίζεται πως είναι παντοκατευθυντικό και, για το λόγο αυτό, είναι εύκολο να υπερθέτονται ηχητικά κύματα από όλες τις κατευθύνσεις, αυξάνοντας τη στάθμη θορύβου. Επίσης, εξαιτίας της πλακέτας, οι ήχοι οι οποίοι προέρχονται πίσω από το μικρόφωνο, ανακλώνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι ελάχιστα, έως καθόλου, ακουστοί. Ιδανικά, θα ήταν επιθυμητή η κάλυψη του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις και στις μικρές συχνότητες.

Όπως διαπιστώθηκε στην επανεξέταση του κυκλώματος, είναι πιθανό να χρειαστούν φίλτρα με, όσο το δυνατόν, πιο κατακόρυφες αποκρίσεις στις συχνότητες αποκοπής. Εξαιτίας των αναλογικών φίλτρων, εμφανίζεται θόρυβος στο κύκλωμα ο οποίος δύσκολα απομονώνεται. Αντίθετα, η ψηφιακή επεξεργασία σημάτων είναι ικανή να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε πρόβλημα, είναι πιο σταθερή, καταναλώνει λιγότερη ισχύ και υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στις τιμές του σήματος⁴⁴. Αυτή η λειτουργία, όμως, ήταν από την αρχή ένα βασικό μειονέκτημα του μικροελεγκτή. Παρά το γεγονός πως η ADC μετατροπή είναι σχετικά καλής ακρίβειας, υπάρχει περιορισμός στο εύρος των παλμών PWM. Έτσι, ακόμη και αν είχε σχεδιασθεί το σύστημα επεξεργασίας εντός του μικροελεγκτή, ο οποίος φέρει επιπλέον μειωμένες επεξεργαστικές δυνατότητες, θα ήταν πρακτικά αδύνατη η ανακατασκευή του ακουστικού σήματος στην έξοδο για συχνότητες άνω των 980 Hz περίπου.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να επιλυθούν, σε ικανοποιητικό επίπεδο, με τη χρήση ψηφιακών μικροεπεξεργαστών/μικροελεγκτών που φέρουν αρκετή επεξεργαστική ισχύ, μικρό latency μεταξύ σημάτων εισόδου – εξόδου και κατάλληλες μονάδες μνήμης για την εγγραφή πολύπλοκων προγραμμάτων. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση chips ADC, DAC και μνήμης EEPROM σε συνδυασμό με ένα IC τύπου FPGA. Τα FPGA επεξεργάζονται ψηφιακά σήματα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, διότι η αρχιτεκτονική τους καθορίζεται από γλώσσα περιγραφής υλικού (HDL). Σε πολλές εφαρμογές, τα FPGA συνεργάζονται με κάποιο μικροελεγκτή πολλών δυνατοτήτων. Ακόμη μία εναλλακτική προσέγγιση, είναι η χρήση του module Teensy 3.6. Το συγκεκριμένο module υποστηρίζει το Arduino IDE, δηλαδή μπορεί να δεχθεί κώδικα από την ίδια πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε εν προκειμένω, και έχει πολλές δυνατότητες σε audio εφαρμογές. Η χρήση του εκτιμήθηκε κατά την έναρξη της διπλωματικής εργασίας, ωστόσο υπήρχε σαφής έλλειψη του στο εμπόριο. Τέλος,

⁴⁴ URL : <https://www.ecstuff4u.com/2017/12/difference-between-analog-and-digital.html>

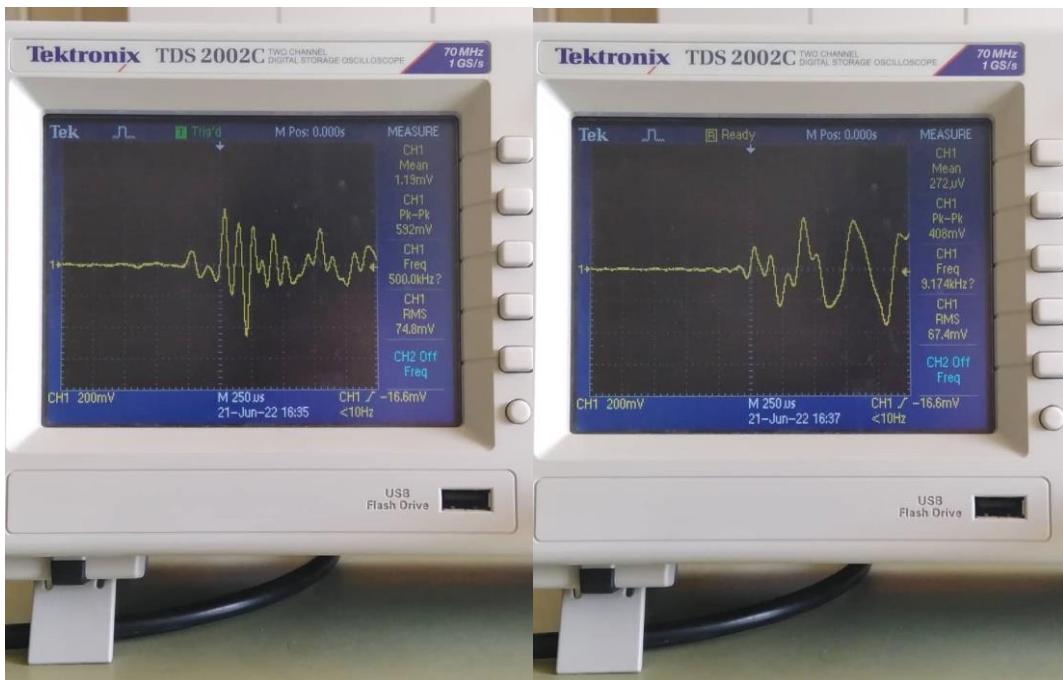
Κεφάλαιο 6 : Τεχνολογική εξέλιξη των ακουστικών βαρηκοΐας και τελικά συμπεράσματα

μπορούν να αξιοποιηθούν αλγόριθμοι εκτίμησης της στάθμης σήματος ή ANC, ενώ χρησιμοποιούνται δύο ή παραπάνω μικρόφωνα, για την ελάττωση του θορύβου.



Εικόνα 6.4: Teensy 3.6

Οι παραπάνω τεχνικές απαιτούν ενασχόληση σε βάθος χρόνου και η εφαρμογή τους έχει αξία σε ειδικές περιπτώσεις. Βασικός στόχος της εργασίας ήταν η επαφή με ένα σχετικά απλό πραγματικό πρόβλημα, η επίλυσή του με πρωτότυπη συσκευή και η απόκτηση πρακτικής εμπειρίας σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Στο διάστημα εκπόνησης της εργασίας, μελετήθηκαν τεχνικές σχεδιασμού ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, έγιναν προσομοιώσεις και εκτιμήσεις σχετικά με την λειτουργία της συσκευής, σχεδιάσθηκε η πλακέτα PCB με τη βοήθεια εξωτερικών κατασκευαστών, έγινε η κόλληση των υλικών από τον φοιτητή και υλοποιήθηκε firmware στο μικροελεγκτή του συστήματος. Τέλος, κατά το διάστημα δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός εξοπλισμός -πολύμετρο, παλμογράφος, γεννήτρια συχνοτήτων και τροφοδοτικό- για την διεκπεραίωση των ηλεκτρικών μετρήσεων σήματος και ισχύος⁴⁵.



Εικόνα 6.5: Ενδεικτικές μετρήσεις/καταγραφές του σήματος φωνής με την βοήθεια παλμογράφου

⁴⁵ Ψωμόπουλος Κ.Στ., (2013). Ηλεκτρικές μετρήσεις

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

Κόντου Β., (2009). *Βαρηκοϊα – Κώφωση*, Ιωάννινα

Βαρανάκη Μ. Ε. & Τραγομαλά Ι. & Τσουλέλλη Μ., (2019). *Αντικειμενικές ακουστικές μετρήσεις φωνής σε καπνιστές και μη και των δυο φύλων, ηλικίας 25-35*, Πάτρα

Gray P.R, Hurst P.J, Lewis S.H & Meyer R.G, (2006). *Ανάλυση και Σχεδίαση Αναλογικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων*

Alexander C.K. & Sadiku M.N.O, (2017). *Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα*

Μάργαρης Ν.Ι, (2017). *Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων*

Rabaey J.N, Chandrakasan A. & Nikolic B., (2006). *Ψηφιακά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα - Μια σχεδιαστική προσέγγιση*

Kasap.S.O., (2004). *Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων*

Razavi B., (2018). *Βασικές αρχές Μικροηλεκτρονικής*

Jaeger R.C & Blalock T.N., (2019). *Μικροηλεκτρονική Σχεδίαση Κυκλωμάτων*

Πεκμεστζή Κ., (2009). *Συστήματα Μικροϋπολογιστών II - Μικροελεγκτές AVR και PIC*, Αθήνα

Σκαρλάτος Δ., (2018). *Εφαρμοσμένη ακουστική - Ηχοπροστασία*

Ματσούκα Π., (2007). *Τεχνικές Συμπίεσης για Άτομα με Πρόβλημα Βαρηκοϊας*

Μάργαρης Α.Ι, (2019). *Σήματα & Συστήματα - Συνεχούς & Διακριτού Χρόνου*

Καφεντζής Γ.Π., (2019). *Επεξεργασία σήματος συνεχούς & διακριτού χρόνου - Μια πρώτη εισαγωγή*

Μουστακίδης Γ.Β, (2019). *Βασικές Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων*

Σκιαδάς Ν. *Εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των μικροφώνων*

Μουρτζόπουλος Γ., (2021). *Ηλεκτροακουστική – I. Ακουστική, ακοή, τεχνολογία ήχου*

Ψωμόπουλος Κ.Στ., (2013). *Ηλεκτρικές μετρήσεις*

Ξενόγλωσση

Stephen J E. & A Shera C., (2013). *The cochlea as a smart structure*

Isiaka A. Alimi, (2015). Performance Improvement of Digital Hearing Aid Systems

Le Goff N., (2015). Amplifying soft sounds – a personal matter, Oticon

Love Callaway S., (2016). Feedback shield LX and Feedback Analyser, Oticon

Rhijn A. (2003). Integrated Circuits for High Performance Electret Microphones, USA

Texas Instruments, (2002). Analysis of the Sallen-Key Architecture

Weile J.N & Bach R., (2016). The Velox Platform

Siti A.Z, Azrul Z.H, Burhanuddin Y.M. & Faisal M.Y. 3, (2020). A Review of MEMS Capacitive Microphones

Haynes D.S, Young J.A., Wanna G.B. & Glasscock M.E., (2009). Middle Ear Implantable Hearing Devices: An Overview

URLs

<https://akouson.gr/enimerotheite/afti/>

<https://www.speechhearingcenter.com/degreehearingloss>

<https://orltsounis.gr/%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CF%85%CF%8C%CE% B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1/>

