



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΜΟΥΡΤΖΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Το αντικείμενο της Ηλεκτροακουστικής

Όπως φαίνεται και από τον τίτλο, το αντικείμενο της Ηλεκτροακουστικής προκύπτει από τον συνδυασμό δύο επιστημών, της ακουστικής και της ηλεκτρολογίας. Έτσι, ο ορισμός της Ηλεκτροακουστικής μπορεί να δοθεί σαν: «η επιστήμη που συνδυάζει την **ακουστική** με την **ηλεκτρολογία** και έχει σαν αντικείμενο την **μελέτη, σχεδιασμό και κατασκευή συστημάτων** που επιτρέπουν την **παραγωγή, διάδοση, ηχογράφηση / αποθήκευση, αναπαραγωγή, μέτρηση και βιομηχανική χρήση του ήχου**». Οι παραπάνω εφαρμογές συνήθως καλύπτονται από ειδικές συσκευές και συστήματα τα οποία και υλοποιούν έναν ή και περισσότερους μετασχηματισμούς από ακουστική σε ηλεκτρική ενέργεια και το αντίθετο, ή ακόμη από μία μορφή ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη, ενώ συχνά τα συστήματα αυτά συνδυάζονται και σε σύνθετα συστήματα ή και εγκαταστάσεις. Σε μία τέτοια σύνθετη εγκατάσταση, οι επιμέρους συσκευές εμφανίζονται σαν υποσυστήματα.

Με βάση τα παραπάνω, η Ηλεκτροακουστική (Η/Α) ασχολείται με τις αρχές λειτουργίας ειδικών συσκευών (υποσυστημάτων) μετατροπής ακουστικής σε ηλεκτρική και ηλεκτρικής σε ακουστική ενέργεια, των λεγομένων ηλεκτροακουστικών μετατροπέων, που στην συνηθέστερη περίπτωση είναι τα **μικρόφωνα** και τα **μεγάφωνα**, καθώς και της βέλτιστης χρήσης και λειτουργίας τους σε σύνθετα συστήματα, δηλαδή στις λεγόμενες **ηχητικές εγκαταστάσεις**. Για την κατανόηση της ακουστικής συμπεριφοράς των υποσυστημάτων αυτών, είναι απαραίτητο στο μάθημα αυτό να δοθούν και οι βασικές γνώσεις ακουστικής που αφορούν τα χαρακτηριστικά των **ηχητικών κυμάτων και πηγών, της ακουστικής των κλειστών χώρων**, καθώς και τα φυσικά **μεγέθη μέτρησης του ήχου**. Δεδομένου ότι σε μία τέτοια συσκευή ο δέκτης είναι συνήθως ένας ακροατής / ακροάτρια, του οποίου το αισθητήριο ακοής λειτουργεί με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά χρονο-συχνοτικής ευαισθησίας, κατά οποία είναι επιθυμητό να βελτιστοποιηθεί και η απόκριση των συσκευών ή της εγκατάστασης, παράγραφοι του μαθήματος ασχολούνται και με την **αντίληψη και ανάλυση του ήχου με βάση τα χαρακτηριστικά ακοής**.

Σημειωτέον ότι πλέον ένα μεγάλο τμήμα των υποσυστημάτων και τεχνικών στην Ηλεκτροακουστική καλύπτεται από ψηφιακά συστήματα και βασίζεται σε μεθόδους Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων. Τα θέματα αυτά καλύπτονται από το μάθημα της Ψηφιακής Τεχνολογίας Ήχου.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το αντικείμενο της Ηλεκτροακουστικής συγγενεύει και με άλλες επιστήμες που παραδοσιακά καλύπτονται σε άλλες Σχολές και Τμήματα, όπως για

παράδειγμα η Κτιριακή Ακουστική (σε Τμήματα Πολιτικών Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων), η Ακουστική Κινητήρων και Μηχανικών Συστημάτων (σε Τμήματα Μηχανολόγων Μηχανικών), η Υδροακουστική, η Ακουστική Μουσικών Οργάνων (σε Τμήματα Μουσικών Σπουδών), η ηχοληψία (συνηθέστερα σε κατώτερες επαγγελματικές Σχολές), κ.α.

1.2 Ιστορική αναδρομή και σημασία

1.2.1 Η εξέλιξη της Ηλεκτροακουστικής

Η επιστήμη της Ηλεκτροακουστικής έχει μία ιστορία 100 και πλέον χρόνων, αρχίζοντας ουσιαστικά από την ανακάλυψη του τηλεφώνου από τον Graham Bell το 1876 και την εξέλιξη του (μηχανο-ακουστικού) φωνόγραφου με αποτύπωση της κυματομορφής σε επιφάνεια κυλίνδρου από τον Thomas Edison, έναν χρόνο αργότερα. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1887, ο Emile Berliner ανακάλυψε το (μηχανο-ακουστικό) γραμμόφωνο, με αποτύπωση της κυματομορφής σε επιφάνεια δίσκου. Στις πρώτες δεκαετίες του 1900, ανακαλύφθηκαν και εξελίχθηκαν τα μεγάφωνα και τα μικρόφωνα, ενώ η σημαντική εμπορική επέκταση της χρήσης ηλεκτροακουστικών διατάξεων δόθηκε με την καθιέρωση του ραδιοφώνου, στα μέσα της δεκαετίας του '20 και των ηλεκτροφώνων με δίσκους 78 στροφών / λεπτό (rpm).

Στην δεκαετία του '30 άρχισαν τα πρώτα πειράματα για την στερεοφωνική κωδικοποίηση / αναπαραγωγή ήχου και ταυτόχρονα άρχισε και η υλοποίηση ηχητικών εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας σε κλειστούς και ανοιχτούς χώρους. Μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο, αρχίζει και η «σύγχρονη» εποχή της Ηλεκτροακουστικής με την εμφάνιση δίσκων «μακράς διάρκειας» (LP) των 33 ½ rpm, την ανάπτυξη προσιτών - στον μέσο καταναλωτή-συστημάτων ηχητικής αναπαραγωγής για το σπίτι και την δραματική εξάπλωση και χρήση της ηχογραφημένης μουσικής σε δίσκους, ειδικά σε ακροατές νεότερης ηλικίας. Η εξάπλωση αυτή έγινε πιο έντονη στην δεκαετία του '60, όπου η ανάπτυξη του ραδιοφώνου FM και του κασετοφώνου, επέτρεψε την ακρόαση μουσικής από φορητά συστήματα μικρού όγκου, τόσο στο σπίτι όσο και έξω από αυτό (π.χ. σε αυτοκίνητα).

Στην δεκαετία του '70 άρχισαν τα πρώτα πειράματα στην ψηφιακή ηχογράφηση και επεξεργασία, τα οποία στις αρχές της δεκαετίας του '80 κατέληξαν στην παρουσίαση του ψηφιακού συμπαγούς δίσκου (digital audio Compact Disc, CD-DA). Η τεχνολογία αυτή καθιερώθηκε πλήρως στην δεκαετία του '90, όπου έκαναν την εμφάνισή τους τόσο η ραδιοφωνική εκπομπή ψηφιακού ήχου (Digital Audio Broadcasting, DAB), όσο και η ανάπτυξη τεχνικών συμπίεσης ψηφιακών ηχητικών δεδομένων για μετάδοσή τους από τηλ/κά και υπολογιστικά δίκτυα (τα οποία καθιερώθηκαν από τα πρότυπα MPEG, όπως π.χ. στα μουσικά δεδομένα τύπου .mp3). Στα τέλη της δεκαετίας του '90 έκανε την εμφάνισή του και ο δίσκος DVD (Digital Versatile Disc), στον οποίο και κωδικοποιείται πολυκαναλικός ήχος κυρίως για συνδυασμό με εικόνα ψηφιακού video (πρότυπο DVD-Video). Η υποστήριξη του ψηφιακού ήχου σε οικιακές όσο και σε επαγγελματικές

εφαρμογές, είχε σαν αποτέλεσμα την εξέλιξη ειδικών συσκευών ψηφιακής επεξεργασίας και αναπαραγωγής ήχου, οι οποίες οδηγούν σε μία πλήρως ψηφιακή ηλεκτρονική αλυσίδα ηχητικής αποθήκευσης, διανομής και αναπαραγωγής, ενώ αντίστοιχες τάσεις παρουσιάζονται και σε εφαρμογές προσωπικών υπολογιστών. Μία συνοπτική καταγραφή των εξελίξεων αυτών δίνεται και στον **Πίνακα 1.1**.

Έτος	Εφευρέτης / Εταιρεία	Τεχνολογία / Μέθοδος
1876	Graham Bell	τηλέφωνο
1877	Thomas Edison	φωνόγραφος (κυλίνδρου)
1887	Emile Berliner	γραμμόφωνο (δίσκου)
1888	Oberlin Smith	μαγνητική ηχογράφηση
1894	U.S. Gramophone Co.	δίσκος γραμμόφωνου (παραγωγή)
1898	Oliver Lodge	μεγάφωνο (πρωτότυπο)
1907	DeForest	ενισχυτής λυχνίας
1921	Maxfield & Harrison, Bell Labs	ηλεκτροακουστική ηχοληψία
1922	Western Electric	ενισχυτής λυχνίας (παραγωγή)
1922		ραδιόφωνο (A.M.)
1925		δίσκος 78 r.p.m. (S.P.)
1925	Rice και Kellog	μεγάφωνο
1925	Paul Voigt (Gramophone, Columbia)	ηλεκτροακουστικοί δίσκοι
1927	Harry Olson	μικρόφωνο (δυναμικό)
1930	Alen Blumlein (EMI Labs)	στερεοφωνία
1948	Columbia Co.	δίσκος 33 ½ r.p.m. (L.P.)
1955	Aronson	ενισχυτής τρανζίστορ
1956	διάφορες εταιρείες	στερεοφωνικοί δίσκοι L.P.
1961	C.Eilers (F.C.C)	ραδιόφωνο F.M.
	Manfred Schroeder (Bell Labs)	ψηφιακή επεξεργασία ήχου
1963	Philips	κασετόφωνο
1967	N.H.K.	ψηφιακό σύστημα ηχογράφησης σε ταινία
1972	T. Stockham	ψηφιακό σύστημα ήχου σε H/Y
1977	Sony / Philips	ψηφιακός δίσκος ήχου (Digital Audio Disc)
1980	35 κατασκευαστές	ψηφιακός δίσκος CD (τυποποίηση)
1986	Johnston και Branderburg	ψυχοακουστική μέθοδος συμπίεσης ήχου
1991	Fraunhofer	τυποποίηση μεθόδου .mp3 (MPEG-1, layer III)
1989	πρόγραμμα Eureka 147	ψηφιακή ραδιοφωνία (D.A.B.)
1992	οργανισμός ISO/MPEG	τυποποίηση κωδικοποίησης MPEG-1
1995	οργανισμός ISO/MPEG	τυποποίηση πολυκαναλικής κωδικοποίησης MPEG-2
1996	οργανισμός DVD Forum	ψηφιακός δίσκος DVD-Video (τυποποίηση)
1998	Diamond Multimedia	πρώτος φορητός mp3 player
1998	οργανισμός ISO/MPEG	τυποποίηση κωδικοποίησης MPEG-4
1999	Napster	διαδικτυακή πύλη με ελεύθερα αρχεία ήχου .
2000	διάφορες εταιρείες	Blue Ray (και HD-DVD) προτάσεις
2001	Rhapsody, MusicNet, κλπ	συνδρομητική διαδικτυακή διανομή μουσικής
2003	Apple	iTunes (συνδρομητική διανομή μουσικής)
2006		πωλήσεις μουσικής από διαδίκτυο ξεπερνούν πωλήσεις δίσκων
2008	Spotify	συνδρομητική διανομή μουσικής
2011	Amazon	Music cloud (διαδικτυακή πρόσβαση μουσικής)

Πίνακας 1.1: Συνοπτική παρουσίαση των σημαντικών εξελίξεων στην Ηλεκτροακουστική και συγγενικές τεχνολογίες.

1.2.2 Η σημασία της Ηλεκτροακουστικής

Για τον σπουδαστή Ηλεκτρολόγο – Μηχανικό, το μάθημα της Ηλεκτροακουστικής παρουσιάζει την παρακάτω διπλή χρησιμότητα:

(α) το αντικείμενο προσφέρει βασικές γνώσεις που είναι απαραίτητες στην κατανόηση της λειτουργίας πολλών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και διατάξεων τα οποία μεταδίδουν ηχητικά μηνύματα και τα οποία καλύπτονται από άλλα μαθήματα. Επιπλέον προσφέρει έναν συγκερασμό γνώσεων που αποκτήθηκαν σε πολλά άλλα μαθήματα (π.χ. την Φυσική, την Τεχνική Μηχανική, τα Ηλεκτρικά Κυκλώματα, τον Ηλεκτρομαγνητισμό, τα Σήματα και Συστήματα, τις Επικοινωνίες, κ.α.). Αυτό συμβαίνει γιατί από την φύση τους τα Ηλεκτροακουστικά συστήματα βασίζονται σε τμήματα τα οποία είναι ηλεκτρικά, ηλεκτρομαγνητικά, μηχανικά, ακουστικά, αλλά και γιατί τα τμήματα αυτά αναλύονται με κοινή μεθοδολογία, γνωστή από την Ανάλυση Κυκλωμάτων και την Θεωρία Σημάτων και Συστημάτων, ενώ ταυτόχρονα η συνολική λειτουργία της συσκευής θα πρέπει να ικανοποιεί με βέλτιστο τρόπο τις απαιτήσεις της ανθρώπινης επικοινωνίας. Σημαντικό πλεονέκτημα του μαθήματος είναι το γεγονός ότι η ανάλυση των συστημάτων και των εννοιών μπορεί άμεσα να συνδυαστεί με ηχητικά παραδείγματα, έτσι ώστε ο σπουδαστής να αναγνωρίσει με έναν επιπλέον άμεσο τρόπο την σημασία της θεωρίας.

(β) προετοιμάζει τον μελλοντικό μηχανικό για επαγγελματική σταδιοδρομία στους τομείς της Ηλεκτροακουστικής, της Ψηφιακής Τεχνολογίας Ήχου, της Ακουστικής, των Τηλεπικοινωνιών, καθώς και σε άλλους συγγενείς τομείς. Όπως είναι γνωστό, ηλεκτροακουστικές συσκευές και συστήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση τόσο στο οικιακό, όσο και στο επαγγελματικό περιβάλλον. Επιπλέον, τα σύγχρονα συστήματα των προσωπικών υπολογιστών, όλο και περισσότερο χρησιμοποιούν συστήματα ηχείων ή και μικρόφωνα για επικοινωνία με τον χρήστη, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την ψηφιακή επεξεργασία ηχητικών δεδομένων (π.χ. αρχείων ήχου) και την πρόσβαση σε ηχητικά δεδομένα μέσω του Διαδικτύου.

Όλες οι παραπάνω **«οικιακές» εφαρμογές**, εμπíπτουν και καλύπτονται από βιομηχανίες και εταιρείες του τομέα των **«καταναλωτικών ηλεκτρονικών» (consumer electronics)**. Πολλές από τις εταιρείες αυτές κατασκευάζουν ηλεκτρονικές συσκευές (π.χ. ενισχυτές, CD-players), συστήματα ηχείων και μεγάφωνα (χιλιάδες μεγαφώνων κατασκευάζονται ημερησίως διεθνώς), αλλά και παράγουν και λογισμικό κατάλληλο για την επεξεργασία ήχου.

Στην Ελλάδα, υπάρχουν αρκετές εταιρείες (βιοτεχνίες κυρίως) που δραστηριοποιούνται στον σχεδιασμό και την κατασκευή ηχείων και σε μικρότερη κλίμακα, λειτουργούν εταιρείες κατασκευής ενισχυτών και άλλων ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται σε ηχητικά συστήματα. Πέρα από τους παραπάνω τομείς, στον χώρο της Ηλεκτροακουστικής αναπτύσσεται και σχετική δραστηριότητα και σε **«επαγγελματικές» εφαρμογές (professional audio)**. Αυτές καλύπτουν τις περιοχές του σχεδιασμού και κατασκευής επαγγελματικών συσκευών ήχου (ηχείων και ενισχυτών για εγκαταστάσεις, συναυλίες και ομιλίες, συστημάτων επεξεργασίας και ηχοληψίας, κλπ), **της μελέτης για**

την υλοποίηση ηχητικών εγκαταστάσεων (για κλειστούς και ανοιχτούς χώρους, συνεδριακά κέντρα, κέντρα διασκέδασης, ξενοδοχεία, κλπ), της μελέτης και προσομοίωσης ακουστικής κλειστών χώρων (αιθουσών συναυλιών, αιθουσών διαλέξεων, κλπ), στην μελέτη ηχορύπανσης και προστασίας από τον θόρυβο και σε άλλους σχετικούς τομείς. Επιπλέον, αναπτύσσεται ταχύτατα η δραστηριότητα στις περιοχές του υλικού και λογισμικού για ψηφιακές συσκευές ήχου που συχνά εντάσσονται σε τηλεπικοινωνιακά ή υπολογιστικά συστήματα.

1.3 Γενικά χαρακτηριστικά ηχητικών σημάτων και συστημάτων

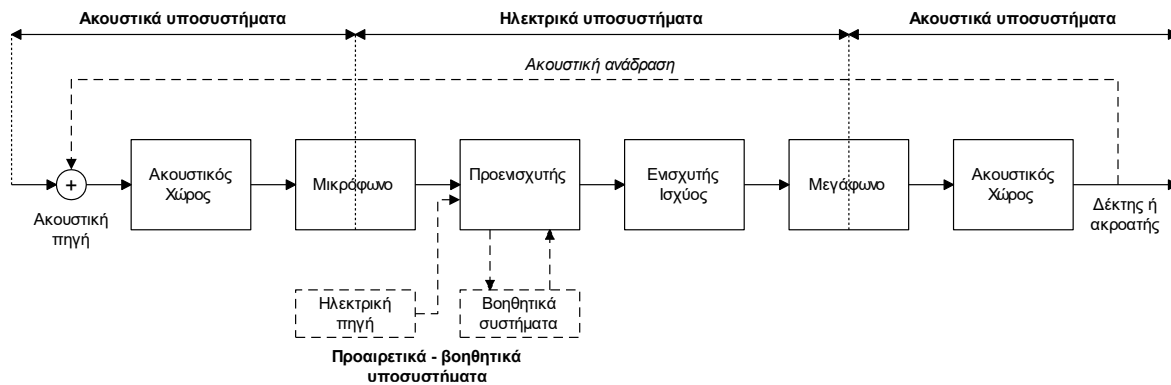
1.3.1 Δομή των ηχητικών συστημάτων

Σε γενικές γραμμές, κάθε ηχητικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί σαν μία διάταξη από επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία λειτουργούν σαν τα γνωστά και από άλλα μαθήματα γραμμικά, χρονικά αμετάβλητα συστήματα, δηλαδή σαν φίλτρα. Στην πράξη, η **συνθήκη της γραμμικής λειτουργίας** μπορεί εύκολα να παραβιαστεί (π.χ. όταν αυξηθεί υπερβολικά το πλάτος του σήματος από το ποτενσιόμετρο ενός προενισχυτή, όπου είτε η βαθμίδα ενίσχυσης, είτε / και τα μεγάφωνα θα ψαλιδίσουν την κυματομορφή του ηχητικού σήματος), αλλά λόγω των ακουστών παραμορφώσεων που παράγονται σε αυτή την περίπτωση και που όπως θα εξηγηθεί παρακάτω είναι ανεπιθύμητες στον ακροατή, ο μηχανικός ήχου ή χρήστης του Η/Α συστήματος, με κατάλληλο σχεδιασμό ή ρυθμίσεις, αποτρέπει ένα τέτοια ενδεχόμενο. Όμοια, για συγκεκριμένες σταθερές ρυθμίσεις, τα υποσυστήματα πρακτικά ικανοποιούν και την **συνθήκη της χρονικά αμετάβλητης λειτουργίας**. Έτσι, εδώ τα Η/Α συστήματα θα προσεγγισθούν σαν Γραμμικά, Χρονικά Αμετάβλητα (ΓΧΑ) συστήματα.

Το ιδιαίτερο γνώρισμα μιας τέτοιας γενικευμένης θεώρησης ενός ηχητικού συστήματος, είναι ότι παρ' όλο ότι αποτελείται από υποσυστήματα που από φυσικής άποψης είναι καθαρά **ηλεκτρικά** (όπως ένας ενισχυτής ή μαγνητόφωνο), καθαρά **ακουστικά** (όπως ένας κλειστός χώρος στον οποίο λειτουργεί μία Η/Α συσκευή), ή **ηλεκτροακουστικά** (μετατρέπουν δηλαδή ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική όπως ένα μικρόφωνο, ή ηλεκτρική σε ακουστική όπως ένα μεγάφωνο), είναι δυνατό να αναλυθεί με **κοινή και γνωστή στον ηλεκτρολόγο μηχανικό μεθοδολογία** (από την Θεωρία Σημάτων & Συστημάτων και την Ανάλυση Κυκλωμάτων). Έτσι, δεδομένου ότι ένα συνηθισμένο Η/Α σύστημα είναι μία ηχητική εγκατάσταση που λειτουργεί σε μία αίθουσα διαλέξεων και **ηλεκτροακουστικά ενισχύει** το ακουστικό σήμα της ομιλίας από τον ομιλητή έτσι ώστε να είναι πλήρως καταληπτό σε όλες τις θέσεις του ακροατηρίου, η δομή του μπορεί να περιγραφεί από την διαδοχή επιμέρους υποσυστημάτων (φίλτρων), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.1** που δίνει τη γενική σχηματική παράσταση ενός τέτοιου συστήματος.

Στην πράξη, το διάγραμμα αυτό περιγράφει ηχητικά συστήματα που λειτουργούν σε εγκαταστάσεις για ομιλίες ή συναυλίες σε ανοιχτούς ή κλειστούς χώρους, μόνιμες εγκαταστάσεις σε οικοδομικά συγκροτήματα (σταθμούς, ξενοδοχεία, κλπ), συστήματα ηχογράφησης, ηχητικά συστήματα χορευτικών κέντρων, κλπ. Δεδομένου ότι στις

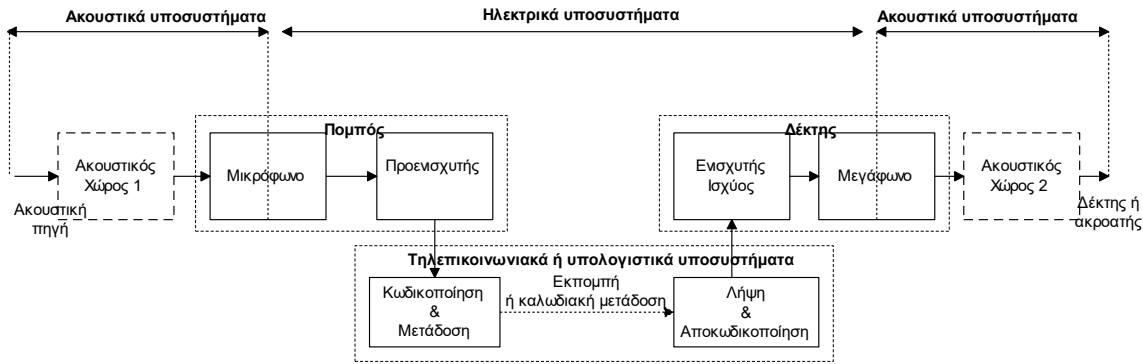
περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η πηγή (π.χ. ομιλητής) και ο δέκτης (π.χ. ακροατής) συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο (π.χ. αίθουσα διαλέξεων) και προφανώς λειτουργούν ταυτόχρονα, είναι πιθανή και η ύπαρξη βρόγχου ακουστικής ανάδρασης όπως φαίνεται και στο Σχήμα (ο βρόγχος αυτός δημιουργείται αφού η ενισχυμένη ακουστική έξοδος των ηχείων, επανατροφοδοτείται μέσω των μικροφώνων στην Η/Α διάταξη, με πιθανή εμφάνιση αστάθειας στο συνολικό σύστημα. Η αστάθεια αυτή εμφανίζεται με τους γνωστούς «μικροφωνισμούς» που συχνά παρατηρούνται σε τέτοια συστήματα).



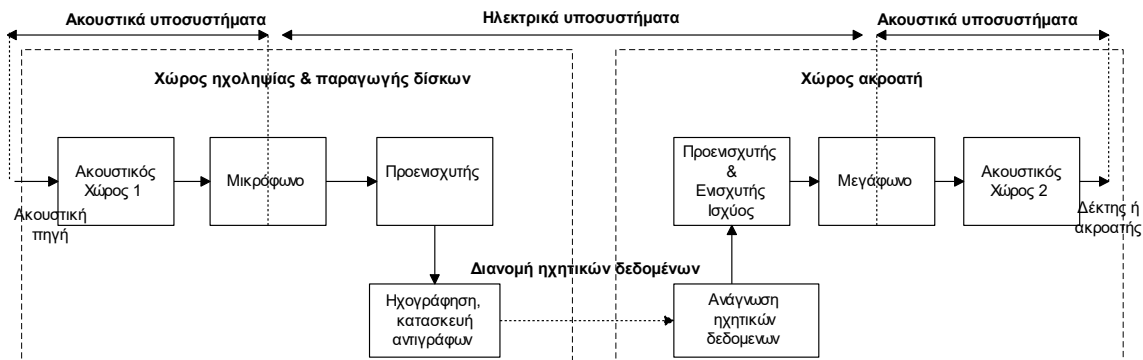
Σχήμα 1.1: Γενικό διάγραμμα ενός πλήρους Η/Α συστήματος

Παραλλαγές της παραπάνω διάταξης Η/Α συστήματος συναντώνται σε **τηλεπικοινωνιακές (ή και διαδικτυακές) εφαρμογές**. Στην περίπτωση αυτή, ο χώρος στον οποίο παράγεται το σήμα από την πηγή και αυτός στον οποίο βρίσκεται ο δέκτης, είναι διαφορετικός, και στην αλυσίδα του **Σχήματος 1.1** παρεμβάλλονται τα υποσυστήματα κωδικοποίησης του ηχητικού σήματος, μετάδοσής του, λήψης και αποκωδικοποίησής του, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2**. Επιπλέον, είναι επίσης πιθανό ότι η επίδραση των Ακουστικών Χώρων στον πομπό και δέκτη να ελαχιστοποιούνται μέσω της χρήσης των συσκευών σε πολύ μικρή απόσταση από τον ομιλητή / ακροατή (όπως στην περίπτωση των τηλεφώνων).

Είναι επίσης συνηθισμένο, η πηγή να παράγει το ηχητικό σήμα σε κάποια προηγούμενη χρονική στιγμή (π.χ. να ηχογραφείται ένα κομμάτι μουσικής σε κάποιο studio), να αποθηκεύεται σε κάποιο μέσο (π.χ. δίσκο) και να αναπαράγεται σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, στον χώρο του ακροατή, αφού ο δίσκος αυτός έχει στο μεταξύ διανεμηθεί μέσω του κυκλώματος εταιρειών / καταστημάτων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.3**. Με την επέκταση της χρήσης ψηφιακών μεθόδων για την αποθήκευση ήχου και την ανάπτυξη καταλλήλων μεθόδων κωδικοποίησης και μετάδοσης ήχου από τηλεπικοινωνιακά και υπολογιστικά συστήματα και δίκτυα (π.χ. υπό μορφή αρχείων .mp3), στις περισσότερες εφαρμογές, η δομή των Η/Α των Σχημάτων 1.2 και 1.3 συγκλίνει σε συστήματα τα οποία θα επιτρέπουν στον χρήστη την πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων στις οποίες ηχητική πληροφορία είναι κατάλληλα κωδικοποιημένη και η οποία διανέμεται στους ακροατές μέσω τηλεπικοινωνιακών ή υπολογιστικών δικτύων.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ενός πλήρους Η/Α συστήματος που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες – διαδίκτυο



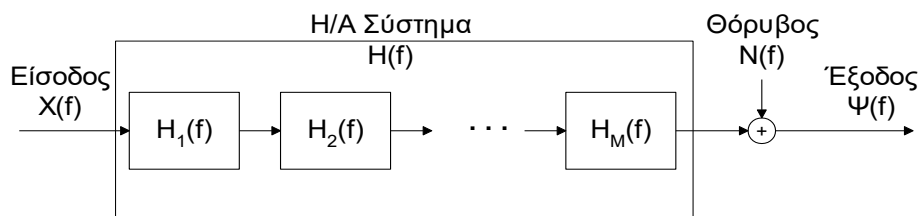
Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ενός πλήρους Η/Α συστήματος που χρησιμοποιείται για ηχογράφηση και αναπαραγωγή μουσικής - διαδίκτυο

1.3.2 Τύποι παραμορφώσεων σε Η/Α συστήματα

Δεδομένης της δομής των Η/Α συστημάτων που περιγράφηκε παραπάνω, η βασική απαίτηση ομαλής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι η αποφυγή προσθήκης παραμορφώσεων στο σήμα της πηγής από οποιοδήποτε υποσύστημα της αλυσίδας, έτσι ώστε το σήμα που φθάνει τελικά στο δέκτη να αποτελεί ακριβές αντίγραφο αυτού της πηγής. Ο ρόλος του μηχανικού (είτε σαν σχεδιαστή των Η/Α υποσυστημάτων, είτε σαν μελετητή μίας Η/Α εγκατάστασης) είναι να βελτιστοποιήσει την αλυσίδα αυτή, επιτυγχάνοντας **την υψηλότερη απόδοση και τις μικρότερες παραμορφώσεις κατά την λειτουργία** της. Για τον λόγο αυτό, τόσο στα επιμέρους υποσυστήματα και συσκευές, όσο και σε μία συνολική εγκατάσταση, καθορίζονται **τεχνικές προδιαγραφές** οι οποίες καθορίζουν τα επιτρεπτά όρια των παραμορφώσεων. Οι προδιαγραφές αυτές συχνά προσδιορίζονται από Διεθνείς Οργανισμούς (π.χ. IEC, ISO, κλπ.) και περιγράφουν τα γενικά χαρακτηριστικά της γραμμικής απόκρισης του συστήματος (π.χ. σαν **εύρος και διακύμανση «απόκριση συχνότητας»**) ή και του ποσοστού μη-γραμμικότητας που αυτό εμφανίζει (π.χ. σαν **% Ολική Αρμονική Παραμόρφωση**,

%THD), ή ακόμη την δυναμική περιοχή στην οποία το σύστημα συμπεριφέρεται μέσα στα παραπάνω όρια (π.χ. σαν **Στάθμη Λόγου Σήματος προς Θόρυβο, SNR**).

Οι παραπάνω προδιαγραφές είναι γνωστές και από άλλα μαθήματα, αλλά μία σύντομη ανακεφαλαίωση είναι σκόπιμο να γίνει και εδώ. Για λόγους υποστήριξης μίας κοινής μεθοδολογίας που να καλύπτει τα ηλεκτρικά, ηλεκτροακουστικά (τα οποία συνήθως λειτουργούν με επιμέρους ηλεκτρο-μηχανικά και μηχανο-ακουστικά τμήματα) και τα ακουστικά υποσυστήματα, εδώ θα ακολουθηθεί μία ανάλυση που να βασίζεται στην Θεωρία Συστημάτων, με βάση τα **Σχήματα 1.1 – 1.3**. Έτσι, είναι σκόπιμο τα επιμέρους υποσυστήματα των παραπάνω Σχημάτων, να αναπαρασταθούν απλά σαν ένας σειριακός συνδυασμός επιμέρους γραμμικών συστημάτων, όπως στο **Σχήμα 1.4**.



Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση ενός πλήρους H/A συστήματος, σαν συνδυασμός επιμέρους γραμμικών υποσυστημάτων

Όπως είναι γνωστό, θα είναι:

$$\Psi(f) = H(f) \cdot X(f) + N(f) = [H_1(f) \cdot H_2(f) \dots H_M(f)] + N(f) \quad (1.1)$$

όπου $X(f)$, $\Psi(f)$ είναι οι (μιγαδικές) συναρτήσεις των φασμάτων των σημάτων εισόδου και εξόδου (τα οποία αναλόγως του σημείου πρόσβασης του συστήματος, μπορεί να είναι ακουστικά, ηλεκτρικά ή και μηχανικά σήματα), $N(f)$ είναι ένα γενικό σήμα θορύβου (ακουστικό, ηλεκτρικό ή μηχανικό) και $H_1(f)$, $H_2(f)$, ..., $H_M(f)$ είναι οι (μιγαδικές) συναρτήσεις μεταφοράς των αντίστοιχων γραμμικών συστημάτων. Όπως είναι γνωστό, αντίστοιχες σχέσεις σχηματίζονται και για τις χρονικές συναρτήσεις των σημάτων εισόδου / εξόδου και θορύβου, δηλαδή:

$$\psi(t) = h(t) * x(t) + n(t) \quad (1.2)$$

όπου * συμβολίζει την συνέλιξη των συναρτήσεων. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν 3 διαφορετικοί και συνήθεις τύποι παραμορφώσεων που εμφανίζονται σε γραμμικά συστήματα γενικά και σε H/A συστήματα και συσκευές, ειδικότερα:

(α) **γραμμικές παραμορφώσεις** μόνον (δηλαδή όταν $N(f) = 0$)

(β) παραμόρφωση λόγω **προσθετικού θορύβου** μόνον (δηλαδή όταν $H(f) = 1$)

(γ) **συνδυασμένες παραμορφώσεις** λόγω γραμμικού συστήματος και προσθετικού θορύβου (δηλαδή όταν ισχύουν πλήρως οι παραπάνω σχέσεις).

(δ) **μή –γραμμικές παραμορφώσεις** όπου δηλαδή οι παραπάνω σχέσεις εισόδου / εξόδου ανατρέπονται και το συνολικό σύστημα παράγει έξοδο που εξαρτάται κυρίως από το σήμα εισόδου (π.χ. όπως σε περίπτωση ψαλιδισμού).

Παρ' όλο ότι στην πράξη τα Η/Α συστήματα λειτουργούν υπό την συνθήκη (γ), είναι χρήσιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στις ειδικές επιπτώσεις από την εμφάνιση παραμορφώσεων που περιγράφονται μόνο από τις υπόλοιπες κατηγορίες.

(α) γραμμικές παραμορφώσεις σε Η/Α συστήματα

Στην περίπτωση αυτή ($n(t) = 0$), οι συνολικές γραμμικές παραμορφώσεις που προσθέτει το Η/Α σύστημα περιγράφονται από την γνωστή μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς $H(f)$, όπου:

$$H(f) = \Psi(f) / X(f) \quad (1.3)$$

Εκφράζοντας την συνάρτηση αυτή σαν μέτρο (πραγματικό μέρος) και φάση (φανταστικό μέρος), έχουμε τις γνωστές σχέσεις των διαγραμμάτων Bode:

$$H(f) = |H(f)| e^{j \arg[H(f)]} = \frac{|\Psi(f)|}{|X(f)|} e^{j\{\arg[\Psi(f)] - \arg[X(f)]\}} \quad (1.4)$$

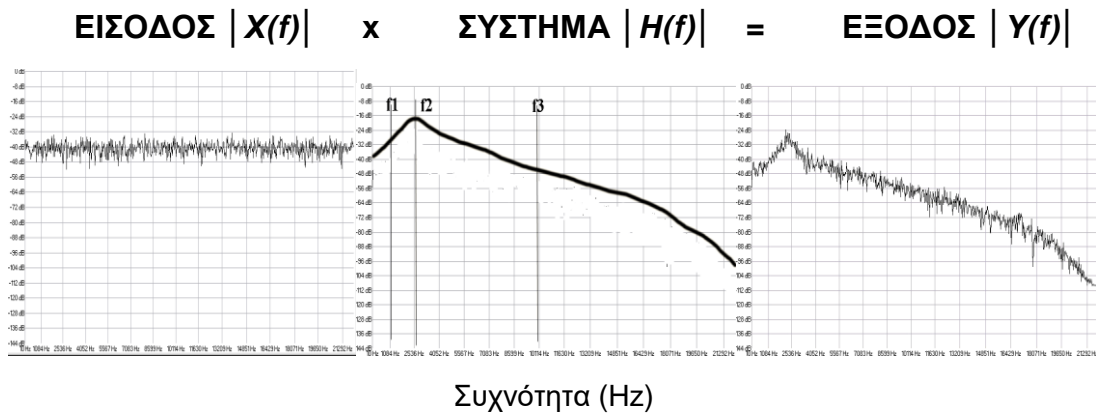
Σε πρακτικές περιπτώσεις, είναι συνηθισμένο ο μηχανικός ήχου να ανατρέχει στην μορφή του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς («απόκριση συχνότητας») για την εκτίμηση των γραμμικών παραμορφώσεων μίας συσκευής. Είναι μάλιστα ευρύτατα διαδεδομένη η απεικόνιση αυτής της συνάρτησης για ηχεία, ενισχυτές, κλπ. Στην περίπτωση αυτή, το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς εκφράζεται σε κλίμακα decibel (dB) για τον άξονα του πλάτους και Hertz (Hz) για τον άξονα των συχνοτήτων. Σε αυτή την περίπτωση εύκολα φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις ότι:

$$20 \log(|H(f)|) = 20 \log(|\Psi(f)|) - 20 \log(|X(f)|) \quad (1.5)$$

Η πρακτική σημασία αυτής της σχέσης μπορεί εύκολα να φανεί αν στην είσοδο χρησιμοποιήσουμε ένα σήμα λευκού θορύβου, όπως γίνεται συχνά στην μέτρηση Η/Α συσκευών, όπως περιγράφεται και σε εργαστηριακή άσκηση του μαθήματος. Στην περίπτωση αυτή και όπως είναι γνωστό από άλλα μαθήματα (π.χ. Σήματα και Συστήματα) η φασματική πυκνότητα του θορύβου είναι σταθερή με την συχνότητα και έτσι

$$|X(f)| \approx 1 \quad (1.6)$$

οπότε από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το φάσμα του σήματος εξόδου θα απεικονίζει άμεσα την μορφή της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος (**Σχήμα 1.5**).



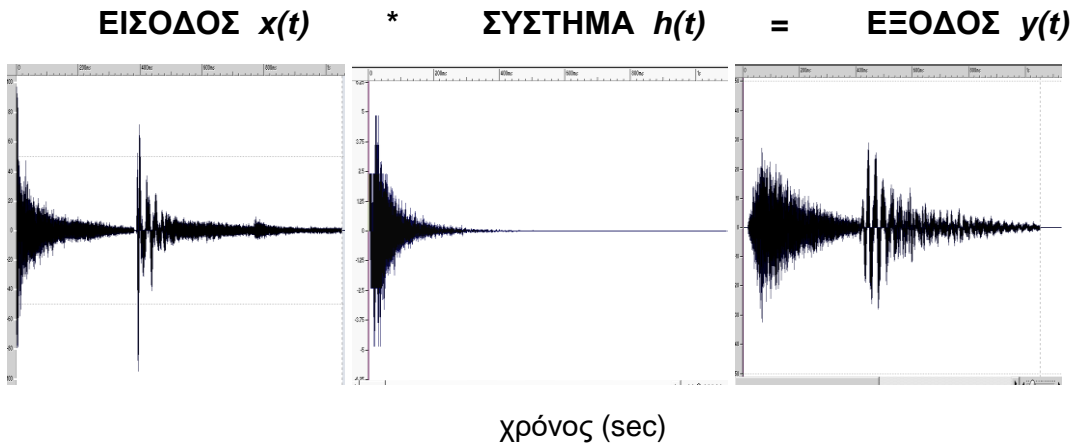
Σχήμα 1.5 : Απεικόνιση της σχέσης απόκρισης πλάτους συχνότητας για λευκό θόρυβο

Πρακτικά, είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς από το Σχήμα αυτό ότι τα πλάτη των συχνοτήτων κάθε σήματος εισόδου στην περιοχή f_1 , θα παραμείνουν αναλλοίωτα στην έξοδο, στην περιοχή f_2 θα ενισχυθούν κατά αρκετά dB, ενώ στην f_3 θα μειωθούν κατά αρκετά dB. Ο ακροατής που θα ακούει το σήμα εξόδου, θα αντιληφθεί ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα, αφού στην περίπτωση αυτή οι μεν χαμηλές συχνότητες θα αποδοθούν κανονικά, οι μεσαίες θα τονισθούν, ενώ οι ψηλές θα κατασταλούν. Έτσι, η έξοδος θα φθάσει στον ακροατή με χαρακτηριστική απώλεια στα «πρίμα» και υπερβολική ένταση στα «μεσαία». Προφανώς μία ιδανική συσκευή θα πρέπει να αναπαράγει όλες τις συχνότητες με σταθερό κέρδος, δηλαδή θα πρέπει $|H(f)| \approx 1$.

Οι παραμορφώσεις στη συνιστώσα της φάσης είναι περισσότερο δύσκολο να γίνουν πρακτικά αντιληπτές, αλλά όπως προκύπτει και από τις παραπάνω σχέσεις, παράγουν ένα σήμα εξόδου με φάση το άθροισμα των επιμέρους φάσεων του σήματος εισόδου και της απόκρισης του συστήματος. Δεδομένου ότι η συνάρτηση φάσης μπορεί να γίνει κατανοητή σαν μία σχετική προπορεία ή καθυστέρηση σε ορισμένες συχνότητες σε σχέση με την ιδανική γραμμική φάση, το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης αυτής έχει σαν αποτέλεσμα κυρίως την χρονική παραμόρφωση του σήματος, όπως εμφανίζεται και από την σχέση της συνέλιξης (δες εξίσωση (1.2)). Στην πράξη, η κυματομορφή του σήματος εξόδου (που θεωρητικά είναι άπειρης χρονικής διάρκειας) είναι παραμορφωμένη (σε σχέση με αυτή του σήματος εισόδου), κάτι που πρακτικά γίνεται αντιληπτό κυρίως σε χρονικά σημεία των μεταβατικών (π.χ. σε αρχή μίας νότας, στον ήχο ενός κρουστού οργάνου, κλπ), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.6**.

(β) παραμορφώσεις λόγω προσθετικού θορύβου σε Η/Α συστήματα

Πρακτικά, ο θόρυβος σε ένα σύνθετο ηχητικό σύστημα μπορεί να προκύπτει από τις ηλεκτρονικές διατάξεις, τον ακουστικό χώρο ή ακόμη και από τα μηχανικά τμήματα ενός Η/Α μετατροπέα. Όπως είναι προφανές και από τις παραπάνω σχέσεις, ο θόρυβος εμφανίζεται προσθετικά στο χρονικό και φασματικό πεδίο του σήματος εξόδου, κάτι που μπορεί να παρασταθεί (για ημιτονικό σήμα εισόδου), με τον τρόπο που φαίνεται **στα Σχήματα 1.7 και 1.8**.



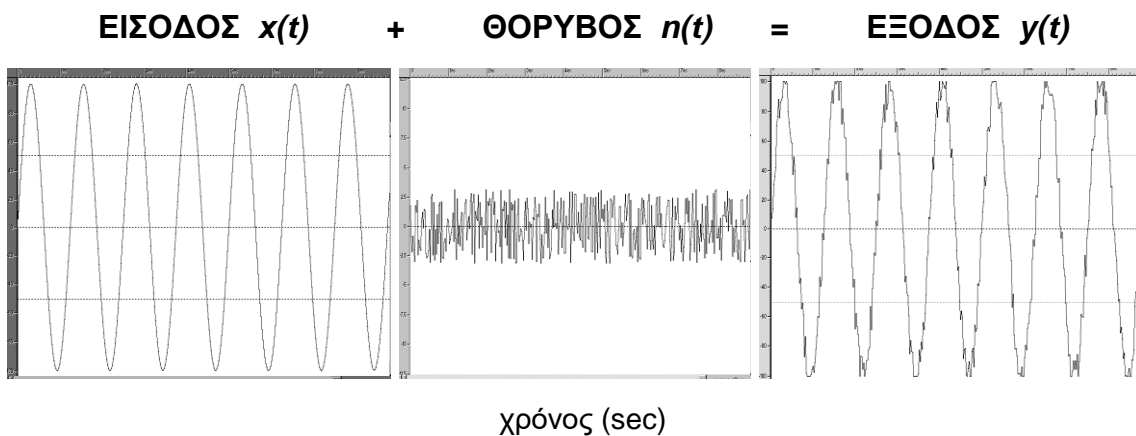
Σχήμα 1.6 : Απεικόνιση του αποτελέσματος της συνέλιξης σε ένα σήμα εισόδου

Όπως είναι γνωστό και από την πρακτική εμπειρία, θόρυβος είναι συχνά ακουστός στην έξοδο Η/Α συσκευών (π.χ. σαν «φύσημα» στην αναπαραγωγή μίας κασέτας). Γενικά συστήματα υψηλής πιστότητας θα πρέπει να εμφανίζουν ελάχιστο θόρυβο, κάτι που ως γνωστό μετριέται με τον Λόγο Σήματος προς Θόρυβο (Signal to Noise Ratio, SNR).

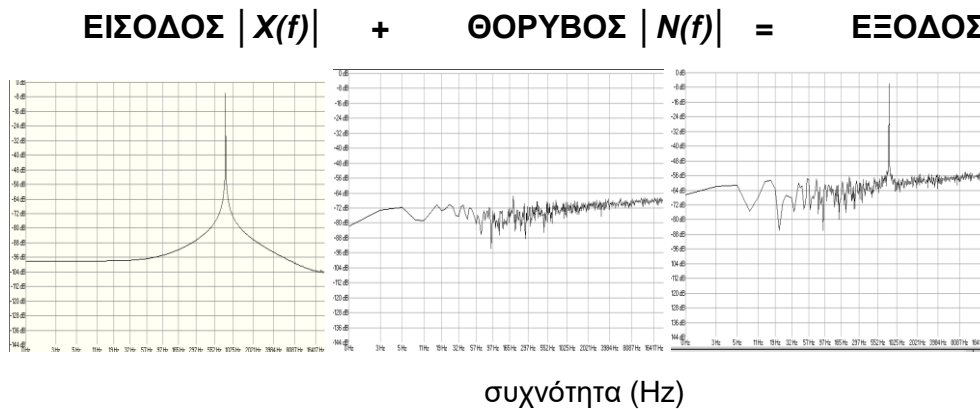
Ο κλασσικός ορισμός του Λόγου Σήματος προς Θόρυβο, δίνεται σε dB, σαν:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{y(t)}{n(t)} \right) \quad (1.7)$$

όπου τα σήματα εκφράζονται συνήθως από τις rms τιμές τους. Πρακτικά, πολλές Η/Α συσκευές (π.χ. ενισχυτές, CD-players, κλπ) επιτυγχάνουν τιμές SNR της τάξης των 100 dB, ενώ η ανθρώπινη ακοή αδυνατεί να αντιληφθεί θόρυβο σε συσκευές με SNR καλύτερο των 120 dB, περίπου. Αυτό το όριο λοιπόν καθορίζει και την επιθυμητή απόδοση της ιδανικής Η/Α συσκευής.



Σχήμα 1.7: Αποτέλεσμα στο πεδίο του χρόνου ύπαρξης θορύβου σε Η/Α σύστημα



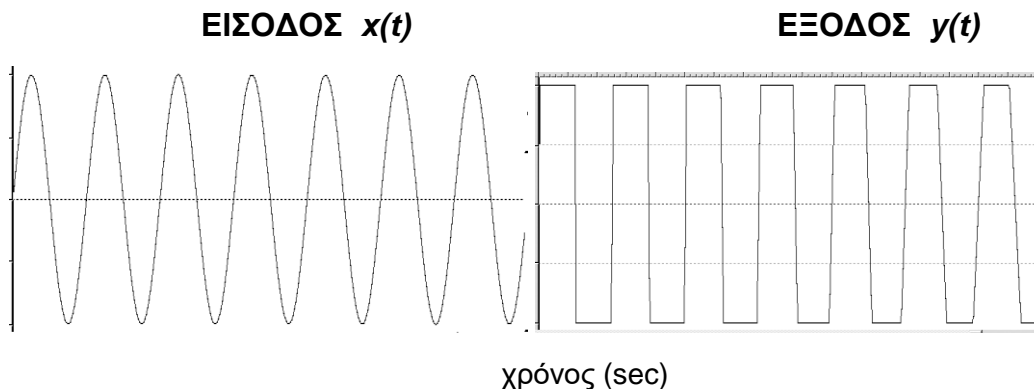
Σχήμα 1.8: Αποτέλεσμα στο πεδίο της συχνότητας ύπαρξης θορύβου σε Η/Α σύστημα

(γ) συνδυασμένες παραμορφώσεις λόγω γραμμικού συστήματος και προσθετικού θορύβου

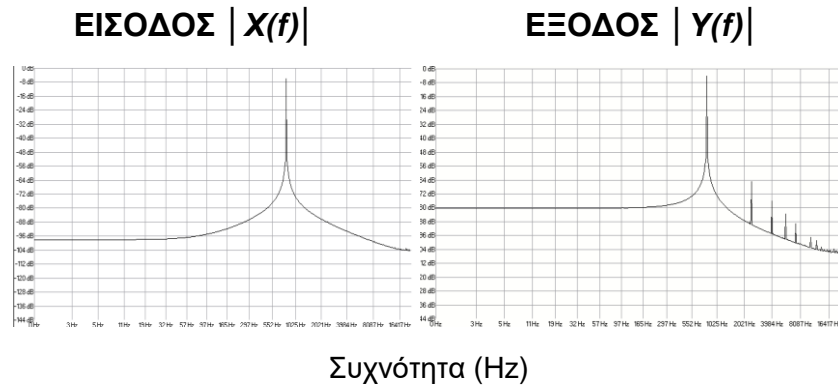
Τα αποτελέσματα τέτοιων παραμορφώσεων προκύπτουν εύκολα από τον συνδυασμό της συζήτησης στις 2 προηγούμενες παραγράφους.

(δ) μη –γραμμικές παραμορφώσεις σε Η/Α συστήματα

Οι παραμορφώσεις αυτές είναι και οι περισσότερο δύσκολες σε μαθηματική ανάλυση, αφού θεωρητικά η έξοδος του συστήματος θα εξαρτάται κυρίως από το σήμα εισόδου (δηλαδή θα είναι διαφορετική για κάθε σήμα εισόδου). Πρακτικά βέβαια, οι Η/Α συσκευές σπάνια λειτουργούν σε συνθήκες τόσο ισχυρής μη-γραμμικότητας, αλλά παρ'όλα αυτά συχνά εμφανίζουν περιορισμένης κλίμακας μη-γραμμικότητα. Τυπικό παράδειγμα τέτοιας παραμόρφωσης είναι ο ψαλιδισμός (clipping) ενός ημιτονοειδούς σήματος εισόδου, έτσι ώστε στην έξοδο να παράγεται σήμα με φάσμα που δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα γραμμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, αλλά αποτελείται από αρμονικές του σήματος αυτού (δες **Σχήμα 1.9**).



Σχήμα 1.9: Τυπικό αποτέλεσμα στον χρόνο, μη-γραμμικής λειτουργίας συστήματος (ψαλιδισμού) σε ημιτονοειδές σήμα εισόδου



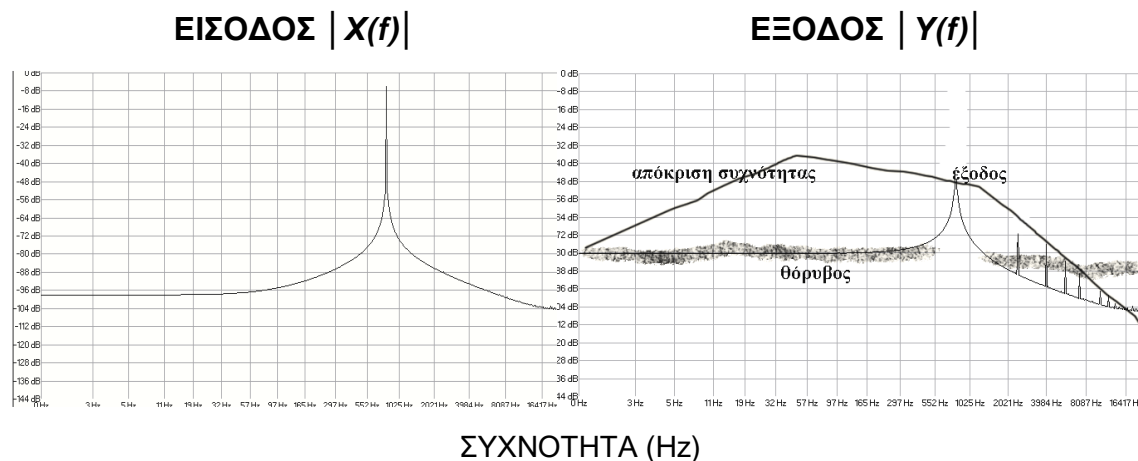
Συχνότητα (Hz)

Σχήμα 1.10: Τυπικό αποτέλεσμα στην συχνότητα, μη-γραμμικής λειτουργίας συστήματος (ψαλιδισμού) σε ημιτονοειδές σήμα εισόδου

Στην πράξη, τέτοια μη-γραμμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας αποφεύγονται όταν όλες οι συσκευές λειτουργούν μέσα στα όρια των προδιαγραφών τους, όπως για παράδειγμα ένας ενισχυτής που θα πρέπει να παράγει την ονομαστική ισχύ του στο κατάλληλο φορτίο, ένα μεγάφωνο να δέχεται σήματα στα όρια της ισχύος του, κλπ. Τυπικές μέθοδοι μέτρησης ποσοστού μη-γραμμικών παραμορφώσεων που παράγονται από Η/Α συστήματα βασίζονται σε μετρήσεις για τυπικά ημιτονοειδή σήματα εισόδου και δίνονται από τα μεγέθη της % Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (% Total Harmonic Distortion, %THD), και Ενδοδιαμόρφωσης (Intermodulation, IM).

Παράδειγμα

Σε ένα τυπικό Η/Α σύστημα, θα εμφανισθούν συνδυασμένοι όλοι οι παραπάνω τύποι παραμορφώσεων. Έτσι, για ημιτονοειδή είσοδο, τα φάσματα εισόδου και εξόδου θα έχουν την μορφή του **Σχήματος 1.11**. Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι λόγω της μορφής των γραμμικών παραμορφώσεων του συστήματος, («Απόκριση Συχνότητας»), το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος θα εμφανισθεί μειωμένο στην έξοδο, ενώ θα εμφανιστούν και ασθενείς αρμονικές συνιστώσες του λόγω των μη-γραμμικών παραμορφώσεων, σε συνδυασμό με την ύπαρξη προσθετικού θορύβου.



ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)

Σχήμα 1.11: Τυπική μορφή φάσματος εξόδου πρακτικού Η/Α συστήματος

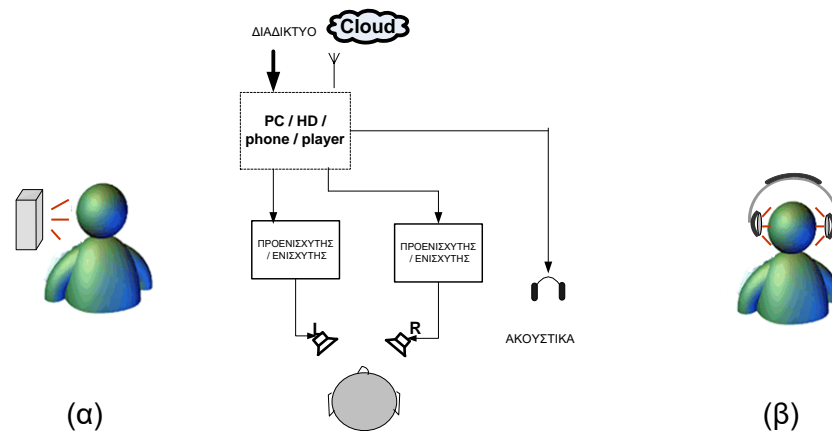
1.4 Κατηγορίες και αρχές λειτουργίας - ακρόασης ηχητικών συστημάτων

1.4.1 Κατηγορίες ηχοσυστημάτων

Η ακρόαση μουσικής από ατομικά συστήματα ή και στο σπίτι αποτελεί ιδιωτική χρήση ηλεκτροακουστικών συστημάτων. Αντίθετα, ηχητικές εγκαταστάσεις για ακρόαση από ακροατήρια σε ανοιχτούς ή κλειστούς χώρους, αποτελεί δημόσια – επαγγελματική χρήση συστημάτων και η κατηγορία αυτή αποτελεί την κυριότερη περιοχή δραστηριοποίησης του μηχανικού.

(α) Συστήματα ατομικής ακρόασης

Τέτοια συστήματα είναι είτε φορητά και σε αυτή την περίπτωση η ακρόαση γίνεται μέσα από ακουστικά, είτε βασίζονται σε μικρά συνήθως αυτοενισχυόμενα ηχεία (ή ένα ηχείο) που τοποθετείται σε γραφείο και κοντά στον ακροατή (Σχήμα 1.12).

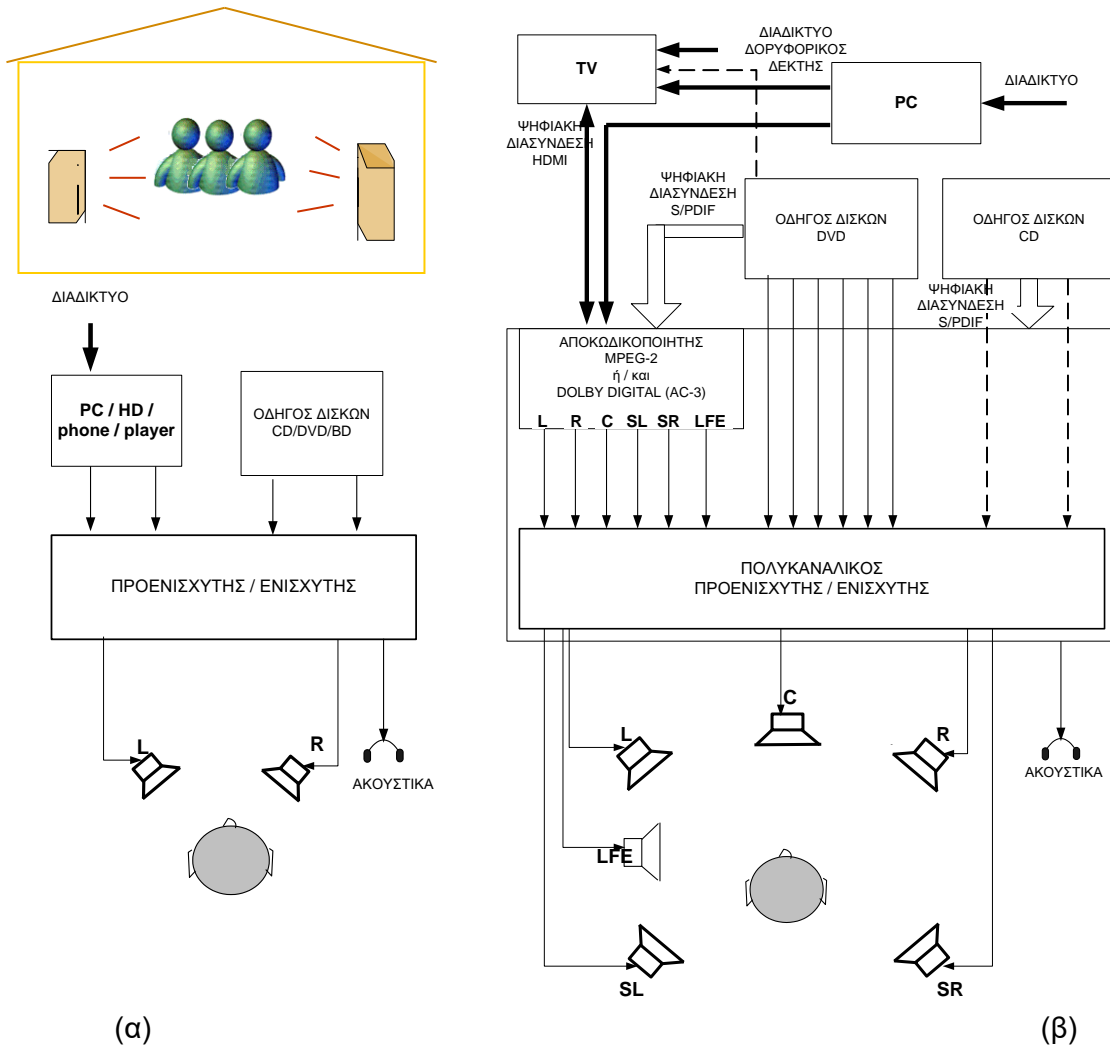


Σχήμα 1.12: συστήματα ατομικής ακρόασης (α) ακουστικά, (β) ηχείο

Με δυνατότητες διαδικτυακής και ασύρματης διασύνδεσης, τέτοια συστήματα πλέον δεν απαιτούν πλέον οδήγηση από εξειδικευμένες πηγές ήχου και συνήθως αναπαράγουν ψηφιακό ήχο από κινητά τηλέφωνα ή υπολογιστές μέσω κατεβάσματος αρχείων (downloading) ή μετάδοσης ροής (streaming). Η πιστότητα τέτοιων συστημάτων είναι περιορισμένη και τεχνικά προκλήσεις αφορούν την βελτιστοποίηση ακρόασης μέσω ακουστικών (με καταστολή εξωτερικού θορύβου, προσαρμογή στον συγκεκριμένο ακροατή, ισοστάθμιση, διεύρυνση της χωρικής εικόνας, κλπ.), ενώ για τα μικρά επιτραπέζια ή φορητά αυτοενισχυόμενα ηχεία, κυρίως απαιτείται διεύρυνση της απόκρισης συχνότητας ειδικά στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων και η εξομίωση αναπαραγωγής στεροεφωνικού ή και πολυκαναλικού ήχου από ένα ηχείο. Η ακρόαση μέσω ακουστικών συχνά γίνεται σε εξαιρετικά ψηλές ηχοστάθμες (πάνω από 100 dB), οι οποίες για μακροχρόνια-συστηματική έκθεση μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στην ακοή. Όπως θα συζητηθεί και σε επόμενες παραγράφους, η αναπαραγωγή μέσα από ακουστικά επιτρέπει την πιο ρεαλιστική αναπαραγωγή τρισδιάστατης θέσης πηγών στον εικονικό χώρο και έτσι επιτρέπει χρήση σε εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας.

(β) Συστήματα οικιακής ακρόασης

Παραδοσιακά τέτοια συστήματα (**Σχήμα 1.13**) είναι στερεοφωνικά (με 2 ηχεία) και οδηγούνται από συμβατικές πηγές ήχου (π.χ. δίσκους), βασισμένα σε διατάξεις προενισχυτή /ενισχυτή ισχύος ή «ολοκληρωμένου» ενισχυτή. Αναλόγως με τη διαρρύθμιση του οικιακού χώρου, η ιδανική διάταξη ηχείων – θέσης ακρόασης (στις αιχμές ισόπλευρου τριγώνου) δεν είναι πάντοτε εφικτή και ταυτόχρονα, η ακουστική των δωματίων συχνά υποβαθμίζει την πιστότητα ηχητικής αναπαραγωγής. Με την λειτουργία οικιακού δικτύου, ως πηγή ηχητικών δεδομένων μπορεί πλέον να βασίζεται υλικό από downloading ή streaming από το διαδίκτυο ή και κάποιος αποθηκευτικός χώρος (π.χ. σκληρός δίσκος).



Σχήμα 1.13: σύστημα οικιακής ακρόασης (α) στερεοφωνικό σύστημα, (β) πολυκαναλικό σύστημα

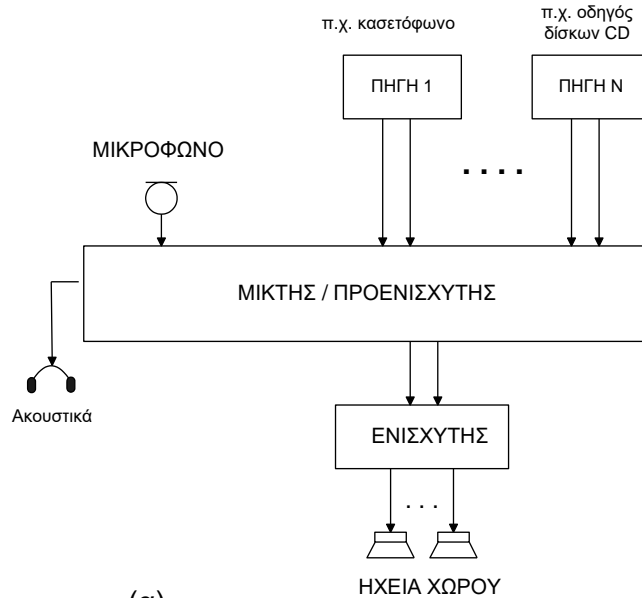
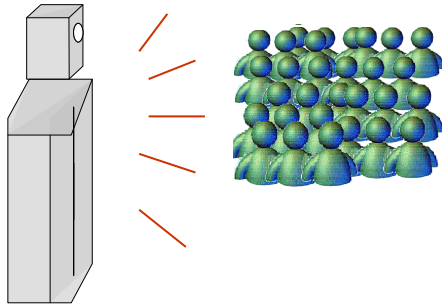
Μια επέκταση της στερεοφωνικής αναπαραγωγής επιτυγχάνεται μέσω από πολυκαναλικά ηχοσυστήματα (surround, Home theatre, κλπ.) όπου ο ήχος αναπαράγεται από πολλαπλά κανάλια / ηχεία, συνήθως μέσω διάταξης 5.1 ηχείων (2 εμπρόσθια, 2 πλευρικά, 1 κεντρικό) και ένα ηχείο για αναπαραγωγή πολύ χαμηλών συχνοτήτων (LFE) – subwoofer (είναι το κανάλι .1). Ως πηγές σε ένα τέτοιο ηχοσύστημα είναι συνήθως οπτικοακουστικά δεδομένα αποθηκευμένα σε δίσκους DVD ή BD, σκληρό δίσκο – υπολογιστή ή ακόμη και διαδικτυακές πηγές που χρησιμοποιούν πολυκαναλικό ήχο (συχνά κωδικοποιημένο σε τυποποίηση Dolby Digital, DTS, MPEG2, MPEG4, κλπ.). Με δεδομένο ότι στη μεγάλη πλειοψηφία τους, τέτοια ηχοσυστήματα χρησιμοποιούνται για αναπαραγωγή κινηματογραφικών ταινιών, ταυτόχρονη σύνδεση της πηγής γίνεται και με οθόνη TV. Σε άλλες περιπτώσεις, ο τηλεοπτικός δέκτης συνδέεται με δορυφορικές ή διαδικτυακές πηγές και αναπαράγει πολυκαναλικό ήχο μέσω ηχείων τύπου soundbar που αξιοποιούν και πλευρικές ανακλάσεις του αναπαραγόμενου ήχου για να εξομοιώσουν την αναπαραγωγή από πλευρικά ηχεία.

(γ) Συστήματα μαζικής ακρόασης

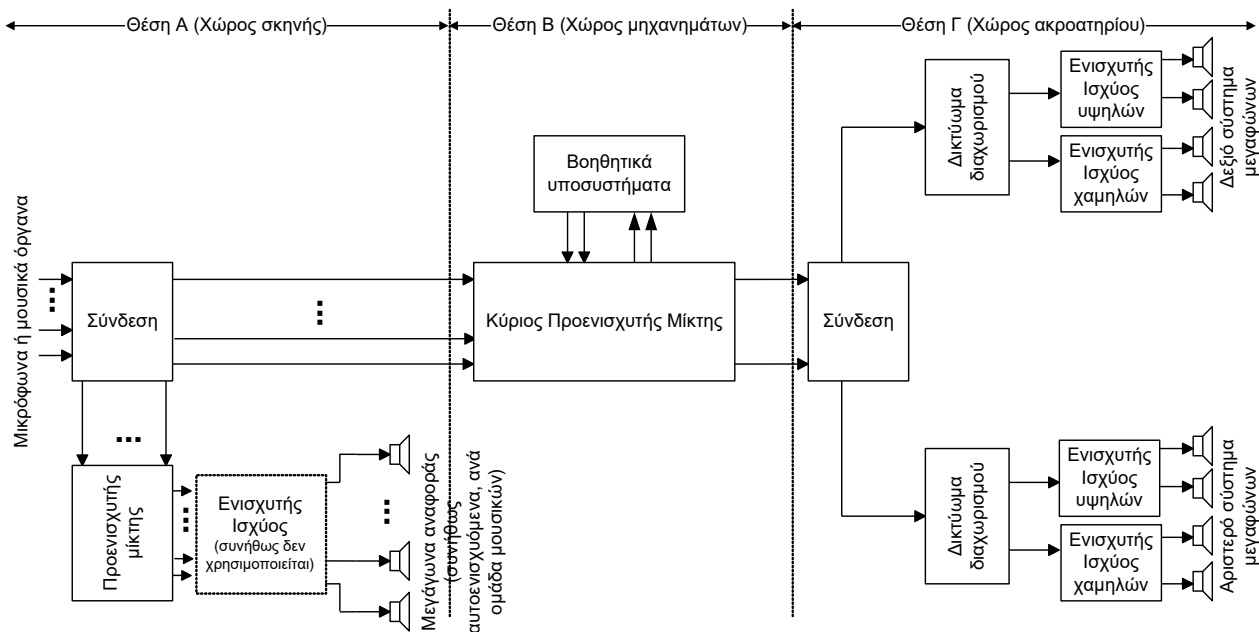
Σε δημόσιους, ανοιχτούς ή στεγασμένους χώρους, σε μόνιμη ή παροδική βάση, τοποθετούνται ηχοσυστήματα για κάλυψη μεγάλων ακροατηρίων, τόσο για αναπαραγωγή ομιλίας, όσο και μουσικής (ζωντανής ή προηχογραφημένης). Τέτοια συστήματα καλούνται να επαυξήσουν την ηχοστάθμη πηγών ώστε να επιτύχουν επιθυμητή ηχητική κάλυψη (από άποψη καταληπτότητας αναπαραγόμενης ομιλίας ή ηχοστάθμης μουσικής) σε ακροατήρια από 10 – 10000 άτομα (**Σχήμα 1.14**). Έτσι, αναλόγως του μεγέθους του ακροατηρίου και της συνεπαγόμενης επιφάνειας κάλυψης και της εφαρμογής-χρήσης, εμφανίζουν διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές και είναι:

- μικρής κλίμακας, π.χ. για υποβοήθηση ομιλίας σε χώρους διαλέξεων, διδασκαλίας, εκκλησίες, αναπαραγωγή μουσικής σε μπαρ, εστιατόρια, club, κλπ.
- μεσαίας κλίμακας, π.χ. για υποβοήθηση ομιλίας σε συνεδριακούς ή ανοιχτούς χώρους, σε γήπεδα και αθλητικούς χώρους, μεγάλες εκκλησίες, αναπαραγωγή μουσικής σε συναυλιακούς χώρους, μεγάλα club, κλπ.
- μεγάλης κλίμακας, π.χ. για συναυλίες και φεστιβάλ, μεγάλες αθλητικές εκδηλώσεις, μόνιμες εγκαταστάσεις σε βιομηχανίες, κλπ.

Σε κάθε περίπτωση, προτεραιότητα αποτελούν οικονομοτεχνικά κριτήρια, το κόστος, η ευκολία προσαρμογής στο χώρο και προφανώς η κάλυψη των απαιτήσεων σε ηχοστάθμη, πιστότητα και ομοιογενή κάλυψη του ακροατηρίου. Συνήθως, η αναπαραγωγή γίνεται χωρίς δυνατότητα στερεοφωνίας, αλλά και σε υπερβολικά ψηλή ηχοστάθμη με αποτέλεσμα την αύξηση της παραμόρφωσης, την κόπωση και τη δημιουργία προβλημάτων στην ακοή του ακροατηρίου και την ηχορύπανση.



(α)



(β)

Σχήμα 1.14: σύστημα μαζικής ακρόασης. (α) Τυπική δομή ηχητικής εγκατάστασης μικρής-μεσαίας κλίμακας (β) σύστημα μεγάλης κλίμακας για συναυλία

1.5 Αρχές ηχητικής αναπαραγωγής και ακρόασης

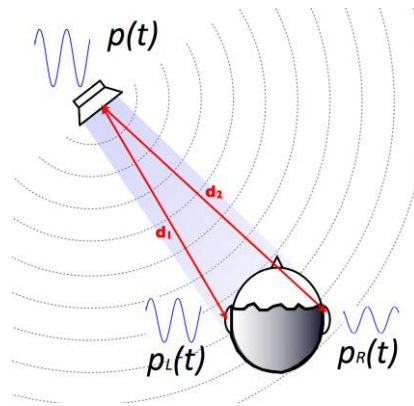
Από τα προηγούμενα, είναι σαφές ότι τα ΗΑ συστήματα πρέπει να ικανοποιούν τη βασική απαίτηση αποφυγής προσθήκης παραμορφώσεων στο σήμα της πηγής από οποιοδήποτε υποσύστημα της αλυσίδας, έτσι ώστε το σήμα που φθάνει τελικά στο δέκτη να αποτελεί ακριβές αντίγραφο αυτού της πηγής. Ταυτόχρονα, για τις περισσότερες εφαρμογές, είναι σκόπιμο να αποδίδουν και μια σχετική εικονική χωρική καταγραφή της σχετικής θέσης των πηγών στον (πραγματικό ή εικονικό χώρο), ανάγκη που αυξάνει όταν το ηχοσύστημα λειτουργεί συνδυαστικά με την αναπαραγωγή κινούμενης εικόνας, σε ταινίες, παιχνίδια και εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Με δεδομένο ότι σε αυτή την περίπτωση η ΗΑ τεχνολογία καλείται να δημιουργήσει κατάλληλη ψευδαίσθηση στον δέκτη-ακροατή, στις επόμενες παραγράφους δίνονται οι βασικές αρχές που διέπουν την αντιληπτική λειτουργία εντοπισμού της θέσης ακουστικών πηγών στο χώρο και οι σχετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις που ακολουθούνται από τα ηχητικά συστήματα.

1.5.1 Στερεοφωνική ακρόαση και αναπαραγωγή

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος αναπαραγωγής του ήχου για οικιακή ή ατομική ακρόαση είναι η στερεοφωνία που βασίζεται στη χρήση δύο ανεξάρτητων καναλιών (αριστερού-L και δεξιού-R) στα οποία συνδυάζονται (δηλ. κωδικοποιούνται στερεοφωνικά κατά τη μίξη) πολλαπλά κανάλια και πηγές κατά την ηχογράφιση και τα οποία αναπαράγονται από δύο ηχεία, κατάλληλα τοποθετημένα στο χώρο και σε σχέση με τον ακροατή ή και από ακουστικά κυρίως για ακρόαση από φορητές συσκευές.

Σε ακρόαση με φυσικό τρόπο, η αντίληψη που δημιουργείται από την ύπαρξη μιας ακουστικής πηγής στο ελεύθερο ακουστικό πεδίο ή και χώρο, οφείλεται στα συνδυασμένα ερεθίσματα από τα 2 αυτιά του ακροατή (αριστερό και δεξί) που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης της πηγής αυτής. Η λειτουργία του μηχανισμού χωρικής αντίληψης του ήχου στηρίζεται εν πολλοίς στην αποκαλούμενη *δυϊκή θεωρία* (duplex theory). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το κάθε αυτί, λόγω της διαφορετικής απόστασής του από την ηχητική πηγή (d_1 και d_2 σύμφωνα με το **Σχήμα 1.15**), λαμβάνει διαφορετικές τιμές ηχητικής πίεσης $p_L(t)$ και $p_R(t)$, λόγω: (α) της εξασθένησης της τιμής της πίεσης συναρτήσει της απόστασης (οπότε και το δεξί αυτί θα δέχεται περισσότερο εξασθενημένη ακουστική πίεση, αφού $d_2 > d_1$) (β) της διαφοράς φάσης ή και σχετικής καθυστέρησης λόγω του διαφορετικού χρόνου άφιξης του ήχου σε κάθε αυτί (δεδομένης της σταθερής ταχύτητας διάδοσης του ήχου) και (γ) της πρόσθετης εξασθένησης που δημιουργείται στην ακουστική πίεση στο αυτί που «καλύπτεται» ακουστικά από το κεφάλι, που δημιουργεί σε περιοχή των συχνοτήτων φαινόμενα ηχητικής σκίασης.

Το φαινόμενο της διαφοροποίησης της ηχοστάθμης που καταγράφεται από το κάθε αυτί είναι κυρίαρχο για συχνότητες μεγαλύτερες των 1500Hz περίπου, δίνοντας σχετικές διαφορές στάθμης μέχρι και 20dB, ενώ σε χαμηλότερες συχνότητες (λόγω του μεγάλου μήκους κύματος σε σχέση με το μέγεθος του κεφαλιού), το φαινόμενο της ηχητικής σκίασης από το κεφάλι δίνει ασήμαντες διαφορές ηχοστάθμης στα 2 αυτιά.



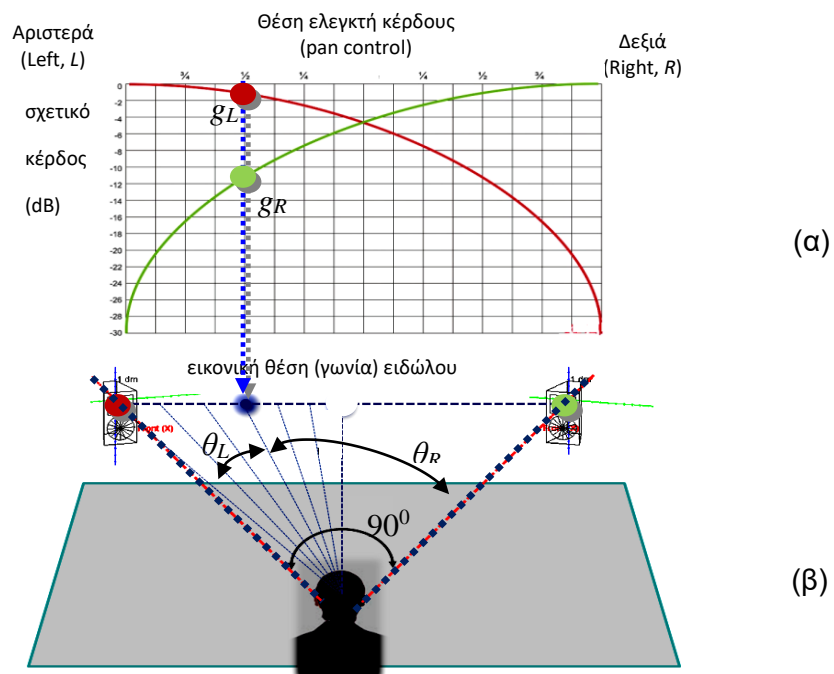
Σχήμα 1.15 : απεικόνιση μηχανισμού στερεοφωνικής ακρόασης

Σε αντίθεση, για τις χαμηλότερες συχνότητες, οι φασικές διαφορές των δύο σημάτων που καταγράφονται από τα αυτιά γίνονται έντονες λόγω του ότι τα μήκη κύματος για χαμηλές συχνότητες είναι μεγάλα, οπότε μικρές μεταβολές των αποστάσεων d_1 και d_2 οδηγούν σε σημαντικές μεταβολές της φάσης (δηλαδή σχετικής καθυστέρησης του κύματος). Κατ' επέκταση, οι δύο παραπάνω φυσικοί ακουστικοί μηχανισμοί λειτουργούν συμπληρωματικά και αξιοποιούνται αντιληπτικά από τα κέντρα επεξεργασίας στον εγκέφαλο του ακροατή, καλύπτοντας έτσι όλο το φάσμα ακουστών συχνοτήτων.

