

## *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

*Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών  
Τομέας Φυσικής*

*Βελτιστοποίηση σχεδίασης ηχείου  
με αναγωγή των μηχανικών  
του μερών σε ηλεκτρονικά*

*Διπλωματική Εργασία*



*Χαϊδάς Φώτιος*

**Επιβλέπων:** Καμπουράκης Γεώργιος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ





Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής θέλω να ευχαριστήσω όλους τους αξιότιμους καθηγητές μου που όλα αυτά τα χρόνια μου προσέδωσαν γνώση, εμπειρία και μου ανέπτυξαν τον τρόπο σκέψης, έτσι ώστε να μπορώ να συντάξω την ακόλουθη εργασία. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου σε κάθε στιγμή, εύκολη ή δύσκολη, και με ωθούσε να συνεχίσω με την συνεχή της πίστη προς εμένα, απαλύνοντας μου τους όποιους προβληματισμούς ή και εξιτάροντας την σκέψη μου. Ιδιαίτερη μνεία ευχαριστιών αξίζει και η κοπέλα μου που εκτός των άλλων με βοήθησε έμπρακτα σε αρκετά σημεία της διπλωματικής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου και μη, που αντάλλαξαν έστω και μια κουβέντα μαζί μου και συντέλεσαν έτσι στο σημείο που είμαστε σήμερα.



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την ανάλυση όλων των παραγόντων που συμβάλλουν στο τελικό αποτέλεσμα ενός ηχείου. Η ανάλυση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή. Έτσι λοιπόν απευθύνεται στον μηχανικό που θέλει να γνωρίσει σε βάθος τον τρόπο λειτουργίας και τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους ηχείων. Παράλληλα το θέμα αναλύεται με όση το δυνατόν εκλαΐκευση, προκειμένου να μπορέσει να διεισδύσει στα άδυτα ενός ηχείου και ένας απλός καθημερινός άνθρωπος. Τέτοιοι άνθρωποι είναι αυτοί που δεν έχουν γνώσεις μηχανικού, διακατέχονται όμως από αγάπη για την αληθινή μουσική και γνωρίζουν ότι μόνο ένα ηχείο υψηλής πιστότητας, σε συνδυασμό με ένα αντίστοιχο ηχοσύστημα, μπορούν να τους προσφέρουν μια τέτοια αληθινή εμπειρία σε καθημερινή βάση.

Η ανάλυση αυτής της άσκησης λοιπόν ξεκινάει με ορισμένες εισαγωγικές έννοιες. Ολόκληρο το πρώτο κεφάλαιο για την ακρίβεια αναλύεται σε στοιχειώδεις γνώσεις ηλεκτρονικής, επίπεδου δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης ή το πολύ γνώσεις προπτυχιακού επιπέδου. Από πλευράς ακουστικής οι γνώσεις είναι προπτυχιακού επιπέδου, αλλά είναι απαραίτητες για την κατανόηση ορισμένων τμημάτων του ηχείου. Παράλληλα για όποιον θέλει να εκμεταλλευτεί εις το έπακρον το ηχητικό του σύστημα, είτε μιλάμε για ένα οικιακό σύστημα είτε για μια επαγγελματική εγκατάσταση, καλά θα κάνει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στο υποκεφάλαιο της ακουστικής μικρών χώρων. Τέλος το πρώτο κεφάλαιο κλείνει με σχετικά γνωστές οντότητες της μηχανικής, ακόμα και στους απόφοιτους δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, και παράλληλα γίνεται η πρώτη σύνδεση των μηχανικών μερών ενός ηχείου με τα ηλεκτρικά τους ανάλογα, που θα μελετήσουμε στη συνέχεια.

Ακόμη και στους λιγότερο μυημένους με τα ηχεία, ίσως είναι γνωστό ότι το πλέον σημαντικό σε αυτά είναι τα μεγάφωνα. Στο δεύτερο κεφάλαιο λοιπόν αναλύουμε όλες τις κατηγορίες των μεγαφώνων που μπορούμε να συναντήσουμε στα κοινά ηχεία. Επιπλέον δίνουμε την πλήρη ανάλυση των παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν, γνωστών και ως Thiele/Small, και συνεχίζουμε με τους μαγνήτες και την επιρροή τους στο τελικό αποτέλεσμα. Κλείνοντας το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρουμε και άλλους τύπους μεγαφώνων, πέρα από τα κλασσικά ηλεκτροδυναμικά.

Μέχρι εδώ κατά κάποιον τρόπο μπορούμε να πούμε ότι είδαμε το πρώτο μέρος, το θεωρητικό και τώρα μπορούμε να προχωρήσουμε στις προσομοιώσεις. Η πειραματική ανάλυση στον υπολογιστή γίνεται τόσο για την σχεδίαση καμπινών όσο και για την σχεδίαση των φίλτρων διαχωρισμού συχνοτήτων (crossover). Παρόλα αυτά και παρά το γεγονός ότι οι κώδικες μοιάζουν αρκετά για τις δύο περιπτώσεις, επιλέξαμε να χωρίσουμε την σχεδίαση των καμπινών από αυτή των crossover. Δηλαδή στο τρίτο κεφάλαιο επεξηγούμε με κάθε λεπτομέρεια τις

διάφορες σχεδιάσεις καμπινών ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύουμε τα όσα χρειάζονται για τον σχεδιασμό ενός φίλτρου αποκοπής. Με βάση και την ιστορική εξέλιξη ξεκινάμε με τις καμπίνες ακουστικής ανάρτησης, οι οποίες μεσουράνησαν μισό αιώνα πριν περίπου και συνεχίζουμε με την τεχνική που εφαρμόζεται κατά κόρον σήμερα, τις καμπίνες ανάκλασης χαμηλών. Τέλος κάνουμε λόγο και για έναν πιο ιδιαίτερο τύπο καμπίνας, αυτόν της γραμμής μεταφοράς καθώς επίσης και για τις υποκατηγορίες του. Αν και δεν έχει την θέση που της αρμόζει στην αγορά, αυτή η καμπίνα έχει ιδιαίτερο θεωρητικό ενδιαφέρον και για αυτό κάνουμε σε αυτή την διπλωματική μια εισαγωγή.

Κλείνοντας, με το τέταρτο κεφάλαιο, αναφέρουμε όλα εκείνα που χρειάζονται και για τον σχεδιασμό ενός σωστού φίλτρου. Επιπλέον δείχνουμε με προσομοίωση τις διάφορες κατηγορίες των φίλτρων καθώς επίσης και το ταίριασμα δύο ή περισσότερων φίλτρων.

## Abstract

The following thesis aims to analyze the factors that contribute on the final acoustic experience of a loudspeaker. The analysis is based on the use of a computer, so it is addressed to every engineer who wants to fully understand the function and the differences between the various loudspeaker types. Special care was given in order to make the analysis suitable for people without academic training. These people are driven only by their love for the experience of true music and know that this experience is achieved only through a loudspeaker of the highest accuracy as part of a comparably well performing system.

The first part of the analysis is used to form a common ground by defining various meanings. The first chapter consists of exposure of facts about electronic systems that is commonly acquired in high school or in the first years of undergraduate study. The knowledge about the acoustics is of undergraduate level but it is essential to fully understand some aspects of the loudspeaker. The section of the Small Area Acoustics is very important for whoever wants to make the most of their system either it is intended for home or professional use. The first chapter is completed with the definition of some mechanical entities that are known even from high school and the connection between the mechanical parts of a speaker with their electrical counterparts which is the subject of the following chapters.

Even someone vaguely acquainted with the loudspeakers may know that the most important part of them is speakers. So, the subject of the second chapter is the analysis of the speaker categories that are found on common layman speakers. Furthermore the full analysis of their parameters is given, is known as Thiele/Small analysis followed by the effect of the magnets on the final outcome. At the end of the chapter there is a list of other speaker types besides the usual ones.

Up to this point the theoretical part is covered and the second part consists mostly of simulations. The simulation analysis aims not only on the cabin sizing but also on the crossover sizing. The code seems very similar on both occasions but it is selected so that it may treat the two sizing separately. The third chapter is about the cabin layouts, whereas the fourth one is about the design of a crossover filter. The chapter and the underlying history begin with sealed enclosures which culminated around fifty years ago and continue with bass reflex enclosures that are currently very popular. Last, but not least, a more special enclosure is presented, the transmission line cabinet with its subcategories. It is the author's opinion that transmission line cabinets deserve more popularity in contemporary market. Their academic value is the reason that those cabinets are presented in this thesis.

Finally, chapter four describes the necessary tools for the design of the desired filter. Also, through simulation, the various filter categories as well as their combinations are presented.

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| Περίληψη .....   | 4  |
| Κεφάλαιο 1.....  | 10 |
| Ηλεκτροακουστική και άλλες εισαγωγικές έννοιες .....               | 10 |
| 1.1 Ορισμός Ηλεκτροακουστικής και Ηχείου .....                     | 10 |
| 1.2 Στοιχεία ηλεκτρονικής.....                                     | 11 |
| 1.2.1 Αντίσταση και νόμος του Ωμ.....                              | 11 |
| 1.2.2 Πηνίο και αυτεπαγωγή .....                                   | 13 |
| 1.2.3 Πυκνωτής και χωρητικότητα .....                              | 15 |
| 1.2.4 Κυκλώματα RLC.....   | 16 |
| 1.3 Στοιχεία ακουστικής.....                                       | 18 |
| 1.3.1 Μετάδοση ηχητικών κυμάτων στον αέρα.....                     | 18 |
| 1.3.2 Αλληλεπίδραση του ήχου με τα διάφορα υλικά μέσα .....        | 19 |
| 1.3.3 Ακουστική μικρών χώρων.....                                  | 20 |
| 1.3.4 Αντηχέιο Helmholtz .....                                     | 23 |
| 1.3.5 Επεξεργασία ακουστικού σήματος .....                         | 26 |
| 1.4 Στοιχεία μηχανικής.....  | 28 |
| 1.4.1 Μάζα και αδράνεια .....                                      | 28 |
| 1.4.2 Ελατήριο και ελαστικότητα .....                              | 29 |
| 1.4.3 Τριβή και απώλειες.....                                      | 30 |
| 1.4.4 Ταλαντούμενα συστήματα.....                                  | 31 |
| 1.4.5 Μηχανικά κυκλώματα ηχείου και τα ηλεκτρικά τους ανάλογα..... | 32 |
| Κεφάλαιο 2.....  | 33 |
| Μεγάφωνα .....   | 33 |
| 2.1 Τι είναι μεγάφωνο.....   | 33 |
| 2.2 Είδη μεγαφώνων .....   | 35 |
| 2.2.1 Woofer .....   | 35 |
| 2.2.2 Midrange.....  | 38 |
| 2.2.3 Tweeter .....  | 39 |
| 2.3 Παράμετροι Thiele/Small .....                                  | 42 |
| 2.4 Μαγνήτες και επιρροή του συντελεστή δύναμης .....              | 46 |
| 2.5 Μεγάφωνα διαφορετικών τύπων.....                               | 48 |



|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 2.5.1 | Πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα.....  | 48  |
| 2.5.2 | Μεγάφωνα πλάσματος.....   | 48  |
| 2.5.3 | Ηλεκτροστατικά και μαγνητοστατικά ηχεία.....                              | 49  |
|       | Κεφάλαιο 3.....   | 52  |
|       | Η καμπίνα ενός ηχείου .....   | 52  |
| 3.1   | Διάφοροι τύποι καμπίνας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους .....        | 52  |
| 3.2   | Καμπίνα ακουστικής ανάρτησης.....   | 53  |
| 3.2.1 | Επίδραση της καμπίνας στις παραμέτρους του μεγαφώνου .....                | 53  |
| 3.2.2 | Σχεδίαση καμπίνας ακουστικής ανάρτησης.....                               | 54  |
| 3.3   | Καμπίνες ανάκλασης χαμηλών ( Bass reflex ).....                           | 58  |
| 3.3.1 | Παρουσίαση και ανάλυση των παραμέτρων που συμβάλουν στη σχεδίαση .....    | 58  |
| 3.3.2 | Ανάλυση των όρων της συνάρτησης μεταφοράς.....                            | 61  |
| 3.3.3 | Διάφορα έτοιμα μοντέλα ευθυγράμμισης.....                                 | 63  |
| 3.3.4 | Προσομοίωση του συστήματος καμπίνα-μεγάφωνο με υπολογιστή .....           | 72  |
| 3.3.5 | Μεγιστοποίηση της απόδοσης από τις οπές ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων..... | 76  |
| 3.3.6 | Σύνοψη και σχεδίαση της καμπίνας bass reflex.....                         | 84  |
| 3.4   | Καμπίνα Γραμμής μεταφοράς.....  | 85  |
| 3.4.1 | Μαθηματική θεμελίωση του μοντέλου .....                                   | 87  |
| 3.4.2 | Εμπέδηση στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα.....                                | 88  |
| 3.4.3 | Απόκριση και εμπέδηση του συστήματος μεγαφώνου καμπίνα .....              | 90  |
| 3.4.4 | Επίδραση των ηχοαπορροφητικών υλικών.....                                 | 93  |
| 3.4.5 | Γραμμές μεταφοράς με μεταβλητό εμβαδό διατομής .....                      | 94  |
|       | Κεφάλαιο 4.....   | 100 |
|       | Το κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων.....                                    | 100 |
| 4.1   | Τι κάνει αυτό το κύκλωμα και μια εισαγωγή πως το πετυχαίνει .....         | 100 |
| 4.2   | Κατηγορίες των crossover .....  | 101 |
| 4.2.1 | Ενεργά και παθητικά crossover.....  | 101 |
| 4.2.2 | Κατηγοριοποιήσεις με βάση τον αριθμό των δρόμων .....                     | 101 |
| 4.2.3 | Κλίσεις αποκοπής .....  | 103 |
| 4.3   | Σχεδιασμός φίλτρων με την χρήση υπολογιστή .....                          | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4 Crossover μεταβλητής κλίσης και ταίριασμα των φίλτρων .....                     | 108 |
| Κεφάλαιο 5.....   | 110 |
| Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη .....                               | 110 |
| 5.1 Συνοπτική περιγραφή των ιδεών και των εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα ηχείο..... | 110 |
| 5.2 Περιγραφή και μελέτη έτοιμων προγραμμάτων σχεδίασης .....                       | 112 |
| 5.3 Εισαγωγή στην καμπύνα απωλειών και στο crossover άπειρης κλίσης .....           | 114 |

# Κεφάλαιο 1

## Ηλεκτροακουστική και άλλες εισαγωγικές έννοιες

### 1.1 Ορισμός Ηλεκτροακουστικής και Ηχείου

Η ηλεκτροακουστική αποτελεί διεπιστημονικό τεχνολογικό κλάδο της ακουστικής και της ηλεκτρονικής, που ασχολείται με το αντικείμενο της εγγραφής, επεξεργασίας και της αναπαραγωγής του ήχου (μουσική, ομιλία, ηχητικά σήματα, κτλ) με ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά μέσα. Γενικά, οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες μετατροπές από ακουστική σε ηλεκτρική ενέργεια ή αντίστροφα.<sup>[1]</sup>

Στην περίπτωση μας θα ασχοληθούμε με την αναπαραγωγή του ήχου. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να μετατρέψουμε την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική. Η συσκευή που κάνει αυτή τη μετατροπή ονομάζεται ηχείο.

Συγκεκριμένα ως ηχείο ορίζουμε την συσκευή που έχει σκοπό τη μετατροπή της λαμβανόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (εισερχόμενο σήμα) σε ακουστική ενέργεια. Δηλαδή σε στιγμιαίες μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Επομένως το ηχείο δεν αποτελεί μία γνήσια ηλεκτρονική συσκευή, αλλά μία ηλεκτρομηχανική ή ηλεκτροακουστική διάταξη.<sup>[2]</sup> Σκοπός του ηχείου είναι να παράξει έναν ήχο όσο το δυνατόν πιο φυσικό και αληθοφανή.

Πρακτικά, όπως θα δούμε και παρακάτω, το ηχείο είναι στην ουσία και ηλεκτροακουστική και ηλεκτρομηχανική διάταξη. Για αυτό στις επόμενες ενότητες θα εισάγουμε στοιχεία από την ηλεκτρονική, την ακουστική και την μηχανική. Το θέμα της διπλωματικής θυμίζουμε πως είναι η βελτιστοποίηση σχεδίασης ηχείου με αναγωγή των μηχανικών του μερών σε ηλεκτρικά. Όποτε για κάθε μηχανικό στοιχείο θα λέμε και το ηλεκτρικό του ανάλογο. Με την αναγωγή όλων των στοιχείων σε ηλεκτρικά επωφελούμαστε. Και αυτό διότι στην ουσία έχουμε να λύσουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ο λόγος που επιλέχθηκε το ηλεκτρικό κύκλωμα έναντι άλλων κυκλωμάτων είναι απλός. Το τελευταίο μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή και προγράμματα σχεδιασμού. Η έρευνα έτσι απλουστεύεται πολύ και παράλληλα οδηγεί στην εξοικονόμηση κόπου και χρημάτων.

## 1.2 Στοιχεία ηλεκτρονικής

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Θα δώσουμε τους ορισμούς από όλα τα στοιχεία που θα χρειαστούμε. Ξεκινάμε με τα ηλεκτρικά στοιχεία γιατί θα τα χρειαστούμε και στην μελέτη των μηχανικών και ακουστικών διατάξεων.

Στην πίσω μέρος ενός ηχείου, όπως ίσως έχετε παρατηρήσει, υπάρχουν τα βύσματα σύνδεσης αυτού. Ουσιαστικά είναι η είσοδος του ηχείου και σε αυτή συνδέουμε μια πηγή τάσης. Ορίζουμε λοιπόν ως πηγές τάσης τις ηλεκτρικές συσκευές που είναι ικανές να παράγουν μια προκαθορισμένη τάση στα άκρα τους. Ανεξάρτητα από το ρεύμα που μπορεί να υπάρξει στο κύκλωμα μια ιδανική πηγή τάσης οφείλει να κρατήσει την τάση σταθερή. Στην πραγματικότητα μια καλή πηγή τάσης επηρεάζεται αμυδρά από το κύκλωμα που είναι συνδεδεμένη. Και η τάση διατηρείται σχεδόν σταθερή αν έχουμε μια καλή πηγή τάσης.<sup>[3]</sup>

Αν προχωρήσουμε στο εσωτερικό ενός ηχείου θα δούμε διάφορα καλώδια και ηλεκτρικά εξαρτήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Αυτά τα εξαρτήματα σε συνδυασμό με τα καλώδια δημιουργούν ένα ή περισσότερα κυκλώματα. Κύκλωμα ονομάζεται μία κλειστή, αγωγίμη από το ηλεκτρικό ρεύμα διαδρομή.<sup>[3]</sup>

Σε ένα κύκλωμα λοιπόν συναντάμε στοιχεία όπως οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα πηνία. Υπάρχουν και άλλα εξαρτήματα, αγωγίμη και ημιαγωγίμη, τα οποία όμως δεν συναντάμε στο εσωτερικό ενός ηχείου και έτσι δεν θα αναφερθούμε περισσότερο σε αυτά.

Μέρος του κυκλώματος είναι και τα μεγάφωνα του ηχείου. Για κάποιον αυτό μπορεί να είναι λογικό. Εκείνο όμως που θα παραξενέψει πολλούς αλλά αποτελεί γεγονός είναι το εξής. Μέρη των διαφόρων κυκλωμάτων ενός ηχείου είναι ακόμα και ο αέρας που υπάρχει σε ένα χώρο. Προφανώς και η ίδια η καμπίνα του ηχείου είναι μέρος του κυκλώματος.

Με τα μεγάφωνα θα ασχοληθούμε στο δεύτερο κεφάλαιο. Πριν από αυτό όμως θα δώσουμε με ακρίβεια τις ιδιότητες πολλών άλλων πραγμάτων. Στις επόμενες ενότητες λοιπόν θα ξεκινήσουμε με την ανάλυση των διάφορων παθητικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική.

### 1.2.1 Αντίσταση και νόμος του Ωμ

Ξέρουμε πως κάθε αγωγός παρουσιάζει στη διέλευση του ρεύματος μια αντίσταση ή αλλιώς δυσκολία. Το ρεύμα ως γνωστόν είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια λοιπόν που μπορούν να κινηθούν είναι αυτά που έχουν αποκολληθεί από τον αντίστοιχο πυρήνα τους. Για την αποκόλληση αυτή χρειάζεται κάποια τάση.<sup>[4]</sup> Το γεγονός ότι χρειαζόμαστε τάση για να δημιουργήσουμε ρεύμα σε μια αντίσταση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αντιστάσεις καταναλώνουν ισχύ,

άρα και ενέργεια. Συνεπώς με μια δεδομένη τάση, που την εξασφαλίζουμε από μια πηγή τάσης, μπορούμε να περάσουμε μέσα από μια αντίσταση ένα δεδομένο και μετρήσιμο ρεύμα. Ονομάζουμε λοιπόν αντίσταση R το πηλίκο της τάσης προς το ρεύμα.<sup>[4]</sup> Συγκεκριμένα της τάσης V που εφαρμόζουμε στα άκρα της αντίστασης και του ρεύματος I που την διαπερνάει:

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

Ο παραπάνω τύπος είναι γνωστός και ως νόμος του Ohm.<sup>[4]</sup> Όσα στοιχεία παρουσιάζουν γραμμική εξάρτηση του ρεύματος με την τάση στα άκρα τους τα λέμε ωμικά. Οι αντιστάσεις είναι ωμικά στοιχεία.<sup>[4]</sup> Μονάδα μέτρησης της αντίστασης είναι το Ω. Οι αντιστάσεις μπορούν εύκολα να μετρηθούν με ένα ωμόμετρο, οπότε δεν θα πούμε λεπτομέρειες για την συσχέτιση της τιμής μιας αντίστασης με τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά. Υπάρχει πάντως και ένας χρωματικός κώδικας για την εύρεση της τιμής μιας αντίστασης. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας που μας δείχνει τι αντιπροσωπεύει κάθε χρώμα, καθώς επίσης και ένα παράδειγμα.

| Ψηφία 1,2,3   |
|---------------|
| Μαύρο : 0     |
| Καφέ : 1      |
| Κόκκινο : 2   |
| Πορτοκαλι : 3 |
| Κίτρινο : 4   |
| Πρασινό : 5   |
| Μπλε : 6      |
| Μωβ : 7       |
| Γκρι : 8      |
| Άσπρο : 9     |
| Χρυσό : 0.1   |

| Ψηφίο 1                  | Ψηφίο 2 | Πολλαπλασιαστής | Ανοχή (%)  |
|--------------------------|---------|-----------------|------------|
| Κίτρινο = 4              | Μωβ = 7 | Κόκκινο = 00    | Χρυσό = 5% |
| Σύνολο : 4700 Ω ή 4,7 ΚΩ |         |                 |            |

| Τιμή                  | Ανοχή        |
|-----------------------|--------------|
| Ψηφίο 1: Κίτρινο = 4  | Καφέ : 1%    |
| Ψηφίο 2: Μωβ = 7      | Κοκκίνο : 2% |
| Ποίησης: Κόκκινο = 00 | Χρυσό : 5%   |
| Ανοχή : Χρυσό = 5%    | Άσημί : 10%  |
|                       | Άχρωμο : 20% |

Τα πρώτα δύο χρώματα από αριστερά προς δεξιά μας δείχνουν το πρώτο και δεύτερο ψηφίο της αντίστασης αντίστοιχα. Το τρίτο χρώμα μας δείχνει τον αριθμό των μηδενικών που ακολουθούν. Τέλος το τέταρτο χρώμα αντιπροσωπεύει την ανοχή της αντίστασης.

Περισσότερες από μια αντιστάσεις μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους παράλληλα ή σε σειρά. Έστω  $R_1, R_2, \dots, R_N$  αντιστάσεις διαφορετικές μεταξύ τους. Η τιμή της αντίστασης  $R$  που θα πάρουμε αν τις συνδέσουμε σε σειρά θα είναι:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

Και αν τις συνδέσουμε παράλληλα θα έχουμε την ακόλουθη έκφραση για την  $R$ :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφέρουμε πως ένα ηχείο διαχειρίζεται εναλλασσόμενα ρεύματα. Οπότε και θα ασχοληθούμε μόνο με αυτά. Ο νόμος του Ohm που διέπει τα ωμικά στοιχεία μας δείχνει ότι το ρεύμα, που τα διαπερνά, βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την τάση στα άκρα αυτών. Δηλαδή όποια και αν είναι τα χαρακτηριστικά της τάσης, τα ίδια ακριβώς θα έχει και το ρεύμα. Ή με άλλα λόγια λέμε ότι το ρεύμα βρίσκεται σε φάση με την τάση. Αυτό όπως είπαμε ισχύει για τις αντιστάσεις αλλά όπως θα δούμε στη συνέχεια δεν ισχύει για τα υπόλοιπα εξαρτήματα του κυκλώματος.<sup>[4]</sup>

### 1.2.2 Πηνίο και αυτεπαγωγή

Γενικά κάθε αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Το πηνίο είναι ένα στοιχείο του κυκλώματος, κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποθηκεύει ενέργεια στο μαγνητικό του πεδίο. Θεωρητικά το πηνίο δεν καταναλώνει καθόλου ενέργεια σε ένα κύκλωμα. Πρακτικά όμως υπάρχει κάποια αντίσταση σε σειρά με το πηνίο η οποία ευθύνεται για μια μικρή κατανάλωση ενέργειας.<sup>[4]</sup>

Τα μαγνητικά πεδία έχουν την ιδιότητα να προβάλλουν αντίσταση στην όποια αλλαγή του ρεύματος. Έτσι λοιπόν για τις μεταβολές του ρεύματος πλέον χρειαζόμαστε κάποια τάση. Συγκεκριμένα στα άκρα ενός πηνίου θα έχουμε γραμμική εξάρτηση της τάσης με την μεταβολή του ρεύματος, όπως παρακάτω:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

Όπου με  $L$  συμβολίζουμε την αυτεπαγωγή του πηνίου, την οποία και μετράμε σε henry(H). Συνήθως βρίσκουμε πηνία με αυτεπαγωγές mH και μH. Όπως είπαμε και στην αρχή της ενότητας κάθε πραγματικό πηνίο έχει και κάποιες απώλειες τις οποίες και συμβολίζουμε με μια αντίσταση απωλειών, συνδεδεμένη σε σειρά με το πηνίο.

Έτσι τελικά η εξίσωση για ένα πραγματικό πηνίο γίνεται:

$$V = L \frac{dI}{dt} + r I$$

Όπου με  $r$  συμβολίζουμε την αντίσταση απωλειών. Η τελευταία εξίσωση μένει σχεδόν η ίδια και για πηνίο μαζί με μια αντίσταση  $R$  σε σειρά. Απλά αντί για  $r$  βάζουμε  $R+r$  στον ίδιο τύπο. Στην παράλληλη σύνδεση πηνίου και αντίστασης τα πράγματα είναι λίγο πιο σύνθετα. Θα δώσουμε στη συνέχεια περισσότερες εξηγήσεις.

Βλέπουμε πάντως από την τελευταία σχέση πως έχουμε να λύσουμε μια διαφορική εξίσωση. Ευτυχώς δεν θα χρειαστεί να την λύσουμε. Αντ'αυτού θα εισάγουμε τον συμβολισμό που επιτρέπει την αναπαράσταση ημιτονοειδών σημάτων με μιγαδικούς αριθμούς. Στην περίπτωση των ηχείων τα σήματα που έχουμε να διαχειριστούμε είναι όλα ημιτονοειδή. Οπότε μπορούμε σχεδόν για όλη τη μελέτη μας να κάνουμε χρήση των μιγαδικών αριθμών.

Έστω τώρα ότι το ρεύμα που διαπερνά ένα πηνίο είναι  $I = A \sin \omega t$ . Έτσι μπορούμε να βρούμε και την τάση που έχουμε εφαρμόσει στα άκρα του πηνίου. Παραγωγίζοντας παίρνουμε:

$$V = L \frac{d}{dt} (A \sin \omega t) = L \omega A \cos \omega t = L \omega A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Και από τον γνωστό τύπο του Euler  $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$  μπορούμε να γράψουμε το ρεύμα και την τάση όπως παρακάτω:

$$V = L \omega A e^{j\omega t} e^{j\pi/2} \quad I = A e^{j\omega t}$$

Όπως είχαμε κάνει και με τον νόμο του Ohm, έτσι και τώρα θα διαιρέσουμε την τάση με το ρεύμα. Προκύπτει λοιπόν ένα νέο μέγεθος, που το λέμε εμπέδηση  $Z$ , και το μετράμε και αυτό σε Ohm. Η εμπέδηση του ιδανικού πηνίου λοιπόν για ημιτονοειδή σήματα είναι:

$$Z_L = L \omega e^{j\pi/2} \Rightarrow Z_L = j\omega L$$

Γενικά για τις εμπεδήσεις που είναι σε σειρά ισχύει  $Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_N$ . Και για εκείνες που είναι συνδεδεμένες παράλληλα:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_N}$$

Στην επόμενη ενότητα θα μελετήσουμε και τον πυκνωτή που παρουσιάζει παρόμοια αλλά αντίθετη κατά κάποιον τρόπο συμπεριφορά με το πηνίο. Στη συνέχεια θα είμαστε σε θέση να δούμε τα πάντα γύρω από τα κυκλώματα RLC. Τα τελευταία αποτελούν τη βάση για την κατασκευή των crossover στα ηχεία. Και επιπλέον οι αναγωγές όλων των άλλων μερών ενός ηχείου θα καταλήξουν στην μελέτη τέτοιων κυκλωμάτων.

### 1.2.3 Πυκνωτής και χωρητικότητα

Ο πυκνωτής τώρα σε αντίθεση με το πηνίο, δεν διαρρέεται από ρεύμα. Στο συνεχές ρεύμα λοιπόν αντιστοιχεί σε ανοικτό κύκλωμα ενώ το πηνίο ισοδυναμεί με ένα βραχυκύκλωμα.<sup>[4]</sup> Όταν όμως εφαρμοστεί στα άκρα του πυκνωτή μια τάση  $V$ , τότε αυτός μπορεί να αναπτύξει στους οπλισμούς του φορτίο  $Q$ . Η σχέση ανάμεσα στα δύο είναι:

$$Q = CV$$

Με  $C$  συμβολίζουμε το μέγεθος εκείνο που στη συνέχεια θα το λέμε χωρητικότητα του πυκνωτή. Η μονάδα μέτρησης της είναι τα Farad(F). Στην πράξη συναντάμε πυκνωτές με  $\mu\text{F}$  και  $\text{pF}$ .

Αν τώρα παραγωγίσουμε μια φορά τη παραπάνω σχέση θα βρούμε τη σχέση που συνδέει το ρεύμα με την τάση σε ένα πυκνωτή. Αρκεί απλά να θυμηθούμε ότι το ρεύμα είναι ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου. Πράγματι λοιπόν έχουμε:

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

Η σχέση αυτή είναι στην ουσία αντίστροφη από εκείνη του πηνίου. Πράγματι για ημιτονοειδή σήματα καταλήγουμε να δώσουμε στον πυκνωτή μια εμπέδηση όπως η παρακάτω:

$$Z_c = \frac{V}{I} = \frac{A \cos \omega t}{-A\omega C \cos(\omega t - \pi/2)} \Rightarrow Z_c = \frac{-j}{\omega C}$$

Τώρα που είπαμε τις εμπεδήσεις όλων των στοιχείων σε μορφή μιγαδικών αριθμών μπορούμε να ορίσουμε ένα συμβολισμό, που θα μας διευκολύνει με τις διάφορες πράξεις μεταξύ των στοιχείων μας. Γενικά μέσα σε ένα κύκλωμα θα βρεθούμε αντιμέτωποι με εμπεδήσεις της μορφής  $Z = A + Bj$ . Εμάς όμως μας ενδιαφέρει το μέτρο της  $Z$  και η φάση της. Οπότε θα γράφουμε την  $Z$  ως εξής:  $Z < \phi$ .<sup>[3]</sup>



Με  $Z$  θα συμβολίζουμε το μέτρο της εμπέδησης και με  $\Phi$  την φάση που θα έχει το διερχόμενο ρεύμα από την εμπέδηση ως προς την αντίστοιχη τάση στα άκρα της εμπέδησης. Ή διαφορετικά αυτή είναι η φάση της εμπέδησης. Συνοψίζοντας λοιπόν η εμπέδηση χαρακτηρίζεται από το μέτρο της  $Z$  και την φάση της  $\Phi$ . Όπου παρακάτω γράφουμε με τι ισούται τα δύο αυτά.

$$Z = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

Πρακτικά κάθε ηλεκτρικό εξάρτημα έχει και χωρητική και ωμική και επαγωγική συμπεριφορά, έστω και λίγο. Δηλαδή δεν έχουμε τέλειους πυκνωτές, πηνία και αντιστάσεις, αλλά ένα άθροισμα των τριών αυτών. Πέρα όμως από αυτό στις κατασκευές μας πολύ συχνά ερχόμαστε αντιμέτωποι με κυκλώματα που διαθέτουν και τα τρία αυτά στοιχεία. Τα κυκλώματα αυτά τα λέμε  $RLC$ .

#### 1.2.4 Κυκλώματα $RLC$

Το κύκλωμα που έχει ένα πηνίο, ένα πυκνωτή και μια αντίσταση συνδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ονομάζεται  $RLC$ . Εκείνο που είναι ενδιαφέρον και με αυτό θα ασχοληθούμε σε αυτή την ενότητα, είναι ότι τέτοια κυκλώματα είναι πρακτικά αρμονικοί ταλαντωτές. Θα εισάγουμε λοιπόν εδώ κάποια νέα μεγέθη που θα μας χρειαστούν στη συνέχεια.

Όπως συμβαίνει με κάθε ταλαντωτή έτσι και εδώ έχουμε μια ιδιοσυχνότητα  $f_0$ , που τη λέμε συχνότητα του κυκλώματος.<sup>[5]</sup> Αν δώσουμε μια στιγμιαία τάση στο κύκλωμα τότε πράγματι αυτό θα ταλαντώνεται με αυτή την ιδιοσυχνότητα. Δηλαδή το ρεύμα που θα διαπερνά το κύκλωμα θα είναι της μορφής  $I = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ . Όπου  $\omega_0$  είναι η κυκλική συχνότητα και ισούται με  $2\pi f_0$ . Η  $f_0$  εξαρτάται από τα  $L$  και  $C$  σύμφωνα με την εξίσωση που απεικονίζεται παρακάτω<sup>[5]</sup>:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Το ρεύμα στο κύκλωμα δεν θα διαρκεί επ'άπειρο. Για το λόγο αυτό ευθύνεται η αντίσταση του κυκλώματος. Συγκεκριμένα το πλάτος του ρεύματος φθίνει εκθετικά με το χρόνο. Με μεγάλες τιμές της αντίστασης μάλιστα δεν έχουμε καθόλου ταλάντωση με μια στιγμιαία διέγερση. Εμάς πάντως μας ενδιαφέρει η περίπτωση όπου η πηγή θα είναι της μορφής  $V = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ . Σε αυτές τις περιπτώσεις πάντα θα έχουμε ταλάντωση αλλά με διαφορετική τιμή ρεύματος ανάλογα τη συχνότητα της πηγής. Η αντίσταση πάντως και εδώ παίζει το ρόλο της απόσβεσης. Την απόσβεση  $\alpha$  την μετράμε σε Nr/s ή πιο πρακτικά σε 1/s. Ορίζουμε επίσης το αδιάστατο μέγεθος  $\zeta = \alpha/\omega_0$ . Το  $\zeta$  το λέμε συντελεστή απόσβεσης.

Ένα ακόμα χρήσιμο μέγεθος είναι ο συντελεστής ποιότητας  $Q$ . Γενικά ο συντελεστής ποιότητας είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος στους ταλαντωτές. Ορίζεται ως η μέγιστη ενέργεια που αποθηκεύεται στο κύκλωμα διαιρεμένη με τις απώλειες ενέργειας στο κύκλωμα αυτό σε μια περίοδο.<sup>[5]</sup>

$$Q = 2\pi \frac{\text{Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια}}{\text{Ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα κύκλο}}$$

Ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  συνδέεται με τον συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$  μέσω της ακόλουθης σχέσης

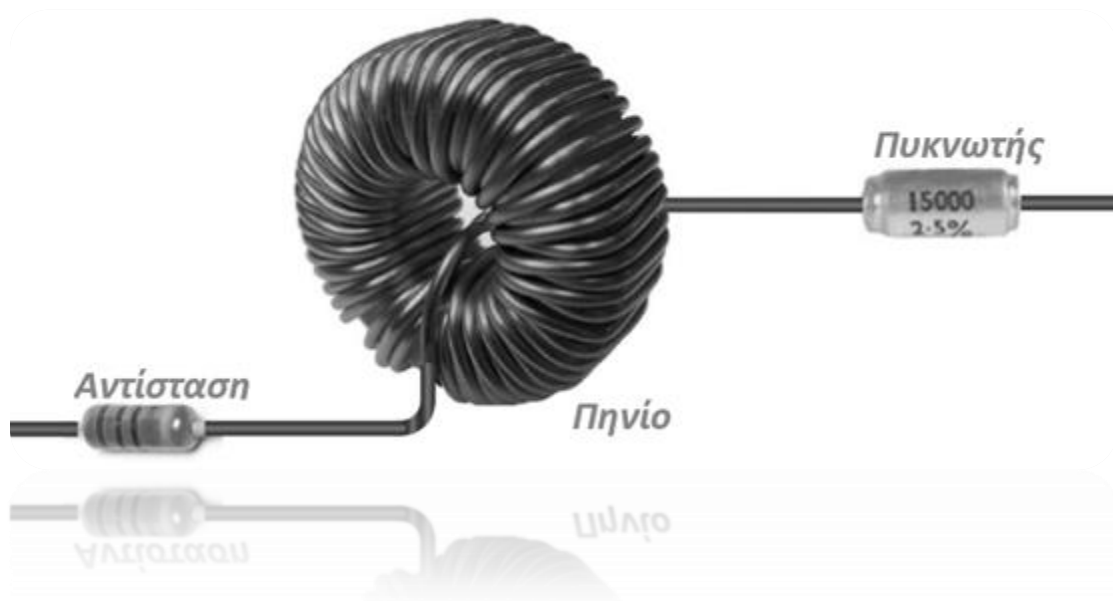
$$Q = \frac{1}{2\zeta}$$

Επίσης μπορούμε να ορίσουμε συντελεστή ποιότητας για ένα μόνο στοιχείο του κυκλώματος, όπως ένα πηνίο ή ένα πυκνωτή. Με δείκτη  $L$  δείχνουμε τα μεγέθη ενός πηνίου και με  $C$  εκείνα ενός πυκνωτή.

$$Q_L = \frac{Z_L}{R_L} = \frac{\omega L}{R_L} \qquad Q_C = \frac{Z_C}{R_C} = \frac{1}{\omega C R_C}$$

Με  $R_L$ ,  $R_C$  συμβολίζουμε τις αντιστάσεις απωλειών ενός πηνίου και ενός πυκνωτή αντίστοιχα.

Ακολουθεί εικόνα με ένα κύκλωμα  $RLC$  σε σειρά



### 1.3 Στοιχεία ακουστικής

Όπως είπαμε και στην αρχή η ηλεκτροακουστική αποτελεί διεπιστημονικό κλάδο της ηλεκτρονικής και της ακουστικής. Τώρα λοιπόν που αναλύσαμε από πλευράς ηλεκτρονικής ότι θα μας χρειαστεί ήρθε η ώρα να εισάγουμε τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα και τις εισαγωγικές έννοιες της ακουστικής. Ορίζουμε λοιπόν ως ακουστική τον κλάδο της φυσικής που μελετά τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του ήχου.<sup>[1]</sup>

Στην αρχή θα μελετήσουμε τη διάδοση κυμάτων στον αέρα και μετά θα δούμε τι αλλάζει κατά τη διάδοση σε διάφορα υλικά μέσα. Έτσι θα είμαστε σε θέση να δούμε πως συμπεριφέρεται ένας μικρός χώρος, όπως το εσωτερικό μιας καμπίνας ηχείου, ή όπως και ένας χώρος ακρόασης στην τελική. Έπειτα από την ακουστική μικρών χώρων θα εισάγουμε και το αντηχείο Helmholtz, το οποίο χρησιμοποιείται σαν θεωρητικό μοντέλο για την σχεδίαση της οπής ανάκλασης των χαμηλών ενός ηχείου. Στα επόμενα κεφάλαια βέβαια θα δούμε πιο αναλυτικά τους περιορισμούς που έχει το μοντέλο, και πως να σχεδιάσουμε καλύτερα μια τέτοια οπή.

Ένα αντικείμενο όχι και τόσο σχετικό με τα προηγούμενα είναι η επεξεργασία των ακουστικών σημάτων. Παρ'όλα αυτά θα μας χρειαστεί στην παρούσα μελέτη μας και έτσι θα το αναφέρουμε σε αυτή την ενότητα.

#### 1.3.1 Μετάδοση ηχητικών κυμάτων στον αέρα

Κύμα ονομάζεται μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο. Ο όρος κύμα χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής συνήθως διαμέσου ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή γίνεται στα υλικά μέσα ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου.<sup>[6]</sup>

Τα ηχητικά κύματα παράγονται από σώματα που εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις και επομένως χαρακτηρίζονται ως μηχανικά κύματα που μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Για την μετάδοση τους είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού είτε σε στερεή, είτε σε υγρή, είτε σε αέρια μορφή. Το αρχικό ερέθισμα προκαλεί μετατόπιση σε κάποια μέρη του μέσου. Αυτά στην πορεία ασκούν δυνάμεις στα γειτονικά μέρη και έτσι η διέγερση μεταδίδεται.

Στον αέρα πιο συγκεκριμένα γίνεται μεταφορά των ηχητικών κυμάτων μέσα από μεταβολές της πίεσης. Οι μεταβολές της πίεσης είναι στην ουσία οι διεγέρσεις και μετατοπίσεις που είπαμε παραπάνω. Αυτές οι μεταβολές γίνονται κατά την διάδοση του κύματος. Κατά τη διάδοση δηλαδή, δημιουργούνται πυκνώματα και αραιώματα της πίεσης στη φορά της κίνησης μάλιστα. Αυτό σημαίνει ότι τα ηχητικά κύματα στον αέρα είναι διαμήκη. Γενικότερα στα ρευστά διαδίδονται μόνο διαμήκη

ηχητικά κύματα, ενώ στα στερεά είναι εφικτή η μετάδοση και των δύο μορφών κυμάτων. Δηλαδή διαμηκών και εγκάρσιων.<sup>[6]</sup>

Στον αέρα τα κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του ήχου. Αυτή είναι 343 m/s στους 20°C και γενικά μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Εξαρτάται πάντως από την πίεση, την θερμοκρασία και την πυκνότητα του αέρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως θα την θεωρούμε σταθερή. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα αναφέρεται η κάθε μεταβολή.

### 1.3.2 Αλληλεπίδραση του ήχου με τα διάφορα υλικά μέσα

Όπως είπαμε και πριν ο ήχος διαδίδεται και στα υλικά μέσα. Βέβαια τα μέσα αυτά έχουν διαφορετική πυκνότητα, η οποία όπως θα δούμε αμέσως, αλλάζει τη ταχύτητα διάδοσης του ήχου στα μέσα αυτά.

Πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα διάδοσης του ήχου  $c$  συνδέεται με την πυκνότητα  $\rho$  και με το μέτρο ελαστικότητας  $Y$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$c^2 = \frac{Y}{\rho}$$

Όπου με  $Y$  ορίζουμε το μέτρο ελαστικότητας του Young.<sup>[6]</sup> Δηλαδή τον λόγο της διαμήκουσ τάσης που ασκούμε σε ένα στερεό προς την αντίστοιχη διαμήκη παραμόρφωση. Έτσι λοιπόν η ταχύτητα διάδοσης ενός ηχητικού κύματος μέσα σε ένα στερεό εξαρτάται από το ίδιο το στερεό και σε κάθε περίπτωση μπορεί να είναι διαφορετική από εκείνη του αέρα.

Σε ένα ογκώδες στερεό, εκτός από την διάδοση των διαμηκών κυμάτων έχουμε και διάδοση εγκάρσιων κυμάτων. Στα ισοτροπικά μέσα μάλιστα η ταχύτητα διάδοσης του ήχου αλλάζει και εκφράζεται πλέον από την ακόλουθη σχέση.

$$c^2 = \frac{Y}{1-2\nu} \left\{ \frac{1}{3} + 2 \left( \frac{1}{3} - \frac{\nu}{1+\nu} \right) \right\} \rho$$

Με  $\nu$  συμβολίζουμε τον αριθμό Poisson. Στα μη ισοτροπικά μέσα η έκφραση της ταχύτητας είναι διαφορετική. Εμείς πάντως θα ασχοληθούμε μόνο με ισοτροπικά μέσα ή σχεδόν ισοτροπικά. Συνεπώς δεν θα αναφέρουμε εδώ περισσότερα για την ταχύτητα.

Γενικά για την δημιουργία και τη μετάδοση ηχητικών κυμάτων ας υποθέσουμε ότι χρειαζόμαστε κάποια δύναμη  $F$ . Όταν μάλιστα έχουμε απώλειες στο μέσο διάδοσης τότε η  $F$  ασκείται συνεχώς για να συνεχιστεί η διάδοση του κύματος. Τις απώλειες αυτές όπως και στη αρχή του κεφαλαίου θα τις λέμε εμπέδηση  $Z$ . Η δύναμη  $F$  εδώ παίζει το ρόλο της τάσης και η ταχύτητα  $v$  παίζει το

ρόλο του ρεύματος. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε μια σχέση που να συνδέει τα τρία αυτά μεγέθη.

$$Z = \frac{F}{v}$$

Όπως είδαμε παραπάνω με τα διάφορα υλικά μέσα αλλάζει η ταχύτητα. Ή με άλλα λόγια για να πετύχουμε την ίδια ταχύτητα διάδοσης χρειαζόμαστε διαφορετική δύναμη. Έτσι ορίζουμε ως εμπέδηση  $Z$  τον παραπάνω λόγο. Η εμπέδηση είναι χαρακτηριστικό του κάθε υλικού. Το μέτρο της εμπέδησης  $Z$  συνδέεται με την ταχύτητα διάδοσης  $c$  και την πυκνότητα  $\rho$ . Συγκεκριμένα

$$Z = c\rho$$

Τι γίνεται όμως όταν αλλάζει η εμπέδηση κατά τη φορά του κύματος. Δηλαδή όταν το κύμα αλλάζει μέσο διάδοσης. Σε αυτό το ερώτημα καλούμαστε να απαντήσουμε αμέσως τώρα. Δεν θα παρουσιάσουμε εδώ την πλήρη λύση του προβλήματος. Θα αρκεστούμε απλώς στο γεγονός ότι ένα μέρος του κύματος διαδίδεται στο νέο μέσο και ένα μέρος ανακλάται πίσω στο αρχικό μέσο. Θα δώσουμε επίσης τον λόγο πλατών και θα είμαστε καλυμμένοι. Με  $A_1$  συμβολίζουμε το αρχικό πλάτος του κύματος. Με  $B_1$  το ανακλώμενο νέο κύμα στο ίδιο μέσο διάδοσης. Και τέλος με  $A_2$  θα γράφουμε το κύμα στο νέο μέσο, το οποίο και συμβολίζουμε με δείκτη  $2$ . Το κύμα αυτό έχει εκτός από το πλάτος ίδια χαρακτηριστικά με το αρχικό μας κύμα, εξού και ο συμβολισμός με  $A_2$ . Οι παρακάτω δύο τύποι δίνουν τους λόγους πλατών συναρτήσει των εμπεδήσεων των δύο μέσων  $Z_1, Z_2$ .

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \qquad \frac{A_2}{A_1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Το ανακλώμενο κύμα πέρα από την αλλαγή πλάτους σε σχέση με το αρχικό έχει και αντιστροφή φάσης. Η συνθήκη αυτή μας οδηγεί στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων, τα οποία και θα μελετήσουμε στην επόμενη ενότητα.

Προς το παρόν πάντως μπορούμε να δούμε πως για  $Z_2 \gg Z_1$  έχουμε ανάκλαση. Δηλαδή αν παρεμβάλουμε ένα σώμα τελείως διαφορετικό από το μέσο διάδοσης στην κατεύθυνση του κύματος έχουμε ανάκλαση. Αν το εμπόδιο είναι περατό ή διαπερατό τότε έχουμε περίθλαση. Ενώ όταν αλλάζει σταδιακά η εμπέδηση, ή αλλιώς το μέσο, έχουμε διάθλαση του ήχου.

### 1.3.3 Ακουστική μικρών χώρων

Αυτή η ενότητα μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαίνεται εκτός θέματος. Στην πράξη όμως το εσωτερικό μιας καμπίνας ηχείου είναι ένας μικρός χώρος. Έχει μια συγκεκριμένη ακουστική και κάποιες ιδιότητες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

Αρχικά θα πούμε τι ορίζουμε μικρό. Έχοντας κατά νου τις συχνότητες από τα 16 Hz έως τα 20 kHz θα ασχοληθούμε με τα αντίστοιχα μήκη κύματος, ήτοι από 21,4 μέτρα περίπου έως 17 χιλιοστά του μέτρου. Όποιος χώρος δηλαδή είναι μικρότερος από 21 μέτρα στην μεγαλύτερη του διάσταση θεωρείται μικρός για την μελέτη μας. Βλέπουμε πως η καμπίνα ενός ηχείου είναι ένας ξεκάθαρα μικρός χώρος και αυτό δεν γίνεται να αλλάξει. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι στους μικρούς χώρους αλλάζει άρδην η ακουστική, μέσα στο συχνοτικό φάσμα, και δεν γίνεται να τους μελετήσουμε με τη χρήση ενός μόνο θεωρητικού μοντέλου. Συνεπώς θα χωρίσουμε το ακουστικό φάσμα σε τέσσερις περιοχές, όπου στην κάθε μια θα εφαρμόσουμε διαφορετικά μοντέλα.<sup>[7]</sup>

Η πρώτη περιοχή A αποτελείται από τα 16 Hz –  $f_1$ . Όπου  $f_1$  είναι η ακόλουθη συχνότητα  $f_1 = c/2L$ .<sup>[7]</sup> Με  $L$  συμβολίζουμε το μήκος της μεγαλύτερης πλευράς της καμπίνας. Δεδομένου ότι έχουμε να κάνουμε με καμπίνες μερικών εκατοστών σε διαστάσεις αναμένουμε μια συχνότητα  $f_1 \approx 350\text{Hz}$ . Σε αυτή την περιοχή η καμπίνα δεν ενισχύει με κανένα τρόπο τις παραγόμενες συχνότητες.

Η δεύτερη περιοχή  $f_1 - f_2$  περιλαμβάνει ηχητικά κύματα των οποίων οι συχνότητες επιβάλλουν στον χώρο να συμπεριφερθεί ως ηχητικός σωλήνας να δημιουργήσει, δηλαδή στάσιμα κύματα. Το εύρος αυτής της περιοχής είναι ανάλογο με τον χρόνο αντήχησης και αντιστρόφως ανάλογο με τον όγκο της καμπίνας. Πριν πούμε περισσότερα όμως για αυτή την περιοχή θα μιλήσουμε για την αντήχηση.

Κάθε ήχος παράγεται μέσα από μια διέγερση. Όταν πάψει αυτή η διέγερση ο ήχος συνεχίζει να διαδίδεται για λίγο ακόμα. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως αντήχηση. Την αντήχηση την μετράμε σε sec. Υπάρχει ένας εμπειρικός τύπος γνωστός ως εξίσωση Sabine που μας δίνει θεωρητικά τον χρόνο αντήχησης. Ορίζουμε ως χρόνο αντήχησης τον χρόνο εκείνο που ο αρχικός ήχος έχει μειωθεί κατά 60dB. Τον συμβολίζουμε με  $RT60$ . Ως μηδενική χρονική στιγμή λαμβάνουμε τη στιγμή κατά την οποία παύει η διέγερση που προκάλεσε τον ήχο. Έχουμε λοιπόν

$$RT60 = 0.1607 \frac{V}{Sa}$$

Με  $V$  συμβολίζουμε τον όγκο του υπό μελέτη χώρου, δηλαδή της καμπίνας. Ως μονάδα μέτρησης του υιοθετούμε τα λίτρα. Το γινόμενο  $Sa$  μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας την συμπεριφορά όλων των επιμέρους επιφανειών και υλικών, τα οποία χαρακτηρίζονται, από διαφορετικούς συντελεστές απορρόφησης.<sup>[7]</sup> Όλες οι επιφάνειες μετρούνται σε  $dm^2$ .

