



Τ.Ε.Ι. Κρήτης – Παράρτημα Ρεθύμνου
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής

Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι

Έκδοση 4^η
Ρέθυμνο, Μάρτιος 2012

Συγγραφή
Μηνάς Κ. Σηφάκης
Καθηγητής Εφαρμογών

Χρήστος Κουτσοδημάκης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του μαθήματος «Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι» είναι η εισαγωγή των φοιτητών στις βασικές αρχές κατασκευής και λειτουργίας των ηλεκτρακουστικών μετατροπέων και του τρόπου αλληλεπίδρασής τους με το χώρο στον οποίο τοποθετούνται. Εν συνεχεία και βασιζόμενοι στις γνώσεις αυτές εισάγονται οι βασικές αρχές ορθής επιλογής, συγκρότησης και διασύνδεσης επιμέρους ηλεκτρακουστικών μετατροπέων καθώς επίσης και οι βασικές αρχές σωστού ακουστικού σχεδιασμού μικρών κλειστών χώρων όπου συνήθως πραγματοποιείται ένα μεγάλο μέρος από τις εργασίες της ηχητικής καταγραφής, επεξεργασίας και ακρόασης.

Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι ηλεκτρακουστικών μετατροπέων και κυκλωμάτων (μικρόφωνα, ενισχυτές, επεξεργαστές, μεγάφωνα – ηχεία), αναλύονται τα βασικά ηλεκτρικά, μηχανικά και ακουστικά χαρακτηριστικά τους και εισάγονται οι αντίστοιχοι τεχνικοί όροι και δείκτες.

Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών αρχών της ακουστικής χώρου με έμφαση στην ακουστική των μικρών κλειστών χώρων (στούντιο ηχογραφήσεων, δωμάτια ακρόασης) και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές ορθού ακουστικού σχεδιασμού αντίστοιχων χώρων.

Στα τελευταία κεφάλαια εισάγονται οι βασικές αρχές ορθής συγκρότησης ενός ηλεκτρακουστικού συστήματος, ξεκινώντας από τον προσδιορισμό των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος και συνδυάζοντας τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους μονάδων του συστήματος.

Επιτυχής ολοκλήρωση του μαθήματος προϋποθέτει κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των μονάδων από τις οποίες αποτελείται ένα ηλεκτρακουστικό σύστημα, κατανόηση της επίδρασης του χώρου στην απόδοση του συστήματος και γνώση των βασικών αρχών σωστού ακουστικού και ηλεκτρακουστικού σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος καταγραφής ή ενίσχυσης ή αναπαραγωγής ήχου.

1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

1.1 Επιμέρους Βαθμίδες

Η ιστορία των ηλεκτρακουστικών μετατροπέων ξεκινάει στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και σχετίζεται με την εφεύρεση του τηλεφώνου (δεκαετία 1870-80) και την κατασκευή των πρώτων μικροφώνων, ενισχυτών και μεγαφώνων (μικρής όμως ισχύος). Μέχρι το τέλος του 19^{ου} αιώνα είχαν ήδη αναπτυχθεί διάφοροι τύποι μεγαφώνων και μικροφώνων, πάντα όμως ως πρωτότυπα για εργαστηριακή χρήση, ενώ οι πρώτοι εμπορικοί τύποι κυκλοφόρησαν την πρώτη δεκαετία του 20^{ου} αιώνα. Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρακουστικών συστημάτων και η διάδοσή τους στο ευρύ κοινό έλαβε χώρα μετά τα τελευταία 2/3 του 20^{ου} αιώνα (λ.χ. ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος σήμερα τύπος μεγαφώνου – το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο - αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1920-30).

Η καταρχήν αποστολή ενός ηλεκτρακουστικού συστήματος ήταν (στη γενικότερη περίπτωση) η κατά το δυνατόν πιστότερη καταγραφή, μετάδοση, ενίσχυση και αναπαραγωγή ηχητικών γεγονότων. Με την πάροδο των χρόνων έχει προστεθεί ένα πλήθος άλλων εφαρμογών και απαιτήσεων που πρέπει να καλύψουν τα αντίστοιχα συστήματα.

Προκειμένου να καταστεί δυνατό κάτι τέτοιο, απαιτείται ο συνδυασμός επιμέρους βαθμίδων κάθε μια από τις οποίες λαμβάνει είσοδο από την προηγούμενη, επιτελεί ένα μέρος της παραπάνω διαδικασίας και τροφοδοτεί με σήμα την επόμενη. Αναλόγως με το πλήθος των μονάδων που χρησιμοποιούνται, καθορίζεται και το πλήθος των εφαρμογών που δύναται να καλύψει μια δεδομένη εγκατάσταση.

Οι βασικές βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται ένα ηλεκτρακουστικό σύστημα είναι οι ακόλουθες:

- Ηλεκτρακουστικοί μετατροπείς (βαθμίδες μετατροπής):

Είναι διατάξεις που μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε ακουστικό ή το αντίστροφο. Ένα μεγάφωνο λ.χ. μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μηχανικές ταλαντώσεις των μορίων του αέρα (ηχητική ενέργεια), ενώ ένα μικρόφωνο μετατρέπει τις μηχανικές ταλαντώσεις των μορίων του αέρα σε ηλεκτρικό σήμα στην έξοδό του.

- Μονάδες επεξεργασίας (βαθμίδες επεξεργασίας):

Είναι διατάξεις που λαμβάνουν το σήμα από το μικρόφωνο, το επεξεργάζονται και το αποστέλλουν είτε σε κάποια μονάδα αποθήκευσης και αναπαραγωγής είτε σε κάποια βαθμίδα μετάδοσης ή ενίσχυσης. Η επεξεργασία δύναται να περιλαμβάνει και την κωδικοποίηση του σήματος.

- Μονάδες εγγραφής και μετάδοσης (βαθμίδες αποθήκευσης / μετάδοσης):

Είναι διατάξεις που αποθηκεύουν το σήμα σε μαγνητικά, οπτικά ή ημιαγώγιμα μέσα και/ή το προετοιμάζουν για μετάδοση σε απομακρυσμένα σημεία (με τεχνικές κωδικοποίησης – πολυπλεξίας).

- Μονάδες ενίσχυσης (βαθμίδες ενίσχυσης):

Είναι διατάξεις που ενισχύουν (δηλαδή αυξάνουν την ενέργεια) του σήματος και το δρομολογούν προς τα μεγάφωνα ή τις γραμμές μεταφοράς.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα αναφερθούμε, ως επί το πλείστον, στους ηλεκτρακουστικούς μετατροπείς (μικρόφωνα, μεγάφωνα) καθότι οι λοιπές βαθμίδες των ηλεκτρακουστικών συστημάτων καλύπτονται σε άλλα μαθήματα.

1.1.1 Βασικές κατηγορίες

Ανάλογα με τη χρήση διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες ηχητικού εξοπλισμού:

1) Οικιακό (domestic):

- i. Ευρείας κατανάλωσης - μαζικής παραγωγής χαμηλού κόστους συστήματα (λ.χ. «ολοκλήρωμένα»-«όλα σε ένα» ηχοσυστήματα). Συνήθως έχουν από απλώς επαρκή ως μέτρια ποιότητα αναπαραγωγής.
- ii. Εξειδικευμένα συστήματα μαζικής παραγωγής χαμηλού – μέτριου κόστους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν αρκετά συστήματα πολύ υψηλής πιστότητας αναπαραγωγής.
- iii. Υψηλού κόστους εξειδικευμένα (High – End) συστήματα, συνήθως εξεζητημένης κατασκευής και φινιρίσματος. Πολλές φορές η κατακόρυφη αύξηση της τιμής στα συστήματα αυτής της κατηγορίας σχετίζεται περισσότερο με το αυξημένο κόστος σχεδίασης (βλ. εξεζητημένα υλικά κατασκευής και φινιρίσματος, περιορισμένη παραγωγή) και διάθεσης (διαφήμιση) των συστημάτων παρά με την καθεαυτή ηχητική πιστότητα. Στα περισσότερα συστήματα αυτής της κατηγορίας τιμών η πιστότητα αναπαραγωγής κυμαίνεται από πολύ καλή έως άριστη.

2) Επαγγελματικό (professional)

Αφορά στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- i. Συστήματα ηχογράφησης και επεξεργασίας
- ii. Συστήματα ενίσχυσης ήχου (ομιλίας και μουσικής)
- iii. Συστήματα πολυκάναλου κινηματογραφικού ήχου
- iv. Συστήματα αναμετάδοσης (λ.χ. για ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς)
- v. Συστήματα αναγγελιών και μηνυμάτων προς το κοινό
- vi. Συστήματα ενδοεπικοινωνίας
- vii. Συνεδριακά και μεταφραστικά συστήματα
- viii. Συστήματα για άτομα με ειδικές ανάγκες
- ix. Συστήματα πολυμέσων
- x. Συστήματα υπέρηχων
- xi. Εφαρμογές ακουστικής ψύξης / θέρμανσης

1.1.2 Τρόπος αξιολόγησης

Όπως προαναφέρθηκε, σε πρώτη προσέγγιση, ο σκοπός ενός ηλεκτρακουστικού μετατροπέα είναι η κατά το δυνατόν πιστότερη μετατροπή του σήματος εισόδου (ακουστικό σήμα προκειμένου για μικρόφωνο, ηλεκτρικό σήμα προκειμένου για μεγάφωνο) σε σήμα εξόδου. Με όρους της θεωρίας συστημάτων αυτό συνεπάγεται ότι η συνάρτηση συχνοτικής μεταφοράς του μετατροπέα θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν επίπεδη, τουλάχιστον στη συχνοτική περιοχή που ενδιαφέρει. Κατά αυτόν τον τρόπο συνδέοντας διαδοχικά μια σειρά από αντίστοιχους μετατροπείς είμαστε σε θέση να καταγράψουμε και να ανασυνθέσουμε οποιοδήποτε σήμα χωρίς καμία απώλεια. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η ποιότητα του συνολικού συστήματος κρίνεται αποκλειστικά και μόνο με όρους απόκρισης των επιμέρους μετατροπέων.

Στην πραγματικότητα όμως, λόγω της ιδιαίτερα πολύπλοκης φύσης της ανθρώπινης ακοής και φαινομένων που συνδέονται με τη διάδοση του ήχου σε ένα χώρο τριών διαστάσεων (σε αντιπαράθεση με τις μονοδιάστατες γραμμές μεταφοράς της θεωρίας συστημάτων) η αξιολόγηση της ηχητικής ποιότητας ενός συστήματος είναι ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα, ενέχει πολλές παραμέτρους που δεν είναι δυνατόν (τουλάχιστον ακόμα) να ποσοτικοποιηθούν και που συχνά δεν επιδέχεται μονοσήμαντη απάντηση. Παρά ταύτα η δουλειά ενός ηλεκτρακουστικού μηχανικού ή ηχηλόγησης, θεωρητικά τουλάχιστον, κρίνεται με βάση την ποιότητα του τελικού ηχητικού αποτελέσματος.

Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητή η έννοια της «ποιότητας του ηχητικού αποτελέσματος» και πώς αξιολογείται αυτό, συγκεντρώνοντας σε κάποιο βαθμό τη μέχρι σήμερα εμπειρία στο αντικείμενο παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Η αξιολόγηση ενός συστήματος είναι εξ' ορισμού μια υποκειμενική κρίση και ως εκ τούτου ενέχει έντονα προσωπικό χαρακτήρα.
- Οι υποκειμενικές κρίσεις επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες κάποιοι εκ των οποίων δύνανται να είναι παντελώς άσχετοι με την καθεαυτή ηχητική ποιότητα.
- Σε συνθήκες τυφλής ακρόασης, πολλές φορές, οι ακροατές είναι σε θέση να διαχωρίσουν συστήματα που υπό διαφορετικές συνθήκες ισχυρίζονται ότι ακούγονται διαφορετικά.
- Συστήματα των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι αντικειμενικές μετρήσεις είναι πανομοιότυπες, εντούτοις ακούγονται και αξιολογούνται διαφορετικά.
- Συστήματα τα οποία επιφέρουν σαφή παραμόρφωση («χρωματισμό») του ηχητικού σήματος πολλές φορές λαμβάνουν ιδιαίτερα υψηλή αξιολόγηση ακριβώς λόγω του εν λόγω χαρακτηριστικού τους (βλ. μικρόφωνα και καμπίνες ηχείων).
- Ανάλογα με τη φύση της επιτελούμενης δραστηριότητας παρατηρείται σημαντική μεταβολή των κριτηρίων αξιολόγησης της ακουστική ποιότητας (τα κριτήρια αξιολόγησης λ.χ. της ποιότητας της τηλεφωνικής επικοινωνίας είναι σαφώς διαφορετικά από τα αντίστοιχα για μουσική ακρόαση σε ένα στούντιο).
- Το ανθρώπινο σύστημα ακοής έχει τη δυνατότητα της προσαρμοστικότητας στις εκάστοτε συνθήκες ακρόασης και της μερικής αποκατάστασης σημάτων που έχουν (ή θεωρεί ότι έχουν) υποστεί αλλοιώσεις. Υπάρχουν όμως και

συγκεκριμένοι τύποι παραμορφώσεων που το σύστημα ακοής μας αδυνατεί να αποκαταστήσει.

- Κατά την τοποθέτηση οποιουδήποτε συστήματος σε ένα κλειστό χώρο υπάρχει αλληλεπίδραση του συστήματος με το χώρο (αυτό ισχύει τόσο για τις βαθμίδες καταγραφής – μικρόφωνα – όσο και για τις διατάξεις αναπαραγωγής – μεγάφωνα) με αποτέλεσμα τη σημαντική τροποποίηση της απόκρισης του συστήματος.
- Τα διάφορα αντικειμενικά κριτήρια και μέτρα που έχουν κατά καιρούς προταθεί αδυνατούν να συμπεριλάβουν το σύνολο της πολυπλοκότητας του ανθρώπινου μηχανισμού ακοής.
- Επί του παρόντος, δεν είναι δυνατή η πλήρης περιγραφή της ακουστικής ποιότητας ενός συστήματος αποκλειστικά με αντικειμενικά κριτήρια.

Συνέπεια των παραπάνω είναι να προβάλλεται πολύ συχνά η άποψη ότι δεν υπάρχει κανένας τυποποιημένος τρόπος για τον εκ των προτέρων ορθό σχεδιασμό μιας ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης και ότι οι επιτυχημένες εγκαταστάσεις και συστήματα είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού «ταλέντου», «έμπνευσης», τύχης και εμπειρίας του μηχανικού ήχου.

Η παραπάνω θέση είναι σαφέστατα λανθασμένη και οφείλεται στην αδυναμία κατανόησης της μεθοδολογίας μελέτης μιας ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης και σε λανθασμένη ιεράρχηση των αντίστοιχων προτεραιοτήτων.

Η αποτελεσματικότητα μιας ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης αξιολογείται αποκλειστικά και μόνο με κριτήριο την ικανοποίηση των προδιαγραφών που είχαν τεθεί κατά το στάδιο εκπόνησης της αντίστοιχης μελέτης και τελικά από την επιτυχή κάλυψη των λειτουργικών απαιτήσεων της συγκεκριμένης εφαρμογής. Σε καμία περίπτωση δεν αξιολογείται με βάση κάποια αόριστη κλίμακα (δηλαδή από τη σύγκριση με κάποια υποθετική βέλτιστη εγκατάσταση).

Η παραπάνω σύμβαση δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να φαντάζει ως περιορισμός ή συμβιβασμός καθότι σιωπηρά υιοθετείται σε πάρα πολλές άλλες καθημερινές μας δραστηριότητες. Έτσι λ.χ. η αδυναμίας μας να προσδιορίσουμε το βάρος¹ μιας φραντζόλας ψωμιού με ακρίβεια δεκάτων του γραμμαρίου δε μας εμποδίζει καθόλου από το να αγοράζουμε ψωμί από το αρτοποιείο ούτε και μας υποχρεώνει να φέρουμε ζυγαριά ακριβείας μαζί μας για να διαπιστώσουμε μήπως ζυγίζει μερικά γραμμάρια λιγότερα από το ονομαστικό της βάρους.

Η αναγνώριση και ικανοποίηση των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος που απαιτείται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μια πολύ συγκεκριμένη εργασία και αποτελεί το αντικείμενο ενός μελετητή - μηχανικού ήχου. Εφ' όσον η εν λόγω εργασία εκτελεσθεί με επιμέλεια και σύμφωνα με τις βασικές αρχές ορθού σχεδιασμού, είναι βέβαιο ότι το τελικό αποτέλεσμα θα είναι επαρκές για να καλύψει τις τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις της εγκατάστασης.

Συζητήσεις πέραν αυτού του σημείου είναι αρκετά «ομιχλώδεις» καθότι αφορούν ένα πεδίο όπου η διάκριση μεταξύ των ζευγών εννοιών, αντικειμενικό – υποκειμενικό, επιστήμη - τέχνη, διαφήμιση – πραγματικότητα, καθίσταται πολλές φορές αδύνατη και κατ' επέκταση ο μηχανικός ήχου δε θα πρέπει να εισέλθει (υπό ρόλο τεχνικού τουλάχιστον).

¹ Η ενδεχομένως την ακριβή γευστική ποιότητα.

Ευελπιστούμε ότι με την ολοκλήρωση της παρακάτω σειράς διαλέξεων η εγκυρότητα της παραπάνω θέσης θα είναι αυταπόδεικτη.

1.2 Ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικό ισοδύναμο

Για ιστορικούς κυρίως λόγους είθισται κάθε εισαγωγή στα ηλεκτρακουστικά συστήματα να ξεκινάει με μια παρουσίαση του ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικού ισοδύναμου, ενός κοινού δηλαδή τρόπου περιγραφής ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών ποσοτήτων υπό τη μορφή κυκλωμάτων. Ο εν λόγω τρόπος περιγραφής θεωρήθηκε εντελώς φυσιολογικός στα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της ηλεκτρακουστικής καθότι αντιμετώπιζε διαμιάς όλες τις ποσότητες που εμφανίζονταν στα αντίστοιχα προβλήματα χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και τους συμβολισμούς ενός τομέα που είχε ήδη αρκετή ανάπτυξη εκείνη την εποχή, της θεωρίας ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Στις σημερινές συνθήκες η εν λόγω περιγραφή αντιμετωπίζεται πλέον με σκεπτικισμό, αφενός λόγω της σημαντικής ανάπτυξης νεότερων γνωστικών πεδίων (λ.χ. θεωρία απόκρισης δικτυωμάτων & φίλτρων, υπολογιστικά μαθηματικά κ.α.) και αφετέρου λόγω της ενασχόλησης με τα ηλεκτρακουστικά συστήματα ανθρώπων που δεν προέρχονται από το περιβάλλον της ηλεκτρονικής (λ.χ. ακουστικούς, φυσικούς) και στους οποίους η μεταγραφή ενός φυσικού προβλήματος με όρους ηλεκτρονικών κυκλωμάτων δεν προσφέρει καμία περαιτέρω διευκόλυνση.

Πάραυτα, λόγω της επί μακρόν επικράτησης του εν λόγω συμβολισμού και προκειμένου να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της σχετικής βιβλιογραφίας, η παρουσίαση και κατανόηση των βασικών αρχών της μεθόδου του ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικού ισοδύναμου κρίνεται και σήμερα απαραίτητη.

Η βασική αρχή ισοδυναμίας προκύπτει από την αντιστοίχιση των παρακάτω μεγεθών:

- Ηλεκτρική Τάση ~ Μηχανική Δύναμη ~ Ακουστική Πίεση
- Ηλεκτρικό Ρεύμα ~ Ταχύτητα Σώματος ~ Ακουστική Σωματιδιακή Ταχύτητα (μορίων αέρα)
- Φορτίο ~ Μηχανική Μετατόπιση ~ Μεταβολή Όγκου Στήλης Αέρα

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ισοδυναμίες λαμβάνουμε αντίστοιχες εκφράσεις για όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών συστημάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση κάποιων βασικών εννοιών.

1.2.2 Εμπέδηση: Ηλεκτρική – μηχανική – ακουστική (electrical – mechanical – acoustical impedance)

Η ηλεκτρική εμπέδηση ορίζεται ως:

$$Z_e = \frac{V}{I} \quad (1.1)$$

Όπου V η τάση και I το ρεύμα.

Είναι μιγαδικός αριθμός και ως τέτοιος δύναται να γραφεί ως:

$$Z_e = R_e + j X_e \quad (1.2)$$

Όπου R_e το πραγματικό μέρος (ονομάζεται ηλεκτρική αντίσταση) και X_e το φανταστικό μέρος (ονομάζεται ηλεκτρική αντίδραση).

Η ηλεκτρική αντίσταση μετράται σε $Ohm(\Omega)$ και συνδέεται με την απώλεια ενέργειας στο κύκλωμα (μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα), σύμφωνα με τη σχέση:

$$W_d = I^2 R_e \quad (1.3)$$

Συμβολίζεται με το γνωστό σύμβολο της ηλεκτρικής αντίστασης («φουσαρμόνικα»).

Το φανταστικό μέρος X_e (απαντάται στη βιβλιογραφία και ως άεργος αντίσταση του κυκλώματος) συνδέεται με τη αποθήκευση ισχύος στα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος. Αποτελείται από στοιχεία εμπέδησης και στοιχεία χωρητικότητας (βλ παρακάτω).

Η μηχανική εμπέδηση ορίζεται ως:

$$Z_m = \frac{F}{u} \quad (1.4)$$

Όπου F η ασκούμενη δύναμη και u η ταχύτητα του σημείου εφαρμογής της δύναμης.

Είναι μιγαδικός αριθμός και ως τέτοιος δύναται να γραφεί ως:

$$Z_m = R_m + j X_m \quad (1.5)$$

Όπου R_m το πραγματικό μέρος – ονομάζεται μηχανική αντίσταση και X_m το φανταστικό μέρος.

Η μηχανική αντίσταση μετράται σε Ns/m και συνδέεται με την απώλεια ενέργειας στο σύστημα (μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα) συνήθως λόγω δυνάμεων εσωτερικής τριβής. Στους μηχανικούς ταλαντωτές συμβολίζεται συνήθως ως c (απόσβεση του ταλαντωτή).

Το φανταστικό μέρος X_m συνδέεται με την αποθήκευση ενέργειας στα διάφορα μέρη του συστήματος.

Η ακουστική εμπέδηση ορίζεται ως:

$$Z_a = \frac{P}{U} \quad (1.6)$$

Όπου p η ακουστική πίεση και U η σωματιδιακή ταχύτητα όγκου των μορίων του αέρα (m/s^3).

Είναι μιγαδικός αριθμός και ως τέτοιος δύναται να γραφεί ως:

$$Z_a = R_a + j X_a \quad (1.7)$$

Όπου R_a το πραγματικό μέρος – ονομάζεται ακουστική αντίσταση και X_a το φανταστικό μέρος.

Η ακουστική αντίσταση μετράται σε Ns/m και συνδέεται με την απώλεια ενέργειας λόγω ακουστικής ακτινοβολίας και διάδοσης (μετατροπή της μηχανικής ενέργειας ενός στοιχείου σε ηχητική ενέργεια και ελάττωση αυτής της ενέργειας κατά τη διάδοση στο ακουστικό μέσο).

Το φανταστικό μέρος X_a συνδέεται με την αποθήκευση ενέργειας.

1.2.3 Ηλεκτρική Αδράνεια (μαγνητική επαγωγή) ~ Μηχανική Αδράνεια (μάζα/ροπή αδράνειας) ~ Ακουστική Αδράνεια

Η μαγνητική επαγωγή ενός στοιχείου κυκλώματος είναι ένας δείκτης της αποθήκευσης ενέργειας (υπό μορφή μαγνητικού πεδίου) στο κύκλωμα καθώς αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Εκφράζει την *ηλεκτρική αδράνεια* του κυκλώματος καθότι συνδέει την ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στα άκρα του κυκλώματος με τη μεταβολή του ρεύματος που διέρχεται από αυτό. Δίδεται από τη σχέση:

$$L = \frac{V_{emf}}{(dI/dt)} \quad (1.8)$$

Όπου V_{emf} η τάση από αυτεπαγωγή στα άκρα του στοιχείου του κυκλώματος, dI/dt η μεταβολή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Συμβολίζεται με το γνωστό από τα ηλεκτρικά κυκλώματα σύμβολο του πηνίου.

Η *μηχανική αδράνεια* ενός μηχανικού συστήματος εκφράζεται από τη μάζα του (m) συστήματος, προκειμένου για σύστημα που εκτελεί γραμμικές μετατοπίσεις και τη ροπή αδράνειας (I_m) προκειμένου για περιστροφικές κινήσεις. Η αντιστοιχία προκύπτει από το 2^ο νόμο του Newton:

$$F = m (du/dt) \Rightarrow m = F / (du/dt) \quad (1.9)$$

Η *ακουστική αδράνεια* ενός μηχανικού συστήματος είναι η αδράνεια της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας του αέρα που κινείται κατά τη διάδοση ενός ακουστικού κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με M και η σχέση ορισμού της είναι:

$$M = \frac{P}{(dU/dt)} \quad (1.10)$$

Η ακουστική αδράνεια μετράται σε $kg \cdot m^2$.

1.2.4 Ηλεκτρική Χωρητικότητα ~ Μηχανική Χωρητικότητα ~ Ακουστική Χωρητικότητα

Η *ηλεκτρική χωρητικότητα* συνδέεται με την αποθήκευση ενέργειας, υπό τη μορφή ηλεκτροστατικής ενέργειας (του διαχωρισμού δηλαδή θετικών και αρνητικών φορτίων), στα μέρη ενός κυκλώματος. Ορίζεται από τη σχέση:

$$C_e = \frac{Q}{V} \quad (1.11)$$

Όπου C_e η χωρητικότητα σε *Farad*, V η τάση στα άκρα του κυκλώματος και $Q = \int I dt$, το φορτίο που αποθηκεύεται στο κύκλωμα. Συμβολίζεται με το σύμβολο του πυκνωτή.

Η *μηχανική χωρητικότητα* ενός μηχανικού συστήματος εκφράζεται κατ' αναλογία:

$$C_m = \frac{x}{F_m} \quad (1.12)$$

Όπου C_m η μηχανική χωρητικότητα, x η μετατόπιση και F_m η ασκούμενη μηχανική δύναμη. Η μηχανική χωρητικότητα είναι ουσιαστικά το αντίστροφο της ακαμψίας (ή σταθεράς ελαστικότητας k) και μετράται σε m/N .

Η *ακουστική χωρητικότητα* ορίζεται με ανάλογο τρόπο ως:

$$C_a = \frac{X}{p} \quad (1.13)$$


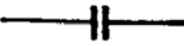
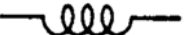
Όπου C_a η ακουστική χωρητικότητα, X η μεταβολή όγκου μιας μάζας αέρα και p η ακουστική πίεση που προκαλεί τη μεταβολή όγκου της μάζας αέρα. Η ακουστική χωρητικότητα μιας μάζας αέρα όγκου V ισούται προς:

$$C_a = \frac{V}{(\rho c^2)} \quad (1.14)$$

Ακουστική χωρητικότητα εμφανίζει λ.χ. μια κλειστή κοιλότητα με ένα άνοιγμα στο οποίο ασκείται μεταβαλλόμενη εξωτερική πίεση. Ο αέρας που βρίσκεται εγκλωβισμένος συμπιέζεται και εκτονώνεται ασκώντας δυνάμεις τύπου ελατηρίου.

Στον Πίνακα I που ακολουθεί συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία του ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικού ισοδύναμου.

Πίνακας Ι
Ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικές αναλογίες

Φυσικό Μέγεθος	Ηλεκτρικό Στοιχείο	Μηχανικό Στοιχείο	Μηχανικό Στοιχείο (περιστροφικό σύστημα)	Ακουστικό Στοιχείο
Δύναμη	Τάση	Μηχανική Δύναμη	Ροπή	Πίεση
Ταχύτητα	Ρεύμα	Ταχύτητα	Γωνιακή Ταχύτητα	Σωματιδιακή ταχύτητα όγκου
Μετατόπιση	Φορτίο	Μετατόπιση	Γωνιακή Μετατόπιση	Μεταβολή Όγκου
Σύμβολο	Ηλεκτρικό Στοιχείο	Μηχανικό Στοιχείο	Μηχανικό Στοιχείο (περιστροφικό σύστημα)	Ακουστικό Στοιχείο
	Αντίσταση	Απόσβεση	Γωνιακή Απόσβεση	Ακουστική Αντίσταση (ακτινοβολία & διάδοσης)
	Χωρητικότητα	1/Ακαμψία	1/Γωνιακή Ακαμψία	1/ Ακαμψία Όγκου Αέρα
	Συντελεστής Αυτεπαγωγής	Μάζα	Ροπή Αδράνειας	Μάζα / μονάδα επιφάνειας

2. ΜΕΓΑΦΩΝΑ

Τα μεγάφωνα, ως ηλεκτρακουστικοί μετατροπείς είναι συνήθως η τελική βαθμίδα ενός συστήματος. Λαμβάνουν ως είσοδο ένα ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπουν σε ηχητική ενέργεια. Στην αλυσίδα αναπαραγωγής του συστήματος συνδέονται (μέσω καλωδίων) στην έξοδο των ενισχυτών του συστήματος.

Τα μεγάφωνα κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, αναλόγως με τον τρόπο που γίνεται η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργεια σε μηχανικές ταλαντώσεις.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

1. Ηλεκτροδυναμικά
2. Ηλεκτροστατικά
3. Πιεζοηλεκτρικά

Οι παραπάνω κατηγορίες, αναλόγως με τον τρόπο μετατροπής των ταλαντώσεων των μηχανικών μερών του μεγαφώνου σε εκπεμπόμενη ηχητική ισχύ, κατατάσσονται περαιτέρω σε:

1. Τύπου χοάνης (κόρνες)
2. Τύπου κώνου
3. Τύπου πάνελ (τεχνολογία NXT)

Σε επαγγελματικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ηλεκτροδυναμικά και πιεζοηλεκτρικά (για τις μονάδες υψηλών συχνοτήτων – tweeter) μεγάφωνα, ενώ στα οικιακά συστήματα απαντώνται και οι υπόλοιποι τύποι.

2.1 Τύποι μεγαφώνων

2.1.1 Ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα (electro-dynamic loudspeakers)

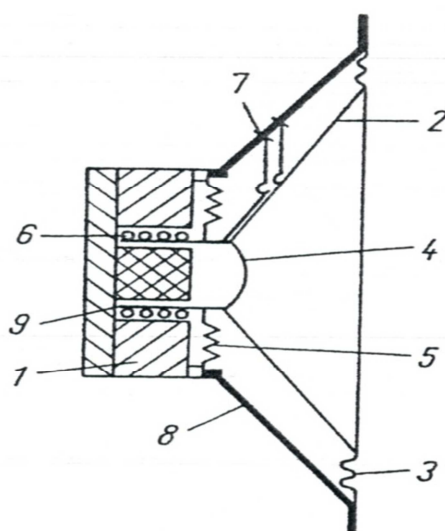
Αποτελούνται από ένα ηλεκτρομαγνητικό διεγέρτη στα κινητά μέρη του οποίου έχει στερεωθεί μια μεμβράνη (η οποία συνδέεται με το πλαίσιο του μεγαφώνου μέσω μιας ανάρτησης) για τη μετατροπή των μηχανικών ταλαντώσεων του διεγέρτη σε ακουστική ενέργεια.

Η μορφή ενός τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου παρουσιάζεται (σε τομή) στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί. Διακρίνονται τέσσερα βασικά μέρη: ένας μόνιμος μαγνήτης, το κινούμενο πηνίο, το διάφραγμα ακτινοβολίας ήχου και η ανάρτηση.

Η βασική λειτουργία έχει ως εξής:

Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από το πηνίο, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο με φορά και μέτρο που εξαρτώνται αντίστοιχα από την κατεύθυνση και την ένταση του ρεύματος. Το πεδίο αυτό αλληλεπιδρά με το πεδίο του μόνιμου μαγνήτη (ο οποίος είναι στερεωμένος με σταθερό τρόπο στο πλαίσιο του μεγαφώνου) και το πηνίο τίθεται σε (αξονική) κίνηση. Στο πηνίο είναι στερεωμένο και το ένα άκρο του διαφράγματος (το άλλο άκρο συνδέεται στο σταθερό πλαίσιο του μεγαφώνου με την παρεμβολή της ελαστικής ανάρτησης), το οποίο τίθεται με τη σειρά του και αυτό σε κίνηση. Η κίνηση του διαφράγματος μεταφέρεται στα μόρια του αέρα με τα οποία είναι σε επαφή και έτσι η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των μορίων του αέρα.

Στην απλούστερη μορφή του το διάφραγμα είναι ένας κώνος από πεπιεσμένο χαρτί αν και τελευταία απαντώνται όλο και συχνότερα πιο εξελιγμένα τεχνολογικά υλικά (λ.χ. Kevlar, ανθρακονήματα κλπ.) και γεωμετρίες. Τα φυσικά (βλ. διαστάσεις, βάρος) και μηχανικά (βλ. συντελεστής απόσβεσης, κύκλος ζωής, θερμική αντοχή κλπ.) χαρακτηριστικά των διάφορων μερών εξαρτώνται από τη συχνοτική περιοχή που θέλουμε να αναπαράγουμε με το μεγάφωνο (χαμηλές, μεσαίες ή υψηλές συχνότητες) και την απαιτούμενη πιστότητα αναπαραγωγής. Για αναπαραγωγή λ.χ. χαμηλών συχνοτήτων απαιτείται μεγάλο διάφραγμα (για να τεθεί σε κίνηση μια μεγάλη ποσότητα αέρα), πρόσθετη ανάρτηση (για να επιτρέπει και να μπορεί να παραλάβει τις μεγάλες μετατοπίσεις του διαφράγματος) και μια ισχυρή βάση στήριξης (για να παραλάβει τις δυνάμεις αδράνειας).



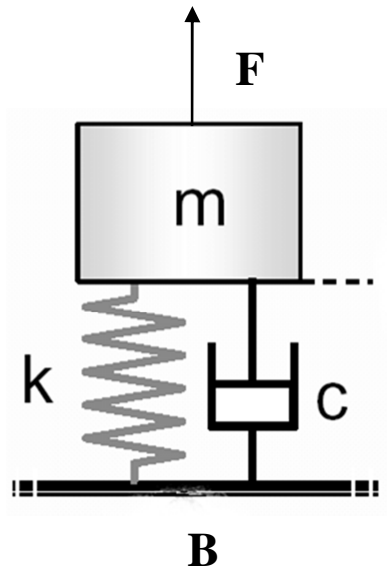
Σχήμα 2.1 Τομή ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.

Διακρίνονται: (1) Μαγνήτης, (2) Κώνος (3) Περιμετρική ανάρτηση, (4) Διάφραγμα, (5) Ανάρτηση, (6) Πηνίο, (7) Ηλεκτρικά καλώδια για το σήμα εισόδου, (8) Περίβλημα, (9) Φορέας του κινούμενου πηνίου

2.1.2 Ανάλυση

Σε πρώτη προσέγγιση, ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο μπορεί να περιγραφεί με όρους συστημάτων (ταλαντωτών) ενός βαθμού ελευθερίας με απόσβεση. Το μηχανικό ανάλογο ενός τέτοιου συστήματος είναι μια μάζα (m) η οποία στηρίζεται σε μία άκαμπτη βάση μέσω ενός ελατηρίου (σταθεράς ελατηρίου k) παράλληλα με έναν αποσβεστήρα (με συντελεστή απόσβεσης c), βλ. σχήμα 2.2 παρακάτω. Η διεγείρουσα την κίνηση δύναμη (F) ασκείται απευθείας στη μάζα (m).

Η μάζα του ταλαντωτή αντιστοιχεί στη μάζα του πηνίου και του διαφράγματος, το ελατήριο στην ελαστικότητα της ανάρτησης και ο αποσβεστήρας στην αποσβεστική ικανότητα της ανάρτησης.



Σχήμα 2.2 Σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας.
Διακρίνονται: (1). Μάζα m , (2). Ελατήριο k , (3). Αποσβεστήρας c , (4). Δύναμη Διέγερσης F , (5). Ακαμπτη Βάση, B

Εφαρμόζοντας το 2^ο νόμο του Newton στο σύστημα λαμβάνουμε την παρακάτω εξίσωση κίνησης:

$$F = m \cdot \frac{du}{dt} + c \cdot u + k \cdot x \quad (2.1)$$

Όπου u η ταχύτητα (m/s) και x η μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας.

Υποθέτοντας διέγερση της μορφής $\tilde{F} = F e^{j\omega t}$, ήτοι αρμονική ταλάντωση του συστήματος, τότε ισχύει:

$$x = \frac{u}{j\omega}, \quad \frac{du}{dt} = j\omega u$$

Οπότε η εξίσωση (2.1) γράφεται

$$F = j\omega m u + c \cdot u + k \frac{u}{j\omega} \quad (2.2)$$

Εισάγουμε τώρα την έννοια της μηχανικής εμπέδησης² Z_m , ως το λόγο της δύναμης ως την ταχύτητα (στα ηλεκτρικά κυκλώματα η εμπέδηση ορίζεται πανομοιότυπα ως ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα, δηλαδή της δύναμης που ασκείται στα ηλεκτρόνια προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου που διέρχονται από μία εγκάρσια τομή του αγωγού). Χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης m για να τονισθεί ότι η εν λόγω εμπέδηση αφορά στο μηχανικό μέρος του μεγαφώνου.

$$Z_m = \frac{F}{u} \quad (2.3)$$

η παραπάνω εξίσωση δύναται να γραφεί αποκλειστικά με όρους εμπέδησης ως

² Η εμπέδηση είναι η γενίκευση της έννοιας της αντίστασης στο σώμα των μιγαδικών αριθμών.

$$Z_m = \frac{F}{u} = jm\omega + c + \frac{k}{j\omega} \Leftrightarrow Z_m = c + j\left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right) \quad (2.4)$$

(καθότι $1/j = -j$).

Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι για κάποια συχνότητα το φανταστικό μέρος της μηχανικής εμπέδησης μηδενίζεται και η εμπέδηση ισούται με την απόσβεση c του συστήματος. Δεδομένου ότι στους συνήθεις ταλαντωτές η απόσβεση είναι πολύ μικρή (της τάξης του 0.01-0.1) αυτό συνεπάγεται ότι στη συχνότητα αυτή ακόμη και μια σχετικά μικρή δύναμη προκαλεί ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συντονισμός του συστήματος και η συχνότητα για την οποία συμβαίνει αυτό συχνότητα συντονισμού (f_0).

Ισχύει ότι:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

Για συστήματα με μηδενική απόσβεση (αντίστοιχα συστήματα δεν υπάρχουν στη φύση³) η απόκριση του συστήματος στη συχνότητα συντονισμού γίνεται άπειρη.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η οξύτητα του συντονισμού μετράται με το συντελεστή ποιότητας Q , ο οποίος ισούται με το λόγο του συχνοτικού εύρους⁴ της καμπύλης συντονισμού προς τη συχνότητα συντονισμού (βλ. σχήμα 2.3 παρακάτω) και δύναται να υπολογισθεί από τα στοιχεία του ταλαντωτή.

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\sqrt{km}}{c} \quad (2.6)$$

Τα παραπάνω περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά του μεγαφώνου σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος (ώστε το πηνίο να μη διαρρέεται από ρεύμα) και κενού αέρος (ώστε να μην υφίσταται αντίδραση από μόρια αέρα στο διάφραγμα).

Προκειμένου τώρα να προσδιορισθεί η συμπεριφορά του μεγαφώνου σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να εξετάσουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα όταν το μεγάφωνο συνδεθεί σε ένα κύκλωμα που διαρρέεται από ρεύμα.

Καθώς το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα αναπτύσσεται μια δύναμη ηλεκτρομαγνητικής φύσης που οφείλεται στην αλληλεπίδραση με το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη.

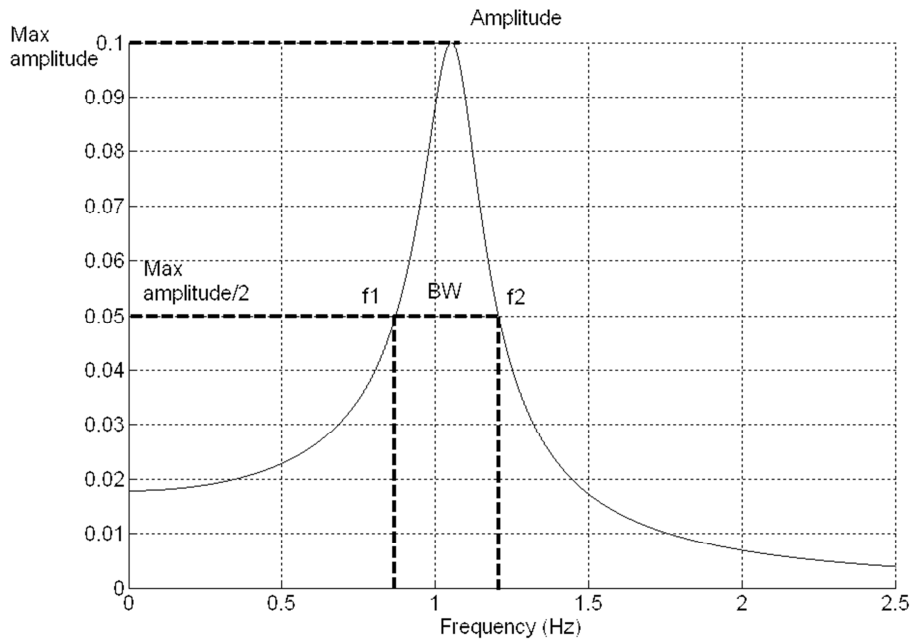
Η δύναμη αυτή ισούται με:

$$F_e = B \cdot I \cdot l \quad (2.7)$$

Όπου B το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη (*Tesla*), I το ρεύμα (*Ampere*) που διέρχεται από το πηνίο και l το συνολικό μήκος του πηνίου (m).

³ Με την εξαίρεση κάποιων υπερ-αγώγιμων υλικών τα οποία όμως δημιουργούνται σε εργαστηριακές συνθήκες και σε θερμοκρασίες τις τάξης των 0° K.

⁴ Στο σημείο όπου το πλάτος ταλάντωσης ισούται με το ήμισυ της τιμής που λαμβάνει στη συχνότητα συντονισμού.



Σχήμα 2.3 Συχνотική απόκριση συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας
Για λόγους απλότητας οι παράμετροι του συστήματος επιλέχθηκαν κατά τρόπο
ώστε η συχνότητα συντονισμού να είναι στο 1 Hz.

Καθώς όμως το πηνίο αρχίζει να κινείται και εξ' αιτίας του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου μια επαγωγική τάση V_b η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης του μαγνήτη και της συνολικής μαγνητικής ροής $B \cdot l$.

$$V_b = B \cdot l \cdot u \quad (2.8)$$

Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το πηνίο προκύπτει από το πηλίκο της τάσης στα άκρα του προς την μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{eb} , δηλαδή:

$$I = \frac{(V_s - V_b)}{Z_{eb}} \quad (2.9)$$

όπου V_s η τάση τροφοδοσίας του μεγαφώνου (στις περισσότερες των περιπτώσεων λόγω της μικρής αντίστασης εξόδου των ενισχυτών η τάση εξόδου είναι σταθερή).

Η μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{eb} του μεγαφώνου δύναται να μετρηθεί ακινητοποιώντας το πηνίο⁵ ούτως ώστε να απομονωθούν τα φαινόμενα επαγωγής.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η συνολική ηλεκτρομαγνητική δύναμη που ασκείται στο πηνίο ισούται προς:

$$F_e = \frac{(V_s - V_b)}{Z_{eb}} \cdot B \cdot l \quad (2.10)$$

Πέραν από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις λόγω της κίνησης του διαφράγματος και της μεταφοράς ορμής στα μόρια του αέρα, αναπτύσσονται και δυνάμεις αντίδρασης στο διάφραγμα οι οποίες είναι ανάλογες προς την ταχύτητα κίνησης του

⁵ Από εδώ προκύπτει και ο δείκτης (b), από την αγγλική λέξη blocked.

διαφράγματος (δεδομένου ότι η μάζα του αέρα που τίθεται σε κίνηση είναι σταθερή και εξαρτάται από τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του διαφράγματος). Η αντίστοιχη εμπέδηση ονομάζεται εμπέδηση ακτινοβολίας Z_r (radiation impedance) καθότι σχετίζεται με την ακτινοβολία της ηχητικής ισχύος από το μεγάφωνο.

$$Fr = Z_r \cdot u \quad (2.11)$$

Η εμπέδηση ακτινοβολίας του διαφράγματος είναι γενικώς μιγαδική ποσότητα και γράφεται:

$$Z_r = R_r + jX_r \quad (2.12)$$

Όπου R_r και X_r πραγματικοί αριθμοί καλούμενοι αντίσταση ακτινοβολίας (radiation resistance) και αντίδραση ακτινοβολίας (radiation reactance) αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας τώρα στη σχέση (2.4) τη συνολική δύναμη, $F_{tot} = F_e - F_r$ και αντικαθιστώντας την τιμή που υπολογίσαμε για τη μηχανική εμπέδηση του συστήματος λαμβάνουμε:

$$u = \frac{B \cdot l \cdot V_s}{Z_{eb}(Z_m + Z_r) + (B \cdot l)^2} \quad (2.13)$$

Η παραπάνω σχέση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθότι μας δίνει την ταχύτητα του διαφράγματος συναρτήσει των φυσικών χαρακτηριστικών του μεγαφώνου και της τάσης εισόδου.

2.1.3 Ακουστική ισχύς ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Η συνολική ακουστική ισχύς που ακτινοβολείται από το μεγάφωνο προκύπτει από το γινόμενο⁶ του τετραγώνου της ταχύτητας του κώνου επί το ήμισυ του πραγματικού μέρους της εμπέδησης ακτινοβολίας (δηλαδή την αντίσταση ακτινοβολίας). Η αντίδραση ακτινοβολίας δε λαμβάνεται υπ' όψιν καθότι δυνάμεις με διαφορά φάσης 90° ως προς τη ταχύτητα δεν παράγουν έργο.

$$W_r = \frac{|u|^2 \cdot R_r}{2} \quad (2.14)$$

Η τιμή της αντίσταση ακτινοβολίας εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά, τον τρόπο τοποθέτησης του διαφράγματος και τη συχνότητα ταλάντωσης αυτού.

Θεωρώντας το διάφραγμα ως ένα συμπαγές κυκλικό έμβολο τοποθετημένο επί απείρως εκτεινόμενου ανακλαστικού επιπέδου (baffled piston approximation) δύναται να υπολογισθεί αναλυτικά η αντίσταση ακτινοβολίας [*Fundamentals of Acoustics*, Kinsler et al.].

Στις χαμηλές συχνότητες ($Ka \ll 1 \Leftrightarrow \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \ll 1$, όπου $K = 2\pi / \lambda = \omega / c$, ο κυματάρθμος και a η ακτίνα του εμβόλου) η εμπέδηση ακτινοβολίας ισούται, κατά προσέγγιση, με:

⁶ Βλ. και τη γνωστή από την ηλεκτρονική σχέση $P=I^2 R$.

$$R_r = \frac{1}{2} \pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho \cdot c \cdot (K \cdot a)^2 = \frac{1}{2} \pi \cdot \alpha^4 \cdot \frac{\rho}{c} \cdot \omega^2$$

$$X_r = \pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{8}{3 \cdot \pi} (K \cdot a) = \frac{8}{3} \cdot \alpha^3 \cdot \rho \cdot \omega$$
(2.15)

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.

Στις υψηλές συχνότητες, ($K\alpha \gg 2 \Leftrightarrow \frac{2\pi \cdot \alpha}{\lambda} \gg 2$)

Η αντίστοιχη τιμή ισούται κατά προσέγγιση με:

$$R_r = \pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho \cdot c, \quad X_r = 0 \quad (2.16)$$

Για να διερευνηθεί ποιοτικά η ακουστική συμπεριφορά του μεγαφώνου διακρίνονται δύο περιπτώσεις συνδεσμολογίας:

a) Τροφοδοσία με σταθερό ρεύμα

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή είναι πολύ υψηλή («άπειρη» για τα δεδομένα του κυκλώματος).

b) Τροφοδοσία με σταθερή τάση

Στην περίπτωση αυτή η αντίστοιχη εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή στον οποίο συνδέεται το μεγάφωνο θεωρείται μηδενική και κατ' επέκταση δεν υφίσταται τάση αυτεπαγωγής.

Γράφοντας την εξίσωση κίνησης του κώνου συναρτήσει του ρεύματος προκύπτει:

$$F_{tot} = F_e + F_r \Rightarrow j\mu i \omega \cdot c \cdot u + k \frac{u}{j\omega}$$

$$= B \cdot I \cdot l - Z_r \cdot u \Rightarrow u = \frac{B \cdot I \cdot l}{(Z_m + Z_r)} \quad (2.17)$$

(υπενθυμίζεται ότι η τροφοδοσία γίνεται υπό σταθερό ρεύμα το οποίο καθορίζει η πηγή ρεύματος).

Λογαριθμώντας τη σχέση (2.14) λαμβάνουμε:

$$\log(W_r) = \log(|\mu|^2) + \log(R_r) - \log 2 \quad (2.18)$$

Υπό αυτή τη μορφή, η εκπεμπόμενη ηχητική ισχύς του μεγαφώνου προκύπτει από το άθροισμα δυο προσθετέων (αγνοώντας το σταθερό όρο) και προσφέρεται για γραφική ανάλυση.

Από τη σχέση (2.17) παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του κώνου είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου και του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογη προς το άθροισμα της μηχανικής εμπέδησης και της εμπέδησης ακτινοβολίας.

Από τη σχέση (2.4) παρατηρούμε ότι στις χαμηλές συχνότητες η τιμή της μηχανικής εμπέδησης καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την ελαστικότητα (k) της ανάρτησης του κώνου του μεγαφώνου και αυξάνεται αναλόγως με τη συχνότητα. Στην περιοχή της συχνότητας συντονισμού ο καθοριστικός παράγοντας είναι η τιμή της απόσβεσης

(c) και σε υψηλότερες συχνότητες η κινητή μάζα του κώνου (μείωση με τη συχνότητα).

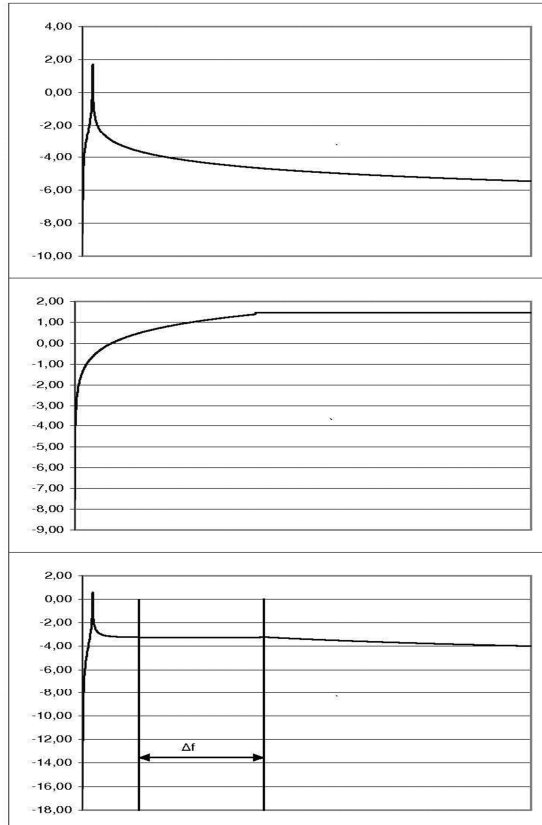
Από τις σχέσεις (2.15) και (2.16) παρατηρούμε ότι η αντίσταση ακτινοβολίας στις χαμηλές συχνότητες αυξάνεται με ρυθμό ανάλογο του τετραγώνου της συχνότητας, ενώ στις υψηλές συχνότητες είναι σταθερή.

Άρα, η συνολική απόκριση του μεγαφώνου στις χαμηλές (μέχρι τη συχνότητα συντονισμού) συχνότητες είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας. Μετά τη συχνότητα συντονισμού είναι περίπου σταθερή (καθότι η μείωση λόγω της μηχανικής εμπέδησης αντισταθμίζεται από αύξηση λόγω της εμπέδησης ακτινοβολίας), ενώ στις υψηλές συχνότητες, όπου η εμπέδηση ακτινοβολίας είναι περίπου σταθερή, έχουμε και πάλι μείωση της απόκρισης ανάλογη προς το τετράγωνο της συχνότητας.

Η ωφέλιμη συχνοτική περιοχή λειτουργίας του μεγαφώνου ορίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο μεταξύ της συχνότητας συντονισμού του κώνου (σχέση 2.5) και της συχνότητας για την οποία ισχύει ότι $K a \approx 2$, καθότι για υψηλότερες συχνότητες η απόκριση του μεγαφώνου φθίνει ως προς f^2 . Ανάλογα με την εφαρμογή πάντως το άνω όριο δύναται να ανεβεί εως και μια οκτάβα παραπάνω (βλ. αύξηση της αξονικής κατευθυντικότητας για υψηλότερες συχνότητες).

Στις συνήθεις συνθήκες (διαστάσεις και βάρος μεγαφώνου και συχνότητες λειτουργίας) η τιμή της εμπέδησης ακτινοβολίας είναι αμελητέα συγκρινόμενη με τη μηχανική εμπέδηση και ως εκ τούτου, σε πρώτη προσέγγιση, δύναται να παραληφθεί κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας του κώνου. Σε περιπτώσεις όμως αναρτήσεων με πολύ μικρή απόσβεση, στην περιοχή του συντονισμού η εμπέδηση ακτινοβολίας δύναται να είναι συγκρίσιμη με τη μηχανική εμπέδηση του μεγαφώνου και ουσιαστικά είναι αυτή που παρέχει την αντίστοιχη απόσβεση και περιορίζει την απόκριση (το πλάτος ταλάντωσης) του συστήματος.

Τα παραπάνω απεικονίζονται υπό μορφή διαγράμματος στο σχήμα 2.4 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.4
Εκπομπή ακουστικής ισχύος από ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο
σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο
Παράγοντες: (1) $\log(u^2)$, (2) $\log(R_r)$, (3) $\log(W_r)$

2.1.4 Απόδοση ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Η συνολική ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει το μεγάφωνο δύναται να υπολογισθεί ($W_e = |I|^2 \operatorname{Re}\{Z_{tot}\}$) και ισούται με:

$$W_e = \frac{|I|^2}{2} \left[R_e + \frac{B^2 l^2 (R_m + R_r)}{|Z_m + Z_r|^2} \right] \quad (2.19)$$

Διαιρώντας την ακουστική ισχύ που ακτινοβολεί το μεγάφωνο με τη συνολική ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει προκύπτει η απόδοση (% efficiency) του μεγαφώνου ως ηλεκτρακουστικού μετατροπέα.

$$\eta = \frac{W_r}{W_e} = \frac{B^2 l^2 R_r}{B^2 l^2 (R_m + R_r) + R_e \cdot |Z_m + Z_r|^2} \quad (2.20)$$

Η παραπάνω σχέση μας δίνει δηλαδή το ποσοστό % της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμη ακουστική ενέργεια.