Με δεδομένο ότι οι ακροατές εντοπίζουν και διαφοροποιούν με ακρίβεια και πηγές που δεν εμφανίζουν σχετικές διαφορές ηχοστάθμης – φάσης στα 2 αυτιά (π.χ. μια πηγή ακριβώς μπροστά σε γωνία 0° ως προς των νοητό άξονα του κεφαλιού και σε απόσταση 1 μέτρου από αυτόν και μία δεύτερη αντιδιαμετρικά της πρώτης σε γωνία 180° και στην ίδια απόσταση), στην αντίληψη αξιοποιούνται και επιπλέον φαινόμενα ανακλάσεων από τον άνω κορμό (π.χ. ώμο, στήθος κ.λπ.), καθώς επίσης και την επίδραση του εξωτερικού πτερυγίου του αυτιού που συλλέγει και διαφοροποιεί τα ηχητικά κύματα που φτάνουν σε αυτό ανάλογα με τις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και στα 2 επίπεδα. Η καταγραφή και περιγραφή της ανατομίας του πτερυγίου και - σε λιγότερο βαθμό - του κεφαλιού και άνω κορμού, μέσα από κατάλληλα φίλτρα, επιτρέπουν έτσι την κωδικοποίηση και αναπαραγωγή ήχου στο τρισδιάστατο χώρο με πολύ πιο ρεαλιστικό τρόπο από ότι η στερεοφωνική τεχνική (δες παράγραφο αμφιωτικής ακρόασης).

Η στερεοφωνική τεχνική στηρίζεται στην κωδικοποίηση (κατά την ηχογράφιση, επεξεργασία) των ηχητικών πηγών που καταγράφονται (πιθανώς από πολλαπλά μικρόφωνα ή κανάλια) σε σχετικές συμπληρωματικές στάθμες σε 2 κανάλια του ηχητικού μέσου (στερεοφωνικό δίσκο, αρχείο) και στην μετέπειτα αναπαραγωγή του υλικού αυτού από 2 διακριτά Η/Α κανάλια έτσι ώστε να ικανοποιείται η βασική αρχή διαφοροποίησης των σχετικών σταθμών μεταξύ των δύο καναλιών για το είδωλο της συγκεκριμένης πηγής. Η τυπική στερεοφωνική διάταξη ακρόασης δίνεται στο **Σχήμα 1.16(β)** όπου τα δύο ηχεία και ο ακροατής καταλαμβάνουν τις κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου και τα ηχεία είναι στραμμένα σε γωνία 30° ως προς τον ακροατή ώστε να αξιοποιείται η

κατευθυντικότητα των μεγαφώνων μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων. Ιδανικά κατά την ακρόαση, η χωρική θέση του ειδώλου της ηχητικής πηγής που δημιουργείται από την στερεοφωνία θα προσλαμβάνεται στην επιθυμητή γωνία θ μεταξύ των δύο ηχείων, λόγω του σχετικού κέρδους αναπαραγωγής του ειδώλου μεταξύ των δύο καναλιών. Η γωνία αυτή, ιδανικά θα ταυτίζεται με την πραγματική γωνία στην οποία παρουσιαζόταν η πηγή αυτή κατά την ηχογράφιση ή στην εικονική γωνία που ανατέθηκε σε αυτήν κατά την μίξη από τον μηχανικό ήχου (**Σχήμα 1.16(α)**). Για λόγους μικρότερης αντιληπτικής στιβαρότητας σε θέματα χρονικής καθυστέρησης και φάσης μεταξύ των 2 καναλιών (ειδικά αν η θέση ακρόασης δεν είναι η ιδανική του σχήματος), η διαφοροποίηση στην κωδικοποίηση της φάσης-καθυστέρησης αξιοποιείται σε ελάχιστο βαθμό κατά την αρχική κωδικοποίηση (εκτός αν προκύπτει εγγενώς λόγω ηχογράφησης με πολλαπλά μικρόφωνα)



Σχήμα 1.16: Τοποθέτηση του ειδώλου της ηχητικής πηγής σε τυπική στερεοφωνική διάταξη(α) σχετικό κέρδος πηγής κατά την κωδικοποίηση (β) εικονική θέση πηγής κατά την αναπαραγωγή

Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι η στερεοφωνική κωδικοποίηση κυρίως βασίζεται σε συμπληρωματική κατανομή (panoramic – pan) του πλάτους (amplitude) του σήματος της κάθε πηγής στα 2 κανάλια του υλικού, δηλ. όπως συνήθως ονομάζεται ως amplitude panning του σήματος, δυνατότητα που δίνεται με απλό ελεγκτή – ποτενσιόμετρο κέρδους. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.16(α)**, αν g_L και g_R είναι το σχετικό κέρδος του πλάτους που παράγεται από τέτοια επεξεργασία στα 2 κανάλια (L, R) για να

επιτευχθεί ένα συνολικό εύρος γωνιών μεταξύ των ηχείων $\theta_L + \theta_R = 90^\circ$ όπως στο **Σχήμα 9.13(β)**, τότε το συνολικό πλάτος του σήματος σε όλα τα σημεία της «πανοραμικής» κωδικοποίησης, θα πρέπει να είναι σταθερό, δηλαδή:

$$g_L^2 + g_R^2 = 1 \quad (1.8)$$

που ικανοποιείται από τη γνωστή σχέση: $\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$. Από τα παραπάνω:

$$\sin^2(90^\circ - \theta_R) + \cos^2(\theta_L) = 1 \quad \text{και επειδή: } \sin(\theta) = \cos(\theta + 90^\circ)$$

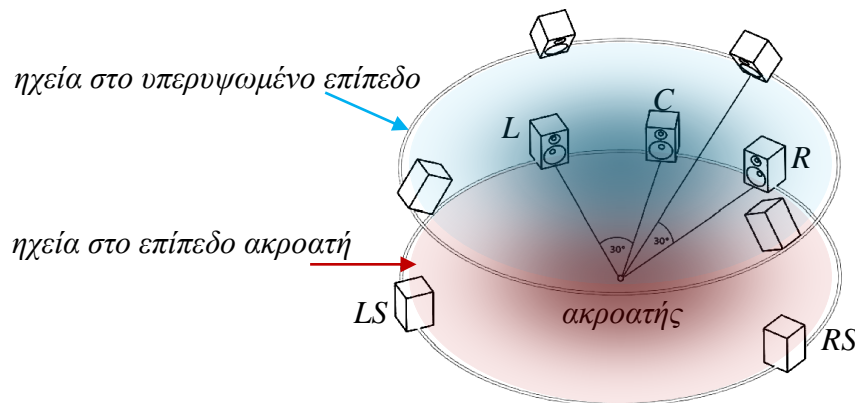
$$\cos^2(90^\circ - \theta_R + 90^\circ) + \cos^2(\theta_L) = 1 \quad \text{και } \cos^2(\theta_R) + \cos^2(\theta_L) = 1$$

$$\text{οπότε } g_{L,R} = \cos(|\theta_{L,R}|) \quad \text{για } 0 \geq \theta_{L,R} \leq 90^\circ \quad (1.9)$$

που δείχνει ότι η τυπική συνάρτηση κέρδους – εικονικής θέσης (γωνίας) ειδώλου για την τεχνική amplitude panning κατά τη στερεοφωνική κωδικοποίηση, ακολουθεί συνημιτονοειδή μορφή (**Σχήμα 1.16(α)**), λαμβάνοντας υπόψη ότι σχήμα, τα g_L και g_R είναι εκφρασμένα σε dB).

Είναι έτσι προφανές ότι η στερεοφωνική μέθοδος αδυνατεί να κωδικοποιήσει και να αναπαράγει αποτελεσματικά εικονικές πηγές-ειδωλα σε χωρικές θέσεις (γωνίες) εκτός του άξονα των 2 ηχείων. Παρόλα αυτά, σχετικές θέσεις ειδώλων στο οριζόντιο επίπεδο ακρόασης για εικονικές αποστάσεις μακρύτερα από τα 2 ηχεία μπορούν να εξομοιωθούν σε κάποιο βαθμό από τις σχετική μείωση της στάθμης τους σε σχέση με πηγές που κωδικοποιούνται σε εικονικές θέσεις στον άξονα των 2 ηχείων και επίσης αυτό επιτυγχάνεται και με την αύξηση του ποσοστού αντήχησης (πραγματικής ή προσομοιωμένης) που συμπεριλαμβάνουν τα σήματα για τις απομακρυσμένες πηγές. Γενικά όμως, η στερεοφωνία αδυνατεί να κωδικοποιήσει πληροφορία σχετική με τη θέση των πηγών στο κάθετο επίπεδο ή και σε θέσεις πολύ κοντά, πλευρικά ή και πίσω από τον ακροατή και έτσι δεν είναι κατάλληλη τεχνική για πλήρως τρισδιάστατη καταγραφή και απεικόνιση του ηχητικού πεδίου. Το μειονέκτημα της αδυναμίας αναπαραγωγής πηγών πλευρικά ή και πίσω από τον ακροατή (και της εν δυνάμει απεικόνισης πλήρως του οριζόντιου επιπέδου του ηχητικού πεδίου), μερικώς αντιμετωπίζεται με την αύξηση των καναλιών καταγραφής και αναπαραγωγής, από τα 2 (στερεοφωνία), στα 5, 7 ή και 11 για τα συστήματα πολυκαναλικής ακρόασης (συστήματα Home Theater ή και surround sound) που βασίζονται στην τυποποίηση ITU-R και τη διάταξη του **Σχήματος 1.13(β)**. Τέτοιες εγκαταστάσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε αναπαραγωγή ήχου για οπτικοακουστικές εφαρμογές και κινηματογραφικές ταινίες. Η τυποποίηση αυτή αξιοποιεί αντίστοιχη με την στερεοφωνία αρχή εντοπισμού πηγής σε πλευρικές θέσεις και πίσω θέσεις, μέσω της κωδικοποίησης διαφοροποιημένου κέρδους (ή και αντήχησης) μεταξύ των πολλαπλών καναλιών. Σε πολυκαναλικές τυποποιήσεις 11.1 (το .xx αφορά κανάλι χαμηλών συχνοτήτων) ή και 22.2 ορίζονται και θέσεις ηχείων σε υψηλότερης θέση από αυτό του επιπέδου ακρόασης (**Σχήμα 1.17**) για δυνατότητα κωδικοποίησης πληροφορίας ύψους, κάτι που αξιοποιείται από τις τυποποιήσεις Dolby Atmos και Auro

3D. Ανάλογη τεχνική τρισδιάστατης κωδικοποίησης πλάτους είναι και η 3D VBAP (3D Vector Based Amplitude Panning).

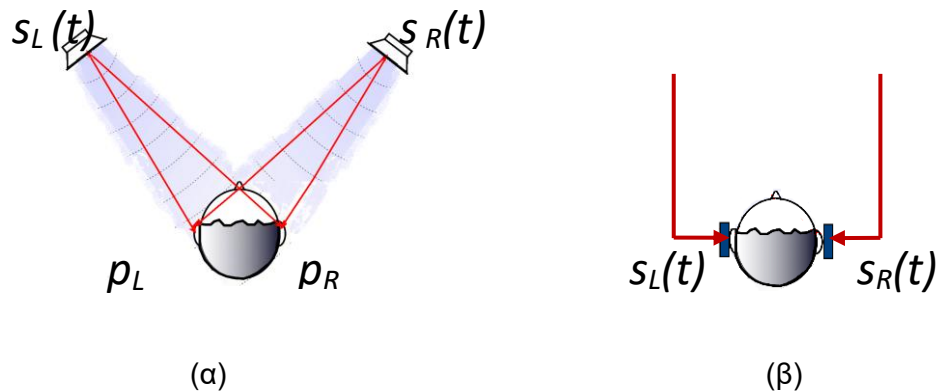


Σχήμα 1.17: Πολυκαναλικό σύστημα 9 ηχείων με ηχεία σε υπερυψωμένη θέση για αναπαραγωγή πληροφορίας στο κάθετο επίπεδο

1.5.2 Αμφιωτική ακρόαση και αναπαραγωγή

Ο άνθρωπος ως ακουστικός δέκτης παρουσιάζει εξαιρετικές ικανότητες στην αναγνώριση και εντοπισμό ηχητικών πηγών στον τρισδιάστατο χώρο. Οι βασικές αρχές αντίληψης της θέσης των πηγών στον τρισδιάστατο χώρο που προαναφέρθηκαν και αφορούν τις σχετικές στάθμες, χρόνους άφιξης ενός σήματος στα 2 αυτιά, της σκίασης του κεφαλιού, της ως προς την γωνία φιλτραρίσματος του σήματος από το πτερύγιο του αυτιού και από τις ανακλάσεις στον άνω κορμό, μπορούν να γενικευθούν σε ένα πλαίσιο που συμπεριλαμβάνει όλους αυτούς τους καθοριστικούς μηχανισμούς και μπορούν να περιγράψουν την αμφιωτική ακρόαση (Binaural listening). Η γενικευμένη αυτή περιγραφή μπορεί να εξαλείψει τους περιορισμούς της στερεοφωνικής τεχνικής και επιτρέπει την υλοποίηση συστημάτων ολογραφικής (τρειςδιάστατης) ηχητικής αναπαραγωγής όπου ηχητικές πηγές μπορούν να αναπαραχθούν εικονικά σε οποιαδήποτε σχετική γωνία σε κάθε επίπεδο και απόσταση ως προς τον ακροατή. Η δυνατότητα αυτή όμως πρακτικά περιορίζεται στην περίπτωση ακρόασης μέσω ακουστικών (**Σχήμα 1.18(β)**) με δεδομένο ότι τα 2 σήματα που μεταφέρονται στα 2 αυτιά του ακροατή, εν πολλοίς είναι ταυτόσημα με τα 2 σήματα που έχουν κωδικοποιηθεί με βάση αυτές τις παραμέτρους. Στην ακρόαση σε κάποιο χώρο μέσω 2 ηχείων, όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 1.18α**), τα σήματα που φθάνουν στα 2 αυτιά, είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των 2 σημάτων από τα ηχεία, δηλαδή στο αριστερό αυτί, το σήμα φθάνει και από το αριστερό, αλλά και από το δεξί ηχείο. Ταυτόχρονα, συχνά η θέση ακρόασης δεν είναι πλήρως συμμετρική ως προς τα ηχεία και συνυπάρχουν με αυτά τα σήματα και ανακλάσεις από το χώρο που φθάνουν από πολλαπλές γωνίες και

έτσι τα επιθυμητά σήματα δεν μπορούν να αναπαραχθούν στη θέση των αυτιών. Παρόλο που έχουν παρουσιαστεί πολλές μέθοδοι που επιχειρούν να καταστείλουν τα ανεπιθύμητα σήματα που φθάνουν σε κάθε αυτί από τα αντιδιαμετρικά ηχεία και τις ανακλάσεις του χώρου (τεχνικές cross-talk cancellation), οι τεχνικές ολογραφικής ηχητικής αναπαραγωγής πρακτικά να εφαρμοστούν με ικανοποιητική ακρίβεια και πιστότητα στον σωστό εντοπισμό της θέσης των πηγών, μόνο για ακρόαση με ακουστικά και σε κάθε περίπτωση βασίζονται σε στάδια ψηφιακής επεξεργασίας του ηχητικού σήματος.

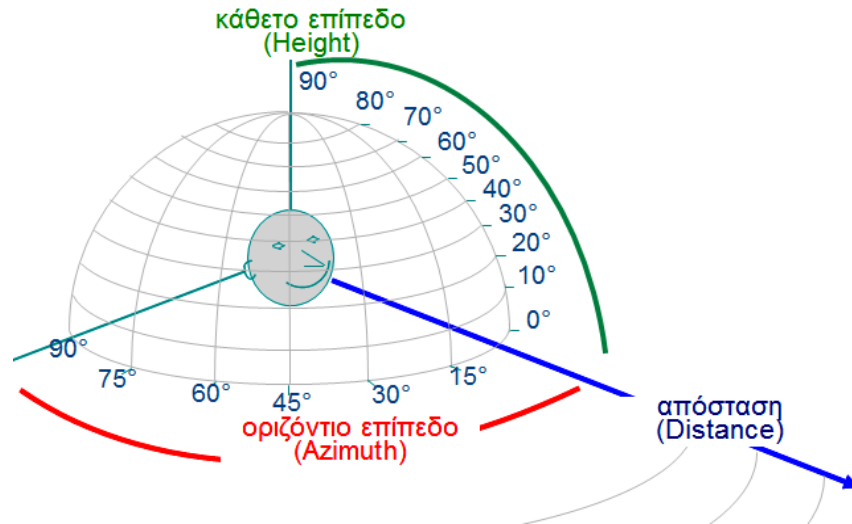


Σχήμα 1.18: ακρόαση μέσω (α) τυπικής στερεοφωνικής διάταξης 2 ηχείων (β) 2 ακουστικών

Κατά τη γενική περίπτωση αμφιωτικής ακρόασης μιας ακουστικής πηγής, ο ήχος που φθάνει στα 2 αυτιά του ακροατή έχει σαν αποτέλεσμα την αντίληψη και τον προσδιορισμό της θέσης της πηγής σε κάποια γωνία τόσο στο οριζόντιο, όσο και στο κάθετο επίπεδο καθώς και την απόσταση που αυτή βρίσκεται (**Σχήμα 1.19**). Η ικανότητα αυτή προκύπτει από τη αντιληπτική διαδικασία που αξιοποιεί τη διαφοροποίηση των σημάτων που φθάνουν στα 2 αυτιά και είναι χαρακτηριστική τόσο για κάθε γωνία στο κάθετο όσο και το οριζόντιο επίπεδο, αλλά επίσης και που εξαρτάται και από ξεχωριστή μορφολογία του πτερυγίου, του κεφαλιού και του άλω κορμού του κάθε ακροατή. Η ευκρίνεια προσδιορισμού στο οριζόντιο επίπεδο είναι της τάξης των 5° , ενώ είναι η ευκρίνεια χειροτερεύει στο κάθετο επίπεδο.

Για την ανάλυση και περιγραφή της αντιληπτικής διαδικασίας μέσω της δυϊκής θεωρίας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αξιοποιούνται οι φυσικές διαφοροποιήσεις στα σήματα των 2 αυτιών:

- διαφορά στάθμης λόγω εξασθένησης της πίεσης λόγω της διαφορετικής απόστασης της πηγής από το κάθε αυτί και το αποτέλεσμα της σκίασης του κεφαλιού. Η διαφορά αυτή αναφέρεται σαν Διωτική Διαφορά Στάθμης (Interaural Level Difference, ILD). Η διαφορά αυτή είναι σημαντική για συχνότητες όπου το μήκος κύματος είναι μικρό σε σχέση με το μέγεθος του κεφαλιού, αρχίζοντας από τα 500Hz και φθάνει και στα 20dB για ψηλές συχνότητες.



Σχήμα 1.19: αντίληψη και εντοπισμός θέσης πηγής μέσω αμφιωτικής ακρόασης

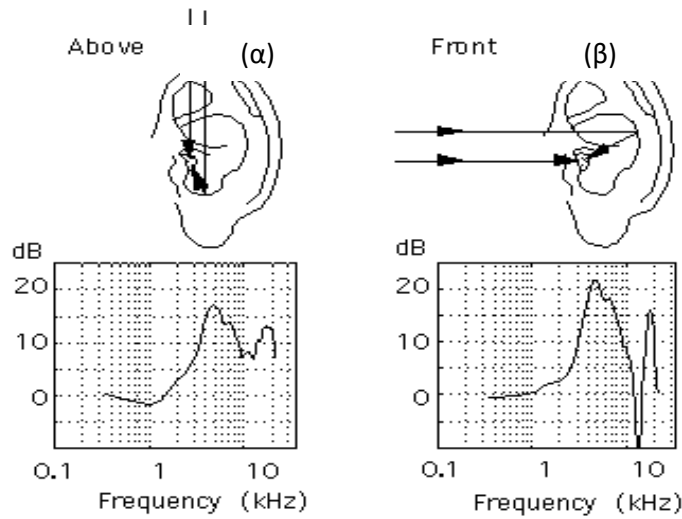
- διαφορά φάσης ή και σχετικής καθυστέρησης λόγω του διαφορετικού χρόνου άφιξης του ήχου σε κάθε αυτί. Η διαφορά αυτή αναφέρεται σαν Διωτική Διαφορά Χρόνου (Interaural Time Difference, ITD). Η διαφορά αυτή είναι σημαντική για συχνότητες όπου το μήκος κύματος είναι μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος του κεφαλιού, πρακτικά κάτω από τα 1500Hz και πλησιάζει τα 700 μsec για γωνία 90° στα για ψηλές συχνότητες.

Η παραπάνω προσέγγιση δεν καλύπτει πλήρως τα χαρακτηριστικά των σημάτων που αξιοποιούνται για την χωρική αντίληψη. Ενδεικτικά, υπάρχει κωνική περιοχή πλευρικά του κάθε αυτιού όπου οι τιμές της ITD είναι παρόμοιες, οπότε και η παράμετρος αυτή δεν μπορεί να συμπληρώσει αντιληπτικά ερεθίσματα από τιμές ILD όπως περιγράφεται από τη δυϊκή θεωρία (η περιοχή αναφέρεται ως cone of confusion)

Είναι λοιπόν απαραίτητο συμπληρωματικά με αυτές τις παραμέτρους να ληφθεί υπόψη και η διαμόρφωση που εισάγει το εξωτερικό αυτί μέσω του σχήματος του πτερυγίου. Είναι γνωστό ότι το προσπίπτον σήμα στο κάθε αυτί διαφοροποιείται και φασματικά («φιλτράρεται») αναλόγως με την γωνία πρόσπτωσης, λόγω της μορφολογίας του πτερυγίου του αυτιού που είναι μάλιστα χαρακτηριστική για τον κάθε άνθρωπο. Το φιλτράρισμα αυτό προκύπτει λόγω του συνδυασμού του προσπίπτοντος σήματος με τα σήματα από πολλαπλές ανακλάσεις στο ανάγλυφο του πτερυγίου, με αποτέλεσμα το συνολικό σήμα που οδηγείται στον ακουστικό πόρο να εμφανίζει χαρακτηριστικές ενισχύσεις και εξασθενίσεις λόγω της συμβολής αυτών των πολλαπλών σημάτων που εξαρτώνται τόσο από τη γωνία πρόσπτωσης όσο και τη συχνότητα του σήματος (**Σχήμα 1.20**).

Η χαρακτηριστική αυτή συνάρτηση φίλτρου του πτερυγίου του εξωτερικού αυτιού, ονομάζεται Συνάρτηση Μεταφοράς Κεφαλής (Head Related Transfer Function, HRTF) και είναι διαφορετική για κάθε γωνία πρόσπτωσης τόσο σε σχέση με το κάθετο, όσο και το οριζόντιο επίπεδο. Ισοδύναμα, η συνάρτηση αυτή εκφράζεται και καταγράφεται σαν η

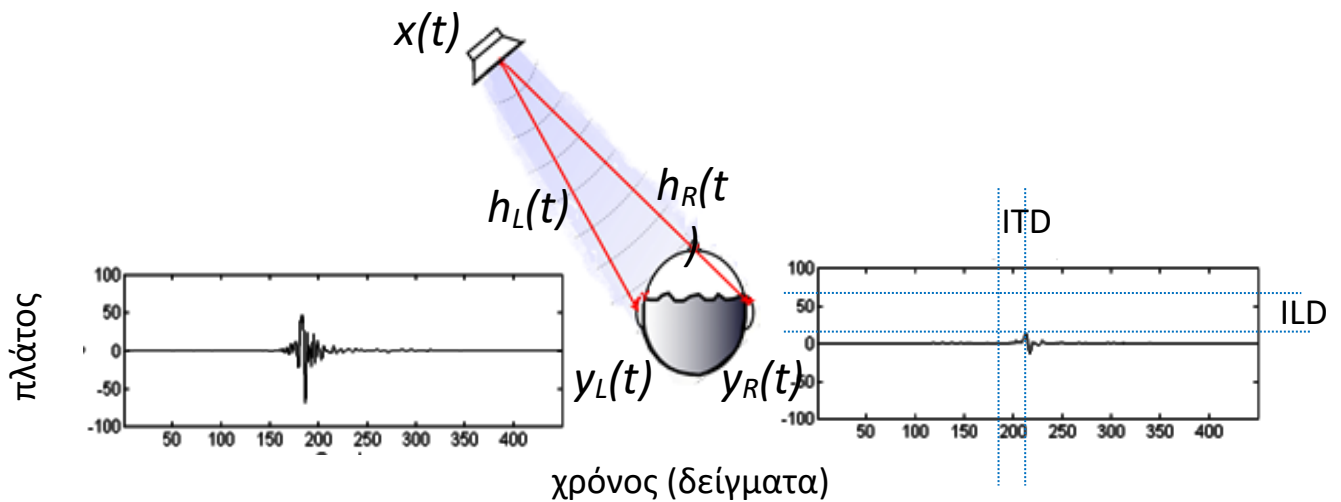
αντίστοιχη κρουστική απόκριση, Head Impulse Response, HIR. Με αναφορά το **Σχήμα 1.21**, μέσω αυτών των συναρτήσεων, είναι δυνατό να περιγραφεί το σήμα που φθάνει στο κάθε αυτί, ως:



Σχήμα 1.20: ανακλάσεις και ενδεικτική απόκριση συχνότητας πτερυγίου για προσπίπτον σήμα κάθετα στο (α) οριζόντιο επίπεδο, (β) κάθετο επίπεδο

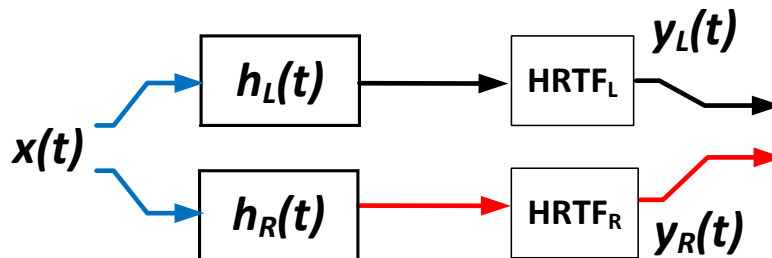
$$y_L(t) = x(t) * h_L(t) * HRTF_L(t)$$

$$y_R(t) = x(t) * h_R(t) * HRTF_R(t) \tag{1.10}$$



Σχήμα 1.21: Αμφιωτική ακρόαση και ενδεικτικές συναρτήσεις HIR που καταγράφονται για τα 2 αυτιά ακροατή μετά από ιδανική διέγερση από θέση πηγής προς τα αριστερά του ακροατή στο οριζόντιο επίπεδο

Στο **Σχήμα 1.21**, οι συναρτήσεις $h_L(t)$ και $h_R(t)$ περιγράφουν τις αποκρίσεις του καναλιού – διαδρομής του σήματος από την πηγή ως το καθένα από τα 2 αυτιά που μπορεί να συμπεριλαμβάνουν την απόκριση του μεγαφώνου-ηχείου, την απλή εξασθένηση και καθυστέρηση λόγω διάδοσης του ήχου, αλλά και σε περιπτώσεις εκπομπής σε κλειστό χώρο και τις ανακλάσεις από τις επιφάνειες που είναι διαφορετικές για κάθε δέκτη. Οι συναρτήσεις $HRTF_L$ και $HRTF_R$ καταγράφουν τις αποκρίσεις – φίλτρα του πτερυγίου για το καθένα αυτί, αφού στο κάθε αυτί τα σήματα θα προσπίπτουν από διαφορετικές γωνίες και θα αντιστοιχούν σε διαφορετικά HRTF. Οι εξισώσεις (...) μπορεί να περιγραφούν από τη διάταξη του **Σχήματος 1.22**.



Σχήμα 1.22: σχηματική διάταξη εξομοίωσης αμφιωτικής ακρόασης ακουστικής πηγής

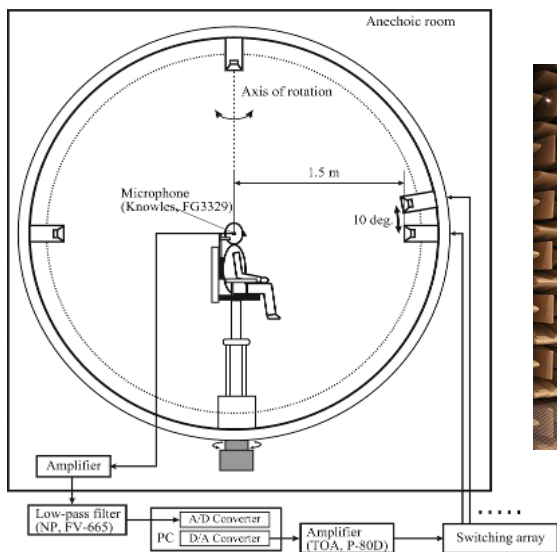
Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 1.21**, οι συναρτήσεις HIR για τα 2 αυτιά καταγράφουν πλήρως τα φαινόμενα διαφοροποίησης πλάτους (ILD) και χρόνου άφιξης (ITD) στα 2 αυτιά για μία συγκεκριμένη γωνία της πηγής ως προς τον ακροατή.

Η μέτρηση των HIR (και των ισοδυνάμων HRTF) ιδανικά θα πρέπει να υλοποιείται για κάθε ακροατή, λόγω της διαφοροποίησης της μορφολογίας, του μεγέθους και σχήματος του πτερυγίου. Η διαδικασία όμως απαιτεί χρήση ανηχικού θαλάμου (είναι ειδικός θάλαμος που δεν εμφανίζει ανακλάσεις του ήχου, ούτε παρεμβολές από θόρυβο) και καταγραφή για πολλαπλές θέσεις πηγής στο κάθετο και οριζόντιο επίπεδο, τυπικά σε διαστήματα-γωνίες 5° (**Σχήμα 1.23**). Λόγω της πολυπλοκότητας και των ειδικών τεχνικών απαιτήσεων της μέτρησης, είναι πλέον σύνηθες να χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων συναρτήσεων HRTF που αντιστοιχούν σε τυπικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά πτερυγίων μέσω μετρητικών ανδρείκελων (dummy head).

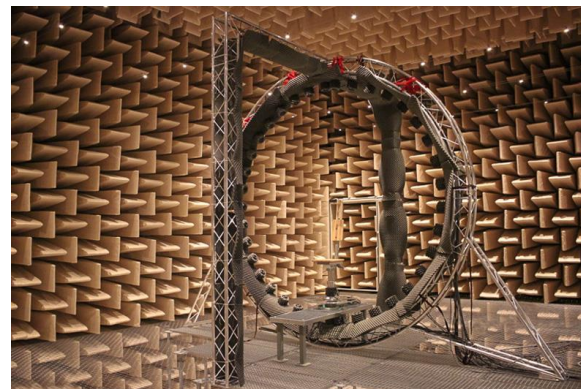
Με δεδομένη την ύπαρξη της βάσης δεδομένων των συναρτήσεων HRTF, η εξομοίωση της ακρόασης μιας εικονικής πηγής, βασίζεται στην υλοποίηση των εξισώσεων... Η πιστότητα της ολογραφικής εξομοίωσης, εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μορφολογίας του πτερυγίου, του μεγέθους του κεφαλιού, κλπ. του συγκεκριμένου σε σχέση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της κεφαλής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις των HRTF. Τα συνηθέστερα προβλήματα αφορούν τον λανθασμένο εντοπισμό της θέσης-γωνίας των εικονικών πηγών (π.χ. σφάλματα εντοπισμού «μέσα στο κεφάλι», in-head localization, σφάλματα αντιδιαμετρικού εντοπισμού, front-back confusion). Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνικές αμφιωτικής αναπαραγωγής, υπερέχουν

σημαντικά της στερεοφωνικής αναπαραγωγής και αποτελούν τη βάση μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε εικονική ακρόαση χώρων (δες Κεφάλαιο 6), σε ήχο για παιχνίδια και για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (VR).

Πέρα από τις αμιγείς μεθόδους αμφιωτικής κωδικοποίησης και αναπαραγωγής που προαναφέρθηκαν, οι βασικές χωρικές παράμετροι ILD και ITD μπορούν να εξαχθούν από πολυκαναλικά σήματα που έχουν ήδη ηχογραφηθεί και εμπεριέχουν τέτοια χωρική πληροφορία και να αξιοποιηθούν σε τεχνικές συμπίεσης ηχητικών δεδομένων, αφού σε τέτοιες εφαρμογές, μπορεί απλά να κωδικοποιηθεί πληροφορία από ένα κανάλι ταυτόχρονα με κανάλι «συμπληρωματικής πληροφορίας» που περιέχει μόνο τιμές των παραμέτρων αυτών και απαιτεί πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bitrate). Τέτοιες τεχνικές αποτελούν τη βάση για πολλές πολυκαναλικές μορφές κωδικοποίησης της τυποποίησης MPEG4 καθώς και άλλων σχετικών μεθόδων που επιτρέπουν προσαρμοζόμενη αναπαραγωγή ανάλογα με τη διαθέσιμη διάταξη ηχείων στον δέκτη.



(α)



(β)

Σχήμα 1.23: μέτρηση συναρτήσεων HRTF (α) διάταξη (β) εγκατάσταση σε ανηχικό θάλαμο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

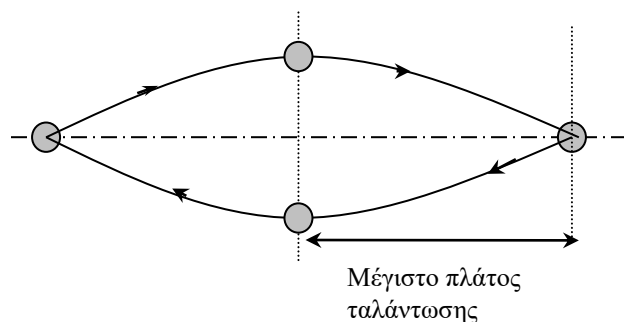
Διάδοση, πηγές και μέτρηση ήχου

2.1 Τα ηχητικά κύματα

Ο ήχος δημιουργείται από τη μηχανική ταλάντωση ενός αερίου, υγρού ή ελαστικού μέσου η οποία μεταφέρει την ενέργεια της πηγής με μορφή ηχητικών κυμάτων. Σε όλες τις πρακτικές περιπτώσεις όπου ένα αντικείμενο κινείται ή δονείται, ένα μικρό ποσοστό της ενέργειάς του μεταφέρεται στα γειτονικά σωματίδια του ελαστικού μέσου που το περιβάλλει υπό μορφή ταλάντωσης η οποία με την σειρά της επενεργεί ως νέα πηγή, που μεταφέρει και διαδίδει το ηχητικό κύμα όπως περιγράφεται και από την αρχή του Huygens. Για να περιγραφεί η μετάδοση του ήχου χρειάζεται να προσδιοριστούν τα σωματίδια αυτά, δηλαδή τα μόρια ή τα στοιχεία του ελαστικού μέσου.

Με τον όρο «στοιχεία του ελαστικού μέσου» ορίζεται ένας στοιχειώδης όγκος του ρευστού, οποίος είναι αφ' ενός μεν τόσο μεγάλος ώστε να συμπεριλαμβάνει εκατομμύρια άτομα, αφ' ετέρου όμως είναι τόσο μικρός, ώστε όλες οι φυσικές του μεταβλητές να είναι οι ίδιες. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η σύμβαση ότι τα στοιχεία και το μέσο είναι ομοιογενή, ιστροπικά και τελείως ελαστικά ρευστά. Οι δυνάμεις της βαρύτητας καθώς επίσης φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας δεν λαμβάνονται υπ' όψη στην ανάλυση που θα ακολουθήσει.

Όταν ένα τέτοιο στοιχείο μετατοπιστεί από τη θέση ισορροπίας του η οποία αρχικά θεωρείται να είναι η ακινησία (που ισοδυναμεί με την χρονικά αμετάβλητη ατμοσφαιρική πίεση), τότε θα χτυπήσει γειτονικό του στοιχείο, αναγκάζοντάς το να μετακινηθεί κατά ίση απόσταση. Όταν το αρχικό στοιχείο επιστρέψει στην αρχική του θέση, θεωρώντας ότι εκτελεί μία αρμονική ταλάντωση (δηλαδή μία μαθηματικά ιδανική κίνηση), τότε θα συμβεί το ίδιο και με τα γειτονικά στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό η διατάραξη του μέσου διαδίδεται με τη μεταφορά της ενέργειας και της μορφής της αρχικής ταλάντωσης και όχι με τη μεταφορά των ίδιων των στοιχείων του ελαστικού μέσου (**Σχήμα 2.1**).



Σχήμα 2.1: Εκτροπή σωματιδίων από τη θέση ισορροπίας

Στο ιδανικό παράδειγμα όπου η πηγή εκτελεί απλή ημιτονοειδή ταλάντωση με συχνότητα f (Hz), έτσι ώστε το πραγματικό μέρος του φάσρα της απομάκρυνσης από την θέση ισορροπίας να εμφανίζεται σαν χρονική μεταβλητή $\xi(t)$, όπου:

$$\xi(t) = A \cos(2\pi ft) \quad (2.1)$$

όπου A είναι το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης, τότε η ταλάντωση αυτή θα προκαλεί περιοδικές συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις (αραιώσεις) του ελαστικού μέσου. Στην περίπτωση που ταλαντώσεις αυτές διαδίδονται κατά μήκος του άξονα διάδοσης του κύματος, τότε το κύμα θεωρείται ως διάμηκες (επίπεδο) κύμα που στην απλούστερη περίπτωση διαδίδεται σε μία διεύθυνση και είναι μονοδιάστατο, όπως για παράδειγμα στην ταλάντωση και πίεση που παράγει ένα παλινδρομικό πιστόνι σε ένα κύλινδρο. Στην περίπτωση που στο ελαστικό μέσο μεταδίδεται μία ταλάντωση κάθετη προς τον άξονα διάδοσης του κύματος, τότε το κύμα θεωρείται να είναι εγκάρσιο. Ένα απλό παράδειγμα δισδιάστατου εγκάρσιου κύματος είναι το κυκλικό κύμα που παράγει στην επιφάνεια ενός υγρού, ένα παλινδρομικά ταλαντούμενο πιστόνι που κινείται κάθετα στην επιφάνεια αυτή, ενώ το κύμα διαδίδεται ακτινικά από την πηγή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρείται ότι η ταλάντωση του ηχητικού κύματος είναι διαμήκης, ενώ τα κύματα προκαλούν την αίσθηση του ήχου, θα πρέπει να περιέχουν συχνότητες που να βρίσκονται μέσα στην περιοχή ακοής, περίπου από 20 Hz μέχρι 20 kHz.

2.2 Η εξίσωση του ηχητικού κύματος

Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, για την αναλυτική περιγραφή ενός ηχητικού κύματος θα απαιτηθεί η πορεία εξέλιξης του τόσο στο χρόνο, όσο και στον χώρο (σε 1, 2 ή και 3 διαστάσεις). Έτσι η στιγμιαία τιμή πλάτους της ταλάντωσης ορίζεται σαν συνάρτηση 2 μεταβλητών $\xi(x,t)$ η οποία παραδοσιακά περιγράφεται από μία μερική διαφορική εξίσωση, ως προς x ή ως προς t . Για τον σχηματισμό της γενικής 3-διαστατης μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει ένα ηχητικό κύμα χρησιμοποιούνται τρεις αρχές της Φυσικής:

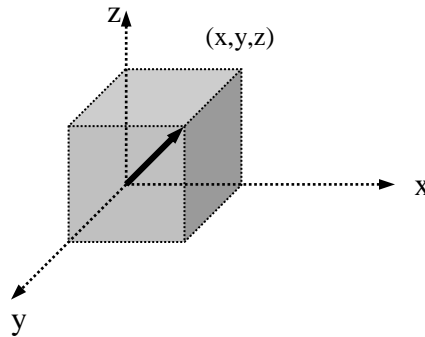
- (α) ο 2^{ος} Νόμος του Newton
- (β) η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ πίεσης και όγκου για το ελαστικό (ρευστό) μέσο διάδοσης
- (γ) η εξίσωση της συνεχούς ροής

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν ταλαντώσεις (όπως αυτές συζητήθηκαν προηγουμένως), πρέπει να επεκταθούν σε τρεις διαστάσεις, επειδή γενικά τα κύματα διαδίδονται με αυτόν τον τρόπο. Στις περιπτώσεις αυτές τα διάφορα φυσικά μεγέθη ορίζονται με διανύσματα της μορφής

$$\vec{u} = u_x \hat{x} + u_y \hat{y} + u_z \hat{z} \quad (2.2)$$

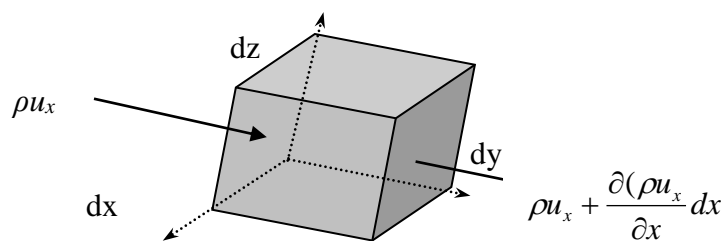
όπου \vec{u} είναι η ταχύτητα του στοιχείου και \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} είναι τα μοναδιαία διανύσματα στους Καρτεσιανούς άξονες x , y , z (**Σχήμα 2.2**). Με τον τρόπο που συζητήθηκε και πριν, εάν $\vec{\xi}$ είναι το διάνυσμα της απομάκρυνσης του στοιχείου από τη θέση ισορροπίας και \vec{a} η επιτάχυνσή του, τότε:

$$\vec{u} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} \quad \text{και} \quad \vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.2: Ορισμός Καρτεσιανών συντεταγμένων για διάδοση κυμάτων

Για να περιγραφεί η πίεση που ασκείται στο μέσο με την κίνησή του, χρειάζεται μια σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της στιγμιαίας πυκνότητας ρ του μέσου αυτού. Προς τον σκοπό αυτό ορίζεται ένα στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο $dV = dx dy dz$ που να είναι σταθερό στο χώρο και υποτίθεται ότι τα στοιχεία του ρευστού κινούνται διαμέσου αυτού (**Σχήμα 2.3**).



Σχήμα 2.3: Ορισμός στοιχειώδους σωματιδίου ακουστικού μέσου

Αν τώρα ρ είναι η στιγμιαία και ρ_0 η σταθερή πυκνότητα ισορροπίας του μέσου σε κάθε του σημείο, και s είναι η μεταβολή της πυκνότητας, τότε s ορίζεται ως:

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.4)$$

Είναι επίσης γνωστό ότι οι ακουστικές διαδικασίες είναι αδιαβατικές. Αυτό σημαίνει ότι δεν υφίσταται σημαντική μεταβολή της στάθμης θερμικής ενέργειας από το ένα στοιχείο του ρευστού στο άλλο. Στις περιπτώσεις αυτές η ακουστική πίεση εκφράζεται σαν:

$$P = \beta \cdot s \quad (2.5)$$

Όπου β είναι το μέτρο ελαστικότητας (Ενδοτικότητα του μέσου).

Εξετάζοντας τη σχέση συνεχούς ροής για το στοιχείο dV που εκφράζει την αύξηση της ταχύτητας της μάζας στο στοιχείο η οποία θα πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα ροής, δηλαδή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dV = -\nabla(\rho \bar{u}) dV \quad (2.6)$$

Όπου η ταχύτητα ροής $(\rho \bar{u}) dV$ καθορίζεται από τον τελεστή ∇ και πιο αναλυτικά:

$$[\nabla(\rho \bar{u})] dV = -\left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] dV \quad (2.7)$$

Οπότε
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0$$

Επειδή ρ_0 είναι σταθερά:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \bar{u} \cong 0 \quad (2.8)$$

Εξετάζοντας τώρα την σχέση δυναμικής ισορροπίας για το στοιχείο dV , η δύναμη df που εφαρμόζεται στον όγκο dV ισούται με τη διαφορά πίεσης στα «τοιχώματα» του όγκου και πρέπει επίσης να ισούται με την επιτάχυνση της μάζας του dV , δηλαδή:

$$\begin{aligned} -[\nabla p] dV &= \bar{a} dm \quad \text{όπου} \\ -[\nabla p] dV &= -\left[\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right] dV \end{aligned} \quad (2.9)$$

Επειδή $dm = \rho dV$ και επειδή δείχνεται ότι $\vec{\alpha} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} = 0$ και αφού κάτω από συνθήκες μικρού πλάτους ταλάντωσης $(\vec{u} \nabla) \vec{u} \rightarrow 0$, άρα $\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) \rho dV = -[\nabla p] dV$

$$\nabla p + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (2.10), \quad \text{ή} \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.11) \quad \text{Εξίσωση του Euler}$$

Όμως ισχύει: $P = \beta \cdot s$. Επίσης ισχύει: $\rho \nabla \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla^2 p$.

Οπότε από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0, \quad \text{άρα} \quad \nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (2.12) προκύπτει:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Όπου c ορίζεται σαν:

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}} \quad (2.14)$$

και είναι η ταχύτητα του ηχητικού κύματος. Η παραπάνω εξίσωση γράφεται και σαν:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

και αποτελεί την λεγόμενη τρισδιάστατη «Κυματική Εξίσωση της Διάδοσης του Ήχου». Πρακτικά, η εξίσωση αυτή περιγράφει ότι όσο πιο γρήγορη είναι η μεταβολή της πίεσης σε κάποιο σημείο του τρισδιάστατου χώρου, τόσο πιο μεγάλη είναι και η επιτάχυνση στην μετακίνηση του κύματος στο χρόνο.

2.3 Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου

Όπως περιγράφηκε, η ταχύτητα του ήχου εκφράζεται από την εξίσωση (14), όπου k είναι μια σταθερά β το μέτρο ελαστικότητας και ρ_0 η πυκνότητα του μέσου. Η ελαστικότητα του μέσου «αέρας» καθορίζεται πειραματικά και ισούται με το γινόμενο της ατμοσφαιρικής πίεσης με μια σταθερά γ . Η σταθερά αυτή είναι ο λόγος της ειδικής θερμότητας του αέρα προς την ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο, που πρακτικά είναι

$$\gamma \approx 1,4. \text{ Προκύπτει λοιπόν ότι } c = \sqrt{\frac{1,4p_0}{\rho_0}} \quad (2.16)$$

όπου p_0 είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Επιπλέον, θεωρώντας ότι ο αέρας λειτουργεί σαν ιδανικό αέριο, η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του αέρα, δηλαδή από την σχέση:

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (2.17)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$. Για $T = 20^{\circ}\text{C}$, τότε $c = 344 \text{ m/s}$, η οποία είναι η τυπική τιμή της ταχύτητας του ήχου για τον αέρα. Στη θάλασσα, η ταχύτητα διάδοσης του ήχου είναι 1500 m/s , στο ξύλο 3800 m/s , στο χάλυβα 5050 m/s και στη γυψοσανίδα 6800 m/s .

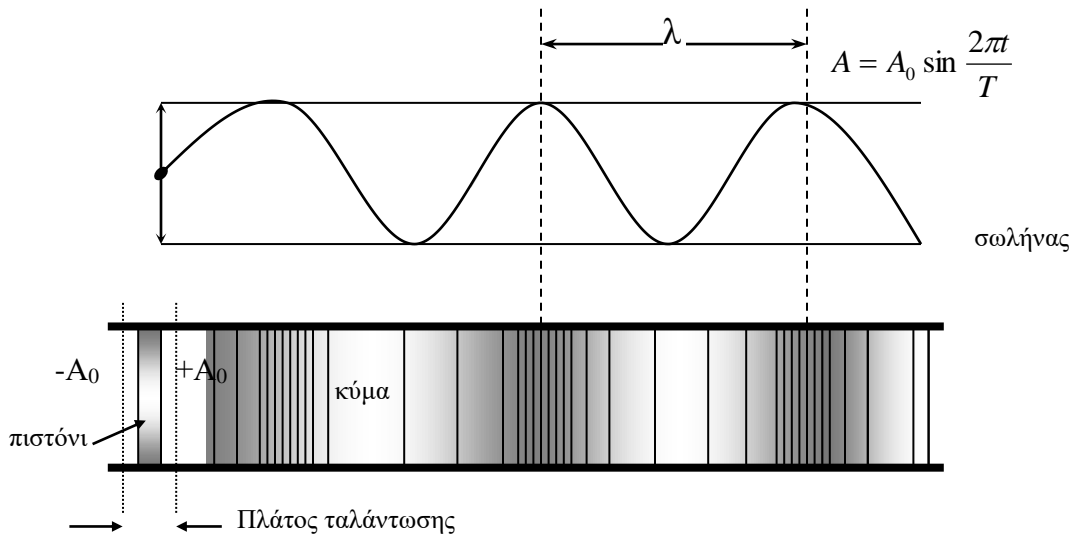
2.4 Τα χαρακτηριστικά των ηχητικών κυμάτων

Τα χαρακτηριστικά των ακουστικών κυμάτων εξαρτώνται από την ταλάντωση της πηγής, που σε πολλές περιπτώσεις βασίζεται στην ιδανική, ημιτονοειδή συνάρτηση. Στο παράδειγμα του **Σχήματος 2.4** η ημιτονοειδής κίνηση του πιστονιού μεταδίδεται σαν μια κυματομορφή που η ακουστική της πίεση παρουσιάζει επαναλαμβανόμενο (περιοδικό) χαρακτήρα (π.χ. το μήκος κύματος) τόσο στο χώρο όσο και στον χρόνο. Το μήκος κύματος λ του ήχου εξαρτάται από την συχνότητα της πηγής, δηλαδή

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \text{ και } c = \lambda \cdot f \quad (2.18)$$

όπου $T(\text{s})$ είναι η περίοδος της ταλάντωσης ($f = 1/T$). Δεδομένου ότι ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται σαν ήχο συχνότητες στην περιοχή των 16Hz έως 16kHz , τότε:

$$\lambda_{16} = 21.5\text{m} \text{ και } \lambda_{16000} = 21.5 \text{ mm}.$$



Σχήμα 2.4: Παραγωγή μονοδιάστατου ακουστικού κύματος από ημιτονοειδή ταλάντωση πιστονιού

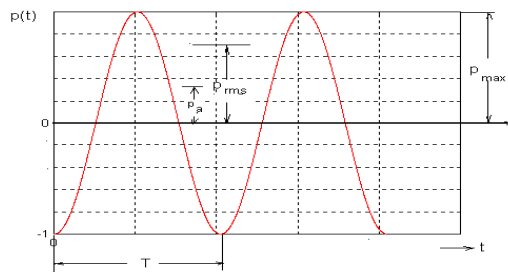
Στην πράξη η μέγιστη τιμή απομάκρυνσης της ακουστικής πηγής (και της ταλάντωσης του κύματος) είναι πολύ μικρή, από 10^{-7} mm μέχρι και μερικά χιλιοστά. Η τιμή αυτή καθορίζει σε γενικές γραμμές και την παραγόμενη ηχητική πίεση, η οποία είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την στατική ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι, ενώ ο ελάχιστος ήχος τον οποίο μπορεί να αντιληφθεί ένα άτομο, αντιστοιχεί σε ακουστική πίεση της τάξης των $0,00002$ Pa, ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$), η πίεση αυτή συνδυάζεται με την ατμοσφαιρική πίεση που είναι της τάξης των 10^5 Pa.

Η πίεση ενός κύματος είναι ένα σημαντικό φυσικό μέγεθος το οποίο και μετριέται σχετικά εύκολα στην πράξη. Όπως και άλλα χρονικά (και χωρικά) μεταβαλλόμενα μεγέθη, έτσι πρέπει και σε σχέση με την ακουστική πίεση να καθοριστεί αν μια μέτρηση αναφέρεται στην μέγιστη ή στην ενεργό τιμή. Στην περίπτωση των απλών περιπτώσεων όπου η χωρική μεταβλητή δεν εξετάζεται και η χρονική συνάρτηση ακολουθεί την ημιτονική μορφή, η σχέση των μεγεθών αυτών περιγράφεται στο **Σχήμα 2.5**. Αν $p(t)$ είναι η χρονική συνάρτηση της ακουστικής πίεσης, τότε όπως είναι γνωστό:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2.19)$$

και με την μέση τιμή p_a να ορίζεται σαν:

$$p_a = \frac{1}{T} \int_0^T |p(t)| dt \Rightarrow p_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} p_a = \frac{1}{\sqrt{2}} p_{max} \quad (2.20)$$



Σχήμα 2.5: Ορισμός μεγεθών peak, rms και average για ημιτονοειδή ταλάντωση

Στην πράξη, είναι επίσης χρήσιμο να εξετάζεται το ηχητικό κύμα του οποίου η πίεση περιγράφεται ως μεταβλητή του χρόνου t και του χώρου x (θεωρώντας την απλή περίπτωση μονοδιάστατου κύματος), σε διακριτές καταστάσεις, μία ως προς μεταβλητή τον χρόνο, διατηρώντας την χωρική μεταβλητή ως σταθερά (δηλαδή για σταθερή απόσταση παρατήρησης ως προς την πηγή), και μία άλλη, ως προς μεταβλητή τον χώρο (απόσταση), διατηρώντας την χρονική μεταβλητή ως σταθερά (δηλαδή για σταθερή στιγμή παρατήρησης ως προς το κύμα).

Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε μία μέτρηση της ηχητικής πίεσης μέσω ενός μικροφώνου, τοποθετημένου σε κάποια σταθερή απόσταση από την πηγή. Η πίεση που καταγράφεται με αυτόν τον τρόπο, $p(t)$, αλλάζει συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Αυτή είναι και η συνήθης διαδικασία καταγραφής του κύματος και κατ' επέκταση του ηχητικού σήματος, αφού το σήμα στην έξοδο του μικροφώνου είναι ηλεκτρικό και μπορεί να αποθηκευθεί και να χρησιμοποιηθεί στις εφαρμογές της Ηλεκτροακουστικής.

Η δεύτερη περίπτωση αντιστοιχεί με πολλαπλές ταυτόχρονες μετρήσεις της ηχητικής πίεσης που προκαλεί το ηχητικό κύμα, σε πολλαπλές διαφορετικές θέσεις, σε μία διεύθυνση από την πηγή (εξετάζοντας μόνο την διάσταση του άξονα x). Έτσι, για την ίδια χρονική στιγμή, η συνάρτηση της πίεσης, $p(x)$, θα εξαρτάται μόνο από την απομάκρυνση από την πηγή.

2.5 Η γενική επίλυση της κυματικής εξίσωσης του ήχου

Η γενική επίλυση της κυματικής εξίσωσης που περιγράφηκε προηγουμένως, θα έχει την μορφή:

$$p(x,t) = f(t - x/c) \quad (2.21)$$

όπου $f(\)$ είναι μία οποιαδήποτε συνάρτηση που περιγράφει την ταλάντωση του κύματος. Η σχέση αυτή περιγράφει λύσεις αφού λέει ότι το κύμα μένει το ίδιο με την κίνησή του με ταχύτητα c , κατά Δx και Δt . Για παράδειγμα, να επαληθευθεί η σχέση παίρνοντας την διπλή παράγωγό της, ως προς x και ως προς t .

Όμοια, κίνηση στον άξονα των x , αλλά στην αρνητική διεύθυνση, θα αποτελεί επίσης γενική επίλυση, άρα γενικότερα, η επίλυση της κυματικής εξίσωσης θα έχει τη μορφή:

$$p(x,t) = f_1(t - x/c) + f_2(t + x/c) \quad (2.22)$$

Σε πολλές περιπτώσεις η συνάρτηση $f(\)$ θα έχει αρμονική μορφή, δηλ. αυτή του μιγαδικού φάσoρα:

$$p(x,t) = f(t - x/c) + f(t + x/c) = \sqrt{2}[P_{\max} e^{j(\omega t - kx)} + P_{\max} e^{j(\omega t + kx)}] = \sqrt{2}[P_{\max} e^{jk(ct-x)} + P_{\max} e^{jk(ct+x)}] \quad (2.23)$$

όπου ο κυματικός αριθμός $\kappa = 2\pi / \lambda$ (rad/m) καθορίζει ότι το αρμονικό κύμα θα επαναλαμβάνεται κάθε 2π rads (δηλαδή 360°) και P_{\max} ορίζει το μέγιστο πλάτος της πίεσης. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, θα λαμβάνεται το πραγματικό μέρος αυτής της συνάρτησης, δηλαδή:

$$p(x,t) = p_{\max} \cos k(x - ct) + p_{\max} \cos k(x + ct) \quad (2.24)$$

2.6 Επίπεδα και σφαιρικά κύματα ήχου

Αν όλες οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν ένα ηχητικό κύμα είναι συναρτήσεις μόνο ενός άξονα συντεταγμένων, τότε η φάση σε κάθε επίπεδο κάθετο σ' αυτήν τη διεύθυνση είναι

σταθερή και το ηχητικό κύμα είναι επίπεδο. Έστω ο άξονας μετάδοσης είναι ο x . Τότε η κυματική εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.25)$$

όπου η ακουστική πίεση είναι συνάρτηση του x και t .

Σύμφωνα με την παραπάνω συζήτηση, για πηγή ήχου που αποδίδει αρμονική ταλάντωση, η λύση για την ακουστική πίεση δίνει:

$$p(x,t) = \sqrt{2}[P_{\max} e^{j(\omega t - kx)} + P_{\max} e^{j(\omega t + kx)}] = \sqrt{2}[P_{\max} e^{jk(ct-x)} + P_{\max} e^{jk(ct+x)}] \quad (2.26)$$

η οποία για πραγματική ημιτονοειδή πηγή και κύμα που να κινείται σε μία διεύθυνση, δίνει:

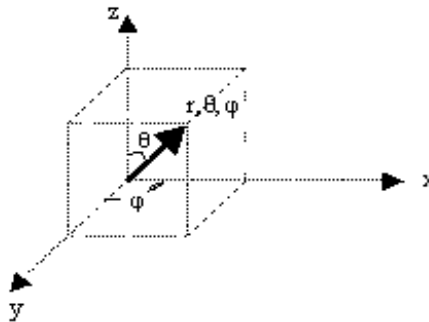
$$p(x,t) = P_{\max} \cos k(x - ct) \quad (2.27)$$

επίσης με δεδομένο ότι ισχύει:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{και άρα} \quad u = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{τότε η ταχύτητα των σωματιδίων, θα είναι:}$$

$$u(x,t) = \sqrt{2}\left[\frac{P_{\max}}{\rho c} e^{jk(ct-x)} + \frac{P_{\max}}{\rho c} e^{jk(ct+x)}\right] = \frac{p(x,t)}{\rho c} \quad (2.28)$$

Για τα σφαιρικά κύματα, οι μεταβλητές ενός τέτοιου ηχητικού κύματος είναι σε φάση με σφαιρικές επιφάνειες που έχουν κέντρο την αρχή των αξόνων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται «Σφαιρικές Συντεταγμένες» σε αντίθεση με τις «Καρτεσιανές Συντεταγμένες» που χρησιμοποιούνται για επίπεδα κύματα (**Σχήμα 2.6**).



Σχήμα 2.6: Ορισμός σφαιρικών συντεταγμένων

Με ανάλογο τρόπο, το σφαιρικό κύμα καθορίζεται από την μεταβλητή του χρόνου t και την ακτινική απόσταση r από την πηγή:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.29)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί και να γραφεί σαν:

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} \quad (2.30)$$

Η γενική επίλυση της εξίσωσης αυτής για αρμονική πηγή, θα έχει την μορφή:

$$p(r,t) = \sqrt{2} \left(\frac{P_{\max} e^{-jkr}}{r} + \frac{P_{\max} e^{jkr}}{r} \right) e^{j\omega t} \quad (2.31)$$

η οποία συνήθως απλοποιείται για εξερχόμενα κύματα, στην:

$$p(r,t) = \frac{\sqrt{2}}{r} P_{\max} e^{-jkr} e^{j\omega t} \quad (2.32)$$

και ακόμη, θεωρώντας πραγματική ημιτονοειδή πηγή, σαν:

$$p(r,t) = \frac{P_{\max} \sqrt{2}}{r} \cos k(r - ct) \quad (2.33)$$

ενώ η ταχύτητα των σωματιδίων θα δίνεται από τη σχέση:

$$u(r,t) = \frac{P_{\max} \sqrt{2}}{\rho_0 c r} e^{j\omega t} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \quad (2.34)$$

2.7 Θέματα πρακτικής επίλυσης των κυματικών εξισώσεων

2.7.1 Στάσιμα κύματα

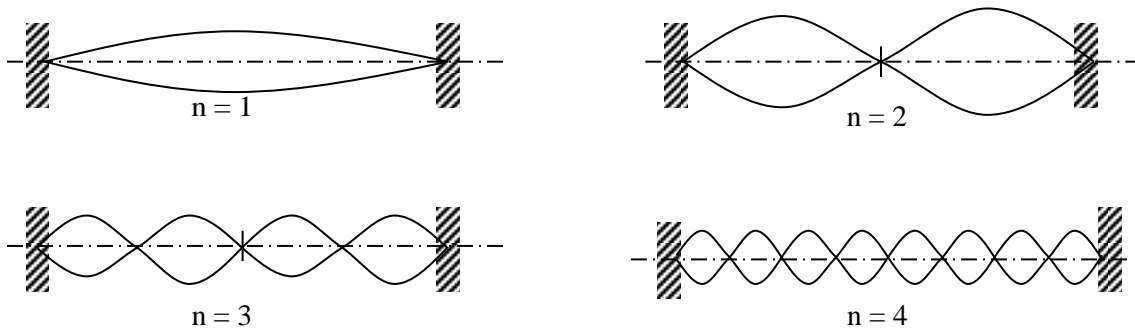
Οι γενικές επιλύσεις των κυματικών εξισώσεων που παρουσιάστηκαν περιγράφουν μαθηματικά πως το κύμα παραμένει το ίδιο με την χρονική ή χωρική του μετακίνηση, δηλαδή αν το x αυξηθεί κατά Δx και το t κατά Δt , με δεδομένο ότι $c = \Delta x / \Delta t$. Αυτό το είδος κύματος αποτελεί ένα «προοδευτικό κύμα» (progressive wave), το οποίο θεωρείται ότι μετακινείται ελεύθερα σε μία (ή περισσότερες) διευθύνσεις, χωρίς να βρίσκει εμπόδια. Σε πολλές όμως περιπτώσεις, η ακουστική πίεση που παράγεται είναι το αποτέλεσμα συνδυασμού περισσότερων κυμάτων ή και ενός κύματος και ανακλάσεων του σε μία ή περισσότερες επιφάνειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπέρθεσης κυμάτων, ισχύει η αρχή της επαλληλίας η οποία ορίζει ότι οι γραμμικοί συνδυασμοί των λύσεων $p_i(x,t)$ της κυματικής εξίσωσης, αποτελούν επίσης λύση της εξίσωσης, δηλαδή:

$$p(x,t) = \sum_i p_i(x,t) \quad (2.35)$$

Αν εξετασθεί μία τέτοια περίπτωση υπέρθεσης κυμάτων, όπου ουσιαστικά προστίθενται 2 όμοια κύματα που προέρχονται από την ίδια αρμονική πηγή, αλλά που ταξιδεύουν σε αντίθετη μεταξύ τους διεύθυνση (όπως στην γενική εξίσωση του αρμονικού κύματος), τότε:

$$p(x,t) = P_{\max} \cos k(x-ct) + P_{\max} \cos k(x+ct) = 2p_{\max} (\cos kx) \cos(2\pi ft) \quad (2.36)$$

Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση του κύματος δεν παραμένει η ίδια για αλλαγές κατά Δx και Δt (π.χ. σε γειτονικά χρονικά ή χωρικά σημεία), αλλά παρουσιάζει μία χωρική διαμόρφωση του πλάτους που εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής και έτσι τα κύματα αυτά δεν είναι «προοδευτικά», αλλά «στάσιμα». Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα κύματα που δημιουργούνται από την διάδοση ενός μονοδιάστατου προοδευτικού αρμονικού κύματος που ανακλάται σε 2 παράλληλες και πλήρως ανακλαστικές επιφάνειες οι οποίες απέχουν απόσταση L μεταξύ τους και εκτείνονται επί' άπειρο, κάθετα στον άξονα διάδοσης του κύματος (**Σχήμα 2.7**).



Σχήμα 2.7: Δημιουργία στασίμων κυμάτων σε παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες

Στην περίπτωση αυτή, η πίεση μεταβάλλεται αρμονικά (π.χ. με ημιτονοειδή τρόπο) σε κάθε σημείο του χώρου διάδοσης, εκτός από τα σημεία $x = 1/4\lambda$ και $x = 3/4\lambda$, όπου η πίεση είναι πάντα μηδενική, ενώ η μέγιστη τιμή της πίεσης εμφανίζεται στα σημεία $x = 0$, $x = \lambda/2$ και $x = \lambda$. Στην πράξη, ένα τέτοιο κύμα θα εμφανίζει τις μέγιστες τιμές (συντονισμούς) και τις ελάχιστες τιμές (ακυρώσεις) σε θέσεις οι οποίες θα εξαρτώνται από τη σχέση μεταξύ της απόστασης L και της συχνότητας της αρμονικής ταλάντωσης. Η χαμηλότερη συχνότητα f_{min} (Hz) για την οποία θα μπορεί να παρουσιαστεί τέτοιο στάσιμο κύμα, θα είναι $f_{min} = c/2L$, ενώ ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής, δηλαδή συχνότητες $f_n = n c/2L$ ($n=1,2,\dots$) επίσης θα παράγουν στάσιμα κύματα. Δεδομένου ότι η μικρότερη απόσταση L για την δημιουργία στάσιμου κύματος είναι $L = \lambda/2$, αυτό συνεπάγεται ότι $k = \pi/L$ και έτσι η εξίσωση (...) που περιγράφει το στάσιμο κύμα, μπορεί να γραφεί σαν:

$$p(x,t) = 2p_{\max} \left(\cos x \frac{\pi}{\lambda} \right) \cos(2\pi ft) \quad (2.37)$$

καθώς και για ακέραια πολλαπλάσια του αρχικού κυματικού αριθμού και της συχνότητας, δηλαδή:

$$p(x,t) = 2p_{\max} \left(\cos nx \frac{\pi}{\lambda} \right) \cos(2\pi ft) \quad (2.38)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει όλους τους πιθανούς τρόπους (modes) συντονισμού ενός μονοδιάστατου στάσιμου κύματος. Προφανώς υπέρθεση τέτοιων λύσεων, επίσης θα αποτελεί λύση για στάσιμο κύμα, οπότε και η γενική επίλυση ενός τέτοιου στάσιμου κύματος θα έχει τη μορφή:

$$p(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \left(\cos nx \frac{\pi}{\lambda} \right) \cos(2\pi f t) \quad (2.39)$$

Σημειωτέον ότι παραλλαγές τις παραπάνω γενικής σχέσης μπορεί να εμφανίζονται εάν η αρμονική διέγερση θεωρηθεί ότι είναι ο μιγαδικός φάσορας. Σε όλες τις περιπτώσεις, η σχέση αυτή περιγράφει πως το αρμονικό σήμα διέγερσης διαμορφώνεται από έναν χωρικό αρμονικό όρο.

Στην βιβλιογραφία της ακουστικής και των ταλαντώσεων, οι παραπάνω γενικές επιλύσεις χρησιμοποιούνται για την μελέτη διαφόρων διατάξεων, όπως για παράδειγμα, οι χορδές, οι κλειστοί ή ημίκλειστοι σωλήνες, κλπ. Σε κάθε περίπτωση, η συγκεκριμένη γεωμετρία καθορίζει τις αρχικές συνθήκες και τις παραλλαγές των επιλύσεων. Επιπλέον, στην πράξη, στάσιμα ακουστικά κύματα δημιουργούνται σε κλειστούς χώρους που παρουσιάζουν κανονικό γεωμετρικό σχήμα και παραλληλίες μεταξύ των επιφανειών των τοίχων, όπως θα συζητηθεί στο Κεφάλαιο της Ακουστικής των κλειστών χώρων (Ηλεκτροακουστική II). Σε επόμενη παράγραφο, το παραπάνω πρόβλημα της επίλυσης για στάσιμα κύματα, θα παρουσιαστεί από μία διαφορετική θεώρηση.

2.7.2 Ανάλυση ακουστικών κυμάτων σε συχνότητες

Γενικά από τις παραπάνω περιπτώσεις, αυτά που συζητήθηκαν στην **Παράγραφο 2.5** αλλά και από την θεωρία των ταλαντώσεων, φάνηκε ότι οι επιλύσεις των κυματικών εξισώσεων γίνονται για απλές αρμονικές συναρτήσεις διέγερσης και έχουν τη γενική μορφή:

$$p(x) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \left(\cos nx \frac{\pi}{L} \right) \quad (2.40)$$

όπου η πίεση κάποια χρονική στιγμή σε οποιοδήποτε σημείο του μονοδιάστατου χώρου (π.χ. στο διάστημα 0 έως L) περιγράφεται σαν σταθμισμένο άθροισμα αρμονικών «χωρικών» διακυμάνσεων. Ανάλογη σχέση προκύπτει, εάν η πίεση περιγραφεί για κάποιο σημείο του χώρου αυτού, σαν χρονική μεταβολή (π.χ. στο διάστημα 0 έως T) σαν σταθμισμένο άθροισμα αρμονικών χρονικών διακυμάνσεων, δηλαδή:

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cos(2\pi f \frac{t}{T}) \quad (2.41)$$

Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λύση πρακτικών προβλημάτων της Ακουστικής, αφού οποιαδήποτε αρμονική ακουστική κυματική ταλάντωση η οποία λαμβάνεται σε ένα σημείο του χώρου (π.χ. σε ένα δέκτη), μπορεί να περιγραφεί σαν

άθροισμα επιμέρους απλών ημιτονοειδών ταλαντώσεων με συχνότητες πολλαπλάσια μίας βασικής (για $n=1$), όπως άλλωστε περιγράφεται και από την γνωστή ανάλυση κατά **σειρά Fourier**. Πολλά πρακτικά ακουστικά σήματα έχουν αυτόν τον περιοδικό / αρμονικό χαρακτήρα, αλλά αυτή η θεώρηση μπορεί να γενικευθεί, ώστε να περιγράψει όλα τα πραγματικά ακουστικά σήματα, αφού στις περισσότερες πρακτικές καταστάσεις η ταλάντωση της πηγής δεν έχει απλό αρμονικό χαρακτήρα. Έτσι θα ήταν χρήσιμη η χρήση γενικευμένου συστήματος επίλυσης που θα έδινε απαντήσεις για όλους τους κυματικούς αριθμούς ή όλες τις συχνότητες και όχι μόνο για ορισμένες «αρμονικές». Ένα τέτοιο σύστημα επίλυσης προσφέρεται με τη χρήση του **μετασχηματισμού Fourier** (όπως περιγράφεται και στο μάθημα των Σημάτων & Συστημάτων). Αντί λοιπόν για ανάλυση ενός περιοδικού σήματος στο διάστημα τιμών $0 < t < T$ και σε συχνότητες $f_n = n f_0$ γίνεται η ανάλυση ενός οποιουδήποτε σήματος το οποίο θεωρητικά ορίζεται για συνεχή μεταβλητή του χρόνου στο διάστημα $-\infty < t < \infty$ και για συνεχή μεταβλητή της συχνότητας, όπως ορίζεται από τον φάσσορα $e^{j\omega t}$, μέσω του ολοκληρώματος Fourier, δηλαδή του αντίστοιχου Μετασχηματισμού που ως γνωστό ορίζεται σαν:

$$p(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(k)e^{jkx} dk \quad p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.42)$$

Η παραπάνω σχέση λέει ότι σε κάποιο σημείο παρατήρησης, οποιαδήποτε συνάρτηση πίεσης $p(t)$ μπορεί να παραχθεί από την υπέρθεση απείρων μιγαδικών αρμονικών όρων, των οποίων το πλάτος ανά συχνότητα ω , ορίζεται από την μιγαδική συνάρτηση $P(\omega)$, που συνήθως ονομάζεται το **«φάσμα»** της $p(t)$.

Από πρακτικής άποψης, ο μηχανικός συνήθως χρησιμοποιεί το αντίστροφο του παραπάνω μετασχηματισμού Fourier, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του φάσματος (μιγαδική συνάρτηση $P(\omega)$), από μία μέτρηση της πίεσης, δηλαδή:

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.43)$$

Αντίστοιχα ζευγάρια μετασχηματισμού Fourier μπορούν να παραχθούν για την μεταβλητή του χώρου, θεωρώντας σταθερή την μεταβλητή του χρόνου. Δηλαδή, θεωρούμε ότι σε κάποιο σημείο x , η πίεση σχηματίζεται από την υπέρθεση απείρων όρων με πολλαπλάσια του κυματικού αριθμού της βασικής ταλάντωσης:

$$p(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(k)e^{jkx} dk \quad (2.44)$$

Όμοια, το φάσμα των κυματικών αριθμών προκύπτει από τον μετασχηματισμό της χωρικής συνάρτησης της πίεσης, δηλ.:

$$P(k) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x)e^{-jkx} dx \quad (2.45)$$

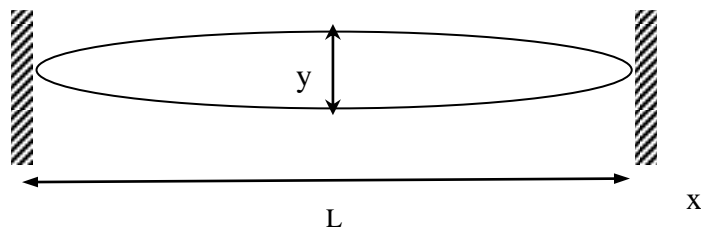
Από τις παραπάνω σχέσεις, ο μηχανικός χρησιμοποιεί κατά κόρο την εξίσωση (2.43) που δίνει το φάσμα $P(\omega)$ σαν μια μιγαδική συνάρτηση που μπορεί να αναλυθεί σε μέτρο και φάση (δηλαδή $P(\omega) = |P(\omega)|e^{j\arg(P(\omega))}$). Στην πράξη, μία μέτρηση με μικρόφωνο, τοποθετημένο σε κάποιο σημείο του πεδίου, θα παράγει την συνάρτηση $p(t)$, από την οποία (μετά από την απαραίτητη ψηφιοποίηση), ένας υπολογιστής μπορεί να παράγει την (διακριτού χρόνου) συνάρτηση φάσματος, υπολογισμένου συνήθως σε dB, δηλαδή σαν $20\log|P(\omega)|$. Η δυνατότητα αυτή υλοποιείται με την χρήση αλγορίθμου Ταχέως Μετασχηματισμού Fourier (FFT). Με χρήση κατάλληλου σήματος διέγερσης, ένα τέτοιο φάσμα θα μπορούσε να αποτελεί μέτρηση της απόκρισης συχνότητας ενός ακουστικού ή ηλεκτροακουστικού συστήματος (δες Άσκηση 1).

2.8 Παράδειγμα

Έστω το γνωστό πρόβλημα της διάδοσης του ήχο σε δύο παράλληλους τοίχους. Παρακάτω, το πρόβλημα αυτό θα εξετασθεί με τις μεθοδολογίες που περιγράφηκαν προηγουμένως, δηλαδή την κυματική εξίσωση και τον μετασχηματισμό Fourier.

2.8.α Κυματική Ανάλυση

Έστω ότι το στάσιμο κύμα αποτελείται από δύο αντίθετα κινούμενα τμήματα ίσων κυματικών αριθμών και έντασης, χωρίς την παρουσία απώλειας ενέργειας. Έτσι δημιουργείται μια ταλάντωση παρόμοια με αυτήν που εκτελεί μια χορδή που είναι στερεωμένη στα δύο της άκρα. Στην περίπτωση αυτή η πίεση θα μεταβάλλεται με αρμονικό τρόπο (στον χρόνο ή στην απομάκρυνση), αλλά θα είναι πάντοτε 0 σε σημεία που θα εξαρτώνται από την απόσταση L μεταξύ των επιφανειών και την συχνότητα της πηγής. Η μέγιστη τιμή πίεσης θα εμφανίζεται για $x = 0$ και $x = L/2$ κ.ο.κ., όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**.



Σχήμα 2.8: Αρμονική ταλάντωση στάσιμου κύματος

Η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση δίνει:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.46)$$

Στους τοίχους η ταχύτητα είναι μηδέν, δηλαδή $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ για $x = 0, L$ και η επίλυση (όπως συζητήθηκε) έχει τη γενική μορφή:

$$p(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{k_n x \pi}{L} [A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t] \quad (2.47)$$

δηλαδή τον συνδυασμό ημιτονοειδών συναρτήσεων γινομένου κυματικού αριθμού/απομάκρυνσης και συχνότητας/χρόνου. Η χαμηλότερη αρμονική συχνότητα που παράγει τέτοιο στάσιμο κύμα είναι

$$\eta \quad \omega_{\min} = \frac{\pi c}{L} \text{ (rad/s) και τα ακέραια πολλαπλάσιά της } \omega_n = \frac{n \pi c}{L}, \text{ που αποτελούν τις}$$

ιδιοσυχνότητες ή συχνότητες συντονισμού. Η σειρά αυτή των στάσιμων κυμάτων για τις διαφορετικές τιμές του n , ονομάζεται «τρόποι». Δεδομένου ότι η μικρότερη απόσταση L που παράγει στάσιμα θα είναι $L = \lambda/2$, δηλαδή $k = \pi/\lambda$, η εξίσωση για τον πρώτο τρόπο προκύπτει από την μονοδιάστατη διαφορική εξίσωση:

$$p(x,t) = 2P \cos(\omega t) \cos(x \frac{\pi}{L}) \quad (2.48)$$

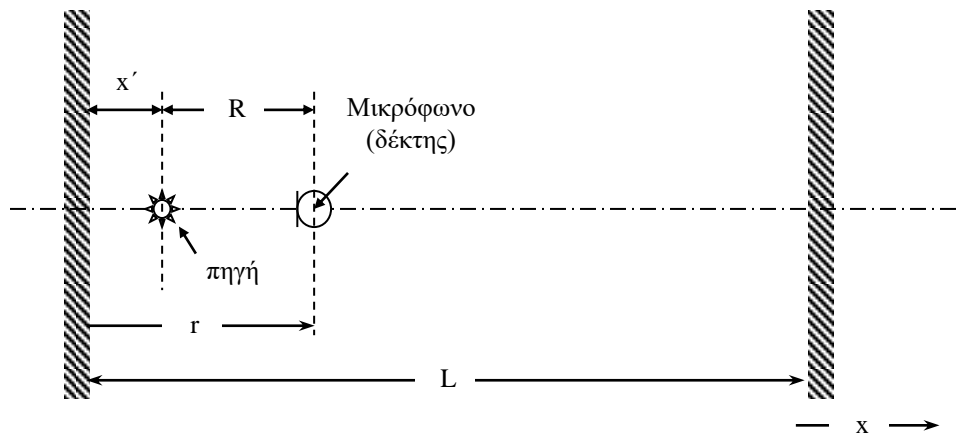
ενώ οι υπόλοιποι τρόποι ($n = 1, 2, \dots$) είναι οι:

$$p(x,t) = 2P \cos(n\omega t) \cos(nx \frac{\pi}{L}) \quad (2.49)$$

Αυξανόμενης της συχνότητας εκπομπής, μικραίνει το λ και μακραίνουν οι αποστάσεις των μηδενικών σημείων.

2.8.β Επίλυση Fourier

Για να σχηματιστεί η αντίστοιχη σχέση, χρειάζεται η χαρακτηριστική κρουστική απόκριση του συστήματος. Έστω ότι η πηγή παράγει έναν ηχητικό παλμό που έχει χαρακτηριστικά της συνάρτησης $\delta(t)$.



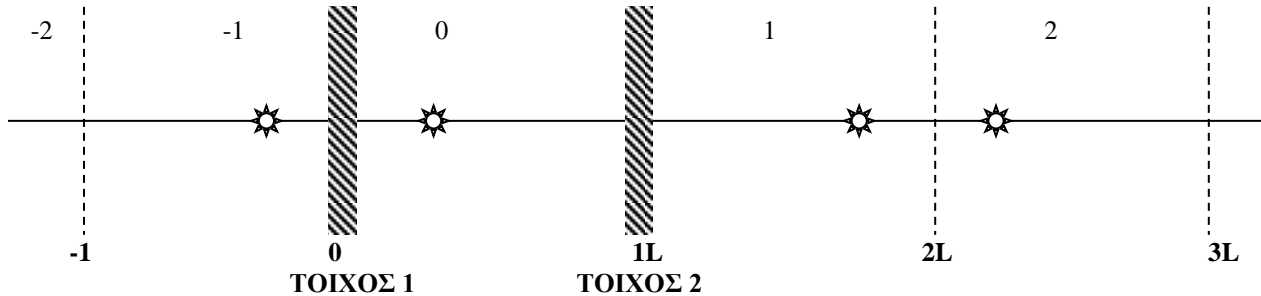
Σχήμα 2.9: Διάταξη πηγής / δέκτη σε παράλληλες επιφάνειες

Υποτίθεται ότι ο ήχος κινείται προς δύο αντίθετες κατευθύνσεις και ανακλάται διαδοχικά στις δύο επιφάνειες (Σχήμα 2.9). Τότε από τη μια κατεύθυνση θα φθάνει στη θέση που βρίσκεται ο δέκτης

($x = r$), σε διαστήματα $t_1 = \frac{2nL \pm x' + r}{c}$, ενώ από την άλλη αρχική κατεύθυνση σε διαστήματα

$t_2 = \frac{2nL \pm x' - r}{c}$ (sec). Σε αντιστοιχία με τις μεθόδους της Οπτικής, κάθε μια από τις ανακλάσεις

μπορεί να αντικατασταθεί από μια «**Εικονική Πηγή**» ή «**Πηγή – Είδωλο**», η οποία βρίσκεται σε θέσεις συμμετρίας ως προς τον ανακλαστήρα (Σχήμα 2.10).