<https://www.akouste.gr/index.php/varikoia/typoi-akoustikon-varikoias>

https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law

<https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>

<https://www.electronics-lab.com/project/installing-the-arduino-bootloader-on-the-atmega328p-microcontroller/>

https://create.arduino.cc/projecthub/yeshvanth_muniraj/analog-to-digital-converter-module-of-atmega328p-e255ea

<https://www.cuidevices.com/blog/understanding-audio-jack-switches-and-schematics>

<https://vlab.amrita.edu/?sub=3&brch=106&sim=241&cnt=1>

<https://www.altium.com/documentation/altium-nexus/understanding-printed-circuit-board-makeup?version=1.1>

<https://education.altium.com/>

https://www.pcbgogo.com/Blog/PCB_Trace__Everything_You_Need_To_Know

<https://www.youtube.com/watch?v=nPx2iqmVAHY&t=996s>

<https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/cochlear-implant-surgery>

<https://www.ecstuff4u.com/2017/12/difference-between-analog-and-digital.html>

Παράρτημα

Κατασκευαστικά φυλλάδια

"18650" LITHIUM-ION BATTERY HOLDERS



THM Leaf Springs
1043
1049 (Dual Cell)
Not Shown



THM Polarized
1043P
1049P (Dual Cell)
Not Shown



Solder Lugs*
1044
1047 (Dual Cell)
Not Shown



SMT Leaf Springs
1042
1048 (Dual Cell)
Not Shown



SMT Polarized
1042P
1048P (Dual Cell)
Not Shown

FEATURES
APPLICATIONS

- * Low profile surface mount holder for cylindrical Lithium and alkaline batteries
- UL 94V-0 heat resistant nylon housing well suited for reflow soldering
- Battery installation and removal does not require tools
- Securely holds battery in place

- Accommodates cells with or without built-in PCB protection circuits
- Polarity clearly marked for orientation
- Polarized holders available for protection against improper battery installation

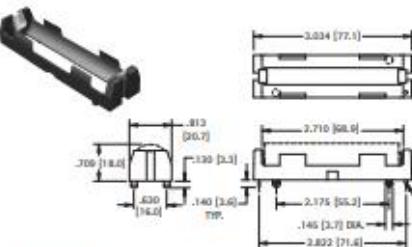
Operating Temp Range:
-60°F to +290°F (-50°C to +145°C)



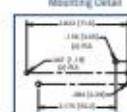
PC Battery Clip Available
See Page 11.

THRU HOLE MOUNT
SURFACE MOUNT

SINGLE CELL

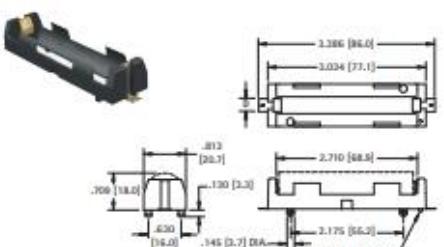


Mounting Detail

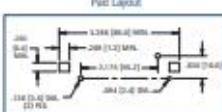


SPECIFICATIONS
Basic: High Temp Nylon 46, UL 94V-0
Contacts: .012 (.30) Stainless Steel, Tin-Nickel Plate
CAT. NO. 1043 Leaf Spring
CAT. NO. 1043P Polarized Holder
CAT. NO. 1044 Solder Lugs *see image above
Packaging Specs: 50 pieces per tray

SINGLE CELL

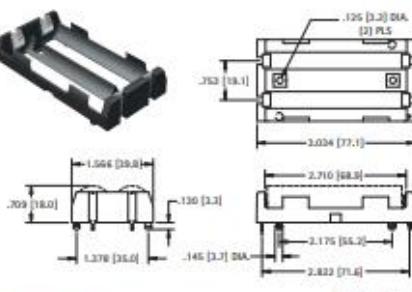


Pad Layout



SPECIFICATIONS
Basic: High Temp Nylon 46, UL 94V-0
Contacts: .012 (.30) Stainless Steel, Gold Plate (Flash)
CAT. NO. 1042 Leaf Spring
CAT. NO. 1042P Polarized Holder
Packaging Specs: 50 pieces per tray

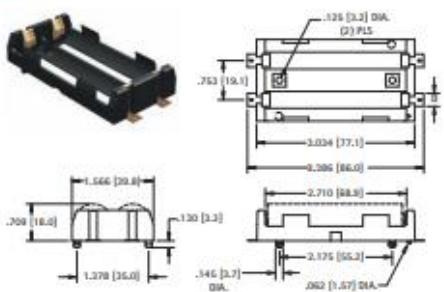
DUAL CELL



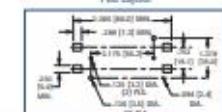
Mounting Detail



SPECIFICATIONS
Basic: High Temp Nylon 46, UL 94V-0
Contacts: .012 (.30) Stainless Steel, Tin-Nickel Plate
CAT. NO. 1049 Dual Springs
CAT. NO. 1049P Polarized Holder
CAT. NO. 1047 Solder Lugs *see image above
Packaging Specs: 25 pieces per tray



Pad Layout



SPECIFICATIONS
Basic: High Temp Nylon 46, UL 94V-0
Contacts: .012 (.30) Stainless Steel, Gold Plate (Flash)
CAT. NO. 1048 Dual Springs
CAT. NO. 1048P Polarized Holder
Packaging Specs: 25 pieces per tray

KEYTEK
www.keytekco.com

RoHS COMPLIANT ~ ISO 9001 CERTIFIED
31-07 20th Road - Astoria, NY 11105-2017

"18650" LITHIUM-ION BATTERY HOLDERS

27

Εικόνα Π.1: Θήκη μπαταρίας τύπου 18650

94



Μπαταρία Λιθίου 18650 3.7V - 3300mAh XTAR

από [XTAR](#)

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ Δεν είναι συμβατή με Ηλεκτρονικά τσιγάρα.

Κωδικός: 05-01865036

Κατασκευαστής: XTAR
Part Number: XTAR-18650-3300
Χώρα Προέλευσης: Κίνα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Κατασκευαστής : XTAR
- Part Number: XTAR-18650-3300
- Χώρα Προέλευσης: Κίνα
- Χημική Σύσταση: Lithium-Ion (Li-Ion)
- Τάση Μπαταρίας: 3.7Volt
- Χωρητικότητα: 3300mAh
- Τύπος Μπαταρίας: 18650
- Συσκευασία: 1Τεμ.

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">Protection: PCB protection<ul style="list-style-type: none">Anti-overloadOvercharging protectionDischarge belowShort-circuit | <ul style="list-style-type: none">Maximum current: 10ALeads: NoneRechargeable batteries features: Button/Nipple TopDimensions: Ø18.6x70mmStorage time to 500 cycles |
|---|---|

Εικόνα ΙΙ.2: Μπαταρία τύπου 18650

Resistance Weld Thru-Hole Crystal

Model: HC49SLF

RoHS Compliant / Pb Free

Rev. 6/2/2009

Page 1 of 2

http://www.foxonline.com/need_a_sample.htm

**FEATURES**

- Low Cost
- Stocking Standard (see page 2)
- Fundamental to 40 MHz
- Resistance Weld

OPTIONS

- Tolerances to 10 PPM
- Stabilities to 5 PPM
- Temperatures to -40°C ~ +105°C
- 2.5mm Height Max (HC49SSLF)

PART NUMBER Learn More - Internet Required

Part Number	Model Number	Frequency Range (MHz)
277LF-Frequency-xxxxx	HC49SLF	3.200 ~ 70.000

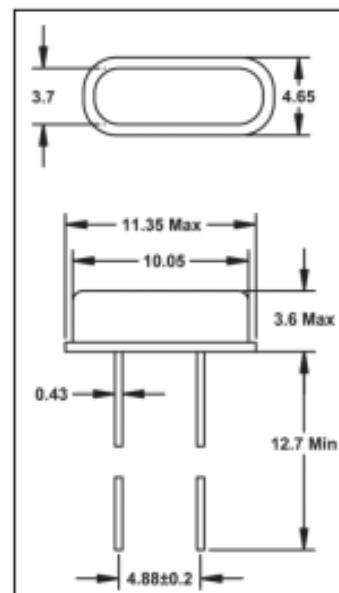
STANDARD SPECIFICATIONS¹

PARAMETERS	MAX (unless otherwise noted)
Frequency Range	3.200 ~ 70.000 MHz
Frequency Tolerance @ 25°C	±50 PPM ²
Frequency Stability, ref @ 25°C Over Operating Temp Range	±50 PPM ¹
Temperature Range	
Operating (TOPR)	-20°C ~ +70°C
Storage (TSTG)	-40°C ~ +85°C
Shunt Capacitance (Co)	7.0 pF
Load Capacitance (CL)	10 pF ~ Series (Customer Specified)
Drive Level	0.5 mW
Aging per year	±5 PPM

¹ Other tolerances, stabilities & operating temperature ranges available. Consult Fox Customer Service for specific requirements.

² Crystal has a ±30ppm tolerance specification for all standard part numbers. These part numbers are listed on page 2 of this datasheet.

All specifications subject to change without notice.



All dimensions are in millimeters.

TERMINATION FINISH: Sn/3.0Ag/0.5Cu

Frequency Range (MHz)	Operating Mode	Max ESR Ω
3,200 ~ 3,500	Fundamental	300
3,500+ ~ 4,000	Fundamental	200
4,000+ ~ 5,000	Fundamental	150
5,000+ ~ 6,000	Fundamental	120
6,000+ ~ 7,000	Fundamental	100
7,000+ ~ 9,000	Fundamental	80
9,000+ ~ 13,000	Fundamental	60
13,000+ ~ 20,000	Fundamental	40
20,000+ ~ 40,000	Fundamental	30
27,000 ~ 70,000	3rd OT	100

FOXElectronics 5570 Enterprise Parkway Fort Myers, Florida 33905 USA +1.239.693.0099 FAX +1.239.693.1554 http://www.foxonline.com
EMEA Tel/Fax: +44.1707.312632 | Asia Hong Kong Tel: +852.2854.4285 Fax +852.2854.4282 | Japan Tel: +81.3.3374.2079 Fax: +81.3.3374.5221
© 2009 FOX ELECTRONICS | ISO9001-2000 Certified

Εικόνα Π.3: Κρύσταλλος των 16 MHz

Axial-Lead Fast-Recovery Rectifiers

Axial-lead, fast-recovery rectifiers are designed for special applications such as dc power supplies, inverters, converters, ultrasonic systems, choppers, low RF interference and free wheeling diodes. A complete line of fast recovery rectifiers having typical recovery time of 150 nanoseconds providing high efficiency at frequencies to 250 kHz.