Άσκηση 1

Να υπολογισθεί η συχνότητα συντονισμού και η ηλεκτρακουστική απόδοση, στις συχνότητες των 100Hz και 2000Hz ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Διάμετρος κώνου: $d = 300mm$

Μάζα: $m = 10gr$

Ακαμψία ανάρτησης: $k = 1000N / m$

Πυκνότητα μαγνητικής ροής: $B = 10T$

Μήκος σύρματος πηνίου: $l = 0,5m$

Μηχανική αντίσταση: $R_m = 0,5Ns / m$

Ηλεκτρική αντίσταση (με ακινητοποιημένα μηχανικά μέρη): $R_e = 8\Omega$

Πυκνότητα αέρα: $\rho = 1,2kg / m^3$

Ταχύτητα του ήχου: $c = 343m / s$

2.1.5 Κατευθυντικότητα ακουστικής εκπομπής

Η κατανομή στο χώρο της ηχητικής ενέργειας που εκπέμπει ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο μεταβάλλεται αναλόγως με τη συχνότητα λειτουργίας. Μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος προκύπτει θεωρώντας ότι ο κώνος του ηχείου είναι ένας συμπαγής δίσκος και κάθε απειροστό σημείο του δίσκου αποτελεί μια σημειακή πηγή. Αθροίζοντας (σε φάση) τη συνεισφορά από όλες αυτές τις απειροστές πηγές είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το συνολικό ηχητικό πεδίο που εκπέμπεται.

Η ακριβής μαθηματική ανάλυση του θέματος ξεφεύγει από το επίπεδο αυτής της εισαγωγής καθώς προϋποθέτει γνώσεις «ανώτερων» μαθηματικών (συναρτήσεις Bessel, για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. *Fundamentals of Acoustics*, Kinsler et al.) και έτσι εδώ θα αναφερθούν απευθείας τα συμπεράσματα μαζί με την ποιοτική ερμηνεία τους.

Στις χαμηλές συχνότητες ($ka \ll 1 \Leftrightarrow \frac{2\pi}{\lambda} \ll 1$) το μέγεθος του κώνου είναι αμελητέο

συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και η ηχητική ακτινοβολία κατανέμεται συμμετρικά. Το μεγάφωνο δηλαδή είναι ισοδύναμο με μια σημειακή πηγή (μονόπολο).

Όσο αυξάνεται η συχνότητα η ηχητική ενέργεια αρχίζει να εστιάζεται περισσότερο προς την περιοχή κατά μήκος του άξονα του μεγαφώνου δημιουργώντας ένα κεντρικό λοβό αυξημένης ηχητικής έντασης, ενώ όσο αποκλίνουμε από τον άξονα η ηχητική ένταση μειώνεται σχηματίζοντας περιοδικά μέγιστα και ελάχιστα (δευτερεύοντες λοβούς του μεγαφώνου). Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας προκαλεί μείωση του γωνιακού εύρους του κύριου λοβού (υπό την έννοια της στερεάς γωνίας Ω) και αύξηση του αριθμού των δευτερεύοντων λοβών.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα παραπάνω ισχύουν σε μεγάλες συγκριτικά αποστάσεις από το μεγάφωνο. Η κατανομή της ηχητικής ακτινοβολίας του

μεγαφώνου είναι πολύ πιο σύνθετη σε μικρές αποστάσεις από τον κώνο, δηλαδή στην περιοχή που ονομάζεται *εγγύς πεδίο* του μεγαφώνου (near field).

Σε όλες σχεδόν τις συνήθεις εφαρμογές μας απασχολεί η συμπεριφορά του μεγαφώνου στο μακρινό πεδίο.

Για λόγους ελέγχου, προσεγγιστικά, το *μακρινό πεδίο* του μεγαφώνου εκτείνεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από:

$$\frac{r}{d} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (2.21)$$

Όπου:

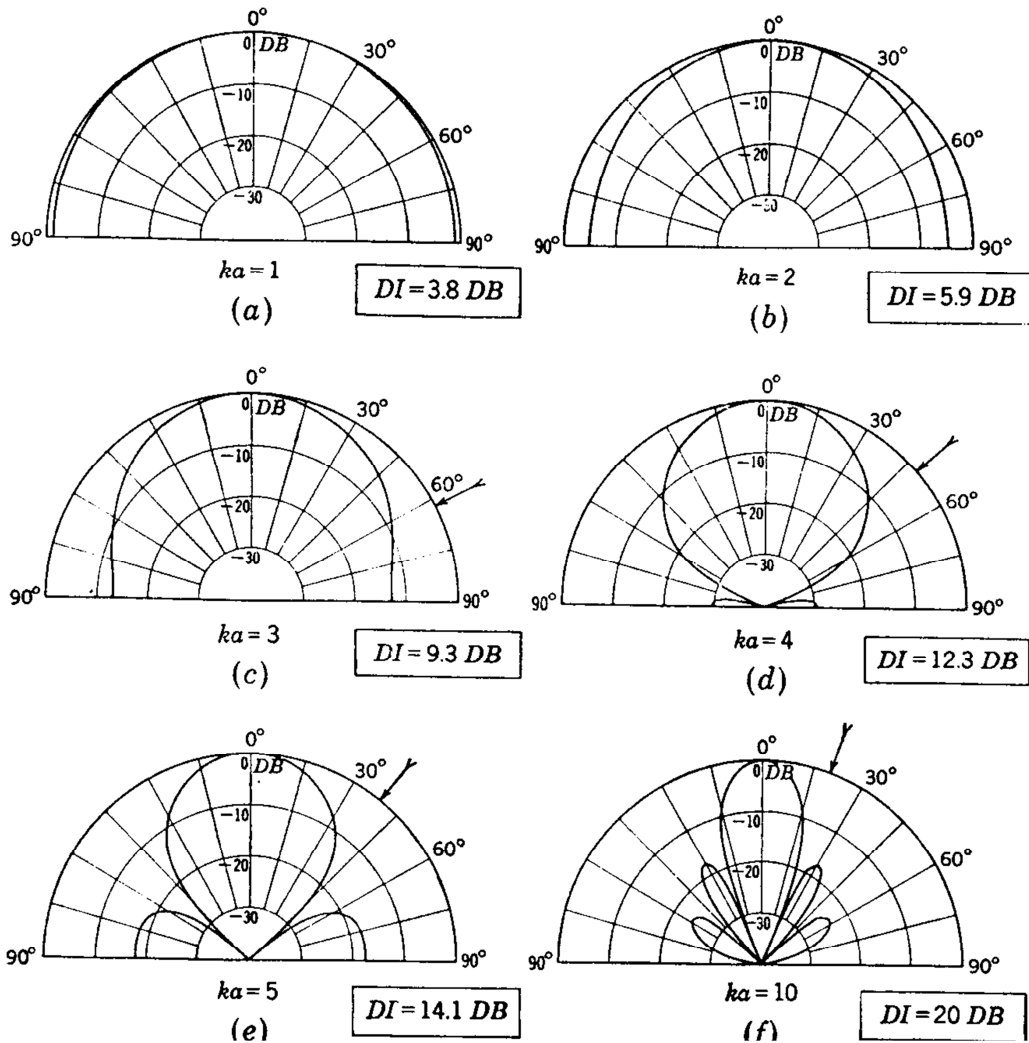
r = απόσταση από την επιφάνεια της πηγής

d = διάμετρος της πηγής (προκειμένου για μεγάφωνο)

λ = μήκος κύματος

Έτσι, λ.χ. για ένα μεγάφωνο διαμέτρου $300mm$ το μακρινό πεδίο εκτείνεται κατά προσέγγιση σε αποστάσεις μεγαλύτερες των: $r = 0.6cm$ για τη συχνότητα των $100Hz$ και $r \geq 6cm$, για τη συχνότητα των $1000Hz$.

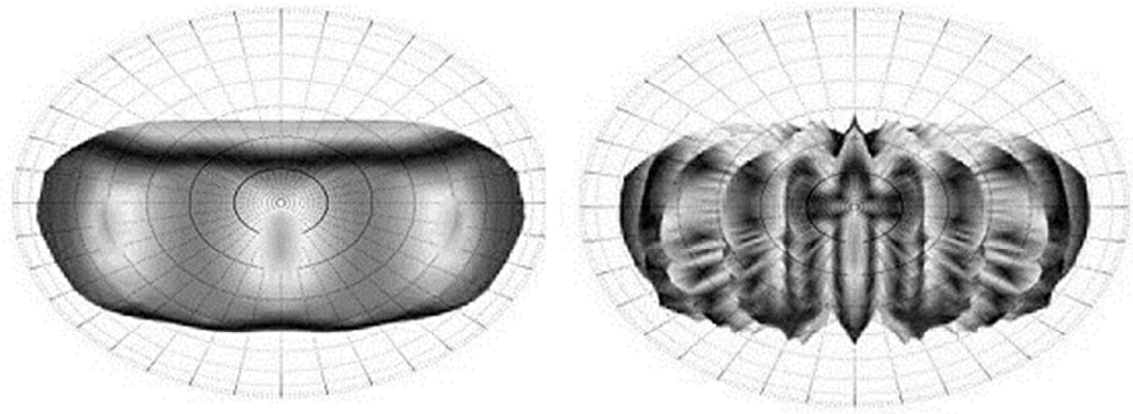
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται, για διαφορετικές συχνότητες η ηχητική ακτινοβολία ενός μεγαφώνου κυκλικής διατομής.



Σχήμα 2.5

Διάγραμμα ακτινοβολίας (πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας) εμβόλου τοποθετημένου σε απείρως εκτεινόμενο ανακλαστικό επίπεδο (baffled piston). Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε προοδευτικά μεγαλύτερες συχνότητες ($ka = 1$ έως $ka = 10$), όπου k ο κυματάριθμος και a η ακτίνα του διαφράγματος. [Acoustics, Beranek].

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ηχητική απόδοση του μεγαφώνου διαφέρει αναλόγως με τη γωνιακή απόσταση από τον άξονα του μεγαφώνου. Το εν λόγω φαινόμενο είναι πολλές φορές αντιληπτό σε ηχητικές εγκαταστάσεις (PA) σε πολύ μεγάλους κλειστούς χώρους ή σε μεγάλης έκτασης εγκαταστάσεις σε ανοικτούς χώρους όπου καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα της ηχητικής πηγής μειώνονται σε στάθμη οι υψηλές συχνότητες της πηγής. Προκειμένου να περιοριστεί κατά το δυνατόν το φαινόμενο αυτό έχουν αναπτυχθεί τα συστήματα τύπου στήλης (Line Array), τα οποία εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη οριζόντια και μικρή κατακόρυφη διασπορά (βλ. σχήμα 4 παρακάτω) και έχουν επικρατήσει στις εφαρμογές πεδίου τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 2.5
Τυπικά διαγράμματα εμπρόσθιας ηχητικής ακτινοβολίας συστήματος Line Array

Επίσης, διαφορετική είναι η συνολική απόκριση ισχύος του μεγαφώνου (δηλαδή η συνολική εκπεμπόμενη ηχητική ισχύς) συγκρινόμενη με την απόκριση ισχύος στον άξονα του μεγαφώνου. Ένα μεγάφωνο που έχει επίπεδη συχνοτική απόκριση μετρούμενη κατά μήκος του κύριου άξονά του, εκπέμπει συνολικά λιγότερη ενέργεια στις υψηλές συχνότητες καθότι η εκτός άξονα απόκριση υστερεί στις υψηλές συχνότητες και κατά συνέπεια και η απόκριση ισχύος του μεγαφώνου (που προκύπτει ολοκληρώνοντας την ακτινοβολούμενη ισχύ σε στερεά γωνία 4π).

Αυτό δύναται να γίνει αισθητό σε μικρούς κλειστούς χώρους με περιορισμένη ηχοαπορρόφηση, όπου ένα μεγάλο μέρος από την εκτός άξονα ηχητική ακτινοβολία ανακλάται από τις οριακές επιφάνειες (τοιχοποιίες, οροφή, δάπεδο, έπιπλα, κλπ.) του δωματίου επιστρέφοντας στον ακροατή, όπου τις περισσότερες φορές γίνεται αντιληπτή η συνολική απόκριση ισχύος του μεγαφώνου και όχι η αξονική.

2.1.6 Περιορισμοί προσεγγιστικού μοντέλου

1. Ο κώνος του μεγαφώνου δεν είναι στην πραγματικότητα ένας απολύτως συμπαγής δίσκος που ταλαντώνεται, αλλά μια ταλαντευόμενη μεμβράνη στην οποία αναπτύσσονται στάσιμα κύματα (βλ. σχήμα 2.6 παρακάτω).

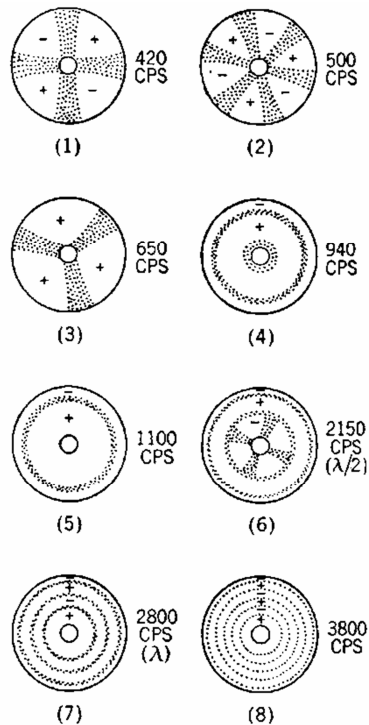
Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι ότι στις υψηλές συχνότητες υπάρχουν περιοχές του κώνου, οι οποίες κινούνται σε αντίθετη φάση προκαλώντας τοπικές ηχο-ακυρώσεις, τροποποιώντας έτσι σημαντικά την τελικώς εκπεμπόμενη κατανομή ακτινοβολίας⁷ και αλλοιώνοντας τη συχνοτική απόκριση εντός και εκτός του άξονα του μεγαφώνου.

Η οξύτητα του φαινομένου αυτού δύναται να περιορισθεί σε κάποιο βαθμό με την αύξηση της εσωτερικής απόσβεσης και της ακαμψίας του κώνου. Η αύξηση όμως της εσωτερικής απόσβεσης του διαφράγματος έχει ως συνέπεια τη μείωση της ενεργούς περιοχής του διαφράγματος (δηλαδή του κλάσματος της επιφάνειας που τίθεται σε κίνηση), τη μείωση της εκπεμπόμενης ηχητικής ισχύος στις χαμηλές συχνότητες και την αύξηση του εύρους του κύριου λοβού (λόγω της μείωσης της εμπέδησης ακτινοβολίας). Η αύξηση του εύρους του

⁷ Η οποία στις αντίστοιχες συχνότητες τείνει να προσεγγίζεται με περισσότερη ακρίβεια από ένα σύνολο στοιχειωδών ακτινοβολιτών (radiators) τύπου διπόλου / τετραπόλου.

κύριου λοβού συνεπάγεται μείωση της αξονικής απόκρισης ισχύος του μεγαφώνου.

2. Το κουτί του μεγαφώνου έχει διαστάσεις περιορισμένες σε σχέση με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί απείρως εκτινόμενο όπως αρχικώς υποθέσαμε.
3. Καμία πηγή ρεύματος ή τάσης δεν έχει άπειρη ή μηδενική αντίσταση αντίστοιχα και κατά συνέπεια η εξίσωση που δίδει την αποδοτικότητα του μεγαφώνου είναι προσεγγιστική.



Σχήμα 2.6

8 τρόποι ταλάντωσης ενός διαφράγματος ηχείου κυκλικής διατομής Συχνότητες από 420Hz (1) έως 3.8 kHz (8), [Acoustics, Beranek]

2.1.7 Επίδραση της καμπίνας του ηχείου

Στα παραπάνω μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, το οποίο είναι στερεωμένο σε μια απείρως εκτεινόμενη ανακλαστική επιφάνεια. Ο βασικός λόγος που χρησιμοποιήθηκε η υπόθεση της ανακλαστικής επιφάνειας είναι ο διαχωρισμός της εμπρόσθιας από την οπίσθια ηχητική ακτινοβολία του κώνου ούτως ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συμβολής. Στην πράξη βέβαια τα μεγάφωνα δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε αντίστοιχες επιφάνειες, αλλά συνήθως τοποθετούνται σε καμπίνες διάφορων σχημάτων και διαστάσεων. Είναι προφανές ότι η τοποθέτηση αυτή επιδρά και στην ηχητική απόδοση του μεγαφώνου. Η επίδραση εξαρτάται από τον τύπο, τις διαστάσεις και τον τρόπο κατασκευής της καμπίνας.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι διατάξεων/καμπίνων για την τοποθέτηση μεγαφώνων.

1. Κλειστού τύπου: Στο εσωτερικό της καμπίνας, η οποία είναι κλειστή με αεροστεγή τρόπο, υπάρχει εγκλωβισμένη μια μάζα αέρα, η οποία δέχεται τις μεταβολές πίεσης λόγω της κίνησης του μεγαφώνου.

2. Ανοικτού τύπου: Ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό της καμπίνας και δέχεται τις μεταβολές πίεσης λόγω της κίνησης του μεγαφώνου και τις αντιδράσεις των τοιχωμάτων της καμπίνας μπορεί να «εκτονωθεί» μέσω ενός ειδικά μελετημένου ανοίγματος της καμπίνας.
3. Τύπου μετάδοσης/χοάνης: Η καμπίνα είναι ουσιαστικά ανοικτή και χρησιμοποιείται ως προσαρμογέας εμπέδησης (και γραμμή καθυστέρησης) για την ακτινοβολία από το πίσω τμήμα του κώνου.

2.1.7.1 Καμπίνες κλειστού τύπου

Η τοποθέτηση ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου σε κλειστού τύπου καμπίνα έχει ως συνέπεια την τροποποίηση της απόκρισης του μεγαφώνου λόγω της μεταβολής της ακουστικής εμπέδησης που «βλέπει» το μεγάφωνο και της δημιουργίας στάσιμων κυμάτων στο εσωτερικό της καμπίνας. Για την απορρόφηση των τελευταίων, συνήθως στο εσωτερικό της καμπίνας τοποθετείται κάποιο πορώδες ηχοαπορροφητικό υλικό.

Η μεταβολή της εμπέδησης οφείλεται στη μηχανική ελαστικότητα του εγκλωβισμένου αέρα και στην αποσβεστική ικανότητα του ηχοαπορροφητικού υλικού (material damping). Στην εξίσωση κίνησης του διαφράγματος θα πρέπει να προστεθεί ένας ακόμα όρος που αντιστοιχεί στην εμπέδηση της καμπίνας.

Στις χαμηλές συχνότητες (μέχρι δηλαδή τη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού της καμπίνας) το φαινόμενο δύναται να εξηγηθεί ποιοτικά, θεωρώντας τον αέρα ως ένα ελατήριο παράλληλα προς έναν αποσβεστήρα, τα οποία ενεργούν απευθείας στο διάφραγμα τροποποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη συχνότητα απόκριση του συστήματος. Η επιπλέον ακαμψία έχει ως συνέπεια τη μετακίνηση της συχνότητας συντονισμού του μεγαφώνου προς υψηλότερες συχνότητες περιορίζοντας έτσι την ωφέλιμη περιοχή λειτουργίας του ηχείου (σε σύγκριση με την τοποθέτηση σε απείρως εκτεινόμενο επίπεδο).

Σε πρώτη προσέγγιση η επιπλέον ακαμψία υπολογίζεται σε:

$$K_c = \frac{\rho c^2 (\pi a^2)^2}{V} \quad (2.22)$$

Όπου a η ακτίνα του διαφράγματος, και V ο όγκος της κοιλότητας.

Η νέα συχνότητα συντονισμού υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$f_s' = f_s \cdot \sqrt{1 + a},$$

$$a = \frac{V_{Ar}}{V_{Bf}} \quad (2.23)$$

Όπου: V_{Bf} ο ισοδύναμος ακουστικός όγκος της καμπίνας (συμπεριλαμβανόμενου του ηχοαπορροφητικού υλικού), V_{Ar} ο ισοδύναμος ακουστικός όγκος του κώνου (ο απαιτούμενος όγκος αέρα επιφάνειας ίσης προς την επιφάνεια του διαφράγματος ώστε να εμφανίζει την ίδια ελαστικότητα με την ανάρτηση του μεγαφώνου⁸).

⁸ Ισούται με $V_{Ar} = \rho c^2 S^2 K_{MS}$, όπου S το εμβαδόν του διαφράγματος και K_{MS} η σταθερά ελαστικότητας του μεγαφώνου

Η οξύτητα του φαινομένου (δηλαδή η τόνωση της απόκρισης του ηχείου στη συχνότητα αυτή) εξαρτάται από τον παράγοντα ποιότητας Q του συντονισμού, ο οποίος καθορίζεται κυρίως από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μεγαφώνου (για τοποθέτηση σε απείρως εκτεινόμενο επίπεδο) και του ηχοαπορροφητικού υλικού που υπάρχει στην κοιλότητα. Τα μεγάφωνα που χρησιμοποιούνται σε ηχεία κλειστής καμπίνας είναι ειδικά σχεδιασμένα να παρουσιάζουν μικρή ακαμψία (μεγάλη ελαστικότητα), ώστε συνδυαζόμενα με την καμπίνα να δίδουν ένα ηχείο που να αποδίδει σε όλη τη περιοχή του ακουστικού φάσματος.

Στο σχήμα 2.7 που ακολουθεί παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας (στις χαμηλές συχνότητες όπου έχει ισχύ το παραπάνω μοντέλο) και οι κρουστικές αποκρίσεις (impulse responses) για έξι διαφορετικές τιμές του συντελεστή ποιότητας μίας καμπίνας κλειστού τύπου.

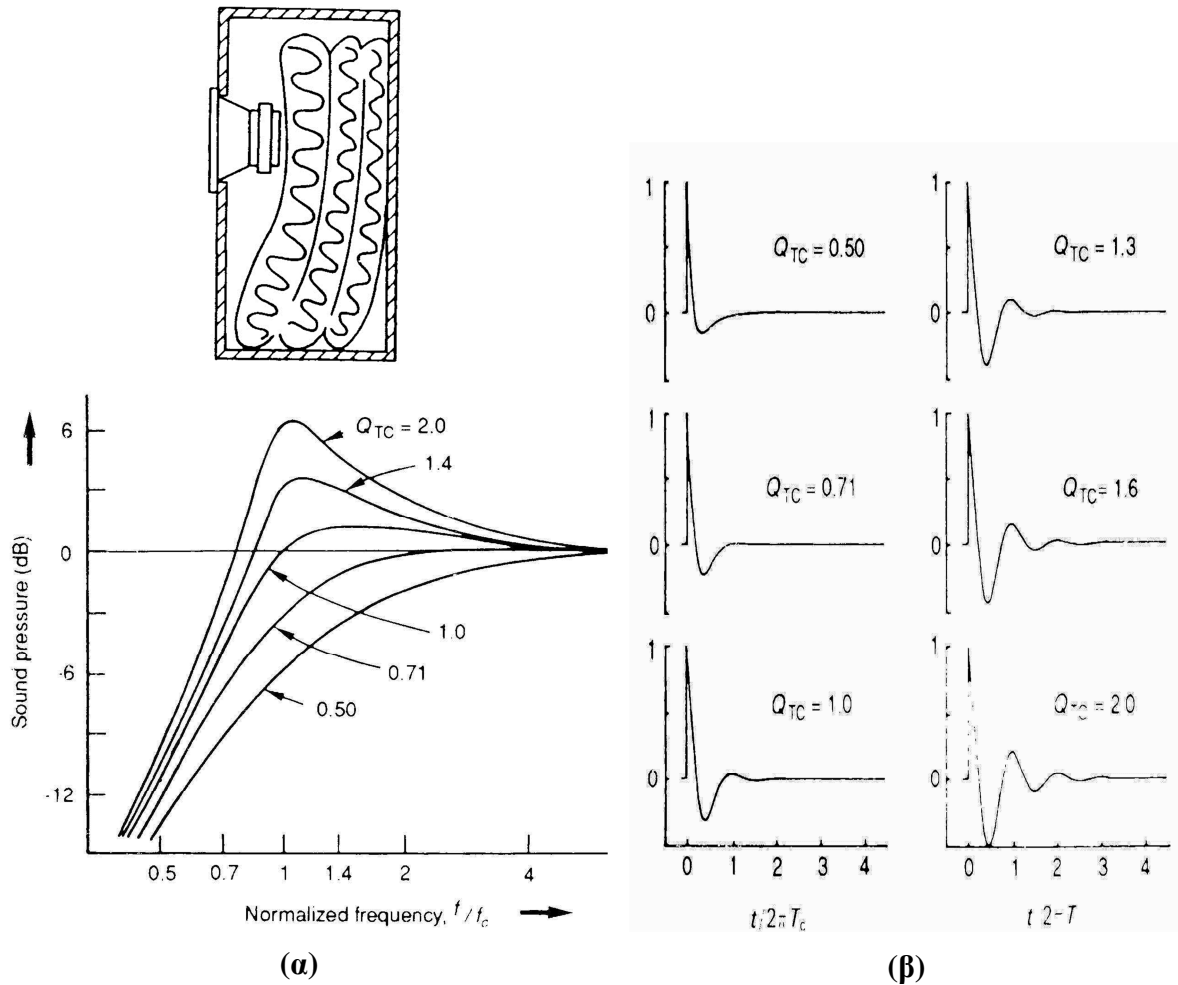
Στις υψηλές συχνότητες το παραπάνω μονοδιάστατο μοντέλο δεν επαρκεί και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η πλήρης κυματική συμπεριφορά εντός της κοιλότητας. Οι ακριβείς συχνότητες εμφάνισης και η πυκνότητα κατανομής (στο πεδίο των συχνοτήτων) των στάσιμων κυμάτων της καμπίνας εξαρτώνται από το σχήμα και τις διαστάσεις της καμπίνας. Προκειμένου λ.χ. για ορθογώνιες παραλληλεπίπεδες καμπίνες και θεωρώντας ότι τα τοιχώματα της καμπίνας δεν μπορούν να ταλαντωθούν, ισχύει η γνωστή σχέση που υπολογίζει και τις συχνότητες συντονισμού σε παραλληλεπίπεδα δωμάτια:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2\right)} \quad (2.24)$$

Όπου: c η ταχύτητα του ήχου, n_x, n_y, n_z ακέραιοι που υποδεικνύουν την τάξη του συντονισμού κατά την αντίστοιχη διεύθυνση και L_x, L_y, L_z οι διαστάσεις της καμπίνας

Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να προτιμούνται διαστάσεις που αντιστοιχούν σε αριθμούς πρώτους μεταξύ τους και σε κάθε περίπτωση πρέπει να αποφεύγονται μήκη που είναι μεταξύ τους ακέραια πολλαπλάσια.

Προκειμένου για πιο σύνθετες γεωμετρίες καμπίνων, ακριβής υπολογισμός των συχνοτήτων συντονισμού απαιτεί τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων και πιο συγκεκριμένα των μεθόδων των πεπερασμένων ή συνοριακών στοιχείων (Finite Elements Analysis / Boundary Elements Analysis). Περισσότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στο ακόλουθο βιβλίο: *High Performance Loudspeakers*, Olson.



Σχήμα 2.7
Ηχείο Ενός Δρόμου – Κλειστής Καμπίνας
(α) Συχνοτική Απόκριση (Frequency response) στις χαμηλές συχνότητες και (β) Κρουστική Απόκριση (Impulse response) για διαφορετικές τιμές του συντελεστή ποιότητας.

Ένα περαιτέρω φαινόμενο που συνδυάζεται με την ύπαρξη του ηχοαπορροφητικού υλικού στο εσωτερικό της καμπίνας είναι η φαινόμενη αύξηση των διαστάσεων της καμπίνας. Το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοσή του μέσω των πόρων του ηχοαπορροφητικού υλικού καθυστερεί περισσότερο έναντι της διάδοσής του στον αέρα, το οποίο ισοδυναμεί με μια φαινόμενη αύξηση των διαστάσεων της καμπίνας.

Αυτό που στην πραγματικότητα συμβαίνει είναι ότι λόγω της ύπαρξης του πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού στην κοιλότητα, η διάδοση ηχητικών κυμάτων στην καμπίνα λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας (ισόθερμη μεταβολή) εν αντιθέσει με τις συνθήκες μηδενικής ανταλλαγής ενέργειας (αδιαβατικής μεταβολής) που λαμβάνουν χώρα άνευ ηχοαπορροφητικού υλικού.

Σε κάθε περίπτωση, η παραπάνω φαινόμενη αύξηση του όγκου της καμπίνας δε δύναται να υπερβεί το 25% της αρχικής τιμής.

2.1.7.2 Καμπίνες ανοικτού τύπου, «ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων» (Vented Box / Bass Reflex)

Στα ηχεία αυτής της κατηγορίας εκμεταλλευόμαστε την ακτινοβολία από την πίσω μεριά του κώνου, την οποία επεξεργαζόμαστε κατάλληλα ώστε να ενισχύσει την ακτινοβολία από την πρόσθια όψη του κώνου.

Αποτελούνται από μια καμπίνα σε ένα τοίχωμα της οποίας έχει δημιουργηθεί ένα άνοιγμα (οπή ανάκλασης χαμηλών, όπως αποκαλείται συνήθως) ούτως ώστε ήχος από το εσωτερικό της καμπίνας να μπορεί να διαφύγει και να συνδυαστεί με την ακτινοβολία από το μεγάφωνο. Κατ' αυτόν τον τρόπο η καμπίνα λειτουργεί ως ένας μεγάλος συνηχητής Helmholtz με την ελαστικότητα του αέρα που βρίσκεται εντός της καμπίνας να θέτει σε κίνηση τη μάζα του αέρα που βρίσκεται στο άνοιγμα⁹. Η συχνότητα συντονισμού ενός συνηχητή Helmholtz υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c^2 S_p}{V l_{eff}}} \quad (2.25)$$

Όπου: S_p το εμβαδόν διατομής της οπής, V ο όγκος της καμπίνας, l_{eff} το ενεργό μήκος της οπής (για κυλινδρικού τύπου λαιμούς ισούται με $l + 8r/3\pi$, όπου l το μήκος του λαιμού και r η ακτίνα του).

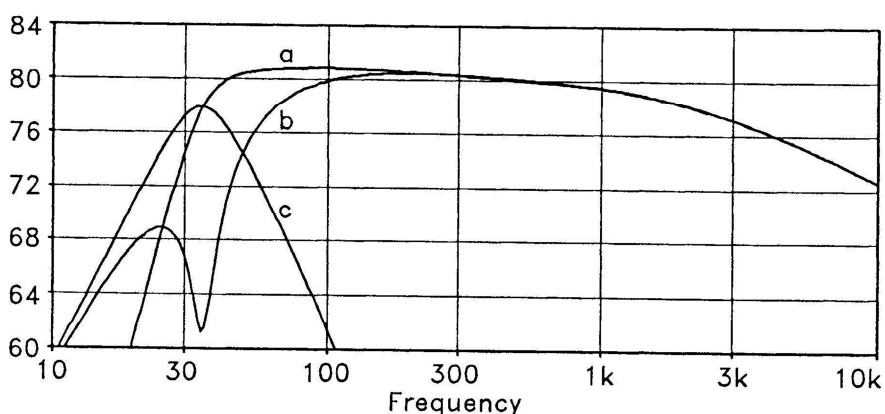
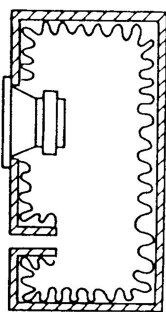
Για συχνότητες μικρότερες της f_o η μάζα του αέρα στην οπή κινείται με αντίθετη φάση με το διάφραγμα και κατ' επέκταση έχει αρνητική συνεισφορά στη συνολικά εκπεμπόμενη ακουστική ισχύ (η ακουστική ακτινοβολία από την οπή συμβάλλει καταστρεπτικά με την ακτινοβολία του διαφράγματος). Στη συχνότητα f_o η κίνηση του αέρα είναι μέγιστη και σε φάση με την κίνηση του διαφράγματος επιτυγχάνοντας έτσι σημαντική ενίσχυση της εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος. Σε υψηλότερες συχνότητες η κίνηση των μορίων του αέρα είναι περιορισμένη και η ύπαρξη της οπής δεν τροποποιεί ουσιαστικά την απόκριση του ηχείου.

Στη συχνότητα f_o επίσης η ταχύτητα του διαφράγματος λαμβάνει ελάχιστη τιμή (οριακά τείνει προς το μηδέν). Συνέπεια αυτού είναι ότι η τάση αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου είναι αμελητέα και κατά συνέπεια η εμπέδηση του μεγαφώνου γίνεται ελάχιστη με τιμή που καθορίζεται από την ωμική αντίσταση του πηνίου. Ελαχιστοποίηση όμως της εμπέδησης συνεπάγεται μεγιστοποίηση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και κατ' επέκταση θέρμανση του μεγαφώνου και αυξημένο κίνδυνο καταστροφής του. Πολλές φορές η συχνότητα f_o επιλέγεται πολύ κοντά στη συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου καθότι με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι μετατοπίσεις του διαφράγματος και έτσι επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής του.

Παρατηρώντας τη σχέση (2.25) παραπάνω διαπιστώνουμε ότι μεταβάλλοντας το μήκος και τη διατομή του σωλήνα είμαστε σε θέση να ρυθμίσουμε τη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας. Με προσεκτική επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού είμαστε σε θέση έτσι να επεκτείνουμε σημαντικά την απόδοση του ηχείου στις χαμηλές συχνότητες.

⁹ Για την ακρίβεια η μάζα του αέρα που κινείται είναι μεγαλύτερη κατά ένα παράγοντα που εξαρτάται από τη γεωμετρία του ανοίγματος. Τιμές του παράγοντα διόρθωσης βρίσκονται στη βιβλιογραφία [*Fundamentals of Acoustics*, Kinsler et al.].

Στο σχήμα 2.8 που ακολουθεί απεικονίζεται η συχνотική απόκριση ενός ηχείου με καμπίνα ανοικτού τύπου.



Σχήμα 2.8
Απόκριση Συχνότητας Ηχείου Ανοικτού Τύπου
(α) Συνολικού Ηχείου, (β) Μεγαφώνου και (γ) Καμπίνας με οπή ανάκλασης χαμηλών

Πρέπει να αναφερθεί ότι μεταξύ δύο ηχείων (ενός κλειστού και ενός ανοικτού τύπου) ίσου όγκου και ίδιου συχνотικού εύρους λειτουργίας, το ανοικτού τύπου θα είναι αποδοτικότερο ως ηλεκτρακουστικός μετατροπέας. Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η ίδια συχνότητα συντονισμού θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγάφωνα με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά.

Περιορισμοί προσεγγιστικού μοντέλου

Το παραπάνω απλουστευτικό μοντέλο δε λαμβάνει υπ' όψιν:

1. Τις παραμορφώσεις λόγω στροβιλισμών του αέρα στην περιοχή του ανοίγματος
2. Την ακουστική παραμόρφωση λόγω των εσωτερικών συντονισμών (στάσιμα κύματα τύπου σωλήνα) στο εσωτερικό του σωλήνα.
3. Τη μη γραμμική απόκριση του συνηχητή Helmholtz κατά τη φάση της συμπύκνωσης και της εκτόνωσης του αέρα στην κοιλότητα.
4. Την ύπαρξη ηχοαπορροφητικού υλικού στην κοιλότητα (δεν είναι εν γένει απαραίτητο σε ένα ηχείο με καμπίνα ανοικτού τύπου).

Μια παραλλαγή, τέλος, του ηχείου με καμπίνα ανοικτού τύπου είναι και τα ηχεία με παθητικό ακτινοβολητή. Η αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου ηχείου είναι η ίδια μόνο που στην είσοδο της οπής τοποθετείται ένα διάφραγμα, η μάζα του οποίου

ταλαντώνεται κατ' αντιστοιχία με τη μάζα του αέρα στην απλή περίπτωση. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ηχείων είναι η μικρότερη παραμόρφωση και η μεγαλύτερη γραμμικότητα στην απόκρισή τους καθώς αποφεύγονται όλα τα προβλήματα αεροδυναμικής.

Ακουστική ακτινοβολία των τοιχωμάτων της καμπίνας

Στα παραπάνω δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η μηχανική ταλάντωση των τοιχωμάτων της καμπίνας τα οποία θεωρήθηκαν ότι παρουσιάζουν άπειρη ακαμψία. Στην πραγματικότητα, η δυναμική ακαμψία των τοιχωμάτων είναι πεπερασμένη και σε αρκετές περιπτώσεις η ταλάντωση των τοιχωμάτων της καμπίνας επηρεάζει σημαντικά («χρωματίζει») την απόκριση του μεγαφώνου στις χαμηλές συχνότητες.

Θεωρώντας, σε πρώτη προσέγγιση, τα τοιχώματα της καμπίνας επίπεδα πάνελ με συνοριακές συνθήκες πάκτωσης, οι συχνότητες συντονισμού δύναται να υπολογισθούν σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_{m_x.m_y} = \frac{12}{2\pi} \sqrt{\frac{B_s}{\rho}} \cdot \sqrt{\left(\frac{7}{2} \left(\frac{1}{m_x^4} + \frac{1}{m_y^4} + \frac{4}{7} + \frac{1}{m_x^2 m_y^2} \right) \right)} \quad (2.26)$$

$$B_s = \frac{E \cdot t^2}{12} \cdot (1 - c^2)$$

Όπου: B_s η καμπτική δυσκαμψία, E το μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's Modulus), ρ η πυκνότητα του πάνελ, t το πάχος του πάνελ, c ταχύτητα διάδοσης διαμηκών κυμάτων στο υλικό του πάνελ και m_x/m_y η τάξη συντονισμού.

Πίνακας 1

Ενδεικτικές τιμές φυσικών χαρακτηριστικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή καμπίνων ηχείων

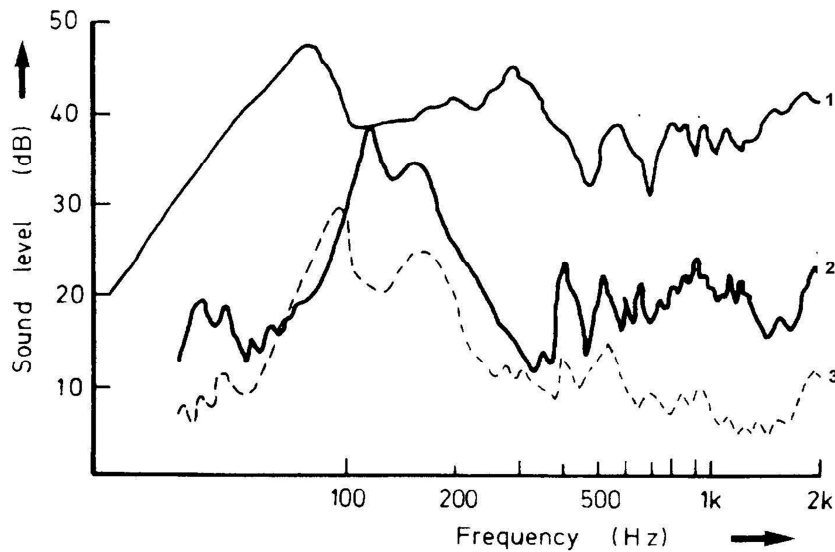
Υλικό	ρ (kg/m ³)	E (kN/m ²)	c (m/s)
Αντικολλητά Φύλλα «κόντρα πλακέ»	670	0.33x 10 ¹⁰	3300
MDF	750	40x10 ¹³	3960

Παρατηρούμε δηλαδή ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα εμφανίζεται μια σειρά από διαδοχικούς συντονισμούς των τοιχωμάτων της καμπίνας.

Παρότι η ακουστική ακτινοβολία που σχετίζεται με τις ταλαντώσεις αυτές έχει γενικά μικρότερη ενέργεια από την ενέργεια που ακτινοβολείται από τον κώνο του μεγαφώνου (τις περισσότερες φορές βρίσκεται τουλάχιστον 20dB κάτω από αυτή) εντούτοις, αναλόγως και με την οξύτητα του συντονισμού (Q), δύναται να γίνει αντιληπτή και να «θολώσει» τη συνολική απόκριση του ηχείου.

Στην πράξη, προκειμένου να μειωθούν οι ταλαντώσεις των τοιχωμάτων της καμπίνας εφαρμόζονται εγκάρσιες στατικές ενισχύσεις, όπως επίσης χρησιμοποιούνται πιο σύνθετα υλικά (τύπου «σάντουιτς»). Στις περιπτώσεις αυτές, οι συχνότητες ταλάντωσης είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν σε κλειστή μορφή και συνήθως εφαρμόζεται ένας συνδυασμός αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων. Στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της απόκρισης συχνότητας μιας

καμπίνας από αντικολλητά φύλλα «κόντρα πλακέ» με την προσθήκη μιας δεύτερης στρώσης απορροφητικού υλικού ασφαλτικού τύπου.



Σχήμα 2.9

Επίδραση των δονήσεων της καμπίνας στην απόκριση συχνότητας ηχείου
Απόκριση συχνότητας: Συνολικού Ηχείου (πάνω), Καμπίνας αποτελούμενης από
αντικολλητά φύλλα πάχους 9mm (μέση) και (3) Καμπίνας αποτελούμενης από
αντικολλητά φύλλα πάχους 9mm με την προσθήκη ασφαλτικής στρώσης πάχους
12mm (κάτω). [Barlow,D.A. *Sound output of loudspeaker cabinet walls*, Proc
AES, 50th Convention, London, 1975]

2.1.8 Μεγάφωνα τύπου χοάνης

Η ακουστική ανάλυση των ηχείων τύπου χοάνης αρχικά πραγματοποιήθηκε από το Λόρδο Rayleigh και τον A.Webster στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αν και η αρχή λειτουργίας τους ήταν ήδη γνωστή από την αρχαιότητα (στις θεατρικές παραστάσεις στην αρχαία Ελλάδα οι μάσκες των ηθοποιών είχαν ένα είδος χοάνης για την ενίσχυση της φωνής του ηθοποιού).

Αποτελούνται από ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο προσαρμοσμένο σε μια χοάνη, η οποία είναι το ακουστικό ανάλογο του ηλεκτρικού μετασχηματιστή προσαρμόζοντας ουσιαστικά την εμπέδηση του διαφράγματος του μεγαφώνου στην ακουστική εμπέδηση του αέρα και αυξάνοντας έτσι κατά πολύ τη μεταφορά ισχύος από το μεγάφωνο στον αέρα.

Τα μεγάφωνα τύπου χοάνης δύνανται να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 50%, σε αντιπαράθεση με τα ηχεία ανοικτού και κλειστού τύπου των οποίων η απόδοση δεν ξεπερνάει, στην καλύτερη περίπτωση, το 5%.

Η εξίσωση του ηχητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός κυματοαγωγού, το εμβαδόν της διατομής S του οποίου είναι συνάρτηση της απόστασης από την αρχή του ($S(x)$), υπακούει τη διαφορική εξίσωση του Webster:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \left(\frac{1}{S} \frac{dS}{dx} \right) \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (2.27)$$

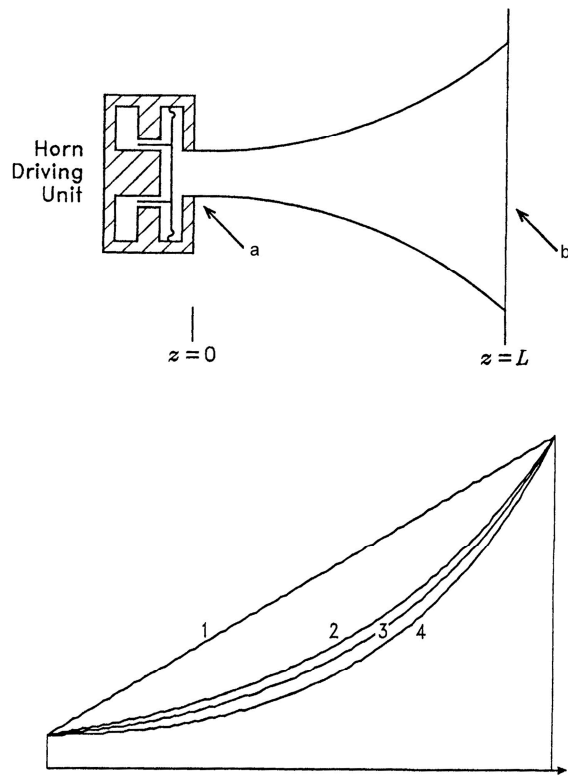
Η παραπάνω εξίσωση δύναται να εξαχθεί απευθείας από την εξίσωση συνέχειας για απειροστούς όγκους εντός του κυματαγωγού και την αρχή διατήρησης της ορμής με γραμμικοποίηση.

Η αναλυτική επίλυση της παραπάνω εξίσωσης είναι εύκολη στην περίπτωση που η εξίσωση που δίδει την εξάρτηση του εμβαδού της διατομής από την απόσταση έχει παράγωγο της ίδιας συναρτησιακής μορφής με την αρχική συνάρτηση (βλ. παρακάτω).

Τα πλέον συνηθισμένα σχήματα χοάνων που χρησιμοποιούνται και πληρούν αυτή την προϋπόθεση είναι τα παρακάτω:

1. Κωνική (conical horn) με συναρτησιακή μορφή: $S(x) = ax^2$
2. Εκθετική (exponential horn) με συναρτησιακή μορφή: $S(x) = ae^{mx}$
3. Υπερβολική (hyperbolic horn) με συναρτησιακή μορφή:
 $S(x) = [a \cosh(mx) + b \sinh(mx)]^2$, $m > 0$, $0 < b < 1$
4. Υπερβολική (hyperbolic horn) με συναρτησιακή μορφή: $S(x) = a \cosh^2(mx)$
με $m > 0$

Η γενική μορφή ενός μεγαφώνου τύπου χοάνης καθώς και οι παραπάνω συχνότερα απαντόμενες διατομές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.10

Μεγάφωνο Τύπου Χοάνης

(1) Κωνικής διατομής, (2) Εκθετικής διατομής, (3) Υπερβολικής διατομής και (4) Κατατονικής διατομής.

Ξεκινώντας από την εξίσωση του εμβαδού της διατομής της κωνικής μορφής και παραγωγίζοντας ως προς την απόσταση λαμβάνουμε:

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dx} = \frac{2}{x} \quad (2.28)$$

Αντικαθιστώντας στη γενική διαφορική εξίσωση λαμβάνουμε:

$$-k^2 p - \frac{2}{x} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (2.29)$$

Η γενική λύσης της παραπάνω εξίσωσης έχει τη μορφή:

$$p(x) = \frac{A}{x} e^{-ikx} \quad (2.30)$$

Και είναι της ίδιας μορφής με τα σφαιρικά κύματα που απομακρύνονται από σημειακή πηγή με ταχύτητα:

$$c_o = \frac{\omega}{k} \quad (2.31)$$

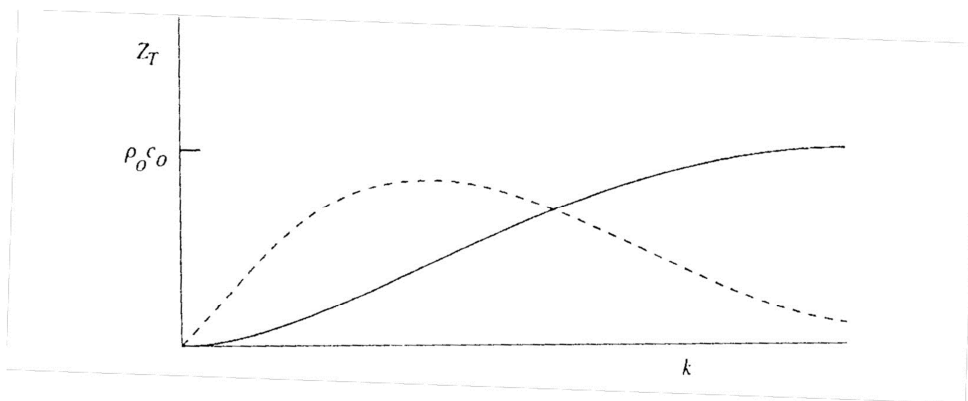
Η ακουστική εμπέδηση της χοάνης δύναται να προκύψει αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.30) στη γενική μορφή της εξίσωσης που συνδέει την ακουστική πίεση με τη σωματιδιακή ταχύτητα των μορίων του αέρα:

$$u = \frac{i}{\omega \rho_o} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.32)$$

Οπότε εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει ότι:

$$Z = \rho_o c_o \left\{ \frac{(kx)^2 + ikx}{(kx)^2 + 1} \right\} \quad (2.33)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η ακουστική εμπέδηση είναι συνάρτηση τόσο της συχνότητας όσο και της απόστασης από την αρχή του κώνου. Στο σχήμα 2.11 που ακολουθεί παρουσιάζεται το γράφημα της ακουστικής εμπέδησης στο λαιμό της χοάνης σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



Σχήμα 2.11

Συχνοτική Εξάρτηση της Εμπέδησης Μεγάφωνου Τύπου Κωνικής Χοάνης

Εκκινώντας τώρα από την αντίστοιχη εξίσωση για την εκθετική χοάνη και εκτελώντας παρόμοιους υπολογισμούς καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις:

$$p(x) = A \cdot e^{-i\gamma x},$$

$$\gamma = \frac{-m \pm \sqrt{m^2 - 4k^2}}{2} \quad (2.34)$$

Η αντίστοιχη γενική λύση λοιπόν αντιπροσωπεύει δύο κύματα που κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις (από και προς το κέντρο της χοάνης).

Η ταχύτητα κίνησης σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ως:

$$c_{ph} = \frac{c_o}{\sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}}} \quad (2.35)$$

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα διάδοσης μεταβάλλεται αναλόγως με τη συχνότητα της κύμανσης. Συνέπεια αυτού είναι η αλλοίωση του σχήματος σύνθετων κυματομορφών κατά τη διάδοσή τους κατά μήκος της χοάνης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διασκεδασμός (dispersion). Επίσης, παρατηρούμε ότι για $m = 2k$ η ταχύτητα διάδοσης τείνει στο άπειρο. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα αποκοπής της

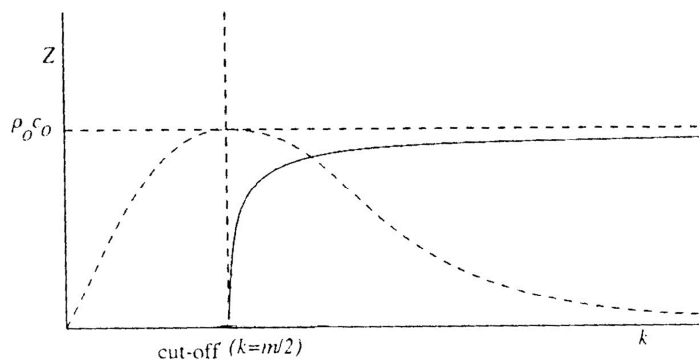
χοάνης και είναι η μικρότερη συχνότητα που μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος της χοάνης.

Η εμπέδηση της εκθετικής χοάνης υπολογίζεται ως:

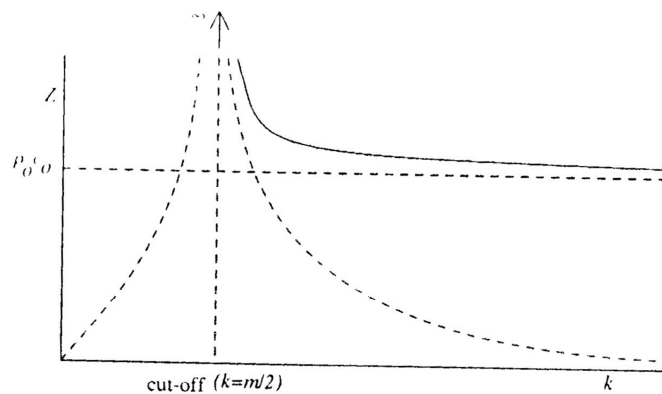
$$Z = \rho_o c_o \left(\sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + i \frac{m}{2k} \right) \quad (2.36)$$

Παρατηρούμε ότι ενώ και σε αυτή την περίπτωση η εμπέδηση είναι συνάρτηση της συχνότητας, είναι ανεξάρτητη από τη θέση επί του σωλήνα της χοάνης.

Στο σχήμα 2.12 που ακολουθεί απεικονίζεται γραφικά η εμπέδηση (ως συνάρτηση της συχνότητας) για εκθετικές και υπερβολικές χοάνες.



(a)

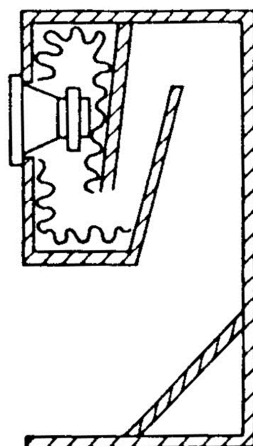


(b)

Σχήμα 2.12
Συχνотική Εξάρτηση της Εμπέδησης Μεγάφωνου Τύπου Χοάνης
(a) Εκθετικής και (b) Υπερβολικής

Παρατηρούμε ότι για να μπορεί μια χοάνη να αποδώσει και στις χαμηλές συχνότητες θα πρέπει να έχει αρκετά μεγάλες διαστάσεις. Για εξοικονόμηση χώρου, οι κατασκευαστές ηχείων τύπου χοάνης που αναπαράγουν χαμηλές συχνότητες πολλές

φορές αναδιπλώνουν τη χοάνη εντός της καμπίνας του ηχείου (βλ. σχήμα 2.13 παρακάτω).

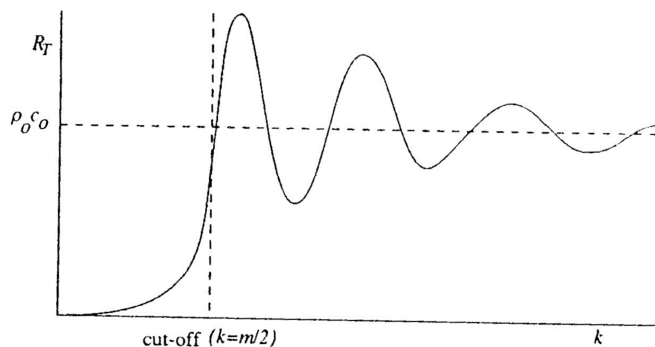


Σχήμα 2.13
Καμπίνα Ηχείου Τύπου Χοάνης Χαμηλών Συχνοτήτων

Εμπέδηση εξόδου της χοάνης

Στα παραπάνω υποθέσαμε σιωπηρά ότι η χοάνη έχει άπειρο μήκος και κατ' επέκταση μπορούμε να παραγωγίσουμε την εξίσωση του (εγκάρσιου) εμβαδού της καθ' όλο το μήκος της. Στην πράξη φυσικά η χοάνη έχει πεπερασμένο μήκος και τα ακουστικά κύματα καθώς φθάνουν στο όριο της χοάνης «συναντούν» μια ασυνέχεια εμπέδησης με αποτέλεσμα την ανάκλαση μέρους της ηχητικής ενέργειας προς την αρχή της χοάνης.