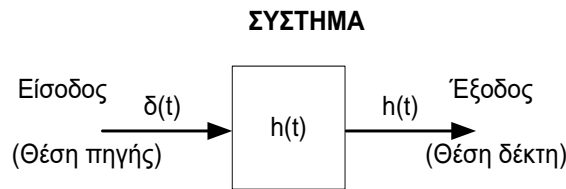
Σχήμα 2.10: Δημιουργία ηχητικών ειδώλων σε παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες

Συνολικά υποτίθεται ότι πηγές βρίσκονται στις θέσεις $R_n = nL + x' - r$ για $n = \text{άρτιο}$ και

$R_n = (n+1)L - x' - r$ για $n = \text{περιττό}$. Οι χρονικές στιγμές που οι ανακλάσεις θα φθάνουν στη

θέση που βρίσκεται ο δέκτης θα είναι $t_n = \frac{R_n}{c}$, οπότε το σήμα που παρουσιάζεται στη θέση του

δέκτη θα είναι η κρουστική απόκριση του συστήματος (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 Αναπαράσταση Ακουστικού Συστήματος

Άρα η κρουστική απόκριση του συστήματος θα έχει τη μορφή:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P}{R_n} \delta(t - t_n) \quad (2.50)$$

όπου P είναι το πλάτος του σήματος της πηγής. Εδώ θεωρείται μια εξασθένιση του ήχου η οποία οφείλεται μόνο στην απόσταση και όχι σε ανάκλαση. Αν τώρα $\frac{P}{R_n} = g^n$, όταν g είναι μια

σταθερά και $t_n = \frac{R_n}{c} = nt_0$, όπου t_0 είναι μια σταθερά, τότε η Συνάρτηση Μεταφοράς του συστήματος $H(\omega)$ μπορεί να εκφρασθεί αναλυτικά (δες Σήματα και Συστήματα), σαν:

$$H(\omega) = F\{h(t)\} = F\left\{\sum_{n=0}^{\infty} g^n \delta(t - nt_0)\right\}$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} g^n \delta(t - nt_0) e^{-j\omega t} dt = \frac{1 - g^n e^{-j\omega nt_0}}{1 - g e^{-j\omega t_0}} \quad \text{ή}$$

$$H(\omega) = \frac{A}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t} + \frac{B}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t_0}$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} g^n \delta(t - nt_0) e^{-j\omega t} dt = \frac{1 - g^n e^{-j\omega nt_0}}{1 - g e^{-j\omega t_0}} \quad \text{ή}$$

$$H(\omega) = \frac{A}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t} + j \frac{B}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t_0} \quad (2.51)$$

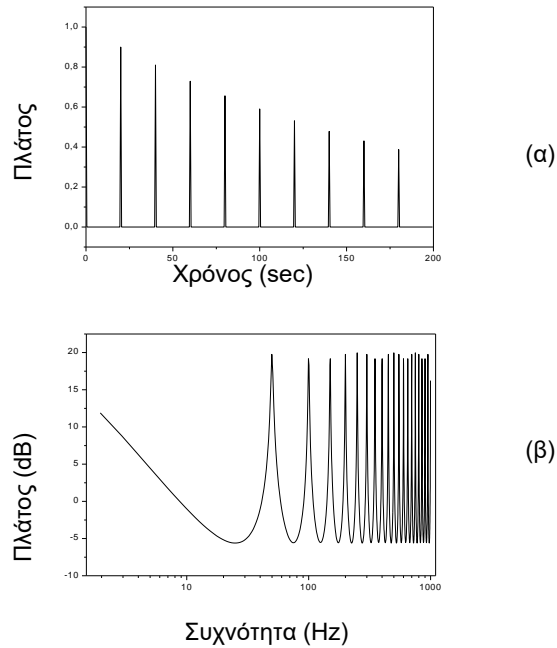
όπου A και B είναι όροι που βρίσκονται από τις παραπάνω σχέσεις και επιτρέπουν τη μετατροπή της μιγαδικής σχέσης σε άθροισμα πραγματικών και φανταστικών ποσοτήτων. Το μέτρο $|H(j\omega)|$ βρίσκεται ότι έχει μορφή που συμπίπτει με την προηγούμενη κυματική επίλυση, δηλαδή εμφανίζει περιοδικές τιμές μεγίστου και ελαχίστου (Σχήμα 2.12).

Φυσικά η μορφή της $|H(j\omega)|$ εξαρτάται από την απομάκρυνση από την πηγή (που καθορίζει το R_n και κατ' επέκταση το όριο nt_0) και την συχνότητα της πηγής που μπορεί ή όχι να συμπίπτει με τις μέγιστες ή ελάχιστες τιμές της συνάρτησης, οπότε εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού ή της εξασθένησης των ήχων, με ανάλογο τρόπο των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την κυματική εξίσωση.

2.8.γ Θέματα πρακτικής υλοποίησης

Με βάση τα προηγούμενα, αν υποθεθεί ότι απαιτείται ο ακριβής υπολογισμός της συνάρτησης πίεσης $p'(t)$ που παράγεται σε συγκεκριμένη απόσταση σε έναν ιδεατό χώρο που να αποτελείται από 2 παράλληλους τοίχους, για σήμα πηγής την συνάρτηση $p(t)$. Με την χρήση της κυματικής ανάλυσης αυτό θα έπρεπε να γίνει μέσω αριθμητικής επίλυσης για κάθε τιμή του ω , οπότε η $p'(t)$ θα μπορούσε να προκύψει μέσω αντιστρόφου μετασχηματισμού (π.χ. FFT), υποθέτοντας βέβαια ότι η $p(t)$ θα υπήρχε σε αναλυτική μορφή. Σε αντίθεση, η χρήση της μεθοδολογίας της θεωρίας Σημάτων («επίλυση Fourier»), επιτρέπει τον κατ' ευθεία υπολογισμό του $p'(t)$, μέσω μιας σχέσης συνέλιξης (εξίσωση διαφοράς) που υλοποιείται εύκολα σε ψηφιακό υλικό (hardware) ή λογισμικό. Στην περίπτωση αυτή, η ταχύτητα υπολογισμού είναι πολύ πιο μικρή και επιπλέον, η απόκριση μπορεί να υπολογισθεί για οποιαδήποτε (ψηφιοποιημένη) μορφή της συνάρτησης $p(t)$.

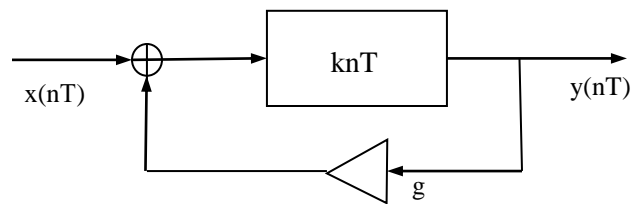
Σε διακριτό χρόνο, η κρουστική απόκριση του απλού αυτού ακουστικού συστήματος με διαδοχικές ανακλάσεις, θα έχει τη μορφή:



Σχήμα 2.12: Απόκριση ακουστικού συστήματος σε περιοδικές ανακλάσεις: (α) κρουστική απόκριση, (β) μέτρο φασματικής απόκρισης

$$h(nT) = \sum_{m=1}^{\infty} g^m \delta(nT - mKnT) \quad (2.52)$$

όπου T είναι η περίοδος δειγματοληψίας του σήματος και K είναι μια ακέραια σταθερά που περιγράφει την καθυστέρηση κάθε ανάκλασης. Η παραπάνω σχέση μπορεί να παρασταθεί με το σύστημα που απεικονίζει το **Σχήμα 2.13**.



Σχήμα 2.13: Διάταξη για υλοποίηση ενός φίλτρου που προσθέτει περιοδικές ανακλάσεις

Σε μορφή εξίσωσης διαφοράς προκύπτει ότι

$$y_n = x_n + g \bullet y_{n-k} \quad (2.53)$$

όπου y_n και x_n είναι τα ταυτόχρονα δείγματα εξόδου και εισόδου και y_{n-k} είναι η έξοδος για K δείγματα με καθυστέρηση. Η εξίσωση αυτή υλοποιείται πολύ εύκολα σε software ή hardware, έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση ηχητική προσομοίωση του φαινομένου του στάσιμου κύματος.

2.9 Τα διάφορα ακουστικά μεγέθη

2.9.1 Η ακουστική εμπέδηση

Η εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση) z , είναι ο λόγος της διέγερσης προς το αποτέλεσμα, που σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα περιγράφεται από τον λόγο τάσης προς ρεύμα. Σε ακουστικά συστήματα, ορίζεται από τον λόγο ακουστικής πίεσης $p(x,t)$ των στοιχείων (σωματιδίων) προς την ταχύτητά τους στο ελαστικό μέσο διάδοσης το οποίο μεταφέρει την πίεση αυτή, για διατάραξη ημιτονοειδούς μορφής. Έτσι, ορίζεται σαν **ακουστική εμπέδηση**, ο λόγος πίεσης προς ταχύτητα όγκου (ογκομετρική ταχύτητα), $U(x,t)$, η οποία ορίζεται σαν το γινόμενο ταχύτητας σωματιδίων $u(x,t)$, επί την επιφάνεια A , ($U(x,t) = u(x,t) \cdot A$), δηλαδή:

$$z = \frac{p(x,t)}{U(x,t)} \quad (2.54)$$

Σαν «ειδική ακουστική εμπέδηση», μετρούμενη σε μονάδες Rayl ($1 \text{ Rayl} = 1 \text{ Kg/m}^2/\text{s}^2$), ορίζεται ο λόγος της πίεσης ως προς την ταχύτητα σωματιδίων $u(x,t)$, δηλαδή:

$$z' = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} \quad (2.55)$$

Για επίπεδα κύματα η ακουστική εμπέδηση είναι πραγματικό μέγεθος που εξαρτάται από την ταχύτητα του ήχου c και την πυκνότητα ρ του μέσου, δηλαδή:

$$z = \rho c \quad (2.56)$$

Για τον αέρα σαν μέσο διάδοσης και για κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (20°C , 10^5 Pa), η σύνθετη ακουστική αντίσταση είναι 415 Rayls.

Για τις σύνθετες κυματικές ταλαντώσεις που παράγονται από μη-ιδανικές πηγές, η z είναι γενικά ένα μιγαδικό μέγεθος και εκφράζεται σαν:

$$Z = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} = R + jI \quad z = R + jI \quad (2.57)$$

όπου R είναι το πραγματικό και I το φανταστικό τμήμα της εμπέδησης του μέσου, όπως θα συζητηθεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο των Μεγαφώνων.

2.9.2 Η πυκνότητα της ακουστικής ενέργειας, E

Η από τα ηχητικά κύματα μεταφερόμενη ενέργεια έχει δύο συνιστώσες: την κινητική ενέργεια E_k των κινούμενων στοιχείων και τη δυναμική ενέργεια E_p του συμπιεσμένου ρευστού μέσου. Έστω ότι το κινούμενο στοιχείο καταλαμβάνει όγκο V_0 από το ρευστό που ήταν σε ισορροπία, τότε

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V_0 u^2 \quad (2.58)$$

Η δυναμική ενέργεια για αλλαγή του όγκου από V_0 σε V είναι:

$$E_p = -\int_{V_0}^V p dV \quad (2.59)$$

Η αρνητική τιμή για την E_r δείχνει ότι η ποσότητα αυτή μεγαλώνει με την επενέργεια της p . Φυσικά η συνολική ακουστική ενέργεια E_r δίνεται από την σχέση:

$$E_T = E_k + E_p \quad (2.60)$$

Η στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας ορίζεται σαν E_i :

$$E_i = \frac{E_T}{V} \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (2.61)$$

Η μέση χρονική της τιμή είναι η πυκνότητα της ακουστικής ενέργειας \bar{E} σε κάθε σημείο, είναι:

$$\bar{E} = \frac{1}{t} \int_0^t E_i dt \quad (2.62)$$

Για ένα επίπεδο ακουστικό κύμα όπου $p = \pm \rho c u$, ισχύει:

$$E = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2} = \frac{p^2_{rms}}{\rho c^2} \quad (2.63)$$

όπου:

p^2_{rms}	Ενεργός τιμή της ακουστικής πίεσης	(Pa ή N/m ²)
ρ	Πυκνότητα του ελαστικού μέσου	(kgm ⁻³)
c	Ταχύτητα του ήχου	(ms ⁻¹)
E	Πυκνότητα ακουστικής ενέργειας	(Wsm ⁻³)

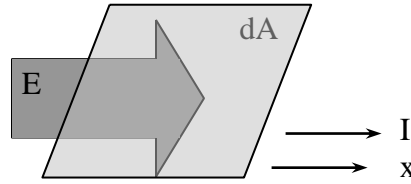
Όμοια, για ένα σφαιρικό κύμα ισχύει:

$$E = \frac{1}{4} \left(\frac{p^2}{\rho c} + \rho u^2 \right) \quad (2.64)$$

2.9.3 Η ακουστική ένταση, I

Η πυκνότητα ακουστικής ενέργειας που περνά σε χρόνο dt από την επιφάνεια dA , ορίζει την ακουστική ένταση (βλέπε επόμενο σχήμα), δηλαδή

$$I = \frac{dE}{dt dA} \quad (2.65)$$



Σχήμα 2.14: Ορισμός έντασης ήχου

Στις παραπάνω παρατηρήσεις λαμβάνονται υπόψη οι στιγμιαίες τιμές της ακουστικής πίεσης οι οποίες και παράγουν ακουστική ενέργεια. Η ακουστική ένταση γενικά ορίζεται από το χρονικό μέσο της στιγμιαίας ακουστικής πίεσης και της ταχύτητας σε μια διεύθυνση, δηλαδή

$$I = \overline{p \cdot u} \quad (2.66)$$

Ένα επίπεδο ακουστικό κύμα που διαδίδεται σ' ένα ελεύθερο ακουστικό πεδίο έχει ταχύτητα μορίων που σχετίζεται με την πίεση (κατ' αναλογία του νόμου του Ohm), σε μια

διεύθυνση, από τη σχέση $u = \frac{p}{\rho c}$ και άρα:

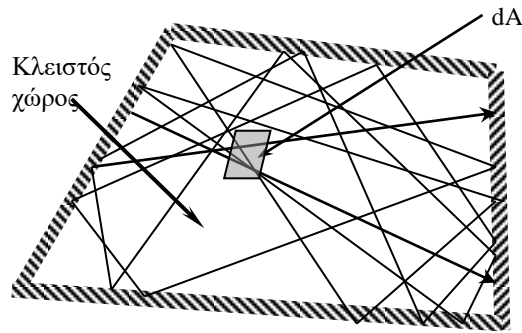
$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.67)$$

Γενικά εδώ θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η τιμή rms της πίεσης για διαφορετικές διευθύνσεις της κίνησης των στοιχείων του μέσου. Η ένταση I είναι πάντα διαφορετική για τα διαφορετικά είδη ακουστικών πεδίων μια που η ύπαρξη ανακλώμενων ή άλλων ηχητικών κυμάτων που δημιουργούν ροή ενέργειας (και ταχύτητα στοιχείων) προς διάφορες διευθύνσεις αλλά από τη διεύθυνση διάδοσης του αρχικού κύματος, μπορούν να αλλάξουν ριζικά την τιμή της ακουστικής έντασης I .

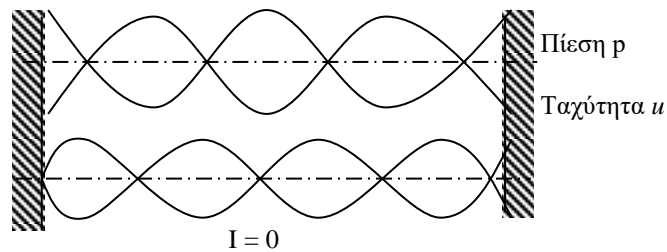
Έτσι, σε ένα διάχυτο ακουστικό πεδίο όπως σε έναν κλειστό χώρο με αντήχηση (**Σχήμα 2.15**), το ηχητικό κύμα έχει την ίδια πιθανότητα να φθάσει στο σημείο μέτρησης απ' όλες τις διευθύνσεις. Γενικά σ' αυτές τις περιπτώσεις η ένταση που περνά από τη μονάδα επιφάνειας από τη μια κατεύθυνση είναι:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c} \quad (2.68)$$

Ένα παράδειγμα αντιδρώντος ακουστικού πεδίου είναι μια κατάσταση ενός στάσιμου ακουστικού κύματος όπως περιγράφηκε προηγουμένως, **Σχήμα 2.16**.



Σχήμα 2.15: Δημιουργία διάχυτου ηχητικού πεδίου



Σχήμα 2.16: Χαρακτηριστικά στάσιμων κυμάτων

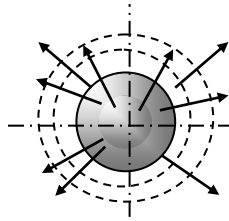
Σε αυτήν την περίπτωση η ένταση είναι μηδέν γιατί η ταχύτητα u και η πίεση p είναι σε 90° εκτός φάσης, με αποτέλεσμα να μηδενίζεται η συνισταμένη ροής ενέργειας και η ένταση να είναι μηδέν. Αυτό το χαρακτηριστικό της έντασης, καθιστά πρακτικά δύσκολη την μέτρησή της με συμβατικά όργανα.

2.10 Ακουστικές πηγές

Είναι σκόπιμο αρχικά να περιγραφούν τα ιδανικά είδη ακουστικών πηγών οι οποίες κατά προσέγγιση ή μετά από κατάλληλους συνδυασμούς μπορούν να περιγράψουν τις διαφορετικές πρακτικές πηγές ήχου.

2.10.1 Μονοπολικές πηγές – ακουστικά μονόπολα

Η απλούστερη πηγή ήχου είναι μια σφαίρα (στατικής) ακτίνας R , της οποίας η διάμετρος αυξομειώνεται με περιοδικό (ή άλλο) τρόπο και η οποία εκπέμπει ισότροπα ήχο προς όλες τις διευθύνσεις. Λόγω της συμμετρίας, μια τέτοια ταλάντωση θα δημιουργήσει σφαιρικά κύματα (**Σχήμα 2.17**).

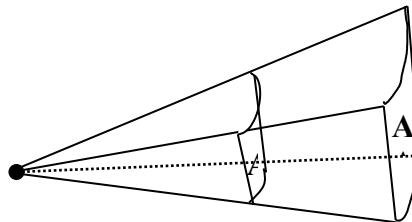


Σχήμα 2.17: Μονοπολική ηχητική πηγή

Πολλές πρακτικές ηχητικές πηγές συμπεριφέρονται σαν μονόπολα (σε πρώτη προσέγγιση) αν και οι διαστάσεις τους είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου. Για αρμονική ταλάντωση της πηγής, όπως έχει προαναφερθεί, το ακουστικό σφαιρικό κύμα που εκπέμπεται έχει τη μορφή:

$$p(r, t) = \frac{\sqrt{2}}{r} P_{\max} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.69)$$

όπου r (m) είναι η απόσταση από την πηγή και ω (rads^{-1}) η γωνιακή συχνότητα της ταλάντωσης. Επειδή η ακουστική ισχύς που εκπέμπει μία τέτοια πηγή είναι σταθερή και χαρακτηριστική των φυσικών της ιδιοτήτων, αυτή θα κατανέμεται εξ' ίσου σε μία επιφάνεια σφαίρας, η οποία για αυξανόμενη τιμή του r , επίσης θα αυξάνει με αποτέλεσμα την ελάττωση της ποσότητας που θα αντιστοιχεί ανά μονάδα επιφάνειας, και κατ' επέκταση της ακουστικής έντασης που θα μετριέται.



Σχήμα 2.18: Αναπαράσταση αύξησης επιφάνειας εκπομπής με την απομάκρυνση

Έτσι, διπλασιασμός της απόστασης r , θα μειώνει την ένταση κατά r^2 και άρα:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.70)$$

Με βάση τα προηγούμενα, η ένταση, και πίεση του ηχητικού κύματος που διαδίδεται σε μια απόσταση r από μια σφαιρική πηγή ισχύος W , θα σχετίζονται με τη σχέση:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (2.71)$$

όπου W είναι η ηχητική ισχύς της πηγής (W – ακουστικά Watt). Η ενεργός τιμή rms της ακουστικής πίεσης που θα παράγει μία τέτοια πηγή ακτίνας R σε μια απόσταση r , για συχνότητες εκπομπής που ικανοποιούν την υπόθεση ότι $kR \ll 1$, είναι:

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{16} \left[\frac{\rho c k Q}{\pi r} \right]^2 \quad (2.72)$$

όπου $k = \omega/c$ είναι ο Κυματικός Αριθμός και Q (m^3/s) η Ακουστική Αντοχή της Πηγής. Η Ακουστική Αντοχή (acoustic strength) ορίζεται σαν το γινόμενο της επιφάνειας της πηγής επί την ταχύτητα u της επιφάνειας αυτής, οπότε για σφαιρική πηγή προκύπτει:

$$Q = 4\pi R^2 u \quad (2.73)$$

έτσι ώστε η ακουστική ισχύς που παράγεται, υπολογίζεται σαν:

$$W = \frac{\rho c k^2 Q^2}{4\pi} \quad (2.74)$$

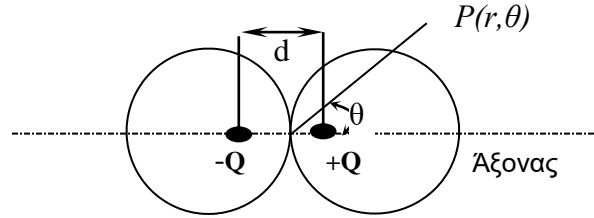
Εύκολα φαίνεται από τα παραπάνω ότι η ακουστική πίεση και η ένταση ελαττώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή, ενώ η ακουστική ισχύς και η αντοχή είναι ανεξάρτητες της απόστασης και εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της πηγής.

Παράδειγμα

Τυπικό παράδειγμα μιας πρακτικής ακουστικής πηγής η οποία συμπεριφέρεται σαν μονόπολο για περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων, είναι ένα μεγάφωνο που είναι κλεισμένο σε ένα κλειστό ηχείο εκπέμποντας στο ελεύθερο ακουστικό πεδίο. Όταν το μήκος κύματος του παραγόμενου ήχου είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις διαστάσεις της πηγής, δηλαδή $kR \ll 1$, τότε η ακουστική πίεση που εκπέμπεται (για πηγές ίσης ισχύος) σε απόσταση $r \gg R$ είναι η ίδια, άσχετα με το σχήμα της επιφάνειας της πηγής, δηλαδή του ηχείου. Για μεγάφωνο με $R = 0.010$ m το οποίο είναι κλειστό σε ηχείο ανάλογου μεγέθους του μεγαφώνου, για συχνότητα 100 Hz, $kR = 2.9 \times 10^{-3}$ η συνθήκη αυτή πρακτικά ικανοποιείται.

2.10.2 Διπολικές πηγές - ακουστικά δίπολα

Ο συνδυασμός δύο ακουστικών μονόπολων σχηματίζει μια πιο σύνθετη ηχητική πηγή που είναι το «ακουστικό δίπολο», του οποίου η ακουστική εκπομπή δεν είναι σταθερή με την γωνία, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Παράδειγμα τέτοιας πηγής αποτελεί ένα μεγάφωνο που είναι τοποθετημένο σε ανοιχτό προς τα πίσω ηχείο. Ο παλλόμενος κώνος του μεγαφώνου διεγείρει τον αέρα και από τις δύο πλευρές, έτσι ώστε όταν η εμπρός επιφάνεια συμπιέζει τον αέρα, η πίσω επιφάνεια να τον αποσυμπιέζει. Ένα δίπολο ορίζεται λοιπόν από τον συνδυασμό δύο μονόπολων που βρίσκονται 180° εκτός φάσης, με αντοχή Q το καθένα, που λειτουργούν σε απόσταση d μεταξύ τους. ($kd \ll 1$), βλέπε επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2.19: Ακουστικό δίπολο

Σε αυτή την περίπτωση, η ακουστική πίεση που παράγεται σε κάποια απόσταση r , δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση αυτή όπως συνέβαινε για τις μονοπολικές πηγές, αλλά λόγω των εκτός φάσης ακυρώσεων που μειώνουν το πλάτος του συνδυασμένου σήματος, η τελική πίεση εξαρτάται και από την γωνία θ (π.χ. στο οριζόντιο επίπεδο) και όμοια την γωνία φ (στο κάθετο επίπεδο). Έτσι, η ακουστική πίεση ισούται με:

$$p(r, t, \theta) = \frac{\sqrt{2}}{r} P_{\max} e^{j(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda})} \left[\frac{\sin \left[\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) \sin \theta \right]}{\sin \left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) \sin \theta \right]} \right]$$

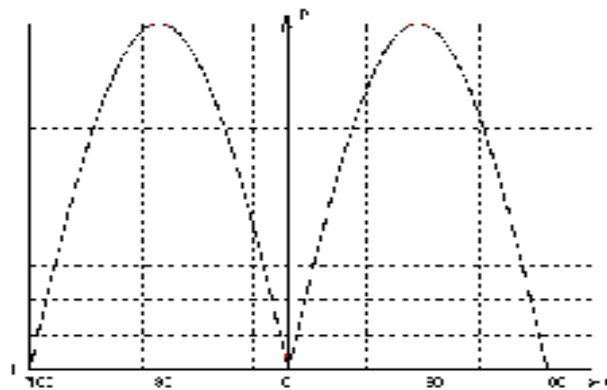
Σε απόσταση $r \gg d$, γίνεται η προσέγγιση του «μακρινού πεδίου» (far field) και δείχνεται ότι:

$$p(r, t, \theta) \approx -j \frac{2P_{\max}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \sin \left(\frac{kd}{2} \sin \theta \right)$$

με προσεγγιστικό πραγματικό μέρος, για συχνότητες τέτοιες ώστε $kd \ll 1$:

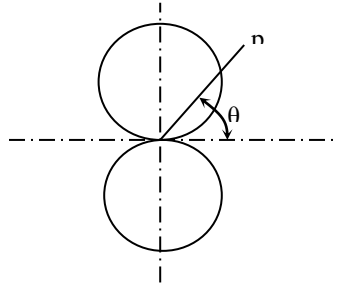
$$|p(r, t, \theta)| = \frac{P_{\max} kd}{r} |\sin(\theta)| \tag{2.77}$$

σχέση η οποία σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες παριστάνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.20: Πίεση ακουστικού δίπολου σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Ενώ σε πολικές συντεταγμένες



Σχήμα 2.21: Πίεση ακουστική διπόλου σε πολικές συντεταγμένες

Το ακουστικό πεδίο που δημιουργείται με τον τρόπο αυτό είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του διπόλου. Η ακουστική ισχύς του διπόλου δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{\rho c k^4 Q^2 d^2}{12\pi} \quad (2.78)$$

όπου Q είναι η rms τιμή της ακουστικής αντοχής.

Ο λόγος της ισχύος διπόλου προς μονοπόλου που εδώ γράφονται σαν W_d/W_m , είναι:

$$\frac{W_d}{W_m} = \frac{k^2 d^2}{3} \cdot \frac{Q_d^2}{Q_m^2} \quad (2.79)$$

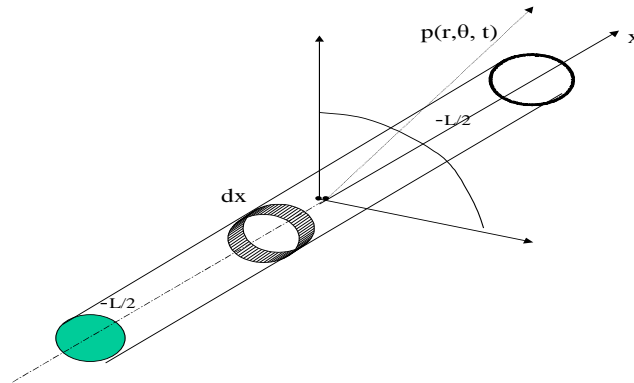
Αν $Q_d = Q_m$, δηλαδή αν οι πηγές έχουν την ίδια αντοχή, τότε αφού το $k = 2\pi f/c$ αυξάνει με την συχνότητα, εύκολα φαίνεται από την παραπάνω σχέση ότι σε πολύ χαμηλές συχνότητες (π.χ. $f < 50$ Hz) το δίπολο γίνεται πολύ λιγότερο αποτελεσματικό από το μονόπολο. Παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής αυτής της αρχής αποτελούν τα μεγάφωνα τα οποία μόνο όταν τοποθετούνται σε κλειστά από τη μια πλευρά ηχεία μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητική ακουστική ισχύ σε πολύ χαμηλές συχνότητες.

2.10.3 Γραμμικές πηγές

Μία άλλη κατηγορία κατευθυντικών πηγών, είναι οι γραμμικές, οι οποίες εκπέμπουν καθ' όλο τους το μήκος L , όπως π.χ. σωλήνες που μεταφέρουν ρέον υγρό, όπως ένας δρόμος ή όπως μία παλλόμενη χορδή (**Σχήμα 2.22**).

Ανάλογη ανάλυση που αναφέρεται σε μετρήσεις μακριά από την πηγή δείχνει ότι η ακουστική πίεση είναι:

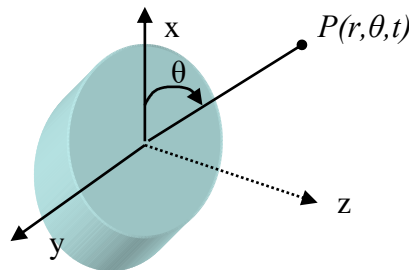
$$p(r, \theta, t) = \frac{1}{2} j \rho c u \frac{R}{r} k L e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2} k L \sin \theta\right)}{\frac{1}{2} k L \sin \theta} \right] \quad (2.80)$$



Σχήμα 2.22: Ακουστική γραμμική πηγή

2.10.δ Επίπεδες κυκλικές πηγές (δίσκοι)

Θεωρείται ότι ένας τέτοιος δίσκος είναι συμπαγής και ότι εκπέμπει μόνο από τη μια του πλευρά αφού είναι τοποθετημένος σε μεγάλη επίπεδη επιφάνεια η οποία διαχωρίζει την εμπρόσθια από την οπίσθια ακτινοβολία, δηλαδή λειτουργεί σε ένα «Άπειρο Αποσβεστήρα» (**Σχήμα 2.23**). Πρακτικά, μία τέτοια πηγή μπορεί να είναι ένας κώνος μεγαφώνου, τοποθετημένου σε ηχείο με μεγάλη εμπρόσθια επιφάνεια («μπάφλα»).



Σχήμα 2.23: Ακουστικός δίσκος

Για μεγάλες αποστάσεις από την πηγή η ακουστική πίεση είναι:

$$p(r, t, \theta) = j \frac{\rho}{2} c u \frac{R}{r} k e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta} \right] \quad (2.81)$$

όπου $J_1(\)$ είναι μία συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης.

2.11. Η κατευθυντικότητα των ακουστικών πηγών

Από τα προηγούμενα φάνηκε ότι πολλές ηχητικές πηγές, όπως τα δίπολα, οι δίσκοι και οι γραμμικές πηγές, παράγουν στο ελεύθερο πεδίο ακουστική πίεση που δεν είναι συνάρτηση της απόστασης (και του χρόνου), αλλά και της γωνίας εκπομπής ως προς την θέση του δέκτη. Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι η παραγόμενη πίεση

αποτελείται από 2 συνιστώσες, μία «αξονική», η οποία είναι συνάρτηση της απόστασης r και μία άλλη η οποία, **για κάθε συχνότητα**, κυρίως εξαρτάται από την γωνία θ , δηλαδή όπως περιγράφηκε, για γραμμικές πηγές:

$$p(r,t,\theta) = p_{ax}(r,t) \left[\frac{\sin(\tau)}{\tau} \right] \quad (2.82)$$

όπου $\tau = kL/2 \sin\theta$.

Αντίστοιχα, για δίσκους, προέκυψε ότι:

$$p(r,t,\theta) = p_{ax}(r,t) \left[\frac{2J_1(\tau)}{\tau} \right] \quad (2.83)$$

όπου $\tau = kR \sin\theta$.

Παρατηρείται ότι οι συναρτήσεις αυτές που εξαρτώνται από την γωνία, για κάθε συχνότητα, εμφανίζουν σε γενικές γραμμές, χαρακτηριστικά συναρτήσεων Bessel, μηδενικής τάξης για τις γραμμικές πηγές και 1^{ης} τάξης για τους δίσκους. Οι συναρτήσεις αυτές αποτελούν τις **συναρτήσεις κατευθυντικότητας** των πηγών, που καθορίζουν την ακουστική τους διασπορά στο πεδίο.

Όπως επίσης σημειώθηκε, η παραπάνω ανάλυση ισχύει για το λεγόμενο «Ελεύθερο Ακουστικό Πεδίο», δηλαδή σε μεγάλες σχετικά αποστάσεις από την πηγή. Η συνάρτηση της κατευθυντικότητας ορίζεται **για κάθε μία ξεχωριστή συχνότητα** και εξαρτάται από δύο γωνίες, τη γωνία εκπομπής ως προς τον οριζόντιο (π.χ. θ) ή τον κατακόρυφο άξονα (π.χ. φ), δηλαδή εκφράζεται σαν $H(\theta,\varphi)$ με μέγιστη τιμή $H(\theta,\varphi) = 1$, η οποία συμπίπτει με τον ακουστικό άξονα εκπομπής της πηγής. Για γραμμικές πηγές, ο ακουστικός άξονας είναι μια επιφάνεια (εξετάζοντας για ευκολία την εκπομπή σε ένα επίπεδο) και η συνάρτηση αυτή είναι:

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin \tau}{\tau} \right| \quad (2.84)$$

όπου

$$\tau = \frac{1}{2} \kappa L \sin \theta \quad (2.85)$$

Στην περίπτωση των δίσκων:

$$H(\theta) = \left| \frac{2J_1(\tau)}{\tau} \right| \quad (2.86)$$

όπου $J_1(\tau)/\tau$ είναι μια συνάρτηση Bessel με $\tau = kR \sin\theta$ και ο ακουστικός άξονας είναι μια ευθεία γραμμή, κάθετη στην επιφάνειά του.

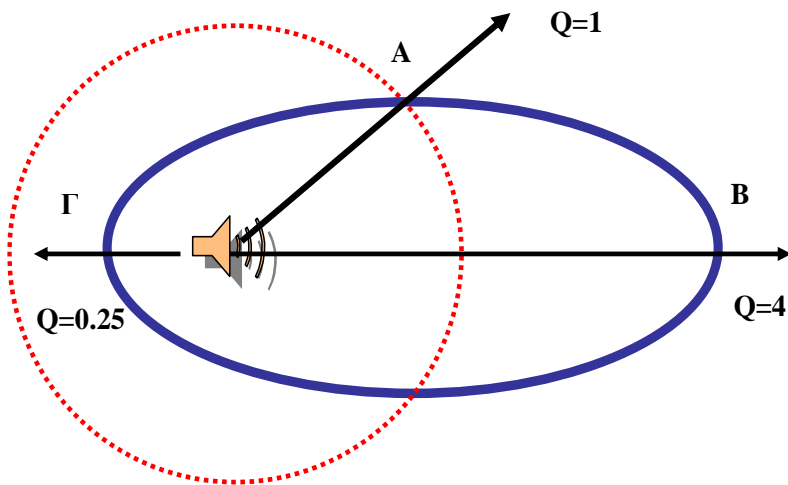
Η συνάρτηση κατευθυντικότητας ορίζεται επίσης και σαν **παράγωγο κατευθυντικότητας** Q_θ , που είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που θεωρητικά για κάθε γωνία και συχνότητα,

ισούται με τον λόγο της έντασης που παράγεται από την πηγή σε μία ορισμένη διεύθυνση που καθορίζεται από τις πολικές γωνίες θ και ϕ , ως προς την ένταση I_0 μίας ισότροπης (παντοκατευθυντικής) πηγής ίδιας ισχύος, αντίστοιχη αυτής του μονόπολου, δηλαδή:

$$Q_{\theta,\phi} = \frac{I_{\theta,\phi}}{I_0} \quad (2.87)$$

Παράδειγμα

Το **Σχήμα 2.23β** δείχνει με προσέγγιση σε δύο διαστάσεις το διάγραμμα κατευθυντικότητας μιας κατευθυντικής πηγής. Η συνεχής καμπύλη (έλλειψη) δείχνει τα σημεία ίσης έντασης, η διακεκομμένη (κύκλος) δείχνει πώς θα ήταν η παραπάνω καμπύλη αν η πηγή ήταν ισότροπη. Στο σημείο *A* όπου η ένταση και στις δύο περιπτώσεις είναι η ίδια ο παράγοντας κατευθυντικότητας έχει την τιμή 1. Στο σημείο *B* όπου η ένταση της πηγής είναι τετραπλάσια από αυτήν που θα υπήρχε αν η πηγή ήταν ισότροπη ο παράγοντας κατευθυντικότητας είναι 4, ενώ στην θέση *Γ*, όπου η ένταση είναι το $\frac{1}{4}$ της αντίστοιχης τιμής της ισότροπης είναι 0.25.



Σχήμα 2.23β αναπαράσταση παράγοντα κατευθυντικότητα πηγών

Όταν ο παράγων ή και η συνάρτηση κατευθυντικότητας εκφράζεται σε dB, τότε ορίζεται σαν **δείκτης κατευθυντικότητας** DI (Directivity Index, DI), δηλαδή:

$$DI = 20 \log H(\theta, \phi) = 10 \log Q_{\theta} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.88)$$

Προφανώς όταν μία πηγή είναι ισότροπη (παντοκατευθυντική) τότε για όλες τις γωνίες είναι $Q_{\theta} = 1$, $H(\theta, \phi) = 1$ και $DI = 0$ (dB). Στην γενική περίπτωση μίας μη ισότροπης πηγής, μπορεί να βρεθεί ότι:

$$Q = \frac{4\pi}{\int_{4\pi} H^2(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (2.89)$$

όπου το ολοκλήρωμα ορίζεται για όλη την επιφάνεια της σφαίρας. Αν θεωρηθεί μια ιδανική ημισφαιρική πηγή με τη μια της πλευρά εφαιπτόμενη στην επιφάνεια ενός «άπειρου αποσβεστήρα» (π.χ. μία άπειρα μεγάλη επιφάνεια τοίχου), τότε $H(\varphi, \theta) = 1$, για $\Omega \leq 2\pi$, και $H(\varphi, \theta) = 0$ για $\Omega \geq 2\pi$, οπότε $Q = 2$ και $DI = 3$ dB. Αν μια σφαιρική πηγή τοποθετηθεί στην τομή μεταξύ δύο κάθετων επιφανειών, τότε όμοια $Q = 4$ και $DI = 6$. Μία ίδια σφαίρα, στην τομή τριών καθέτων επιφανειών, θα παράγει $Q = 8$ και $DI = 9$. Παράδειγμα αυτής της αύξησης της εκπεμπόμενης ισχύος προς ένα τμήμα του πεδίου από θεωρητικά παντοκατευθυντικές πηγές που βρίσκονται κοντά σε τοίχους (έναν, δύο ή και τρεις τοίχους), αποτελούν τα ηχεία που όταν τοποθετηθούν κοντά σε τέτοιες επιφάνειες παράγουν περισσότερη ακουστική πίεση σε χαμηλές συχνότητες, (όπως προβλέπουν οι παραπάνω σχέσεις), αφού όπως έχει ήδη συζητηθεί, στην πράξη συμπεριφέρονται σαν παντοκατευθυντικές πηγές μόνο για τέτοιες πολύ χαμηλές συχνότητες.

Σημειωτέον, ότι οι αρχές της παραπάνω ανάλυση για θέματα κατευθυντικής συμπεριφοράς των **ακουστικών πηγών**, ισχύει σε μεγάλο βαθμό και για **ακουστικούς δέκτες**, π.χ. για τα μικρόφωνα, όπως θα συζητηθεί και στο αντίστοιχο Κεφάλαιο.

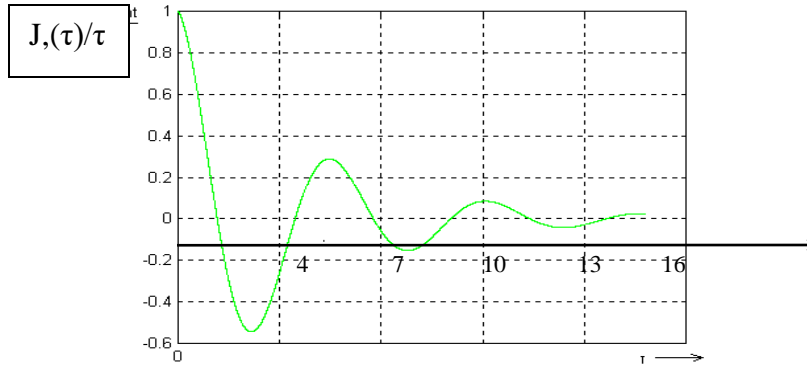
2.12 Διαγράμματα κατευθυντικότητας

Πολλές από τις πρακτικές πηγές (και δέκτες) έχουν περισσότερο πολύπλοκη συμπεριφορά κατευθυντικότητας από ότι οι ιδανικές πηγές που εξετάστηκαν και που μπορεί να περιγραφεί από αναλυτικές σχέσεις. Έτσι, ο μηχανικός συχνά εκτιμά την κατευθυντική συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων (π.χ. ηχείων, ενός κινητήρα, κλπ.) με αναφορά σε κατάλληλα διαμορφωμένα διαγράμματα τα οποία έχουν προκύψει από μετρήσεις. Γενικά από τα προηγούμενα φάνηκε ότι η συνάρτηση $H(\theta)$ έχει συνήθως τη μορφή:

$$H(\theta) \cong \left[\frac{2J_1(\tau)}{\tau} \right] \quad (2.90)$$

όπου για δίσκους για το ελεύθερο ακουστικό πεδίο, όταν $r \gg R$, $\tau = kR \sin\theta$, όπου $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$. Άρα: $kR = 2\pi \frac{R}{\lambda}$ (2.91)

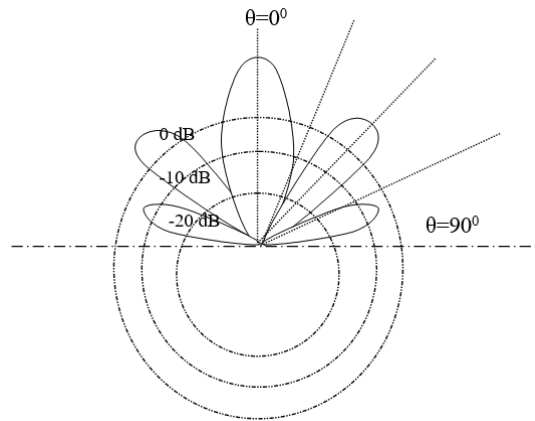
Προφανώς η συνάρτηση $\sin\theta$, έχει μέγιστο ± 1 για $\theta = \pm 90^\circ$. Άρα τα όρια της καμπύλης του $H(\theta)$ καθορίζονται από το γινόμενο kR , δηλαδή σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, από το λόγο του R προς το μήκος κύματος λ , (**Σχήμα 2.24**).



Σχήμα 2.24: Μορφή συνάρτησης Bessel πρώτης τάξης τ

Αν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα, κάτι που αληθεύει στις χαμηλές συχνότητες ($R \ll \lambda$), τότε $kR \ll 1$ και άρα η $p(r, t, \theta)$ είναι σχετικά σταθερή για την κύρια διεύθυνση εκπομπής. Αν το kR γίνει πολύ μικρό τότε η πηγή τείνει να γίνει παντοκατευθυντική (omnidirectional), να μοιάζει δηλαδή με μια ιδανική σημειακή πηγή ($H(\theta) \approx 1$, για όλα τα θ).

Όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό σε σχέση με την ακτίνα, δηλαδή για ψηλές συχνότητες, ($kR \gg 1$), τότε η πηγή είναι περισσότερο κατευθυντική και γενικά η δέσμη που σχηματίζεται αποτελείται από πολλούς λοβούς, έτσι ώστε παράγεται σταθερή πίεση σε μικρότερο εύρος γωνιών (στενότερη δέσμη ακτινοβολίας).

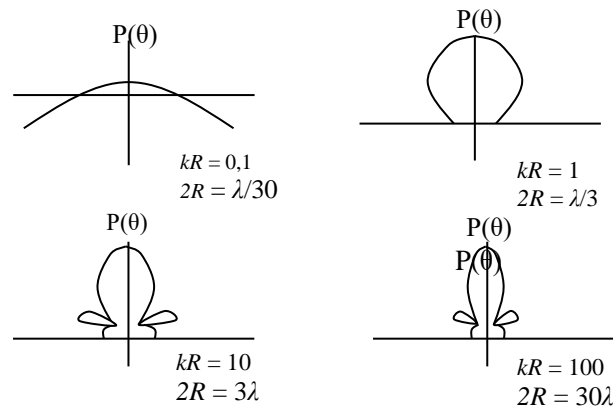


Σχήμα 2.25: Τυπικό πολικό διάγραμμα ακουστικής εκπομπής/λήψης κατευθυντικότητας πηγής/δέκτη

Για την πρακτικότερη αντίληψη της ακτινοβολίας τέτοιων πηγών, τα διαγράμματα του δείκτη κατευθυντικότητας DI ως προς θ , εκφράζονται από Καρτεσιανές σε πολικές συντεταγμένες, έτσι ώστε το σχετικό κέρδος εκπομπής να εμφανίζεται σε ένα επίπεδο σχήμα, στο οποίο παραδοσιακά σχεδιάζονται ομόκεντροι κύκλοι σταθερού κέρδους, οι οποίοι για μικρότερες ακτίνες περιγράφουν διαφορά κέρδους π.χ. κατά -10 dB (**Σχήμα 2.25**) Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται και διαγράμματα ακτινοβολίας ή πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας και πάντα αναφέρονται σε μία συχνότητα εκπομπής.

Με βάση αυτά που συζητήθηκαν παραπάνω, όταν το λ είναι παρόμοιο του R , τότε στην συνάρτηση ακτινοβολίας θα σχηματίζονται ελάχιστα στην καμπύλη για τιμές του $kR \sin\theta = 4, 7, 10$ κλπ. και για διαφορετικούς λόγους $0,1 < kR < 100$ θα δημιουργούνται καμπύλες παρόμοιες με αυτές στο **Σχήμα 2.26**.

Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν παρατηρούνται ακριβώς στην πράξη, π.χ. στα ηχεία, αν φυσικά υποθεθεί ότι ο κώνος τους έχει τα χαρακτηριστικά του δίσκου. Η βασική διαφορά βρίσκεται στο πεπερασμένο του αποσβεστήρα (μπροστινής επιφάνειας του ηχείου), ο οποίος στις μεν υψηλές συχνότητες μπορεί να συμπεριφερθεί σαν «Άπειρος Αποσβεστήρας», στις χαμηλές συχνότητες όμως στις οποίες το μήκος κύματος είναι στην τάξη μεγέθους των διαστάσεων του αποσβεστήρα, η σύμβαση αυτή δεν ισχύει και έτσι η εκπομπή του ήχου από συχνά τείνει να δημιουργήσει κατευθυντικότητα όμοια με αυτήν του δίπολου.



Σχήμα 2.26: Τυπική εξάρτηση κατευθυντικότητας από συχνότητα/μέγεθος εκπομπού

Άλλες διαφορές συνίστανται στο γεγονός ότι ο δίσκος (κώνος) δεν στερείται ενδοτικότητας και ως εκ τούτου αποτελεί μηχανικά ταλαντευόμενο σύστημα του οποίου τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την ακτίνα του και την απόσταση από το κέντρο. Έτσι, ενώ θεωρητικά θα έπρεπε να παρατηρούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις στην παραγόμενη στάθμη του ήχου στο χώρο, λόγω της κατευθυντικότητας των οικιακών ηχείων, αυτό δεν συμβαίνει πρακτικά, αφού πέρα από τους παραπάνω λόγους, τα ηχεία χρησιμοποιούνται σε μικρούς και σχετικά ανακλαστικούς χώρους, όπου προκύπτουν πολύπλοκες συνθήκες ανακλάσεων του ήχου με αποτέλεσμα την διασπορά των κατευθύνσεων του ήχου που φθάνει στον ακροατή και ελαχιστοποίηση της αντίληψης της κατευθυντικότητας της πηγής. Έτσι τέτοια φαινόμενα κατευθυντικότητας αφορούν τις ψηλές συχνότητες, οι οποίες γενικά περιορίζουν την περιοχή ακρόασης, σε θέσεις κοντά στην τομή των ακουστικών αξόνων ενός στερεοφωνικού ζεύγους ηχείων για να δημιουργηθεί το απαιτούμενο ακουστικό είδωλο.

Σε αντίθεση, σε επαγγελματικά συστήματα ήχου τα οποία αποτελούνται από ειδικά ηχεία ή συστοιχίες ηχείων, τόσο σε ανοιχτούς, όσο και σε μεγάλους κλειστούς χώρους, τέτοια

φαινόμενα κατευθυντικότητας είναι σημαντικά και θα συζητηθούν αναλυτικότερα στο κεφάλαιο των Ηχητικών Εγκαταστάσεων.

2.13 Το σύστημα decibel

Το decibel είναι το 1/10 του Bel, μονάδα που ονομάστηκε προς τιμήν του Alexander Graham Bell, εφευρέτη της τηλεφωνίας. Το decibel χρησιμοποιείται σαν μονάδα σε συστήματα και μεγέθη που έχουν σχέση με τις επικοινωνίες, επειδή επιτρέπει συμπίεση της κλίμακας φυσικών μετρήσεων βασιζόμενο στη χρήση λογαρίθμων εφαρμοσμένων σε μεγέθη στάθμης τα οποία βασίζονται σε λόγο του μετρίσιμου ως προς μέγεθος αναφοράς. Σε κάποια προσέγγιση οι ανθρώπινες αισθήσεις και ιδιαίτερα η ακοή λειτουργούν παρόμοια. Φυσικά στους λογαρίθμους ισχύουν οι γνωστές σχέσεις:

$$\log_b \left(\frac{a}{c} \right) = n \Leftrightarrow \left(\frac{a}{c} \right) = b^n \quad (2.92)$$

Ο ορισμός του Bel αναφέρεται στο λογάριθμο του λόγου 2 μεγεθών ισχύος:

$$1\text{Bel} = \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (2.93)$$

π.χ. αν $W_1 = 2 \text{ W}$ και $W_2 = 1 \text{ W}$, η σχέση των ισχύων είναι 0,301 Bel και επειδή 1 Bel = 10 dB, τότε η ίδια σχέση ισχύων θα είναι ισοδύναμη με 3.01 dB.

Η κλίμακα decibel βασίζεται σε λόγους μεγεθών ισχύος. Όμως τέτοια μεγέθη σπάνια μετρώνται στην πράξη. Στη θέση τους μετρούνται συνήθως τα μεγέθη πεδίου, όπως η τάση, η πίεση, κλπ. Ο διπλασιασμός τάσης αντιστοιχεί σε αύξηση 6 dB, ενώ ο διπλασιασμός ισχύος αντιστοιχεί σε 3 dB, αφού:

$$\underbrace{10 \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^2}_{\text{ισχύς}} = \underbrace{20 \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)}_{\text{τάση}} \quad (2.94)$$

Δεδομένου ότι τα dB εκφράζουν μια σχέση (λόγο) 2 μεγεθών, στην πράξη το ένα από αυτά είναι μια στάθμη αναφοράς, από την οποία γίνεται και η εκτίμηση του σχετικού φυσικού μεγέθους στάθμης (π.χ. ισχύς, πίεση, ηλεκτρική τάση κτλ.). Η στάθμη αναφοράς δίνεται πάντα από ένα ελάχιστο φυσικό μέγεθος. Για παράδειγμα όταν εξετάζονται σχέσεις ηλεκτρικής ισχύος, τότε η στάθμη αναφοράς είναι τα 10^{-3}W , (ή παραδοσιακά σε τηλεφωνικά συστήματα, τα 0,775 V σε 600 Ω). Η σχέση αυτή αναφέρεται σαν dBm, όπου το m δηλώνει mW.

Στην Ακουστική οι πιο συχνές μετρήσεις αναφέρονται σε ακουστικές πιέσεις και η πίεση αναφοράς αφορά την ελάχιστη αντιληπτή από την ακοή ακουστική πίεση που είναι τα $0,00002 \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{N/m}^2$. Μετρήσεις σε dB που αφορούν στάθμη ακουστικής πίεσης εκφράζονται πάντα ως προς αυτή την στάθμη αναφοράς και αναφέρονται σαν **ηχοστάθμη**, dB-SPL, (Sound Pressure Level, SPL) που γράφεται και σαν L_p . Σε

αντίθεση τα dB για την στάθμη ακουστικής ισχύος αναφέρονται σαν L_w (dB-PWL) και για στάθμη έντασης σαν L_I (dB-IL). Έτσι, ισχύουν οι βασικές σχέσεις:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}}, \quad p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ N / m}^2$$

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right), \quad W_{ref} = 10^{-12} \text{ W} \quad (2.95)$$

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right), \quad I_{ref} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Συχνά οι σχέσεις αυτές εκφράζονται σαν:

$$L_p = 20 \log_{10} p + 94 \quad (dB)$$

$$L_w = 20 \log_{10} W + 120 \quad (dB) \quad (2.96)$$

$$L_I = 20 \log_{10} I + 94 \quad (dB)$$

Τυπικές τιμές ακουστικής στάθμης για διάφορα περιβάλλοντα και συστήματα, δίνονται στον **Πίνακα 2.1**.

Το μέγεθος L_p (dB-SPL) είναι περίπου ίσο με αυτό του L_w (dB-PWL) για απόσταση 0,283 μέτρων από μια σφαιρική ακουστική πηγή σε ελεύθερο ακουστικό πεδίο. Με άλλα λόγια η ισχύς που περνάει ανά m^2 επιφάνειας σε εκείνη την ακτίνα, θα έχει μια τιμή dB-PWL ίση με αυτήν που η μέτρηση της πίεσης σε dB-SPL θα έχει οπουδήποτε στην ίδια επιφάνεια. Καθώς η απόσταση από την πηγή αυξάνει με κάθε διπλασιασμό της απόστασης, η επιφάνεια από την οποία διέρχεται η ακουστική ενέργεια τετραπλασιάζεται, άρα θεωρώντας σταθερή την ισχύ της πηγής, η μετρούμενη ηχοστάθμη μειώνεται κατά 6 dB.

2.14 Πρακτικές σχέσεις σε ηλεκτροακουστικά συστήματα

Σε μία σύνθετη ηλεκτροακουστική διάταξη, σε οποιοδήποτε σημείο μέτρησης, οι αναλογίες των μεγεθών σε dB, θα παραμένουν σταθερές. Για παράδειγμα, στην διάταξη του **Σχήματος 2.27**, αύξηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας κατά 6 dB, θα έχει σαν αποτέλεσμα τον τετραπλασιασμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τον ενισχυτή και τον διπλασιασμό της παραγόμενης ηχοστάθμης από το ηχείο.

Μετρήσεις σε dB χρησιμοποιούνται κατά κόρον για υπολογισμό του κέρδους ή της απώλειας σε διάφορες βαθμίδες των ηλεκτροακουστικών συστημάτων. Απαιτείται όμως προσοχή στον υπολογισμό των μεγεθών αυτών, όπως φαίνεται και από το παρακάτω παράδειγμα.

Ηχητική Πίεση (Pa ή N/m ²)	Ηχοστάθμη (dB, ref. 2x10 ⁻⁵ Pa)
2x10 ⁻⁵ = 0,00002	0 dB κατώφλι ακοής
10 ⁻³ = 0,001	34 dB θόρυβος σε εξοχή
10 ⁻² = 0,01	54 dB θόρυβος σε δωμάτιο
10 ⁻¹ = 0,1	74 dB θόρυβος σε εσωτερικό αυτοκίνητου
10 ⁰ = 1	94 dB δυνατή κλασική μουσική
10 ¹ = 10	114 dB δυνατή rock μουσική
10 ² = 100	134 dB θόρυβος απογείωσης jet
10 ³ = 1 000	154 dB πάνω από το όριο πόνου

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές ηχοστάθμης

Τα μεγέθη dB σε διάφορες περιοχές της εργασίας του μηχανικού, συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.2**

Μέγεθος (Στάθμη)	Στάθμη αναφοράς	Σύμβολο	Πολ/στής
Πίεση ήχου	0,00002 N/m ²	L_p	20
Ένταση ήχου	10 ⁻¹² W/m ²	L_I	10
Ισχύς ήχου	10 ⁻¹² W	L_W	10
Ηλεκτρ. ισχύς	10 ⁻³ W (ή 0,775V στα 600Ω)	dBm	10
Ηλεκτρ. τάση	1 V (ανεξάρτητα αντίστασης)	dBV	20
Ηλεκτρ. τάση	0,775 V στα 600Ω	dBv ή dBu	20

Πίνακας 2.2: Μονάδες dB για διαφορετικές μετρήσεις

Παράδειγμα

Έστω η αλυσίδα ηχητικής αναπαραγωγής στο αριστερό τμήμα του **Σχήματος 2.27**. Αν ο ενισχυτής παρουσιάζει αντίσταση εισόδου $|z_1| = 600 \Omega$ και η γεννήτρια παράγει σήμα με ενεργό τιμή $V_1 = 0,775 V_{rms}$, ενώ ο ενισχυτής παράγει έξοδο $V_2 = 0,775 V_{rms}$ που οδηγεί το ηχείο με αντίσταση $|z_2| = 8\Omega$, τότε το κέρδος λειτουργίας του ενισχυτή δεν θα είναι τα 0 dB (όπως είναι πιθανό να υποθέσει κανείς σε πρόχειρη εκτίμηση), αλλά θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και τα χαρακτηριστικά των αντιστάσεων, δηλαδή:

Ισχύς εισόδου στον ενισχυτή, $W_{in} = V_1^2 / |z_1| = 0,775^2 / 600 = 0,001 \text{ W} = 1 \text{ milliwatt}$ (όπως άλλωστε αναμένεται και από τον ορισμό για τα 0 dBm).

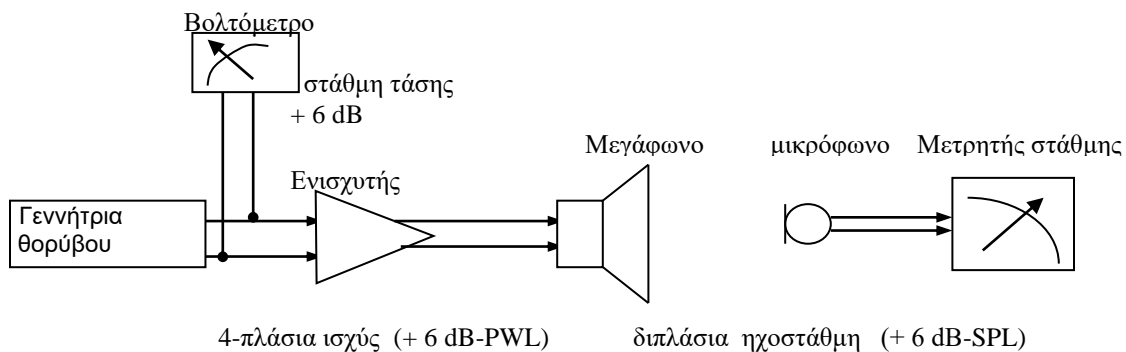
Ισχύς στο ηχείο, $W_{out} = V_2^2 / |z_2| = 0,775^2 / 8 = 0,075 \text{ W} = 75 \text{ milliwatt}$.

Το κέρδος λειτουργίας του ενισχυτή, σε dB, υπολογίζεται από τον λόγο ισχύος εξόδου / εισόδου:

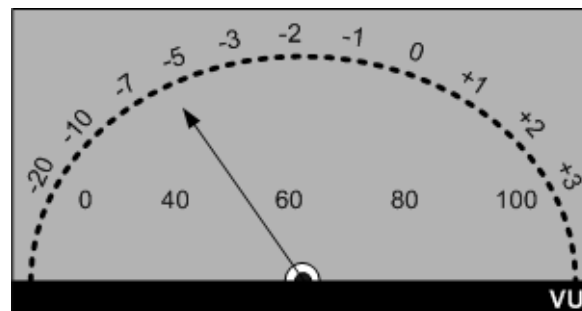
$$\text{Κέρδος ενισχυτή, dB} = 10 \log \frac{W_{out}}{W_{in}} = 10 \log \frac{75}{1} = 19 \text{ dB}.$$

Είναι επίσης προφανές ότι λόγω της μεταβαλλόμενης φύσης των ηλεκτροακουστικών σημάτων, δεν είναι σκόπιμο να γίνει απευθείας στιγμιαία μέτρηση σε dB, επειδή μία τέτοια μέτρηση θα είχε σημασία για ημιτονοειδείς κυματομορφές (με ενεργή τιμή 0,707 της μέγιστης). Έτσι, σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται οπτική απεικόνιση της μεταβολής του πλάτους του ηχητικού σήματος, όπως π.χ. σε ένα μετρητικό για κάποιο σύστημα ηχογράφησης) σχεδιάστηκε από το 1939 ένας ειδικός μετρητής για τη μέτρηση στάθμης ομιλίας και μουσικής. Οι μονάδες του συστήματος αυτού, το οποίο χρησιμοποιείται και σήμερα με παραλλαγές, ονομάστηκαν “Volume Units, VU” (Μονάδες Όγκου), που σε γενικές γραμμές ισοδυναμούν με αυτές του dBm (για ημίτονα).

Στην πράξη, όταν ένα VU-μετρο (Σχήμα) συνδεθεί στα άκρα μιας αντίστασης 600 Ω και το μετρούμενο σήμα είναι μια ημιτονοειδής κυματομορφή, τότε το πραγματικό σήμα έχει στάθμη +4 dBm (αντί για τα 0 dBm που θα δείχνει ο μετρητής), λόγω της σύμβασης. Γενικά τα μουσικά σήματα και η ομιλία έχουν κορυφές που είναι τουλάχιστο 10 dB πάνω από τη μέση τιμή, οπότε για μεταγραφή τέτοιων σημάτων σε άλλα συστήματα απαιτείται προσοχή στα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης του συστήματος και τέτοιες ενδείξεις δίνονται από το VU-μετρο.



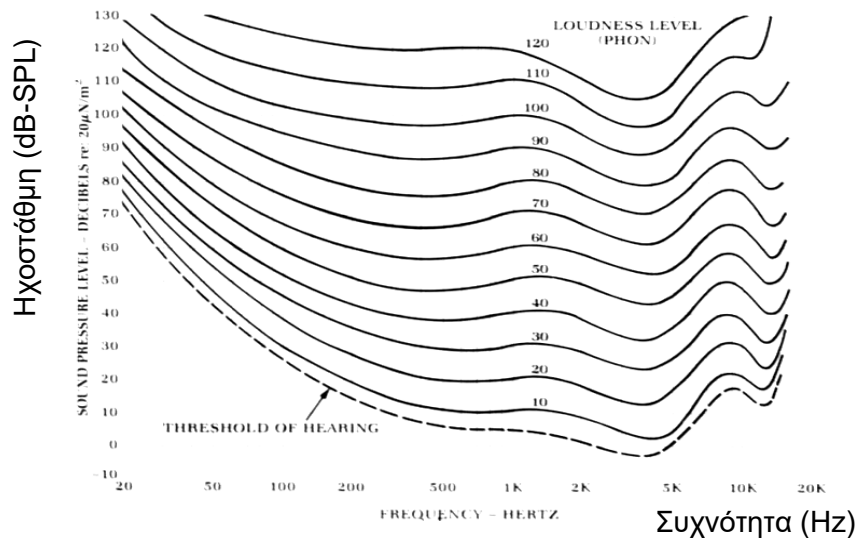
Σχήμα 2.27: Παράδειγμα μεταβολής κέρδους σε ηλεκτροακουστική διάταξη



Σχήμα 2.28: Τυπική μορφή μετρητή VU

2.15 Ακουστότητα, dB(A), dB(B), dB(C)

Η υποκειμενική αίσθηση της στάθμης ενός ήχου εξαρτάται από την συχνότητά του. Η εξάρτηση αυτή είναι τυποποιημένη στις καμπύλες Fletcher – Munson οι οποίες αποτελούν τις «**Καμπύλες Ίσης Ακουστότητας**». Από τις καμπύλες αυτές διαφαίνεται ότι ένας ημιτονοειδής τόνος στάθμης 20 dB στα 1000 Hz θα είναι ακουστός, ενώ τόνος ίσης στάθμης, αλλά στα 100 Hz, δεν θα είναι (**Σχήμα 2.29**).



Σχήμα 2.29: Καμπύλες ίσης ακουστότητας

Η μονάδα ακουστότητας που ορίζεται σαν την ηχοστάθμη σε dB στα 1000 Hz, είναι το Phon. Με βάση την συγκεκριμένη ακουστότητα μίας μέτρησης (σε Phon), όπως φαίνεται από την ανάλογη καμπύλη, η σχετική στάθμη dB-SPL, μπορεί να εξαχθεί ανά συχνότητα. Αντίστοιχα, συγκεκριμένη ηχοστάθμη σε μία συχνότητα καθορίζει και την υποκειμενική ακουστότητα σε Phon.

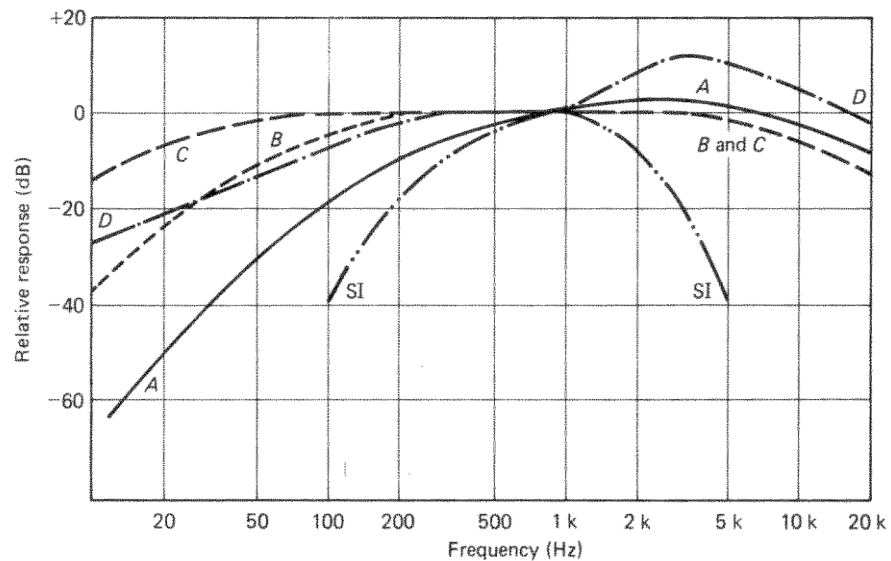
Λόγω της διαφοροποίησης μεταξύ των μετρήσεων ήχου σε dB-SPL και της υποκειμενικής ακουστότητας που εξαρτάται από την συχνότητα (για κάθε στάθμη, με διαφορετικό τρόπο, όπως δείχνουν οι καμπύλες), έχουν δημιουργηθεί τυποποιημένες μέθοδοι στάθμισης του μετρούμενου ήχου, οι οποίες βασίζονται σε φιλτράρισμα του ηχητικού σήματος με φίλτρα τα οποία παρουσιάζουν απόκριση με φθίνον κέρδος σε περιοχές όπου και η ακοή παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία. Οι μέθοδοι αυτές στάθμισης ονομάζονται dB(A), dB(B), dB(C), dB(D) (**Σχήμα 2.30**). Οι μέθοδοι αυτές συχνά χρησιμοποιούνται και σε μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών που περιγράφουν την απόκριση ηλεκτροακουστικών συσκευών, όπως π.χ. μέτρηση SNR κατά dB(A).

Οι μετρητές στάθμης ήχου επιτρέπουν μέτρηση του μεγέθους dB-SPL και αποτελούνται από ένα μικρόφωνο, έναν ενισχυτή, μερικούς διαιρέτες και φίλτρα που επιτρέπουν

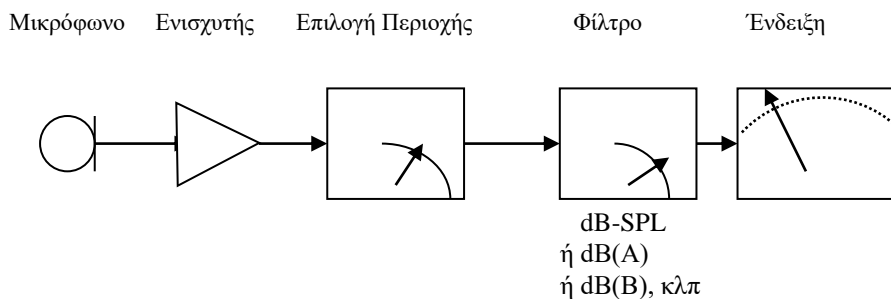
μετρήσεις γραμμικές ή σε κλίμακα dB(A), dB(B), κλπ. Οι ενδείξεις δίνονται σε σκάλα οργάνου ή σε ψηφιακή μονάδα ένδειξης.

2.16 Η μέτρηση του θορύβου

Σαν θόρυβος ορίζεται συνήθως η κατηγορία των ανεπιθύμητων ήχων, που στην πράξη περιλαμβάνει ήχους που παράγονται από: (α) καθημερινές δραστηριότητες εργασίας (μέσα μεταφοράς, βιομηχανία, εργασία, κ.λπ.), (β) επικοινωνιακές δραστηριότητες (μουσική, φωνή, ομιλία, κ.λπ.) που σε ορισμένους ακροατές είναι ενοχλητικές, (γ) φυσικά φαινόμενα και το περιβάλλον (αέρας, θάλασσα, ζώα κ.λπ.).



Σχήμα 2.30: Εξάρτηση κέρδους από συχνότητα για μεθόδους μέτρησης dB(A), dB(B), dB(C), και dB(D)



Σχήμα 2.31: Τυπικά υποσυστήματα μετρητή ηχοστάθμης

Η συνεχής επέκταση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων δημιουργεί μια συνεχή αύξηση των θορύβων που παράγονται από τις κατηγορίες (α) και (β) με σοβαρές επιπτώσεις σε μεγάλες ομάδες του πληθυσμού. Παρ' όλο ότι συχνά η ενόχληση από τους θορύβους θεωρείται σαν μια υποκειμενική ποσότητα, η ποσότητα της ηχητικής ρύπανσης μπορεί

και πρέπει να μετρηθεί με αντικειμενικά κριτήρια που ορίζονται από τη νομοθεσία και αποτελούν αντικείμενο της άσκησης αυτής. Επιπλέον, δεδομένου ότι για την μείωση αυτής της ενόχλησης κατασκευάζονται κατάλληλα οικοδομικά στοιχεία που διαχωρίζουν τις πηγές του θορύβου από τον ακροατή, είναι επίσης χρήσιμο να καθοριστεί και η απόδοσή τους ως προς τη μείωση της στάθμης του θορύβου (δηλαδή, η ηχομονωτική τους ικανότητα).

Για μετρήσεις θορύβου, σαν στιγμιαία τιμή της στάθμης ηχητικής πίεσης (S.P.L ή L_p) ορίζεται σαν:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p(t)}{p_o(t)} \right) \quad (2.97)$$

όπου $p_o(t)=2 \times 10^{-5}$ (Pa) είναι η στάθμη αναφοράς και $p(t)$ (Pa) είναι η τιμή της μετρούμενης πίεσης.

Η συνεχής διακύμανση της ηχοστάθμης με το χρόνο συχνά ελαχιστοποιεί την πρακτική σημασία μιας τέτοιας μέτρησης, αφού δεν περιγράφει επαρκώς ή μονοσήμαντα το βαθμό ηχητικής ρύπανσης για όλη την χρονική διάρκεια παρατήρησης. Για να οριστεί μια ποσότητα που περιγράφει την μέση ρύπανση σε κάποιο διάστημα χρόνου, πρέπει να υπολογιστεί η ισοδύναμη στάθμη ενός θορύβου με σταθερή τιμή που όμως έχει την ίδια ενέργεια με τον προς μέτρηση χρονικά μεταβλητό θόρυβο. Με δεδομένο λοιπόν ότι απευθείας άθροιση (ή και υπολογισμός μέσου όρου τιμών) των μονάδων dB δεν είναι δυνατή, εισάγεται και ορίζεται η **Ισοδύναμη Στάθμη Θορύβου (Ι.Σ.Θ., L_{eq})** που αφορά διαδοχικές μετρήσεις διάρκειας Δt η κάθε μια. Η Ισοδύναμη Στάθμη Θορύβου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \left(10^{0.1L_1} \Delta t_1 + 10^{0.1L_2} \Delta t_2 + \dots \right) \right] \quad (\text{dB}) \quad (2.98)$$

Όπου: $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$ οι χρόνοι που διαρκεί η μέτρηση κάθε στάθμης και L_1, L_2, \dots οι στάθμες του κυμαινόμενου ήχου που αντιστοιχούν στις παραπάνω χρονικές διάρκειες $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$

Έτσι, ο συνολικός χρόνος παρατήρησης T θα είναι $T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots$

Προφανώς, η τιμή της ισοδύναμης στάθμης εξαρτάται από τον συνολικό χρόνο T (sec) που διαρκεί η μέτρηση, κυρίως όταν υπάρχουν «γεγονότα θορύβου», δηλαδή απότομες αυξήσεις της στάθμης του ήχου. Σε πολλές περιπτώσεις (κυρίως για το χαρακτηρισμό του θορύβου μιας περιοχής) ο χρόνος παρατήρησης είναι μια ώρα και η μετρούμενη ισοδύναμη στάθμη συμβολίζεται με: $L_{eq,1h}$. Η μέτρηση της ΙΣΘ πραγματοποιείται από ηχόμετρα με κατάλληλο κύκλωμα ολοκλήρωσης (ή λογισμικό) ή και με κατάλληλη επεξεργασία αρχείων με μετρήσεις θορύβου.

Πέρα από τις παραπάνω μετρήσεις, είναι συχνά χρήσιμη η ανάλυση του θορύβου με άλλα στατιστικής φύσης κριτήρια, όπως π.χ. η εύρεση της μέγιστης τιμής του L_{max} (για τη διάρκεια της μέτρησης), κ.λπ. Επιπλέον, η επίπτωση και ενόχληση από τους θορύβους σχετίζεται άμεσα με το συχνотικό τους περιεχόμενο, δεδομένης της μεταβλητής ως προς

τη συχνότητα ευαισθησίας της ακοής, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Γι' αυτόν τον λόγο, τα παραπάνω κριτήρια (καθώς και αυτά που ακολουθούν) είτε μετριοούνται "γραμμικά" (linear), όπως ορίζεται από τις σχέσεις (2.97) και (2.98), είτε με σταθμισμένη (φιλτραρισμένη) την τιμή της $p(t)$ (A-weighted), όπου δηλαδή:

$$p_A(t) = p(t) * h_A(t) \quad (2.99)$$

όπου: $p_A(t)$ είναι η φιλτραρισμένη με φίλτρο "τύπου-A" τιμή της πίεσης (Pa).

$h_A(t)$ είναι η απόκριση του φίλτρου "τύπου-A". Η $h_A(t)$ έχει συχνοτικό χαρακτήρα αντίστοιχο της συνάρτησης ευαισθησίας της ανθρώπινης ακοής. Στην περίπτωση αυτή, οι ποσότητες L_p και L_{eq} σημειώνονται σαν L_{pA} και L_{eqA} και μετριοούνται σε dBA.

Επιπλέον, είναι συχνά απαραίτητη και η φασματική ανάλυση του μετρούμενου ηχητικού σήματος του θορύβου, αφού με την ανάλυση αυτή, αφ' ενός μπορούν να συναχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τα φυσικά χαρακτηριστικά του θορύβου, αφ' ετέρου να υπολογιστεί με περισσότερη ακρίβεια η επίπτωση του θορύβου στην ακοή και να ληφθούν τα απαραίτητα προστατευτικά μέτρα (π.χ. κατάλληλη ηχομόνωση). Παρόλο ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει με τη χρήση αναλυτή φάσματος, είναι επίσης δυνατό να υπολογιστεί η τιμή της ενέργειας του θορύβου σε κάποια περιοχή συχνότητας, μετά από αρχικό φιλτράρισμα της συνολικής πίεσης με κατάλληλο φίλτρο ζώνης. Αν $h_i(t)$ είναι η απόκριση ενός τέτοιου φίλτρου, τότε η φιλτραρισμένη τιμή της πίεσης θα είναι η $p_i(t)$ όπου:

$$p_i(t) = h_i(t) * p(t), \quad i=1, \dots, N \quad (2.100)$$

Με βάση την $p_i(t)$ είναι κατόπιν δυνατό να ορισθούν οι ποσότητες L_{pi} και L_{eqi} που ουσιαστικά καταγράφουν την στάθμη θορύβου που εμφανίζεται ανά ζώνη συχνότητας. Τα χαρακτηριστικά των αποκρίσεων των φίλτρων / ζωνών $h_i(t)$ δίνονται από τις τυποποιήσεις IEC 225 και ANSI S1.11-1966(R 1975), και καλύπτουν είτε $N=12$ ζωνοδιαβατά φίλτρα, εύρους 1 οκτάβας, είτε $N=36$ ζωνοδιαβατά φίλτρα, εύρους 1/3 οκτάβας. Οι κεντρικές συχνότητες των φίλτρων δίνονται στον **Πίνακα 2.3**.

Φίλτρα εύρους 1 οκτάβας, Συχνότητες (Hz)
8, 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000
Φίλτρα εύρους 1/3 οκτάβας, Συχνότητες (Hz)
6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000

Πίνακας 2.3: Περιοχές κεντρικών συχνοτήτων φίλτρων, ανάλυσης κατά οκτάβα και 1/3 οκτάβας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ηλεκτρικές, Μηχανικές, Ακουστικές Αναλογίες, Μετατροπείς και Ισοδύναμα Κυκλώματα

3.1 Αναλογίες Στοιχείων και Συστημάτων

3.1.1 Ακουστικά συστήματα

Λόγω της πολυπλοκότητας των ηλεκτρο-ακουστικών διατάξεων που όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, αποτελούνται από ηλεκτρικά, μηχανικά και ακουστικά υποσυστήματα (ή και συνδυασμούς τους), είναι απαραίτητο να σχηματιστούν σχέσεις μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που τα αποτελούν, οι οποίες να ανάγουν τις φυσικές και μαθηματικές τους ιδιότητες σε ένα ισότιμο σύστημα αναφοράς. Στο Κεφάλαιο αυτό λοιπόν, θα ορισθούν σχέσεις αναλογίας μεταξύ των ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών στοιχείων οι οποίες επιτρέπουν την δημιουργία «ισοδυνάμων» κυκλωμάτων, τα οποία ανεξάρτητα του φυσικού μηχανισμού λειτουργίας του υποσυστήματος, επιτρέπουν την ανάλυσή του με την γνώριμη στον ηλεκτρολόγο μεθοδολογία.