Mechanical Characteristics

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 gram (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 220°C Max. for 10 Seconds, 1/16" from case
- Shipped in plastic bags, 1000 per bag.
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a "RL" suffix to the part number
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band
- Marking: 1N4933, 1N4934, 1N4935, 1N4936, 1N4937

**1N4933
thru
1N4937**

1N4935 and 1N4937 are
Motorola Preferred Devices

**FAST RECOVERY
RECTIFIERS
50-600 VOLTS
1.0 AMPERE**



MAXIMUM RATINGS (1)

Rating	Symbol	1N4933	1N4934	1N4935	1N4936	1N4937	Unit
*Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V _{RRM} V _{RWM} V _R	50	100	200	400	600	Volts
*Non-Repetitive Peak Reverse Voltage RMS Reverse Voltage	V _{RSM} V _{R(RMS)}	75 35	150 70	250 140	450 280	650 420	Volts
*Average Rectified Forward Current (Single phase, resistive load, $T_A = 75^\circ\text{C}$) (2)	I _O			1.0			Amp
*Non-Repetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions)	I _{FSM}			30			Amps
Operating Junction Temperature Range Storage Temperature Range	T _J T _{Stg}			–65 to +150	–65 to +150		°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient (Typical Printed Circuit Board Mounting)	R _{θJC}	65	°C/W

* Indicates JEDEC Registered Data for 1N4933 Series.

(1) Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

(2) Derate by 20% for capacitive loads.

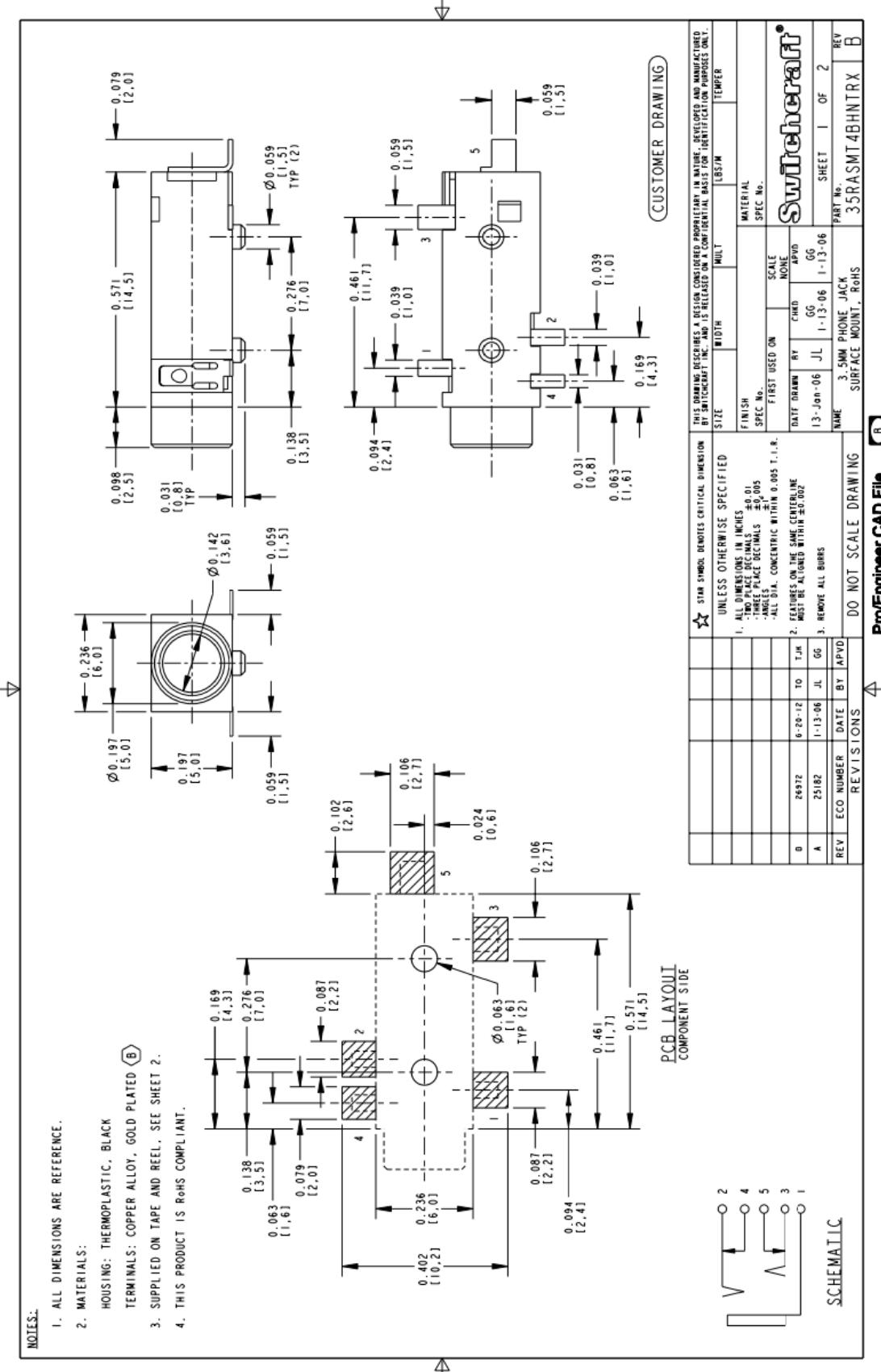
Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

Rev 3

© Motorola, Inc. 1996



Εικόνα Ι.4: Δίοδος





3680 Wyse Road
Dayton Ohio 45414-5802
Phone: 937-918-2200
Fax: 937-918-2206
Audio@ProjectsUnlimited.com

Part Number: POM-2738P-R



Features

Omnidirectional
Super clarity, distortion-free response
Pin type mounting
This part is RoHS 2002/95/EC Compliant

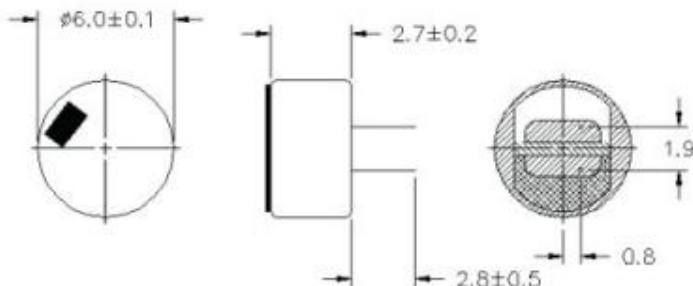
Electrical Specifications

Directivity	Omnidirectional
Impedance	2.2 kOhm
Operating Voltage	2 Vdc
Package Size	6 x 2.7 mm
Sensitivity	-38 +/- 3 dB

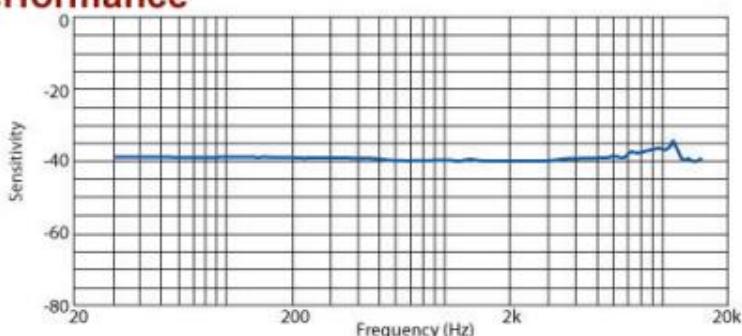
Environmentally friendly

Mechanical

Dimensions are in millimeters, tolerance is ± 0.5 unless otherwise specified.



Performance



For application notes and detail drawing specifications, please consult www.projectsunlimited.com.

Specifications subject to change without notice.

© 2006, Projects Unlimited Inc., All Rights Reserved.

Εικόνα Π.6: Παντοκατευθυντικό μικρόφωνο Electret



LTC6910-1/
LTC6910-2/LTC6910-3

Digitally Controlled Programmable Gain Amplifiers in SOT-23

FEATURES

- 3-Bit Digital Gain Control in Three Gain-Code Options
- Rail-to-Rail Input Range
- Rail-to-Rail Output Swing
- Single or Dual Supply: 2.7V to 10.5V Total
- 11MHz Gain Bandwidth Product
- Input Noise Down to $8nV/\sqrt{Hz}$
- System Dynamic Range to 120dB
- Input Offset Voltage: 1.5mV
- 8-Pin Low Profile (1mm) SOT-23 (ThinSOT™) Package

APPLICATIONS

- Data Acquisition Systems
- Dynamic Gain Changing
- Automatic Ranging Circuits
- Automatic Gain Control

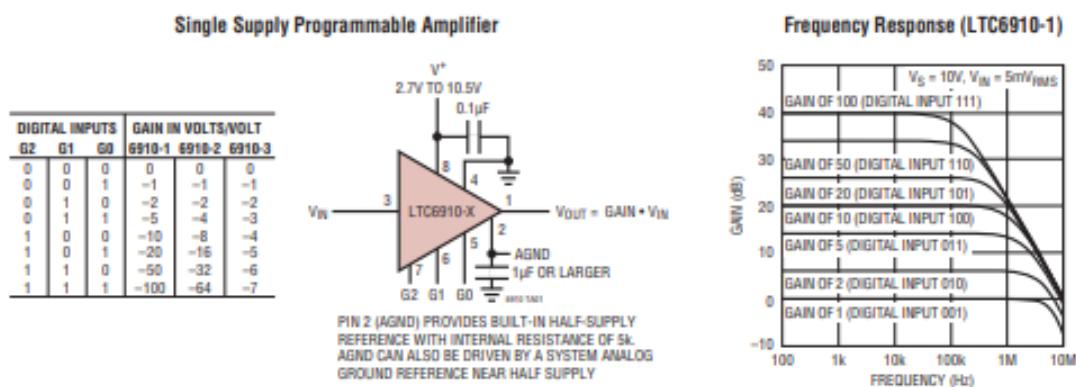
DESCRIPTION

The LTC®6910 family are low noise digitally programmable gain amplifiers (PGAs) that are easy to use and occupy very little PC board space. The inverting gain is adjustable using a 3-bit digital input to select gains of 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50 and 100V/V in the LTC6910-1; 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32 and 64V/V in the LTC6910-2; and 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7V/V in the LTC6910-3.

The LTC6910-Xs are inverting amplifiers with rail-to-rail output. When operated with unity gain, they will also process rail-to-rail input signals. A half-supply reference generated internally at the AGND pin supports single power supply applications. Operating from single or split supplies from 2.7V to 10.5V, the LTC6910-X family is offered in an 8-lead SOT-23 package.

LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks and ThinSOT is a trademark of Analog Devices, Inc. All other trademarks are the property of their respective owners. Protected by U.S. patents, including 6121908.