Η μορφή της εμπέδησης εξόδου μιας χοάνης εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις της χοάνης και έχει γενικά σύνθετη μορφή. Σε γενικές όμως γραμμές έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο σχήμα 2.14 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.14
Εμπέδηση Εξόδου Χοάνης Πεπερασμένων Διαστάσεων

Παρατηρούμε ότι η εμπέδηση εξόδου εμφανίζει διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα (σε συχνοτικές αποστάσεις που αυξάνονται όσο αυξάνεται και η συχνότητα).

Κατευθυντικότητα

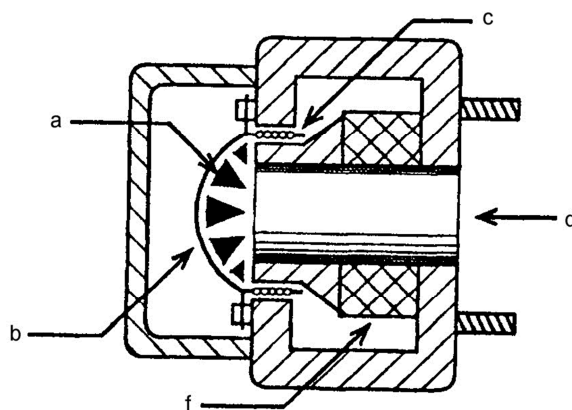
Η κατευθυντικότητα των μεγαφώνων τύπου χοάνης είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις διαστάσεις και τη μορφή της διατομής της χοάνης. Συγκρινόμενα με τους άλλους τύπους ηχείων είναι σαφώς πιο κατευθυντικά, ενώ χρησιμοποιώντας εξελιγμένα υπολογιστικά μοντέλα σε Η/Υ σήμερα κατασκευάζονται μεγάφωνα με μορφές κατευθυντικότητας, οι οποίες είναι αδύνατον να επιτευχθούν με άλλο τύπο μεγαφώνου (εκτός και αν χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα υψηλός αριθμός μονάδων).

Σε γενικές γραμμές, η κατευθυντικότητα των μεγαφώνων τύπου χοάνης καθορίζεται από:

1. Τη γεωμετρία και τις διαστάσεις της εξόδου της χοάνης (επηρεάζει κυρίως τις χαμηλές συχνότητες).
2. Την κλίση (ή το ρυθμό μεταβολής αυτής) των τοιχωμάτων (επηρεάζει κυρίως τις μεσαίες συχνότητες).
3. Τις διαστάσεις της εισόδου (λαιμού) της χοάνης (επηρεάζει τις υψηλές συχνότητες).

Μεγάφωνο οδήγησης της χοάνης

Στην αρχή («στόμα») της χοάνης τοποθετείται το μεγάφωνο οδήγησης. Στη γενικότερη μορφή του πρόκειται για ένα μικρό ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο το οποίο ακτινοβολεί προς την έξοδο «λαιμό» της χοάνης διαμέσου μιας διάταξης διόρθωσης της φάσης (phase plug). Η τομή μιας τυπικής μονάδας απεικονίζεται στο σχήμα 2.15 παρακάτω:



Σχήμα 2.15
Μεγάφωνο Οδήγησης Χοάνης
(a) Διορθωτής Φάσης, (b) Διάφραγμα, (c) Πηνίο, (d) Λαιμός Χοάνης και
(f) Μόνιμος Μαγνήτης

Η αναγκαιότητα για την τοποθέτηση του phase plug προκύπτει λόγω του αυξημένου μεγέθους του διαφράγματος σε σχέση με την είσοδο της χοάνης (το οποίο είναι απαραίτητο προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα του μεγαφώνου). Το phase plug ουσιαστικά εξασφαλίζει την ταυτόχρονη άφιξη της ηχητικής ακτινοβολίας από κάθε στοιχειώδες τμήμα του διαφράγματος.

2.1.9 Ηλεκτροστατικά ηχεία

Τα ηλεκτροστατικά ηχεία, σε αντίθεση με τα ηλεκτροδυναμικά, βασίζονται στην ηλεκτρική δύναμη Coulomb που ασκείται όταν ηλεκτρικό φορτίο βρεθεί εντός ηλεκτρικού πεδίου.

Αποτελούνται από ένα λεπτό διάφραγμα (από κάποιο πλαστικό ή πολυεστερικό υλικό με ενσωματωμένο κάποιο αγώγιμο πλέγμα), το οποίο τοποθετείται μεταξύ δύο αγώγιμων πλεγμάτων. Το διάφραγμα συνδέεται με μια πηγή πόλωσης και σε σειρά με κάποια πολύ μεγάλη αντίσταση ώστε να αναπτύξει υψηλό στατικό φορτίο. Είναι σύνηθες η τάση πόλωσης του διαφράγματος ως προς τα πλέγματα που το περικλείουν να είναι της τάξης των μερικών kV . Το προς αναπαραγωγή ηχητικό σήμα διοχετεύεται στα δύο πλέγματα με αντίθετη φάση ούτως ώστε να αναπτυχθεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ τους. Υπό την επίδραση αυτού του πεδίου τίθεται σε κίνηση το διάφραγμα και εκπέμπεται η ηχητική ακτινοβολία.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία των ηλεκτροστατικών ηχείων είναι η απόλυτη ομοιομορφία του ηλεκτροστατικού πεδίου μεταξύ των δύο πλεγμάτων και η ομοιόμορφη πόλωση του διαφράγματος.

Προκειμένου να εκπέμπεται ο ήχος ανενόχλητα διαμέσου των αγώγιμων πλεγμάτων θα πρέπει αυτά να έχουν αρκετά μεγάλο ποσοστό διάτρησης. Συγχρόνως, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η επαρκής δυναμική ακαμψία για την αποφυγή ταλαντώσεων/συντονισμών (που γίνονται αντιληπτές ως αρμονική παραμόρφωση) είτε των πλεγμάτων είτε του διαφράγματος.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, η απόδοση των ηλεκτροστατικών ηχείων, ειδικά στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, δύναται να είναι εξαιρετική ξεπερνώντας σε πολλές περιπτώσεις την απόδοση ακόμη και των καλύτερων συστημάτων που βασίζονται στα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η απουσία αρμονικής παραμόρφωσης, η πολύ καλή χρονική τους απόκριση (λόγω της πολύ μικρής μάζας του διαφράγματος) και η γραμμικότητά τους.

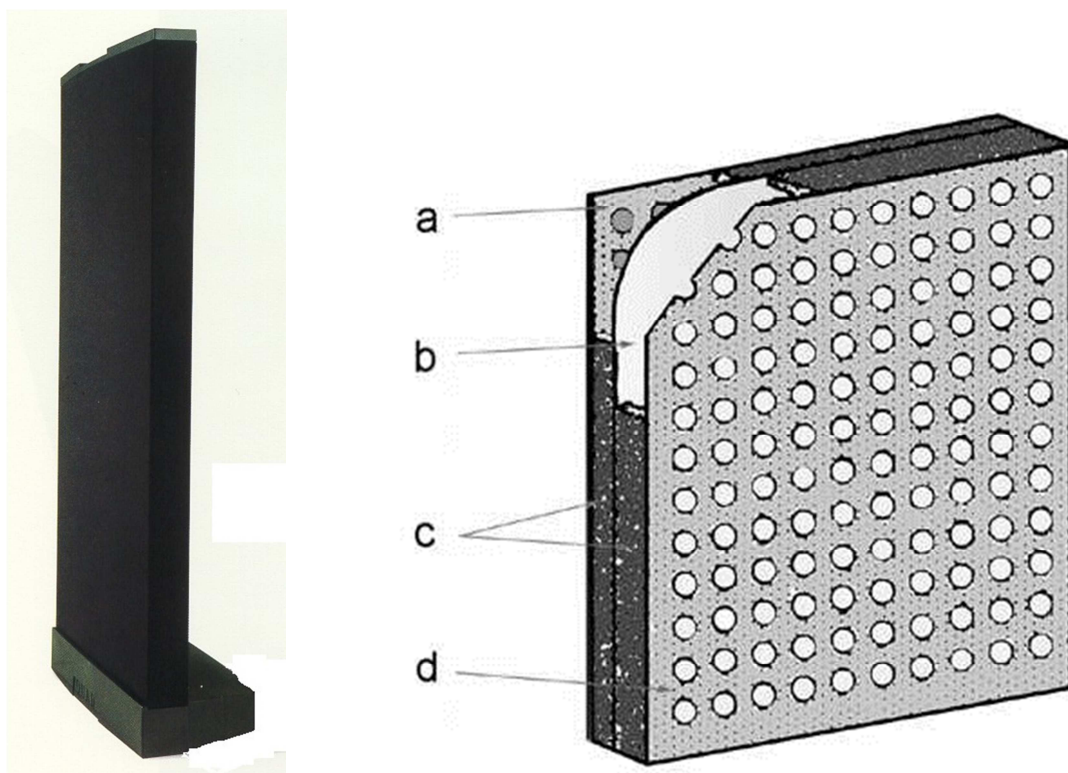
Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την τοποθέτησή τους καθότι η κατευθυντικότητα τους προσεγγίζει περισσότερο αυτή του διπολικού ακτινοβολητή, λόγω της απουσίας καμπίνας διαχωρισμού της πρόσθιας και της οπίσθιας ακτινοβολίας του διαφράγματος (το αποτέλεσμα της συμβολής των οποίων αντιστοιχεί στη γνωστή διπολική κατευθυντικότητα).

Στα μειονεκτήματα των ηλεκτροστατικών ηχείων θα πρέπει πρωτίστως να αναφερθεί η μικρή απόδοσή τους στις χαμηλές συχνότητες. Λόγω της μικρής μάζας του διαφράγματος, αλλά και της πολύ μικρής δυνατής μετατόπισης του διαφράγματος (καθότι ο διαθέσιμος χώρος μεταξύ των πλεγμάτων είναι πολύ περιορισμένος) δεν είναι σε θέση να θέσουν σε κίνηση τη μεγάλη μάζα αέρα που απαιτείται στις χαμηλές συχνότητες. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, έχουν παρουσιαστεί μικτά συστήματα που χρησιμοποιούν ηλεκτροδυναμικά ηχεία για την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων (woofer).

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω του διαφορετικού τρόπου λειτουργίας τους τα ηλεκτροστατικά ηχεία είναι διατάξεις πολύ υψηλής εσωτερικής εμπέδησης (καθότι στην πραγματικότητα το όλο σύστημα βρίσκεται διαρκώς σε υψηλή τάση, ενώ το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμά του είναι πολύ μικρό). Σε αντιπαράβολή, τα ηλεκτροδυναμικά ηχεία είναι διατάξεις μικρής εσωτερικής εμπέδησης (της τάξης των 2-16Ω) καθότι στηρίζουν τη λειτουργία τους στη ροή ρεύματος από το πηνίο.

Δεδομένου ότι οι περισσότεροι ενισχυτές κατασκευάζονται για την οδήγηση ηλεκτροδυναμικών ηχείων, η σύνδεση σε αυτούς ενός ηλεκτροστατικού ηχείου απαιτεί την παρεμβολή ενός μετασχηματιστή με υψηλό λόγο σπειρών πρωτεύοντος-δευτερεύοντος. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να ληφθεί ούτως ώστε ο μετασχηματιστής να είναι σε θέση να αναπαράγει το σύνολο του ακουστικού φάσματος.

Λόγω του πολύ υψηλού κόστους τους και της αδυναμίας τους να αναπαράγουν υψηλές ηχητικές στάθμες τα ηλεκτροστατικά ηχεία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε οικιακές εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλής πιστότητας αναπαραγωγής.



Σχήμα 2.16
Ηλεκτροστατικό μεγάφωνο
(a) Πρόσθιο Πλέγμα Πόλωσης, (b) Διάφραγμα, (c) Αποστάτες και (d) Οπίσθιο Πλέγμα Πόλωσης

2.1.10 Μεγάφωνα τύπου ταινίας (Ribbon speakers)

Τα μεγάφωνα τύπου ταινίας βασίζονται στη λειτουργία τους σε αμιγώς μαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια ταινία από αλουμίνιο, η οποία αποτελεί το διάφραγμα του μεγαφώνου και βρίσκεται στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο ενός ζεύγους ισχυρών μόνιμων μαγνητών. Η ταλάντωση της ταινίας αλουμινίου προκαλεί την εκπομπή ηχητικής ακτινοβολίας. Λόγω της μικρής μάζας των κινητών μερών (ταινία αλουμινίου) τα μεγάφωνα τύπου ταινίας εμφανίζουν πολύ καλή απόδοση και πιστότητα στις υψηλές συχνότητες, αλλά λόγω των περιορισμένων διαστάσεων δεν αποδίδουν ικανοποιητικά στις χαμηλές συχνότητες. Για την επίτευξη υψηλών ηχητικών στάθμεων απαιτείται η χρήση ενός ιδιαίτερα ισχυρού μαγνήτη, ενώ λόγω της πολύ μικρής αντίστασης του διαφράγματος η σύνδεση με τον ενισχυτή πρέπει πάντα να πραγματοποιείται με την παρεμβολή ενός προσαρμογέα εμπέδησης (μετασχηματιστή υψηλής ποιότητας).

Πέραν της υψηλής τους απόδοσης στις υψηλές συχνότητες, βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας μεγαφώνων είναι ότι λόγω γεωμετρίας του διαφράγματος¹⁰ (σχήματος ταινίας) η διασπορά τους είναι πολύ μικρή στον κατακόρυφο άξονα και πολύ μεγάλη στον οριζόντιο, καθιστώντας τα ιδανικά για κατακόρυφη τοποθέτηση σε σύνθετα συστήματα (line arrays).

Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η σχετικά υψηλή τιμή τους, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής του ηλεκτρομαγνήτη και του μετασχηματιστή προσαρμογής του μεγαφώνου.



Σχήμα 2.17
Μεγάφωνο Τύπου Ταινίας

¹⁰ Το αποτέλεσμα συμβολής των επιμέρους απειροστών σημειακών πηγών στα οποία δύναται να χωριστεί ένας πεπερασμένος ακτινοβολητής παραλληλόγραμμου σχήματος είναι (σε αποστάσεις πέραν του εγγύος πεδίου) της ίδιας μορφής με τον ακτινοβολητή (δηλαδή παραλληλόγραμμο) αλλά στραμμένο κατά 90°.

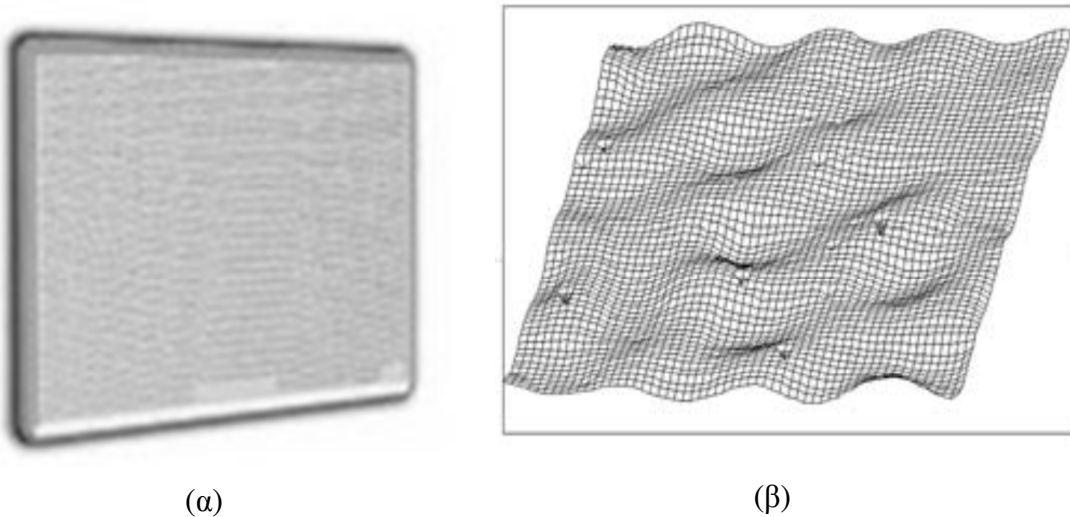
2.1.11 Μεγάφωνα τύπου μεμβράνης (panel loudspeakers)

Στα ηχεία αυτού του τύπου η ακουστική ακτινοβολία παράγεται από μια μεμβράνη ή ένα εύκαμπτο πάνελ, το οποίο τίθεται σε ταλάντωση μέσω ενός ηλεκτροδυναμικού διεγέρτη (μοτέρ). Ο ηλεκτροδυναμικός διεγέρτης τοποθετείται σε σημείο που να διεγείρει κατά το δυνατόν περισσότερα στάσιμα κύματα της μεμβράνης. Κατά τη διάδοση των καμπτικών κυμάτων στο πάνελ, λόγω φαινομένων ανώμαλου διασκεδασμού (βλ. και διάδοση κυμάτων σε εκθετική χοάνη) και μεταφορά ενέργειας μεταξύ των διάφορων τρόπων ταλάντωσης λόγω σύζευξης, το δονητικό πεδίο στο πάνελ πολύ γρήγορα καθίσταται περίπου τυχαίο με αποτέλεσμα την σχεδόν ομοιόμορφη ηχητική ακτινοβολία. Οι αντίστοιχες μετατοπίσεις των διάφορων σημείων της μεμβράνης είναι της τάξης των μm .

Βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου μεγαφώνων είναι η άρτια ενσωμάτωσή τους σε οποιοδήποτε περιβάλλον καθότι μπορούν να έχουν λ.χ. τη μορφή ενός πίνακα ζωγραφικής ή μιας πλάκας οροφής και η σχετικά ομοιόμορφη διασπορά τους (η κατευθυντικότητα τους προσεγγίζει περισσότερο την ακτινοβολία σημειακής-μονοπολικής πηγής) σε όλο σχεδόν το εύρος του ακουστικού φάσματος.

Στα μειονεκτήματά τους θα πρέπει να αναφερθεί η μέτρια απόδοσή τους και η αδυναμία δημιουργίας υψηλών ηχητικών στάθμεων.

Επί του παρόντος, το αγοραστικό ενδιαφέρον για αυτή την κατηγορία ηχείων είναι σχετικά περιορισμένο. Λόγω όμως της υψηλής τους αισθητικής αποδοχής, της χαμηλής τιμής τους και της αποδεκτής, για γενικές χρήσεις, απόδοσης που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια, είναι πολύ πιθανόν η χρήση τους να παρουσιάσει αύξηση στα προσεχή χρόνια.



Σχήμα 2.18
Μεγάφωνο Τύπου Μεμβράνης
(α) Εξωτερική όψη και (β) Ταλάντωση του διαφράγματος σε συνθήκες λειτουργίας

2.1.12 Σύνθετα ηχεία

Παραπάνω παρουσιάστηκαν οι βασικοί τύποι μεγαφώνων, αναλύθηκε ο τρόπος λειτουργίας τους και εκτέθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου. Τα εμπορικά συστήματα αποτελούνται συνήθως από ένα συνδυασμό επιμέρους μονάδων επιλεγμένων και ρυθμισμένων κατά τρόπο ώστε να αξιοποιείται η βέλτιστη συχνοτική περιοχή λειτουργίας της κάθε επιμέρους μονάδας.

Έτσι λ.χ. στα συστήματα δύο δρόμων ένα (ή παραπάνω) μεγάφωνο αναλαμβάνει την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων (σε διάταξη κλειστής καμπίνας, ανάκλασης χαμηλών ή χοάνης) και ένα (ή παραπάνω) μεγάφωνο αναλαμβάνει την αναπαραγωγή των μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων. Αντίστοιχα, υπάρχουν συστήματα τριών ή και παραπάνω δρόμων¹¹.

Επίσης, έχουν κατασκευαστεί συστήματα που συνδυάζουν την κατευθυντικότητα από πολλά επιμέρους μεγάφωνα ή συστήματα μεγαφώνων για να δημιουργήσουν μονάδες πολύ συγκεκριμένης (ή ακόμη και ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενης) κατευθυντικότητας για ειδικές εφαρμογές. Παραδείγματα αυτού του τύπου είναι τα ηχεία τύπου ηχοστήλης και οι γραμμικές συστοιχίες ηχείων σε διάταξη “Line Array”.

2.1.6. Φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-over filters)

Προκειμένου να λειτουργήσει σωστά ένα σύνθετο ηχείο είναι πολύ σημαντικό να διασφαλιστεί ότι ο κάθε «δρόμος» του θα τροφοδοτείται αποκλειστικά και μόνο από τη συχνοτική περιοχή του σήματος την οποία δύναται να αναπαράγει με βέλτιστη απόδοση. Για να επιτευχθεί αυτό, εισάγονται στην είσοδο του μεγαφώνου *φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-over filters)*, τα οποία διαχωρίζουν το ακουστικό φάσμα του σήματος εισόδου στις επιμέρους συχνοτικές περιοχές και τις δρομολογούν στα αντίστοιχα μέρη του ηχείου.

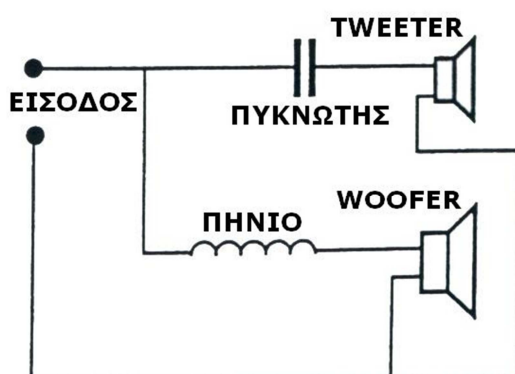
Υπάρχουν τριών ειδών φίλτρα:

- Χαμηλοπερατά (low pass filters): επιτρέπουν τη διέλευση όλων των συχνοτήτων που είναι μικρότερες από μια συγκεκριμένη συχνότητα, τη συχνότητα αποκοπής f_c του φίλτρου.
- Ζωνοπερατά (band pass filters): επιτρέπουν τη διέλευση συχνοτήτων που βρίσκονται σε μια ζώνη εύρους Δf γύρω από την κεντρική συχνότητα f_x του φίλτρου.
- Υψηλοπερατά (high pass filters): επιτρέπουν τη διέλευση όλων των συχνοτήτων που είναι μεγαλύτερες από μια συγκεκριμένη συχνότητα, τη συχνότητα αποκοπής f_c του φίλτρου.

Η απλούστερη μορφή φίλτρου διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων είναι η τοποθέτηση ενός πηνίου σε σειρά με το πηνίο του μεγαφώνου χαμηλών συχνοτήτων. Η εμπέδηση ενός πηνίου είναι $Z_L = R_L + j\omega L$, δηλαδή αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, οπότε με την κατάλληλη επιλογή της σταθεράς αυτεπαγωγής του πηνίου δύναται να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητες. Το αντίστοιχο φίλτρο διαχωρισμού

¹¹ Ο αριθμός των «δρόμων» ενός συστήματος δηλώνει τον αριθμό των μερών στα οποία έχει χωριστεί το ακουστικό φάσμα και τα οποία αναπαράγονται από ξεχωριστά τμήματα του ηχείου. Δε θα πρέπει να συγχέεται με τον αριθμό των μεγαφώνων που έχει ένα ηχείο καθότι πολύ συχνά ένας δρόμος αναπαράγεται από δύο ή και περισσότερα μεγάφωνα (λ.χ. στις χαμηλές συχνότητες).

υψηλών συχνοτήτων είναι η τοποθέτηση ενός πυκνωτή με εμπέδηση $Z_C = R_C + j/\omega C$ σε σειρά με τη μονάδα αναπαραγωγής υψηλών συχνοτήτων. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 2.19 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.19

Στοιχειώδης μορφή φίλτρου διαχωρισμού συχνοτήτων (basic cross-over filter)

Στις περισσότερες εφαρμογές βέβαια απαιτείται η χρήση πιο σύνθετων κυκλωμάτων διαχωρισμού, δηλαδή φίλτρα ανώτερης τάξης, αλλά η βασική αρχή σχεδιασμού και λειτουργίας παραμένει η ίδια.

Η ανάλυση των φίλτρων συχνοτήτων είναι ένα ευρύ αντικείμενο, ξεφεύγει από το σκοπό αυτού του μαθήματος και διδάσκεται στα πλαίσια των μαθημάτων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Παρακάτω, υπό μορφή σύντομης υπενθύμισης και χωρίς περαιτέρω ανάλυση παρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των φίλτρων συχνοτήτων τα οποία και θα πρέπει να γνωρίζει ο μηχανικός ήχου:

- Η συχνοτική απόκριση ενός φίλτρου μεταβάλλεται με ομαλό τρόπο και δε μηδενίζεται απότομα εκτός της περιοχής λειτουργίας του φίλτρου. Αναλόγως με την τάξη του φίλτρου, ο ρυθμός μείωσης της απόκρισης εκτός της περιοχής λειτουργίας του φίλτρου μπορεί να είναι από $-3dB/oct$ έως $-36dB/oct$ ή και πιο απότομος.
- Εκτός από το πλάτος (μέτρο) της συχνοτικής απόκρισης ενός φίλτρου, μεγάλη σημασία έχει και η φασική του απόκριση καθότι δηλώνει την καθυστέρηση (delay) που προκαλεί το φίλτρο στις διάφορες συχνότητες καθώς αυτές διέρχονται εντός του. Φίλτρα με οξύ ρυθμό πτώσης προκαλούν πολλές φορές μεγάλη χρονική καθυστέρηση απόκρισης.
- Η συχνοτική απόκριση εντός της ζώνης διέλευσης του φίλτρου δεν είναι απολύτως επίπεδη αλλά εμφανίζει διακυμάνσεις (ripples), ειδικότερα σε φίλτρα ανώτερης τάξης.
- Για κάθε συγκεκριμένη μορφή συχνοτικής απόκρισης υπάρχει ένα φίλτρο, το οποίο προκαλεί την ελάχιστη καθυστέρηση σε σήμα που διέρχεται από αυτό¹². Το φίλτρο αυτό ονομάζεται *φίλτρο ελάχιστης φάσης (minimum phase filter)*. Η διαφορά της φασικής απόκρισης του φίλτρου που χρησιμοποιείται στο ηχείο από τη φασική απόκριση του αντίστοιχου φίλτρου ελάχιστης φάσης ονομάζεται *πλεονάζουσα φάση (excess phase)* του φίλτρου.

¹² Για περισσότερες πληροφορίες βλ. μετασχηματισμούς Hilbert και αναλυτική έκφραση συνάρτησης.

- Όλα τα φίλτρα εμφανίζουν έναν πεπερασμένο χρόνο αντίδρασης και σίγασης.

Υπενθυμίζεται τέλος ότι πέραν από την απόκριση των φίλτρων διαχωρισμού, κάθε επιτυχημένη υλοποίηση απαιτεί, κατ' ελάχιστον, την εξέταση και των υπόλοιπων βασικών χαρακτηριστικών των επιμέρους μονάδων, ήτοι: απόκριση συχνότητας, κατευθυντικότητα, εμπέδηση, καθώς επίσης και τη χρονική ευθυγράμμιση του συνόλου.

2.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ολοκληρωμένων συστημάτων

2.2.1 Γενικά

Τα βασικά χαρακτηριστικά βάσει των οποίων πραγματοποιείται η αξιολόγηση και η επιλογή ολοκληρωμένων συστημάτων περιγράφονται παρακάτω:

- απόκριση συχνότητας
- ονομαστική σύνθετη αντίσταση
- στάθμη ευαισθησίας
- ακουστική ισχύς εξόδου
- ονομαστική απόδοση φορτίου
- παράγοντας front-to-random
- γωνία εκπομπής, λόγος γωνιακής κατευθυντικότητας, λόγος απόκλισης κατευθυντικότητας
- απόδοση
- παραμόρφωση

2.2.2 Απόκριση συχνότητας (frequency response)

Συνήθως παρουσιάζεται υπό τη μορφή διαγράμματος με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατό να βγουν συμπεράσματα για το πώς θα ακούγεται ένα ηχείο, αφού απότομες μεταβολές (αυξομειώσεις) γίνονται αντιληπτές ως χρωματισμοί του ήχου. Μια κατά το δυνατόν επίπεδη συχνοτική απόκριση ($\pm 3dB$) σε όλο το εύρος του ακουστικού φάσματος με λίγη μεγαλύτερη πτώση στα άκρα του φάσματος να είναι αποδεκτή, είναι απαραίτητη για ηχητική αναπαραγωγή υψηλής ποιότητας. Σε μεγάλα συστήματα υψηλής ισχύος μεγαλύτερες αποκλίσεις ($\pm 5dB$) είναι αναπόφευκτες.

Σε εφαρμογές όπου το ζητούμενο δεν είναι η πιστότητα αναπαραγωγής, αλλά απλώς η μετάδοση μηνυμάτων (λ.χ. συστήματα ανακοινώσεων) και αναγγελιών είναι δυνατή - και ωφέλιμη όσον αφορά την καταληπτότητα - η μείωση του συχνοτικού εύρους αναπαραγωγής στις συχνότητες άνω των 100Hz (καθότι η ανθρώπινη ομιλία έχει πολύ λίγη ενέργεια σε χαμηλότερες συχνότητες), επιτυγχάνοντας έτσι και σημαντική οικονομία σε εξοπλισμό.

2.2.3 Ονομαστική σύνθετη αντίσταση (nominal impedance)

Είναι η ολική αντίσταση που παρουσιάζει το ηλεκτρικό κύκλωμα του μεγαφώνου στη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Η τιμή που συνήθως δίδει ο κατασκευαστής - η

ονομαστική εμπέδηση του μεγαφώνου - είναι η ωμική αντίσταση που αντιστοιχεί στην περιοχή γραμμικής λειτουργίας του μεγαφώνου (βλ. παραπάνω) και συνήθως είναι 4, 8 ή 16Ω. Υπενθυμίζεται πάντως ότι η εμπέδηση του μεγαφώνου είναι μιγαδικό μέγεθος, εξαρτάται από τη συχνότητα και σε συγκεκριμένες συχνότητες δύναται να λάβει τιμή κατά πολύ μικρότερη από την ονομαστική της τιμή (ή να έχει έντονα επαγωγικό χαρακτήρα) δυσχεραίνοντας σημαντικά την οδήγηση του μεγαφώνου από τον ενισχυτή.

2.2.4. Στάθμη ευαισθησίας (sensitivity level, G)

Είναι μέτρο της ικανότητας μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος που δέχεται το μεγάφωνο στην εισόδο του σε ακουστική ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, είναι η ηχητική στάθμη σε dB που παράγεται από το μεγάφωνο σε απόσταση $1m$ από το ακουστικό του κέντρο και επί του άξονα αναφοράς, για σήμα εισόδου ισχύος $1W$ και συχνότητας $1kHz$.

Υπολογίζεται από το λόγο της ηχητικής πίεσης εξόδου προς την τάση εισόδου του κυκλώματος του μεγαφώνου. Ο λόγος αυτός ονομάζεται ευαισθησία (T_s), μετράται σε (Pa/V) και υπολογίζεται ως εξής:

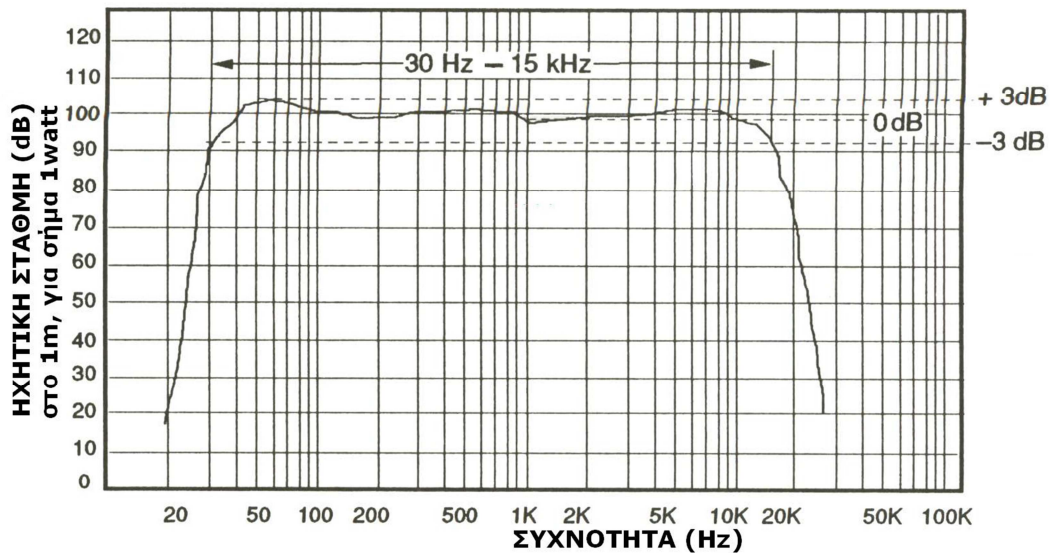
$$T_s = \frac{P}{V} \quad (2.37)$$

Η μέτρηση της ευαισθησίας αφορά ελεύθερο πεδίο και γι' αυτό το μέγεθος ονομάζεται και ευαισθησία ελεύθερου πεδίου (free-field sensitivity, T_d). Ομοίως, ορίζεται η ευαισθησία διάχυτου πεδίου (diffuse-field sensitivity, T_r), η ίδια δηλαδή μέτρηση σε διάχυτο πεδίο. Η διαφορά τους βρίσκεται στο συντελεστή διόρθωσης που χρησιμοποιείται στην περίπτωση του διάχυτου πεδίου για να εξαλειφθούν οι ακουστικές ιδιότητες του δωματίου.

Ο εικοσαπλάσιος λογάριθμος του λόγου της ευαισθησίας προς την τιμή ευαισθησίας αναφοράς ($T_0 = 1Pa/V$) ονομάζεται στάθμη ευαισθησίας (sensitivity level, G) και υπολογίζεται σε dB από τον τύπο:

$$G_s = 20 \log \frac{T_s}{T_0} \quad (2.38)$$

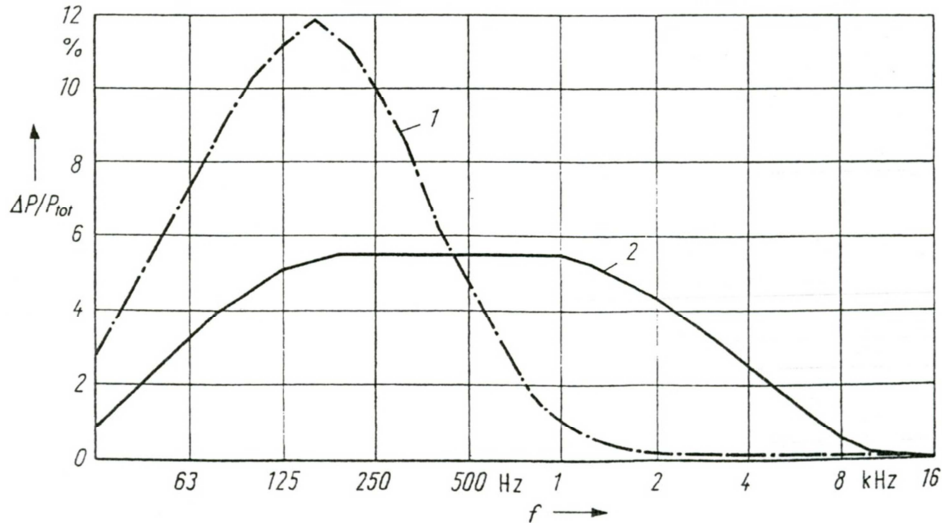
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συχνотική κατανομή της στάθμης ευαισθησίας μεγαφώνου.



Σχήμα 2.20
Στάθμη ευαισθησίας μεγαφώνου – αξονική συχνοτική απόκριση σε απόσταση 1m, για σήμα εισόδου ισχύος $1W_{rms}$.

2.2.5 Ονομαστική απόδοση φορτίου (nominal load capacity)

Είναι η επιτρεπόμενη ηλεκτρική ισχύς που καθορίζεται από τον κατασκευαστή σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά σχεδίασης του μεγαφώνου. Υπολογίζεται από ένα τεστ αντοχής στο οποίο χρησιμοποιείται ένα ειδικό σήμα θορύβου.



Σχήμα 2.21
Συχνοτική ανάλυση σήματος θορύβου που χρησιμοποιείται για μέτρηση της ονομαστικής απόδοσης φορτίου μεγαφώνου

2.2.6 Ακουστική ισχύς εξόδου (power handling)

Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δεχθεί ένα μεγάφωνο χωρίς να παραμορφώσει το σήμα περισσότερο από ένα ποσοστό που καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Περιγράφεται με διαφορετικούς τρόπους:

- **Ισχύς Εξόδου Σε Πραγματικές Συνθήκες (program power)**
Χρησιμοποιείται σήμα με σύνθετη κυματομορφή που προσομοιώνει περισσότερο τις συνθήκες που ισχύουν κατά την αναπαραγωγή μουσικής.
- **Ισχύς Κορυφής (peak power ratings)**
Αναφέρεται στη μέγιστη στιγμιαία ισχύ που μπορεί να χειριστεί το μεγάφωνο. Αυτή περιορίζεται από τη μέγιστη δυνατή μετατόπιση του διαφράγματος.
- **Ισχύς Εξόδου EIA (EIA power handling)**
Το όνομα οφείλεται στην Electronic Industries Association που έχει καθορίζει αυτό το πρότυπο. Χρησιμοποιεί έναν ειδικά διαμορφωμένο θόρυβο που προσομοιώνει συνθήκες μουσικού σήματος, έχοντας ένα μέσο επίπεδο ισχύος με διακυμάνσεις της τάξης των $6dB$.

2.2.7 Παράγοντας front-to-random (front-to-random factor, γ)

Δείχνει τη σχέση ανάμεσα στην ακουστική ισχύ που θα εκπέμπονταν στο χώρο από μια παντοκατευθυντική πηγή και στην ακουστική ισχύ που πραγματικά εκπέμπει το μεγάφωνο, για πηγές με ίδια ευαισθησία ελεύθερου πεδίου και ακουστική ισχύ οδήγησης:

$$\gamma_L = \frac{\int_s \tilde{p}_0^2 dS}{\int_s \tilde{p}^2(\vartheta) dS} \quad (2.39)$$

Μια μέθοδος πειραματικής μέτρησης υπολογίζει τον παράγοντα front-to-random βάσει του τύπου:

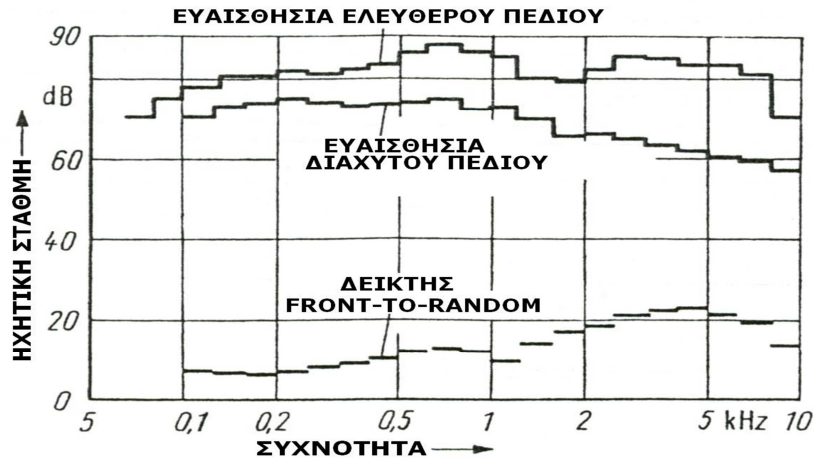
$$\gamma_L = \left(\frac{\tilde{P}_d r}{\tilde{P}_r D_c} \right)^2 \quad (2.40)$$

όπου \tilde{p}_d η ηχητική πίεση (Pa) μετρημένη σε ελεύθερο πεδίο και σε απόσταση r (m) από τον άξονα αναφοράς του μεγαφώνου και \tilde{p}_r η ηχητική πίεση (Pa) μετρημένη σε διάχυτο πεδίο με κρίσιμη απόσταση D_c (m).

Ο δείκτης front-to-random (front-to-random index, C_L) είναι ο δεκαπλάσιος δεκαδικός λογάριθμος του παράγοντα front-to-random :

$$C_L = 10 \log \gamma_L \quad (2.41)$$

και αντιστοιχεί στη διαφορά στάθμης ευαισθησίας σε dB μεταξύ ελεύθερου και διάχυτου πεδίου. Στα συστήματα ενίσχυσης ήχου έχει αποδειχτεί ότι μικρή αύξηση της τάξης των $3dB/οκτάβα$ στο δείκτη front-to-random είναι κατάλληλη τιμή, γιατί προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις φυσικές πηγές ήχου.



Σχήμα 2.22

Δείκτης front-to-random όπως προκύπτει γραφικά από την ευαισθησία ελεύθερου και διάχυτου πεδίου

2.2.8 Λόγος γωνιακής κατευθυντικότητας (angular directivity ratio, Γ)

Για μία συχνότητα ή συχνοτικό εύρος, είναι ο λόγος της ηχητικής πίεσης που εκπέμπεται σε μια γωνία ϑ από τον άξονα αναφοράς του μεγαφώνου προς την ηχητική πίεση που παράγεται σε σημείο επί του άξονα αναφοράς και σε ίση απόσταση από το ακουστικό κέντρο του ηχείου, δηλαδή από τη θέση του κινούμενου πηνίου:

$$\Gamma_L(\vartheta) = \frac{\tilde{p}(\vartheta)}{\tilde{p}_0} \quad (2.42)$$

Η εικοσαπλάσια λογαριθμική ποσότητα του λόγου γωνιακής κατευθυντικότητας ονομάζεται κέρδος γωνιακής κατευθυντικότητας (angular directivity gain, D_L) και είναι (dB) :

$$D_L(\vartheta) = 20 \log \Gamma_L(\vartheta) \quad (2.43)$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει το πολικό διάγραμμα του μεγαφώνου με τον ίδιο τρόπο όπως και στα μικρόφωνα, το οποίο είναι η γραφική παράσταση σε πολικές συντεταγμένες όλων των τιμών της σχέσης 2.43. Λόγω της εξάρτησης της κατευθυντικότητας από τη συχνότητα, από το πολικό διάγραμμα μπορεί εύκολα να προκύψουν συμπεράσματα για τη συχνοτική απόκριση του μεγαφώνου off-axis.

2.2.9 Γωνία εκπομπής (angle of radiation)

Αναφέρεται στη στερεά γωνία μέσα στην οποία το κέρδος γωνιακής κατευθυντικότητας δε μειώνεται περισσότερο από 3dB σε σχέση με την τιμή αναφοράς. Όσο μεγαλύτερη είναι η κατευθυντικότητα, τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκπομπής.

2.2.10 Λόγος απόκλισης κατευθυντικότητας (directivity deviation ratio, Γ^*)

Συσχετίζει την εκπεμπόμενη ακουστική πίεση σε γωνία ϑ με την πίεση που θα ακτινοβολούνταν από παντοκατευθυντική πηγή ίδιας ευαισθησίας:

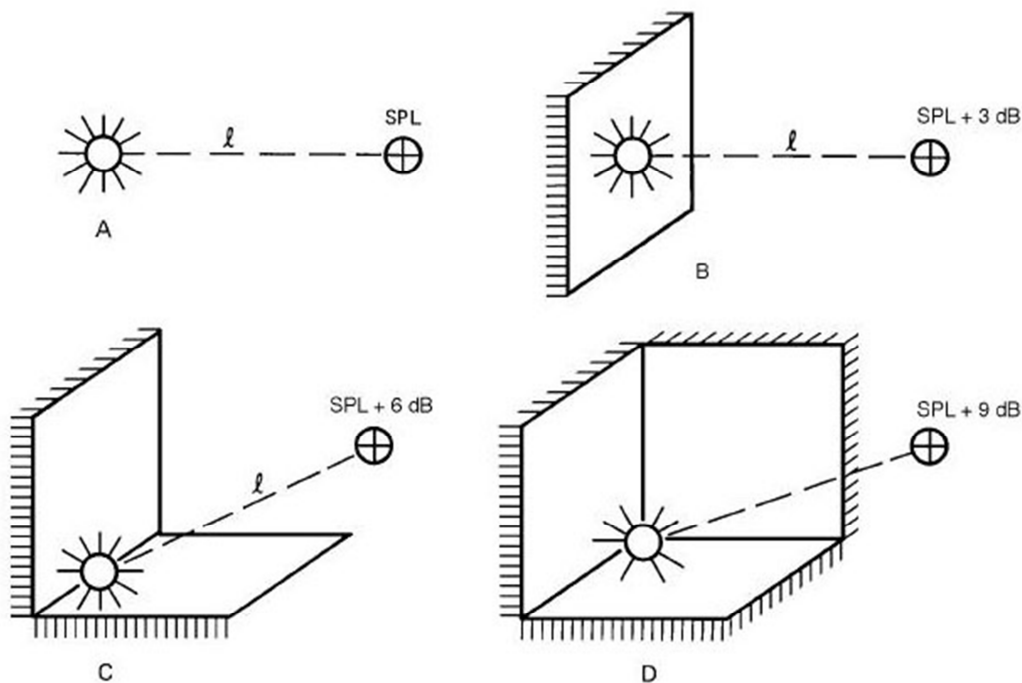
$$\Gamma_L^*(\vartheta) = \sqrt{\gamma_L} \cdot \Gamma_L(\vartheta) \quad (2.44)$$

Η τιμή αυτή δείχνει το κλάσμα του πεδίου αντήχησης του δωματίου που οφείλεται στο μεγάφωνο. Το τετράγωνο της ποσότητας αυτής δίνει τον παράγοντα κατευθυντικότητας (directivity factor, Q_L):

$$Q_L(\vartheta) = \gamma_L \Gamma_L^2(\vartheta) \quad (2.45)$$

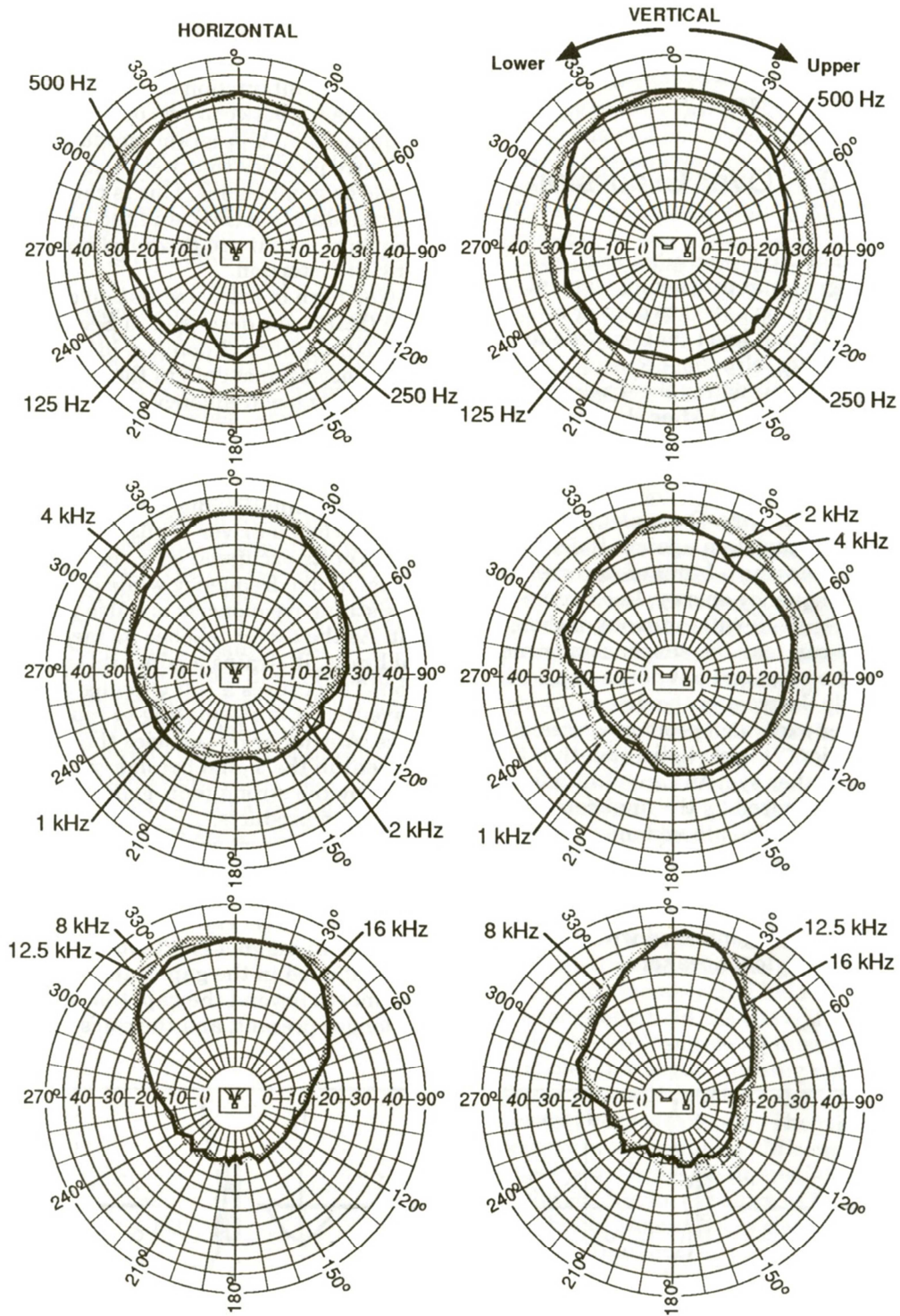
και ο δεκαπλάσιος δεκαδικός λογάριθμος της παραπάνω σχέσης αντιστοιχεί στην τιμή (σε dB) του δείκτη κατευθυντικότητας (directivity index, DI):

$$DI = 10 \log Q_L(\vartheta) \quad (2.46)$$



Σχήμα 2.23

Δείκτης κατευθυντικότητας ως προς γωνιακή κάλυψη
(A: σφαίρα, B: ημισφαίριο, C: 1/4 σφαίρας, D: 1/8 σφαίρας)



Σχήμα 2.24
Πολικά διαγράμματα, σε οριζόντιο και κάθετο επίπεδο, για σύστημα μεγαφώνων που καλύπτει ολόκληρο το ηχητικό φάσμα

2.2.11 Απόδοση (efficiency, n)

Περιγράφει την ικανότητα του μεγαφώνου να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική. Είναι ο λόγος της εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος προς την παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ:

$$n = \frac{P_{ac}}{P_{el}} = \frac{E_K^2}{\rho_0 c} \frac{4\pi r_0^2}{\gamma_L} \times 100\% = 3 \frac{E_K^2}{\gamma_L} \% \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (2.47)$$

όπου E_K η χαρακτηριστική ευαισθησία του μεγαφώνου ($\mu Pa/\sqrt{W}$), $\rho_0 c = 417$ $Rayls$, r_0 η απόσταση (m) και γ_L ο παράγοντας front-to-random.

Πρακτικά παίρνει τιμές μεταξύ 0.1 και 10%, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Υπερθέρμανση του μεγαφώνου οδηγεί στο φαινόμενο της συμπίεσης ισχύος, δηλαδή αύξηση της εμπέδησης, άρα και μείωση της απόδοσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση εξαρτάται από τη μάζα του πηνίου, τη μάζα του διαφράγματος, τη μάζα του αέρα που λειτουργεί ως φορτίο, αλλά και από τη συχνότητα. Όσο μεγαλώνει η διάμετρος του διαφράγματος τόσο μεγαλώνει η ισχύς του ήχου που εκπέμπεται, άρα αυξάνεται η απόδοση του μεγαφώνου, αλλά μειώνεται και το ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων λόγω εσωτερικού συντονισμού του κώνου.

2.2.12 Παραμόρφωση (distortion)

Αλλοίωση του σήματος μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους, όπως παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation distortion). Για την αναπαραγωγή μουσικής χρειάζεται το μέγαφωνο να παράγει πολλές συχνότητες ταυτόχρονα. Υπό ορισμένες συνθήκες, μερικές συχνότητες αλληλεπιδρούν και παράγουν επιπλέον συχνότητες (ενδοδιαμόρφωση), με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του αρχικού σήματος. Ενδοδιαμόρφωση συμβαίνει επίσης όταν σε ένα πολύ δυνατό σήμα, το κινούμενο πηνίο μετακινηθεί τόσο ώστε να βγει έξω από το μαγνητικό πεδίο (μη γραμμικό φαινόμενο).

3. ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

Τα μικρόφωνα είναι διατάξεις μετατροπής της μηχανικής (ακουστικής) ενέργειας σε ηλεκτρική. Αποτελούνται από μια μονάδα που μετατρέπει την ταλάντωση των μορίων του αέρα σε μηχανική ταλάντωση (διάφραγμα), μια μονάδα που μετατρέπει τη μηχανική ταλάντωση του διαφράγματος σε ηλεκτρικό σήμα και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για την προσαρμογή του ηλεκτρικού σήματος στα χαρακτηριστικά εισόδου των λοιπών ηλεκτρονικών συσκευών (συστήματα καταγραφής, επεξεργασίας, ενίσχυσης και αναπαραγωγής). Η ακρίβεια με την οποία αναπαράγεται το ηχητικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, δηλαδή η πιστότητα της μετατροπής, εξαρτάται από τον τύπο και την ποιότητα κατασκευής του μικροφώνου, αλλά και την ταυτοποίηση των απαιτήσεων της κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής με το βέλτιστο τύπο μικροφώνου.

3.1 Τύποι μικροφώνων

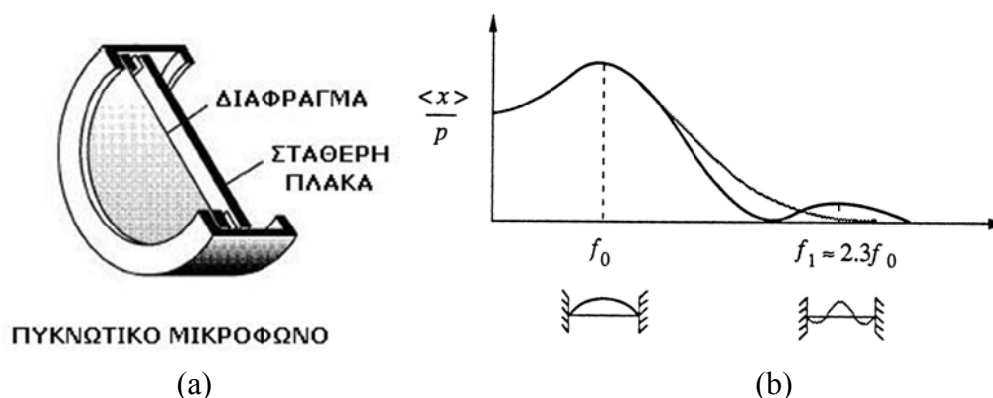
Οι βασικότεροι τύποι μικροφώνων περιλαμβάνουν τα:

- δυναμικά μικρόφωνα
- πυκνωτικά μικρόφωνα
- μικρόφωνα ταινίας
- μικρόφωνα άνθρακα
- πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα

3.1.1 Πυκνωτικά μικρόφωνα (condenser microphones)

Βασίζονται στην αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού πυκνωτή. Το διάφραγμα του μικροφώνου αποτελεί τη μια πλάκα ενός μεταβλητού πυκνωτή, η χωρητικότητα του οποίου μεταβάλλεται καθώς το διάφραγμα κινείται υπό την επίδραση του ηχητικού κύματος. Με την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης πόλωσης η μεταβολή της χωρητικότητάς του έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μιας μεταβαλλόμενης τάσης στα άκρα του πυκνωτή.