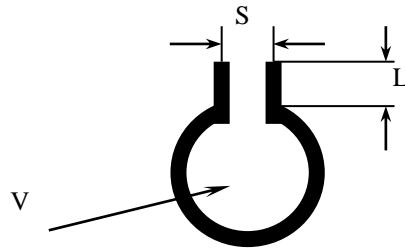
Για να σχηματισθούν οι σχέσεις αυτές, θα πρέπει να καθοριστούν τα διάφορα στοιχεία των επιμέρους υποσυστημάτων. Για τα ηλεκτρικά συστήματα μπορεί να διακριθούν 4 τύποι στοιχείων κυκλώματος (αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία και μετασχηματιστές) καθώς και δύο τύποι γεννητριών (σταθερής τάσης ή σταθερού ρεύματος). Ενώ για τα ηλεκτρικά αυτά στοιχεία καθώς και για τα μηχανικά στοιχεία οι σχέσεις έχουν συζητηθεί σε άλλα μαθήματα, για τα ακουστικά συστήματα τέτοιες σχέσεις δεν έχουν παρουσιαστεί σε ανάλογη ύλη και έτσι θα καλυφθούν σε αυτό το Κεφάλαιο. Στα ακουστικά συστήματα ενδιαφέρουν βασικά δύο μεταβλητές: η ακουστική πίεση $p(t)$ (που ισοδυναμεί στην ηλεκτρική τάση) και η ταχύτητα όγκου $U(t)$ (ή ογκομετρική ταχύτητα, που ισοδυναμεί στο ηλεκτρικό ρεύμα). Η ταχύτητα όγκου ισούται με την ταχύτητα ροής $u(t)$ του ακουστικού μέσου επί την επιφάνεια ροής s , ενώ η παραγόμενη πίεση σχετίζεται με αυτά τα μεγέθη μέσω της αντίστασης εκπομπής, δηλαδή:

$$U(t) = su(t) \text{ και } p(t) = f(t) / s = s^2 R_A U(t) = R_m U(t) \quad (3.1)$$

όπου $R_m = R_A s^2$, R_A είναι η ακουστική αντίσταση και $R_m =$ μηχανική αντίσταση (που αντιστοιχούν στο πραγματικό μέρος της αντίστοιχης σύνθετης και μιγαδικής αντίστασης).

Ένας εγκλωβισμένος όγκος του ελαστικού μέσου διάδοσης (π.χ. αέρα) έχει λόγω της ενδοτικότητάς του C_A την ικανότητα να αποθηκεύει ακουστική ενέργεια, όπως τα ελατήρια στη Μηχανική και οι πυκνωτές στον Ηλεκτρισμό. Όταν οι όγκοι αυτοί

επικοινωνούν με ανοίγματα δημιουργείται ροή ρευστού με αύξηση της κινητικής ενέργειας, οπότε και προκύπτει το φαινόμενο της ακουστικής αντίδρασης M_A , κατ' αναλογία με τη μάζα σε ένα μηχανικό σύστημα που παρουσιάζει αντίσταση στην προσπάθεια επιτάχυνσής της. Όταν το ρευστό αναγκάζεται να περάσει μέσα από λεπτές σχισμές ή ακουστικές οθόνες (π.χ. ένα κάλυμμα ηχείου), τότε παρουσιάζεται απόσβεση της ενέργειάς του λόγω ύπαρξης τριβής, δηλαδή εμφανίζεται ακουστική αντίσταση R_A , ανάλογη με τις αντιστάσεις που παρουσιάζονται στα ηλεκτρικά ή μηχανικά συστήματα. Ένα στοιχειώδες ακουστικό σύστημα στο οποίο είναι εμφανής η αναλογία με το κύκλωμα RLC ή με ένα αντίστοιχο μηχανικό σύστημα ταλαντωτή με απόσβεση, είναι το «Αντηχείο ή Συντονιστής του Helmholtz» (Helmholtz Resonator), που απεικονίζεται το **Σχήμα 3.1**. Το σύστημα αυτό αποτελεί το βασικότερο ακουστικό συντονιστή που χρησιμοποιείται και στην πράξη σαν ηχείο σε πολλά μουσικά όργανα: κιθάρα, βιολί, σφυρίχτρα, κλπ. Οι διαστάσεις του είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην συχνότητα συντονισμού και γενικά λειτουργεί σαν ταλαντωτής με απόσβεση, και επιλεκτικότητα περιοχής συχνοτήτων του σήματος εισόδου.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση τομής συντονιστή Helmholtz

Όπως είναι γνωστό και από την καθημερινή εμπειρία, ένα τέτοιο απλό ακουστικό σύστημα (π.χ. ένα μπουκάλι) στο οποίο εφαρμόζεται μία ακουστική πίεση (όπως για παράδειγμα φυσώντας στο στόμιο του), θα παράγει σαν απόκριση ένα ήχο με οξεία χροιά, δηλαδή το σύστημα αυτό συντονίζει και άρα ενισχύει ορισμένες συχνότητες του σήματος διέγερσης και η συμπεριφορά του αυτή περιγράφεται από μία διαφορική εξίσωση, κατ' αναλογία του γνωστού μηχανικού ταλαντωτή με απόσβεση ή ενός κυκλώματος RLC, δηλαδή:

$$M_A \frac{d^2(t)}{dt^2} + R_A \frac{d(t)}{dt} + \frac{1}{C_A} y(t) = f(t) \quad (3.2)$$

όπου $y(t)$ είναι η απομάκρυνση του ρευστού λόγω της επενέργειας της δύναμης $f(t)$ και ισούται με το γινόμενο της πίεσης $p(t)$ επί την επιφάνεια του στομίου, δηλαδή $f(t) = p(t) s$.

Για το συγκεκριμένο σύστημα του αντηχείου Helmholtz, τα επιμέρους στοιχεία ισοδυναμούν με:

$$R_A = \rho \cdot c \frac{k^2}{2\pi}, \quad C_A = \frac{V}{\rho c^2 \pi^2 R^4}, \quad M_A = \rho \cdot \frac{\rho L}{\pi R^2} \quad (3.3)$$

όπου R (m) είναι η ακτίνα, s (m²) η επιφάνεια, L (m) το μήκος του στομίου και V (m³) είναι ο όγκος του ηχείου (Σχήμα 3.1).

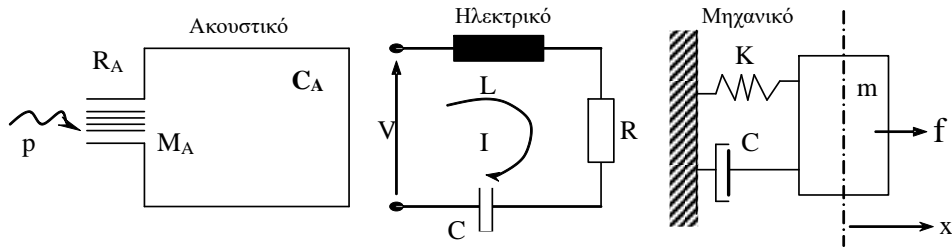
3.1.2 Ανάλογα ηλεκτρικά – μηχανικά - ακουστικά συστήματα

Επιστρέφοντας τώρα στα αντίστοιχα στοιχειώδη ηλεκτρικά και μηχανικά συστήματα (κυκλώματα και ταλαντωτές), είναι γνωστό ότι τα στοιχεία τους περιγράφονται με ανάλογο τρόπο, ανήκοντας στις κατηγορίες των αντιστάσεων, πηνίων, πυκνωτών / μάζας, αποσβεστήρων, ελατηρίων. Έτσι, η συνολική ταξινόμηση των στοιχείων που αποτελούν τα ισοδύναμα στοιχειώδη συστήματα, δίνεται από τον Πίνακα Αναλογιών (Πίνακας 3.1). Στον Πίνακα αυτό, για απλότητα, δεν περιλαμβάνεται η εξάρτηση των μεγεθών από την χρονική μεταβλητή.

Πίνακας 3.1: Πίνακας Αναλογιών

	Αντίσταση	Αυτο-επαγωγή / μάζα	Χωρητικότητα / απόθήκευση
Ηλεκτρικό	Μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα με τη γνωστή σχέση $R_E = \frac{V}{I}$	Αντιτίθεται στην αλλαγή ροής του ρεύματος και η ενέργεια του πεδίου αποθηκεύεται στο πηνίο. $V = L \frac{dI}{dt}$	Αντιτίθεται στην αλλαγή τάσης (χωρίζει θετικά και αρνητικά φορτία), η ενέργεια του πεδίου αποθηκεύεται στον πυκνωτή. $I = C_E \frac{dV}{dt}$ $\Rightarrow V = \frac{1}{C_E} \int Idt$
Μηχανικό	Μετατρέπει κινητική ενέργεια σε θερμότητα με την τριβή $R_m = \frac{F}{u}$	Αντιτίθεται στην αλλαγή ταχύτητας της μάζας (από το νόμο του Newton). $F = m \frac{du}{dt}$	Το μηχανικό στοιχείο που χαρακτηρίζεται από την «Ενδοτικότητα» (Compliance), αντιτίθεται στην αλλαγή της ασκούμενης δύναμης (ελατήριο) $F = \frac{x}{C_m}$
Ακουστικό	Μετατρέπει ακουστική ενέργεια σε θερμότητα με το πέρασμα του ελαστικού μέσου από μια ακουστική αντίσταση $R_A = \frac{p}{U}$	Αντιτίθεται στην αλλαγή ροής όγκου του ελαστικού μέσου διάδοσης. $p = M_A \frac{dU}{dt}$	Είναι το στοιχείο της ακουστικής χωρητικότητας που συσχετίζεται με τη δυναμική ενέργεια που προκύπτει από την συμπίεση του ρευστού και αντιτίθεται στην αλλαγή της ασκούμενης πίεσης, δηλαδή: $U = C_A \frac{dp}{dt}$

Η αναλογία των στοιχειωδών ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστικών συστημάτων φαίνεται στο Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.2: Αναλογίες των βασικών ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών συστημάτων.

Τα συστήματα αυτά αποτελούν «Ανάλογα» πρώτου βαθμού και συνοπτικά, η λειτουργία τους έχει ως εξής: σε ένα γραμμικό σύστημα στο οποίο επιτρέπεται ταλάντωση, περιλαμβάνει στοιχεία αποθήκευσης κινητικής και δυναμικής ενέργειας. Τα στοιχεία της κινητικής ενέργειας είναι η σύνθετη αντίσταση, η μάζα και η αντίδραση. Τα στοιχεία της δυναμικής ενέργειας είναι η χωρητικότητα των πυκνωτών, η ενδοτικότητα και η ακουστική χωρητικότητα. Οι αντιστάσεις, δηλαδή οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι μηχανικές αντιστάσεις τριβής καθώς και οι ακουστικές αντιστάσεις καταναλώνουν ενέργεια. Η ταχύτητα, το ρεύμα και η ογκομετρική ταχύτητα είναι ισοδύναμα φυσικά μεγέθη σε διαφορετικό σύστημα στα οποία οι βασικές σχέσεις είναι όπως φαίνονται στον **Πίνακα 3.2**




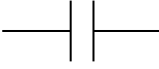



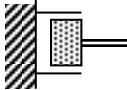

Πίνακας 3.2: Βασικές σχέσεις σε ανάλογα ηλεκτρικά, μηχανικά και ακουστικά συστήματα.

	Σχέσεις βασικών μεγεθών	Σύνθετη αντίσταση	Συχνότητα συντονισμού
Ηλεκτρικό Σύστημα	$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{V e^{j\omega t}}{R_E + j\omega L_E - j \frac{1}{\omega C_E}} = \frac{V}{Z_E}$	$Z_E = R_E + j\omega L_E - \frac{j}{\omega C_E}$	$f_E = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_E C_E}}$
Μηχανικό Σύστημα	$u(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{F e^{j\omega t}}{R_M + j\omega m - j \frac{1}{\omega C_m}} = \frac{f_m}{Z_M}$	$Z_m = R_m + j\omega m - \frac{j}{\omega C_M}$	$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{m C_m}}$
Ακουστικό Σύστημα	$V(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{p e^{j\omega t}}{R_A + j\omega M_A - j \frac{1}{\omega C_A}} = \frac{P}{Z_A}$	$Z_A = R_A + j\omega M_A - \frac{j}{\omega C_A}$	$f_A = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_A C_A}}$

Σημείωση: συχνά για τα μηχανικά συστήματα χρησιμοποιείται $1/C_m = k$ (σκληρότητα ελατηρίου) και $C = R_M$ (για την απόσβεση).

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, για κατάλληλες τιμές των R_E , L_E , C_E , m , C_M , M_A και C_A θα υπάρχει μια συχνότητα, που είναι η **συχνότητα συντονισμού** του συστήματος, για την οποία το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης θα είναι μηδέν και σε αυτή την περίπτωση ο λόγος ρεύματος / τάσης, ταχύτητας / δύναμης και ογκομετρικής ταχύτητας / πίεσης θα είναι μέγιστα.

Το **Σχήμα 3.3** παρουσιάζει την αντιστοιχία για τα στοιχεία των αναλόγων συστημάτων.

Ηλεκτρικά	Μηχανικά	Ακουστικά
Αυτεπαγωγή L 	Μάζα m 	Αντίδραση M_A 
Χωρητικότητα C 	Ενδοτικότητα $C_m = 1/k$ 	Υποχωρητικότητα C_A 
Αντίσταση R 	Απόσβεση R_A 	Αντίσταση R_A 

Σχήμα 3.3: Αντιστοιχία σε ανάλογα ηλεκτρικά, μηχανικά και ακουστικά συστήματα.

Ο Πίνακας 3.3 δίνει όλες τις παραπάνω σχέσεις και τις αντίστοιχες μονάδες του κάθε μεγέθους για το σύστημα αναλογιών που χρησιμοποιείται εδώ, δηλαδή την «Αναλογία Εμπέδησης» (“Impedance analogy”) ή «Σύστημα EPF».

Πίνακας 3.3: Αναλογία Εμπέδησης

Ηλεκτρικό Σύστημα	Μηχανικό Σύστημα	Ακουστικό Σύστημα
Τάση V (Volt)	Δύναμη f (Newton)	Ακουστική πίεση p (N/m ²)
Επαγωγή L (Henry)	Μάζα m (kg)	Αντίδραση M_A (kg/m ⁴)
Φορτίο Q (Coulomb)	Απομάκρυνση x (m)	Μετάβ. Όγκο X (m ³)
Ρεύμα I (Ampere)	Ταχύτητα u (m/s)	Ταχύτητα όγκου U (m ³ /s)
Αντίσταση R (Ohm)	Απόσβεση C (kgs/m)	Αντίσταση R_A (Ns/m)
1/Χωρητ. $1/C$ (Farad)	Σταθερά Ελατηρίου K (kg/m)	1/Ενδοτικότητα $1/C_A$ (Nm ⁻⁵)
Σύνθετη Αντ. Z_E (Ohm)	Σύνθετη Αντίσταση Z_M	Σύνθετη Αντίσταση Z_A

Σε όλα τα παρακάτω κεφάλαια θα ακολουθηθεί η παραπάνω αναλογία E.P.F. Επειδή όμως σε μερικές εφαρμογές χρησιμοποιείται και η αναλογία I.P.F. (ή «Αναλογία Κινητικότητας», “Mobility Analogy”), ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει τις αντίστοιχες σχέσεις σε αυτό το εναλλακτικό σύστημα.

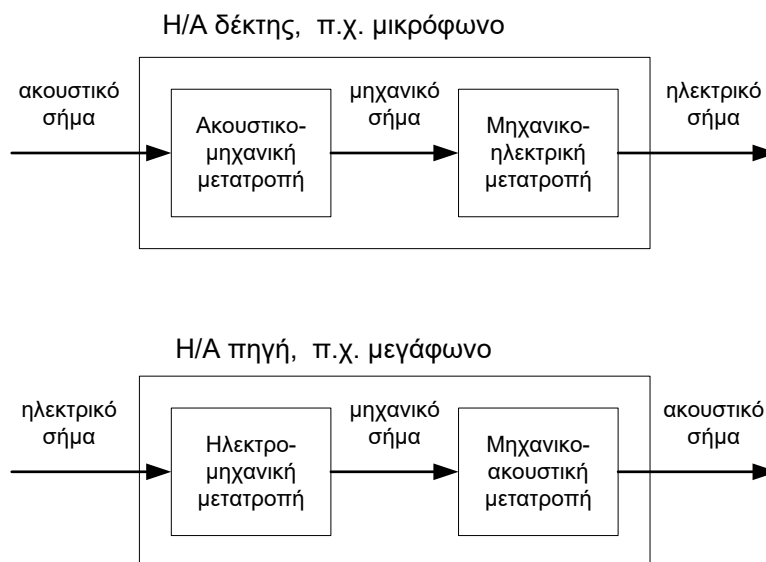
Πίνακας 3.4: Αναλογία Κινητικότητας

Ηλεκτρικό Σύστημα	Μηχανικό Σύστημα	Ακουστικό Σύστημα
Τάση V (Volt)	Ταχύτητα u (m/s)	Ταχύτητα όγκου U (m ³ /s)
Επαγωγή L (Henry)	Ενδοτικότητα $C_m = 1/k$	Ενδοτικότητα C_A (N ⁻¹ m ⁵)
Φορτίο Q (Coulomb)	Απομάκρυνση x (m)	Μετάβ. Όγκου X (m ³)
Ρεύμα I (Ampere)	Δύναμη f (Newton)	Ακουστική πίεση p (N/m ²)
Αντίσταση R (Ohm)	Απόσβεση C (kgs/m)	1/Αντίσταση $1/R_A$ (Ns/m)
1/Χωρητ. C (Farad)	Μάζα m (kg)	Αντίδραση M_A (kg/m ⁴)

3.2 Ηλεκτρική – Μηχανική – Ακουστική Μετατροπή

3.2.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της Ηλεκτροακουστικής είναι η ανάλυση και περιγραφή μετατροπών ενέργειας μεταξύ των αναλόγων συστημάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ηλεκτρική, μηχανική ή ακουστική ενέργεια η οποία παράγεται ή αποθηκεύεται σε αυτά τα συστήματα, μετασχηματίζεται από μία μορφή σε άλλη μέσω της σύζευξης των επιμέρους αναλόγων υποσυστημάτων σε κατάλληλες διατάξεις μετασχηματιστών, οι οποίοι ονομάζονται ηλεκτροακουστικοί «μετατροπείς» (transducers). Στην πράξη, οι Η/Α μετατροπείς συνδυάζουν πολλαπλά στάδια ενεργειακού μετασχηματισμού, όπως για παράδειγμα σε ένα μικρόφωνο (όπου το σήμα μετασχηματίζεται από ακουστικό σε μηχανικό σε ηλεκτρικό), ή σε ένα μεγάφωνο (όπου το σήμα μετασχηματίζεται από ηλεκτρικό σε μηχανικό σε ακουστικό), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4** Στην παράγραφο αυτή ορίζονται σχέσεις που επιτρέπουν την μελέτη και βελτιστοποίηση τέτοιων μορφών μετατροπής, δηλαδή κυρίως ενός ηλεκτρικού σήματος σε ακουστικό και το αντίστροφο.



Σχήμα 3.4: Σχηματική διάταξη ηλεκτροακουστικών μετατροπέων

Θεωρητικά οι μετατροπείς αυτοί έχουν συμμετρική συμπεριφορά ως προς την διεύθυνση κατά την οποία λαμβάνει χώρα η μετατροπή του σήματος, όπως θα συζητηθεί και παρακάτω, έτσι ώστε να λειτουργούν είτε σαν **H/A πηγές**, είτε σαν **H/A δέκτες**. Όπως επίσης θα συζητηθεί αργότερα, η συνηθέστερη μορφή ηλεκτρο-μηχανικής και μηχανο-ηλεκτρικής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ηλεκτρομαγνητικού και κατά δεύτερο λόγο ηλεκτροστατικού, πιεζοηλεκτρικού ή μαγνητοστατικού στοιχείου μετατροπής («κινητήρα»), το οποίο (κατά την ηλεκτρο-μηχανική μετατροπή) λαμβάνει ηλεκτρικό σήμα και παράγει κατάλληλη μηχανική

ταλάντωση ανάλογα με τη στιγμιαία τιμή τάσης του σήματος. Το αντίστροφο ακριβώς συμβαίνει κατά την μηχανο-ηλεκτρική μετατροπή.

Η συνηθέστερη μορφή μηχανο-ακουστικής και ακουστο-μηχανικής μετατροπής βασίζεται στη χρήση κατάλληλης επιφάνειας (μεμβράνης, διαφράγματος, κλπ.), η οποία μεταφέρει την μηχανική ταλάντωση του «κινητήρα» στο ελαστικό μέσο (π.χ. αέρα) και το αντίστροφο.

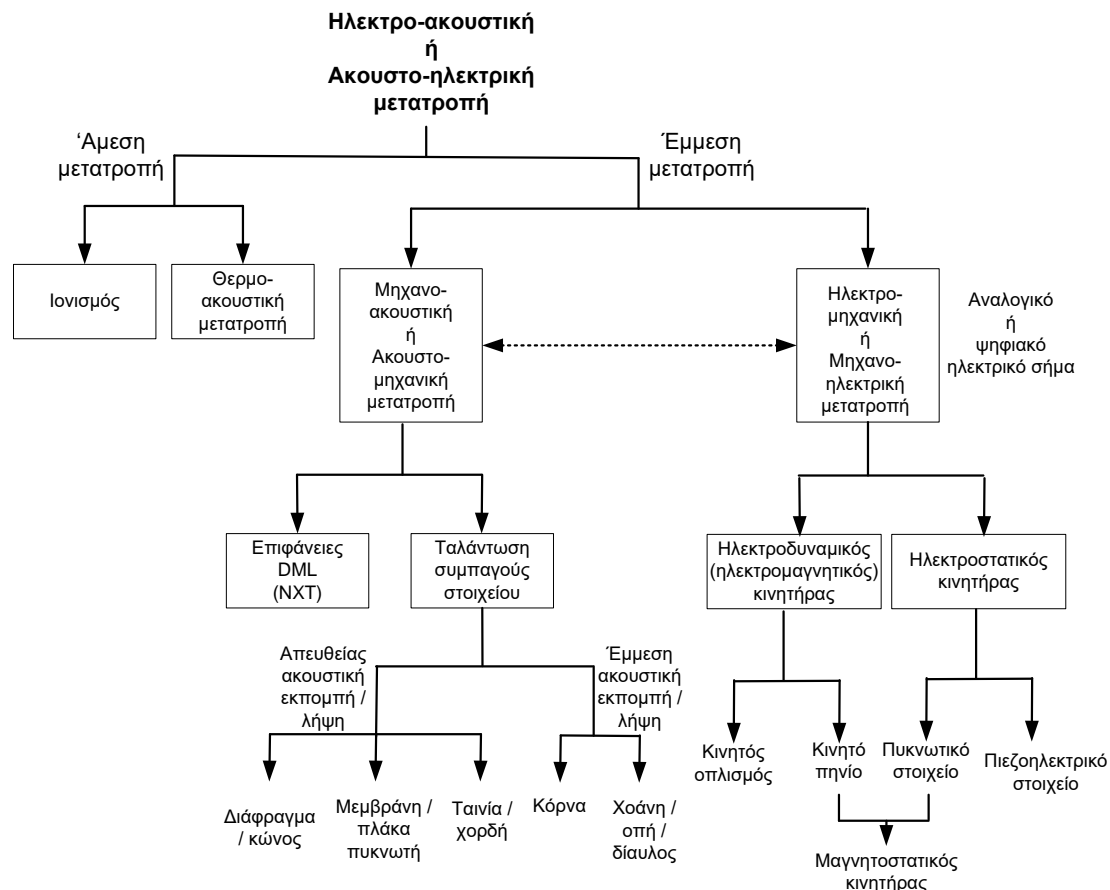
3.2.2 Επισκόπηση μεθόδων μετατροπής

Ιστορικά, η εξέλιξη των Η/Α μετατροπέων ξεκίνησε από τα συστήματα που ανακάλυψε ο Edison (μηχανο-ακουστικό σύστημα φωνόγραφου) και ο Bell (μετατροπείς για τηλέφωνο), γύρω στο 1880 και τα οποία βασιζόταν στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία που διατύπωσε ο Maxwell (γύρω στα 1840), καθώς και σε προηγούμενες ανακαλύψεις των Henry, Morse, Gauss και Weber. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σήμερα τεχνολογία των «ηλεκτροδυναμικών» (ηλεκτρομαγνητικών) Η/Α μετατροπέων, η οποία θα αναλυθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε παρακάτω παραγράφους, πρωτοεμφανίστηκε την δεκαετία του 1920 από τους Olson και Rice / Kellogg. Οι εναλλακτικές μέθοδοι μετατροπής που βασίζονται στη χρήση ηλεκτροστατικού, πιεζοηλεκτρικού ή μαγνητοστατικού στοιχείου μετατροπής, εμφανίστηκαν επίσης την ίδια εποχή. Πέρα από υβριδικά, πειραματικά, ή περιορισμένης εφαρμογής συστήματα, οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούνται και στην συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων Η/Α μετατροπέων.

Πρόσφατες εξελίξεις (1997) αποτελούν τα επίπεδα ηχεία τύπου DML (Distributed Mode Loudspeakers), τα οποία αν και βασίζονται στη χρήση συμβατικού ηλεκτροδυναμικού κινητήρα, σε συνδυασμό με ειδική, επίπεδη επιφάνεια εκπομπής, παρουσιάζουν διαφορετική μέθοδο μηχανο-ακουστικής μετατροπής από αυτή των συμβατικών ηχείων όπου το διάφραγμα λειτουργεί ως συμπαγής επιφάνεια ακουστικής εκπομπής. Τα τελευταία χρόνια (αρχές του 2000) παρουσιάζονται και αμιγώς ψηφιακοί ηλεκτρο-ακουστικοί και ακουστο-ηλεκτρικοί μετατροπείς (μεγάφωνα και μικρόφωνα), οι οποίοι παρόλο που βασίζονται σε συμβατικές μεθόδους μετατροπής (όπως έχουν περιγραφεί), χρησιμοποιούν ψηφιακό ηλεκτρικό σήμα (συνήθως κωδικοποιημένου κατά PCM) αντί του συνήθους αναλογικού. Μελλοντικά, τέτοιες μέθοδοι είναι πιθανό να επιτρέψουν την ολοκλήρωση και καλύτερο έλεγχο της μετατροπής μέσω ψηφιακών μεθόδων και την απλοποίηση της κατασκευής των μεγαφώνων / μικροφώνων. Σε πειραματικό στάδιο βρίσκονται μετατροπείς που βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία όμως εκπέμπουν σε υπερηχητικές συχνότητες ("soundbeam") και αξιοποιούν την αποδιαμόρφωση που δημιουργεί η διάδοση αυτής της ηχητικής ακτίνας στο ελαστικό μέσο για να παράγουν ακουστό ήχο.

Τέλος, πειραματικά έχουν εμφανισθεί και άλλοι μηχανισμοί ηλεκτρο-ακουστικής μετατροπής, οι οποίοι σε αντίθεση με όλες τις παραπάνω μεθόδους, δεν απαιτούν την ενδιάμεση χρήση μηχανικών στοιχείων ταλάντωσης, αλλά επιτυγχάνουν παραγωγή ακουστικής πίεσης μέσα από άλλους φυσικούς μηχανισμούς μετατροπής

ενέργειας. Τέτοια συστήματα, είναι τα «μεγάφωνα ιονισμού», τα οποία μέσω της εκφόρτισης ηλεκτρικού σήματος από ειδικά ηλεκτρόδια, εκμεταλλεύονται το φαινόμενο ιονισμού του ελαστικού μέσου (φαινόμενο “corona”) για την παραγωγή ηχητικής πίεσης (κατ’ αναλογία του ήχου που παράγει ο κεραυνός). Άλλες πειραματικές διατάξεις βασίζονται στο φαινόμενο της θερμο-ακουστικής μετατροπής. Στο **Σχήμα 3.5**, δίνεται μία ταξινόμηση των διαφορετικών διατάξεων και μεθόδων ηλεκτροακουστικής μετατροπής.

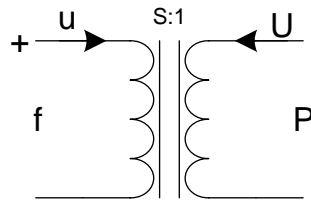


Σχήμα 3.5: Διατάξεις και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροακουστική μετατροπή

3.2.3 Μηχανο-ακουστική και ακουστο-μηχανική σύζευξη και μετατροπή

Εξετάζοντας τώρα αναλυτικότερα τους επιμέρους μηχανισμούς μετατροπών του σήματος, η ιδανική και απλούστερη περίπτωση σύζευξης ενός μηχανικού και ενός ακουστικού συστήματος, αποτελεί μία συμπαγής, κυκλική επιφάνεια (δίσκος) S (m^2), η οποία λόγω της εφαρμογής δύναμης $f(t)$, κινείται με ταχύτητα $u(t)$, παράγοντας ταχύτητα όγκου $U(t)$ και ακουστική πίεση $p(t)$, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**

Επειδή κατά τη σύζευξη αυτή συντελείται μετασχηματισμός μηχανικής σε ακουστική ενέργεια (ή το αντίστροφο), η διάταξη αυτή θα θεωρηθεί σαν ένας μετασχηματιστής που περιγράφει ένα συζευγμένο δίκτυο, του οποίου η μία πλευρά είναι η ακουστική και η άλλη, η μηχανική (**Σχήμα 3.6**).



Σχήμα 3.6: Απλοποιημένη Μηχανο-ακουστική σύζευξη

Όπως είναι γνωστό, ένας μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία διαφορετικού αριθμού σπειρών συζευγμένα μαγνητικά, τα οποία πολλαπλασιάζουν τις τάσεις με τον συντελεστή k (λόγος σπειρών) και στην αντίθετη κατεύθυνση διαιρούν τις τάσεις με τον ίδιο συντελεστή (δηλαδή $V_2 = k \cdot V_1$ και $I_2 = (1/k)I_1$). Αν το πρωτεύον κύκλωμα παρουσιάζει αντίσταση R_1 , ο αρχικός λόγος τάσεων μπορεί να διατηρηθεί, αν το δευτερεύον κύκλωμα έχει αντίσταση R_2 , τέτοια ώστε $R_2 = k^2 \cdot R_1$ (παρόμοιες σχέσεις ισχύουν και για σύνθετες αντιστάσεις).

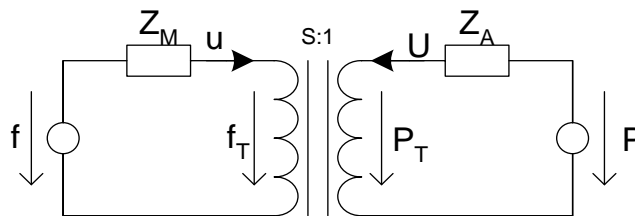
Στην περίπτωση του μηχανο-ακουστικού μετασχηματιστή, ο λόγος σπειρών αντικαθίσταται από το στοιχείο μετατροπής, που είναι η επιφάνεια του δίσκου η οποία μετατρέπει ταχύτητες και δυνάμεις σε πίεση και ταχύτητα όγκο (και το αντίστροφο) και έτσι είναι $S = 1$, οπότε ισχύει:

$$\begin{aligned} f(t) &= S \cdot p(t) \\ U(t) &= S \cdot u(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

και για ισορροπία:

$$f(t) \cdot u(t) + p(t) \cdot U(t) = 0 \quad (3.5)$$

Σε μία περισσότερο ρεαλιστική θεώρηση, η κάθε μία πλευρά θα πρέπει να λειτουργεί σαν ένα σύστημα (ακουστικό ή μηχανικό), το οποίο θα πρέπει να εμφανίζει και κάποια σύνθετη αντίσταση. Για το μηχανικό τμήμα, δεδομένου ότι η ταλάντωση θα υλοποιείται από τον δίσκο ο οποίος και θα παρουσιάζει μάζα και θα αναρτάται με αντίσταση και απόσβεση (όπως έχει ήδη συζητηθεί), η σύνθετη μηχανική αντίσταση Z_M θα δημιουργείται από την αλληλοεπίδραση των στοιχείων αυτών.



Σχήμα 3.7: Πρακτικός Μηχανοακουστικός μετατροπέας

Όμοια, η ακουστική πλευρά, θα εμφανίζει μία ακουστική σύνθετη αντίσταση εκπομπής Z_A , λόγω της αλληλοεπίδρασης του δίσκου με το ελαστικό μέσο. Έτσι, το ιδανικό σχήμα του μηχανο-ακουστικού μετασχηματιστή, διαφοροποιείται σε αυτό του **Σχήματος 3.7** για το οποίο εύκολα μπορούν να γραφούν και οι παρακάτω σχέσεις:

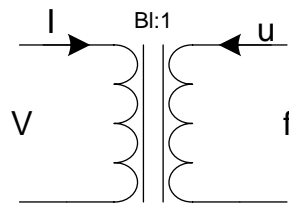
$$f(t) = Z_M u(t) + f_T(t) = Z_M u(t) + S^2 Z_A u(t) + S p(t) \quad (3.6)$$

$$p(t) = Z_A U(t) + p_T(t) = Z_A U(t) + S^2 Z_M U(t) + S^{-1} f(t) \quad (3.7)$$

Η μορφή και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων ενός τέτοιου μετασχηματιστή, θα συζητηθούν σε επόμενες παραγράφους.

3.2.4 Ηλεκτρο-μηχανική και μηχανο-ηλεκτρική σύζευξη και μετατροπή

Στην περίπτωση αυτή, μετασχηματίζονται ηλεκτρικές τάσεις και ρεύματα σε μηχανικές δυνάμεις και ταχύτητες (και το αντίστροφο). Η ανάλυση ακολουθεί την μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου, ξεκινώντας από τον ιδανικό μετασχηματιστή, που όμως εδώ θα βασίζεται στους «**ηλεκτροδυναμικούς**» (ηλεκτρομαγνητικούς) κινητήρες, οι οποίοι αφενός παρουσιάζουν την απλούστερη περίπτωση μετατροπής και αφετέρου αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία των Η/Α μετατροπέων. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.8**, στην ιδανική περίπτωση, ένα ηλεκτρικό στοιχείο (π.χ. πηνίο) το οποίο βρίσκεται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο το οποίο παράγει ένας μόνιμος μαγνήτης (το οποίο και επιδρά κάθετα στο πηνίο) διαρρέεται από ρεύμα $I(t)$ και στα άκρα του εμφανίζει τάση $V(t)$. Όπως θα συζητηθεί αναλυτικότερα παρακάτω, από τον νόμο του Laplace, στην διάταξη αυτή θα παραχθεί μία ηλεκτρομαγνητική δύναμη $f(t)$ η οποία και θα μετακινήσει την μηχανική διάταξη με ταχύτητα $u(t)$. Το αντίστροφο επίσης θα ισχύει, αφού μία κίνηση του πηνίου με ταχύτητα $u(t)$ λόγω εφαρμογής της δύναμης $f(t)$, θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή αντίστοιχου χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος $I(t)$ και τάσης $V(t)$ στα άκρα του αγωγού.



Σχήμα 3.8: Απλοποιημένη ηλεκτρομηχανική σύζευξη

Οι αρχές της ηλεκτροδυναμικής (ηλεκτρομαγνητικής) μετατροπής, παρ' όλο ότι είναι γνωστές από τα μαθήματα του Ηλεκτρομαγνητισμού, θα περιγραφούν και εδώ σε συντομία. Στην Ηλεκτροακουστική, ένας τέτοιος ηλεκτρομαγνητικός κινητήρας, υλοποιείται με έναν σταθερό μαγνήτη, ο οποίος παράγει πυκνότητα μαγνητικής ροής B (Tesla). Συνήθως, ο μαγνήτης αυτός έχει δακτυλιοειδή μορφή και με δεδομένου ότι το ηλεκτρικό πηνίο μήκους l (m) επίσης είναι σχηματισμένο σε δακτυλιοειδή μορφή, στο εσωτερικό του μαγνήτη (**Σχήμα 3.9**), το μαγνητικό πεδίο είναι παντού σταθερό και εφαρμόζει ακτινικά και κάθετα σε όλα τα σημεία του αγωγού.

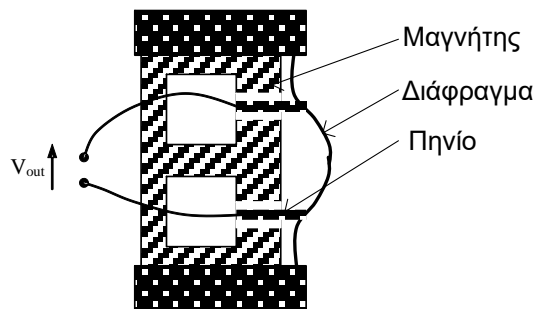
Έστω τώρα ένα στοιχείο dl του αγωγού το οποίο κινείται με ταχύτητα u στο πεδίο μαγνητικής ροής B , μεταφέροντας ρεύμα i (**Σχήμα 3.10**). Σαν αποτέλεσμα, από τον

νόμο του Lenz, θα παράγεται και θα εφαρμόζει κάθετα στη διεύθυνση του πεδίου, μία ηλεκτρεγερτική δύναμη de , ίση με:

$$de = u \cdot B \cdot dl$$

έτσι ώστε για το συνολικό μήκος του αγωγού, θα είναι:

$$e = \int_l dedl = -Blu \text{ (Volt)}$$



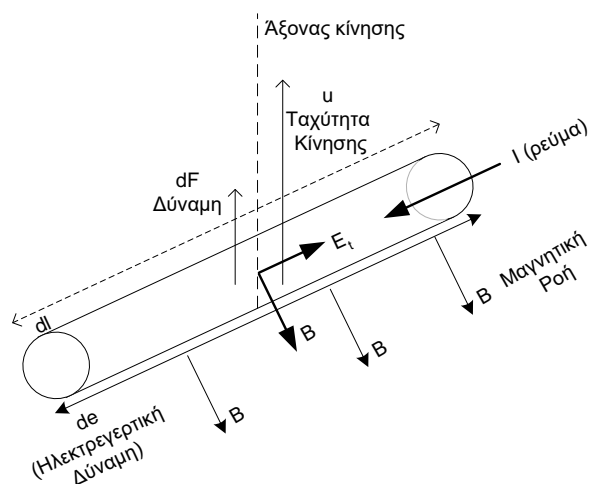
Σχήμα 3.9: Τομή ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα

Επίσης, από τον νόμο του Laplace, θα παράγεται και θα εφαρμόζει κάθετα στον αγωγό, μία μαγνητική δύναμη df , ίση με:

$$df = Bidl$$

έτσι ώστε για το συνολικό μήκος του αγωγού, θα είναι:

$$f = \int_l df dl = Bli \text{ (Newton)}$$



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση νόμων ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής

Στην ανάλυση αυτή, υποτίθεται ότι η μαγνητική ροή B , έχει ομοιόμορφη τιμή (μέτρο) σε όλα τα σημεία της διάταξης και ότι ο αγωγός κινείται μόνο ως προς μία διεύθυνση.

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν την **ηλεκτροδυναμική σύζευξη** (που αποτελεί και τον κύριο μηχανισμό ηλεκτρομηχανικής μετατροπής) και ο **συντελεστής σύζευξης** ορίζεται το στοιχείο Bl (σε Vs/m, ή σε N/A, ή σε Tm). Έτσι, στην περίπτωση του ηλεκτρομηχανικού μετασχηματιστή, ο λόγος σπειρών αντικαθίσταται από το στοιχείο μετατροπής, που σε αυτή την περίπτωση είναι το γινόμενο Bl και το οποίο επιτρέπει την μετατροπή ρευμάτων και τάσεων σε ταχύτητες και δυνάμεις (και το αντίστροφο) και έτσι είναι $Bl = 1$, οπότε ισχύει:

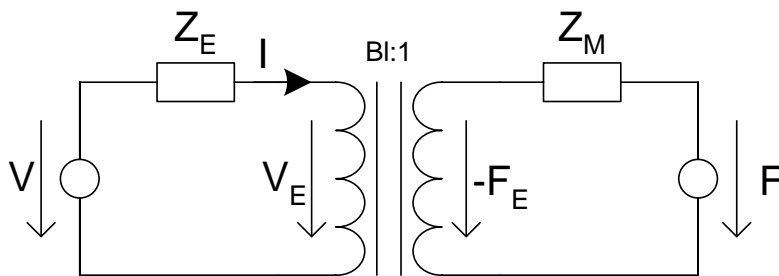
$$\begin{aligned} V(t) &= Bl.u(t) \\ f(t) &= Bl.I(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

και για ισορροπία:

$$V(t).I(t) + u(t).f(t) = 0 \quad (3.9)$$

Κατ' αντιστοιχία αυτών που συζητήθηκαν και για την μηχανο-ακουστική μετατροπή, ο πρακτικός μετατροπέας θα εμφανίζει σε κάθε πλευρά του και κάποια σύνθετη αντίσταση, αφού στην ηλεκτρική πλευρά, ο αγωγός του πηνίου παρουσιάζει αντίσταση και επαγωγή, και άρα μία σύνθετη αντίσταση Z_E , ενώ στο μηχανικό τμήμα, δεδομένου ότι η ταλάντωση θα υλοποιείται από τον δίσκο ο οποίος και θα παρουσιάζει μάζα και θα αναρτάται με αντίσταση και απόσβεση (όπως έχει ήδη συζητηθεί), η σύνθετη μηχανική αντίσταση Z_M θα δημιουργείται από την αλληλοεπίδραση των στοιχείων αυτών. Άρα, ο πρακτικός ηλεκτροδυναμικός μετασχηματιστής, θα παρουσιάζει τη μορφή που δίνεται στο **Σχήμα 3.11**. για το οποίο εύκολα μπορούν να γραφούν και οι παρακάτω σχέσεις:

$$-V + Z_E I + V_E = 0 \text{ και } f + f_E - Z_M u = 0 \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.11: Πρακτικός Ηλεκτρομηχανικός Μετατροπέας

Δεδομένου ότι σύμφωνα με τα προηγούμενα, η σύζευξη των δύο πλευρών απαιτεί ότι $V_E = Blu$ και $f_E = -BlI$, οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται σαν:

$$V = Z_E I + Blu \text{ και } f = Z_M u - BlI \quad (3.11)$$

και αποτελούν το ζεύγος των **κανονικών εξισώσεων** του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα.

3.2.5 Ηλεκτροακουστική αντιστρεπτικότητα

Στις παραπάνω εξισώσεις, οι κοινοί όροι Bl ονομάζονται συντελεστές ηλεκτρομηχανικής ΗΜ (EM) και μηχανοηλεκτρικής ΜΗ (ME) μετατροπής και για όλους τους μετατροπείς που λειτουργούν συμμετρικά, λόγω πιθανής αλλαγής της φοράς στο παραγόμενο ρεύμα / εφαρμοζόμενη δύναμη, αυτοί οι συντελεστές ορίζονται σαν:

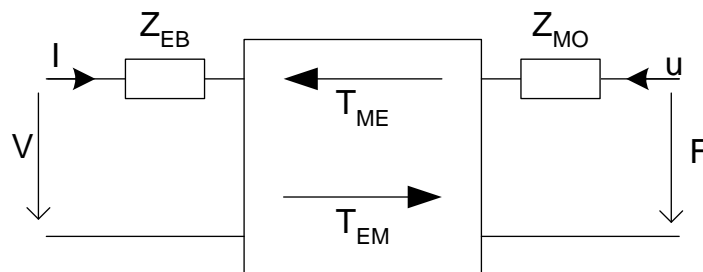
$$T_{EM} = \pm T_{ME} \quad (3.12)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως σε αυτούς που βασίζονται σε κρυσταλλικό, κεραμικό ή ηλεκτροστατικό στοιχείο, επίσης ισχύει $T_{EM} = T_{ME} = T$, οπότε ο μετατροπέας παρουσιάζει «Ηλεκτρομηχανική Αντιστρεπτικότητα». Αν το στοιχείο αντιστρέφει τη φορά, δηλαδή ισχύει $T_{EM} = -T_{ME}$, όπως στους ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς που λειτουργούν με κινητό πηνίο ή σπλισμό, τότε ο μετατροπέας παρουσιάζει « Αντίθετη Ηλεκτρομηχανική Αντιστρεπτικότητα».

Στην περίπτωση αυτή, ένα θετικό ρεύμα θα διεγείρει μία δύναμη με κατεύθυνση προς τα έξω, δηλαδή με αρνητική φορά. Πρακτικά όμως, ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής μπορεί να έχει πρόσημο που να εξαρτάται από τη φορά τυλίγματος του πηνίου. Συχνά, χρησιμοποιείται και η σχέση: $T_{EM} = -T_{ME} = T$, έτσι ώστε $-T_{ME}T_{EM} = T^2 = (Bl)^2$.

3.2.6 Οι ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς σαν ηλεκτρικά δίκτυα

Ο ηλεκτροδυναμικός μετασχηματιστής που παρουσιάστηκε συνδυάζει σε κάθε πλευρά του στοιχεία που εξετάστηκαν μεμονωμένα στην παράγραφο περί Αναλογιών, με βάση τα οποία, τα στοιχεία αυτά εκφράζονται σαν ηλεκτρικά κυκλώματα. Έτσι, κάθε Η/Α μετατροπέας μπορεί να περιγραφεί σαν ένα **ηλεκτρικό δίθυρο**, δηλαδή ένα δίκτυο με 2 ακροδέκτες (2-port network), το οποίο στην μία του πλευρά εμφανίζει ηλεκτρικές και στην άλλη του πλευρά μηχανικές ιδιότητες (Σχήμα 3.12).



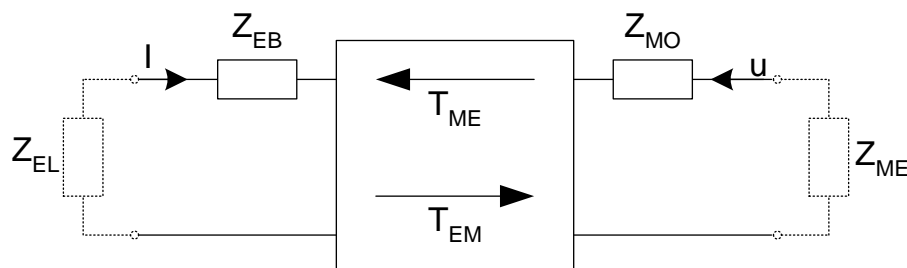
Σχήμα 3.12: Απλοποιημένη μορφή Ηλεκτρομηχανικού Δίθυρου

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε με λεπτομέρεια την συμπεριφορά τέτοιων δίθυρων (τα οποία επίσης αναλύονται και στα μαθήματα των Ηλεκτρονικών και της Εισαγωγής στις Τηλεπικοινωνίες), θεωρώντας τις ιδιότητες των μετατροπέων αυτών

όπως αυτές παρατηρούνται «απ' έξω». Έτσι, είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι το διάφραγμα (και ο κώνος) είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν (να κινούνται) σε φάση σε όλη τους την επιφάνεια, δηλαδή ολόκληρη η μεμβράνη ή ολόκληρος ο κώνος να κινείται σαν σύνολο ανάλογα με το στιγμιαίο πλάτος του σήματος, χωρίς αλλαγή της μορφής που έχει σε κατάσταση ηρεμίας. Στην περίπτωση αυτή όπως συζητήθηκε στην περίπτωση του πιστονιού ή του κυκλικού δίσκου, χρησιμοποιούνται σαν παράμετροι περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος η ομοιογενής ταχύτητα της επιφάνειας και η συνολική δύναμη που εφαρμόζει σ' αυτήν την επιφάνεια, ενώ όμοια το ηλεκτρικό υποσύστημα, περιγράφεται επίσης από δύο παραμέτρους, την τάση και το ρεύμα

Η περιγραφή μέσω των δίθυρων κυκλωμάτων, επιτρέπει και την ανάλυση της συμπεριφοράς των μετατροπέων είτε αυτά λειτουργούν σαν πηγές, είτε σαν δέκτες. Είναι σκόπιμο σε ένα τέτοιο δίθυρο να αναλυθεί αρχικά το θέμα της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και αυτό θα απασχολήσει κυρίως τις επόμενες παραγράφους. Φυσικά, στο επόμενο ή προηγούμενο στάδιο εμφανίζεται η μηχανοακουστική μετατροπή, οπότε πρέπει να εξεταστεί και το θέμα της ακουστικής εκπομπής ή λήψης. Για μια πηγή, αυτό είναι το θέμα της ακουστικής εκπομπής / λήψης, αφορά την μορφή του ακουστικού πεδίου που σχηματίζεται (ή παράγει) την κίνηση του κώνου, ιδανικά σε τρεις διαστάσεις που συνήθως σχετίζεται και με θέματα κατευθυντικότητας της πηγής / δέκτη (όπως συζητήθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια). Αγνοώντας τέτοια προβλήματα, η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα θεωρήσει σαν δεδομένη την αρχή της Η/Α αντιστρεπτότητας που συζητήθηκε, οπότε και τα συμπεράσματα θα ισχύουν και για τις δύο διευθύνσεις λειτουργίας του δίθυρου.

Επιπλέον, δεδομένου ότι αργότερα κυρίως θα περιγραφούν ακουστικά στοιχεία απευθείας εκπομπής / λήψης (π.χ. κώνοι και διαφράγματα), στην πράξη θα θεωρηθεί ότι η μηχανοακουστική σύζευξη μπορεί να απλοποιηθεί έτσι ώστε να εμφανίζεται σαν ένα «φορτίο εκπομπής», δηλαδή σαν μία σύνθετη ακουστική αντίσταση Z_A (που από εδώ και μετά θα γράφεται σαν Z_{ME}), το οποίο επιδρά στη μηχανική πλευρά του κυκλώματος και που η συνεισφορά του αναλύεται όταν απαιτείται η μελέτη της συνολικής ηλεκτροακουστικής μετατροπής. Επιπλέον, στην πράξη στην ηλεκτρική πλευρά θα εφαρμόζει και ένα επιπλέον φορτίο, που περιγράφεται από την σύνθετη αντίσταση Z_{EL} , λόγω των καλωδίων διασύνδεσης του πομπού (μεγαφώνου) ή δέκτη (μικροφώνου), αντίστοιχα με τον ενισχυτή ή προενισχυτή, οι οποίοι επίσης θα παρουσιάζουν και αντιστάσεις εξόδου / εισόδου. Έτσι, η πρακτική μορφή δίθυρου που απασχολήσει τις επόμενες παραγράφους, δίνεται στο **Σχήμα 3.13**.



Σχήμα 3.13: Πρακτική μορφή ηλεκτρομηχανικού δίθυρου

Για το κύκλωμα αυτό, θα ισχύουν οι εξισώσεις που δόθηκαν προηγουμένως (με τις κατάλληλες αντικαταστάσεις), δηλαδή:

$$V = Z_{EB}I + T_{EM}u \quad \text{και} \quad f = Z_{MO}u + T_{ME}I \quad (3.13)$$

Για να ορισθούν οι συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος αυτού, είναι χρήσιμο να περιγραφεί η συνολική εμπεδισή του, για διέγερση από την μία πλευρά του δίθυρου και αδρανής την άλλη. Έτσι, η εμπέδιση (είσοδος τάση / έξοδος ρεύμα) της ηλεκτρικής πλευράς, όταν στη μηχανική πλευρά δεν επιδρούν άλλες εξωτερικές δυνάμεις (δηλ. $f=0$), ορίζει την ηλεκτρική εμπέδιση, Z_{EI} , δηλαδή:

$$\left(\frac{V}{I}\right)_{f=0} = Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{(Bl)^2}{Z_{MO}} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MO}} \quad (3.14)$$

Όμοια, η συνολική μηχανική εμπέδιση (είσοδος δύναμη / έξοδος ταχύτητα) ορίζεται για απουσία εξωτερικού ηλεκτρικού σήματος στην ηλεκτρική πλευρά ($I=0$), ως:

$$\left(\frac{F}{u}\right)_{I=0} = Z_{MI} = Z_{MO} + \frac{(Bl)^2}{Z_{EB}} = Z_{MO} + \frac{T^2}{Z_{EB}} \quad (3.15)$$

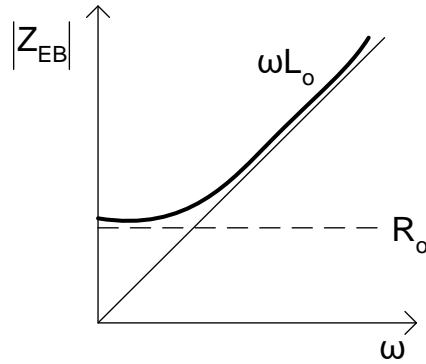
Η εμπέδιση Z_{EI} , ονομάζεται «**Σύνθετη Ηλεκτρική Αντίσταση Κίνησης**», ή «**Συνολική Σύνθετη Ηλεκτρική Αντίσταση**» του μετατροπέα, ενώ η Z_{MI} , ονομάζεται «**Συνολική Σύνθετη Μηχανική Αντίσταση**» του μετατροπέα. Η αντίσταση Z_{EI} μετρήθηκε για πρώτη φορά το 1912, όταν οι Pierce και Kennely μετρούσαν ο καθένας ξεχωριστά την αντίσταση τηλεφωνικών δεκτών, με διαφορετικά αποτελέσματα ο καθένας, αφού ο ένας είχε την πηγή στραμμένη προς την επιφάνεια του πάγκου εργασίας και ο άλλος, στραμμένη προς τα επάνω.

3.2.7 Το ισοδύναμο κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα

Αρχικά, η σύνθετη ακουστική αντίσταση εκπομπής θα θεωρηθεί αμελητέα, δηλαδή $Z_{ME} \ll Z_{MO}$ και θα εξετασθεί η μορφή της αμιγώς ηλεκτρικής αντίστασης Z_{EB} , για αδρανές το μηχανικό μέρος.

$$Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0 \quad (3.16)$$

όπου R_0 είναι η ωμική αντίσταση και L_0 η επαγωγή του αδρανούς πηνίου. Η σχέση αυτή οδηγεί στην εξάρτηση της τιμής (μέτρου) της αντίστασης αυτής από τη συχνότητα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.14**.

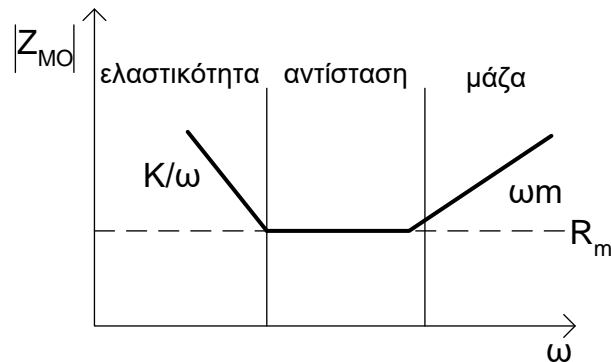


Σχήμα 3.14: Εξάρτηση μέτρου ηλεκτρικής αντίστασης από τη συχνότητα

Όμοια, εξετάζοντας την αμιγώς μηχανική αντίσταση Z_{MO} , η οποία προκύπτει από τη γνωστή σχέση:

$$Z_{MO} = R_M + j(\omega m - \frac{k}{\omega}) \quad (3.17)$$

όπου R_M είναι η απόσβεση, m η μάζα και k η σκληρότητα. Η σχέση αυτή οδηγεί στην εξάρτηση της τιμής (μέτρου) της αντίστασης αυτής από τη συχνότητα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.15**.



Σχήμα 3.15: Εξάρτηση μέτρου μηχανικής αντίστασης από συχνότητα

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις για την Z_{EB} και την Z_{MO} στην εξίσωση της Z_{EI} , προκύπτει:

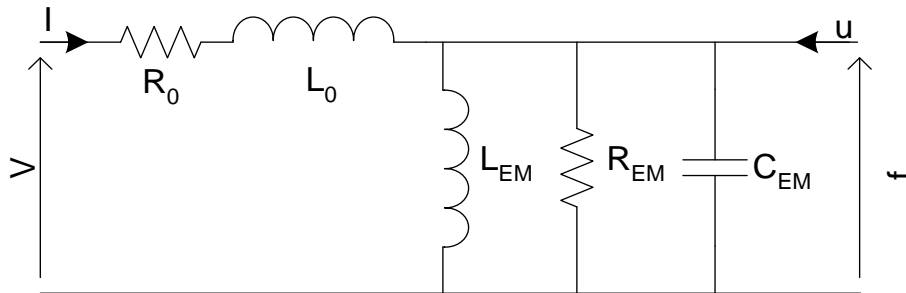
$$Z_{EI} = R_0 + j\omega L_0 + \frac{T^2}{R_M + j(\omega m - \frac{k}{\omega})} = R_0 + j\omega L_0 + \left[\frac{1}{R_{EM}} + j(\omega C_{EM} - \frac{1}{\omega L_{EM}}) \right]^{-1} \quad (3.18)$$

όπου τα μηχανικά στοιχεία του κυκλώματος μετατρέπονται σε **ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία**, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_M}, C_{EM} = \frac{m}{T^2} \text{ και } L_{EM} = \frac{T^2}{k} \quad (3.19)$$

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι τα ισοδύναμα αυτά στοιχεία, εμφανίζονται σε παράλληλη σύνδεση με τα αμιγώς ηλεκτρικά στοιχεία, έτσι ώστε να προκύπτει το

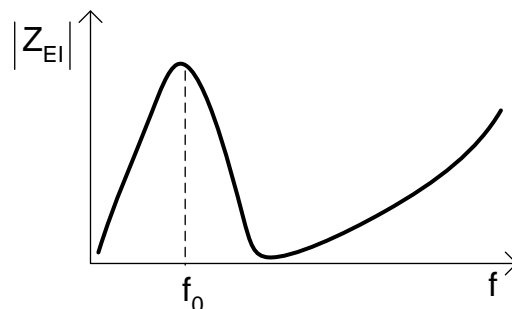
ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα, που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16



Σχήμα 3.16: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα

Το κύκλωμα αυτό μπορεί πλέον να αναλυθεί με την γνωστή μεθοδολογία που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα, για εισόδους διακριτές συχνότητες ηλεκτρικής διέγερσης και να υπολογισθεί η έξοδος (π.χ. ταχύτητα) και κατ' επέκταση η ακουστική απόκριση, επιτρέποντας και τον υπολογισμό της ηλεκτρικής / ακουστικής απόκρισης του μετατροπέα (δηλ. της απόκρισης συχνότητας), ή και το αντίστροφο (π.χ. για μικρόφωνα). Γενικά, είναι χρήσιμο να εξετασθεί και η σχέση εξάρτησης από την συχνότητα της σύνθετης αντίστασης Z_{EI} ενός τέτοιου μετατροπέα, ειδικά σε σχέση με τιμές των μηχανικών και ηλεκτρικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην υλοποίησή του. Έτσι, με βάση τα **Σχήματα 3.14 και 3.15**, προκύπτει το **Σχήμα 3.17**, που δείχνει ότι μέτρο της Z_{EI} παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην πρώτη συχνότητα μηχανικού συντονισμού των αντίστοιχων στοιχείων και επίσης πτώση σε σχετικά χαμηλές τιμές, πριν αρχίσει να παρουσιάζει αύξηση σε ψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα, στη συχνότητα $\omega_0 = 1/\sqrt{k/m}$ (rad/s) η οποία προκύπτει από τον συντονισμό της αυτεπαγωγής του L_{EM} με το στοιχείο C_{EM} . Όμοια, η ελάχιστη τιμή στην επόμενη συχνότητα συντονισμού ω_1 δημιουργείται από τον εκτός φάσης συνδυασμό του L_0 με το στοιχείο C_{EM} .

Πέραν του παραπάνω ηλεκτρικού ισοδυνάμου, είναι δυνατό να σχηματισθεί και το **ισοδύναμο μηχανικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα**, όπου τα ηλεκτρικά στοιχεία μετατρέπονται σε ισοδύναμα μηχανικά και συνδυάζονται με τα αμιγώς στοιχεία, έτσι ώστε προκύπτει η σχέση:

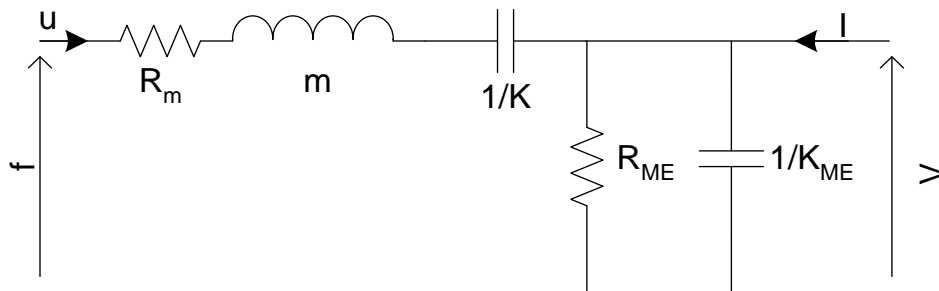


Σχήμα 3.17: Εξάρτηση μέτρου ολικής ηλεκτρικής αντίστασης από συχνότητα

$$Z_{MI} = R_M + j(\omega m - \frac{k}{\omega}) + \frac{T^2}{R_0 + j\omega L_0} = R_M + j(\omega m - \frac{k}{\omega}) + \left[\frac{1}{R_{ME}} + j \frac{\omega}{k_{ME}} \right]^{-1} \quad (3.20)$$

$$\text{όπου: } R_{ME} = \frac{T^2}{R_0} \text{ και } L_{ME} = \frac{1}{k_{ME}} = \frac{T^2}{L_0}$$

που έχει τη μορφή του κυκλώματος που δίνεται από το **Σχήμα 3.18**.



Σχήμα 3.18: Ισοδύναμο μηχανικό κύκλωμα ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα

3.2.8 Ευαισθησία μετατροπέων

Η ευαισθησία ενός μετατροπέα ορίζεται ως ο λόγος της εισερχόμενης ενέργειας προς το παραγόμενο έργο και είναι προφανώς σημαντική παράμετρος που καθορίζει την απόδοση τους, αλλά και την απόκρισή τους, αφού για την απαιτούμενη σταθερή με την συχνότητα απόκριση, θα πρέπει και η ευαισθησία να είναι το ίδιο σταθερή.

Για δέκτες (μικρόφωνα), σαν ευαισθησία για ανοιχτό κύκλωμα ($I=0$) ορίζεται ο λόγος τάσης εξόδου προς μονάδα δύναμης που επενεργεί στην επιφάνεια του διαφράγματος (για $Z_{EL}=0$), και για ηλεκτροδυναμικούς δέκτες, αυτό σχετίζεται με την μηχανική αντίσταση και τον συντελεστή μετατροπής, δηλαδή:

$$S_{\delta} = \left(\frac{V}{F} \right)_{I=0} = \frac{V}{u} \frac{u}{F} = \frac{T_{ME}}{Z_{MO}} \quad (3.21)$$

Για πηγές (μεγάφωνα), σαν ευαισθησία ($F=0$) ορίζεται ο λόγος ταχύτητας του κώνου προς το εφαρμοζόμενο ρεύμα (για $Z_{ME}=0$), και για ηλεκτροδυναμικούς δέκτες, αυτό σχετίζεται με την μηχανική αντίσταση και τον συντελεστή μετατροπής, δηλαδή:

$$S_{\pi} = \left(\frac{u}{I} \right)_{F=0} = - \frac{T_{EM}}{Z_{MO}} \quad (3.22)$$

Έτσι, αφού $|S_{\pi}| = |S_{\delta}| = \left| \frac{T}{Z_{MO}} \right|$, ένας ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας θα εμφανίζει

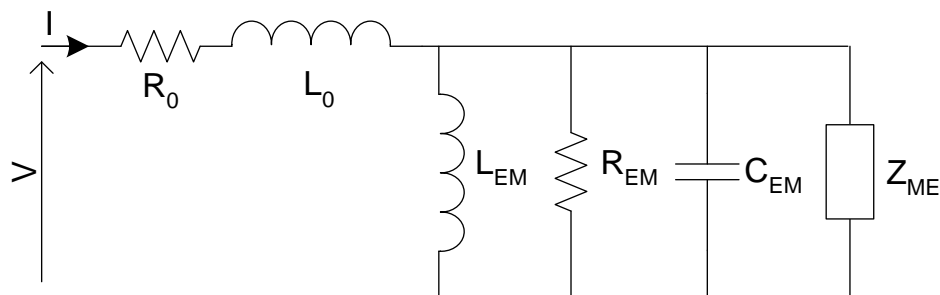
ηλεκτρομηχανική αντιστρεπτότητα και θεωρητικά θα έχει την ίδια ευαισθησία, είτε όταν λειτουργεί σαν πηγή, είτε σαν δέκτης. Στην πράξη, αυτή η συνθήκη δεν μπορεί να υλοποιηθεί για ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων ή και γωνιών εκπομπής / λήψης και για ρεαλιστικές στάθμες σημάτων. Έτσι, τα μικρόφωνα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μεγάφωνα (και το αντίστροφο). Η ευαισθησία μετατροπέων,

συχνά χρησιμοποιείται υπό μορφή στάθμης ευαισθησίας SL (*Sensitivity Level*), όπου σαν ευαισθησία αναφοράς S_{ref} , ορίζεται το 1 Pa/V , δηλαδή:

$$SL = 20 \log \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.23)$$

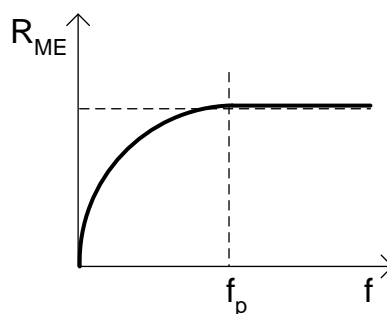
3.2.9 Μηχανοακουστική σύζευξη του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα

Με βάση όσα συζητήθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, είναι πλέον εφικτό να περιγραφεί με σχετικά απλοποιημένο τρόπο, το θέμα της ακουστικής εκπομπής (ή και λήψης) ενός τέτοιου ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα, με την κατάλληλη συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος με επιπλέον βρόγχο (-ους), που να συνθέτουν την σύνθετη μηχανοακουστική αντίσταση εκπομπής Z_{ME} , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.19**. Ως γνωστό, η αντίσταση αυτή περιγράφει την ικανότητα του ακουστικού εκπομπού (ή δέκτη), να μετατρέψει την κίνηση του πιστονιού σε ακουστική ισχύ (και το αντίστροφο).



Σχήμα 3.19: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα με ακουστικό φορτίο εκπομπής

Γενικά, η αντίσταση αυτή θα είναι μιγαδικό μέγεθος, δηλαδή $Z_{ME} = R_{ME} + jI_{ME}$, ουσιαστικά όμως, για κυκλικούς δίσκους, η συνεισφορά της I_{ME} είναι αμελητέα και έτσι σημαντική είναι η μορφή της R_{ME} που στην περίπτωση αυτή, είναι όπως δίνεται από το **Σχήμα 3.20**



Σχήμα 3.20: Μορφή R_{ME} συναρτήσει συχνότητας

Το σχήμα αυτό δείχνει ότι σε ψηλές σχετικά συχνότητες, όλα τα πιστόνια έχουν την ίδια δυνατότητα παραγωγής ακουστικής ισχύος / μονάδα επιφάνειας, αλλά για συχνότητες κάτω από μία οριακή τιμή f_P (Hz), για την οποία το μήκος κύματος πλησιάζει και ξεπερνά τις διαστάσεις του εκπομπού, η αντίσταση ελαττώνεται κατά 12 dB / οκτάβα (με το $-1/f^2$). Η συχνότητα f_P (Hz) ονομάζεται **συχνότητα πιστονιού** και ισούται με:

$$f_P \approx \frac{c}{2\pi R} \quad (3.24)$$

όπου $c=343$ (m/s) και R (m) είναι η ακτίνα του δίσκου. Έτσι, ισχύει:

$$R_{ME} \approx -\frac{1}{f^2}, \quad f < f_P \quad (3.25)$$

$$R_{ME} \approx 1, \quad f > f_P \quad (3.26)$$

Στην πράξη, για $R \approx 10$ cm, η συχνότητα πιστονιού είναι περίπου 550 Hz, που είναι πολύ μεγάλη για να αρχίσει η απώλεια κέρδους στην αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων.

Είναι επίσης γνωστό ότι η παραγόμενη ακουστική ισχύς $W_{ME} \approx R_{ME} U^2$, όπου $U=S u$ (για δίσκους $S=\pi R^2$), ενώ η παραγόμενη πίεση $P = Z_{ME} U \approx R_{ME} U \approx S R_{ME} U$. Δεδομένου ότι για την τυπική ημιτονοειδή διέγερση $u = 2\pi f x$ (m/s), όπου x (m) είναι η στιγμιαία απομάκρυνση της επιφάνειας,

$P \approx S R_{ME} 2\pi f x$ και έτσι, για δεδομένο μέγεθος επιφάνειας, θα είναι:

για $f < f_P$, η παραγόμενη πίεση θα μειώνεται για $f \rightarrow 0$ (με κλίση -12 dB/οκτάβα) και για να παραχθεί σταθερή πίεση (σε τέτοιες συχνότητες), θα πρέπει να αυξάνει αντίστοιχα η x .

για $f > f_P$, η παραγόμενη πίεση θα αυξάνει για $f \rightarrow \infty$ και για να παραχθεί σταθερή πίεση (σε τέτοιες συχνότητες), θα πρέπει να ελαττώνεται αντίστοιχα η x .

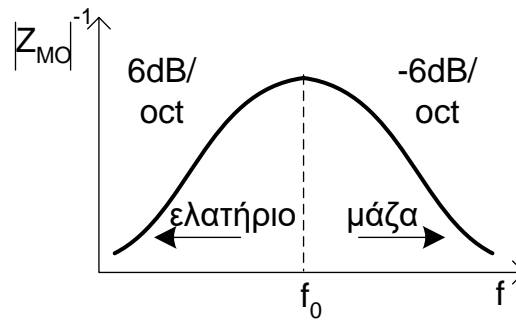
Επιπλέον, θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι λόγω της γνωστής κατευθυντικής συμπεριφοράς του δίσκου, για $f > f_P$, η παραγόμενη πίεση στον άξονα εκπομπής είναι δυνατό να παραμένει σταθερή (ικανοποιώντας την παραπάνω συνθήκη, αλλά η κατευθυντικότητα θα αυξάνει, με αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης πίεσης σε άλλες γωνίες, δεδομένου ότι η γωνία εκπομπής θα μειώνεται κατά το μισό ανά οκτάβα αύξησης της συχνότητας.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι ένα μεγάφωνο το οποίο θα πρέπει να αναπαράγει χαμηλές συχνότητες, θα πρέπει να εμφανίζει σταθερή απόκριση και σε συχνότητες χαμηλότερες της f_P με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο από το μηχανικό του τμήμα να επιτρέπει την αύξηση της απομάκρυνσης με την ελάττωση της συχνότητας. Αυτό είναι εφικτό δεδομένου ότι ισχύει:

$$u = 2\pi f x \approx -\frac{T_{ME} I}{|Z_{MO}|} \quad (3.27)$$

Δεδομένου ότι σε ένα τέτοιο μετατροπέα για συχνότητες κάτω από την πρώτη συχνότητα συντονισμού $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}}$ (Hz), η ποσότητα $\frac{1}{|Z_{MO}|}$ αυξάνει όπως

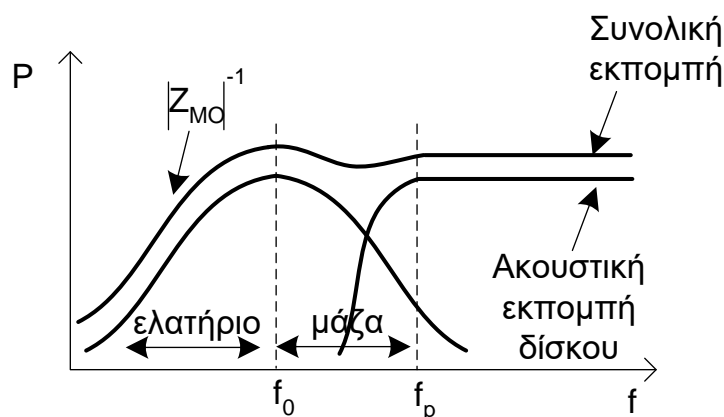
φαίνεται στο **Σχήμα 3.21**



Σχήμα 3.21: Εξάρτηση αντιστρόφου μέτρου μηχανικής αντίστασης συναρτήσει συχνότητας

Με αυτό τον τρόπο, ο συνδυασμός του ακουστικού και του μηχανικού συστήματος παράγει μία συνολική απόκριση που φαίνεται στο **Σχήμα 3.22**.

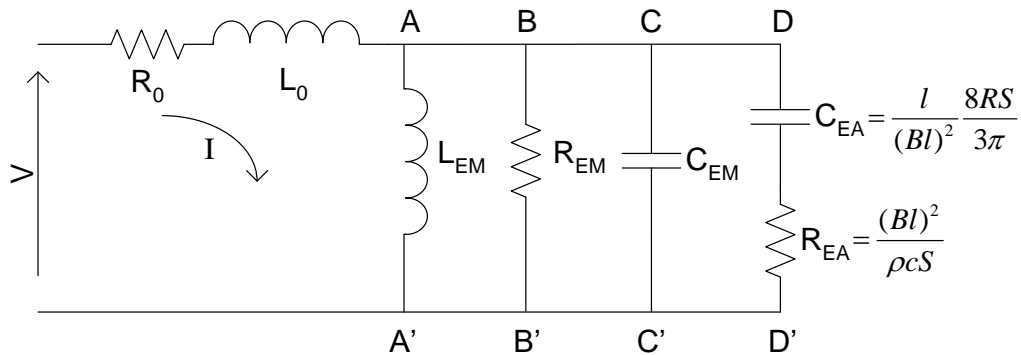
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εν' δυνάμει επέκταση της απόκρισης συχνότητας του μεγαφώνου, σε χαμηλότερες συχνότητες. Επειδή η κρίσιμη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ του 1^{ου} συντονισμού και της συχνότητας πιστονιού εξαρτάται από την μάζα m του μηχανικού συστήματος, θεωρείται ότι η απόκριση σε αυτή την περιοχή βρίσκεται κάτω από τον «έλεγχο μάζας», ο οποίος και καθορίζει την επέκταση σε χαμηλές συχνότητες, μέχρι και την f_0 , της απόκρισης ενός ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα, με συνεχή αύξηση των διαδρομών του κώνου. Κάτω από την f_0 , η απόκριση βρίσκεται κάτω από τον «έλεγχο ελατηρίου», του οποίου και η σκληρότητα περιορίζει τις ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις και έτσι καθορίζει και την μορφή αποκοπής της απόκρισης συχνότητας.



Σχήμα 3.22: Εξάρτηση συνολικής εκπομπής συστήματος αναρτημένου δίσκου από τις επιμέρους αποκρίσεις των μηχανικών και ακουστικών στοιχείων

Η παραπάνω ανάλυση ισχύει για πιστόνια που λειτουργούν σε ιδανικούς «άπειρους αποσβεστήρες», ενώ τα πρακτικά μεγάφωνα είναι τοποθετημένα σε ηχεία με πεπερασμένες διαστάσεις πρόσοψης («μπάφλας»). Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος της μπάφλας καθορίζει την κατευθυντικότητα του ηχείου, αφού για συχνότητες με μήκος κύματος κάτω από αυτή τη διάσταση, η εκπομπή γίνεται παντοκατευθυντική.

Για να περιγραφεί αυτή η συμπεριφορά του ακουστικού εκπομπού σε ισοδύναμο κύκλωμα (**Σχήμα 3.19**), αρχικά θα εξετασθεί το παράδειγμα του ηλεκτροδυναμικού μεγάφωνου σε «άπειρο αποσβεστήρα». Σε αυτή την περίπτωση, η Z_{ME} αναλύεται σε 2 στοιχεία, ένα πυκνωτικό C_{EA} , και ένα ωμικό R_{EA} , το οποίο και περιγράφει το ακουστικό φορτίο, δηλαδή την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται σε αυτό και εκπέμπεται σαν ακουστική ισχύς (**Σχήμα 3.22**).



Σχήμα 3.22: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα σε άπειρο αποσβεστήρα

Η ανάλυση αυτού του ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικού ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να γίνει για διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, με τον συνηθισμένο τρόπο ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Για χαμηλές συχνότητες $f < f_0$, και σταθερό ρεύμα στην είσοδο, η πτώση της τιμής της L_{EM} με μείωση της συχνότητας, θα εξαναγκάζει όλο και λιγότερο ρεύμα να διοχετεύεται στον βρόγχο DD', με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της ισχύος που καταναλώνεται στην R_{EA} και αντίστοιχη πτώση της παραγόμενης ακουστικής ισχύος. Αυτό συνδυάζεται και με την αύξηση της τιμής της C_{EA} , που έχει σαν τελικό αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης με ρυθμό 12 dB/ οκτάβα, κλίση η οποία και χαρακτηρίζει την απόκριση ηχείων κλειστού τύπου. Για συχνότητες πάνω από την f_0 (περιοχή «ελέγχου μάζας»), καθοριστικό ρόλο παίζει η C_{EM} στον βρόγχο CC', αφού το ρεύμα θα μοιραστεί σχετικά ισομερώς στους CC' και DD', όσο η τιμή της C_{EA} (εξαρτώμενη από το μέγεθος του κώνου) εμφανίζεται σχετικά μικρή σε σχέση με τη «συχνότητα πιστονιού». Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα και άρα η εκπομπή θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη συχνότητας σε αυτή την περιοχή. Για ακόμη υψηλότερες συχνότητες, το μέγεθος του κώνου θα παρουσιάζεται μεγάλο σε

σύγκριση με το μήκος κύματος του ήχου και ταυτόχρονα, η συνεισφορά της μάζας στην C_{EA} θα απαιτεί όλο και περισσότερο ρεύμα με την συχνότητα στον βρόγχο CC' , με αποτέλεσμα την προοδευτική μείωση της στάθμης της ακουστικής εκπομπής, γεγονός το οποίο επίσης παρατηρείται σε μεγάφωνα που προσπαθούν να αναπαράγουν υψηλές συχνότητες σε σχέση με το μέγεθός τους. Στην πράξη, όπως θα συζητηθεί αργότερα, η απόκριση ενός τέτοιου μεγαφώνου περιορίζεται τεχνητά με χρήση ηλεκτρονικού φίλτρου ("crossover") και η περιοχή υψηλών συχνοτήτων συμπληρώνεται με άλλο μεγάφωνο, μικρότερων διαστάσεων και κατάλληλων μηχανο-ακουστικών χαρακτηριστικών (π.χ. "tweeter").

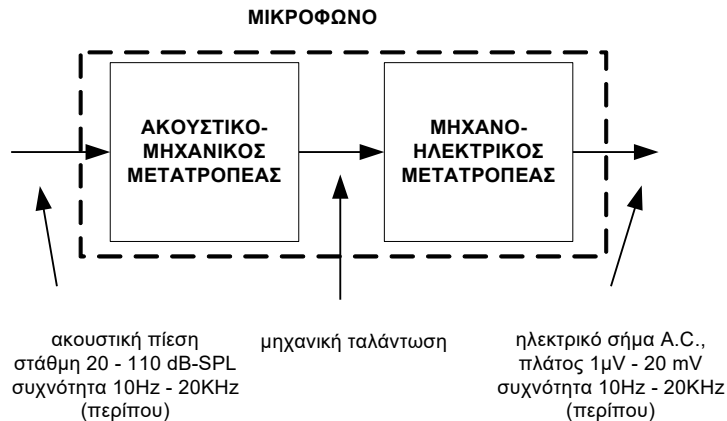
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μικρόφωνα

4.1 Εισαγωγή

Τα μικρόφωνα είναι συστήματα μετασχηματισμού ακουστικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση τους είναι απαραίτητη σε όλες τις εφαρμογές επικοινωνίας που απαιτούν ηλεκτροακουστική υποστήριξη (π.χ. στις τηλεπικοινωνίες, σε συστήματα επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής, κλπ.), στην ηχοληψία της μουσικής ή λόγου και στην ηλεκτρική ενίσχυση ακουστικών σημάτων (π.χ. σε συναυλίες, ομιλίες).