TYPICAL APPLICATION



For more information www.linear.com/LTC6910

Εικόνα Η.7: Ψηφιακά προγραμματιζόμενος αναλογικός ενισχυτής (PGA)



MICROCHIP

MCP6001/2/4

1 MHz, Low-Power Op Amp

Features

- Available in SC-70-5 and SOT-23-5 packages
- Gain Bandwidth Product: 1 MHz (typ.)
- Rail-to-Rail Input/Output
- Supply Voltage: 1.8V to 5.5V
- Supply Current: $I_Q = 100 \mu A$ (typ.)
- Phase Margin: 90° (typ.)
- Temperature Range:
 - Industrial: -40°C to +85°C
 - Extended: -40°C to +125°C
- Available in Single, Dual and Quad Packages

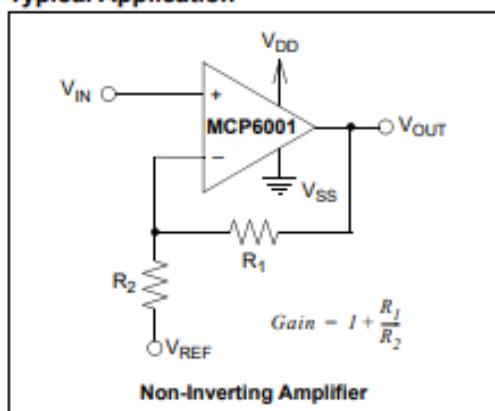
Applications

- Automotive
- Portable Equipment
- Photodiode Amplifier
- Analog Filters
- Notebooks and PDAs
- Battery-Powered Systems

Available Tools

SPICE Macro Models (at www.microchip.com)
FilterLab® Software (at www.microchip.com)

Typical Application

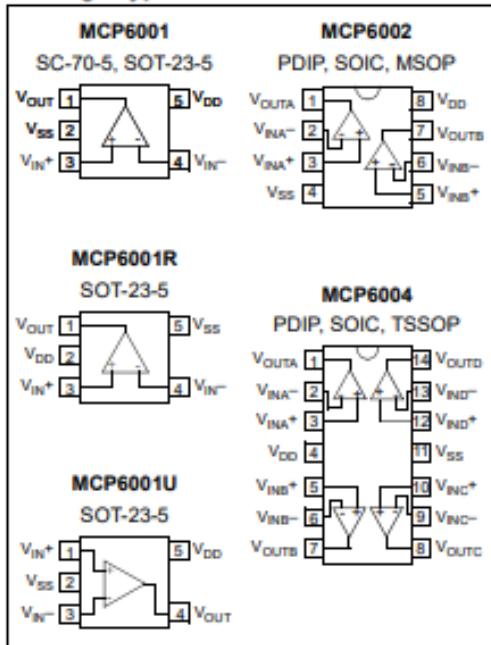


Description

The Microchip Technology Inc. MCP6001/2/4 family of operational amplifiers (op amps) is specifically designed for general-purpose applications. This family has a 1 MHz Gain Bandwidth Product (GBWP) and 90° phase margin (typ.). It also maintains 45° phase margin (typ.) with a 500 pF capacitive load. This family operates from a single supply voltage as low as 1.8V, while drawing 100 μA (typ.) quiescent current. Additionally, the MCP6001/2/4 supports rail-to-rail input and output swing, with a common mode input voltage range of $V_{DD} + 300 \text{ mV}$ to $V_{SS} - 300 \text{ mV}$. This family of op amps is designed with Microchip's advanced CMOS process.

The MCP6001/2/4 family is available in the industrial and extended temperature ranges, with a power supply range of 1.8V to 5.5V.

Package Types



Product
FolderSample &
BuyTechnical
DocumentsTools &
SoftwareSupport &
CommunityReference
DesignOPA134, OPA2134, OPA4134
SBOS058A – DECEMBER 1997 – REVISED OCTOBER 2015

OPAx134 SoundPlus™ High Performance Audio Operational Amplifiers

1 Features

- Superior Sound Quality
- Ultra Low Distortion: 0.00008%
- Low Noise: 8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- True FET-Input: $I_B = 5\text{pA}$
- High Speed:
 - Slew Rate: 20 V/ μs
 - Bandwidth: 8 MHz
- High Open-Loop Gain: 120 dB (600 Ω)
- Wide Supply Range: $\pm 2.5\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$
- Single, Dual, and Quad Versions

2 Applications

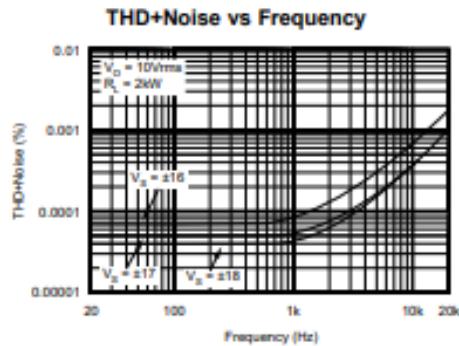
- Professional Audio and Music
- Line Drivers
- Line Receivers
- Multimedia Audio
- Active Filters
- Preamplifiers
- Integrators
- Crossover Networks

3 Description

The OPA134 series are ultra-low distortion, low-noise operational amplifiers fully specified for audio applications. A true FET input stage is incorporated to provide superior sound quality and speed for exceptional audio performance. This, in combination with high output drive capability and excellent DC performance, allows for use in a wide variety of demanding applications. In addition, the OPA134 has a wide output swing, to within 1 V of the rails, allowing increased headroom and making it ideal for use in any audio circuit.

The OPA134 SoundPlus™ audio operational amplifiers are easy to use and free from phase-inversion and the overload problems often found in common FET-input operational amplifiers. They can be operated from $\pm 2.5\text{-V}$ to $\pm 18\text{-V}$ power supplies. Input cascode circuitry provides excellent common-mode rejection and maintains low input bias current over its wide input voltage range, minimizing distortion. OPA134 series operational amplifiers are unity-gain stable and provide excellent dynamic behavior over a wide range of load conditions, including high load capacitance. The dual and quad versions feature completely independent circuitry for lowest crosstalk and freedom from interaction, even when overdriven or overloaded.

Single and dual versions are available in 8-pin DIP and SO-8 surface-mount packages in standard configurations. The quad is available in 14-pin DIP and SO-14 surface mount packages. All are specified for -40°C to 85°C operation. A SPICE macromodel is available for design analysis.



Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
OPA134	SOIC (8)	3.91 mm × 4.90 mm
	PDIP (8)	6.35 mm × 9.81 mm
OPA2134	SOIC (8)	3.91 mm × 4.90 mm
	PDIP (8)	6.35 mm × 9.81 mm
OPA4134	SOIC (14)	3.91 mm × 8.65 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Εικόνα ΙΙ.9: Τελεστικός ενισχυτής για audio εφαρμογές



ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P

ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller Family
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32KBytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
 - 256/512/512/1KBytes EEPROM
 - 512/1K/1K/2KBytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- Atmel® QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix® acquisition
 - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
 - Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change

Atmel-8271JS-AVR- ATmega-Datasheet_11/2015

Εικόνα Π.10: Εφαρμογές του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU

- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
 - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
 - 0 - 4MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1MHz, 1.8V, 25°C
 - Active Mode: 0.2mA
 - Power-down Mode: 0.1µA
 - Power-save Mode: 0.75µA (Including 32kHz RTC)

Εικόνα Π.11: Εφαρμογές του μικροελεγκτή ATMEGA328-PU

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P

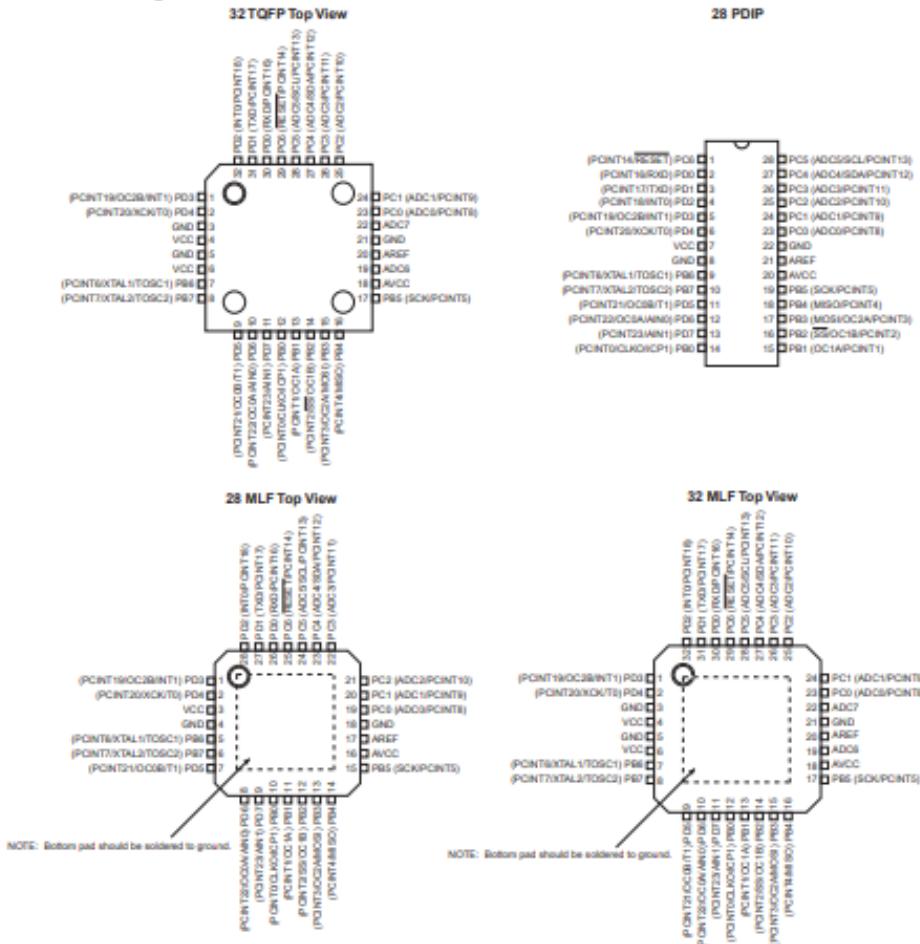


Table 1-1. 32UFBGA - Pinout ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA

	1	2	3	4	5	6
A	PD2	PD1	PC6	PC4	PC2	PC1
B	PD3	PD4	PD0	PC5	PC3	PC0
C	GND	GND			ADC7	GND
D	VDD	VDD			AREF	ADC6
E	PB6	PD6	PB0	PB2	AVDD	PB5
F	PB7	PD5	PD7	PB1	PB3	PB4