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τους συντελεστές διάφορων υλικών. Οι συντελεστές όπως βλέπουμε αλλάζουν με την συχνότητα. Ο πίνακας μας δίνει έξι

τυπικές συχνότητες που καλύπτουν όλο το φάσμα συχνοτήτων που θα διαδοθούν μέσα σε μια καμπίνα ηχείου, και θα επηρεαστούν από αυτή.

| Ceiling Materials              | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Acoustic Tiles                 | 0.05   | 0.22   | 0.52   | 0.56    | 0.45    | 0.32    |
| Acoustic Ceiling Tiles         | 0.70   | 0.66   | 0.72   | 0.92    | 0.88    | 0.75    |
| Fiberglass: 2" 703 no airspace | 0.22   | 0.82   | 0.99   | 0.99    | 0.99    | 0.99    |
| Fiberglass: spray 5"           | 0.05   | 0.15   | 0.45   | 0.70    | 0.80    | 0.80    |
| Fiberglass: spray 1"           | 0.16   | 0.45   | 0.70   | 0.90    | 0.90    | 0.85    |
| Fiberglass: 2" rolls           | 0.17   | 0.55   | 0.80   | 0.90    | 0.85    | 0.80    |
| wood                           | 0.15   | 0.11   | 0.10   | 0.07    | 0.06    | 0.07    |
| Foam: Sonex 2"                 | 0.06   | 0.25   | 0.56   | 0.81    | 0.90    | 0.91    |
| Foam: SDG 3"                   | 0.24   | 0.58   | 0.67   | 0.91    | 0.96    | 0.99    |
| Foam: SDG 4"                   | 0.33   | 0.90   | 0.84   | 0.99    | 0.98    | 0.99    |
| Foam: polyur. 1"               | 0.13   | 0.22   | 0.68   | 1.00    | 0.92    | 0.97    |
| Foam: polyur. 1/2"             | 0.09   | 0.11   | 0.22   | 0.60    | 0.88    | 0.94    |
| Plaster: smooth on tile/brick  | 0.013  | 0.015  | 0.02   | 0.03    | 0.04    | 0.05    |
| Plaster: rough on lath         | 0.02   | 0.03   | 0.04   | 0.05    | 0.04    | 0.03    |
| Sheetrock 1/2" 16" on center   | 0.29   | 0.10   | 0.05   | 0.04    | 0.07    | 0.09    |
| Wood: 3/8" plywood panel       | 0.28   | 0.22   | 0.17   | 0.09    | 0.10    | 0.11    |

Τώρα λοιπόν που ορίσαμε τον χρόνο αντήχησης μπορούμε να ορίσουμε και τη συχνότητα  $f_2$ . Αυτή έχει βρεθεί πειραματικά και περιγράφεται αυθαίρετα από τον ακόλουθο τύπο.

$$f_2 = 18791 \sqrt{\frac{RT60}{V}} = 18791 \sqrt{\frac{0.1607}{Sa}}$$

Η  $f_2$  βλέπουμε πως δεν επηρεάζεται τελικά από τον όγκο της καμπίνας, παρά μόνο από τις επιφάνειες και τους συντελεστές απορρόφησης των υλικών που απαρτίζουν αυτές τις επιφάνειες.<sup>[7]</sup>

Στην περιοχή  $f_1 - f_2$  μπορούν να αναπτυχθούν στάσιμα κύματα. Η συχνότητα  $f$  ενός στάσιμου κύματος δίνεται από τον ακόλουθο τύπο

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

Όπου τα  $L, W, H$  είναι αντίστοιχα το μήκος, το πλάτος και το ύψος ενός χώρου. Από την άλλη τα  $p, q, r$  είναι ακέραιοι αριθμοί που παίρνουν τις τιμές 0,1,2...<sup>[7]</sup>

Ανάλογα τις τιμές που παίρνουν λοιπόν έχουμε διάφορους ιδιορρυθμούς, τους οποίους και θα ονομάζουμε (100) ή (010) για παράδειγμα. Τους δύο αυτούς ρυθμούς τους λέμε αξονικούς τρόπους ταλάντωσης. Αξονικός είναι και ο ρυθμός (001), καθώς επίσης και τα πολλαπλάσια αυτών [(200),(300),(040),(003)]. Μετά

έχουμε τους εφαπτομενικούς ρυθμούς ταλάντωσης όπως για παράδειγμα αναφέρουμε τον (110) ή τον (011). Τέλος υπάρχουν και οι πλάγιοι ρυθμοί όπως ο (111). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εφαπτομενικοί ιδιορρυθμοί έχουν στάθμες 3dB χαμηλότερα και οι πλάγιοι 6dB χαμηλότερα από τους αξονικούς ιδιορρυθμούς.<sup>[7]</sup>

Γενικά δεν υπάρχει τρόπος να γλιτώσουμε από τα στάσιμα κύματα μιας καμπίνας. Μπορούμε απλώς να αλλάξουμε τις πλευρές έτσι ώστε να μην έχουμε ποτέ δύο ή περισσότερους ιδιορρυθμούς σε μια συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την υπερβολική ενίσχυση αυτής της μιας συχνότητας. Παράλληλα, σε όλο και περισσότερες συχνότητες αντιστοιχεί ένας ιδιορρυθμός. Έτσι επιτυγχάνουμε μια κάπως πιο ομαλή ενίσχυση του φάσματος. Πρακτικά για να πετύχουμε ένα τέτοιο αποτέλεσμα χρειαζόμαστε καμπίνα με λόγο εσωτερικών διαστάσεων 1.000:1.618:2.618

Μια ακόμα άμβλυση του προβλήματος είναι να μην φορτίσουμε πολύ τους ιδιορρυθμούς της καμπίνας με την πηγή μας. Πειραματικά πάλι, έχει βρεθεί ότι όταν η πηγή των κυμάτων, δηλαδή το μεγάφωνο στην περίπτωση μας, έχει κάποια απόσταση από τα τοιχώματα τότε δεν προκύπτουν τόσο ισχυροί συντονισμοί. Αυτό γίνεται επειδή οι ιδιορρυθμοί του χώρου δεν φορτίζονται πάρα πολύ. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από το Q του μεγαφώνου αλλά σε γενικές γραμμές για έναν μεγάλο αριθμό μεγαφώνων χρειαζόμαστε αποστάσεις ίσες με το 20% του μήκους κύματος. Συνήθως του μήκους κύματος από τον πρώτο αξονικό τρόπο ταλάντωσης. Αυτό είναι λογικό γιατί τα μήκη κύματος από μεγαλύτερες ιδιοσυχνότητες είναι πιο μικρά και άρα πληρείται η προϋπόθεση για την μη δημιουργία στάσιμων κυμάτων.

Μετά την συχνότητα  $f_2$  έχουμε μια περιοχή που την ονομάζουμε περιοχή αποκοπής του χώρου. Η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι μια συχνότητα  $f_3$ , για την οποία ισχύει  $f_3 = 4f_2$ . Στην περιοχή  $f_2 - f_3$  κυριαρχεί η διάχυση του ήχου και δεν έχουμε να μελετήσουμε κάτι το ιδιαίτερο εδώ.<sup>[7]</sup>

Από την  $f_3$  και μέχρι τα 20000 Hz ο ήχος μπορεί να μελετηθεί με τις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.<sup>[7]</sup> Αυτό είναι εφικτό επειδή τα μήκη κύματος πλέον είναι πολύ μικρά. Η γεωμετρική ακουστική αντιμετωπίζει τον ήχο ως διαδιδόμενο ευθύγραμμο, κύμα, με τις ανακλάσεις του να καθορίζονται από τους γνωστούς κανόνες της οπτικής. Η γωνία πρόσπτωσης και ανάκλασης είναι ίσες.<sup>[7]</sup> Ουσιαστικά μιλάμε για συχνότητες πάνω από τα 4-5 kHz. Μέσα σε μια καμπίνα ενός ηχείου δεν έχουμε τέτοιες συχνότητες, επειδή καλείται να τις αναπαράγει ένα μεγάφωνο που έχει τον δικό του κλειστό θάλαμο. Αυτό το μεγάφωνο το ονομάζουμε tweeter και θα ασχοληθούμε με αυτό πιο αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο, το κεφάλαιο των μεγαφώνων.

### 1.3.4 Αντηχείο Helmholtz

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε ότι στις πολύ χαμηλές συχνότητες δεν μπορούμε να ενισχύσουμε μέσω της καμπίνας τον ήχο. Από την άλλη όμως για την



παραγωγή αυτών των συχνοτήτων χρειαζόμαστε εξαιρετικά μεγάλους κώνους. Οι τελευταίοι απαιτούν με τη σειρά τους μεγάλη καμπίνα, μόνο και μόνο για τη στήριξη, και γενικότερα μας οδηγούν σε μια πιο δαπανηρή οικονομικά σχεδίαση.

Έτσι λοιπόν έπρεπε να γίνει κάτι, το οποίο να ενισχύει τον σχετικά αδύναμο ήχο ενός μεγαφώνου κανονικών διαστάσεων. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι το λεγόμενο αντηχείο του Helmholtz.<sup>[7]</sup> Τα αντηχεία αυτά όταν λαμβάνουν ηχητική ενέργεια με τη μορφή κύματος, δεν την απορροφούν. Αντίθετα την ακτινοβολούν σε μορφή ημισφαιρίου από το άνοιγμα τους. Έτσι προκαλούν ουσιαστικά διάχυση στον ήχο. Αυτό είναι καλό γιατί γεμίζουν ομοιόμορφα τον χώρο μας.<sup>[7]</sup>

Πάντως βρίσκουμε στην ιστορία ακουστικά τεχνουργήματα που δουλεύουν με βάση την θεωρία του Helmholtz πολύ πριν από τον ίδιο. Συγκεκριμένα στην αρχαία Ελλάδα συναντάμε τα πρώτα ευρήματα. Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν ως αντηχεία Helmholtz κάποιες γλάστρες μεγάλου μεγέθους, προκειμένου να προσδίδουν αντήχηση στα υπαίθρια θέατρα τους.

Ενώ στην αρχαία Ελλάδα η αντήχηση ήταν χρήσιμη, στην περίπτωση μιας σχεδίασης ηχείου μπορεί να είναι πρόβλημα. Πολλές φορές έχει εκφραστεί η ανησυχία ότι, οι σχεδιάσεις που στηρίζονται στα αντηχεία Helmholtz, οι επονομαζόμενες bass reflex, ηχούν με το δικό τους χρόνο. Δηλαδή αλλοιώνουν τη μουσική που καλούνται να αναπαράξουν.

Το αντηχείο Helmholtz χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή ποιότητας  $Q$ .<sup>[7]</sup> Αν μετρήσουμε πειραματικά την καμπύλη απόκρισης του αντηχείου μπορούμε μέσα από τον τύπο  $Q = f_0 / \Delta f$  να μετρήσουμε τον συντελεστή ποιότητας. Με  $f_0$  ορίζουμε τη συχνότητα συντονισμού του αντηχείου και με  $\Delta f$  το εύρος των συχνοτήτων που η στάθμη έχει μειωθεί κατά 3dB.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι όταν αυξάνει το  $Q$  αυξάνεται και ο χρόνος αντήχησης. Μεγάλα  $Q$  της τάξης του 100 δίνουν χρόνο αντήχησης μερικά sec. Δεδομένου ότι ο χρόνος αντήχησης μέσα σε μια καμπίνα είναι λιγότερο από 1sec χρειαζόμαστε συντελεστές ποιότητας με μερικές μονάδες το πολύ. Για να πετύχουμε μικρά  $Q$  κατασκευάζουμε τις καμπίνες από ξύλο. Έτσι έχουμε το ζητούμενο μικρό χρόνο αντήχησης και παράλληλα κερδίζουμε μεγαλύτερο εύρος ενίσχυσης. Βέβαια θυσιάζουμε λίγο από το πλάτος της ενίσχυσης αλλά αυτό δεν είναι τόσο μεγάλο πρόβλημα.

Ανάλογα τον όγκο της καμπίνας που έχουμε μπορούμε να βρούμε το μέγεθος του σωλήνα που θα χρησιμοποιήσουμε από τον παρακάτω τύπο

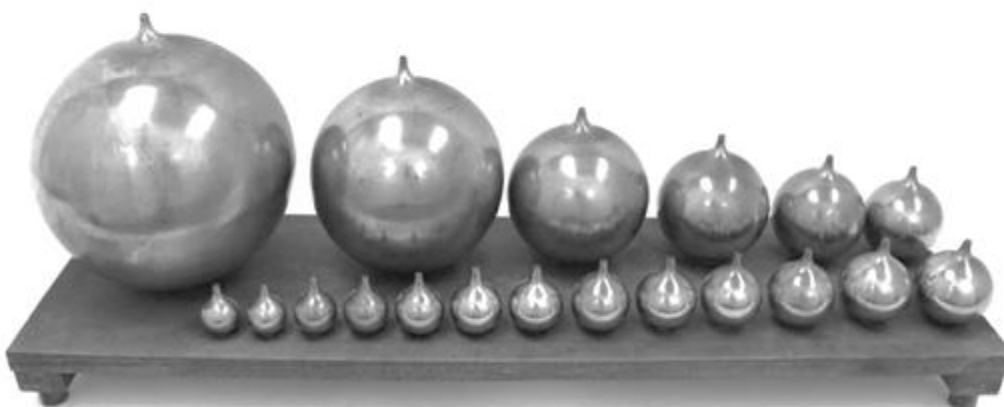
$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L_{eq}}}$$

Όπου με  $A$  συμβολίζουμε το εμβαδό του ανοίγματος και με  $V_0$  είναι ο εσωτερικός όγκος της καμπίνας.

Με  $L_{eq}$  γράφουμε το ισοδύναμο μήκος του σωλήνα ή αλλιώς του ανοίγματος. Για το τελευταίο ισχύει η σχέση  $L_{eq} = L + 0.3D$ .  $L$  είναι το πραγματικό μήκος του σωλήνα και αν μιλάμε για κυκλικής διαμέτρου σωλήνα  $D$  είναι η διάμετρος του. Στην αγορά υπάρχουν έτοιμοι, κυκλικής διαμέτρου σωλήνες, σε ποικιλία μεγεθών και έτσι χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να υποθέσουμε ότι ένα ηχείο θα έχει τέτοιο σωλήνα. Συνεπώς δεν χρειάζεται να πούμε τα ισοδύναμα μήκη άλλων περιπτώσεων σωλήνων.

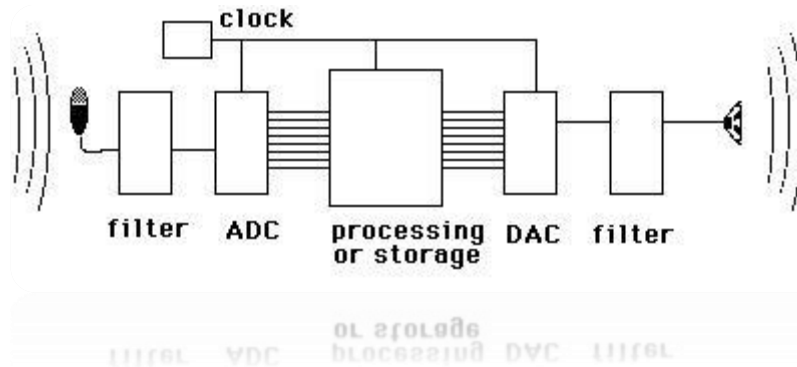
Ο παραπάνω τύπος μπορεί να εφαρμοστεί με καλή προσέγγιση αρκεί το ρευστό που ρέει μέσα από το αντηχείο να είναι ασυμπίεστο. Ασυμπίεστη ροή καλούμε εκείνη της οποίας οι μεταβολές πυκνότητας είναι αμελητέες μέσα σε όλη της την έκταση. Από τις γνώσεις της ρευστομηχανικής προκύπτει ότι ο αέρας είναι ασυμπίεστος για ταχύτητες του κύματος αρκετά μικρότερες από την ταχύτητα του ήχου. Πιο συγκεκριμένα για την μέτρηση της συμπίεστικότητας ορίζουμε τον αριθμό Mach  $M = v/c$ .  $v$  είναι η ταχύτητα του ρευστού και  $c$  εκείνη του ήχου. Είναι απαραίτητη προϋπόθεση ο αριθμός Mach να είναι μικρότερος ή ίσος του 0.3 για να έχουμε μια ασυμπίεστη ροή.<sup>[8]</sup>

Στην πράξη λοιπόν πρέπει οι ταχύτητες που διέρχονται από την ωπή να είναι μικρότερες από 100m/s. Ανάλογα με το μεγάφωνο και τις στάθμες που επιθυμούμε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλου εμβαδού σωλήνα ώστε να μας παρέχει την απαραίτητη ροή χωρίς η ταχύτητα της να υπερβεί τα 100m/s.



### 1.3.5 Επεξεργασία ακουστικού σήματος

Στις προηγούμενες ενότητες είδαμε πως χρειαζόμαστε διάφορες μετρήσεις ακουστικών σημάτων. Σε τελική ανάλυση επίσης θα χρειαστεί να μετρήσουμε το ηχείο μας. Συνεπώς θέλουμε να επεξεργαστούμε ηχητικά σήματα. Για την επεξεργασία τους θα πρέπει να τα μετατρέψουμε σε ηλεκτρικά. Έπειτα με τη χρήση υπολογιστή μπορούμε να κάνουμε τις διάφορες μετρήσεις μας και επεξεργασίες.



Στην παραπάνω φωτογραφία βλέπετε ένα διάγραμμα της διαδικασίας της ηχογράφησης μιας φωνής από ένα μικρόφωνο.

Με τη χρήση ενός φίλτρου επιλέγονται οι συχνότητες που έχουμε ρυθμίσει όπως θέλουμε με αποτέλεσμα να μετατρέπεται ο ήχος σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα περνάει μέσα από το καλώδιό του, καταλήγει σε μια κάρτα ήχου όπου το σήμα ενισχύεται και τέλος έχουμε την απεικόνισή του στην οθόνη του υπολογιστή ως κυματομορφή. Τότε έχουμε και τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε τον ήχο και να κάνουμε εξαγωγή σε οποιοδήποτε τύπο αρχείου ήχου.

Η ψηφιοποίηση γίνεται από μια ειδική μονάδα, το μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ονόματι ADC. Για να γίνει αυτή η διαδικασία απαιτείται ειδικό υλικό και λογισμικό υπολογιστή. Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος συχνά αποτελεί τμήμα της κάρτας ήχου η οποία παίρνει δείγματα από το πρωτότυπο αναλογικό σήμα με συγκεκριμένο ρυθμό. Για κάθε δείγμα υπολογίζει το πλάτος και το στρογγυλοποιεί προς τη πλησιέστερη ακέραια τιμή. Όσο περισσότερα δείγματα χρησιμοποιούνται ανά μονάδα χρόνου, τόσο πιο καλή ποιότητα έχει ο ψηφιοποιημένος ήχος. Η είσοδος του αναλογικού σήματος γίνεται είτε από το μικρόφωνο, είτε από κάποια συσκευή αναπαραγωγής ήχου. Η ποιότητα της ψηφιοποίησης του ήχου χαρακτηρίζεται από δύο παράγοντες.

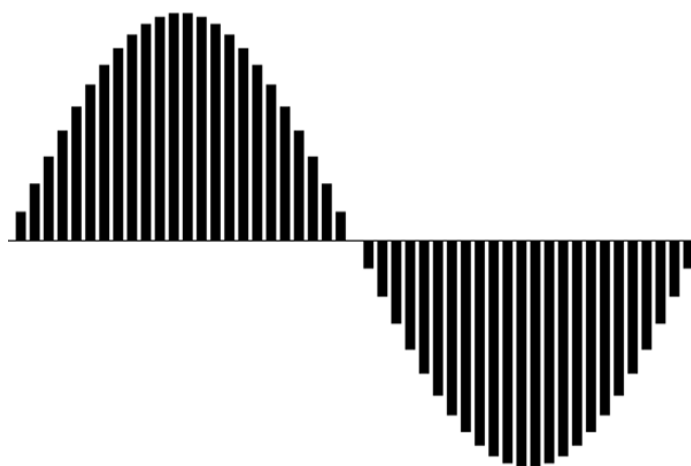
Πρώτον από τον ρυθμό δειγματοληψίας. Με αυτό εννοούμε τον ρυθμό δειγμάτων που παίρνει η κάρτα ήχου ανά δευτερόλεπτο. Μονάδα μέτρησης της δειγματοληψίας είναι τα kHz. Όσο πιο ψηλός είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας, τόσο πιο καλό αποτέλεσμα έχουμε. Πρέπει πάντως να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την μέγιστη συχνότητα του αρχικού αναλογικού σήματος. Οι συνηθέστεροι ρυθμοί δειγματοληψίας είναι τα 44.1 kHz και 48 kHz. Άλλοι ρυθμοί δειγματοληψίας είναι τα

88.2 kHz, 96 kHz, 176.4 kHz και 192 kHz. Ο ρυθμός δειγματοληψίας 44.1 KHz αντιστοιχεί σε μέτρηση της στάθμης του σήματος κάθε 1/44100 δευτερόλεπτα.

Δεύτερον η ποιότητα του ψηφιακού ήχου εξαρτάται από το εύρος του δείγματος που είναι ίσο με τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων, ή αλλιώς bit, που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή του πλάτους του σήματος. Αυτά τα bit καθορίζουν το πλήθος των δυνατών τιμών που μπορούν να αποθηκευτούν. Συνηθέστερες τιμές για το εύρος του δείγματος είναι τα 16 bit, τα 24bit, και τώρα τελευταία και τα 32bit. Με τα 16bit οι επιτρεπτές τιμές στάθμης ενός δείγματος είναι  $2^{16} = 65536$ . Αντίστοιχα με τα 24 έχουμε  $2^{24} = 16777216$ . Χωρίς αμφιβολία αυτές οι τιμές είναι υπέρ αρκετές για να περιγραφεί πλήρως ένα αναλογικό σήμα.

Συνεπώς χρειαζόμαστε μια τυπικώς καλή κάρτα ήχου για να κάνουμε τις μετρήσεις μας και πρωτίστως ένα πολύ καλό μικρόφωνο. Ειδικά αν θέλουμε να μετρήσουμε σήματα με χαμηλή συχνότητα μας αρκούν τα συνηθισμένα 44.1 kHz ή 48. Τα μικρόφωνα, από την άλλη, χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες. Ανάλογα με την συχνοτική περιοχή που μας ενδιαφέρει επιλέγουμε ένα μικρόφωνο με καλή ευαισθησία και ακρίβεια στην περιοχή αυτή.

Το ακουστικό σήμα ψηφιοποιημένο πλέον απεικονίζεται στον υπολογιστή μας. Για τις περισσότερες μετρήσεις μας χρησιμοποιούμε δύο είδη θορύβων, τον λευκό και τον ροζ. Λευκός ήχος είναι ένα τυχαίο σήμα με την ίδια ένταση σε διαφορετικές συχνότητες. Ροζ ήχος είναι ένα σήμα με φάσμα συχνοτήτων τέτοιο ώστε η φασματική πυκνότητα ενέργειας ή ισχύος ανά Hz, να είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας του σήματος. Στο ροζ θόρυβο κάθε οκτάβα μεταφέρει ίση ποσότητα ενέργειας του θορύβου. Το όνομα προέρχεται από τη ροζ εμφάνιση του ορατού φωτός με αυτό το φάσμα ισχύος. Με την παραγωγή ενός εκ των δυο αυτών θορύβων μπορούμε να μετρήσουμε την κρουστική απόκριση ενός ακουστικού συστήματος. Έπειτα με ανάλυση Fourier μετασχηματίζουμε την κρουστική απόκριση σε απόκριση συχνοτήτων. Έτσι έχουμε μια πλήρη εικόνα, τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και σε εκείνο των συχνοτήτων.



## 1.4 Στοιχεία μηχανικής

Για την σχεδίαση ηχείων, και την κατασκευή τους σε επόμενο στάδιο, χρειαζόμαστε μηχανικά μέσα. Μέσα τα οποία μπορούν να ταλαντωθούν κι έτσι να διεγείρουν τα μόρια του αέρα. Στην πλειοψηφία τους τα ηχεία αποτελούνται από έναν συγκεκριμένο τύπο μεγαφώνων. Αναρτώμενες μάζες συνδεδεμένες με ένα πηνίο ευρισκόμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι τα περισσότερα μεγάφωνα που θα συναντήσει κανείς σήμερα.

Κάπως έτσι λοιπόν είναι μάλλον χρήσιμο και σκόπιμο να εξετάσουμε πριν την ανάλυση των μεγαφώνων ορισμένα στοιχεία μηχανικής και τις ιδιότητες τους. Στη συνέχεια θα δούμε τις μηχανικές ταλαντώσεις. Έπειτα θα κάνουμε κάποιες αναλογίες των μηχανικών μερών ενός συστήματος με τα ηλεκτρικά μεγέθη ενός αντίστοιχου κυκλώματος.

### 1.4.1 Μάζα και αδράνεια

Η μάζα είναι εγγενής ιδιότητα των φυσικών σωμάτων. Μάζα είναι η ποσότητα της ύλης που περιέχεται σε ένα σώμα. Στο σύστημα μονάδων SI, η μάζα μετράται σε χιλιόγραμμα ή kg. Ένα χρήσιμο υποπολλαπλάσιο είναι τα γραμμάρια ή gr.

Στην κλασική μηχανική, η αδρανειακή μάζα εμφανίζεται ως σταθερά αναλογίας στον 2ο νόμο του Νεύτωνα

$$F = ma$$

Δηλαδή η αδρανειακή μάζα ορίζεται ως η ιδιότητα της ύλης να αντιστέκεται στις μεταβολές της κίνησης. Ισοδύναμα μπορούμε να πούμε πως είναι το μέτρο της αδράνειας ενός σώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδρανειακή μάζα ενός σώματος, τόσο μικρότερη επιτάχυνση υφίσταται από δεδομένη δύναμη που θα του ασκηθεί.

Στην μηχανική επίσης, ισχύει ότι η επιτάχυνση είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Έτσι θα προκύψει μια σχέση που θα συνδέει την δύναμη με την ταχύτητα για κάθε φυσικό σώμα.

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

Αυτή η σχέση θα πρέπει να μας θυμίζει έντονα την εξίσωση που ερμηνεύει τα φαινόμενα ενός πηνίου. Πράγματι παρακάτω γράφουμε ξανά την τελευταία

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

Αν μάλιστα ασκήσουμε στο σώμα μας μια δύναμη της μορφής  $F = mA\omega \cos \omega t$  τότε αυτό θα κινείται με ταχύτητα, όπως προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση, ίση με  $v = A \sin \omega t$ , όπου  $A$  μια σταθερά. Κατά τα γνωστά ορίζουμε ως εμπέδηση ενός σώματος τον λόγο της ασκούμενης δύναμης σε αυτό προς την ταχύτητα του

$$Z = \frac{F}{v} = j\omega m$$

Για την κατασκευή ηχείων τα σήματα μας είναι ημιτονοειδή, οπότε μπορούμε εύκολα να καταφεύγουμε στις εμπεδήσεις αντί για τις μάζες των σωμάτων.

Από την απλή λογική δύο σώματα μάζας  $m_1$  και  $m_2$  όταν ευρίσκονται μαζί σε ένα ταλαντούμενο σύστημα ισοδυναμούν με μια μάζα  $m = m_1 + m_2$ . Οι δυο αυτές μάζες θα λέμε πως βρίσκονται σε σειρά. Η συνολική τους εμπέδηση θα ισοδυναμεί με μια  $Z = j\omega m$ . Οι επιμέρους εμπεδήσεις είναι  $Z_1 = j\omega m$  και  $Z_2 = j\omega m$ . Η σχέση που συνδέει όλες τις εμπεδήσεις είναι η παρακάτω

$$Z = Z_1 + Z_2$$

Για περισσότερες μάζες, έστω  $m_1, m_2, \dots, m_n$  έχουμε αντίστοιχα εμπεδήσεις  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  Ισχύει λοιπόν

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$$

Είδαμε πως η μάζα είναι στα μηχανικά συστήματα ότι είναι το πηνίο στα ηλεκτρικά. Και στα δύο συστήματα η μάζα και το πηνίο αντίστοιχα παρουσιάζουν μια αντίσταση στην μεταβολή της κίνησης. Μην ξεχνάμε ότι το ρεύμα στα ηλεκτρικά συστήματα είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων. Στην επόμενη ενότητα θα δούμε το ελατήριο το οποίο έχει ιδιότητες ανάλογες του πυκνωτή στα μηχανικά ταλαντούμενα συστήματα.

### 1.4.2 Ελατήριο και ελαστικότητα

Ελατήριο ονομάζεται ένα μηχανικό εξάρτημα το οποίο έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μηχανική ενέργεια. Για την αποθήκευση αυτής της ενέργειας παραμορφώνεται, αλλάζει δηλαδή το αρχικό του μήκος. Έτσι όταν έχουμε ένα ελατήριο σε ένα σύστημα ανάλογα με την μετατόπιση του συστήματος το ελατήριο προβάλλει κάποια δύναμη ή αλλιώς κάποια αντίσταση. Πράγματι, σύμφωνα και με το νόμο του Hooke το ελατήριο διέπεται από μια σχέση της ακόλουθης μορφής

$$F = kx$$

Η σταθερά  $k$  είναι ένας δείκτης ελαστικότητας του ελατηρίου. Μονάδα μέτρησης του είναι τα  $N/m$ . Κάθε σώμα που θα παρουσιάζει μια ελαστικότητα, θα την εκφράζουμε με έναν συντελεστή  $k$ .

Όπως είχαμε κάνει και στην ενότητα με τον πυκνωτή, έτσι και εδώ θα παραγωγίσουμε την παραπάνω σχέση μας. Επειδή είναι  $v = \frac{dx}{dt}$  θα έχουμε

$$\frac{dF}{dt} = kv$$

Βλέπουμε δηλαδή πως τα φυσικά σώματα, που διέπονται από ελαστικότητα, παρουσιάζουν κατά κάποιο τρόπο μια δύναμη στην όποια κίνηση. Δεν θα μας απασχολήσει περισσότερο το ζήτημα, πάντως είναι καλό να γνωρίζουμε ότι κάθε σώμα χαρακτηρίζεται και από μάζα και από ελαστικότητα.

Κατά τα γνωστά πλέον, για τα ημιτονοειδή σήματα έχουμε την εμπέδηση εκφρασμένη με την βοήθεια των μιγαδικών αριθμών όπως παρακάτω

$$Z = \frac{F}{v} = -j \frac{k}{\omega}$$

Πέρα από τις δύο αυτές ιδιότητες που μπορεί να έχει ένα φυσικό σώμα θα δούμε πως υπάρχουν και οι τριβές. Οι τελευταίες αναπτύσσονται και αντιτίθενται σε κάθε κίνηση του σώματος. Είναι δηλαδή ανάλογες στην κίνηση του σώματος. Για την ακρίβεια αντίθετες. Στην επόμενη ενότητα λοιπόν θα γνωρίσουμε την έννοια της τριβής και τις απώλειες που αυτή εισάγει. Φυσικά όταν ακούμε απώλειες σκεφτόμαστε την αντίσταση. Πράγματι η τριβή είναι το μηχανικό ανάλογο της αντίστασης.

### 1.4.3 Τριβή και απώλειες

Ορίζουμε ως τριβή την δύναμη αντίστασης που εκδηλώνεται ενάντια σε οποιαδήποτε σχετική κίνηση δύο σωμάτων. Η φορά της εκδηλωμένης τριβής είναι πάντα αντίθετη προς την φορά της κίνησης. Το μέτρο από την άλλη είναι πάντα σε αναλογία με την ταχύτητα κίνησης. Είναι δηλαδή της μορφής  $F_T = rv$ . Όπου  $r$  μια σταθερά.

Από τον τύπο που ισχύει για την εμπέδηση βλέπουμε εύκολα ότι η εμπέδηση μιας τριβής στο σύστημα είναι  $Z = r$ . Η τριβή επειδή συνδέεται με απώλειες ενέργειας για το σύστημα, θα συνδέεται και με μια κατανάλωση ισχύος.

Όπως θα δούμε και παρακάτω η τριβή για τα μηχανικά συστήματα είναι το μόνο στοιχείο που καταναλώνει ενέργεια. Η μάζα και τα ελαστικά στοιχεία αποθηκεύουν ενέργεια. Ουσιαστικά κάθε υλικό έχει, ανάλογα με την μάζα του και την ελαστικότητά του, μια ιδιοσυχνότητα.

Σε αυτή την ιδιοσυχνότητα η εσωτερική τριβή του υλικού παίζει μεγάλο ρόλο στη συμπεριφορά του. Γύρω από την ιδιοσυχνότητα πάντως, θα δούμε, στην επόμενη ενότητα, πως συμπεριφέρονται και τα ίδια τα υλικά, αλλά και τα διάφορα μηχανικά ταλαντούμενα συστήματα.

#### 1.4.4 Ταλαντούμενα συστήματα

Ένα σύστημα στην μηχανική, λοιπόν, έχει και αδράνεια, λόγω μάζας, και ελαστικότητα και απώλειες λόγω τριβής. Σύστημα στην ουσία είναι και κάθε σώμα μόνο του. Μπορούμε να γράψουμε τώρα πια την εμπέδηση ενός συστήματος

$$Z = r + j(\omega m - \frac{k}{\omega})$$

Αν ασκήσουμε μια δύναμη  $F$  στο σώμα μας της μορφής  $F = F_0 \cos \omega t$ , τότε από τον ορισμό της εμπέδησης, αυτό θα κινείται με μια ταχύτητα της μορφής

$$v = \frac{F}{Z} = \frac{F_0}{\left( r + j \left( \omega m - \frac{k}{\omega} \right) \right)} \cos \omega t$$

Από την παραπάνω σχέση εύκολα βλέπουμε ότι το σώμα θα εκτελέσει απλή αρμονική ταλάντωση, εφόσον και η δύναμη είναι τέτοιας μορφής, και το πλάτος της ταχύτητας είναι το ακόλουθο

$$|v| = \frac{F_0}{Z} = \frac{F_0}{\sqrt{\left( r^2 + \left( \omega m - \frac{k}{\omega} \right)^2 \right)}}$$

Το πλάτος δηλαδή εξαρτάται από τη συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα στις χαμηλές συχνότητες κυριαρχεί ο όρος  $-\frac{k}{\omega}$ , με αποτέλεσμα η σύνθετη αντίσταση να εξαρτάται από την ελαστικότητα κυρίως. Στις υψηλές συχνότητες, από την άλλη, η εμπέδηση και το μέτρο της ταχύτητας κατά προέκταση, εξαρτώνται από τον όρο  $\omega m$ . Σε μια συγκεκριμένη συχνότητα όμως, που τη λέμε  $\omega_0$ , ισχύει η σχέση  $\omega_0 m = \frac{k}{\omega_0}$ . Σε αυτή τη συχνότητα η εμπέδηση έχει την ελάχιστη τιμή της ίση με  $r$  και το πλάτος της ταχύτητας τότε αποκτά τη μέγιστη τιμή του. Το πλάτος στην  $\omega_0$  ισούται με  $F_0/r$ . Αυτή τη συχνότητα την λέμε ιδιοσυχνότητα και σε αυτήν η ταχύτητα είναι σε φάση με την ασκούμενη δύναμη.<sup>[6]</sup>



### 1.4.5 Μηχανικά κυκλώματα ηχείου και τα ηλεκτρικά τους ανάλογα

Είδαμε στις προηγούμενες ενότητες ότι τα μηχανικά συστήματα μοιάζουν στην μελέτη τους με τα ηλεκτρικά. Και τα δύο έχουν εμποδίες, κίνηση, και μια αιτία που την προκαλούν. Στα μηχανικά αυτή η αιτία είναι κάποια δύναμη. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα από την άλλη την λέμε τάση.

Στην αρχή της διπλωματικής όμως είχαμε πει ότι θα κάνουμε προσομοίωση όλων των εξαρτημάτων ενός ηχείου με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την προσομοίωση αυτή θα κάνουμε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που θα περιέχει όλα τα στοιχεία του ηχείου. Και τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά.

Όπως θα δούμε και παρακάτω ένα μεγάφωνο δέχεται στα άκρα του τάση  $V$ . Αυτή η τάση δημιουργεί ένα ρεύμα  $i$  και λόγω του μαγνητικού συστήματος δημιουργείται μια δύναμη  $F$ . Χάρη στον μαγνήτη έχουμε ένα μαγνητικό πεδίο και στις εξισώσεις θα εισάγουμε έναν παράγοντα  $Bl$  ο οποίος μας λέει πόσα  $N/A$  θα έχουμε. Με δεδομένο το ρεύμα  $i$  λοιπόν θα έχουμε μια δύναμη  $F = Bli$  που θα κινεί το σώμα μας. Η ταχύτητα  $v$  που θα αποκτήσει το σύστημα είναι

$$v = \frac{F}{Z} = \frac{Bli}{r + j\left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)}$$

Παράλληλα μέσα στο μαγνητικό πεδίο έχουμε έναν ρευματοφόρο αγωγό που κινείται. Αυτό σημαίνει ότι στα άκρα του αγωγού θα αναπτύσσεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη. Αυτή σύμφωνα με τις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού θα αντιτίθεται στην αρχική τάση  $V$ . Έτσι η ηλεκτρική μας εμπέδηση πλέον γίνεται

$$Z = \frac{V - Blv}{i} = \frac{V}{i} - \frac{Blv}{i} = R + j\omega L - \frac{B^2 l^2}{r + j\left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)}$$

Ουσιαστικά λόγω ανάπτυξης  $HE\Delta$  έχουμε την αλλαγή στην ηλεκτρική εμπέδηση. Τώρα που ξέρουμε πως τα μηχανικά στοιχεία ενός μεγαφώνου επηρεάζουν το ηλεκτρικό τους κύκλωμα μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση των μεγαφώνων.

Έχουμε καλύψει όλες τις εισαγωγικές έννοιες που θα χρειαστούν για την ανάλυση ενός ηχείου. Συνεπώς είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα δούμε τα μεγάφωνα και πως αυτά λειτουργούν. Βέβαια μια μικρή εισαγωγή την κάναμε ήδη. Επίσης θα δούμε τις διάφορες κατηγορίες μεγαφώνων.

## Κεφάλαιο 2

### Μεγάφωνα

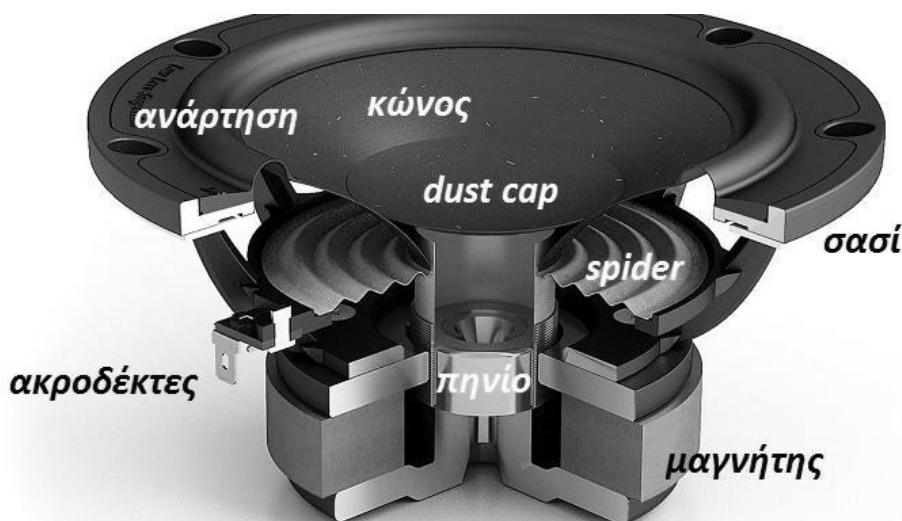
#### 2.1 Τι είναι μεγάφωνο

Τα μεγάφωνα είναι για πολλούς το πιο σημαντικό μέρος σε ένα ηχείο. Αυτό είναι δικαιολογημένο μέχρι ενός σημείου, διότι ουσιαστικά αυτά κάνουν την μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε ακουστικό. Βέβαια θυμίζουμε πως στόχος του ηχείου είναι η αναλλοίωτη αναπαραγωγή του αρχικού ήχου. Για να γίνει αυτό θα πρέπει και τα μεγάφωνα, αλλά και όλα τα άλλα μέρη του ηχείου να μην προσθέτουν και κυρίως να μην αφαιρούν τίποτα από την εισερχόμενη πληροφορία.

Το μεγάφωνο αποτελείται από ένα σώμα μάζας  $m$  αναρτώμενο από μια ανάρτηση ελαστικότητας  $k$ . Το σώμα είναι κολλημένο με ένα πηνίο  $L$ . Το πηνίο βρίσκεται μέσα στον μαγνήτη. Καθώς αυτό διέρχεται από ρεύμα ο μαγνήτης του ασκεί μια δύναμη  $F$ . Η δύναμη αυτή ασκείται σε όλο το σώμα και έτσι αυτό εκτελεί μια κίνηση με ταχύτητα όμοια με το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά το πηνίο.<sup>[9]</sup>

Το σώμα που συνδέεται με το πηνίο θα το λέμε κώνο του μεγαφώνου.<sup>[9]</sup> Καθώς ο κώνος συνδέεται με το πηνίο φωνής, ένα μεγάλο κενό πάνω από το πηνίο φωνής αφήνεται εκτεθειμένο. Αυτό είναι πρόβλημα γιατί ξένα σωματίδια και σκόνες μπορούν να μπουν μέσα στο πηνίο φωνής και στο εσωτερικό του μαγνήτη. Η λύση αυτού του προβλήματος είναι η τοποθέτηση ενός καλύμματος σκόνης στο κενό που αφήνει ο κώνος. Το κάλυμμα αυτό το λέμε dust cap.<sup>[9]</sup>

Ο κώνος συνδέεται με το σασί του μεγαφώνου μέσω της ανάρτησης.<sup>[9]</sup> Επίσης και το πηνίο συνδέεται με το μη κινούμενο μέρος του μεγαφώνου, το σασί. Η ανάρτηση που ενώνει το πηνίο αποκαλείται ανάρτηση spider. Ονομάζεται έτσι λόγω του ιδιαίτερου σχήματος της.<sup>[9]</sup>



Η δομή του μεγαφώνου, όπως περιγράφηκε παραπάνω συναντάται σχεδόν σε όλα τα μεγάφωνα. Κάποιες μικρές διαφορές υπάρχουν μόνο στο dust cap, όπου μπορεί να είναι προς τα έξω ή να είναι και με πιο μυτερό σχήμα. Στην τελευταία περίπτωση καλείται phase plug. Το αληθινό phase plug είναι στερεωμένο στο σασί και ως εκ τούτου δεν μετατοπίζεται.



Τα παραπάνω μεγάφωνα τα λέμε μεγάφωνα κώνου. Εκτός από αυτά υπάρχει και ένας ακόμα τύπος μεγαφώνων. Τα μεγάφωνα τύπου θόλου. Στα μεγάφωνα αυτά ο κώνος έχει αντικατασταθεί από τον θόλο. Για την ακρίβεια ο κώνος είναι σε σχήμα θόλου.<sup>[9]</sup> Εφόσον έχουμε να κάνουμε με θόλο δεν υπάρχει κάποιο κενό στην μέση, για να το καλύψουμε με ένα dust cap ας πούμε. Στα όρια του θόλου προσκολλάται το πηνίο.<sup>[9]</sup> Φυσικά το πηνίο βρίσκεται και εδώ μέσα σε ένα μαγνήτη. Η όλη διάταξη αναρτάται μέσω μιας ανάρτησης στο σασί.<sup>[9]</sup>



## 2.2 Είδη μεγαφώνων

Τα μεγάφωνα τα ίδια πρέπει να είναι πολύ ιδιαίτερες κατασκευές για να καταφέρουν να αναπαράξουν όλο το συχνοτικό φάσμα. Και πάλι υπάρχουν περιορισμοί. Είναι σκόπευον λοιπόν να υιοθετήσουμε περισσότερα από ένα μεγάφωνα για την αναπαραγωγή.

Έτσι πρέπει να χωρίσουμε το φάσμα σε περιοχές. Την κάθε περιοχή την αποκαλούμε δρόμο του ηχείου. Συνήθως καταλήγουμε σε μια υλοποίηση δύο ή τριών δρόμων. Για κάθε δρόμο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός, τουλάχιστον, μεγαφώνου. Πολλές φορές βέβαια, ανάλογα με την σχεδίαση μπορεί σε ένα δρόμο να έχουμε περισσότερα από ένα μεγάφωνα.

Τα μεγάφωνα που καλούνται να αναπαράξουν τις χαμηλές συχνότητες τα λέμε woofers.<sup>[10]</sup> Είναι τα μεγαλύτερα σε διάσταση μεγάφωνα μέσα σε ένα ηχείο. Αυτό συμβαίνει γιατί η αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων απαιτεί μεγάλες ποσότητες αέρα. Το woofers δηλαδή είναι και το μεγαλύτερο και παράλληλα κάνει και τις μεγαλύτερες διαδρομές. Συνήθως είναι κατασκευές τύπου κώνου.<sup>[10]</sup>

Σε ηχείο τριών δρόμων έχουμε χωριστό μεγάλο για την αναπαραγωγή των μεσαίων συχνοτήτων, ονόματι midrange.<sup>[11]</sup> Αυτό συνήθως καλείται να αναπαράξει το φάσμα από 300 Hz - 4000 Hz.<sup>[11]</sup> Διαφορετικά σε περίπτωση απουσίας του midrange το φάσμα μέχρι 2500 Hz ανατίθεται στο woofers. Τα midrange αποτελούν κατά κανόνα μικρογραφία των woofers. Συνήθως είναι τύπου κώνου με phase plug στις πιο καλές υλοποιήσεις.

Το τμήμα από τα 4000 Hz - 20000 Hz, ή από τα 2500 Hz στην περίπτωση απουσίας midrange, αναπαράγεται από το tweeter.<sup>[12]</sup> Τα tweeter είναι σχεδόν πάντα τύπου θόλου.<sup>[12]</sup> Παλιότερα συνηθιζόταν και τα tweeter με κώνο, αλλά τώρα πια τείνουν προς εξαφάνιση.

Στις επόμενες ενότητες θα μελετήσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια το κάθε είδος. Άλλες κατηγορίες μεγαφώνων είναι τα super tweeter, τα midwoofers ή τα subwoofers. Τα μεγάφωνα αυτά όμως δεν διαφέρουν πολύ από τα τρία βασικά είδη. Έτσι θα περιγράψουμε εκτενώς μόνο αυτά τα τρία είδη, δηλαδή τα woofers τα midrange και τα tweeters. Σε κάθε μια ενότητα θα σχολιάσουμε και τις διαφορές των εκάστοτε παραλλαγών.

### 2.2.1 Woofers

Τα woofers είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τύπου κώνου. Το όνομα τους προέρχεται από την αγγλική λέξη woof, που παραπέμπει στο γαύγισμα ενός σκύλου.<sup>[10]</sup> Το τελευταίο έχει κυρίως μπάσες συχνότητες, τις οποίες καλείται να αναπαράγει το woofers. Διαφέρουν μεταξύ τους στο μέγεθος, καθώς συναντάμε woofers από κώνους διαμέτρου 10 εκατοστών μέχρι και περίπου 40.<sup>[10]</sup> Σαφώς και

υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις με μεγαλύτερους ακόμα κώνους σε διάμετρο αλλά συνήθως είναι ειδικές κατασκευές.

Ένα άλλο σημείο διαφοροποίησης είναι το υλικό κατασκευής του κώνου. Όλα τα υλικά έχουν κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Τα τρία κύρια σημεία που εστιάζουμε σε ένα υλικό είναι η μάζα του, η ελαστικότητα του και οι αποσβεστικές του ιδιότητες. Στόχος μας είναι η χαμηλή μάζα και η αυξημένη ακαμψία έτσι ώστε η ιδιοσυχνότητα του μεγάφωνου να γίνει όσο πιο ψηλή μπορεί.<sup>[13]</sup> Παράλληλα ενδιαφερόμαστε για καλή σχετικά απόσβεση ώστε να μην είναι πολύ ηχηρό το μεγάφωνο στην περιοχή γύρω από την ιδιοσυχνότητα.<sup>[13]</sup>

Κανονικά το μεγάφωνο δεν κάνει να παίζει σε αυτές τις συχνότητες, γύρω από την ιδιοσυχνότητα. Με το κύκλωμα διαχωρισμού το αποκόπτουμε. Οπότε δεν μας ενοχλεί ιδιαίτερα αν είναι ηχηρό εκεί το μεγάφωνο. Το μόνο πρόβλημα που μας δημιουργεί η παραπάνω ηχηρότητα είναι ότι θα καταλήξουμε με ένα πιο σύνθετο κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων. Τα πιο σύνθετα φίλτρα με τη σειρά τους θέλουν ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό. Σήμερα με τη βοήθεια υπολογιστή ο σχεδιασμός πάντως είναι πιο εύκολος και εγκυμονούν λιγότεροι έως αμελητέοι κίνδυνοι για λάθη.

Έτσι λοιπόν σήμερα έχουν αναπτυχθεί νέα υλικά, όπως το Kevlar ή το μαγνήσιο, τα οποία είναι ελαφριά και δύσκαμπτα, δεν έχουν όμως την απαιτούμενη απόσβεση. Πάντως σε όλο και περισσότερες υλοποιήσεις προτιμώνται λόγω του ότι μακριά από την ιδιοσυχνότητα τους είναι πιο καθαρά και πιο άμεσα συμβάλλοντας έτσι σε καθαρό και γρήγορο ήχο κατάλληλο για κάθε είδος μουσικής.

Στον αντίποδα υπάρχει το κλασικό πλέον υλικό κατασκευής κώνων, το χαρτί. Οι κώνοι με βάση το χαρτί έχουν πολύ καλύτερες έως και άριστες αποσβεστικές ιδιότητες.<sup>[13]</sup> Συνεπώς ένας δρόμος ηχείου που έχει μεγάφωνο με τέτοιο κώνο είναι πολύ πιο απλοϊκός στην σχεδίαση του. Το ίδιο το φίλτρο είναι πιο απλό και πολλές φορές ηχητικά καλύτερο από ένα άλλο σύνθετο φίλτρο. Αυτό σε συνδυασμό με έναν κώνο που να είναι προσεγγισμένος μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα. Μεγάφωνα που να παίζουν καλά στο ωφέλιμο εύρος τους έχουν παραχθεί και με τα δύο αυτά υλικά καθώς επίσης και με πολλά άλλα.

Εκτός από τους κώνους διαφορετικό μπορεί να είναι και το υλικό κατασκευής των αναρτήσεων. Υπάρχουν αναρτήσεις με βάση το λάστιχο ή με βάση κάποιο αφρώδες υλικό.<sup>[9]</sup> Στα woofers συνήθως έχουμε αναρτήσεις με βάση το λάστιχο. Εκτός από την εξωτερική ανάρτηση βέβαια υπάρχει και η εσωτερική, ονόματι spider. Οι δύο αναρτήσεις δρουν παράλληλα και το τελικό αποτέλεσμα είναι μια σύνθεση των ιδιοτήτων τους. Η εσωτερική ανάρτηση λοιπόν στηρίζει σχεδόν αποκλειστικά το αναρτώμενο σύστημα, οριοθετώντας παράλληλα την κίνηση του πηνίου μέσα στο μαγνήτη.<sup>[9]</sup> Ενώ θέτει το όριο της όλης ταλάντωσης του μεγάφωνου θα πρέπει να επιτρέπει, σε συνδυασμό πάντα με την εξωτερική ανάρτηση, την γραμμική ταλάντωση στα μικρότερα πλάτη.<sup>[9]</sup> Τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής των εσωτερικών αναρτήσεων είναι το βαμβάκι, το συνθετικό βαμβάκι

και ο συνδυασμός πολυεστέρα βαμβακιού.<sup>[14]</sup> Συχνά συναντάμε και τα πολυακρυλικά υλικά καθώς και τις ίνες αραμιδίου.<sup>[14]</sup> Πιο σπάνια βλέπουμε ως υλικό κατασκευής των spider τη γόμα.<sup>[14]</sup> Πριν κλείσουμε με τις αναρτήσεις θα παραθέσουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα.

|               | Material                              | Normal Cotton        | Polyester Cotton     | 100% Aramic Fiber    | Aramic Combo         | Acrylic              | Rubber Coated Cloth |
|---------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|               | Colour                                | Yellow, Brown, Black | Yellow, Brown, Black | Yellow, Brown, Black | Yellow, Brown, Black | Yellow, Brown, Black | Black               |
| Merit/feature | Flame Retardant                       | Fair                 | Good                 | Excellent            | Good                 | Excellent            | Good                |
|               | Range of stiffness.                   | Bigger               | Good                 | Good                 | Good                 | Good                 | Fair                |
|               | Economical                            | Excellent            | Good                 | Fair                 | Fair                 | Fair                 | Fair                |
|               | Penetration for easy bonding          | Excellent            | Good                 | Good                 | Good                 | Fair                 | Good                |
|               | Elastic-Suspension Compliance (Cms)   | Fair                 | Good                 | Excellent            | Excellent            | Good                 | Fair                |
|               | Holding and Centering Rigidity        | Fair                 | Good                 | Good                 | Good                 | Good                 | Fair                |
|               | Air Tight -Leakage losses (QL)        | Fair                 | Good                 | Excellent            | Good                 | Excellent            | Excellent           |
|               | Stability in movement linearity       | Fair                 | Excellent            | Excellent            | Good                 | Excellent            | Good                |
|               | Linear Restoring force                | Fair                 | Good                 | Good                 | Good                 | Excellent            | Fair                |
|               | Ability in withstand high temperature | Fair                 | Excellent            | Good                 | Good                 | Good                 | Fair                |
|               | Consistence Mechanical Resistance     | Fair                 | Excellent            | Good                 | Good                 | Excellent            | Good                |
|               | Strong                                | Fair                 | Good                 | Good                 | Good                 | Good                 | Fair                |

Με βάση και τον πίνακα βλέπουμε πως τα υλικά όπως οι ίνες αραμιδίου και τα ακρυλικά είναι καλά έως εξαιρετικά σε πολλούς τομείς με εξαίρεση όμως το κόστος.