Για την πρακτική επίτευξη αυτού του στόχου με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**, ακολουθείται η υλοποίηση μίας διαδοχής μετασχηματισμών που περιλαμβάνει την μετατροπή του ακουστικού σήματος σε μηχανική ταλάντωση (μέσα από κατάλληλο ακουστικό-μηχανικό μετατροπέα, π.χ. αναρτημένο διάφραγμα) και την μετατροπή του μηχανικού σήματος σε ηλεκτρικό (π.χ. από την κίνηση ενός πηνίου που είναι συνδεδεμένο με το κινούμενο διάφραγμα, μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο).



Σχήμα 4.1: Στάδια μετασχηματισμού ενέργειας σε ένα μικρόφωνο

Η μεγάλη πλειοψηφία των μικροφώνων που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι ηλεκτροδυναμικού ή ηλεκτροστατικού τύπου (αντίστοιχα ονομάζονται «δυναμικά» ή «πυκνωτικά» μικρόφωνα). Στα **πυκνωτικά μικρόφωνα**, υπάρχει μία

κατάλληλη διάταξη πυκνωτή με μεταβλητή χωρητικότητα η οποία ενεργοποιείται όταν το ηχητικό κύμα χτυπήσει σε ένα κινούμενο διάφραγμα είναι τοποθετημένο μπροστά από έναν σταθερό δίσκο (πλάκα). Το κινούμενο στοιχείο και ο σταθερός δίσκος

αποτελούν τα ηλεκτρόδια ενός πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται με την χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική πίεση. Μια συνεχής d.c. τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων αποτελεί την τάση πόλωσης.

Τα «**δυναμικά**» **μικρόφωνα** χρησιμοποιούν ένα πηνίο το οποίο συνδέεται μηχανικά με το διάφραγμα. Το πηνίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο που προκαλεί ένας μόνιμος μαγνήτης. Λόγω της «Ηλεκτροδυναμικής Αρχής» που συζητήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, επάγεται στο πηνίο τάση αντίστοιχη με την ταχύτητα κίνησης του πηνίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο, του μήκους του πηνίου και της μαγνητικής ροής. Σε άλλες εφαρμογές εμφανίζονται **μικρόφωνα ταινίας** (ribbon) ηλεκτροδυναμικού τύπου που χρησιμοποιούν μια ταινία η οποία κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Τα «**Πιεζοηλεκτρικά**» και τα «**Κρυσταλλικά**» μικρόφωνα ηλεκτροδυναμικού τύπου χρησιμοποιούν τη μεταβολή της αντίστασης των κρυστάλλων εξαιτίας της ασκούμενης πίεσης για να δημιουργήσουν σε κατάλληλο κύκλωμα μεταβολές στην τάση εξόδου. Τα είδη αυτά των μικροφώνων θα περιγραφούν με λεπτομέρεια παρακάτω. Επιπλέον, συχνά υπάρχει υποβοήθηση της ακουστικο-μηχανικής μετατροπής με κατάλληλες ακουστικές διατάξεις (φίλτρα) οι οποίες προσαρμόζουν το διάφραγμα στα χαρακτηριστικά της πηγής (διεύθυνση, ένταση, κλπ.), όπως και κατάλληλης προ-ενίσχυσης του ηλεκτρικού σήματος ή και τροφοδοσίας του κυκλώματος (προ-ενισχυτή - πυκνωτή). Οι διαφορετικές χρήσεις των μικροφώνων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- (α) μικρόφωνα εφαρμογών επικοινωνίας (για τηλέφωνα, ακουστικά, υπολογιστές, κλπ.), όπου γενικά απαιτείται υψηλή ευαισθησία στην περιοχή καταληπτότητας της ομιλίας, μεγάλη αντοχή, μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος.
- (β) μικρόφωνα για ηχοληψία (π.χ. σε studio ηχογραφήσεων), όπου γενικά απαιτείται υψηλή πιστότητα και επακριβώς καθορισμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας.
- (γ) μικρόφωνα για ηχητικές εγκαταστάσεις (π.χ. σε αίθουσες διαλέξεων, συναυλίες, κλπ.), όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή, ικανοποιητική πιστότητα και λογική τιμή.
- (δ) μικρόφωνα για ηλεκτροακουστικές μετρήσεις, όπου απαιτείται υψηλότατη ακρίβεια και πιστότητα και σταθερή απόδοση στον χρόνο και στις συνθήκες.

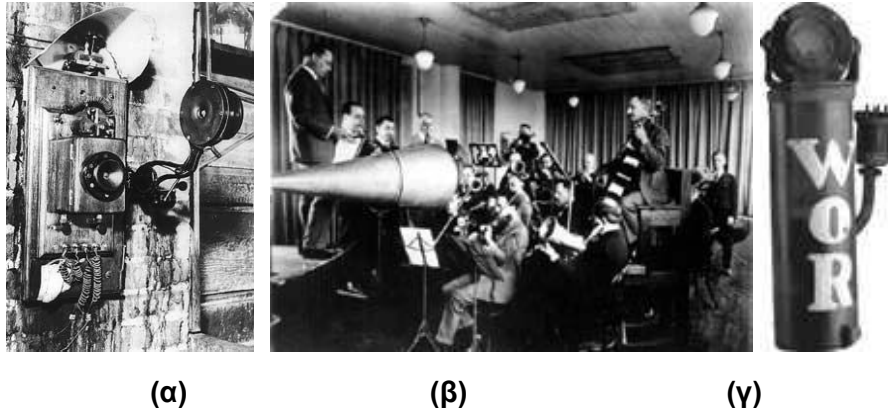
Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι τα μικρόφωνα διαφοροποιούνται ως προς τα:

- ηλεκτροακουστικά χαρακτηριστικά (απόκριση, ευαισθησία, κατευθυντικότητα)
- μηχανικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, αντοχή, κλπ.)
- ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (αντίσταση, στάθμη εξόδου, κλπ.)
- κόστος και ευχρηστία

Ιστορικά, τα μικρόφωνα πρωτοεμφανίστηκαν στην δεκαετία του 1870, ταυτόχρονα από αρκετούς ερευνητές όπως οι Johann Phillip Reis, Alexander Graham Bell, Elisha Gray, Amos E. Dolbear, Daniel Drawbaugh, Antonio Meucci και Innocenzo Manzetti.

Το 1878 ο Thomas Edison ανακάλυψε ότι ένας κρύσταλλος από κάρβουνο μπορούσε να τροφοδοτηθεί από μπαταρία και να εμφανίζει μεταβαλλόμενη

αντίσταση, ανάλογα με την μεταβολή της ακουστικής πίεσης που παρήγαγε μία κοντινή ακουστική πηγή. Η αρχή χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα ακουστικά τηλεφώνου (και με παραλλαγές μέχρι και σήμερα), που αποτελούσαν για πολλά χρόνια την μόνη εφαρμογή χρήσης μικροφώνων (**Σχήμα 4.2**).

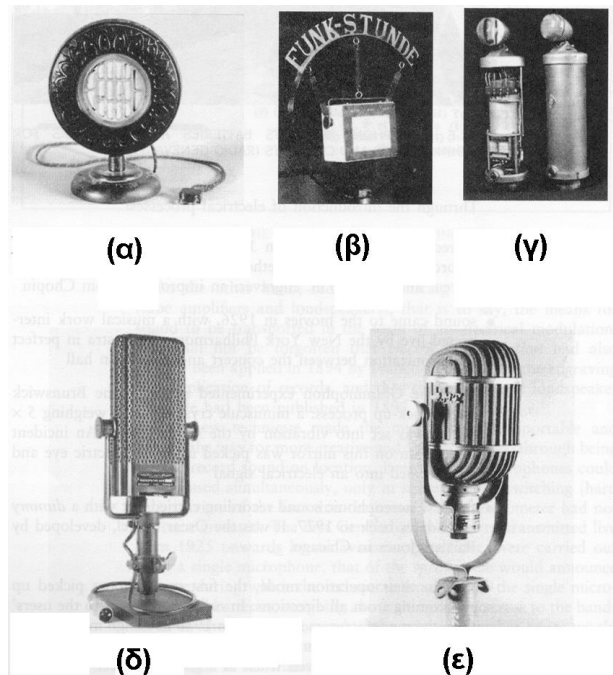


Σχήμα 4.2: (α) μικρόφωνο με στοιχείο κάρβουνου του Edison (1878), (β) ηχογράφηση ορχήστρας της εταιρίας Victor (1925) (γ) πυκνωτικό μικρόφωνο της Western Electric (1929).

Η χρήση μικροφώνων για ραδιοφωνικές εφαρμογές άρχισε γύρω στα 1915 από τον Reginald Fessenden και από τα Bell Labs, με αποτέλεσμα τα μικρόφωνα αυτά να χρησιμοποιούνται σε σταθμούς από το 1920 περίπου. Σημαντικές εξελίξεις ήταν η εμπορική εμφάνιση του δυναμικού μικροφώνου (1930), του μικροφώνου ταινίας (ribbon) της RCA (1932) και του καρδιοειδούς μικροφώνου (1938). Η εμφάνιση της τηλεόρασης μετά το 1945, οδήγησε στην εμφάνιση μικρών μικροφώνων τα οποία μπορούσαν να τοποθετηθούν στα ρούχα των ομιλητών ενώ από την δεκαετία του 1950, η άνθηση της παραγωγής δίσκων, οδήγησε σε ποιοτική βελτίωση των μικροφώνων για ηχοληψία με υψηλή πιστότητα (**Σχήμα 4.3**).

Η σμίκρυνση των μικροφώνων έχει συνεχιστεί στις μέρες μας, έτσι ώστε να είναι πλέον εφικτή η κατασκευή μικροφώνων υψηλής πιστότητας σε εξαιρετικά μικρό μέγεθος που συχνά συνδέονται με ασύρματους πομπούς με τις υπόλοιπες βαθμίδες του ηχοσυστήματος. Επιπλέον, είναι δυνατή και ολοκλήρωση όλων των κυκλωμάτων σε μικροσκοπικά ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία και συνδυάζουν την ακουστικο-ηλεκτρική μετατροπή με την αναλογικο-ψηφιακή μετατροπή, έτσι ώστε τα νέα αυτά μικρόφωνα να κωδικοποιούν το ηχητικό σήμα σε ψηφιακή μορφή.

Πολλαπλά τέτοια μικρά στοιχεία μπορούν να συνδυαστούν υπό μορφή συστοιχιών μικροφώνων (microphone arrays), οι οποίες εμφανίζουν επιλεγόμενη και ελεγχόμενη κατευθυντικότητα (δες Κεφάλαιο 2). Έτσι, τέτοια συστήματα μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν κάτω από έλεγχο μικροεπεξεργαστών σαν «έξυπνοι αισθητήρες» για την βέλτιστη επιλογή πηγών σε ένα σύνθετο ακουστικό περιβάλλον, κάτι που είναι απαραίτητο για την πρακτική υλοποίηση των μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και των συστημάτων επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής.

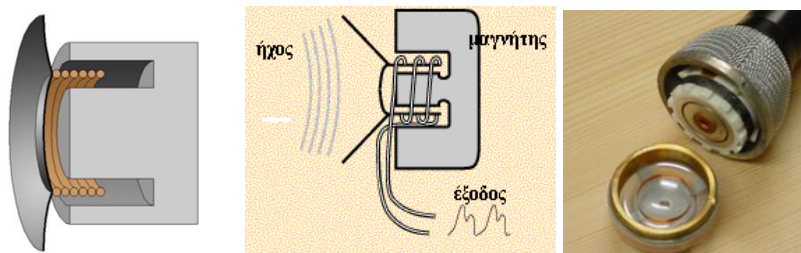


Σχήμα 4.3: (α) μικρόφωνο Western Electric με στοιχείο κάρβουνου (1927), (β) μικρόφωνο Reisz με στοιχείο κάρβουνου από Γερμανικό ραδιοφωνικό σταθμό (1928), (γ) πυκνωτικό μικρόφωνο (1930), (δ) μικρόφωνο Melodium ταινίας (1930), (ε) δυναμικό μικρόφωνο Western Electric ταινίας και πηνίου (1938).

4.2 Τύποι μικροφώνων

4.2.1 Δυναμικά μικρόφωνα

Όπως προαναφέρθηκε, τα δυναμικά μικρόφωνα χρησιμοποιούν ένα πηνίο το οποίο συνδέεται μηχανικά με το κινούμενο διάφραγμα. Το πηνίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο που προκαλεί ένας μόνιμος μαγνήτης. Λόγω της «Ηλεκτροδυναμικής Αρχής» που συζητήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, επάγεται στο πηνίο τάση αντίστοιχη με την ταχύτητα κίνησης του πηνίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο, του μήκους του πηνίου και της μαγνητική ροής (**Σχήμα 4.4**).



Σχήμα 4.4: σχηματικά διαγράμματα και τυπική φωτογραφία δυναμικού μικροφώνου

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των μικροφώνων τα οποία αποτελούν και τα συνηθέστερα σε ηλεκτροακουστικές εγκαταστάσεις και σε ηχοληψία, είναι το σχετικά χαμηλό κόστος τους, η αντοχή τους και η δυνατότητα σμίκρυνσης του μεγέθους τους. Σαν μειονέκτημα, εμφανίζεται η σχετικά υποδεέστερη απόκριση και ποιότητα τους όταν συγκρίνεται με αυτή των πυκνωτικών μικροφώνων.

4.2.2 Πυκνωτικά μικρόφωνα

Όπως προαναφέρθηκε στα πυκνωτικά μικρόφωνα το κινούμενο στοιχείο και ο σταθερός δίσκος αποτελούν τα ηλεκτρόδια ενός πυκνωτή του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται με την ακουστική πίεση. Μια συνεχής d.c. τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων αποτελεί την τάση πόλωσης (μέσω εξωτερικής τροφοδοσίας ή και μπαταρίας), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**.

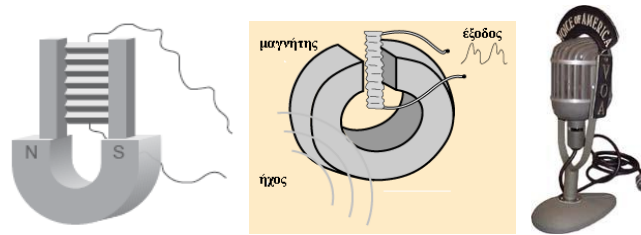


Σχήμα 4.5: σχηματικό διάγραμμα και φωτογραφίες πυκνωτικών μικροφώνων

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των μικροφώνων τα οποία αποτελούν και τα συνηθέστερα σε εφαρμογές ηχοληψίας (π.χ. σε studio), είναι η εξαιρετική απόκριση και ηχητική ποιότητα. Σαν μειονέκτημα, εμφανίζεται η απαίτηση εξωτερικής τροφοδοσίας και η ευαισθησία τους σε παραμορφώσεις όταν χρησιμοποιούνται κοντά σε δυνατές πηγές.

4.2.3 Μικρόφωνα ταινίας

Τα μικρόφωνα αυτά (ribbon microphones) είναι ηλεκτροδυναμικού τύπου, όπου το διάφραγμα το οποίο αποτελείται από λεπτή μεταλλική ταινία (αλουμίνιο μερικών μm πάχους και 2-4 mm μήκους) και υπό την επίδραση του ακουστικού κύματος, κινείται μέσα σε μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Η μεταβλητή τάση που θα εμφανιστεί στα άκρα της ταινίας, είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης, και για αυτό τα μικρόφωνα αυτά ονομάζονται και «μικρόφωνα ταχύτητας» (**Σχήμα 4.6**).



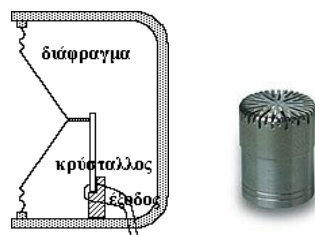
Σχήμα 4.6: σχηματικό διάγραμμα και τυπική φωτογραφία μικροφώνου ταινίας

Το σήμα που παράγεται είναι σε χαμηλή στάθμη και για αυτό στην έξοδο των μικροφώνων αυτών (τα οποία χρησιμοποιούνταν κυρίως μέχρι την δεκαετία του '50), ήταν σύνηθες να προσαρμόζεται και μετασχηματιστής.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των μικροφώνων είναι η καλή απόκριση συχνότητας, η «ζεστή» ηχητική ποιότητα την οποία αναπαράγουν και η απόρριψη θορύβου. Σαν μειονεκτήματα, εμφανίζονται η μηχανική ευαισθησία τους και οι παραμορφώσεις που παράγουν όταν υπάρχει αέρας, έτσι ώστε να μην ενδείκνυται για χρήση σε ανοιχτούς χώρους.

4.2.4 Κρυσταλλικά (ή και «πιεζοηλεκτρικά») μικρόφωνα

Τα μικρόφωνα αυτά βασίζονται στην πιεζοηλεκτρική αρχή κατά την οποία συγκεκριμένα υλικά, όταν αυτά συμπιέζονται, παράγουν ηλεκτρικό σήμα εξόδου. Η συμπίεση δημιουργείται από την κίνηση του διαφράγματος (**Σχήμα 4.7**). Για τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, παλαιότερα χρησιμοποιούνταν κρύσταλλοι Rochelle, αλλά συνήθως τώρα χρησιμοποιούνται κεραμικά υλικά όπως συνδυασμός μόλυβδου και ψευδάργυρου ή οξειδίο τιτανίου με βάριο.



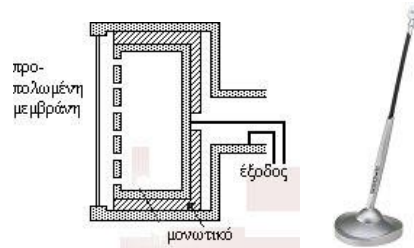
Σχήμα 4.7: σχηματικό διάγραμμα και τυπική φωτογραφία πιεζοηλεκτρικού μικροφώνου

Τα μικρόφωνα αυτά είναι μικρά σε μέγεθος και παράγουν σχετικά υψηλή στάθμη σήματος, αλλά δεν έχουν ικανοποιητική απόκριση συχνότητας.

4.2.5 Μικρόφωνα electret

Τα μικρόφωνα αυτά βασίζονται στην ηλεκτροστατική αρχή της μετατροπής, των οποίων το πυκνωτικό στοιχείο είναι μόνιμα (εκ κατασκευής) προ-πολωμένο έτσι ώστε

να μην απαιτείται εξωτερική τάση πόλωσης, όπως στα συνηθισμένα πυκνωτικά μικρόφωνα (**Σχήμα 4.8**). Η μεμβράνη του διαφράγματος είναι κατασκευασμένη από λεπτό στρώμα μετάλλου (αλουμίνιο, κράμα χρυσού, κλπ.), ενώ υπάρχει περίπτωση πλαστικής επικάλυψης της άλλης της πλευράς. Συχνά σε τέτοια μικρόφωνα χρησιμοποιείται και ένας προενισχυτής (με στοιχεία FET) για την βέλτιστη μεταφορά του σήματος. Τα μικρόφωνα αυτά παρουσιάζουν ικανοποιητική απόκριση, μικρό μέγεθος με κόστος χαμηλότερο των πυκνωτικών μικροφώνων και συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολυμέσων σε υπολογιστές.



Σχήμα 4.8: σχηματικό διάγραμμα και τυπική φωτογραφία electret μικροφώνου

4.3 Χαρακτηριστικά μικροφώνων

4.3.1 Ακουστικά χαρακτηριστικά

Όπως προαναφέρθηκε το στοιχείο ακουστικο-μηχανικής μετατροπής όλων των τύπων των μικροφώνων είναι ένα διάφραγμα το οποίο είναι αναρτημένο (**Σχήμα 4.9 (α)**) και εμφανίζει τα γνωστά μηχανικά χαρακτηριστικά ενός αναρτημένου συμπαγούς δίσκου (πιστονιού με ελατήριο και αποσβεστήρα) τα οποία συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

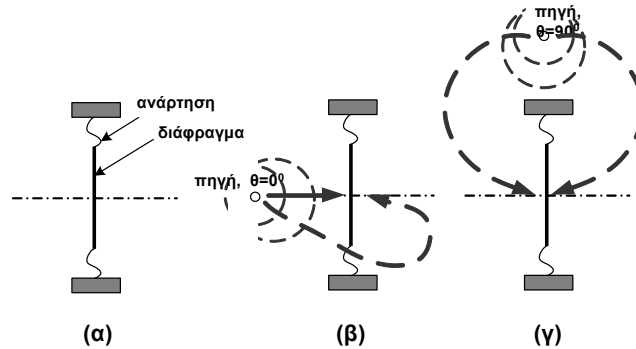
Έτσι η ταχύτητα κίνησης $u(t)$ (m/s) του διαφράγματος σχετίζεται με την κάθετη συνιστώσα της (ακουστικής) δύναμης $F(t)$ (N) που εφαρμόζει στο διάφραγμα και την μηχανική εμπέδιση του συστήματος Z_{Mo} , δηλαδή:

$$F(t) = Z_{Mo}u(t) \quad \text{ή απλούστερα} \quad F = Z_{Mo}u \quad (4.1)$$

Όπου προφανώς η δύναμη ισούται με την πίεση p επί την επιφάνεια S , δηλαδή:

$F = S p$. Έτσι, συχνά η συμπεριφορά αυτή ορίζει τα μικρόφωνα, σαν «μικρόφωνα πίεσης» (pressure microphones). Για το ανοιχτό κύκλωμα ($I = 0$), η μηχανική σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z_{Mo} = R_M + j \left(\omega m - \frac{k}{\omega} \right) \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.9: (α) το αναρτημένο διάφραγμα σαν μηχανο-ακουστικός μετατροπέας, (β) μέγιστη απόκριση σε διαφοράς πίεσης λόγω ταυτόχρονης πρόσπτωσης στις 2 πλευρές του διαφράγματος, (γ) ακύρωση απόκρισης για $\theta = 90^\circ$.

όπου R_m είναι η αντίσταση (απόσβεση), k η σκληρότητα του ελατηρίου της ανάρτησης και m η μάζα του διαφράγματος. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.9**, η κίνηση του διαφράγματος μπορεί να προκαλείται είτε από ακουστική πίεση που προσπίπτει από την μία διεύθυνση σε αυτό (π.χ. όταν το διάφραγμα εκτίθεται στο ηχητικό κύμα από την μία πλευρά, ενώ από την άλλη είναι κλειστό σε ένα κουτί), είτε λόγω της «διαφοράς της πίεσης» Δp (**pressure gradient**) μεταξύ του ήχου που προσπίπτει από τις 2 πλευρές (όταν υπάρχει είσοδος του ήχου και από την πίσω πλευρά). Όπως φαίνεται στην περίπτωση του **Σχήματος 4.9(β)**, όταν η πηγή βρίσκεται επί του ακουστικού άξονα ($\theta = 0^\circ$), τότε και το Δp θα είναι μέγιστο; Ενώ όταν η πηγή βρίσκεται σε γωνία $\theta = 90^\circ$ (**Σχήμα 4.9(γ)**) τότε το Δp θα τείνει στο μηδέν. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση η κίνηση του διαφράγματος και κατ' επέκταση η ηλεκτρική έξοδος, θα εξαρτάται από την σχετική γωνία μεταξύ του άξονα του μικροφώνου και της θέσης της ακουστικής πηγής, το μικρόφωνο δηλαδή λειτουργεί σαν κατευθυντικός μετατροπέας (δες Κεφάλαιο 2).

Στην πράξη, η μηχανική αντίσταση Z_{MO} θα συνδυάζεται και από την ακουστική εμπέδιση, δημιουργώντας μία συνολική μηχανο-ακουστική εμπέδιση, λόγω της τοποθέτησης του διαφράγματος σε μικρό κουτί («κάψα»), το οποίο και θα λειτουργεί ως ηχείο Helmholtz (δες Κεφάλαιο 3), όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.10**.

Σε ένα τέτοιο κύκλωμα θα υπάρχει και μία μικρή τρύπα εξίσωσης της ατμοσφαιρικής d.c. πίεσης και τα χαρακτηριστικά της θα καθορίσουν και την χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής στην απόκριση συχνότητας του μικροφώνου. Η συχνότητα αποκοπής στις υψηλές συχνότητες συνήθως καθορίζεται από το μέγεθος του διαφράγματος. Αν στο κουτί αυτό υπάρχουν πλευρικές οπές, τότε είναι δυνατό να επιτευχθούν και τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά τα οποία προαναφέρθηκαν, αφού αυτές επιτρέπουν την ενεργοποίηση και της πίσω πλευράς του διαφράγματος από τον ήχο (λειτουργία pressure gradient).

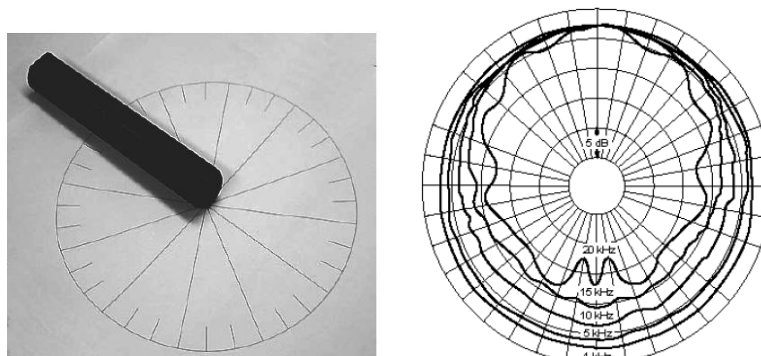


Σχήμα 4.10: τοποθέτηση διαφράγματος σε κλειστό κουτί (απόκριση μόνο από μία πλευρά του διαφράγματος), (β) κουτί με πλευρικά ανοίγματα (διαφορική απόκριση του διαφράγματος).

Επιπλέον, λόγω της επανεκπομπής του προσπίπτοντος ήχου από το διάφραγμα και της διάθλασης του ήχου (δες παρακάτω), το σχήμα και το μέγεθος του μικροφώνου, επιδρούν στο ακουστικό πεδίο και άρα επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια μετατροπής. Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα μικρόφωνο «μεγάλου διαφράγματος», π.χ. ακτίνας 2.4 mm, θα εμφανίζει γενικά μεγαλύτερη ευαισθησία (λόγω της εξίσωσης (1)), αλλά θα επιτρέπει μέτρηση χαμηλότερης ηχοστάθμης (λόγω χαλαρότερης ανάρτησης της μηχανικής διάταξης) και θα εμφανίζει απόκριση σε μικρότερο εύρος συχνότητας (σε υψηλές συχνότητες), με μείωση της ακρίβειας μέτρησης λόγω μεγαλύτερης διατάραξης του ηχητικού πεδίου. Τα αντίθετα χαρακτηριστικά παρατηρούνται σε μικρόφωνα «μικρού διαφράγματος» (π.χ. 12 mm), τα οποία και χρησιμοποιούνται συνήθως ως «μετρητικά μικρόφωνα».

4.3.2 Κατευθυντικότητα μικροφώνων

Όπως προαναφέρθηκε, οι σχέσεις που συζητήθηκαν για την κατευθυντικότητα ακουστικών πηγών, μπορούν να εφαρμοστούν και για δέκτες. Έτσι οι βασικές αρχές κατευθυντικότητας πηγών που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 2 και που ως γνωστό περιγράφονται συνοπτικά από πολικά διαγράμματα απόκρισης (π.χ. στο **Σχήμα 4.11**), εφαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό στα μικρόφωνα.



Σχήμα 4.11: απεικόνιση της οριζόντιας πολικής απόκρισης μικροφώνου και τυπικό πολικό διάγραμμα

Με δεδομένο ότι ένα μικρόφωνο είναι ένας μετασχηματιστής ακουστικής σε ηλεκτρική ενέργεια, τα χαρακτηριστικά μετατροπής καθορίζουν την «ευαισθησία» S του μετατροπέα, που ως γνωστό ορίζεται (δες και παρακάτω) από τον λόγο της προσπίπτουσας πίεσης προς την παραγόμενη τάση, δηλαδή :

$$S = \left(\frac{V}{P} \right)_{f=0} \quad (4.3)$$

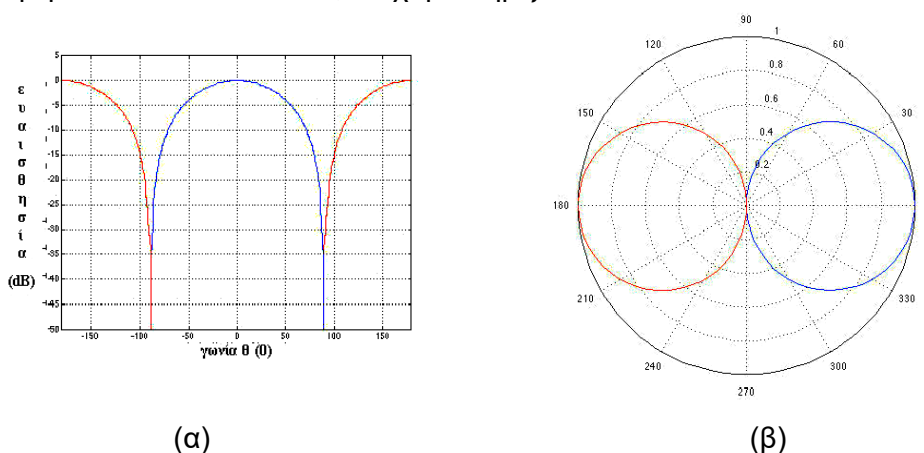
Έχοντας υπ' όψη τα παραπάνω, είναι προφανές ότι η ευαισθησία ενός τέτοιου μετατροπέα μπορεί να είναι διαφορετική για ήχους που φθάνουν από διαφορετικές γωνίες. Έτσι, τα «μικρόφωνα πίεσης» θα έχουν ευαισθησία $S = 1$ για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης, ενώ τα «μικρόφωνα διαφοράς πίεσης» θα έχουν $S = -1$ για $\theta = 180^\circ$ και $S = 0$ για $\theta = 90^\circ$ και 270° . Έτσι, γενικά η ευαισθησία των κατευθυντικών μικροφώνων (μετατροπέων), σχετίζεται με μία συνάρτηση συνημιτόνου, του τύπου:

$$S(\theta) \approx \cos(\theta) \quad (4.4)$$

Όπως θα συζητηθεί και παρακάτω, μία τέτοια μορφή ευαισθησίας, ορίζει ένα δικάτευθυντικό (bidirectional) μικρόφωνο (**Σχήμα 4.12**). Συνδυασμοί λειτουργίας ενός μετατροπέα σαν «μικρόφωνα πίεσης» και «μικρόφωνα διαφοράς πίεσης» (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.10(β)**) δημιουργεί διαφορετικούς συνδυασμούς κατευθυντικότητας, έτσι ώστε η γενική εξάρτηση της ευαισθησίας από την ακουστική λειτουργία του διαφράγματος να ορίζεται από τη σχέση:

$$S(\theta) = P + G \cos(\theta) \quad (4.5)$$

Όπου P είναι η συνεισφορά της συνιστώσας «πίεσης» και G η συνεισφορά της συνιστώσας «διαφοράς πίεσης», με $P + G = 1$. Έτσι, ένα μικρόφωνο με ίση συνεισφορά των 2 συνιστωσών, θα χαρακτηρίζεται σαν:



Σχήμα 4.12: απόκριση δικάτευθυντικού μικροφώνου, (α) σε καρτεσιανές συντεταγμένες (dB συνάρτηση της γωνίας), (β) σε πολικές συντεταγμένες

$$S(\theta) = 0.5 + 0.5 \cos(\theta) \quad (4.6)$$

Με βάση αυτή τη σχέση, είναι δυνατό να δημιουργηθούν περισσότερο σύνθετες μορφές κατευθυντικότητας (ευαισθησίας ως προς την γωνία), μέσω του συνδυασμού π.χ. 2 δικάτευθυντικών μικροφώνων που τοποθετούνται το ένα να σκοπεύει σε $\theta = 0^\circ$ και $\theta = 180^\circ$. Έτσι, από εδώ και κάτω, η έννοια της ευαισθησίας του μικροφώνου που εξαρτάται από την γωνία, θα εκφράζεται από την συνάρτηση κατευθυντικότητας, δηλαδή θα εννοείται ότι $S(\theta) \equiv H(\theta)$. Οι διαφορετικές μορφές κατευθυντικότητας των μικροφώνων που πρακτικά προκύπτουν από την έκθεση του διαφράγματος στον ήχο από την μία ή και τις 2 πλευρές (όπως αναφέρθηκε παραπάνω), είναι εξαιρετικά χρήσιμες γιατί επιτρέπουν στον χρήστη να καθορίσει τη γωνία (ή τη διεύθυνση) για την οποία ήχοι θα μετατρέπονται επιλεκτικά σε σήμα και αντίστοιχα να μπορεί να απορρίψει ήχους (ή κατευθύνσεις) που δεν είναι επιθυμητοί. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται ο λόγος σήματος / θόρυβο που καταγράφεται αφού οι ανεπιθύμητοι ήχοι ή ο θόρυβος που προέρχεται από τις συγκεκριμένες πηγές, είναι δυνατό να καταγραφεί με πολύ λιγότερο κέρδος από ότι ο επιθυμητός ήχος. Θεωρητικά, η συνάρτηση κατευθυντικότητας ενός δέκτη, ορίζεται σαν τον λόγο της πίεσης που προσπίπτει από συγκεκριμένη γωνία που μετατρέπεται, ως προς την αξονική πίεση (για $\theta = 0^\circ$):

$$H_r(\vartheta, \phi) = \left| \frac{\bar{p}(\vartheta, \phi)}{\bar{p}_{ax}} \right| \quad (4.7)$$

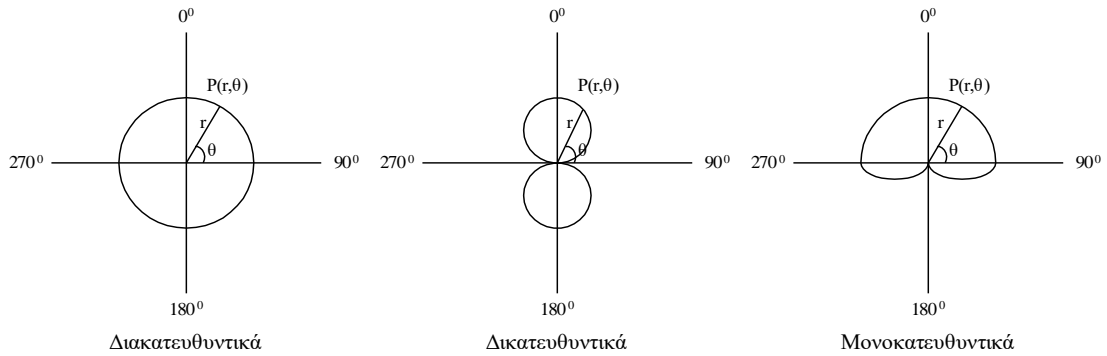
Έτσι, η «ενεργός» πίεση που μετατρέπεται από ένα μικρόφωνο, θα ισούται με:

$$p(r, \theta) = p_{ax}(r) H_r(\theta, r) \quad (4.8)$$

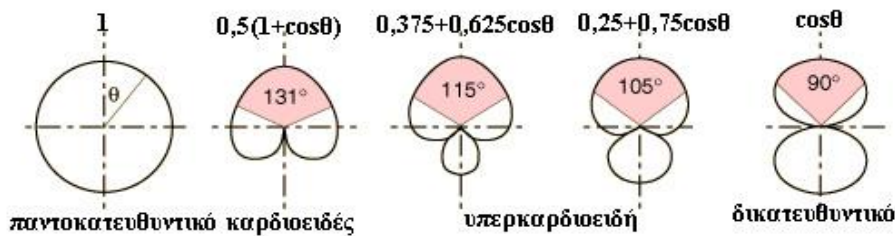
Γενικά ορίζονται διαφορετικές μορφές κατευθυντικότητας που σχετίζονται σχηματικά με τη μορφή της συνάρτησης $p(\theta)$ δηλαδή την ακουστική πίεση για μια τιμή της απόστασης r σε σχέση με τη γωνία του μικροφώνου ως προς τη διεύθυνση του ακουστικού κύματος (θεωρώντας για απλότητα επίπεδα ακουστικά κύματα). Έτσι, οι βασικές μορφές κατευθυντικότητας μικροφώνων είναι οι παρακάτω τρεις (**Σχήμα 4.13**), από τις οποίες προκύπτουν και διαφορετικοί συνδυασμοί:

Διακατευθυντικά ή παντοκατευθυντικά	(omnidirectional)	μικρόφωνα
Δικάτευθυντικά	(bidirectional)	μικρόφωνα
Μονοκατευθυντικά	(unidirectional)	μικρόφωνα

Επιπλέον, με βάση τις σχέσεις για την εξάρτηση της ευαισθησίας από την γωνία που δόθηκαν παραπάνω, είναι εύκολο να δημιουργηθούν και αναλυτικές εκφράσεις για την συνάρτηση $H_r(\theta, r)$ για κάθε τύπο μικροφώνου, καθώς και για πιο ειδικές μορφές που προκύπτουν από συνδυασμούς τύπων κατευθυντικότητας. Το **Σχήμα 4.14** και ο **Πίνακας 4.1** δίνουν αυτά τα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 4.13: βασικές κατηγορίες κατευθυντικότητας μικροφώνων



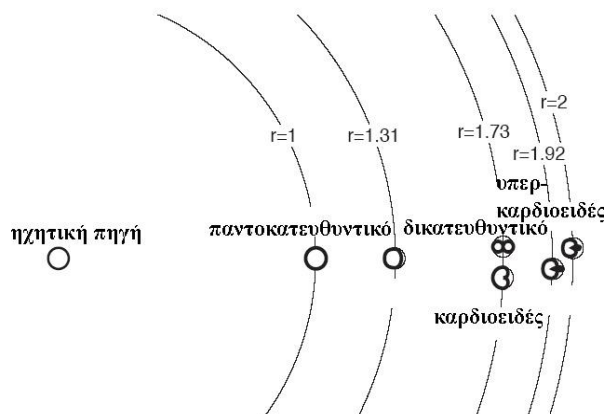
Σχήμα 4.14: συνήθεις τύποι κατευθυντικότητας μικροφώνων

Η σημασία της κατευθυντικότητας είναι πολύ μεγάλη στις πρακτικές εφαρμογές αφού επιλέγοντας τον ακουστικό άξονα του μικροφώνου να βρίσκεται στην διεύθυνση της πηγής, υπάρχει διαφοροποίηση του κέρδους του σήματος αυτού σε σχέση με άλλα τα οποία θα βρισκόταν σε ίση απόσταση, αλλά διαφορετική γωνία.

Έτσι, στην πράξη, για οποιαδήποτε απόσταση πηγής / μικροφώνου, ένα κατευθυντικό μικρόφωνο θα καταγράψει το σήμα της πηγής με υψηλότερο κέρδος σε σχέση με ήχους που φθάνουν από άλλες διευθύνσεις, από ότι ένα μη-κατευθυντικό (παντοκατευθυντικό) μικρόφωνο. Με τον τρόπο αυτό ο μηχανικός ήχου που στρέφει το μικρόφωνο προς τη διεύθυνση της πηγής μπορεί να βελτιώσει το Λόγο Σήματος προς Θόρυβο (παρεμβολή), αν θεωρήσουμε ότι οι εκτός άξονα πηγές παράγουν μη-επιθυμητό σήμα (θόρυβο ή και ανακλάσεις του σήματος της πηγής). Η βελτίωση αυτή ισοδυναμεί με αυτό που θα κατέγραφε ένα ισοδύναμο αλλά παντοκατευθυντικό μικρόφωνο, τοποθετημένο πιο κοντά στην πηγή (**Σχήμα 4.15**).

Όνομασία και τύπος	Δια-κατευθυντικό omni-directional	Δι-κατευθυντικό bidirectional	Μono-κατευθυντικό Καρδιοειδές cardioid	Μono-κατευθυντικό Υπερκαρδιοειδές Hypercardioid	Δι-κατευθυντικό σχήματος 8 Figure of 8
Μορφή πολικής απόκρισης					
Αναλυτική μορφή συνάρτησης $H_r(\theta, r)$	1	$\cos\theta$	$0,5(1+\cos\theta)$	$0,25(1+3\cos\theta)$	$\cos^2\theta$
Σχετική τιμή εξόδου για $\theta = 90^\circ$ (dB)	0	$-\infty$	-6	-12	$-\infty$
Σχετική τιμή εξόδου για $\theta = 180^\circ$ (dB)	0	0	$-\infty$	-6	0
Τιμή θ για την οποία υπάρχει μηδενική έξοδος	-	90°	180°	110°	90°

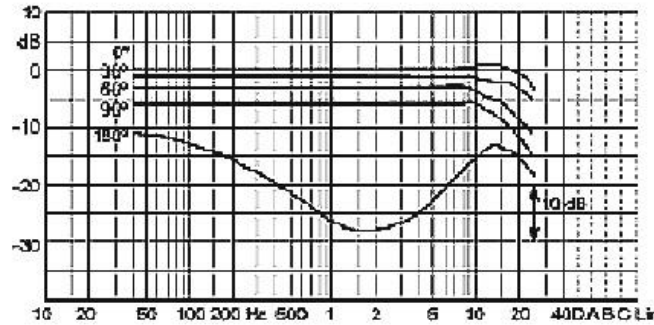
Πίνακας 4.1: συνήθεις τύποι κατευθυντικότητας και ιδιότητες μικροφώνων



Σχήμα 4.15: Τυπική ισοδυναμία λόγου Σήματος προς Παρεμβολή που καταγράφεται σε διαφορετικές αποστάσεις (δες επίσης **Πίνακα 4.2**)

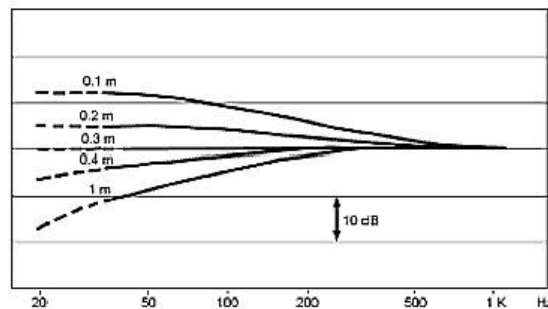
Όπως θα αποδειχθεί στην παράγραφο 4.3.3, το κέρδος αυτό στην απόσταση που υλοποιείται με το κατευθυντικό μικρόφωνο, είναι γενικά της τάξης του $r 2^{1/2}$ (όπου r (m) είναι η απόσταση πηγής / μικροφώνου). Στην πράξη αυτό το κέρδος αγγίζει το 1.7 για καρδιοειδή μικρόφωνα και το 1.9 – 2 για υπερκαρδιοειδή (**Σχήμα 4.15**).

Πρακτικά, η δυνατότητα αυτή των κατευθυντικών μικροφώνων αξιοποιείται περισσότερο σε ηχητικές εγκαταστάσεις για την ηχογράφιση ή ενίσχυση συναυλιών ή ομιλιών, όπου απαιτείται ο καλύτερος διαχωρισμός, μίξη και ενίσχυση των διαφόρων πηγών, που συνήθως είναι τοποθετημένες σε ένα μη-βέλτιστο χώρο ή διάταξη (δες Ηλεκτροακουστική II). Μειονέκτημα των κατευθυντικών μικροφώνων είναι η εκτός άξονα ανομοιογενής απόκριση (η οποία προκύπτει από την πολική απόκρισή τους), η οποία «χρωματίζει», δηλαδή παραμορφώνει συχνοτικά το σήμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.16**.



Σχήμα 4.16: Τυπική απόκριση συχνότητας (μέτρο) κατευθυντικού μικροφώνου, για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ήχου

Τα κατευθυντικά μικρόφωνα εμφανίζουν ένα επιπλέον πρόβλημα, όταν τοποθετούνται πολύ κοντά σε πηγές που παράγουν και χαμηλές συχνότητες. Με δεδομένη την παντοκατευθυντική συμπεριφορά των πηγών αυτών σε χαμηλές συχνότητες, σε συνδυασμό με την επιλογή ενός pressure gradient κατευθυντικού μικροφώνου (τα οποία χρησιμοποιούν διορθωτικά φίλτρα ενίσχυσης των πολύ χαμηλών συχνοτήτων οι οποίες φυσιολογικά θα εμφανιζόταν με χαμηλό κέρδος λόγω της δίπλευρης διέγερσης του διαφράγματος), οι χαμηλές συχνότητες ενισχύονται υπερβολικά με τρόπο που εξαρτάται από την απόστασή τους από την πηγή (**Σχήμα 4.17**). Αυτό ονομάζεται «φαινόμενο εγγύτητας» (**proximity effect**). Έτσι, ορθή ηχογράφιση πηγών (π.χ. ομιλίας) σε κοντινή απόσταση (της τάξης των cm), απαιτεί χρήση παντοκατευθυντικών μικροφώνων.



Σχήμα 17: Τυπική απόκριση συχνότητας (μέτρο) κατευθυντικού μικροφώνου, για διαφορετικές αποστάσεις παντοκατευθυντικής πηγής («φαινόμενο εγγύτητας»).

4.3.3 Χαρακτηριστικά μικροφώνων σε διάχυτο πεδίο

Σε διάχυτο ακουστικό πεδίο, θεωρείται ότι ο ήχος φθάνει με ίση πιθανότητα από όλες τις γωνίες (οριζόντιου και κάθετου άξονα). Για παράδειγμα, ένα τέτοιο πεδίο δημιουργείται σε ένα κλειστό χώρο με υψηλή στάθμη αντήχησης και σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (δες Σημειώσεις Ηλεκτροακουστικής II).

Για να ορισθεί σε σφαιρικές συντεταγμένες, η Απόκριση Τυχαίας Ενέργειας (**Random Energy Response, RER**) ενός μικροφώνου, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$RER = \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} H^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (4.9)$$

Κατ' αναλογία της σχέσης (4.7), η απόδοση μετατροπής διάχυτης ακουστικής ενέργειας από ένα μικρόφωνο, ορίζεται σαν Απόδοση Τυχαίας Ενέργειας (**Random Energy Efficiency, REE**) και ισούται από τον λόγο της RER του μικροφώνου, ως προς αυτήν ενός ιδανικού παντοκατευθυντικού μικροφώνου (RER_{omni}), δηλαδή:

$$REE = \frac{RER}{RER_{\text{omni}}} \text{ και ισοδύναμα σε dB: } REE_{\text{dB}} = 10 \log(REE) \quad (4.10)$$

Ο **Πίνακας 4.2** δίνει τυπικές τιμές για αυτή την παράμετρο, για διαφορετικούς τύπους κατευθυντικότητας.

Κατευθυντικά χαρακτηριστικά μικροφώνου	Random Energy Efficiency, REE_{dB} (dB)	Distance Factor, DSF
παντοκατευθυντικό	0	1
καρδιοειδές	-2,34	1,73
υπερκαρδιοειδές	-6,02	2
δικατευθυντικό	-4,77	1,73

Πίνακας 4.2: Απόδοση Τυχαίας Ενέργειας (REE_{dB}) και Λόγος Απόστασης (DSF) για διαφορετικούς τύπους μικροφώνων

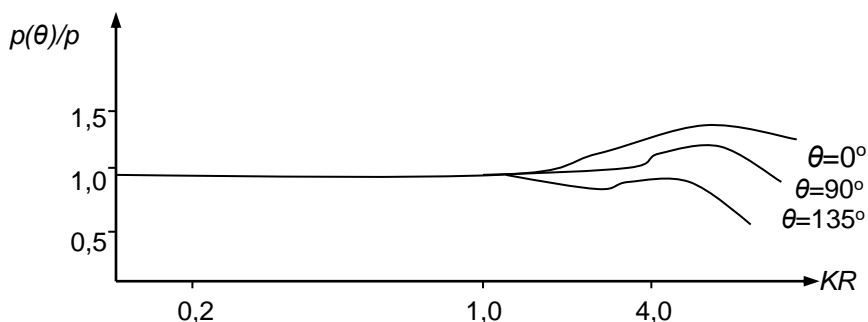
Ο Πίνακας αυτός δείχνει ότι χρησιμοποιώντας ένα υπερκαρδιοειδές μικρόφωνο σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο, μακριά από την πηγή, η ηλεκτρική έξοδος θα είναι μέχρι

και 6 dB χαμηλότερη από αυτή ενός παρόμοιου παντοκατευθυντικού μικροφώνου. Με δεδομένο όμως ότι ένα κατευθυντικό μικρόφωνο μπορεί να στραφεί προς την πηγή, σε κάθε πρακτική περίπτωση χρήσης του σε κλειστό χώρο με αντήχηση (διάχυτο πεδίο) ή και θόρυβο παρεμβολής (που έστω ότι εμφανίζεται επίσης σαν διάχυτο πεδίο), κάθε είδος μικροφώνου ορίζει και μία τιμή Λόγου Απόστασης (**Distance Factor, DSF**), που περιγράφει τον λόγο της ενέργειας του κατευθείαν **σήματος** (της πηγής) προς **παρεμβολή** (διάχυτου σήματος) που θα παράγει το μικρόφωνο. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.15**, τα κατευθυντικά μικρόφωνα μπορούν να τοποθετηθούν σε μακρύτερη απόσταση από τα παντοκατευθυντικά και να καταγράψουν ισοδύναμο λόγο Σήματος προς Παρεμβολή, ή ισοδύναμα, εάν τοποθετηθούν σε ίσες αποστάσεις να εμφανίσουν πολλαπλάσιο λόγο Σήματος προς Παρεμβολή (κάτι που όπως προ-αναφέρθηκε, συχνά είναι απαραίτητο σε πρακτικές εφαρμογές).

4.3.4 Χαρακτηριστικά διάθλασης

Θεωρώντας ότι οι διαστάσεις του μικροφώνου δεν είναι αμελητέες σε σχέση με το μήκος κύματος λ του προσπίπτοντος ήχου, είναι προφανές ότι θα εμφανιστούν φαινόμενα διάθλασης, δηλαδή το μικρόφωνο θα είναι πιο ευαίσθητο στις υψηλές συχνότητες, δηλαδή σε μικρά μήκη κύματος λ . Εξιδανικεύοντας τις συνθήκες για ένα μικρόφωνο που λειτουργεί σαν σφαιρικός δέκτης ακτίνας R , η σχέση αυτή εκφράζεται από το λόγο μεταξύ της πίεσης $p(\theta)$ για μια γωνία θ πάνω στην επιφάνεια της σφαίρας, προς την πίεση p απουσία του δέκτη. Η σχέση μεταξύ αυτού του λόγου και του γινομένου $\kappa \cdot R$ (κ =Κυματικός αριθμός = ω/c), φαίνεται στο **Σχήμα 4.18**.

Στην πράξη, αυτό καθορίζει το ονομαζόμενο «Σφάλμα Ελεύθερου πεδίου» ενός μικροφώνου το οποίο συχνά προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή. Για να μην εμφανίζονται τέτοια προβλήματα και για μια περιοχή συχνοτήτων από 0 μέχρι 20 kHz, θα πρέπει να είναι $\kappa R \leq 1$, δηλαδή $R \leq 0,3$ cm.



Σχήμα 4.18: τυπικά χαρακτηριστικά διάθλασης (επίδραση στην απόκριση συχνότητας) μικροφώνων διαφορετικού μεγέθους, για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του ήχου

4.3.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μικροφώνων

Τα μικρόφωνα μπορούν να θεωρηθούν σαν γεννήτριες που όμως παράγουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές τάσης (της τάξης των μV), εμφανίζοντας μία εσωτερική σύνθετη αντίσταση Z_{EI} . Έτσι, για να επιτευχθεί ικανοποιητική Η/Α απόδοση (π.χ. Λόγος Σήματος προς Θόρυβο), τόσο η προενίσχυση του σήματος όσο και η διασύνδεση των μικροφώνων με τους προενισχυτές, αποτελούν εξαιρετικά κρίσιμα στάδια. Για την βέλτιστη μεταφορά του σήματος από το μικρόφωνο στον προενισχυτή και με δεδομένη την πιθανότητα το καλώδιο να έχει μήκος μέτρων, παλαιότερα, γινόταν προσπάθεια με χρήση μετασχηματιστών στα κυκλώματα, να δημιουργηθούν συνθήκες προσαρμογής (δηλαδή η αντίσταση του μικροφώνου να είναι παρόμοια με την αντίσταση εισόδου), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η παραγόμενη ισχύς. Οι σύγχρονοι προενισχυτές που βασίζονται σε τελεστικούς ενισχυτές (δες Ηλεκτροακουστική II), επιχειρούν να υλοποιήσουν συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος (δηλαδή, με αναφορά στο **Σχήμα 4.19**, να είναι $V \approx V_E$). Για τον λόγο αυτόν, το κύκλωμα προενίσχυσης σχεδιάζεται έτσι ώστε στην περιοχή απόκρισης συχνότητας ενδιαφέροντος (π.χ. 10 Hz – 20 KHz) να εμφανίζει αντίσταση εισόδου (πιο σωστά μιγαδική εμπέδιση) τουλάχιστο πενταπλάσια αυτής του μικροφώνου, δηλαδή $Z_{EL} > 5Z_{EI}$. Με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιείται το κέρδος της τάσης κατά την διασύνδεση, όπως είναι εύκολο να δειχθεί στο απλό παρακάτω **Παράδειγμα**.

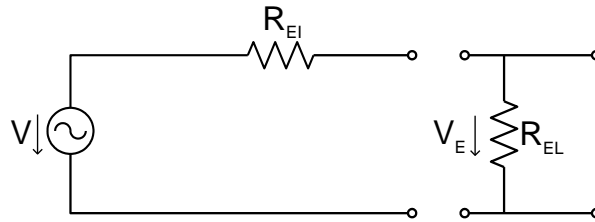
Παράδειγμα

Με αναφορά στο **Σχήμα 19**, και απλοποιώντας τις σύνθετες μιγαδικές αντιστάσεις σε ωμικές, έστω ότι για την συνθήκη (1) ισχύει ότι $R_{EI} = 200 \Omega$, $R_{EL} = 100 \text{ K}\Omega$, ενώ για την συνθήκη (2) ισχύει ότι $R_{EI} = 200 \Omega$, $R_{EL} = 200 \Omega$. Για $V = 1$, στην κάθε περίπτωση θα είναι:

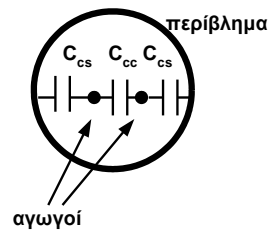
$$V_E = V \frac{R_{EL}}{R_{EL} + R_{EI}}$$

και στην (1) $V_{E1} \approx 1$, ενώ στην (2) $V_{E2} \approx 0.5$. Έτσι $20 \log V_{E2}/V_{E1} = -6 \text{ dB}$. Άρα στην περίπτωση της «συνθήκης προσαρμογής» (2), εμφανίζεται απώλεια τάσης 6 dB σε σχέση με την συνθήκη (1) όπου υπάρχει υψηλή αντίσταση εισόδου.

Επιπλέον, το καλώδιο που συνδέει το μικρόφωνο με τον προενισχυτή είναι συνήθως ομοαξονικό (δες παρακάτω), έτσι ώστε να εμφανίζει μία εν σειρά αντίσταση R_C και μία παράλληλη χωρητικότητα C_C που τείνουν να μειώσουν την τιμή της παραγόμενης τάσης V_E . Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.20**, χωρητικότητα C_C είναι αποτέλεσμα μίας χωρητικότητας C_{cc} που εκφράζει την χωρητικότητα αγωγού προς αγωγό (τυπική τιμή 100 pF/m) και μίας μίας χωρητικότητας C_{cs} που εκφράζει την χωρητικότητα αγωγού προς το περίβλημα του καλωδίου (τυπική τιμή 200 pF/m).



Σχήμα 4.19: μικρόφωνο σαν γεννήτρια τάσης και σύνδεση με προενισχυτή

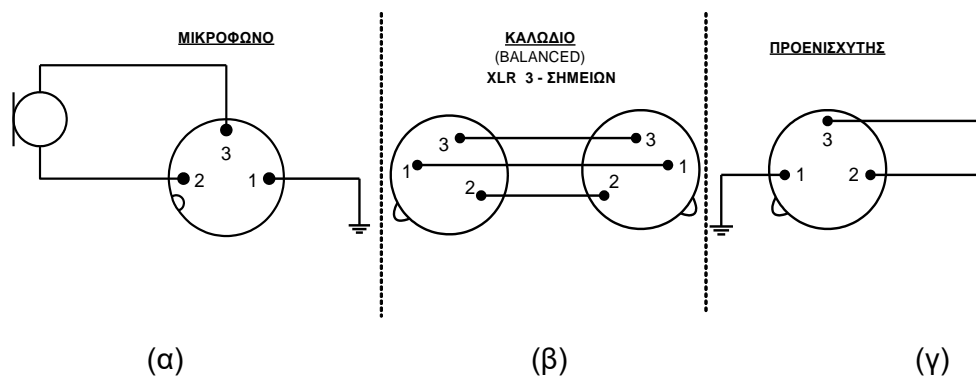


Σχήμα 4.20: σχηματική απεικόνιση χωρητικότητας καλωδίου σύνδεσης μικροφώνου με προενισχυτή

Το σύνηθες αποτέλεσμα είναι η συνολική χωρητικότητα του αγωγού να είναι $C_c \approx 100\text{pF/m}$. Έτσι, η Z_{EI} δεν θα πρέπει να έχει μικρή τιμή σε σχέση με την R_c ή πολύ μεγάλη τιμή σε σχέση με την $1/\omega C_c$. Αυτό το πρόβλημα γίνεται επιτακτικό στην περίπτωση των ηλεκτροστατικών («πυκνωτικών») μικροφώνων. Όπως θα συζητηθεί παρακάτω, τα μικρόφωνα αυτά εμφανίζουν κάποια «στατική χωρητικότητα» C_0 (δηλαδή όταν το διάφραγμα δεν κινείται), που για ένα τυπικό παράδειγμα είναι 69.5 pF . Άρα, αφού $Z_{EI} = 1/j\omega C_0$ που π.χ. για $\omega = 100 \times 6.28\text{ rad/s}$, προκύπτει εμπέδιση μικροφώνου $Z_{EI} = 23\text{ M}\Omega$, ενώ σε πολύ υψηλές συχνότητες η εμπέδιση μπορεί να πλησιάζει και τα $\text{G}\Omega$. Άρα, αγνοώντας το καλώδιο, ένα τέτοιο μικρόφωνο θα πρέπει να συνδεθεί με μία αντίσταση τουλάχιστο $100\text{ M}\Omega$ για να μην υπάρχει απώλεια στην μεταφορά της τάσης. Βάζοντας ένα ενδιάμεσο καλώδιο, τότε η χωρητικότητα του αγωγού αυτού (όπως συζητήθηκε παραπάνω), θα μείωνε επιπλέον την παραγόμενη τάση (ευαισθησία του μετατροπέα). **Για τον λόγο αυτό, στα πυκνωτικά μικρόφωνα, τα οποία άλλωστε παράγουν χαμηλή ηλεκτρική έξοδο, ο προενισχυτής / μετασχηματιστής εμπέδισης υλοποιείται αμέσως μετά τους ακροδέκτες του μικροφώνου, χωρίς δηλαδή να παρεμβληθεί καλώδιο μεταφοράς μικροφωνικού σήματος.** Ο προενισχυτής αυτός ενισχύει το σήμα σε στάθμη Volt (περίπου), δηλαδή σε στάθμη σήματος «γραμμής» (line level). Παλαιότερα, τέτοιοι προενισχυτές υλοποιούνταν με λυχνίες, με αποτέλεσμα τα πυκνωτικά μικρόφωνα να είναι ογκώδη, ενώ τα σύγχρονα ηλεκτρονικά μειώνουν δραματικά το μέγεθος των κυκλωμάτων αυτών. **Έτσι, τα πυκνωτικά μικρόφωνα απαιτούν d.c. τροφοδοσία, τόσο για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων αυτών, όσο και για την πόλωση του πυκνωτή.** Η τροφοδοσία αυτή συνήθως παρέχεται μέσω του καλωδίου που συνδέει τον προενισχυτή και το μικρόφωνο, όπως περιγράφεται παρακάτω.

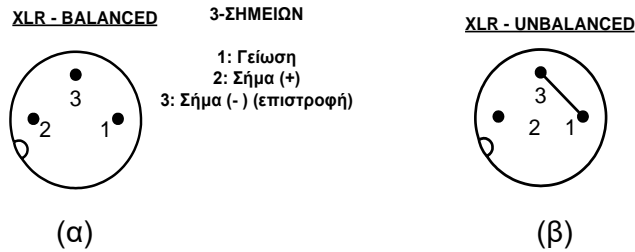
4.3.6 Τρόποι διασύνδεσης και καλώδια

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι σε περίπτωση που τα μικρόφωνα συνδέονται με προενισχυτές με μακριά καλώδια, τότε για βέλτιστη μεταφορά των σημάτων χαμηλής στάθμης και την αποφυγή προσθήκης παρεμβολών και θορύβου, θα απαιτηθεί ειδική μορφή διασύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση **ισορροπημένης (balanced) διασύνδεσης** στους αγωγούς και στην είσοδο του προενισχυτή. Η συνδεσμολογία αυτή βασίζεται στην χρήση 3 ακροδεκτών στην έξοδο της συσκευής / πηγής (στην προκειμένη περίπτωση το μικρόφωνο), στους ακροδέκτες του καλωδίου διασύνδεσης (το οποίο μεταφέρει 3 αγωγούς) και του προενισχυτή, ο οποίος θα πρέπει να λειτουργεί σε διαφορική τοπολογία (**Σχήμα 4.21**). Σε μία τέτοια διασύνδεση, τα 2 σκέλη του κυκλώματος (+ και -) εμφανίζουν την ίδια εμπέδιση σε σχέση με τη γείωση και το κάθε σκέλος μεταφέρει το ίδιο σήμα αλλά σε αντίθετη πολικότητα. Έτσι επιτυγχάνεται η ακύρωση κοινών σημάτων θορύβου τα οποία τυχόν εμφανίζονται στα 2 σκέλη και βελτιστοποιείται ο λόγος Σήματος προς Θόρυβο. Έτσι, με τυπική μορφή ακροδεκτών 3-σημείων (τύπου XLR) που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες συσκευές, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.22**, ο ακροδέκτης (1) αποτελεί τη γείωση, ο (2) φέρει το σήμα (+) και ο (3) την «επιστροφή» του σήματος (-). Η τοπολογία αυτή ακολουθείται κατά κόρον σε επαγγελματικές ηχητικές εφαρμογές.

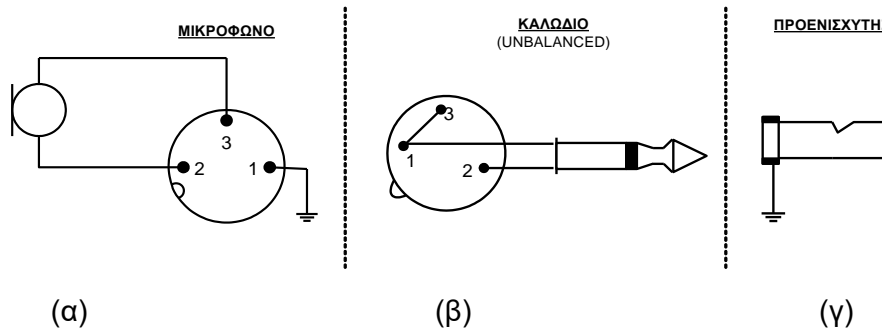


Σχήμα 4.21: Ισορροπημένη διασύνδεση μικροφώνου με προενισχυτή. (α) έξοδος μικροφώνου, (β) διασυνδετικά καλώδιου XLR, (γ) είσοδος προενισχυτή

Σε ημι-επαγγελματικές και οικιακές εφαρμογές, συχνά ακολουθείται η **μη-ισορροπημένη (unbalanced) τοπολογία**, όπου το καλώδιο φέρει 2 αγωγούς (γείωση και σήμα), ενώ η είσοδος του προενισχυτή βασίζεται σε διασυνδετικό 2-σημείων τύπου jack ή και mini-jack (**Σχήμα 4.23**). Στην περίπτωση αυτή ο ακροδέκτης εξόδου (3) του μικροφώνου, συνδέεται στην γείωση (**Σχήμα 4.22(β)**). Γενικά μία τέτοια διασύνδεση θα λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο για μικρότερα μήκη καλωδίων.

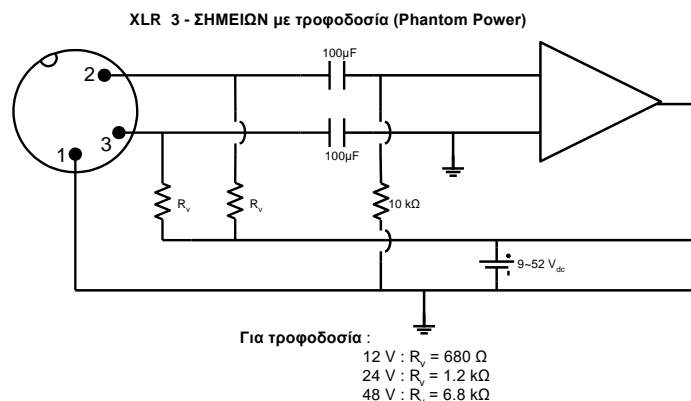


Σχήμα 4.22: σήματα στους ακροδέκτες μικροφώνων. (α) ισορροπημένη διασύνδεση, (β) μη-ισορροπημένη διασύνδεση



Σχήμα 23: μη-ισορροπημένη διασύνδεση μικροφώνου με προενισχυτή. (α) έξοδος μικροφώνου, (β) διασυνδετικά καλωδίου jack, (γ) είσοδος προενισχυτή

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, τα πυκνωτικά μικρόφωνα απαιτούν τροφοδοσία d.c. από τους προενισχυτές, η οποία παρέχεται μέσω του καλωδίου διασύνδεσης. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.24**, η τροφοδοσία αυτή βασίζεται στη χρήση της ισορροπημένης τοπολογίας που περιγράφηκε παραπάνω και η d.c. ισχύς εφαρμόζεται σε κοινό τρόπο στους αγωγούς / ακροδέκτες (2) και (3) σε σχέση με τον αγωγό / ακροδέκτη (1 –γείωση). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται τροφοδοσία **“phantom power”** (λόγω της ονομασίας ενός συστήματος από την Γερμανική εταιρία Neumann), είναι συνήθως 48 Volt, και παρέχεται από τους περισσότερους επαγγελματικούς προενισχυτές, μέσω επιλογέα που ενεργοποιεί ο χρήστης.

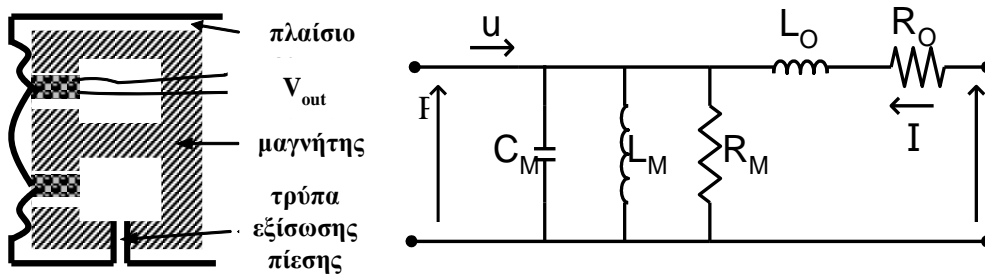


Σχήμα 4.24: τυπικό διάγραμμα διασύνδεσης πυκνωτικού μικροφώνου με τροφοδοσία

4.3.7 Ηλεκτρο-μηχανικά χαρακτηριστικά

(α) Δυναμικά Μικρόφωνα

Όπως προαναφέρθηκε, τα μικρόφωνα του τύπου αυτού αποτελείται από ένα αναρτημένο διάφραγμα το οποίο συνδέεται με ένα ή περισσότερα κυκλικά πηνία και το οποίο κινείται μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο με ροή $B(T)$. Κατ' επέκταση, το ισοδύναμο κύκλωμα του βασίζεται σε ό,τι συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 3(Σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.25: τομή και ισοδύναμο κύκλωμα δυναμικού μικροφώνου

Το σύστημα είναι ακριβώς αντίστοιχο με αυτό του μεγαφώνου που συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ευαισθησία του μετατροπέα δίνεται από την σχέση:

$$S \cong \frac{ABl}{Z_{m0}} \quad (4.11)$$

όπου A (m^2) η επιφάνεια του διαφράγματος, l (m) το μήκος του πηνίου και όπως είναι γνωστό από το προηγούμενο Κεφάλαιο (δες και εξίσωση (4.2)):

$$Z_{m0} = R_m + j\left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right) \quad (4.12)$$

Για την επιθυμητή μεγιστοποίηση της ευαισθησίας, απαιτείται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης Z_{m0} και η όσο το δυνατό μείωση της σημασίας από τους όρους της συχνότητας και άρα πρέπει η R_m να γίνει πολύ μεγάλη. Όμως για μεγαλύτερη ευαισθησία η μηχανική αντίσταση πρέπει να είναι γενικά όσο γίνεται μικρότερη. Επιπλέον, η ευαισθησία (και άρα η απόκριση) δεν μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί πλήρως από το φανταστικό τμήμα της Z_{m0} που περιέχει όρους που αλλάζουν με τη συχνότητα: για μεγάλες συχνότητες αυξάνει η σημασία της μάζας, ενώ για μικρές της σταθεράς K . Σε όλες τις περιπτώσεις οι παράμετροι R_m , m , και k , σχετίζονται με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μετατροπέα και έτσι η απόκριση ενός τέτοιου μικροφώνου δεν θα είναι πολύ καλή και θα αλλάζει με τη συχνότητα.

Στην πράξη, για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, σχεδιάζονται περισσότερο σύνθετοι μηχανο-ακουστικοί μηχανισμοί με τη χρήση επιπλέον ακουστικής υποβοήθησης στο διάφραγμα. Αν υποθεθεί ότι το διάφραγμα συμπεριφέρεται σαν

ένας αναρτημένος δίσκος (πιστόνι) που έχει μάζα m , απόσβεση R_m , και σταθερά k που προκύπτουν καθώς αυτός ταλαντώνεται στην προκαθορισμένη περιοχή συχνοτήτων, τότε η συμπίεση του αέρα μέσα στην κάψα, πίσω από το διάφραγμα δημιουργεί μια επιπλέον συνθήκη ελατηρίου με σταθερά k_1 . Συχνά, σχεδιάζονται σύνθετες εσωτερικές ακουστικές οθόνες, έτσι ώστε η κίνηση του αέρα που συμπιέζεται από δύο οθόνες (από μετάξι) με σταθερές R_1 και k_2 . Έτσι, η μηχανική σύνθετη αντίσταση στην περίπτωση αυτή αποτελείται από ένα σύνθετο πραγματικό μέρος R_0 και ένα σύνθετο φανταστικό μέρος που συμπεριλαμβάνει αυτές τις επιπλέον μεταβλητές, δηλαδή:

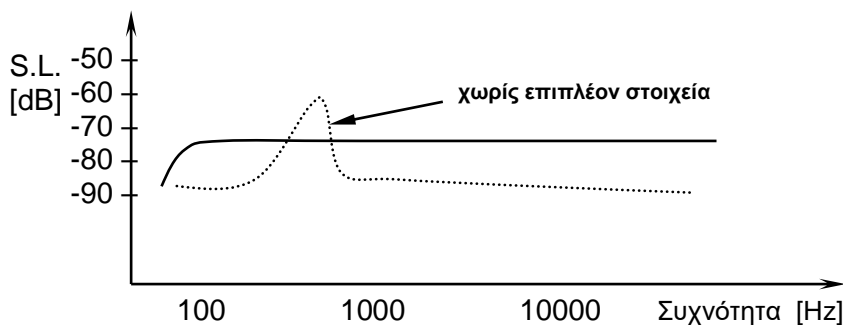
$$Z_{m0} = R_{m0} + jX_{m0}, \text{ όπου } R_{m0} = R + \frac{k_1^2 R_1}{R_1^2 \omega^2 + m_1^2 (\omega_1^2 - \omega^2)^2} \quad \omega_1^2 = \frac{k_1}{m},$$

$$X_{m0} = \omega_m + \frac{k}{\omega} + \frac{k_1 \omega (m_1^2 (\omega_1^2 - \omega^2) - R_1^2)}{R_1^2 \omega^2 + m_1^2 (\omega_1^2 - \omega^2)^2} \quad (4.13)$$

Οι τιμές όλων αυτών των παραμέτρων καθορίζουν τη νέα τιμή της Z_{m0} και έτσι την ευαισθησία και φυσικά την απόκριση συχνότητας. Μάλιστα, με τον τρόπο αυτό δημιουργείται σε συστήματα μικροφώνων ανομοιογενής σχέση ευαισθησίας /συχνότητας για τονισμό συχνοτήτων, π.χ. σημάτων ή ομιλίας.

Παράδειγμα

Έστω ότι: $P = 1 \text{ Ns/m}$, $R_1 = 24 \text{ Ns/m}$, $k = 10^4 \text{ N/m}$, $k_1 = 10^6 \text{ N/m}$, επιφάνεια $A = 5 \text{ cm}^2$ και μήκος του πηνίου $l = 10 \text{ mm}$ σε πεδίο $B = 1,5 \text{ T}$. Η εφαρμογή της σχέσης (4.12) θα δώσει την τιμή της Z_{m0} συναρτήσει της συχνότητας και κατ' επέκταση της ευαισθησίας, που όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.26** θα εξαρτάται από τη συχνότητα. Παρ' όλα αυτά, με την προσθήκη καταλλήλων τιμών στα επιπλέον ακουστικά στοιχεία σύμφωνα με τη σχέση (4.13), η **Στάθμη Ευαισθησίας (S.L.)**, δηλαδή η ευαισθησία εκφρασμένη σε dB (δες παρακάτω), μπορεί να γίνει πλήρως ανεξάρτητη της συχνότητας (**Σχήμα 4.26**)



Σχήμα 4.26: τυπική απόκριση συχνότητας (μέτρο) δυναμικού μικροφώνου χωρίς και με ακουστικο-μηχανική βελτιστοποίηση με την χρήση επιπλέον στοιχείων.

(β) Πυκνωτικά μικρόφωνα

Όπως προαναφέρθηκε, αποτελούνται από ένα κινούμενο λεπτό μεταλλικό φύλλο που συμπεριφέρεται σαν διάφραγμα και σαν ηλεκτρόδιο ενός πυκνωτή, ο οποίος με την εφαρμογή μιας συνεχούς τάσης πόλωσης, έχει ένα σταθερό ηλεκτρικό φορτίο, ενώ μεταβολή της χωρητικότητας λόγω κίνησης του διαφράγματος, παράγει ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα εξόδου (**Σχήμα 4.27**).

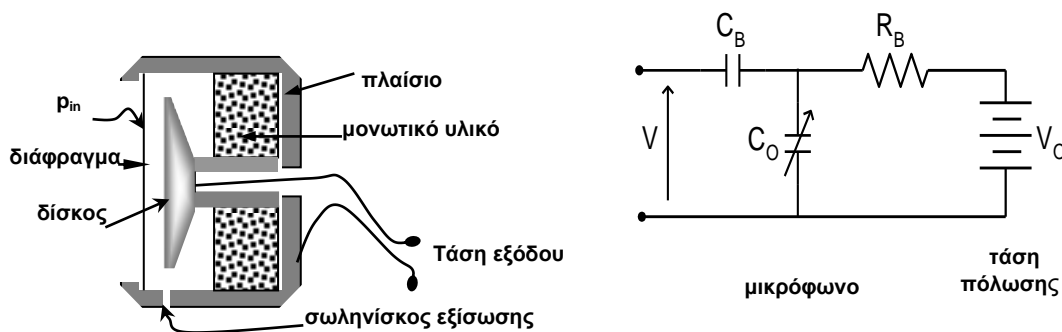
Όπως προαναφέρθηκε, επειδή η στατική ατμοσφαιρική πίεση θα δημιουργούσε περισσότερη τάση που δεν θα προερχόταν από ακουστική διέγερση (πίεση), χρησιμοποιείται ένα απλό σύστημα εξίσωσης της d.c.πίεσης μεταξύ των 2 πλευρών του διαφράγματος. Για μεγαλύτερη ευαισθησία, η «στατική» χωρητικότητα του μικροφώνου / ενισχυτή C_0 , πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή, οπότε χρησιμοποιείται πάντα ένας προενισχυτής συζευγμένος με το μικρόφωνο, συχνά ενσωματωμένος στην κάψα του μικροφώνου. Από τη σχέση της χωρητικότητας και τη διηλεκτρική σταθερά του αέρα προκύπτει και η «στατική» χωρητικότητα του μικροφώνου:

$$C_0 = \frac{27,8R^2}{x_0} \text{ (pF)} \quad (4.14)$$

όπου R (m) είναι η ακτίνα του διαφράγματος και x_0 (m) η απόσταση των πλακών. Αν οριστεί σαν F_T (N/m) η μηχανική τάση του διαφράγματος και V_0 (Volts) η στατική τάση πόλωσης, τότε η σχέση ευαισθησίας του πυκνωτικού μικροφώνου δίνεται από τη σχέση:

$$S \cong \frac{V_0 R^2}{x_0 8F_T} \quad (4.15)$$

Προφανώς για μεγαλύτερη ευαισθησία χρειάζεται μεγαλύτερη επιφάνεια διαφράγματος, υψηλή τάση πόλωσης, μικρή απόσταση διαφράγματος / δίσκου και χαμηλή μηχανική τάση (προ-ένταση) στο διάφραγμα. Όλες αυτές οι συνθήκες όμως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα στην πράξη. Αν για παράδειγμα μεγαλώσουν οι διαστάσεις του διαφράγματος τότε θα χειροτερέψει η απόκριση συχνότητας στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων, ενώ αν αυξηθεί η τάση πόλωσης ή μειωθεί η απόσταση, θα υπάρξει πρόβλημα διαπίδυσης του φορτίου.

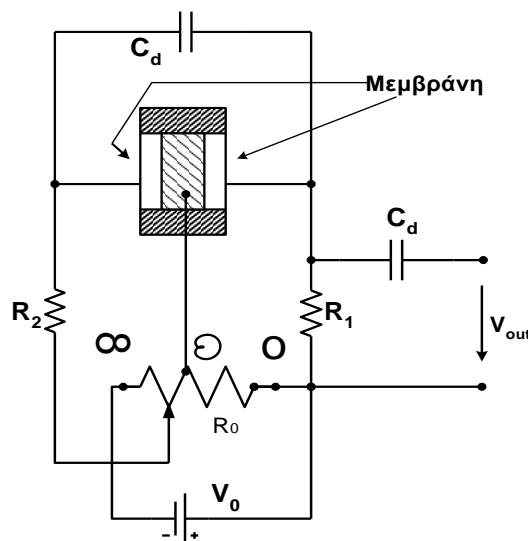


Σχήμα 4.27: τομή και απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτικού μικροφώνου

Παράδειγμα

Δίδεται μικρόφωνο με διάφραγμα από φύλλο αλουμινίου πάχους $0,04 \text{ mm}$ ακτίνα $R = 1 \text{ cm}$, μηχανική τάση $F_T = 20000 \text{ N/m}$. Αν η απόσταση $x_0 = 0,04 \text{ mm}$ και η τάση πόλωσης είναι $V_0 = 300 \text{ V}$, προκύπτει με απλή εφαρμογή των τύπων ότι η ευαισθησία του θα είναι $S = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ V/Pa}$ και η στάθμη ευαισθησίας σε dB θα είναι -47 dB (ref 1 V/Pa). Η στατική χωρητικότητα C_0 του μικροφώνου είναι $69,5 \text{ pF}$. Από την σχέση $Z_{EB} = 1/j\omega C$, προκύπτει ότι η ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση θα είναι πολύ υψηλή και ειδικά στις υψηλές συχνότητες. Για $\omega = 100 \cdot 2\pi \text{ rad/s}$, προκύπτει $Z_{EB} = 23 \text{ M}\Omega$. Για να χρησιμοποιηθεί το μικρόφωνο αυτό σύστημα σαν μετατροπέας, θα πρέπει να συνδεθούν παράλληλα τουλάχιστο $50 \text{ M}\Omega$ για να μετρηθεί τάση ίση με αυτήν που παράγει το μικρόφωνο. Αυτό δείχνει την σημασία της χρήσης προενισχυτή συνδεδεμένου άμεσα στην έξοδο του μικροφωνικού συστήματος.

Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας ενός πυκνωτικού μετατροπέα είναι γενικά διακατευθυντικά (omnidirectional) και εμφανίζονται φαινόμενα διάθλασης αντιστοίχα με το μέγεθος του συστήματος που στις περισσότερες περιπτώσεις συμπεριλαμβάνει και τον προενισχυτή. Παρ' όλα αυτά ένα τέτοιο μικρόφωνο μπορεί και να λειτουργήσει και σαν διακατευθυντικό όταν χρησιμοποιηθεί κατάλληλη πόλωση των διαφραγμάτων (Σχήμα 4.28), με διακόπτη επιλογής ο οποίος καθορίζει την πόλωση και κατ' επέκταση την φασική συμπεριφορά σε προσπίπτοντες ήχους.



Σχήμα 4.28: επιλογή κατευθυντικότητας πυκνωτικού μικροφώνου με διαφοροποίηση της πόλωσης του διαφράγματος

4.4 Τεχνικές προδιαγραφές μικροφώνων

Οι προδιαγραφές των μικροφώνων που κατά κύριο λόγο αφορούν την Απόκριση Συχνότητας, την Κατευθυντικότητα, την Στάθμη Ευαισθησίας, τον Παραγόμενο Θόρυβο και την Μέγιστη Ηχοστάθμη, ορίζονται από τον κατασκευαστή, συχνά σύμφωνα με αναφορά στο πρότυπο **IEC 268-4**, και επιτρέπουν την κατάλληλη επιλογή ενός τέτοιου μικροφώνου για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Συχνά όμως, οι κατασκευαστές ορίζουν με διαφορετικό τρόπο τις προδιαγραφές αυτές με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η σύγκρισή τους.

4.4.1 Ευαισθησία

Ευαισθησία ορίζεται η ικανότητα του μικροφώνου να μετατρέψει ακουστική πίεση σε ηλεκτρική τάση και καθορίζει την τάση που θα παράγεται για συγκεκριμένη πίεση. Προφανώς ένα μικρόφωνο με υψηλή ευαισθησία θα απαιτεί λιγότερο ηλεκτρικό κέρδος στο στάδιο της προενίσχυσης και θα παράγει καλύτερο Λόγο Σήματος προς Θόρυβο εάν καταγραφεί ακουστικά σήματα χαμηλής ηχοστάθμης. Η τυποποίηση IEC 268-4 ορίζει την ευαισθησία σαν τον λόγο της εξόδου σε mV προς την πίεση σε Pascal (ή N/m²) στην συχνότητα 1 KHz. Εναλλακτικά, συχνά ακολουθείται η τυποποίηση που ορίζει την Στάθμη Ευαισθησίας σε dB, με αναφορά το 1V/Pa. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές είναι αρνητικές (μεγαλύτερες αρνητικές τιμές για μικρότερη ευαισθησία). Όπως προαναφέρθηκε, η ευαισθησία εκφράζεται από την τάση του ανοιχτού κυκλώματος για συγκεκριμένη πίεση στο σημείο που τοποθετείται το μικρόφωνο, δηλαδή:

$$S=V/P \quad (4.16)$$

Έτσι, ορίζεται συνήθως μια **ευαισθησία αναφοράς** $S_{ref} = 1V/Pa$ ώστε να δοθεί η Στάθμη Ευαισθησίας S.L. (σε dB), σαν:

$$S.L. = 20\log_{10} \frac{S}{S_{ref}} \quad \text{ref} = 1V/Pa \quad (4.17)$$

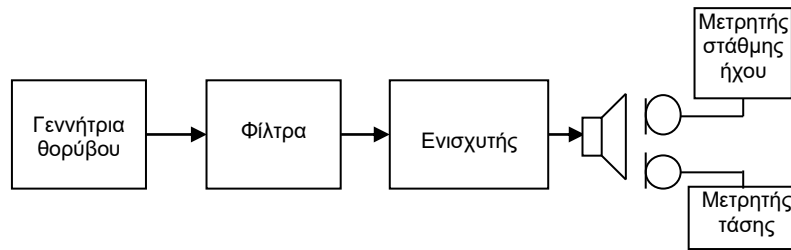
Από τον παραπάνω (με δεδομένο ότι $P_{ref} = 94 \text{ dB-SPL}$), προκύπτει επίσης ότι:

$$S.L. = 20\log V - 20\log \frac{P}{P_{ref}} = 20\log V - \text{dB} - \text{SPL} + 94 \quad (\text{dB}) \quad (4.18)$$

Πρακτικά, οι τυπικές προδιαγραφές ευαισθησίας που παρουσιάζει ένας κατασκευαστής θα βασίζονται σε κάποιον από τους παραπάνω ορισμούς, καθώς και το περιθώριο διακύμανσης της τιμής σε dB, για λόγους κατασκευαστικής ακρίβειας. Η μέτρηση της ευαισθησίας ενός μικροφώνου γίνεται με την χρήση γεννήτριας θορύβου, ηχώμετρου και βολτόμετρου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.29** και παρουσιάζεται αναλυτικά στην **Εργαστηριακή Άσκηση 3** του μαθήματος.

Χαμηλό κέρδος εξόδου του μικροφώνου θα απαιτήσει μεγάλο κέρδος στον προενισχυτή (αυξάνοντας τη στάθμη του ηλεκτρονικού θορύβου), ενώ υψηλό κέρδος του μικροφώνου και του προενισχυτή, είναι πιθανό να οδηγήσει σε ψαλιδισμό του σήματος και σε παραμορφώσεις (ειδικά σε απότομα μεταβατικά περάσματα και «κορυφές» του σήματος).

Συχνά, η Στάθμη Ευαισθησίας εκφράζεται και σε dBm, που αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου για ακουστική ηχοστάθμη ίση με της αναφοράς (94 dB-SPL). Αν η πίεση δεν είναι 94 dB-SPL, ανάλογα μεταβάλλεται και η ισχύς εξόδου (αφαιρώντας ή προσθέτοντας τα αντίστοιχα dB), όπως φαίνεται στο **Παράδειγμα**.



Σχήμα 4.29: διάταξη για τη μέτρηση ευαισθησίας μικροφώνου (δες Άσκηση 3)

Παράδειγμα

Μικρόφωνο στάθμης ευαισθησίας -50 dBm (ref. 94 dB-SPL), αν δεχθεί ηχητικό σήμα στάθμης 84 dB-SPL , θα παράγει ηλεκτρική έξοδο -60 dBm .

Συχνά ορίζεται η Στάθμη Ευαισθησίας Ισχύος, $S.W.$ (dBm), που για να υπολογισθεί σε μικρόφωνο αντίστασης Z_{EI} που συνδέεται με προενισχυτή κέρδους $S.G.$ (dB), χρησιμοποιείται η σχέση:

$$S.W. = S.L. + S.G. - 20 \log_{10} |Z_{EI}| \quad (\text{dBm}) \quad (4.19)$$

Παράδειγμα

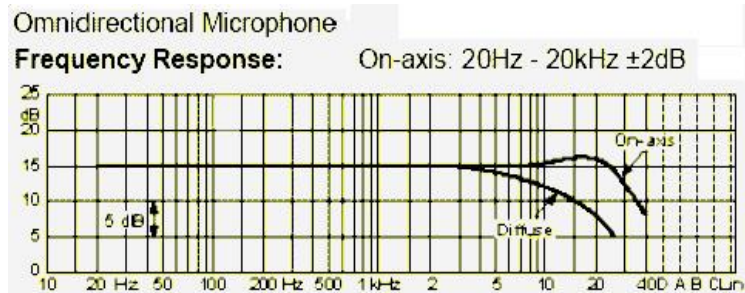
Για μικρόφωνο $S.L. = -60 \text{ dB}$ (ref. 94 dB-SPL), με αντίσταση (μέτρο) $Z_{EI} = 200 \Omega$ που συνδέεται σε προενισχυτή με κέρδος $S.G. = 40 \text{ dB}$, παράγεται σύμφωνα με τον τύπο, ηλεκτρική έξοδος -43 dBm .

4.4.2 Απόκριση Συχνότητας

Ορίζεται σαν την τάση εξόδου του μικροφώνου συναρτήσει της συχνότητας, για ακουστικό κύμα πίεσης που φθάνει κάθετα στο διάφραγμα και το οποίο εμφανίζει σταθερή ηχοστάθμη σε κάθε συχνότητα. Εδώ χρησιμοποιείται η σχέση (4.18):

$$S.L. = 20 \log_{10} V + 94 - \{ \text{dB-SPL} \}, \text{ με αναφορά το } 1 \text{ V/Pa.} \quad (4.20)$$

Αυτήν τη φορά, πρέπει η τάση V να μετρηθεί για διαφορετικές συχνότητες και θα πρέπει λοιπόν να παραχθεί η απαιτούμενη στάθμη dB-SPL χρησιμοποιώντας γεννήτρια ημιτονοειδών σημάτων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα μετρήσεων (κάψες) που προσαρμόζονται στο διάφραγμα που δημιουργούν την κατάλληλη στάθμη (συνήθως 104 dB-SPL). Το **Σχήμα 4.30** παριστάνει μια τυπική καμπύλη απόκρισης συχνότητας παντοκατευθυντικού μικροφώνου, όπου διαγράφεται η απόκριση για ακουστική διέγερση στον άξονα (on-axis) και για διάχυτο ακουστικό πεδίο, όπου ο ήχος φθάνει από τυχαίες διευθύνσεις πρόσπτωσης (diffuse field). Όπως προαναφέρθηκε, πιο ριζικές διαφορές στην καμπύλη απόκρισης εμφανίζονται σε κατευθυντικά μικρόφωνα, τόσο σε σχέση με την γωνία (**Σχήμα 4.13**), όσο και σε σχέση με την απόσταση από την πηγή (**Σχήμα 4.14**).



Σχήμα 4.30: τυπική καμπύλη απόκρισης συχνότητας (μέτρο) παντοκατευθυντικού μικροφώνου, για ακουστική διέγερση στον άξονα (on-axis) και για διάχυτο ακουστικό πεδίο (diffuse field)

Πρακτικά λοιπόν, η απόκριση συχνότητας των παντοκατευθυντικών μικροφώνων είναι δυνατό να είναι εξαιρετικά ικανοποιητική (επίπεδη), ενώ αυτή των κατευθυντικών μικροφώνων παρουσιάζει παραμορφώσεις σε σχέση με την θέση (π.χ. κοντινή απόσταση) και την γωνία (π.χ. εκτός άξονα). Σε όλες τις περιπτώσεις, συχνά οι κατασκευαστές δημιουργούν επί τούτοις μικρές αυξήσεις του κέρδους (απόκρισης) σε περιοχές συχνοτήτων που τονίζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά κάποιας ακουστικής πηγής (π.χ. γύρω στα 2 KHz για μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται σε ηχογράφιση φωνής).

ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (dB-SPL)	ΕΞΟΔΟΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ (mV)	ΣΤΑΘΜΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ (dB ref. 1V /Pa)
100	100	-20
90	10	-30
80	1	-40
70	0,1	-50
60	0,01	-60
50	0,001	-70
40		-80

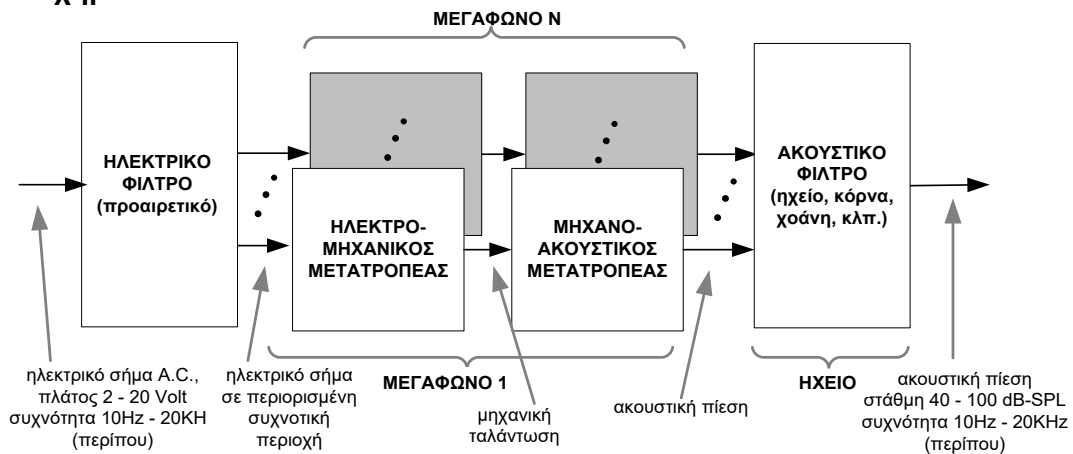
Πίνακας 4.3: Νομόγραμμα ηχοστάθμης / στάθμης ευαισθησίας μικροφώνου και ηλεκτρικής εξόδου (η ευθεία γραμμή μετακινείται ως προς τον κάθετο άξονα της και συνδέει – κατά προσέγγιση- τις τιμές στα πεδία).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μεγάφωνα και ηχεία

5.1 Εισαγωγή

Τα μεγάφωνα είναι ηλεκτροακουστικές πηγές που μετασχηματίζουν ηλεκτρικό σήμα στάθμης ισχύος, σε ακουστικό σήμα υψηλής στάθμης (εξ ου και ο όρος *μεγά-φωνα*, σε αντιδιαστολή με την τεχνολογία των ακουστικών που πρωτοεμφανίστηκαν σε τηλέφωνα). Για την πρακτική επίτευξη αυτού του στόχου ακολουθείται μία σειρά μετασχηματισμών που περιλαμβάνει την μετάδοση του ηλεκτρικού σήματος σε ένα ή περισσότερα μεγάφωνα που μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε μηχανικό, την μετατροπή του μηχανικού σήματος σε ακουστικό και την τελική προσαρμογή της ακουστικής εκπομπής μέσα από ένα ακουστικό σύστημα, το ηχείο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**.

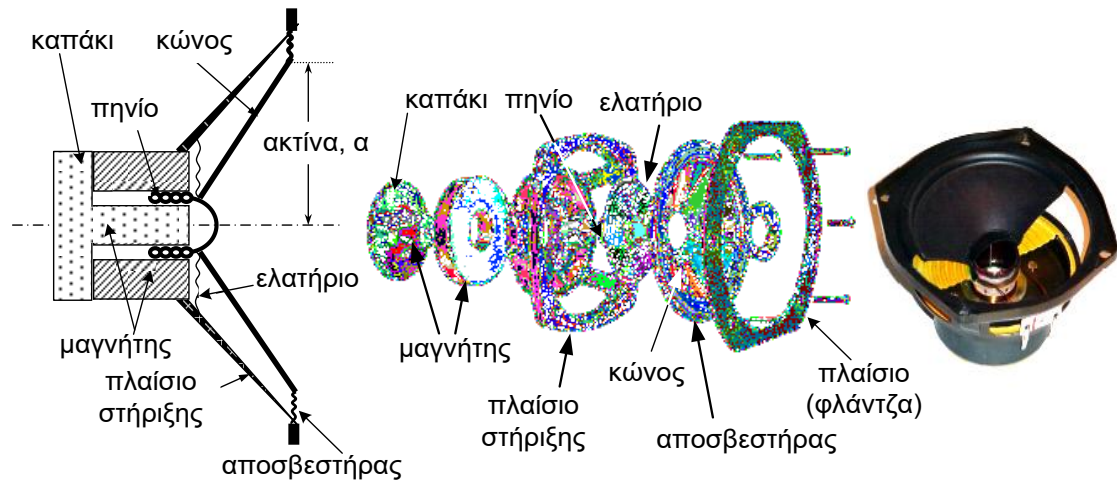


Σχήμα 5.1: Στάδια μετασχηματισμού ενέργειας σε μεγάφωνα / ηχεία

Όπως έχει προαναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3, η μεγάλη πλειοψηφία των μεγαφώνων που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι ηλεκτροδυναμικού τύπου, έτσι ώστε το μεν ηλεκτρο-μηχανικό στοιχείο να αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικό κινητήρα τύπου κινητού πηνίου, το δε μηχανο-ακουστικό στοιχείο να αποτελείται από σύστημα αναρτούμενου κώνου – διαφράγματος το οποίο να οδηγείται σε ταλάντωση από τον παραπάνω κινητήρα, έτσι ώστε να παράγει ηχητικό κύμα. Για την βέλτιστη αναπαραγωγή του ακουστικού σήματος, το μεγάφωνο τοποθετείται σε κατάλληλο κουτί (ηχείο) ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ένας ειδικός ακουστικός προσαρμογέας (χοάνη – κόρνα, είτε για ενίσχυση των χαμηλών, είτε των υψηλών συχνοτήτων, δες **Σχήμα 5.2** και **5.3**). Έτσι, στην πράξη κάθε πρακτικός ηλεκτρο-ακουστικός μετατροπέας, αποτελείται από:

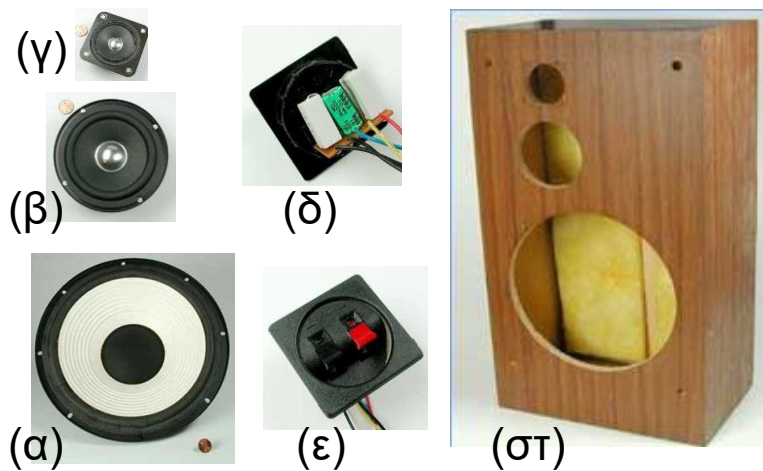
- ένα ή και περισσότερα μεγάφωνα («οδηγούς») που μετατρέπουν το ηλεκτρικό σε ακουστικό σήμα,
- ηλεκτρικά φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-over), που τροφοδοτούν τα μεγάφωνα με το κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα,
- ένα ακουστικό σύστημα – ηχείο (π.χ. «κουτί», «κόρνα», κλπ) που βελτιστοποιεί την εκπομπή του ακουστικού σήματος.

Οι χρήσεις των μεγαφώνων / ηχείων εμφανίζονται σε όλες τις ηλεκτρο-ακουστικές εφαρμογές, τόσο σε κλειστούς όσο και σε ανοιχτούς χώρους και για ηχητική αναπαραγωγή σε διαφορετικό είδος και μέγεθος ακροατηρίου.



Σχήμα 5.2 : Διατομή και υποσυστήματα ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Τέτοια συστήματα μπορεί να χρησιμοποιούνται είτε σε «προσωπικά», **φορητά συστήματα** (π.χ. υπό μορφή ακουστικών – headphones, η ηχοσυστημάτων σε αυτοκίνητα), είτε σε **οικιακά συστήματα** για ακρόαση σε περιορισμένο χώρο στο σπίτι, είτε σε **επαγγελματικά συστήματα** για αναπαραγωγή σε μεγάλα ακροατήρια αποτελούμενα από εκατοντάδες ή και χιλιάδες ακροατές σε κάποιο δημόσιο χώρο ή κέντρο διασκέδασης. Σε πολλές από τις εφαρμογές αυτές απαιτείται κυρίως υψηλή πιστότητα (High Fidelity, Hi-Fi) ενώ σε άλλες κύρια απαίτηση είναι η επάρκεια ισχύος, όπως π.χ. σε συστήματα ηχητικής κάλυψης ανοιχτού χώρου.

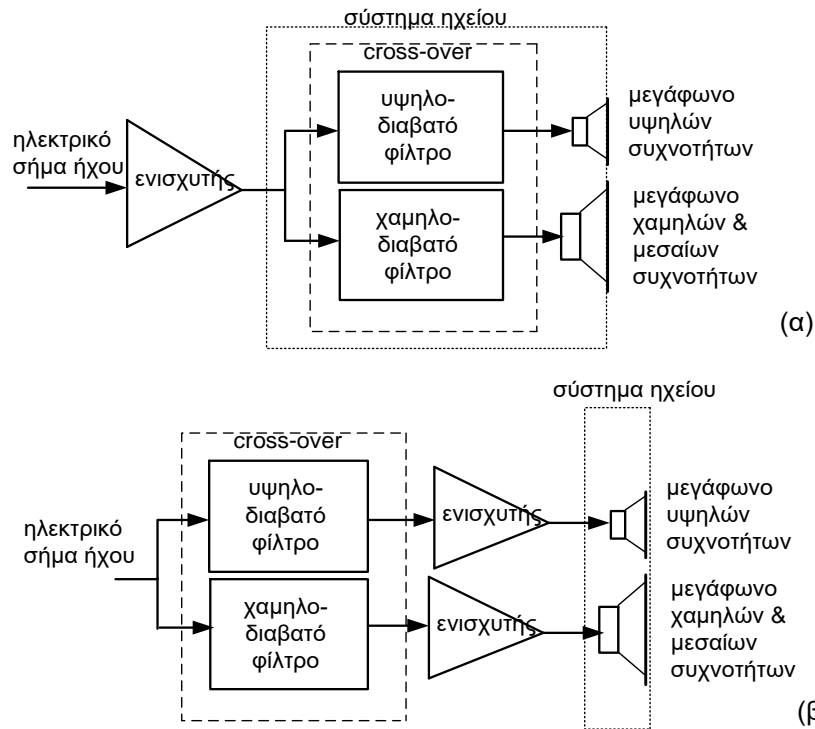


Σχήμα 5.3: υποσυστήματα συστήματος ηχείου 3 δρόμων. (α) μεγάφωνο χαμηλών συχνοτήτων (woofer), (β) μεγάφωνο μεσαίων συχνοτήτων (mid-range), (γ)μεγάφωνο υψηλών συχνοτήτων (tweeter), (δ) κύκλωμα παθητικού cross-over, (ε) ακροδέκτες, (στ) κουτί (ηχείο) κλειστού τύπου.

Τα μεγάφωνα άμεσης εκπομπής (δηλ. χωρίς κόρνα) ικανοποιούν κυρίως την πρώτη συνθήκη, προσφέροντας ικανοποιητική απόκριση σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων, μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος, έχουν όμως το μειονέκτημα της σχετικά χαμηλής απόδοσης, και της περιορισμένης κατευθυντικότητας στις υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, για χρήσεις ανοιχτού χώρου και για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων σε

επαγγελματικές ηχητικές εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται συνήθως συστήματα μεγάφωνων / κórνας τα οποία εμφανίζουν αντιδιαμετρικά χαρακτηριστικά.

Όπως συζητήθηκε και φαίνεται στα **Σχήματα 5.2** και **5.3**, ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο θεωρείται ότι είναι τοποθετημένο σε άπειρο αποσβεστήρα και σαν απευθείας ακουστικός εκπομπός, με διάφραγμα (κώνος) να λειτουργεί σαν πιστόνι – δίσκος ακτίνας a (m). Η διέγερση της κίνησης του διαφράγματος είναι το ρεύμα στο πηνίο «φωνής» (κινητό πηνίο). Το πηνίο, το οποίο αναρτάται και κεντράρεται από ένα δακτυλιοειδές σύστημα ελατηρίων ανάρτησης, κινείται σε συγκεκριμένες διαμήκεις διαδρομές μέσα στο διάκενο που σχηματίζει ένας ισχυρός μαγνήτης ο οποίος έχει κυλινδρικό σχήμα. Το πηνίο συνδέεται σταθερά με το κέντρο του κώνου, του οποίου η περίμετρος προσκολλάται στο πλαίσιο στήριξης μέσω ενός ελαστικού δακτυλίου (αποσβεστήρα). Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο τροφοδοτείται από τον ενισχυτή και το οποίο διαρρέει το πηνίο, παράγει ένα πεδίο σε κάθετη διεύθυνση με αυτό του μαγνήτη, η δύναμης έλξης και απώθησης που παράγουν τα πεδία αυτά, έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση του πηνίου προς την διαμήκη διεύθυνση (μπρος – πίσω), με την στιγμιαία συχνότητα που μεταφέρεται από το ηλεκτρικό σήμα.



Σχήμα 5.4: τυπική διάταξη ηχείου με 2 μεγάφωνα διαφορετικών συχνοτικών περιοχών (ηχείο 2 δρόμων). (α) διάταξη παθητικού cross-over, (β) διάταξη ενεργού cross-over

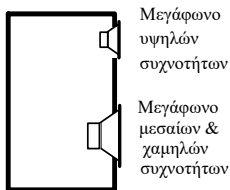
Με τον ίδιο τρόπο κινείται και ο κώνος με αποτέλεσμα την παραγωγή του ακουστικού κύματος. Για τεχνικούς λόγους, ένα μεγάφωνο δεν μπορεί να αποδώσει μόνο του ολόκληρη την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στον συνδυασμό μεγαφώνων, συνήθως δύο ή τριών, τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές, που τροφοδοτούνται από κατάλληλα φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων (**Σχήματα 5.3** και **5.4**). Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις, 2 ή περισσότερα μεγάφωνα ίδιας περιοχής (δρόμου) μπορεί να λειτουργούν συμφασικά έτσι ώστε να πολλαπλασιάζεται το ακουστικό κέρδος στην συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή (π.χ. 2 ή περισσότερα μικρά μεγάφωνα χαμηλών / μεσαίων

συχνότητων). Έτσι, πρακτικά τα μεγάφωνα λειτουργούν σε ένα σύνθετο σύστημα, το σύστημα ηχείου.

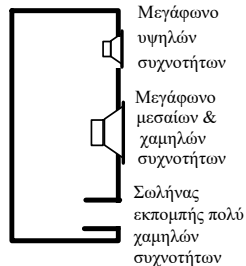


Σχήμα 5.5: μερικοί τύποι οικιακών και επαγγελματικών ηχείων που χρησιμοποιούν ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

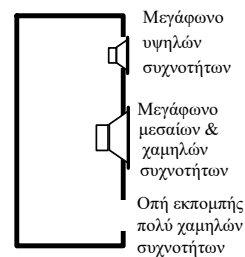
**Κλειστού τύπου
(closed box)**



**Ανάκλασης χαμηλών
(bass reflex)**

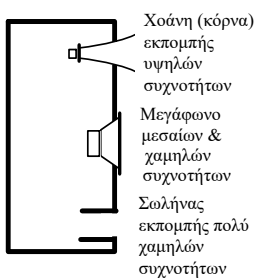


με σωλήνα (ducted port)

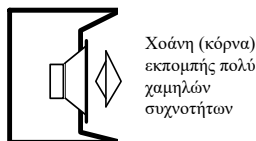
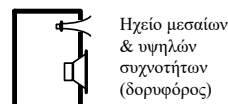


κατευθείαν ακτινοβολίας (vented box)

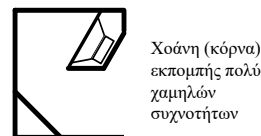
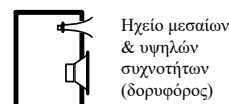
**Κόρνας υψηλών
(high frequency horn)**



**Πολλαπλών μονάδων με κόρνες χαμηλών & υψηλών
(low & high frequency horn)**



κόρνα τύπου W (W-bin)



διπλωμένη κόρνα (folded horn)

Σχήμα 5.6: διατομή των συνηθέστερων τύπων ηχείων

Το κιβώτιο (ηχείο) απομονώνει -στην περίπτωση ηλεκτροδυναμικών μεγαφώνων- την εκπομπή μεταξύ των δύο πλευρών του διαφράγματος, και μορφοποιεί για μια ορισμένη περιοχή συχνοτήτων τα σφαιρικά χαρακτηριστικά διάδοσης, ενώ συχνά συνδυάζεται και με ειδική χοάνη η οποία εκπέμπει σε περιορισμένη συχνοτική περιοχή και ακουστικά ενισχύει τη συγκεκριμένη περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή τα μπάσα (bass-reflex). Υπάρχουν πολλές διαφορετικές παραλλαγές του σχήματος του ηχείου και συνδυασμοί μονάδων μεγαφώνων και ηχείων και κόρνας, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 5.5** και **5.6**. Σε περιορισμένη κλίμακα και σε οικιακές εφαρμογές, εμφανίζονται και συστήματα μεγαφώνων – ηχείων τα οποία δεν βασίζονται σε ηλεκτρο-δυναμικά μεγάφωνα (και δεν λειτουργούν σε κλειστά ηχεία), αλλά χρησιμοποιούν μεγάφωνα ηλεκτροστατικού, μαγνητοστατικού τύπου ή και

ταινίας (ribbon), συχνά σε διπολικές (δηλ. με ακτινοβολία εμπρός-πίσω) και υβριδικές υλοποιήσεις (δηλ. σε συνδυασμούς διαφορετικών τύπων μεγαφώνων, **Σχήμα 5.7**).



Σχήμα 5.7: μερικοί τύποι οικιακών ηχείων που χρησιμοποιούν ηλεκτροστατικά, μαγνητοστατικά μεγάφωνα και μεγάφωνα ταινίας.

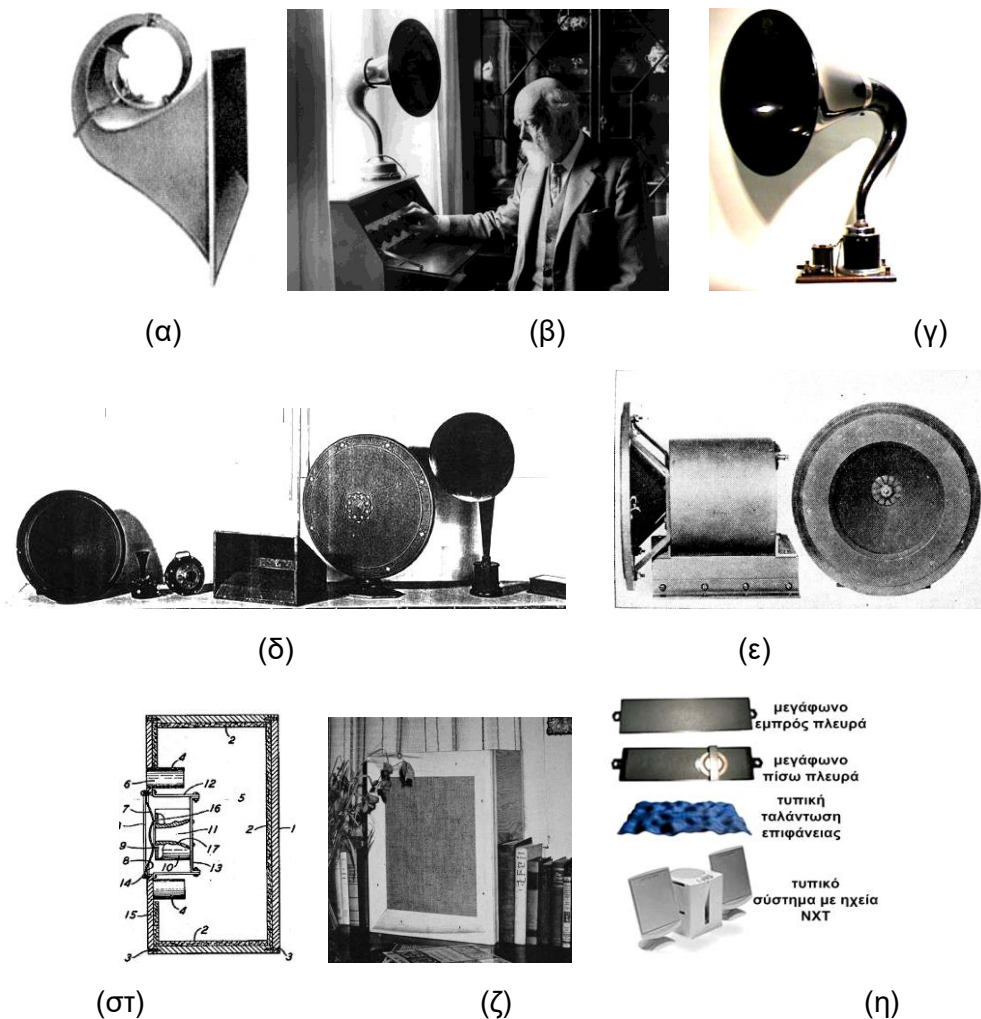
Όπως συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 3, το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο αποτελεί το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο σύστημα Η/Α μετατροπής και έχει μία παρουσία πάνω από 100 χρόνια (δες και επόμενη παράγραφο), με τα βασικά χαρακτηριστικά να παραμένουν σχετικά αναλλοίωτα αλλά με μικρές βελτιώσεις σε σχέση με την χρήση καλύτερων υλικών (για τους κώνους των μεγαφώνων, τους μαγνήτες, τα πηνία, κλπ.), όσο και λόγω σχεδιαστικής βελτιστοποίησης. Έτσι, παρ' όλη τη σχετικά μικρή διαφοροποίηση των μεγαφώνων στα χρόνια αυτά, λόγω της συνεχούς εξέλιξης, μπορεί να παρατηρηθεί ανά δεκαετία μια συνεχής βελτίωση των χαρακτηριστικών των συστημάτων αυτών. Για παράδειγμα, η περιοχή απόκρισης συχνότητας αυξήθηκε από 100 – 1000 Hz (-6 dB έως + 6 dB) για σύστημα της δεκαετίας του '60, σε 50 – 18000 Hz (-3 dB έως +3 dB) για ένα σύστημα της δεκαετίας του '70 με ταυτόχρονη ελάττωση του όγκου του ηχείου από 50 - 100 λίτρα, σε έναν τυπικό όγκο 35 λίτρων, με ταυτόχρονη όμως ελάττωση της ευαισθησίας του μετατροπέα. Παρ' όλες όμως τις προσπάθειες, η τελική απόδοση τέτοιων συστημάτων παραμένει ένας συνδυασμός πολύπλοκων παραμέτρων, οι οποίες συχνά σχετίζονται με την ακουστική και την ψυχοακουστική, έτσι ώστε η τελική τους αξιολόγηση να εμπίπτει σε κάποιο βαθμό στο είδος της μουσικής που αναπαράγουν, τον χώρο μέσα στον οποίο λειτουργούν και στα αισθητικά και υποκειμενικά κριτήρια του ακροατή.

5.2 Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο σύστημα ηλεκτροδυναμικού κινητήρα με κινητό κυκλικό πηνίο, το οποίο μπορούσε να κινηθεί μέσα σε μόνιμο μαγνητικό πεδίο, παρουσιάστηκε από τον Ernst W.Siemens το 1874, ο οποίος και πατεντάρισε την μέθοδο στις ΗΠΑ, όχι όμως για ηλεκτροακουστική μετατροπή. Μία τέτοια πατέντα προήλθε από τον Alexander Bell το 1876, για το σύστημα που χρησιμοποιούταν στο τηλέφωνο. Μεταγενέστερη πατέντα του Siemens (1878) περιέγραψε την χρήση κόρνας, μέθοδος που ακολουθήθηκε σε όλα τα αρχικά συστήματα Η/Α μετατροπής. Ο Oliver Lodge το 1889, επέτυχε σημαντικές βελτιώσεις στο ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο, που με βάση και τις προσθήκες των Jensen και Pridham, απετέλεσε την βάση του εμπορικού προϊόντος Magnavox στις πρώτες δεκαετίες του 1900.

Περίπου στα 1915, ο Harold Arnold εργαζόμενος στα Bell Labs εξέλιξε ενισχυτές οι οποίοι σε συνδυασμό με τα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα απετέλεσαν στην βάση στην ανάπτυξη των ραδιοφωνικών δεκτών. Παρ' όλα αυτά οι αρχές κατασκευής του μεγαφώνου όπως είναι και σήμερα γνωστές, θεωρείται ότι τέθηκαν από τους Chester W.Rice και Edward W.Kellog γύρω στο 1925 όταν αυτοί εργαζόταν στην General

Electric. Το 1926, η RCA χρησιμοποίησε το megάφωνο (και ενισχυτή) των Rice & Kellogg στο ραδιόφωνο Radiola, που διατέθηκε ευρύτατα στην αγορά.



Σχήμα 8: (α) megάφωνο Siemens (1874, 1878), (β) Oliver Lodge και megάφωνο (1889), (γ) Magnavox (1915), (δ) megάφωνα της Bell (1876-1919), (ε) megάφωνο Rice & Kellogg (1925), (στ) πατέντα για ηχείο bass reflex του Thuras (1930), (ζ) ηχείο «ακουστικής ανάρτησης» AR-1 (1957), (η) ηχεία NXT (1996) που χρησιμοποιούν ηλεκτροδυναμικό κινητήρα για τη διέγερση ειδικής επιφάνειας η οποία δονείται αλλά δεν μετακινείται.

Η επέκταση της χρήσης του ραδιοφώνου έδωσε σημαντική ώθηση στην βιομηχανική παραγωγή megάφωνων σε μεγάλη κλίμακα, ενώ στις επόμενες δεκαετίες, βελτιώσεις εμφανίστηκαν κυρίως στις μεθόδους κατασκευής και τα υλικά τους. Το 1930 ο Albert L.Thuras από τα Bell Labs, πατεντάρισε το σύστημα εκπομπής χαμηλών συχνοτήτων "bass reflex", ενώ το 1931, από το ίδιο εργαστήριο, ο H.A.Frederick εισήγαγε τη χρήση φίλτρων (cross-over) στο σχεδιασμό ηχείου 3 δρόμων. Στις δεκαετίες του '30 και '40, εξέλιξη των συστημάτων αυτών πραγματοποιήθηκε και για εφαρμογές κάλυψης κινηματογραφικών αιθουσών ή μεγάλων ανοιχτών χώρων. Το 1954, ο Edgar Villchur περιέγραψε τη χρήση «ακουστικής ανάρτησης», για την βελτιστοποίηση της απόκρισης σε χαμηλές συχνότητες από κλειστά ηχεία μικρού σχετικά όγκου (Acoustic Research AR-1), τεχνική που χρησιμοποιείται ευρύτατα και στις μέρες μας. Το 1996, η εταιρία Verity Group, με βάση πατέντα του Ken Heron

(από το 1991), προχώρησε την κατασκευή επίπεδων ηχείων (NXT) τα οποία χρησιμοποιούν ειδικό στοιχείο εκπομπής τύπου “Distributed Mode Loudspeakers, DML”, το οποίο συνήθως οδηγείται σε ταλάντωση από ηλεκτροδυναμικό κινητήρα. Η επιφάνεια αυτή δεν κινείται μπρος-πίσω όπως ένας συμπαγής κώνος, αλλά δονείται και ταλαντώνεται με ένα σύνθετο τρόπο, ώστε να διεγείρει το ακουστικό μέσο. Το **Σχήμα 5.8** παρουσιάζει ενδεικτικές εικόνες από τις παραπάνω τεχνικές και συστήματα. Σε όλα αυτά τα χρόνια, σημαντική εργασία έχει γίνει και στην ανάλυση, κατανόηση και βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των μεγαφώνων – ηχείων. Ενδεικτικά αναφέρεται η συνεισφορά των Hunt, Olson, Beranek στην περιγραφή των ισοδυνάμων κυκλωμάτων (δεκαετίες του '40 και '50), των Thiele / Small στην θεωρητική ανάλυση και παραμετροποίηση (δεκαετίες του '60 και '70), και του Klippel (δεκαετία '90) στην ανάλυση των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών της απόκρισής τους. Σημαντική ώθηση δόθηκε με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών μέτρησης της απόκρισης ηχείων (Bernam / Fincham) και των τεχνικών Laser (Adams) για τη μέτρηση της ταλάντωσης του κώνου. Μελλοντικές εξελίξεις ξεκινούν από τη χρήση φίλτρων ισοστάθμισης (Berkovitz, 1980) ή και των ψηφιακών φίλτρων (Clarkson / Mourjopoulos / Hammond, 1984) για την πλήρη εξάλειψη γραμμικών παραμορφώσεων στην επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων.

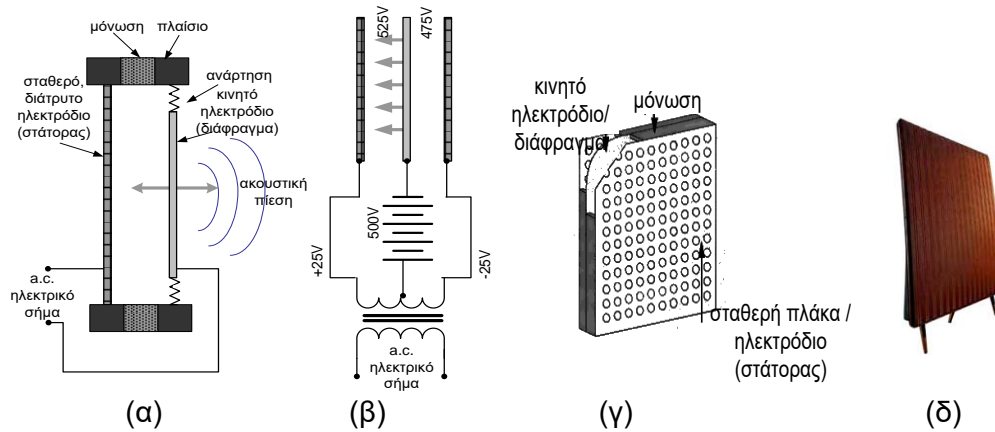
5.3 Τύποι μεγαφώνων

Τα **ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα** που αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές (δες και Κεφάλαιο 3), θα εξετασθούν αναλυτικότερα παρακάτω. Εδώ, θα περιγραφούν εν συντομία, μερικά ακόμη συστήματα μεγαφώνων, τα οποία είτε εμφανίζουν περιορισμένη εμπορική χρήση, είτε έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές διατάξεις.

5.3.1 Ηλεκτροστατικά μεγάφωνα

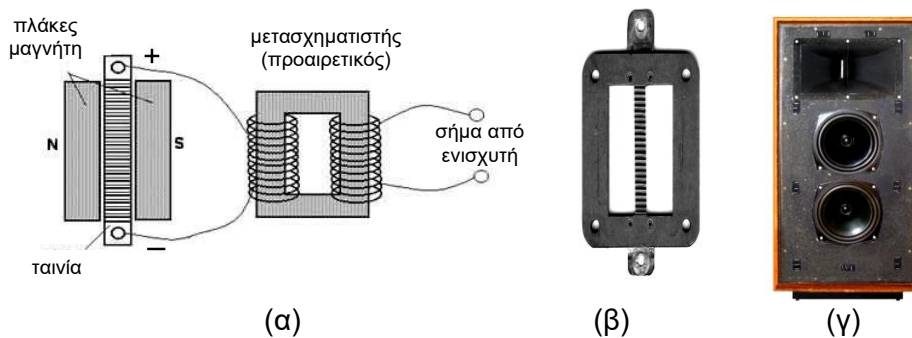
Τα μεγάφωνα αυτά χρησιμοποιούν στατική φόρτιση ενός πυκνωτή, για να αναπτύξουν μηχανικές δυνάμεις οι οποίες παράγονται από τα χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά φορτία τα οποία είναι ανάλογα του ηχητικού σήματος και τα οποία εφαρμόζουν στις πλάκες του. Συνήθως, μία επίπεδη και πολωμένη μεμβράνη (διάφραγμα) αναρτάται μεταξύ δύο παράλληλων και αγώγιμων διάτρητων πλακών (για να μπορεί να τις διαπερνά το ακουστικό κύμα), στις οποίες εφαρμόζει ηλεκτρική τάση κατάλληλα διαμορφωμένη από το (χρονικά μεταβαλλόμενο) ηχητικό σήμα. Ανάλογα με το σήμα αυτό, το διάφραγμα θα κινηθεί προς ή από τη μία πλάκα, με ταυτόχρονη μηχανο-ακουστική ζεύξη με τον αέρα και εκπομπή ηχητικού κύματος (**Σχήμα 5.9**). Η αμφίπλευρη ακουστική εκπομπή ακολουθεί διπολική ακτινοβολία.

Οι αρχές λειτουργίας των μετατροπών αυτών βασίζονται στην ηλεκτροδυναμική μετατροπή, αλλά χρησιμοποιούν γραμμικό και όχι δακτυλιοειδές πηνίο. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.10**, αποτελούνται από μία λεπτή ταινία αλουμινίου η οποία αναρτάται μεταξύ 2 πλακών μόνιμου μαγνήτη (αντίθετης πολικότητας) και η οποία με το πέρασμα μεταβλητού ρεύματος, κινείται και παράγει ηχητικό κύμα. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για χρήση σε μονάδες υψηλών συχνοτήτων (tweeter), **Σχήμα 5.10**.



Σχήμα 5.9: ηλεκτροστατικά συστήματα μεγαφώνων: (α) αρχή λειτουργίας για μία πλευρά, (β) ενδεικτική λειτουργία συστήματος 2 πλευρών (push-pull), (γ) διατομή συστήματος 2 πλευρών, (δ) εμπορικό σύστημα οικιακού ηλεκτροστατικού ηχείου.

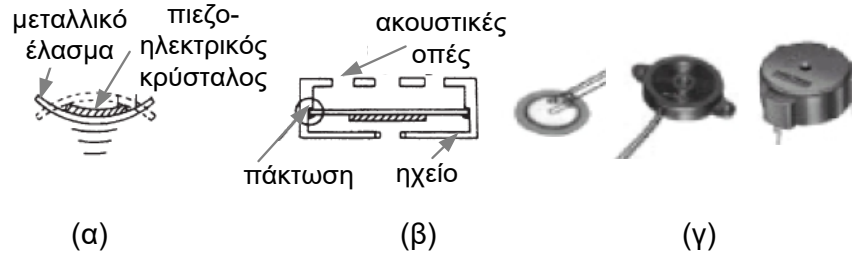
5.3.2 Μεγάφωνα ταινίας (ribbon)



Σχήμα 5.10: (α) αρχή λειτουργίας μεγαφώνου ταινίας, (β) πρακτικό σύστημα για tweeter και (γ) χρήση σαν tweeter σε ηχείο 2 δρόμων

5.3.3 Πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα

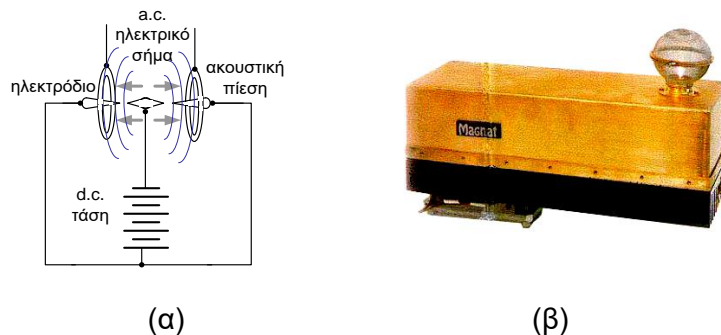
Διάφορα κρυσταλλικά υλικά (quartz, κρύσταλλοι Rochelle, κλπ.), έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν μηχανικό σχήμα, όταν σε αυτά εφαρμόσει ηλεκτρική τάση, ενώ και η αντίστροφη λειτουργία τους είναι εφικτή, δηλαδή της παραγωγής ηλεκτρικού σήματος όταν αυτά συμπιεστούν μηχανικά. Για την υλοποίηση μεγαφώνων, οι κρύσταλλοι αυτοί εδράζονται σε μεταλλικά ελάσματα, τα οποία και είναι ευπαθή σε μηχανική παραμόρφωση (**Σχήμα 5.11(α)**). Για ενίσχυση της παραγόμενης ηχητικής πίεσης και κατάλληλης διαμόρφωσης της απόκρισης, τα ελάσματα προσαρμόζονται σε ηχεία, με σύστημα ακουστικών συντονιστών/οπών (**Σχήμα 5.11(β)**). Τα πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα παράγουν υψηλές στάθμες, αλλά η απόκριση τους εμφανίζει κλίση προς τις υψηλές συχνότητες και αποκοπή στις χαμηλές, έτσι ώστε να μπορούν να εκπέμπουν και σε υπερηχητικές συχνότητες.



Σχήμα 5.11: (α) αρχή λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού μεγαφώνου, (β) τομή πιεζοηλεκτρικού μεγαφώνου / ηχείου και (γ) τυπικά εμπορικά συστήματα.

5.3.4 Μεγάφωνα ιονισμού

Όπως είναι γνωστό, όταν εφαρμόζεται επαρκής τάση σε αγωγό μικρής ακτίνας (ακίδα), τότε μπορεί να παραχθεί στο αέριο που περιβάλλει τον αγωγό μία ηλεκτρική εκκένωση (εκκένωση κορόνας). Η εκκένωση αυτή συνοδεύεται από οπτικά, χημικά, αεροδυναμικά, ραδιοηλεκτρικά και ακουστικά φαινόμενα. Τέτοιοι μετατροπείς (Corona Wind Loudspeakers, CWLS), χρησιμοποιούν δύο ηλεκτρόδια, το ένα επίπεδο και το άλλο τύπου ακίδας, τοποθετημένα σε απόσταση εκατοστών μεταξύ τους τα οποία με την παραγωγή ανέμου λόγω της εκκένωσης, εκπέμπουν ένα ακουστικό κύμα. Στην πράξη, η τοποθέτηση ενός δακτυλίου γύρω από την ακίδα, και η χρήση 2 ακίδων σε διάταξη push-pull, μπορεί να βελτιστοποιήσει την εκπομπή, η οποία και ενισχύεται με την ανάπτυξη πολλών τέτοιων ζευγών ακίδων σε μορφή οθόνης (**Σχήμα 5.12**).

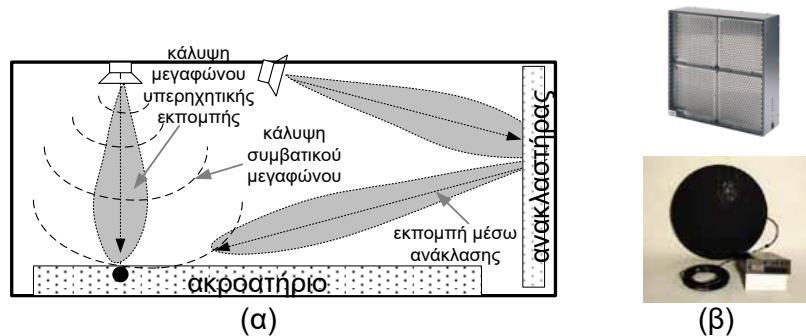


Σχήμα 5.12:(α) αρχή λειτουργίας μεγάφωνου ιονισμού (Corona), (β) εμπορικό σύστημα

5.3.5 Μεγάφωνα υπερηχητικής εκπομπής

Σε διάφορες εφαρμογές (ιατρικές, απώθησης επιβλαβών ζώων, κλπ.), χρησιμοποιούνται μεγάφωνα που εκπέμπουν ισχυρά σήματα σε υπερηχητικές συχνότητες (πάνω από τα 20 KHz). Είναι όμως δυνατό, τέτοια σήματα να παράγουν και ήχο στην ακουστή περιοχή συχνοτήτων, όπως σε συστήματα «παραμετρικών συστοιχιών» (parametric arrays), που από την δεκαετία του '40 χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε εφαρμογές υποβρύχιας ακουστικής. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, το ελαστικό μέσο διάδοσης του ήχου (αέρας, νερό) έχει την ιδιότητα της αποδιαμόρφωσης υπερηχητικών ακουστικών σημάτων τα οποία εμφανίζουν ηχητική πληροφορία συνδυασμένη με υπερηχητικό σήμα φορέα. Στην πράξη, ένα ισχυρό ημιτονοειδές σήμα γύρω στο 40 KHz χρησιμοποιείται σαν φορέας, στο οποίο διαμορφώνεται κατά πλάτος, η περιβάλλουσα του ηχητικού σήματος. Το αποδιαμορφωμένο ηχητικό σήμα, παρουσιάζει εξαιρετικά κατευθυντικά χαρακτηριστικά, όμοια εν πολλοίς με αυτά μίας δέσμης φωτός ("audio spotlight").

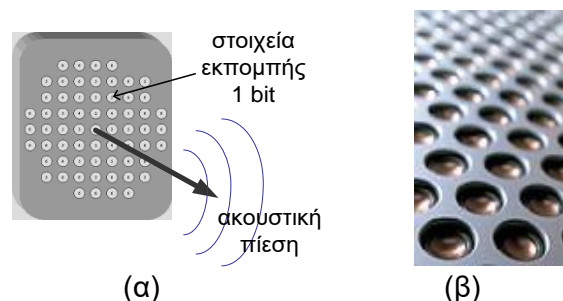
Έτσι, το σήμα από αυτά τα μεγάφωνα (τα οποία είναι συνήθως πιεζοηλεκτρικά), μετά από κατάλληλη ψηφιακή προεπεξεργασία, μπορεί είτε να καλύψει ένα αυστηρά καθορισμένο χώρο, ή και να χρησιμοποιηθεί μέσω ανάκλασης σε κάποια κατάλληλη επιφάνεια (**Σχήμα 5.13**).



Σχήμα 5.13: (α) χρήσεις μεγαφώνων υπερηχητικής εκπομπής, μέσω απ' ευθείας ακτινοβολίας ή μέσω ανάκλασης, (β) εμπορικά συστήματα.

5.3.6 Ψηφιακά μεγάφωνα

Είναι εφικτό το ηλεκτρικό ηχητικό σήμα που τροφοδοτεί το μεγάφωνο να μην είναι στη συνήθη αναλογική μορφή (συνεχούς χρόνου), αλλά να είναι διακριτού χρόνου, ψηφιακό PCM σήμα αποτελούμενο από διαδοχή δειγμάτων εμφανιζόμενα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, κάθε περίοδο δειγματοληψίας (π.χ. κάθε $1/44100$ sec για ήχο από CD) και με πλάτος που περιγράφεται από μία δυαδική σειρά ψηφίων (π.χ. 2^{16} bit για ήχο από CD). Τέτοια ηλεκτρικά σήματα είναι δυνατό επίσης να μετασχηματιστούν κατευθείαν σε ακουστικό σήμα, χωρίς τη μεσολάβηση Ψηφιο-αναλογικής μετατροπής, μέσα από τις διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω, π.χ. δεξ **Σχήμα 5.1**. Οι συνήθεις μεθοδολογίες που ακολουθούνται σε αυτή την περίπτωση είναι είτε η χρήση του συνήθους ηλεκτροδυναμικού κινητήρα που ακολουθεί το πλήρες πλάτος του ψηφιακού σήματος (ανά δείγμα), είτε η τροφοδοσία των δυαδικών ψηφίων που περιγράφουν το πλάτος σε κάθε δείγμα, σε μικρά μεγάφωνα, τα οποία πλέον λειτουργούν σαν διακοπτικά δυαδικά στοιχεία 1 bit και τα οποία αναπαράγουν (ανά δείγμα) σαν συνολική επιφάνεια, το ακουστικό σήμα (**Σχήμα 5.14**). Τα μεγάφωνα αυτή μπορεί να είναι είτε ηλεκτροδυναμικά, είτε πιεζοηλεκτρικά. Σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια λειτουργεί σαν συστοιχία με δυνατότητα επιλογής της συνάρτησης κατευθυντικότητας μετά από κατάλληλη ψηφιακή προεπεξεργασία του σήματος εισόδου.



Σχήμα 5.14: (α) αρχή λειτουργίας ψηφιακού μεγάφωνα, (β) εμπορικό σύστημα.

5.4 Ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα: σύνοψη σχέσεων ηλεκτρο – μηχανικο – ακουστικής σύζευξης

Για τα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα που θα εξετασθούν αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους, θα πρέπει να γίνει αναφορά και στο **Κεφάλαιο 3**, όπου συζητήθηκαν οι βασικές ακουστικο – μηχανικο - ηλεκτρικές σχέσεις μετατροπής ενέργειας σε τέτοια συστήματα. Το **Σχήμα 5.15**, συνοψίζει τις σχέσεις που περιγράφουν την εμπέδιση και τα υπόλοιπα χρήσιμα ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστικά μεγέθη σε ένα τέτοιο μεγάφωνο. Οι βασικές σχέσεις μεταξύ αυτών των μεγεθών με βάση αυτά που συζητήθηκαν και στο Κεφάλαιο 3, είναι:

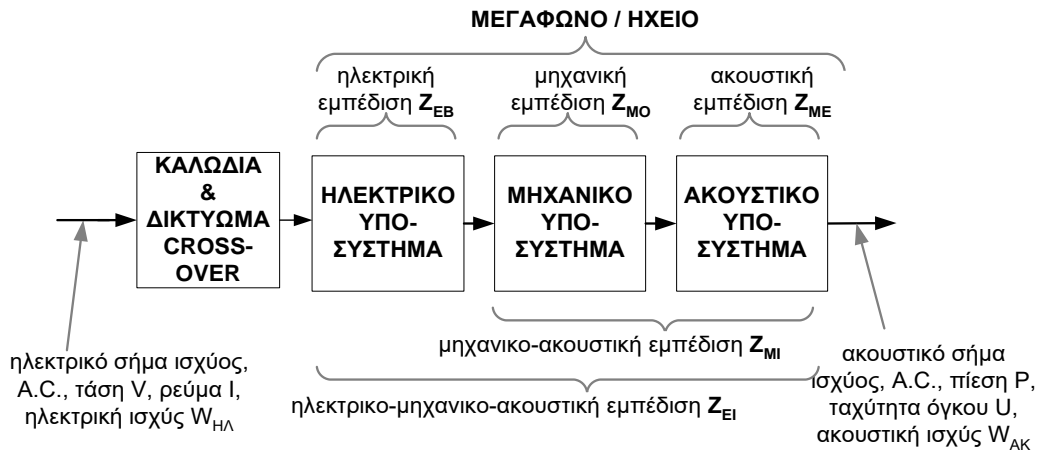
$$\begin{aligned}
 \text{Ηλεκτρική εμπέδιση πηνίου:} & \quad Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0 \\
 \text{Μηχανική εμπέδιση συστήματος (κώνος + πηνίο):} & \quad Z_{MO} = R_m + j(\omega m - \frac{k}{\omega}) \\
 \text{Ακουστική εμπέδιση κώνου:} & \quad Z_{ME} = R_{ME} + j\omega X_{ME} \\
 \text{Συνολική μηχανο-ακουστική εμπέδιση:} & \quad Z_{MI} = Z_{MO} + Z_{ME} \quad (5.1) \\
 \text{Συνολική ηλεκτρικο-μηχανο-ακουστική εμπέδιση:} & \quad Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MI}}, \quad T^2 = (Bl)^2
 \end{aligned}$$

$$\text{Σχέση ταχύτητας κίνησης, εμπέδισης και ηλεκτρικών παραμέτρων: } u = \frac{T \cdot I}{Z_{MI}}$$

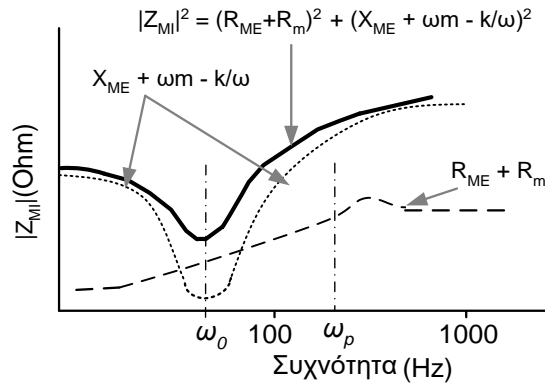
$$\text{Σχέση ακουστικής ισχύος, εμπέδισης και ταχύτητας όγκου: } W_{AK} = R_{ME} \cdot U^2 = R_{ME} \cdot u^2 \cdot S^2$$

Όπως έχει συζητηθεί και συνάγεται από τις παραπάνω σχέσεις, η συμπεριφορά του συστήματος (για χαμηλές συχνότητες), σχετίζεται με τη συχνότητα συντονισμού του μηχανικο-ακουστικού συστήματος εκπομπής (κώνος). Στα σχήματα αυτά δείχνεται ότι η ακουστική απόκριση εξαρτάται από τη **συχνότητα μηχανικού συντονισμού ω_0** και τη «**συχνότητα πιστονιού**» ω_p , θεωρώντας ότι ο κώνος προσομοιάζει συμπαγή δίσκο (πιστόνι) ακτίνας a (m), κάτι που στην πράξη ισχύει μόνο μέχρι κάποια μέγιστη συχνότητα πάνω από την οποία η ταλάντωση συντελεί στην παραμόρφωση του κώνου και συνεπώς στην παραγωγή ανομοιογενούς πίεσης. Στα ίδια σχήματα φαίνεται επίσης ότι μέχρι την συχνότητα ω_p το πραγματικό μέρος του ακουστικού φορτίου λειτουργεί περίπου σαν μάζα αέρα που επενεργεί στις 2 πλευρές του κώνου. Στην πράξη, το ακουστικό φορτίο όπως θα λειτουργήσει σε ένα μεγάφωνο στον αέρα ή και σε άπειρο αποσβεστήρα, θα μεταβάλει την αμιγώς μηχανική συχνότητα ω_0 , με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας μηχανο-ακουστικής συχνότητας συντονισμού ω'_0 , που όμως, όπως θα γίνει προφανές παρακάτω, δεν διαφέρει παρά λίγα rad/s (ή Hz) από την ω_0 . Δραστικές μεταβολές στην ω_0 εμφανίζονται μόνο όταν το μεγάφωνο τοποθετηθεί σε κάποιο κλειστό κουτί (ηχείο) σχετικά μικρού μεγέθους. Επιπλέον, είναι ήδη γνωστό ότι στο μηχανο-ακουστικό σύστημα και για επίτευξη σταθερής (με τη συχνότητα) απόκρισης κάτω από τη συχνότητα ω_p , η απομάκρυνση χ της ταλάντωσης του κώνου θα πρέπει σταθερά να αυξάνει όσο χαμηλώνει η συχνότητα. Έτσι, η αυξανόμενη αδυναμία του πεπερασμένου σε μέγεθος κώνου να αξιοποιήσει το φορτίο εκπομπής για παραγωγή ήχου (το R_{ME} μειώνεται κατά 12 dB/οκτ. κάτω από την ω_p), αντισταθμίζεται με την αύξηση της χ , ώστε να παράγεται σταθερή ακουστική πίεση και ισχύς στην περιοχή $\omega_0 < \omega < \omega_p$. Σε συχνότητες $\omega < \omega_0$, η επιτάχυνση ταλάντωσης (που ταυτίζεται με την πίεση) μειώνεται κατά -12 dB/οκτ. και έτσι μειώνεται και η παραγόμενη ακουστική πίεση. Η ακουστική ισχύς μειώνεται, αλλά με διπλάσιο ρυθμό, δηλαδή κατά 24 dB/ οκτ. Σε συχνότητες $\omega > \omega_p$, η αύξηση της μάζας και των μηχανικών παραμορφώσεων μειώνουν την εκπεμπόμενη (στον άξονα)

ακουστική ισχύ. Το **Σχήμα 5.17** συνοψίζει τις σχέσεις όλων των παραπάνω μεγεθών, που θα αναλυθούν σε λεπτομέρεια και παρακάτω.



Σχήμα 5.15: βασικά ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστικά μεγέθη σε μεγάφωνο / ηχείο.



Σχήμα 5.16: εξάρτηση μηχανο-ακουστικής εμπέδισης από τη συχνότητα.

5.5 Χαρακτηριστικά ηλεκτροδυναμικών μεγαφώνων

5.5.1 Ακουστικά χαρακτηριστικά

Η γενική απαίτηση από το στοιχείο ακουστικής εκπομπής είναι να συμπεριφέρεται με ομοιογενή τρόπο σε όλη του την επιφάνεια χωρίς να δημιουργεί αποκοπές ή συντονισμούς. Στην περίπτωση αυτή η θεωρητική ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος προσομοιάζει αυτήν ενός επιπέδου συμπαγούς δίσκου που συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 2. Εκεί δόθηκε ότι $Z_{\text{ΜΕ}} = P/U = -F/u$ (δες και **Σχήμα 5.18**), λαμβάνοντας υπ' όψη ότι $Z_{\text{ΜΕ}} = R_{\text{ΜΕ}} + jX_{\text{ΜΕ}}$, και θέτοντας φυσικές παραμέτρους:

$$Z_{\text{ΜΕ}} = \pi \cdot \rho \cdot c \cdot a^2 \left[1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right] + j \cdot 4 \cdot \rho \cdot c \cdot a^2 K_1(2ka)$$

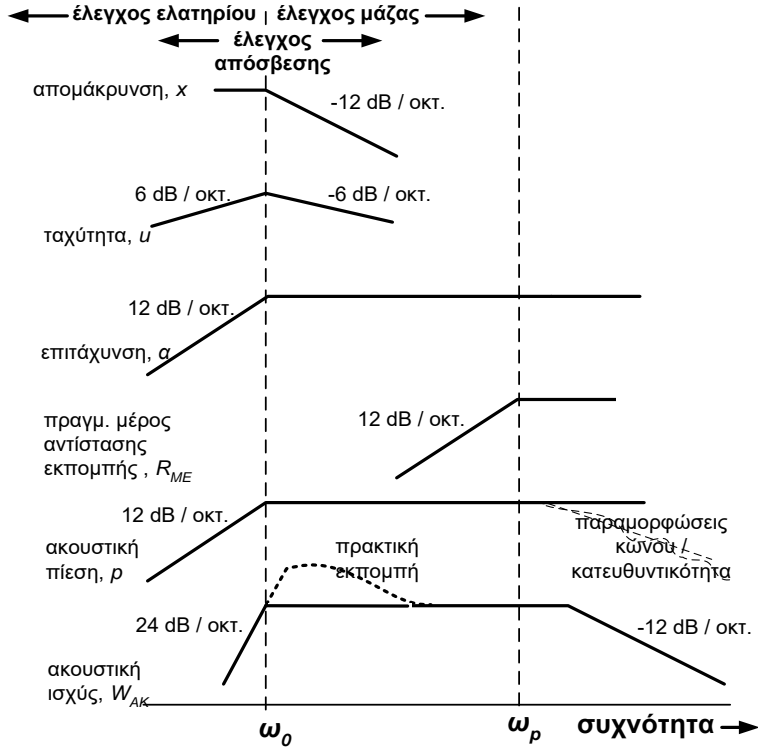
όπου $J_1(\)$ και $K_1(\)$ είναι συναρτήσεις Bessel, ρ (Kg/m^3) είναι η πυκνότητα του ελαστικού μέσου, c (m/s) είναι η ταχύτητα του ήχου, a (m) η ακτίνα του δίσκου και k ο κυματικός αριθμός. Από την συμπεριφορά των συναρτήσεων Bessel μπορεί να

δειχθεί ότι για χαμηλές συχνότητες ($ka \ll 1$): $Z_{\text{ΜΕ}} \approx 0,5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c \cdot a^4 \cdot k^2 + j \frac{8 \cdot \rho \cdot c \cdot k \cdot a^3}{3}$

ενώ για υψηλές συχνότητες ($ka \gg 1$): $Z_{\text{ΜΕ}} \approx \pi \cdot \rho \cdot a^2 + j \frac{2 \cdot \rho \cdot c \cdot a}{k}$ (5.2)

όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.19**. Απλοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, δείχνεται

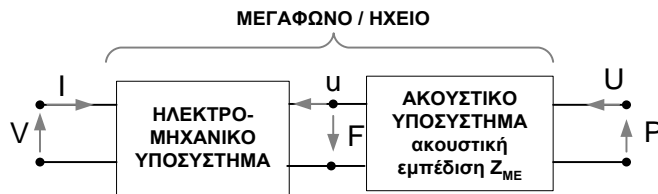
ότι το πραγματικό (ωμικό) μέρος της ακουστικής εμπέδωσης (R_{ME}) αυξάνει με τη συχνότητα μέχρι την τιμή $k\alpha=1$ με κλίση 12dB/οκτ, ενώ πάνω από αυτή την τιμή,



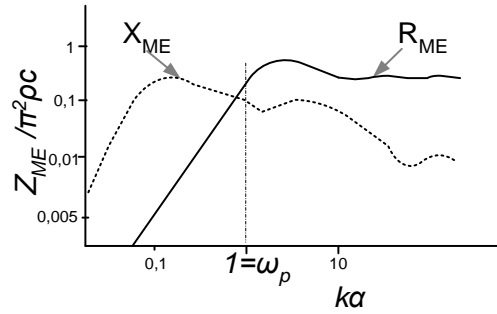
Σχήμα 5.17 Η απομάκρυνση x , ταχύτητα u , επιτάχυνση a , αντίσταση εκπομπής R_{ME} (πραγματικό μέρος της Z_{ME}), εκπεμπόμενη ακουστική πίεση p και ισχύς W_{AK} , ενός συμπαγούς δίσκου σε άπειρο αποσβεστήρα, που οδηγείται από σταθερή δύναμη. Το διάγραμμα αναπαριστά κατά προσέγγιση την μηχανικο-ακουστική συμπεριφορά του κώνου ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.

παραμένει περίπου σταθερή. Στο τμήμα που η R_{ME} αυξάνει (για $kR < 1$), μπορεί ναδειχθεί ότι η κλίση είναι για τον αέρα προσεγγιστικά ίση με:

$$R_{ME} = \frac{\pi \omega^2 a^4 \rho}{4c} \approx 2,4 \cdot f^2 \cdot a^4 \quad \text{Ns/m} \quad (5.3)$$



Σχήμα 5.18: βασικές σχέσεις μηχανικο-ακουστικής σύζευξης σε μεγάφωνα.



Σχήμα 5.19: σχέση μεγέθους / μήκους κύματος και ακουστικής εμπέδισης για ακουστική εκπομπή από συμπαγή δίσκο.

πάνω από την «συχνότητα πιστονιού» ($kR > 2$), η R_{ME} είναι ανεξάρτητη της συχνότητας, προσεγγιστικά ίση με:

$$R_{ME} \approx \pi \cdot \rho \cdot c \cdot a^2 \quad \text{Ns/m} \quad (5.4)$$

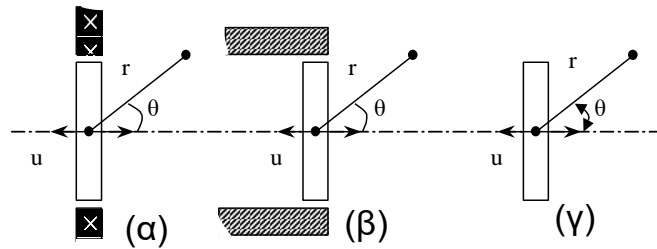
Το φανταστικό μέρος της ακουστικής εμπέδισης (X_{ME}), σε χαμηλές συχνότητες ($kR < 1$), ισοδυναμεί με το φορτίο της μάζας αέρα (πάχους 0,85 m) που κινείται από την επιφάνεια του δίσκου, δηλαδή:

$$X_{ME} \approx 0,85 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \rho \cdot a \quad \text{Ns/m} \quad (5.5)$$

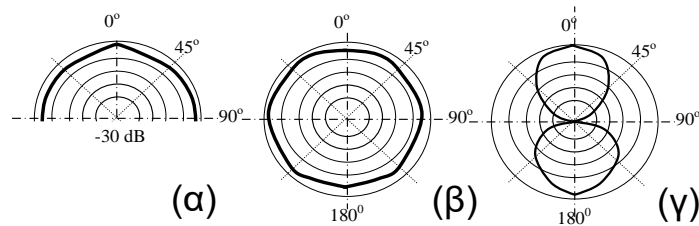
Η ακουστική εκπομπή ενός τέτοιου δίσκου στην πράξη θα είναι αποτέλεσμα είτε: (α) της προσαρμογής του σε «άπειρο αποσβεστήρα» («μπάφλα»), (β) λειτουργίας του σε ηχείο με περιορισμένες διαστάσεις μπάφλας, (γ) λειτουργίας του χωρίς άλλη ακουστική υποστήριξη, εκπέμποντας σαν δίπολο (δες **Σχήμα 5.20**). Από το **Κεφάλαιο 2**, είναι γνωστό ότι η πίεση που παράγει ένα τέτοιο σύστημα είναι συνάρτηση της απόστασης r και της γωνίας θ , που οδηγεί στο γνωστό ορισμό της συνάρτησης κατευθυντικότητας για κάθε μία περίπτωση. Προφανώς οι διαστάσεις του διαφράγματος καθορίζουν την κατευθυντικότητά του που στην περίπτωση (α) του **Σχήματος 5.20** εμφανίζει σε χαμηλές συχνότητες μία ιδανική εκπομπή ημισφαιρίου που στην πράξη προσεγγίζεται από ένα ηχείο με διαστάσεις μεγαλύτερες από ορισμένο μήκος κύματος, κάτω από το οποίο (δηλ. για χαμηλές συχνότητες) το σύστημα συμπεριφέρεται διακατευθυντικά (παντοκατευθυντικά). Στην περίπτωση (β) εμφανίζεται η προσέγγιση πιστονιού / δίσκου, που στην πράξη ισχύει για μικρά ηχεία με μεγάλα διαφράγματα (μεγάφωνα) όπου σε χαμηλές συχνότητες το ηχείο συμπεριφέρεται παντοκατευθυντικά. Στην περίπτωση (γ) εμφανίζεται ένας δίσκος σε ελεύθερο πεδίο με δικατευθυντική συμπεριφορά, που στην πράξη ισχύει μόνο για μερικά εμπορικά συστήματα όπως είναι τα ηλεκτροστατικά ηχεία, ή ηλεκτροδυναμικά / μαγνητοστατικά δίπολα ηχεία.

Τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά των μεγαφώνων αξιοποιούνται σε Η/Α εφαρμογές, ειδικά στο σχεδιασμό συστοιχιών μεγαφώνων για ηχεία που χρησιμοποιούνται σε **επαγγελματικές εγκαταστάσεις** μεγάλης κλίμακας (δες Σημειώσεις Η/Α II). Αντίθετα, σε **οικιακά συστήματα**, η βέλτιστη κάλυψη συγκεκριμένων θέσεων ακρόασης δεν είναι το ίδιο απαραίτητη ή επιθυμητή αλλά είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση της γωνίας κάλυψης των μεγαφώνων που αναπαράγουν χαμηλές συχνότητες (woofer) και τα οποία γενικά εμφανίζουν παντοκατευθυντική κάλυψη, σε αυτά που αναπαράγουν μεσαίες / υψηλές (tweeter), τα οποία είναι κατευθυντικά, γιατί αλλιώς θα παρουσιάζετο ανομοιογενής απόκριση

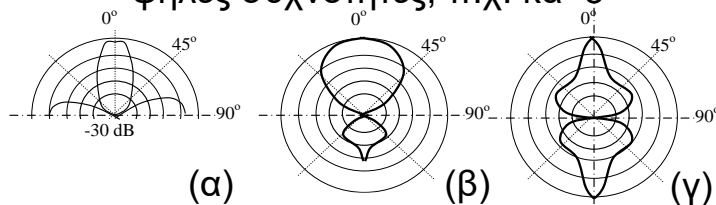
συχνότητας σε σχέση με τη θέση (γωνία / απόσταση) ακρόασης. Το θέμα αυτό θα συζητηθεί αργότερα, σε σχέση με τη λειτουργία των δικτυωμάτων cross-over.



χαμηλές συχνότητες, π.χ. $ka=1$

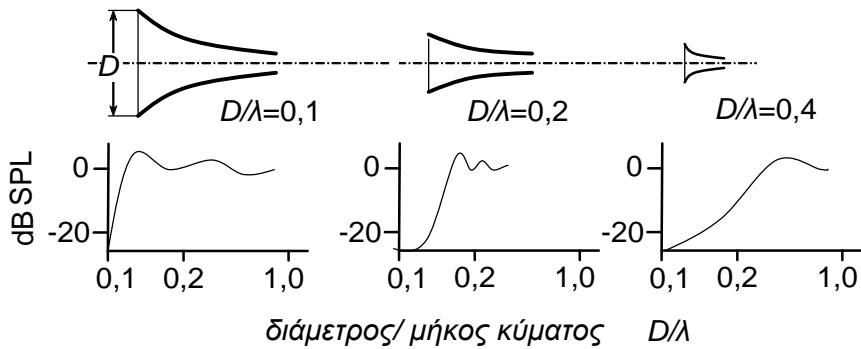


ψηλές συχνότητες, π.χ. $ka=5$



Σχήμα 5.20: τομή και κατευθυντικότητα συμπαγούς δίσκου που λειτουργεί σε: (α) «άπειρο αποσβεστήρα» (μπάφλα), (β) σε μπάφλα μικρών διαστάσεων, (γ) χωρίς μπάφλα για διαχωρισμό εμπρόςθιας – οπίσθιας εκπομπής.

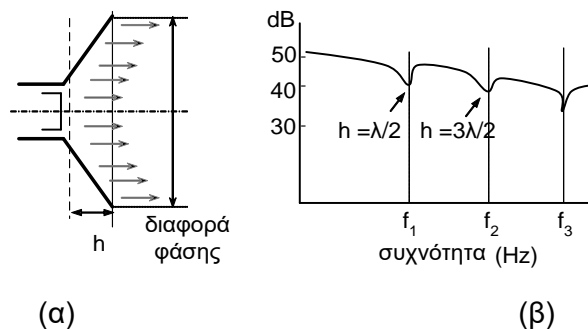
Μεγάφωνα με χοάνη τύπου «κέρατος» (κόρνας) χρησιμοποιούνται σε επαγγελματικά ηχοσυστήματα, κυρίως σε εφαρμογές ανοιχτού χώρου, λόγω του ότι εμφανίζουν αυξημένη Η/Α απόδοση και ελεγχόμενη κατευθυντικότητα (δες **Σχήματα 5.5** και **5.6**). Τα πλεονεκτήματα αυτά επιτυγχάνονται με την προσαρμογή κόρνας στην έξοδο του διαφράγματος, γεγονός που συντελεί στη κατάλληλη διαμόρφωση της σύνθετης αντίστασης εκπομπής, δηλαδή της Z_{ME} . Όπως είναι προφανές, αυξάνοντας την αντίσταση εκπομπής, η παραγόμενη ακουστική ισχύς (και άρα η απόδοση) από ένα συγκεκριμένο μεγάφωνο, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Η επιθυμητή συνάρτηση ακουστικής αντίστασης μπορεί υλοποιηθεί με κατάλληλη γεωμετρία της κόρνας και οι διαστάσεις και το σχήμα του κέρατος καθορίζουν την απόκριση του συστήματος (**Σχήμα 5.21**). Η συχνότητα αποκοπής του συστήματος είναι ανάλογη της διαμέτρου του στομίου της κόρνας (π.χ. για $f_c = 40$ Hz, η επιφάνεια πρέπει να είναι $5,9$ m²) και όπως είναι κατανοητό, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν απαγορευτικά μεγάλο όγκο όταν απαιτείται να αναπαράγουν χαμηλές συχνότητες. Έτσι, η χρήση κόρνας είναι συνηθέστερη σε μεγάφωνα υψηλών συχνοτήτων, ενώ σε πολλές χρήσεις εμφανίζεται συνδυασμός συστημάτων ηχείων με χοάνη χαμηλών συχνοτήτων (τύπου bass-reflex) και μεγαφώνων κόρνας για τις υψηλές και μεσαίες συχνότητες (**Σχήμα 5.6**), όπως θα συζητηθεί αναλυτικότερα και στην Ηλεκτροακουστική II. Σε τέτοια συστήματα παρουσιάζεται δυσκολία επίτευξης ομαλής απόκρισης συχνότητας, ενώ υπαρκτό είναι και το πρόβλημα της αυξημένης αρμονικής παραμόρφωσης.