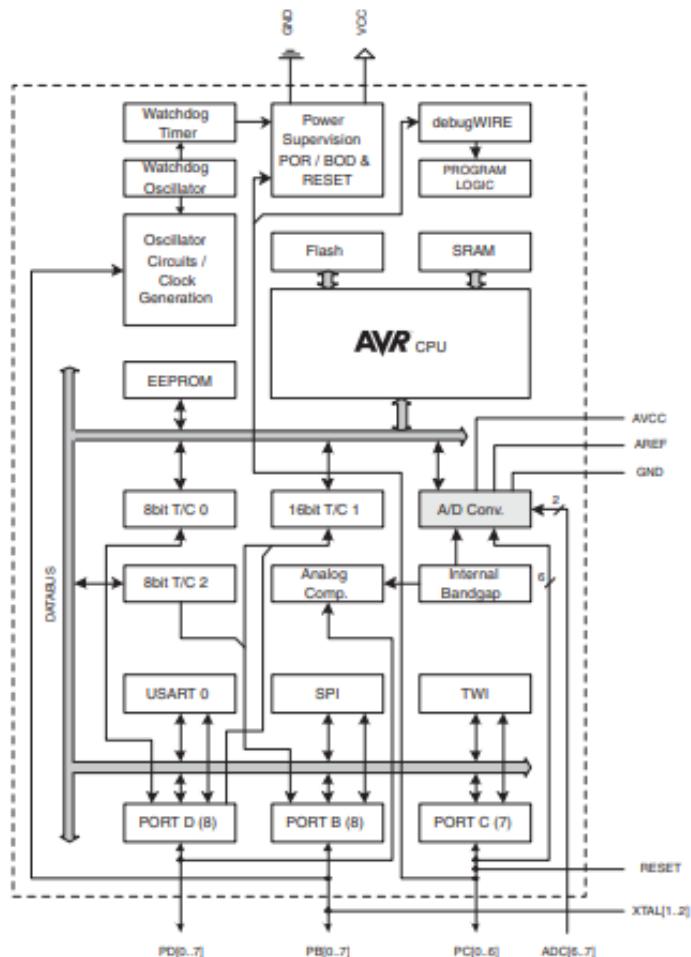
Εικόνα Η.12: Pinout διάγραμμα ATMEGA328-PU

2. Overview

The ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

Πηγαίος κώδικας

```

dspControlHearingAid

#include <math.h>
#include "LowPower.h"

const float Vbias = 0.9;
int countSamplingTime = 0; // crystal works on 16MHz and 44100 is typical audio sampling time so 16MHz/44100 = 363 loops approximately
int countBiasCrossings = 0;
float fundamentalF = 0;
float sigIn = 0.0;
int countWorkingTime = 0;

void setup() {
    // initialize I/O
    //Program Interrupt and Analog Input
    pinMode(PD2, INPUT);
    pinMode(PC2, INPUT);
    //Program BPF1
    pinMode(PB3, OUTPUT);
    pinMode(PB4, OUTPUT);
    pinMode(PB5, OUTPUT);
    //Program BPF2
    pinMode(PB0, OUTPUT);
    pinMode(PB1, OUTPUT);
    pinMode(PB2, OUTPUT);
    //Program BPF3
    pinMode(PD5, OUTPUT);
    pinMode(PD6, OUTPUT);
    pinMode(PD7, OUTPUT);
    //Program BPF3
    pinMode(PC0, OUTPUT);
    pinMode(PD3, OUTPUT);
    pinMode(PD4, OUTPUT);

    // initialize gains for BPFs' signals according to audiogram
    digitalWrite(PB3,HIGH);
    digitalWrite(PB4,LOW);
    digitalWrite(PB5,HIGH);

    digitalWrite(PB0,HIGH);
    digitalWrite(PB1,LOW);
    digitalWrite(PB2,HIGH);

    digitalWrite(PD5,HIGH);
    digitalWrite(PD6,LOW);
    digitalWrite(PD7,HIGH);

    digitalWrite(PC0,HIGH);
}

```

Εικόνα ΙΙ.14: Αρχικοποίηση μεταβλητών, θυρών, λειτουργιών και εγγραφών στις εξόδους.

```

digitalWrite(PD3,LOW);
digitalWrite(PD4,HIGH);

// attach interrupt on pin PD2 to wake up
attachInterrupt(digitalPinToInterruption(PD2),wakeUpCallback,LOW);
}

void loop() {
    float voltageIn = (analogRead(PC2))*(5/1023.0);
    countSamplingTime++;
    if(countSamplingTime >= 363){
        fundamentalF = (countBiasCrossings/363.0)*22050.0;
        countBiasCrossings = 0;
        countSamplingTime = 0;
        if(fundamentalF <= 500 && abs(voltageIn-Vbias) >= 0.5) LowerAudio(0);
        else if(fundamentalF <= 500 && abs(voltageIn-Vbias) <= 0.1) UpperAudio(0);
        else if(fundamentalF > 500 && fundamentalF <= 1000 && abs(voltageIn-Vbias) >= 1) LowerAudio(1);
        else if(fundamentalF > 500 && fundamentalF <= 1000 && abs(voltageIn-Vbias) <= 0.1) UpperAudio(1);
        else if(fundamentalF > 1000 && fundamentalF <= 4000 && abs(voltageIn-Vbias) >= 1) LowerAudio(2);
        else if(fundamentalF > 1000 && fundamentalF <= 4000 && abs(voltageIn-Vbias) <= 0.1) UpperAudio(2);
        else if(fundamentalF > 4000 && abs(voltageIn-Vbias) >= 0.5) LowerAudio(3);
        else if(fundamentalF > 4000 && abs(voltageIn-Vbias)) UpperAudio(3);
    }
    if((voltageIn - Vbias)>= 0.2 && (sigIn-Vbias) <= 0.2 || (sigIn - Vbias)>= 0.2 && (voltageIn-Vbias) <= 0.2){
        countBiasCrossings++;
    }
    // check if module is working without reason
    // let signal threshold be +- 0.2 V
    if( abs(voltageIn - sigIn) <= 0.2) {
        countWorkingTime++;
    }
    else if (countWorkingTime >= 500 && abs(voltageIn - sigIn) > 0.2){
        countWorkingTime = 0; // reset timer in case there is a speech ongoing
    }
    sigIn = voltageIn;
    if(countWorkingTime >= 10000){
        // enter low power mode and wake up when digital pin 3 gets HIGH value
        LowPower.powerDown(SLEEP_FOREVER,ADC_OFF,BOD_OFF);
    }
}

void wakeUpCallback(){
    countWorkingTime = 0;
    attachInterrupt(digitalPinToInterruption(PD2),wakeUpCallback,LOW);
}

```

Εικόνα Π.15: Κορμός του αλγορίθμου ελέγχου των συστήματος στη συνάρτηση void loop() και ορισμός της συνάρτησης Callback για τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης των μικροελεγκτή

```

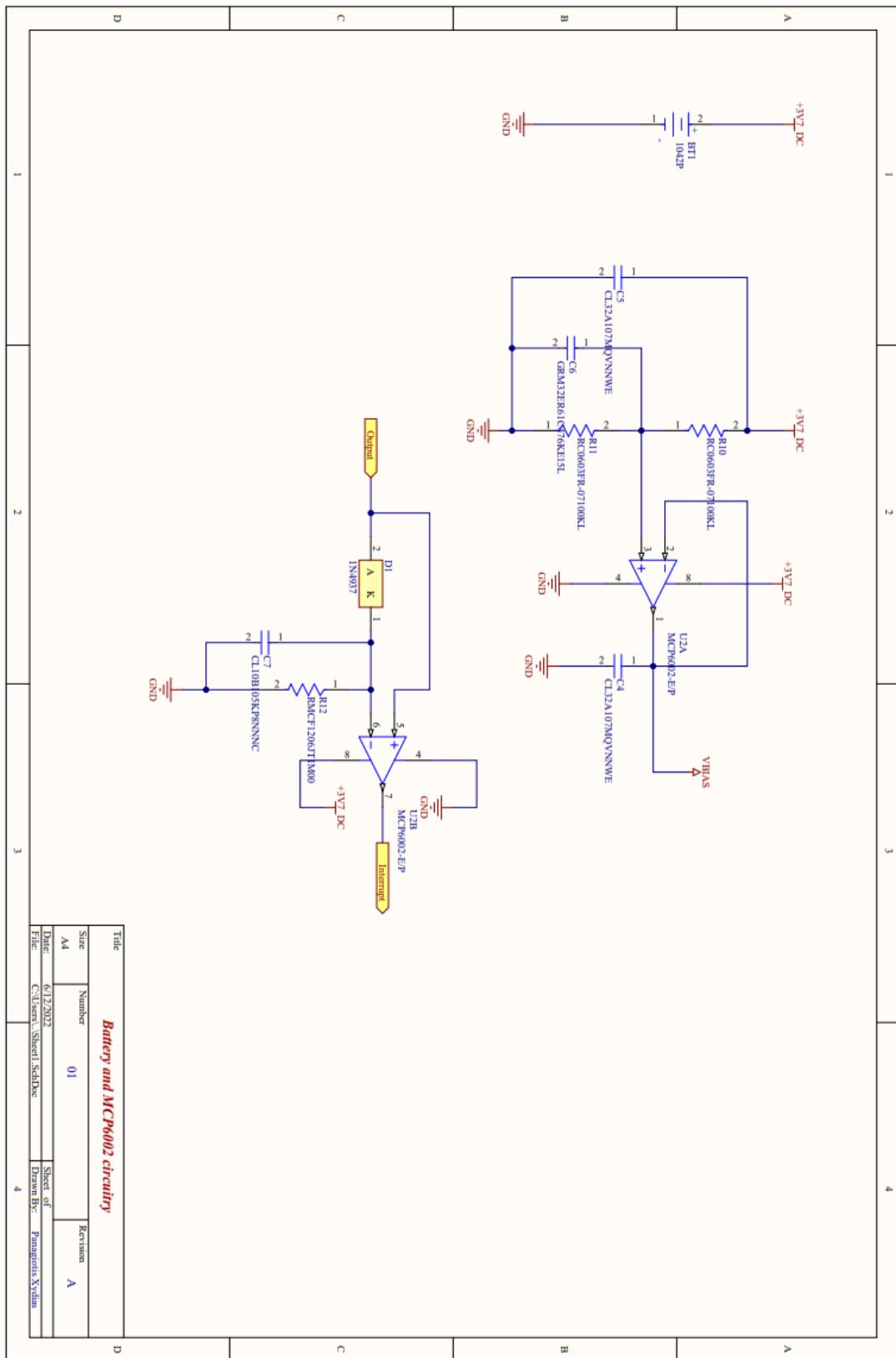
void LowerAudio(int filter){
    if(filter == 0){
        // decrease volume in BPF1
        digitalWrite(PB3,HIGH);
        digitalWrite(PB4,HIGH);
        digitalWrite(PB5,LOW);
    }
    else if (filter == 1){
        // decrease volume in BPF2
        digitalWrite(PB0,HIGH);
        digitalWrite(PB1,HIGH);
        digitalWrite(PB2,LOW);
    }
    else if (filter == 2){
        // decrease volume in BPF3
        digitalWrite(PD5,HIGH);
        digitalWrite(PD6,HIGH);
        digitalWrite(PD7,LOW);
    }
    else if (filter == 3){
        // decrease volume in BPF4
        digitalWrite(PC0,HIGH);
        digitalWrite(PD3,HIGH);
        digitalWrite(PD4,LOW);
    }
}
}

void UpperAudio(int filter){
    if(filter == 0){
        // increase volume in BPF1
        digitalWrite(PB3,LOW);
        digitalWrite(PB4,HIGH);
        digitalWrite(PB5,HIGH);
    }
    else if (filter == 1){
        // increase volume in BPF2
        digitalWrite(PB0,LOW);
        digitalWrite(PB1,HIGH);
        digitalWrite(PB2,HIGH);
    }
    else if (filter == 2){
        // increase volume in BPF3
        digitalWrite(PD5,LOW);
        digitalWrite(PD6,HIGH);
        digitalWrite(PD7,HIGH);
    }
    else if (filter == 3){
        // increase volume in BPF4
        digitalWrite(PC0,LOW);
        digitalWrite(PD3,HIGH);
        digitalWrite(PD4,HIGH);
    }
}
}

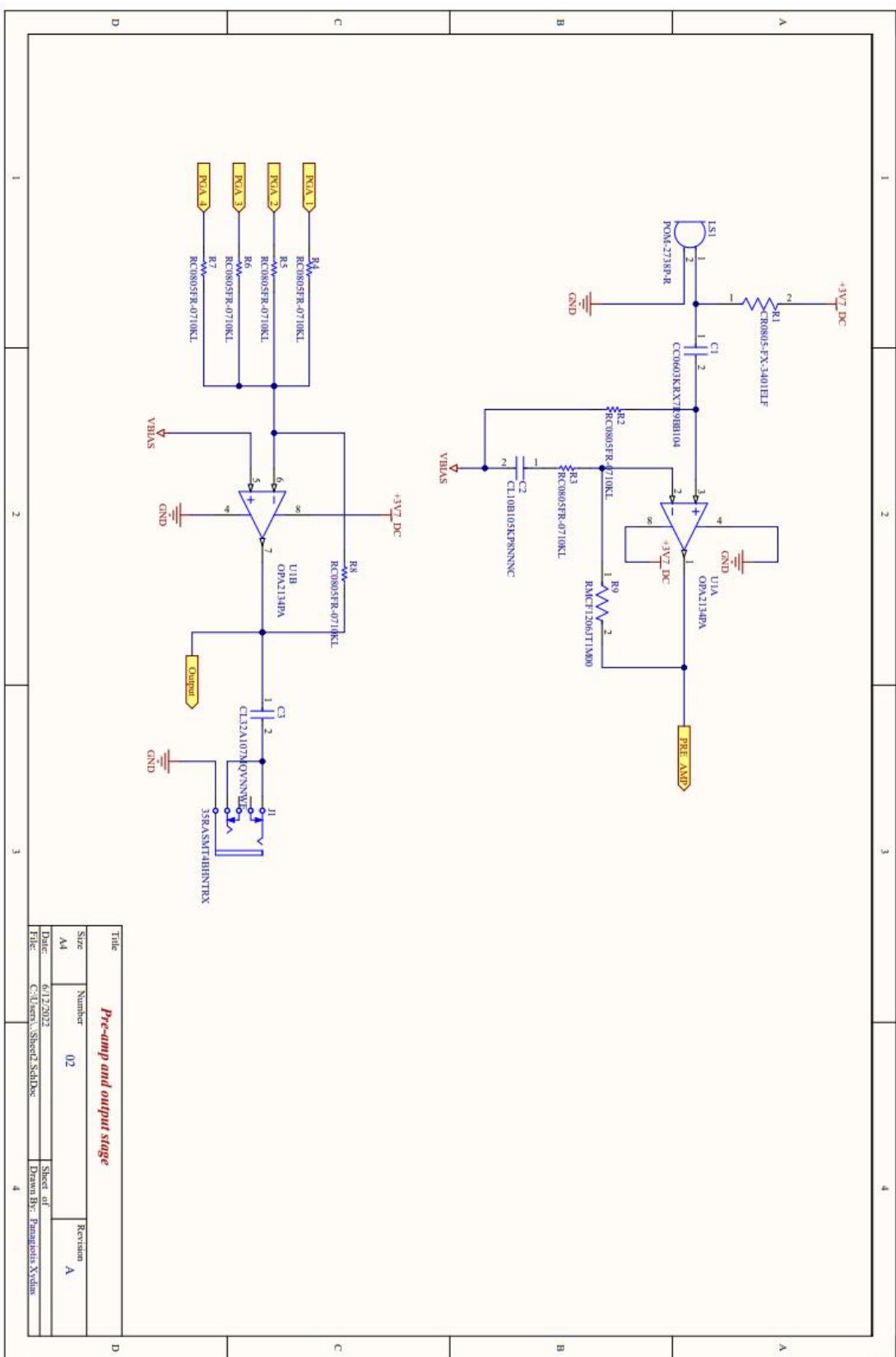
```