Το διάφραγμα του μικροφώνου είναι από δυναμικής σκοπιάς μια μεμβράνη, η οποία είναι πακτωμένη στο πλαίσιο του μικροφώνου και κατά την ταλάντωσή του εμφανίζει μια σειρά από στάσιμα κύματα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους δύο βασικούς τρόπους δόνησης του διαφράγματος, η γενική μορφή της απόκρισης συχνότητας της μετατόπισης του διαφράγματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 παρακάτω.



Σχήμα 3.1
Πυκνωτικό Μικρόφωνο
(α) Γενική μορφή και (β) Απόκριση συχνότητας μεμβράνης.

Οι συχνότητες συντονισμού f_0, f_1 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$f_0 = \frac{2,4}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{m}}, f_1 = 2,3f_0 \quad (3.1)$$

Όπου: T η τάση του διαφράγματος (N/m), m η επιφανειακή πυκνότητα του διαφράγματος (kg/m^2) και a η ακτίνα του διαφράγματος σε m .

Από τη θεωρία ταλαντώσεων γνωρίζουμε ότι για συχνότητες μικρότερες της f_0 το διάφραγμα κινείται σε φάση και η δυναμική του συμπεριφορά μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με χρήση ενός μονοδιάστατου μοντέλου ενός βαθμού ελευθερίας (lumped parameter model).

Η διαφορική εξίσωση κίνησης του διαφράγματος υπό αυτές τις συνθήκες γίνεται:

$$F = M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x \quad (3.2)$$

Όπου: $M = m\pi a^2$ η συνολική μάζα του διαφράγματος, c ο συντελεστής απωλειών (απόσβεση) του διαφράγματος, $k = 6\pi T$ ο συντελεστής ακαμψίας (ελαστικότητας) και F η ασκούμενη στην επιφάνεια του διαφράγματος δύναμη, ως συνέπεια της τοποθέτησης του μικροφώνου σε ηχητικό πεδίο.

Η απόκριση συχνότητας του παραπάνω συστήματος είναι:

$$F = p\pi a^2 = (-M\omega^2 + jc\omega + k)x \Rightarrow \frac{x}{p} = \frac{\pi a^2}{(-M\omega^2 + jc\omega + k)} \quad (3.3)$$

Χωρίς περιορισμό της γενικότητας, θεωρούμε ότι η πίεση που ασκείται στο διάφραγμα έχει θετικό πρόσημο. Συμβολίζουμε με d την απόσταση μεταξύ του διαφράγματος του μικροφώνου και της πίσω αγωγίμης πλάκας. Η πίεση αυτή θα μετακινήσει το διάφραγμα κατά $x(t)$ μειώνοντας την απόσταση μεταξύ των δύο πλακών του πυκνωτή σε $d - x(t)$. Η μεταβολή αυτή της απόστασης έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή σύμφωνα με τη σχέση:

$$C(t) = \frac{\epsilon_0 \pi a^2}{d - x(t)} \quad (3.4)$$

Όπου: C η χωρητικότητα του πυκνωτή και ϵ_0 η μαγνητική επιδεκτικότητα του αέρα ($8.8 \times 10^{-12} \text{ Farads/m}$).

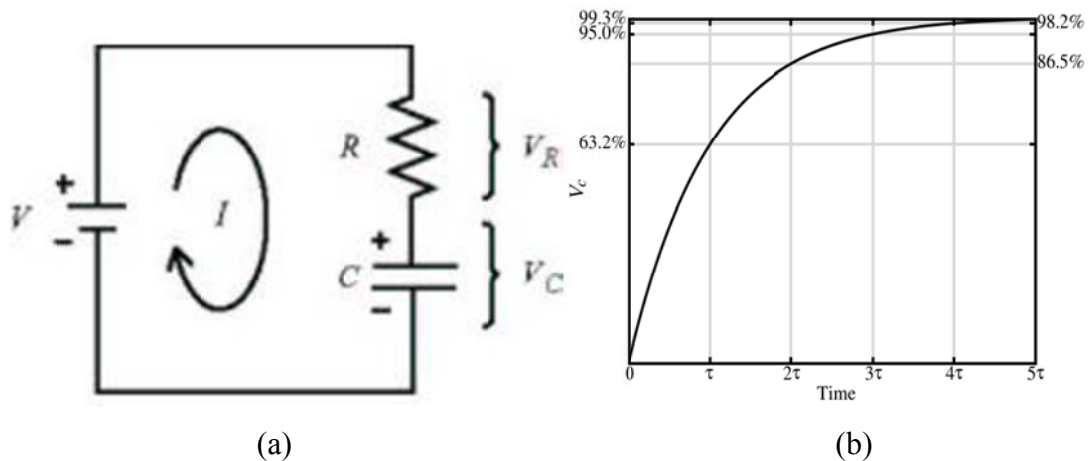
Η μεταβολή της χωρητικότητας θα πρέπει να μετατραπεί σε μεταβολή τάσης ούτως ώστε να τροφοδοτήσει τις λοιπές βαθμίδες του ηχητικού συστήματος.

Υπάρχουν δυο δυνατότητες:

3.1.1.1 Μετατροπή υπό σταθερό φορτίο

Είναι η πλέον συνηθισμένη μέθοδος. Το μικρόφωνο πολώνεται σε μια τάση E (συνήθως 200V ή 48V) διαμέσου μιας μεγάλης ωμικής αντίστασης R .

Το αντίστοιχο κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.2
(a) Κύκλωμα RC και (b) Καμπύλης Φόρτισης

Το παραπάνω κύκλωμα είναι γνωστό από τη θεωρία στοιχειωδών ηλεκτρικών κυκλωμάτων ως κύκλωμα RC . Υπό την επίδραση της εξωτερικής τάσης E ο πυκνωτής φορτίζεται μέσω της αντίστασης με ρυθμό που εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου του συστήματος¹³ και η οποία ισούται προς $\tau = RC$.

Σε περίπτωση που οι μεταβολές της χωρητικότητας του πυκνωτή λαμβάνουν χώρα πολύ γρήγορα (συγκρινόμενες με τη σταθερά φόρτισης του κυκλώματος), τότε το φορτίο στα άκρα του πυκνωτή παραμένει σταθερό. Έτσι λ.χ. εάν θέλουμε ένα μικρόφωνο να λειτουργεί υπό σταθερό φορτίο σε συχνότητες άνω των 20Hz θα πρέπει η σταθερά χρόνου του να είναι τουλάχιστον:

$$\tau = RC_o \geq 0,05\text{s} \quad (3.5)$$

Δεδομένου δε ότι η συνήθης τιμή της χωρητικότητας του μικροφώνου είναι της τάξης των 20pF , η αντίσταση του κυκλώματος θα πρέπει να είναι της τάξης των $R \geq 2,5\text{G}\Omega$! Αντίστοιχη φυσικά θα πρέπει να είναι και η τιμή της αντίστασης εισόδου του ενισχυτή που θα χρησιμοποιηθεί (συνήθως FET).

Το φορτίο στα άκρα ενός πυκνωτή υπολογίζεται με βάση την τάση πόλωσης και τη χωρητικότητα του πυκνωτή:

$$q = \frac{E\epsilon_o\pi a^2}{d} \quad (3.6)$$

Θεωρώντας το φορτίο αυτό σταθερό ακόμη και όταν το διάφραγμα κινείται, λαμβάνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$q = \frac{E\epsilon_o\pi a^2}{d} = \frac{\epsilon_o[E + V(t)]\pi a^2}{d - x(t)} \Rightarrow V(t) = -\frac{E}{d}x(t) \quad (3.7)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η τάση εξόδου είναι ευθέως ανάλογη της μετατόπισης του διαφράγματος του μικροφώνου. Υπό την προϋπόθεση ότι το μικρόφωνο λειτουργεί σε συχνότητες μικρότερες από τη συχνότητα f_0 η απόκρισή του καθορίζεται από την

¹³ Με την παρέλευση χρόνου, $t = \tau$, η τάση στα άκρα του πυκνωτή έχει φθάσει 63.2% της μέγιστης τιμής της.

ελαστικότητα (ή αλλιώς την ακαμψία) του διαφράγματος και η σχέση 3.3 δύναται να απλοποιηθεί ως:

$$\frac{x}{p} = \frac{\pi\alpha^2}{k} = \frac{\pi\alpha^2}{6\pi T} = \frac{\alpha^2}{6T} \quad (3.8)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση 3.7 παίρνουμε μια εξίσωση για την ευαισθησία του μικροφώνου, δηλαδή την απολαβή τάσης συναρτήσει της ακουστικής πίεσης που ασκείται στο διάφραγμα:

$$\frac{V(t)}{p(t)} = -\frac{Ea^2}{6dT} \quad (3.9)$$

Παρατήρηση: Υπάρχει μια υποκατηγορία των πυκνωτικών μικροφώνων που δε χρειάζεται τάσης πόλωσης για να λειτουργήσει. Τα μικρόφωνα αυτά χρησιμοποιούν ειδικά διηλεκτρικά υλικά τα οποία διατηρούν ένα μόνιμο ηλεκτρικό φορτίο (ονομάζονται Electret). Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο υλικό για το διάφραγμα ή τη δεύτερη πλάκα του πυκνωτή αποφεύγεται η αναγκαιότητα της τάσης πόλωσης. Τα εν λόγω μικρόφωνα αν και δεν έχουν ιδιαίτερα υψηλή πιστότητα, εντούτοις δύνανται να παραχθούν μαζικά με πολύ χαμηλό κόστος και ως εκ τούτου βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή σε εφαρμογές όπου η υψηλή πιστότητα δεν είναι απαραίτητη.

3.1.1.2 Μετατροπή με διαμόρφωση συχνότητας

Όταν ένας πυκνωτής συνδεθεί παράλληλα με ένα πηνίο τότε δημιουργείται ένας ηλεκτρικός ταλαντωτής (κύκλωμα LC). Η συχνότητα συντονισμού ενός τέτοιου κυκλώματος είναι:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τυπικές τιμές για τα L, C βρίσκουμε μια συχνότητα ταλάντωσης της τάξης των μερικών MHz .

Εάν τώρα η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή (όπως συμβαίνει με το διάφραγμα ενός μικροφώνου) τότε η απόκριση του κυκλώματος διαμορφώνεται συχνοτικά (FM).

Το διαμορφωμένο σήμα μπορεί στη συνέχεια να από-διαμορφωθεί ώστε να ανακτηθεί το αρχικό σήμα.

Αξιολόγηση-Χρήση: Τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν πολύ καλή ποιότητα αναπαραγωγής, αλλά είναι πολύ ευαίσθητα σε φθορά και σε υψηλές ηχητικές στάθμες. Λόγω της υψηλής τους ευαισθησίας και ποιότητας προτιμούνται για την ηχογράφηση σχετικά αδύναμων σημάτων (λ.χ. φωνή, έγχορδα). Χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα σε μετρητικό εξοπλισμό υψηλής ποιότητας, όπως ηχόμετρα και φασματικούς αναλυτές. Απαντώνται περισσότερο σε ηχογραφήσεις σε στούντιο, στην τηλεόραση/ραδιόφωνο και λιγότερο σε εφαρμογές εγκαταστάσεων ενισχυμένου ήχου.

3.1.2 Δυναμικά μικρόφωνα (dynamic microphones)

Βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, στην εμφάνιση δηλαδή μιας ηλεκτρικής τάσης (ανάλογης προς την ταχύτητα κίνησης) στα άκρα ενός αγωγού

που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και αποτελούν τον «αντίστροφο» μετατροπέα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα τυπικό δυναμικό μικρόφωνο. Στο διάφραγμα είναι συνδεδεμένο ένα πηνίο, το οποίο βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη.



Σχήμα 3.3
Δυναμικό Μικρόφωνο

Η επαγωγική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου θα είναι ανάλογη με τη μαγνητική ροή που διαρρέει το πηνίο και την ταχύτητα του πηνίου, δηλαδή:

$$V(t) = B \cdot l \cdot u(t) \quad (3.11)$$

Όπου: B η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του μόνιμου μαγνήτη, l το συνολικό μήκος του σύρματος του πηνίου φωνής και $u(t)$ η ταχύτητα κίνησης του πηνίου.

Υποθέτοντας όπως και παραπάνω ότι η κίνηση του διαφράγματος δύναται να περιγραφεί από ένα σύστημα με ένα βαθμό ελευθερίας, τότε η απόκριση συχνότητας (ως προς την ταχύτητα) ισούται προς:

$$u(\omega) = \frac{1}{j(M\omega - \frac{k}{\omega}) + c} F(\omega) \quad (3.12)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις 3.11 και 3.12 δύναται να εξαχθεί η ευαισθησία του δυναμικού μικροφώνου:

$$\frac{V(\omega)}{p(\omega)} = \frac{Bl\pi\alpha^2}{j(M\omega - \frac{k}{\omega}) + c} \quad (3.13)$$

Παρατηρούμε ότι προκειμένου να καταστεί η παραπάνω σχέση σταθερή ως προς τη συχνότητα, δηλαδή να έχει το μικρόφωνο μια ομοιόμορφη συχνотική απόκριση, θα πρέπει ο παράγοντας $M\omega - k/\omega$ να μηδενιστεί και η απόκριση του συστήματος να καθορίζεται από την απόσβεση c . Κατά συνέπεια, το μικρόφωνο θα πρέπει να χρησιμοποιείται κοντά στην περιοχή του συντονισμού και να έχει υψηλή απόσβεση, ούτως ώστε η συνολική απόκριση να είναι όσο το δυνατόν επίπεδη.

Αξιολόγηση-Χρήση: Είναι αξιόπιστα και ιδιαίτερα ανθεκτικά μικρόφωνα και γι' αυτό είναι ο πιο συνηθισμένος και διαδεδομένος τύπος μικροφώνου.

3.1.3 Μικρόφωνα ταινίας (ribbon microphones)

Βασίζονται επίσης στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όπως και στα δυναμικά μικρόφωνα, το ηλεκτρικό σήμα παράγεται από αγωγό κινούμενο σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με τη διαφορά όμως ότι ο αγωγός είναι το ίδιο το διάφραγμα, το οποίο έχει τη μορφή λεπτής, ελαφριάς, μεταλλικής ταινίας και βρίσκεται ανάμεσα στους πόλους ενός ισχυρού μόνιμου μαγνήτη.

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς των μικροφώνων τύπου ταινίας χρησιμοποιούμε και πάλι την προσέγγιση του μονοδιάστατου συστήματος. Η βασική διαφορά με τα παραπάνω έγκειται στο γεγονός ότι η κίνηση του διαφράγματος (ταινίας) προκαλείται από τη διαφορά πίεσης στις δύο επιφάνειές του, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κοιλότητα όπισθεν του διαφράγματος. Το διάφραγμα δηλαδή αντιδρά στη διαφορά της ακουστικής πίεσης μεταξύ των δύο επιφανειών του (στην κλίση της πίεσης σύμφωνα με τη μαθηματική ορολογία). Σύμφωνα με το 2^ο νόμο του Newton, η συνολική δύναμη ισούται προς:

$$F = \Delta p S = (p_2 - p_1) S = j\omega m u \quad (3.14)$$

Όπου: u ταχύτητα των μορίων του αέρα και m η μάζα του αέρα που τίθεται σε κίνηση ($m = \rho LA$). Η τάση εξόδου στα άκρα της ταινίας θα είναι:

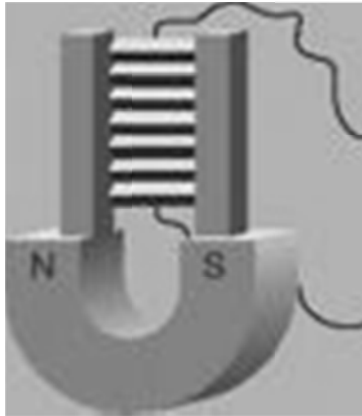
$$V(t) = B \cdot l \cdot u(t) \quad (3.15)$$

Η ευαισθησία του μικροφώνου ως προς τη σωματιδιακή ταχύτητα είναι:

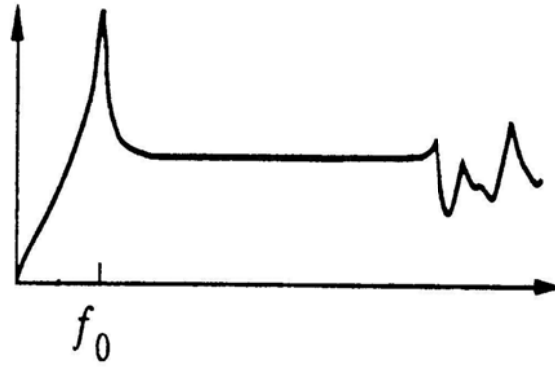
$$\frac{V(\omega)}{u(\omega)} = \frac{j\omega \rho A B l L}{j(M\omega - \frac{k}{\omega}) + c} \quad (3.16)$$

Προκειμένου η απόκριση του μεγαφώνου να είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα θα πρέπει να είμαστε στη συχνοτική περιοχή όπου ο παράγοντας αδράνειας είναι ο κυρίαρχος, δηλαδή στην περιοχή πάνω από τη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού του. Για να μειωθεί κατά το δυνατόν η συχνότητα συντονισμού, ούτως ώστε να διευρυνθεί η συχνοτική περιοχή λειτουργίας του μικροφώνου, πρέπει να μειωθεί η ακαμψία του διαφράγματος (συνήθως με τη δημιουργία διατρήσεων), το οποίο όμως εξασθενεί τη μηχανική αντοχή του που σε συνδυασμό με τα υψηλά πλάτη ταλάντωσης στη συχνότητα αυτή καθιστά το διάφραγμα ιδιαίτερα ευαίσθητο.

Θα πρέπει να τονιστεί επίσης ότι στις υψηλές συχνότητες εμφανίζονται πιο σύνθετοι τρόποι ταλάντωσης του διαφράγματος που τροποποιούν τη συχνοτική απόκριση του μικροφώνου και τους οποίους το μονοπαραμετρικό μοντέλο που υιοθετήσαμε δε δύναται να λάβει υπ' όψιν. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 3.4 που ακολουθεί.



(a)



(b)

Σχήμα 3.4
Μικρόφωνο τύπου ταινίας
(a) Μικρόφωνο και (b) Συχνοτική Απόκριση

Αξιολόγηση-Χρήση: Τα μικρόφωνα ταινίας έχουν καλά ηχητικά χαρακτηριστικά με «ζεστές» υψηλές συχνότητες και καλή απόκριση σε μεταβατικά σήματα (transient signals), είναι όμως πάρα πολύ ευπαθή καθότι υψηλές στάθμες μπορούν να παραμορφώσουν μόνιμα το διάφραγμα.

3.1.4 Μικρόφωνα άνθρακα (carbon microphones)

Βασίζονται στην ιδιότητα που έχουν ορισμένα υλικά να μεταβάλουν την ηλεκτρική τους αντίσταση όταν υπόκεινται σε πίεση. Αποτελούνται από ένα διάφραγμα που πιέζει ένα έμβολο, το οποίο με τη σειρά του πιέζει ρινίσματα άνθρακα που βρίσκονται μέσα σε ένα κουτί. Η μεταβολή της πίεσης έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της αντίστασης της μάζας του άνθρακα και τελικά της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα όταν αυτό είναι υπό τάση.

Αξιολόγηση-Χρήση: Τα μικρόφωνα αυτά δε φημίζονται για τα ηχητικά χαρακτηριστικά τους και με τη χρήση η απόδοσή τους μειώνεται, έχουν όμως μικρό κόστος. Αξίζει να αναφερθεί ότι είναι τα πρώτα μικρόφωνα που κατασκευάστηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα για χρήση στις τηλεφωνικές συσκευές του A.G. Bell και έτσι αποτελούν κατά κάποιο τρόπο ένα μεγάλο τμήμα της ιστορίας της ηλεκτρακουστικής.

3.1.5 Πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα (piezoelectric microphones)

Η λειτουργία των μικροφώνων αυτών βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, την εμφάνιση δηλαδή ηλεκτρικής τάσης μεταξύ των δύο επιφανειών ενός κρυστάλλου όταν ασκείται σε αυτόν κάποια εξωτερική πίεση. Συνδέοντας το διάφραγμα του μικροφώνου με ένα αντίστοιχο κρύσταλλο επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή της κίνησης του διαφράγματος σε ηλεκτρική τάση.

Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά η τάση είναι ευθέως ανάλογη της πιεζοηλεκτρικής σταθεράς και της πίεσης που ασκείται στο υλικό. Υλικά που εμφανίζουν έντονα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο υπάρχουν στη φύση (λ.χ. quartz) αν και στα μικρόφωνα χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον συνθετικά, κεραμικά υλικά με πλέον χρησιμοποιούμενο το PZT.

Λόγω της υψηλής ακαμψίας των υλικών αυτών και προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητική σύζευξη με το ακουστικό κύμα, απαιτείται μια βαθμίδα (μηχανικής) προσαρμογής εμπέδησης¹⁴.

Αξιολόγηση-Χρήση: Τα μικρόφωνα αυτού του τύπου δεν έχουν πολύ καλή ποιότητα και είναι γενικά ευπαθή, είναι όμως φθηνά και αν ρυθμιστούν σωστά μπορεί να έχουν καλή απόδοση. Αυτού του τύπου είναι τις περισσότερες φορές τα μικρόφωνα επαφής.

3.2 Τάξη & Κατευθυντικότητα μικροφώνων

Ως προς την ακουστική ποσότητα καταγραφής τα μικρόφωνα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Μικρόφωνα Πρώτης Τάξης ή Μικρόφωνα Πίεσης (Pressure Microphones): Αντιδρούν σε μεταβολές της ακουστικής πίεσης στην επιφάνεια του διαφράγματος
2. Μικρόφωνα Δεύτερης Τάξης ή Μικρόφωνα Κλίσης Πίεσης / Ταχύτητας (Pressure Gradient Microphones): Αντιδρούν στη διαφορά της ακουστικής πίεσης μεταξύ δύο σημείων (μεταβολές πρώτης τάξης)
3. Μικρόφωνα Ανώτερης Τάξης (Higher Order Microphones): Προκύπτουν από συνδυασμό των παραπάνω και αντιδρούν σε μεταβολές ανώτερης τάξης της ακουστικής πίεσης.

3.2.1 Μικρόφωνα πρώτης τάξης

Μικρόφωνα πίεσης είναι τα μικρόφωνα που αναλύθηκαν στις παραγράφους 3.1.1, 3.1.2, 3.1.4 και 3.1.5 παραπάνω, στα μικρόφωνα δηλαδή που μόνο η μια επιφάνεια του διαφράγματος είναι εκτεθειμένη στο ηχητικό πεδίο (σε αντιπαραβολή λ.χ. με το μικρόφωνο τύπου ταινίας). Με βάση και την ανάλυση που έγινε παραπάνω τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροφώνων δύνανται να συνοψισθούν ως εξής:

1. Στις χαμηλές συχνότητες όπου το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του διαφράγματος του μικροφώνου η πίεση που ασκείται στο διάφραγμα μπορεί να θεωρηθεί με αρκετή ακρίβεια ομοιόμορφη. Δεδομένου ότι η ακουστική πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος, συνεπάγεται ότι η δύναμη είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις και κατ'επέκταση το μικρόφωνο είναι παντοκατευθυντικό.
2. Στις υψηλές συχνότητες οι διαστάσεις του διαφράγματος είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του ήχου και κατ'επέκταση το ηχητικό πεδίο τροποποιείται από την παρουσία του μικροφώνου, διότι το μικρόφωνο προκαλεί σκέδαση. Στην περίπτωση αυτή η ακουστική πίεση στο διάφραγμα δεν αντιστοιχεί στην πίεση που θα υπήρχε στο αντίστοιχο σημείο αν δεν υπήρχε το μικρόφωνο, δηλαδή την πίεση ελεύθερου πεδίου. Η οξύτητα του φαινομένου εξαρτάται από τη συχνότητα, τη γωνία πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος στο μικρόφωνο και τις διαστάσεις του μικροφώνου. Οι κατασκευαστές μικροφώνων υψηλής ακρίβειας πραγματοποιούν

¹⁴ Αντίστοιχες μονάδες δεν απαιτούνται λ.χ. στα υδρόφωνα καθότι η ακουστική εμπέδηση του νερού είναι μεγαλύτερη.

εργαστηριακές μετρήσεις και προσδιορίζουν ακριβώς τη σχετική μεταβολή (συνήθως ονομάζεται διόρθωση ελεύθερου πεδίου), την οποία και απεικονίζουν σε διαγράμματα.

3. Η απόκριση των μικροφώνων στις χαμηλές συχνότητες περιορίζεται από την ύπαρξη της οπής εξισορρόπησης της ατμοσφαιρικής πίεσης. Υπό κανονικές συνθήκες (Κ.Σ.) η ατμοσφαιρική πίεση είναι της τάξης των $10^5 Pa$, ενώ οι μεταβολές της ακουστικής πίεσης της τάξης των μερικών μόνο Pa (στις υψηλότερες στάθμες που ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί ένα μικρόφωνο). Δεδομένου ότι η ατμοσφαιρική πίεση μεταβάλλεται έντονα με την υγρασία και το υψόμετρο (μεταβολές της τάξης του 5% είναι πιθανές) είναι πολύ εύκολο να προκληθεί καταστροφή του διαφράγματος εάν δε ληφθεί σχετική πρόληψη. Για το λόγο αυτό στην κοιλότητα που βρίσκεται στην πίσω επιφάνεια του διαφράγματος υπάρχει πάντα μια οπή για την εξίσωση της στατικής πίεσης. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η κοιλότητα συμπεριφέρεται σαν ένας συνηχητής Helmholtz στις χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα η ακουστική πίεση που μετράται στις συχνότητες αυτές να διαφέρει από την πίεση του ηχητικού πεδίου.

3.2.2 Μικρόφωνα δεύτερης τάξης

Αν και έχει ήδη εξετασθεί παραπάνω η ακουστική συμπεριφορά του μικρόφωνα τύπου ταινίας το οποίο ανήκει σε αυτή την κατηγορία, ο πλέον απλός τρόπος για να ερμηνευθεί ποιοτικά η ακουστική συμπεριφορά αυτού του τύπου μικροφώνων είναι με τη θεώρηση δυο μικροφώνων μέτρησης πίεσης τα οποία βρίσκονται σε μικρή απόσταση d , μεταξύ τους.

Η βαθμίδα πίεσης μεταξύ των δύο θέσεων θα ισούται (χωρίς απώλεια της γενικότητας θεωρούμε ότι ο άξονας των x εκτείνεται κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα διαφράγματα των μικροφώνων) προς:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_2 - p_1}{d}, \text{ για } d \ll \lambda \quad (3.17)$$

Χρησιμοποιώντας και τη σχέση που συνδέει τη σωματιδιακή ταχύτητα με την ακουστική πίεση κατά τη διάδοση ενός ηχητικού κύματος στον αέρα:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = -\frac{1}{\rho \cdot d} \int (p_2 - p_1) dt \quad (3.18)$$

ή ισοδύναμα,

$$u(\omega) = \frac{1}{j\omega\rho d} [p_1(\omega) - p_2(\omega)] \quad (3.19)$$

Καθότι η ταχύτητα είναι διανυσματικό μέγεθος, η απόκριση του μικροφώνου θα είναι αμφιπολική (σχήματος «8»)¹⁵.

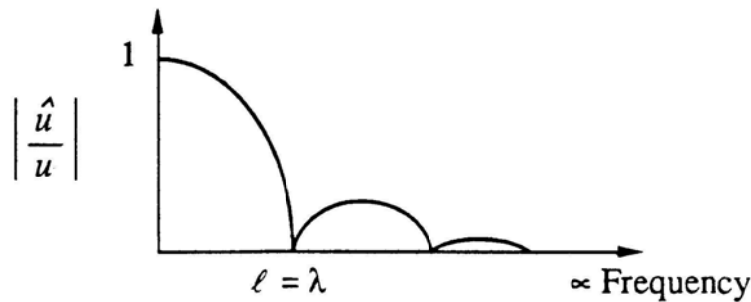
Γράφοντας το ακουστικό κύμα σε εκθετική μορφή ($p(\omega) = P_o e^{j(\omega t - kx)}$) και θεωρώντας ως σημείο υπολογισμού της σωματιδιακής ταχύτητας κάποιο σημείο επί του άξονα που ενώνει τα δύο μικρόφωνα και ισαπέχει από αυτά υπολογίζουμε:

¹⁵ Καθότι για την ίδια βαθμίδα πίεσης αντιστοιχούν δύο πιθανά διανύσματα της ταχύτητας.

$$u(\omega) = \frac{1}{j\omega\rho d} [p_1(\omega) - p_2(\omega)] = \frac{P_o \cdot e^{j\omega t}}{j\omega\rho d} (e^{jk d/2} - e^{-jk d/2}) \Rightarrow$$

$$u(\omega) = \frac{P_o \cdot e^{j\omega t}}{\rho c} \frac{\sin(kd/2)}{(kd/2)} = u_o(\omega) \frac{\sin(kd/2)}{(kd/2)} \quad (3.20)$$

Όπου $u_o(\omega)$ η πραγματική τιμή της σωματιδιακής ταχύτητας στη θέση υπολογισμού. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η τιμή που καταγράφει το μικρόφωνο είναι στις χαμηλές συχνότητες ίση προς την πραγματική τιμή της ακουστικής σωματιδιακής ταχύτητας, ενώ όσο αυξάνεται η συχνότητα γίνεται μικρότερη από την πραγματική τιμή. Για συχνότητα $f = c/(10d)$, $\lambda = d/10$ το σφάλμα είναι μόλις $0.6dB$, ενώ για συχνότητα $f = c/d$, $\lambda = d$ η μετρούμενη τιμή μηδενίζεται ανεξάρτητα από την τιμή της πραγματικής σωματιδιακής ταχύτητας. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.5

Σφάλμα καταγραφής μικροφώνου μέτρησης βαθμίδας πίεσης

Συνοπτικά, τα βασικά ακουστικά χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί των μικροφώνων βαθμίδας πίεσης είναι τα ακόλουθα:

1. Η απόκριση κατευθυντικότητάς τους είναι αμφιπολική (σχήματος «8»).
2. Στις χαμηλές συχνότητες λόγω των πολύ μεγάλων μηκών κύματος που εμπλέκονται (λ.χ. το μήκος κύματος στα $100Hz$ είναι $3.4m$), η διαφορά πίεσης μεταξύ των δυο μικροφώνων είναι πολύ μικρή και πρακτικά είναι διακριτή από τον ηλεκτρικό θόρυβο του μικροφώνου και των λοιπών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.
3. Στις υψηλές συχνότητες το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με την απόσταση μεταξύ των δύο μικροφώνων. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται σφάλμα όσον αφορά την πραγματική τιμή της σωματιδιακής ταχύτητας.

3.2.2.1 Ειδική Εφαρμογή: Η χρήση του μικρόφωνου βαθμίδας για το διαχωρισμό κοντινών και απομακρυσμένων ηχητικών πηγών (αρχή του Close Talk Mic-ing)

Έστω δύο σημειακές, παντοκατευθυντικές ηχητικές πηγές σε αποστάσεις r_1 και r_2 από ένα μικρόφωνο βαθμίδας αντίστοιχα. Η πηγή 1 βρίσκεται σε μικρή απόσταση

από το μικρόφωνο, ενώ η πηγή 2 απέχει αρκετά από το μικρόφωνο (δηλαδή $r_1 > r_2$). Υποθέτουμε επίσης ότι η απόσταση μεταξύ των δύο διαφραγμάτων είναι μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει (δηλαδή $d \ll \lambda$).

Η ηχητική εκπομπή της κάθε πηγής μπορεί να γραφεί σε εκθετική μορφή ως:

$$p(r, \omega) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial r} = -\left(\frac{A}{r^2} + \frac{jkA}{r}\right) e^{j(\omega t - kr)} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{p(r, \omega)}{r} (1 + jkr) \quad (3.21)$$

Εφ' όσον το τώρα $kr_1 \ll 1$ (εγγύς πεδίο πηγής 1) και $kr_2 \gg 1$ (μακρινό πεδίο πηγής 2), τότε η απόκριση του μικροφώνου λόγω της πηγής 1 θα είναι (βλ. και σχέση 3.19 παραπάνω) $-\frac{p_1(r, \omega)}{r_1}$, ενώ η απόκριση λόγω της πηγής 2 θα είναι $-jkp_2(r, \omega)$.

Διαιρώντας κατά μέλη λαμβάνουμε:

$$\left| \frac{\text{απόκριση λόγω πηγής 1}}{\text{απόκριση λόγω πηγής 2}} \right| = \frac{p_1}{kr_1 p_2} \gg \frac{p_1}{p_2} \quad (3.22)$$

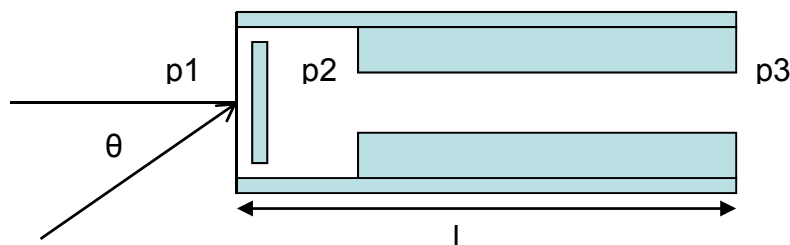
Παρατηρούμε δηλαδή ότι το μικρόφωνο βαθμίδας ενισχύει το σήμα από το κοντινό μικρόφωνο κατά $1/kr_1$ φορές.

3.2.3 Μικρόφωνα ανώτερης τάξης

Συνδυάζοντας στοιχεία από μικρόφωνα πίεσης και μικρόφωνα βαθμίδας προκύπτουν μικρόφωνα με νέους τύπους κατευθυντικότητας. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να εξασφαλιστεί και με την εισαγωγή ακουστικών στοιχείων στο μικρόφωνο.

3.2.3.1 Ειδική Εφαρμογή: Μικρόφωνο βαθμίδας με καθυστέρηση

Θεωρούμε ένα μικρόφωνο βαθμίδας στην πίσω επιφάνεια του οποίου έχει τοποθετηθεί μια διάταξη καθυστέρησης (λ.χ. ένας κύλινδρος κυματαγωγός-βλ. σχήμα παρακάτω) η οποία, στη συχνοτική περιοχή λειτουργίας του μικροφώνου, δεν επηρεάζει καθόλου το πλάτος του ακουστικού κύματος (ακουστική πίεση), αλλά μόνο τροποποιεί, με γραμμικό τρόπο, τη φάση του κύματος (είναι δηλαδή ένα καθαρό delay).



Σχήμα 3.6
Μικρόφωνο βαθμίδας με γραμμή καθυστέρησης

Μαθηματικά αυτό αποτυπώνεται γράφοντας ότι:

$$p_2 = p_3 e^{-j\phi(\omega)} = p_3 e^{-j\omega T_d} = p_3 e^{-jkd} \quad (3.23)$$

Όπου T_d η χρονική καθυστέρηση που προκαλεί η διάταξη και d η ισοδύναμη απόσταση διάδοσης του ήχου ($d = cT_d$).

Εκφράζοντας τώρα την πίεση στη θέση 3 σε συνάρτηση της πίεσης στη θέση 1, της γωνίας πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος στο διάφραγμα και του μήκους l του μικροφώνου, και αντικαθιστώντας στη σχέση 3.23 προκύπτει ότι:

$$p_2 = p_1 e^{-jk(d+l\cos\theta)} \quad (3.24)$$

Αλλά η ποσότητα εντός της παρένθεσης είναι πάντα μικρότερη της μονάδος (καθότι $d \ll \lambda$ και $l \ll \lambda$) οπότε χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική σχέση, $e^{-jx} = 1 - jx$, λαμβάνουμε:

$$p_2 \approx p_1 - jk p_1 (d + l \cos \theta) \Rightarrow u \sim p_1 - p_2 = jk p_1 (d + l \cos \theta) \quad (3.25)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η απόκριση του μικροφώνου εξαρτάται από το μήκος του, τη γωνία πρόσπτωσης του ήχου και τη χρονική καθυστέρηση που εισάγει η αντίστοιχη βαθμίδα.

Διαιρώντας τώρα τη σχέση 3.25 με $(d + l)$ το οποίο αντιστοιχεί στην απόκριση του μικροφώνου για αξονική πρόσπτωση, λαμβάνουμε:

$$u \sim \frac{d}{d+l} + \frac{l \cos \theta}{d+l} \Rightarrow u \sim (1 - K) + K \cos \theta \quad (3.26)$$

Όπου $K = \frac{l}{d+l}$.

Στην παραπάνω σχέση η κατευθυντικότητα του μικροφώνου εκφράζεται ως συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής.

Προκειμένου να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της διακρίνουμε τρεις οριακές περιπτώσεις:

- $d \ll l \Rightarrow K = 1 \Rightarrow u \sim l \cos \theta$ που είναι η απόκριση ενός αμφικατευθυντικού μικροφώνου (figure of 8 microphone).

Μικρόφωνα αυτής της κατευθυντικότητας εμφανίζουν μέγιστο απόκρισης σε ήχους κατά μήκος του άξονά τους (μπροστά και ακριβώς πίσω από το μικρόφωνο), ενώ απορρίπτουν αυτούς που προέρχονται από τις πλευρικές κατευθύνσεις. Το πολικό διάγραμμα σχηματίζει ένα «8» από όπου προέρχεται και η αγγλική ονομασία του μικροφώνου. Χρησιμοποιούνται συχνά για ταυτόχρονη λήψη δύο οργάνων ή φωνών καθώς επίσης και σε κάποιου ειδικού τύπου μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων (πλευρικά κλάσματα - Lateral Energy Fractions).

- $d \gg l \Rightarrow K = 0 \Rightarrow u \sim 1$ που είναι η απόκριση ενός παντοκατευθυντικού μικροφώνου (omnidirectional microphone).

Μικρόφωνα αυτής της κατευθυντικότητας εμφανίζουν σταθερή απόκριση σε κάθε κατεύθυνση. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η ομοιόμορφη συχνοτική απόκριση προς κάθε κατεύθυνση και επομένως η απουσία χρωματισμών κατά

την ηχογράφηση κινούμενων ή χωρικά εκτεταμένων ηχητικών πηγών, ενώ βασικό τους μειονέκτημα είναι η κακή συμπεριφορά τους ως προς την ανάδραση.

- $d = l \Rightarrow K = 0,5 \Rightarrow u \sim d(1 + l \cos \theta)$ που είναι η απόκριση ενός καρδιοειδούς μικροφώνου (cardioid microphone).

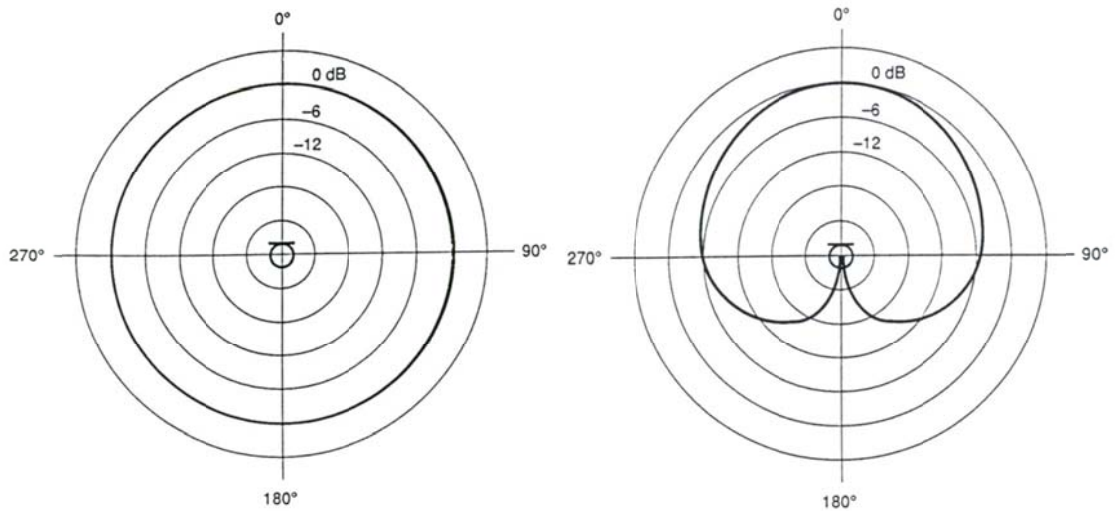
Μικρόφωνα αυτής της κατευθυντικότητας εμφανίζουν μέγιστο απόκρισης σε ήχους από την μπροστινή μεριά του μικροφώνου και κατά μήκος του άξονα του. Καθώς η γωνία πρόσπτωσης μεγαλώνει, η ευαισθησία μειώνεται βαθμιαία μέχρι να μηδενιστεί στο πίσω μέρος του μικροφώνου. Ονομάζεται έτσι λόγω του σχήματος καρδιάς που δημιουργείται στο πολικό του διάγραμμα. Σημειώνεται ότι λόγω της διαφορετικής μορφής του πολικού διαγράμματος σε κάθε συχνότητα (το εύρος του κύριου λοβού μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα), για πηγές εκτός άξονα έχουμε τονική αλλοίωση που μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση. Τα καρδιοειδή μικρόφωνα χρησιμοποιούνται ευρέως στον ενισχυμένο ήχο.

Για ενδιάμεσες τιμές της καθυστέρησης προκύπτει μια σειρά από άλλες καμπύλες κατευθυντικότητας. Οι πλέον συχνά απαντόμενες είναι:

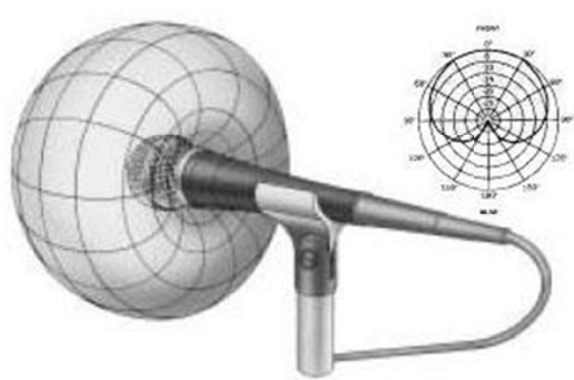
- $d = 0,5l \Rightarrow K = 2/3 \Rightarrow u \sim 0,33 + 0,66 \cos \theta$ που είναι η απόκριση ενός υπερκαρδιοειδούς μικροφώνου (hyper-cardioid microphone).
- $d = 0,25l \Rightarrow K = 3/4 \Rightarrow u \sim 0,25 + 0,75 \cos \theta$ που είναι η απόκριση ενός υπερκαρδιοειδούς μικροφώνου (super cardioid microphone).

Η κατευθυντικότητα και των δυο παραπάνω τύπων μικροφώνων έχει πολλές ομοιότητες με την κατευθυντικότητα του καρδιοειδούς μικροφώνου με τη διαφορά ότι ο προς τα εμπρός λοβός είναι στενότερος (είναι δηλαδή περισσότερο κατευθυντικά προς τα εμπρός) και εμφανίζουν ένα μόνο λοβό προς τα πίσω. Λόγω της αυξημένης κατευθυντικότητάς τους χρησιμοποιούνται για την καταγραφή απομακρυσμένων πηγών.

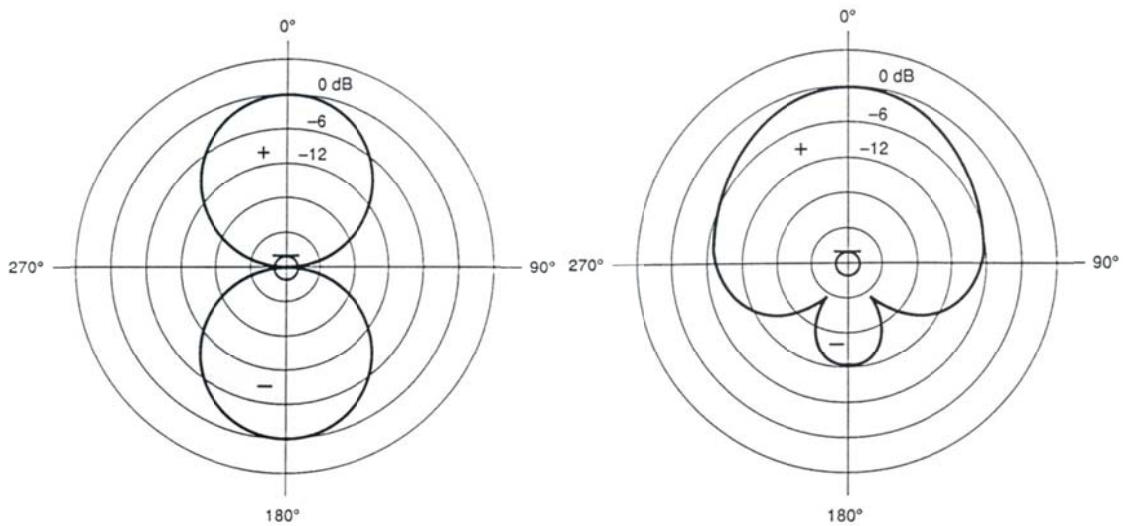
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αντίστοιχα πολικά διαγράμματα, δηλαδή η κατευθυντικότητα σε συνάρτηση με τη γωνία.



ΠΟΛΥΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ



ΚΑΡΔΙΟΕΙΔΕΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ



ΑΜΦΙΠΟΛΙΚΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

ΥΠΕΡΚΑΡΔΙΟΕΙΔΕΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

Σχήμα 3.7
Πολικά Διαγράμματα Βασικών Τύπων Μικροφώνων

3.2.4 Μικρόφωνα ειδικού τύπου

3.2.4.1 Το πολυ-μικρόφωνο καταγραφής ηχητικού πεδίου (Sound Field Microphone)

Αποτελείται από τέσσερα μικρόφωνα τοποθετημένα σε τετραεδρική διάταξη. Τρία από αυτά είναι τύπου βαθμίδας και καταγράφουν την ηχητική πίεση κατά μήκος των τριών αξόνων του χώρου και το τέταρτο είναι τύπου πίεσης και καταγράφει την ηχητική πίεση στο κέντρο του μικροφώνου.

Εφ' όσον το σήμα από τις μονάδες του μικροφώνου καταγραφεί σε ανεξάρτητα, συγχρονισμένα κανάλια, υπάρχει η δυνατότητα στη συνέχεια να ανασυντεθεί το ηχητικό αποτέλεσμα που θα είχε η τοποθέτηση οποιουδήποτε μικροφώνου πρώτης τάξης στη θέση καταγραφής ανεξαρτήτως της γωνίας τοποθέτησης.

3.2.4.2 Συστοιχίες μικροφώνων (Microphones Arrays)

Αποτελούνται από ένα σύνολο μονάδων πρώτης τάξης, οι αποκρίσεις των οποίων συνδυάζονται ηλεκτρονικά προκειμένου να επιτευχθούν πολύ ειδικές καμπύλες κατευθυντικότητας. Σημειώνεται ότι με κατάλληλη επεξεργασία των χαρακτηριστικών σύνδεσης (φάση και πλάτος) των επιμέρους μονάδων της συστοιχίας είναι δυνατή τροποποίηση της κατευθυντικότητας και η αλλαγή κατεύθυνσης του άξονα της συστοιχίας (electronic directivity steering, beaming and shading).

3.2.4.3 Μικρόφωνα πολλαπλών γραμμών καθυστέρησης (Shotgun Microphones)

Βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τα μικρόφωνα βαθμίδας μόνο που εισάγονται ταυτόχρονα παραπάνω από μια γραμμές καθυστέρησης. Κατ'αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να δημιουργηθούν μικρόφωνα με πολύ υψηλή κατευθυντικότητα (πολύ στενό κύριο λοβό) για ειδικές εφαρμογές. Η εμπορική τους ονομασία είναι «shotgun microphones».

Ασκήσεις:

1. Να αποδειχθεί ότι με ένα σύστημα τριών μικροφώνων είναι δυνατό να προσδιορισθεί πλήρως η κατεύθυνση και το πλάτος ενός ηχητικού κύματος στο επίπεδο.
2. Να υπολογισθεί η κατευθυντικότητα ενός μικρόφωνα με 5 γραμμές καθυστέρησης.
3. Να υπολογισθεί η κατευθυντικότητα ενός μικροφώνου με αποτελείται από 5 μικρόφωνα πίεσης.

3.3 Λοιπά χαρακτηριστικά μικροφώνων

Κατά την επιλογή του κατάλληλου μικροφώνου για μια εφαρμογή εξετάζονται πέραν από τον τύπο του μικροφώνου και μια σειρά από άλλα ηλεκτρακουστικά χαρακτηριστικά:

- προενίσχυση
- εξωτερική τάση πόλωσης (phantom power)
- ευαισθησία
- κατευθυντικότητα
- παράγοντες front to random / front to back
- απόκριση συχνοτήτων
- στιγμιαία απόκριση
- εμπέδηση
- εσωτερική στάθμη θορύβου
- στάθμη υπερφόρτωσης
- δυναμικό εύρος

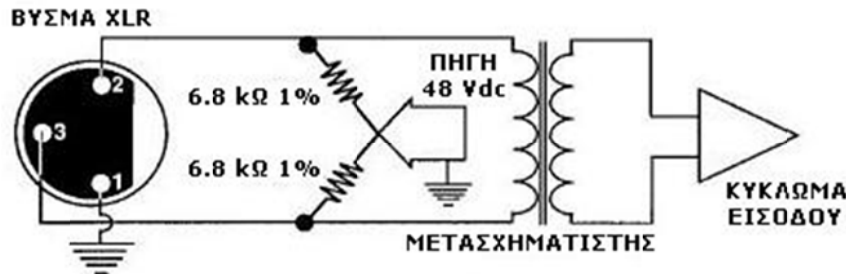
3.3.1 Προενίσχυση (preamplifier)

Λόγω του ότι το διάφραγμα ενός μικροφώνου είναι πολύ μικρό, το πλάτος του σήματος που παράγει είναι πολύ μικρό (προκειμένου για ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο της τάξης μερικών mV). Λόγω της αντίστασης των καλωδίων, του ηλεκτρικού και ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και της αντίστασης εισόδου της κονσόλας, το σήμα αυτό εάν δεν ενισχυθεί κατάλληλα θα εξασθενήσει περιορίζοντας δραστικά το δυναμικό του εύρος χάνοντας σημαντικό ποσοστό προτού διανύσει την απόσταση μέχρι την επόμενη βαθμίδα. Για αυτό το λόγο επιβάλλεται η χρήση προενισχυτή μικροφώνου, ο οποίος ενισχύει το σήμα σε επίπεδο γραμμής (line level, ήτοι, περίπου $0.775 V$). Όλες οι κονσόλες, αναλογικές και ψηφιακές, περιλαμβάνουν μονάδες προενίσχυσης και η ποιότητα των εν λόγω μονάδων αποτελεί βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας της κονσόλας. Μονάδες προενίσχυσης υψηλής ποιότητας ή ειδικών χαρακτηριστικών υφίστανται και σαν εξωτερικές μονάδες (stand alone units) και στην περίπτωση αυτή το κύκλωμα προενίσχυσης της κονσόλας παρακάμπτεται εντελώς.

3.3.2 Εξωτερική τάση πόλωσης (Phantom Power)

Αφορά τα πυκνωτικά μικρόφωνα και είναι η συνεχής τάση ($12 - 48V$) που χρειάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα του μικροφώνου για να τεθεί σε λειτουργία και να δημιουργηθεί τάση πόλωσης στον πυκνωτή. Την τάση αυτή παρέχει η μονάδα προενίσχυσης μέσω του καλωδίου σύνδεσης ή σε σπάνιες περιπτώσεις, κάποια εξωτερική ανεξάρτητη πηγή τροφοδοσίας. Σε ισοσταθμισμένη (balanced) σύνδεση, η τάση παρέχεται με την ίδια πολικότητα και στις δυο γραμμές του σήματος. Η εν λόγω σύνδεση έχει το πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζει ούτε τη σύνδεση ενός δυναμικού

μικροφώνου στο κύκλωμα, καθότι το άθροισμα της τάσης στην έξοδο είναι μηδέν. Αντίθετα, αν σε μια απλή *unbalanced phantom powered* σύνδεση συνδεθεί ένα ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο αυτό θα καταστραφεί άμεσα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ελέγχεται **πάντα** αν το κανάλι στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί ένα ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο είναι συνδεδεμένο με κύκλωμα εξωτερικής τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.7

Συνδεσμολογία τάσης πόλωσης (phantom power) σε ισοσταθμισμένη γραμμή

3.3.3 Ευαισθησία (sensitivity, G)

Ορίζεται ως ο λόγος της τάσης εξόδου ενός μικροφώνου προς μια σταθερή ηχητική στάθμη εισόδου, συνήθως στα 1000Hz. Όσο πιο μεγάλο σήμα εξόδου δίδει ένα μικρόφωνο για δεδομένη ηχητική στάθμη εισόδου τόσο πιο ευαίσθητο είναι το μικρόφωνο αυτό. Η στάθμη ευαισθησίας υπολογίζεται σε dB_{SPL} από τον τύπο :

$$G_E = 20 \log \frac{T_E}{T_0} \quad (3.27)$$

όπου $T_E = \frac{\tilde{u}}{\tilde{p}}$ η ευαισθησία, u η σωματιδιακή ταχύτητα, p η ηχητική πίεση και T_0 η τιμή αναφοράς της ευαισθησίας ($T_0 = 1V / Pa$).

3.3.4 Κατευθυντικότητα ελεύθερου πεδίου (directional effect, Q)

Είναι ένας δείκτης της μεταβολής της τάσης εξόδου του μικροφώνου ως προς την κατεύθυνση από την οποία προέρχεται ο ήχος για ηχητική έκθεση σε περιβάλλον ελεύθερου πεδίου (χωρίς δηλαδή ανακλάσεις). Περιγράφεται από τα παρακάτω μεγέθη :

3.3.4.1 Λόγος γωνιακής κατευθυντικότητας (angular directivity ratio, Γ) :

Είναι ο λόγος της τάσης εξόδου στο ελεύθερο πεδίο $T_{Ed}(\vartheta)$, υπολογισμένης για ένα σταθερό ηχητικό κύμα σε μια γωνία ϑ από τον άξονα του μικροφώνου, και της τιμής που υπολογίζεται στον άξονα αναφοράς του μικροφώνου (γωνία 0°), $T_{Ed}(0)$ δηλαδή :

$$\Gamma_M(\vartheta) = \frac{T_{Ed}(\vartheta)}{T_{Ed}(0)} \quad (3.28)$$

3.3.4.2 Κέρδος γωνιακής κατευθυντικότητας

Είναι ο εικοσαπλάσιος λογάριθμος του λόγου γωνιακής κατευθυντικότητας και μετριέται σε dB (angular directivity gain, D):

$$D_M(\vartheta) = 20 \log \Gamma_M(\vartheta) \quad (3.29)$$

3.3.4.3 Γωνιακό εύρος (coverage angle)

Είναι η γωνία μέσα στην οποία το κέρδος κατευθυντικότητας δε μειώνεται περισσότερο από $3dB$ από την τιμή αναφοράς, δηλαδή την τιμή επί του άξονα του μικροφώνου (on axis).