Πέρα από τις αναρτήσεις διαφέρουν και οι μαγνήτες. Για τους μαγνήτες θα μιλήσουμε πιο αναλυτικά σε λίγο. Αλλά τις διαφορές τους μπορούμε να τις δούμε και μέσα από κάποιες παραμέτρους, που τις λέμε Thiele/Small Parameters. Σημαντικό τέλος είναι και το σασί του μεγαφώνου. Έχει σκοπό να κρατά όλα τα κινούμενα μέρη στη σωστή ευθυγράμμιση. Δεδομένου ότι στο πηνίο υπάρχουν μικρά ανοίγματα, καταλαβαίνουμε ότι χρειάζεται σωστή στήριξη, προκειμένου να μην τρίβεται το πηνίο με τα τοιχώματα. Τα σασί μπορεί να είναι από μέταλλο ή από πλαστικό. Στην περίπτωση που είναι μεταλλικά μπορούν να είναι πρεσαριστά ή χυτά. Τα πρεσαριστά απαντώνται στις φτηνές υλοποιήσεις συνήθως και γενικά δεν έχουν μεγάλη αντοχή. Από την άλλη τα χυτά επιτρέπουν μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό τους και είναι πιο ανθεκτικά. Έτσι κρατούν όντως ευθυγραμμισμένα όλα τα κινούμενα μέρη και παράλληλα έχουν τα κατάλληλα ανοίγματα ώστε ο αέρας να εισέρχεται ελεύθερα μέσα στο σασί. Δυστυχώς είναι πιο ακριβά αλλά αποτελούν μονόδρομο για ένα προσεγμένο πλαίσιο.

Μια ειδική κατηγορία των woofer είναι τα subwoofer. Αυτά είναι κατασκευασμένα με τις ίδιες αρχές απλώς έχουν επικεντρωθεί στην αναπαραγωγή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή από 20 Hz – 120 Hz.<sup>[15]</sup> Με δεδομένο ότι στοχεύουν σε αυτές τις συχνότητες μπορούν να έχουν κώνους πιο βαριούς χαμηλώνοντας μεν την ιδιοσυχνότητα τους, αλλά κερδίζοντας δε στον ισοδύναμο όγκο. Έχουν απαίτηση δηλαδή για μικρότερο όγκο.

Από την άλλη μεριά συναντάμε τα midwoofer. Woofer ειδικά σχεδιασμένα για να αναπαράξουν και τις μεσαίες συχνότητες. Σε αυτά δίνεται ιδιαίτερη έμφαση τόσο στις αποσβεστικές ιδιότητες του κώνου τους όσο και στην μάζα του. Πρέπει γενικά να έχουν μια ιδιοσυχνότητα όσο το δυνατόν ψηλότερα και καλά ελεγμένη.

### 2.2.2 Midrange

Τα midrange ή αλλιώς mid συνήθως είναι μικρογραφία των woofer, δηλαδή μεγάφωνα τύπου κώνου με μικρότερες απλώς διαστάσεις. Μιλάμε συνήθως για διαστάσεις από τα 7 εκατοστά σε διάμετρο μέχρι και τα 17. Υπάρχουν και midrange τύπου θόλου αλλά είναι λιγότερο διαδεδομένα. Τα θολωτά mid χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που ο δρόμος τους καλείται να αναπαράξει συχνότητες από τα 1000 Hz – 6000 Hz. Έτσι τα συναντάμε σε ηχεία που έχουν περίπου midwoofer αντί για woofer και πιθανότατα super tweeter αντί για tweeter. Ο λόγος ύπαρξης τους είναι ότι πετυχαίνουν καλύτερη διασπορά σε σχέση με τα απλά mid, χωρίς βέβαια αυτό να είναι απόλυτο.

Τα κλασικά midrange τύπου κώνου, όπως και τα woofer, αποτελούνται από κώνους χάρτινους ή πλαστικοποιημένους. Έτσι πετυχαίνουν καλή απόσβεση γύρω από την ιδιοσυχνότητα τους. Αλλά φυσικά υπάρχουν και μεγάφωνα με κώνους μεταλλικούς ή από συνθετικά υλικά όπως το Kevlar, τα οποία χαρίζουν μεγαλύτερο εύρος σωστής και καθαρής αναπαραγωγής.<sup>[11]</sup>

Η χρήση του midrange είναι αμφισβητήσιμη. Από πολλούς πιστεύεται ότι είναι περιττό για την πλήρη και καλή αναπαραγωγή του ακουστικού μας φάσματος. Επίσης η ύπαρξη τρίτου δρόμου κάνει την όλη κατασκευή πιο σύνθετη και μπορεί τελικώς να δημιουργήσει προβλήματα τονικής ισορροπίας καθώς επίσης και να επιφέρει αλλοιώσεις στο πεδίο του χρόνου.

Πάντως με μια προσεκτική σχεδίαση αυτά τα προβλήματα δεν υφίστανται. Πέρα από αυτό με τη χρήση mid μπορούμε να κάνουμε ακόμα πιο εκλεπτυσμένο σχεδιασμό για το επιμέρους φάσμα χωριστά. Μια διαφοροποίηση για παράδειγμα είναι ο διαφορετικός τύπος καμπίνας στους δυο αυτούς δρόμους. Επίσης με τους ξεχωριστούς δρόμους για την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων και των μεσαίων απαλλασσόμαστε από την ύπαρξη φαινομένου Doppler στις τελευταίες. Πιο αναλυτικά καθώς παίζει ένα μεγάφωνο πάλλεται μπρος πίσω. Καθώς λοιπόν πάλλεται θα κληθεί να αναπαράξει και άλλους ήχους διαφορετικής στάθμης και συχνότητας. Ήχοι με μικρότερη στάθμη και υψηλότερη συχνότητα απαιτούν μικρότερη διαδρομή. Ένας κώνος που δεν βρίσκεται στην θέση ισορροπίας του λοιπόν μπορεί έως και να μην παράξει αυτούς τους δευτερεύοντες ήχους. Σίγουρα πάντως θα τους παράξει βεβιασμένα και με παραμόρφωση.

Συνοψίζοντας για μια μεγαλοπρεπή μουσική συμφωνικού περιεχομένου, για παράδειγμα, χρειάζεται μάλλον ένα ηχείο με τρεις δρόμους. Προφανώς μιλάμε για μια σωστή σχεδίαση. Από την άλλη για κάποιον που ακούει πιο μικρά μουσικά

σύνολα και κυρίως φωνητικά ακούσματα είναι προτιμότερο ένα ηχείο δύο δρόμων ή ίσως και ενός!

### 2.2.3 Tweeter

Για όσους, σχεδιαστές και μη, αποφάσισαν πως θέλουν ένα ηχείο δύο ή τριών δρόμων πρέπει να συνεχίσουν με την ενότητα των tweeter. Το όνομα τους προέρχεται από το γεγονός ότι μπορούν να αναπαράξουν υψίσυχνους ήχους με τους οποίους κελαηδούν κάποια πουλιά. Το συχνοτικό τους εύρος φτάνει ως τις 20000 Hz.<sup>[12]</sup> Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις που αγγίζουν μέχρι και τα 100 kHz. Tweeter τα οποία ξεπερνούν σε έκταση τους 20000 κύκλους καλούνται super tweeter.<sup>[16]</sup> Το μέγεθος του θόλου ενός tweeter έχει τυπικά 2,5 εκατοστά διάμετρο. Τα μεγαλύτερα αγγίζουν τα 4 εκατοστά διαμέτρου.

Τα super tweeter είναι πιο μικρά, με διάμετρο γύρω στο 1,5 εκατοστό, από τα tweeter και αναπαράγουν σχεδόν αποκλειστικά συχνότητες που δεν τις αντιλαμβάνεται το μέσο αυτί. Σήμερα τα αυτόνομα super tweeter σπανίζουν γιατί πολλά κανονικού μεγέθους tweeter είναι πλέον στην ευχάριστη θέση να έχουν εκτεταμένο συχνοτικό εύρος. Πολλές φορές μάλιστα επικρατεί σύγχυση γιατί κανονικά tweeter καλούνται super tweeter, λόγου αυτού του εκτεταμένου εύρους. Επίσης στις μέρες μας και τα δύο είδη tweeter είναι τύπου θόλου.

Και εδώ τα υλικά κατασκευής του θόλου είναι κάποια μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το μαγνήσιο ή το βηρύλλιο.<sup>[12]</sup> Αυτά είναι τα λεγόμενα tweeter σκληρών θόλων και η έκτασή τους μπορεί εύκολα να ανέβει ψηλά. Όπως όμως και στα υπόλοιπα μεγάφωνα έτσι και εδώ στην ιδιοσυχνότητα το μεγάφωνο βγαίνει εύκολα εκτός ελέγχου. Πολλοί βέβαια ισχυρίζονται πως πλέον δεν είναι πρόβλημα καθώς η ιδιοσυχνότητα του κώνου είναι αρκετά έξω από το ακουστικό φάσμα και επίσης οι πηγές αναπαραγωγής όπως το CD δεν έχουν καν πληροφορία μετά τα 20 kHz.

Όμως θεωρείται πως οι ήχοι άνω των συχνοτήτων αυτών επηρεάζουν ηχητικά τα όσα ακούμε. Αυτό συμβαίνει επειδή ψυχοακουστικά αντιλαμβανόμαστε τέτοιους ήχους. Αυτός ήταν άλλωστε και ο λόγος κυκλοφορίας του super audio CD<sup>[17]</sup> ή αλλιώς SA-CD<sup>[17]</sup> και των super tweeter. Συνεπώς τα tweeter με σκληρό θόλο μπορούν να αναπαράξουν συχνότητες πολύ πάνω από τα 20 kHz, αλλά χρειάζονται προσοχή στην σχεδίαση τους.

Ξανά και εδώ εναλλακτική προσέγγιση στο ζήτημα του μεγαφώνου υψηλών συχνοτήτων έρχονται να δώσουν τα υλικά με σπουδαίες αποσβεστικές ιδιότητες και προφανώς με καλή ελαστικότητα. Τα tweeter με θόλους από μετάξι ή από πολυαιθυλένιο δεν έχουν ηχηρό χαρακτήρα γύρω από την ιδιοσυχνότητα, η οποία σαφώς βρίσκεται χαμηλότερα. Αναπαράγουν έτσι εξίσου καλά τις υψηλές συχνότητες απλώς είναι πιο περιορισμένες σε εύρος. Σίγουρα πάντως φτάνουν το ακουστικό φάσμα, δηλαδή τις 20000 Hz.



Στην πράξη έχουν υπάρξει tweeter με κάθε λογής υλικό για την κατασκευή του θόλου τους με τα αποτελέσματα στον ήχο να ποικίλουν. Ανάλογα το κόστος και την προσωπική τεχνολογία και τεχνογνωσία του κάθε κατασκευαστή έχουμε δει εξίσου καλές και κακές υλοποιήσεις με κάθε υλικό.

Σε κάποια tweeter τοποθετείται ένα ειδικό ρευστό πίσω από τον θόλο τους και μεταξύ του μαγνήτη.<sup>[12]</sup> Το ρευστό αυτό είναι ένα μίγμα πολύ μικρών, της τάξης των 10 nm, μαγνητικών σωματιδίων οξειδίου του σιδήρου μέσα σε ένα υγρό πολύ χαμηλής πτητικότητας. Συνήθως αυτό το υγρό είναι σύνθετο λάδι. Οι σχεδιαστές μπορούν να κάνουν παραλλαγές με διαφόρων ιξωδών έλαια. Επίσης μπορούν να δοκιμάσουν διαφορετικής πυκνότητας σωματίδια προκειμένου να προσδώσουν στο μεγάφωνο κατάλληλη απόσβεση και ψύξη. Επιπλέον αυτό το υγρό κεντράρει καλύτερα το πηνίο μέσα στο μαγνητικό πεδίο, μειώνοντας την παραμόρφωση. Το υγρό τοποθετείται μέσα στο μαγνητικό διάκενο και συγκρατείται στη θέση του από το ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Παρόλο που το λάδι είναι δύσκολο να εξατμιστεί, σε ακραίες καταστάσεις αυτό μπορεί να συμβεί. Έτσι αλλάζει η πυκνότητα των σωματιδίων μέσα στο ρευστό και μπορεί να έχουμε μέχρι και απώλεια στην ποιότητα του ήχου. Απώλεια μερικών dB στη στάθμη του tweeter είναι επίσης εφικτή. Σε αυτή την περίπτωση συνίσταται άμεσα η αλλαγή του υγρού.

Παρά το γεγονός ότι η κατασκευή ενός tweeter με υγρό είναι πιο δύσκολη και μπορεί μετά από χρόνια να φθαρεί εντούτοις προτιμάται για τους εξής λόγους. Ψύχει το όλο σύστημα κάνοντας το να αντέχει σε πολύωρες και με υψηλή στάθμη αναπαραγωγές. Παράλληλα προσδίδει στο μεγάφωνο την απαραίτητη απόσβεση και κεντράρει τον θόλο εξασφαλίζοντας έτσι λιγότερη παραμόρφωση. Επίσης απομονώνει και αποσβένει τις οπίσθιες ακτινοβολίες του μεγαφώνου. Έτσι δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη σχεδίαση της καμπίνας του tweeter.

Ωστόσο κάποιοι κατασκευαστές μεγαφώνων θεωρούν ότι το υγρό προκαλεί υπεραπόσβεση και έτσι απορρίπτουν την σχεδίαση υλοποίησης με υγρό. Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει έτσι είναι ότι το tweeter θέλει το δικό του θάλαμο, εκτός και αν δεχτούμε την κατώτερη ποιότητα που θα προκύψει χωρίς τον θάλαμο. Με τον δικό του ειδικά σχεδιασμένο θάλαμο, όπως προείπαμε και για το υγρό, καταφέρνουμε να αποσβέσουμε αφενός την δική του οπίσθια ακτινοβολία και αφετέρου να το απομονώσουμε.

Με τον όρο απομόνωση εννοούμε ότι τα κινούμενα μέρη ενός tweeter δεν αλληλεπιδρούν με τα κύματα από το woofer και το midrange. Πιο αναλυτικά όπως θα δούμε και παρακάτω κάθε μεγάφωνο εκπέμπει κύματα και από πίσω. Τα κύματα αυτά λοιπόν μπορούν να προσκρούσουν στην επιφάνεια άλλων μεγαφώνων μεταδίδοντας τους φυσικά ενέργεια. Με τη ενέργεια αυτή τα μεγάφωνα πάλλονται σε μια συχνότητα που δεν προοριζόταν αρχικά να αναπαράγουν. Προκαλείται έτσι ενδοδιαμόρφωση και προβληματική αναπαραγωγή λόγω του φαινομένου Doppler.

Πίσω στην κατασκευή tweeter πάλι όπως είπαμε για τα βέλτιστα αποτελέσματα χρειάζεται ένας θάλαμος. Εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου με την

βοήθεια των πρώτων υπολογιστών έχει αναπτυχθεί ένας θάλαμος ειδικά σχεδιασμένος σε μορφή σωλήνα. Για την ακρίβεια είναι σωλήνας με ελαφρώς κωνικό σχήμα. Χάρη σε αυτό το σχήμα τα κύματα από την οπίσθια ακτινοβολία αποσβένονται σταδιακά και τελικά εξαφανίζονται.

Η B&W, η εταιρεία πίσω από την ανακάλυψη και υλοποίηση του συστήματος, ονόμασε αυτούς τους σωλήνες nautilus.<sup>[18]</sup> Κυκλοφόρησε μάλιστα τότε ένα ηχείο τεσσάρων δρόμων με τέτοιους σωλήνες σε όλους τους δρόμους. Όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω κάθε δρόμος έχει σωλήνα διαφορετικού μήκους. Ο τελευταίος σωλήνας λόγω του μεγάλου μήκους του, περί τα 3 μέτρα, έχει αναδιπλωθεί σε σχήμα ναυτίλου. Πιθανότατα από εκεί προέκυψε και η ονομασία για το επίτευγμα της έρευνας.



Σήμερα η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στα tweeter ακόμα και από την ίδια την εταιρεία. Στα μεγάφωνα των υπόλοιπων δρόμων υπάρχουν και άλλες προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό της καμπίνας. Ειδικά στα woofers δεν θέλουμε να αποσβέσουμε τους οπίσθιους ήχους. Αντιθέτως μάλιστα θέλουμε να τους εκμεταλλευτούμε προκειμένου να βγάλουμε πιο πιστά μπάσα. Περισσότερα όμως για τις καμπίνες θα πούμε στο τρίτο κεφάλαιο. Πριν από αυτό θα τελειώσουμε το δεύτερο με την επεξήγηση λοιπών παραμέτρων που αφορούν τα συμβατικά μεγάφωνα. Έπειτα θα δούμε και άλλες περιπτώσεις μεγαφώνων.

Δεδομένου ότι τα tweeter τα παίρνουμε έτοιμα, όπως και τα υπόλοιπα μεγάφωνα άλλωστε, εκτός και αν έχουμε την υποδομή να τα κατασκευάσουμε μόνοι μας, δεν θα ξανά ασχοληθούμε με αυτά. Λόγω του μικρού τους μεγέθους μπορεί ο ίδιος ο κατασκευαστής να τα εξοπλίσει με τον δικό τους ιδιαίτερο θάλαμο. Φυσικά μπορεί να καταφύγει και στη λύση του μαγνητικού υγρού. Έτσι πολλοί κατασκευαστές δεν μας δίνουν και τα πλήρη Thiele/Small χαρακτηριστικά των tweeter. Μας δίνουν όσα χρειαζόμαστε για να το συνδυάσουμε σωστά με τα άλλα μεγάφωνα μέσω του κυκλώματος αποκοπής συχνοτήτων. Το κύκλωμα αυτό καλείται crossover.

## 2.3 Παράμετροι Thiele/Small

Οι παράμετροι Thiele/Small αποτελούνται από ένα σύνολο ηλεκτρομηχανικών στοιχείων.<sup>[20]</sup> Μέσω αυτών των στοιχείων ορίζεται με πολύ καλή ακρίβεια η απόδοση ενός μεγαφώνου στο κάτω μέρος του φάσματος του. Συγκεκριμένα η απόδοση ορίζεται με ωραία σαφήνεια μέχρις ότου ο κώνος να πλησιάσει στην ιδιοσυχνότητα του. Τα στοιχεία αυτά τα δημοσιεύουν για κάθε μεγάφωνο οι κατασκευαστές τους. Έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε την καμπύνα ανάλογα με το μεγάφωνο που θα χρησιμοποιήσουμε ή το αντίστροφο.

Μέρος των παραμέτρων αυτών είναι οι φυσικές ιδιότητες του μεγαφώνου.<sup>[20]</sup> Ιδιότητες όπως η μάζα του κώνου, η ελαστικότητα της ανάρτησης του και η αντίσταση του πηνίου ανήκουν στις φυσικές ιδιότητες του μεγαφώνου. Όταν το μεγάφωνο είναι ολοκληρωμένο, είναι δύσκολο να μετρήσουμε μία ή περισσότερες από αυτές τις ιδιότητες. Για την μέτρηση τους πάντως χρησιμοποιούμε μικρά σήματα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ισοδύναμο του μεγαφώνου. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε όλες αυτές τις παραμέτρους και θα περιγράψουμε συνοπτικά την κάθε μια.

- **Mms** Είναι η μάζα του κώνου συμπεριλαμβανομένης και της μάζας του αέρα που μετακινεί το μεγάφωνο. Μετριέται σε γραμμάρια.
- **Rms** Εκφράζει την μηχανική αντίσταση του συστήματος και τις απώλειες που αυτή εισάγει. Συνήθως καθορίζεται από την τοπολογία των αναρτήσεων του μεγαφώνου και τα υλικά κατασκευής του. Παίζει καθοριστικό ρόλο στον μηχανικό συντελεστή ποιότητας  $Q_{ms}$ . Η μηχανική αντίσταση μετριέται σε  $kg/s$  ή  $Ns/m$ .
- **Cms** Είναι η ελαστικότητα της ανάρτησης και ουσιαστικά είναι η ελαστικότητα όλου του μεγαφώνου στην περιοχή συχνοτήτων που οφείλει να αναπαράγει. Δηλαδή μιλάμε για συχνότητες αρκετά πριν την ιδιοσυχνότητα του κώνου. Την μετράμε σε  $mm/N$ .
- **Re** Αυτή είναι η ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου του μεγαφώνου, ή αλλιώς του πηνίου φωνής. Όταν η ηλεκτρική αντίσταση υπακούει στον νόμο του Ohm και μετριέται σε Ohm.
- **Le** Το πηνίο φωνής είναι ένα πηνίο με χαμηλό συντελεστή ποιότητας, αφού έχει μεγάλη αντίσταση απωλειών σχετικά με την αυτεπαγωγή του. Παρόλα αυτά έχει μια αυτεπαγωγή, ονόματι  $Le$ , μετρούμενη σε mH.
- **Sd** Είναι το θεωρητικό εμβαδό του μεγαφώνου που παράγει τον ήχο μέσω των ταλαντώσεων. Συνήθως είναι το εμβαδό του κώνου, αλλά ανάλογα την γεωμετρία της ανάρτησης μπορεί να είναι λίγο διαφορετικό. Αφού είναι εμβαδό μετριέται σε  $cm^2$ .
- **Bl** Γνωστός ως συντελεστής δύναμης. Θεωρητικά αυτό το μέγεθος εκφράζει το εξωτερικό γινόμενο του μαγνητικού πεδίου με το μήκος του πηνίου. Έτσι

ως θεωρητική μονάδα μέτρησης ορίζονται τα  $T_m$ . Πάντως από τον ορισμό των Tesla  $T$  προκύπτει ότι  $T_m = N/A$ . Επειδή με δεδομένη ποσότητα ρεύματος παίρνουμε την ασκούμενη δύναμη ονομάζουμε το γινόμενο αυτό συντελεστή δύναμης. Ο συντελεστής δύναμης έχει πολύ μεγάλη επίδραση στον ηλεκτρικό συντελεστή ποιότητας  $Q_{es}$ .

Πέρα από τις φυσικές παραμέτρους ή θεμελιώδεις έχουμε και κάποια παράγωγα μεγέθη. Αυτά μπορούν να εξαχθούν πιο εύκολα από την ηλεκτρική εμπέδηση του μεγαφώνου. Παρακάτω τα περιγράφουμε κάθε ένα ξεχωριστά και θα λέμε από τι εξαρτώνται.

- **$F_s$**  Είναι η συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου. Δηλαδή σε αυτή τη συχνότητα τα κινούμενα μέρη του μεγαφώνου αγγίζουν την μέγιστη ταχύτητα τους. Πολλές φορές λέγεται και ιδιοσυχνότητα του μεγαφώνου. Δεν έχει καμία σχέση με την ιδιοσυχνότητα του κώνου. Τα σήματα με συχνότητες αρκετά χαμηλότερες της συχνότητας αυτής δεν αναπαράγονται σωστά από το μεγάφωνο και ουσιαστικά του προκαλούν προβλήματα, τόσο στην ορθή αναπαραγωγή των υπολοίπων συχνοτήτων όσο και στην αντοχή του, καταπονώντας το μηχανικά. Τα woofers έχουν ιδιοσυχνότητα μεταξύ των 16 Hz και των 60 Hz. Ενώ στα mid κυμαίνεται στο εύρος 60 Hz – 500 Hz. Των tweeter βρίσκεται γύρω στο 1 kHz.

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms}M_{ms}}}$$

- **$Q_{ms}$**  Είναι ο μηχανικός συντελεστής ποιότητας. Όντας συντελεστής είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και χαρακτηρίζει την μηχανική απόσβεση του μεγαφώνου. Έχει τιμές από 1-10 με μια τυπική τιμή να είναι το 4. Ο υψηλός συντελεστής υποδηλώνει χαμηλές απώλειες ενώ ο μικρός δηλώνει αντίθετα μεγάλες απώλειες. Όπως θα δούμε και στο τύπο παρακάτω ένας μεγάλος συντελεστής αυξάνει σημαντικά την αντίσταση στον συντονισμό.

$$Q_{ms} = \frac{2\pi F_s M_{ms}}{R_{ms}}$$

- **$Q_{es}$**  Με  $e_s$  δηλώνουμε αντίστοιχα τον ηλεκτρικό συντελεστή ποιότητας. Αυτός περιγράφει την ηλεκτρική απόσβεση του μεγαφώνου. Η δύναμη που ευθύνεται για αυτή την απόσβεση δημιουργείται εξαιτίας του μαγνήτη. Πιο αναλυτικά καθώς διέρχεται ρεύμα μέσα από τον, ευρισκόμενο στο μαγνητικό πεδίο, αγωγό τότε ο μαγνήτης δημιουργεί ένα άλλο ρεύμα τέτοιο ώστε να αντιτίθεται στην κίνηση του αγωγού. Συνεπώς σε όλο το κινούμενο

σύστημα που βρίσκεται κολλημένο με τον αγωγό ασκείται μια δύναμη με σκοπό να αποσβέσει την κίνηση του. Αυτή η δύναμη απόσβεσης είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αναρτώμενου συστήματος. Συνεπώς ο συντελεστής  $Q_{es}$  παίρνει συνήθως τιμές από 0,2 έως 1. Το ρεύμα που δημιουργεί ο μαγνήτης πάντως καταναλώνεται στην αντίσταση  $Re$ . Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή τόσο πιο μικρή είναι η δύναμη απόσβεσης. Στην  $Re$  θα πρέπει να προστεθούν και αντιστάσεις του κυκλώματος που είναι σε σειρά συνδεδεμένες, όπως για παράδειγμα η εσωτερική αντίσταση ενός ενισχυτή. Με όλες τις εξωτερικές αντιστάσεις ο ηλεκτρικός συντελεστής ποιότητας αυξάνεται. Το άθροισμα όλων αυτών των αντιστάσεων το απεικονίζουμε στον τύπο με  $r$ .

$$Q_{es} = \frac{2\pi F_s M_{ms} (Re + r)}{(Bl)^2}$$

- **Q<sub>ts</sub>** Εφόσον έχουμε δύο δυνάμεις απόσβεσης είναι λογικό να έχουμε μια απόσβεση ισοδύναμη με το άθροισμα αυτών των δύο. Αυτή η απόσβεση είναι η ολική του μεγαφώνου και την χαρακτηρίζει ο ολικός συντελεστής ποιότητας. Οι συνήθεις τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται από 0,2 έως 0,6 με πιο συχνές τις τιμές 0,3-0,5. Δίνεται από τον τύπο.

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

- **V<sub>as</sub>** Το μέγεθος αυτό καλείται ισοδύναμος όγκος. Η ονομασία του προέρχεται από το ότι αντιπροσωπεύει τον όγκο αέρα που έχει την ίδια ελαστικότητα με την ανάρτηση του μεγαφώνου, όταν ασκείται σε ένα εμβαδό ίδιο με αυτό το μεγαφώνου. Δηλαδή δύο μεγάφωνα διαφορετικής διαμέτρου, άρα και επιφάνειας, που έχουν ίδια ανάρτηση έχουν διαφορετικό ισοδύναμο όγκο. Ανάλογα τον όγκο της καμπίνας μας και με δεδομένο τον ισοδύναμο όγκο του μεγαφώνου μπορούμε εύκολα να βρίσκουμε την ολική ελαστικότητα του ηχείου μας, τον ολικό συντελεστή απόσβεσης και την νέα ιδιοσυχνότητα. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα δούμε αναλυτικά πως επηρεάζει η καμπίνα το εκάστοτε μεγάφωνο. Μαθηματικά πάντως ο ισοδύναμος όγκος εκφράζεται ως εξής.

$$V_{as} = \rho c^2 S d^2 C_{ms}$$

Εκτός από αυτά τα χαρακτηριστικά υπάρχουν και λίγα ακόμα που μας δείχνουν τη συμπεριφορά του κώνου στις υψηλές στάθμες και τις αντοχές του. Τα πλέον σημαντικά από αυτά είναι η μέγιστη διαδρομή της ανάρτησης του, η οποία

καλείται  $X_{max}$ , και η μέγιστη πρόσληψη ισχύος, ονόματι  $P_e$ . Με  $X_{max}$  δηλώνουμε τη μέγιστη γραμμική διαδρομή της ανάρτησης και την μετράμε σε mm. Αν λόγω μεγάλου ηλεκτρικού σήματος στην είσοδο το μεγάφωνο αναγκαστεί να κάνει διαδρομές μεγαλύτερες από την προαναφερθείσα τιμή το σήμα θα υποστεί έντονη παραμόρφωση και το χειρότερο κινδυνεύει να καταστραφεί και το μεγάφωνο.

Πέρα από αυτό το μεγάφωνο μπορεί να καεί και αν υπερβούμε την μέγιστη ισχύ του  $P_e$ . Η τελευταία είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί και υπάρχουν διάφοροι τύποι μέτρησης της. Αφού μιλάμε για ισχύ μονάδα μέτρησης της είναι το watt. Υπάρχουν δύο τύποι μέτρησης που συναντάμε συχνά, την rms ισχύ και την peak. Η rms είναι η πραγματική ισχύς που αντέχει το μεγάφωνο για πολλές ώρες και αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Πέρα από αυτούς τους τύπους που είναι πιο γενικοί, συγκεκριμένα για τα μεγάφωνα υπάρχει η θερμική και μηχανική ισχύς. Με τον όρο θερμική εννοούμε την ισχύ με την οποία καταστρέφεται λόγω θερμότητας μέρος ή όλο το μεγάφωνο. Με τον όρο μηχανική ισχύς ορίζουμε το όριο στο οποίο καταστρέφονται κάποια ή όλα τα μηχανικά μέρη του μεγαφώνου. Οι δύο αυτές ισχύεις γενικά είναι διαφορετικές για κάθε μεγάφωνο.

Οι τυπικές μετρήσεις λοιπόν αφορούν την θερμική ισχύ. Συχνά γίνονται με μια τυποποιημένη μέθοδο με συχνότητα στα 200 Hz. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να είμαστε εγκρατείς γιατί ένα μεγάφωνο που αντέχει πολλά watt μέχρι να καταστραφεί θερμικά μπορεί με λίγα watt σε πολύ χαμηλή συχνότητα να υποστεί μηχανική βλάβη.

Πρέπει να σημειωθεί πριν κλείσει η ενότητα αυτή ότι οι παράμετροι Thiele /Small ισχύουν όταν το μεγάφωνο λειτουργεί κανονικά. Δηλαδή αν επιχειρήσουμε να μετρήσουμε ένα μεγάφωνο, προκειμένου να επαληθεύσουμε τις παραμέτρους αυτές, οφείλουμε πρώτα να το αφήσουμε να λειτουργήσει με κάποιο μονότονο σήμα. Έτσι θα μπορέσει να έρθει στα φυσιολογικά της επίπεδα η ελαστικότητα του. Αυτές οι πρώτες ώρες εν τω μεταξύ λέγονται περίοδος στρωσίματος και χρειάζονται για κάθε μηχανήμα, προκειμένου να εισπράξουμε το μέγιστο από αυτό. Όταν τα μεγάφωνα στρώσουν η μέτρηση καλό είναι να γίνει σε θερμοκρασίες δωματίου, καθώς στις πολύ πιο χαμηλές θερμοκρασίες οι αναρτήσεις γίνονται πιο σκληρές.

Από εκεί και πέρα τώρα το μεγάφωνο θα λειτουργήσει όπως αναμένεται για αρκετά χρόνια. Γύρω στα 10-15 χρόνια όμως τα διάφορα υλικά που απαρτίζουν τις αναρτήσεις του θα αρχίζουν να αλλοιώνονται. Το αποτέλεσμα, ενώ το μεγάφωνο θα παίζει ακόμα, θα είναι να παίζει, και να μετράει πλέον, διαφορετικά. Συνεπώς για ένα παλιό μεγάφωνο δεν έχει πολύ νόημα να ανατρέξουμε στα χαρακτηριστικά του διότι αυτά πλέον θα είναι αλλαγμένα. Για να περιοριστεί το φαινόμενο γήρανσης όσο γίνεται, καλό είναι τα μεγάφωνα να διατηρούνται σε μέρος μη εκτιθέμενο στην ηλιακή ακτινοβολία και φυσικά σε μέρος με χαμηλή σχετική υγρασία.

## 2.4 Μαγνήτες και επιρροή του συντελεστή δύναμης

Μέχρι τώρα μιλήσαμε στο κεφάλαιο αυτό για τα διάφορα μεγάφωνα και την κατασκευή τους. Μιλήσαμε για αυτά που συναντάμε πιο συχνά. Ένα κοινό γνώρισμα των μεγαφώνων αυτών είναι η χρήση μαγνήτη. Όμως υπάρχουν μεγάφωνα τέτοιου τύπου με μικρό μέγεθος όπως τα tweeter. Αυτά χρειάζονται εξίσου ισχυρούς μαγνήτες αλλά πρέπει αυτοί να είναι μικρότεροι σε μέγεθος.

Οι μαγνήτες πάντως που είναι πιο μικροί αλλά εξίσου ισχυροί είναι και πιο ακριβοί. Οπότε ανάλογα το κόστος, το μέγεθος και μερικές ακόμα παραμέτρους επιλέγουμε έναν μαγνήτη από τους πολλούς που μπορούν να κατασκευαστούν με βάση τα διαθέσιμα υλικά. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μαγνητών είναι οι μαγνήτες με φερρίτη, οι μαγνήτες νεοδυμίου και οι ονομαζόμενοι alnico. Πιο σπάνια συναντάμε τους μαγνήτες κοβάλτιου σαμαρίου.

Ο πλέον συνηθισμένος τύπος μαγνήτη στα συμβατικά μεγάφωνα αποτελείται από φερρίτη.<sup>[20]</sup> Γνωστοί και ως κεραμικοί, οι μαγνήτες αυτοί κοστίζουν λιγότερο από τους μεταλλικούς που θα πούμε παρακάτω αλλά είναι και πιο εύθραυστοι από αυτούς. Διατηρούν πάντως καλά την μαγνητική τους δύναμη με την πάροδο του χρόνου, και μάλιστα καλύτερα όσο η θερμοκρασία αυξάνει, εκτός και αν έρθουν κοντά σε κάποιον ισχυρότερο μαγνήτη νεοδυμίου. Μπορούν επίσης να απομαγνητισθούν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των -20 βαθμών κελσίου, καθώς χάνουν μεγάλο μέρος από την αυτονομία τους. Θετικό είναι το γεγονός ότι εντάσσονται στην κατηγορία των μονωτών ηλεκτρικά, όντας παράλληλα θερμοαγώγιμοι, καθώς και το ότι δεν διαβρώνονται στο νερό. Είναι πάντως σχετικά βαριοί και αυτό αποτελεί πρόβλημα για τα μικρά και φορητά ηχεία του σήμερα.

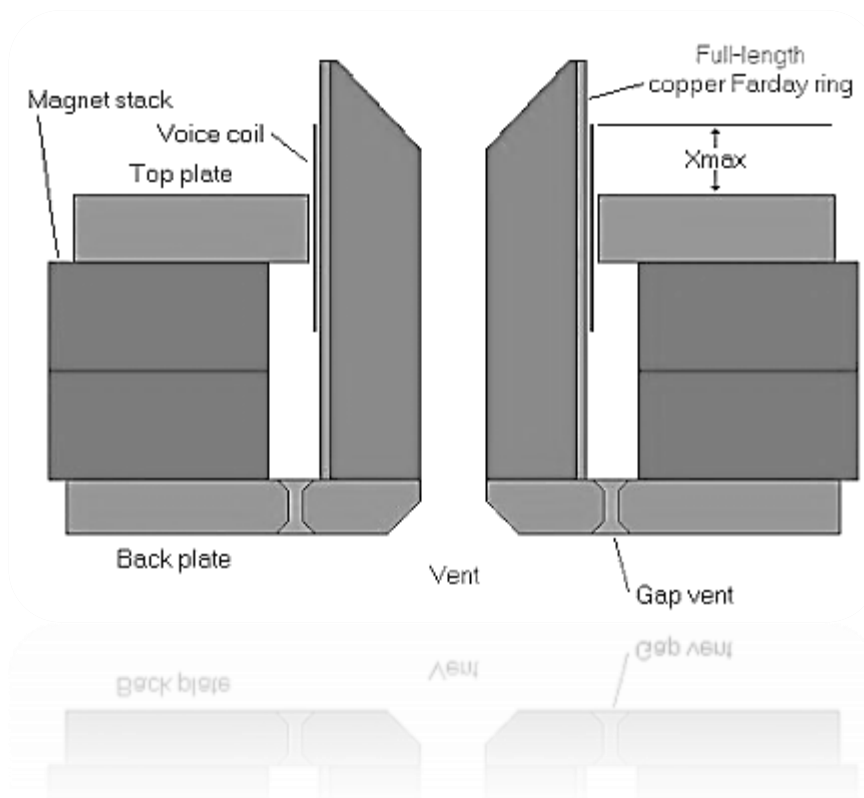
Για τις κατασκευές λοιπόν που πρέπει να είναι ελαφριές ή που δεν υπάρχει πολύς χώρος για τον μαγνήτη υπάρχει η λύση του μαγνήτη νεοδυμίου.<sup>[21]</sup> Με το ίδιο μέγεθος κερδίζουμε περίπου 7 φορές μεγαλύτερη δύναμη σε σχέση με ένα κεραμικό μαγνήτη. Για την ακρίβεια είναι οι πιο ισχυροί μαγνήτες ανά μονάδα όγκου. Δουλεύουν σε υψηλό εύρος θερμοκρασιών, από τους -200 βαθμούς μέχρι τουλάχιστον τους 80 βαθμούς κελσίου. Και λέμε τουλάχιστον επειδή υπάρχουν κάποιες εκδοχές τους που πιστοποιούνται μέχρι και τους 220 βαθμούς. Το πρόβλημα είναι ότι κοστίζουν και εκτός αυτού θέλουν προσοχή με τη διάβρωση του σιδήρου. Υπάρχουν κάποιοι πιο ανθεκτικοί αλλά κοστίζουν ακόμα περισσότερο. Επίσης πρόσθετο κόστος έχουν και οι εκδοχές που μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Για τις υψηλές θερμοκρασίες άνω των 150 βαθμών πάντως παρόλο που μπορούν να λειτουργήσουν και οι δύο προηγούμενοι μαγνήτες επιλέγουμε τους μαγνήτες σαμαρίου κοβάλτιου.<sup>[22]</sup> Οι τελευταίοι είναι πιο θερμοαγώγιμοι και έχουν πάρα πολύ υψηλή αυτονομία, γεγονός που τους κάνει να μην απομαγνητίζονται εύκολα. Αν και δεν θα δουλέψουν ποτέ σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες μέσα σε ένα ηχείο, εντούτοις η καλύτερη θερμοαγωγιμότητα, η μεγάλη αυτονομία και η

διατήρηση του μαγνητικού πεδίου σταθερού ανεξαρτήτως θερμοκρασίας είναι κάποια πράγματα που δίνουν ξεκάθαρα ανώτερη ηχητική ποιότητα. Αυτή η ποιότητα όμως έχει το τίμημα της καθώς γενικά οι μαγνήτες αυτού του τύπου κοστίζουν περισσότερο, ακόμα και από τους νεοδυμίου. Επιπρόσθετο αρνητικό είναι το ότι είναι οι πιο εύθραυστοι.

Τέλος οι μαγνήτες που δουλεύουν στις πιο υψηλές θερμοκρασίες, κοντά στους 500 βαθμούς, και παρουσιάζουν συνάμα την μικρότερη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου με την αλλαγή θερμοκρασίας είναι οι μαγνήτες alnico.<sup>[23]</sup> Λόγω αυτής της σταθερότητας στην μαγνητική δύναμη προτιμούνται στις εφαρμογές υψηλής πιστότητας. Το κόστος τους, όπως ίσως είναι αναμενόμενο, είναι σχετικά υψηλό. Εκτός αυτού έχουν και το μειονέκτημα ότι μπορούν σχετικά εύκολα να χάσουν την μαγνήτισή τους.

Συνοψίζοντας λοιπόν στη θεωρία παίρνουμε ως δεδομένο και σταθερό το συντελεστή δύναμης. Στην πράξη αυτός εξαρτάται από τον μαγνήτη και έναν κακός μαγνήτης, που θα είναι και φθηνός φυσικά, θα αλλάζει αισθητά τον συντελεστή δύναμης κάτω από διάφορες συνθήκες. Εκτός από τον μαγνήτη για να έχουμε έναν όσο το δυνατόν πιο σταθερό συντελεστή πρέπει και το ίδιο το πηνίο να είναι συνεχώς μέσα στο μαγνητικό διάκενο. Για ακόμα μεγαλύτερη σταθερότητα μάλιστα και λιγότερη παραμόρφωση στα άκρα του μαγνήτη τοποθετείται στις καλές υλοποιήσεις και ένα χάλκινο δαχτυλίδι, με το οποίο κόβουμε τα ανεπιθύμητα πεδία που αναπτύσσονται σε αυτές τις μεταβατικές περιοχές.





## 2.5 Μεγάφωνα διαφορετικών τύπων

Στην ενότητα αυτή μιλήσαμε για τα μεγάφωνα. Τα όσα είπαμε μέχρι τώρα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως στην πράξη. Πριν κλείσουμε όμως το κεφάλαιο αυτό, θα αναφέρουμε και άλλες τεχνολογικές μεθόδους για την υλοποίηση μεγαφώνων. Οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως στα ακριβά ηχεία, με στόχο την εξάλειψη των περιορισμών που μας δημιουργούν τα συμβατικά μεγάφωνα, για τα οποία μιλήσαμε ως τώρα. Τα μεγάφωνα στα οποία αναφερθήκαμε λέγονται ηλεκτροδυναμικά.

### 2.5.1 Πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα

Εξαίρεση στον παραπάνω κανόνα, σύμφωνα με τον οποίο στρεφόμαστε σε διαφορετικούς τύπους μεγαφώνων για καλύτερη ποιότητα, αποτελεί η κατηγορία των πιεζοηλεκτρικών μεγαφώνων.<sup>[24]</sup> Τα μεγάφωνα αυτά πήραν το όνομα τους λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου που χρησιμοποιούν. Η μηχανική διέγερση που χρειάζεται για να παραχθεί ο ήχος δημιουργείται από την εφαρμογή τάσης στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Για να έχει μια σεβαστή ένταση ο ήχος ενισχύεται ακουστικά μέσα από αντηχεία ή κόνρες.

Συγκρινόμενα με άλλα μεγάφωνα, τα πιεζοηλεκτρικά έχουν σταθερή αντίσταση και χαρακτηρίζονται έτσι ως εύκολα φορτία. Αυτό τα κάνει ικανά να οδηγηθούν από πολλούς ενισχυτές. Ωστόσο η αντίσταση τους έχει έντονα χωρητικό χαρακτήρα, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει έντονη παραμόρφωση σε κάποιους ενισχυτές, ή ακόμα και καταστροφή τους. Επιπλέον η ηχητική τους ποιότητα δεν είναι καλύτερη από τις άλλες κατηγορίες μεγαφώνων ειδικά στους ήχους χαμηλών συχνοτήτων. Συνοψίζοντας λοιπόν τα πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα είναι κατάλληλα για χώρους, κυρίως εξωτερικούς, όπου δεν μετράει πολύ η ηχητική ποιότητα και θέλουμε να αναπαράξουμε ήχους με συχνότητες 1-5 kHz, κυρίως φωνές δηλαδή, και σε υψηλή ένταση. Πάντως αξίζει να αναφερθεί ότι τα πιεζοηλεκτρικά μπορούν να παράγουν ακόμα και υπερήχους. Όταν θέλουμε να αναπαράξουμε υπερήχους πάντως στρεφόμαστε σε άλλες κατηγορίες μεγαφώνων, μια από τις οποίες είναι και η ακόλουθη.

### 2.5.2 Μεγάφωνα πλάσματος

Για τους υπέρηχους λοιπόν εκτός από τα προαναφερθέντα super tweeter θόλου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και μεγάφωνα με τεχνολογία πλάσματος.<sup>[25]</sup> Η τεχνολογία πίσω από την όλη ιδέα λέει πως χρησιμοποιείται μια δέσμη πλάσματος υψηλής ηλεκτρικής ενέργειας αντί για ένα στερεό διάφραγμα. Αυτή η δέσμη αν συνδεθεί στην έξοδο ενός ενισχυτή μεταβάλλεται ανάλογα με την

τάση του και έτσι δρα σαν ένα στοιχείο ηχητικής ακτινοβολίας. Το στοιχείο αυτό δεν έχει μάζα και μπορεί έτσι να παράξει εξαιρετικά υψηλές συχνότητες. Παράλληλα ο ιονισμός των διάφορων αερίων βοηθά, διότι χαμηλώνει αρκετά την ηλεκτρική τους αντίσταση και έτσι έχουμε αρκετή ποσότητα ρεύματος που διαπερνά την δέσμη πλάσματος. Συνεπώς με μαγνητικό πεδίο μπορούμε να δημιουργήσουμε ισχυρές δονήσεις στον αέρα, που με τη σειρά τους οδηγούν σε ήχους υψηλής έντασης.

Παρόλα αυτά επειδή οι δέσμες απαρτίζονται από μικρό σωματίδια δεν μπορούν να μετακινήσουν τόσο μεγάλες ποσότητες αέρα, όπως αυτές που χρειάζονται οι ήχοι χαμηλών συχνοτήτων. Δεδομένης μάλιστα και της ικανότητας των μεγαφώνων plasma να μπορούν να παίξουν υπερήχους, με σημαντικά χαμηλότερες παραμορφώσεις μάλιστα από τα συμβατικά tweeter, τα καθιστά ιδανικά για tweeter.

Οι σημαντικά χαμηλότερες παραμορφώσεις προέρχονται από το γεγονός ότι τα ταλαντούμενο στοιχείο εδώ δεν έχει μάζα, άρα ούτε και αδράνεια. Το μουσικό σήμα λοιπόν ακολουθείται πιο πιστά δημιουργώντας έτσι έναν πιο καθαρό, άμεσο και εστιασμένο ήχο. Παρά το γεγονός ότι τα ηχεία πλάσματος δημιουργούν ένα ιδανικό αποτέλεσμα ηχητικά στην πράξη συναντάμε ελάχιστες υλοποιήσεις. Το κυριότερο πρόβλημα είναι το κόστος της υλοποίησης και κάποιοι λόγοι ασφαλείας σχετικά με την χρήση του πλάσματος. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της παραμόρφωσης, λόγω της αδράνειας που δημιουργούν τα κλασικά μεγάφωνα, έχουν υπάρξει και άλλες υλοποιήσεις. Μια από αυτές είναι τα ηλεκτροστατικά ηχεία.

### 2.5.3 Ηλεκτροστατικά και μαγνητοστατικά ηχεία

Η ιδέα παραμένει και στα ηλεκτροστατικά ηχεία<sup>[26]</sup> περίπου η ίδια. Να κατασκευάσουμε ένα μεγάφωνο με μικρή μάζα, πολύ μικρότερη για την ακρίβεια από τα συμβατικά μεγάφωνα, ώστε να έχουμε πιο πιστή αναπαραγωγή.

Πιο συγκεκριμένα στα ηλεκτροστατικά ηχεία το μεγάφωνο είναι μια μεμβράνη, αιωρούμενη μέσα σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, η οποία πάλλεται και δημιουργεί ταλαντώσεις στον αέρα, όταν της ασκήσουμε κάποια δύναμη. Η μεμβράνη αποτελείται από ένα λεπτό επίπεδο διάφραγμα, συνήθως φτιαγμένο από πλαστικό και επικαλυμμένο με ένα αγώγιμο υλικό, όπως ο γραφίτης. Το διάφραγμα τοποθετείται μεταξύ δύο ηλεκτρικά αγώγιμων πλεγμάτων με λίγο διάκενο ανάμεσα τους.

Προκειμένου να έχουμε χαμηλή παραμόρφωση, χρειάζεται το διάφραγμα να είναι υπό σταθερό φορτίο. Για να επιτευχθεί αυτό, είτε κατασκευάζουμε το διάφραγμα με υψηλή αντίσταση ανά επιφάνεια ή συνδέουμε το διάφραγμα με μια μεγάλη αντίσταση σε σειρά. Η πιο σωστή επιλογή και αυτή που εισάγει την λιγότερη παραμόρφωση είναι να έχει το διάφραγμα από μόνο του την απαιτούμενη αντίσταση.

Τα πλέγματα από την άλλη οδηγούνται από το ηχητικό σήμα. Το πίσω πλέγμα είναι σε αντίθετη φάση από το μπροστινό και έτσι παράγεται ένα ομοιόμορφο ηλεκτροστατικό πεδίο ανάλογο του μουσικού σήματος. Το τελευταίο είναι σε θέση να κινήσει το διάφραγμα και να παραχθεί έτσι ο ήχος. Ο ήχος αυτός διέρχεται μέσα από τα πλέγματα, οπότε αυτά δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να είναι φύλλα ας πούμε. Πρέπει να είναι διάτρητα. Κλείνοντας με την περιγραφή της όλης διάταξης σημειώνουμε πως για να παραχθεί ένα αρκετά ισχυρό πεδίο χρειαζόμαστε μια υψηλή τάση και παράλληλα επειδή δεν έχουμε κατανάλωση του φορτίου η αντίσταση της όλης κατασκευής μας είναι υψηλή σε αντίθεση με την χαμηλή αντίσταση που έχουν τα ηλεκτροδυναμικά ηχεία.

Δεδομένου λοιπόν ότι οι ενισχυτές ήχου έχουν σχεδιαστεί για την πλειοψηφία των ηχείων, δηλαδή τα ηλεκτροδυναμικά, είναι φτιαγμένοι να λειτουργούν με χαμηλές τάσεις και εφαρμοζόμενες σε χαμηλές αντιστάσεις. Συνεπώς η όλη διάταξη των ηλεκτροστατικών ηχείων περιέχει και ένα μετασχηματιστή, ο οποίος αναλαμβάνει να ανεβάσει την τάση του μουσικού σήματος στα επιθυμητά επίπεδα.

Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτροστατικών μεγαφώνων λοιπόν είναι η χαμηλή τους παραμόρφωση, από μία έως και δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερα, σε σχέση με τα συμβατικά ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα. Αιτία για αυτό είναι η εξαιρετικά μικρή μάζα του κινούμενου συστήματος. Απαλλαγμένο λοιπόν από τη μάζα το σύστημα μπορεί να αναπαράξει υποδειγματικά το σήμα τόσο σε πλάτος, όσο και σε φάση. Εκτός αυτών των δύο έχουμε γλιτώσει επίσης και από τυχόν συντονισμούς. Για να γίνουμε πιο πειστικοί, σχετικά με το πόσο χαμηλή είναι η μάζα, θα αναφέρουμε κάποια μεγέθη. Ενώ λοιπόν στα κλασσικά ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα έχουμε μάζα μερικών δεκάδων γραμμαρίων ή στην καλύτερη περίπτωση, όταν μιλάμε για tweeter, μερικών γραμμαρίων, στις μεμβράνες η μάζα μας ανέρχεται στα μερικά χιλιοστά του γραμμαρίου μόλις.