Εικόνα Π.16: Ορισμός των συναρτήσεων μείωσης και αύξησης της έντασης του ήχου

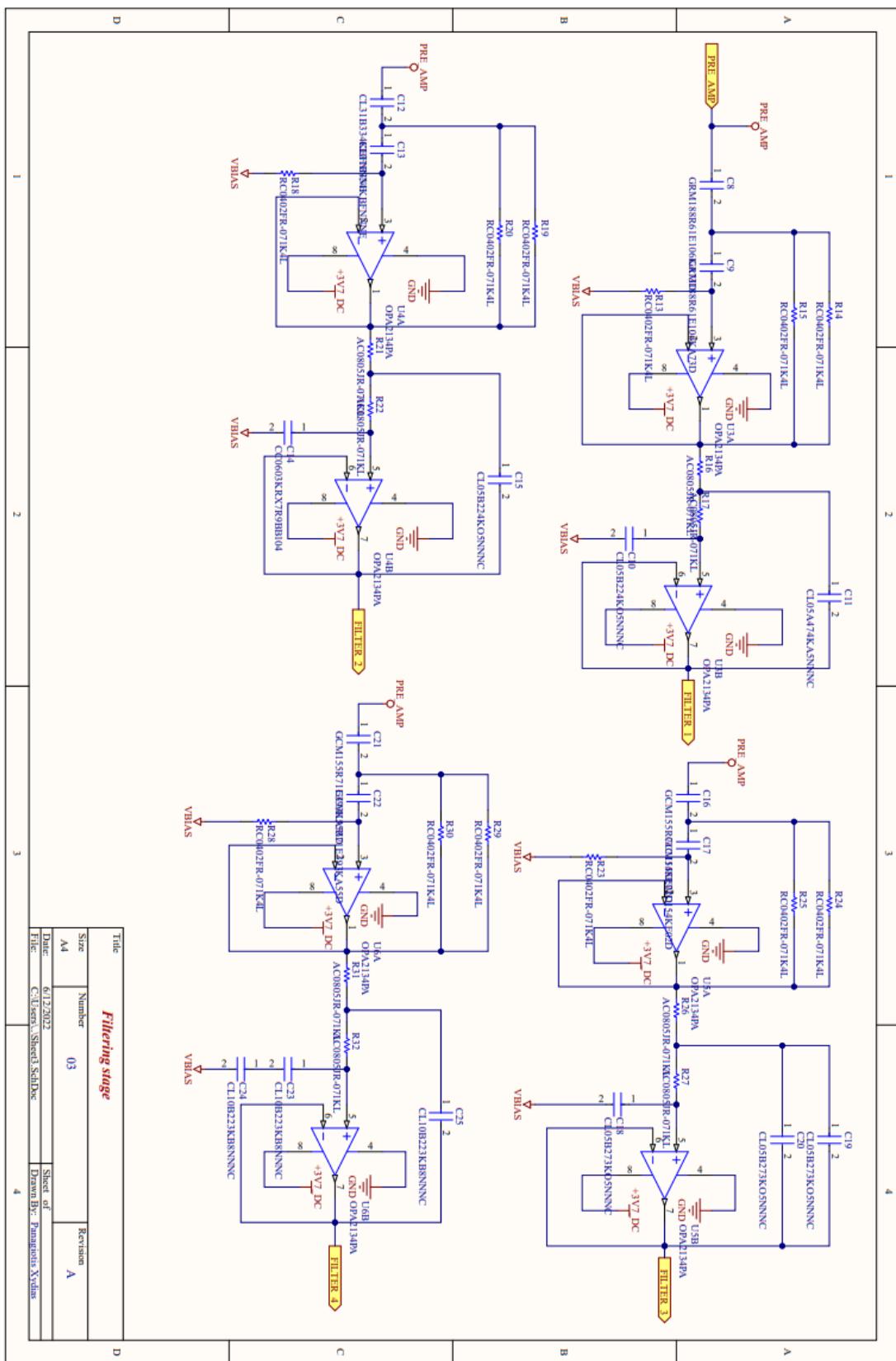
Φύλλα κυκλωματικών διαγραμμάτων, PCB Layout και BoM



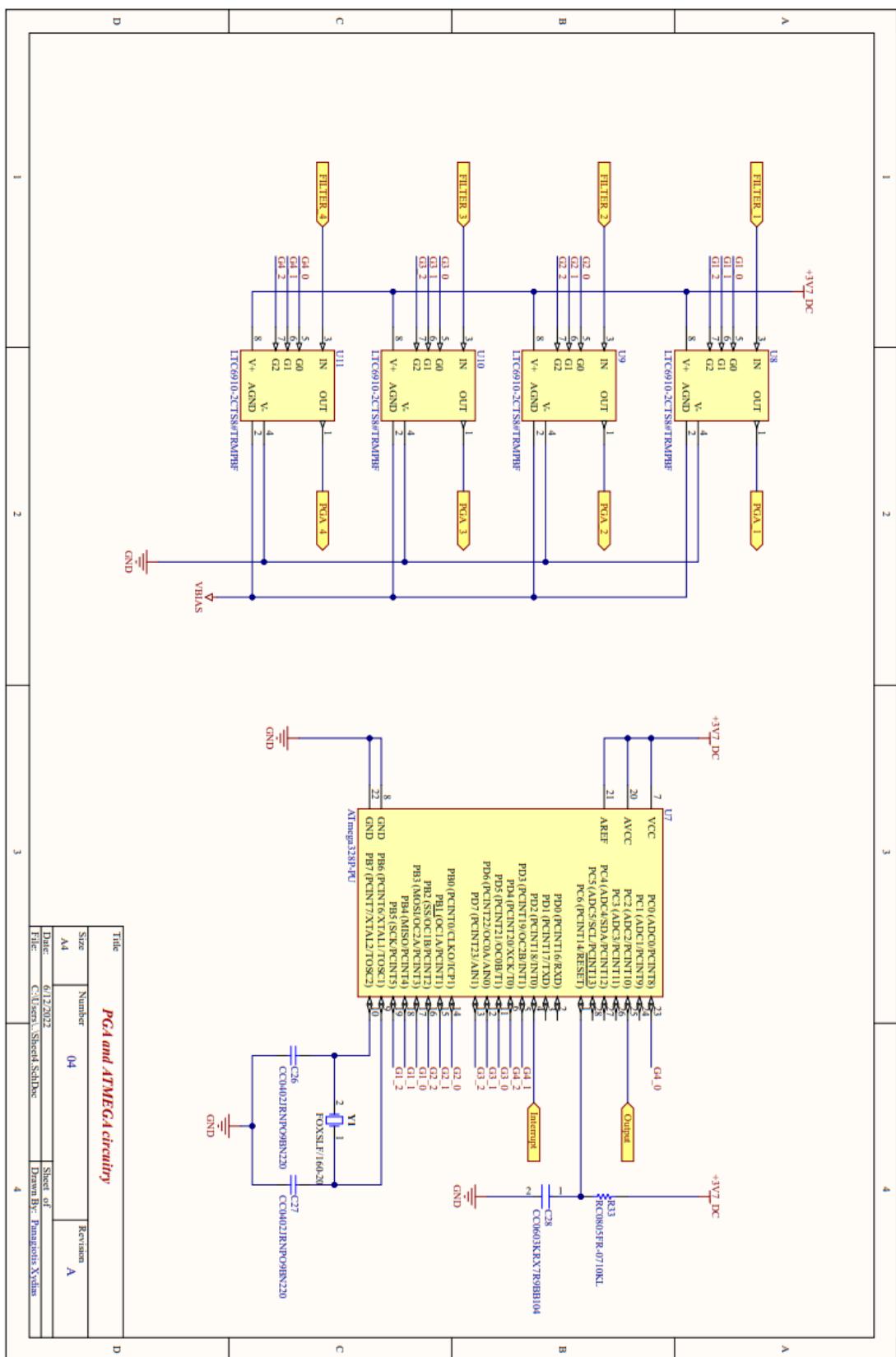
Εικόνα Π.17: Σχηματικό κυκλώματος - φυλλάδιο No.1