3.3.5 Κατευθυντικότητα διάχυτου πεδίου

Είναι δείκτες της μεταβολής της τάσης εξόδου του μικροφώνου σε συνάρτηση με την κατεύθυνση του ήχου μεταξύ συνθηκών ελεύθερου και διάχυτου πεδίου (όπου η ηχητική ενέργεια κατευθύνεται προς το διάφραγμα του μικροφώνου με ίδια πιθανότητα από κάθε διεύθυνση του χώρου).

3.3.5.1 Παράγοντας front-to-random (front-to-random factor, γ)

Είναι ο λόγος ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από το μικρόφωνο, όταν αυτό βρίσκεται σε ελεύθερο πεδίο σε σχέση με την ίδια μέτρηση, όταν το μικρόφωνο τοποθετηθεί σε διάχυτο πεδίο ίδιας ηχητικής στάθμης πίεσης. Και στις δύο μετρήσεις χρησιμοποιείται μονοσυχνотικό ηχητικό πεδίο σταθερής έντασης και η πηγή του ήχου βρίσκεται στην κατεύθυνση του άξονα του μικροφώνου. Ισχύει:

$$\gamma_M = \frac{T_{Ed}^2}{T_{Er}^2} \quad (3.30)$$

3.3.5.2 Δείκτης front-to-random (front-to-random index, C)

Είναι ο δεκαπλάσιος λογάριθμος του παράγοντα front to random και μετράται σε dB :

$$C_M = 10 \log \gamma_M \quad (3.31)$$

3.3.5.3 Δείκτης κατευθυντικότητας διάχυτου πεδίου (diffuse field directivity factor, DF)

Είναι το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογάριθμου του λόγου της μέσης τετραγωνικής πίεσης που καταγράφει το μικρόφωνο όταν τοποθετηθεί σε ένα διάχυτο πεδίο προς την αντίστοιχη τιμή που καταγράφει ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο.

Δύναται να υπολογισθεί σε κλειστή μορφή ως συνάρτηση του παράγοντα κατευθυντικότητας K και δίδεται από τη σχέση:

$$DF = 10 \log [1 - 2K + (4/3)K^2] \quad (3.32)$$

3.3.5.4 Δείκτης front to back διάχυτου πεδίου (*FBR*)

Ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογάριθμου του λόγου της μέσης τετραγωνικής πίεσης που καταγράφει το μικρόφωνο λόγω της ηχητικής πίεσης που φθάνει από το ημισφαίριο που βρίσκεται εμπρός από το μικρόφωνο προς την αντίστοιχη τιμή που καταγράφει λόγω της ηχητικής ενέργειας που προσπίπτει από το πίσω ημισφαίριο.

Η τιμή του *FBR* επίσης δύναται να υπολογισθεί σε κλειστή μορφή ως συνάρτηση του παράγοντα κατευθυντικότητας *K* και δίδεται από τη σχέση:

$$FBR = 10 \cdot \log\left(\frac{1 - k + \frac{k^2}{3}}{1 - 3k + 7\frac{k^2}{3}}\right) \quad (3.32)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές των *DF* και *FBR* για τους βασικούς τύπους μικροφώνων.

Τύπος μικροφώνου	<i>DF</i> (dB)	<i>FBR</i> (dB)	Γωνιακό Εύρος (-3dB angle)
Παντοκατευθυντικό	0	0	360°
Αμφικατευθυντικό	-4.8	0	90°
Καρδιοειδές	-4.8	8.5	130°
Υπερκαρδιοειδές	-5.8	11	120°
Σούπερκαρδιοειδές	-6	9	110°

Πίνακας 3.1: Δείκτης κατευθυντικότητας διάχυτου πεδίου και δείκτης front to back διάχυτου πεδίου βασικών τύπων μικροφώνων

3.3.6 Απόκριση συχνότητας (frequency response)

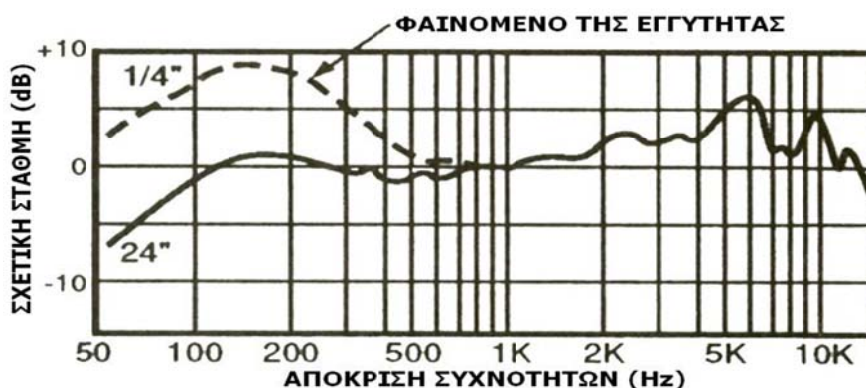
Είναι η συνάρτηση που αντιστοιχεί την τιμή του σήματος εξόδου του μικροφώνου (εκφρασμένη σε *dB*) σε κάθε συχνότητα ως προς την τιμή εξόδου που αντιστοιχεί σε κάποια καθορισμένη συχνότητα αναφοράς, όταν για είσοδο υπάρχει ηχητικό πεδίο σταθερής ηχητικής στάθμης ανά συχνότητα. Η συνηθέστερη μορφή απεικόνισης της συχνοτικής απόκρισης είναι υπό τη μορφή διαγράμματος.

Το εύρος συχνοτήτων στο οποίο η συχνοτική απόκριση του μικροφώνου είναι επίπεδη ονομάζεται συχνοτική περιοχή λειτουργίας (transmission range) του μικροφώνου. Παρότι εκ πρώτης φαίνεται ότι το ιδανικό μικρόφωνο θα πρέπει να έχει ευθεία απόκριση, δηλαδή το σήμα εξόδου να είναι σταθερό για κάθε σήμα εισόδου σταθερού πλάτους, ανεξάρτητα από τη συχνότητα, στην πράξη στις περισσότερες εφαρμογές αυτό δεν είναι απαραίτητο, πολλές φορές μάλιστα ούτε καν επιθυμητό. Η

ανθρώπινη φωνή, για παράδειγμα, δεν παράγει ηχητικές συχνότητες κάτω από τα 100Hz. Προκειμένου η ηχογράφησή της να είναι κατά το δυνατόν απαλλαγμένη από τυχαίους θορύβους στις συχνότητες αυτές, είναι ωφέλιμο να χρησιμοποιηθεί μικρόφωνο με μειωμένη απόκριση στη συχνότητα περιοχή κάτω των 100Hz (ή ισοδύναμα, να χρησιμοποιηθεί κάποιο υπεραποκοπή φίλτρο αποκοπής).

Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την ηχογράφιση φωνητικών σημάτων και αφορά στην αλλοίωση της απόκρισης ενός κατευθυντικού μικροφώνου όταν η ηχητική πηγή είναι πολύ κοντά στο μικρόφωνο είναι το φαινόμενο της εγγύτητας (proximity effect). Πρόκειται για μια αύξηση στην απόκριση των χαμηλών συχνοτήτων όταν το μικρόφωνο βρίσκεται πολύ κοντά στην ηχητική πηγή (λιγότερο από 5cm). Άγνοια της οξύτητας του φαινομένου δύναται να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του προενισχυτή. Παρότι το εν λόγω φαινόμενο αποτελεί μια αλλοίωση της συχνοτικής απόκρισης του μικροφώνου, εντούτοις είναι πολλές φορές επιθυμητό στο λυρικό τραγούδι και χρησιμοποιείται από τους τραγουδιστές για να προσδώσει όγκο στη φωνή. Αντιθέτως, έχει αρνητική επίδραση στην ηχογράφιση ομιλίας καθότι περιορίζει την καταληπτότητα.

Επίσης, η συχνοτική απόκριση των κατευθυντικών μικροφώνων, όπως είδαμε και παραπάνω, μεταβάλλεται σημαντικά με τη συχνότητα λειτουργίας. Κατά συνέπεια, μετακίνηση της ηχητικής πηγής εκτός του άξονα ενός κατευθυντικού μικροφώνου θα έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της χροιάς της πηγής (off-axis coloration), φαινόμενο που γίνεται εύκολα αντιληπτό ακόμη και από μη εξασκημένους ακροατές. Κατ' επέκταση, κατά την επιλογή ενός μικροφώνου, πέραν από τη συχνοτική περιοχή εκπομπής της ηχητικής πηγής και την αντίστοιχη επιθυμητή αξονική συχνοτική απόκριση του μικροφώνου, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η πιθανότητα κίνησης της ηχητικής πηγής ως προς τον άξονα του μικροφώνου.



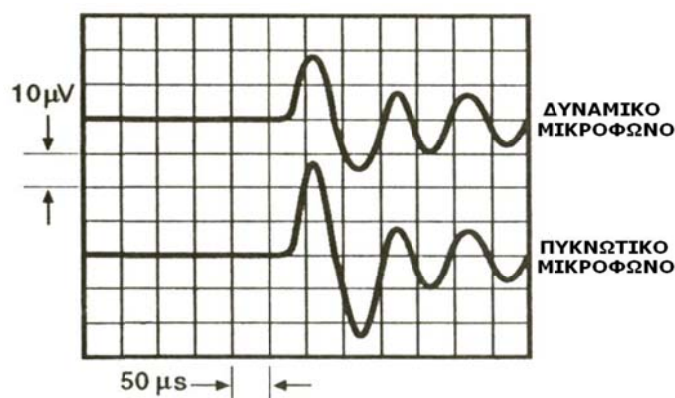
Σχήμα 3.8

Φαινόμενο της Εγγύτητας κατά την ηχογράφιση με κατευθυντικό μικρόφωνο

Ένα μικρόφωνο με καλύτερη απόκριση γύρω στα 5 με 8kHz είναι κατάλληλο για βασική φωνή ή κάποιο σόλο όργανο, ενώ ένα μικρόφωνο που ενισχύει τις χαμηλές και απορρίπτει τις υψηλές συχνότητες είναι αποδοτικότερο στα κρουστά. Στον ενισχυμένο ήχο προτιμάται ευθεία απόκριση.

3.3.7 Στιγμιαία απόκριση (transient response)

Είναι μέτρο της ικανότητας του μικροφώνου να αποκρίνεται σε γρήγορες αλλαγές του πλάτους του ηχητικού κύματος. Καθορίζεται από την ηλεκτρική, μηχανική και ακουστική εμπέδηση του μικροφώνου. Αφορά τόσο στο χρόνο μέγιστης απόκριση μετά την έναρξη όσο και στο χρόνο σίγασης (ηρεμίας) μετά τη διακοπή ενός απειροστού παλμού (συνάρτηση δέλτα). Είναι το βασικό στοιχείο διαφοροποίησης των πυκνωτικών από τα δυναμικά μικρόφωνα. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν ελαφρύτερο διάφραγμα, άρα μικρότερη μηχανική αδράνεια και κατά συνέπεια καλύτερη στιγμιαία απόκριση.



Σχήμα 3.9
Στιγμιαία Απόκριση Μικροφώνου

3.3.8 Εμπέδηση (impedance)

Είναι η ολική σύνθετη αντίσταση εξόδου του μικροφώνου. Μετριέται σε Ohm , είναι μιγαδικό μέγεθος και μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητα.

Ως προς την εμπέδηση υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες «τάξεις» μικροφώνων:

- Χαμηλής εμπέδησης: $Z < 600\Omega$, με τυπική τιμή τα 200Ω
- Μεσαίας εμπέδησης: $600\Omega < Z < 10.000\Omega$, με τυπική τιμή τα $2k\Omega$
- Υψηλής εμπέδησης: $Z > 10.000\Omega$, με τυπική τιμή τα $25k\Omega$

Τα μικρόφωνα χαμηλής εμπέδησης έχουν την καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά στην επίδραση του ηλεκτρικού θορύβου του κυκλώματος και στην οδήγηση μακριών καλωδιακών γραμμών. Αντιθέτως, τα μικρόφωνα υψηλής εμπέδησης δεν μπορούν να οδηγήσουν μακριές γραμμές (καθότι ένα μεγάλο μέρος του σήματος καταναλώνεται στο καλώδιο) και είναι ευαίσθητα στον ηλεκτρικό θόρυβο (βλ. και θερμικό θόρυβο αντιστάσεων). Σε περίπτωση που ένα μικρόφωνο υψηλής εμπέδηση πρέπει να οδηγήσει μεγάλο μήκος καλωδίου είναι απαραίτητη η παρεμβολή ενός προσαρμογέα εμπέδησης.

Το βασικό στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τη σύνδεση ενός μικροφώνου σε ένα προενισχυτή ή κονσόλα είναι η συμβατότητα της εμπέδησης του μικροφώνου με την εμπέδηση εισόδου της κονσόλας. Σημαντικό είναι να γίνει κατανοητό ότι η μετάδοση του σήματος του μικροφώνου γίνεται υπό μορφή τάσης και όχι ρεύματος. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης μεταφοράς σήματος από το μικρόφωνο στην είσοδο του προενισχυτή και όχι η

μεγιστοποίηση μεταφοράς ισχύος από το μικρόφωνο στον προενισχυτή όπως, λανθασμένα, συχνά αναγράφεται.

Η εμπέδηση εισόδου του προενισχυτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη από την εμπέδηση του μικροφώνου: $Z_{amp} \geq 10Z_{mic}$. Μικρότερη τιμή της αντίστασης εισόδου του προενισχυτή έχει ως συνέπεια τη μείωση της απόδοσης του μικροφώνου, όχι όμως την καταστροφή του, όπως επίσης μερικές φορές αναγράφεται.

3.3.9 Εσωτερική στάθμη θορύβου (internal noise level)

Είναι η τάση που εμφανίζεται στην έξοδο του μικροφώνου εκφρασμένη σε dBV , τη απουσία ακουστικού σήματος, είναι δηλαδή μέτρο του θερμικού θορύβου που δημιουργείται από τα στοιχεία του κυκλώματος και εξαρτάται από τον τύπο του μικροφώνου, την εσωτερική του αντίσταση και τη θερμοκρασία.

3.3.10 Υπερφόρτωση (overload sound pressure)

Είναι η μεγαλύτερη ηχητική πίεση που μπορεί να καταγράψει το μικρόφωνο πέραν της οποίας η παραμόρφωση υπερβαίνει κάποια καθορισμένα όρια. Στα περισσότερα μικρόφωνα το όριο αυτό είναι μεταξύ των 120 και $140dB$ (στη θέση του διαφράγματος) όπου $130dB$ είναι το όριο του πόνου. Γι' αυτό το λόγο, η συνηθέστερη πηγή παραμόρφωσης από υπερφόρτωση είναι η βαθμίδα προενίσχυσης και όχι το μικρόφωνο.

3.3.11 Δυναμικό εύρος (dynamic range)

Είναι η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη τάση εξόδου που δίδει το μικρόφωνο χωρίς παραμόρφωση και χωρίς κίνδυνο καταστροφής και στην εσωτερική στάθμη θορύβου του.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται διάφοροι τύποι μικροφώνων που απαντώνται στο εμπόριο.



Σχήμα 3.10
Τύποι Εμπορικά Διαθέσιμων Μικροφώνων

Άσκηση:

Να αποδειχθεί η συνθήκη μέγιστης μεταφοράς ισχύος από ηλεκτρική πηγή με πεπερασμένη (ωμική) εσωτερική αντίσταση σε φορτίο, ως συνάρτηση του λόγου των αντιστάσεων πηγής-φορτίου.

Να αποδειχθεί η συνθήκη μέγιστης απόδοσης μεταφοράς σήματος από ηλεκτρική πηγή με πεπερασμένη (ωμική) εσωτερική αντίσταση σε φορτίο ως συνάρτηση του λόγου των αντιστάσεων πηγής-φορτίου.

4. ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ - ΚΑΛΩΔΙΑ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιασθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των ενισχυτών και των καλωδίων δίδοντας έμφαση στα χαρακτηριστικά που αφορούν το μηχανικό ήχο. Η αρχή λειτουργίας των ενισχυτών και η θεωρία γραμμών μεταφοράς δε θα παρουσιασθούν καθότι αποτελούν αυτοτελές αντικείμενο που διδάσκεται στα πλαίσια ξεχωριστού μαθήματος.

4.1 Ενισχυτές

Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, οι ενισχυτές ήχου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. τους Οικιακούς
2. τους Επαγγελματικούς

Ο τρόπος υλοποίησης της κάθε κατηγορίας ενισχυτών διαφέρει ριζικά και καθορίζεται από τις εντελώς διαφορετικές απαιτήσεις χρήσης.

4.1.1 Οικιακοί

Οι απαιτήσεις χρήσης των οικιακών ενισχυτών μπορούν να συνοψισθούν σε:

- Υψηλή πιστότητα αναπαραγωγής
- Παροχή υψηλής ισχύος, αλλά για μικρά, σχετικά, χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια, απαιτούνται σαφώς μικρότερα τροφοδοτικά και συστήματα ψύξης.
- Μειωμένες απαιτήσεις σε κυκλώματα προστασίας και παρακολούθησης. Οι πιθανότητες λανθασμένης συνδεσμολογίας / βραχυκυκλώματος είναι πρακτικά ανύπαρκτες. Συνεπώς, δεν υπάρχει ανάγκη για ενσωμάτωση ειδικών συστημάτων ασφάλειας και παρακολούθησης των γραμμών συνδεσμολογίας.
- Ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι γνωστές και σταθερές.
- Μικρό μήκος γραμμών οδήγησης. Οι αποστάσεις μέχρι τα ηχεία είναι περιορισμένες (τυπικά μικρότερες των 10 m).

4.1.2 Επαγγελματικοί

Οι απαιτήσεις χρήσης των επαγγελματικών ενισχυτών διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες των οικιακών και σε γενικές γραμμές μπορούν να συνοψισθούν σε:

- Παρατεταμένη λειτουργία στο όριο της ονομαστικής ισχύος λειτουργίας τους. Κατά συνέπεια, απαιτούνται μεγάλα τροφοδοτικά υψηλής ποιότητας κατασκευής και κυκλώματα ψύξης (ανεμιστήρες και ψήκτρες απαγωγής θερμότητας).
- Οδήγηση γραμμών μεγάλου μήκους (μήκη καλωδίων >100 m)
- Δυνατότητα οδήγησης γραμμών με πολλά ηχεία (λ.χ. σε συστήματα ανακοινώσεων)

- Λειτουργία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (υγρασία / θερμοκρασία)
- Απαιτήση για συνεχή παρακολούθηση της λειτουργίας των κυκλωμάτων του ενισχυτή και των γραμμών μεγαφώνων και επισήμανση τυχόντων προβλημάτων
- Χαμηλή παραμόρφωση – υψηλή πιστότητα αναπαραγωγής

Έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθοι βασικοί τύποι:

4.1.3 Ενισχυτές σε τάξη A

Η βαθμίδα εξόδου του ενισχυτή (τρανζίστορ) διαρρέεται συνεχώς από ρεύμα υψηλής έντασης (ρεύμα πόλωσης) ανεξαρτήτως από την ύπαρξη ή μη σήματος στην είσοδο του ενισχυτή. Καθότι τα τρανζίστορ είναι μη γραμμικά στοιχεία, σε μικρές εντάσεις η ύπαρξη του ρεύματος πόλωσης εξασφαλίζει τη λειτουργία του τρανζίστορ στη γραμμική του περιοχή εξασφαλίζοντας έτσι βέλτιστη απόδοση.

Οι ενισχυτές τάξης A καταναλώνουν δυσανάλογα μεγάλα ποσά ενέργειας (το μεγαλύτερο μέρος της οποίας αναλώνεται για την πόλωση του τρανζίστορ) και απαιτούν την ύπαρξη πολύ αποτελεσματικών διατάξεων ψύξης καθώς καταναλώνουν ενέργεια ακόμη και όταν δεν υπάρχει κανένα σήμα στην είσοδο του ενισχυτή.

Αντιπροσωπεύουν όμως τους ενισχυτές υψηλότερης πιστότητας και απαντώνται σε ακριβότερα συστήματα. Τυπικό κύκλωμα αντίστοιχου ενισχυτή με την αντίστοιχη καμπύλη λειτουργίας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί.

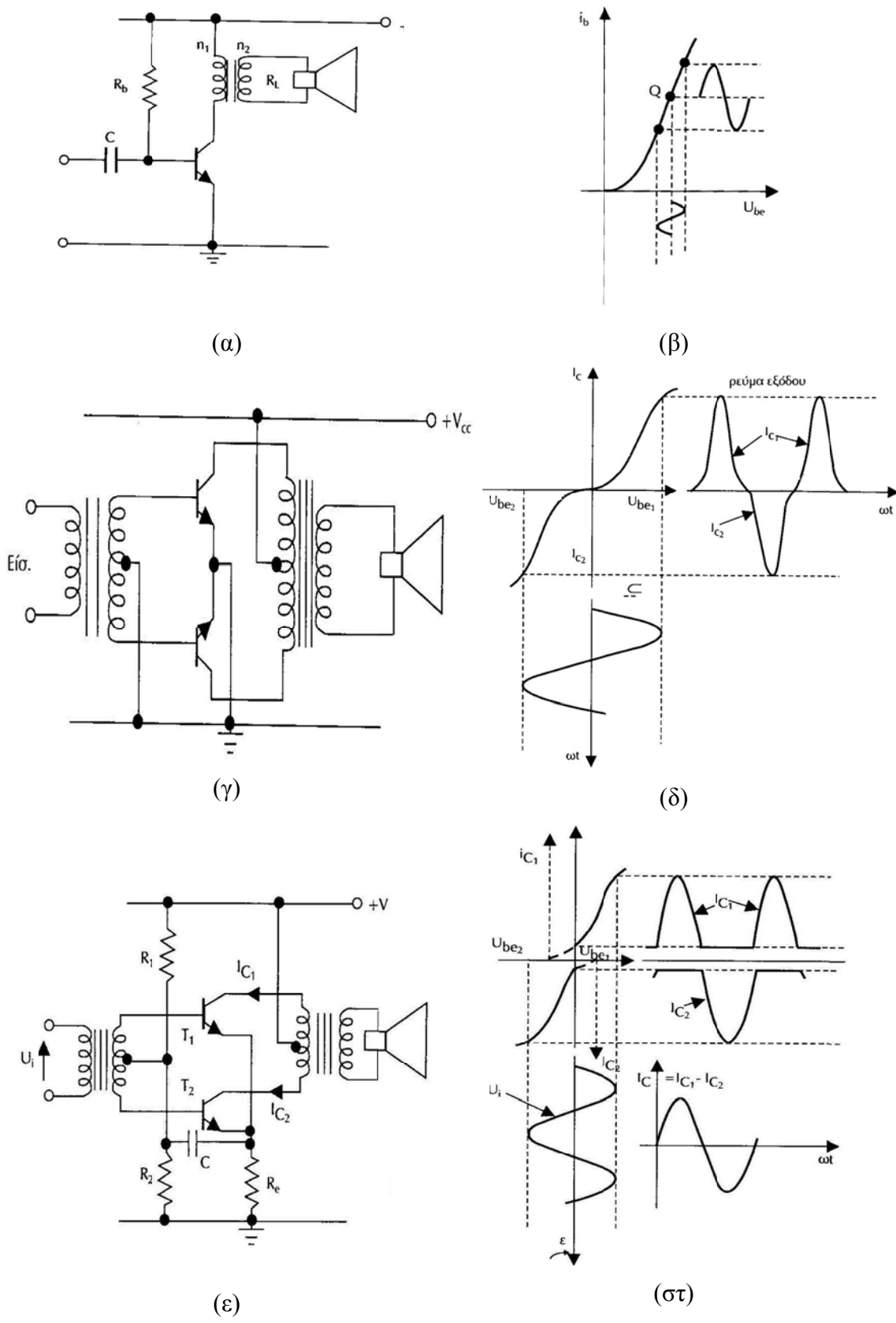
4.1.4 Ενισχυτές σε τάξη B

Η βαθμίδα εξόδου του ενισχυτή (τρανζίστορ) διαρρέεται από ρεύμα μόνο όταν στην είσοδο του ενισχυτή υπάρχει ακουστικό σήμα. Δεδομένου ότι το τρανζίστορ δεν είναι πολωμένο, δηλαδή το σημείο ηρεμίας είναι στην αρχή της χαρακτηριστικής, το σήμα ενισχύεται μόνο κατά τη θετική του ημιπερίοδο και λόγω της μη-γραμμικότητας των τρανζίστορ εμφανίζει παραμόρφωση στις χαμηλές εντάσεις ρεύματος (βλ. σχήμα 4.1 παρακάτω). Προκειμένου να ενισχυθούν και οι δύο ημιπερίοδοι του σήματος απαιτείται και δεύτερο τρανζίστορ το οποίο λαμβάνει είσοδο με ανεστραμμένη πολικότητα (διάταξη Push-pull). Καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από τους ενισχυτές σε τάξη A και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχουν ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις πιστότητας ή απαιτείται εξοικονόμηση ενέργειας (λ.χ. τηλέφωνα, φορητά συστήματα με μπαταρίες).

4.1.5 Ενισχυτές σε τάξη A-B

Ουσιαστικά είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω δύο τύπων. Η βαθμίδα εξόδου του ενισχυτή διαρρέεται συνεχώς από ένα ρεύμα πόλωσης, μικρότερης όμως έντασης από το αντίστοιχο στους ενισχυτές τάξης A. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η λειτουργία του ενισχυτή σε χαμηλές εντάσεις ρεύματος. Όσο αυξάνεται η ένταση ρεύματος ο ενισχυτής αρχίζει να λειτουργεί σε τάξη B (το μικρής έντασης ρεύμα πόλωσης όμως συνεχίζει να υφίσταται). Επιτυγχάνεται έτσι οικονομία ισχύος, μείωση του θερμικού φορτίου και πολύ καλή απόδοση.

Η πλειονότητα των οικιακών ενισχυτών υψηλής ποιότητας λειτουργούν σε τάξη A-B. Ενδεικτικό κύκλωμα και καμπύλη λειτουργίας απεικονίζεται στο σχήμα 4.1 παρακάτω.



Σχήμα 4.1
Κυκλώματα και καμπύλες λειτουργίας βασικών τύπων ενισχυτών ήχου:
(α,β) Τάξης Α, (γ,δ) Τάξης Β-διάταξη Push-Pull, (ε,στ) Τάξης ΑΒ
[Σ.Α.Πακτίσης, «Γενικά Ηλεκτρονικά», Εκδόσεις ΙΩΝ]

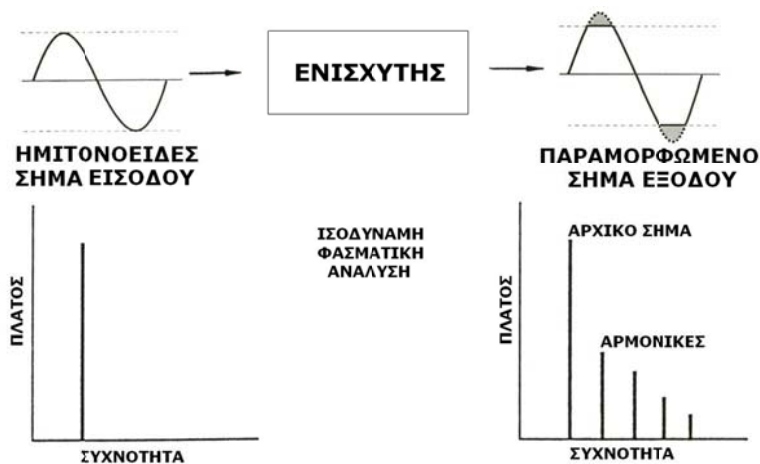
4.1.6 Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενισχυτών

Οι ενισχυτές ισχύος χαρακτηρίζονται από τα ακόλουθα ποιοτικά χαρακτηριστικά:

- a. Ευαισθησία
- b. Ισχύς εξόδου
- c. Εύρος ισχύος
- d. Συχνοτική απόκριση - φασική απόκριση
- e. Ρυθμός απόκρισης
- f. Παραμόρφωση
- g. Διαχωρισμός καναλιών (crosstalk)
- h. Σήμα προς θόρυβο
- i. Παράγοντας απόσβεσης
- j. Εμπέδηση
- k. Δυνατότητα οδήγησης γραμμών υψηλής εμπέδησης

4.1.6.1 Ευαισθησία (sensitivity)

Είναι η απαιτούμενη τάση εισόδου για την παραγωγή της μέγιστης ονομαστικής τάσης εξόδου του ενισχυτή. Είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, γιατί δείχνει τη μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί η είσοδος του ενισχυτή χωρίς να εμφανιστεί ψαλιδισμός. Αν αυτή η τάση ξεπεραστεί, ο ενισχυτής θα υπερφορτωθεί και το σήμα εξόδου θα είναι ψαλιδισμένο, δηλαδή όσες κορυφές είναι έξω από τα όρια θα κοπούν με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί αρμονική παραμόρφωση. Για ημιτονικό λ.χ. σήμα εισόδου, η έξοδος θα αρχίσει να προσεγγίζει τετραγωνικό παλμό (βλ. σχήμα 4.2 παρακάτω) με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ενέργεια και σε αρμονικές συχνότητες. Παρατεταμένη οδήγηση του ενισχυτή σε συνθήκες ψαλιδισμού δύναται να προκαλέσει καταστροφή των μεγαφώνων του συστήματος λόγω υπερθέρμανσης (από τις υψηλής συχνότητας αρμονικές, οι οποίες πολλές φορές είναι σε συχνότητες που δεν είναι καν ακουστές). Για λόγους προστασίας είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται ενισχυτές που παρέχουν περισσότερη ισχύ από την τιμή που υπολογίζεται για την οριακή λειτουργία του συστήματος. Συνήθως οι ενισχυτές ισχύος έχουν τη δυνατότητα της ρύθμισης της στάθμης εισόδου (σε κλίμακα dB). Θα πρέπει πάντα να ελέγχεται η μέγιστη τάση εξόδου της συσκευής που θα συνδεθεί στην είσοδο του ενισχυτή και εφ' όσον αυτή υπερβαίνει την ευαισθησία του ενισχυτή να πραγματοποιείται η αντίστοιχη ρύθμιση στην είσοδό του (λ.χ. $-3 dB$). Συνήθως η ευαισθησία ενός ενισχυτή αναγράφεται ως, « $300W$ σε 4Ω με ευαισθησία $0 dBu$ », το οποίο σημαίνει ότι αν στην είσοδο του ενισχυτή εφαρμοσθεί τάση $0 dBu$ ($0.775 V$) τότε εάν στην έξοδο του συνδεθεί φορτίο 4Ω θα καταναλωθεί ισχύς $300W$ στο φορτίο.



Σχήμα 4.2
Ψαλιδισμός σήματος και δημιουργία αρμονικής παραμόρφωσης
λόγω υπερφόρτωσης του ενισχυτή

4.1.6.2 Ισχύς εξόδου (power output level)

Είναι η ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο ενισχυτής για συγκεκριμένο επίπεδο παραμόρφωσης και εύρος συχνοτήτων, οδηγώντας ηχείο καθορισμένης ονομαστικής αντίστασης. Τυπική λ.χ. περιγραφή είναι η: «100W/κανάλι στα 4Ω με ταυτόχρονη οδήγηση και των δυο καναλιών». Διαιρώντας την ισχύ με την ονομαστική αντίσταση και παίρνοντας την τετραγωνική ρίζα λαμβάνουμε το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο (5A στο παράδειγμα) ή πολλαπλασιάζοντας και παίρνοντας την τετραγωνική ρίζα την τάση (20V στο παράδειγμα). Δεδομένου ότι η τάση εξόδου του ενισχυτή παραμένει σταθερή, υποδιπλασιασμός της αντίστασης του φορτίου (δηλαδή σύνδεση μεγαφώνου με ονομαστική εμπέδηση 2Ω) θεωρητικά συνεπάγεται το διπλασιασμό της παρεχόμενης ισχύος. Στην πράξη όμως κάτι τέτοιο δεν είναι σχεδόν ποτέ εφικτό καθότι η εμπέδηση του μεγαφώνου είναι μιγαδικό μέγεθος και μεταβάλλεται σημαντικά με τη συχνότητα. Πολλές φορές, σε συχνότητες που η εμπέδηση του ηχείου έχει έντονα επαγωγικό χαρακτήρα, η παρεχόμενη από τον ενισχυτή ισχύς δύναται να είναι κατά πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη ονομαστική.

Η μεθοδολογία καθορισμού της ισχύος εξόδου του ενισχυτή έχει τυποποιηθεί από την αμερικανική Federal Trade Commission και αφορά στην οδήγηση του ενισχυτή στο 1/3 της ονομαστικής του ισχύος (rated power), με ημιτονικό σήμα συχνότητας 1 kHz, σε φορτίο με αντίσταση ισοδύναμη με την ονομαστική εμπέδηση του φορτίου (rated load impedance), για χρονικό διάστημα μιας ώρας.

4.1.6.3 Εύρος ισχύος (power bandwidth)

Είναι το εύρος συχνοτήτων εντός του οποίου ο ενισχυτής δύναται να παρέχει τουλάχιστον το ήμισυ της ονομαστικής του ισχύος (δηλαδή -3 dB), χωρίς να υπερβεί την προδιαγραφη παραμόρφωσης (βλ. παρακάτω).

4.1.6.4 Απόκριση συχνότητας - φάσης (frequency – phase response)

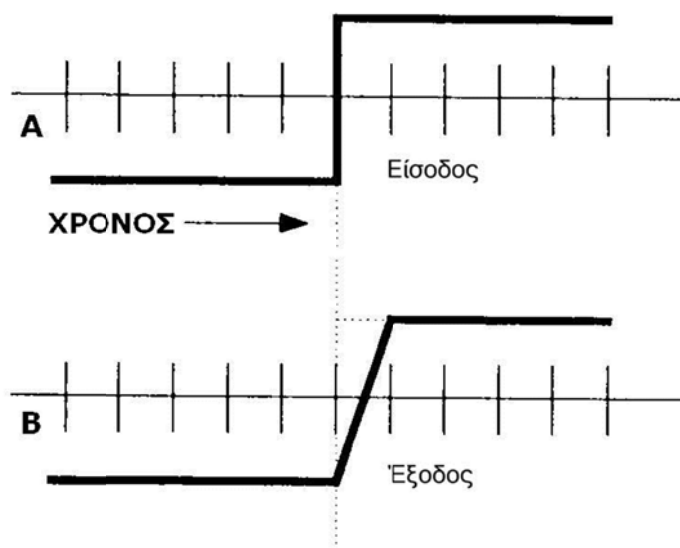
Χαρακτηρίζει την απόκριση συχνότητας του ενισχυτή σε σήματα μικρής ισχύος (συνήθως η μέτρηση γίνεται με ισχύ 1W σε φορτίο 8Ω). Διαφέρει ως προς το εύρος

ισχύος καθότι η απόκριση του ενισχυτή μεταβάλλεται μη γραμμικά όσο προσεγγίζονται τα όρια λειτουργίας του. Απόκριση συχνότητας με μέγιστη μεταβολή $\pm 0.5\text{dB}$ είναι απόλυτα εφικτή στις μέρες μας και απαντάται στα περισσότερα συστήματα.

Η φασική απόκριση δηλώνει τη διαφορά φάσης (χρονική καθυστέρηση) μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Σπάνια αποτελεί πρόβλημα στους σύγχρονους ενισχυτές, αλλά συνιστάται η μεταβολή στα άκρα του ακουστού φάσματος να μην υπερβαίνει τις 15° .

4.1.6.5 Ρυθμός απόκρισης (slew rate)

Είναι η ικανότητα ενός ενισχυτή να ανταποκρίνεται σε απότομες αλλαγές του σήματος εισόδου. Μετράται σε $V/\mu\text{s}$ και σχετίζεται με την «ηλεκτρική αδράνεια» των κυκλωμάτων του ενισχυτή. Όταν η τιμή του ρυθμού απόκρισης είναι μικρή, ο ενισχυτής δεν προλαβαίνει να παρακολουθήσει ταχείες μεταβολές του σήματος εισόδου και παραμορφώνει (ουσιαστικά λειτουργεί σαν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο). Από την άλλη μεριά, μια υπερβολικά μεγάλη τιμή δύναται να επιτρέψει την ενίσχυση ακόμη και ραδιοφωνικών συχνοτήτων, οι οποίες δύναται να υπάρχουν στο σήμα εισόδου και να προκληθεί υπερθέρμανση και καταστροφή των οδηγών υψηλών συχνοτήτων. Μια τιμή περί τα $50\text{V}/\mu\text{s}$ είναι ικανοποιητική (και εύκολα επιτεύξιμη) για τις περισσότερες εφαρμογές. Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά το φαινόμενο.



Σχήμα 4.3

Απόκριση ενισχυτή με πεπερασμένο ρυθμό απόκρισης (slew rate) σε τετραγωνικό σήμα

4.1.6.6 Παραμόρφωση (distortion) – Ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion, THD)

Μετριέται σε ποσοστό % και είναι ένα μέτρο της μεταφοράς ενέργειας από τη θεμελιώδη συχνότητα ενός τόνου, ο οποίος εισάγεται στην είσοδο του ενισχυτή, σε αρμονικές συχνότητες στην έξοδο του ενισχυτή. Τιμές κάτω του 0.1% επιτυγχάνονται εύκολα και θα πρέπει να θεωρούνται απαραίτητες ακόμη και για

εφαρμογές χωρίς εξεζητημένες απαιτήσεις. Οι μετρήσεις αρμονικής παραμόρφωσης πραγματοποιούνται στην ονομαστική ισχύ εξόδου του ενισχυτή και συνήθως μαζί με το αποτέλεσμα δηλώνεται και η συχνότητα που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση (συνήθως 1 kHz). Επειδή στους περισσότερους τύπους ενισχυτή η αρμονική παραμόρφωση αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες, συνιστάται να υπάρχει πάντα ένα περιθώριο ασφάλειας και να μην επιλέγεται εξοπλισμός που οριακά επιτυγχάνει την εν λόγω προδιαγραφή.

4.1.6.7 Διαχωρισμός καναλιών (crosstalk)

Είναι μέτρο της διαρροής σήματος μεταξύ δύο ανεξάρτητων καναλιών του ενισχυτή και μετριέται σε dB . Οφείλεται σε φυσικούς περιορισμούς και ατέλειες των κυκλωμάτων του ενισχυτή. Τιμές κάτω των 70 dB θεωρούνται απαραίτητες.

4.1.6.8 Λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio)

Είναι ο λόγος της τάσης στην έξοδο του ενισχυτή όταν η είσοδος είναι βραχυκυκλωμένη προς την τάση στην έξοδο του ενισχυτή όταν δεν υπάρχει σήμα στην είσοδο (δηλαδή ο ηλεκτρικός θόρυβος του ενισχυτή).

4.1.6.9 Παράγοντας απόσβεσης (damping factor)

Ο κώνος ενός μεγαφώνου, λόγω αδράνειας, έχει την τάση να συνεχίσει να ταλαντώνεται για ένα μικρό χρονικό διάστημα μετά τη διακοπή του σήματος εισόδου. Ο παράγοντας απόσβεσης ενός ενισχυτή είναι μια αριθμητική ένδειξη της ικανότητας του ενισχυτή να ελέγχει τις ταλαντώσεις του μεγαφώνου. Ορίζεται ως ο λόγος της εμπέδησης εξόδου του ενισχυτή προς την ονομαστική εμπέδηση του μεγαφώνου και δηλώνεται μαζί με την αντίσταση του φορτίου βάσει του οποίου υπολογίσθηκε. Παράγοντας απόσβεσης 200 στα 8Ω λ.χ. σημαίνει ότι η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή είναι $8/200 = 0.04\Omega$. Μεγάλες τιμές του συντελεστή απόσβεσης (περί τα 100-200) είναι επιθυμητές (λόγω του ελέγχου της τάσης αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται στο πηνίο του μεγαφώνου). Γενικά είναι χρήσιμο να παρέχει ο ενισχυτής μεγάλο παράγοντα απόσβεσης στις χαμηλές συχνότητες, καθότι η αυξημένη μάζα (άρα και αδράνεια) του κώνου των αντίστοιχων μονάδων απαιτεί καλύτερο έλεγχο.

4.1.6.10 Εμπέδηση (impedance)

Χωρίζεται σε εμπέδηση εισόδου και εμπέδηση εξόδου. Η εμπέδηση εισόδου του ενισχυτή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη απολαβή τάσης. Τιμές άνω των $10\text{ k}\Omega$ είναι συνηθισμένες. Η εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρότερη (ιδανικά μηδενική) ούτως ώστε ο ενισχυτής να λειτουργεί ως πηγή σταθερής τάσης. Τυπικές τιμές είναι της τάξης των 0.1Ω .

4.1.6.11 Δυνατότητα οδήγησης γραμμής υψηλής εμπέδησης (high impedance-100V- line capability)

Αφορά στην ικανότητα ενός ενισχυτή να οδηγήσει γραμμή υψηλής εμπέδησης, δηλαδή γραμμή στην οποία έχουν συνδεθεί μεγάφωνα με μετασχηματιστή προσαρμογής, ούτως ώστε η εμπέδηση εισόδου τους να είναι της τάξης των kV . Απαιτείται συνήθως η τοποθέτηση ενός μετασχηματιστή προσαρμογής στην έξοδο του ενισχυτή προκειμένου να αυξηθεί η τάση εξόδου του στην τιμή των $100V$, η οποία και έχει καθιερωθεί για τα αντίστοιχα συστήματα (στην Αμερική χρησιμοποιούνται τα $70V$). Η συνδεσμολογία αυτή προτιμάται όταν το μήκος της γραμμής είναι πολύ μεγάλο και σε σύνδεση χαμηλής εμπέδησης οι απώλειες λόγω καλωδίων (βλ. παρακάτω) θα ήταν απαγορευτικά υψηλές.

4.2 Καλώδια

4.2.1 Γενικά

Η αποστολή των καλωδίων είναι η μεταφορά, σε ηλεκτρική μορφή, ενός ηχητικού σήματος μεταξύ δυο ηλεκτροακουστικών μετατροπέων. Εξ' ορισμού λοιπόν η ποιότητα ενός καλωδίου καθορίζεται από την πιστότητα μεταφοράς του σήματος.

Αποτελούνται από έναν ή παραπάνω (αναλόγως με τον τύπο του καλωδίου) αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος (χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά¹⁶ όπως χαλκός, μπρούντζος, αλουμίνιο και σίδηρος), ενδεχομένως κάποια θωράκιση (αναλόγως με τον τύπο) και το εξωτερικό περίβλημα προστασίας (συνήθως κάποιο πλαστικό υλικό).

Σε γενικές γραμμές και αναφορικά στα καλώδια που αφορούν στο μηχανικό ήχου διακρίνονται οι παρακάτω βασικές κατηγορίες καλωδίων:

- Τροφοδοσίας (ρεύματος) – power cables: Χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των μονάδων του συστήματος.

Αποτελούνται από δύο αγωγούς χαλκού, διατομής ανάλογης με τις απαιτήσεις ισχύος της τροφοδοτούμενης συσκευής και εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα από κάποιο εύκαμπτο πλαστικό υλικό.

- Μικροφωνικά / γραμμής (σήματος) – mic / line level cables: Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του σήματος από τα μικρόφωνα προς τις μονάδες προενίσχυσης και επεξεργασίας (μικροφωνικά καλώδια) και για τη μεταφορά σήματος μεταξύ των διάφορων μονάδων επεξεργασίας, καταγραφής, αναπαραγωγής και ενίσχυσης (καλώδια για στάθμη γραμμής).
 - Μικροφωνικά: Αποτελούνται από ένα ζεύγος συνεστραμμένων αγωγών, που μεταδίδουν το σήμα και ένα τρίτο αγωγό γείωσης και ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης (STP – Shielded Twisted Pair). Επειδή η στάθμη του σήματος που παράγει το μικρόφωνο είναι πολύ χαμηλή, το καλώδιο πρέπει έχει πολύ υψηλή αγωγιμότητα και να παρέχει άριστη προστασία από τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία.
 - Γραμμής: Είναι ίδιου τύπου με τα μικροφωνικά καλώδια, αλλά μεταφέρουν σήματα μεγαλύτερης έντασης ρεύματος και κατ'

¹⁶ Το οποίο ενίοτε προκαλεί έκπληξη καθότι η τιμή ορισμένων εμπορικών τύπων θα δικαιολογούνταν μόνο αν ήταν κατασκευασμένα από χρυσό...

επέκταση δύνανται να μεταφέρουν το σήμα σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Λόγω της μεταφοράς σήματος υψηλότερης στάθμης για δεδομένη απόσταση δύναται να χρησιμοποιηθεί καλώδιο χαμηλότερων προδιαγραφών έναντι των μικροφωνικών (βλ. παρακάτω).

- **Μεγαφώνων - loudspeaker cables:** Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ενισχυμένου ηχητικού σήματος από τους ενισχυτές στα μεγάφωνα του συστήματος.

Αποτελούνται από δύο αγωγούς χαλκού, υψηλής καθαρότητας και διατομής ανάλογα με την απαίτηση ισχύος και την απόσταση μεταξύ ηχείων και ενισχυτή με εξωτερικό ελαστικό περίβλημα υψηλής μηχανικής αντοχής.

Στα καλώδια τροφοδοσίας και μεγαφώνων συνήθως χρησιμοποιούνται πολύκλωνοι αγωγοί (δηλαδή ο κάθε αγωγός αποτελείται από ένα σύνολο μικρότερης διατομής αγωγών πλεγμένων μεταξύ τους) ούτως ώστε να μειώνεται η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου και να αυξάνεται η αγωγιμότητα αλλά και η μηχανική αντοχή του καλωδίου.

Σημείωση: Στα παραπάνω, εσκεμμένα, δεν έγινε αναφορά σε καλώδια μεταφοράς ψηφιακού σήματος. Τα καλώδια αυτού του τύπου δεν είναι με αυστηρούς όρους καλώδια μεταφοράς ηχητικού σήματος¹⁷ και ο τρόπος μετάδοσης του σήματος στηρίζεται σε τελείως διαφορετικές αρχές.

Τα κύρια χαρακτηριστικά βάσει των οποίων αξιολογούνται τα καλώδια είναι τα ακόλουθα:

- **Αντίσταση**

Είναι η συνολική αντίσταση σε Ω των δυο αγωγών του καλωδίου (μετράται δηλαδή βραχυκυκλώνοντας τους αγωγούς στο ένα άκρο) και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι αγωγοί, τη διατομή του, τον αριθμό των κλώνων του κάθε αγωγού και το συνολικό μήκος του καλωδίου. Η ύπαρξη Ωμικής αντίστασης έχει ως συνέπεια την πτώση τάσης στα άκρα των αγωγών και της κατανάλωσης μέρους της ισχύος του σήματος στο καλώδιο.

Οι κατασκευαστές καλωδίων συνήθως παρέχουν την τιμή της αντίστασης ανά τρέχον μέτρο καλωδίου (Ω/m) και με αναγωγή προκύπτει η συνολική αντίσταση για το μήκος εφαρμογής.

- **Χωρητικότητα**

Είναι η κατανεμημένη ηλεκτρική χωρητικότητα (ανά μέτρο μήκους καλωδίου) μεταξύ των δυο αγωγών του καλωδίου. Εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι αγωγοί, από τη διατομή τους, από την απόσταση μεταξύ τους και από την ύπαρξη ή όχι ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Συνέπεια της ύπαρξης χωρητικότητας είναι ότι, ειδικότερα στις υψηλές συχνότητες, η αγωγοί παύουν να είναι μεταξύ τους μονωμένοι και ένα μικρής έντασης ρεύμα («μετατόπισης» σύμφωνα με τη συναφή ορολογία) άγεται μεταξύ τους.

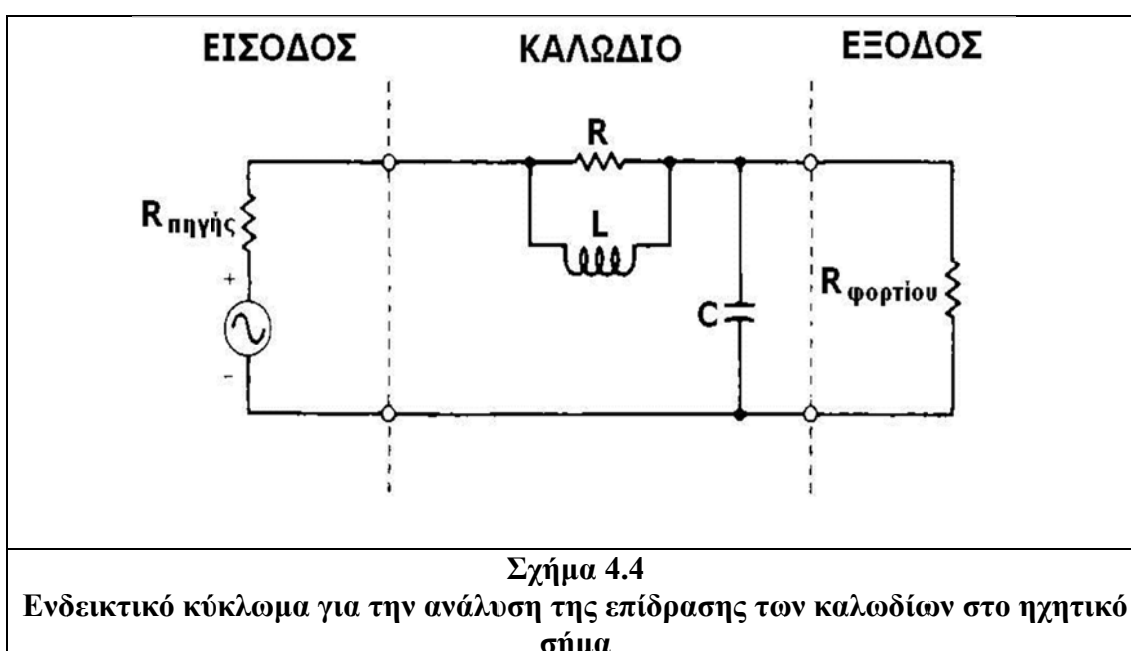
¹⁷ Από τη στιγμή που το ηχητικό σήμα ψηφιοποιηθεί και κωδικοποιηθεί, η μετάδοσή του ανεξαρτητοποιείται από τη φύση του σήματος και πραγματοποιείται με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Με τεχνικές, λ.χ. πολυπλεξίας, υπάρχει δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης πολλών καναλιών ήχου μέσα από ένα μόνο ζεύγος καλωδίων.

Οι κατασκευαστές καλωδίων συνήθως παρέχουν την τιμή της χωρητικότητας ανά τρέχον μέτρο καλωδίου (pF/m) και με αναγωγή προκύπτει η συνολική χωρητικότητα.

- Συντελεστής επαγωγής

Είναι ο συνολικός συντελεστής επαγωγής μεταξύ των δύο αγωγών του καλωδίου. Οφείλεται στη μαγνητική ροή από την επιφάνεια που ορίζεται από τους δύο αγωγούς και έχει ως συνέπεια αφενός την εμφάνιση τάσης αυτεπαγωγής μεταξύ των αγωγών (η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αμελητέα) και αφετέρου τη δημιουργία επαγωγικής τάσης όταν το καλώδιο βρεθεί σε εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (λ.χ. από τη διέλευση ενός καλωδίου τροφοδοσίας), η οποία γίνεται αντιληπτή ως ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος (EMF noise).

Στο σχήμα 4.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται βοηθητικό κύκλωμα για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των καλωδίων στο ηχητικό σήμα.



4.2.2 Καλώδια τροφοδοσίας

Ο μηχανικός ήχου δεν εμπλέκεται στην επιλογή των χαρακτηριστικών των καλωδίων τροφοδοσίας του εξοπλισμού. Από τεχνικής σκοπιάς, τα καλώδια θα πρέπει να έχουν ικανή διατομή για την παροχή της ισχύος τροφοδοσίας του εξοπλισμού (και των ρευμάτων διαφυγής σε περίπτωση βλάβης) χωρίς να παρουσιάζουν φαινόμενα θέρμανσης. Η διαστασιολόγηση των αγωγών, παρότι δύναται να πραγματοποιηθεί με γνώσεις βασικής ηλεκτροτεχνίας, δεν πρέπει *σε καμία περίπτωση* να πραγματοποιείται από μηχανικό ήχου καθότι απαιτεί γνώση του ελληνικού κανονισμού ηλεκτρικών εγκαταστάσεων (και πλήθος άλλων διατάξεων ασφάλειας), αφορά θέματα ασφαλείας και υφίστανται αυστηρότατες νομικές κυρώσεις για τυχούσα παραβίασή του. Σε εφαρμογές μόνιμων εγκαταστάσεων (λ.χ. θέατρα, αίθουσες συναυλιών, χώροι ηχογράφησης) ο ρόλος του μηχανικού ήχου περιορίζεται αυστηρά στην ενημέρωση του ηλεκτρολόγου μηχανικού (ο οποίος βάσει νομοθεσίας είναι ο υπεύθυνος για θέματα ισχύος) σχετικά με την ισχύ (συνηθέστερα υπό τη μορφή του ρεύματος $-A-$ λειτουργίας) και το κλάσμα ταυτοχρονισμού του εξοπλισμού.

4.2.3 Μικροφωνικά καλώδια – καλώδια γραμμής

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι κατ' αντιστοιχία προς τις δυο βασικές συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται:

- Μη ισοσταθμισμένη (unbalanced) συνδεσμολογία:

Στη συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιούνται δυο αγωγοί. Ο ένας αγωγός μεταφέρει το σήμα και ο δεύτερος αγωγός τη γείωση ούτως ώστε να κλείσει το κύκλωμα. Ο δεύτερο αγωγός πολλές φορές περικλείει τον πρώτο (ομοαξονικό καλώδιο) ούτως ώστε να παρέχεται και μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης του κυκλώματος.

Επίδραση της αντίστασης: Λόγω της υψηλής τιμής της αντίστασης εισόδου των συσκευών που διασυνδέονται (μικρόφωνα και προενισχυτές), τις περισσότερες φορές η ωμική αντίσταση του καλωδίου δεν αποτελεί πρόβλημα. Θεωρώντας το διαιρέτη τάσης μεταξύ της αντίστασης του καλωδίου (της τάξης των $10^{-2} \Omega/m$) και της αντίστασης εισόδου ενός προενισχυτή (της τάξης των $k\Omega$) παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος λόγω του καλωδίου είναι αμελητέα.

Επίδραση της χωρητικότητας: Όπως προαναφέρθηκε, η ύπαρξη κατανεμημένης χωρητικότητας ισοδυναμεί με την ανάπτυξη αγωγιμότητας (συχνοτικά μεταβαλλόμενης) μεταξύ των αγωγών. Όπως γνωρίζουμε το μέτρο της εμπέδησης ενός πυκνωτή ισούται προς $|Z|=1/(2\pi fC)$, όπου C η χωρητικότητα και f η συχνότητα. Στις χαμηλές συχνότητες η τιμή της εμπέδησης είναι μεγάλη και μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Κατά συνέπεια στις υψηλές συχνότητες ένα μέρος του σήματος χάνεται καθώς το διάκενο μεταξύ των αγωγών άγει (δηλαδή η ύπαρξη του καλωδίου προσομοιάζει τη λειτουργία ενός χαμηλοπερατού φίλτρου).