Ένα ακόμα σημείο υπεροχής, τουλάχιστον για την πλειοψηφία των ηλεκτροστατικών ηχείων, είναι το γεγονός ότι είναι δίπολες πηγές ήχου. Το γεγονός αυτό διαφοροποιεί την τοποθέτηση τέτοιων ηχείων μέσα σε ένα συμβατικό χώρο. Στην αρχή λοιπόν μπορεί να υπάρξει ένας προβληματισμός με τα δίπολα ηχεία. Εφόσον όμως τοποθετηθούν σωστά, τα δίπολα ηχεία είναι σε θέση να διεγείρουν λιγότερο τις ιδιοσυχνότητες του δωματίου, που είχαμε δει στο κεφάλαιο 1, και γενικότερα να μειώσουν τις αντανάκλασεις. Έτσι ο λόγος του απευθείας ήχου προς τον ανακλώμενο κερδίζει γύρω στα 4-5 dB. Συμπερασματικά λοιπόν διαπιστώνουμε ότι αν γίνει σωστή τοποθέτηση των ηχείων και του ακροατή στο χώρο μπορούμε να οδηγηθούμε σε καλύτερη στερεοφωνική αναπαραγωγή.

Όστοςό όλα αυτά τα πλεονεκτήματα που περιγράψαμε μέχρι εδώ συμβάλλουν όλα μαζί και οδηγούν σε μια προβληματική αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων. Η δίπολη αρχή ακτινοβολίας στις χαμηλές συχνότητες που είναι παντοκατευθυντικές οδηγεί σε ακύρωση και εξασθένηση των κυμάτων. Για να

αμβλυνθεί η ακύρωση χρειαζόμαστε μεγάλες επιφάνειες. Επίσης οι μεμβράνες που ακτινοβολούν μπορούν να κάνουν μικρές διαδρομές οπότε πρέπει για έναν ακόμα λόγο να έχουν μεγάλο εμβαδό. Ο λόγος είναι να μπορούν να μετακινήσουν μεγάλες ποσότητες αέρα, οι οποίες με τη σειρά τους θα χρησιμεύσουν για την αναπαραγωγή ενός προγράμματος, που περιέχει και χαμηλές συχνότητες, σε υψηλή στάθμη.

Οι πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει εν μέρει ότι υπάρχει λύση, αλλά δεν είναι ολική. Για παράδειγμα το quad ESL-63, το οποίο είναι στην μικρότερη διάσταση του, το πλάτος, 0.66 μέτρα έχει εύρος συχνοτήτων μέχρι τα 129 Hz. Το εύρος αυτό δεν είναι αποδεκτό για τα περισσότερα μουσικά είδη. Από την άλλη ένα ηχείο για οικιακή χρήση δεν μπορεί να γίνει πιο πλατύ. Άλλες λύσεις του ζητήματος είναι η χρήση ψηφιακής ισοστάθμισης ή ακόμα και η χρήση ενός υπογούφερ για τις δύο ή τρεις τελευταίες οκτάβες του φάσματος.

Η λύση του υπογούφερ πάντως είναι αμφισβητήσιμη διότι τα ηλεκτροστατικά μεγάφωνα χαρακτηρίζονται ως γραμμικές πηγές και θεωρητικά η στάθμη τους μειώνεται κατά 3 dB με κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Αντίθετα το υπογούφερ με τον ηλεκτροδυναμικό κώνο δρα σαν σημειακή πηγή και έχει απώλειες 6 dB με κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Οπότε αναλόγως την απόσταση ακρόασης πρέπει να ρυθμίσουμε ξεχωριστά τη στάθμη του υπογούφερ από αυτή των πάνελ. Πάνελ είναι μια διαφορετική ονομασία για τα ηχεία αυτού του τύπου επειδή είναι επίπεδα. Ηχεία πάνελ εκτός από τα ηλεκτροστατικά είναι και τα μαγνητοστατικά.

Τα μαγνητοστατικά ηχεία έχουν πολλές ομοιότητες με τα ηλεκτροστατικά απλώς αντί για υψηλές τάσεις χρησιμοποιούν υψηλό ρεύμα. Η όλη διάταξη έχει και μόνιμους μαγνήτες που περιέχουν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Έτσι το ρεύμα περνά μέσα από τους αγωγούς, που είναι ενωμένοι με ένα λεπτό διάφραγμα, και λόγω μαγνητικού πεδίου η όλη διάταξη ταλαντώνεται όπως σε ένα συμβατικό ηλεκτροδυναμικό οδηγό. Και τα μαγνητοστατικά ηχεία είναι δίπολα με ότι καλό και κακό συνεπάγεται αυτό.

Σαν φορτία είναι ιδιαίτερα ομαλά και με συμπεριφορά που παραπέμπει σε αντίσταση. Σαν μέτρο όμως η αντίσταση τους είναι χαμηλή και θα πρέπει έτσι οι ενισχυτές που θα κληθούν να τα οδηγήσουν να είναι ικανές πηγές τάσης, να μπορούν δηλαδή να διατηρήσουν την τάση τους σταθερή κάτω από αντίξοες συνθήκες.

Τα ηχεία πάνελ είναι σίγουρα λεπτά αλλά πρέπει να έχουν μεγάλη επιφάνεια. Έτσι λοιπόν έχουν μεγάλο ύψος και πλάτος. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή είναι δίπολα ηχεία. Παρ'όλα αυτά έχουν υπάρξει και κάποιες προσπάθειες για μη δίπολα ηχεία πάνελ. Δεν έχουν όμως κάτι διαφορετικό σε τεχνολογία μεγαφώνων για αυτό και δεν θα αναφέρουμε κάτι εδώ.

## Κεφάλαιο 3

### Η καμπίνα ενός ηχείου

#### 3.1 Διάφοροι τύποι καμπίνας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα μεγάφωνα καθώς πάλλονται εκπέμπουν κύματα και από τις δύο πλευρές τους. Στόχος λοιπόν της καμπίνας, εκτός από την στήριξη των μεγαφώνων, είναι και η διαχείριση της οπίσθιας ακτινοβολίας του μεγαφώνου. Οι περισσότεροι τύποι καμπίνας έχουν ως σκοπό την απομόνωση και εξάλειψη των κυμάτων αυτών.

Η απόσβεση της οπίσθιας ακτινοβολίας γίνεται ώστε να μείνει στο χώρο μόνο η μπροστινή ακτινοβολία του μεγαφώνου. Σε περίπτωση που διαδίδονται και οι δύο ακτινοβολίες ενός μεγαφώνου μέσα σε ένα χώρο θα έχουμε ακύρωση των κυμάτων επειδή αυτά είναι αντίθετα. Το γεγονός ότι τα δύο κύματα είναι σε αντίθετη φάση προκύπτει εύκολα αν σκεφτούμε λίγο τον τρόπο που λειτουργεί το μεγάφωνο. Καθώς ο κώνος πάλλεται προς τη μια κατεύθυνση δημιουργεί πύκνωμα στην μια ακτινοβολία και αραιώμα στην άλλη. Αντίθετα όταν θα κινηθεί προς την άλλη κατεύθυνση τα δύο κύματα, τα οποία θυμίζουμε πως είναι διαμήκη, θα έχουν πάλι το ένα αραιώμα και το άλλο πύκνωμα. Και συνεπώς σε κάθε κίνηση του κώνου φαίνεται πως τα δύο κύματα πάντα θα είναι αντίθετα.

Πέρα πάντως από τις συνήθεις καμπίνες υπάρχουν και οι ανοιχτού τύπου, οι οποίες επιτρέπουν την διάδοση και των δύο κυμάτων. Δεν μπορούμε πάντως να τις χρησιμοποιήσουμε στις πολύ χαμηλές συχνότητες που ο ήχος εξαπλώνεται σχεδόν σφαιρικά και οδηγούμαστε σε ακύρωση των κυμάτων. Στις υπόλοιπες συχνότητες έχουμε διάφορα οφέλη να χρησιμοποιήσουμε καμπίνες ανοιχτού τύπου. Ουσιαστικά είναι σαν να έχουμε ελεύθερα τα μεγάφωνα απαλλαγμένα από κάθε πρόβλημα που μπορεί να δημιουργήσει η καμπίνα.

Η καλή τεχνογνωσία των κλειστών καμπινών πάντως καθιστά εύκολη την κατασκευή τους και έτσι συχνά επιλέγονται οι καμπίνες αυτού του τύπου. Δηλαδή τις ανοιχτές καμπίνες τις συναντάμε σπανίως, οπότε και δεν αναφερθούμε περισσότερο σε αυτές ή στις υποκατηγορίες τους. Οι κλειστές καμπίνες με τη σειρά τους έχουν τις δικές τους υποκατηγορίες. Έχουμε λοιπόν τις καμπίνες ακουστικής ανάρτησης που είναι τελείως κλειστές. Από εκεί και πέρα υπάρχουν οι καμπίνες ανάκλασης χαμηλών. Αυτές διαθέτουν μια ωπή ανάκλασης η οποία λειτουργεί σύμφωνα με το αντηχείο του Helmholtz. Σε συχνότητες αρκετά πιο πάνω από την ιδιοσυχνότητα της οπής συμπεριφέρονται και αυτές σαν τις κλειστές. Σήμερα στην αγορά είναι οι πιο δημοφιλείς καμπίνες. Δεύτερες έρχονται οι καμπίνες ακουστικής ανάρτησης. Από εκεί και πέρα υπάρχουν και άλλοι τύποι, που σπανίζουν πάντως στην αγορά, όπως οι γραμμής μεταφοράς ή οι οπίσθιας χοάνης.

## 3.2 Καμπίνα ακουστικής ανάρτησης

Η καμπίνα αυτού του τύπου έχει εφευρεθεί το 1954.<sup>[27]</sup> Όταν πρωτοπαρουσιάστηκε επέτρεψε νέα επίπεδα στην απόδοση του χαμηλού ενός ηχείου από τον ίδιο όγκο και μέγεθος μεγαφώνου. Αυτό συνέβη επειδή ο αέρας πίσω από το μεγάφωνο ήταν κλεισμένος μέσα στην καμπίνα. Έτσι η οπίσθια ακτινοβολία έμενε αποκλειστικά μέσα στο κουτί και δεν διαχεόταν στο χώρο, ώστε να ακυρωθεί με την εμπρόσθια. Σήμερα παραμένει εν μέρει ανταγωνιστική η τοπολογία αυτή, καθώς είναι πολύ εύκολη στη σχεδίαση της και την υλοποίηση της. Έχει αναμενόμενα αποτελέσματα και το κόστος της όλης κατασκευής μπορεί να διατηρηθεί χαμηλό.

Ο αέρας που βρίσκεται μέσα στην καμπίνα, δεδομένου ότι δεν μπορεί να βγει, μπορεί μόνο να συμπιεστεί. Καθώς ο κώνος ταλαντώνεται αλλάζει η πυκνότητα του αέρα. Έτσι αυτός ασκεί στον κινούμενο κώνο μια δύναμη επαναφοράς. Αυτή η δύναμη αθροίζεται με την δύναμη επαναφοράς του αναρτώμενου συστήματος του μεγαφώνου. Συνοψίζοντας λοιπόν έχουμε μια νέα μεγαλύτερη σταθερά ελαστικότητας. Δηλαδή ορισμένες παράμετροι Thiele/Small αλλάζουν. Θα πούμε επακριβώς ποιοι παράμετροι αλλάζουν στην επόμενη υποενότητα.

### 3.2.1 Επίδραση της καμπίνας στις παραμέτρους του μεγαφώνου

Το πρώτο πράγμα που μπορούμε να ξέρουμε για μια καμπίνα είναι ο όγκος της. Επειδή λοιπόν ο όγκος είναι γνωστός για μια καμπίνα και επίσης γνωστός είναι και ο ισοδύναμος όγκος του κάθε μεγαφώνου μας βολεύει να δουλέψουμε με όγκους. Ακόμα και η ανάλυση των υπόλοιπων παραμέτρων θα γίνει με βάση τους δύο όγκους.

Ουσιαστικά όπως είπαμε ήδη ο αέρας ασκεί μια επιπρόσθετη δύναμη επαναφοράς. Έτσι λοιπόν αλλάζουν τα μεγέθη απόσβεσης του ταλαντωμένου συστήματος, δηλαδή του μεγαφώνου καθώς επίσης και η ιδιοσυχνότητα του. Την τελευταία θα την συμβολίζουμε με  $f_c$ . Για την απόσβεση του συστήματος πάλι θα χρησιμοποιήσουμε έναν νέο συντελεστή ποιότητας. Αυτός ο συντελεστής ποιότητας, ονόματι  $Q_{tc}$ , θα αναπαριστά τον συντελεστή ποιότητας όλου του συστήματος, δηλαδή του μεγαφώνου συνολικά και της καμπίνας. Δεδομένου ότι η δύναμη επαναφοράς από την καμπίνα είναι άμεσα εξαρτώμενη από το μεγάφωνο είναι λογικό και ο συντελεστής ποιότητας της καμπίνας να είναι συναρτώμενος του  $Q_{ts}$ . Τελικώς και ο  $Q_{tc}$ , όντας συνδυασμός των δύο αυτών  $Q$  θα συνδέεται με μια γραμμική σχέση εξάρτησης από τον  $Q_{ts}$ .

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\left(\frac{V_{as}}{V_c} + 1\right)}$$

Όπου με  $V_c$  συμβολίζουμε τον όγκο της καμπίνας.  
Αντίστοιχα τώρα για τη συχνότητα  $f_c$  ισχύει

$$f_c = f_s \sqrt{\left(\frac{V_{as}}{V_c} + 1\right)}$$

Πέρα από την ιδιοσυχνότητα θα αναφέρουμε τώρα μια ακόμα πιο γενική και χρήσιμη σχέση που συνδέει την ιδιοσυχνότητα ενός συστήματος με τον συντελεστή του  $Q$  και την συχνότητα  $f_3$ . Η συχνότητα με αυτόν τον δείκτη είναι γνωστή ως συχνότητα -3dB. Με άλλα λόγια είναι γνωστή ως η συχνότητα όπου η αποδιδόμενη ισχύς, άρα και ενέργεια, γίνεται η μισή της μέγιστης. Για αυτή την συχνότητα ισχύει

$$f_3 = f_c \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}}$$

Σε αυτό το σημείο θυμίζουμε πως ο συντελεστής ποιότητας συνδέεται με την απόσβεση  $\zeta$  με την σχέση  $Q = 1/2\zeta$ . Με  $\zeta=1$  έχουμε απόσβεση την οποία την χαρακτηρίζουμε κρίσιμη ενώ για μεγαλύτερα  $\zeta$  έχουμε υπεραπόσβεση. Αντίθετα με  $\zeta < 1$  έχουμε υποαπόσβεση. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα το σύστημα εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση με συχνότητα λίγο διαφορετική από την ιδιοσυχνότητα του.

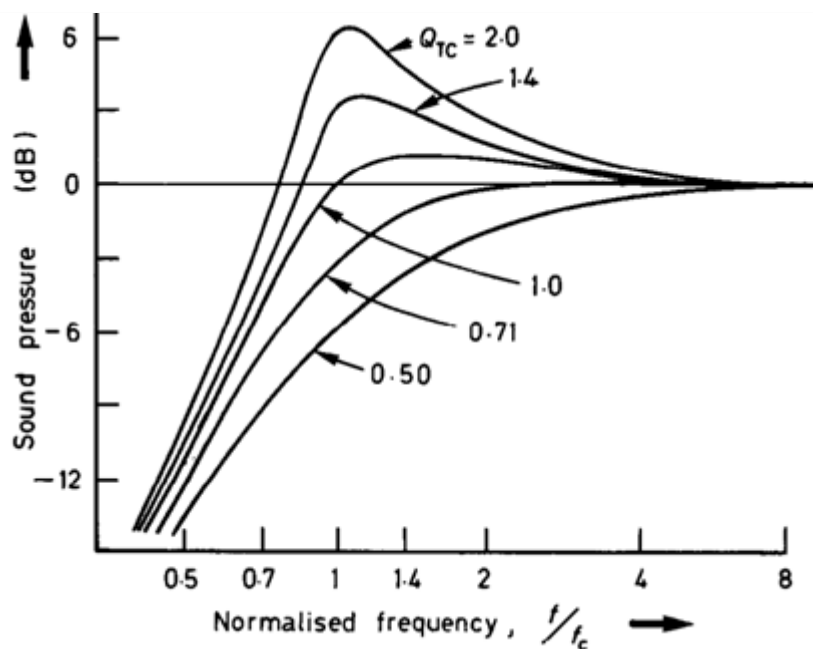
Στα ηχεία μας ενδιαφέρει να έχουμε κρίσιμη απόσβεση, προκειμένου να επιτύχουμε βέλτιστη συμπεριφορά στην κρουστική απόκριση. Ακόμα πιο ιδανική είναι η περίπτωση όπου έχουμε ελαφρώς υποαπόσβεση. Έτσι επιτυγχάνουμε σχετικά καλή συμπεριφορά ως προς την χρονική απόκριση και παράλληλα μειώνουμε τον λόγο  $f_3/f_c$  όσο γίνεται.

### 3.2.2 Σχεδίαση καμπίνας ακουστικής ανάρτησης

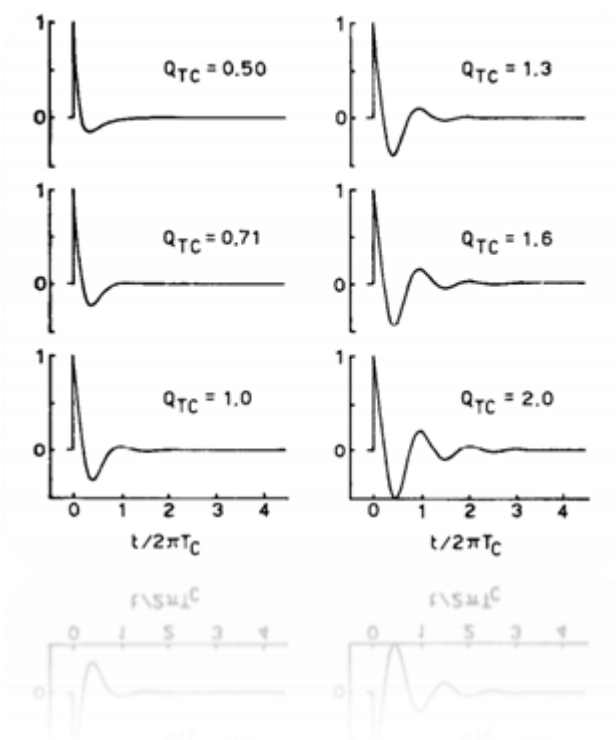
Για τον σχεδιασμό λοιπόν μιας καμπίνας ακουστικής ανάρτησης, όπως είπαμε και στην αρχή θα χρειαστούμε απλοϊκές κινήσεις. Ουσιαστικά θα υπολογίζουμε τον όγκο που θέλουμε με δεδομένο το μεγάφωνο που θα χρησιμοποιήσουμε. Πριν από αυτό όμως είναι σκόπιμο να δούμε τις πρέπουσες τιμές που θα πάρει το  $Q_{tc}$ .

Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει η τέλεια κρουστική απόκριση χρειαζόμαστε κρίσιμη απόσβεση, δηλαδή  $\zeta=1$ . Από την σχέση  $Q = 1/2\zeta$  βλέπουμε πως το  $Q$  του ηχείου πρέπει να είναι  $Q_{tc} = 0,5$ . Η συχνότητα τώρα των  $-3\text{dB}$  θα δοθεί από τον τύπο και θα είναι  $f_3 = 1,55f_c$ . Η  $f_3$  μας ενδιαφέρει γιατί υποδηλώνει το κατώτατο όριο του εύρους συχνοτήτων που μπορεί να αναπαράξει το ηχείο. Γενικά ως εύρος συχνοτήτων μιας συσκευής ήχου ορίζουμε τις δύο συχνότητες στις οποίες η αποδιδόμενη ισχύς είναι η μισή της μέγιστης. Σε συχνότητες χαμηλότερες από την  $f_3$  το ηχείο ασφαλώς και παίζει απλώς αρχίζουμε πλέον και αισθανόμαστε την απουσία αυτών των ήχων στα αυτιά μας, αφού αναπαράγονται με εξασθένηση περισσότερη των 3 dB.

Από την άλλη είπαμε πως μπορούμε να έχουμε και λίγο μικρότερο  $\zeta$  (υποαπόσβεση) με σκοπό την περισσότερη έκταση κοντά στην ιδιοσυχνότητα. Εδώ το  $Q$  μεγαλώνει. Γενικά είναι αποδεκτές οι τιμές μέχρι  $Q=0,8$  με συνηθέστερη τιμή την  $Q = 0,707 = 1/\sqrt{2}$ . Η τιμή αυτή δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την κρουστική απόκριση και δίνει μια  $f_3 = f_c$ . Δηλαδή για δύο συστήματα που έχουν ίδια  $f_c$  αυτό με  $Q = 0,707$  έχει μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Φυσικά σημειώνουμε πως όλες οι τιμές μεταξύ του 0,5 και του 0,707 είναι επιτρεπτές και δίνουν ενδιάμεσα αποτελέσματα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και του εύρους συχνοτήτων. Παρακάτω ακολουθούν γραφικές παραστάσεις για να πάρουμε μια καλύτερη εικόνα των  $Q$ .







Στην προηγούμενη ενότητα δείξαμε πως επιλέγουμε τον όγκο της καμπίνας. Με δεδομένο το ισοδύναμο όγκο ενός μεγαφώνου, καθώς και τον ολικό του συντελεστή  $Q_{ts}$  μπορούμε να εξάγουμε τον θεμιτό όγκο, αρκεί να δώσουμε μια τιμή για το  $Q_{tc}$ . Πράγματι είναι

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\frac{V_{as}}{V_c} + 1} \Rightarrow \frac{V_{as}}{V_c} = \left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1 \Rightarrow V_c = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}$$

Αφού βρούμε τον όγκο εύκολα βρίσκουμε και την ιδιοσυχνότητα του συστήματος η οποία θα είναι και ίδια με την  $f_3$  για  $Q=0,707$ .

Ο όγκος για τον οποίο μιλήσαμε εδώ είναι ο φαινομενικός όγκος της καμπίνας και σε ορισμένες περιπτώσεις διαφέρει από τον πραγματικό όγκο. Οι δύο όγκοι διαφέρουν μεταξύ τους όταν γεμίζουμε τον υπαρκτό, και πραγματικό, όγκο, ή έστω μέρος αυτού. Το γέμισμα μπορεί να γίνει με διάφορα ηχοαπορροφητικά υλικά. Με το γέμισμα κερδίζουμε καλύτερη απόσβεση της οπίσθιας ακτινοβολίας και αύξηση του φαινομενικού όγκου. Εμπειρικά προκύπτει πως με πλήρως γεμάτη την καμπίνα κερδίζουμε περίπου 25%-30% σε όγκο. Με γέμισμα περίπου του μισού όγκου κερδίζουμε 12%-15%. Τυπικά υλικά γεμίματος είναι τα διάφορα συνθετικά βαμβάκια ή ο υαλοβάμβακας, αν και τελευταία δεν συναντάται τόσο συχνά λόγω των πιθανών καρκινογενέσεων, για τις οποίες είναι υπεύθυνος.

Συνοψίζοντας λοιπόν η καμπίνα ακουστικής ανάρτησης είναι μια σχετικά εύκολη υπόθεση, η οποία μάλιστα θα παραδώσει σίγουρα και ουδέτερα αποτελέσματα. Ένα ηχείο βασισμένο σε μια τέτοια καμπίνα θα έχει ένα αποδεκτό εύρος απόκρισης και τυπικά καλή έως άριστη κρουστική απόκριση. Εκπληρώνεται δηλαδή κατά μεγάλο ποσοστό, τουλάχιστον στις χαμηλές συχνότητες, ο αρχικός στόχος του κάθε ηχείου. Πιστή αναπαραγωγή των όσων σημάτων δέχεται.

Γενικά ξεκινάμε με ένα μεγάφωνο κατάλληλο για την κατασκευή που θέλουμε. Κατάλληλα μεγάφωνα είναι αυτά με συνολικό Q στο εύρος 0,35-0,45. Μεγάφωνο με διαφορετικό Q δεν είναι πρόβλημα σε καμία περίπτωση. Παράλληλα θέτουμε το ολικό  $Q_{tc} = 0,707$ . Έτσι βρίσκουμε τον φαινομενικό όγκο που θέλουμε. Κατασκευάζουμε λοιπόν μια καμπίνα με όγκο γύρω στο 85% του όγκου αυτού και την γεμίζουμε καλά. Καλό γέμισμα θεωρείται περίπου το 80% της καμπίνας. Ιδανικό είναι το πλήρες γέμισμα, αλλά πρακτικά ανέφικτο αφού μέσα στον όγκο θα είναι και άλλα πράγματα του ηχείου, όπως τα μεγάφωνα και τα crossover.

Πριν από περίπου μισό αιώνα, η ευκολία της υλοποίησης τέτοιου τύπου καμπινών καθώς και η πολύ καλή απόδοση σε όλους τους τομείς τις έκαναν πολύ δημοφιλείς. Στην πορεία ωστόσο καθώς περάσαμε στη στερεοφωνία και αργότερα στον πολυκάναλο ήχο χρειαζόμασταν περισσότερα ηχεία μέσα στον ίδιο χώρο. Τα ηχεία λοιπόν έπρεπε να μικρύνουν σε μέγεθος, χωρίς φυσικά να χάσουν σε απόδοση του χαμηλού. Προέκυψαν έτσι διάφοροι νέοι τύποι καμπινών. Αυτός που επικράτησε, κυρίως λόγω της ευκολίας κατασκευής του, θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο μέρος αυτού του κεφαλαίου. Τα ηχεία αυτού του τύπου λέγονται bass reflex και χρησιμοποιούν θεωρία από τα αντηχεία του Helmholtz.



### 3.3 Καμπίνες ανάκλασης χαμηλών ( Bass reflex )

Με την εξέλιξη του οικιακού, και μη, ήχου δημιουργήσαμε περισσότερα κανάλια τα οποία προϋποθέτουν ασφαλώς και περισσότερα ηχεία. Έγινε λοιπόν ανάγκη η σμίκρυνση των ηχείων. Παράλληλα όμως έπρεπε να διατηρηθεί η απόδοση των χαμηλών συχνοτήτων.

Έτσι παρουσιάστηκαν τα ηχεία ανάκλασης χαμηλών, ή bass reflex, τα οποία εδραιώθηκαν στην αγορά καθώς τα χρόνια περνούσαν και στην σχεδίαση σιγά σιγά έμπαινε και ο υπολογιστής. Σήμερα είναι κανόνας για τα ηχεία αυτού του τύπου οι σχεδιάσεις, με τη τοπολογία ακουστικής ανάρτησης να την συναντάμε πλέον μόνο σε ειδικές κατασκευές. Δηλαδή πολύ μικρά ηχεία, στα οποία δεν νοιαζόμαστε ούτως ή άλλως για την αναπαραγωγή χαμηλού ή ηχεία μόνο χαμηλών συχνοτήτων.

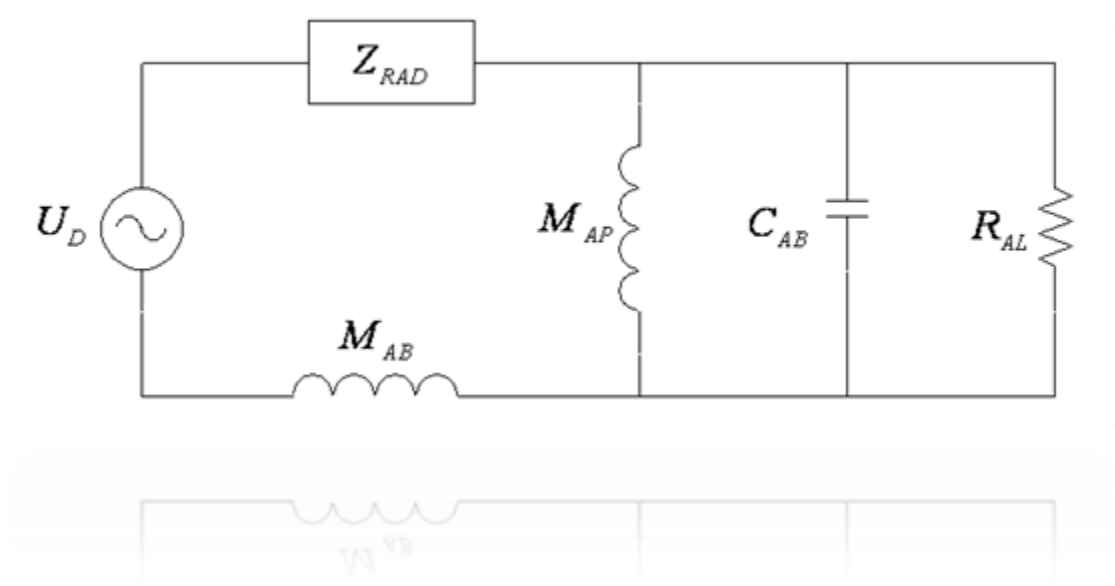
Συνοψίζοντας πάντως τα ηχεία με καμπίνες bass reflex υπερτερούν σε δύο σημεία. Πρώτον στην αύξηση της παραγόμενης στάθμης κατά περίπου 3dB και δεύτερον στην επέκταση του εύρους συχνοτήτων χαμηλά.

#### 3.3.1 Παρουσίαση και ανάλυση των παραμέτρων που συμβάλουν στη σχεδίαση

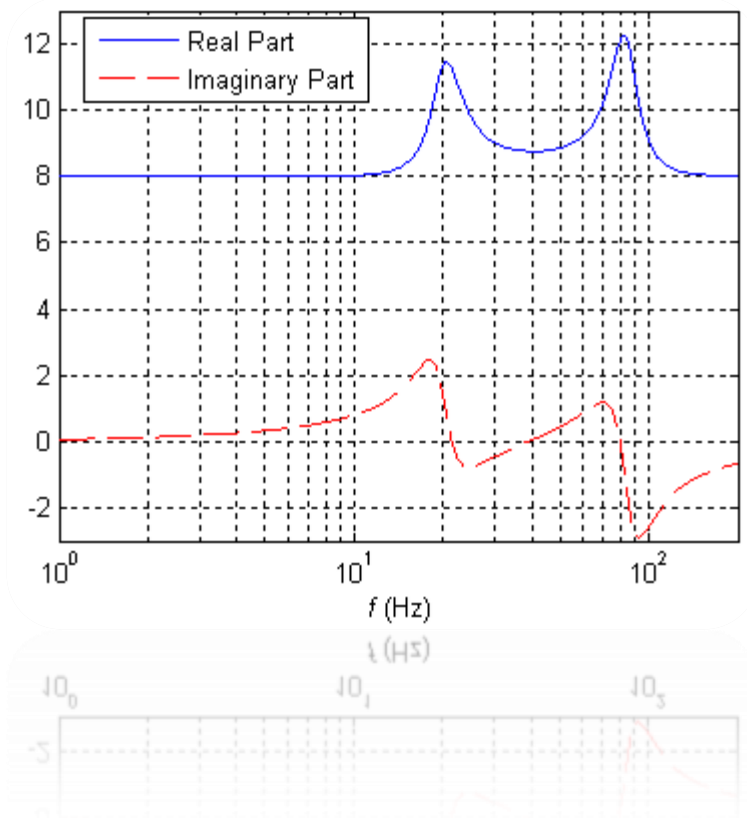
Πριν πούμε για τις ειδικές παραμέτρους που συναντάμε μόνο εδώ, θα πούμε για αυτές που υπάρχουν γενικά και μπορούμε να τις συναντήσουμε και σε μια καμπίνα ακουστικής ανάρτησης ας πούμε. Έχουμε λοιπόν την μάζα του μεγαφώνου καθώς επίσης και την ελαστικότητα του. Στην μάζα συνυπολογίζουμε και την μάζα του αέρα που κινεί το μεγάφωνο. Συνήθως αυτή μας την δίνει ο κατασκευαστής μέσα από τα στοιχεία Thiele/Small.

Και εδώ έχουμε την ελαστικότητα της καμπίνας αλλά πλέον συνδέονται παράλληλα σε αυτήν και άλλες νέες παράμετροι. Όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα παράλληλα στην ελαστικότητα έχουμε πλέον την μάζα της οπής. Δηλαδή την μάζα του αέρα που βρίσκεται μέσα στην οπή. Αυτή η παράλληλη σύνδεση είναι που συνδέει θεωρητικά τις καμπίνες αυτού του τύπου με τα μοντέλα του Helmholtz. Στα μοντέλα αυτά βέβαια η καμπίνα διεγείρεται μέσω του σωλήνα ενώ στην περίπτωση του ηχείου έχουμε διέγερση της καμπίνας μέσα από το μεγάφωνο. Ωστόσο κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος προκύπτει το ίδιο αποτέλεσμα.

Επιπλέον έχουμε παράλληλη σύνδεση και της αντίστασης διαρροών. Αυτό είναι λογικό γιατί ο αέρας συμπιέζεται και διαφεύγει παράλληλα τόσο από τις διαρροές στα τοιχώματα της καμπίνας, όσο και από την οπή.<sup>[28]</sup> Τέλος προσθέτουμε στο κύκλωμα και την μάζα της καμπίνας, έτσι ακριβώς όπως την προσθέσαμε και στο κύκλωμα ακουστικής ανάρτησης. Παρακάτω φαίνεται η εικόνα των όσων είπαμε.



Εδώ με  $Z_{RAD}$  συμβολίζουμε την ολική αντίσταση λόγω μεγαφώνου και αλληλεπίδρασης του με το περιβάλλον.<sup>[28]</sup> Κοντά στην ιδιοσυχνότητα το μεγάφωνο, είτε είναι ελεύθερο είτε σε κλειστή καμπίνα, παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και πρακτικά τα κινούμενα μέρη του ίσα που του επιτρέπουν να κινηθεί. Έτσι σε αυτή την συχνότητα παίζει κυρίως η οπή και επειδή συνδέεται παράλληλα με το μεγάφωνο έχουμε πλέον στα ηχεία bass reflex μια βύθιση της αντίστασης στην ιδιοσυχνότητα.



Στις υπόλοιπες συχνότητες τώρα θα δώσουμε μια έκφραση για την  $Z_{RAD}$  και στη συνέχεια θα την απλοποιήσουμε. Η απλοποίηση θα γίνει με βάση το εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει προς το παρόν, δηλαδή κάτω από τα 150 Hz.<sup>[28]</sup> Η αντίσταση του πηνίου σε αυτές τις συχνότητες είναι σχεδόν ωμική και μπορεί να θεωρηθεί ως τέτοια. Μια πρώτη έκφραση της αντίστασης είναι

$$Z_{RAD} = \frac{\rho_0 c}{\pi a^2} \left[ \left( 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) + j \frac{H_1(2ka)}{ka} \right]$$

Όπου τα  $J_1(x)$  και  $H_1(x)$  αποτελούν συναρτήσεις Bessel.<sup>[28]</sup> Όπου το  $a$  είναι η ακτίνα του κώνου. Για μικρά  $ka$  μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι

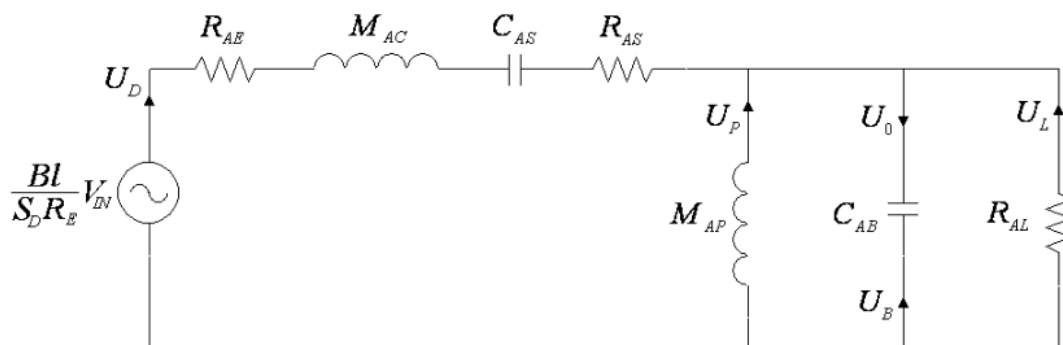
$$J_1(2ka) \approx ka \quad H_1(2ka) = \frac{8(ka)^2}{3\pi}$$

Έτσι η αντίσταση γίνεται

$$Z_{RAD} \approx j \frac{8\rho_0 \omega}{3\pi^2 \alpha} = jM_{A1}$$

Με  $M_{A1}$  συμβολίζουμε την ακουστική μάζα. Όλες οι μάζες στο κύκλωμα μας βρίσκονται σε σειρά, οπότε στην ακόλουθη έκφραση του θα τις συμβολίζουμε με μια  $M_{AC}$ . Επειδή μελετούμε ένα κύκλωμα με ακουστικά εξαρτήματα καλούμαστε να μετατρέψουμε και όποιο άλλο στο ακουστικό του ανάλογο.

Έτσι την ηλεκτρική αντίσταση, το ανάλογο της πιο συγκεκριμένα, θα το συμβολίζουμε με  $R_{AE}$ . Αντίστοιχα η αντίσταση της ανάρτησης απεικονίζεται με  $R_{AS}$ . Η ελαστικότητα της ανάρτησης τέλος θα είναι  $C_{AS}$ . Το κύκλωμα μας τώρα λοιπόν έχει την ακόλουθη μορφή



Στο σχήμα επίσης φαίνεται και η ροή των ταχυτήτων. Με βάση αυτές θα γίνει η περαιτέρω ανάλυση. Ουσιαστικά ισχύει η σχέση  $U_0 = U_D + U_P + U_L$ . Εμείς λοιπόν είμαστε σε θέση να μετρήσουμε όλες αυτές τις ταχύτητες, καθώς επίσης και την

τάση  $V_{IN}$ . Έτσι μπορούμε να εξάγουμε την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς η οποία και διέπει τις καμπίνες αυτού του τύπου.

$$\frac{U_0}{V_{IN}} = H(s) = \frac{\frac{s^4}{\omega_0^4}}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^4 + a_3 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^3 + a_2 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + a_1 \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1}$$

### 3.3.2 Ανάλυση των όρων της συνάρτησης μεταφοράς

Πριν δώσουμε τις εξισώσεις για τα  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \omega_0$  θα ορίσουμε κάποια ακόμα μεγέθη.

- Ιδιοσυχνότητα της καμπίνας  $f_B$ . Όπως έχει και το μεγάφωνο την δική του ιδιοσυχνότητα έτσι και μια καμπίνα τύπου Helmholtz έχει ανάλογα με τον όγκο της και τη μάζα του αέρα της οπής τη δική της ιδιοσυχνότητα. Στους τύπους χρησιμοποιούμε την κυκλική συχνότητα  $\omega_B$ . Με μαθηματική διατύπωση η  $\omega_B$  γράφεται:

$$\omega_B = \frac{1}{\sqrt{M_{AP} C_{AB}}}$$

- Ιδιοσυχνότητα του μεγαφώνου  $f_S$ . Το μέγεθος αυτό το έχουμε ορίσει και στην παράγραφο 2.3, όταν κάναμε την παρουσίαση των μεγεθών Thiele /Small. Εδώ θα δώσουμε απλώς την έκφραση της κυκλικής της συχνότητας.

$$\omega_S = \frac{1}{\sqrt{M_{AC} C_{AS}}}$$

- Συνολικά για το σύστημα μεγάφωνο καμπίνα έχουμε την ολική ιδιοσυχνότητα που θα χρησιμοποιούμε στον τύπο  $\omega_0$ .<sup>[28]</sup>

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_B \omega_S}$$

- Εκτός από τις ιδιοσυχνότητες στο σύστημα έχουμε δύο ακόμα παραμέτρους, τον συντελεστή συντονισμού Helmholtz  $h$  και τον συντελεστή όγκου  $\alpha$ , ή συντελεστή ενδοτικότητας.<sup>[28]</sup> Αμφότεροι δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$h = \frac{\omega_B}{\omega_S} \quad \alpha = \frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{V_{AS}}{V_{AB}}$$

Τέλος, εφόσον έχουμε απώλειες τόσο στο μεγάφωνο, όσο και στην καμπίνα, μέσω των διαρροών του αέρα, θα εισάγουμε και δύο συντελεστές ποιότητας. Με  $Q_L$  είναι ο συντελεστής ποιότητας λόγω διαρροών και με  $Q_{TS}$  συμβολίζουμε τον ολικό συντελεστή του μεγαφώνου, όπως πάλι είχαμε πει στο κεφάλαιο 2.3.

$$Q_L = R_{AL} \sqrt{\frac{C_{AB}}{M_{AP}}}$$

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται αποκλειστικά από την κατασκευή της καμπίνας και γενικά για μια αρκούντως στεγανή καμπίνα έχει τιμές από 7 έως 20. Ευτυχώς όπως θα δούμε σε λίγο δεν επηρεάζει πολύ το αποτέλεσμα μας και έτσι μπορεί να έχει ένα μεγάλο εύρος τιμών όπως το παραπάνω.

Μέχρι εδώ ήδη έχουμε ορίσει το μέγεθος  $\omega_0$  και μας μένουν τώρα οι ορισμοί για τα  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ .<sup>[28]</sup> Πειραματικά λοιπόν έχουν προκύψει οι ακόλουθες εξισώσεις

$$\alpha_1 = \frac{1}{Q_L \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_{TS}}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha + 1}{h} + h + \frac{1}{Q_L Q_{TS}}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{Q_{TS} \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_L}$$

Τώρα που ξέρουμε όλους τους συντελεστές μπορούμε να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς. Μέσω αυτής θα πάρουμε την θεωρητική προσέγγιση για την απόκριση του ηχείου χαμηλά. Δεν θα πάρουμε σε καμία περίπτωση απόλυτα μεγέθη γιατί η προσέγγιση μας για διευκόλυνση έχει παρακάμψει κάποια σημεία. Όμως θα πάρουμε μια πολύ καλή εικόνα για την κλίση της αποκοπής του ηχείου στο κάτω μέρος του φάσματος. Για την ακρίβεια το ηχείο συμπεριφέρεται σαν ένα είδος υπερπαρατού φίλτρου, αφού θέλοντας και μη, αποκόπτει τις πολύ χαμηλές συχνότητες. Βλέποντας το έτσι και με δεδομένο ότι έχουν προκύψει κάποιες τυποποιημένες ευθυγραμμίσεις υπερπαρατών φίλτρων, αυτές μπορούν να εφαρμοστούν και στην θεωρητική προσέγγιση του ηχείου. Παρακάτω λοιπόν θα παρουσιάσουμε αυτά τα μοντέλα.

### 3.3.3 Διάφορα έτοιμα μοντέλα ευθυγράμμισης

Όπως προαναφέραμε τα ηχεία συμπεριφέρονται σαν ένα είδος υψιπερατού φίλτρου, με χαμηλή συχνότητα αποκοπής βέβαια. Ένα ηχείο που καλείται να αναπαράγει τις συχνότητες όλων των οργάνων, δηλαδή μέχρι περίπου τα 42 Hz, πρέπει να έχει μια συχνότητα αποκοπής κάπου εκεί κοντά, στα 40-50 Hz. Την συχνότητα αυτή τη συμβολίζουμε με  $f_c$  ή διαφορετικά με  $f_s$ . Στην συνέχεια θα δείξουμε έτοιμα μοντέλα ευθυγράμμισης και τις τιμές που πρέπει να λάβουν οι διάφοροι παράμετροι.

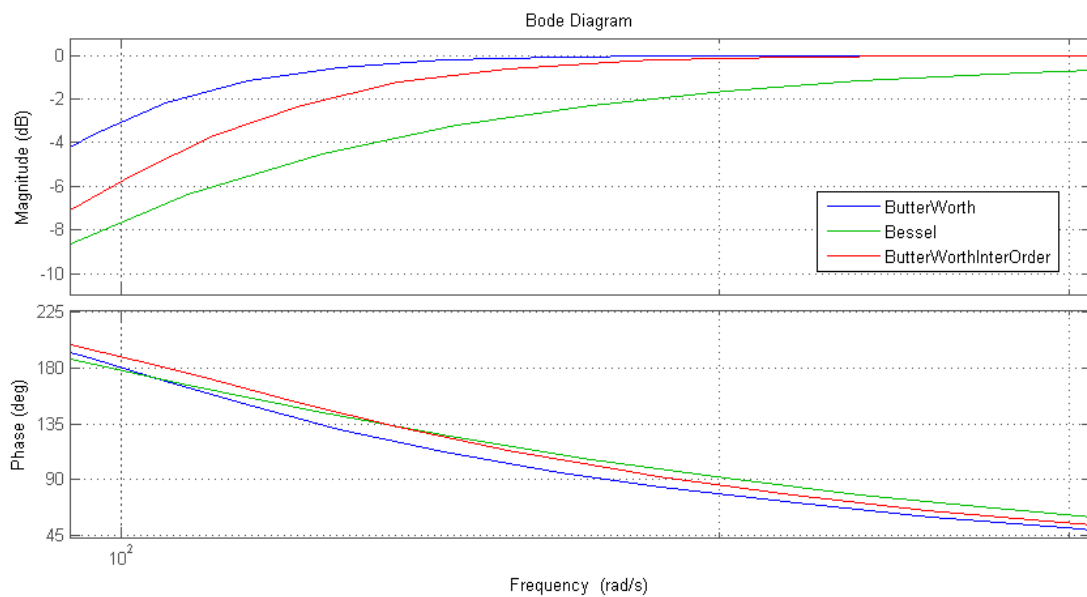
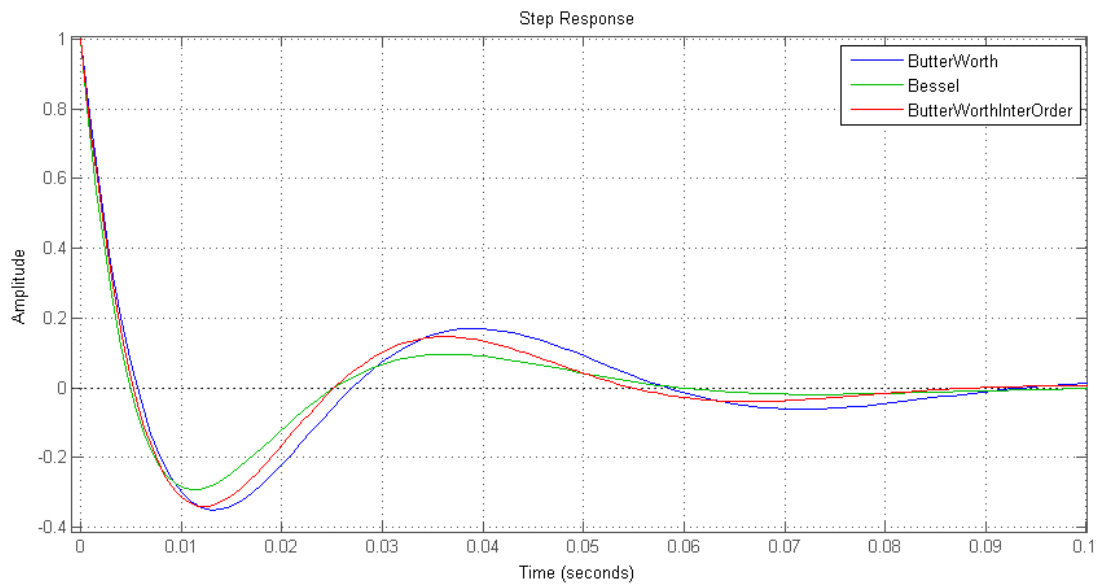
Τα μοντέλα μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες, στα διακριτά, με την έννοια ότι υφίστανται για μια τιμή  $Q_{TS}$ , και στα μη διακριτά.<sup>[29]</sup> Τα τελευταία μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές τιμές για το συντελεστή ποιότητας του μεγαφώνου και έτσι είναι αυτά που συναντώνται συνήθως στην πράξη.

Όσον αφορά τα διακριτά μοντέλα αυτά είναι τρία. Έχουμε το μοντέλο Butterworth στο οποίο στόχος είναι να γίνει το εύρος συχνοτήτων όσο το δυνατόν πιο επίπεδο γίνεται.<sup>[29]</sup> Από την άλλη στο μοντέλο Bessel η κρουστική απόκριση είναι η καλύτερη μεταξύ των τριών αυτών διακριτών μοντέλων και τέλος το μοντέλο Butterworth Inter-Order είναι μια ενδιάμεση λύση.<sup>[29]</sup> Στον ακόλουθο πίνακα βλέπουμε πως μπορούμε να πετύχουμε ένα από αυτά.

| <b>Butterworth</b>             |          |        |          |             |
|--------------------------------|----------|--------|----------|-------------|
| $Q_L$                          | $Q_{ts}$ | H      | $\alpha$ | $f_3 / f_s$ |
| 3                              | 0,4386   | 1,0000 | 0,6543   | 1,0000      |
| 7                              | 0,4048   | 1,0000 | 1,0613   | 1,0000      |
| 15                             | 0,3937   | 1,0000 | 1,2444   | 1,0000      |
| <b>Bessel</b>                  |          |        |          |             |
| $Q_L$                          | $Q_{ts}$ | H      | $\alpha$ | $f_3 / f_s$ |
| 3                              | 0,3535   | 0,9696 | 1,4036   | 1,4911      |
| 7                              | 0,3312   | 0,9735 | 1,9076   | 1,4941      |
| 15                             | 0,3230   | 0,9749 | 2,1296   | 1,4951      |
| <b>Butterworth Inter-Order</b> |          |        |          |             |
| $Q_L$                          | $Q_{ts}$ | H      | $\alpha$ | $f_3 / f_s$ |
| 3                              | 0,3835   | 1,1397 | 1,1722   | 1,2432      |
| 7                              | 0,3572   | 1,1184 | 1,6802   | 1,2315      |
| 15                             | 0,3477   | 1,1117 | 1,9030   | 1,2278      |

Παρακάτω ακολουθεί και εικόνα με την κρουστική απόκριση των τριών αυτών μοντέλων καθώς επίσης και άλλη μια με την απόκριση συχνοτήτων.





Αυτές οι γραφικές παραστάσεις προέκυψαν για  $Ql = 7$  και με το  $Qts$  να είναι με βάση τον παραπάνω πίνακα.<sup>[29]</sup> Με βάση αυτόν είναι και τα  $H, \alpha$ . Ενώ τέλος ως  $f_c$  έχει επιλεγεί η συχνότητα των  $100\text{rad/s}$ .

Αντίστοιχα τώρα υπάρχουν και άλλα μοντέλα με τα οποία θα κάνουμε συγκριτικές δοκιμές. Αυτή τη φορά θα επιλέξουμε εκτός από το  $Ql$  και το  $Qts$  σταθερό θεωρώντας έτσι ότι έχουμε ίδιο μεγάφωνο και αναζητούμε την βέλτιστη καμπύλη. Τα μοντέλα που διέπουν αυτή την κατηγορία, και με αυτά θα ασχοληθούμε, είναι τα Super Forth-Order Boom Box ή SBB4 και το Third-Order Quasi-Butterworth ή QB3.<sup>[29]</sup> Παρακάτω δίνονται οι πίνακες για  $Ql = 7$  και  $Ql = 15$ .