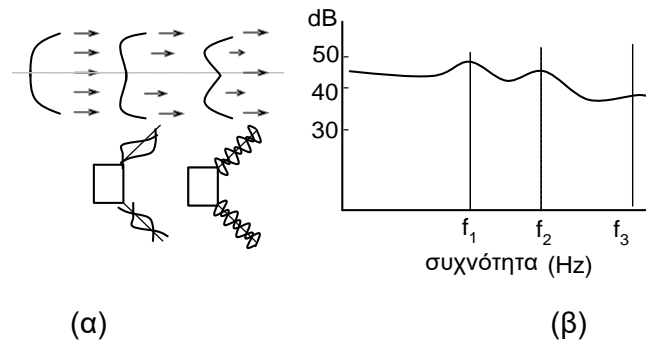
Σχήμα 5.21: τυπική τομή και απόκριση συχνότητας μεγαφώνων κώννας για διαφορετικές σχέσεις διαμέτρου στομίου (D) προς μήκος κύματος (λ).

5.5.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Στην πράξη, η λειτουργία του διαφράγματος ξεφεύγει από το ιδανικό μοντέλο του δίσκου, λόγω εμφάνισης μηχανικών παραμορφώσεων και συντονισμών, συνήθως σε υψηλές συχνότητες (όπου η πλευρά του κώνου γίνεται μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου και έτσι η πραγματική επιφάνεια εκπομπής μικραίνει). Γενικά η μηχανική συμπεριφορά του πρακτικού συστήματος εξαρτάται από τις διαστάσεις του, την ανάρτησή του, το σχήμα το και το υλικό κατασκευής του. Για την επίτευξη όσο το δυνατό μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής στις ταλαντώσεις, το ιδανικό σχήμα του δίσκου μετατρέπεται σε κωνικό σχήμα ισοδύναμης επιφάνειας. Το φαινόμενο της «αποκοπής» εμφανίζεται λόγω της διαφοράς φάσης που δημιουργείται από την εκπομπή από διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του κώνου (**Σχήμα 5.22**), εξαρτάται από το μέγεθος του και έχει σαν αποτέλεσμα την περιοδική παραμόρφωση της ακουστικής απόκρισης του συστήματος. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα με διάμετρο κώνου 300 mm, η κανονική λειτουργία χωρίς αποκοπή είναι μέχρι τα 500 Hz, ενός κώνου διαμέτρου 200 mm μέχρι τα 1000 Hz και ενός κώνου 25 mm μέχρι τα 10 kHz. Παρ' όλα αυτά, παραμόρφωση εμφανίζεται και λόγω των συντονισμών του σχήματος του κώνου σε σχετικά ψηλές συχνότητες (ως προς το μέγεθος του) (**Σχήμα 5.23**).

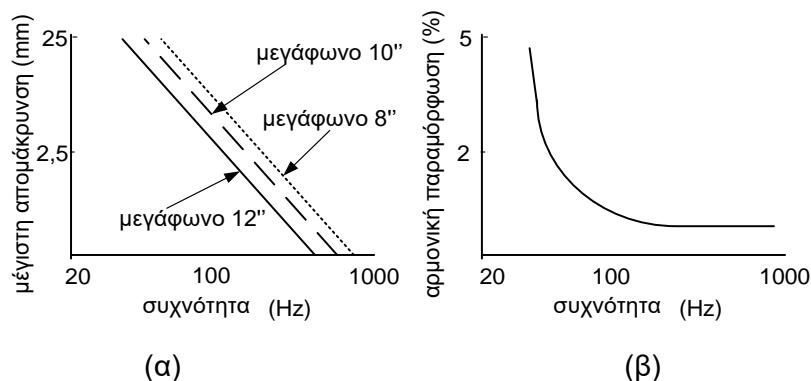


Σχήμα 5.22: αποκοπή στην απόκριση συχνότητας κώνου: (α) διαφορά φάσης λόγω γεωμετρίας του κώνου, (β) τυπική ακουστική απόκριση.



Σχήμα 5.23: παραμόρφωση στην απόκριση συχνότητας κώνου: (α) ενδεικτικός μηχανισμός παραμορφώσεων, (β) τυπική ακουστική απόκριση

Τα συστήματα συντονισμού που δημιουργούνται είναι συχνά πολύπλοκα και έχουν σαν αποτέλεσμα την ανομοιογενή απόκριση (**Σχήμα 5.23(β)**). Η σημασία του σχήματος του κώνου είναι επίσης σημαντική, αφού με περισσότερο κλειστή γωνία διαφράγματος επιτυγχάνεται καλύτερη μηχανική στερεότητα και μεγαλύτερη ταχύτητα εκπομπής, καθώς και αύξηση του ορίου αποκοπής. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα λειτουργεί σαν ιδανικός δίσκος, σε αντίθεση με ανοιχτές γωνίες κώνου (περίπου 180°), που έχουν όμως μικρή αντοχή σε παραμορφώσεις. Η ανάλυση της συμπεριφοράς ενός δονούμενου διαφράγματος επιτυγχάνεται με μετρήσεις των ταλαντώσεων με συσκευές laser. Η μηχανική απόσβεση της ανάρτησης είναι επίσης σημαντική, αφού ο συντελεστής ποιότητας $Q_m = \sqrt{k_T m / R_m}$ θα πρέπει να ρυθμίζεται κοντά το 0,5 για να επιτυγχάνεται κρίσιμη απόσβεση και η καλύτερη δυνατή συμπεριφορά σε μεταβατικά σήματα. Επιπλέον, η σκληρότητα του ελατηρίου της ανάρτησης θα πρέπει να επιτρέπει την γραμμική συμπεριφορά (δηλ. δράση ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης) σε συχνότητες κάτω από την συχνότητα μηχανικού συντονισμού ω_0 , μέχρι τα μέγιστα επιτρεπτά όρια διαδρομής του συστήματος, πέρα από όπου θα πρέπει να αποτρέπεται ταλάντωση για αποφυγή τόσο μηχανικής καταστροφής, όσο και δημιουργίας μη-γραμμικότητας από την υπέρβαση της ομοιογένειας του μαγνητικού πεδίου. Σημειωτέον ότι μεγαλύτερα μεγάφωνα απαιτούν μικρότερες διαδρομές για την παραγωγή ίσης ακουστικής ισχύος (**Σχήμα 5.24(α)**). Οι μη-γραμμικές παραμορφώσεις που παράγονται είναι συνδυασμός των μηχανικών και ηλεκτρικών παραμορφώσεων και επίσης εξαρτώνται και από το υλικό του κώνου, ειδικά σε περιπτώσεις που αυτό είναι από λεπτό χαρτόνι (**Σχήμα 5.24(β)**).

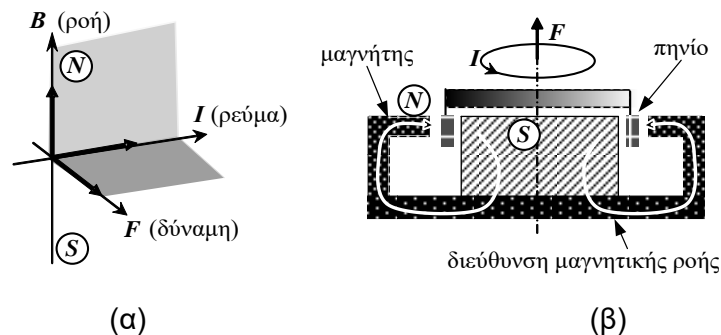


Σχήμα 5.24: (α) διαδρομές μεγαφώνων (peak – peak) διαφορετικού μεγέθους για αναπαραγωγή ημίτονου 1 Watt ακουστικής ισχύος (ανά πλευρά, σε άπειρη μπάφλα). (β) τυπική % THD για ηλεκτρική είσοδο 1 Watt.

5.5.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κινητήρας του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου αποτελείται από τον μόνιμο μαγνήτη (με εμπρός και πίσω καπάκι) και το πηνίο. Το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο τροφοδοτείται από τον ενισχυτή και το οποίο διαρρέει το πηνίο παράγει ένα πεδίο σε κάθετη διεύθυνση σε σχέση με αυτό του μαγνήτη και έτσι η δύναμη έλξης και απώθησης που παράγουν τα πεδία αυτά (ανάλογα με την φορά του A.C. ρεύματος), έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση του πηνίου προς την διαμήκη διεύθυνση (μπρος – πίσω). Η γνωστή θεωρητική αρχή της παραπάνω λειτουργίας φαίνεται στο **Σχήμα 5.25(α)**. Στην πράξη τα συστήματα αυτά δεν παρουσιάζουν την ιδανική γραμμική συμπεριφορά κυρίως λόγω της ανομοιογένειας της μαγνητικής ροής η οποία εμφανίζεται σε μεγάλες διαδρομές ταλάντωσης (τυπικά για χαμηλές συχνότητες και με μεγάλη ενέργεια εκπομπής), οπότε το πηνίο κινείται στα «άκρα της ροής» του μαγνήτη (δες **Σχήμα 5.25(β)**).

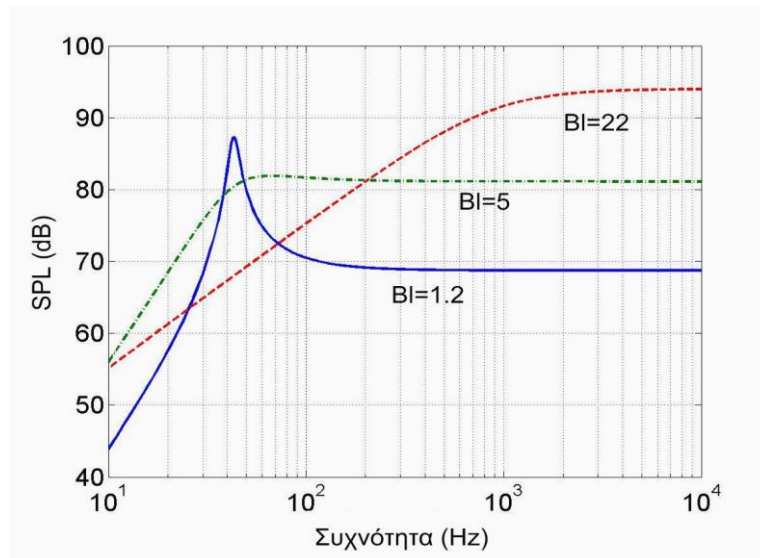
Σε τέτοιες συνθήκες παρουσιάζεται και σημαντική μεταβολή της τιμής του μεγέθους $(Bl)^2$, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη ισχύς από την πηγή (ενισχυτή), η οποία και προκαλεί μεγαλύτερη απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας, κ.ο.κ. Για να λυθεί το πρόβλημα είτε αυξάνεται η τιμή της σκληρότητας του συστήματος ανάρτησης, με ταυτόχρονη (ανεπιθύμητη) αύξηση της συχνότητας συντονισμού (π.χ. από τα 20 Hz στα 35 Hz), είτε διαμορφώνεται το μήκος του πηνίου, ώστε να το γινόμενο περιελίξεων X ροή να παραμένει σχετικά σταθερό στα άκρα του πεδίου. Το πηνίο παρουσιάζει ωμική και επαγωγική συμπεριφορά. Συνήθως ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της ωμικής τιμής R_0 , αλλά ταυτόχρονα απαιτείται και υψηλή τιμή Bl , που συνεπάγεται μεγάλο μήκος πηνίου, πιθανά μάλιστα σε περιορισμένο αριθμό περιελίξεων (λόγω προκαθορισμένου μήκους διαδρομής μέσα στον δακτυλιοειδή μαγνήτη), με αποτέλεσμα την απαίτηση για λεπτό σε διατομή αγωγό.



Σχήμα 5.25: (α) ιδανική σχέση δύναμης / ρεύματος σε γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό μετατροπέα. (β) τομή ηλεκτροδυναμικού κινητήρα με ενδεικτική παρουσίαση της διεύθυνσης δυνάμεων / ρεύματος.

Πέρα από την ανάγκη για συμβιβασμό στις αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις, μείωση της διατομής του αγωγού συνεπάγεται και αύξηση της πιθανότητας καταστροφής λόγω κοψίματος του ειδικά μετά από υπερθέρμανση από συνεχή λειτουργία σε υψηλές στάθμες ισχύος. Τα επαγωγικά χαρακτηριστικά των πηνίων, ειδικά σε υψηλές συχνότητες, δημιουργούν πολλά προβλήματα και για αυτό γίνεται συνεχής προσπάθεια ελάττωσής της με διάφορους μεθόδους (επικάλυψη, χρήση διπλών αναιρούμενων συστημάτων, κλπ). Η «ηλεκτρική δύναμη» του μεγαφώνου εξαρτάται από την ποσότητα Bl και η τιμή της καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την απόδοση του συνολικού συστήματος, όσο και την μορφή της απόκρισης συχνότητας στην περιοχή του μηχανο-ακουστικού συντονισμού. Στο **Σχήμα 5.26** φαίνεται η δραστική μεταβολή της ακουστικής απόκρισης, σε σχέση με το μέγεθος Bl , που με βάση τα

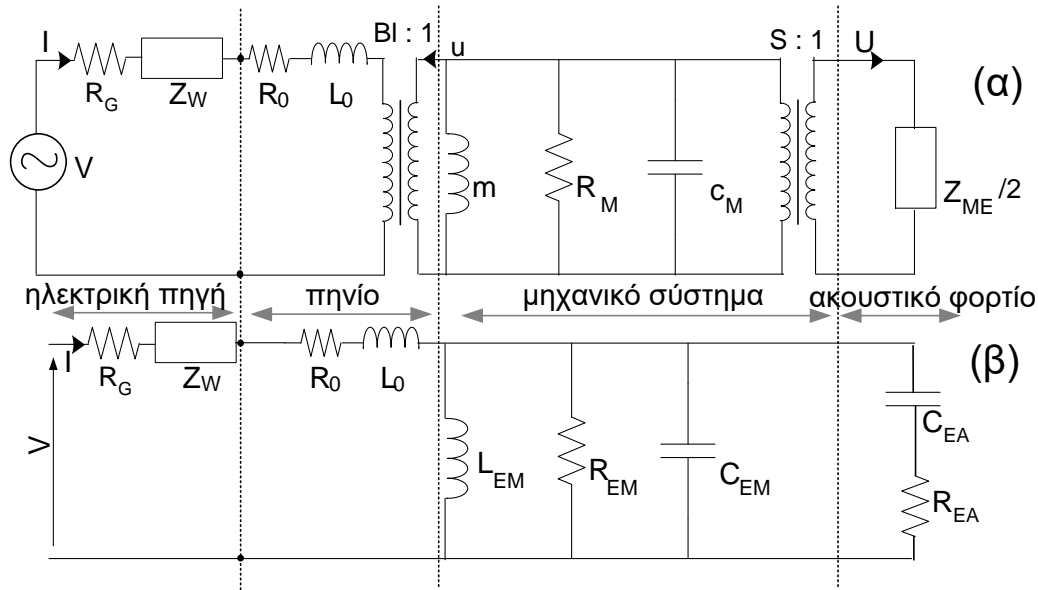
όσα συζητήθηκαν παραπάνω, εξαρτάται τελικά από το μέγεθος του μαγνήτη. Όπως φαίνεται, ο μεγαλύτερος μαγνήτης έχει ελαττώσει την στάθμη των χαμηλών συχνοτήτων στην συχνότητα συντονισμού και έχει αυξήσει κατά 20 dB περίπου τη στάθμη στις μεσαίες συχνότητες. Το αντίστροφο συμβαίνει για το μικρό μαγνήτη, που αυξάνει την στάθμη κυρίως μόνο στη συχνότητα συντονισμού, που επιπλέον δημιουργεί μεγάλη ανωμαλία στην απόκριση φάσης. Ο προφανής «χρωματισμός» σε συχνότητες γύρω από αυτή του συντονισμού συνοδεύεται από λιγότερη ενέργεια στις μεσαίες και χαμηλές συχνότητες. Ο σχεδιαστής θα προσπαθήσει να συνδυάσει τις απαιτήσεις σε απόκριση του συνολικού συστήματος με την επιλογή μεγαφώνου που πετυχαίνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του μαγνήτη/πηνίου/διαφράγματος. Επιπλέον, από τη σχέση της H/A απόδοσης που θα συζητηθεί αμέσως μετά, φαίνεται ότι αυτή αυξάνει με το Bl που υλοποιείται είτε με τη χρήση μεγαλύτερου μαγνήτη είτε με ελάττωση του διάκενου, είτε με την αύξηση του μήκους του πηνίου. Αλλά πάλι, συχνά αυτό δεν είναι δυνατό να συμβεί λόγω του μεγέθους που θα προέκυπτε για το τελικό σύστημα ή της μικρότερης ικανότητάς του να μεταφέρει το απαιτούμενο ρεύμα.



Σχήμα 5.26: εξάρτηση της απόκρισης συχνότητας ενός μεγαφώνου από την ποσότητα Bl .

5.6 Συνάρτηση μεταφοράς και απόδοση

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, ένα μεγάφωνο αποτελεί έναν ηλεκτρο – μηχανικό – ακουστικό μετασχηματιστή, ο οποίος μπορεί και να περιγραφεί από **ισοδύναμο κύκλωμα** το οποίο να περιλαμβάνει **συγκεντρωμένα στοιχεία (lumped element equivalent circuit)**, με τη γενική του μορφή να δίνεται στο **Σχήμα 5.27**. Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζονται και τα τμήματα της καλωδίωσης πηγής / μεγαφώνου (υπό μορφή της μιγαδικής αντίστασης του καλωδίου Z_w), καθώς και η αντίσταση εξόδου R_G της πηγής σταθερής τάσης (ενισχυτή). Όπως έχει ξανασυζητηθεί, η αντίσταση εκπομπής, εδώ παρουσιάζεται από τη μιγαδική αντίσταση Z_{ME} που όπως φαίνεται στην περίπτωση λειτουργίας είτε σε άπειρο αποσβεστήρα, είτε σε κλειστό ηχείο, η αντίσταση αυτή αντιστοιχεί στο μισό της συνολικής που θα παρουσίαζε ένα πιστόνι στο ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.27: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων στοιχείων ενός μεγαφώνου: (α) στάδια ηλεκτρικού – μηχανικού – ακουστικού μετασχηματισμού, (β) ισοδύναμο κύκλωμα για λειτουργία σε άπειρο αποσβεστήρα ή κλειστό ηχείο.

Με δεδομένη την επιφάνεια S (m^2) του πιστονιού ($S = \pi \alpha^2$) και με την συχνότητα ω_0 (rad/s) να δίνεται σαν $\omega_0 = \sqrt{1/c_M m}$, εάν το μεγάφωνο λειτουργεί σε κλειστό κουτί εσωτερικού όγκου V_B (m^3), τότε η συνολική δύναμη επαναφοράς k_{TOT} κατά την ταλάντωση θα αποτελείται από την σκληρότητα του ελατηρίου k , και την αντίσταση του αέρα από το κλειστό κουτί που λειτουργεί σαν ελατήριο σκληρότητας k_A , όπου $k_A = \rho c S^2 / V_0$ και συνεπώς $k_{TOT} = k + k_A$ (5.6)

Με βάση αυτό το κύκλωμα, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 3, η εκπεμπόμενη ακουστική ισχύς μπορεί να υπολογισθεί σαν την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται στην αντίσταση εκπομπής R_{EA} . Στις επόμενες παραγράφους θα δοθούν βασικές αναλυτικές σχέσεις που διέπουν την ηλεκτρο-μηχανο-ακουστική σύζευξη, με στόχο την εξαγωγή των γενικών συναρτήσεων μεταφοράς, της συνολικής αντίστασης και της απόδοσης του συστήματος, όλων σε σχέση με την συχνότητα.

(α) απόκριση συχνότητας

Με βάση το **Σχήμα 5.27**, η τάση $V(t)$ που παράγει ρεύμα $I(t)$ στην αντίσταση και το πηνίο και θα κινεί τον κώνο σε απομάκρυνση $x(t)$, λόγω της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης Bl , σύμφωνα με τη γνωστή σχέση:

$$V(t) = I(t)R_0 + Bl \frac{dx(t)}{dt} + L_0 \frac{dI(t)}{dt} \quad (5.7)$$

και στο πεδίο συχνότητας, με χρήση μετασχηματισμού Laplace (για αρμονική διέγερση $s \rightarrow j\omega$):

$$V(s) = I(s)R_0 + BlsX(s) + L_0 sI(s) \quad (5.8)$$

Επιπλέον, η σχέση της δύναμης Lorenz και της μηχανικής ταλάντωσης είναι:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + R_m \frac{dx(t)}{dt} + k_T x(t) = BlI(t) \quad (5.9)$$

Με συνδυασμό των εξισώσεων (5.8) και (5.9), προκύπτει:

$$X(s) \left[s^2 m + s \left(R_m + \frac{(Bl)^2}{L_0 s + R_0} \right) + k_T \right] = \frac{BlV(s)}{L_0 s + R_0} \quad (5.10)$$

από την παραπάνω σχέση, αγνοώντας την επαγωγή (που επενεργεί κυρίως σε ψηλές συχνότητες) και τα ρεύματα eddy, μπορεί να εξαχθεί η **συνάρτηση μεταφοράς απομάκρυνσης / τάσης** $H_x(s)$:

$$H_x(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{\frac{Bl}{R_0}}{s^2 m + s \left(R_m + \frac{(Bl)^2}{R_0} \right) + k_T} \quad (5.11)$$

για αποστάσεις «μακρινού πεδίου» από το μεγάφωνο (δίσκος σε άπειρο αποσβεστήρα), δηλαδή για $\alpha/r < c/\omega \alpha$, όπως έχει συζητηθεί, η παραγόμενη πίεση είναι ανάλογη της ογκομετρικής επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$p(t) = \frac{\rho S \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)}{2\pi r} \quad \text{και στο πεδίο συχνότητας} \quad P(s) = \frac{s^2 \rho S X(s)}{2\pi r} \quad (5.12)$$

από τις παραπάνω σχέσεις, αγνοώντας την αυτοεπαγωγή L_0 , μπορεί να εξαχθεί και η ζητούμενη **συνάρτηση μεταφοράς ηλεκτρικής τάσης / ακουστικής πίεσης** $H_p(s)$:

$$H_p(s) = \frac{P(s)}{V(s)} = \frac{\frac{Bl}{R_0} \frac{s^2 \rho S X(s)}{2\pi r}}{s^2 m + s \left(R_m + \frac{(Bl)^2}{R_0} \right) + k_T} \quad (5.13)$$

που μπορεί και να γραφεί, με την δράση της αντίστασης εκπομπής (για $s \rightarrow j\omega$) και σαν:

$$H_p(\omega) = \frac{P(\omega)}{V(\omega)} = \frac{(j\omega)^2}{\left\{ (j\omega)^2 m + j\omega \left(R_m + R_{ME} + \frac{(Bl)^2}{R_0} \right) + k_T \right\}} \frac{Bl}{R_0} \frac{a^2 \rho}{2r} \quad (5.14)$$

Ορίζονται τώρα οι κανονικοποιημένες ποσότητες (συντελεστές ποιότητας):

$$Q_e = \frac{R_0 \sqrt{k_{TOT} m}}{(Bl)^2} \text{ ηλεκτρικός, } Q_m = \sqrt{\frac{k_{TOT} m}{R_m}} \text{ μηχανικός, } Q_r = \sqrt{\frac{k_{TOT} m}{R_{ME}}} \text{ ακουστικός,}$$

$$Q_{mr} = \frac{Q_m Q_r}{Q_m + Q_r} \text{ συνολικός μηχανο-ακουστικός συντελεστής ποιότητας}$$

$$Q_T = \frac{m\omega_0}{R_m + R_{ME} + (Bl)^2 / R_0} \text{ συνολικός Η/Α συντελεστής ποιότητας} \quad (5.15)$$

Με βάση τις προηγούμενες σχέσεις (δες εξισώσεις (5.14) και (5.15)), η **συνάρτηση μεταφοράς ηλεκτρικής τάσης / ακουστικής πίεσης** $H_p(\omega)$, κανονικοποιώντας και ως προς τη συχνότητα συντονισμού, δίνεται σαν:

$$H_p(\omega) = \frac{(j\omega/\omega_0)^2}{(j\omega/\omega_0)^2 + (j\omega/\omega_0)Q_T^{-1} + 1} \left(\frac{Bl}{R_0} \frac{a^2 \rho}{2mr} \right) \quad (5.16)$$

Η σχέση (5.16), δείχνει καθαρά ότι η Η/Α συνάρτηση μεταφοράς (απόκριση συχνότητας) εξαρτάται από ένα (πρώτο) όρο με ανωδιαβατά χαρακτηριστικά και ένα (δεύτερο) όρο που εκφράζει μέσω του συνολικού συντελεστή ποιότητας Q_T , την ευαισθησία (σε σχέση με τη συχνότητα), η οποία όπως φαίνεται και από την σχέση (5.15) αυξάνει για συστήματα με μεγάλο μαγνήτη / διαστάσεις και μικρή μάζα / αντίσταση. Στην πράξη, όπως έχει ήδη συζητηθεί, οι παραπάνω απαιτήσεις (μεγάλος μαγνήτης, μεγάλο μήκος καλωδίου, χαμηλή μάζα, κλπ.) αποτελούν αντικείμενο συμβιβασμού από τον σχεδιαστή. Στη συχνότητα συντονισμού ($\omega = \omega_0$), εύκολα δείχνεται ότι:

$$H_p(\omega_0) = \frac{jQ_T Bl}{R_0} \frac{a^2 \rho}{2mr} \quad (5.17)$$

από όπου φαίνεται η εξάρτηση της απόκρισης από την τιμή του Bl , αλλά και από τον συντελεστή Η/Α ποιότητας Q_T . Όπως θα συζητηθεί αναλυτικότερα παρακάτω, η μορφή της απόκρισης στην συχνότητα συντονισμού, έχει συνέπειες στην συνολική ηχητική ποιότητα του μεγαφώνου.

Έτσι, η απόκριση συχνότητας (ηλεκτρική τάση / ακουστική πίεση) ενός μεγαφώνου (σε άπειρο αποσβεστήρα) έχει μορφή **ανωδιαβατού φίλτρου 2^{ης} τάξης (high-pass) με κλίση 12 dB/οκτάβα**. Ενώ το κριτήριο της απόδοσης σχετίζεται με την έννοια της ισχύος και συμπεριλαμβάνει το υψωμένο στο τετράγωνο μέτρο της συνάρτησης αυτής (όπως θα φανεί αμέσως μετά), πρέπει να σημειωθεί ότι η αίσθηση της ακοής, άρα και η υποκειμενική αξιολόγηση της απόκρισης ενός τέτοιου συστήματος, βασίζεται στην ακουστική πίεση. Συνεπώς η μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς τάσης – πίεσης $H(s)_p = |H_p(s)| \cdot e^{arg\{H_p(s)\}}$, $s=j\omega$ (σε μορφή μετασχηματισμού Laplace) είναι

καταλληλότερη για την εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς ενός τέτοιου μετατροπέα και αναφέρεται σαν η «απόκριση συχνότητας» ενός μεγαφώνου ή ηχείου (δες εργαστηριακή Άσκηση 3). Συχνά εξετάζεται μόνο το μέτρο της συνάρτησης με απαίτηση την σταθερή ομοιογενή του τιμή σε όλες τις ακουστικές συχνότητες. Παρ' όλα αυτά η απόκριση φάσης του συστήματος είναι εξίσου σημαντική, τόσο υποκειμενικά, όσο και επειδή η απόκριση πλάτους και φάσης, σχηματίζουν την κρουστική απόκριση του συστήματος, η οποία δείχνει την αντίδραση του συστήματος σε μεταβατικά σήματα. Άλλωστε, τα περισσότερα μουσικά σήματα εμφανίζουν έντονες μεταβατικές μεταβολές στο χρόνο και ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν κρουστά μουσικά όργανα. Η μεταβατική απόκριση του συστήματος, παρ' όλο ότι δεν αναλύεται εδώ, μπορεί εύκολα να εξετασθεί με την παραπάνω μεθοδολογία.

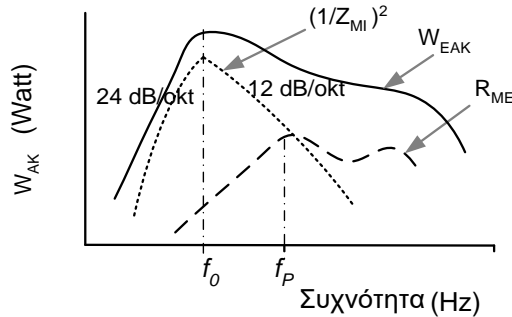
(β) ακουστική ισχύς

Η ακουστική ισχύς, μπορεί επίσης να υπολογισθεί με δεδομένη την επιφάνεια S (m²) του πιστονιού από τη σχέση:

$$W_{AK} = S^2 u^2(t) R_{ME} = S^2 \left(\frac{f(t)}{Z_{MI}} \right)^2 R_{ME} = S^2 \left(\frac{Bl i(t)}{Z_{MI}} \right)^2 R_{ME} \quad (5.18)$$

πού όπως δείχνει και το **Σχήμα 5.28**, εμφανίζει χαρακτηριστικά ζωνοδιαβατού φίλτρου. Είναι επιπλέον γνωστό, ότι η κατευθυντικότητα ενός συμπαγούς δίσκου στο ελεύθερο πεδίο και σε απόσταση r από την πηγή και σε οποιαδήποτε γωνία εκτός άξονα, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ακουστικής πίεσης /

ισχύος για υψηλές συχνότητες. Έτσι, πρακτικά η αποδιδόμενη ακουστική ισχύς, περιορίζεται τόσο στις χαμηλές, όσο και στις υψηλές συχνότητες, όπως στο σχήμα.



Σχήμα 5.28: συνάρτηση εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος από μεγάφωνο, σε σχέση με τη συχνότητα

(γ) εμπέδιση

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα του **Σχήματος 5.27**, φαίνεται ότι για αρμονικά σήματα, η δύναμη και η τάση σχετίζονται με τη σχέση:

$$f(t) = [R_m + j(\omega m + \frac{k_T}{\omega}) + Z_{ME}]V(t) \quad (5.19)$$

αγνοώντας το φανταστικό μέρος της αντίστασης εκπομπής, μπορεί εύκολα να εξαχθεί, ότι η **συνολική ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστική αντίσταση του μεγαφώνου, Z_{EI}** , δίνεται από τη (γνωστή) σχέση:

$$Z_{EI} = R_0 + j\omega L_0 + \frac{(Bl)^2}{(R_m + R_{ME}) + j(\omega m + \frac{k_{TOT}}{\omega})} \quad (5.20)$$

Η **μέγιστη τιμή της Z_{EI}** προκύπτει για $\omega = \omega_0$ και είναι:

$$Z_{EI}(\omega = \omega_0) = R_0 [1 + \frac{Q_{mr}}{Q_e}] \approx R_0 + \frac{(Bl)^2}{R_m} \quad (5.21)$$

από όπου φαίνεται η σημασία της τιμής του Bl για την αντίσταση, ειδικά κοντά στη συχνότητα συντονισμού.

(δ) απόδοση

Η απόδοση του συστήματος ορίζεται σαν ο λόγος της ακουστικής ισχύος που παράγεται ως προς την ηλεκτρική ισχύ που χρησιμοποιείται, δηλαδή $\eta = W_{AK} / W_{ΗΛ}$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να εξαχθεί και η προσεγγιστική σχέση για την **απόδοση του μεγαφώνου συναρτήσει της συχνότητας, $\eta(\omega)$** , σαν:

$$\eta(\omega) \approx \frac{(Bl)^2 R_{ME}}{R_0 |Z_{MI}|^2}, \text{ για } \omega_0 \ll \omega \ll \omega_\pi \text{ και } |Z_{MI}|^2 = (R_0 + R_{ME})^2 + \left(X_{ME} + \omega m - \frac{k_{TOT}}{\omega} \right)^2 \quad (5.22)$$

και αφού η ποσότητα Z_{MI} παρουσιάζει ελάχιστο στη συχνότητα συντονισμού (δες **Σχήμα 5.16**), η απόδοση εμφανίζει μέγιστο στην περιοχή αυτή. Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά και σαν:

$$\eta(\omega) \approx \frac{(Bl)^2 R_{ME}}{R_0 2\pi c m^2}, \text{ για } \omega_0 \ll \omega \ll \omega_\pi \quad (5.23)$$

που εύκολα δείχνει την εξάρτηση της απόδοσης από τον όρο Bl , κυρίως για συχνότητες εκτός της ω_0 . Επιπλέον, με δεδομένο ότι $(R_m + R_{ME}) \ll (Bl)^2 / R_0$, στην συχνότητα συντονισμού δείχνεται ότι η απόδοση εξαρτάται λιγότερο από τον όρο Bl , αλλά μεγαλώνει όσο μικραίνει η τιμή της μηχανικής απόσβεσης:

$$\eta(\omega_0) \approx \frac{R_{ME}}{R_m + R_{ME}} \quad (5.24)$$

Για ένα επίπεδο κύμα με ένταση $I = P^2 / \rho c$ και ακουστική ισχύ $W_{AK} = 2\pi r^2 I = 2\pi r^2 P^2 / \rho c$, εύκολα δείχνεται ότι η παραγόμενη ηχοστάθμη dB-SPL ή L_p , ισούται με:

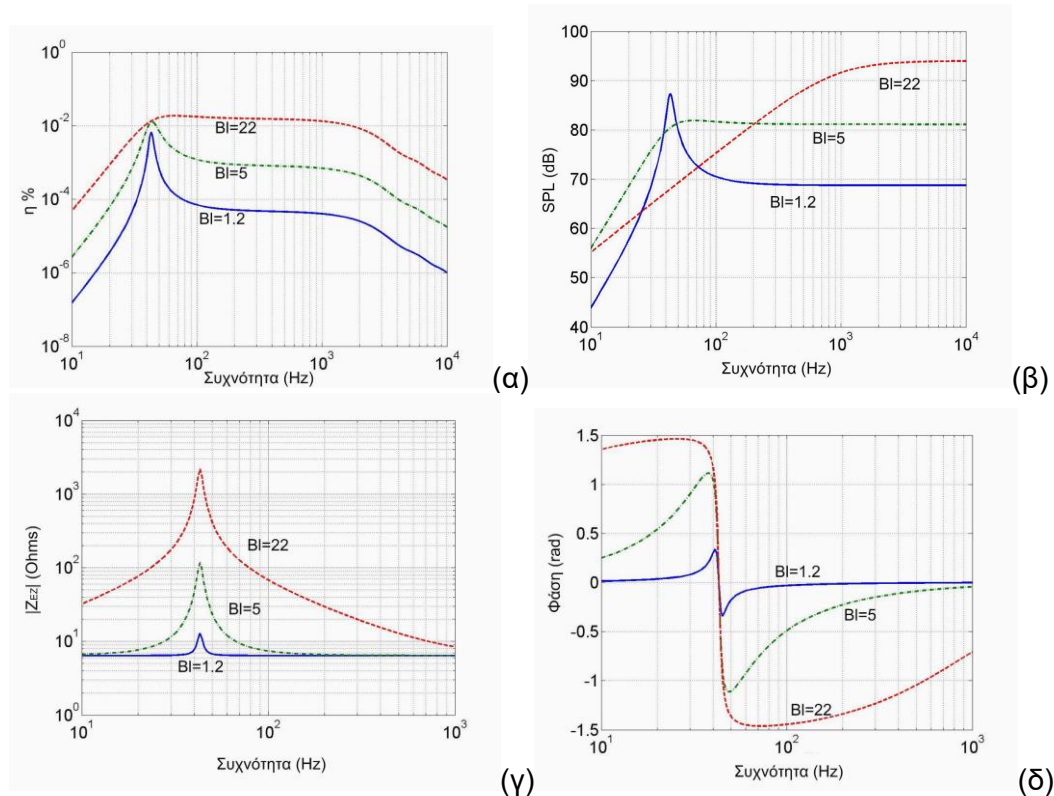
$$L_p = 20 \log \left(\frac{\sqrt{\frac{W_{AK} \rho c}{2\pi r^2}}}{P_{ref}} \right) \quad (5.25)$$

για ημισφαιρική εκπομπή (στερεά γωνία 2π), με τον δίσκο να λειτουργεί σε άπειρο αποσβεστήρα, και για $\rho c = 415 \text{ rayls}$, $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ και εφαρμόζοντας $W_{HA} = 1 \text{ Watt}$, είναι δυνατό να υπολογισθεί από τα προηγούμενα, **η παραγόμενη ηχοστάθμη, συναρτήσει της απόδοσης**, σαν:

$$L_p = 112 + 10 \log \eta \quad (\text{dB-SPL}) \quad (5.26)$$

Για την θεωρητικά ιδανική περίπτωση όπου $\eta = 1$ (δηλαδή $W_{HA} = W_{AK} = 1 \text{ Watt}$), μπορεί να υπολογισθεί ότι η μέγιστη δυνατή ηχοστάθμη για τροφοδοσία 1 Watt (δηλαδή η στάθμη ευαισθησίας), θα είναι $L_p = 112 \text{ dB-SPL}$, το οποίο αποτελεί και **το ανώτερο θεωρητικό όριο ευαισθησίας ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου**. Στην πράξη, μεγάφωνα χαμηλών συχνοτήτων (woofer) παρουσιάζουν στάθμη ευαισθησίας της τάξης των $80\text{-}90 \text{ dB-SPL/Watt}$, ενώ τα μεγάφωνα υψηλών συχνοτήτων, παρουσιάζουν στάθμη ευαισθησίας της τάξης των $90\text{-}100 \text{ dB-SPL/Watt}$. Η ευαισθησία αυξάνει όταν στα μεγάφωνα προσαρμοσθεί κατάλληλη κόρνα (ακουστικός προσαρμογέας). Με την χρήση της παραπάνω σχέσης, είναι επίσης εύκολο να προσδιοριστεί η παραγόμενη ηχοστάθμη για την τυποποιημένη τιμή του $W_{HA} = 1 \text{ Watt}$ (όπως ορίζεται για την μέτρηση της ευαισθησίας) και για πρακτικές τιμές της W_{AK} που προκύπτουν από τις επιμέρους παραμέτρους του μεγαφώνου. Επιπλέον, φαίνεται ότι η μορφή της συνάρτησης της παραγόμενης ηχοστάθμης (ως προς τη συχνότητα), ταυτίζεται με αυτήν της (λογαριθμισμένης) συνάρτησης ευαισθησίας. Μετά από προγραμματισμό των παραπάνω σχέσεων, δείχνεται εύκολα η τυπική μορφή των συναρτήσεων σε σχέση με τη συχνότητα και για διαφορετικές παραμέτρους του μεγαφώνου, όπως συγκεντρωτικά εκφράζονται από τον όρο Bl , που καθορίζει και την τιμή του συντελεστή Q_T . Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 5.29(β)** δείχνεται η γνωστή εξάρτηση της απόκρισης συχνότητας από τον όρο Bl , όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 5.5.3. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.29(α)** δείχνεται η τυπική μορφή της συνάρτησης της Η/Α απόδοσης, η οποία είναι πάντοτε μέγιστη για τη συχνότητα συντονισμού, ειδικά για μικρές τιμές του όρου Bl . Όπως αναμένεται και από τις παραπάνω σχέσεις, η συνολική Η/Α εμπέδιση Z_{EI} αυξάνει για μεγάλες τιμές του Bl κοντά στη συχνότητα συντονισμού με αντίστοιχη μεγάλη μεταβολή στη γωνία φάσης σε αυτή την περιοχή **Σχήμα 5.29(γ) και (δ)**.

Μία συνολική αριθμητική επίλυση και ανάλυση της συμπεριφοράς των μεγαφώνων, δίνεται και στο **Παράδειγμα** που ακολουθεί.



Σχήμα 5.29: εξάρτηση των χαρακτηριστικών των ηλεκτροδυναμικών μεγαφώνων από την συχνότητα και τον όρο Bl . (α) Η/Α απόδοση η , (β) απόκριση συχνότητας (μέτρο απόκρισης τάση / ηχοστάθμη), (γ) μέτρο συνολικής ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστική εμπέδισης Z_{EI} , (δ) γωνία φάσης.

Σημείωση

Στην διεύθυνση του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής

www.wcl.ee.upatras.gr/audiogroup κάτω από την επιλογή **Tools**, δίνεται και πρόγραμμα (**Loudspeaker Simulator**) για τον υπολογισμό και σχεδιασμό των αποκρίσεων μεγαφώνων / ηχείων, με βάση τις παραμέτρους των μεγαφώνων. Στην ίδια διεύθυνση βρίσκεται και η εφαρμογή **Speaker Parametrix** που επιτρέπει τον υπολογισμό αποκρίσεων ηχείων για συνδυασμό παραμέτρων των μεγαφώνων και των κουτιών.

Παράδειγμα

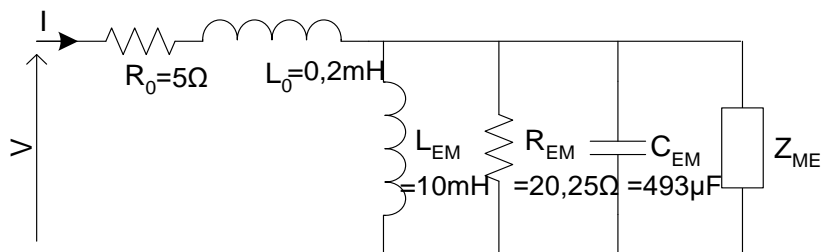
Έστω ένα μεγάφωνο το οποίο υποτίθεται ότι λειτουργεί σαν ιδανικός δίσκος σε άπειρο αποσβεστήρα, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά (βλ. πίνακα).

Αρχικά, θα παρουσιαστεί το ισοδύναμο κύκλωμα του μεγαφώνου και θα υπολογιστεί η απόκριση του. Με βάση την ανάλυση του Κεφαλαίου 3, βρίσκεται ότι $T^2 = (Bl)^2 = 20,25$ και τα ανάλογα ηλεκτρικά στοιχεία των μηχανικών μερών, είναι:

$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_m} = 20,25\Omega, \quad C_{EM} = \frac{m}{T^2} = 493\mu\text{F}, \quad L_{EM} = \frac{T^2}{k} = 10\text{mH} \quad \text{και το ισοδύναμο κύκλωμα}$$

φαίνεται στο **Σχήμα 5.30**. Η ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση $Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0$, έχει τη συμπεριφορά που δίνεται από το **Σχήμα 5.31(α)**.

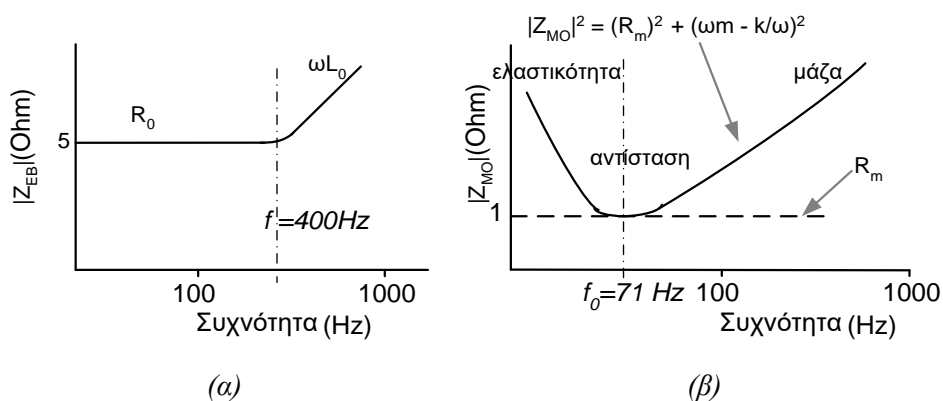
Ακτίνα διαφράγματος	$\alpha = 0,1 \text{ m}$ (μεγάφωνο 8'')
Ηλεκτρική αντίσταση πηνίου	$R_0 = 5 \Omega$
Ηλεκτρική επαγωγή	$L_0 = 0,2 \text{ mH}$
Μαγνητική ροή στο πηνίο (πυκνότητα)	$B = 0,9 \text{ T}$
Μήκος πηνίου	$l = 5 \text{ m}$
Μηχανική αντίσταση (απόσβεση ανάρτησης)	$R_m = 1 \text{ Ns/m}$
Μηχανική σκληρότητα ανάρτησης	$k = 2000 \text{ N/m}$
Μηχανική μάζα διαφράγματος	$m = 10 \times 10^{-3} \text{ kg}$



Σχήμα 5.30: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μεγαφώνου του Παραδείγματος

Στο σχήμα, φαίνεται η σημασία του L_0 στις υψηλές συχνότητες πριν από την εμφάνιση της αποκοπής λόγω αύξησης της αντίστασης ακουστικής εκπομπής. Βασικά για το μηχανικό σύστημα **μόνο**, ισχύει η γνωστή συμπεριφορά (Σχήμα 5.31(β)), η οποία δείχνει την λειτουργία

της ανάρτησης γύρω από την **μηχανική συχνότητα συντονισμού** $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \approx 71 \text{ Hz}$.



Σχήμα 5.31: αμειγρές σύνθετες αντιστάσεις μεγαφώνου (α) ηλεκτρική, (β) μηχανική

Η συνολική συμπεριφορά των **μηχανικών και ακουστικών στοιχείων** εκφράζεται από την $Z_{MI} = Z_{M0} + Z_{ME}$. Εδώ φαίνεται η σημασία της μάζας στις συχνότητες πάνω από περίπου 100 Hz που συνδυάζεται με τα υπόλοιπα στοιχεία καθώς το διάφραγμα λειτουργεί με το φορτίο του αέρα όπως εκφράζεται από την Z_{ME} . Όπως συζητήθηκε και προηγουμένως, η εξάρτηση της Z_{ME} από την συχνότητα είναι σχετικά πολύπλοκη και βασίζεται στη γεωμετρία του εκπομπού, εδώ

στο ιδανικό μοντέλο του διαφράγματος / δίσκου. Γενικά όπως αναφέρθηκε
 $Z_{ME} = R_{ME} + jX_{ME}$ όπου προσεγγιστικά δίνεται σαν:

$$R_{ME} = \pi a^2 \rho c R_1(2ka) \cong 13,1 R_1(0,00366f)$$

$$X_{ME} = \pi a^2 \rho c X_1(2ka) \cong 13,1 X_1(0,00366f)$$

όπου $R_1(x)$ και $X_1(x)$ είναι συναρτήσεις της μορφής:

$$R_1(x) = 1 - \frac{2J_1(x)}{x} = \frac{x^2}{2^2 \cdot 1! \cdot 2!} - \frac{x^4}{2^4 \cdot 2! \cdot 3!} + \dots$$

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{(x)^5}{3^3 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right)$$

καθώς η συμπεριφορά αυτών των συναρτήσεων, λόγω κατευθυντικότητας, εξαρτάται από την συχνότητα εκπομπής. Στην πράξη, προκύπτουν οι παρακάτω προσεγγίσεις:

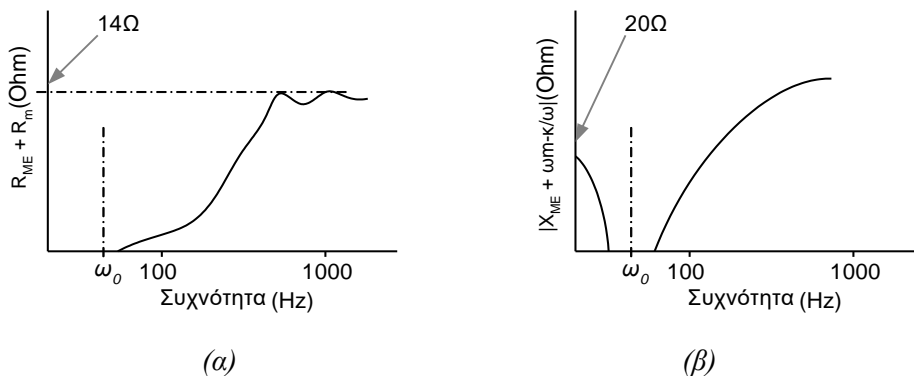
Για $2ka > 1$, δηλαδή για $f \leq 275$ Hz, $R_{ME} \approx 2,2 \cdot 10^{-5} f^2$, και $X_{ME} \approx 0,02 f$

Για $2ka > 4$, δηλαδή για $f > 1100$ Hz, $R_{ME} \approx 13$ Ns/m

Η συνολική μηχανο-ακουστική αντίσταση προκύπτει από την Z_{M0} και την Z_{ME} :

$$Z_{MI} = Z_{M0} + Z_{ME} = (R_m + R_{ME}) + j \left(X_{ME} + \omega m - \frac{k}{\omega} \right)$$

Εξετάζοντας το **πραγματικό μέρος της Z_{MI}** φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις ότι αρχίζει να αυξάνει για $f \approx 200$ Hz και γίνεται μέγιστη ($R_m + R_{ME} \approx 13 + 1 \approx 14$ Ω) για $f \geq 1100$ Hz (**Σχήμα 5.32(α)**).



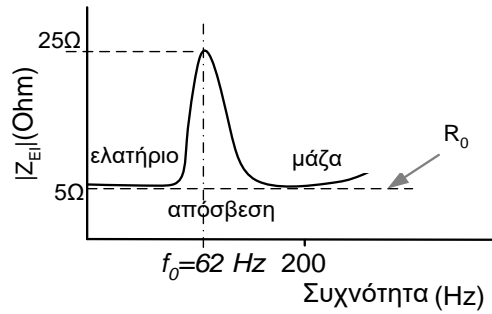
Σχήμα 5.32: σύνθετη μηχανο-ακουστική αντίσταση μεγαφώνου (α) πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος

Η συνάρτηση του φανταστικού μέρους $X_{ME} + \omega m - (k/\omega)$ έχει τη μορφή του **Σχήματος 5.32(β)**, με νέα συχνότητα ακουστικο-μηχανικού συντονισμού τα $f_0 = 62$ Hz (υπολογίζεται σαν:

$$X_{ME} + \omega_0 m - \frac{k}{\omega_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega_0 - \frac{2000}{\omega_0} = 0 \Rightarrow \omega_0 = 389,49 \text{ rad/s} \Rightarrow f_0 \approx 62 \text{ Hz}.$$

Εδώ φαίνεται πάλι η γνωστή εξάρτηση της συμπεριφοράς από την σκληρότητα του ελατηρίου στις χαμηλές συχνότητες και πάνω από την ω_0 λόγω της μάζας και της αύξησης της X_{ME} με την συχνότητα (δες και **Σχήμα 5.31(β)**). Για $f_0 = 62$ Hz, με αντικατάσταση των τιμών, υπολογίζεται ότι $R_{ME} \approx 2,2 \times 10^{-5} \times (62)^2 = 0,0845$ και $|Z_{MI}| \approx 1,081 \Omega$.

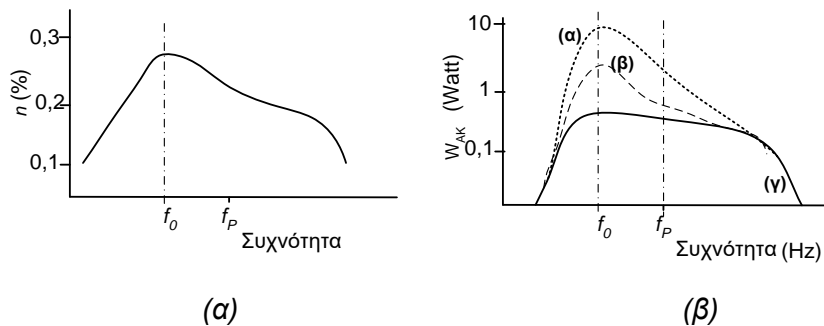
Για την ηλεκτρική συμπεριφορά του κυκλώματος, πρέπει να εξετασθεί η Z_{EI} ($Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MI}} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{ME} + Z_{M0}}$). Από την συμπεριφορά της Z_{EB} και της Z_{MI} που συζητήθηκε παραπάνω, προκύπτει η γνωστή μορφή που φαίνεται στο **Σχήμα 5.33**, που δείχνει την πρώτη συχνότητα συντονισμού, στην οποία εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή, που από τις πράξεις φαίνεται ότι είναι $|Z_{EI\max}| \approx 25\Omega$.



Σχήμα 5.33: Μέτρο συνολικής σύνθετης ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστικής αντίστασης μεγαφώνου

Για να εξετασθεί η Η/Α απόδοση του συστήματος χρησιμοποιείται η σχέση: $\eta \cong \frac{T^2 \cdot R_{ME}}{R_0 \cdot |Z_{MI}|^2}$

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η απόδοση αυξάνει στην συχνότητα συντονισμού, ενώ κάτω από αυτήν την συχνότητα η απόδοση εξαρτάται κυρίως από τη μορφή της $|Z_{MI}|^2$ που είναι γενικά ανάλογη της $1/f$ (**Σχήμα 5.34(α)**). Πάνω από αυτήν την συχνότητα η απόδοση εξαρτάται κυρίως από την R_0 την R_{ME} και την $|Z_{MI}|$. (Για $f = f_0 = 62 \text{ Hz}$, υπολογίζεται ότι $n \approx 0,29\%$).



Σχήμα 5.34: (α) Η/Α απόδοση μεγαφώνου, (β) εκπεμπόμενη ακουστική ισχύς.

Επίσης, παρ' όλο που η ακουστική ισχύς σε dB εμφανίζεται να ελαττώνεται πάνω από 1000 Hz, με ρυθμό περίπου $20 \log f$, (δες και **Σχήμα 5.34(β)**), ο ακροατής αντιλαμβάνεται κυρίως την **απόκριση της ακουστικής πίεσης** η οποία δεν φθίνει σε τόσο μεγάλο ρυθμό, αλλά που πρακτικά αρχίζει να παρουσιάζει παραμορφώσεις, αφού όπως έχει ήδη συζητηθεί, το διάφραγμα κινείται σαν συμπαγές στοιχείο μέχρι μια ορισμένη συχνότητα (π.χ. $f=500\text{Hz}$, για $u = 500\text{ms}^{-1}$). Έτσι, στην πράξη η ακουστική ισχύς και πίεση μπορεί να μην μειωθούν όπως θεωρητικά θα αναμενόταν, λόγω της μικρότερης μάζας του κώνου στις υψηλές συχνότητες, αφού μόνο το κέντρο του διεγείρεται και ακολουθεί την υψίσυχη ταλάντωση. Στο άλλο άκρο του φάσματος, είναι σχετικά δύσκολο να επιτευχθεί σταθερή απόδοση στις χαμηλές συχνότητες αφού απαιτείται είτε μεγαλύτερη διάμετρος κώνου (πράγμα που συνεπάγεται και μεγάλη μάζα), είτε αύξηση των διαδρομών που απαιτεί την ελάττωση της σκληρότητας της ανάρτησης του συστήματος (χαμήλωμα της συχνότητας συντονισμού), με αρνητικές επιπτώσεις στην μηχανική αξιοπιστία του συστήματος και με ταυτόχρονη αύξηση των μη-γραμμικών παραμορφώσεων.

Είναι επίσης χρήσιμο να υπολογισθεί η εξάρτηση της Η/Α απόκρισης και απόδοσης του μεγαφώνου από το ηλεκτρικό σήμα εισόδου, όπως φαίνεται από το διάγραμμα της εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος (δες Σχήμα 5.34(β)), το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό της απόδοσης, αν θεωρήσουμε σταθερή ηλεκτρική ισχύ. Όμως, αφού είναι γνωστό ότι

$$u(t) = \frac{T \cdot I(t)}{Z_{ME} + Z_{MO}},$$

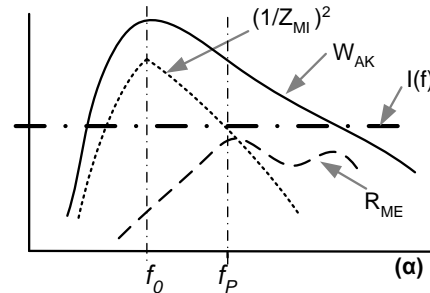
η ακουστική ισχύς που εκπέμπεται σύμφωνα με τη σχέση (5.18) θα

εξαρτάται από την ηλεκτρική τροφοδοσία, η οποία εναλλακτικά θα μπορεί να παρέχει:

(α) ρεύμα σταθερό για όλες τις συχνότητες και ανεξάρτητο του φορτίου, π.χ. $I = 2 \text{ A}$, τότε από τη

$$\text{σχέση } W_{AK} = S^2 \left(\frac{BI(t)}{Z_{MI}} \right)^2 R_{ME}$$

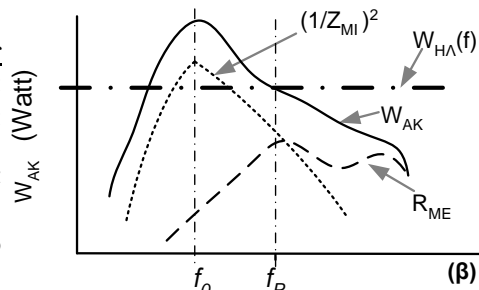
ακουστική ισχύς εξόδου θα έχει τη μορφή του Σχήματος 5.35(α).



(β) ηλεκτρική ισχύ σταθερή για όλες τις συχνότητες π.χ. $W_{HL} = 20 \text{ W}$ και με δεδομένο ότι από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι

$$\eta \cong \frac{(BI)^2 \cdot R_{ME}}{|Z_{MI}|^2 R_0}$$

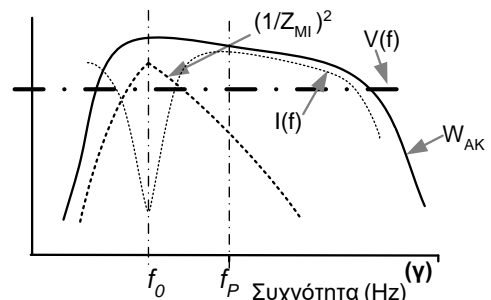
και $W_{AK} = \eta W_{HL}$ υπολογίζεται ότι η ακουστική ισχύς θα έχει τη μορφή του Σχήματος 5.35(β).



(γ) τάση σταθερή για όλες τις συχνότητες και ανεξάρτητη του φορτίου, π.χ. $V = 10 \text{ V}$ και αφού το παρεχόμενο ρεύμα θα ακολουθεί την αντίστροφη μορφή της Z_{EI} αφού ισχύει

$$V = I \cdot Z_{EI} \text{ και } Z_{EI} = R_0 + j\omega L_0 + \frac{T^2}{Z_{MO} + Z_{ME}}$$

υπολογίζεται η ακουστική ισχύς με τη μορφή του Σχήματος 5.35(γ).



Σχήμα 5.35: Αποδιδόμενη ακουστική ισχύς για ηλεκτρική τροφοδοσία: (α) σταθερού ρεύματος, (β) σταθερής ηλεκτρ. ισχύος, (γ) σταθερής τάσης.

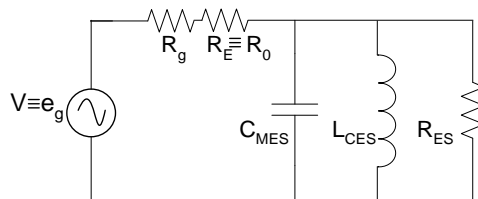
Το σχήμα αυτό εξηγεί την σημασία της μορφής της ηλεκτρικής τροφοδοσίας από τον ενισχυτή, στην ακουστική απόκριση του μεγαφώνου. Είναι προφανές ότι σταθερές (με τη συχνότητα και φορτίο) τιμές ρεύματος, ισχύος ή και τάσης παράγουν διαφορετική ακουστική ισχύ που είναι σταθερή μόνο στην περιοχή από 400 έως 1000 Hz περίπου, αλλά με μεγάλες διαφορές γύρω από την συχνότητα συντονισμού $f_0 = 62 \text{ Hz}$. Για παράδειγμα, στην περιοχή αυτή, με είσοδο 2A παράγεται ακουστική ισχύς περίπου 20 φορές μεγαλύτερη από ότι με είσοδο 10V. Έτσι, αν χρησιμοποιείται ενισχυτής λειτουργεί σαν γεννήτρια σταθερού ρεύματος για όλες τις συχνότητες, και ανεξάρτητα από την αντίσταση του μεγαφώνου, τότε θα παράγεται περισσότερη ακουστική ισχύς στην συχνότητα συντονισμού από ότι στις άλλες συχνότητες. Ένας ενισχυτής «σταθερής ισχύος», θα λειτουργήσει με μικρότερο τονισμό της περιοχής αυτής. Προφανώς, ένας ενισχυτής «σταθερής τάσης» (δηλαδή που να μπορεί να αναπαράγει την απαιτούμενη τάση ανεξαρτήτως συχνότητας / φορτίου), θα είναι προτιμότερος για Η/Α εφαρμογές με ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα, αφού παράγει ομαλή ακουστική απόκριση σε σχέση με τη συχνότητα και είναι

γεγονός ότι οι σύγχρονοι ενισχυτές γενικά εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης εξόδου.

5.7 Ανάλυση της ακουστικής απόκριση μέσω παραμετροποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος

Για την αποδοτικότερη ανάλυση και κωδικοποίηση της συμπεριφοράς του μεγαφώνου στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων και όταν αυτό λειτουργεί σε ηχείο – κουτί, έχει καθιερωθεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του ισοδύναμου κυκλώματος, με βάση μεθοδολογία που καθιερώθηκε κυρίως από τους Thiele και Small. Έκτοτε, οι παράμετροι που αφορούν μία τέτοια προσέγγιση αναφέρονται σαν «**παράμετροι Thiele-Small**», που παρ' όλο βασίζονται σε κοινή προσέγγιση με αυτή που παρουσιάστηκε σε προηγούμενες Παραγράφους (π.χ. 5.6) και Κεφάλαια, διαφέρουν κυρίως στην σημειογραφία, η οποία θα πρέπει εδώ να επεξηγηθεί.

Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται το σύνηθες ισοδύναμο ηλεκτρικό ισοδύναμο του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα (π.χ. δεξ **Σχήμα 3.16**) αλλά με τον τελικό μετασχηματισμό της μηχανικής απόκρισης σε ακουστική πίεση (π.χ. δεξ **Σχήμα 3.7**), μέσω της επιφάνειας εκπομπής (διαφράγματος) S , τα ισοδύναμα ηλεκτρικά μεγέθη του κυκλώματος, μετασχηματίζονται σε στοιχεία τα οποία εκφράζουν και την ακουστική εκπομπή. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 5.36**, του κατά Thiele-Small ισοδύναμου που περιλαμβάνει μετασχηματισμένο και το ακουστικό φορτίο και με δεδομένο ότι σε σχετικά χαμηλές συχνότητες η σημασία του L_0 είναι μικρή (και έτσι δεν περιλαμβάνεται), τα μεγέθη του κυκλώματος είναι:



Σχήμα 5.36: τροποποιημένη μορφή ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος με στοιχεία εκφρασμένα σύμφωνα με την παραμετροποίηση Thiele-Small

$$C_{MES} = \frac{mS^2}{T^2} = C_{EM} S^2, \quad L_{CES} = \frac{T^2}{kS^2} = \frac{L_{EM}}{S^2} \quad \text{και} \quad R_{ES} = \frac{T^2}{R_m S^2} = \frac{R_{EM}}{S^2}, \quad (5.27)$$

όπου $T^2 = (Bl)^2$. Όμοια με τις σχέσεις (5.15), ορίζονται οι παρακάτω συντελεστές ποιότητας:

$Q_{ES} = \omega_0 C_{MES} R_0$, ηλεκτρικό-μηχανικός συντελεστής ποιότητας που στην πράξη μετατρέπεται στον ηλεκτρικό συντελεστή ποιότητας μέσω της αντίστασης της πηγής,

$$\text{σαν: } Q_E = Q_{ES} \frac{R_0 + R_g}{R_0} \quad (5.28)$$

$$Q_{MS} = \omega_0 C_{MES} R_{ES} \quad (5.29)$$

μηχανο-ακουστικός συντελεστής ποιότητας. Όμοια, ο συντελεστής αυτός μετατρέπεται στον Q_M αν παρουσιαστεί ακουστική αντίσταση.

Ο συνολικός συντελεστής ποιότητας Q_T του μεγαφώνου προκύπτει από τους παραπάνω συντελεστές, δηλαδή:

$$Q_T = \frac{Q_E Q_M}{Q_E + Q_M} \quad \text{και} \quad Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}} \quad (5.30)$$

ορίζεται επίσης η παράμετρος του «ισοδύναμου όγκου αέρα», V_{AS} , που παρουσιάζει την ίδια ακουστική ενδοτικότητα με αυτήν της μηχανικής ανάρτησης του κώνου, δηλαδή:

$$V_{AS} = \rho c^2 C_{EM} \quad (5.31)$$

Επιπλέον, κατ' αναλογία της σχέσης (5.22), μπορεί ναδειχθεί ότι η «απόδοση αναφοράς», στη συχνότητα συντονισμού, ισούται με:

$$\eta(f_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}} \quad (5.32)$$

Είναι επίσης σημαντικό να συζητηθεί και η μεταβατική συμπεριφορά ενός μεγαφώνου σε σχέση με τον συνολικό συντελεστή ποιότητας Q_{TS} . Όπως είναι γνωστό, η κρουστική απόκριση ενός μεγαφώνου περιγράφει πλήρως την συμπεριφορά αυτή. Σε κάποια απλοποίηση, η διάρκεια της ταλάντωσης του συστήματος αυτού, στην συχνότητα συντονισμού f_0 , ορίζει την «χρονική σταθερά» T_0 (sec) του συστήματος και όπως είναι γνωστό και φαίνεται από τα παραπάνω, ισχύει:

$$T_0^2 = 1/\omega_0^2 = C_{MES} L_{CES} = m/k \text{ .Επιπλέον, δείχνεται ότι : } T_0 = \frac{mS^2 R_0}{Q_{TS}((Bl)^2 + mS^2 R_0 R_m)} \quad (5.33)$$

από όπου προκύπτει ότι υψηλές τιμές του Q_{TS} και του Bl , συνεπάγονται μικρές περιόδους ταλάντωσης και μικρή τιμή του T_0 .

5.8 Λειτουργία μεγαφώνου σε ηχείο

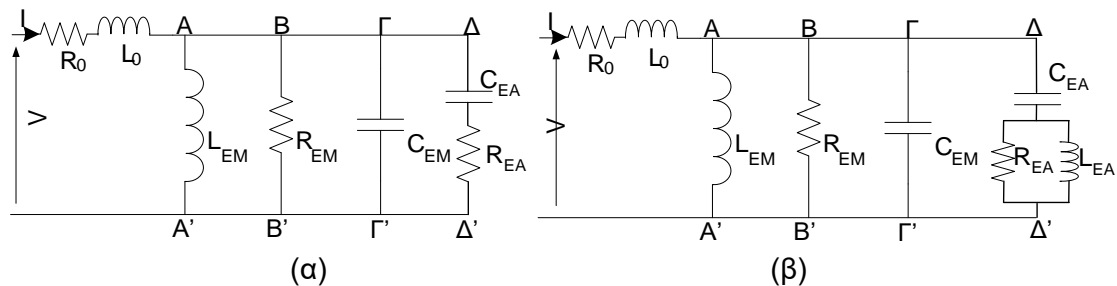
Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή του Κεφαλαίου, τα μεγάφωνα πρακτικά λειτουργούν σε ηχεία (κουτιά), τα οποία καλύπτουν 3 ανάγκες:

- απομονώνουν την ακουστική εκπομπή του εμπρός από το πίσω μέρος του μεγαφώνου (για αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος σε πολύ χαμηλές συχνότητες) και επιτρέπουν την ημισφαιρική εκπομπή
- υποβοηθούν την συμπεριφορά της μηχανικής ανάρτησης του μεγαφώνου (δράση ελατηρίου)
- στηρίζουν μηχανικά τα μεγάφωνα, σχηματίζουν κατάλληλη εμπρόσθια επιφάνεια ακτινοβολίας (μπάφλα) και καλύπτουν ευαίσθητα κυκλώματα (π.χ. cross-over)

Όσο αφορά την πρώτη από τις παραπάνω λειτουργίες, δηλαδή την αποκοπή της ακτινοβολίας από την πίσω πλευρά του μεγαφώνου και όπως συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.10.β), το κάθε μεγάλο λειτουργεί στον αέρα σαν ακουστικό δίπολο με εκτός φάσης εκπομπή από την εμπρός και την πίσω πλευρά, που σε πολύ χαμηλές συχνότητες ακυρώνει ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος. Τοποθετώντας το μεγάλο σε μία μεγάλη επιφάνεια («άπειρο αποσβεστήρα» ή «μπάφλα»), η ακύρωση εξαλείφεται και μάλιστα το μεγάλο εκπέμπει ιδανικά σαν μονοπολική πηγή, σε χώρο ημισφαιρίου (με επιπλέον 3 dB θεωρητικό κέρδος σε πολύ χαμηλές συχνότητες). Ένα πρακτικό ηχείο βέβαια, εμφανίζει περιορισμένες διαστάσεις εμπρόσθιας επιφάνειας («μπάφλας»), έτσι ώστε το κέρδος λόγω της ιδανικής αυτής εκπομπής να περιορίζεται μέχρι κάποια χαμηλή συχνότητα (μέγεθος μήκους κύματος). Το **Σχήμα 5.37(α)** δίνει το γνωστό ισοδύναμο κύκλωμα για αυτή τη διάταξη. Για την μοντελοποίηση της εκπομπής του μεγαφώνου χωρίς μπάφλα ή κουτί, με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 3**, ο βρόγχος $\Delta\Delta'$, ο οποίος περιγράφει το φορτίο της ακουστικής εκπομπής, μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει παράλληλα με το ωμικό φορτίο R_{EA} , το πηνίο L_{EA} (**Σχήμα 5.37(β)**). Όπως προαναφέρθηκε, η ακουστική εκπομπή ισοδυναμεί με την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται στην αντίσταση R_{EA} και επειδή η τιμή του L_{EA}

μειώνεται με την μείωση της συχνότητας, όσο χαμηλώνει η συχνότητα, όλο και λιγότερο ρεύμα διοχετεύεται στην αντίσταση R_{EA} και έτσι πρακτικά η ακουστική ισχύς περιορίζεται κάτω από την συχνότητα συντονισμού, με ταχύτερο ρυθμό, δηλαδή 24 dB / οκτάβα (**Σχήμα 5.38(α)**). Οι τιμές των ακουστικών αυτών στοιχείων δίνονται σαν:

$$C_{EA} = \frac{\rho 8aS}{3\pi T^2}, \quad R_{EA} = \frac{T^2}{\rho cS} \quad \text{και} \quad L_{EA} = \frac{T^2 \rho a}{(\rho c)^2 S}, \quad \text{όπου} \quad T^2 = (Bl)^2 \quad \text{και} \quad S = \pi a^2 \quad (\text{m}^2) \quad (5.35)$$



Σχήμα 5.37: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου για λειτουργία: (α) σε άπειρο αποσβεστήρα ή και σε κλειστό ηχείο, (β) στον αέρα

Όπως δείχθηκε και στο **Σχήμα 5.6**, τα ηχεία αυτά είτε είναι κλειστού τύπου, είτε αξιοποιούν ειδικές οπές ή και χοάνες (π.χ. ανάκλασης χαμηλών, bass-reflex) για ακουστική υποβοήθηση της απόκρισης σε χαμηλές συχνότητες.

5.8.1 Ηχεία κλειστού τύπου

Αρχικά, το μέγεθος των ηχείων κλειστού τύπου ήταν τόσο μεγάλο, ώστε να προσεγγίζει την συνθήκη λειτουργίας σε αποσβεστήρα άπειρων διαστάσεων, με υψηλή ακουστική ενδοτικότητα που δεν επηρέαζε την μηχανική συμπεριφορά του μεγαφώνου (και άρα χωρίς να αξιοποιείται η δεύτερη από τις παραπάνω συνθήκες). Μετά την εργασία των Olson και Preston (1944) και εξελίξεις στην κατασκευή των μεγαφώνων, άρχισε η αξιοποίηση της δεύτερης παραπάνω συνθήκης, με την δημιουργία από τον Villchur (1954) μικρότερων ηχείων «ακουστικής ανάρτησης», όπως περιγράφεται και στην Εισαγωγή του Κεφαλαίου (δες **Σχήμα 5.8(ζ)**). Στην περίπτωση αυτή, το μέγαφωνο σχεδιάζεται εξ αρχής με μεγάλη μηχανική ενδοτικότητα (δηλαδή μικρή σκληρότητα στο ελατήριο), έτσι ώστε η συχνότητα μηχανικού συντονισμού (στον αέρα), η f_0 , να είναι αρχικά χαμηλή. Με την τοποθέτηση σε κλειστό κουτί με σχετικά μικρό εσωτερικό όγκο και συνεπώς υψηλή ακουστική σκληρότητα (χαμηλή ενδοτικότητα), η δράση του αέρα στο κουτί συνδυάζεται με το μηχανικό ελατήριο και αυξάνει την συχνότητα μηχανο-ακουστικού συντονισμού στην f'_0 , η οποία και βρίσκεται στο προβλεπόμενο όριο για την λειτουργία του συστήματος, ελέγχοντας σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του συστήματος, στις χαμηλές συχνότητες, με τρόπο που έχει ήδη αναλυθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την υλοποίηση συστημάτων μεγαφώνων / ηχείων με μικρές εξωτερικές διαστάσεις κουτιού και μπάφλας («στενόμακρα» ηχεία) και μικρά σε διάμετρο μέγαφωνα χαμηλών-μεσαίων, τάση που ακολουθείται όλο και περισσότερο στις μέρες μας. Η μειωμένη δυνατότητα απόκρισης σε χαμηλές συχνότητες, αντισταθμίζεται συνήθως με χρήση πολλαπλών (συμφασικών) μονάδων μεγαφώνων χαμηλών-μεσαίων ή και με την χρήση χοάνης bass-reflex.

Παράδειγμα

Έστω το μεγάφωνο του **Παραδείγματος της Παραγράφου 5.6**, τοποθετείται σε κλειστό ηχείο με εσωτερικό όγκο $V_B = 0,05 \text{ (m}^3\text{)}$. Η συχνότητα συντονισμού του συγκεκριμένου μεγαφώνου στον αέρα, είχε υπολογισθεί σαν $f_0 = 62\text{Hz}$. (υπολογίζεται από:

$$X_{ME} + \omega_0 m - \frac{k}{\omega_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega_0 - \frac{2000}{\omega_0} = 0 \Rightarrow \omega_0 = 389,49 \text{ rad/s} \Rightarrow f_0 \approx 62\text{Hz}.$$

Όταν το μεγάφωνο τοποθετηθεί στο ηχείο, θεωρείται ότι λειτουργεί αεροστεγώς στην τρύπα που ανοίγεται και που έχει ακτίνα ίση με αυτήν του κώνου, δηλαδή το ηχείο λειτουργεί σαν συντονιστής Helmholtz. Με βάση την ανάλυση στο Κεφάλαιο 3, ο κλειστός όγκος του αέρα στο ηχείο, λειτουργεί σαν ελατήριο, κάτω από την πίεση που δέχεται από την πίσω πλευρά του κώνου του μεγαφώνου. Στην περίπτωση αυτή, η ακουστική σκληρότητα k_A , υπολογίζεται σαν:

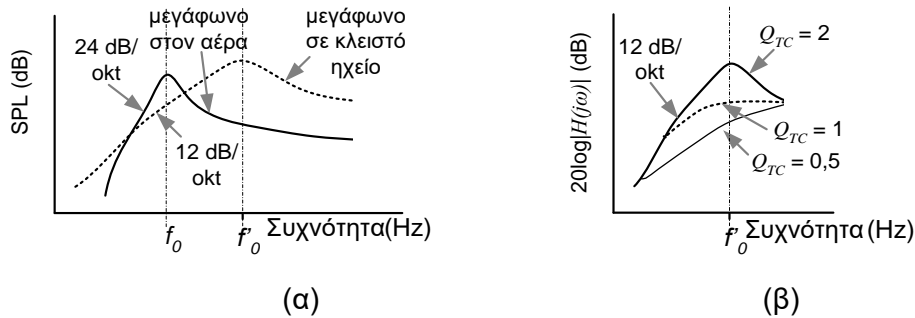
$$k_A = (\pi a^2)^2 \frac{\rho c^2}{V_{\text{ηβ}}} = 2809 \text{ N/m.}$$

Η δράση του ακουστικού ελατηρίου του κουτιού, συνδυάζεται με

αυτή του, ώστε να παράγει μία νέα συνολική σκληρότητα k_{TOT} και άρα, συχνότητα συντονισμού f'_0 . Άρα, ισχύει: $k_{TOT} = k + k_A = 2000 + 2809 = 4809 \text{ N/m}$ και για τη νέα συχνότητα:

$$X_{ME} + \omega'_0 m - \frac{k_{TOT}}{\omega'_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega'_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega'_0 - \frac{4809}{\omega'_0} = 0 \Rightarrow \omega'_0 = 604,04 \text{ rad/s} \Rightarrow f'_0 \approx 96\text{Hz}$$

Έτσι, η συχνότητα του μεγαφώνου αυξάνει από τα 62Hz στα 96Hz μόλις αυτό τοποθετηθεί στο κλειστό κουτί (ηχείο). Ταυτόχρονα, αλλάζει και η κλίση της απόκρισης (**Σχήμα 5.38(α)**).

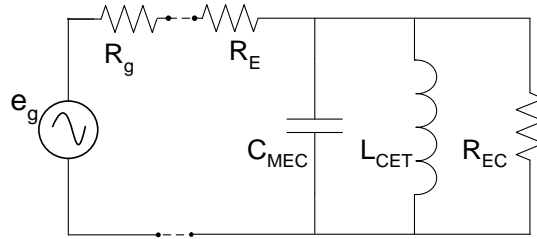


Σχήμα 5.38: (α) απόκριση μεγαφώνου στον αέρα και σε κλειστό ηχείο, (β) διαφοροποίηση στην απόκριση συχνότητας μέσω του συνολικού συντελεστή ποιότητας μεγαφώνου / ηχείου.

Γενικά, η συμπεριφορά του συνδυασμένου συστήματος μεγάφωνο / κλειστό ηχείο, μπορεί να αναλυθεί με την μεθοδολογία που έχει παρουσιαστεί προηγουμένως στο παραπάνω Παράδειγμα, ώστε να περιλαμβάνουν και τη δράση του αέρα στο κλειστό κουτί. Εάν ακολουθηθεί η εναλλακτική μέθοδος παραμετροποίησης των Thiele-Small που παρουσιάστηκε παραπάνω, τότε χρησιμοποιείται το ηλεκτρικό ισοδύναμο του ηλεκτροδυναμικού μετατροπέα (**Σχήμα 5.39**), αλλά με τούς μετασχηματισμούς που περιλαμβάνουν την παραπάνω δράση του «ακουστικού ελατηρίου» (και αφού σε σχετικά χαμηλές συχνότητες η σημασία του L_0 είναι μικρή και έτσι δεν περιλαμβάνεται). Τα τροποποιημένα στοιχεία του κυκλώματος (παράμετροι Thiele-Small για κλειστό ηχείο), τώρα είναι:

$$C_{MEC} = \frac{mS^2}{T^2} = C_{MES}, \quad L_{CET} = \frac{T^2}{k_{TOT}S^2} \quad \text{και} \quad R_{EC} = \frac{T^2}{R_m S^2 + R_{AB} S^2}, \quad (5.36)$$

όπου R_{AB} περιγράφει την απόσβεση λόγω εσωτερικής απορρόφησης στο κουτί.



Σχήμα 5.39: ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μεγαφώνου σε κλειστό ηχείο κατά Thiele-Small.