Από το σχήμα 4.4 παραπάνω παρατηρούμε ότι ο πυκνωτής είναι συνδεδεμένος παράλληλα με το φορτίο και κατά συνέπεια η τάση στα άκρα τους είναι κοινή. Προκειμένου να διερευνήσουμε ποσοτικά την επίδραση της χωρητικότητας θεωρούμε το διαιρέτη τάσης μεταξύ της αντίστασης της πηγής (η αντίσταση του καλωδίου είναι συνήθως αμελητέα συγκρινόμενη με αυτή της πηγής σήματος) και του πυκνωτή. Απαιτώντας η τάση στα άκρα του πυκνωτή να είναι τουλάχιστον 50% αυτή της πηγής (δηλαδή πτώση κατά 3 dB) στη συχνότητα των 40 kHz (ώστε να εξασφαλίσουμε ότι οι απώλειες εντός του ακουστού φάσματος θα είναι αμελητέες) υπολογίζουμε τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή για τη συνολική χωρητικότητα του καλωδίου:

$$C_{\max} = \frac{1}{2\pi f R} \quad (4.1)$$

Όπου R η αντίσταση εξόδου της πηγής.

Διαιρώντας την παραπάνω τιμή με την τιμή της κατανεμημένης χωρητικότητας του καλωδίου (δηλαδή της χωρητικότητας ανά μέτρο καλωδίου), την οποία δίδουν οι κατασκευαστές των καλωδίων, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα καλώδιο. Τυπική τιμή κατανεμημένης χωρητικότητας για μικροφωνικό καλώδιο είναι τα $200 pF/m$.

Επίδραση της επαγωγής: Η ύπαρξη της επαγωγής του καλωδίου αυξάνει την εμπέδηση του καλωδίου. Όπως γνωρίζουμε, το μέτρο της εμπέδησης ενός πηνίου ισούται προς $|Z|=2\pi fL$, όπου L η αυτεπαγωγή και f η συχνότητα. Στην πράξη

όμως οι τιμές της επαγωγής που αναπτύσσονται είναι πάρα πολύ μικρές για να αποτελέσουν πρόβλημα λόγω αύξησης της εμπέδησης του καλωδίου.

Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος: Η ύπαρξη όμως επαγωγής είναι, όπως προαναφέρθηκε, η αιτία της εμφάνισης ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στο καλώδιο και ο καθοριστικός λόγος που περιορίζει τη δυνατότητα χρήσης των μη ισοσταθμισμένων συνδέσεων. Η ύπαρξη αγωγού θωράκισης δύναται να περιορίσει το εν λόγω φαινόμενο (λόγω της δημιουργίας ενός κλωβού Faraday γύρω από τον κεντρικό αγωγό), αλλά όχι να το περιορίσει εντελώς, ενώ συγχρόνως προκαλεί σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του καλωδίου.

Πεδίο εφαρμογής: Μη ισοσταθμισμένες συνδέσεις χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε οικιακό εξοπλισμό και πολύ σπανιότερα σε επαγγελματικό εξοπλισμό. Είναι ο πλέον οικονομικός τρόπος διασύνδεσης εξοπλισμού, αλλά δεν προσφέρεται για αποστάσεις μεγαλύτερες των μερικών μέτρων ή για περιβάλλοντα με υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία καθότι δεν παρέχει ικανοποιητική προστασία από το θόρυβο.

- Ισοσταθμισμένη (balanced) συνδεσμολογία:

Στη συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιούνται δύο αγωγοί για τη μεταφορά του σήματος και ένας αγωγός θωράκισης, ο οποίος γειώνεται. Στα δυο άκρα της γραμμής (είσοδο-έξοδο των αντίστοιχων μονάδων) τοποθετείται από ένας μετασχηματιστής (1:1) με τους δύο αγωγούς να συνδέονται στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή και τη γείωση στο κέντρο.

Επίδραση της αντίστασης: Ισχύει ότι και για τις απλές γραμμές (βλ ανωτέρω).

Επίδραση της χωρητικότητας: Ισχύει ότι και για τις απλές γραμμές (βλ ανωτέρω).

Επίδραση της επαγωγής: Ισχύει ότι και για τις απλές γραμμές (βλ ανωτέρω).

Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος: Λόγω της διαφορικής σύνδεσης του καλωδίου στο πηνίο του μετασχηματιστή το σήμα διαιρείται στα δύο και μεταφέρεται από τους δύο αγωγούς με ανεστραμμένη φάση και αφαιρείται στο μετασχηματιστή τερματισμού. Αφαιρώντας το σήμα των δύο καλωδίων αφαιρούνται οι επαγωγικές τάσεις που τυχόν αναπτύχθηκαν κατά μήκος του καλωδίου (οι οποίες θα είναι περίπου ταυτόσημες) και προσθέτονται τα (αντίστροφης φάσης) σήματα των δυο αγωγών βελτιώνοντας έτσι κατά πολύ το λόγο σήματος προς θόρυβο. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται, μετρούμενη σε dB , χαρακτηρίζει ποιοτικά τη γραμμή και τους μετασχηματιστές και ονομάζεται λόγος απόρριψης κοινού (CMR common mode rejection). Τυπικές τιμές υπερβαίνουν τα $80 dB$.

Η χρήση συνεστραμμένων ζευγών επίσης έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση του επαγωγικού θορύβου. Καθότι οι επιφάνειες που σχηματίζουν δυο διαδοχικοί «βρόχοι» του συνεστραμμένου καλωδίου έχουν αντίθετο προσανατολισμό, οι επαγόμενες τάσεις έχουν αντίθετα πρόσημα και αλληλοεξουδετερώνονται.

Πεδίο εφαρμογής: Ισοσταθμισμένες γραμμές χρησιμοποιούνται σε όλα σχεδόν τα επαγγελματικά συστήματα και σε όλες τις εφαρμογές που απαιτείται μεταφορά σήματος σε μεγάλες αποστάσεις (μετάδοση μικροφωνικού σήματος σε αποστάσεις της τάξης των $200 m$ είναι λ.χ. εφικτή). Για ακόμη καλύτερη απόδοση δύναται να χρησιμοποιηθούν και καλώδια τεσσάρων αγωγών (πλέον του αγωγού θωράκισης) – γνωστά ως star quad cables.

4.2.4 Καλώδια μεγαφώνων

Τα καλώδια μεγαφώνων αποτελούνται από δυο πολύκλωνους αγωγούς, κατάλληλα διαστασιολογημένους και το περίβλημα προστασίας τους που συνήθως κατασκευάζεται από κάποιο πλαστικό υλικό¹⁸ αυξημένης μηχανικής αντοχής και ελαστικότητας.

Κατ' αντιστοιχία προς τους δυο βασικούς τύπους συνδεσμολογίας μεγαφώνων (σε χαμηλή ή υψηλή εμπέδηση) επιλέγονται και τα αντίστοιχα καλώδια.

- **Συνδεσμολογία χαμηλής εμπέδησης:** Στην περίπτωση αυτή τα μεγάφωνα συνδέονται απευθείας στην έξοδο του ενισχυτή. Η αντίσταση δηλαδή του φορτίου (μεγαφώνου ή μεγαφώνων αναλόγως με την εφαρμογή) είναι μικρή, τυπικά από 4Ω ως 16Ω.

Επίδραση της αντίστασης: Η ωμική αντίσταση του καλωδίου, ειδικά όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ ενισχυτή και ηχείων, δύναται να είναι συγκρίσιμη με την αντίσταση του φορτίου. Κατά συνέπεια, ένα μέρος της ισχύος του ενισχυτή καταναλώνεται στο καλώδιο. Θεωρώντας το διαιρέτη τάσης μεταξύ της αντίστασης του καλωδίου και του μεγαφώνου μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή των απωλειών στο καλώδιο χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$P = V \cdot I = V^2 / R \Rightarrow \frac{dP}{P} = \left(\frac{R_L}{R_L + R_W} \right)^2 \quad (4.2)$$

Όπου R_L και R_W αντίσταση φορτίου και η ωμική αντίσταση του καλωδίου αντίστοιχα.

Καθορίζοντας την ανώτατη επιτρεπτή τιμή για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει (λ.χ. 0.05 dB) και γνωρίζοντας το μήκος του καλωδίου που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, μπορούμε να προσδιορίσουμε την απαιτούμενη διατομή καλωδίου με βάση τις τιμές της αντίστασης ανά μέτρο και της διατομής του καλωδίου που δίδουν οι κατασκευαστές. Τυπική τιμή της αντίστασης μεγαφωνικού καλωδίου είναι τα $10^{-2} \Omega / m$. Πρακτικά η αντίσταση του καλωδίου καθορίζει το άνω όριο στην απόσταση μεταξύ ενισχυτή και μεγαφώνου καθότι για πολύ μεγάλες αποστάσεις απαιτούνται καλώδια πολύ μεγάλης διατομής τα οποία, πέρα από το πολύ μεγάλο κόστος κτήσης τους, έχουν τα μειονεκτήματα της πολύ περιορισμένης ελαστικότητας και της αδυναμίας προσαρμογής τους στους ακροδέκτες του μεγαφώνου.

Επίδραση της χωρητικότητας: Η επίδραση της χωρητικότητας είναι αμελητέα στα μεγαφωνικά καλώδια καθότι, επειδή δεν υπάρχει θωράκιση, η χωρητικότητα είναι πολύ μικρή και τα προβλήματα λόγω ωμικής αντίστασης πολύ εντονότερα.

Επίδραση της επαγωγής: Η επίδραση της επαγωγής του καλωδίου επίσης είναι αμελητέα στα μεγαφωνικά καλώδια λόγω της ιδιαίτερα μικρής τιμής της (τουλάχιστον για το μεγαλύτερο μέρος των πρακτικών εφαρμογών).

Πεδίο εφαρμογής: Η συνδεσμολογία χαμηλής εμπέδησης επιλέγεται όταν η απόσταση μεταξύ του ενισχυτή και των ηχείων είναι περιορισμένη (<50 m) και ο αριθμός των ηχείων που συνδέονται σε κάθε ενισχυτή μικρός (συνήθως ≤ 4).

- **Συνδεσμολογία υψηλής εμπέδησης:** Στη συνδεσμολογία αυτή, στην είσοδο του μεγαφώνου τοποθετείται ένας μετασχηματιστής ούτως ώστε να αυξηθεί η

¹⁸ Μονωτή του ηλεκτρισμού.

αντίσταση του μεγαφώνου (τυπικά περί τα $1\text{ k}\Omega$). Αντίστοιχα, τοποθετείται ένας μετασχηματιστής στην έξοδο του ενισχυτή ούτως ώστε να αυξηθεί η τάση εξόδου του ενισχυτή στα 100 V (70 V για τις ΗΠΑ). Δεδομένου ότι η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή είναι πολύ μικρή, η παρουσία του μετασχηματιστή δεν αποτελεί πρόβλημα (καθότι η αντίσταση εξόδου ακόμη και μετά το μετασχηματιστή παραμένει μικρή, τυπικά $<1\ \Omega$).

Επίδραση της αντίστασης: Λόγω της υψηλής πλέον εμπέδησης των μεγαφώνων οι απώλειες ισχύος στο καλώδιο είναι πολύ μικρές (όπως προκύπτει από το διαίρητη τάσης που σχηματίζεται μεταξύ της αντίστασης του καλωδίου και του μεγαφώνου). Κατ'αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να συνδεθούν μεγάφωνα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις ($>200\text{ m}$). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να συνδεθεί μεγάλος αριθμός ηχείων στον ίδιο ενισχυτή (παράλληλα) χωρίς να μειωθεί υπερβολικά η αντίσταση του κυκλώματος (βλ. παρακάτω).

Επίδραση της χωρητικότητας: Η επίδραση της χωρητικότητας είναι σε γενικές γραμμές περιορισμένη και στις γραμμές υψηλής εμπέδησης, λόγω της μικρής χωρητικότητας των καλωδίων. Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις πάντως είναι θεωρητικά δυνατό να υπάρξει πρόβλημα και καλό είναι να πραγματοποιείται ένας υπολογισμός ελέγχου.

Επίδραση της επαγωγής: Η επίδραση της επαγωγής του καλωδίου επίσης είναι αμελητέα.

Περιορισμοί: Ο πιο καθοριστικός και βασικός περιοριστικός παράγοντας της λειτουργίας μεγαφώνων σε υψηλή εμπέδηση είναι η ποιότητα του χρησιμοποιούμενου μετασχηματιστή. Η κατασκευή μετασχηματιστών που να μπορούν να αναπαράγουν χωρίς παραμόρφωση όλο το ακουστό εύρος είναι δύσκολη, ενώ η απαίτηση για λειτουργία σε υψηλή ισχύ απαιτεί μεγάλο μέγεθος και ειδικές διατάξεις ψύξης ανεβάζοντας σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα των σχετικών υλοποιήσεων.

Πεδίο εφαρμογής: Η συνδεσμολογία υψηλής εμπέδησης επιλέγεται όταν η απόσταση μεταξύ του ενισχυτή και των ηχείων είναι μεγάλη ($>50\text{ m}$) ή /και ο αριθμός των ηχείων που συνδέονται σε κάθε ενισχυτή μεγάλος (συνήθως ≥ 4 , πολλές φορές >10). Ως επί το πλείστον χρησιμοποιείται σε συστήματα ανακοινώσεων και μουσικής υπόβαθρου.

4.2.5 Συνδεσμολογίες μεγαφώνων

Στις περιπτώσεις που χρειάζεται να συνδεθούν δυο ή περισσότερα μεγάφωνα σε έναν ενισχυτή, η εμπέδηση που αντιμετωπίζει ο ενισχυτής εξαρτάται από τον τρόπο συνδεσμολογίας. Λανθασμένη συνδεσμολογία δύναται να καταστρέψει τον ενισχυτή ή να μειώσει δραστικά την απόδοση του συνολικού συστήματος.

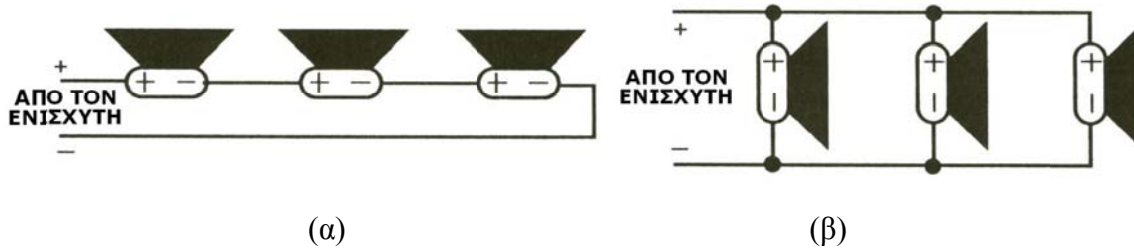
Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι συνδεσμολογίας:

- **Σύνδεση σε σειρά:** Στη σύνδεση σε σειρά (βλ. σχήμα 4.5 παρακάτω) το ρεύμα που διαρρέει όλα τα μεγάφωνα είναι κοινό και η συνολική εμπέδηση που «βλέπει» ο ενισχυτής ισούται προς το αλγεβρικό άθροισμα της εμπέδησης των επιμέρους μεγαφώνων.

$$Z_{Tot} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_N \quad (4.5)$$

- **Παράλληλη σύνδεση:** Στην παράλληλη σύνδεση η τάση στα άκρα των μεγαφώνων είναι κοινή και η συνολική αγωγιμότητα του κυκλώματος που «βλέπει» ο ενισχυτής είναι ίση προς το άθροισμα της αγωγιμότητας των επιμέρους μεγαφώνων. Δηλαδή, με όρους εμπέδησης:

$$\frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_N} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.5
Συνδεσμολογίες μεγαφώνων
(α) Σε σειρά και (β) Παράλληλα

Παρατηρήσεις:

- **Σύνδεση σε σειρά:**
 - Κατά τη σύνδεση πολλών μεγαφώνων σε σειρά αυξάνεται σημαντικά η συνολική εμπέδηση που αντιμετωπίζει ο ενισχυτής και κατά συνέπεια μειώνεται η παρεχόμενη ισχύς.
 - Σε περίπτωση καταστροφής ενός μεγαφώνου δημιουργείται ανοικτό κύκλωμα και παύει η λειτουργία ολόκληρης της γραμμής.
 - Επειδή η εμπέδηση των μεγαφώνων είναι μιγαδικό μέγεθος που μεταβάλλεται με τη συχνότητα και το οποίο εμφανίζει μεγάλη διακύμανση ακόμη και σε μεγάφωνα του ίδιου τύπου, εμφανίζεται αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους μεγαφώνων της γραμμής.
- **Παράλληλη σύνδεση:**
 - Κατά την παράλληλη σύνδεση πολλών μεγαφώνων μειώνεται σημαντικά η συνολική εμπέδηση που αντιμετωπίζει ο ενισχυτής. Σε συνδεσμολογία χαμηλής εμπέδησης αυτό δύναται να μειώσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος, ειδικά στις συχνότητες που η εμπέδηση των μεγαφώνων έχει έντονα επαγωγικό χαρακτήρα. Σε συνδεσμολογία υψηλής εμπέδησης δεν υφίσταται πρόβλημα.
 - Σε περίπτωση καταστροφής ενός μεγαφώνου τα υπόλοιπα μεγάφωνα συνεχίζουν να λειτουργούν.
 - Η παράλληλη σύνδεση, ως πιο αξιόπιστη, χρησιμοποιείται στο σύνολο σχεδόν των επαγγελματικών εφαρμογών.

- **Μικτή σύνδεση:** Ο συνδυασμός μεγαφώνων παράλληλα και σε σειρά αναφέρεται ενίοτε στη βιβλιογραφία (κυρίως σε παλαιά άρθρα). Η σχετική αρθρολογία συνήθως στηρίζεται σε υπολογισμούς με βάση την ονομαστική αντίσταση των μεγαφώνων παραβλέποντας το γεγονός ότι η εμπέδηση των μεγαφώνων είναι στην πραγματικότητα μιγαδικό μέγεθος που μεταβάλλεται με τη συχνότητα. Η εν λόγω συνδεσμολογία **θα πρέπει να αποφεύγεται** εκτός από περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (λ.χ. κατόπιν βλάβης ενός ενισχυτή σε μια ζωντανή εκδήλωση).

4.2.6 Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι στοιχεία κυκλωμάτων που μετασχηματίζουν τις βασικές ηλεκτρικές ποσότητες (αντίσταση, τάση) που εφαρμόζονται στην είσοδό τους, πολλαπλασιάζοντας ή διαιρώντας τες με κάποιο σταθερό αριθμό. Αποτελούνται από ένα μεταλλικό πυρήνα γύρω από τον οποίο περιελίσσονται δύο πηνία, καλούμενα «πρωτεύον» και «δευτερεύον» αντίστοιχα. Όταν το πρωτεύον πηνίο διαρρέεται από ρεύμα μεταβάλλεται η μαγνητική ροή στον πυρήνα και επάγεται στο δευτερεύον πηνίο μια τάση. Η τάση στο δευτερεύον πηνίο είναι ανάλογη της τάσης στο πρωτεύον με συντελεστή αναλογίας τον λόγο των σπειρών μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας (αν αγνοήσουμε τις απώλειες μαγνητικής ροής και ένα μικρό ρεύμα που διαρρέει τον πυρήνα) επιβάλλει ότι το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον του μετασχηματιστή θα είναι αντιστρόφως ανάλογο με το λόγο των σπειρών των δυο πηνίων. Η εμπέδηση (προκύπτει από το λόγο των δύο μεγεθών) θα είναι κατ' επέκταση ανάλογη του τετραγώνου του λόγου των σπειρών. Τα παραπάνω εκφράζονται συνοπτικά ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{V_1} &= \frac{n_2}{n_1}, \\ \frac{I_2}{I_1} &= \frac{n_1}{n_2}, \\ \frac{Z_2}{Z_1} &= \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Όπου, $V_1, I_1, Z_1, V_2, I_2, Z_2$ η τάση, το ρεύμα και η εμπέδηση στο πρωτεύον και το δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή αντίστοιχα και n_1, n_2 ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

5. ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται τα διάφορα είδη ηχητικών πεδίων. Στη συνέχεια εξετάζεται η διάδοση του ήχου στον αέρα και τα αποτελέσματα του ακουστικού περιβάλλοντος σε αυτόν.

5.2 Κατηγορίες Πεδίων

Ηχοδιάδοση: είναι η κυματική διαδικασία, με την οποία μεταφέρεται ηχητική ενέργεια από ένα μέρος ενός ελαστικού μέσου σε ένα άλλο.

Διεύθυνση ηχοδιάδοσης: είναι η διεύθυνση κατά την οποία ρέει η ηχητική ενέργεια που μεταφέρει το ηχητικό κύμα.

5.2.1 Ελεύθερο πεδίο (Free Field)

Ένα πεδίο ονομάζεται ελεύθερο (free field) αν είναι ομοιόμορφο, ελεύθερο από οριακές επιφάνειες και αδιατάραχτο από άλλες ηχητικές πηγές. Στην πραγματικότητα είναι ένα πεδίο όπου οι οριακές επιφάνειες επηρεάζουν πάρα πολύ λίγο την περιοχή του ενδιαφέροντος. Η ροή της ηχητικής ενέργειας γίνεται προς μια κατεύθυνση. Οι ανηχοϊκοί θάλαμοι και αρκετά ψηλά από το έδαφος εξωτερικά περιβάλλοντα είναι ελεύθερα πεδία. Η ηχητική στάθμη πίεσης του ελεύθερου πεδίου συμβολίζεται με L_D .

5.2.2 Αντηχητικό πεδίο (Reverberant Field)

Το αντηχητικό πεδίο (reverberant field) είναι αυτό που προέρχεται από τη συμβολή του απευθείας και ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. Το πεδίο αυτό έχει σχεδόν ομοιόμορφη πυκνότητα ακουστικής ενέργειας, δηλαδή είναι διάχυτο. Ως αντηχητικό πεδίο σε έναν ολικώς ή μερικώς κλειστό χώρο όπου λειτουργεί μια ηχητική πηγή είναι η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου που προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στις περατωτικές επιφάνειες του χώρου και στην οποία η επίδραση του ήχου που φτάνει κατευθείαν από την πηγή είναι αμελητέα [ΕΛΟΤ 556.1].

Σε ένα αντηχητικό πεδίο ο χρονικός μέσος όρος του μέσου τετραγώνου της πίεσης είναι παντού ο ίδιος. Η ροή της ενέργειας σε όλες τις διευθύνσεις έχει ίση πιθανότητα να λάβει χώρα. Αυτό συμβαίνει σε έναν κλειστό χώρο όπου δεν υπάρχει απορρόφηση. Η ηχητική στάθμη πίεσης του αντηχητικού πεδίου συμβολίζεται με L_R .

5.2.3 Ημι-αντηχητικό πεδίο (Semi-reverberant Field)

Το ημι-αντηχητικό πεδίο (semi-reverberant field) είναι το αντηχητικό πεδίο που επικρατεί σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με επιφάνειες, οι οποίες έχουν μέτρια ηχοανακλαστικότητα [ΕΛΟΤ 556.1].

Σε ένα ημιαντηχητικό πεδίο (semi-reverberant field) η ηχητική ενέργεια ανακλάται και απορροφάται. Η ροή της ενέργειας έχει περισσότερες από μία κατευθύνσεις. Η περισσότερη ενέργεια προέρχεται πραγματικά από αντηχητικό πεδίο. Ωστόσο, υπάρχουν συνιστώσες του πεδίου, οι οποίες έχουν ορισμένη κατεύθυνση διάδοσης από την πηγή του θορύβου.

Το ημιαντηχητικό πεδίο είναι αυτό που συναντάται στην πλειοψηφία των αρχιτεκτονικών ακουστικών περιβάλλοντων. Οι πρώτες ανακλάσεις (κατόπιν 50 msec από το L_D) συμβολίζονται σαν L_{RE} .

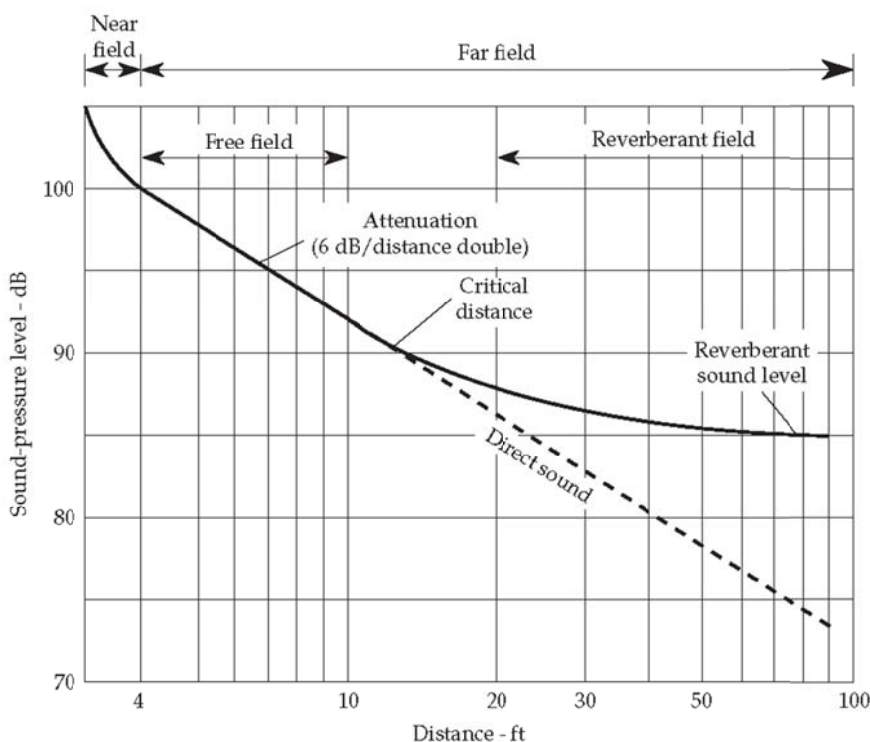
5.2.4 Κοντινό ηχητικό πεδίο (Near Field)

Το κοντινό ηχητικό πεδίο (near field) μιας πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση. Η έκταση του κοντινού πεδίου εξαρτάται από τον τύπο της πηγής και το μήκος κύματος.

5.2.5 Μακρινό ηχητικό πεδίο (Far Field)

Το μακρινό ηχητικό πεδίο (far field) μιας πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι σε φάση. Η έκταση του κοντινού ηχητικού πεδίου εξαρτάται από τον τύπο της πηγής και το μήκος κύματος.

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η μεταβολή της στάθμης ηχητικής πίεσης μέσα σε ένα θάλαμο αντήχησης και οι κατηγορίες των ηχητικών πεδίων εντός αυτού.



Σχήμα 5.1 Μεταβολή της στάθμης ηχητικής πίεσης εντός θαλάμου αντήχησης ως συνάρτηση της απόστασης από την ηχητική πηγή

5.3 Ελεύθερο Πεδίο - Νόμος του αντίστροφου τετραγώνου

Η μείωση της στάθμης ηχητικής πίεσης ενός ελεύθερου πεδίου περιγράφεται από το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Η μεταβολή της ηχητικής στάθμης πίεσης είναι μείωση 6dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης για την περίπτωση σφαιρικών κυμάτων από μια σημειακή πηγή ήχου:

$$L_{P(M)} = L_{P(r)} - 20 \log\left(\frac{D_M}{D_r}\right) \quad (5.1)$$

όπου:

$L_{P(M)}$: η στάθμη ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο M

$L_{P(r)}$: η στάθμη ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο αναφοράς r

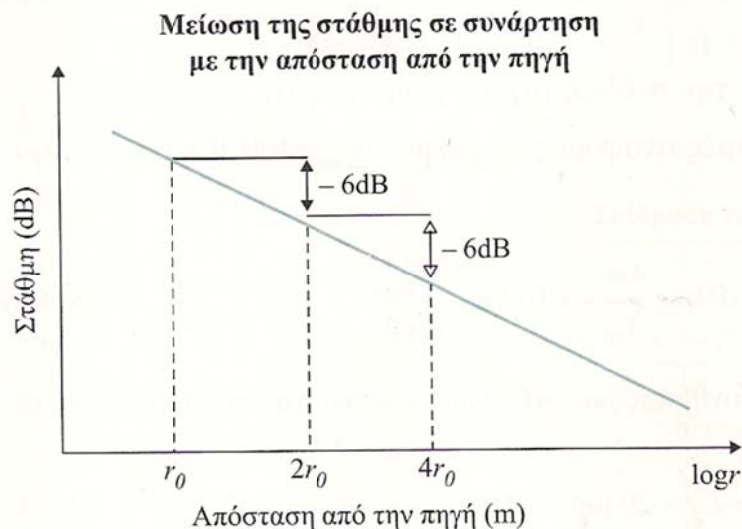
D_M : η απόσταση του σημείου M από την ηχητική πηγή

D_r : η απόσταση του σημείου αναφοράς r από την ηχητική πηγή

Σε περιπτώσεις που το σημείο αναφοράς r βρίσκεται σε απόσταση $D_r = 1m$ (σύνηθες στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηχείων) ο παραπάνω τύπος απλοποιείται:

$$L_{p(M)} = L_{p(1m)} - 20 \log(D_M) \quad (5.2)$$

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η μείωση της ηχητικής στάθμης πίεσης κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την ηχητική πηγή.



Σχήμα 5.2: Μείωση της στάθμης ηχητικής πίεσης για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την ηχητική πηγή

5.4 Συντελεστής ανάκλασης – διάδοσης – απορρόφησης

5.4.1 Συντελεστής ανάκλασης α_r

Συντελεστής ανάκλασης μιας επιφάνειας ή ενός υλικού, σε ορισμένες συχνότητες και συνθήκες, είναι ο λόγος της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα ηχητική ενέργεια (W_i)

$$\alpha_r = \frac{W_r}{W_i} \quad (5.3)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης είναι αδιάστατο μέγεθος. Μερικές φορές αντί για το λόγο των ισχύων λαμβάνεται ο λόγος των αντίστοιχων πιέσεων. Το οριζόμενο μέγεθος λέγεται συντελεστής ανάκλασης ηχητικής πίεσης.

5.4.2 Συντελεστής διάδοσης τ

Στην περίπτωση που μία επιφάνεια χωρίζει δύο μέσα διάδοσης, χρησιμοποιείται ο συντελεστής διάδοσης. Ως συντελεστής διάδοσης τ ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που διαδίδεται μέσω της επιφάνειας διαχωρισμού δύο μέσων W_t προς την προσπίπτουσα W_i .

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (5.4)$$

5.4.3 Συντελεστής απορρόφησης α

Συντελεστής απορρόφησης μιας επιφάνειας ή ενός υλικού, σε ορισμένες συχνότητες και σε ορισμένες συνθήκες, είναι ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που απορροφάται W_a από την επιφάνεια προς την ηχητική ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια W_i .

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (5.5)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης είναι αδιάστατο μέγεθος. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.

Για το συντελεστή απορρόφησης ισχύει:

$$\begin{cases} \alpha = 1 - \alpha_r \\ \alpha = \delta + \tau \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου:

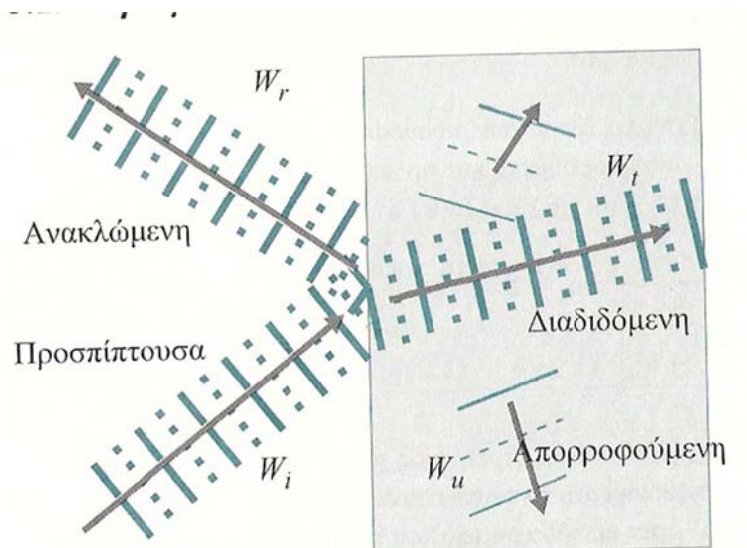
α_r ο συντελεστής ανάκλασης

δ ο συντελεστής απώλειας

τ ο συντελεστής μετάδοσης

Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 ή αλλιώς από 0 μέχρι 100%. Συντελεστής $\alpha = 0.8$ ενός υλικού σε μια συχνότητα (π.χ. 500Hz) σημαίνει ότι το υλικό απορροφά το 80% της ηχητικής ενέργειας που προσπίπτει και ανακλά το 20%.

Στο σχήμα 5.3 αναπαρίσταται σχηματικά η σχέση μεταξύ της απορρόφησης και της μετάδοσης του κύματος.



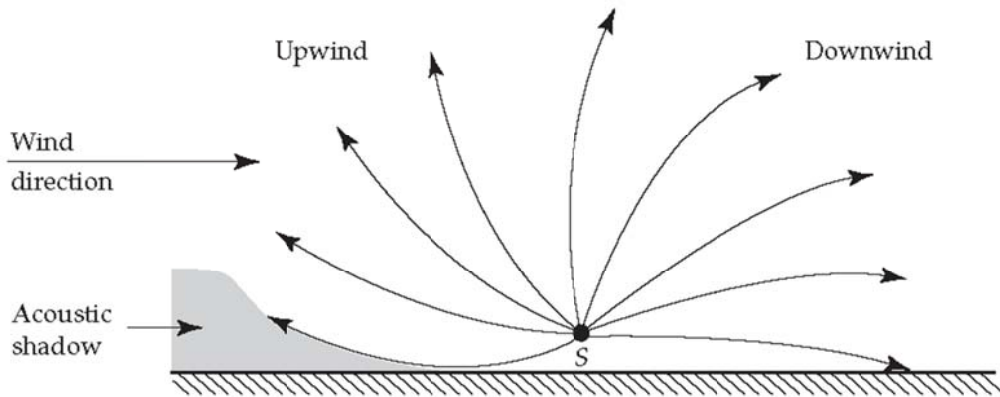
Σχήμα 5.3 Πρόσπτωση ηχητικής ενέργειας σε περατωτική επιφάνεια

5.5 Επίδραση του περιβάλλοντος στην ηχητική διάδοση στον αέρα

Για διάδοση του ήχου κοντά στο έδαφος, οι βαθμίδες της ταχύτητας του ήχου έχουν μεγάλη επιρροή στις ηχητικές στάθμες που λαμβάνονται σε κάποια απόσταση. Οι βαθμίδες της ταχύτητας του ήχου (velocity gradients) μπορεί να προκληθούν από τον άνεμο ή τη θερμοκρασία.

5.5.1 Επίδραση του ανέμου

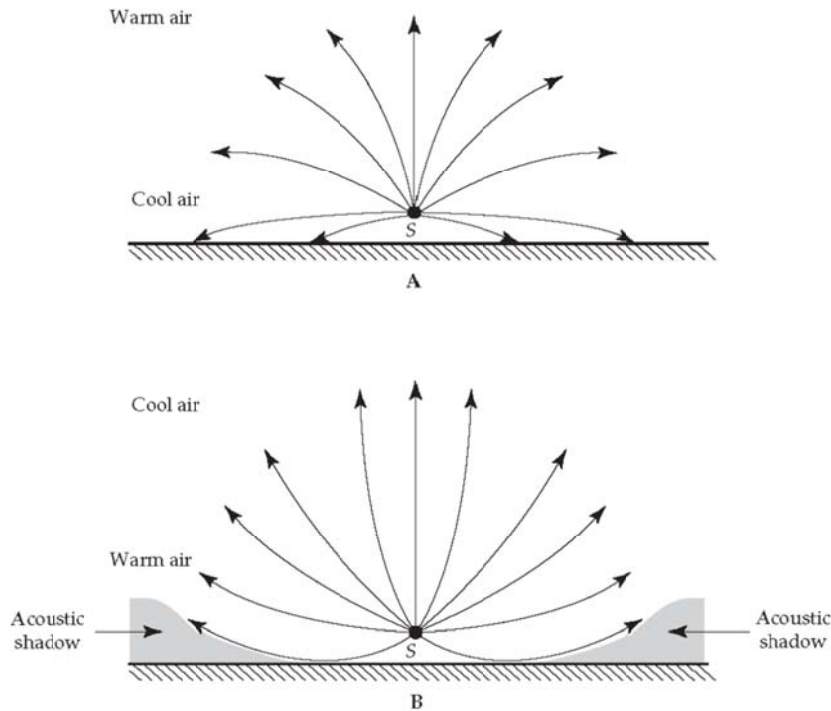
Η τριβή ανάμεσα στον κινούμενο αέρα και στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ήχου κοντά στο έδαφος. Αυτό προκαλεί μια παραμόρφωση στο μέτωπο του κύματος. Από την πηγή προς τα κάτω, οι ακτίνες του ήχου ανακλώνται πίσω εξ' αιτίας του εδάφους και η λαμβάνουσα στάθμη δεν επηρεάζεται. Από την πηγή προς τα πάνω, ο ήχος ανακλάται μακριά από το έδαφος προκαλώντας ηχητικές σκιές στις οποίες η ηχητική στάθμη μειώνεται (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 Επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου

5.5.2 Επίδραση της θερμοκρασίας

Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της απόλυτης θερμοκρασίας. Όταν τα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας θερμαίνονται από τον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, κατά την νύχτα αυτά που βρίσκονται κοντά στο έδαφος ψύχονται ευκολότερα με αποτέλεσμα να δημιουργείται θερμοκρασία αναστροφής. Συνεπώς, όταν η θερμοκρασία των ανώτερων στρωμάτων είναι μεγαλύτερη από αυτή των κατώτερων, οι ηχητικές ακτίνες κάμπτονται προς τα πάνω (νόμος Snell) με αποτέλεσμα να έχουμε μια ζώνη σκιάς κοντά στο έδαφος στην περιοχή κοντά στην πηγή, όπου ο ήχος σχεδόν μηδενίζεται. Η ζώνη ηχητικής σκιάς είναι συμμετρική γύρω από την πηγή και καμιά ηχητική ακτίνα δεν μπορεί να φθάσει σε αυτήν την περιοχή άμεσα. Στη ζώνη σκιάς η ηχητική στάθμη πέφτει κατά $10dB$ αναφορικά με αυτήν που θα υπήρχε χωρίς σκιά (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου

5.6 Ασκήσεις - Παραδείγματα

Σας ζητείται να παρέχετε ενίσχυση του ήχου για μια συναυλία σε εξωτερικό χώρο (ελεύθερο πεδίο). Το βάθος του ακροατηρίου είναι 30m. Επιθυμείτε να τοποθετήσετε ένα full range ηχείο με ευαισθησία στα 98dB (1m, 1 Watt είσοδο) στη μέση του χώρου ακρόασης. Το ηχείο οδηγείται από έναν ενισχυτή 100 Watt συνεχούς ισχύος. Ποιά θα είναι η μέγιστη ηχητική στάθμη πίεσης SPL στο τέλος του ακροατηρίου;

Λύση

- 1) Υπολογίζουμε το λόγο μεταξύ του 1 και των 100 Watt χρησιμοποιώντας την εξίσωση των decibel για την ισχύ: $10 \log\left(\frac{100}{1}\right) = 20dB$
- 2) Προσθέτουμε αυτό το νούμερο στην ευαισθησία του ηχείου 98dB (τα οποία είναι SPL για 1Watt) για να υπολογίσουμε τα SPL στα 100 Watt (σε απόσταση 1 m): $98+20=118 dB$ (1m, 1 Watt είσοδο)
- 3) Υπολογίζουμε με το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου τη μείωση του πεδίου στα 30 m από την πηγή:

$$L_{P(M)} = 118 - 20 \log(30) = 118 - 30 = 88dB (30m, 1 Watt)$$

6. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

6.1 Εισαγωγή

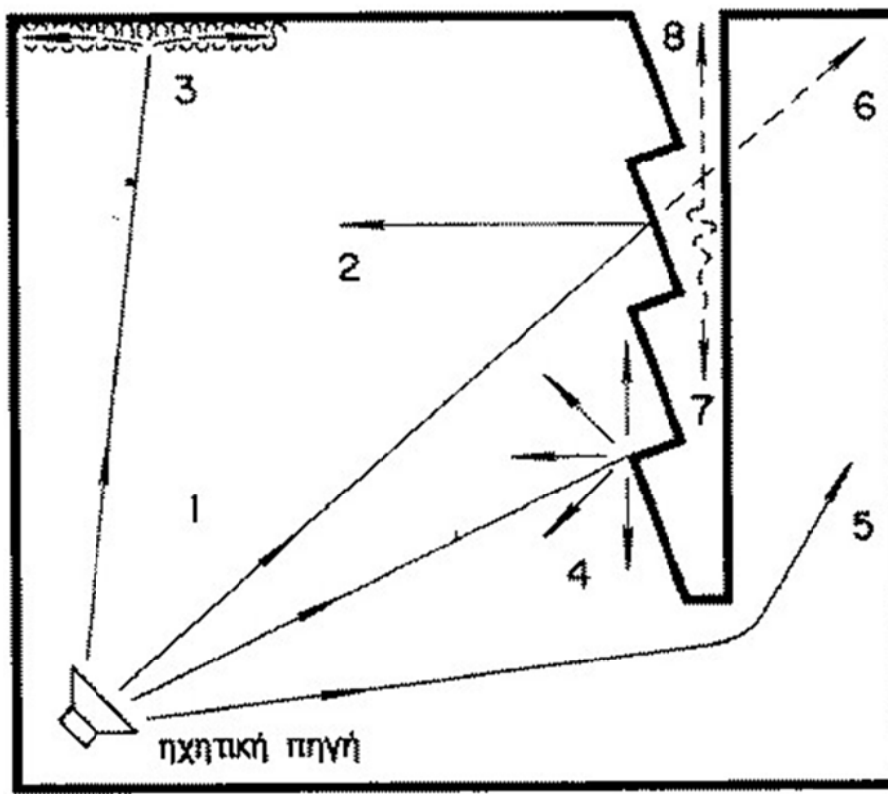
Όταν ακούμε μια συναυλία στην ύπαιθρο (ανοιχτός εξωτερικός χώρος) το ηχητικό πεδίο που δημιουργούν οι ηχητικές πηγές (τα μουσικά όργανα ή τα ηχεία του συστήματος του ενισχυτή) αποτελείται από τον απευθείας ήχο (direct sound). Ενδεχομένως να υπάρχουν μερικές ανακλάσεις από κάποιες επιφάνειες, αλλά ας θεωρήσουμε τον εξωτερικό χώρο τελείως ανοιχτό και ότι δεν υπάρχουν καθόλου ανακλάσεις. Η ενέργεια του ηχητικού πεδίου καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή μειώνεται κατά $3dB$ ανά διπλασιασμό απόστασης ($6dB$ η στάθμη ηχητικής πίεσης).

Όλοι όμως έχουμε την εμπειρία, για το πώς ακούγεται η μουσική μέσα σε κλειστούς χώρους. Η ακρόαση της μουσικής ή οι συνομιλίες γίνονται κατά κόρον μέσα σε κλειστούς χώρους (γραφείο, σπίτι, κινηματογράφος, θέατρο, αίθουσες μουσικής κλπ.). Κατά ένα μεγάλο ποσοστό οι χώροι αυτοί είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (παράλληλοι τοίχοι), ενώ ένα μικρό ποσοστό έχει διαφορετικό αρχιτεκτονικό σχήμα. Οι κλειστοί χώροι μπορούν να διαχωριστούν σε μεγάλους και μικρούς. Αυτός είναι ένας πολύ βασικός διαχωρισμός που έχει ως συνέπεια τη διαφορετική αντιμετώπισή τους σε κάποια ακουστική μελέτη. Άλλη παρατήρηση από την εμπειρία μας είναι ότι οι χώροι με πολλά έπιπλα, χαλιά και κουρτίνες έχουν «ξερό» ήχο (dry), χωρίς όγκο και ηχώ, με ίσως όχι πολύ ευχάριστο αποτέλεσμα για τη μουσική, ενώ μπορούμε όμως να ακούσουμε καθαρά το συνομιλητή μας. Ο χώρος αυτός λέμε ότι έχει μεγάλη απορρόφηση (μικρή αντήχηση) ή είναι ακουστικά «νεκρός» (dead). Αντιθέτως χώροι χωρίς έπιπλα, κάδρα, χαλιά, σχεδόν άδειοι είναι ακουστικά «ζωντανοί» και έχουν μεγάλη αντήχηση. Ακούμε δηλαδή τη μουσική ή την ομιλία παράλληλα με κάποια ηχώ.

Έστω ότι έχουμε μια ηχητική πηγή σε έναν κλειστό χώρο. Ο ήχος που ακούμε αποτελείται από τον απευθείας ήχο (direct) που έρχεται στα αυτιά μας κατευθείαν από την πηγή καθώς και την αντήχηση (reverberation). Η αντήχηση είναι εκείνος ο ήχος που φτάνει στα αυτιά μας με κάποια χρονική καθυστέρηση έχοντας ταξιδέψει από την πηγή στους τοίχους όπου ανακλάται και μετά φτάνει στα αυτιά μας. Με άλλα λόγια, στα δωμάτια δεν υπάρχει μόνο ο ήχος που παράγεται από τις ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους. Σε μερικές περιπτώσεις (μεγάλες αίθουσες που παίζεται ζωντανά μουσική) η αντήχηση μπορεί να είναι επιθυμητή καθώς και ελεγχόμενη. Σε άλλες περιπτώσεις όμως η αντήχηση δεν είναι ελεγχόμενη και δημιουργεί προβλήματα στους ακροατές. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές αρχές της ακουστικής των κλειστών χώρων.

6.2 Ακουστικά φαινόμενα μέσα σε κλειστούς χώρους

Η διάδοση και η συμπεριφορά του ήχου μέσα σε κλειστούς χώρους διαφέρει κατά πολύ από την ελεύθερη διάδοσή του και είναι περισσότερο πολύπλοκη. Στο σχήμα 6.1 φαίνονται διάφορα ηχητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εντός κλειστών χώρων:



Σχήμα 6.1 Ηχητικά φαινόμενα εντός κλειστού χώρου

1. *Απευθείας ήχος*: ο ήχος που παράγεται από την πηγή και φθάνει απευθείας στο δέκτη.
2. *Ανάκλαση*: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων επιστρέφει από αυτή σε γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Το μήκος κύματος λ του ήχου που ανακλάται πρέπει να είναι μικρότερο από τις διαστάσεις της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει. Οπότε οι υψηλότερες συχνότητες ανακλώνται από τις περατωτικές επιφάνειες του δωματίου με συνήθεις διαστάσεις, ενώ οι χαμηλές όχι.
3. *Απορρόφηση*: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ο ήχος προσπέσει σε ένα απορροφητικό υλικό «εξαφανίζεται», καθώς το υλικό απορροφά την ηχητική του ενέργεια. Κατά το φαινόμενο της απορρόφησης, η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως σε θερμότητα.
4. *Διάχυση*: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, ο ήχος που προσπίπτει σε ένα διαχυτή, ανακλάται ομοιόμορφα σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια ηχητική ένταση.
5. *Περίθλαση*: είναι το φαινόμενο της αλλαγής της διεύθυνσης διάδοσης που συμβαίνει κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (παράκαμψη ηχητικών κυμάτων ενός τοίχου, μιας γωνίας ενός κτιρίου, αλλοίωση του μετώπου κύματος από ανοιχτά παράθυρα, κλπ.).
6. *Διάδοση*: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ο ήχος διαδίδεται μέσω των περατωτικών επιφανειών του χώρου.

7. Διασπορά του ήχου μέσα στην κατασκευή.

8. Διάδοση μέσα στην κατασκευή.

6.3 Απευθείας ήχος (Direct Sound) – Πρώτες ανακλάσεις (Early Reflections) – Αντηχητικό πεδίο (Reverberation Field)

6.3.1 Απευθείας ήχος (Direct Sound)

Ας υποθέσουμε ότι ένας ακροατής κάθεται σε ένα ανοιχτό στάδιο ή μέσα σε ένα δωμάτιο όπου δεν υπάρχουν ανακλάσεις (ανηχοϊκός θάλαμος). Όταν ένας μουσικός παίζει ένα τόνο, τότε ο ακροατής ακούει τον τόνο ακριβώς όπως παράχθηκε από το μουσικό όργανο. Η δομή του τόνου, η ακουστότητα και η διάρκειά του, τις οποίες ακούει αυτός είναι τα ακριβή χαρακτηριστικά του μουσικού οργάνου και του εκτελεστή-μουσικού. Οι τόνοι από τα πνευστά φθίνουν αμέσως μετά το σταμάτημα της διέγερσής τους. Οι τόνοι από τα έγχορδα όργανα είναι λίγο μακρύτεροι σε διάρκεια εξαιτίας της περαιτέρω ταλάντωσης των χορδών και του ξύλου. Οι ήχοι από τα κρουστά, το ελεύθερα ταλαντευόμενο πιάνο ή την άρπα διαρκούν πολύ περισσότερο εκτός και αν ο μουσικός τους σταματήσει. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση ο ήχος που φτάνει στα αυτιά του ακροατή ονομάζεται απευθείας ήχος (direct sound). Σε αυτή την περίπτωση, δίδεται η εντύπωση πως δεν υπάρχει κλειστός χώρος και κατά συνέπεια καθόλου επιφάνειες, οι οποίες θα δημιουργούσαν την ανάκλαση του ήχου. Σε μια αίθουσα συναυλιών, ο ήχος, ο οποίος φτάνει χρονικά πρώτος στον ακροατή πριν από οποιαδήποτε ανάκλαση ονομάζεται «απευθείας ήχος».

6.3.2 Πρώτες ανακλάσεις (Early Reflections)

Πρώτες ανακλάσεις είναι εκείνες οι ανακλάσεις που φθάνουν στον ακροατή εντός χρονικού διαστήματος 80msec από την άφιξη του απευθείας ήχου. Οι ανακλάσεις αυτές είναι εκείνες που δίνουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο την πληροφορία για το μέγεθος του κλειστού χώρου στον οποίο βρίσκεται ο ακροατής και είναι πολύ σημαντικές.

6.3.3 Αντηχητικό πεδίο (Reverberation Field)

Το αντηχητικό πεδίο δημιουργείται από όλες τις ανακλάσεις του ήχου κατά την πρόσπτωσή του στις περατωτικές επιφάνειες του χώρου (μετά από τα πρώτα 80msec). Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι το αντηχητικό πεδίο δε δημιουργείται στιγμιαία.

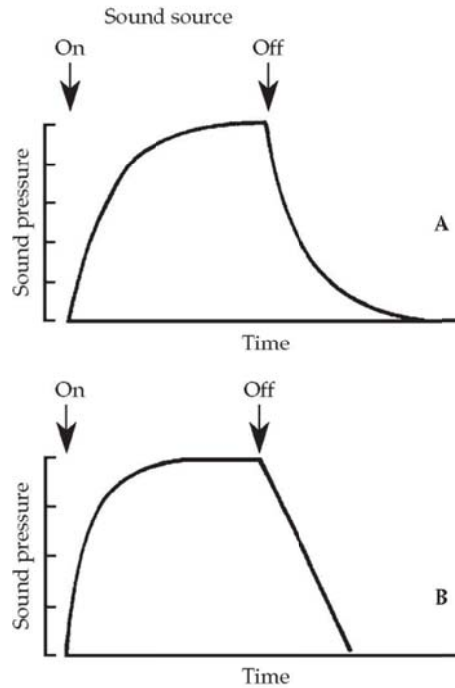
Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ηχείο μέσα σε ένα δωμάτιο, το οποίο συνδέεται με μια γεννήτρια θορύβου. Καθώς το ηχείο ηχοβολεί, μέσα στο δωμάτιο «χτίζεται» γρήγορα ένα ηχητικό πεδίο μέχρι κάποια συγκεκριμένη στάθμη ηχητικής πίεσης. Αυτή ονομάζεται σταθερή κατάσταση ή σημείο ισορροπίας, στο οποίο η ηχητική ενέργεια που εκπέμπεται από το ηχείο είναι αρκετή να αντισταθμίσει τις απώλειες του ήχου

στον αέρα και στα όρια-επιφάνειες του δωματίου (απορρόφηση). Όταν το ηχείο εκπέμπει μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια, το σημείο ισορροπίας δύναται να βρίσκεται σε μεγαλύτερη στάθμη, ενώ για λιγότερη ηχητική ενέργεια το σημείο ισορροπίας μπορεί να βρίσκεται σε μικρότερη στάθμη πίεσης. Αφότου το ηχείο σταματήσει να ηχοβολεί, απαιτείται ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα ώσπου η στάθμη ηχητικής πίεσης να μειωθεί σε σημείο ώστε να μην ακούγεται.

Το φαινόμενο κατά το οποίο το ηχητικό πεδίο μέσα σε ένα κλειστό χώρο διατηρείται μετά από το σταμάτημα της ηχητικής πηγής που το δημιούργησε, ονομάζεται αντήχηση (reverberation).

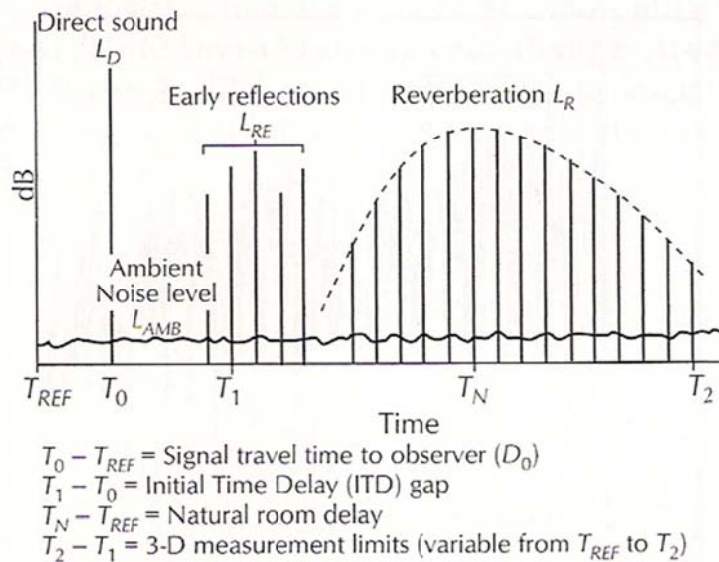
Τα παραπάνω γίνονται σαφέστερα αν αναφέρουμε ένα μηχανικό παράδειγμα που αντιστοιχίζει τη δημιουργία και την εξασθένηση του αντηχητικού πεδίου. Έστω το δωμάτιο μας αντιστοιχίζεται με ένα αυτοκίνητο. Πατώντας το πεντάλ του γκαζιού, το αυτοκίνητο επιταχύνει ώσπου να φτάσει σε μια συγκεκριμένη σταθερή ταχύτητα (αν ο δρόμος είναι επίπεδος ή λείος). Με αυτή τη ρύθμιση το πεντάλ του γκαζιού παράγει ακριβώς την απαιτούμενη ενέργεια για να αντισταθμιστούν οι τριβές του αέρα και του δρόμου. Αν τώρα αφήσουμε το πεντάλ του γκαζιού ελεύθερο, τότε μετά από κάποιο πεπερασμένο χρονικό διάστημα το αυτοκίνητο θα σταματήσει. Το αυτοκίνητο δε φτάνει ακαριαία σε μια σταθερή ταχύτητα, αλλά επιταχύνεται και μάλιστα χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να επιταχύνει. Επίσης, μόλις το πεντάλ του γκαζιού αφηθεί ελεύθερο δε σταματά αμέσως, αλλά επίσης χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να ακινητοποιηθεί τελείως.