### SBB4

| <b><math>Q_L = 7</math></b> |          |                            |                               |                |
|-----------------------------|----------|----------------------------|-------------------------------|----------------|
| <b><math>Q_{ts}</math></b>  | <b>H</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>f_3 / f_s</math></b> | <b>Peak-db</b> |
| 0,2000                      | 1,0000   | 5,8980                     | 3,3686                        | 0              |
| 0,2100                      | 1,0000   | 5,3339                     | 3,1518                        | 0              |
| 0,2200                      | 1,0000   | 4,8457                     | 2,9521                        | 0              |
| 0,2300                      | 1,0000   | 4,4204                     | 2,7674                        | 0              |
| 0,2400                      | 1,0000   | 4,0478                     | 2,5960                        | 0              |
| 0,2500                      | 1,0000   | 3,7114                     | 2,4366                        | 0              |
| 0,2600                      | 1,0000   | 3,4286                     | 2,2883                        | 0              |
| 0,2700                      | 1,0000   | 3,1699                     | 2,1503                        | 0              |
| 0,2800                      | 1,0000   | 2,9388                     | 2,0220                        | 0              |
| 0,2900                      | 1,0000   | 2,7315                     | 1,9031                        | 0              |
| 0,3000                      | 1,0000   | 2,5448                     | 1,7932                        | 0              |
| 0,3100                      | 1,0000   | 2,3761                     | 1,6922                        | 0              |
| 0,3200                      | 1,0000   | 2,2233                     | 1,6000                        | 0              |
| 0,3300                      | 1,0000   | 2,0843                     | 1,5162                        | 0              |
| 0,3400                      | 1,0000   | 1,9576                     | 1,4406                        | 0              |
| 0,3500                      | 1,0000   | 1,8419                     | 1,3728                        | 0              |
| 0,3600                      | 1,0000   | 1,7357                     | 1,3122                        | 0              |
| 0,3700                      | 1,0000   | 1,6392                     | 1,2583                        | 0              |

| <b><math>Q_L = 15</math></b> |          |                            |                               |                |
|------------------------------|----------|----------------------------|-------------------------------|----------------|
| <b><math>Q_{ts}</math></b>   | <b>H</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>f_3 / f_s</math></b> | <b>Peak-db</b> |
| 0,2000                       | 1,0000   | 6,0844                     | 3,2996                        | 0              |
| 0,2100                       | 1,0000   | 5,5113                     | 3,0818                        | 0              |
| 0,2200                       | 1,0000   | 5,0149                     | 2,8811                        | 0              |
| 0,2300                       | 1,0000   | 4,5821                     | 2,6955                        | 0              |
| 0,2400                       | 1,0000   | 4,2025                     | 2,5233                        | 0              |
| 0,2500                       | 1,0000   | 3,8678                     | 2,3633                        | 0              |
| 0,2600                       | 1,0000   | 3,5711                     | 2,2146                        | 0              |
| 0,2700                       | 1,0000   | 3,3070                     | 2,0764                        | 0              |
| 0,2800                       | 1,0000   | 3,0708                     | 1,9483                        | 0              |
| 0,2900                       | 1,0000   | 2,8588                     | 1,8301                        | 0              |
| 0,3000                       | 1,0000   | 2,6678                     | 1,7214                        | 0              |
| 0,3100                       | 1,0000   | 2,4650                     | 1,6222                        | 0              |
| 0,3200                       | 1,0000   | 2,3384                     | 1,5323                        | 0              |
| 0,3300                       | 1,0000   | 2,1958                     | 1,4514                        | 0              |
| 0,3400                       | 1,0000   | 2,0357                     | 1,3790                        | 0              |
| 0,3500                       | 1,0000   | 1,9467                     | 1,3146                        | 0              |
| 0,3600                       | 1,0000   | 1,8375                     | 1,2576                        | 0              |

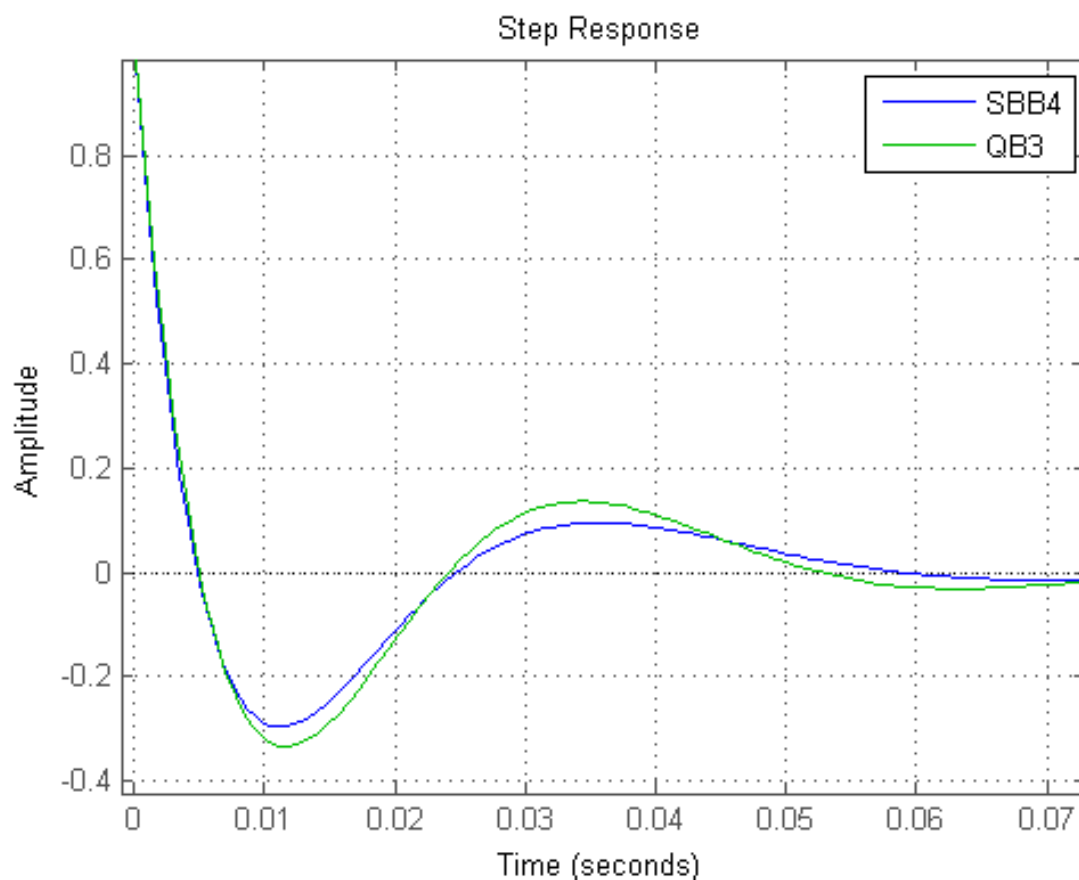
### QB3

| $Q_L = 7$ |        |          |             |         |
|-----------|--------|----------|-------------|---------|
| $Q_{ts}$  | H      | $\alpha$ | $f_3 / f_s$ | Peak-db |
| 0,1000    | 3,8416 | 34,3925  | 5,2233      | 0       |
| 0,1100    | 3,4947 | 28,2341  | 4,7386      | 0       |
| 0,1200    | 3,2058 | 23,5499  | 4,3337      | 0       |
| 0,1300    | 2,9615 | 19,9046  | 3,9902      | 0       |
| 0,1400    | 2,7525 | 17,0150  | 3,6949      | 0       |
| 0,1500    | 2,5712 | 14,6784  | 3,4381      | 0       |
| 0,1600    | 2,4129 | 12,7685  | 3,2126      | 0       |
| 0,1700    | 2,2743 | 11,1855  | 3,0128      | 0       |
| 0,1800    | 2,1495 | 9,8589   | 2,8345      | 0       |
| 0,1900    | 2,0388 | 8,7361   | 2,6741      | 0       |
| 0,2000    | 1,9393 | 7,7775   | 2,5289      | 0       |
| 0,2100    | 1,8494 | 6,9524   | 2,3968      | 0       |
| 0,2200    | 1,7678 | 6,2372   | 2,2759      | 0       |
| 0,2300    | 1,6935 | 5,6132   | 2,1647      | 0       |
| 0,2400    | 1,6254 | 5,0655   | 2,0620      | 0       |
| 0,2500    | 1,5629 | 4,5822   | 1,9667      | 0       |
| 0,2600    | 1,5054 | 4,1535   | 1,8778      | 0       |
| 0,2700    | 1,4522 | 3,7714   | 1,7946      | 0       |
| 0,2800    | 1,4029 | 3,4295   | 1,7165      | 0       |
| 0,2900    | 1,3571 | 3,1223   | 1,6429      | 0       |
| 0,3000    | 1,3145 | 2,8421   | 1,5732      | 0       |
| 0,3100    | 1,2748 | 2,5944   | 1,5070      | 0       |
| 0,3200    | 1,2376 | 2,3667   | 1,4439      | 0       |
| 0,3300    | 1,2028 | 2,1594   | 1,3836      | 0       |
| 0,3400    | 1,1702 | 1,9699   | 1,3258      | 0       |
| 0,3500    | 1,1395 | 1,7964   | 1,2702      | 0       |
| 0,3600    | 1,1106 | 1,6371   | 1,2167      | 0       |
| 0,3700    | 1,0834 | 1,4905   | 1,1651      | 0       |
| 0,3800    | 1,0578 | 1,3552   | 1,1153      | 0       |
| 0,3900    | 1,0335 | 1,2300   | 1,0674      | 0       |
| 0,4000    | 1,0106 | 1,1141   | 1,0214      | 0       |
| 0,4100    | 0,9889 | 1,0065   | 0,9776      | 0       |

| <b>Q<sub>L</sub> = 15</b> |          |          |                                      |                |
|---------------------------|----------|----------|--------------------------------------|----------------|
| <b>Q<sub>ts</sub></b>     | <b>H</b> | <b>α</b> | <b>f<sub>3</sub> / f<sub>s</sub></b> | <b>Peak-db</b> |
| 0,1000                    | 3,6841   | 35,4793  | 5,0715                               | 0              |
| 0,1100                    | 3,3494   | 29,1286  | 4,6004                               | 0              |
| 0,1200                    | 3,0732   | 24,2984  | 4,2069                               | 0              |
| 0,1300                    | 2,8398   | 20,5392  | 3,8730                               | 0              |
| 0,1400                    | 2,6400   | 17,5563  | 3,5859                               | 0              |
| 0,1500                    | 2,4570   | 15,1498  | 3,3362                               | 0              |
| 0,1600                    | 2,3158   | 13,1802  | 3,1169                               | 0              |
| 0,1700                    | 2,1826   | 11,5478  | 2,9225                               | 0              |
| 0,1800                    | 2,0644   | 10,1797  | 2,7488                               | 0              |
| 0,1900                    | 1,9589   | 9,0218   | 2,5926                               | 0              |
| 0,2000                    | 1,8640   | 8,0331   | 2,4512                               | 0              |
| 0,2100                    | 1,7784   | 7,1822   | 2,3225                               | 0              |
| 0,2200                    | 1,7007   | 6,4446   | 2,2045                               | 0              |
| 0,2300                    | 1,6299   | 5,8010   | 2,0960                               | 0              |
| 0,2400                    | 1,5652   | 5,2361   | 1,9956                               | 0              |
| 0,2500                    | 1,5058   | 4,7375   | 1,9023                               | 0              |
| 0,2600                    | 1,4512   | 4,2952   | 1,8153                               | 0              |
| 0,2700                    | 1,4007   | 3,9011   | 1,7338                               | 0              |
| 0,2800                    | 1,3540   | 3,5484   | 1,6471                               | 0              |
| 0,2900                    | 1,3106   | 3,2314   | 1,5846                               | 0              |
| 0,3000                    | 1,2703   | 2,9455   | 1,5159                               | 0              |
| 0,3100                    | 1,2327   | 2,6867   | 1,4504                               | 0              |
| 0,3200                    | 1,1976   | 2,4517   | 1,3880                               | 0              |
| 0,3300                    | 1,1648   | 2,2376   | 1,3281                               | 0              |
| 0,3400                    | 1,1341   | 2,0420   | 1,2705                               | 0              |
| 0,3500                    | 1,1052   | 1,8629   | 1,1251                               | 0              |
| 0,3600                    | 1,0781   | 1,6983   | 1,1615                               | 0              |
| 0,3700                    | 1,0526   | 1,5468   | 1,1099                               | 0              |
| 0,3800                    | 1,0286   | 1,4070   | 1,0602                               | 0              |
| 0,3900                    | 1,0059   | 1,2777   | 1,0125                               | 0              |
| 0,4000                    | 0,9845   | 1,1579   | 0,9672                               | 0              |

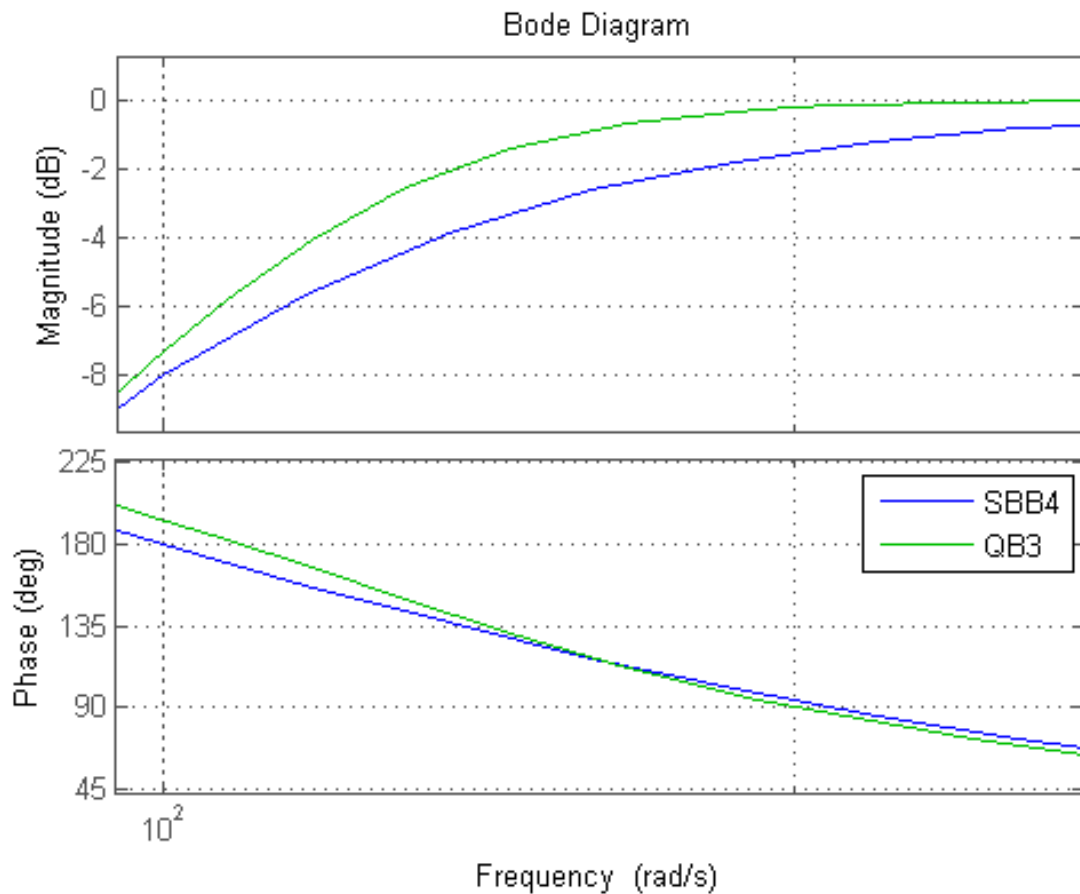
Το μοντέλο  $QB3$  χρησιμοποιείται κατά συντριπτική πλειοψηφία. Όπως βλέπουμε και από τους πίνακες μπορεί να γίνει προσέγγιση με πάρα πολλά  $Qts$ , άρα κατά προέκταση και με πολλά μεγάφωνα. Πέραν αυτού οι υψηλότερες τιμές του  $a$  θέλουν μικρότερη καμπίνα αν μιλάμε για το ίδιο μεγάφωνο, δηλαδή για τον ίδιο ισοδύναμο όγκο.

Από τις παρακάτω εικόνες που έχουμε προσομοίωση με ίδια  $Ql = 7$  και  $Qts = 0.37$  βλέπουμε πως στην κρουστική απόκριση το καλύτερο μοντέλο είναι το  $SBB4$  με το  $QB3$  να ακολουθεί από πολύ κοντά.



Στο επόμενο γράφημα που μας απεικονίζει το διάγραμμα bode θα δούμε μια πιο ξεκάθαρη υπεροχή του  $QB3$ . Και εδώ οι συχνότητες των δύο συστημάτων είναι ίσες με  $100rad/s$ .

Πέρα από τις τιμές που έχει ο πίνακας για το  $QB3$  υπάρχουν και άλλες παραλλαγές. Ο λόγος που καλείται Quasi(=ψευδό) Butterworth έχει να κάνει με το ότι αν μηδενίσουμε ένα παράγοντα  $B$  στη συνάρτηση μεταφοράς του  $QB3$  τότε καταλήγουμε σε εκείνη του Butterworth. Πριν δούμε όμως τις δύο συναρτήσεις ας δούμε το εύρος συχνοτήτων των δύο συστημάτων  $SBB4$  και  $QB3$ .



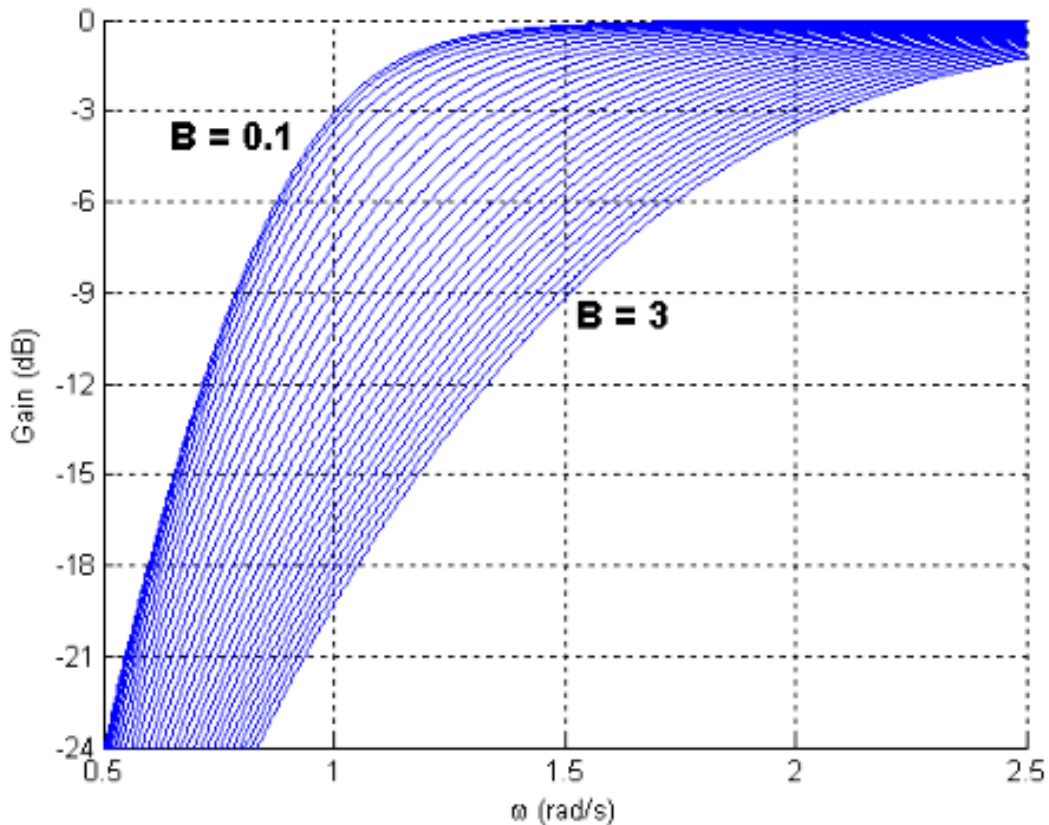
Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Butterworth προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το εύρος συχνοτήτων έχει όσους περισσότερους μηδενισμούς γίνεται στους πόλους της. Δηλαδή είναι της μορφής

$$H_B(s) = \frac{s^4}{\frac{s^4}{\omega^4} + 1}$$

Στην *QB3* έχουμε ένα ακόμα πόλο πολλαπλασιασμένο με έναν παράγοντα  $B$ .<sup>[28]</sup> Έτσι ανάλογα την τιμή του  $B$  η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να αποκόπτει ακόμα και με κλίση τρίτης τάξης. Πρακτικά το  $B$  παίρνει τιμές από 0.1 έως και 3.<sup>[28]</sup> Η συνάρτηση μεταφοράς λοιπόν του *QB3* είναι της ακόλουθης μορφής.

$$H_{QB3}(s) = \frac{\frac{s^4}{\omega^4}}{\frac{s^4}{\omega^4} + B \frac{s}{\omega} + 1}$$

Η εξίσωση που διέπει τον παράγοντα  $B$  είναι:  $B^2 = \alpha_1^2 - 2\alpha_2$   
 Αναλόγως το  $B$  βλέπουμε παρακάτω πως αλλάζει η εικόνα του φίλτρου.<sup>[28]</sup>

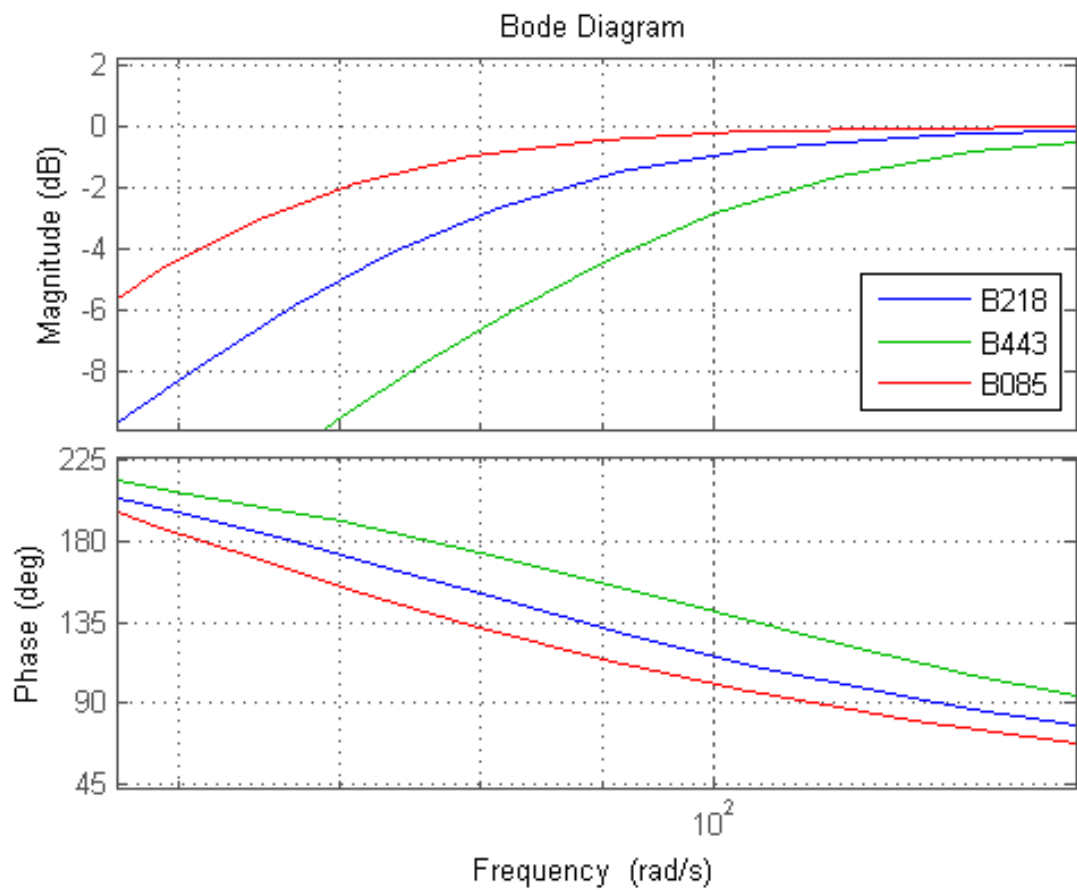
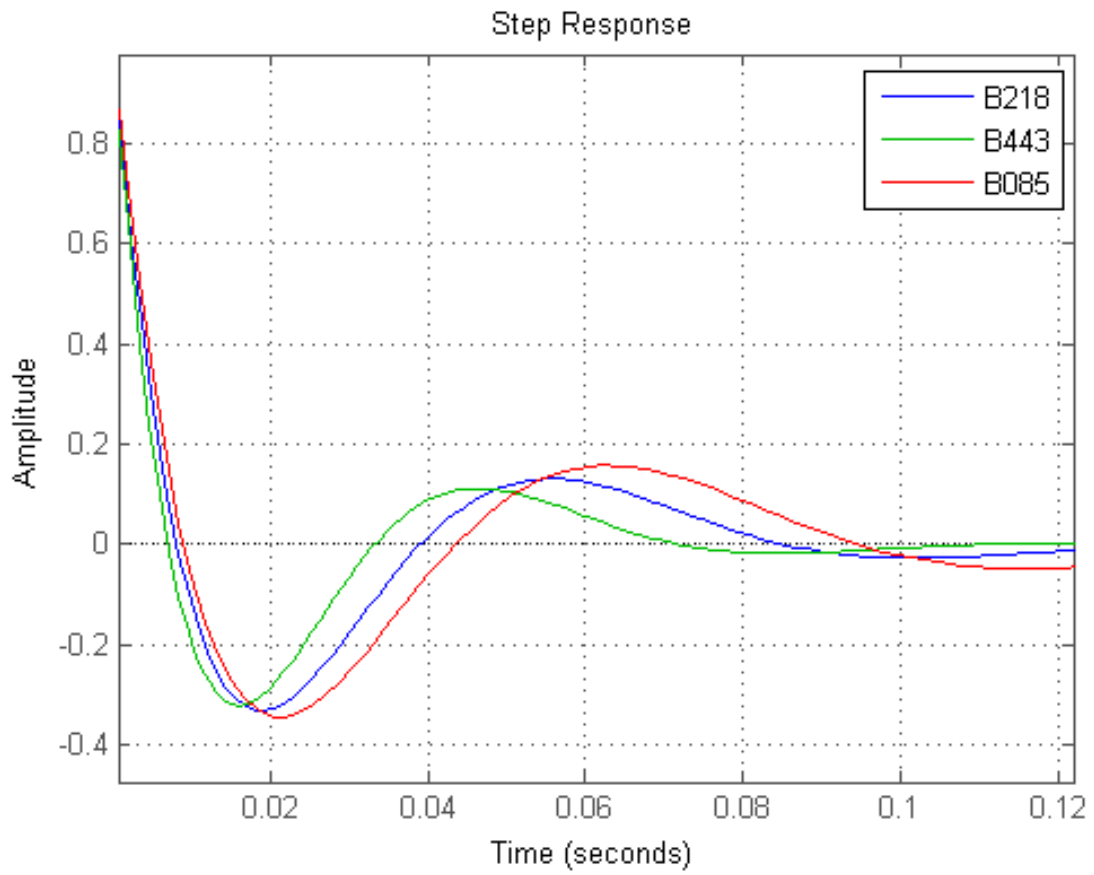


Για να εφαρμόσει κάποιος το  $QB3$  χρειάζεται λίγες ακόμα σχέσεις.

$$\alpha_2^2 + 2 = 2\alpha_1\alpha_3 \quad \alpha_3 = \sqrt{2\alpha_2} \quad \alpha_2 > 2 + \sqrt{2}$$

Από τα έτοιμα μοντέλα λοιπόν είναι μάλλον σαφές γιατί επιλέγεται κατά κόρον το μοντέλο  $QB3$ . Συνδυάζει αρκετή ευελιξία, αφού δουλεύει με πλήθος μεγαφώνων και σαν φίλτρο μπορεί να μας δώσει την παραμετροποίηση που θέλουμε στην καμπύλη απόκρισης. Παράλληλα απαιτεί μικρότερες καμπίνες από τα άλλα μοντέλα κάτι το οποίο θυμίζουμε πως ήταν ο, κύριος ίσως, λόγος που η βιομηχανία ηχείων πέρασε στις καμπίνες bass reflex.

Πριν κλείσουμε με τα έτοιμα μοντέλα προσέγγισης θα δείξουμε και μια εικόνα από την προσομοίωση τριών quasi Butterworth. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα παρακάτω έχουμε επιλέξει  $B = 2.18$   $B = 4.43$   $B = 0.85$ . Όπως και πριν προηγείται η εικόνα με την κρουστική απόκριση και ακολουθεί εκείνη με την απόκριση συχνοτήτων και το διάγραμμα φάσης. Ακόμα και στο ίδιο μοντέλο βλέπουμε ότι όταν βελτιώνουμε την κρουστική απόκριση χάνουμε σε εύρος συχνοτήτων και αντίστροφα. Από εκεί και πέρα είναι καθαρά υποκειμενικό τι εύρος και τι απόκριση θα δώσει ο κάθε ένας στην σχεδίαση του.





### 3.3.4 Προσομοίωση του συστήματος καμπίνα-μεγάφωνο με υπολογιστή

Στο προηγούμενο μέρος του κεφαλαίου είδαμε ότι υπάρχουν κάποια έτοιμα μοντέλα και μέσα από τους πίνακες που τα περιγράφουν μπορεί κανείς να διαλέξει το ιδανικό για αυτόν μοντέλο. Για την ακρίβεια μπορεί να διαλέξει το σχεδόν ιδανικό αλλά γλιτώνει από την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στην σημερινή εποχή όμως, οι υπολογιστές αφενός δεν είναι πια τόσο ακριβοί και αφετέρου θα βοηθήσουν και σε άλλους τομείς, από τη σχεδίαση ενός ηχείου μέχρι οτιδήποτε. Υπό το πρίσμα του ότι θα εργαστούμε με υπολογιστή λοιπόν μπορούμε να παρουσιάσουμε κάποιο κώδικα με τον οποίο θα έχουμε απευθείας πρόσβαση στους όρους που επηρεάζουν τη συνάρτηση μεταφοράς. Έτσι ανάλογα τις ανάγκες μας και το μέγεθος της καμπίνας, καθώς επίσης και το μεγάφωνο που διαθέτουμε θα καταλήγουμε στην βέλτιστη λύση κάθε φορά.

Το λειτουργικό με το οποίο θα γίνει η ανάλυση είναι το `mat lab`. Ορίζουμε τους όρους της συνάρτησης λοιπόν και πειραματιζόμαστε με την απόκριση συχνοτήτων και την κρουστική απόκριση. Σε δεύτερη φάση μπορούμε να συσχετίσουμε του όρους με τα δεδομένα της κατασκευής όπως η ιδιοσυχνότητα της καμπίνας και του μεγαφώνου, οι συντελεστές ποιότητας και οι λόγοι των δύο όγκων, του φαινομενικού και του πραγματικού.

Από εκεί και πέρα εφόσον έχουμε πλέον τους όρους μπορούμε να φτιάξουμε την συνάρτηση μεταφοράς εύκολα και γρήγορα. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να δανειστούμε τον κώδικα καλώντας απλά την συνάρτηση με την εντολή `tf`. Η `tf` είναι της ακόλουθης μορφής

$$tf(\text{αριθμητής}, \text{παρανομαστής})$$

Ο αριθμητής και ο παρανομαστής γράφονται με τη μορφή διανυσμάτων. Κάθε συνιστώσα του διανύσματος αντιπροσωπεύει τον παράγοντα της εκάστοτε δύναμης της μεταβλητής  $s$ . Ακολουθεί ένα παράδειγμα για την κατανόηση του πράγματος.

$$H = tf([1 \ 0 \ 1], [0 \ 1 \ 0]) \quad ==> \quad H = \frac{s^2 + 1}{s}$$

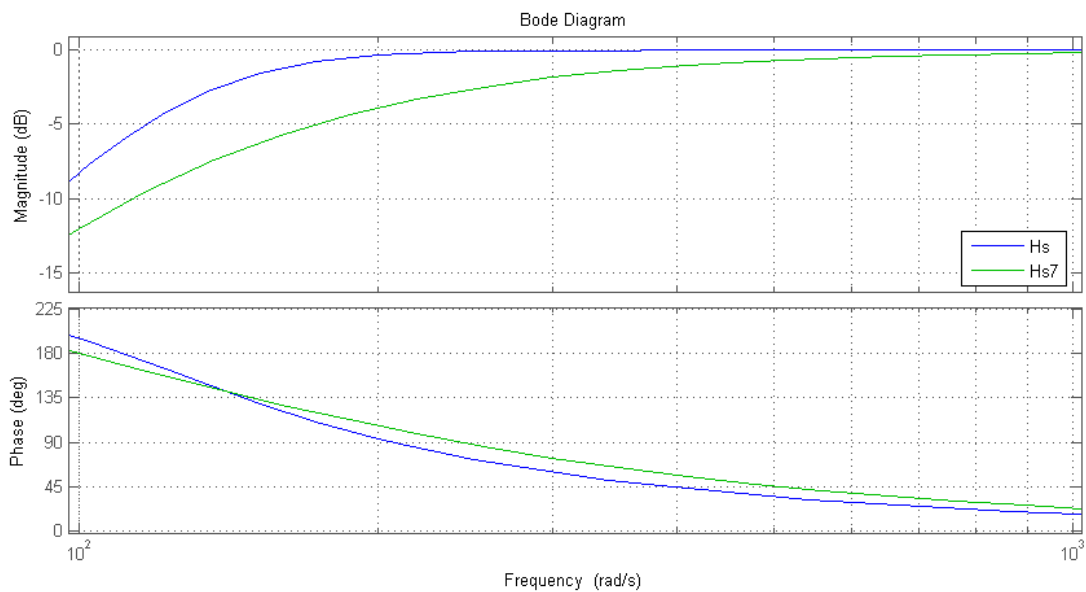
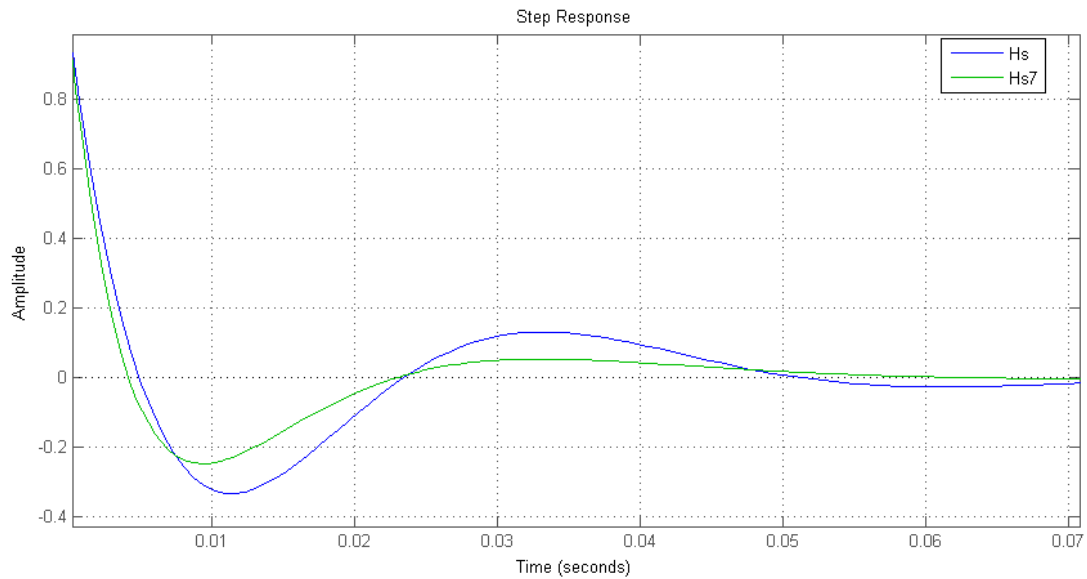
Μετά έχουμε τις έτοιμες συναρτήσεις που τις καλούμε και μας δίνουν την κρουστική απόκριση και το διάγραμμα bode. Αυτές καλούνται ως `step` και `bode` αντίστοιχα. Για κάποιες ακόμα μικροεντολές θα πούμε στα σχόλια τι ακριβώς κάνουν. Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε την βασική εκδοχή του κώδικα.

```

close all
    %Κλείνει όλες τις προηγούμενες εργασίες από άλλα
    προγράμματα
clear all
    %Καθαρίζει τις μνήμες και τις παραμέτρους από
    προηγούμενες εκτελέσεις
w=100;
    %Κυκλική συχνότητα εκφράζεται σε rad/s
a1=3.708; a2=4.5; a3=3;
    %Οι τρεις παράμετροι που απαρτίζουν την συνάρτηση
    μεταφοράς
a17=4; a27=6; a37=4;
    %Άλλες τρεις παράμετροι που φτιάχνουν μια
    διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς
Hs=tf([1 0 0 0 0],[1 a3.*w a2.*w.^2 a1.*w.^3 1.*w.^4]);
    %Υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς
Hs7=tf([1 0 0 0 0],[1 a37.*w a27.*w.^2 a17.*w.^3
1.*w.^4]);
    %Υλοποίηση μιας δεύτερης συνάρτησης μεταφοράς ώστε
    να κάνουμε συγκρίσεις
figure('name','Step','numbertitle','off');
    %Δημιουργεί ένα νέο παράθυρο με τις προεπιλεγμένες
    τιμές ιδιοτήτων και με όνομα όπως αυτό της
    παρένθεσης
hold on
    %Κρατάει το παράθυρο ανοιχτό και όλα τα γραφήματα
    ενσωματώνονται σε αυτό
step(Hs,Hs7);
    %Δημιουργεί τις κρουστικές αποκρίσεις όσων
    συναρτήσεων είναι στην παρένθεση και τις απεικονίζει
    στο παράθυρο
hold off
    %Κλείνει το παράθυρο ή καλύτερα δεν το κρατάει
    ανοιχτό. Το όποιο νέο γράφημα θα παρουσιαστεί στο
    δικό του νέο παράθυρο
grid on;
    %Εμφανίζει το παράθυρο με πλέγμα
figure('name','Bode','numbertitle','off');
    %Ίδια λειτουργία με πριν
hold on
    %Ίδια λειτουργία με πριν
bode(Hs,Hs7);
    %Δημιουργεί σε διαγράμματα Bode το εύρος συχνοτήτων
    και τις φάσεις των συναρτήσεων μεταφοράς που είναι
    μέσα στην παρένθεση. Επίσης τις απεικονίζει στο
    παράθυρο
grid on
    %Ίδια λειτουργία με πριν

```

Έτσι μπορούμε να έχουμε εικόνες σαν τις παρακάτω και να κάνουμε άμεσες συγκρίσεις.



Σε αυτό το σημείο αρκεί να θυμηθούμε τις εξισώσεις που διέπουν τα  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Άμα θέλουμε τις γράφουμε και μέσα στον κώδικα.

$$\alpha_1 = \frac{1}{Q_L \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_{TS}} \quad \alpha_2 = \frac{\alpha + 1}{h} + h + \frac{1}{Q_L Q_{TS}} \quad \alpha_3 = \frac{1}{Q_{TS} \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_L}$$

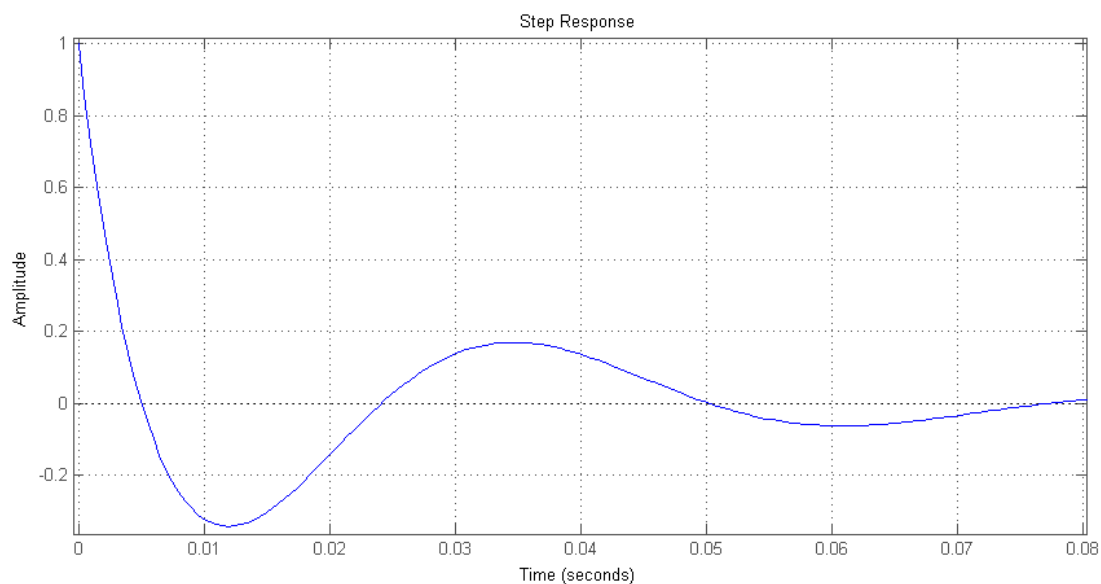
Δεδομένου ότι το  $Ql$  είναι αρκετά πιο μεγάλο από το  $Qts$  μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε ότι τα μεγέθη  $\alpha_1, \alpha_3$  εξαρτώνται κυρίως από το τελευταίο. Και μάλιστα επειδή τα μεγάφωνα έχουν τιμές κοντά στο  $Qts = 0.33$  προκύπτουν τιμές ίσες με 3. Αυτές οι τιμές ισχύουν με  $h = 1$ .

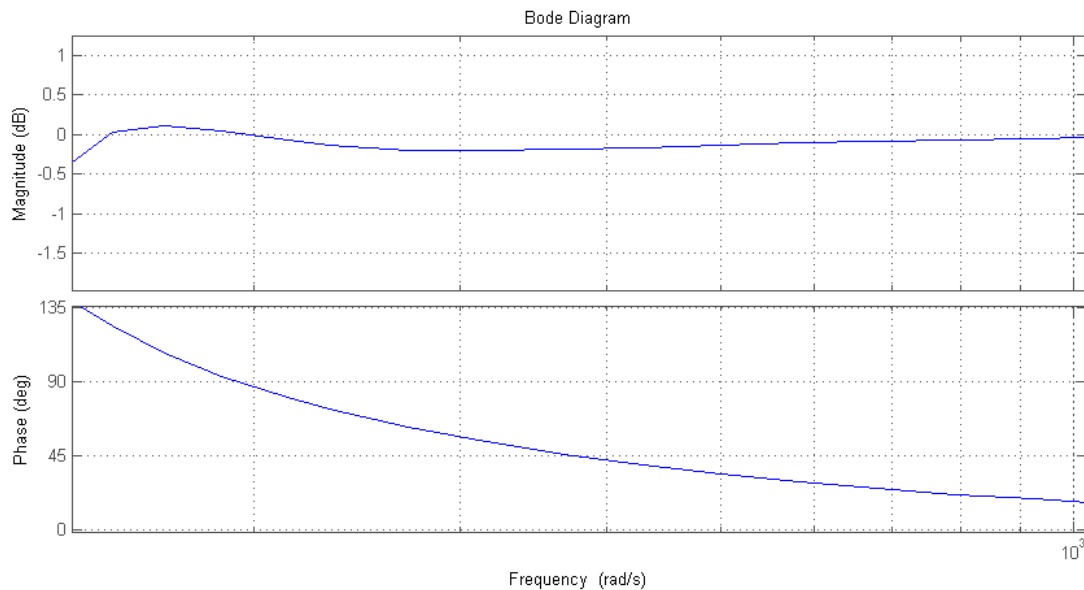
Για το  $\alpha_2$  εκτός όλων των παραπάνω παίζει ρόλο και ο λόγος των όγκων  $\alpha$ . Στην πράξη αυτός μπορεί να είναι ίσος με 1 ή μεγαλύτερος, αφού οι καμπίνες είναι σχεδόν πάντα μικρότερες ή ίσες του φαινομενικού όγκου των μεγαφώνων. Έτσι ο συντελεστής  $\alpha_2$  είναι πρακτικά μεγαλύτερος ή ίσος του 3,5. Πρακτικά επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα με  $\alpha_2 = 4$ , αν οι άλλοι δύο παράγοντες είναι ίσοι με 3.

Τα βέλτιστα αποτελέσματα πάντως, μεταξύ καλής απόκρισης και εύρους, έρχονται με  $h > 1$ . Τιμές από 1.2-1.5 δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα. Η κατάλληλη τιμή διαφέρει ανά περίπτωση. Με δεδομένες αυτές τις τιμές λοιπόν για το  $h$  και χωρίς να αλλάξουμε τα παραπάνω μεγέθη καταλήγουμε στις ακόλουθες τιμές για τους πολλαπλασιαστικούς παράγοντες

$$\alpha_1 \approx 4 \quad \alpha_2 \approx 4 \quad \alpha_3 \approx 3$$

Πράγματι οι εν λόγω τιμές δίνουν πραγματικά επίπεδη απόκριση συχνοτήτων και αρκετά καλή κρουστική απόκριση όπως βλέπουμε παρακάτω





Η μορφή της κρουστικής απόκρισης μπορεί να μην φαίνεται τόσο καλή, αλλά πρακτικά οι ήχοι μετά την παύση του μουσικού σήματος είναι κάτω από τα -10Db και έτσι είναι δύσκολα αντιληπτοί.

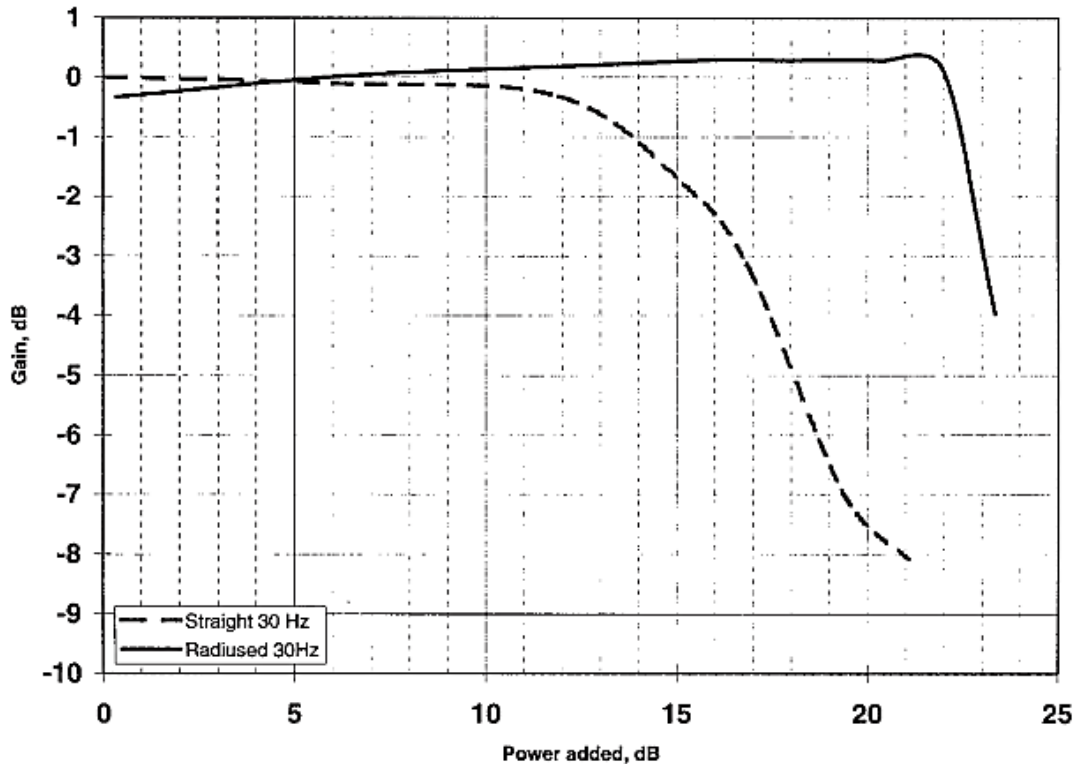
Σε αυτό το κεφάλαιο βέβαια είδαμε πως μπορεί να γίνει η προσομοίωση μέσω του υπολογιστή. Συνεπώς όποιος δουλεύει με αυτά τα εργαλεία μπορεί σχετικά εύκολα να κάνει όποια προσομοίωση επιθυμεί. Δηλαδή μπορούμε με κάποια σχετική σιγουριά να πούμε πως δεν υπάρχει το τέλει και το ζήτημα καμπίνα μεγάφωνο είναι εν μέρει υποκειμενικό.

### 3.3.5 Μεγιστοποίηση της απόδοσης από τις οπές ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων

Με εξαίρεση την παράγραφο του Helmholtz που είπαμε στην εισαγωγή δεν έχουμε ξανά αναφερθεί στην οπή εκτόνωσης των χαμηλών συχνοτήτων. Ήρθε η ώρα λοιπόν να αναφερθούμε και σε αυτή και να δούμε πως επηρεάζει το αποτέλεσμα μας.

Γενικά οι οπές έχουν τη μορφή κυλινδρικού σωλήνα. Θα καλούμε ευθείες οπές(straight) αυτές που η διατομή τους είναι παντού σταθερή. Αντίθετα οι οπές που έχουν καμπύλωση στο ένα ή στα δύο τους άκρα θα λέγονται κυρτές(curved).<sup>[30]</sup>

Πριν δώσουμε περισσότερες λεπτομέρειες για την σχεδίαση των κυρτών οπών θα παραθέσουμε μια εικόνα με σύγκριση των δύο οπών.<sup>[30]</sup> Όπως βλέπουμε και στο σχήμα με διακεκομμένο σημειώνεται η ευθεία οπή και με την γραμμή συμβολίζεται η κυρτή.



Βλέπουμε πως η ευθεία οπή μετά την προσθήκη 10dB αρχίζει να έχει απώλειες στο κέρδος ή αλλιώς να συμπιέζει το αναπαραγόμενο αποτέλεσμα. Σε αντίθεση η κυρτή παραμένει χωρίς συμπίεση ακόμα και στα 22dB. Εδώ μπορεί κάποιος να ισχυριστεί ότι το μειονέκτημα της κυρτής οπής είναι η απότομη συμπίεση. Αλλά και πάλι η ευθεία οπή έχει συμπίεση υπέρ του δεόντως, και συγκεκριμένα 10dB, με την προσθήκη των 20dB περίπου.

Όπως θα δούμε και παρακάτω οι δύο οπές, που στο παράδειγμα μας είναι και οι δύο συντονισμένες στα 30 Hz, χρειάζονται περίπου τον ίδιο χώρο. Όταν λέμε χώρο εννοούμε το μέγεθος που καταλαμβάνει η καθεμία από τα λίτρα της καμπίνας. Εφόσον λοιπόν μιλάμε για παραπλήσια μεγέθη βλέπουμε πως η κυρτή οπή υπερτερεί έναντι της ευθείας. Η υπεροχή της έγκειται στο γεγονός ότι συμπιέζει λιγότερο τον αέρα με αποτέλεσμα και το κέρδος να μην επηρεάζεται και την παραμόρφωση να μην αυξάνει.

Από το πρώτο κεφάλαιο είχαμε πει ότι η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τον παρακάτω τύπο. Τώρα παράλληλα με αυτόν θα δώσουμε και μια νέα έκφραση που θα μας χρησιμεύσει.

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_B L}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{V_B M_{AP}}}$$

Με  $M_{AP}$  σημειώνουμε την ακουστική μάζα της οπής. Η τελευταία μετράται σε  $kg/m^4$ . Με  $\rho$  συμβολίζουμε την πυκνότητα του αέρα που είναι ίση με  $1.2 kg/m^3$ .

Η νέα έκφραση για τη συχνότητα συντονισμού είναι πιο γενική. Έτσι ο νέος τύπος μας κάνει για κάθε πιθανό σχήμα οπής. Έστω λοιπόν ότι έχουμε οπή της οποίας το εμβαδό  $A$  σε μια τυχαία διατομή σε απόσταση  $x$  από το μέσο της οπής είναι τυχαίο και διαφορετικό από άλλες θέσεις της διατομής. Δηλαδή το εμβαδό εξαρτάται από το  $x$ , και είναι της μορφής  $A(x)$ .<sup>[30]</sup> Η εξίσωση λοιπόν που θα μας δώσει την  $M_{AP}$  είναι η παρακάτω

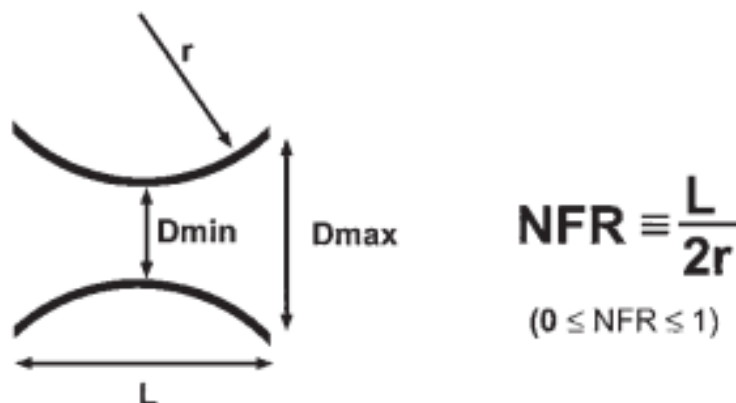
$$M_{AP} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\rho}{A(x)} dx + E_c$$

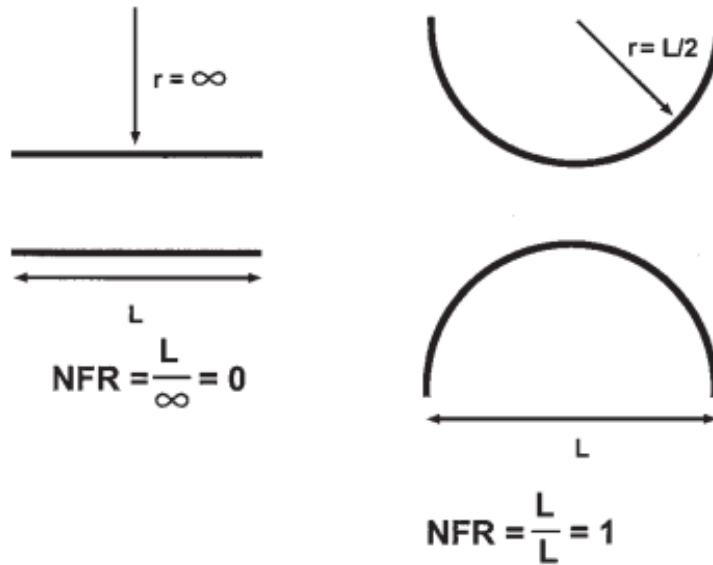
Δυστυχώς σε αυτή την εξίσωση έχουμε τον όρο  $E_c$  ο οποίος συμβολίζει τη διόρθωση στα άκρα της οπής. Και λέμε δυστυχώς γιατί η δυσκολία στις κυρτές οπές, κυρίως λόγω της μεγάλης ποικιλίας τους, είναι η μοντελοποίηση του όρου  $E_c$ . Έτσι λοιπόν πρέπει να κάνουμε μια ειδικευση και για αυτήν να αναπτύξουμε μια γενίκευση.<sup>[30]</sup>

Η γενίκευση μας είναι ότι τα τοιχώματα της οπής θα απαρτίζονται από το ίδιο τόξο κύκλου ακτίνας  $r$ . Παράλληλα η οπή θα έχει ένα δεδομένο μήκος  $L$ . Μπορούμε τώρα να εξάγουμε τον παρακάτω λόγο, τον οποίο και ονομάζουμε  $NFR$  (normalized flare rate).<sup>[30]</sup>

$$NFR = \frac{L}{2r}, \quad 0 < NFR < 1$$

Ο περιορισμός που μπαίνει στον λόγο είναι απλός και απεικονίζεται παρακάτω. Εφόσον συμφωνήσαμε στην αρχή να ειδικεύσουμε σε οπές που τα τοιχώματά τους να είναι τόξα κύκλου από τη γεωμετρία προκύπτει ο παραπάνω περιορισμός. Το μήκος της οπής είναι ίσο με τη χορδή των τόξων που σχηματίζουν την οπή. Από τους γεωμετρικούς κανόνες δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο της διαμέτρου του, ίδιου πάντα, κύκλου. Και ως γνωστόν η διάμετρος είναι ίση με  $2r$ . Έτσι ο λόγος προκύπτει ίσος με τη μονάδα. Από την άλλη για μια εντελώς ευθεία οπή, όπως μας δείχνει και το σχήμα παρακάτω, ο λόγος είναι μηδέν.