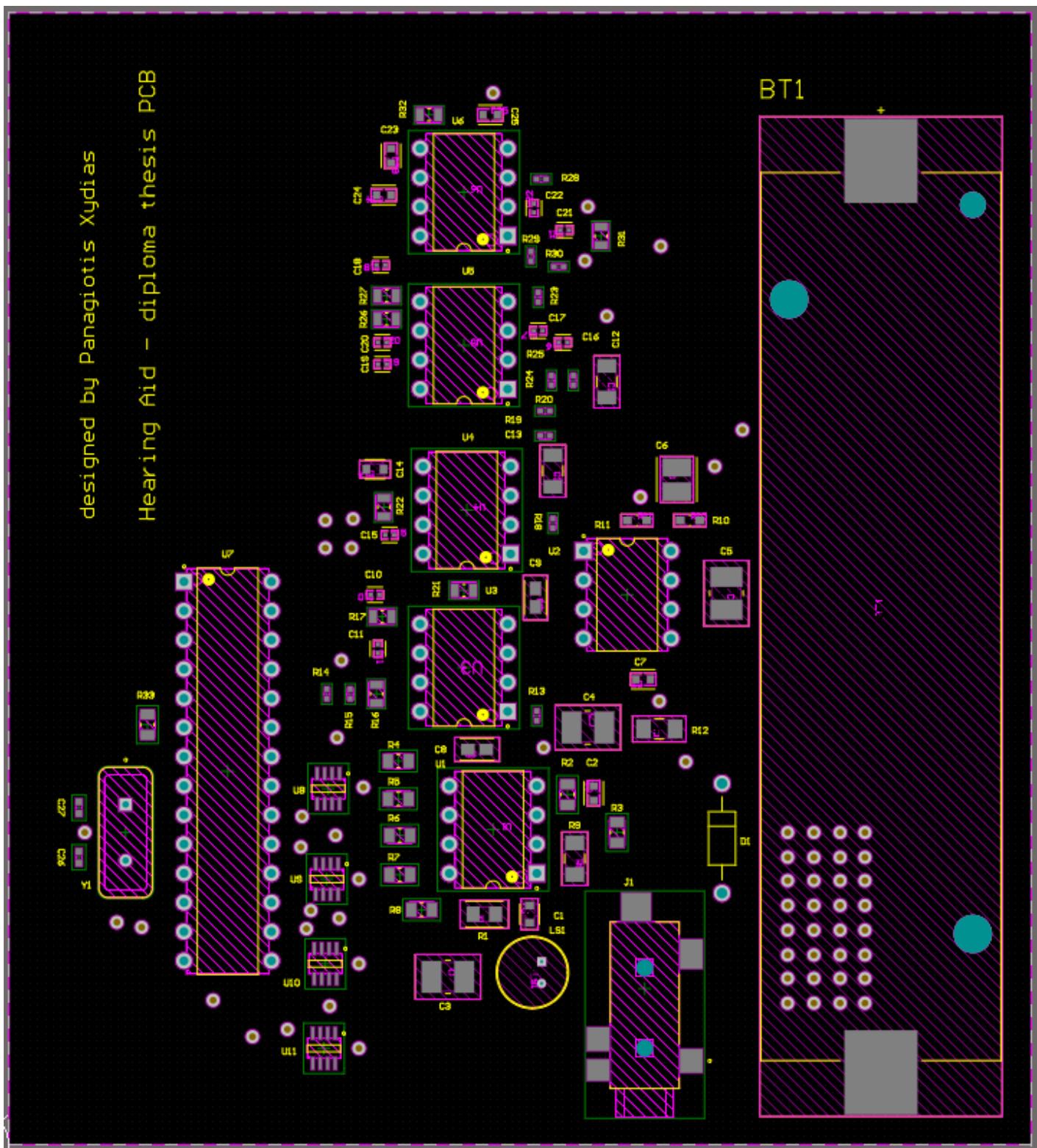
Εικόνα Π.18: Σχηματικό κυκλώματος - φυλλάδιο No.2



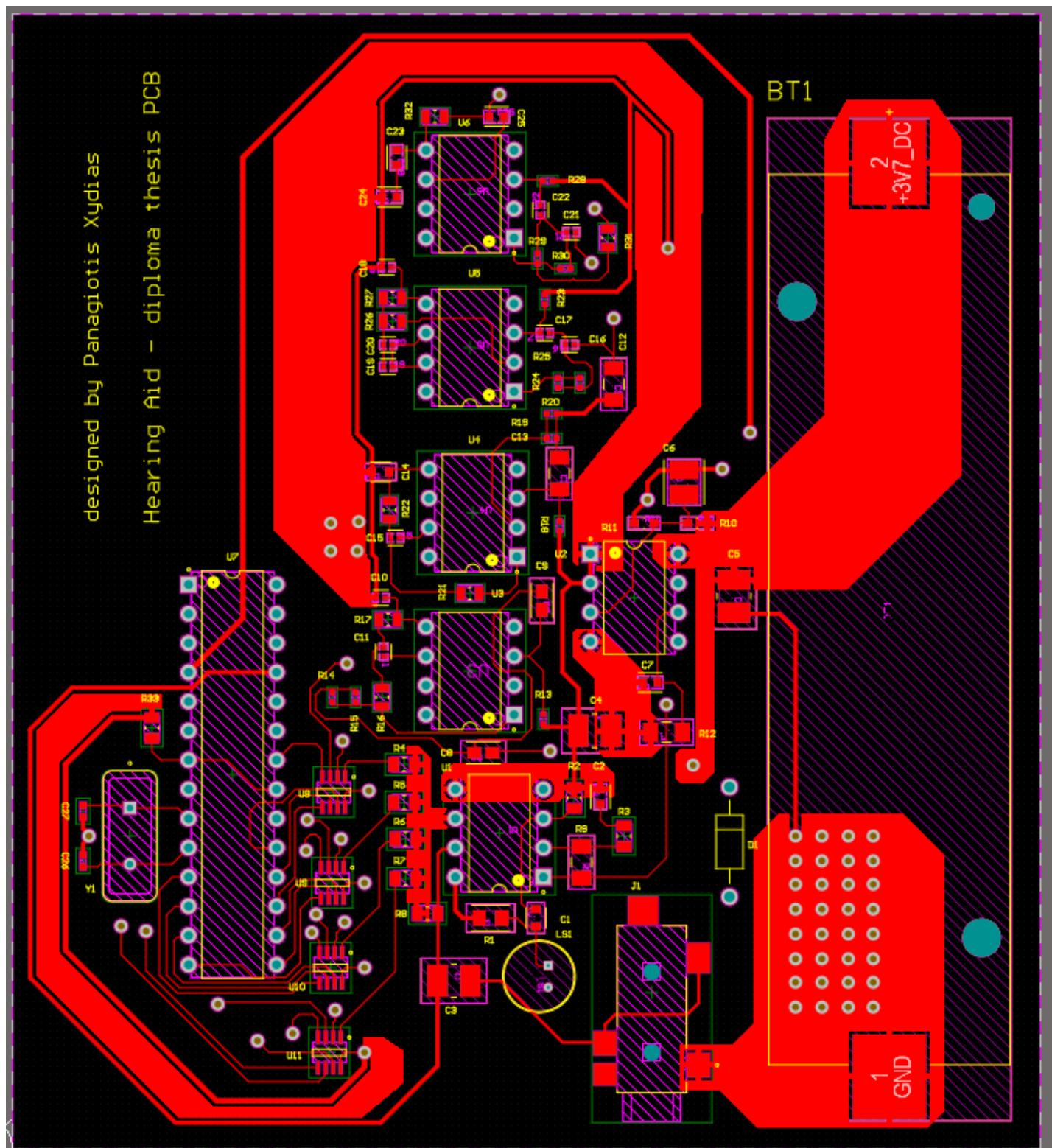
Εικόνα Π.19: Σχηματικό κυκλώματος - φυλλάδιο No.3