Παρομοίως, το αντηχητικό πεδίο χρειάζεται κάποιο χρόνο να δημιουργηθεί (συνήθως λιγότερο από 1sec) και κάποιον άλλο χρόνο για να μειωθεί-εξαλειφθεί (κάποια msec – sec). Κοινό σημείο στο παράδειγμα με το αυτοκίνητο και στο αντηχητικό πεδίο είναι η ενέργεια. Η μηχανή του αυτοκινήτου αντιπροσωπεύει τον ενισχυτή που οδηγεί το ηχείο. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται η δημιουργία και η πτώση του αντηχητικού πεδίου.



Σχήμα 6.2 Άνοδος και πτώση ηχητικού πεδίου κλειστού χώρου με γραμμική (A) και λογαριθμική (B) κλίμακα ηχητικής πίεσης

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η ιδανική ακουστική απόκριση σε σχέση με τη στάθμη ηχητικής πίεσης και το χρόνο. Διακρίνονται τα τρία τμήματα: απευθείας ήχος, πρώτες ανακλάσεις και αντήχηση.



Σχήμα 6.3 Η στάθμη ηχητικής πίεσης για μια ιδανική ακουστική απόκριση ενός κλειστού χώρου συναρτήσει του χρόνου

6.4 Διαχωρισμός μικρών και μεγάλων ακουστικά χώρων (διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman)

Οι χώροι μπορούν να χωριστούν ακουστικά σε δύο κατηγορίες: τους μεγάλους και τους μικρούς. Η μελέτη των μεγάλων χώρων γίνεται με τις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής, ενώ των μικρών χώρων με τις αρχές της κυματικής ακουστικής.

Ο Manfred Schroeder όρισε τη συχνότητα διαχωρισμού (f_c – συχνότητα αποκοπής) ενός μεγάλου από ένα μικρό δωμάτιο, ως τη συχνότητα πάνω από την οποία ένας μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων του δωματίου (room modes) θα δημιουργούνται λόγω της πηγής. Η εξίσωση που δίνει αυτήν τη συχνότητα είναι:

$$f_c = K \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (6.1)$$

όπου:

f_c : η συχνότητα αποκοπής σε Hz

K : μία σταθερά με τιμή 2000 στο S.I. και 11885 στο U.S. μετρικό σύστημα

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης του δωματίου σε sec

V : ο όγκος του δωματίου σε m^3

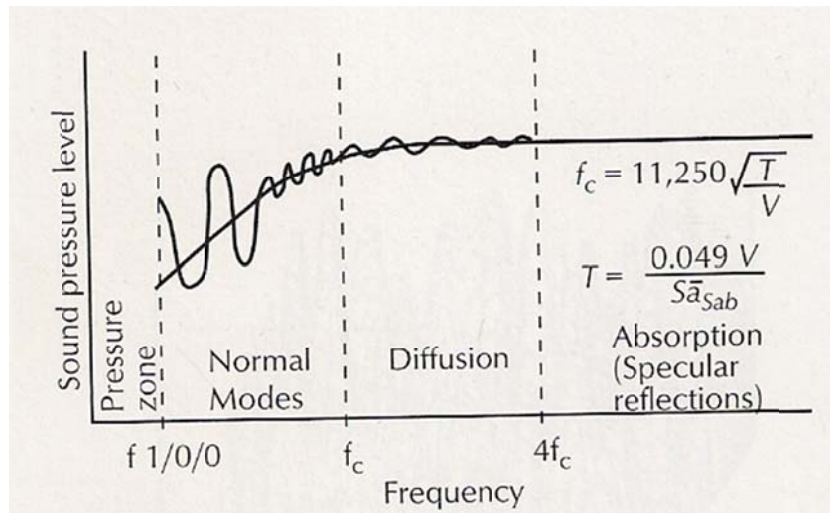
Η παραπάνω εξίσωση είναι μια προσέγγιση που εκφράζει πάνω από ποια συχνότητα f_c ένα δωμάτιο με συγκεκριμένο όγκο V και χρόνο αντήχησης RT_{60} , συμπεριφέρεται ομοιόμορφα ακουστικά.

Ας υποθέσουμε για παράδειγμα, ότι για ομιλία θέλουμε ως κατώτερο συχνοτικό όριο τα 80Hz και για μουσική τα 30Hz και ότι ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας $RT_{60} = 1,6sec$. Λύνοντας την εξίσωση 6.1 ως προς τον όγκο έχουμε:

$$V = K^2 \frac{RT_{60}}{f_c^2} \quad (6.2)$$

Οπότε για τα 80Hz έχουμε $V = 1000m^3$ και για τα 30Hz έχουμε $V = 7111,11m^3$.

Οι Bolt, Beranek και Newman δημιούργησαν ένα διάγραμμα, το οποίο ονομάζεται ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου:



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Bolt-Beraneck-Newmann – Ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου

Η συχνότητα f_c (cut-off frequency) αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ ενός μεγάλου και ενός μικρού κλειστού χώρου. Σε ένα φυσικά μικρό δωμάτιο η συχνότητα f_c μπορεί να φτάσει ακόμα και ως τα 500Hz, ενώ σε ένα φυσικό μεγάλο δωμάτιο μπορεί να πέσει στα 30Hz. Το ακουστικό φάσμα, βάσει του σχήματος 6.4, μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές:

1. Τη ζώνη πίεσης (pressure zone). Εκτείνεται από 0 Hz μέχρι τη συχνότητα $f = 171,5/L$ Hz, όπου L η μεγαλύτερη διάσταση του δωματίου. Κάτω από αυτή τη συχνότητα του πρώτου συχνοτικά αξονικού στάσιμου κύματος (βλ. Κεφ. 7), δεν υπάρχει συντονισμός που να υποστηρίζεται από το δωμάτιο. Αυτό δε σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρξει τόσο χαμηλή συχνότητα εντός του δωματίου, αλλά δεν μπορεί να υπάρξει ενίσχυσή της μέσω των συντονισμών του δωματίου, διότι δεν υπάρχει κανένας συντονισμός σε αυτήν την περιοχή.
2. Τη ζώνη των στάσιμων κυμάτων (modal zone). Εκτείνεται από $f = 171,5/L$ Hz έως f_c . Σε αυτή την περιοχή, οι διαστάσεις του δωματίου είναι της τάξης του μήκους κύματος του ήχου που μελετάται. Η μελέτη του ηχητικού πεδίου γίνεται με τις αρχές της κυματική ακουστικής.
3. Τη ζώνη διάχυσης (diffusion zone). Εκτείνεται από f_c έως $4f_c$ και είναι μία μεταβατική περιοχή.
4. Τη ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone). Οι διαστάσεις του χώρου είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τα μήκη κύματος και η ηχητική διάδοση προσομοιάζεται με τη διάδοση ηχητικών ακτίνων (rays), οι οποίες φέρουν ηχητική ενέργεια. Για τη μελέτη αυτής της συχνοτικής περιοχής χρησιμοποιούνται οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

6.5 Άσκηση

Ένα δωμάτιο έχει διαστάσεις $8 \times 5 \times 3.5 \text{ m}$ και χρόνο αντήχησης 1.8 sec . Να βρεθεί η συχνότητα αποκοπής του δωματίου αυτού και να οριστούν οι τέσσερις περιοχές απόκρισης του δωματίου.

7. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη μελέτη των μεγάλων κλειστών χώρων. Ένας χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι δύο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που ενδιαφέρει. Στους μεγάλους χώρους εφαρμόζεται η γεωμετρική ακουστική (ray tracing) καθώς επίσης και οι αρχές της στατιστικής ακουστικής κατά τον υπολογισμό τύπων. Η αρχιτεκτονική ακουστική είναι μια σχετικά πρόσφατη επιστήμη. Ιστορικά, ο νεαρός φυσικός W. C. Sabine το 1898 στο πανεπιστήμιο Harvard είχε τελειώσει την έρευνά του στους κλειστούς χώρους βελτιώνοντας την ακουστική της αίθουσας διδασκαλίας Fogg Art Museum. Ήταν η πρώτη φορά που η ακουστική αντιμετωπίστηκε με επιστημονικό τρόπο. Ο Sabine χρησιμοποιώντας μαξιλαράκια των θέσεων ενός θεάτρου ως φορητούς απορροφητές, σφυρίχτρες ως ηχητικές πηγές και ένα χρονόμετρο, κατέληξε σε μια σχέση μεταξύ του όγκου του δωματίου και της απορρόφησης που χρειάζεται για συγκεκριμένο χρόνο αντήχησης.

7.2 Χρόνος αντήχησης RT_{60} – Τύπος Sabine

Ως χρόνος αντήχησης RT_{60} (Reverberation time) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη ηχητικής πίεσης L_p σε κάποιο σημείο ενός κλειστού χώρου να ελαττωθεί κατά $60dB$, μετά το μηδενισμό της ηχητικής ακτινοβολίας από την πηγή. Ο εμπειρικός τύπος στον οποίο κατέληξε ο Sabine είναι:

$$RT_{60} = 0.161 \frac{V}{S\bar{a}} \quad (7.1)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

\bar{a} : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

$S\bar{a}$: η συνολική απορρόφηση σε Sabines

Σημαντικές παρατηρήσεις σχετικές με το χρόνο αντήχησης:

- Ο τύπος του Sabine ισχύει ικανοποιητικά για $\bar{a} < 0.1$.
- Ο χρόνος αντήχησης για τον ίδιο χώρο, εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και γι' αυτό το λόγο ορίζεται για κεντρικές συχνότητες ζώνης.
- Ο χρόνος αντήχησης μετριέται σε δευτερόλεπτα (*sec*) και αποτελεί τη σπουδαιότερη παράμετρο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ακουστικής ποιότητας χώρων.

7.2.1 Απόδειξη του τύπου υπολογισμού του χρόνου αντήχησης

Στους μεγάλους ακουστικά χώρους μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τις ακουστικές συνθήκες αν φανταστούμε ότι το ακουστικό κύμα ταξιδεύει περιμετρικά εντός του χώρου. Το κύμα αυτό ταξιδεύει σε ευθεία κατεύθυνση, ωστόσο συναντήσει μια επιφάνεια. Έπειτα ανακλάται από την επιφάνεια σε γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης και ταξιδεύει στην καινούργια του διεύθυνση, ωστόσο χτυπήσει σε κάποια άλλη επιφάνεια. Επειδή ο ήχος ταξιδεύει με $340m/s$ θα συμβούν πολλές ανακλάσεις κατά τη διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

Σύμφωνα με τις αρχές της στατιστικής, ορίζεται ως μέση ελεύθερη απόσταση, η μέση απόσταση που ταξιδεύει ένα ηχητικό κύμα μέσα σε ένα χώρο ανάμεσα στις ανακλάσεις και τις οριακές επιφάνειες. Ο Knudsen ορίσε πραγματικά τη μέση ελεύθερη απόσταση (mean free path) σε 11 διαφορετικούς μεγάλους χώρους και κατέληξε στο ότι μπορεί να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια με βάση τον τύπο:

$$MFP = \frac{4V}{S} \quad (7.2)$$

όπου:

V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

Ο αριθμός των ανακλάσεων ανά δευτερόλεπτο (Reflection Per Second):

$$RPS = \frac{c}{MFP} \quad \text{ή} \quad RPS = \frac{cS}{4V} \quad (7.3)$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Αν θεωρήσουμε $60dB$ μείωση, όπου $e^{6 \ln 10} = 1000000$, τότε $6 \ln[10 (1/\bar{a})]$ είναι ο συνολικός αριθμός των ανακλάσεων (N) κατά τη διάρκεια της πτώσης των $60dB$.

Έτσι:

$$RT_{60} = \frac{N}{RPS} = \frac{\frac{6 \ln 10}{\bar{a}}}{\frac{4V}{S}} \quad (7.4)$$

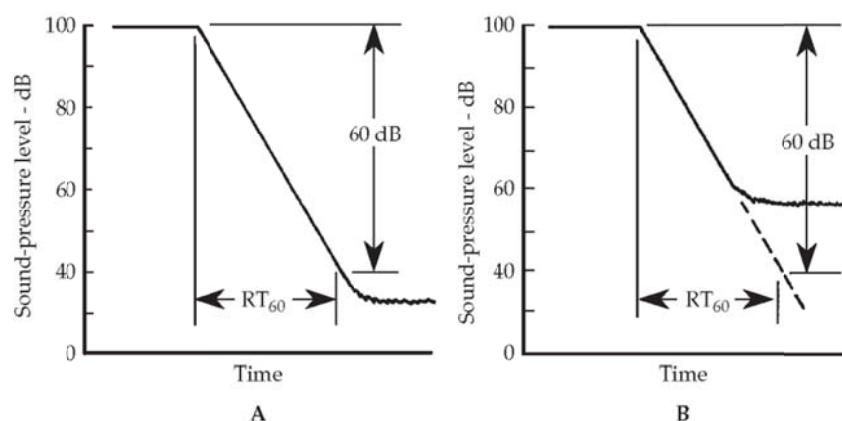
Άρα $\frac{4(6 \ln 10)}{344} = 0.161$ η μετρητική σταθερά που έχει διαστάσεις (S/m).

Έτσι, ο χρόνος αντήχησης

$$RT_{60} = \frac{m^3}{m^2} \left(\frac{S}{m} \right) = s$$

έχει μονάδες τα δευτερόλεπτα.

Στο σχήμα 7.1 φαίνεται ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης γραφικά:



Σχήμα 7.1 Υπολογισμός της πτώσης κατά 60dB του ηχητικού πεδίου απευθείας (A) και με extrapolation (B)

Ο χρόνος αντήχησης ορίζεται για την κεντρική συχνότητα κάθε συχνοτικής ζώνης υπολογισμού, επειδή τα υλικά παρουσιάζουν ανομοιομορφη συχνοτικά απορρόφηση. Οι οκτάβες στις οποίες αναφέρεται ο χρόνος αντήχησης είναι: 125, 250, 500, 1000, 2000 και 4000Hz. Στην περίπτωση που δεν προσδιορίζεται η συχνοτική ζώνη, ο χρόνος αντήχησης που δίδεται, αναφέρεται στη ζώνη με κεντρική συχνότητα 500Hz.

7.2.2 Μέσος συντελεστής απορρόφησης – Απορρόφηση δωματίου

Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης για έναν κλειστό χώρο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (7.5)$$

Η απορρόφηση δωματίου ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S\bar{\alpha} = A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (7.6)$$

όπου:

S_1, S_2, \dots, S_n : το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας.

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$: οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Τόσο η απορρόφηση όσο και ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζονται για την κεντρική συχνότητα της χρησιμοποιούμενης συχνοτικής ζώνης.

7.2.3 Απορρόφηση ανθρώπου

Ο άνθρωπος, όπως και τα υπόλοιπα υλικά, παρουσιάζει απορρόφηση, η οποία όμως λόγω της ανθρώπινης φυσιολογίας δεν έχει σημασία εάν εκφράζεται μέσω του συντελεστή απορρόφησης. Κατά συνέπεια, έχει νόημα ο ορισμός της συνολικής

απορρόφησης που προσφέρει ένας άνθρωπος. Ενδεικτικές τιμές της απορρόφησης του ανθρώπου παρατίθενται στον πίνακα 7.1.

125Hz	500Hz	2000Hz
0.17/άτομο	0.43/άτομο	0.47/άτομο

Πίνακας 7.1: Απορρόφηση του ατόμου για διάφορες οκτάβες

7.3 Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προσεγγιστικό τύπο του Sabine για να υπολογίσουμε το χρόνο αντήχησης ενός χώρου ανάλογα με τα υλικά που υπάρχουν εντός του.

Στον πίνακα 7.2 φαίνεται η μεθοδολογία με την οποία υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης για ένα δωμάτιο διαστάσεων 23.3 x 16 x 10 ft → 7.1 x 4.8 x 3.04 m, όπου το πάτωμα είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι τοίχοι από γυψοσανίδα πάχους 1/2 in.

		Size	23.3 × 16 × 10 ft										
		Treatment	None										
		Floor	Concrete										
		Walls/ceiling	Gypsum board, 1/2", on frame construction										
		Volume	(23.3)(16)(10) = 3,728 cu ft										
Material	S sq ft	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz	
			S		S		S		S		S		S
Concrete	373	0.01	3.7	0.01	3.7	0.015	5.6	0.02	7.5	0.02	7.5	0.02	7.5
Gypsum board	1,159	0.29	336.1	0.10	115.9	0.05	58.0	0.04	46.4	0.07	81.1	0.09	104.3
Total absorption (sabins)		339.8		119.6		63.6		53.9		88.6		111.8	
Reverberation time (seconds)		0.54		1.53		2.87		3.39		2.06		1.63	
<p>S = area of material = absorption coefficient for that material and for that frequency A = S absorption units, sabins</p> $RT_{60} = \frac{(0.049)(3728)}{A} = \frac{182.7}{A}$ <p>Example: For 125 Hz, $RT_{60} = \frac{182.7}{339.8} = 0.54$ second</p>													

Πίνακας 7.2 Μέθοδος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης ενός δωματίου με βάση τον τύπο του Sabine για συχνότητες από 125 έως 4000Hz

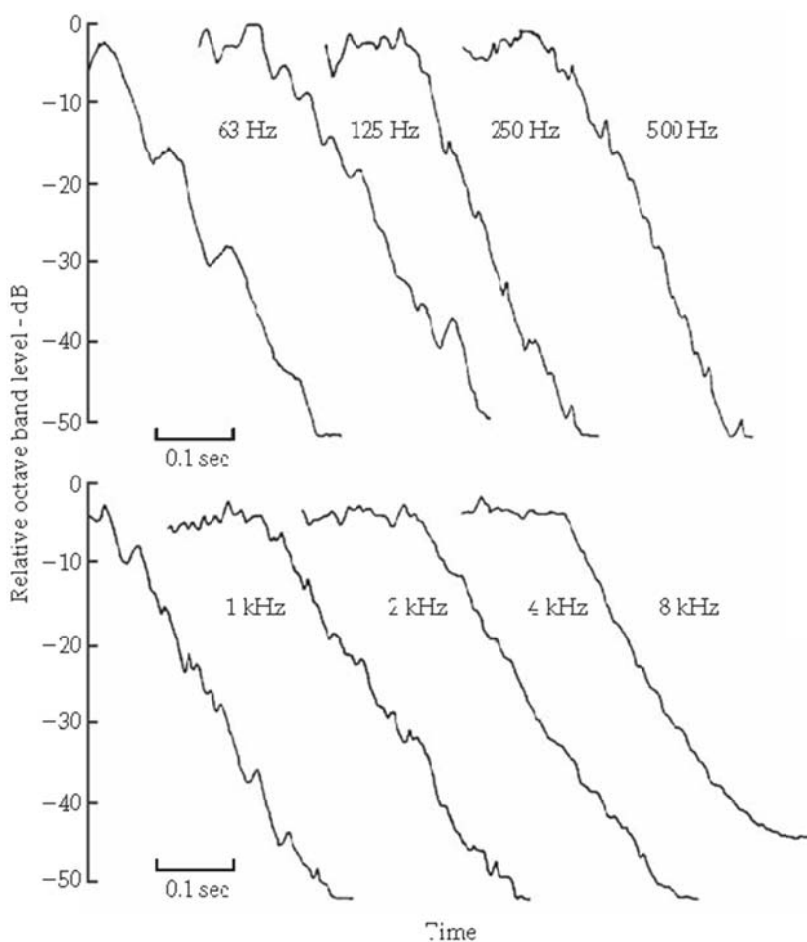
7.4 Μέτρηση του χρόνου αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης είναι η πιο σπουδαία παράμετρος για το χαρακτηρισμό της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου και υπολογίζεται μετρώντας τη χρονική απόκριση του χώρου έπειτα από παλμική διέγερση. Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης περιγράφονται στο πρότυπο ISO 3382-1975.

Στις σύγχρονες συσκευές μέτρησης του χρόνου αντήχησης υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισής του στις συχνοτικές ζώνες 125- 4000Hz ταυτόχρονα.

Μια απεικόνιση της πτώσης της ηχητικής στάθμης συναρτήσει του χρόνου για διάφορες συχνοτικές ζώνες φαίνονται στο σχήμα 7.2.

Παρατηρώντας το σχήμα 7.1 (A) βλέπουμε πως θεωρητικά χρειάζεται μια πτώση της αρχικής ηχητικής στάθμης πίεσης κατά 60dB. Στην πραγματικότητα αυτό είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί γιατί η στάθμη του θορύβου βάθους (background noise) δεν επιτρέπει την πτώση κατά 60dB. Μια ηχητική πηγή είναι πολύ δύσκολο να παράγει ηχητικό πεδίο με στάθμη πίεσης 120dB. Στην πραγματικότητα, γίνονται μετρήσεις για πτώσεις ηχητικής στάθμης 30-40dB και εν συνεχεία υπολογίζεται γραφικά ο χρόνος αντήχησης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1 (B).



Σχήμα 7.2 Πτώση στάθμης ηχητικού πεδίου για διάφορες οκτάβες

Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις μέθοδοι μέτρησης χρόνου αντήχησης.

7.4.1 Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής

Ένας χώρος διεγείρεται με θόρυβο (ροζ ή λευκός) που μηδενίζεται ακαριαία. Ένας αναλυτής και ένα ηχόμετρο καταγράφει τη μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου

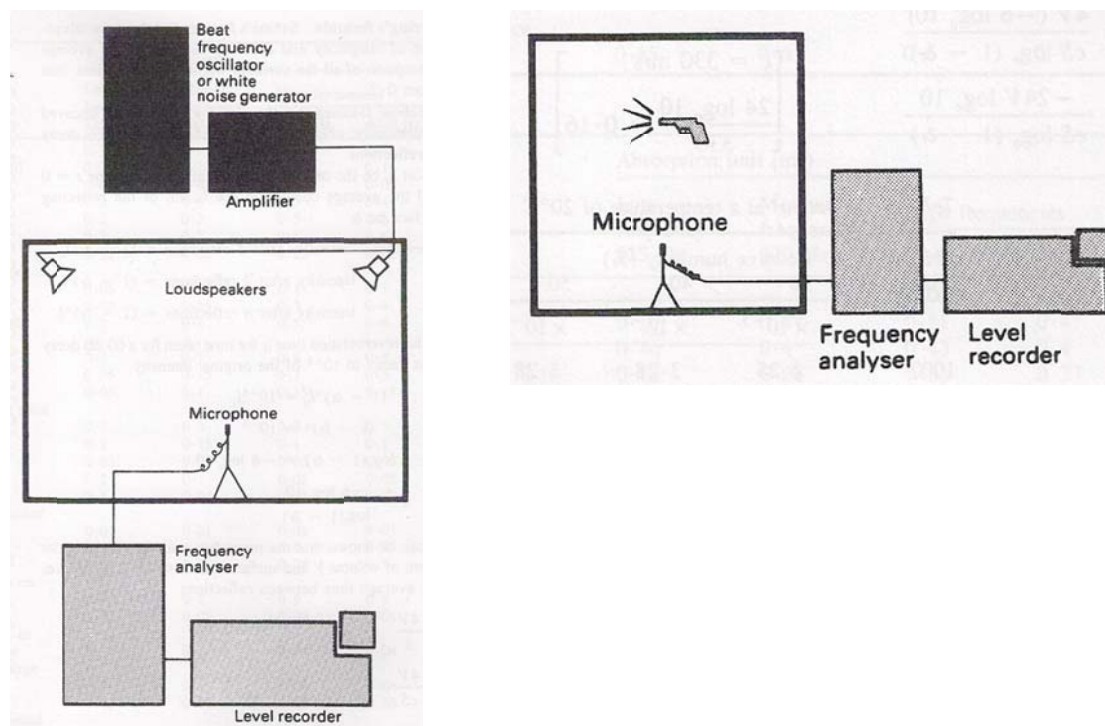
συναρτήσεως του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης.

7.4.2 Μέθοδος της παλμικής διέγερσης (impulse response)

Είναι παρόμοια με την παραπάνω μέθοδο με τη διαφορά ότι η διέγερση του χώρου πραγματοποιείται μέσω κάποιου παλμού (π.χ. πιστόλι).

7.4.3 Μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS - Maximum Length Sequence)

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους Schroeder και Alutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται ακολουθία μέγιστου μήκους MLS (Maximum Length Sequence). Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνουμε μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N). Η ακολουθία είναι στάσιμη με μήκος $l = 2^n - 1$ (όπου n ακέραιος θετικός αριθμός). Κάθε δείγμα, πλην του πρώτου που είναι εξ' ορισμού μονάδα, της ακολουθίας έχει τιμή 0 ή 1, αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα (Dirac Delta Functions).



Σχήμα 7.3 Σχηματική απεικόνιση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο της διακοπτόμενης πηγής (αριστερά) και της παλμικής διέγερσης (δεξιά).

7.5 Άλλοι τύποι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης RT_{60}

7.5.1 Τύπος των Norris - Eyring

Όταν για το μέσο συντελεστή απορρόφησης ισχύει $\bar{a} > 0.1$, ο προσεγγιστικός τύπος του Sabine δεν παρέχει ορθά αποτελέσματα. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \bar{a})} \quad (7.7)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

\bar{a} : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

Για $a < 0.1$ έχουμε $-\ln(1 - a) = a + \frac{a^2}{2} + \frac{a^3}{3} + \dots + \frac{a^n}{n} \approx a$ οπότε ο παραπάνω τύπος παίρνει τη μορφή του τύπου του Sabine.

7.5.2 Τύπος του Fitzroy

Στην περίπτωση ανομοιομόρφης απορρόφησης, δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών, όπως υαλοπίνακες, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S^2} \left[\frac{S_{XY}}{a_{XY}} + \frac{S_{XZ}}{a_{XZ}} + \frac{S_{YZ}}{a_{YZ}} \right] \quad (7.8)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

S_{XY}, S_{XZ}, S_{YZ} : η ολική επιφάνεια επί των αξόνων XY, XZ, YZ του δωματίου αντίστοιχα

a_{XY}, a_{XZ}, a_{YZ} : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης επί των αξόνων XY, XZ, YZ του δωματίου αντίστοιχα

Ο τύπος αυτός ισχύει για χώρους όπου η απορρόφηση δεν είναι ομοιόμορφη. Επίσης είναι εφαρμόσιμος στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις (π.χ. χαλί στο πάτωμα, ακουστικό πλακάκι στην οροφή, όλοι οι άλλοι τοίχοι ανακλαστικοί).

7.5.3 Απορρόφηση από τον αέρα

Στην περίπτωση που ο χώρος είναι εξαιρετικά μεγάλων διαστάσεων (π.χ. εκκλησίες, θέατρα) πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η απορρόφηση του αέρα.

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S\bar{a} + 4mV} \quad (7.9)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

\bar{a} : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

m : ο συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας που η τιμή του εξαρτάται από την υγρασία και τη συχνότητα.

Σχετική Υγρασία %	Θερμοκρασία	Συχνότητα (Hz)			
		2000	4000	6300	8000
30%	15	0.0143	0.0486	0.1056	0.1360
	20	0.01190	0.0379	0.0840	0.1360
	25	0.0114	0.0313	0.685	0.1360
	30	0.0281	0.0281	0.0564	0.1360
50%	15	0.0099	0.0286	0.0626	0.0860
	20	0.0096	0.0244	0.0503	0.0860
	25	0.0095	0.0235	0.0444	0.0860
	30	0.0092	0.0233	0.0426	0.0860
70%	15	0.0088	0.0223	0.0454	0.0600
	20	0.0085	0.0213	0.0399	0.0600
	25	0.0084	0.0211	0.0388	0.0600
	30	0.0082	0.0207	0.0383	0.0600

Πίνακας 7.3 Εξάρτηση του συντελεστή εξασθένησης της ηχητικής ενέργειας λόγω της παρουσίας αέρα συναρτήσει της σχετικής υγρασίας ($4m$), της θερμοκρασίας και της συχνότητας.

7.5.4 Χώροι με ανοιχτά παράθυρα (Sabine-Franklin)

Στην περίπτωση που ο χώρος περιλαμβάνει μεγάλα ανοιχτά παράθυρα και η απορρόφηση από τα αντικείμενα εντός του είναι μεγάλη, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{24V \ln 10}{Ac} \quad (7.10)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

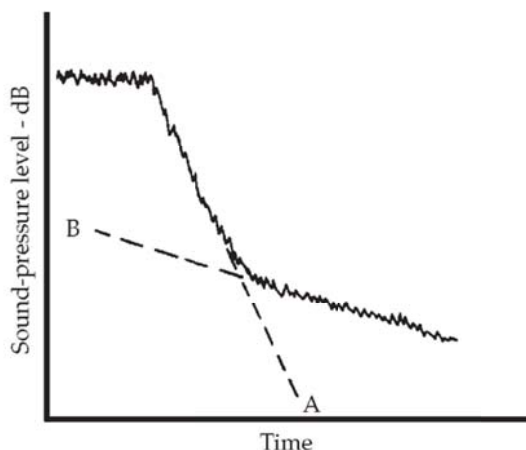
V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

A : η συνολική απορρόφηση του χώρου σε Sabines

c : η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε m/s

7.6 Συγκινονούντες χώροι

Όταν έχουμε δύο χώρους που επικοινωνούν, η μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου σε λογαριθμική κλίμακα δεν ακολουθεί τον κανονικό ρυθμό μείωσης (ευθεία γραμμή). Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να διακρίνουμε δύο ρυθμούς μείωσης, με αποτέλεσμα η πτώση της στάθμης να μην είναι ευθεία, αλλά να παρουσιάζει σημεία καμπής.



Σχήμα 7.4 Πτώση στάθμης ηχητικού πεδίου με διπλή κλίση λόγω σύζευξης ενός χώρου με μεγάλη απορρόφηση (A) κι ανακλαστικού χώρου (B)

Σύμφωνα με το σχήμα 7.4, ο χώρος A είναι το κυρίως δωμάτιο με σχετικά μικρό χρόνο αντήχησης (καμπύλη A). Ο χώρος B είναι προσαρτημένος διάδρομος με ανακλαστικές επιφάνειες και μεγάλο χρόνο αντήχησης (καμπύλη B). Ένα άτομο που βρίσκεται μεν μέσα στον κυρίως χώρο A, αλλά κοντά στο άνοιγμα προς τον παρακείμενο διάδρομο έχει την ευκαιρία να ακούσει ένα διπλό χρόνο αντήχησης.

7.7 EDT (Early Decay Time) και ERT (Extended Reverberation Time)

Ο EDT ορίζεται ως η επί έξι (6) φορές χρονική περίοδος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά $10dB$ μετά το μηδενισμό της πηγής.

Ο ERT ορίζεται ως δύο (2) φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος να ελαττωθεί από -5 έως $-35dB$ από τη μέγιστη στάθμη του ηχητικού πεδίου.

Και οι δύο παραπάνω χρόνοι ορίζονται για κάθε συχνότητα όπως ακριβώς και ο χρόνος αντήχησης.

Όταν η ηχητική ενέργεια είναι τελείως διάχυτη (π.χ. μεγάλοι χώροι) οι χρόνοι EDT, ERT, RT_{60} έχουν ίδιες τιμές. Για χώρους όπου η ηχητική ενέργεια δεν είναι διάχυτη (π.χ. μικροί χώροι) οι χρόνοι αυτοί διαφέρουν.

7.8 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης

Οι βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου, δηλαδή διαφέρουν κατά περίπτωση.

7.8.1 Ακουστικές απαιτήσεις χώρων

Ένας κλειστός χώρος έχει καλή ακουστική όταν πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Ο ήχος φτάνει σε όλα τα σημεία του χώρου χωρίς αισθητή μείωση και κυρίως έχει την ίδια κατανομή παντού.
2. Δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης (ή τουλάχιστον είναι περιορισμένο).
3. Ο ρυθμός μείωσης του ήχου είναι βέλτιστος. Αυτό έχει ως συνέπεια την καθαρότητα της συνομιλίας και τη βελτίωση της αντίληψης της μουσικής.
4. Δεν υπάρχουν δυσάρεστες καταστάσεις όπως ηχώ, ηχητικές σκιές, ηχητικές παραμορφώσεις και ηχητικές συγκεντρώσεις.

7.8.2 Κατάλληλος όγκος ενός χώρου

Προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες είναι απαραίτητο ένας χώρος να έχει το σωστό όγκο σύμφωνα με την εκάστοτε χρήση. Στον πίνακα 7.4 φαίνεται ο βέλτιστος όγκος ανά άτομο ανάλογα με τη χρήση του χώρου.

	Ελάχιστος	Βέλτιστος	Μέγιστος
Αίθουσα συναυλιών	6.5	7.1	9.9
Ιταλικού τύπου αίθουσες όπερας	4.0	4.2-5.1	5.7
Εκκλησίες	5.7	7.1-7.9	11.9
Κινηματογράφοι	-	3.1	4.2
Αίθουσες ομιλίας	-	2.8	4.9

Πίνακας 7.4: Βέλτιστος όγκος / άτομο (m^3 /άτομο) ανάλογα με τη χρήση του χώρου

7.8.3 Εξίσωση βέλτιστης αντήχησης (Εξίσωση Stephens-Bate)

Έχουν προταθεί βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για χώρους από διάφορους κατασκευαστές χρησιμοποιώντας εμπειρικές μεθόδους. Μια πρόταση από τους Stephens και Bate είναι ο παρακάτω τύπος:

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (7.11)$$

όπου:

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (sec)

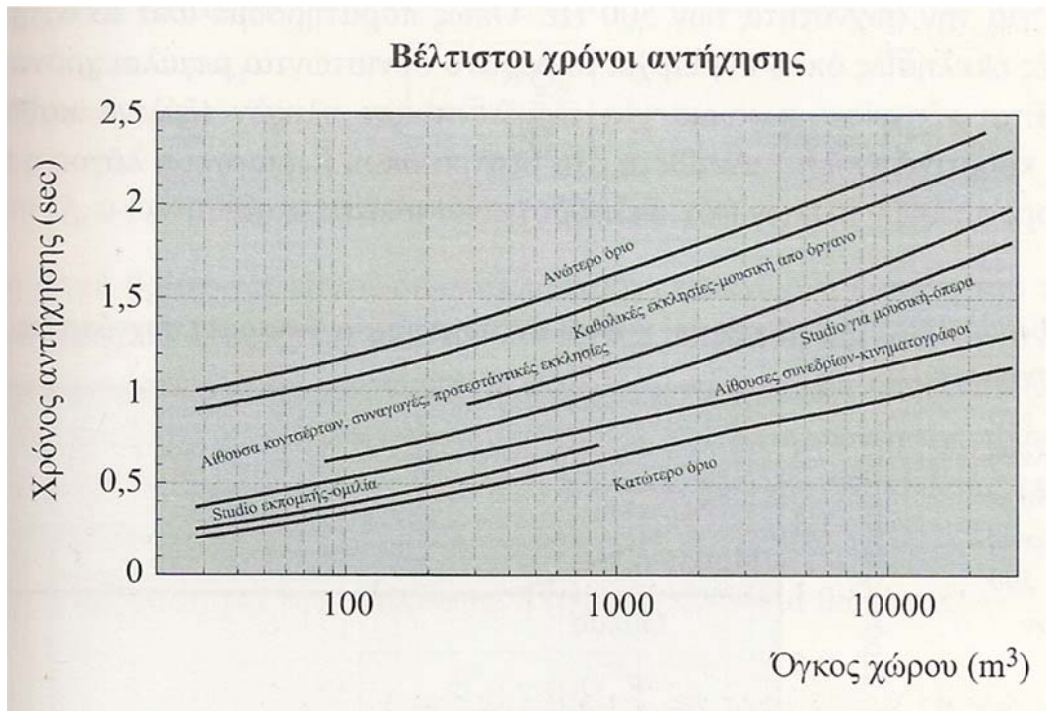
V : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)

$r = 4$ για λόγο

$r = 5$ για ορχήστρα

$r = 6$ για χορωδία

Μία άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί γραφήματα για τον υπολογισμό του βέλτιστου χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τον όγκο, αναλόγως με τη χρήση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.5 Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης συναρτήσει του όγκου και της χρήσης του χώρου

7.9 Ηχητική στάθμη πίεσης του αντηχητικού πεδίου

Στους μεγάλους χώρους εφαρμόζονται οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής. Συνοπτικά, ο ήχος θεωρείται ως μια ακτίνα που διαδίδεται μέσα στο δωμάτιο και καθώς προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της αρχικής της ενέργειας ανακλάται και ένα απορροφάται. Επειδή το δωμάτιο είναι μεγάλο, θεωρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και τυχαία διεύθυνση της διάδοσης του ήχου. Οι αρχές της στατιστικής χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τύποι που χρησιμεύουν στην περιγραφή ενός τέτοιου δωματίου.

Είναι σημαντικό να μπορούμε να υπολογίσουμε τη στάθμη έντασης L_p μέσα σε ένα μεγάλο χώρο. Υπενθυμίζεται ότι για συνθήκες ελεύθερου πεδίου (free field) ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου στη μεταβολή της στάθμης L_D και η εξίσωση που υπολογίζει τη στάθμη του ελεύθερου πεδίου:

$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (7.12)$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη στάθμη ηχητικής πίεσης του αντηχητικού πεδίου μέσα σε ένα μεγάλο χώρο είναι:

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{S\bar{\alpha}} \quad (7.13)$$

Ο τύπος που δίνει τη συνολική ηχητική στάθμη πίεσης σε ένα μεγάλο χώρο προκύπτει συνδυάζοντας τους δύο παραπάνω τύπους:

$$L_T = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{S\bar{a}} \right) \quad (7.14)$$

όπου:

L_W : η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής

r : η απόσταση από την πηγή σε m

Q : ο παράγοντας κατευθυντικότητας της ηχητικής πηγής ($Q = 1$ για παντοκατευθυντική πηγή)

\bar{a} : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου

$S\bar{a}$: η απορρόφηση του χώρου

Επίσης ορίζεται και η ποσότητα R που ονομάζεται σταθερά δωματίου (Room Constant), η οποία εξαρτάται από την απορρόφηση του χώρου και δίδεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}} \quad (7.15)$$

7.10 Κρίσιμη απόσταση (Critical Distance) D_C

Βλέπουμε πως μέσα σε ένα κλειστό χώρο συνυπάρχουν δύο ηχητικά πεδία, το απευθείας (direct) με στάθμη L_D και το αντηχητικό (reverberant) με στάθμη L_R . Η συνολική στάθμη είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους παραπάνω:

$$L_T = L_D + L_R \quad (7.16)$$

Κοντά στην ηχητική πηγή υπερισχύει το απευθείας πεδίο, ενώ μακριά από την πηγή το αντηχητικό. Σε κάποιο σημείο η στάθμη του απευθείας και του αντηχητικού πεδίου εξισώνονται. Με άλλα λόγια, η ολική στάθμη είναι $3dB$ υψηλότερη από τη στάθμη του αντηχητικού (ή τη στάθμη του απευθείας). Η απόσταση αυτή ονομάζεται κρίσιμη απόσταση (critical distance) D_C . Μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η απόσταση αυτή θεωρώντας το απευθείας ηχητικό πεδίο ίσο με το αντηχητικό, δηλαδή:

$$\frac{Q}{4\pi^2 D_C^2} = \frac{4}{S\bar{a}} \quad (7.17)$$

Λύνοντας τον παραπάνω τύπο ως προς D_C η κρίσιμη απόσταση δίνεται από την εξίσωση:

$$D_C = 0.141 \sqrt{QS\bar{a}} \quad (7.18)$$

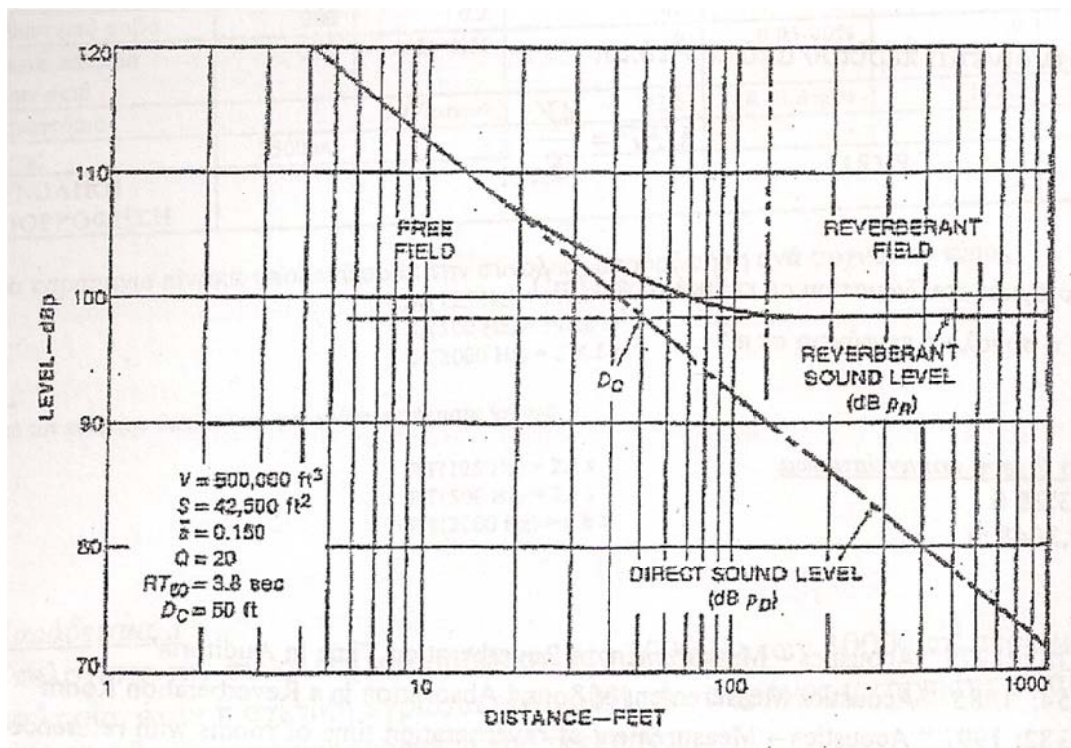
Συνδυάζοντας την εξίσωση Sabine για το χρόνο αντήχησης με την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ένας περισσότερο χρήσιμος τύπος για την κρίσιμη απόσταση, ο οποίος συμπεριλαμβάνει το χρόνο αντήχησης και τον όγκο του χώρου:

$$D_c = 0.057 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}} \quad (7.19)$$

Για πολύ «ζωντανό δωμάτιο» ισχύει $\bar{\alpha} \ll 1$, οπότε ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$D_c = \frac{\sqrt{S\bar{\alpha}}}{7} \quad (7.20)$$

Στο σχήμα 7.6 απεικονίζεται η στάθμη ηχητικής πίεσης συναρτήσει της απόστασης από την ηχητική πηγή. Απεικονίζεται το απευθείας πεδίο, το αντηχητικό και η κρίσιμη απόσταση.



Σχήμα 7.6 Υπολογισμός της κρίσιμης απόστασης βάσει της στάθμης του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου του χώρου

Η κρίσιμη απόσταση είναι απαραίτητο να είναι γνωστή κατά την ηχογράφιση μίας ορχήστρας (ηχητικής πηγής) μέσα σε μία αίθουσα. Αν τοποθετήσουμε τα μικρόφωνα σε απόσταση μικρότερη από την D_c , τότε έχουμε εμφανώς τον απευθείας ήχο της πηγής. Για απόσταση μεγαλύτερη από D_c επικρατεί κυρίως το αντηχητικό πεδίο και ελάχιστα το απευθείας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας συνδυασμός μικροφώνων

για να πετύχουμε διαφορετικά αποτελέσματα, δεν είναι σκοπός όμως αυτού του κεφαλαίου.

Σημείωση: μετατροπή από ft σε m και αντίστροφα

$m \rightarrow ft: 1m = 3.28ft$

$ft \rightarrow m: 1ft = 0.3048m$

7.11 Πρότυπα

- ISO 3382: 1975 “Acoustic measurements of reverberation time in auditoria”
- ISO 354: 1985 “Acoustic measurements of sound absorption in a reverberation room”
- ISO 3382: 1007 “Acoustic measurements of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters”

7.12 Λυμένες Ασκήσεις

Άσκηση 1

Προτείνετε το βέλτιστο όγκο και χρόνο αντήχησης για μια αίθουσα συναυλίας χωρητικότητας 450 ατόμων που θα χρησιμοποιείται κυρίως για ορχήστρα.

Λύση

Από τον πίνακα 7.4 βλέπουμε πως ο όγκος $7.1m^3$ ανά άτομο για τη χρήση αυτή είναι επιθυμητός. Άρα,

$$450 \text{ άτομα} \times 7.1m^3 / \text{άτομο} = 3195m^3$$

ο συνολικός όγκος της αίθουσας.

Από τον τύπο του Stephens-Bate έχουμε:

$$T = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) = 1.4sec$$

Άσκηση 2

Υπολογίστε το χρόνο αντήχησης στα 125, 500 και 2000Hz για μια αίθουσα $2500m^3$ (για 250 άτομα), η οποία αποτελείται από τις παρακάτω επιφάνειες:

Σοβάς με τούβλο: $265m^2$

3mm Γυάλινο Παράθυρο: $43m^2$

Εξέδρα: $70m^2$

25mm ξύλινα-υφασμάτινα πλάκες: $60m^2$

Κρυστάλλινες οθόνες: $96m^2$

Ταβάνι από σοβά: $300m^2$

Ξύλινο πάτωμα: $310m^2$

Θεωρήστε ότι η σκίαση του πατώματος από το ακροατήριο μειώνει αποτελεσματικά την απορρόφηση κατά 40% στα 125 και 500Hz καθώς και 60% στα 2000Hz.

Λύση

		125Hz		500Hz		2000Hz	
Υλικό	Επιφάνεια (m ²)	a	A	a	A	a	A
Σοβάς σε τούβλο	265	0.02	5.3	0.02	5.3	0.04	10.6
3 mm Γυάλινο Παράθυρο	43	0.3	12.9	0.1	4.3	0.05	2.2
Εξέδρα	70	0.15	10.5	0.1	7	0.1	7
25 mm ξύλινα- υφασμάτινα πλάκες	60	0.1	6	0.4	24	0.6	36
Κρυστάλλινες οθόνες	96	0.1	9.6	0.04	3.8	0.02	1.9
Ταβάνι από σοβά	300	0.2	62	0.1	31	0.04	12.4
Ξύλινο πάτομα μείον σκιά	310	0.05-40%	9	0.05-40%	9	0.1-60%	21
Ακροατήριο		0.17/άτομο	42.5	0.43/άτομο	107.5	0.47/άτομο	117.5
Αέρας	2500m ³	-	-	-	-	0.01	25
Συνολική Απορρόφηση		157.8		191.9		224.6	

Με βάση τις παραπάνω τιμές της απορρόφησης και με τη χρήση του τύπου του Sabine προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για το χρόνο αντήχησης:

$$RT_{60}(125Hz) = 2.5s$$

$$RT_{60}(500Hz) = 2.1s$$

$$RT_{60}(2000Hz) = 1.8s$$

Άσκηση 3

Υπολογίστε τη συνολική απορρόφηση στα 2000Hz των 30000m³ αέρα μέσα σε μία εκκλησία, όταν η σχετική υγρασία είναι 50% και η θερμοκρασία 20°C. Αν ο χρόνος αντήχησης είναι 4s (στα 2000Hz) βρείτε την απορρόφηση της εκκλησίας.

Λύση

Απορρόφηση αέρα = 0.0096 x 30000m³ = 288m²

Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Sabine:

$$RT = \frac{0.161V}{S\bar{a} + 4mV} \Rightarrow S\bar{a} + 288 = \left(0.161 * \frac{30000}{4}\right) \Rightarrow S\bar{a} = 919.5m^2$$

7.13 Ασκήσεις προς λύση

Άσκηση 1

Το αμφιθέατρο μιας σχολής πρόκειται να κατασκευαστεί για να εξυπηρετεί 200 άτομα και θα χρησιμοποιείται κυρίως για λόγο.

(α) Ορίστε τον κατάλληλο όγκο και χρόνο αντήχησης.

(β) Πόση απορρόφηση χρειάζεται στην κατασκευή ώστε να πετύχουμε τις βέλτιστες συνθήκες όταν η αίθουσα είναι γεμάτη κατά τα 2/3;

(Θεωρήστε ότι κάθε άτομο συνεισφέρει κατά 0.4m² μονάδες απορρόφησης στα 500Hz).

Λύση: 600m³ – 0.8s – 70m²

Άσκηση 2

Ένας ναός έχει όγκο περίπου 150000m³. Η αντήχηση του στα 500Hz είναι 11.7s όταν είναι άδειος και 6.3s όταν είναι γεμάτος. Πόσα άτομα θα είναι παρόντα όταν είναι γεμάτος ο ναός;

(Θεωρήστε ότι κάθε άτομο συνεισφέρει κατά 0.4m² μονάδες απορρόφησης στα 500Hz).

Λύση: 4400 άτομα

Άσκηση 3

Ένα δωμάτιο έχει διαστάσεις 60x10x5m (Μ x Π x Υ) και το οποίο χρησιμοποιούνταν για εργαστήριο πρόκειται να μετατραπεί σε αίθουσα διαλέξεων χωρητικότητας 200 ατόμων. Οι αρχικές επιφάνειες του πατώματος και του ταβανιού είναι κατασκευασμένες από σοβά και σκυρόδεμα, των οποίων ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι 0.05. Ακουστικά πλακάκια με συντελεστή απορρόφησης 0.75 είναι διαθέσιμα για την επικάλυψη των τοίχων και του ταβανιού.

(α) Ποιός είναι ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης για την καινούργια χρήση του χώρου;

(β) Υπολογίστε τη συνολική επιφάνεια των πλακιδίων τα οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί ο παραπάνω χρόνος αντήχησης;

(Η απορρόφηση του ακροατηρίου κατά άτομο είναι $0.4m^2$)

Λύση: $0.87s - 54.3m^2$

Άσκηση 4

Μια αίθουσα διαλέξεων διαστάσεων $16 \times 12.5 \times 5m$ (Μ x Π x Υ) έχει χρόνο αντήχησης $0.7s$. Υπολογίστε το μέσο συντελεστή απορρόφησης των επιφανειών χρησιμοποιώντας τον τύπο των Norris - Eyring.

Λύση: 0.21

Άσκηση 5

Θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα παραλληλεπίπεδο δωμάτιο με ύψος $3m$.

(α) Να βρεθούν οι δύο άλλες διαστάσεις (μήκος, πλάτος) του δωματίου αυτού σύμφωνα με τους προτεινόμενους λόγους διαστάσεων του Sempeyer (ύψος / πλάτος / μήκος = $1.00 / 1.60 / 2.33$), έτσι ώστε να έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των στάσιμων κυμάτων του δωματίου αυτού.

(β) Αν οι τοίχοι είναι από τούβλο και η οροφή με το πάτωμα από σκυρόδεμα, να βρεθεί ο χρόνος αντήχησης του δωματίου.

(γ) Αν επενδύσουμε το πάτωμα με ξύλο, να υπολογιστεί ο καινούργιος χρόνος αντήχησης του δωματίου.

(δ) Για το άδειο αυτό δωμάτιο να βρεθεί η συχνότητα αποκοπής f_c (Schroeder).

Δίνονται οι συντελεστές απορρόφησης στα $500Hz$: τούβλο= 0.02 , σκυρόδεμα= 0.04 και ξύλο= 0.1 .

8. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ

8.1 Εισαγωγή

Τα μικρά δωμάτια έχουν διαστάσεις, οι οποίες είναι της ίδιας τάξης με το μήκος κύματος λ των χαμηλών συχνοτήτων μιας ηχητικής πηγής (π.χ. μπάσου, μπότας drums). Η μελέτη αυτών των χώρων γίνεται βάσει των αρχών της κυματικής ακουστικής. Δεν είναι έγκυρο να χρησιμοποιείται ο χρόνος αντήχησης RT_{60} , η μέση ελεύθερη απόσταση καθώς και άλλοι στατιστικοί τύποι στα μικρά δωμάτια.

8.2 Στάσιμα κύματα σε τρεις διαστάσεις

8.2.1 Κυματική εξίσωση σε τρεις διαστάσεις

Σύμφωνα με την κυματική ακουστική, ο ήχος είναι ένα κύμα που διαδίδεται σε κάποιο ελαστικό μέσο (π.χ. στον αέρα). Η χωρική και χρονική περιγραφή ενός ηχητικού κύματος γίνεται με την κυματική εξίσωση, της οποίας η μαθηματική έκφραση για τρεις διαστάσεις δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{V}^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (8.1)$$

όπου:

$$\bar{V}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} : \text{ο τελεστής Laplace δεύτερης τάξης}$$

p : η πίεση του ηχητικού πεδίου

c : η ταχύτητα του ήχου

t : ο χρόνος

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή και σε άλλες επιστημες πλην της ακουστικής, οι οποίες ασχολούνται με κύματα, όπως ηλεκτρομαγνητισμός, οπτική κλπ.

8.2.2 Στάσιμα κύματα σε κλειστό σωλήνα

Για να κατανοήσουμε τα στάσιμα κύματα, ας θεωρήσουμε ένα μονοδιάστατο πρόβλημα, έναν κλειστό ανακλαστικό σωλήνα στη μια άκρη του οποίου υπάρχει μια ηχητική πηγή. Έστω ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται μέσα στο σωλήνα κατά μήκος του άξονα x . Όταν το ηχητικό κύμα προσπέσει σε ένα τοίχωμα, υφίσταται ανάκλαση. Στην πραγματικότητα, το εξερχόμενο κύμα από την πηγή είναι το άθροισμα του πρωταρχικού απευθείας κύματος που ξεκίνησε από την πηγή, συν το εξερχόμενο ηχητικό κύμα από τις ανακλάσεις που πραγματοποιούν το δεύτερο, τρίτο, τέταρτο κ.ο.κ. ταξίδι τους. Παρομοίως, το εισερχόμενο προς την πηγή κύμα είναι ο συνδυασμός της πρώτης ανάκλασης και των κυμάτων που επιστρέφουν από το δεύτερο, τρίτο, τέταρτο, κ.ο.κ. ταξίδι τους. Αυτά τα εισερχόμενα και εξερχόμενα

κύματα προσθέτονται και παράγουν το στάσιμο κύμα. Η εξίσωση που περιγράφει το ηχητικό πεδίο μέσα σε ένα σωλήνα είναι:

$$p(x) = \frac{-j\rho v c \cos[k(L-x)]}{\sin(kL)} \quad (8.2)$$

όπου:

L : το μήκος του σωλήνα

$k = 2\pi/\lambda$: ο κυματόριθμος

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση που $\sin(kL) = 0$, η πίεση γίνεται άπειρη. Αυτό συμβαίνει όταν το γινόμενο kL είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π :

$$kL = n\pi \quad (8.3)$$

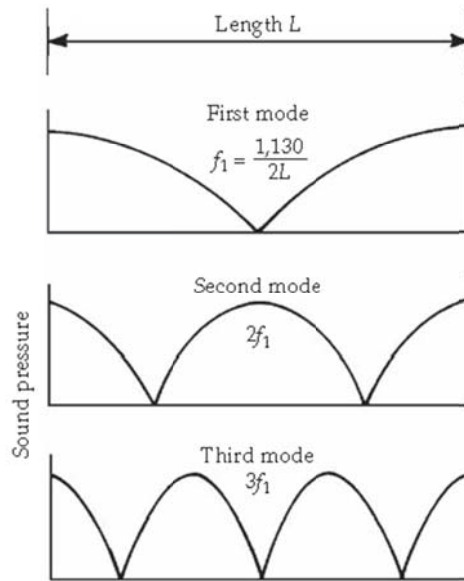
$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (8.4)$$

Από τις σχέσεις (8.3) και (8.4) προκύπτει πως στάσιμα κύματα δημιουργούνται μέσα σε έναν κλειστό και από τις δύο πλευρές σωλήνα, όταν το μήκος του σωλήνα L είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος. Αν στις παραπάνω σχέσεις αντικαταστήσουμε το μήκος κύματος λ από τη σχέση $c = \lambda f$, τότε οι ιδιοσυχνότητες (ή συχνότητες συντονισμού ή συχνότητες στάσιμων κυμάτων) δίνονται από τον τύπο:

$$f = n \frac{c}{2L} \quad (8.5)$$

όπου n : θετικός ακέραιος αριθμός.