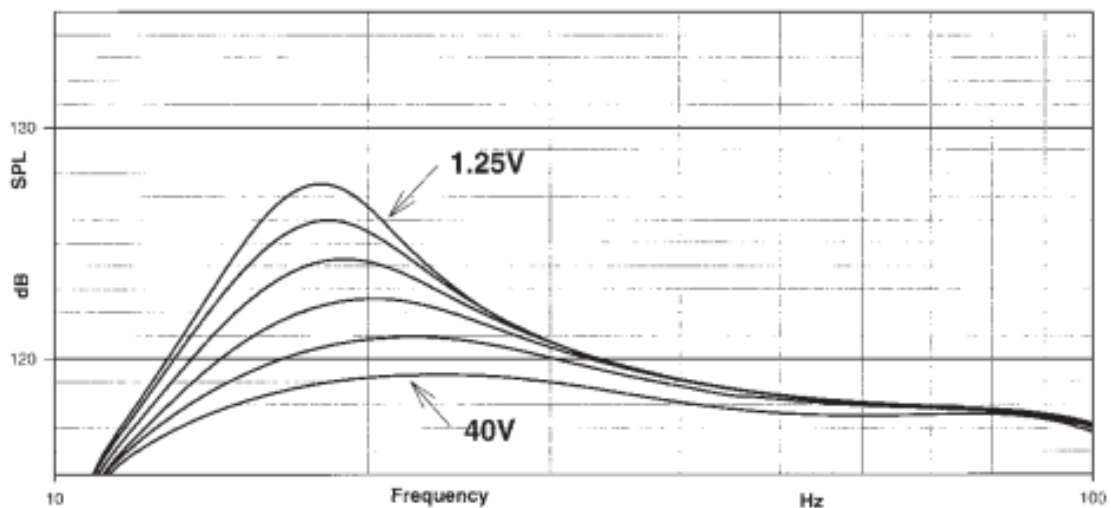
Για τις κυρτές σπές αυτού του τύπου λοιπόν μπορούμε να εξάγουμε τις παρακάτω εξισώσεις οι οποίες μας διευκολύνουν στους υπολογισμούς μας.

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_{eff}}{V_B L_{eff}}}$$

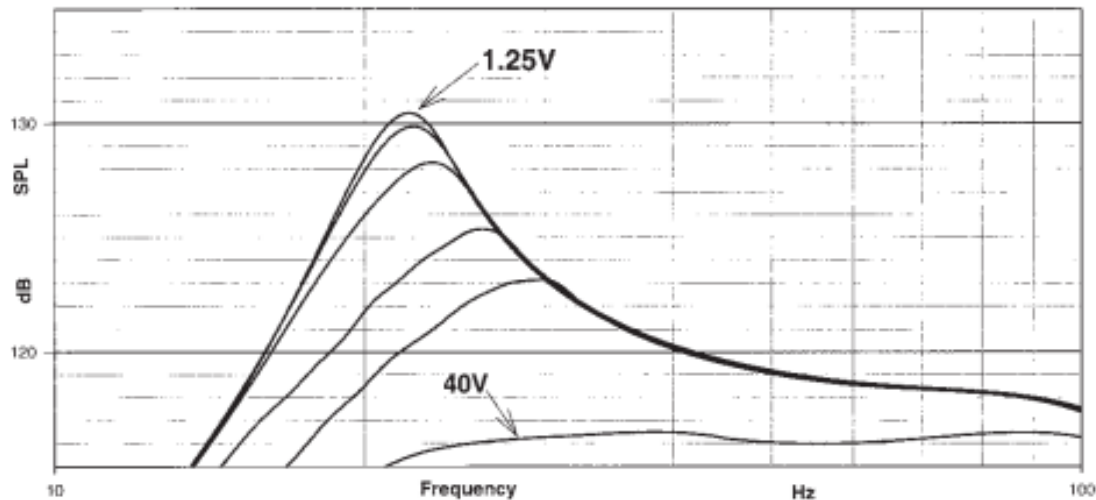
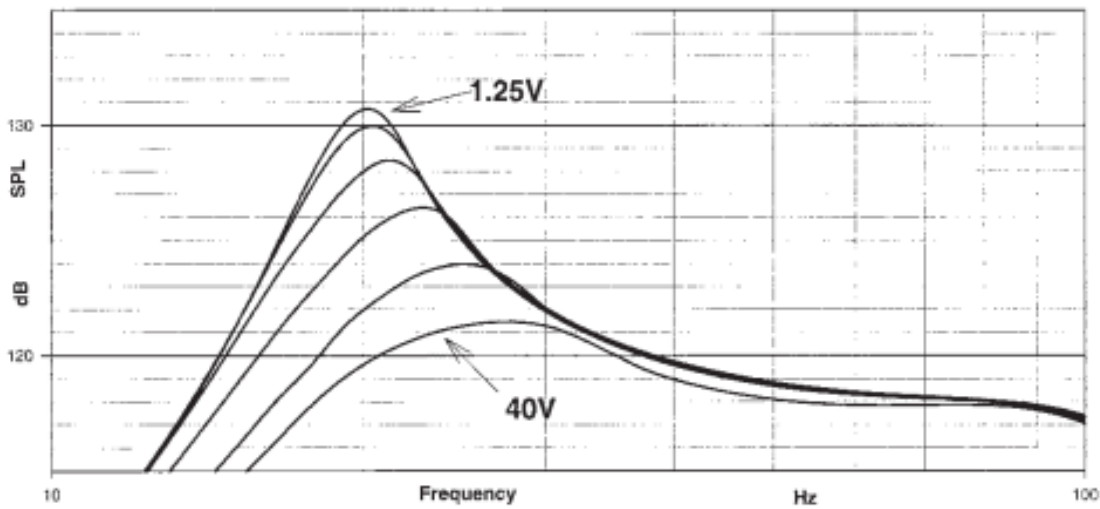
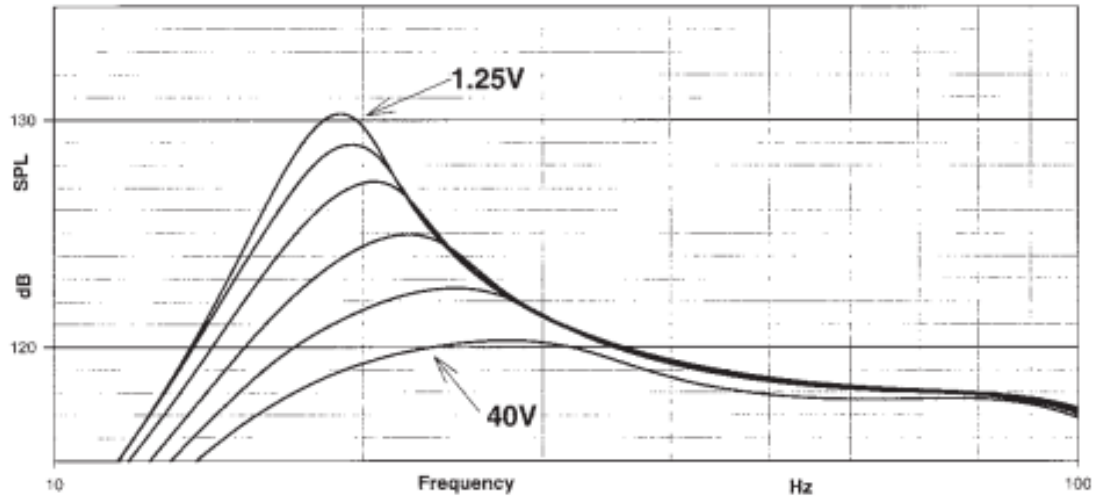
Όπου

$$A_{eff} = (1 + 0.576 NFR) A_{min} \quad L_{eff} = L + D_{min}$$

Τώρα λοιπόν το θέμα μας είναι πόσο καμπύλωση χρειαζόμαστε. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκε πείραμα με τα αποτελέσματα να απεικονίζονται παρακάτω. Πρώτα απεικονίζεται η ευθεία σπή και μετά ακολουθούν αυτές με λόγο  $NFR$  0.25, 0.5 και 1.







Όπως φαίνεται και στα σχήματα οι μετρήσεις ξεκίνησαν με τάσεις 1.25V και κάθε φορά γινόταν αύξηση κατά 6dB μέχρι που φτάσαμε στα 40V. Στα σχήματα οι καμπύλες είναι όλες με αφαίρεση του κέρδους που προέκυπτε από κάθε τάση ώστε να μπορούμε άμεσα να τις συγκρίνουμε στο πόσο συμπιέζουν.

Ξεκινώντας από το τελευταίο γράφημα για  $NFR = 1$  βλέπουμε πως είναι μεταξύ άλλων το χειρότερο έχοντας μάλιστα μεγάλες αποκλίσεις τόσο στην

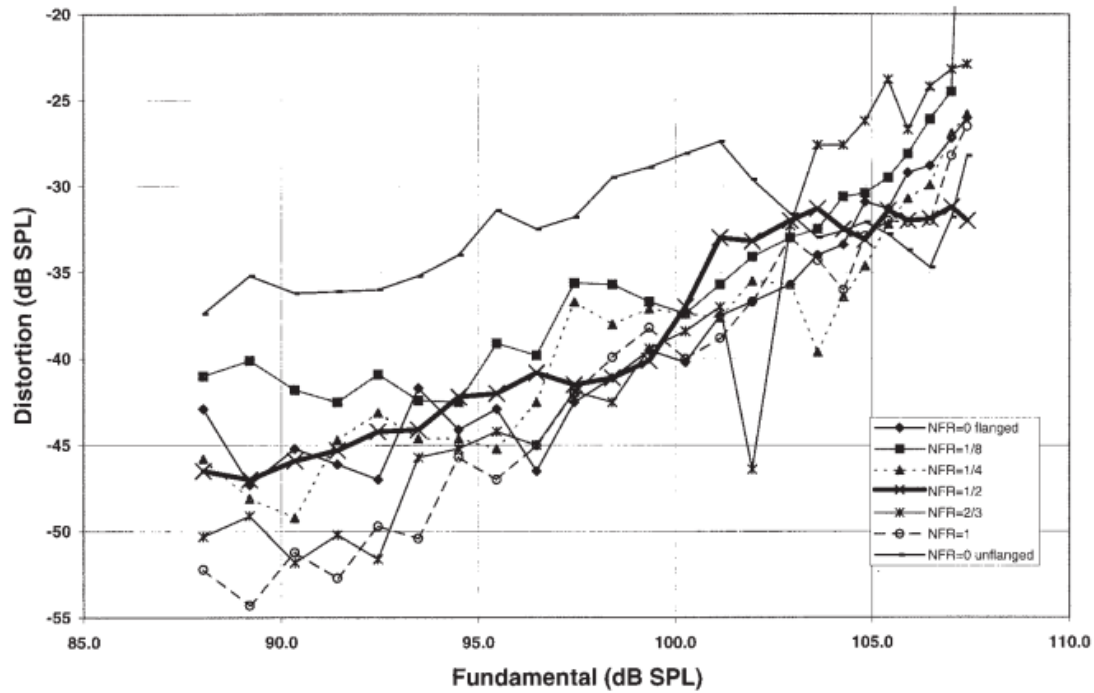
συμπύεση όσο και στην συχνότητα συντονισμού. Η πιο πιθανή αιτία γιατί συμβαίνει αυτό είναι ότι ο σωλήνας πρακτικά είναι ισοδύναμος με κάποιον άλλο μικρότερου μήκους καθώς η στάθμη ανεβαίνει.

Από εκεί και πέρα παρατηρούμε ότι οι κυρτές οπές και μάλιστα αυτές με το μεγαλύτερο *NFR* έχουν πιο υψηλή στάθμη στις χαμηλές τάσεις. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ποιότητας των οπών αυτών είναι μεγαλύτερος. Αυτό είναι λογικό γιατί οι απώλειες τους είναι μικρότερες. Θυμίζουμε πάντως εδώ ότι οι οπές με μεγαλύτερο *Q* έχουν και μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης. Αν σκεφτούμε ότι δεν θέλουμε και πολύ μεγάλο χρόνο αντήχησης τότε μάλλον καταλήγουμε με ένα υπέρ των ευθειών οπών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η ελάχιστη μεταβολή της συχνότητας συντονισμού. Το μειονέκτημα από την άλλη είναι οι απώλειες ειδικά στις χαμηλές τάσεις. Τελικώς μπορούμε να πούμε ότι η βέλτιστη λύση για τον σχεδιασμό μιας οπής είναι μεταξύ της μη μετατόπισης της ιδιοσυχνότητας και της μη εισαγωγής πάρα πολλών απωλειών. Οπές με *NFR* 0.25 και 0.5 δείχνουν να κυριαρχούνται από μια πολύ καλή ισορροπία.

Εκτός από την συμπύεση στο κέρδος και την μετατόπιση της ιδιοσυχνότητας οι οπές ανάλογα με τον σχεδιασμό τους έχουν και διαφορετική αρμονική παραμόρφωση. Η προηγούμενη έρευνα λοιπόν έκανε μετρήσεις όλων των διαφόρων οπών και στο ζήτημα της αρμονικής παραμόρφωσης. Όσον αφορά την παραμόρφωση αυτή οφείλουμε να πούμε ότι έχουμε δύο είδη αρμονικών, τις άρτιες και τις περιττές. Οι πρώτες είναι μεν παραμορφώσεις αλλά σύμφωνα με πολλούς είναι ευχάριστες ακουστικά προσδίδοντας στον ήχο μια φωτεινότητα και ζεστασιά. Οι δεύτερες πάλι έχουν το δικό τους φανατικό κοινό, το οποίο ισχυρίζεται πως ο ήχος γίνεται πιο δυναμικός με τις περιττές αρμονικές. Εμείς θα κρατήσουμε μια ουδέτερη στάση και θα επιθυμήσουμε να μειώσουμε όσο γίνεται τις αρμονικές παραμορφώσεις. Αναπόφευκτα λοιπόν θα μειωθεί και η ολική αρμονική παραμόρφωση, η οποία είναι άθροισμα των άλλων δύο.

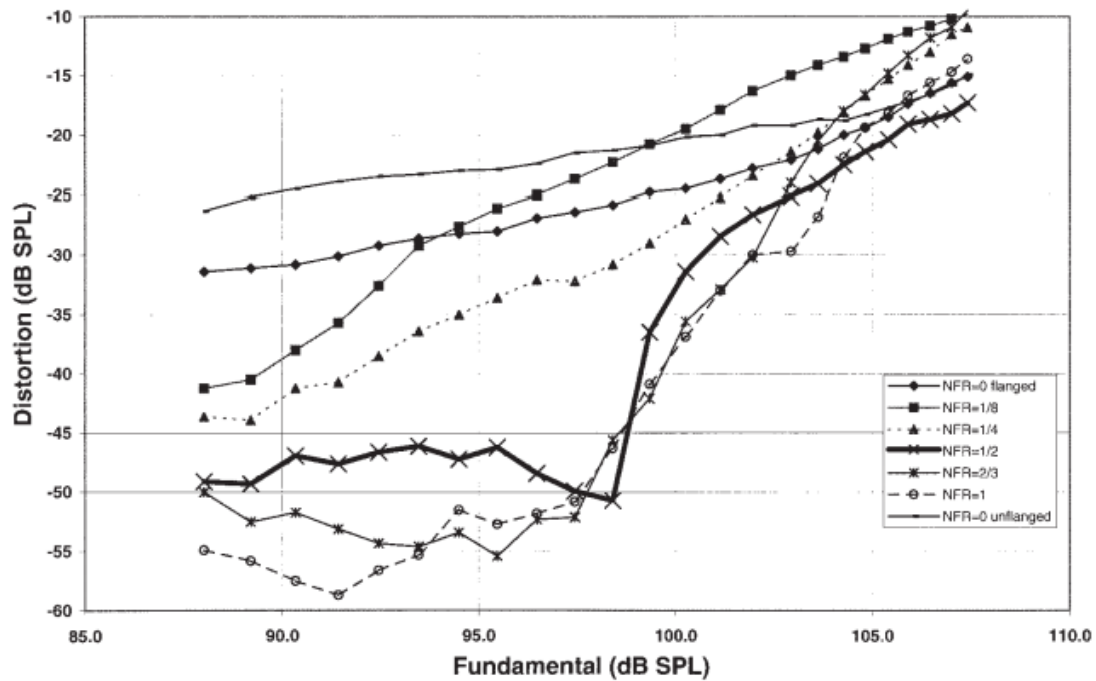
Πειραματικά τώρα βρέθηκε ότι όλες οι οπές δεν μπορούν να μειώσουν πολύ την δεύτερη αρμονική οπότε η συνολική άρτια παραμόρφωση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά καθώς ανεβαίνει η ένταση. Στις περιττές αρμονικές όμως αναλόγως την οπή έχουμε αρκετή διαφορά. Την μικρότερη αύξηση καθώς ανεβαίνουν οι στάθμες σημείωσαν οι ευθείες οπές. Όμως η παραμόρφωση αυτών είναι ούτως ή άλλως υψηλή σε κάθε στάθμη. Αντίθετα οι έντονα κυρτές οπές παρουσίασαν χαμηλή περιττή παραμόρφωση μέχρι ενός σημείου και μετά παρά την ξαφνική και απότομη άνοδο δεν ξεπέρασαν κατά πολύ τις ευθείες. Μάλιστα κάποιες, μεταξύ αυτών και αυτή με *NFR* = 0.5, είχαν έστω και λίγο χαμηλότερη παραμόρφωση από τις ευθείες.

Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα γραφήματα, δηλαδή των άρτιων αρμονικών παραμορφώσεων, των περιπτών και τέλος της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης.



Διάγραμμα άρτιων αρμονικών παραμορφώσεων

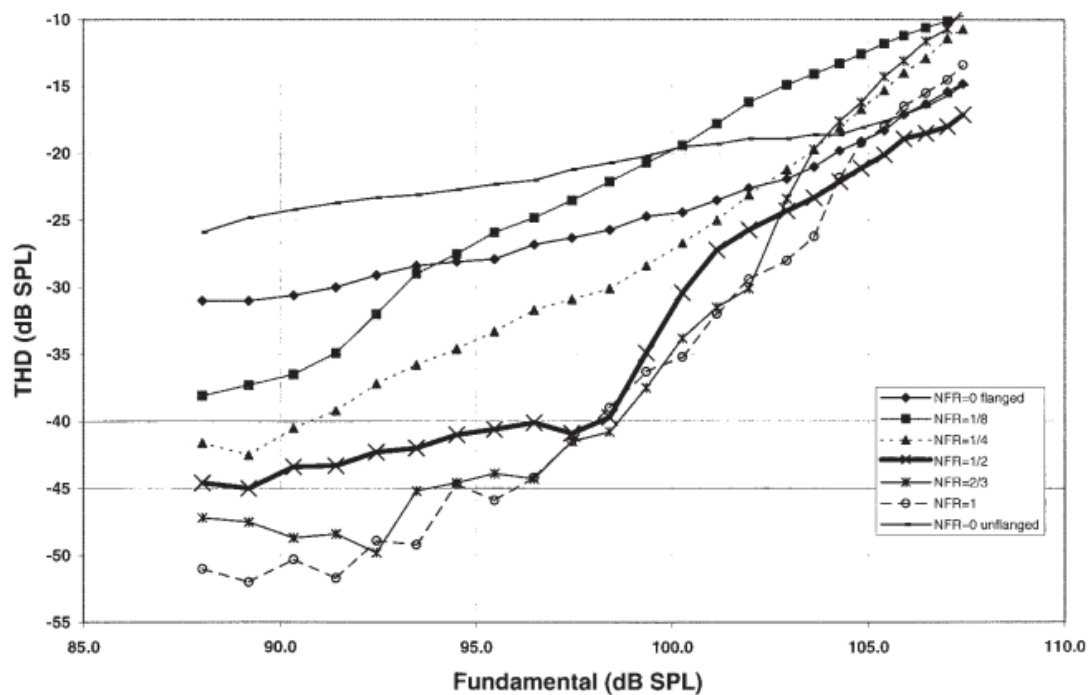
Βλέπουμε όπως είπαμε και πριν ότι δύσκολα ξεχωρίζει κανείς ποια σπή είναι ποια. Πρακτικά όλες αυξάνουν κυρίως την δεύτερη αρμονική σχεδόν γραμμικά με την αύξηση των dB.



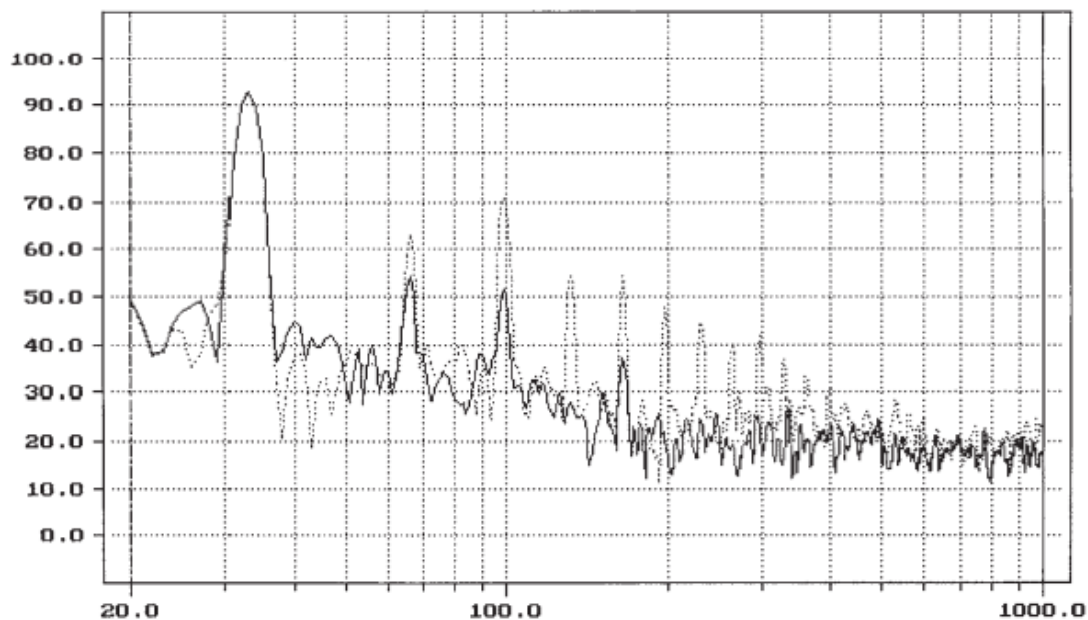
Διάγραμμα περιττών αρμονικών παραμορφώσεων

Εδώ φαίνονται καλύτερα οι διαφορές αφού είναι και πιο αισθητές. Πιο συγκεκριμένα με την σκέτη γραμμή είναι η ευθεία σπή που όπως είπαμε έχει σχετικά υψηλή παραμόρφωση και μικρή αύξηση αυτής καθώς ανεβαίνει η στάθμη.

Με έντονο μαύρο χρώμα σημειώνεται η καλύτερη ίσως επίδοση, η οποία και αντιστοιχεί σε  $NFR = 0.5$ .



Ολική αρμονική παραμόρφωση συναρτήσει της στάθμης θεμελιώδους συχνότητας



Διάγραμμα αρμονικών με θεμελιώδη συχνότητα τα 33 Hz και στάθμη 93dB. Με μαύρο σημειώνεται η καλύτερη οπή και με διακεκομμένο η χειρότερη του συγκριτικού.

Τελικώς μια μέση και ικανοποιητική σε κάθε βαθμό λύση είναι μια οπή με  $0.2 < NFR < 0.5$ .

### 3.3.6 Σύνοψη και σχεδίαση της καμπίνας bass reflex

Τώρα όσον αφορά τη σχεδίαση της καμπίνας και τα όσα ειπώθηκαν σε όλο το κεφάλαιο, μπορούμε να πούμε πως με τη βοήθεια του υπολογιστή σχεδιάζουμε ένα ηχείο bass reflex στα μέτρα μας. Χωρίς την βοήθεια του υπολογιστή δεν θα κάνουμε κάτι διαφορετικό αλλά σε κάθε περίπτωση θα πετύχουμε κάτι τυπικό και αποδεκτό.

Πα'όλα αυτά θα είμαστε σε θέση να εισπράξουμε τα βασικά πλεονεκτήματα μιας τέτοιας σχεδίασης. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι η απλότητα στην κατασκευή και η αυξημένη ευχρηστία λόγω μικρότερου μεγέθους και βάρους της υλοποίησης μας. Άλλα προτερήματα είναι η καλή αντοχή στις υψηλές στάθμες και επιπλέον η καλή αντοχή σε βάθος χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα η καμπίνα πρέπει να είναι απλώς αρκούντως στεγανή, ώστε να προσδώσει ένα  $Q$  μέσα στο εύρος 7-15. Παράλληλα και η οπή πρέπει να χαρακτηρίζεται από παρόμοιο συντελεστή ποιότητας ώστε να μην ηχεί πάρα πολύ αφότου σταματήσει η αρχική διέγερση και επιπλέον να μην έχει μεγάλες απώλειες καταλήγοντας ουσιαστικά να μην ηχεί.

Όσον αφορά την επιλογή μεγαφώνου πρέπει με βάση τα χαρακτηριστικά Thiele/Small να είναι μέσα στα κατάλληλα για την καμπίνα μας ή διαφορετικά αν ξεκινήσουμε από το μεγάφωνο να επιλέξουμε μέγεθος καμπίνας και οπής τέτοιο ώστε να ταιριάζει με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μεγαφώνου.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν βέβαια για τις χαμηλές συχνότητες του φάσματος. Μετά τις τρεις πρώτες οκτάβες οι προσεγγίσεις που κάναμε στα διάφορα σημεία της μελέτης μας δεν έχουν τόσο καλή ακρίβεια και πιστότητα. Σημειώνουμε εδώ πως κάθε οκτάβα περιέχει συχνότητες από μια δεδομένη συχνότητα μέχρι την διπλάσια αυτής. Δηλαδή η πρώτη οκτάβα του ακουστικού φάσματος είναι 20-40 Hz. Η δεύτερη εκτείνεται μέχρι τα 80 Hz και η τρίτη μέχρι τα 160 Hz. Μέχρι αυτές τις οκτάβες επίσης ο ήχος εκπέμπεται σε ευρύ φάσμα σχεδόν σφαιρικά μέσα στο χώρο και έτσι τα μεγάφωνα των χαμηλών συχνοτήτων, ονόματι woofers, καθώς επίσης και τις οπές ανάκλασης των χαμηλών συχνοτήτων μπορούμε να τις τοποθετήσουμε όπου θέλουμε πάνω στο ηχείο. Δεν είναι δηλαδή απαραίτητο να ακτινοβολούν προς τον ακροατή. Είναι ωστόσο ωφέλιμο να τοποθετούνται μακριά από τα άκρα της καμπίνας ώστε να μην επηρεάζονται τόσο πολύ από τα στάσιμα κύματα που ενδεχομένως να δημιουργηθούν στο εσωτερικό της καμπίνας.

Για τις ανώτερες οκτάβες παίζει ρόλο η κατεύθυνση των μεγαφώνων και πιο συγκεκριμένα αυτά πρέπει να ακτινοβολούν προς τον ακροατή. Εκτός από την τοποθέτηση τους χρειάζεται και κατάλληλο ταίριασμα με τα υπόλοιπα μεγάφωνα. Το σωστό ταίριασμα τόσο σε στάθμη όσο και σε φάση, καθώς και στο πεδίο του χρόνου καλείται να το φέρει εις πέρας το κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων που εκτός των παραπάνω καλείται να διαχωρίσει και τις συχνότητες στα επιμέρους μεγάφωνα. Περισσότερα όμως για αυτό το κύκλωμα στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.4 Καμπίνα Γραμμής μεταφοράς

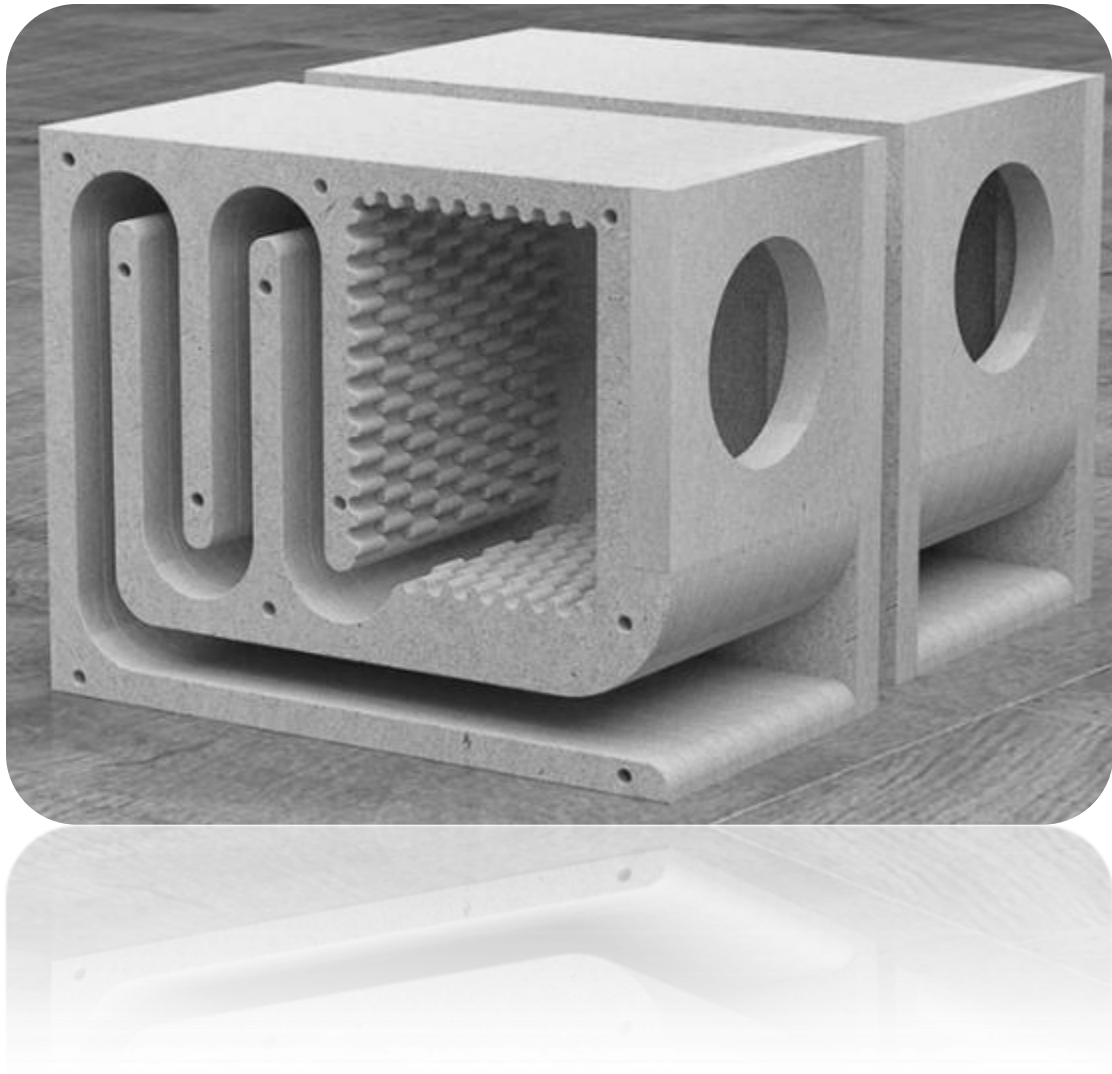
Η πιο γνωστή καμπίνα μετά τις καμπίνες ακουστικής ανάρτησης και bass reflex είναι η καμπίνα γραμμής μεταφοράς. Η βασική θεωρητική ιδέα της καμπίνας αυτού του τύπου είναι η μετάδοση κυμάτων μέσα σε ηχητικό σωλήνα.

Ηχητικός σωλήνας καλείται η διάταξη της οποίας η μια διάσταση είναι αισθητά μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Όταν λέμε αισθητά εννοούμε μια με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Επίσης η όλη διάταξη είναι κατασκευασμένη από μη ηχοπερατό υλικό στα τοιχώματα της. Στην πράξη οι κανονικοί σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ηχητικοί αρκεί να τηρηθεί η παρακάτω λεπτομέρεια. Προκειμένου να διαδοθούν επίπεδα ακουστικά κύματα, σε όλο το μήκος του σωλήνα, χρειάζεται η διάμετρος του σωλήνα να είναι αρκετά μικρότερη από το μήκος κύματος. Γύρω στη μια τάξη μεγέθους είναι αρκετή.

Για τις ανάγκες ενός εργαστηρίου λοιπόν ένας σωλήνας μπορεί να παίξει το ρόλο της καμπίνας. Στο ένα άκρο του μάλιστα τοποθετούμε το μεγάφωνο και έχουμε έτσι ένα ηχείο με καμπίνα τύπου γραμμής μεταφοράς!



Όταν πρόκειται για μαζική εφαρμογή και ειδικά αν μιλάμε για οικιακές εφαρμογές ηχεία σαν αυτό της παραπάνω εικόνας δεν έχουν θέση. Πρέπει λοιπόν το μήκος του σωλήνα να αναδιπλωθεί και να χωρέσει μέσα σε μια συμβατική καμπίνα. Έτσι οι καμπίνες γραμμής μεταφοράς έχουν συνήθως την ακόλουθη μορφή.



Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα ο αναδιπλωμένος σωλήνας.

Πέρα από την κατασκευή, η οποία όπως βλέπουμε στην τελευταία περίπτωση παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες, δύσκολη είναι και η σχεδίαση ενός ηχείου γραμμής μεταφοράς. Θεωρητικά υπάρχει ένας βασικός τύπος που μας λέει την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, ανάλογα με το μήκος του σωλήνα.

$$f_0 = \frac{c}{4L}$$

Στην πράξη όμως αν θέλουμε να επιτύχουμε σωστά αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπίσουμε την γραμμή με την εξελιγμένη θεωρία γύρω από τις γραμμές μεταφοράς. Ουσιαστικά χρειάζεται να ξέρουμε την εμπέδηση της γραμμής και να την ταιριάξουμε σωστά τόσο με την εμπέδηση του μεγαφώνου, όσο και με την εμπέδηση στο ανοιχτό άκρο της.

### 3.4.1 Μαθηματική θεμελίωση του μοντέλου

Υπενθυμίζουμε εδώ πως η ακουστική εμπέδηση είναι ο λόγος της πίεσης προς την ταχύτητα.<sup>[31]</sup> Η ταχύτητα λοιπόν, μέσα στην γραμμή μεταφοράς, διέπεται από την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση.

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}$$

Και οι συνοριακές συνθήκες στο δικό μας πρόβλημα είναι οι εξής:

$$u(0, t) = u_d e^{j\omega t} \quad \frac{\partial u(L, t)}{\partial x} = 0$$

Τέλος πριν ειδικεύσουμε στις ημιτονοειδείς λύσεις που αρμόζουν στο πρόβλημα μας παραθέτουμε και την διαφορική εξίσωση που διέπει την πίεση μέσα στον σωλήνα.<sup>[31]</sup>

$$-\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \rho \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$$

Μέσα από την επίλυση όλων αυτών των διαφορικών παίρνουμε τις ακόλουθες δύο εκφράσεις για την ταχύτητα και την πίεση.

$$u(x, t) = \left[ u_d \tan\left(\frac{\omega}{c} L\right) \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) + u_d \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \right] e^{j\omega t}$$

$$p(x, t) = j\rho c \left[ u_d \tan\left(\frac{\omega}{c} L\right) \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) + u_d \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) \right] e^{j\omega t}$$

Βάσει ορισμού της εμπέδησης λοιπόν,  $z = F/u$  παίρνουμε διαδοχικά

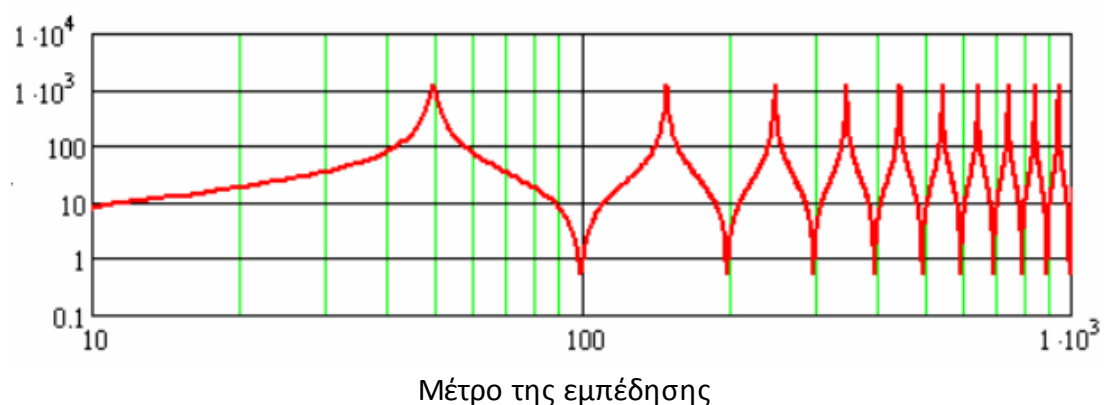
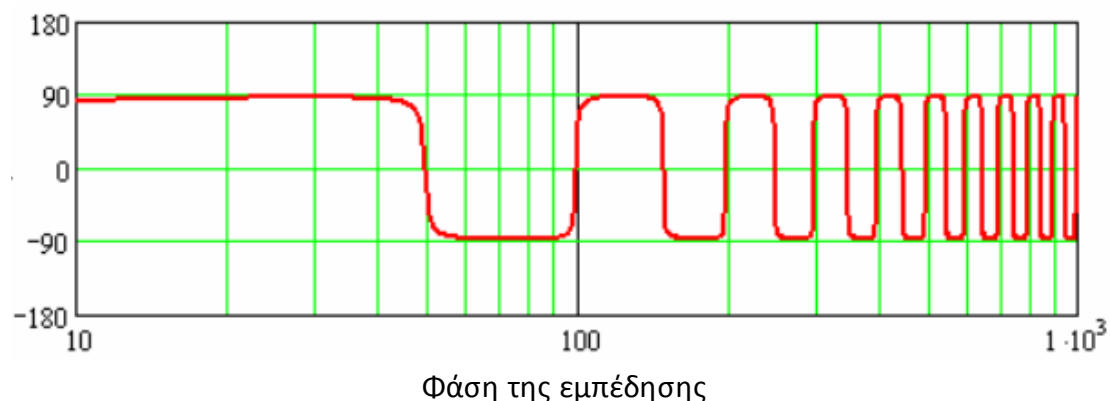
$$z(\omega) = \frac{p}{S} = \frac{p}{S u} = \frac{p(0)}{S u(0)} \Rightarrow z(\omega) = \frac{j\rho c \tan\left(\frac{\omega}{c} L\right)}{S}$$

Με  $S$  συμβολίζουμε το εμβαδό του σωλήνα και στο παράδειγμα μας αυτό είναι σταθερό σε όλο το μήκος του σωλήνα.

Από την έκφραση για την εμπέδηση μπορούμε εύκολα να δούμε ότι αυτή για κάποιες τιμές θεωρητικά απειρίζεται. Σε αυτές τις τιμές έχουμε τις ιδιοσυχνότητες της γραμμής, οι οποίες όπως είπαμε και παραπάνω δίνονται από τον τύπο  $f_n = nc/4L$ . Παρακάτω ακολουθούν και γραφήματα με το μέτρο και τη φάση της



εμπέδησης για ένα σωλήνα μήκους 1.7 μέτρων, ο οποίος, βάσει τύπου, έχει ιδιοσυχνότητα στα 50 Hz.



Όπως υποδεικνύουν και οι τύποι παρατηρούμε πως στις περιττές αρμονικές της ιδιοσυχνότητας έχουμε τις μέγιστες τιμές της εμπέδησης ενώ στις άρτιες αρμονικές η εμπέδηση μας ελαχιστοποιείται.

Μέχρι εδώ είδαμε την μαθηματική προσέγγιση του φαινομένου σε μια πιο απλοϊκή και ιδανική προσέγγιση. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα κάνουμε την προσέγγιση μας καλύτερη και πιο ρεαλιστική αντικαθιστώντας οτιδήποτε ιδεατό με το πραγματικό του ανάλογο. Ξεκινούμε την αντικατάσταση με την μηδενική εμπέδηση που θεωρήσαμε στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα.

### 3.4.2 Εμπέδηση στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα

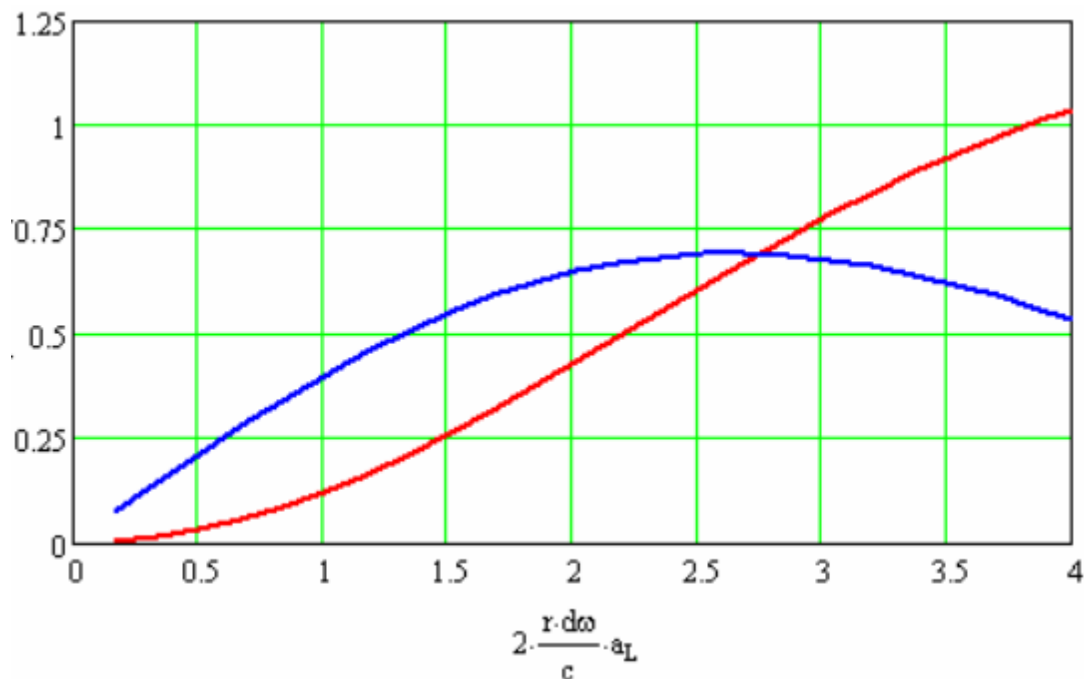
Ο διαδιδόμενος ήχος μέσα στο σωλήνα, μόλις φθάσει στο ελεύθερο άκρο αυτού, εκπέμπεται σφαιρικά στον ανοικτό χώρο. Δεδομένων των ταχυτήτων και των πιέσεων που επικρατούν έχουμε μια υπολογίσιμη εμπέδηση. Για τον υπολογισμό αυτής θα χρησιμοποιήσουμε την γνωστή θεωρία που έχουμε αναπτύξει για κινούμενα συμβατικά ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα πάνω σε μια άπειρη, θεωρητικά, μπάφλα.<sup>[31]</sup>

Συνοψίζοντας λοιπόν η εμπέδηση μπορεί να γραφεί

$$Z_{mouth}(\omega) = \frac{\rho c}{S} \left\{ \left[ \frac{1 - 2J_1\left(2\frac{\omega a_L}{c}\right)}{2\frac{\omega a_L}{c}} \right] + j \left[ \frac{2H_1\left(2\frac{\omega a_L}{c}\right)}{2\frac{\omega a_L}{c}} \right] \right\}$$

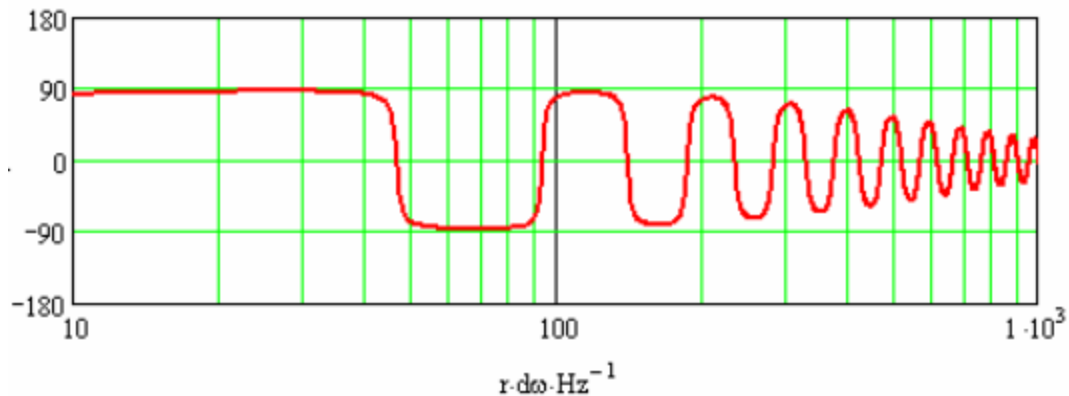
Όπου το  $a_L$  είναι η ακτίνα του σωλήνα και τα  $J_1$ ,  $H_1$  είναι οι συντελεστές των εξισώσεων Bessel. Το  $S$  τέλος είναι η διάμετρος του σωλήνα. Για τις συχνότητες μέχρι τα 1000 Hz περίπου, αφού αυτές μας ενδιαφέρουν, δείχνουμε παρακάτω μια γραφική παράσταση.

Σε αυτή τη γραφική παράσταση απεικονίζουμε το πραγματικό μέρος της εμπέδησης, με την καμπύλη που έχει το μεγαλύτερο μέγιστο, και το φανταστικό.

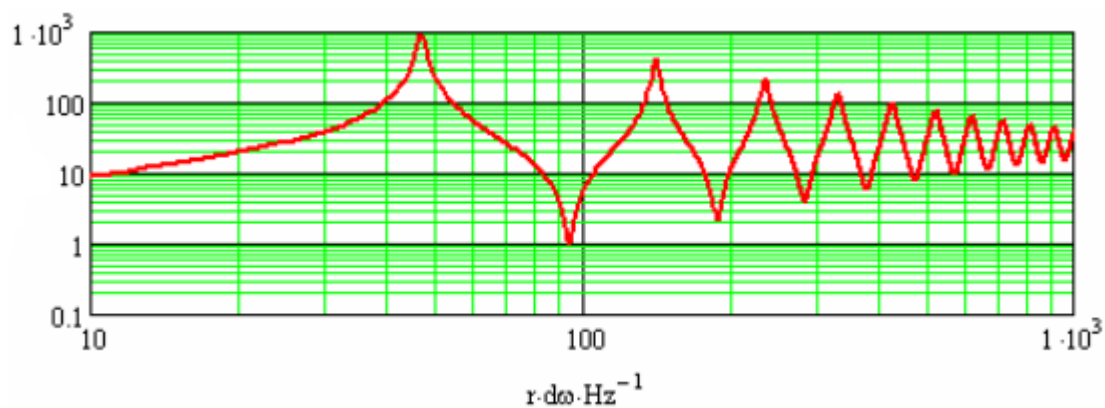


Όπως βλέπουμε καθώς ανεβαίνουν οι συχνότητες αυξάνει και η πραγματική εμπέδηση, η οποία δρα ως απόσβεση της μεταφερόμενης ενέργειας από το σωλήνα στο δωμάτιο. Το φανταστικό μέρος της εμπέδησης από την άλλη δρα ως επιπρόσθετη μάζα, ανακλώντας μέρος της ενέργειας μέσα στο σωλήνα και παράλληλα αυξάνει λίγο το ακουστικό μήκος του σωλήνα. Η ανακλώμενη ενέργεια είναι η αιτία των στάσιμων κυμάτων.

Με βάση όλα αυτά, όπως θα δούμε και παρακάτω, η εμπέδηση αλλάζει ελαφρώς μορφή σε σχέση με τα αντίστοιχα προηγούμενα γραφήματα. Πρώτον έχουμε ιδιοσυχνότητα λίγο μικρότερη, στα 47 Hz σε αντίθεση με τα 50 που είχαμε πριν. Δεύτερον παρατηρούμε ότι το μέτρο της αντίστασης και η φάση παρουσιάζουν μια πιο ωμική και σταθερή συμπεριφορά όσο αυξάνει η συχνότητα.



Φάση της εμπέδησης μετά την προσαρμογή του ελεύθερου άκρου



Μέτρο της εμπέδησης μετά την προσαρμογή του ελεύθερου άκρου

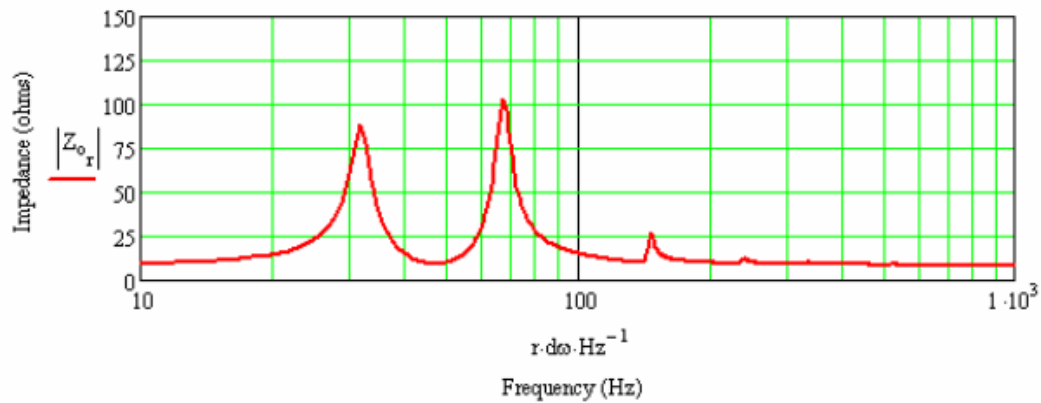
Ουσιαστικά λοιπόν με την πραγματική προσέγγιση για το ελεύθερο άκρο κρατάμε σαν συμπέρασμα ότι η γραμμή μεταφοράς δουλεύει στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό ουσιαστικά μας βολεύει γιατί μετά, στις επόμενες οκτάβες η γραμμή μεταφοράς θα επενέβαινε έντονα στο μεγάφωνο. Στην επόμενη υποενότητα λοιπόν θα συνεχίσουμε με το μεγάφωνο και με την ολική ταλάντωση των δύο συστημάτων, του μεγαφώνου και της καμπίνας.