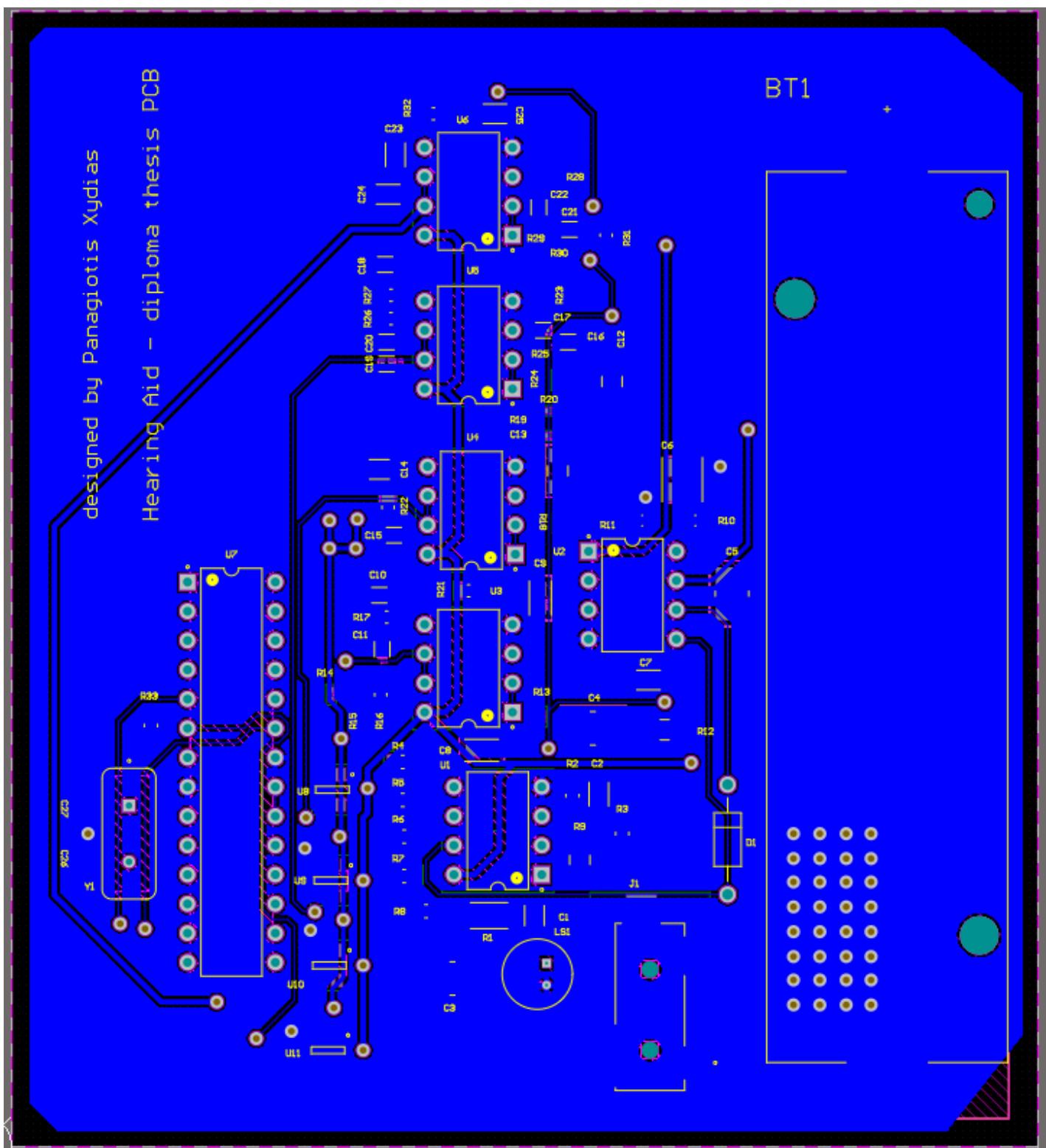
Εικόνα Η.20: Σχηματικό κυκλώματος - φυλλάδιο No.4



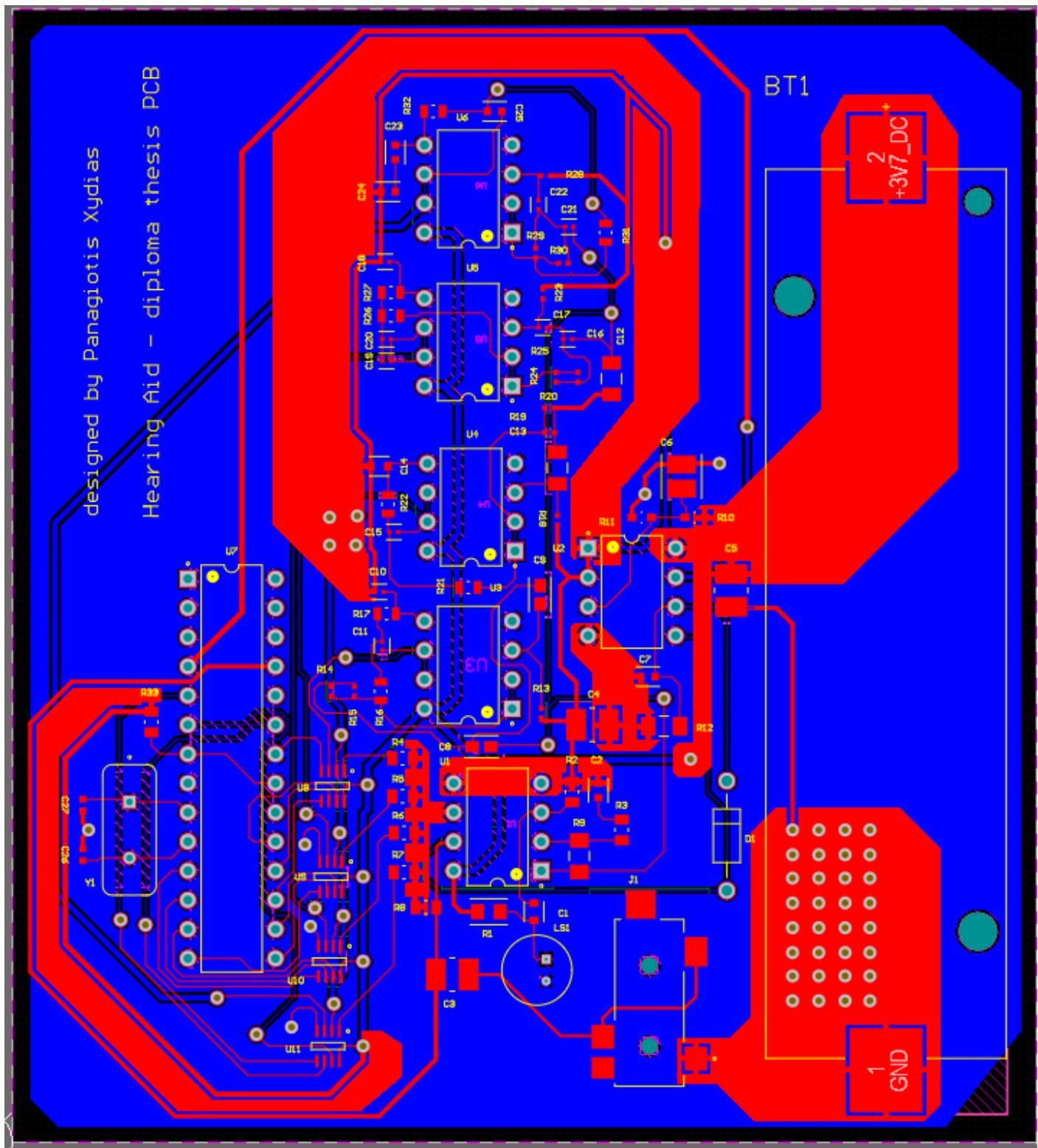
Εικόνα Π.21: Mechanical layer – τοποθέτηση των νλικών



Εικόνα ΙΙ.22: Top layer – διασύνδεση των υλικών στο πάνω στρώμα



Εικόνα ΙΙ.23: Bottom layer – διασύνδεση των υλικών στο κάτω στρώμα



Εικόνα ΙΙ.24: Τελικό layout του PCB

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
1042P	BATTERY HOLDER 1865	BT1	FP-1042P-MFG	CMP-19636-000019-1	1
CC0603KRX7R9BB104	CAP CER 0.1UF 50V X7	C1, C14	FP-CC0603-DA-MFG	CMP-2100-03601-2	2
CL10B105KP8NNNC	Cap Ceramic 1uF 10V X	C2, C7	FP-CL10-IPC_C	CMP-2000-06094-2	2
CL32A107MQVNNWE	Cap Ceramic 100uF 6.3	C3, C4, C5	FP-CL32-IPC_A	CMP-13271-000832-1	3
GRM32ER61C476KE15L	CAP CER 47UF 16V X5R	C6	FP-GRM32E-0_3-0_2-IP	CMP-2000-06362-2	1
GRM188R61E106KA73D	Chip Multilayer Ceram	C8, C9	FP-GRM188-0_2-IPC_A	CMP-06035-045268-1	2
CL05B224KO5NNNC	Cap Ceramic 220nF 16	C10, C15	FP-CL549-IPC_C	CMP-13271-002972-1	2
CL05A474KA5NNNC	Cap Ceramic 470nF 25	C11	FP-CL545-IPC_C	CMP-13271-002157-1	1
CL31B334KBFNNNE	Cap Ceramic 330nF 50	C12, C13	FP-CL31-IPC_B	CMP-13271-003116-1	2
GCM155R71C154KE02D	Ceramic Capacitor for	C16, C17	FP-GCM155-0_05-IPC	CMP-06035-044987-1	2
CL05B273KO5NNNC	Cap Ceramic 27nF 16V	C18, C19, C20	FP-CL515-IPC_C	CMP-13271-001227-1	3
GCM155R71E393KA55D	Ceramic Capacitor for	C21, C22	FP-GCM155-0_05-IPC	CMP-06035-010687-1	2
CL10B223KB8NNNC	Cap Ceramic 22nF 50V	C23, C24, C25	FP-CL10-IPC_C	CMP-13271-001437-1	3
CC0402JRNP09BN220	Chip Capacitor, 22 pF,	C26, C27	CAPC1005X55X25ML05	CMP-2100-03590-1	2
1N4937	Fast-Recovery Rectifie	D1	ONSC-AXIAL LEAD-2	CMP-0902-00177-1	1
35RASMT4BHNTRX	Female 3.5 mm Phone	J1	SWIT-35RASMT4BHNTR	CMP-1772-00001-1	1
POM-2738P-R	MIC COND ANALOG O	LS1	FP-POM-2738P-R-MFG	CMP-103887-000001-1	1
CR0805-FX-3401ELF	Thick Film Chip Resist	R1	FP-CR0805-IPC_A	CMP-1013-00569-2	1
RC0805FR-0710KL	Chip Resistor, 10 KOhr	R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8	RESC2013X60X35NL10	CMP-1659-00013-4	8
RMCF1206JT1M00	1MΩ ±5% 0.25W 1206	R9, R12	FP-RMCF1206-IPC_B	CMP-26527-001398-1	2
RC0603FR-07100KL	RES SMD 100K OHM 1%	R10, R11	FP-RC0603-0_55-MFG	CMP-2100-03662-2	2
RC0402FR-071K4L		R13, R14, R15, R18, R19	RESC1005X40X25NL05	CMP-2002-07461-1	12
AC0805JR-071KL		R16, R17, R21, R22, R26	RESC2013X60X35LL10T	CMP-2001-04511-1	8
OPA2134PA	SoundPlus(TM) High P	U1, U3, U4, U5, U6	P0008A	CMP-0808-00047-2	5
MCP6002-E/P	None	U2	PDIP300-P8	CMP-0187-00133-3	1
ATmega328P-PU	8-bit AVR Microcontro	U7	28P3	CMP-0095-00013-2	1
LTC6910-2CTS8#TRMP1	Single Channel, Digital	U8, U9, U10, U11	LT-TS8-8-TSOT-23_V	CMP-0359-03778-2	4
FOXSLF/160-20	Resistance Weld Thru	Y1	FOX-FOXSLF160-20	CMP-1749-00003-1	1

Εικόνα ΙΙ.25: BoM – λίστα υλικών και εξαρτημάτων της συσκευής