Στο σχήμα 8.1 φαίνονται τρόποι ταλάντωσης ενός κλειστού-κλειστού σωλήνα όσον αφορά την κατανομή της πίεσης εντός του:



Σχήμα 8.1 Κατανομή της ηχητικής πίεσης για τους τρεις τρόπους ταλάντωσης ενός κλειστού και στα δύο άκρα σωλήνα

Παρατηρούμε πως κατά μήκος του σωλήνα, υπάρχουν σημεία όπου η πίεση είναι μέγιστη και ονομάζονται κοιλίες (peaks), καθώς επίσης και σημεία όπου η πίεση είναι ελάχιστη, σχεδόν μηδενική και ονομάζονται δεσμοί (nodes). Ο ακέραιος αριθμός n δείχνει πόσοι δεσμοί σχηματίζονται σε μια ιδιοσυχνότητα. Αν για παράδειγμα έχουμε $L = 3m$ και $n = 2$, τότε $f = 114Hz$ και θα υπάρχουν δύο δεσμοί πίεσης. Στάσιμα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν επίσης και σε έναν ανοιχτό από τις δύο πλευρές σωλήνα. Αντίστοιχα στον ανοιχτό-ανοιχτό σωλήνα ισχύουν οι τύποι:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (8.6)$$

$$f = n \frac{c}{2L} \quad (8.7)$$

Τέλος, στάσιμα κύματα υπάρχουν και στον ανοιχτό-κλειστό σωλήνα, στον οποίο ισχύουν οι τύποι:

$$L = n \frac{\lambda}{4} \quad (8.8)$$

$$f = n \frac{c}{2L} \quad (8.9)$$

Όπως έχει αναφερθεί σε άλλο μάθημα, τα στάσιμα κύματα αποτελούν τη βάση παραγωγής του ήχου στα πνευστά, έγχορδα και κρουστά μουσικά όργανα.

8.2.3 Στάσιμα κύματα εντός παραλληλεπίπεδου δωματίου

Τα δωμάτια είναι γενίκευση της περίπτωσης του σωλήνα (μία διάσταση) σε τρεις διαστάσεις (μήκος, πλάτος, ύψος). Η περιγραφή του ηχητικού πεδίου μέσα σε ένα δωμάτιο γίνεται με τη λύση της κυματικής εξίσωσης (σχέση (8.1)) που αναφέρθηκε παραπάνω με οριακές συνθήκες τις επιφάνειες των τοίχων του δωματίου. Η εξίσωση του αντηχητικού πεδίου (reverberant field) μέσα σε ένα παραλληλεπίπεδο δωμάτιο δίνεται από τη σχέση:

$$p = \rho c^2 \sum_0^{\infty} \frac{q\omega \Psi_n(r)\Psi_n(r_0)}{V\Lambda_n(2\omega_n\zeta_n + j(\omega^2 - \omega_n^2))} e^{j\omega t} \quad (8.10)$$

όπου:

r : το διάνυσμα του σημείου του δωματίου που μελετάμε

r_0 : η θέση της ηχητικής πηγής μέσα στο δωμάτιο

ρ : η πυκνότητα του αέρα

c : η ταχύτητα του ήχου στον αέρα

q : η στοιβαρότητα (strength) της πηγής

ω_n : η συχνότητα συντονισμού του στάσιμου κύματος

ω : η συχνότητα της πηγής.

$\Psi_n = A_n \cos\left(\frac{n_x\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z\pi z}{L_z}\right)$ (8.11): η κανονική συνάρτηση για το

παραλληλεπίπεδο δωμάτιο, αντίστοιχα στο σημείο r και στο σημείο r_0

ζ_n : ο συντελεστής απόσβεσης του n -οστού στάσιμου κύματος

Λ_n : ο παράγοντας κλίμακας που ορίζεται από κάθε στάσιμο κύμα

Το συνολικό ηχητικό πεδίο μέσα στο δωμάτιο περιγράφεται αν στον παραπάνω τύπο για το αντηχητικό πεδίο προστεθεί και το απευθείας ηχητικό πεδίο (direct field) της ηχητικής πηγής, που δίνεται από τον τύπο:

$$p_{dir} = \frac{j\omega\rho q}{4\pi|r-r_0|} e^{j\omega\left(t-\frac{|r-r_0|}{c}\right)} \quad (8.12)$$

Το συνολικό ηχητικό πεδίο μέσα σε ένα παραλληλεπίπεδο δωμάτιο περιγράφεται από τη λύση της παρακάτω κυματικής εξίσωσης:

$$p_{tot} = \frac{j\omega\rho q}{4\pi|r-r_0|} e^{j\omega\left(t-\frac{|r-r_0|}{c}\right)} + \rho c^2 \sum_0^{\infty} \frac{q\omega \Psi_n(r)\Psi_n(r_0)}{V\Lambda_n(2\omega_n\zeta_n + j(\omega^2 - \omega_n^2))} e^{j\omega t} \quad (8.13)$$

Ο παραπάνω τύπος με τη βοήθεια υπολογιστικών μοντέλων μπορεί να παρέχει και να σχεδιάσει το ηχητικό πεδίο μέσα σε ένα δωμάτιο.

8.3 Ιδιοσυχνότητες παραλληλεπίπεδων χώρων και πλήθος των στάσιμων κυμάτων

Πρακτική αξία έχει όμως η γνώση των ιδιοσυχνοτήτων ενός παραλληλεπίπεδου δωματίου οι οποίες δίνονται από τον τύπο:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (8.14)$$

όπου:

f : η συχνότητα στάσιμου κύματος

c : η ταχύτητα του ήχου (344m/s στους 20°)

L_x, L_y, L_z : οι διαστάσεις του δωματίου

n_i : η τάξη του στάσιμου κύματος

Υπάρχουν τριών ειδών στάσιμα κύματα μέσα σε ένα παραλληλεπίπεδο δωμάτιο:

(α) Τα αξονικά (axial) στάσιμα κύματα, τα οποία δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ δύο απέναντι επιφανειών. Περιέχουν τη μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια και είναι αυτά που συνήθως σε μια πρώτη προσέγγιση ενδιαφέρουν τους μηχανικούς ήχου.

(β) Τα εφαπτομενικά (tangential) στάσιμα κύματα, τα οποία δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ τεσσάρων επιφανειών (τοίχοι στο ίδιο επίπεδο). Ενεργειακά έχουν τη μισή ηχητική ενέργεια σε σχέση με τα αξονικά στάσιμα κύματα (είναι κατά 3dB ασθενέστερη).

(γ) Τα πλάγια (oblique) στάσιμα κύματα, τα οποία δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ έξι επιφανειών (από όλους τους τοίχους του δωματίου). Η ηχητική τους ενέργεια είναι το 1/4 της αντίστοιχης των αξονικών στάσιμων κυμάτων (είναι κατά 6dB ασθενέστερη).

Τα εφαπτομενικά και τα πλάγια στάσιμα κύματα έχουν μικρότερη ενέργεια από τα αξονικά, επειδή ο ήχος ανακλάται σε περισσότερες επιφάνειες, χάνοντας ένα μέρος από την ενέργειά του σε κάθε ανάκλαση.

Ο συντελεστής n_x μας δείχνει τη διάδοση του κύματος παράλληλα προς τον άξονα x , και αντίστοιχα οι n_y, n_z παράλληλα προς τον άξονα y και z αντίστοιχα. Για τα αξονικά στάσιμα κύματα έχουμε $(n_x, 0, 0)$, $(0, n_y, 0)$, $(0, 0, n_z)$, ενώ για τα εφαπτομενικά στάσιμα κύματα $(n_x, n_y, 0)$, $(0, n_y, n_z)$, $(n_x, 0, n_z)$ και για τα πλάγια στάσιμα κύματα (n_x, n_y, n_z) . Ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων αυξάνεται με τη συχνότητα. Παρακάτω αναφέρονται δύο χρήσιμοι τύποι:

8.3.1 Εξίσωση για τον υπολογισμό του αριθμού των στάσιμων κυμάτων (N) ανά συχνότητα (f)

$$N \approx \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \quad (8.15)$$

όπου:

V : ο όγκος του δωματίου σε m^3

S : η συνολική επιφάνεια του δωματίου

$L = L_x + L_y + L_z$: η συνολική περιμετρική απόσταση του δωματίου

f : η συχνότητα

c : η ταχύτητα του ήχου

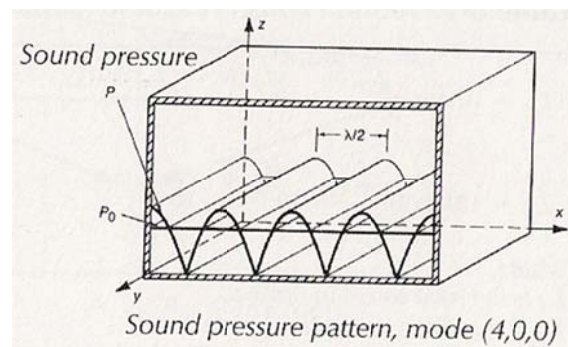
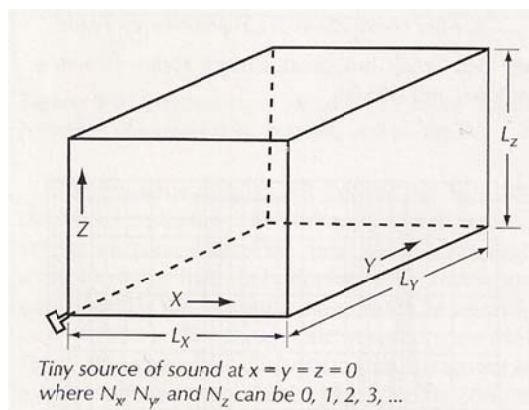
N : ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων

8.3.2 Αριθμός των στάσιμων κυμάτων εύρους συχνοτήτων (Δf) με κεντρική συχνότητα f

$$\Delta N \approx \left[4\pi V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c}\right) \right] \frac{\Delta f}{f} \quad (8.16)$$

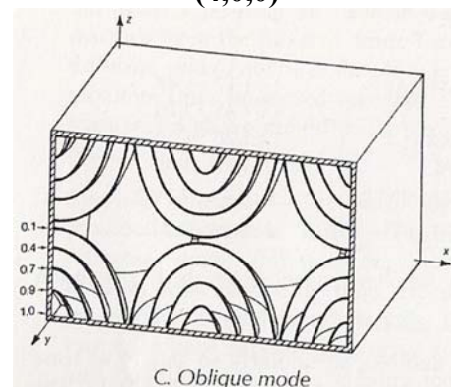
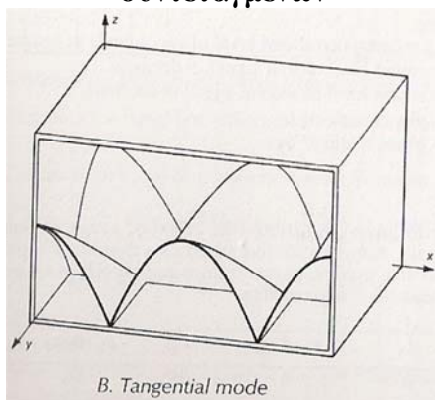
8.3.3 Χωρική κατανομή ηχητικού πεδίου μέσα σε κλειστό χώρο

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα αξονικά, εφαπτομενικά και πλάγια στάσιμα κύματα μέσα σε παραλληλεπίπεδο δωμάτιο.



Σχήμα 8.2(α) Σύστημα ορθογώνιων συντεταγμένων

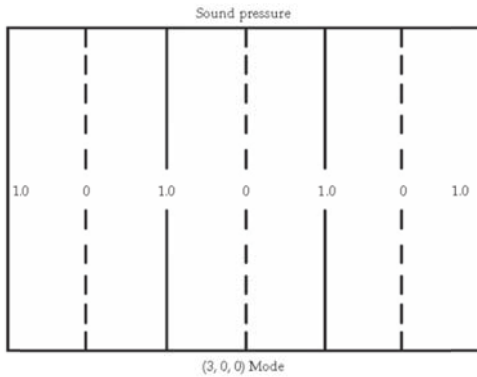
Σχήμα 8.2(β) Αξονικό στάσιμο κύμα (4,0,0)



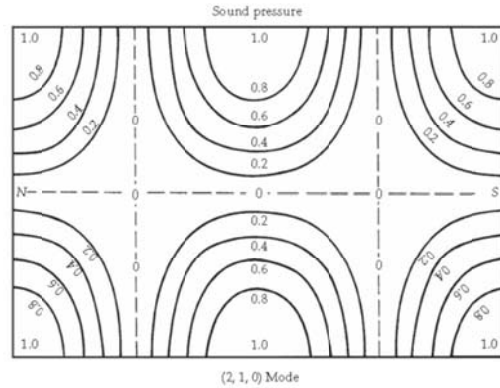
Σχήμα 8.2(γ) Εφαπτομενικό στάσιμο κύμα (2,1,0)

Σχήμα 8.2(δ) Πλάγιο στάσιμο κύμα

Στο σχήμα 8.3 φαίνονται οι ισοφασικές επιφάνειες στο επίπεδο x-y των εραπτομενικών στάσιμων κυμάτων (3,0,0) και (2,1,0) όπως προσομοιώνονται σε προγραμματιστικό περιβάλλον, χρησιμοποιώντας την εξίσωση του ηχητικού πεδίου σε παραλληλεπίπεδο δωμάτιο. Οι ισοφασικές επιφάνειες δείχνουν τη μεταβολή του ηχητικού πεδίου στο χώρο.



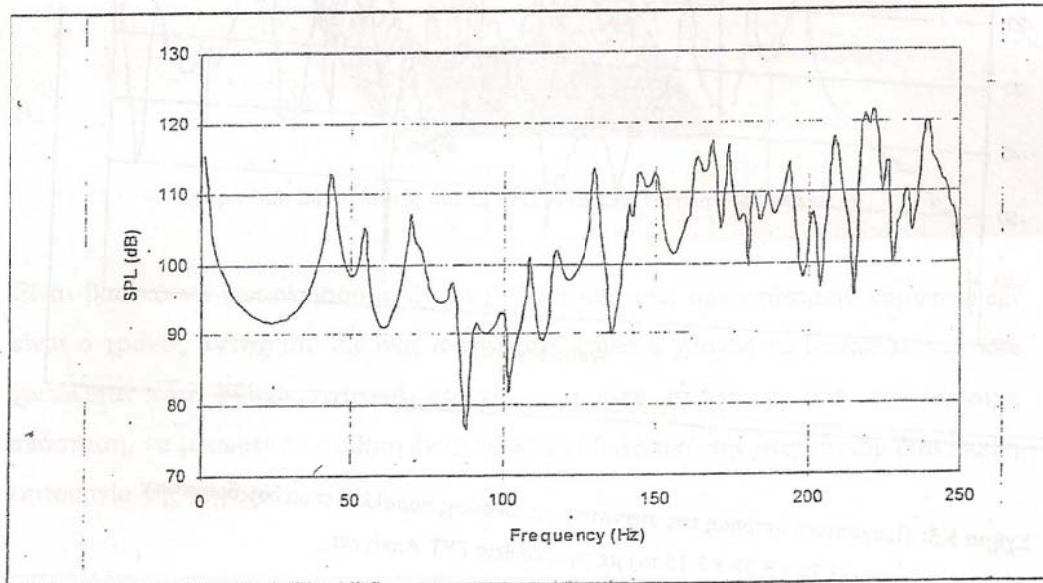
Σχήμα 8.3 (α) Ισοφασικές επιφάνειες για το στάσιμο κύμα (3,0,0)



Σχήμα 8.3 (β) Ισοφασικές επιφάνειες για το στάσιμο κύμα (2,1,0)

8.4 Συχνотική απόκριση μικρού κλειστού χώρου

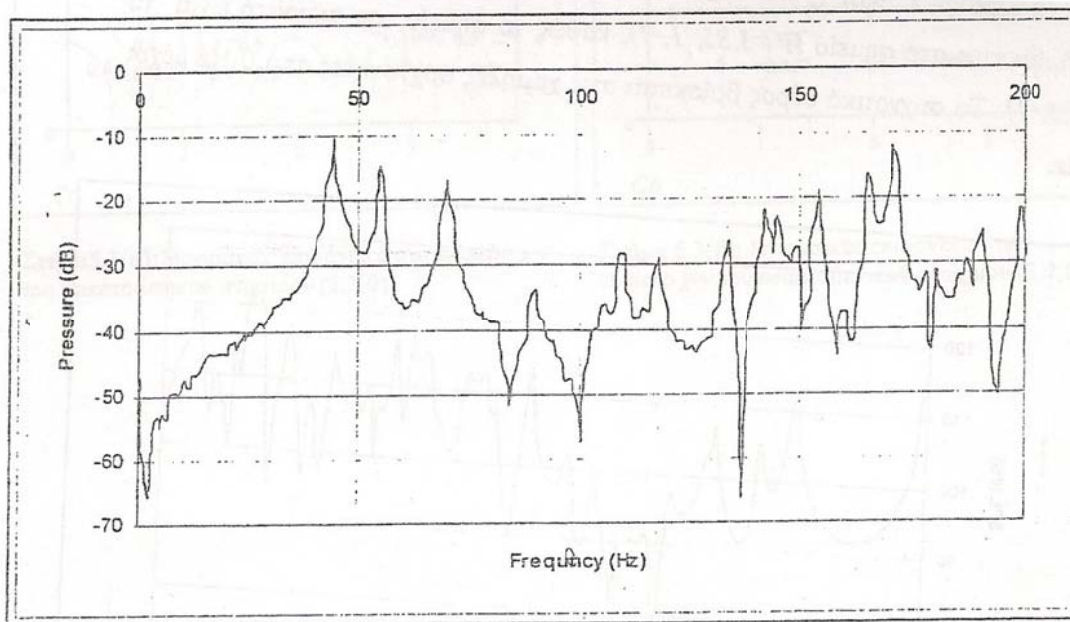
Μια άλλη χρήσιμη γραφική παράσταση που μας παρέχει η μελέτη βάσει της κυματικής θεωρίας είναι η συχνотική απόκριση ενός κλειστού χώρου. Αυτή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (8.10), αλλάζοντας τη συχνότητα για μια συγκεκριμένη θέση της πηγής και του ακροατηρίου. Παρακάτω φαίνεται η συχνотική απόκριση ενός παραλληλεπίπεδου δωματίου με ανακλαστικές επιφάνειες διαστάσεων $3.95m \times 2.38m \times 3.15m$ (M x Y x Π). Η ηχητική πηγή βρίσκεται στο σημείο Π(3.85, 1, 1) και το σημείο του ακροατή είναι το Α(1, 1.5, 1). Η συχνотική απόκριση του χώρου υπολογίζεται για το εύρος μεταξύ 0Hz και 250 Hz.



Σχήμα 8.4 Συχνοτική απόκριση κλειστού χώρου διαστάσεων $3.95m \times 2.38m \times 3.15m$ (M x Y x Π) για εύρος 0-250Hz μετά από προσομοίωση

Στο σχήμα 8.4 εμφανίζονται ιδιοσυχνότητες που αντιστοιχούν σε όλα τα είδη των στάσιμων κυμάτων. Από το σχήμα φαίνονται οι ιδιοσυχνότητες του δωματίου στα: 43.42Hz αξονικό (1,0,0), 54.44Hz αξονικό (0,0,1), 69.64Hz εφαπτομενικό (1,0,1), 86.84Hz αξονικό (2,0,0), 90.31Hz εφαπτομενικό (0,1,1), 100.21Hz πλάγιο (1,1,1) κ.ο.κ.

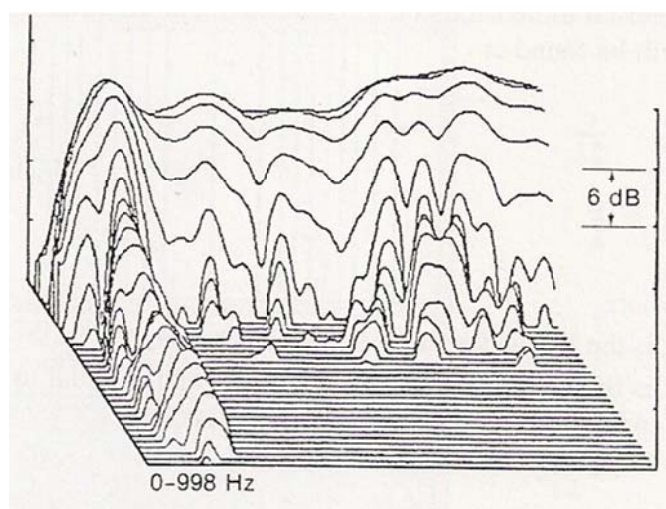
Στην πραγματικότητα, η συχνοτική απόκριση του δωματίου (οποιοδήποτε σχήματος) γίνεται μέσω ηχητικών μετρήσεων με τη χρήση ενός FFT (Fast Fourier Transform) αναλυτή, ο οποίος υπολογίζει τη συχνοτική απόκριση του δωματίου. Μια πραγματική μέτρηση για το παραπάνω δωμάτιο στο οποίο έγινε προσομοίωση φαίνεται στο σχήμα 8.5. Το συχνοτικό εύρος κυμαίνεται από 0Hz μέχρι 200Hz.



Σχήμα 8.5 Συχνотική απόκριση κλειστού χώρου διαστάσεων $3.95m \times 2.38m \times 3.15m$ (M x Y x Π) για εύρος 0-200Hz μετά από μετρήσεις. Ο άξονας y είναι σε λογαριθμική διαβάθμιση (dB_{SPL})

8.5 Ρυθμός πτώσης στάσιμων κυμάτων (Modal Decay Rate)

Σε ένα μικρό δωμάτιο με μεγάλη απορρόφηση (dead room), όπως για παράδειγμα ένα μέσο studio με χώρο ελέγχου (control room) και χώρο ακρόασης (listening room) συνήθως ποτέ δεν είμαστε μακριά από την επιρροή του απευθείας ήχου της πηγής. Η εξίσωση του χρόνου αντήχησης έχει υπολογιστεί για συνθήκες οι οποίες επικρατούν μόνο σε αντηχητικά πεδία. Υπό αυτή τη γωνία, η έννοια του χρόνου αντήχησης δεν είναι εφαρμόσιμη σε μικρά και σχετικά πολύ απορροφητικά δωμάτια. Υπάρχει όμως μια ποσότητα εφάμιλλη αυτής που μετράται σε μεγάλους κλειστούς χώρους. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται ρυθμός πτώσης του στάσιμου κύματος (mode decay rate) και απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6 Ρυθμός πτώσης στάσιμου κύματος στα 125Hz

Είναι βασικό να κατανοήσουμε ότι ο ρυθμός μείωσης των στάσιμων κυμάτων δεν είναι ο χρόνος αντήχησης. Αυτό γιατί ο χρόνος αντήχησης αναφέρεται στην πτώση ολόκληρου του αντηχητικού πεδίου, εν αντιθέσει με το ρυθμό πτώσης στάσιμου κύματος, ο οποίος είναι η πτώση μετρούμενη σε dB/s ενός συγκεκριμένου στάσιμου κύματος. Κατ' επέκταση, κάθε στάσιμο κύμα έχει το δικό του ρυθμό μείωσης.

Η σχέση που συνδέει το ρυθμό πτώσης με το χρόνο αντήχησης είναι $decay\ rate = 60/RT_{60}$. Αν για παράδειγμα $RT_{60} = 0.5s$, τότε $decay\ rate = 120\ dB/s$.

8.6 Στάθμη πίεσης σε μικρό κλειστό χώρο με ανομοιογενές αντηχητικό πεδίο (T. Schultz Equation)

Η εξίσωση που δίνει τη στάθμη ηχητικής πίεσης μέσα σε ένα μικρό δωμάτιο είναι:

$$L_p = L_W - 10 \log r - 5 \log V - 3 \log f + 25 \text{ (dB)} \quad (8.17)$$

όπου:

L_W : η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής

r : η απόσταση από την πηγή (m)

V : ο όγκος του δωματίου (m^3)

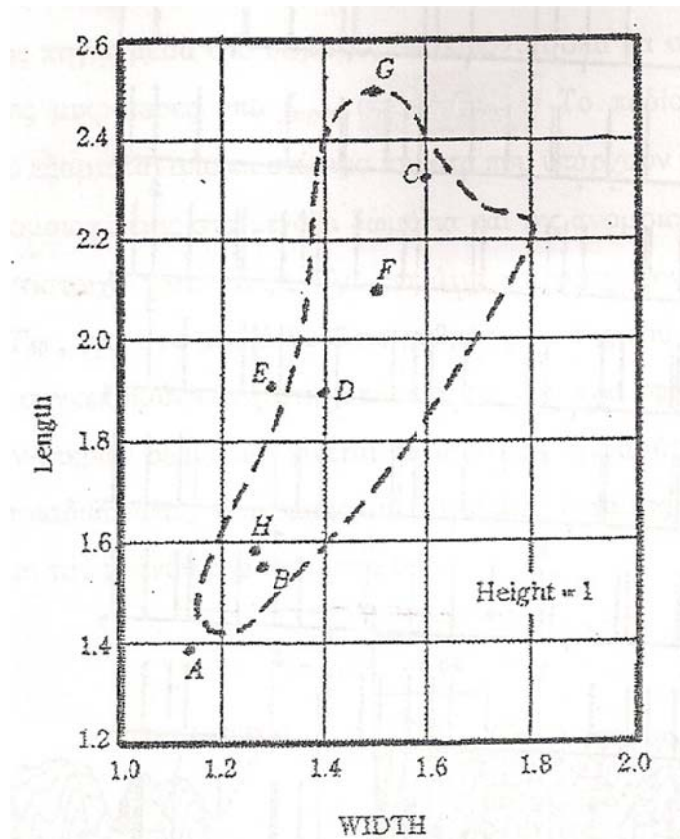
f : η συχνότητα (Hz)

L_p : η στάθμη ηχητικής πίεσης

8.7 Βέλτιστες διαστάσεις για ένα παραλληλεπίπεδο χώρο

Για το σχεδιασμό ενός παραλληλεπίπεδου χώρου πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν πως πρέπει όσο το δυνατόν τα στάσιμα κύματα να είναι ισοκαταναμημένα συχνοτικά, ώστε το ηχητικό πεδίο να είναι το δυνατότερο ομοιόμορφο. Σα μια μικρή προσέγγιση μελετάται η συχνοτική κατανομή των αξονικών στάσιμων κυμάτων αγνοώντας τα εφαπτομενικά και τα πλάγια. Αυτά είναι άλλωστε τα σημαντικότερα, επειδή φέρουν τη μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια.

Διάφοροι ερευνητές εκφράζουν τη δική τους άποψη για τη βέλτιστη αναλογία των διαστάσεων ενός δωματίου. Ο Bolt δίνει τις βέλτιστες αναλογίες ενός παραλληλεπίπεδου χώρου, ο οποίος έχει την ηπιότερη συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες σύμφωνα με το διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 8.7. Η περιοχή που ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές ονομάζεται «περιοχή Bolt».

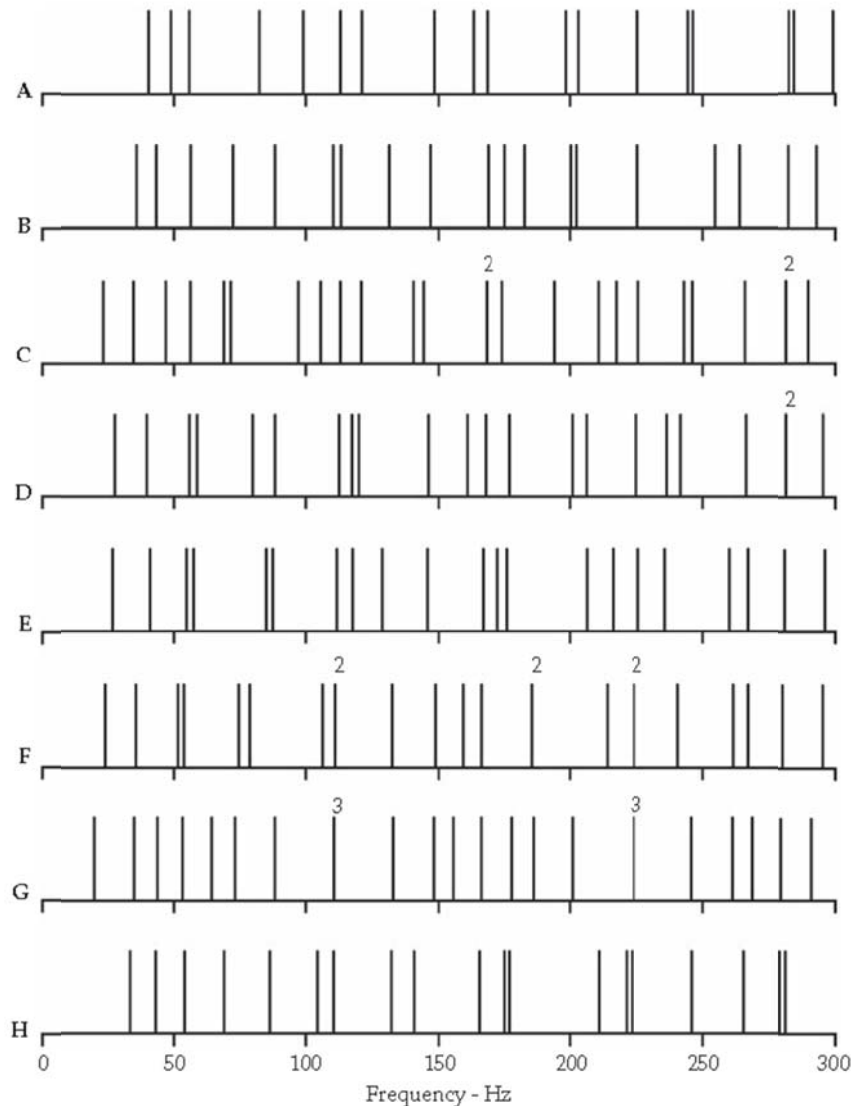


Σχήμα 8.7 Διάγραμμα Bolt: προτεινόμενες αναλογίες διαστάσεων μικρών χώρων για την ομοιόμορφη κατανομή των στάσιμων κυμάτων

Παρακάτω υπάρχει ένας πίνακας που συνοψίζει τους λόγους άλλων ερευνητών:

Ευρετής		Ύψος	Πλάτος	Μήκος	Διάγραμμα Bolt
Sepmeyer	A	1.00	1.14	1.39	Όχι
	B	1.00	1.28	1.54	Ναι
	C	1.00	1.60	2.33	Ναι
Louden	D	1.00	1.40	1.90	Ναι
	E	1.00	1.30	1.90	Όχι
	F	1.00	1.50	2.50	Ναι
Volkmann	G	1.00	1.50	2.50	Ναι
2:3:5					
Boner	H	1.00	1.26	1.59	Ναι
$1: 2^{1/3}: 4^{1/3}$					

Πίνακας 8.1: Προτεινόμενοι λόγοι διαστάσεων ενός παραλληλεπίπεδου δωματίου



Σχήμα 8.8 Συχνοτική κατανομή των στάσιμων κυμάτων μέχρι τα 300Hz για χώρους με αναλογίες διαστάσεων όπως περιγράφονται στον πίνακα 8.1. Τα νούμερα στο διάγραμμα αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των στάσιμων κυμάτων που συμπίπτουν συχνοτικά. Το ύψος του δωματίου είναι περίπου 3m.

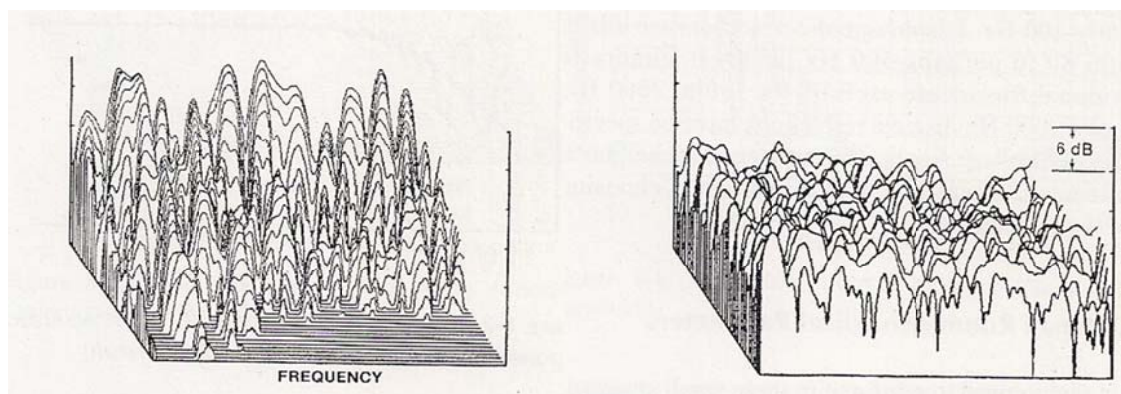
8.8 Σύγκριση μικρών και μεγάλων χώρων και σχόλια

(α) Στάσιμα κύματα υπάρχουν στα μεγάλα δωμάτια όπως και στα μικρά. Ωστόσο, ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων στα μεγάλα δωμάτια είναι τόσο μεγάλος ώστε η κατανομή του ηχητικού πεδίου να είναι ομοιόμορφη. Αντιθέτως, στα μικρά δωμάτια για την ίδια συχνότητα της ηχητικής πηγής υπάρχει μικρός αριθμός στάσιμων κυμάτων.

(β) Το ηχητικό πεδίο στα μεγάλα δωμάτια είναι ομοιόμορφο σχεδόν σε όλα τα σημεία του δωματίου, καθώς ακόμη και στις χαμηλές συχνότητες, πολλά στάσιμα κύματα συνδράμουν στη δημιουργία του πεδίου. Η ηχητική ενέργεια φέρεται από πολλά στάσιμα κύματα. Στα μικρά δωμάτια, στις χαμηλές συχνότητες υπάρχει μικρός αριθμός στάσιμων κυμάτων (π.χ 1, 4, κλπ.) με αποτέλεσμα το πεδίο να είναι ανομοιογενές (διαφορετικό στη μέση και στην άκρη του δωματίου). Αν $f_{πηγής}$ η

συχνότητα της πηγής μέσα στο δωμάτιο, εντός του δωματίου διεγείρονται όλα τα στάσιμα κύματα με ιδιοσυχνότητες μικρότερες της ($f_n \leq f_{πηγής}$). Το πεδίο έχει χωρική κατανομή που εξαρτάται από τα στάσιμα κύματα που υπάρχουν μέσα στο δωμάτιο.

(γ) Εξαιτίας της ομοιογένειας στα μεγάλα δωμάτια και της ανομοιογένειας στα μικρά, προκύπτει αντίστοιχα ότι τα μεγάλα δωμάτια χαρακτηρίζονται από το χρόνο αντήχησης, ενώ τα μικρά δωμάτια χαρακτηρίζονται από το ρυθμό πτώσης του στάσιμου κύματος για συγκεκριμένη συχνότητα. Η διαφορά αυτή μεταξύ μεγάλων και μικρών δωματίων γίνεται περισσότερο εμφανής παρατηρώντας τα παρακάτω τρισδιάστατα διαγράμματα.



Σχήμα 8.9(α) Ρυθμός πτώσης στάσιμων κυμάτων σε μικρό δωμάτιο χωρίς έντονο αντηχητικό πεδίο

Σχήμα 8.9(β) Μείωση αντήχησης σε μεγάλο δωμάτιο με έντονο αντηχητικό πεδίο

Στο σχήμα 8.9(α) φαίνεται το τρισδιάστατο διάγραμμα για ένα μικρό χώρο, χωρίς αντηχητικό πεδίο αλλά με στάσιμα κύματα. Φαίνονται καθαρά τα στάσιμα κύματα, το καθένα από τα οποία έχει το δικό του ρυθμό πτώσης. Οι υψηλότερες συχνότητες αποσβένουν γρηγορότερα από τις χαμηλές που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες του δωματίου. Στο σχήμα 8.9(β) φαίνεται το τρισδιάστατο διάγραμμα για ένα μεγάλο χώρο με έντονο αντηχητικό πεδίο. Όπως βλέπουμε, το πεδίο είναι ομοιόμορφο (δεν υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις της στάθμης όπως τα μικρά δωμάτια). Το ηχητικό πεδίο αποσβένει ομοιόμορφα σε όλο το συχνοτικό εύρος του με ρυθμό που αντιστοιχεί στο χρόνο αντήχησης του δωματίου.

Παρακάτω παρατίθεται ένας συνοπτικός πίνακας με βάση τη σύγκριση των μεγάλων και μικρών χώρων:

Παράμετρος	Μικρός χώρος	Μεγάλος χώρος
Θεωρία	Κυματική ακουστική	Γεωμετρική ακουστική
Όγκος	Μικρός (Διαστάσεις Παρόμοιες με μήκος κύματος των χαμηλών ακουστικών συχνοτήτων)	Μεγάλος
Πτώση ηχητικού πεδίου	Ρυθμός πτώσης στάσιμων κυμάτων	Χρόνος αντήχησης
Ηχητικό πεδίο	Ανομοιόμορφο (Συντονισμός: κορυφές και κοιλίες)	Ομοιόμορφο
Ενέργεια του ηχητικού πεδίου	Η ηχητική ενέργεια φέρεται από συγκεκριμένα στάσιμα σε συγκεκριμένες συχνότητες	Ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και τυχαία διεύθυνση της διάδοσης του ήχου

Πίνακας 8.2: Πίνακας σύγκρισης μικρών και μεγάλων χώρων

8.9 Σχεδιασμός χώρων

8.9.1 Ακουστική των χώρων ηχογραφήσεων (studios)

Στους παρακάτω πίνακες 8.3. και 8.4 φαίνονται διάφορα χαρακτηριστικά μικρών, μεσαίων και μεγάλων χώρων ηχογραφήσεων:

Διαστάσεις Studio				
	Λόγος	Μικρό Studio	Μεσαίο Studio	Μεγάλο Studio
Ύψος	1.00	2.44	3.66	4.88
Πλάτος	1.28	3.12	4.68	6.25
Μήκος	1.54	3.75	5.64	7.51
Όγκος	-	28.55	96.60	229.05

Πίνακας 8.3: Χαρακτηριστικές διαστάσεις χώρων ηχογραφήσεων

	Μικρό Studio	Μεσαίο Studio	Μεγάλο Studio
Ο αριθμός των αξονικών ιδιοσυχνοτήτων κάτω των 300Hz	18	26	33
Χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα αξονικού τρόπου ταλάντωσης	45.9	30.6	22.9
Μέση απόσταση ιδιοσυχνοτήτων	14.1	10.4	8.4
Συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαγώνιο του δωματίου	31.6	21	15.8
Θεωρητικός χρόνος αντήχησης	0.3	0.5	0.7
Πλάτος ιδιοσυχνότητας	7.3	4.4	3.1

Πίνακας 8.4: Ενδεικτικές διαστάσεις και συγκρίσεις διαφόρων studio ηχογραφήσεων

8.9.2 Ακουστική των δωματίων ελέγχου (control rooms)

Υπάρχουν δυο εμφανείς τεχνοτροπίες στο σχεδιασμό των δωματίων ελέγχου:

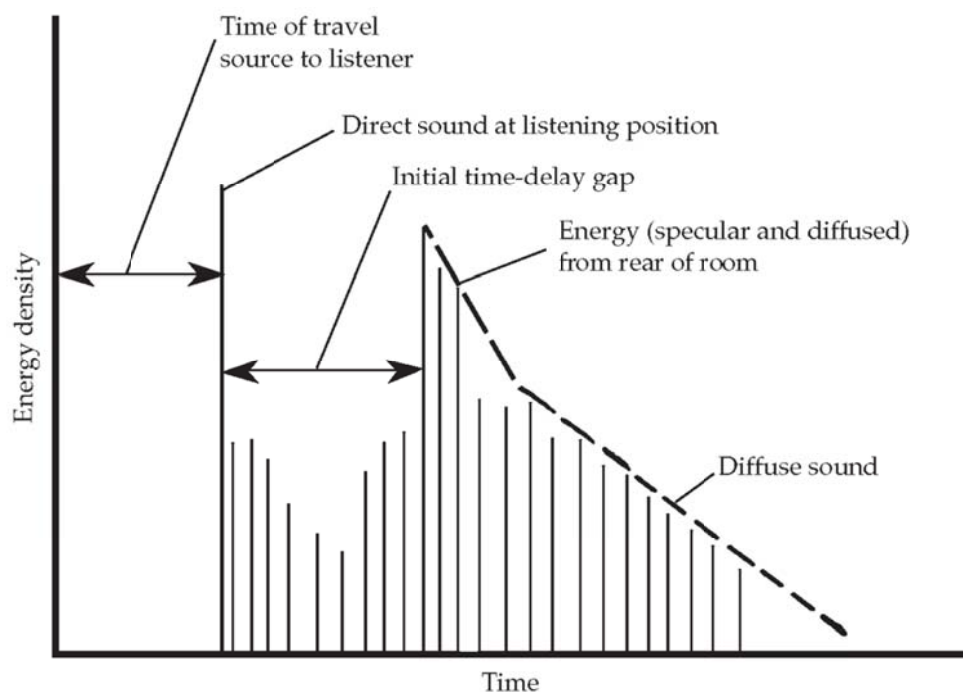
A) East Lake

Σύμφωνα με αυτή την τεχνοτροπία, το δωμάτιο είναι ανακλαστικό μπροστά και απορροφητικό πίσω.

B) Live End Dead End - LEDE (Don & Chip Davis, Peter D'Antonio)

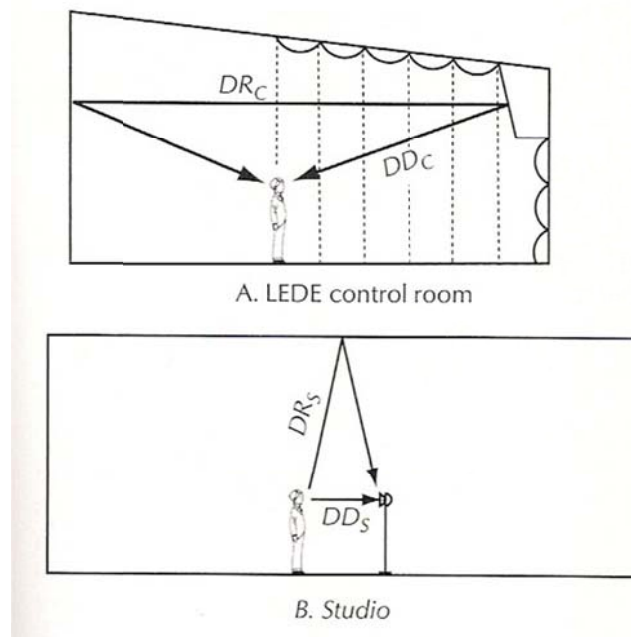
Ο Beranek, ο οποίος έκανε μελέτες σε διάφορες μουσικές αίθουσες σε ολόκληρο τον κόσμο, διαπίστωσε μερικές τεχνικές ομοιότητες μεταξύ των καλύτερων ακουστικά αιθουσών. Μια από αυτές τις ιδιότητες είναι το *αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης (ITD initial time delay gap)*, το οποίο ορίζεται ως ο χρόνος ανάμεσα στην άφιξη του απευθείας ήχου σε μια συγκεκριμένη θέση και της άφιξης των πρώτων ανακλάσεων.

Παρατήρησε πως οι αίθουσες που χαρακτηρίζονταν από υψηλή ακουστική ποιότητα είχαν όλες έναν καλά καθορισμένο IDT, περίπου 20ms. Στο σχήμα 8.10 φαίνεται γραφικά το αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης:



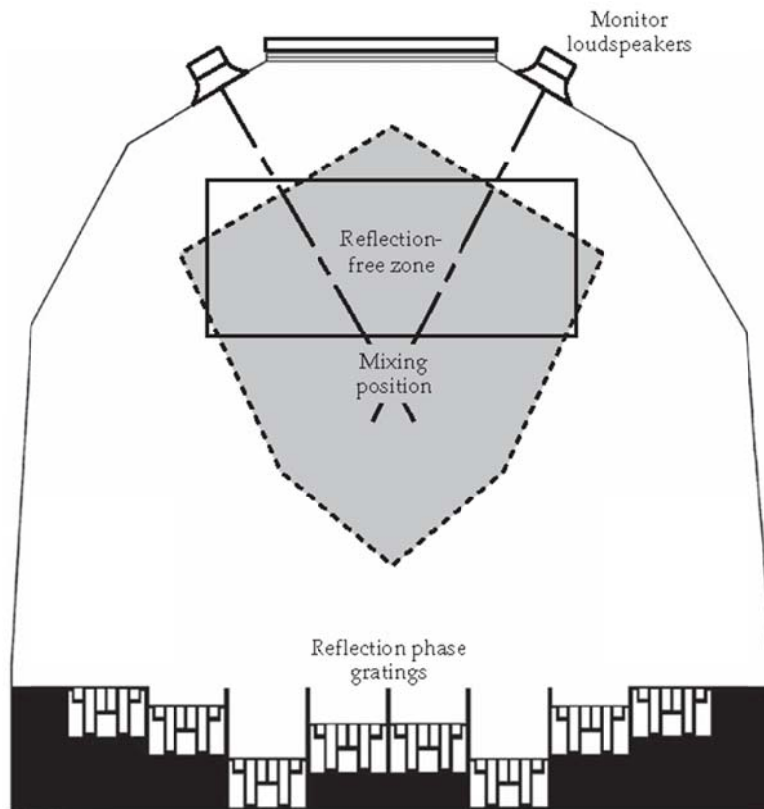
Σχήμα 8.10 Σχηματικός προσδιορισμός του αρχικού χρονικού κενού καθυστέρησης (initial time delay gap)

Οι Don & Chip Davis και Peter D'Antonio πειραματίστηκαν στην κατασκευή ενός control room οδηγούμενοι από το αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης. Συνοπτικά οι σκέψεις που έκαναν είναι οι εξής:

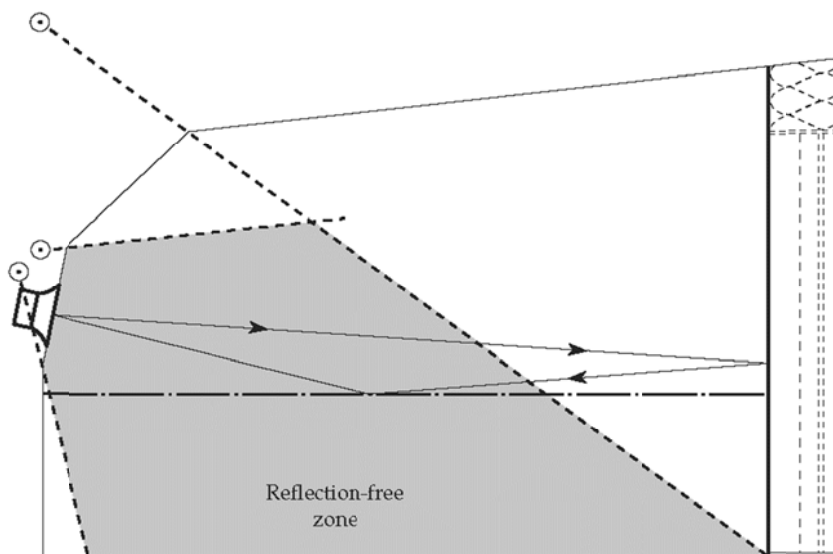


Σχήμα 8.11 Διαδρομές απευθείας σήματος και πρώτων ανακλάσεων σε ένα LEDE δωμάτιο ελέγχου (A) και σε ένα δωμάτιο ηχογραφήσεων (B)

Έστω ότι βρίσκεται κάποιος στην αίθουσα ηχογραφήσεων και τραγουδάει. Στο μικρόφωνο φτάνει ο απευθείας ήχος διανύοντας μια μικρή διαδρομή και λίγο αργότερα ο ανακλώμενος ήχος από το πάτωμα, το ταβάνι και τους τοίχους. Ο χρόνος άφιξης αυτών των ανακλάσεων καθορίζεται από τη γεωμετρία της συγκεκριμένης αίθουσας ηχογράφησης. Ο ηκολήπτης σε μια συμβατική αίθουσα ελέγχου (control room) δεν μπορεί να ακούσει το αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης της αίθουσας ηχογραφήσεων, γιατί επικαλύπτεται από τις πρώτες ανακλάσεις της αίθουσας ελέγχου. Με άλλα λόγια, η κάθε αίθουσα έχει παρόμοιο αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης. Για να ακουστούν ευκρινώς οι πρώτες ανακλάσεις της αίθουσας ηχογράφησης (αυτό είναι επιθυμητό γιατί αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούμε το συγκεκριμένο studio, λόγω της συγκεκριμένης αυτής ακουστικής του), πρέπει οι πρώτες ανακλάσεις της αίθουσας ελέγχου να έρχονται αργότερα, ώστε να δημιουργείται 'χρονικό κενό', να μεγαλώσει δηλαδή το αρχικό χρονικό κενό καθυστέρησης της αίθουσας ελέγχου. Αυτό επιτυγχάνεται εξαλείφοντας τις πρώτες ανακλάσεις, κάνοντας την αίθουσα ελέγχου απορροφητική από μπροστά. Επειδή όμως η αίθουσα ελέγχου πρέπει να είναι λίγο 'ζωντανή', η πίσω πλευρά της αίθουσας γίνεται ανακλαστική, ενώ τοποθετούνται επίσης και διαχυτές (diffusers). Οι αίθουσες ελέγχου που είναι απορροφητικές μπροστά και ανακλαστικές πίσω ονομάζονται LEDE (Live End Dead End). Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο μιας τέτοιας αίθουσας:



Σχήμα 8.12 Κάτοψη μιας αίθουσας ελέγχου ενός LEDE studio



Σχήμα 8.13 Τομή μιας αίθουσας ελέγχου ενός LEDE studio

8.10 Καταληπτότητα του λόγου (speech intelligibility)

Η κατανόηση του λόγου μέσα σε ένα χώρο είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την υψηλή ακουστική ποιότητά του. Οι ακουστικοί σχεδιαστές μπορούν να προβλέψουν την καταληπτότητα του λόγου μέσα σε μια αίθουσα καθώς και να τη μετρήσουν με ακρίβεια.

Παράμετροι που επηρεάζουν την κατανόηση του λόγου:

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N)
2. Χρόνος αντήχησης (RT_{60})
3. Απόσταση από την πηγή
4. Μη ευθυγραμμισμένες πηγές
5. Ανακλάσεις που προέρχονται από αποστάσεις μικρότερες του $1ft$
6. Ανακλάσεις οι οποίες είναι καθυστερημένες (πάνω από $100ms$) και φέρουν υψηλότερη ενέργεια από την ενέργεια κοντά σε αυτές

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες είναι προβλέψιμοι με αρκετή ακρίβεια στο στάδιο σχεδιασμού μιας αίθουσας. Οι τρεις τελευταίοι παράγοντες χαρακτηρίζονται ως ανωμαλίες εξαιτίας παραβλέψεων ή λαθών.

Η πρόβλεψη για την καταληπτότητα λόγου μπορεί να γίνει με την Απώλεια Άρθρωσης των Συμφώνων (Articulation Loss of Consonants - % AL_{CONS}) μέσω μιας εξίσωσης που πρότεινε το 1971 ο M.A. Reutz:

$$\% AL_{CONS} = \frac{656 D_2^2 RT_{60}(N)}{V Q M}, \quad D_2 < D_L \quad (8.18)$$

$$\% AL_{CONS} = 9 RT_{60}, \quad D_2 > D_L \quad (8.19)$$

όπου:

D_2 : η απόσταση του ηχείου από τον πιο απομακρυσμένο ακροατή (m)

RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης (s)

V : ο όγκος δωματίου (m^3)

N : ο λόγος της στάθμης ηχητικής ισχύος που προκαλεί το L_D (L_W) προς τη στάθμη ηχητικής ισχύος όλων των πηγών εκτός αυτών που προκαλούν το L_W

M : ο συντελεστής D_C (συνήθως επιλέγεται 1 εκτός ειδικών περιπτώσεων)

$D_L = 3.16D_C$

Αναλόγως με την τιμή του ποσοστού AL_{CONS} :

- Για τιμή κάτω από 10% η κατανόηση είναι πολύ καλή
- Για τιμή ανάμεσα 10% - 15% η κατανόηση είναι καλή
- Για τιμή πάνω από 15% η κατανόηση είναι ικανοποιητική μόνο για καλούς ακροατές – ομιλητές – μηνύματα

Η εξίσωση (8.18) μπορεί να μετασχηματιστεί στις ακόλουθες χρήσιμες εξισώσεις:

$$\max D_2 \text{ για } 15\% AL_{CONS} = \sqrt{\frac{15 V Q M}{656 RT_{60}^2(N)}} \quad (8.20)$$

$$\max RT_{60} \text{ για } 15\% AL_{CONS} = \sqrt{\frac{15 V Q M}{656 D_2^2(N)}} \quad (8.21)$$

$$\min V \text{ για } 15\% AL_{CONS} = \frac{656 D_2^2 RT_{60}(N)}{15 Q M} \quad (8.22)$$

$$\min Q \text{ για } 15\% AL_{CONS} = \frac{656 D_2^2 RT_{60}(N)}{15 V M} \quad (8.23)$$

Άσκηση

Δωμάτιο σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου έχει διαστάσεις 7 x 2.5 x 4.5m

α) Να υπολογιστούν οι 6 χαμηλότερες συχνότητες συντονισμού.

β) Να υπολογιστεί η συχνότητα αποκοπής f_c και να υπολογιστεί ο αριθμός στάσιμων κυμάτων μέχρι τη συχνότητα αυτή.

γ) Να υπολογιστεί ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων στην οκτάβα των 500Hz.