### 3.4.3 Απόκριση και εμπέδηση του συστήματος μεγαφώνου καμπίνα

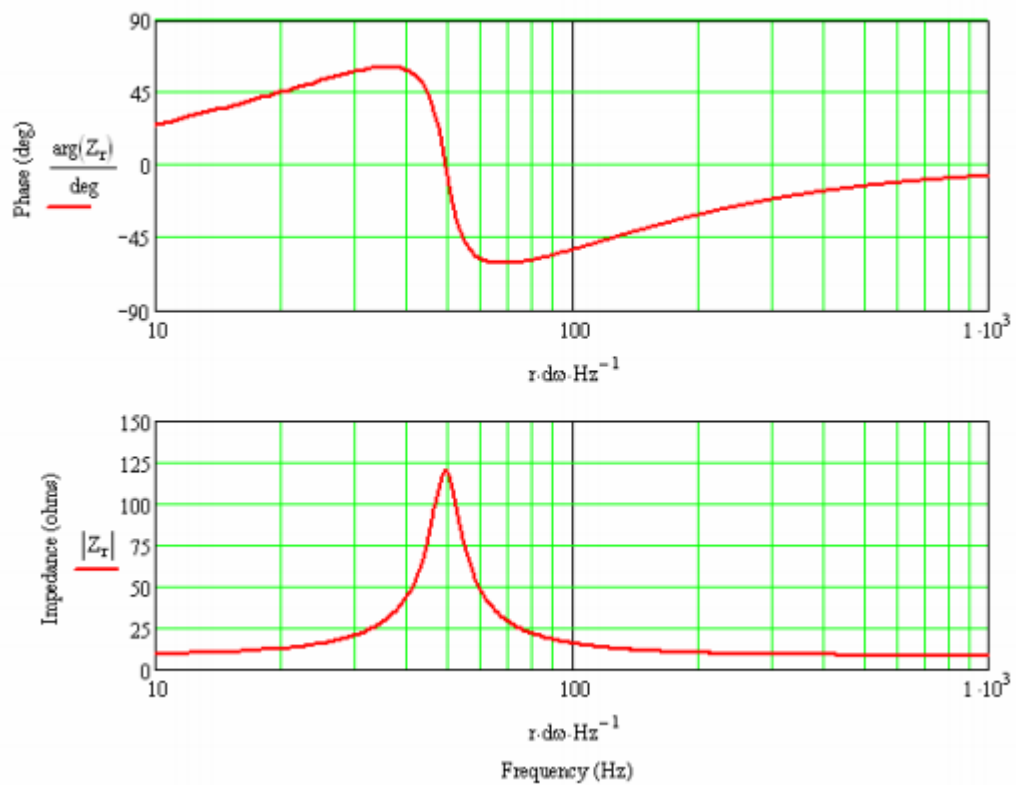
Για την προσομοίωση μας επιλέξαμε ένα μεγάφωνο με ιδιοσυχνότητα στα 50 Hz. Έτσι η μαθηματική μας μοντελοποίηση διευκολύνεται. Γενικά σε κάθε περίπτωση μπορούμε να ξέρουμε την ιδιοσυχνότητα του μεγαφώνου και να φτιάχνουμε γραμμή μεταφοράς ίσης ιδιοσυχνότητας. Οπότε χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να συνεχίσουμε με αυτή την πιο απλοϊκή προσέγγιση.

Όπως θα δούμε και από το γράφημα της αντίστασης τώρα το σύστημα μεγάφωνο καμπίνα έχει δύο κορυφές στην εμπέδηση του. Δηλαδή ουσιαστικά παρουσιάζει δύο ιδιοσυχνότητες, μια με συχνότητα μικρότερη των 50 Hz και μια με

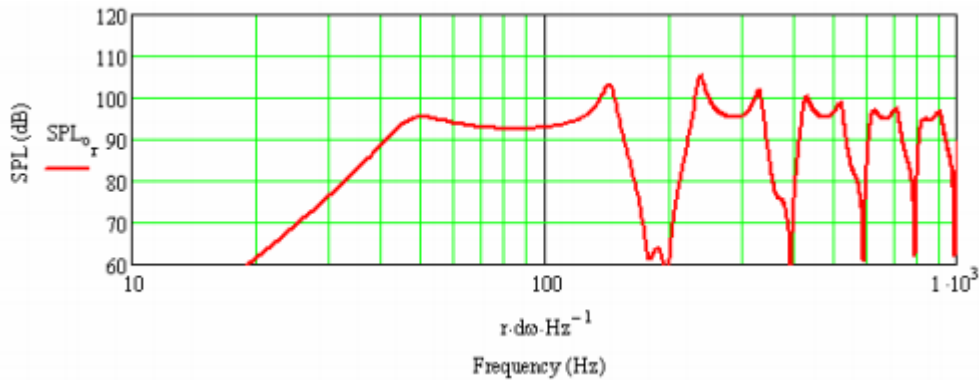
μεγαλύτερη. Αυτή η συμπεριφορά είναι σύμφωνη με την θεωρία γύρω από τους συζευγμένους ταλαντωτές. Σύμφωνα με την θεωρία λοιπόν τα δύο συζευγμένα ταλαντούμενα συστήματα ίδιας ιδιοσυχνότητας παρουσιάζουν ταλάντωση με διαφορετικές ιδιοσυχνότητες. Έτσι λοιπόν το ηχείο μας πλέον έχει μια ιδιοσυχνότητα στα 33 Hz και μια δεύτερη στα 68. Αυτό φαίνεται και από το παρακάτω γράφημα της εμπέδησης. Τονίζουμε εδώ ότι και το bass reflex έχει δύο ιδιοσυχνότητες και για αυτό το λόγο τα γραφήματα έχουν μια ομοιότητα.



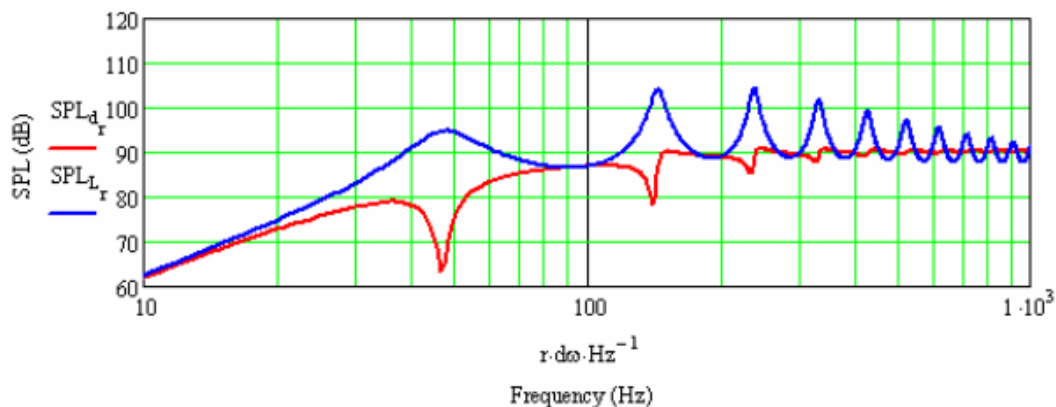
Για σύγκριση παρουσιάζουμε και την εμπέδηση του μεγαφώνου, μαζί με την φάση του, σε άπειρη μπάφλα.



Αυτό που μας αφορά πάντως είναι η απόκριση συχνοτήτων. Εδώ θα δούμε ότι από τα 200 Hz και κάτω έχουμε μια ομαλή συμπεριφορά χωρίς βυθίσματα ή φουσκώματα με την έκταση του συστήματος να φτάνει στα 50 Hz και ύστερα να αποκόπτεται με 24 dB ανά οκτάβα. Ως οκτάβα ορίζουμε το εύρος από μια συχνότητα μέχρι την διπλάσια της. Παραδείγματος χάριν το εύρος από τα 40-80 Hz είναι μια οκτάβα και πιο συγκεκριμένα η δεύτερη του ακουστικού μας φάσματος.



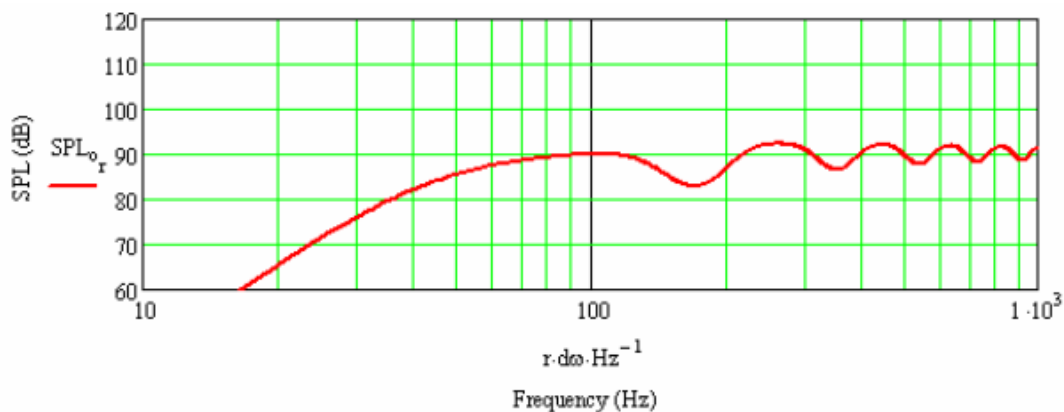
Αύτη είναι η απόκριση του ηχείου και όπως βλέπουμε πάνω από τα 200 Hz αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα. Πιο αναλυτικά μπορούμε να δούμε και την απόκριση του μεγαφώνου και του ελεύθερου άκρου της γραμμής ξεχωριστά. Στα 50 Hz από κάτω προς τα πάνω συμβολίζουμε το μεγάφωνο και το ελεύθερο άκρο.



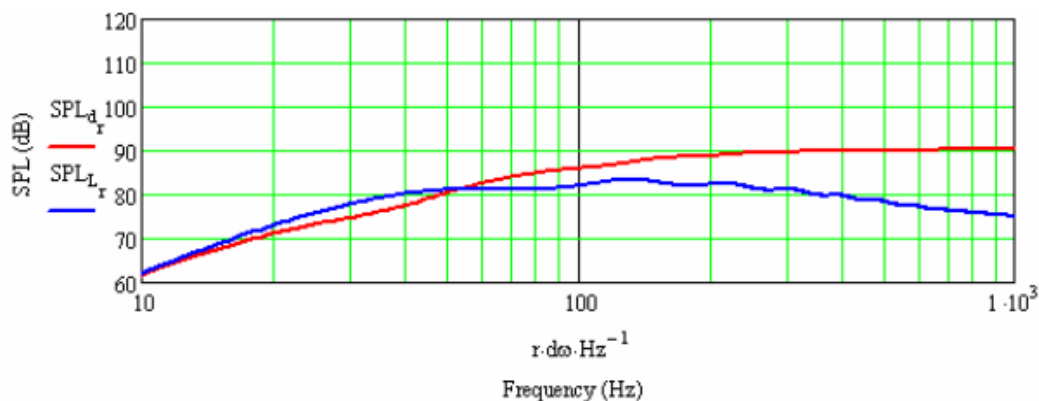
Παρατηρούμε ότι το μεγάλο πρόβλημα είναι στις συχνότητες που εκπέμπουν και τα δύο εξίσου δυνατά και λόγω αντίθετης φάσης τα σήματα ακυρώνονται. Παράλληλα βλέπουμε και τα φουσκώματα που κάνει ο σωλήνας. Συνεπώς το ιδανικό είναι να μπορέσουμε να απομονώσουμε την ακτινοβολία του σωλήνα από τα 100 Hz και πάνω περίπου. Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα αυτό είναι μέχρι έναν βαθμό εφικτό με την χρήση αποσβεστικών και ηχοαπορροφητικών καλυμμάτων.

### 3.4.4 Επίδραση των ηχοαπορροφητικών υλικών

Προσθέτοντας στον σωλήνα ηχοαπορροφητικό και ξανά κάνοντας την μέτρηση βγάζουμε ένα αποτέλεσμα αρκετά διαφορετικό. Χρειάζεται αρκετή προσοχή στην λεπτομέρεια και στη ποσότητα του υλικού που θα βάλουμε. Πρέπει να πετύχουμε απόσβεση στους ήχους άνω των 100 Hz περίπου και από εκεί και κάτω να μην αποκόψουμε πολύ το σωλήνα γιατί θα χάσουμε σε έκταση και βάθος χαμηλού. Γεμίζοντας τον σωλήνα λοιπόν μπορεί να παραχθεί το ακόλουθο αποτέλεσμα.

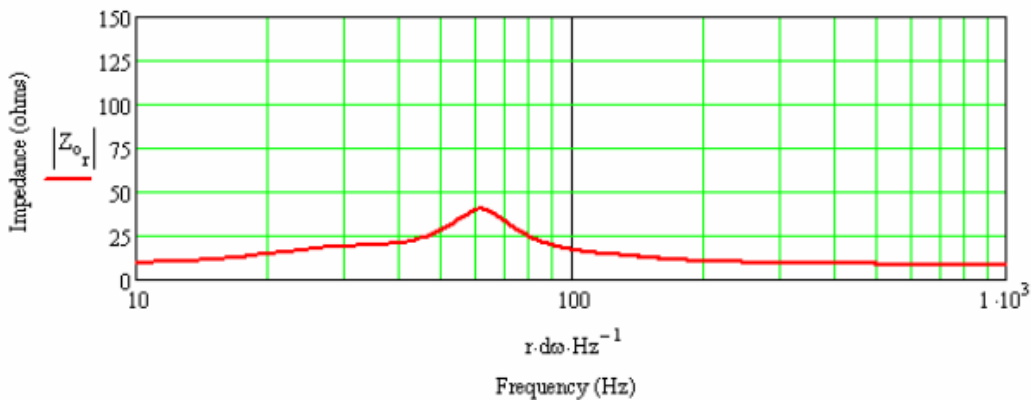


Και πάλι βέβαια το αποτέλεσμα έχει μια διακύμανση μέσα στο ωφέλιμο και αναπαραγόμενο εύρος συχνοτήτων, της τάξης των 6 dB. Συνεπώς θα είναι και εδώ ακουστό ένα βύθισμα στα 170 Hz περίπου. Επίσης παρατηρούμε ότι με το γέμισμα, όπως είπαμε και πιο πριν άλλωστε, η έκταση των χαμηλών μειώθηκε. Εν ολίγοις πετύχαμε μεν βελτίωση, αλλά όχι όσο θα θέλαμε, δε. Παρόλα αυτά πριν αναφέρουμε και άλλες μεθόδους για την περαιτέρω βελτίωση του παραγόμενου αποτελέσματος θα δείξουμε δύο ακόμα γραφήματα. Το ένα δείχνει την απόκριση του ανοιχτού άκρου και του woofer, από κάτω προς τα πάνω αντίστοιχα στα 200 Hz.



Εδώ φαίνεται πιο καθαρά η επίδραση του υλικού στο αποτέλεσμα, ειδικά πάνω από τα 200 Hz.

Τελευταίο είναι και το γράφημα της εμπέδησης, όπου και αυτό έχει υποστεί αλλαγές.



Ουσιαστικά πλέον η εμπέδηση θυμίζει εκείνες την ηχείων ακουστικής ανάρτησης.

Μέχρι εδώ μιλήσαμε για γραμμές μεταφοράς με σταθερό εμβαδό διατομής. Είδαμε την βασική αρχή λειτουργίας τους, τα αρχικά τους προβλήματα και κάποιους τρόπους εξάλειψής τους. Πριν κλείσουμε το κεφάλαιο αυτό όμως πρέπει να πούμε λίγα λόγια και για τις γραμμές με μεταβλητό εμβαδό διατομής.

### 3.4.5 Γραμμές μεταφοράς με μεταβλητό εμβαδό διατομής

Οι σωλήνες αυτής της κατηγορίας είναι δύο ειδών. Από τη μια έχουμε τους συστελλόμενους, στους οποίους το εμβαδό διατομής γίνεται όλο και μικρότερο όσο πλησιάζουμε στο ανοιχτό άκρο. Και από την άλλη έχουμε τους διαστελλόμενους όπου το εμβαδό γίνεται όλο και μεγαλύτερο. Το τελευταίο είδος καμπίνας μάλιστα μπορεί κανείς να το συναντήσει και με την ονομασία, καμπίνα οπίσθιας χοάνης.

Όπως και να έχει, η ουσία από πλευράς μελέτης είναι ότι και αυτές οι σχεδιάσεις υπακούουν ουσιαστικά στις ίδιες βασικές αρχές με αυτές των γραμμών μεταφοράς. Για το λόγο αυτό λοιπόν τις αναφέρουμε μέσα στο κεφάλαιο αυτό και όχι σε κάποιο άλλο ξεχωριστό.

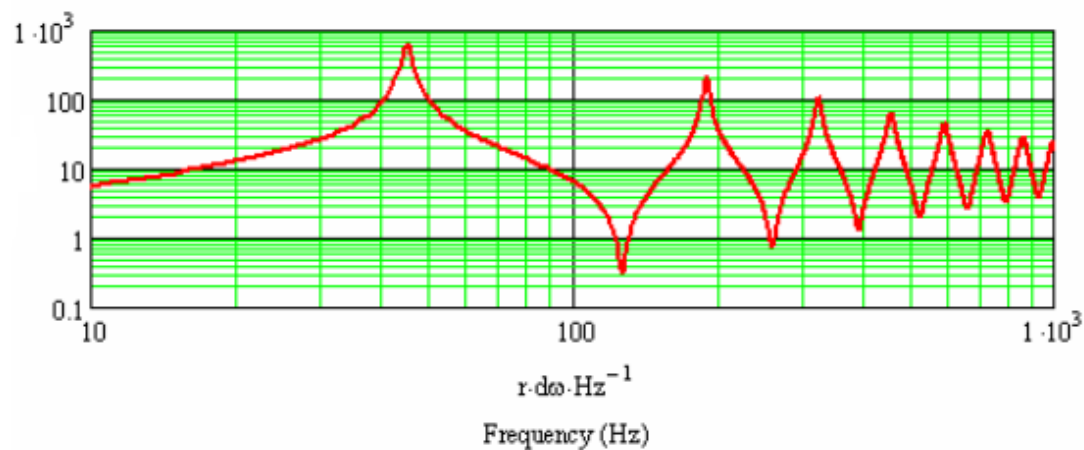
Η πρώτη βασική διαφοροποίηση είναι ότι εδώ δεν ισχύει ο βασικός τύπος  $f_0 = c/4L$  που μας δίνει την ιδιοσυχνότητα της γραμμής. Θα πρέπει λοιπόν με κάποια σύνθετα μαθηματικά να βρούμε την συχνότητα ή να την μετρήσουμε. Μια ποιοτική προσέγγιση πάνω στο ζήτημα και όχι ποσοτική μας λέει ότι οι συστελλόμενοι σωλήνες χρειάζονται μικρότερο μήκος από τους κανονικούς για την ίδια ιδιοσυχνότητα και αντίθετα οι μεγαλύτεροι χρειάζονται μεγαλύτερο μήκος.<sup>[31]</sup>

Στην πράξη λοιπόν θα χρησιμοποιήσουμε τρεις σωλήνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπου όλοι τους όμως συντονίζονται στα 50 Hz. Όμοια με πριν θα μετρήσουμε εμπεδήσεις, απόκριση συχνοτήτων, επιμέρους αποκρίσεις και θα παραθέσουμε εδώ τα αντίστοιχα γραφήματα.

| Variable    | Tapered        | Straight       | Expanding      |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Length (in) | 48.5           | 67.3           | 87.5           |
| $S_0$       | $5 \times S_d$ | $2 \times S_d$ | $1 \times S_d$ |
| $S_L$       | $1 \times S_d$ | $2 \times S_d$ | $5 \times S_d$ |

Στον παραπάνω πίνακα<sup>[31]</sup> φαίνονται οι ακριβείς διαστάσεις των σωλήνων μας. Όπως είπαμε έχουμε κοινή ιδιοσυχνότητα αλλά όπως θα δούμε κίόλας οι αρμονικές είναι σε διαφορετικές συχνότητες για κάθε σωλήνα.

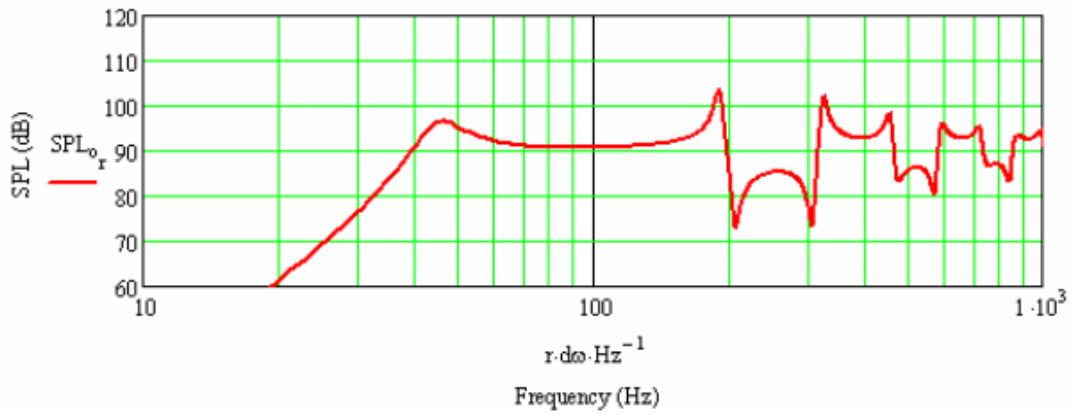
Ξεκινώντας με τον συστελλόμενο σωλήνα λοιπόν θα πάρουμε την ακόλουθη καμπύλη για το μέτρο της εμπέδησης του.



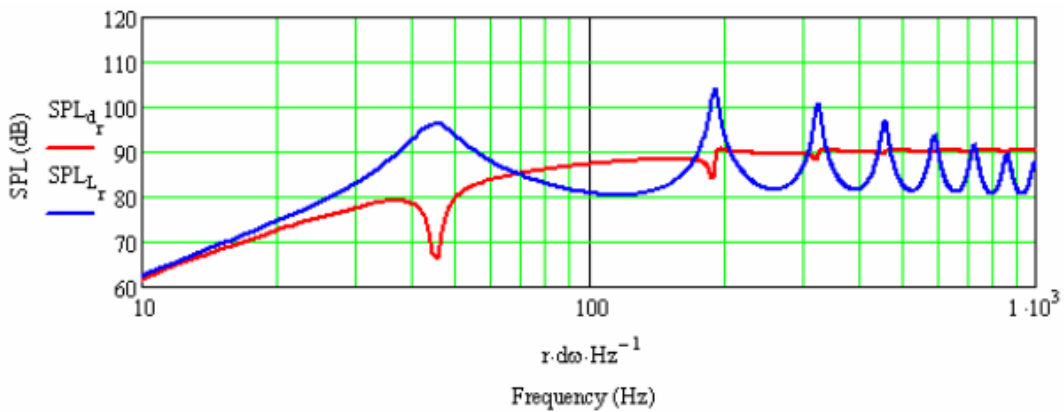
Όπως είπαμε και πιο πριν, παρατηρούμε ότι ενώ η πρώτη θεμελιώδης συχνότητα είναι στα 47 Hz, η δεύτερη είναι γύρω στα 120 και η τρίτη κοντεύει στα 200. Το όφελος μας λοιπόν είναι ότι οι αρμονικές της θεμελιώδους που ακυρώνονται με το σήμα του μεγαφώνου είναι σε μεγαλύτερες συχνότητες και μπορούν έτσι να αποσβεστούν πιο αποτελεσματικά.

Επίσης η παραγόμενη στάθμη στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα δεν είναι ίση με αυτή του μεγαφώνου με αποτέλεσμα να μην έχουμε πλήρως ακυρώσεις σε ορισμένες συχνότητες, αλλά απλώς να έχουμε μεγάλες αυξομειώσεις. Για να γίνουμε πιο κατανοητοί λοιπόν θα δείξουμε αμέσως την στάθμη του ηχείου. Θα δείξουμε και την συνολική καθώς και τις near field μετρήσεις του μεγαφώνου και του ανοιχτού άκρου. Μέτρηση near field εννοούμε την μέτρηση που γίνεται πολύ κοντά στο μεγάφωνο για παράδειγμα, με αποτέλεσμα να μετράμε μόνο το σήμα από αυτό χωρίς την αλληλεπίδραση του χώρου και άλλων πηγών, όπως μια οπή ή ένα δεύτερο μεγάφωνο.

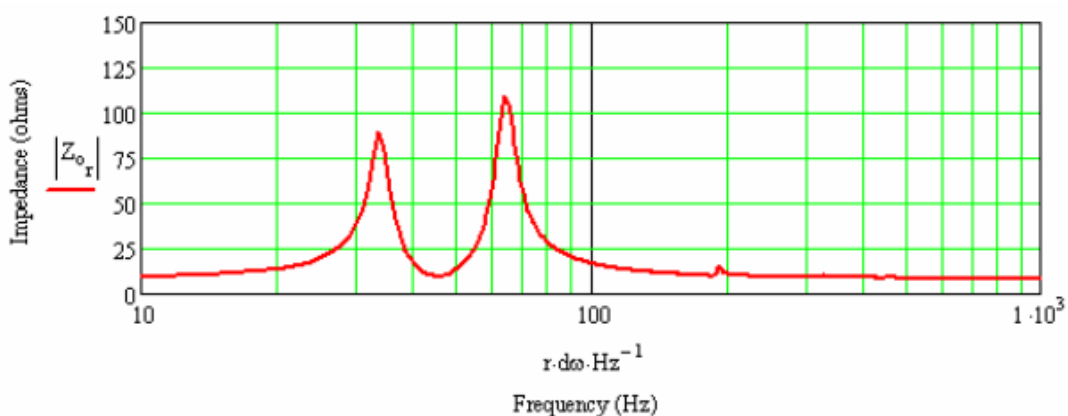




Βλέπουμε πως πράγματι δεν έχουμε πλήρη ακύρωση περί τα 200 Hz, αλλά έχουμε μια αισθητή μείωση της τάξης των 15 Db. Το μεγαλύτερο κακό είναι ότι όλη η περιοχή από τα 200-300 Hz είναι εξασθενημένη γύρω στα 10 dB.

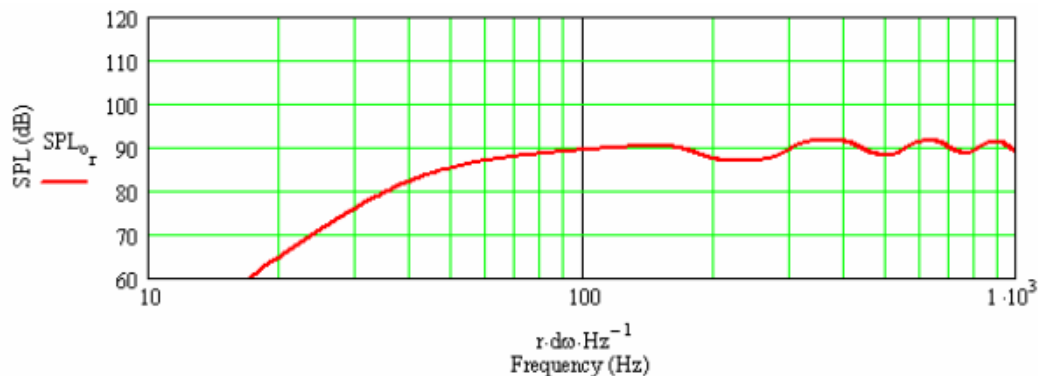


Εδώ βλέπουμε πως όντως η έξοδος του ανοίγματος είναι μειωμένη. Και τέλος αυτές οι αλλαγές φαίνονται και στην εμπέδηση.

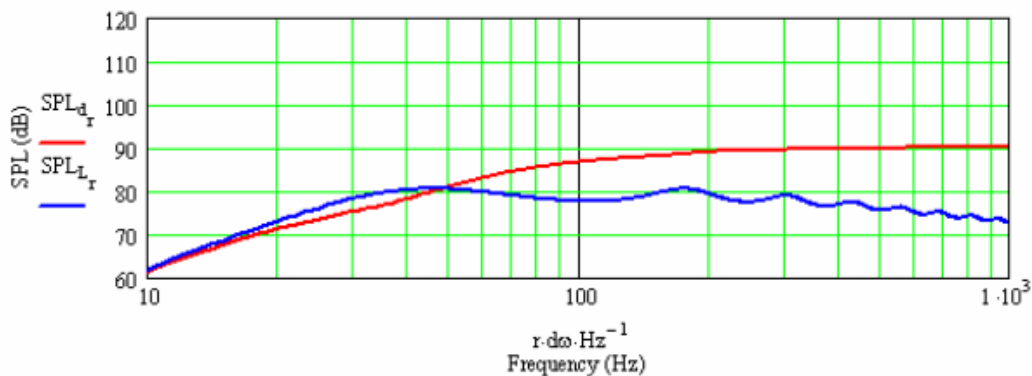


Πέρα από τις δύο κορυφές πρακτικά καμία άλλη 'μύτη' δεν εμφανίζεται εδώ. Να τονιστεί ότι μιλάμε για σωλήνα άδειο.

Τα αποτελέσματα συνεπώς, σαφώς και καλύτερεύουν με τον σωλήνα γεμισμένο. Δεν θα κάνουμε κάποια ιδιαίτερη ανάλυση εδώ απλώς θα παραθέσουμε τα αντίστοιχα γραφήματα.



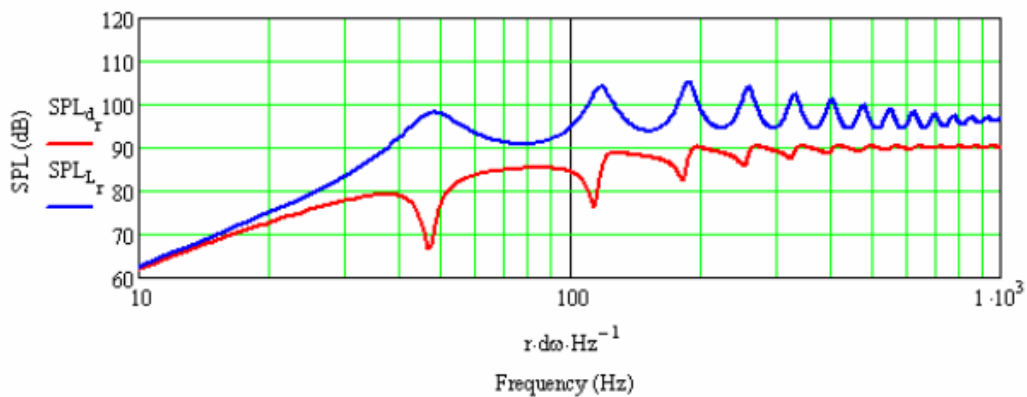
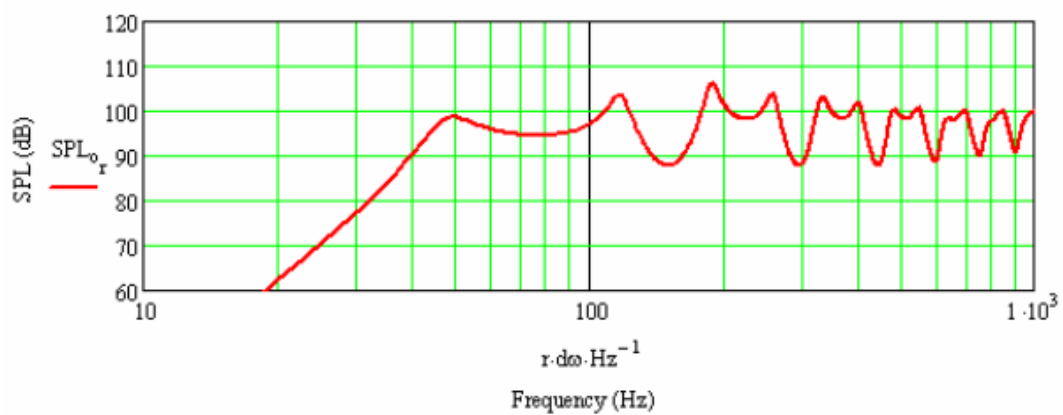
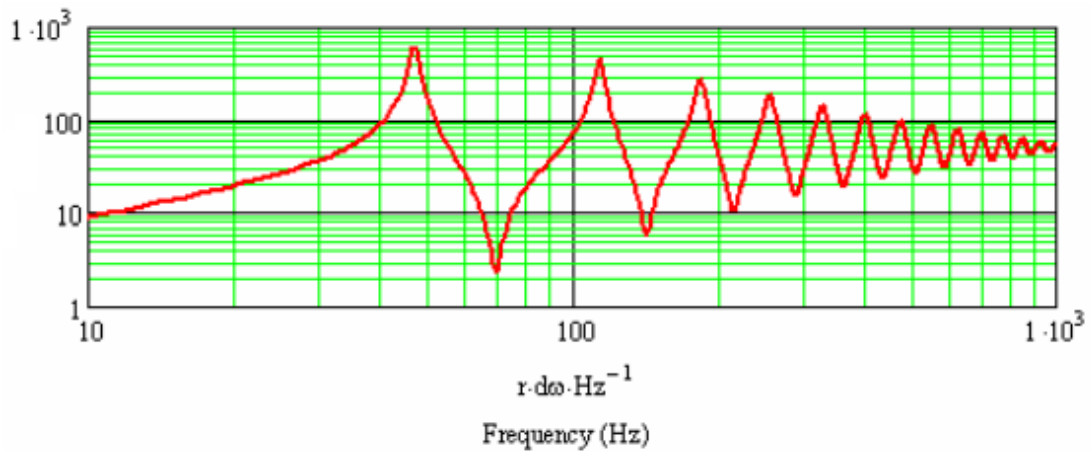
Ξανά θυμίζουμε ότι από κάτω απεικονίζεται το ελεύθερο άκρο και από πάνω η απόκριση του μεγαφώνου.



Τέλος για εξοικονόμηση χαρτιού δεν θα ξανά δείξουμε το γράφημα της αντίστασης καθώς είναι πρακτικά ίδιο.

Όπως είδαμε, ενώ ο συστελλόμενος σωλήνας κάνει εξαιρετική δουλειά στην καταπολέμηση των συντονισμών δυστυχώς δεν έχει την απαιτούμενη έκταση χαμηλά. Για τον σκοπό αυτό λοιπόν υπάρχουν και οι γραμμές μεταφοράς με διαστελλόμενο σωλήνα.

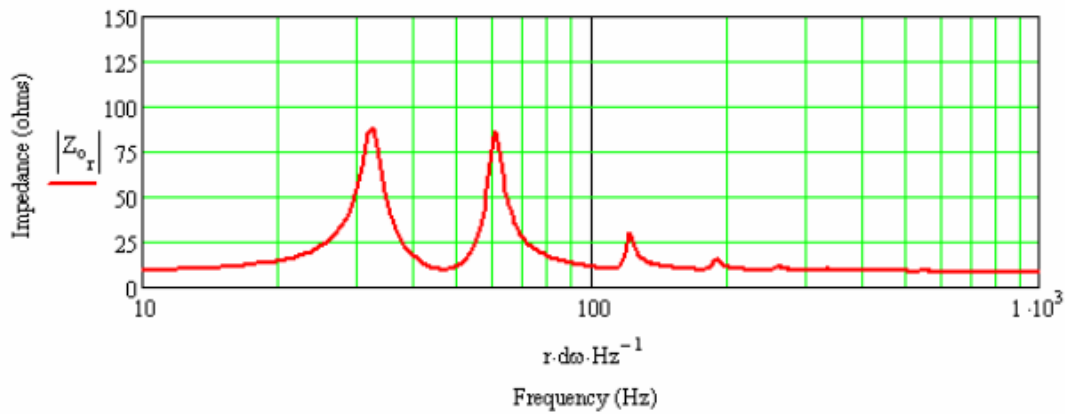
Εδώ οι αρμονικές είναι πιο κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα. Στόχος μας πλέον δεν είναι να τις κόψουμε. Πρωταρχικός μας στόχος είναι να παράγουμε ενίσχυση στα κατώτερα χαμηλά, εκεί δηλαδή που αδυνατεί το μεγάφωνο να παράγει από μόνο του σωστά την πληροφορία. Ευτυχώς όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω δεν έχουμε τελείως ακυρώσεις και έτσι το αποτέλεσμα με λίγη προσοχή στη σχεδίαση μπορεί να γίνει καλό.



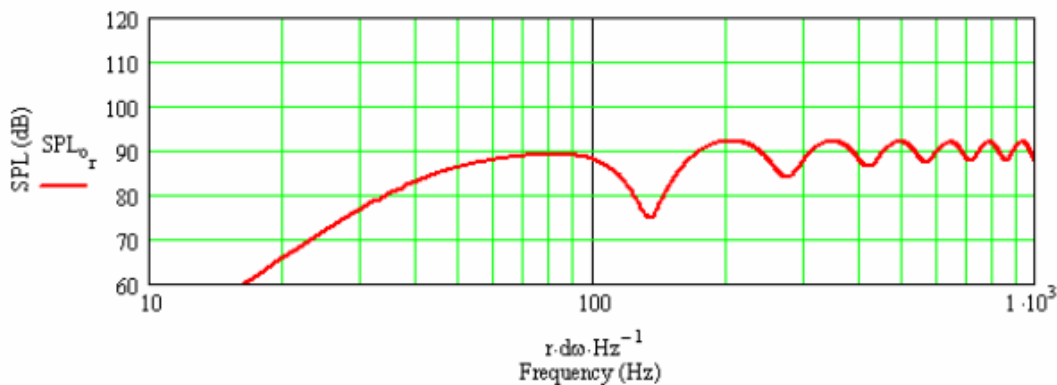
Βλέπουμε πλέον πως η καμπύλη του ανοίγματος υπερέχει σε στάθμη έναντι αυτής του μεγαφώνου ή με άλλα λόγια ότι το άνοιγμα, όντας μεγαλύτερο σε εμβαδό, δημιουργεί μεγαλύτερες ωθήσεις στον αέρα.

Στην προσπάθεια μας να γεμίσουμε τον σωλήνα με ηχοαπορροφητικό δεν θα πετύχουμε κάτι ιδιαίτερο. Αφενός θα χάσουμε τον αρχικό μας στόχο, δηλαδή την ενίσχυση των πιο χαμηλών συχνοτήτων και αφετέρου όπως θα δούμε κιόλας οι αυξομειώσεις μέσα στο φάσμα αναπαραγωγής των συχνοτήτων θα παραμείνουν.

Πριν πάμε στον γεμισμένο σωλήνα ας δείξουμε και την καμπύλη της αντίστασης ώστε να δούμε πως αυτή έχει κάποιες ακόμα κορυφώσεις πέραν των δύο βασικών.



Τέλος κλείνουμε με την ολική απόκριση του συστήματος όταν είναι γεμισμένο.



Οι καμπίνες αυτές μαζί με όλες τις υποκατηγορίες τους αποτελούν όπως είπαμε και στην αρχή μια ακόμα πρόταση για την καμπίνα ενός ηχείου. Ωστόσο είναι αρκετά πιο σύνθετες με αποτέλεσμα να μην έχουν γνωρίσει, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, μια ευρεία αποδοχή.

Από επιστημονικής μελέτης έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, και εμείς εδώ κάναμε μόνο μια εισαγωγή. Η όλη διάταξη έχει αρκετούς βαθμούς ελευθερίας με αποτέλεσμα ο καθένας ανάλογα τι θέλει να μπορεί να υλοποιήσει την δική του προσέγγιση.

Εκτός από αυτά τα τρία είδη καμπινών υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις οι οποίες είναι ακόμα πιο σπάνιες ή τέλος πάντων δεν έχουν το ίδιο ενδιαφέρον, και για αυτό και δεν τις αναφέραμε εδώ.

Όπως και να έχει η διπλωματική μας, που έχει στόχο την θεωρητική ανάλυση όλων των μερών ενός ηχείου, προχωράει στο επόμενο κεφάλαιο με την εισαγωγή του κυκλώματος διαχωρισμού συχνοτήτων ή αλλιώς crossover.

## Κεφάλαιο 4

### Το κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων

#### 4.1 Τι κάνει αυτό το κύκλωμα και μια εισαγωγή πως το πετυχαίνει

Έχουμε ήδη πει από το δεύτερο κεφάλαιο ότι στις περισσότερες υλοποιήσεις ηχείων δεν έχουμε ένα μεγάφωνο για όλο το ακουστικό εύρος συχνοτήτων. Κάθε μεγάφωνο λοιπόν ή μια ομάδα μεγαφώνων καλείται να αναπαράξει μέρος του ακουστικού φάσματος.<sup>[9]</sup>

Τα μεγάφωνα από μόνα τους παίζουν μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων αλλά σχεδόν πάντα δεν την παράγουν ολόκληρη εξίσου καλά και απαραμόρφωτα. Εκτός λοιπόν από το γεγονός ότι πρέπει εμείς να τους δώσουμε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων να αναπαράξουν, προκειμένου να έχουμε βέλτιστα αποτελέσματα, υπάρχει και ο κίνδυνος καταστροφής των μεγαφώνων αν κληθούν να αναπαράγουν συχνοτική περιοχή εκτός του φάσματος που προβλέπει ο κατασκευαστής τους.

Έτσι είναι μάλλον προφανές ότι χρειαζόμαστε ένα κύκλωμα το οποίο να διαχωρίζει τις συχνότητες και να στέλνει στα επιμέρους μεγάφωνα τις κατάλληλες συχνοτικές ομάδες. Στην πλειοψηφία των ηχείων το κύκλωμα αυτό αποτελείται από ηλεκτρονικά εξαρτήματα και λέγεται crossover.<sup>[9]</sup> Δηλαδή έχουμε τα κλασικά παθητικά εξαρτήματα της ηλεκτρονικής, ήτοι πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις, και μέσω των διαφορετικών εμπεδήσεων που προσφέρουν αυτά κάνουμε τη δουλειά μας.

Στο κεφάλαιο αυτό δεν υπάρχει ουσιαστικά κάποια αναγωγή μηχανικών μερών σε ηλεκτρονικά. Σε μια πρώτη προσέγγιση θεωρούμε το μεγάφωνο σαν μια ωμική αντίσταση με σταθερό μέτρο, για παράδειγμα 8 Ohm, και καλούμαστε να υπολογίσουμε τις τιμές των διαφόρων εξαρτημάτων που θα βάλουμε στο κύκλωμα. Η όλη λογική πίσω από το σχεδιασμό τέτοιων κυκλωμάτων είναι οι κανόνες τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff.

Θυμίζουμε εν συντομία από το πρώτο κεφάλαιο ότι το μέτρο της εμπίδησης ενός πηνίου αυξάνει καθώς αυξάνει η συχνότητα, ενώ αντίστροφα του πυκνωτή μειώνεται. Συνεπώς ο πυκνωτής καταναλώνει φαινομενικά πολύ ισχύ στις χαμηλές συχνότητες, απορροφώντας τες από το μεγάφωνο, με το οποίο έχει συνδεθεί σε σειρά. Ενώ από την άλλη το πηνίο που συνδέεται σε σειρά με ένα μεγάφωνο καταναλώνει περισσότερη ισχύ όσο ανεβαίνουν οι συχνότητες καταφέροντας έτσι την αποκοπή τους στο συγκεκριμένο μεγάφωνο.<sup>[4]</sup>

Η αποκοπή γίνεται επειδή στο μεγάφωνο εισέρχεται σήμα με χαμηλότερη ισχύ οπότε και αυτό με τη σειρά του παράγει ασθενέστερους ήχους στο συχνοτικό εύρος που έχει αποκοπεί.

## 4.2 Κατηγορίες των crossover

Οι κατηγορίες των crossover υπάρχουν έτσι ώστε να τα ξεχωρίζουμε και να καταλαβαίνουμε άμεσα και εύκολα τον ρόλο τους. Υπάρχουν κατηγορίες με βάση το συχνοτικό εύρος αποκοπής καθώς και με την ισχύ που είναι σχεδιασμένα να διαχειρίζονται.

### 4.2.1 Ενεργά και παθητικά crossover

Τα crossover που δουλεύουν με σήμα αρκετά ισχυρό ώστε να διεγείρει μεγάφωνα τα λέμε παθητικά. Η τοποθέτηση τους, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι μέσα στο ηχείο. Σε αυτό το στάδιο κατηγοριοποίησης έχουμε, εκτός από τα παθητικά, και τα ενεργά crossover.

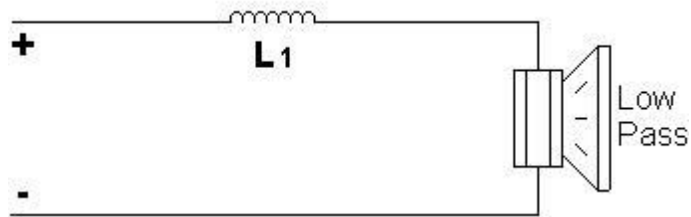
Σε αντίθεση με τα παθητικά, που πήραν το όνομα τους χάρη στα παθητικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούν, αυτά τα crossover έχουν και ενεργά ημιαγωγικά στοιχεία. Δουλεύουν με σήματα χαμηλής ισχύος και αποκόπτουν το σήμα πριν ενισχυθεί και φτάσει στην τελική του μορφή. Έτσι για να ενισχύσουμε όλο το συχνοτικό εύρος χρειαζόμαστε περισσότερες ενισχυτικές μονάδες και πιο συγκεκριμένα μια για κάθε δρόμο.

Η σχεδίαση ενός ενεργού φίλτρου διαχωρισμού συνήθως γίνεται μαζί με μια ή περισσότερες ενισχυτικές βαθμίδες και αποτελεί αντικείμενο μελέτης του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Επειδή το αντικείμενο της διπλωματικής είναι το ηχείο και ο κύριος αναγνώστης της είναι ο μηχανικός ήχου δεν θα πούμε περισσότερες λεπτομέρειες για τα ενεργά crossover. Οι επόμενες κατηγορίες αφορούν την κατηγοριοποίηση με βάση τις συχνότητες αποκοπής.

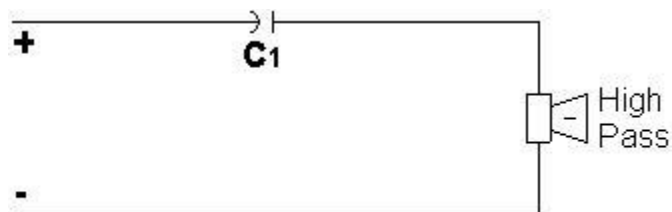
### 4.2.2 Κατηγοριοποιήσεις με βάση τον αριθμό των δρόμων

Είτε στα ενεργά είτε στα παθητικά crossover συναντάμε τους τρεις ακόλουθους τύπους με βάση το συχνοτικό εύρος που αποκόπτουν.

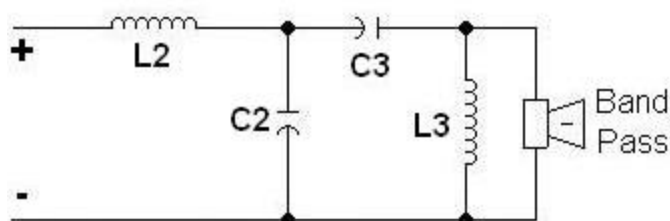
- **Χαμηλοπερατά [Low Pass (LPF)]:** Τα φίλτρα αυτά όπως δηλώνει και το όνομα τους αποκόπτουν τις υψηλές συχνότητες και επιτρέπουν την διέλευση στις χαμηλές. Ως συχνότητα αποκοπής ορίζεται η συχνότητα των -3 dB. Στις αποκομμένες συχνότητες το κύκλωμα αποκόπτει εκθετικά. Το πιο απλοϊκό φίλτρο τέτοιου τύπου είναι ένας πυκνωτής συνδεδεμένος παράλληλα με την αντίσταση, που θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει το μεγάφωνο. Στην περίπτωση μας πιο συχνά χρησιμοποιούμε ένα πηνίο σε σειρά με το μεγάφωνο.



- **Υψιπερατά [High Pass (HPF)]:** Εδώ έχουμε το αντίθετο φίλτρο το οποίο και επιτρέπει να διέλθουν συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής. Η τελευταία ορίζεται με τον ίδιο τρόπο και η αποκοπή είναι εξίσου ίδια με το χαμηλοπερατό φίλτρο. Στην πράξη ένα τέτοιο φίλτρο μπορεί να είναι ένας πυκνωτής σε σειρά με το μεγάφωνο μας ή ένα παράλληλα συνδεδεμένο πηνίο.



- **Ζωνοπερατά [Band Pass (BPF)]:** Το ζωνοπερατό φίλτρο είναι κάπως διαφορετικό από τα άλλα δύο και εν μέρει πιο πολύπλοκο. Πρακτικά το πιο απλό ζωνοπερατό φίλτρο είναι ένα κύκλωμα RLC. Στα κυκλώματα αυτά θυμίζουμε πως υπάρχει και ένας συντελεστής Q. Στην περίπτωση μας ο παράγοντας Q περιγράφει το εύρος ζώνης του φίλτρου και μάλιστα είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Υψηλό Q δίνει ένα στενό ή αλλιώς μικρό συχνοτικό εύρος διέλευσης ενώ αντίθετα το χαμηλό Q προσφέρει ένα πλατύτερο εύρος. Εκτός από το πολύ απλό, κυκλωματικά, φίλτρο RLC το ζωνοπερατό φίλτρο μπορεί γενικά να γίνει και από συνδυασμό ενός χαμηλοπερατού με ένα υψιπερατό.



Στην αρχή της υποενότητας αυτής είπαμε ότι χωρίζουμε τα crossover με βάση τους δρόμους της όλης μας κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα σε ένα δίδρομο ηχείο, τώρα που μάθαμε τα ονόματα τους, κάνουμε χρήση ενός χαμηλοπερατού

φίλτρου για τον δρόμο του woofers. Παράλληλα για τον δρόμο των υψηλών συχνοτήτων τοποθετούμε ένα υπερηχητικό φίλτρο.

Σε μια τρίδομη υλοποίηση τώρα, στην οποία έχουμε και δρόμο για τις μεσαίες συχνότητες κάνουμε χρήση και του ζωνοπερατού φίλτρου. Από εκεί και πέρα, σε υλοποιήσεις περισσότερων δρόμων πάλι χρησιμοποιούμε ένα χαμηλοπερατό, ένα υπερηχητικό και περισσότερα του ενός ζωνοπερατά.

Πέρα από τις μέχρι τώρα κατηγοριοποιήσεις θα αναφέρουμε στην επόμενη υποενότητα και τον διαχωρισμό των φίλτρων με βάση την κλίση αποκοπής. Δηλαδή δεν αποκόπτουν όλα τα χαμηλοπερατά φίλτρα, για παράδειγμα, το ίδιο απότομα. Παρακάτω θα δούμε τις διάφορες τάξεις των φίλτρων.

#### 4.2.3 Κλίσεις αποκοπής

Όπως προαναφέραμε τα φίλτρα ανάλογα με το πόσο απότομα φιλτράρουν τις συχνότητες χωρίζονται σε τάξεις.<sup>[32]</sup> Την τάξη του φίλτρου την μετράμε από την εξασθένιση που έχει υποστεί μια συχνότητα διπλάσια ή δεκαπλάσια μιας άλλης, η οποία βρίσκεται, και αυτή, πέρα από την συχνότητα αποκοπής.<sup>[32]</sup>

Δηλαδή, έστω ότι έχουμε χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής,  $f_c = 1000$  Hz. Αν το φίλτρο αυτό είναι πρώτης τάξης τότε η συχνότητα των 5000 Hz θα είναι εξασθενημένη κατά 20 dB σε σχέση με την συχνότητα των 1000 Hz και αντίστοιχα οι ήχοι με συχνότητα 10000 Hz θα διέρθουν από το φίλτρο αυτό εξασθενημένοι κατά 6 dB.

Θυμίζουμε εδώ πως κάθε οκτάβα περιέχει συχνότητες από μια δεδομένη συχνότητα μέχρι την διπλάσια αυτής. Παράλληλα δεκάδα θα ορίζουμε το διάστημα από μια συχνότητα μέχρι την δεκαπλάσια αυτής.

Πέρα από τις τάξεις των φίλτρων, τα φίλτρα αναλόγως με το τι κάνουν γύρω από τη συχνότητα αποκοπής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και με βάση τα μοντέλα ευθυγράμμισης, για τα οποία είχαμε μιλήσει στο τρίτο κεφάλαιο. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω είμαστε σε θέση να δώσουμε τους ορισμούς για την εκάστοτε τάξη φίλτρων.

- Φίλτρο πρώτης τάξης είναι αυτό που πέρα της συχνότητας αποκοπής οι συχνότητες εξασθενούν με 6 dB/oct ή με 20 dB/dec. Γύρω από τη συχνότητα αποκοπής όλα τα φίλτρα πρώτης τάξης έχουν ευθυγράμμιση τύπου Butterworth. Αυτό σημαίνει ότι το κέρδος της ωφέλιμης συχνοτικής περιοχής είναι όσο το δυνατόν πιο ίδιο.
- Φίλτρο δεύτερης τάξης είναι αυτό στο οποίο η εξασθένιση αγγίζει τα 12 dB/oct ή αλλιώς τα 40 dB/dec. Εδώ, σε αντίθεση με τα φίλτρα πρώτης τάξης, μπορούμε να έχουμε διάφορες ευθυγραμμίσεις. Έχουμε λοιπόν την Butterworth, καθώς επίσης και την Bessel, η οποία βελτιστοποιεί την



κρουστική απόκριση. Πέραν αυτών όμως έχουμε στα φίλτρα αυτά μια νέα ευθυγράμμιση, ονόματι Linkwitz-Riley (L-R). Ουσιαστικά η ευθυγράμμιση αυτή μοιάζει αρκετά με την Butterworth. Η διαφορά, όχι μόνο σε σχέση με ένα Butterworth φίλτρο, αλλά σε σχέση και με τα άλλα φίλτρα, έγκειται στο ότι η συχνότητα αποκοπής είναι εξασθενημένη κατά 6 dB αντί για 3 dB. Στην πράξη αυτό γίνεται συνδυάζοντας δύο φίλτρα πρώτης τάξης Butterworth, τα οποία έχουν κέρδος -3 dB στην συχνότητα αποκοπής. Το πλεονέκτημα του φίλτρου L-R είναι ότι αν συνδυάσουμε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με ένα υψηλοπερατό με την ίδια συχνότητα αποκοπής τότε σε αυτή τη συχνότητα το άθροισμα των δύο φίλτρων θα είναι 0 dB.<sup>[32]</sup> Διαφορετικά θα είχαμε κέρδος 3 dB. Στα ηχεία προκειμένου να αναπαράξουμε όλο το ακουστικό φάσμα συχνοτήτων συνδυάζουμε τους δρόμους του εκάστοτε ηχείου. Στην συχνότητα αποκοπής δηλαδή παίζουν αμφότεροι οι δρόμοι. Το παραγόμενο αποτέλεσμα είναι άθροισμα των δύο αυτών, γύρω από τη συχνότητα αποκοπής. Και για ένα ηχείο υψηλής πιστότητας μας νοιάζει να είναι στο ίδιο κέρδος όλο το συχνοτικό φάσμα.

- Μετά τα φίλτρα δεύτερης τάξης ακολουθούν τα φίλτρα τρίτης τάξης στα οποία η εξασθένηση φθάνει τα 18 dB/oct ή τα 60 dB/dec. Τα φίλτρα αυτά είναι συνήθως τύπου Butterworth και έχουν αρκετές ομοιότητες με τα φίλτρα πρώτης τάξης. Μια από τις ομοιότητες είναι και η συμπεριφορά, ή μάλλον καλύτερα, η αλλαγή φάσης στην συχνότητα αποκοπής. Πιο συγκεκριμένα οι δύο δρόμοι που αποκόπτονται στην συχνότητα αποκοπής τους δεν έχουν φασική διαφορά 180 μοιρών, δεν είναι δηλαδή σε αντίθετη φάση, πράγμα το οποίο είναι καλό. Αυτό, με την αντίθετη φάση, συμβαίνει μόνο στα φίλτρα δεύτερης τάξης, τουλάχιστον από αυτά που συναντάμε στα ηχεία. Για τα τελευταία, προκειμένου να καταπολεμηθεί το πρόβλημα συνδέουμε εντέλει ολόκληρο τον δρόμο, συνήθως αυτόν του tweeter ή του midrange, αν υπάρχει, με αντίθετη φάση. Έτσι στην συχνότητα αποκοπής οι φάσεις των δρόμων συμβαδίζουν.

Πέρα από αυτές τις τρεις τάξεις που συναντάμε κατά κόρον στα crossover των ηχείων υπάρχουν και μεγαλύτερες τάξεις φίλτρων με τα dB εξασθένησης να αυξάνονται αντίστοιχα. Από αυτές τις τάξεις η πιο διαδεδομένη είναι η τέταρτη τάξη με 24 db/oct. Αυτές οι τάξεις πάντως όπως είπαμε σπανίζουν, αφενός επειδή δεν χρειαζόμαστε τόσο μεγάλη αποκοπή και αφετέρου επειδή παρουσιάζουν ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην σχεδίαση και στην κατασκευή τους.

Από εκεί και πέρα τώρα τα όσα είπαμε μέχρι εδώ έχουν μεν ενδιαφέρον αλλά κυρίως εγκυκλοπαιδικού χαρακτήρα. Με την βοήθεια των σημερινών υπολογιστών μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα φίλτρο όπως το θέλουμε ώστε να ταιριάζει τέλεια στο μεγάφωνο μας και γενικότερα στο ηχείο μας.

### 4.3 Σχεδιασμός φίλτρων με την χρήση υπολογιστή

Όπως και στην σχεδίαση της καμπίνας έτσι και εδώ μπορούμε να κάνουμε χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Mat lab. Οι κώδικες που χρειάζονται για τον σχεδιασμό ενός ηχείου είναι σχετικά απλοί με αποτέλεσμα κάθε υπολογιστής του σήμερα να μπορεί να τους φέρει εις πέρας.

Πριν πάμε όμως στον ίδιο τον κώδικα, θα δώσουμε λίγες επεξηγήσεις σχετικά με τα εξαρτήματα. Όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο τα παθητικά εξαρτήματα έχουν μια μορφή εμπέδησης το καθένα. Έτσι μπορούμε να τα συνδυάσουμε μέσα σε ένα κύκλωμα για να πετύχουμε την εμπέδηση που θέλουμε ή με άλλα λόγια την συνάρτηση μεταφοράς που θέλουμε. Εμείς λοιπόν στην Mat lab σχεδιάζουμε συναρτήσεις μεταφοράς και μετά απαρτίζουμε το crossover με τα εξαρτήματα που χρειάζεται.

Για το πηνίο λοιπόν η συνάρτηση μεταφοράς, που είναι όμοια της εμπέδησης του, είναι της μορφής

$$H_L(s) = L s$$

Με  $s$  ορίζουμε τον όρο  $\sigma + j\omega$ . Για τον ιδανικό πηνίο δεν έχουμε  $\sigma$ , καθώς αυτό πρεσβεύει τις απώλειες. Στην πράξη έχουμε πει πως τις απώλειες του πηνίου τις συμπεριλαμβάνουμε μέσα σε μια αντίσταση του κυκλώματος που είναι σε σειρά με το πηνίο. Στους υπολογισμούς μας εν τέλει, τόσο στο πηνίο όσο και στον πυκνωτή, θα ισχύει  $s = j\omega$ .

Για τον πυκνωτή τώρα με βάση την χωρητική αντίσταση του  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$  θα προκύψει και η συνάρτηση μεταφοράς

$$H_C(s) = \frac{1}{C s}$$

Τέλος αφού η αντίσταση έχει σταθερή εμπέδηση σε συνάρτηση με τη συχνότητα η συνάρτηση μεταφοράς της είναι  $H_R(s) = R$ .

Για την συνδεσμολογία στοιχείων σε σειρά οι συναρτήσεις μεταφοράς προστίθενται ενώ για παράλληλη σύνδεση πολλαπλασιάζονται. Επίσης αφού βρούμε την όλη συνάρτηση μεταφοράς, στο τέλος βάσει κανόνων του Kirchhoff, υλοποιούμε την συνάρτηση του φίλτρου. Αυτή είναι κλάσμα με αριθμητή την αντίσταση του μεγαφώνου και παρανομαστή την όλη συνάρτηση που βρήκαμε λίγο πιο πριν. Πιο αναλυτικά και με περισσότερη κατανόηση θα τα δούμε όλα αυτά στο δείγμα κώδικα που ακολουθεί.

```

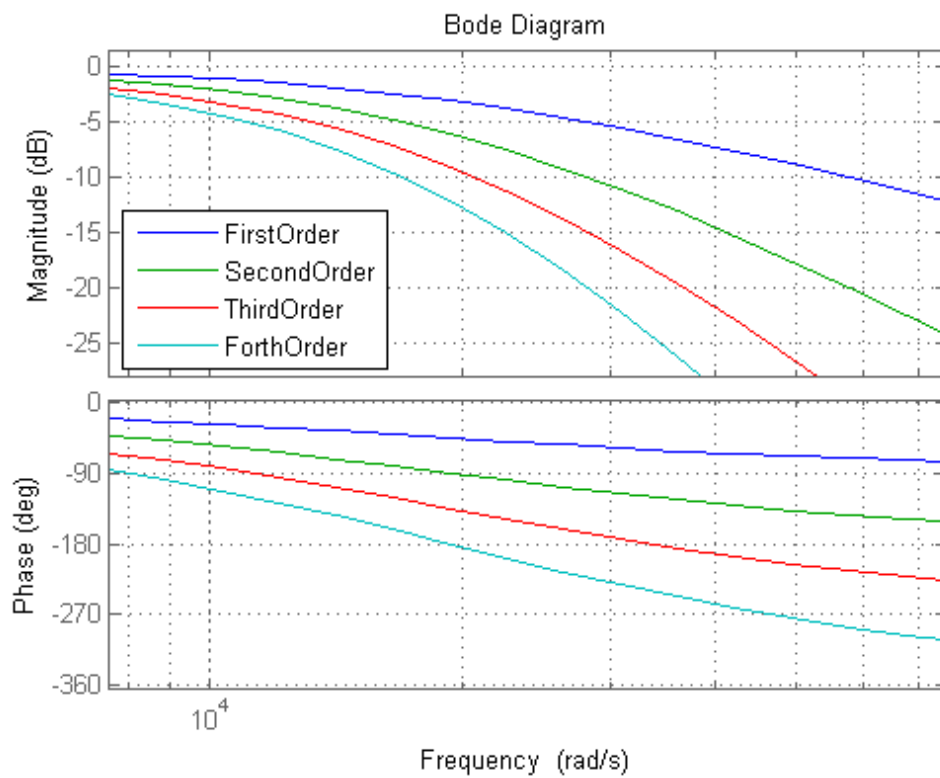
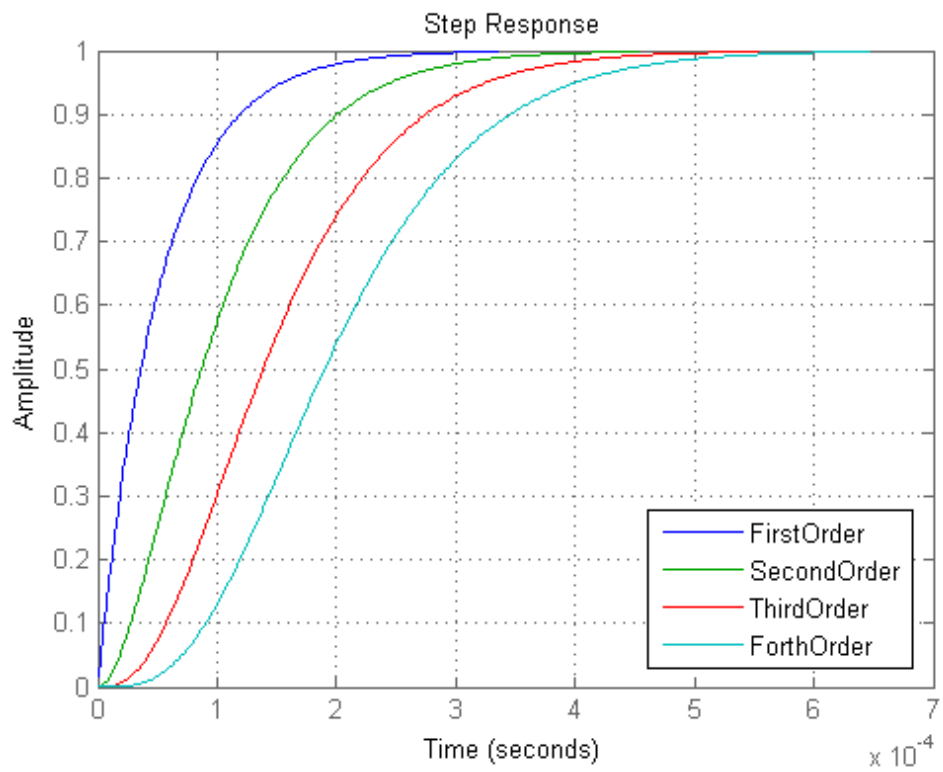
close all %Κλείνει όλες τις προηγούμενες εργασίες από
άλλα προγράμματα
clear all %Καθαρίζει τις μνήμες και τις παραμέτρους από
προηγούμενες εκτελέσεις
R=5.8; %Είναι η ωμική αντίσταση του μεγαφώνου εκφρασμένη
σε Ohm
L=0.3*10.^(-3); %Το πηνίο του κυκλώματος συνδεδεμένο σε
σειρά με το μεγάφωνο. Η τιμή του εκφράζεται σε H.
lpf=tf([0 R],[L R]); %Η εντολή αυτή μας δίνει τη
συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου
figure('name','Step','numbertitle','off'); %Δημιουργεί
ένα νέο παράθυρο με τις προεπιλεγμένες τιμές ιδιοτήτων
και με όνομα όπως αυτό της παρένθεσης
hold on %Κρατάει το παράθυρο ανοιχτό και όλα τα γραφήματα
ενσωματώνονται σε αυτό
step(lpf); %Δημιουργεί τις κρουστικές αποκρίσεις όσων
συναρτήσεων είναι στην παρένθεση και τις απεικονίζει στο
παράθυρο
hold off %Κλείνει το παράθυρο ή καλύτερα δεν το κρατάει
ανοιχτό. Το όποιο νέο γράφημα θα παρουσιαστεί στο δικό
του νέο παράθυρο
grid on; %Εμφανίζει το παράθυρο με πλέγμα
figure('name','Bode','numbertitle','off'); %Ίδια
λειτουργία με πριν
hold on %Ίδια λειτουργία με πριν
bode(lpf); %Δημιουργεί σε διαγράμματα Bode το εύρος
συχνοτήτων και τις φάσεις των συναρτήσεων μεταφοράς που
είναι μέσα στην παρένθεση. Επίσης τις απεικονίζει στο
παράθυρο
grid on %Ίδια λειτουργία με πριν

```

Με τον παραπάνω κώδικα λοιπόν είμαστε σε θέση να δούμε τόσο την κρουστική απόκριση όσο και το διάγραμμα bode ενός απλού φίλτρου πρώτης τάξης, που στην περίπτωση μας απαρτίζεται από ένα μόνο πηνίο και την ενσωματωμένη αντίσταση του μεγαφώνου.

Με παρόμοιο τρόπο φτιάχνουμε και φίλτρα μεγαλύτερης τάξης. Εδώ χρειάζεται λίγη προσοχή διότι το ίδιο το φίλτρο έχει ιδιοταλάντωση στην συχνότητα αποκοπής. Η ιδιοταλάντωση αυτή πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλό συντελεστή ποιότητας, πιο κάτω από 0.8 και ιδανικά κοντά στο 0.5, ώστε το φίλτρο να έχει ομαλό κέρδος στην ωφέλιμη περιοχή συχνοτήτων και η κρουστική απόκριση να είναι ομαλή χωρίς overshoot και ringing.

Θα δείξουμε πιο κάτω εικόνες, τόσο της κρουστικής απόκρισης, όσο και του διαγράμματος bode, για φίλτρα διαφόρων τάξεων. Συνοψίζοντας δεν υπάρχει γενικά κάποιο φίλτρο που να είναι το πιο κατάλληλο. Το κάθε ένα έχει τις ιδιαιτερότητες του και ανάλογα την περίπτωση εμείς οφείλουμε να κρίνουμε πιο μας ταιριάζει.



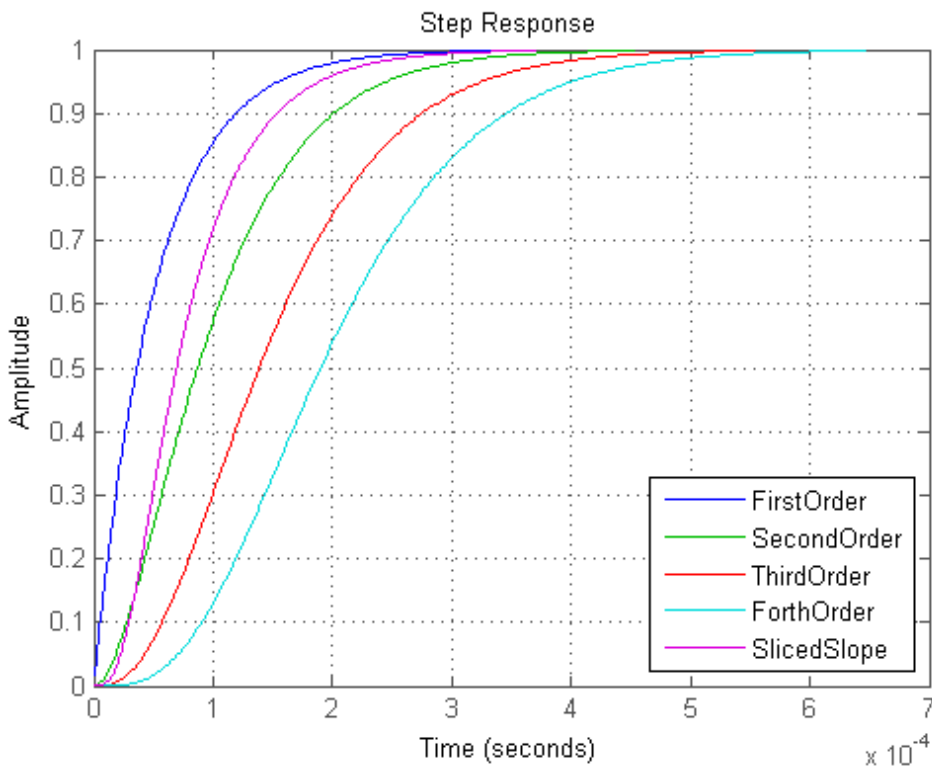
#### 4.4 Crossover μεταβλητής κλίσης και ταίριασμα των φίλτρων

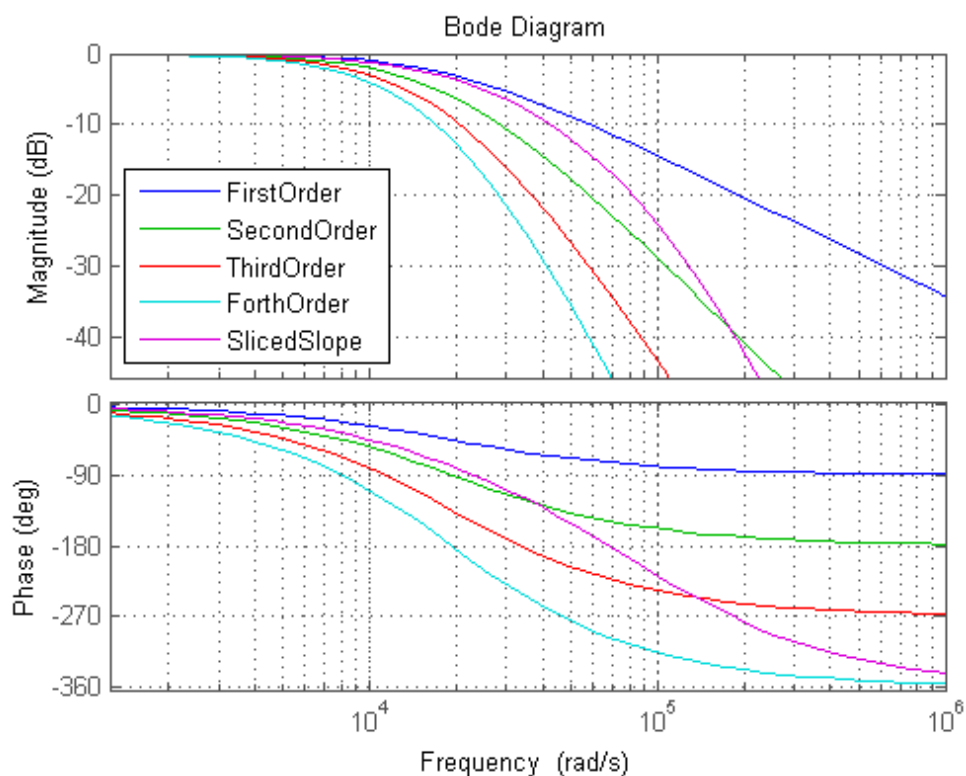
Με τη βοήθεια του υπολογιστή μπορούμε πλέον να σχεδιάσουμε ένα φίλτρο στα μέτρα μας. Έτσι δεν είναι ανάγκη να ακολουθήσουμε μια πεπατημένη οδό και να φτιάξουμε ένα crossover που να ανήκει σε μια από τις κατηγορίες της ενότητας 4.2. Αντιθέτως με βάση πλέον το megáfwno που έχουμε σχεδιάζουμε ένα φίλτρο στα μέτρα του.

Πέρα από αυτό μπορούμε πλέον να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα διαφόρων τάξεων. Για παράδειγμα η πρώτη τάξη έχει ήπια, αλλά ομαλή αποκοπή με μικρή μετατόπιση φάσης και γρήγορη κρουστική απόκριση. Από την άλλη χρειαζόμαστε τις μεγαλύτερες κλίσεις για να αποκόψουμε αποτελεσματικά το megáfwno, ώστε αυτό να μην κινδυνεύει να καεί ή να μην παραμορφώνει αισθητά.

Δημιουργήθηκαν έτσι τα φίλτρα μεταβλητής κλίσης, τα οποία αποκόπτουν συνήθως με χαμηλή κλίση από τη συχνότητα αποκοπής μέχρι μια άλλη δεδομένη συχνότητα και στη συνέχεια πέραν αυτής της δεδομένης συχνότητας η αποκοπή γίνεται με μεγαλύτερη κλίση.

Ο σχεδιασμός αυτού του crossover γίνεται με τον σχεδιασμό των δύο επιμέρους φίλτρων και στο τέλος γίνεται η σύνθεση τους. Δηλαδή στην Mat lab σχεδιάζουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς των δύο φίλτρων και στην συνέχεια τις πολλαπλασιάζουμε. Θα δούμε παρακάτω ένα τέτοιο φίλτρο, σε σύγκριση μάλιστα με τα τέσσερα που είδαμε παραπάνω.





Το παραπάνω φίλτρο μεταβλητής κλίσης ή αλλιώς τεμαχισμένης, όπως έχει επικρατήσει να λέγεται παγκόσμια, είναι ένα από τα πολλά πιθανά που μπορούν να σχεδιασθούν. Επίσης κάποια από τα όσα μπορούν να υπάρξουν είναι και τα υπόλοιπα φίλτρα. Απλώς απεικονίζουμε κάποιες εικόνες εδώ για καλύτερη κατανόηση.

Μέχρι τώρα έχουμε σχεδιάσει μόνο χαμηλοπερατά φίλτρα. Η μελέτη και η σχεδίαση των άλλων φίλτρων, όπως λόγου χάρη των υψιπερατών, δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα. Ένα σημείο προσοχής πάντως είναι το λεγόμενο ταίριασμα μεταξύ των φίλτρων.

Ως γνωστόν το κάθε φίλτρο αποτελεί μαζί με το μεγάφωνο που συνδέεται ένα δρόμο. Ο δρόμος αυτός θα αναπαράξει ένα μέρος του ηχητικού φάσματος. Επειδή όμως το φάσμα ολόκληρο θα πρέπει να αναπαραχθεί ομοιόμορφα καλούμαστε να σχεδιάσουμε τα φίλτρα ώστε να συμπληρώνει το ένα το άλλο.

Οι δρόμοι παίζουν παράλληλα και το αποτέλεσμα τους είναι το άθροισμα. Απλώς δηλαδή προσθέτουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς των δύο φίλτρων. Πέρα από τη σχεδίαση των φίλτρων χρειάζεται να έχουμε και μια εικόνα για την απόκριση συχνοτήτων του μεγαφώνου ώστε να υπολογίσουμε συνολικά την απόκριση του κάθε δρόμου και να τον ταιριάξουμε καλύτερα με τους άλλους δρόμους. Σχεδόν όλα τα έτοιμα μεγάφωνα έχουν μια εικόνα με το συχνοτικό τους διάγραμμα, αλλά το ιδανικό είναι να μετρήσουμε την απόκριση του μεγαφώνου που μας ενδιαφέρει και να δημιουργήσουμε έτσι την ολική συνάρτηση μεταφοράς του κάθε δρόμου.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

#### 5.1 Συνοπτική περιγραφή των ιδεών και των εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα ηχείο

Όπως είναι πλέον γνωστό το ηχείο είναι μια από τις πολλές εφαρμογές του διεπιστημονικού κλάδου της ηλεκτροακουστικής. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η μελέτη τόσο των στοιχειωδών ηλεκτρονικών όσο και της ακουστικής.

Σκοπός του ηχείου είναι να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική. Προκειμένου να γίνει αυτό εκμεταλλευόμαστε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού σύμφωνα με τους οποίους, ένας ρευματοφόρος αγωγός ευρισκόμενος μέσα σε μαγνητικό πεδίο τείνει να κινηθεί. Τα μεγάφωνα υλοποιούν στην πράξη την ιδέα αυτή. Διαθέτουν μαγνήτη, ώστε να δημιουργηθεί το μόνιμο σταθερό μαγνητικό πεδίο. Μέσα στο πεδίο αυτό βρίσκεται το πηνίο που στα άκρα του εφαρμόζεται η τάση και έτσι διαρρέεται από ρεύμα. Το πηνίο είναι προσκολλημένο στον κώνο του μεγαφώνου και η όλη διάταξη αναρτάται στο σασί του μεγαφώνου. Συνεπώς ο κώνος ταλαντώνεται δημιουργώντας στον αέρα πυκνώματα και αραιώματα, ή με άλλα λόγια δημιουργείται διάμηκες κύμα.

Ουσιαστικά λοιπόν τα μεγάφωνα παίζουν τον κύριο ρόλο στο αποτέλεσμα ενός ηχείου. Παρ'όλα αυτά επειδή τα μεγάφωνα εκπέμπουν διπολικά στον χώρο το αποτέλεσμα είναι η ακύρωση του παραγόμενου ήχου, εκτός και αν με κάποιο τρόπο καταφέρουμε να απομονώσουμε τα δύο αντίθετα κύματα.

Σε αυτό το σημείο λοιπόν υπεισέρχεται η αναγκαιότητα χρήσης της καμπίνας, πέρα από τον προφανή λόγο στήριξης των μεγαφώνων. Έτσι λοιπόν οι καμπίνες που παρουσιάστηκαν και κυριάρχησαν μισό αιώνα πριν είχαν ως κύριο στόχο την απομόνωση και τελικώς την απόσβεση της οπίσθιας, όπως λέμε, ακτινοβολίας του μεγαφώνου. Δεδομένου πάντως ότι η οπίσθια ακτινοβολία μεταφέρει ενέργεια εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι αυτές οι καμπίνες χαρακτηρίζονται από χαμηλή ευαισθησία. Με τον όρο χαμηλή ευαισθησία εννοούμε ότι για δεδομένη ηλεκτρική ενέργεια έχουμε χαμηλή παραγόμενη ηχητική στάθμη. Πέρα από αυτό το μειονέκτημα και αυτό του μεγάλου χώρου οι καμπίνες αυτές, που τις λέμε τύπου ακουστικής ανάρτησης, έχουν κάποια άλλα χαρίσματα, κυρίως στην ηχητική ποιότητα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται και σήμερα.

Αργότερα και κυρίως μετά τη δεκαετία του '90 γινόταν όλο και πιο δημοφιλής ένας νέος τύπος καμπίνας, ονόματι bass reflex, που σήμερα κυριαρχεί στην αγορά και έχει την πολύ χρήσιμη ιδιότητα να επανεκπέμπει την οπίσθια ακτινοβολία. Με τέτοιες καμπίνες λοιπόν είμαστε σε θέση να παράξουμε μεγαλύτερη ηχητική στάθμη ή πιο χαμηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος

από ένα δεδομένο μέγεθος καμπίνας, συγκριτικά πάντα με τον τύπο ακουστικής ανάρτησης. Πέρα από αυτά τα δύο είδη καμπίνας, που είναι τα δημοφιλέστερα έχουμε και άλλες σχεδιάσεις κατά καιρούς που για διαφορετικούς λόγους η κάθε μια δεν κατάφεραν να κερδίσουν την αγορά.

Τέλος, επειδή κανένα μεγάφωνο δεν είναι ικανό να αναπαράξει σωστά όλο το συχνοτικό φάσμα, χρησιμοποιούμε κάποια ηλεκτρονικά κυκλώματα, προκειμένου να διαχωρίσουμε το εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει σε μικρότερα μέρη. Τα κυκλώματα αυτά τα αποκαλούμε crossover. Για την υλοποίηση ενός σωστού crossover πρέπει να εστιάσουμε σε δύο σημεία. Πρώτο σημείο είναι ο σωστός σχεδιασμός ενός τέτοιου φίλτρου. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύουμε όλα τα σημεία ώστε να σχεδιασθεί ένα crossover με τη βοήθεια του υπολογιστή και πιο συγκεκριμένα με το πρόγραμμα Mat Lab.

Για όσους πάντως δεν νιώθουν ασφαλείς με τη χρήση της Mat Lab ή δεν κατέχουν τα δικαιώματα χρήσης της, μπορούν να κάνουν τους σχεδιασμούς διαφορετικά. Τόσο για την καμπίνα όσο και για το crossover υπάρχουν διάφορα άλλα έτοιμα προγράμματα, μερικά εκ των οποίων θα αναφέρουμε στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Δεύτερο σημείο που αξίζει την προσοχή σε ένα crossover είναι η ποιότητα των υλικών του. Θυμίζουμε εδώ πως στην ποιότητα κυρίαρχο ρόλο παίζουν τα μεγάφωνα. Όμως τα μεγάφωνα όσο καλά και αν είναι θα αναπαράξουν το σήμα που θα δεχτούν. Συνεπώς θα πρέπει τα εξαρτήματα του crossover να είναι υλικά μικρής ανοχής, προκειμένου οι αποκοπές να γίνονται όπως έχουν σχεδιασθεί και στο πρόγραμμα. Επιπλέον θα πρέπει τα αγώγιμα και μονωτικά υλικά που συναντάμε μέσα στα εξαρτήματα να είναι καλής ποιότητας. Με τον όρο καλή ποιότητα εννοούμε να μην έχουν διάφορες προσμίξεις μέσα τους ακόμα και σε μοριακό επίπεδο. Το ίδιο ισχύει και για τα καλώδια που θα χρησιμοποιήσουμε τα οποία θα πρέπει να είναι από χαλκό καθαρότητας ίσης ή μεγαλύτερης από 99,99%.

Χωρίς να δώσουμε πολλές λεπτομέρειες θα προσπαθήσουμε απλώς με ένα παράδειγμα να εξηγήσουμε τι συμβαίνει με ένα εξάρτημα που έχει ατέλειες. Με τον όρο ατέλεια εννοούμε ότι μέσα στην κρυσταλλική δομή του υλικού αντί για ένα μόριο του υλικού μας έχουμε κάποιο άλλο μόριο. Το μόριο αυτό έχει άλλες ιδιότητες από το υλικό μας. Μια από αυτές τις ιδιότητες είναι και η ειδική του αντίσταση. Αν τώρα υποθέσουμε πως έχουμε ένα σήμα πολύ μικρής τάσης, ικανό πάντως να αποκολλήσει ηλεκτρόνια από τον αγωγό μας, τότε θεωρητικά διέρχεται ρεύμα, αλλά στην πράξη μπορεί τα ηλεκτρόνια με ένα τόσο αμυδρό σήμα να μην είναι σε θέση να ξεπεράσουν το δυναμικό ενός διαφορετικού μορίου. Μετρητικά ένα καλώδιο ή ένα εξάρτημα που απαρτίζονται από κακούς αγωγούς ή και μονωτές έχουν την τάση να εμφανίζουν αυξημένο θόρυβο, λόγω αυτής της ιδιότητας που είπαμε πιο πριν, δηλαδή να μην αναπαράγουν ή να αλλοιώνουν αισθητά τα ασθενή σήματα.



## 5.2 Περιγραφή και μελέτη έτοιμων προγραμμάτων σχεδίασης

Στην παρούσα διπλωματική είδαμε πως μπορεί να γίνει η σχεδίαση ενός ηχείου από σχεδόν λευκό χαρτί. Δεδομένου πάντως ότι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια, αφού αισίως βρισκόμαστε στο 2018, έχουν υπάρξει και άλλες ανταγωνιστικές υλοποιήσεις. Με τον όρο υλοποιήσεις εννοούμε προγράμματα, κώδικες για το Microsoft Excel ή ακόμα και ιστοσελίδες που παρέχουν κάποια σχεδιαστικά εργαλεία και υπολογισμούς.

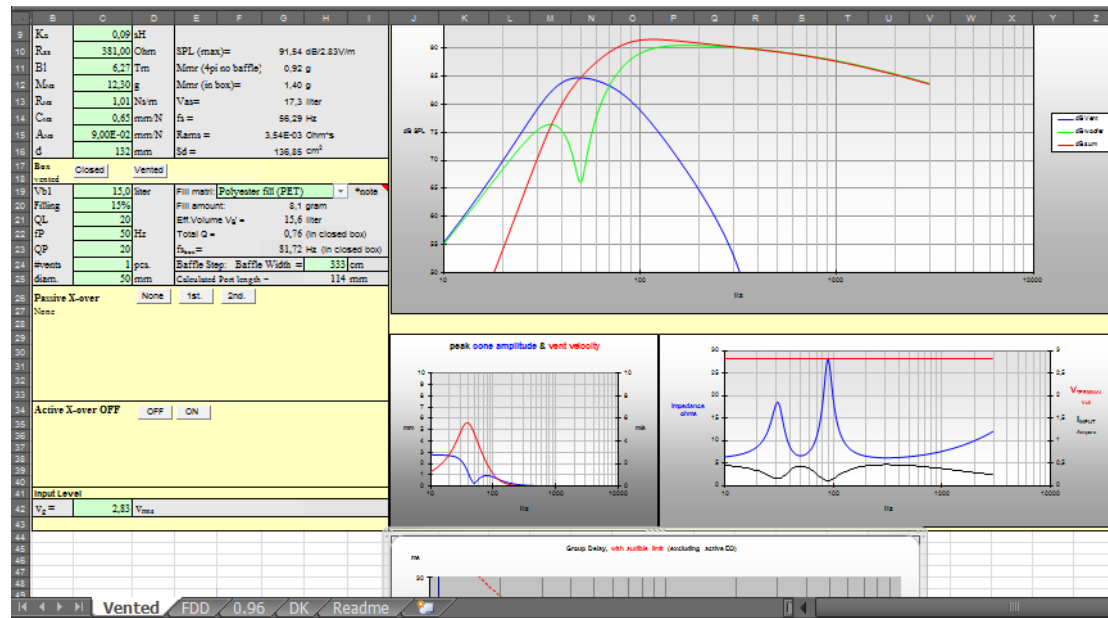
Ξεκινώντας αντίστροφα με τις ιστοσελίδες αναφέρουμε την [www.mhaudio.nl](http://www.mhaudio.nl) η οποία προσφέρει σχεδόν κάθε υπολογιστικό τύπο για κάθε μέρος του ηχείου. Όσον αφορά τις καμπίνες προσφέρει υπολογισμούς και για καμπίνα ακουστικής ανάρτησης και για καμπίνα bass reflex. Επιπλέον, όσον αφορά τα crossover είναι επίσης σχετικά πλήρης για όλα τα κανονικά φίλτρα. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι αν θέλει κάποιος να κάνει μια σχεδιαστική καινοτομία δεν μπορεί να το κάνει μέσα από τους υπολογιστές αυτής της ιστοσελίδας, κάτι το οποίο είναι εντελώς αναμενόμενο.

Περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, τουλάχιστον όσον αφορά την σχεδίαση της καμπίνας, μπορεί να βρει κανείς μέσα από άλλα προγράμματα όπως αυτό που θα σχολιάσουμε παρακάτω. Ουσιαστικά δεν μιλάμε για ξεχωριστό πρόγραμμα αλλά για ένα αρχείο excel με γραμμένους κώδικες στη γλώσσα visual basic. Το αρχείο το διαθέτει δωρεάν η γνωστή εταιρεία μεγαφώνων, ονόματι Scanspeak, στην ιστοσελίδα της. Καθώς το πρόγραμμα περιέχει εισαγωγή όλων των παραμέτρων Thiele/Small για το μεγάφωνο και παρέχει επίσης όλες τις παραμέτρους για την σχεδίαση μιας καμπίνας δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να πειραματισθεί κυριολεκτικά με τις ώρες. Ο γράφων δεν αποτέλεσε εξαίρεση αφού δούλεψε αρκετά με το εν λόγω αρχείο.

Μάλιστα πολλές φορές τρέξαμε με τα ίδια δεδομένα για το μεγάφωνο και την καμπίνα τόσο στη Mat Lab όσο και στο excel και είδαμε πολύ καλή ταύτιση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Μέσα στο αρχείο παρέχεται επίσης και η επιλογή για προσθήκη φίλτρου αποκοπής. Ωστόσο ο υπολογισμός και η απεικόνιση σταματούν στα 3 kHz πράγμα το οποίο κάνει το excel αυτό κατάλληλο για woofer και τα αντίστοιχα βαθυπερατά φίλτρα τους.

Μια τελευταία λεπτομέρεια που κάνει το αρχείο αυτό να μονοπωλεί είναι ότι εκτός από τις παραμέτρους Thiele/Small δέχεται και κάποιες άλλες προηγμένες που η εταιρεία τις αποκαλεί Scanspeak advanced FDD parameters. Κατά πάσα πιθανότητα οι παράμετροι αυτές αποτελούν ευρεσιτεχνία της εταιρείας και, τουλάχιστον από τις εταιρείες μεγαφώνων που έχουμε δει, μόνο η ίδια δίνει αυτές τις παραμέτρους για τα μεγάφωνα της. Μαζί με τις παραμέτρους ευτυχώς δίνει και επεξηγηματικό σχεδιάγραμμα. Έτσι εκτός από το εν λόγω έτοιμο αρχείο υπολογισμού μπορεί κανείς να σχεδιάσει σε όποιο προγραμματιστικό πρόγραμμα θέλει ένα κώδικα ώστε να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις ιδιότητες του

μεγαφώνου. Πάντως είναι ένα μεγάλο συν για το αρχείο το ότι έχει αυτόν τον μοναδικό τύπο παραμέτρων που όπως είπαμε και στην αρχή το κάνει να μονοπωλεί για όποιον σκέφτεται να εργαστεί με μεγάφωνα της εταιρείας. Πριν κλείσουμε με το αρχείο αυτό θα δώσουμε και μια εικόνα του από το αρχικό περιβάλλον χρήσης του.



Αυτά που είδαμε και αναλύσαμε εδώ είναι λίγα από τα όσα κυκλοφορούν, αν και παίζει να είναι από τα πιο ικανά για όποιον διαθέτει και τις απαραίτητες γνώσεις βέβαια.

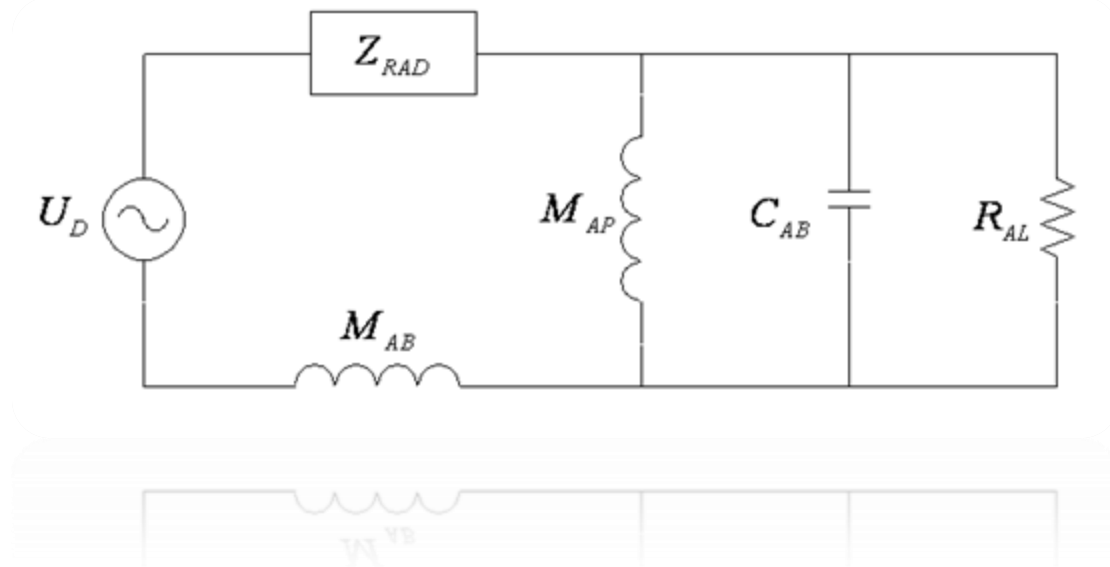
Ένα άλλο εξίσου ικανό πρόγραμμα, και με ακόμα περισσότερες παραμέτρους ενδεχομένως, είναι το Basta. Δυστυχώς πλέον δεν λαμβάνει υποστήριξη αλλά τουλάχιστον διατίθεται δωρεάν η πλήρης έκδοση του. Κατά τα γνωστά μπορούμε και εδώ να εισάγουμε τις παραμέτρους ενός μεγαφώνου και να σχεδιάσουμε καμπίνια, crossover και ότι άλλο χρειαζόμαστε. Για παράδειγμα μας απεικονίζει ακόμα και τη μπάφλα του ηχείου ώστε να δούμε τις μικρό διαφοροποιήσεις ανάλογα με το που τοποθετούμε τα μεγάφωνα σε αυτήν. Ή επιπλέον αν θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα ηχείο αποκλειστικά για ένα δεδομένο χώρο τότε μπορούμε να συμπεριλάβουμε και το κέρδος του δωματίου στο τελικό αποτέλεσμα. Επιγραμματικά θα λέγαμε ότι το Basta είναι ένα ενδιαφέρον πρόγραμμα με ιδιαίτερες ευκολίες, για τις οποίες πάντως δεν υπήρξαν οι πόροι προκειμένου να κατασκευαστούν πειραματικά μοντέλα και να δοκιμαστούν στην πράξη όλες αυτές οι ιδιαιτερότητες. Μένει λοιπόν προς μελλοντική έρευνα κατά πόσο το πρόγραμμα είναι αληθές, πράγμα το οποίο ισχύει λίγο πολύ για όλα τα προγράμματα που αναφέρθηκαν εδώ. Επιπρόσθετο μειονέκτημα είναι ότι δουλεύει μόνο με τις παραμέτρους Thiele/Small.

Τέλος, ένα γενικότερο μειονέκτημα όλων των παραπάνω προγραμμάτων είναι το γεγονός πως είναι προσαρμοσμένα στις συνηθεις σχεδιάσεις ηχείων.

### 5.3 Εισαγωγή στην καμπίνα απωλειών και στο crossover άπειρης κλίσης

Στην προηγούμενη σελίδα κατακρίναμε την αδυναμία των προγραμμάτων να δώσουν τη δυνατότητα σχεδιασμού ενός νέου και καινοτόμου πράγματος. Τέτοιες πιθανές καινοτομίες θα συζητήσουμε σε αυτή την ενότητα οι οποίες και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

Όσον αφορά την καμπίνα ενός ηχείου οφείλουμε να θυμηθούμε κάποια πράγματα από το τρίτο κεφάλαιο. Θα δώσουμε και μια εικόνα για περισσότερη σαφήνεια.

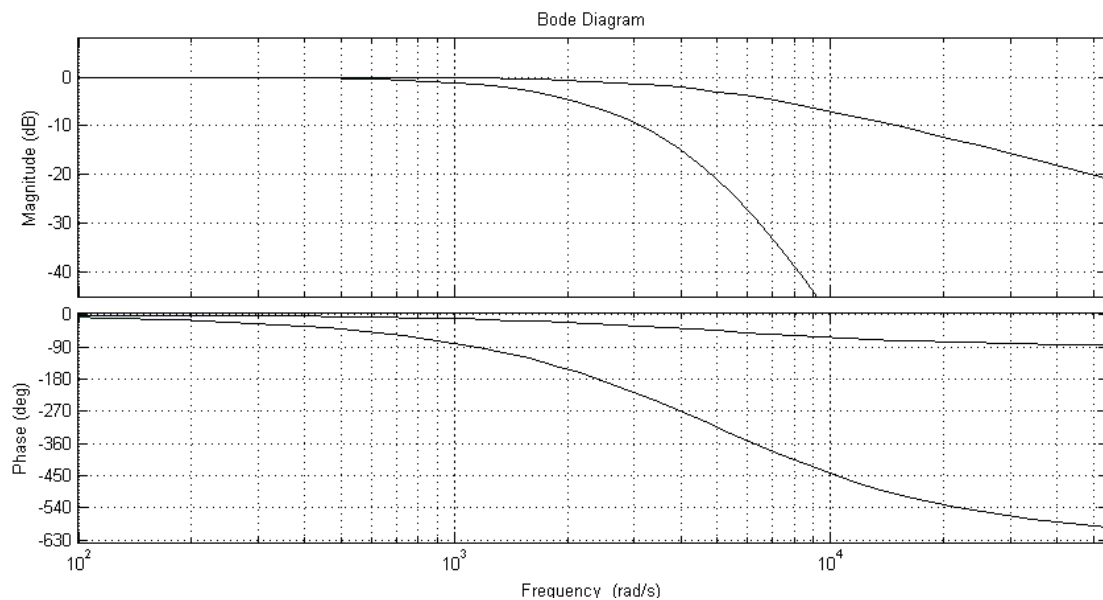


Ξανά θυμίζουμε εδώ ότι η ολική αντίσταση του μεγαφώνου συμβολίζεται με  $Z_{RAD}$  και τα υπόλοιπα μέρη του κυκλώματος είναι ο όγκος της καμπίνας, η ποσότητα του αέρα μέσα σε αυτή και ο αέρας που υπάρχει μέσα στην οπή. Με αυτό που δεν είχαμε ασχοληθεί τότε είναι η αντίσταση τέρμα δεξιά στο κύκλωμα, γνωστή και ως αντίσταση απωλειών. Σε μια καμπίνα πλήρως στεγανή οι απώλειες αέρα είναι μικρές και ως εκ τούτου η αντίσταση αυτή απειρίζεται και οδηγεί σε ανοιχτό κύκλωμα. Αν όμως επιτρέψουμε μια διαρροή αέρα τότε η αντίσταση αυτή αποκτά μέγεθος συγκρίσιμο με τα άλλα μέρη του κυκλώματος.

Εκ πρώτης όψεως φαίνεται να μπορεί έτσι να επιτευχθεί μια καμπίνα ανάμεσα σε αυτές της ακουστικής ανάρτησης και της ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων. Όπως είχαμε σχολιάσει τότε οι καμπίνες ακουστικής ανάρτησης, για μεγάλα μεγάφωνα ειδικά απαιτούν πολύ μεγάλο όγκο. Από την άλλη οι καμπίνες bass reflex δύσκολα μπορούν να πιάσουν σε ποιότητα τις πρώτες. Συνεπώς μια καμπίνα νέου τύπου ίσως δώσει αρκετές λύσεις και μπορεί να θέσει νέα πρότυπα. Πέρα όμως από τον εκ νέου σχεδιασμό του κώδικα για τον υπολογιστή χρειάζονται και κάποια πειραματικά μοντέλα για πραγματικές μετρήσεις και δοκιμές. Έτσι λοιπόν δεν θα δώσουμε περισσότερες λεπτομέρειες για την καμπίνα απωλειών.

Εκτός από την καμπίνα υπάρχει τα τελευταία χρόνια και ένα νέο φίλτρο αποκοπής συχνοτήτων που καλείται φίλτρο άπειρης κλίσης. Υπάρχουν ένας με δύο κατασκευαστές που το υιοθετούν στα ηχεία τους αλλά δεν δίνουν λεπτομέρειες για το πώς δουλεύει. Στη Mat Lab πάντως είναι εφικτό να γίνει φίλτρο νιοστής τάξης ανατροφοδοτώντας απλώς το υπάρχον απλό φίλτρο. Το θέμα είναι πως μπορούμε με παθητικά εξαρτήματα να κάνουμε κατά κάποιον τρόπο μια ανατροφοδότηση ώστε το φίλτρο ακόμα και πρώτης τάξης να είναι να δουλεύει πρακτικά άπειρες φορές.

Η ανάγνωση της πατέντας για το φίλτρο άπειρης κλίσης δείχνει σε κάποια σχεδιαγράμματα και τη χρήση μετασχηματιστών. Ο πειραματισμός και οι δοκιμές στο μέλλον σίγουρα θα επιφέρουν κάτι και εδώ. Προς το παρόν μπορούμε να κλείσουμε με ένα στιγμιότυπο που δείχνει πόσο πιο απότομη αποκοπή μπορεί να επιτύχει ένα τέτοιο φίλτρο συγκριτικά με ένα απλό φίλτρο.



Όπως είναι αναμενόμενο η φάση στο αποκομμένο φάσμα αλλοιώνεται αισθητά αλλά δεδομένου ότι αυτό είναι πολύ εξασθενημένο ώστε να συμμετάσχει στο ακουστικό αποτέλεσμα δεν θα πρέπει να μας απασχολεί αυτή η αλλοίωση.

## Βιβλιογραφία και χρήσιμοι σύνδεσμοι

- [1] Acoustical Society of America, Acoustics and You (A Career in Acoustics?)
- [2] Σάγος Γεώργιος Α. , Τεχνολογία Ηχείων
- [3] Giorgio Rizzoni, Ανάλυση κυκλωμάτων και σημάτων
- [4] Ίδρυμα Ευγενίδου, Βιβλιοθήκη του Τεχνικού Ραδιοτεχνία Τόμος Α΄
- [5] Kenneth L. Kaiser, Electromagnetic Compatibility Handbook
- [6] Η. J. Pain, Φυσική των Ταλαντώσεων και των Κυμάτων
- [7] F. Alton Everest, Εγχειρίδιο Ακουστικής
- [8] Άγγελος Θ. Παπαϊωάννου, Μηχανική των Ρευστών i
- [9] Ήχος και Εικόνα, Ηχεία το Τέλος της Αλυσίδας
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Woofer>
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mid-range\\_speaker](https://en.wikipedia.org/wiki/Mid-range_speaker)
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tweeter>
- [13] <https://hometheaterhifi.com/q-a/speaker-cone-material-best-performance/>
- [14] <http://www.bestcommand.com/product/damper-spider-suspension/>
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Subwoofer>
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Super\\_tweeter](https://en.wikipedia.org/wiki/Super_tweeter)
- [17] [https://www.sony.jp/audio/technology/tech\\_SACD\\_f.html](https://www.sony.jp/audio/technology/tech_SACD_f.html)
- [18] [http://www.bowers-wilkins.com/Speakers/Home\\_Audio/Nautilus/](http://www.bowers-wilkins.com/Speakers/Home_Audio/Nautilus/)
- [19] Leo L. Beranek and Tim J. Mellow, Acoustics: Sound Fields and Transducers
- [20] <https://www.eclipsemagnetics.com/row/magnetic-materials-ferrite-ceramic/>

- [21] <https://www.eclipsemagnetics.com/row/magnetic-materials-rare-earth-neodymium-ndfeb/>
- [22] <https://www.eclipsemagnetics.com/row/magnetic-materials-samarium-cobalt-smco/>
- [23] <https://www.eclipsemagnetics.com/row/magnetic-materials-alnico-cast-and-sintered/>
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric\\_speaker](https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_speaker)
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_speaker](https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_speaker)
- [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic\\_loudspeaker](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_loudspeaker)
- [27] [https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_suspension](https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_suspension)
- [28] [https://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Bass-Reflex\\_Enclosure\\_Design](https://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Bass-Reflex_Enclosure_Design)
- [29] <http://audiojudgement.com/bass-reflex-alignments-explained/>
- [30] Alex Salvatti and Allan Devantier and And Doug J. Button, Maximizing Performance from Loudspeaker Ports
- [31] Martin J. King, Anatomy of a Transmission Line Loudspeaker
- [32] <http://sound.whsites.net/articles/derived-xovers.htm>