Επιπλέον, για την ανάλυση χρησιμοποιείται και η συνολική μηχανο-ακουστική ενδοτικότητα (μεγάφωνο-κουτί) C_{AT} που ισούται με:

$$C_{AT} = \frac{C_{AB} + C_{AS}}{C_{AB} C_{AS}}, \text{ όπου } C_{AS} = \text{ακουστική ενδοτικότητα μεγαφώνου και } C_{AB} = \text{ακουστική ενδοτικότητα μεγαφώνου μέσα σε ηχείο. Ορίζεται και ο λόγος} \quad (5.37)$$

$$\alpha = C_{AS} / C_{AB}$$

μεταξύ ενδοτικότητας του μεγαφώνου, στον αέρα και στο κουτί. Όμοια, ορίζεται και η συνολική αντίσταση (απόσβεση) του συστήματος, R_{ATC} που ισούται με:

$$R_{ATC} = R_{AS} + R_{AB} + \frac{T^2}{(R_g + R_0)S^2}, \text{ όπου } R_{AB} \text{ περιγράφει την εσωτερική απορρόφηση στο}$$

κουτί και R_{AS} την ακουστική αντίσταση εκπομπής. Όμοια με την ανάλυση σε αυτό το Κεφάλαιο και για την νέα συχνότητα συντονισμού ω'_0 , ορίζονται οι συντελεστές ποιότητας:

$$Q_{EC} = \omega'_0 C_{MEC} R_0, \quad Q_{MC} = \omega'_0 C_{MEC} R_{EC}, \quad (5.38)$$

Ο συνολικός συντελεστής ποιότητας Q_{TC} του μεγαφώνου στο ηχείο, προκύπτει σαν:

$$Q_{TC} = \frac{1}{\omega'_0 C_{AT} R_{ATC}} \quad (5.39)$$

που είναι αντίστοιχος του Q_{TS} του μεγαφώνου στον αέρα. Μπορεί εύκολα να δειχθεί, ότι:

$$C_{AS} / C_{AT} = \alpha + 1, \quad \omega'_0 / \omega_0 = f'_0 / f_0 = T_0 / T'_0 = \sqrt{\alpha + 1} \text{ και } Q_{EC} / Q_{ES} = \sqrt{\alpha + 1} \quad (5.40)$$

όπου $T_0 = 1 / \omega_0$ (sec) είναι η «χρονική σταθερά» του μεγαφώνου στον αέρα και T'_0 στο ηχείο. Με επεξεργασία των σχέσεων (με παρόμοιο τρόπο όπως σε προηγούμενες παραγράφους), δείχνεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς ηλεκτρικής τάσης / ακουστικής πίεσης $H(s)$ (σε αναλογία των σχέσεων (5.16) και (5.17)) προκύπτει σαν:

$$H(s) = \frac{s^2 T_0^2}{s^2 T_0^2 + s T'_0 / Q_{TC} + 1} \quad (5.41)$$

που είναι χαρακτηριστική απόκριση υψηλοδιαβατού φίλτρου 2ης τάξης (με κλίση αποκοπής 12 dB / οκτάβα). Εύκολα δείχνεται ότι η απόκριση στην περιοχή της συχνότητας συντονισμού / αποκοπής, εξαρτάται πλέον από τον συνολικό συντελεστή Q_{TC} του μεγαφώνου στο ηχείο (**Σχήμα 5.38(β)**).

Με δεδομένη την απόδοση του μεγαφώνου που υπολογίστηκε στη συχνότητα συντονισμού σαν: $\eta(f_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}}$, η αντίστοιχη σχέση για λειτουργία του μεγαφώνου σε κλειστό ηχείο με «ισοδύναμο» όγκο V_{AT} , είναι:

$$\eta(f_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AT}}{c^3 Q_{EC}} \quad \text{όπου } V_{AT} = \rho c^2 C_{AT} \quad (5.42)$$

Επιπλέον, η απόδοση αυτή μπορεί εύκολα να υπολογισθεί και σαν συνάρτηση του εσωτερικού όγκου V_B (m^3) του ηχείου, από τη σχέση:

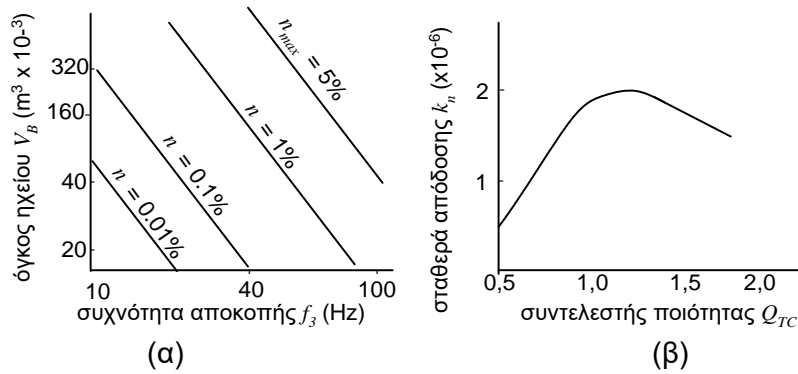
$$\eta(f_0) = k_n f_3^3 V_B \quad (5.43)$$

όπου f_3 (Hz) είναι η συχνότητα αποκοπής (-3 dB) του συστήματος ηχείο – μεγάφωνο και k_n είναι η «σταθερά απόδοσης» η οποία με ισούται με:

$$k_n = \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AT}}{c^3 f_3^3 V_B Q_{EC}} \quad (5.44)$$

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν την εξάρτηση της απόδοσης από την συχνότητα συντονισμού f_0 κουτιού-μεγαφώνου η οποία αυξάνει σε σχέση με αυτήν του μεγαφώνου στον αέρα (f_0), με την συνεπαγόμενη αύξηση της απόδοσης του συστήματος (δες **Σχήμα 5.40(α)**). Με βάση αυτή την ανάλυση, μπορεί ναδειχθεί ότι η μέγιστη θεωρητική τιμή της απόδοσης είναι της τάξης του 5%. Επιπλέον, η σχέση μεταξύ εσωτερικού όγκου V_B (m^3) του ηχείου, της συχνότητας αποκοπής f_3 (Hz) του συστήματος ηχείο – μεγάφωνο και της απόδοσης, μπορεί να υπολογιστεί από τις παραπάνω σχέσεις και φαίνεται στο **Σχήμα 5.40(α)**. Από τις παραπάνω σχέσεις, μπορεί ναδειχθεί ότι επίσης η σταθερά απόδοσης (και κατ' επέκταση η απόδοση), αυξάνει συναρτήσει του συνολικού συντελεστή ποιότητας μεγαφώνου-κουτιού Q_{TC} , μέχρι περίπου την τιμή $Q_{TC} = 1,1$ (αφού ο λόγος f_3 / f_0 εξαρτάται από το Q_{TC}), όπως στο **Σχήμα 5.40(β)**. Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, όσο αυξάνει ο εσωτερικός όγκος ή / και η συχνότητα αποκοπής ή και ο συνολικός συντελεστής ποιότητας του συστήματος, τόσο αυξάνει και η συνολική του απόδοση. Επειδή όμως συχνά οι παραπάνω παράμετροι παρουσιάζουν αντικρουόμενες αλληλο-εξαρτήσεις, η επιλογή τους στην πράξη καταλήγει να αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης σε σχέση με τους συνολικούς σχεδιαστικούς στόχους του συστήματος, όπως θα συζητηθεί σε επόμενη παράγραφο. Σημειωτέον ότι σε ηχεία κλειστού τύπου, η κατασκευή του κουτιού, θα πρέπει να είναι πλήρως αεροστεγής (ώστε να ικανοποιείται η ανάγκη λειτουργίας ελατηρίου του εσωτερικού όγκου αέρα) και επιπλέον τα τοιχώματα να είναι όσο το δυνατό πιο αδρανή στην ταλάντωση από την δράση του μεγαφώνου (ώστε να μην επανεκπέμπεται «δευτερογενής» ακουστική ακτινοβολία).

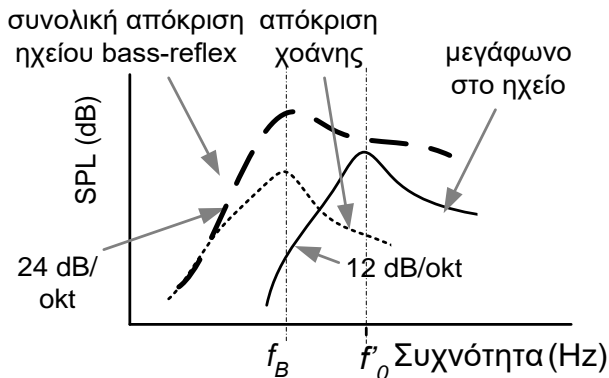
Στην πράξη, το υλικό των τοιχωμάτων του κουτιού είναι συνήθως από παράγωγα ξύλου (νοβοπάν ή MDF, π.χ. 22mm σε πάχος) και είναι επίσης χρήσιμη η ενίσχυση του ηχείου με εσωτερικό πλαίσιο. Επιπλέον, η εκπομπή από το μεγάφωνο προς το εσωτερικό του ηχείου (η οποία είναι θεωρητικά ίση με αυτή που εκπέμπεται προς τον ακροατή), θα πρέπει να απορροφάται αποτελεσματικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την εσωτερική επένδυση του κουτιού με ηχοαπορροφητικό υλικό (π.χ. υαλοβάμβακα ή πετροβάμβακα), η οποία μετατρέπει περίπου το 70% της ενέργειας του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος σε θερμότητα (και σε μεταγενέστερες ανακλάσεις και την υπόλοιπη ενέργεια), όπως στο **Σχήμα 5.42(α)**. Η δράση της εσωτερικής ηχοαπορρόφησης, μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα επιπλέον όρο στην παράμετρο της μηχανο-ακουστικής απόσβεσης του κουτιού.



Σχήμα 5.40: (α) σχέση εσωτερικού όγκου κλειστού ηχείου, συχνότητας αποκοπής συστήματος και απόδοσης, (β) σχέση συντελεστή ποιότητας μεγαφώνου / ηχείου και απόδοσης.

5.8.2 Ηχεία με ανάκλαση χαμηλών συχνοτήτων (bass reflex)

Τέτοια ηχεία πρωτο-εμφανίστηκαν από τον Thuras το 1930 και είναι κλειστά κουτιά τα οποία πέρα από το άνοιγμα στο οποίο προσαρμόζονται τα μεγάφωνα (όπως και στα ηχεία κλειστού τύπου), εμφανίζουν και άνοιγμα (οπή ή χοάνη / σωλήνα) η οποία επιτρέπει αέρα να κινείται από το εσωτερικό του κουτιού και ο οποίος εκπέμπει ακουστική πίεση, επιπρόσθετη του (των) μεγαφώνου (-ων), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.42(β)**. Σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν και στην Παράγραφο 3.1.1, η μάζα του αέρα στην επιπλέον οπή / χοάνη και του εσωτερικού όγκου του κουτιού (ελατήριο), λειτουργεί σαν **συντονιστής Helmholtz**, που δημιουργεί ένα συντονισμό σε συχνότητα κάτω από αυτή του συστήματος μεγαφώνου/κουτί (όπως αναλύθηκε παραπάνω), ο οποίος προσθέτει έκταση στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων στην καμπύλη απόκρισης (**Σχήμα 5.41**).



Σχήμα 5.41: απόκριση συχνότητας ηχείων με χοάνη τύπου bass-reflex.

Ανάλογοι μηχανισμοί «βοηθητικής» εκπομπής από συστήματα οπών παρουσιάζονται είτε σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται ένα αριθμός οπών ("vented-box") ή χοάνης (port) που τοποθετείται στην οπή, ή συστήματος μεμβράνης χωρίς μηχανισμό ανάρτησης («παθητικός ακτινοβολητής») ή και σύνθετου συστήματος εσωτερικών σωληνώσεων πριν την εκπομπή ("transmission line", **Σχήμα 5.42(γ)**). Σε όλες τις περιπτώσεις, η εκπομπή αυτή εμφανίζεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες (και ειδικά σε σχέση με τις διαστάσεις του ηχείου), έτσι ώστε να λειτουργεί παντοκατευθυντικά και κατ' επέκταση να μην εξαρτάται από τη θέση της

οπής/χοάνης σε σχέση με τον ακροατή, η οποία στην πράξη μπορεί να είναι στην εμπρόσθια ή στην οπίσθια πλευρά του κουτιού.

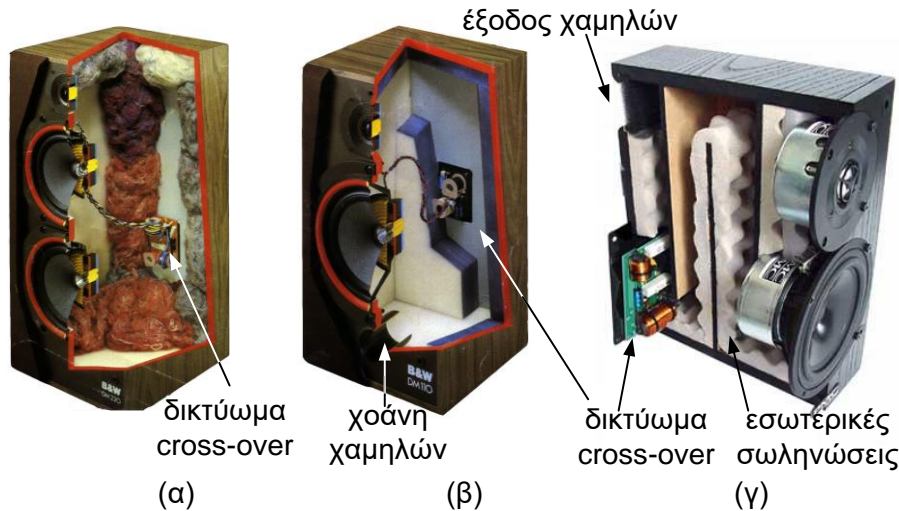
Για την μοντελοποίηση της εκπομπής του ηχείου bass-reflex, με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 και σε προηγούμενες παραγράφους σε αυτό το Κεφάλαιο, ο βρόγχος $\Delta\Delta'$, ο οποίος περιγράφει το φορτίο της ακουστικής εκπομπής, πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει παράλληλα έναν επιπλέον σύνθετο ακουστικό βρόγχο EE' λόγω χοάνης-οπής (**Σχήμα 5.43**). Στον βρόγχο αυτό εμφανίζεται σε παραλληλία ένας βρόγχος παρόμοιος με τον $\Delta\Delta'$ με στοιχεία R'_{EA} και C'_{EA} που περιγράφει την ακουστική εμπέδιση λόγω αλληλοσυσχέτισης μεταξύ μεγαφώνου και οπής. Επιπλέον εμφανίζεται στον βρόγχο EE' η αντίδραση C'_{EA} (τιμή η οποία εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις της χοάνης), η αντίσταση R'_{EA} του αέρα στην χοάνη (η οποία εκφράζει την ακουστική εκπομπή από την οπή /χοάνη) και το στοιχείο L_B όπου αναπαριστά τη νέα ακουστική ενδοτικότητα

του ηχείου. Οι τιμές των ακουστικών αυτών στοιχείων δίνονται σαν: $C_{EA} = \frac{\rho 8aS}{3\pi T^2}$,

$R_{EA} = \frac{T^2}{\rho c S}$ (όπως και στην περίπτωση του κλειστού ηχείου),

$$L_B = \frac{T^2 V_B}{\rho c^2 S}, \quad (5.45)$$

όπου V_B (m^3) είναι ο εσωτερικός όγκος του ηχείου και S (m^2) η επιφάνεια του κώνου.



Σχήμα 5.42: τομές ηχείων 2 δρόμων: (α) ηχείο κλειστού τύπου με 2 συμφασικές μονάδες χαμηλών-μεσαίων και μονάδα υψηλών συχνοτήτων, (β) ηχείο με ανάκλαση χαμηλών συχνοτήτων (bass reflex), (γ) ηχείο γραμμής μεταφοράς (transmission line).

Επιπλέον είναι:

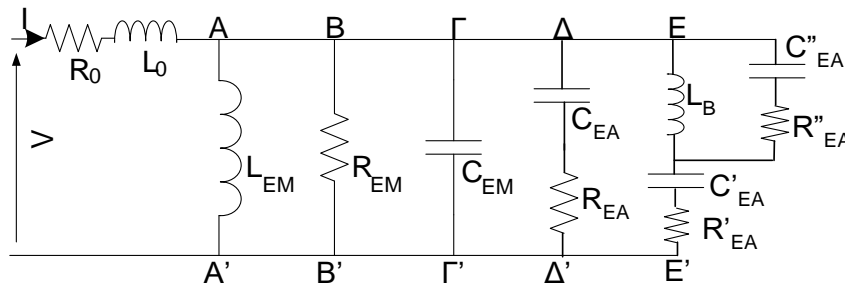
$$C'_{EA} = \frac{\rho 8bS^2}{3\pi T^2 S_p}, \quad R'_{EA} = \frac{T^2 S_p}{\rho c S^2} \quad (5.46)$$

όπου b (m) είναι η ακτίνα της χοάνης, και S_p (m^2) είναι η επιφάνεια της χοάνης.

Επίσης:

$$C''_{EA} = \frac{\rho S_p S}{2\pi g T^2}, \quad R''_{EA} = \frac{T^2 2\pi g^2}{\rho c S} \quad (5.47)$$

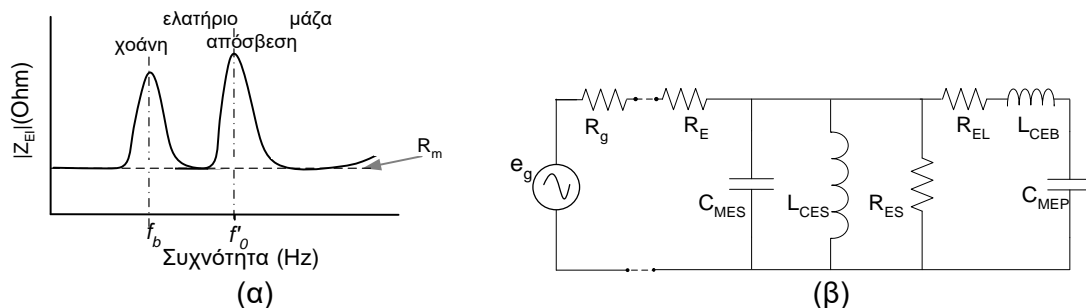
όπου g (m) είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων του μεγαφώνου και της χοάνης.



Σχήμα 5.43: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μεγαφώνου σε ηχείο bass-reflex.

Όπως προαναφέρθηκε, η ακουστική εκπομπή ισοδυναμεί με την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται σε όλες τις αντιστάσεις στους βρόγχους $\Delta\Delta'$ και EE' . Με δεδομένη την ύπαρξη του ακουστικού συντονισμού λόγω οπής / χοάνης στην συχνότητα f_B και την ισοδύναμη δράση του βρόγχου EE' , η σύνθετη αντίσταση του συστήματος αυτού, διαφέρει από αυτήν του απλού μεγαφώνου ή και του ηχείου σε κλειστό κουτί, στο ότι εμφανίζει 2 πλέον μέγιστα, ένα στην συχνότητα του ακουστικού συντονισμού f_B και ένα στην συχνότητα του μηχανικού συντονισμού f'_0 (**Σχήμα 5.44(α)**).

Εάν ακολουθηθεί η εναλλακτική μέθοδος παραμετροποίησης των Thiele-Small που παρουσιάστηκε παραπάνω, τότε χρησιμοποιείται το ηλεκτρικό ισοδύναμο του μεγαφώνου/κουτιού (**Σχήμα 5.44(β)**) με την προσθήκη των μετασχηματισμένων στοιχείων της χοάνης/οπής, με δεδομένο ότι σε χαμηλές συχνότητες η σημασία του L_0 είναι μικρή και έτσι δεν περιλαμβάνεται.



Σχήμα 5.44: (α) μορφή μέτρου σύνθετης ηλεκτρο-μηχανικο-ακουστικής αντίστασης μεγαφώνου σε ηχείο bass-reflex, (β) ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος κατά την μέθοδο Thiele-Small.

Τα μηχανικά στοιχεία του κυκλώματος (παράμετροι Thiele-Small για ηχείο bass-reflex), τώρα τροποποιούνται λόγω του ανοίγματος στο κουτί και είναι:

R_{ES} απόσβεση της μηχανικής ανάρτησης (δηλ. το R_m)

C_{MES} μηχανική μάζα (δηλ. το M_{AS})

L_{CES} ενδοτικότητα της ανάρτησης (δηλ. το C_{AS})

Και επιπλέον, οι ακουστικές παράμετροι Thiele-Small για ηχείο bass-reflex, είναι:

R_{EL} απώλεια πίεσης από το κουτί στη χοάνη (δηλ. το R_{AL})

C_{MEP} ακουστική μάζα του αέρα στη χοάνη (δηλ. το M_{AP})

L_{CEB} ενδοτικότητα του κουτιού / χοάνης (δηλ. το C_{AB})

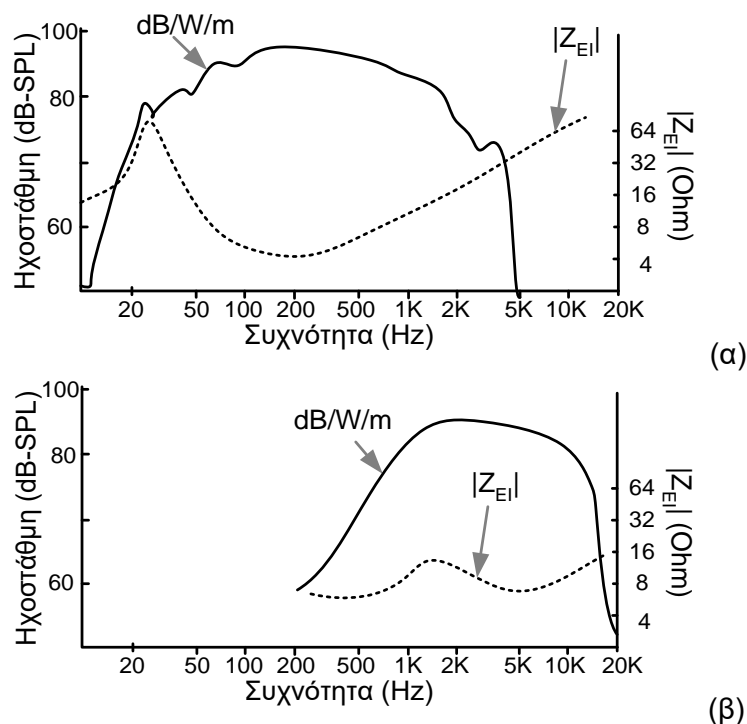
(5.48)

5.9 Υποσυστήματα μεγαφώνων

Όπως συζητήθηκε, η πρακτική και ικανοποιητική λειτουργία ενός συστήματος μεγαφώνου περιορίζεται μόνο σε μια μικρή περιοχή συχνοτήτων, που σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τις φυσικές διαστάσεις του και τις ηλεκτρο-μηχανικές του ιδιότητες. Η ανάλυση που προηγήθηκε εξέτασε κυρίως την συμπεριφορά των μονάδων σε χαμηλές συχνότητες. Στην περιοχή αυτή συνήθως λειτουργούν σχετικά μεγάλα σε μέγεθος μεγάφωνα, τα οποία βελτιστοποιούνται και με την ακουστική συμπεριφορά του ηχείου, όπως περιγράφηκε. Σε ψηλότερες συχνότητες, χρησιμοποιούνται μικρότερες σε μέγεθος μονάδες, των οποίων η συμπεριφορά είναι επίσης παρόμοια, αλλά η περιοχή λειτουργίας μετατοπίζεται σε υψηλότερες περιοχές του φάσματος. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα, η δράση του ηχείου δεν αφορά τόσο την υποβοήθηση της ανάρτησης από τον εσωτερικό όγκο αέρα, αλλά κυρίως την ακουστική εκπομπή από πλευράς γωνιών κάλυψης και περίθλασης του ήχου. Έτσι, η συνολική περιοχή απόκρισης (π.χ. 16 έως 20000 Hz), καλύπτεται από την συνδυασμένη χρήση υποσυστημάτων μεγαφώνων με διαφορετικές μηχανικές, ακουστικές, ηλεκτρικές και φυσικές παραμέτρους (δες **Σχήμα 5.45**). Τα χαρακτηριστικά τέτοιων υποσυστημάτων περιγράφονται στον παρακάτω **Πίνακα**.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (Hz)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
20-100	Πολύ χαμηλές	«Sub-woofers»
30 –1000	Χαμηλές	«Woofers»
500–5000	Μεσαίες	«Mid – rangers»
3000–20000	Υψηλές	«Tweeters»
8000–30000	Πολύ υψηλές	«Super-tweeters»

Πίνακας: τυπικά χαρακτηριστικά και ονομασία μεγαφώνων



Σχήμα 5.45: τυπική απόκριση συχνότητας για 1 Watt στο 1 m και μέτρο εμπέδισης για: (α) μεγάφωνο χαμηλών-μεσαίων (woofer), (β) μεγάφωνο υψηλών συχνοτήτων (tweeter).

(α) Μονάδες χαμηλών συχνοτήτων

Χρησιμοποιούνται συνήθως για να καλύψουν τις συχνότητες από 20Hz μέχρι 5kHz παρά το γεγονός ότι η αποτελεσματική τους λειτουργία υπάρχει μόνο μέχρι τους 1000Hz. Εμφανίζουν θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού από 10 – 60Hz που καθορίζει το είδος και τον σχεδιασμό του συστήματος ηχείου. Σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκε, λειτουργούν σαν πιστόνια και η ισχύς που παράγουν είναι ανάλογη της επιφάνειάς τους. Για πρόσθετη ισχύ, κάθε ελάττωση της συχνότητας κίνησης κατά το ήμισυ, συνεπάγεται διπλασιασμό της απομάκρυνσης κίνησης του οδηγού πηνίου, που σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές απομάκρυνσης κίνησης, συχνά δημιουργεί τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας που συζητήθηκαν. Η χρήση ειδικών υλικών κατασκευής στο διάφραγμα, όπως αυτή του sandwich αλουμινίου, πολυστερίνης, fiberglass, ινών κάρβουνου, Bextrene (πολυεστερίνη + νεοπρέν) κλπ., καθώς και ειδικών συστημάτων ανάρτησης, επιτυγχάνουν ομαλή λειτουργία, με σταθερά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας λειτουργίας. Τέτοιες θερμοκρασίες παράγονται συχνά σε μονάδες χαμηλών συχνοτήτων και αντιμετωπίζονται με τη χρήση ειδικών ψυκτικών υγρών (ferrofluids). Τυπικές διαστάσεις διαμέτρου μεγαφώνων είναι (σε ίντσες, όπως συνηθίζεται να εκφράζονται): 15", 12", 10", 8", 6,5" (381mm, 304,8mm, 254mm, 203,2mm, 165,1mm).

(β) Μονάδες χαμηλών / μεσαίων συχνοτήτων

Λόγω συμβιβασμών και οικονομίας, σε πολλά οικιακά συστήματα χρησιμοποιούνται μονάδες χαμηλών / μεσαίων που καλύπτουν συχνότητες μέχρι 2 kHz ή και συχνά 4 kHz. Τέτοια συστήματα έχουν σχετικά ομοιογενή απόκριση συχνότητας και κατευθυντικότητας. Τυπικές διαστάσεις είναι της τάξης των 6,5" (200 mm), ενώ συχνά χρησιμοποιούνται συμφασικά, πολλαπλές τέτοιες μονάδες.

(γ) Μονάδες μεσαίων συχνοτήτων

Τέτοιες μονάδες έχουν διάμετρο από 60 – 160 mm και χρησιμοποιούν κωνικά ή και σφαιρικά διαφράγματα, σε περιοχές λειτουργίας από 600 Hz έως 6 kHz με θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού 100 έως 500 Hz. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν στη μέγιστη περιοχή ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού (250 Hz έως 5 kHz) που κατά συνέπεια περιλαμβάνει και την περισσότερη ποσότητα πληροφορίας στο σήμα (πρόγραμμα), δηλαδή τη μουσική και την ομιλία. Γι' αυτό και παίζουν το μεγαλύτερο ρόλο στην συνολική πιστότητα του συστήματος. Με δεδομένο όμως ότι για τη χρήση τους απαιτείται σχεδιασμός ηχείου 3 δρόμων (με αυξημένη πολυπλοκότητα και κόστος), είναι σύνηθες να μην χρησιμοποιούνται σε πολλά σύγχρονα συστήματα.

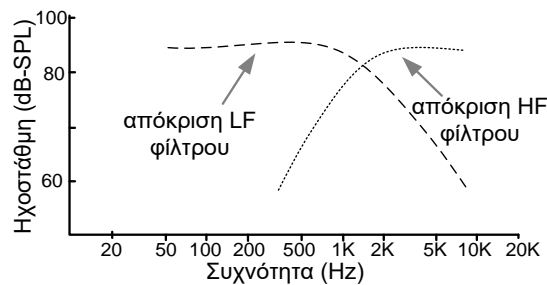
(δ) Μονάδες υψηλών συχνοτήτων

Οι μονάδες αυτές πρέπει να καλύψουν μια περιοχή από 5 οκτάβες (1 έως 30kHz), όπου όμως και το αυτί έχει τη μικρότερη ευαισθησία. Συχνά χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα για να καλύψουν περιοχές 1 έως 10 kHz, 3 έως 18 kHz και 8 έως 30kHz. Τέτοια συστήματα έχουν συχνά σφαιρικό σχήμα (dome). Χρησιμοποιούνται επίσης ηλεκτροστατικά συστήματα και συστήματα ταινίας. Τα μεγέθη των μονάδων αυτών είναι της τάξης των 25mm για ύφασμα, 9,25 ή 38mm για πλαστικό, 9 έως 18mm για σκληρό ύφασμα και 30mm για μέταλλο (π.χ. Berylium, 30 μm πάχος, 30mg βάρος).

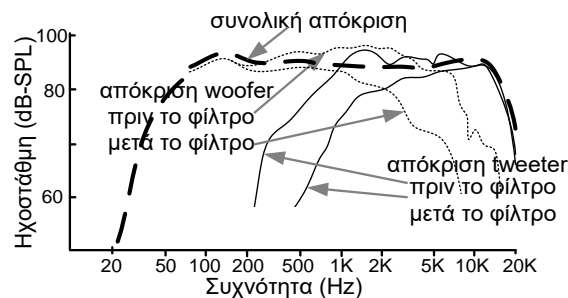
5.10 Κυκλώματα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-over)

Όπως συζητήθηκε, οι πρακτικές αδυναμίες λειτουργίας των μεγαφώνων σε ολόκληρη την περιοχή συχνοτήτων, επιβάλλει τη χρήση συνδυασμένων συστημάτων δύο ή περισσότερων μεγαφώνων, με βέλτιστη απόκριση σε περιορισμένο συχνοτικό εύρος. Ο διαχωρισμός του σήματος εισόδου σε αντίστοιχες περιοχές συχνοτήτων γίνεται

από ειδικά φίλτρα (δικτυώματα, cross-over), τα οποία μπορεί να είναι είτε «ενεργού» είτε «παθητικού» τύπου, (Σχήμα 5.4). Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν ταυτόχρονα και τον έλεγχο της συνολικής απόκρισης, ενισχύοντας ή εξασθενώντας το σήμα σε ανάλογες περιοχές, καθώς επίσης δευτερευόντως και τον έλεγχο της «κατευθυντικότητας» του ηχείου. Στα δικτυώματα διαχωρισμού, απαιτείται καθορισμός της συχνότητας αποκοπής και της κλίσης των φίλτρων κάθε περιοχής (συνήθεις τιμές 6,12,18,24 dB/οκτ.), όπως γίνεται σε όλα τα ηλεκτρονικά φίλτρα. Στην πράξη, η συχνότητα αποκοπής της μονάδας χαμηλών συχνοτήτων διαμέτρου 200mm αρχίζει περίπου στα 600Hz και αυτό καθορίζει συχνότητα αποκοπής f_c γύρω στα 1000Hz. Το υποσύστημα μεσαίων συχνοτήτων (αν υπάρχει) λειτουργεί, συνήθως για συχνότητες μεταξύ 600 και 4000 Hz και το σύστημα υψηλών συχνοτήτων λειτουργεί περίπου από τα 3000Hz (για συστήματα 3 δρόμων) και 1000 Hz (για συστήματα 2 δρόμων). Ένα απλό cross-over σχηματίζεται με κατάλληλα δικτυώματα LRC. Για παράδειγμα, ένα πηνίο σε σειρά με τη μονάδα χαμηλών συχνοτήτων και ένας πυκνωτής με τη μονάδα υψηλών, δίνει ένα απλό φίλτρο πρώτης τάξης με κλίση αποκοπής 6 dB/οκτ. (Σχήμα 5.47(α)).

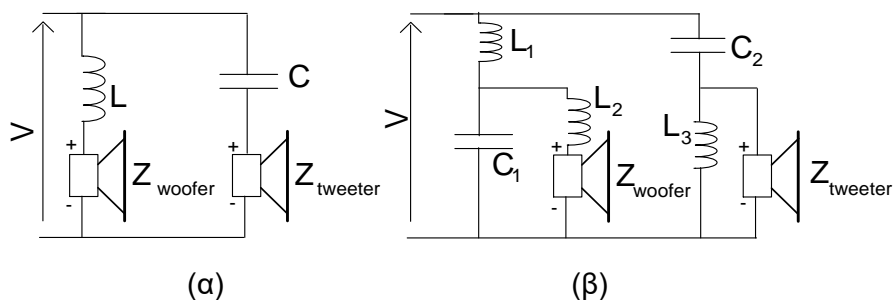


(α)



(β)

Σχήμα 5.46: (α) τυπική απόκριση φίλτρων διαχωρισμού χαμηλών (LF) και υψηλών συχνοτήτων δικτυώματος cross-over 2^{ης} τάξης, (β) αποκρίσεις μεγαφώνων πριν και μετά τα φίλτρα και συνολική απόκριση συστήματος 2 δρόμων.



(α)

(β)

Σχήμα 5.47: απλοποιημένο κύκλωμα διαχωρισμού (α) 1^{ης} τάξης, (β) 2^{ης} τάξης.

Παράδειγμα

Για $|Z_{\text{woofer}}| = |Z_{\text{tweeter}}| = |Z_{\text{EI}}| = 8 \Omega$, $L = 0,42 \text{ mH}$ και $C = 6,6 \mu\text{F}$, υπολογίζεται η συχνότητα αποκοπής $f_c = 3 \text{ kHz}$ για το δικτύωμα 1^{ης} τάξης με αποκοπή 6 dB/οκτ. του Σχήματος 5.47(α),

χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις $L = \frac{|Z_{\text{EI}}|}{2\pi f_c}$ και $C = \frac{1}{2\pi f_c |Z_{\text{EI}}|}$. Στην περίπτωση

συστήματος 2^{ης} τάξης (αποκοπή 12 dB/οκτ.) του Σχήματος 5.47(β), όμοια υπολογίζεται η

συχνότητα αποκοπής f_c με $L_1 = \frac{|Z_{\text{EI}}|}{2\sqrt{2} \cdot 2\pi f_c}$, $L_2 = \frac{|Z_{\text{EI}}|}{\sqrt{2} \cdot 2\pi f_c}$, $C_1 = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi f_c |Z_{\text{EI}}|}$ και

$$C_2 = \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot \pi f_c |Z_{\text{EI}}|}.$$

Για τον βέλτιστο σχεδιασμό της συνάρτησης μεταφοράς του δικτύματος χρησιμοποιείται μία συνάρτηση «στόχου» (target function) $T(f)$ που παριστά την επιθυμητή συνολική απόκριση. Αν υποθεθεί ότι $H_\phi(f)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του προς σχεδιασμό φίλτρου και $H_\mu(f)$ η συνάρτηση μεταφοράς του μεγαφώνου, έτσι ώστε:

$$H_\phi(f) = T(f)/H_\mu(f). \quad (5.49)$$

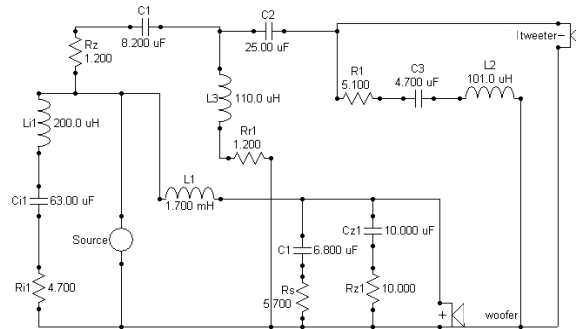
Αν $H_{\mu L}(f)$ και $H_{\mu H}(f)$ είναι οι συναρτήσεις των μεγαφώνων χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, τότε θα πρέπει η συνολική επιθυμητή συνάρτηση στόχου να δημιουργείται από τις επιμέρους συναρτήσεις, δηλαδή:

$$T(f) = H_{\phi L}(f)H_{\mu L}(f) + H_{\phi H}(f)H_{\mu H}(f) \quad (5.50)$$

Ο σχεδιασμός των συναρτήσεων στόχου γίνεται με τη χρήση γνωστών συναρτήσεων σχεδιασμού φίλτρων, όπως Butterworth, Linkwitz-Riley, κλπ.

Παραμορφώσεις φάσης παράγονται από αυτά τα δικτύματα και είναι ανάλογες της τάξης του φίλτρου. Για ένα σύστημα 2^{ης} τάξης εμφανίζεται στις μονάδες χαμηλών συχνοτήτων 90^ο καθυστέρηση και στις μονάδες υψηλών 90^ο προπορεία. Γενικά οι παραμορφώσεις φάσης από τα κυκλώματα αυτά, ειδικά στην συχνότητα αποκοπής είναι σημαντικές, προστίθενται στις παραμορφώσεις φάσης του κάθε μεγαφώνου (είναι συστήματα «ελάχιστης φάσης») και συχνά γίνονται αντιληπτές από τον ακροατή. Επιπλέον, με δεδομένη την κάθετη τοποθέτηση των μονάδων μεγαφώνων που καλύπτουν μεν διαφορετικές συχνοτικές περιοχές (π.χ. woofer / tweeter), αλλά λειτουργούν ταυτόχρονα σε κάποια περιοχή συχνοτήτων, όπως καθορίζεται από την αλληλοεπικάλυψη των αποκρίσεων των 2 βρόγχων του δικτύματος cross-over και με δεδομένες τις παραμορφώσεις φάσης που αυτά εμφανίζουν, δημιουργείται μία ανομοιογενής κατευθυντικότητα στο κατακόρυφο επίπεδο στην συνολική ακουστική απόκριση, με εξάρτηση της απόκρισης συχνότητας από το ύψος ακρόασης. Έτσι, η ισοστάθμιση τέτοιων προβλημάτων απαιτεί επιπλέον στοιχεία στο κύκλωμα cross-over, τα οποία προσαρμόζουν κατάλληλα τα χαρακτηριστικά επικάλυψης των 2 βρόγχων. Κατασκευαστικά, η ωμική αντίσταση των συστημάτων αυτών κρατιέται όσο πιο χαμηλά γίνεται (για αποφυγή απωλειών) και αποφεύγεται η χρήση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, λόγω του ρεύματος διαρροής που παρουσιάζουν παρουσία τάσης. Σε αντίθεση με τα ιδανικά αυτά φίλτρα, η σχεδίαση πρακτικών συστημάτων cross-over πρέπει να συμπεριλάβει και την μεταβαλλόμενη αντίσταση με την συχνότητα του κάθε υποσυστήματος, όπως αυτή εκφράζεται από την συνάρτηση $|Z_{\text{EI}}|$. Επιπλέον, γίνεται προσπάθεια ώστε το συνολικό κύκλωμα να αποτελεί ομοιογενές φορτίο για τον ενισχυτή και χρησιμοποιούνται επιπλέον στοιχεία που αντισταθμίζουν τις επιμέρους εμπεδίσσεις των μεγαφώνων, έτσι ώστε ένα πρακτικό δίκτυμα θα είναι πιο σύνθετο από τα ιδανικά φίλτρα που περιγράφηκαν. Τυπική διάταξη για την αντιστάθμιση των αυξανόμενα επαγωγικών χαρακτηριστικών

των μεγαφώνων με τη συχνότητα, είναι μέσω ενός βρόγχου τύπου Zobel. Το **Σχήμα 5.48**, δείχνει ένα τέτοιο πρακτικό κύκλωμα 2^{ης} τάξης για ένα σύγχρονο ηχείο 2 δρόμων.



Σχήμα 5.48: κύκλωμα cross-over 2^{ης} τάξης για ένα σύγχρονο ηχείο 2 δρόμων.

5.11 Σχεδιασμός συστημάτων μεγαφώνων & ηχείων

Στην πράξη, ο μηχανικός που σχεδιάζει ένα σύστημα ηχείου καλείται να συνοπτολογίσει όλα τα παραπάνω θεωρητικά και πρακτικά δεδομένα και να τα προσαρμόσει σε ένα ιεραρχημένο πλαίσιο επιλογών και συμβιβασμών με αναφορά τις προβλεπόμενες προδιαγραφές, μέγεθος, σχήμα, διαστάσεις και κόστος του συστήματος. Συνήθως, η διαδικασία σχεδιασμού ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

- (α) επιλογή των μονάδων μεγαφώνων (από τις διαθέσιμες στο εμπόριο, επιλογή που είναι καθοριστική για την ποιότητα και το κόστος της τελικής υλοποίησης),
- (β) εξομοίωση της απόκρισης του συνολικού συστήματος με τη χρήση προσομοιωτικών εργαλείων σε υπολογιστή (π.χ. προγράμματα Leap, Calshod),
- (γ) κατασκευή πρωτοτύπου (με καμπίνα ηχείου και δικτύωμα cross-over),
- (δ) μέτρηση της ακουστικής απόκρισης, π.χ. με τη μέθοδο τύπου MLSSA
- (ε) τυχόν επανασχεδιασμό χαρακτηριστικών του cross-over για απαιτούμενες διορθώσεις στην απόκριση, ή και τροποποιήσεις στην καμπίνα,
- (στ) τυχόν διορθώσεις με βάση ακροάσεις του συστήματος.

Τα προγράμματα σχεδιασμού, απαιτούν τις ακριβείς παραμέτρους (μηχανικές, ακουστικές και ηλεκτρικές) των μεγαφώνων που θα επιλεγούν. Συχνά, οι κατασκευαστές προσφέρουν αυτές τις παραμέτρους με τις μονάδες, αλλά σε περίπτωση ελλείψεων ή ανάγκης επιβεβαίωσης, θα πρέπει να ακολουθηθεί μία **διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμών παραμέτρων Thiele-Small του μεγαφώνου** που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες παραγράφους, με τα ακόλουθα στάδια:

1. Μέτρηση R_0 (Ω), της ωμικής DC αντίστασης μεγαφώνου
Μέτρηση a (m), της ακτίνας μεγαφώνου
2. Μέτρηση $|Z_{EI}(f)|$, της μεταβολής του μέτρου εμπέδισης του μεγαφώνου, με τη συχνότητα
3. Καθορισμός f_0 (Hz), τη συχνότητα συντονισμού για την οποία $|Z_{EI}(f)| = Z_{EI}(f)_{max}$ (όπως μετρήθηκε στο βήμα 2)

4. Καθορισμός f_1 και f_2 (Hz) για τις οποίες $|Z_{EI}(f_1, f_2)| = \sqrt{\frac{|Z_{EI}(f)|_{max}}{R_0}}$

5. Υπολογισμός Q_{MS} , όπου $Q_{MS} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{|Z_{EI}(f)|_{\max}}{R_0}}$ είναι ο μηχανικός συντελεστής ποιότητας του μεγαφώνου
6. Υπολογισμός V_{AS} , όπου $V_{AS} = \rho c^2 C_{AS} = \frac{\rho c^2 S^2}{(Bl)^2} L_{EM} = \frac{\rho c^2 S^2}{a^2}$ είναι ο ισοδύναμος όγκος αέρα που εκτοπίζει το μεγάφωνο.
7. Υπολογισμός Q_{TS} , όπου $Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{TS}}{Q_{ES} + Q_{TS}}$ είναι ο συνολικός συντελεστής ποιότητας του μεγαφώνου και $Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{TS}}{Q_{ES} + Q_{TS}}$ με $Q_{ES} = R_{AE} C_{AS} / 2\pi f_0$ να είναι ο ηλεκτρικός συντελεστής ποιότητας και με $R_{AE} = \frac{(Bl)^2}{S^2} (R_0 + R_G)$

Μετά τη μέτρηση / υπολογισμό των παραμέτρων της κάθε μονάδας μεγαφώνου, θα ακολουθήσει ο σχεδιασμός του ηχείου υπό την έννοια ότι αρχικά θα πρέπει να καθορισθεί ο απαιτούμενος εσωτερικός όγκος και διαστάσεις της καμπίνας για την ορθή λειτουργία του μεγαφώνου στις χαμηλές συχνότητες. Έτσι, η **διαδικασία υπολογισμών παραμέτρων του ηχείου** (εδώ για περιγράφεται για ηχεία κλειστού τύπου) θα ακολουθήσει τα ακόλουθα στάδια:

1. Συλλέγονται οι παράμετροι του μεγαφώνου f_0 (Hz), Q_{TS} , V_{AS} , από την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω
2. Επιλέγεται ο επιθυμητός συντελεστής ποιότητας του ηχείου Q_{TC} , που καθορίζει την μορφή της απόκρισης στην περιοχή του συντονισμού μεγαφώνου στο ηχείο, με $Q_{TC} = 0,5$ να αποτελεί την τιμή για κρίσιμα αποσβεσμένη συμπεριφορά.
3. Καθορίζεται αν $Q_{TC} > Q_{TS}$, οπότε αν όχι επιλέγονται άλλη μονάδα μεγαφώνου χαμηλών (και επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία). Αν η παραπάνω σχέση ικανοποιείται τότε, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα
4. Υπολογίζεται ο όρος α μεταξύ ενδοτικότητας του μεγαφώνου στον αέρα και στο κουτί, όπου $\alpha = \left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1$
8. Υπολογίζεται ο V_B (m³), όπου $V_B = V_{AS} / \alpha$ είναι ο εσωτερικός όγκος του μεγαφώνου.
5. Καθορίζεται αν ο όγκος που υπολογίστηκε είναι αποδεκτός ή όχι. Αν όχι, ο σχεδιασμός επιστρέφει στο βήμα 2 και επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία. Αν ο όγκος που υπολογίστηκε είναι αποδεκτός, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα
6. Υπολογίζεται η συχνότητα συντονισμού / αποκοπής του μεγαφώνου στο ηχείο, f'_0 (Hz) όπου $f'_0 = f_0 Q_{TC} / Q_{TS}$
7. Υπολογίζεται η συχνότητα f'_{0-3dB} για την οποία η απόκριση μεγαφώνου / ηχείου θα είναι σε πλάτος -3 dB σε σχέση με αυτήν στην συχνότητα f'_0
8. Καθορίζεται αν η συχνότητα που υπολογίστηκε είναι αποδεκτή ή όχι. Αν όχι, ο σχεδιασμός επιστρέφει στο βήμα 2 και επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία. Αν η συχνότητα που υπολογίστηκε είναι αποδεκτή, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα
9. Καθορίζεται αν όλες οι παραπάνω παράμετροι Q_{TC} , V_B , f'_{0-3dB} είναι αποδεκτές ή όχι. Αν όχι, ο σχεδιασμός επιστρέφει στο βήμα 2 και επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία. Αν όλες οι παράμετροι είναι αποδεκτές, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα

10. Καθορίζονται οι εξωτερικές διαστάσεις του ηχείου με βάση τον όγκο V_B που υπολογίστηκε. Για να αποφεύγονται στάσιμα κύματα στο εσωτερικό του ηχείου, οι διαστάσεις Πλάτος X Ύψος X Βάθος θα πρέπει να ακολουθούν τις αναλογίες 1 : 1,14 : 1,39 ή 1 : 1,28 : 1,54 ή 1 : 1,60 : 2,23.

5.12 Βιβλιογραφία

1. Hunt F.: "Electroacoustics", Acoustical Society of America, 1954.
2. Kinsler L, Fry A, Coppens A, Sanders J.: "Fundamental of Acoustics", J.Wiley, 1982.
3. Colloms M., "High Performance Loudspeakers", Pentech Press, 1978.
4. Dickanson V., "The Loudspeaker Design Cookbook", Audio Amateur Press, 1991.
5. Borwick J., "Loudspeaker and Headphone Handbook", Focal Press, 2001.
6. D' Appolito J., "Testing Loudspeakers", Audio Amateur Press, 1998.
7. Aarts R.M., "High-Efficiency Low-BI Loudspeakers", J. Audio Eng. Soc., 53(7):579-592, July/August 2005. Επίσης Matlab κώδικας: <http://www.dse.nl/~rmaarts/>.
8. Audio Engineering Society, "Loudspeakers, An Anthology Vol.1", 1980.
9. Rossi M., "Acoustics and Electroacoustics", Artech House, 1988.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ακουστική Κλειστών Χώρων

6.1 Εισαγωγή

Οι βασικές γνώσεις της διάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους που θα συζητηθούν εδώ, βοηθούν σε πολλές εφαρμογές της Ηλεκτροακουστικής, όπως στην τοποθέτηση εγκατάστασης ηχητικών συστημάτων αναπαραγωγής και ηχογράφησης, στην επεξεργασία ακουστικών σημάτων, στην αξιολόγηση ηλεκτροακουστικών συστημάτων, κ.τ.λ. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα βασικά εργαλεία και μέθοδοι που επιτρέπουν την σωστή ακουστική σχεδίαση των αιθουσών.

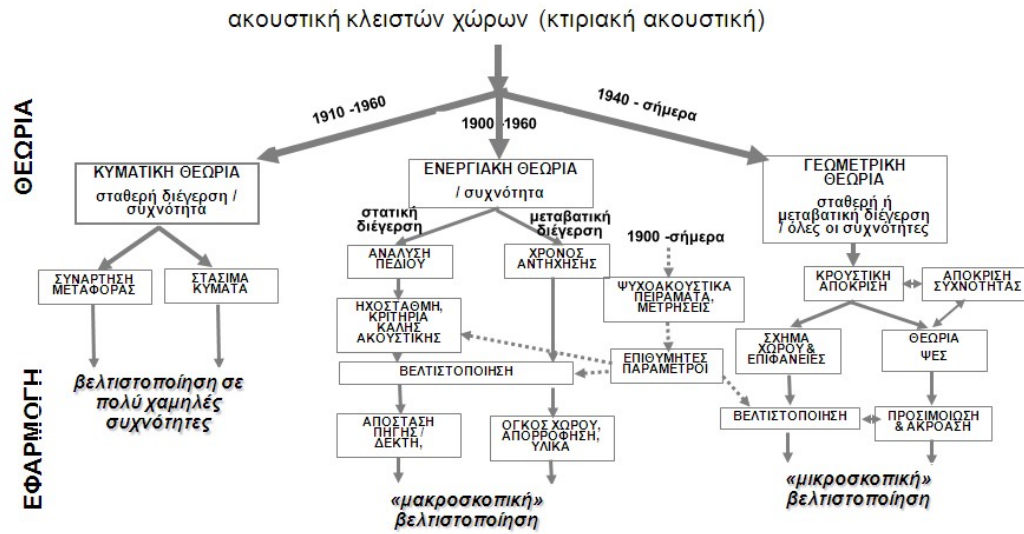
Παρόλο που από την αρχαιότητα υπήρχε εμπειρική γνώση στην ακουστική σχεδίαση και κατασκευή χώρων (παραδείγματα υπάρχουν από τα αρχαία θέατρα έως και τους συναυλιακούς χώρους που κατασκευάστηκαν στην Δύση τους προηγούμενους αιώνες), οι επιστημονικές βάσεις της φυσικής θεωρίας και οι κυριότερες πειραματικές μελέτες του θέματος τέθηκαν από το 1900 έως το 1960 περίπου και ωφέλησαν στον βέλτιστο σχεδιασμό καταλλήλων αρχιτεκτονικών χώρων (από studio ηχογραφήσεων μέχρι και σύγχρονες αίθουσες συναυλίας). Οι θεωρίες αυτές χρησιμοποιούνται και σήμερα για την επιμέρους ανάλυση της ακουστικής χώρων με απλά γεωμετρικά σχήματα. Στις δεκαετίες του 60 και 70 αναπτύχθηκαν κυρίως ειδικές ηλεκτροακουστικές εγκαταστάσεις (π.χ. για συναυλίες σε κλειστούς χώρους ή και συσκευές για τον έλεγχο της ακουστικής ορισμένων αιθουσών (όπως π.χ. το σύστημα «υποβοηθούμενης αντήχησης», δηλαδή της assisted resonance του Royal Festival Hall του Λονδίνου). Οι σύγχρονες εξελίξεις στους Η/Υ και οι ψηφιακές τεχνικές επιτρέπουν την ακριβή προσομοίωση της διάδοσης του ήχου σε κλειστούς ακουστικούς χώρους και την δυνατότητα «εικονικής ακρόασης» (auralisation) οποιουδήποτε ήχου σε τέτοιους εικονικούς χώρους. Άλυτο όμως παραμένει ακόμα το πρόβλημα της αφαίρεσης των παραμορφώσεων από το ακουστικό σήμα κατά τη μετάδοσή του σε κλειστός χώρος και έτσι συνεχίζει να υπάρχει εξάρτηση των μετρήσεων από τα χαρακτηριστικά των εσωτερικών χώρων που συχνά κατασκευάζονται ειδικά για τον σκοπό αυτό (π.χ. ειδικά studio). Το γεγονός αυτό περιορίζει την πρακτική εφαρμογή πολλών νέων τεχνολογιών όπως είναι η επικοινωνία ανθρώπου - μηχανής.

Ιστορικά, η θεωρητική προσέγγιση της ανάλυσης του θέματος ξεκίνησε από τον Wallace Sabine, στις αρχές του 1900 και έχουν εμφανιστεί διαφορετικές προσεγγίσεις που φαίνονται στο **Σχήμα 6.1**.

Από τις υπάρχουσες αναλυτικές μεθόδους, η παραδοσιακή βασίζεται στην Κυματική Θεωρία και προσφέρει επιλύσεις κυρίως στο πεδίο της συχνότητας, η άλλη προσέγγιση βασίζεται στη Γεωμετρική Θεωρία διάδοσης του ήχου και

προσφέρει επιλύσεις κυρίως στο πεδίο του χρόνου. Η τελευταία είναι καταλληλότερη για χρήση με Η/Υ σε συνδυασμό με μεθόδους ανάλυσης σημάτων. Επίσης, η «Ενεργειακή» θεωρία επιτρέπει περιορισμένες μεν, αλλά εύχρηστες εκτιμήσεις των ακουστικών χαρακτηριστικών κάποιου χώρου και είναι συχνά κατάλληλη σαν πρώτη προσέγγιση ενός τέτοιου προβλήματος.

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα των θεωριών αυτών και συζητιέται η μείωση της αντίληψης σημάτων (όπως της ομιλίας) σε συνθήκες αντήχησης.



Σχήμα 6.1. εξέλιξη και χαρακτηριστικά αναλυτικών μεθόδων για την ακουστική των κλειστών χώρων

6.2 Βασική Κυματική Θεωρία

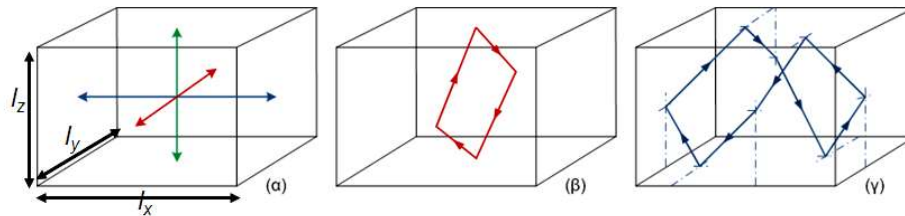
Η κυματική ανάλυση της διάδοσης του ήχου σε κλειστούς τριδιάστατους χώρους, βασίζεται στις αρχές που συζητήθηκαν νωρίτερα (Κεφάλαιο 2, παράγραφος 2.7). Όπως έχει συζητηθεί, εμφάνιση ενός στάσιμου κύματος που δημιουργείται από τη διαδοχική ανάκλαση του ήχου σε δύο παράλληλες επιφάνειες εμφανίζεται για συχνότητες πηγής:

$$f_n = \frac{nc}{2l} \tag{6.1}$$

όπου $n=1,2,3$ και l (m) η απόσταση μεταξύ των επιφανειών. Επεκτείνοντας τη θεωρία αυτή σε 3 διαστάσεις (Σχήμα 6.2), καθίσταται δυνατό να βρεθούν αντίστοιχες συχνότητες συντονισμού, οι οποίες για απλό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο χώρο έχουν τη μορφή:

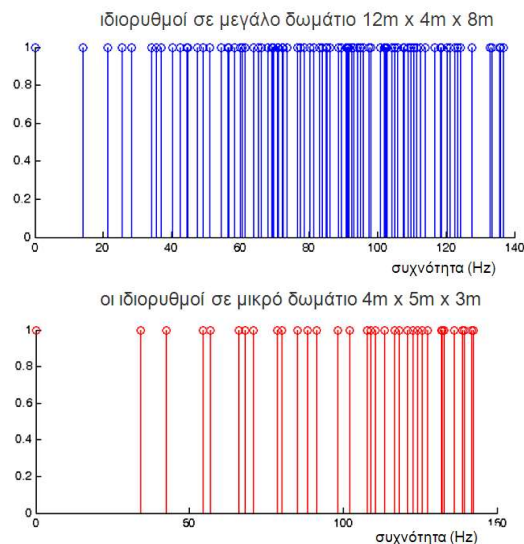
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (6.2)$$

όπου l_x, l_y, l_z είναι οι διαστάσεις του χώρου και n_x, n_y, n_z ανεξάρτητες μεταξύ τους μεταβλητές που δείχνουν τους συνδυασμούς των διευθύνσεων για τα συστήματα συντονισμού. π.χ. για $l_x=12\text{m}, l_y=10\text{m}$ (αγνοώντας για ευκολία τη διάσταση l_z), έχουμε για $n_x=1, n_y=1, n_z=0$ την συχνότητα συντονισμού $f_{1,1,0}=73.5\text{Hz}$ κ.ο.κ. Τα στάσιμα αυτά κύματα δημιουργούνται στη διεύθυνση και των 3 αξόνων του χώρου (αξονικοί συντονισμοί), αλλά και ταυτόχρονα και σε 2 επίπεδα (εφαπτόμενοι συντονισμοί) ή και σε 3 επίπεδα (πλάγιοι συντονισμοί, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.2**.



Σχήμα 6.2: Τρισδιάστατος απλός παραλληλεπίπεδος ακουστικός χώρος με κατηγορίες συντονισμών. (α) αξονικοί συντονισμοί, (β) εφαπτόμενοι συντονισμοί, (γ) πλάγιοι συντονισμοί.

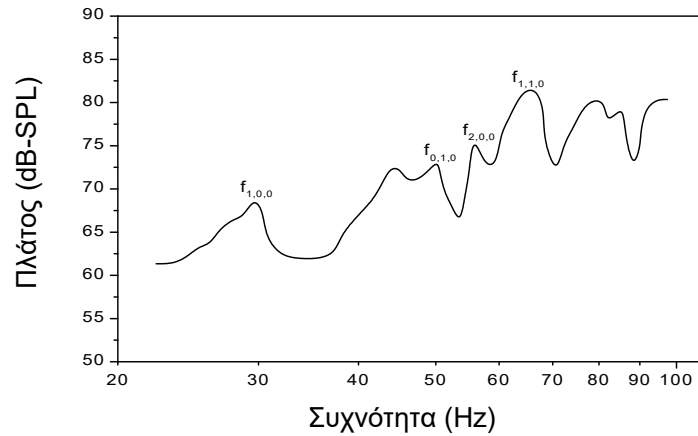
Για αυξανόμενη συχνότητα, η πυκνότητα των συχνοτήτων συντονισμού (ιδιορυθμών), είναι αντιστρόφως ανάλογη των διαστάσεων του χώρου (**Σχήμα 6.3**).



Σχήμα 6.3: Συχνότητες συντονισμού (ιδιορυθμοί) σε μεγάλο και μικρό δωμάτιο

Η ολική ακουστική απόκριση ενός τέτοιου χώρου για σήμα διέγερσης ευρέως φάσματος (π.χ. για λευκό θόρυβο), θα δημιουργηθεί από το άθροισμα των αποκρίσεων για όλες τις τιμές του n , με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας πολύπλοκης απόκρισης συχνότητας με διαδοχικές ενισχύσεις και ακυρώσεις στο

πλάτος του σήματος. Για παράδειγμα, σε ένα δωμάτιο 2,5X3X7 m, η μορφή της ακουστικής απόκρισης για τον δέκτη τοποθετημένο σε κάποια απόσταση από την πηγή (και για διέγερση λευκού θορύβου), θα είναι αυτή που δείχνει το **Σχήμα 6.4**.



Σχήμα 6.4: Τυπική ακουστική απόκριση ενός κλειστού παραλληλεπίπεδου χώρου

Στην πράξη, για διαφορετικές θέσεις της πηγής, διεγείρονται και διαφορετικά συστήματα συντονισμών, με αποτέλεσμα η ακουστική απόκριση ενός συγκεκριμένου χώρου να πρέπει να οριστεί για συγκεκριμένες τοποθετήσεις πηγής/δέκτη. Σημαντικός είναι επίσης και ο ρόλος των χαρακτηριστικών απόσβεσης των επιφανειών που ανακλούν το ηχητικό κύμα (τοίχοι, πατώματα, κτλ). Η απορρόφηση αυτή, υποθέτουμε ότι εκφράζεται από την παράμετρο k_n (για κάθε συχνότητα συντονισμού), μπορεί δε να αποδειχτεί ότι η αναλυτική μορφή της ακουστικής πίεσης στον δέκτη (δηλ. η συνάρτηση μεταφοράς για ένα χώρο), για τις (διανυσματικές) θέσεις X και X' με συντεταγμένες (x, y, z) και (x', y', z') θα είναι:

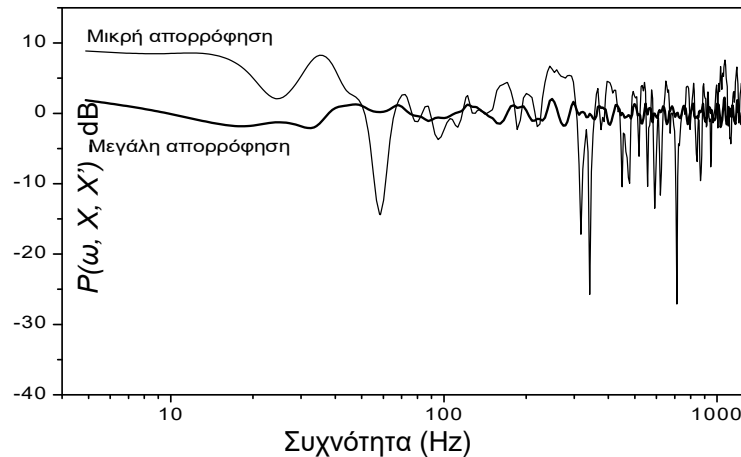
$$P(\omega, X, X', t) = \rho \cdot c \cdot Q e^{j\omega t} \sum \frac{[\Psi_n(x', y', z')][\Psi_n(x, y, z)]}{2 \frac{\omega_n k_n}{\omega} + j \left(\frac{\omega - \omega_n^2 + k_n^2}{\omega} \right)} \quad (6.3)$$

όπου ρ (kg/m^3) η πυκνότητα του αέρα, c (m/s) η ταχύτητα του ήχου, $Q e^{j\omega t}$ ο φάσοντας διέγερσης με πλάτος Q , ω_n οι συχνότητες συντονισμού, k_n η απόσβεση στις ιδιοσυχνότητες συντονισμών και Ψ_n οι ιδιοσυναρτήσεις (Eigenfunctions) της συνάρτησης μεταφοράς.

Η παραπάνω σχέση, δείχνει ότι η ακουστική απόκριση παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια ειδικά με την αύξηση της συχνότητας ή και της απόστασης πηγής - δέκτη. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η διασπορά της απόκρισης από τη μέση στάθμη του $P(\omega, X, X)$ είναι της τάξης των 11dB, ενώ η αύξηση της απόσβεσης λόγω μεγαλύτερης απορρόφησης στους τοίχους του χώρου έχει σαν αποτέλεσμα την σχετική ομαλοποίηση της καμπύλης απόκρισης (**Σχήμα 6.3**).

Η σημασία της απορρόφησης θα συζητηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επόμενη παράγραφο. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ανάλυση της ακουστικής

των κλειστών χώρων με βάση την κυματική θεωρία, προσφέρει λίγες πρακτικές απαντήσεις που έχουν μεγάλο υπολογιστικό κόστος και πολυπλοκότητα. Επιπλέον, η ανάλυση που επιτυγχάνεται συνήθως περιορίζεται στον προσδιορισμό της απόκρισης συχνότητας ενός χώρου, για σταθερή (στον χρόνο) διέγερση, κάτι που δεν καλύπτει την περιγραφή των μεταβατικών ηχητικών φαινομένων που παράγονται σε ένα τέτοιο χώρο. Η ανάλυση τέτοιων φαινομένων γίνεται συνήθως με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 6.3 : Ακουστική απόκριση συχνότητας του ίδιου χώρου, αλλά για διαφορετική απορρόφηση στους τοίχους

6.3 Το ηχητικό πεδίο σε ένα κλειστό χώρο

Αν υποθέσουμε ότι η διέγερση της πηγής που δημιουργεί τα παραπάνω χαρακτηριστικά διακοπεί απότομα, τότε η ενέργεια του ήχου που φθάνει στο δέκτη θα συνεχίσει για ένα χρονικό διάστημα, αφού συνεχείς ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους θα φθάνουν με καθυστερήσεις που αντιστοιχούν στις όλο και μεγαλύτερες διαδρομές που αυτές ακολουθούν στο δωμάτιο φθίνοντας ολοένα με τον χρόνο λόγω της συνεχούς απορρόφησης ενέργειας από τις διαδοχικές αυτές ανακλάσεις από τους τοίχους. Έτσι, σε αντίθεση με το ελεύθερο ακουστικό πεδίο που περιγράφηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, όπου ακουστική πίεση εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά και την απόσταση της πηγής, στην περίπτωση του πεδίου στον κλειστό χώρο θα εμφανιστεί μία ακόμη συνιστώσα της ακουστικής πίεσης λόγω των ανακλάσεων. Έτσι το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται αποτελείται από τον κατ' ευθείαν διαδιδόμενο ήχο (ο οποίος υπόκειται στην ανάλυση που συζητήθηκε νωρίτερα) και στον ανακλώμενο ήχο (ο οποίος σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το ποσοστό του ήχου που ανακλάται από τους τοίχους, δηλαδή την απορρόφηση ή απόσβεση που παρουσιάζει ο κάθε χώρος).

Η απόσβεση που εμφανίζει ένας κλειστός χώρος εξαρτάται λοιπόν από τον λόγο της ακουστικής ενέργειας που προσπίπτει, προς αυτήν που ανακλάται πάνω σε κάθε επιφάνεια του χώρου, και ορίζεται (για την κάθε επιφάνεια) από τον συντελεστή ηχο-απορρόφησης α_n , όπου $n=1,2,3\dots$ είναι ο δείκτης της

συγκεκριμένης επιφάνειας. Συνήθως οι συντελεστές αυτοί είναι προϋπολογισμένοι για τα διάφορα αρχιτεκτονικά υλικά και παρουσιάζονται σε πίνακες συναρτήσεως της συχνότητας (αφού το κάθε υλικό και στοιχείο απορροφά διαφορετικά ποσοστά ακουστικής ενέργειας σε κάθε συχνότητα). Ένας τέτοιος πίνακας έχει την μορφή του **Πίνακα 6.1**.

Πίνακας 6.1: Συντελεστές απορρόφησης για διάφορα υλικά και ακουστικά στοιχεία

Υλικό	Συχνότητα (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Αέρας	0	0	0	0,003	0,007	0,02
Επίπεδος τοίχος	0,15	0,3	0,75	0,85	0,75	0,4
Τοίχος - Τούβλο	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Μπετόν	0,02	0,02	0,2	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - ξύλο	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Πάτωμα -χαλί	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3
Κουρτίνες	0,05	0,12	0,15	0,27	0,37	0,50
Ακροατής (καθιστός)	0,18	0,4	0,46	0,46	0,51	0,46

Σε περίπτωση που σε κάποιο χώρο χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά, είναι δυνατόν να σχηματιστεί μια μέση τιμή της ηχοαπορρόφησης, από το άθροισμα των γινομένων συντελεστών και αντιστοίχων επιφανειών:

$$\bar{a} = \frac{S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n}{S} = \frac{A}{S} \quad (6.4)$$

όπου $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ το άθροισμα των n επιφανειών του χώρου σε m^2 . Ο αριθμητής του κλάσματος ορίζει την συνολική απορρόφηση του ήχου, δηλ. $A = S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n$ ($m^2 \cdot \text{Sabines}$). Η «Σταθερά Δωματίου» R , δίδεται από τον τύπο

$$R = \frac{A}{1 - \bar{a}} \quad (6.5)$$

ενώ συχνά ο όρος $1 - \bar{a} = \bar{\beta}$ ονομάζεται και «Μέσος Συντελεστής Ανάκλασης».

Όπως προαναφέρθηκε, η ακουστική ενέργεια του κατ' ευθείαν διαδιδόμενου ήχου ελαττώνεται με την απόσταση, αλλά η ανακλώμενη ακουστική ενέργεια δημιουργεί ένα πεδίο που εξαρτάται από την Σταθερά του Δωματίου R . Ορίζοντας λοιπόν I_d την ηχητική ένταση λόγω του σήματος ελεύθερου πεδίου και I_r την εξ ανακλάσεως ένταση, τότε:

$$I_d = \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad (6.6\alpha)$$

$$I_r = \frac{4W}{R} \quad (6.6\beta)$$

όπου W (Watt – ακουστικά) η ακουστική ισχύς της πηγής, r (m) η απόσταση πηγής/δέκτη, R η Σταθερά Δωματίου (όπως ορίστηκε παραπάνω) και Q η κατευθυντικότητα της πηγής (όταν δεν έχουμε σφαιρική πηγή). Προφανώς ισχύει

$$\frac{I_d}{I_r} = \frac{QR}{16\pi r^2} \quad (6.7)$$

Κατ' επέκταση, ο λόγος στάθμης ακουστικής πίεσης, όπου P_d είναι η απευθείας και P_r η ανακλώμενη πίεση υπολογίζεται από τη σχέση

$$L_p \left(\frac{P_d}{P_r} \right) = 10 \log \left(\frac{Q \times R}{16\pi r^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6.8)$$

Για μια ορισμένη τιμή της απόστασης, η ένταση του «απευθείας» και του «ανακλώμενου» ήχου θα είναι ίση, ορίζοντας την “Ακτίνα του Δωματίου” r_r (m) ως:

$$r_r = \sqrt{\frac{R \times Q}{16\pi}} \quad (6.9)$$

Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και με την ακουστική πίεση, δηλαδή η συνολική ακουστική πίεση στον δέκτη θα προκύπτει σαν άθροισμα της απευθείας και ανακλώμενης πίεσης:

$$p = W \rho c \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (6.10)$$

Οπότε

$$10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} = L_p = 10 \log_{10} W + 10 \log_{10} \rho \cdot c + 94 + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (6.11)$$

Όμως

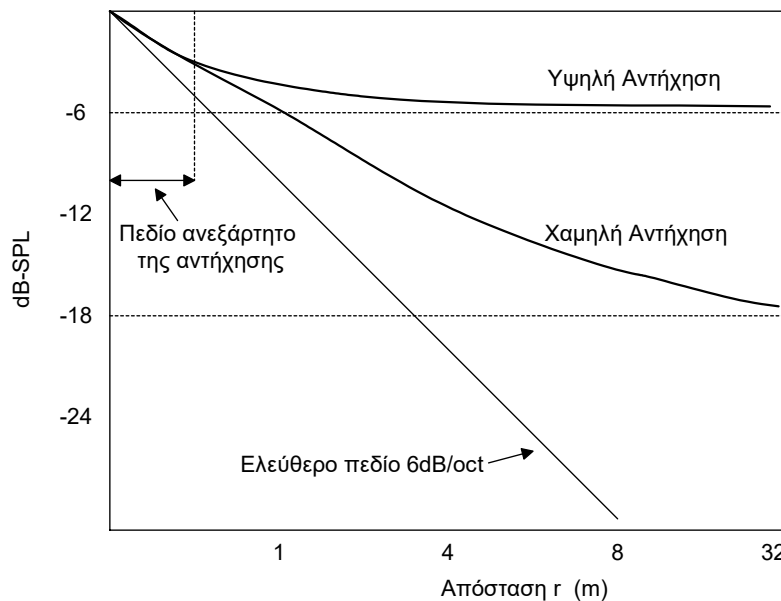
$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} = 10 \log W + 120 \quad (\text{dB}) \quad (6.12)$$

και άρα:

$$L_p = PWL + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 0,5 \quad (\text{dB}) \quad (6.13)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει την στάθμη της ακουστικής πίεσης που δημιουργείται σε κάποια απόσταση r από την ηχητική πηγή ισχύος W και κατευθυντικότητας Q , όταν αυτή λειτουργεί σε κλειστό χώρο με απόσβεση που δίνεται από το R και ονομάζεται **εξίσωση Hopkins-Stryker**.

Η τυπική μορφή αυτής της σχέσης αυτής δίνεται στο **Σχήμα 6.4**, όπου φαίνεται καθαρά η εξάρτηση της ανακλώμενης ενέργειας (σε κάποιαν απόσταση) από την απόσβεση R του δωματίου.

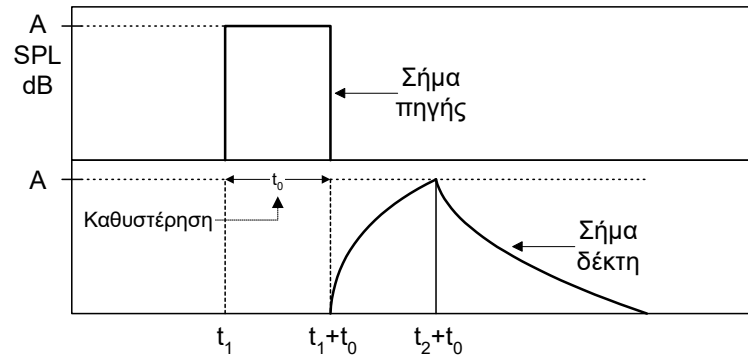


Σχήμα 6.4: Η μεταβολή της ηχοστάθμης σε κλειστό χώρο, σαν συνάρτηση της απόστασης από την πηγή

Προφανώς, η αύξηση της ενέργειας λόγω της αντήχησης καθιστά την ακουστική πίεση σε διάφορα σημεία του δωματίου μεγαλύτερη από ότι θα ήταν στο ελεύθερο πεδίο. Το γεγονός αυτό, όπως θα δούμε αργότερα, έχει πολλές φορές αρνητικά αποτελέσματα στην ποιότητα (ιδίως σε περιπτώσεις σημάτων μουσικής) ή την καταληπτότητα του μεταδιδόμενου ηχητικού σήματος (ιδίως σε περιπτώσεις σημάτων ομιλίας).

6.4 Ο χρόνος αντήχησης

Πέρα από αυτές τις βασικές σχέσεις που περιγράφουν το ηχητικό πεδίο για σταθερή με τον χρόνο διέγερση, ο καθορισμός της ακουστικής απόκρισης των κλειστών χώρων είναι επίσης απαραίτητος και για χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα, όπως είναι τα σήματα ομιλίας και της μουσικής. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα σήματα αυτά ξεκινούν από κάποια κατάσταση ησυχίας και έχουν πλάτος που διακόπτεται σε κάποια άλλη χρονική στιγμή («Σήμα πηγής» στο **Σχήμα 6.5**). Το αντίστοιχο πλάτος του σήματος που θα φθάσει στον δέκτη, θα χαρακτηρίζεται από μία αρχική καθυστέρηση (λόγω της απόστασης πηγής/δέκτη), από μία προοδευτική αύξηση του πλάτους μέχρι κάποια μέγιστη τιμή (λόγω της συσώρευσης της καθυστερημένης ενέργειας του ανακλώμενου ήχου που προστίθεται στο κατευθείαν σήμα) και μία προοδευτική και σχετικά μεγάλης διάρκειας πτώση του πλάτους λόγω της φθίνουσας ενέργειας από το ανακλώμενο ηχητικό πεδίο.



Σχήμα 6.5: Σχηματική περιγραφή του αποτελέσματος της αντήχησης στο πλάτος ενός μεταβατικού σήματος

Στην περίπτωση αυτή, το πιο σημαντικό φαινόμενο είναι το ότι εμφανίζεται ένας πεπερασμένος χρόνος ελάττωσης της ενέργειάς μετά από τη διακοπή της εκπομπής της πηγής (**Σχήμα 6.5**). Η καθυστερημένη αυτή ηχητική ενέργεια ονομάζεται αντήχηση και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του συγκεκριμένου χώρου και την απορρόφηση της ενέργειας από τους τοίχους και μετριέται συνήθως από τον **Χρόνο Αντήχησης RT** (sec). Ο Χρόνος Αντήχησης (που συχνά συμβολίζεται και σαν T , T_{60} , RT_{60} , κλπ), ορίστηκε αρχικά πειραματικά από τον καθηγητή του Harvard, Sabine το 1898 και έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή του βαθμού αντήχησης που εμφανίζει ένας κλειστός χώρος. Ο Χρόνος Αντήχησης λοιπόν ορίζεται ως εκείνος ο χρόνος μέσα στον οποίο η στάθμη της ακουστικής πίεσης πέφτει κατά 60 dB μετά από την διακοπή του σήματος διέγερσης.

Ο Sabine καθόρισε τη μεταβλητή αυτή πειραματικά ως:

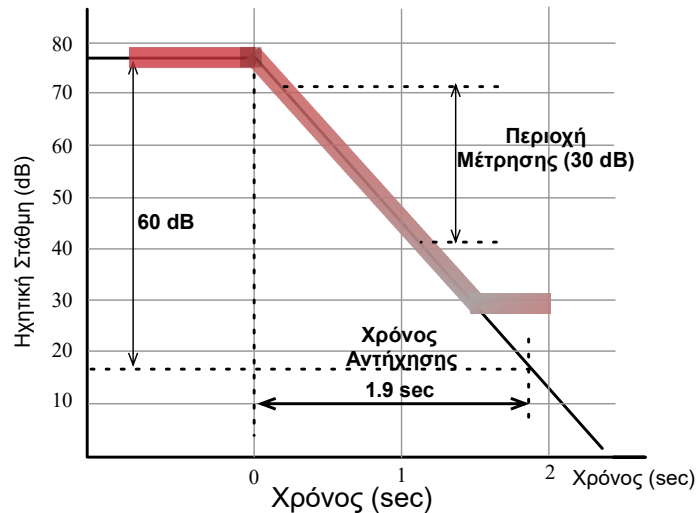
$$RT = \frac{0,161 \times V}{A} \quad (6.14)$$

όπου RT ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα, V ο όγκος του δωματίου σε m^3 και $A = S_1\alpha_1 + \dots + S_n\alpha_n$

η συνολική ηχοαπορρόφηση του δωματίου. Σε μερικές περιπτώσεις, πιο ακριβής είναι ο τύπος του Eyring:

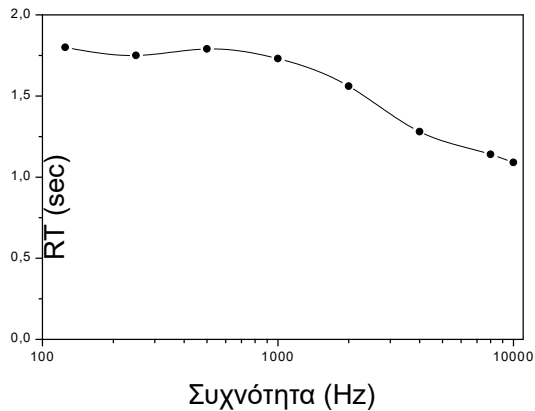
$$RT = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (6.15)$$

Θεωρητικά, η πτώση της στάθμης θα έπρεπε να είναι εκθετική με τον χρόνο, αλλά λόγω των πολύπλοκων χαρακτηριστικών των διαφορετικών συστημάτων συντονισμού, ο RT μετριέται στην πράξη με ακρίβεια μόνο πειραματικά και συνήθως σαν προσέγγιση της αρχικής μέτρησης, π.χ. για 30 dB (**Σχήμα 6.6**).



Σχήμα 6.6: Θεωρητικός προσδιορισμός του Χρόνου Αντήχησης από την πτώση της ηχοστάθμης

Στους περισσότερους χώρους, λόγω της μεταβολής της απορρόφησης του ήχου με την συχνότητα από τα τοιχώματα, ο RT μεταβάλλεται και με την συχνότητα (**Σχήμα 6.7**).

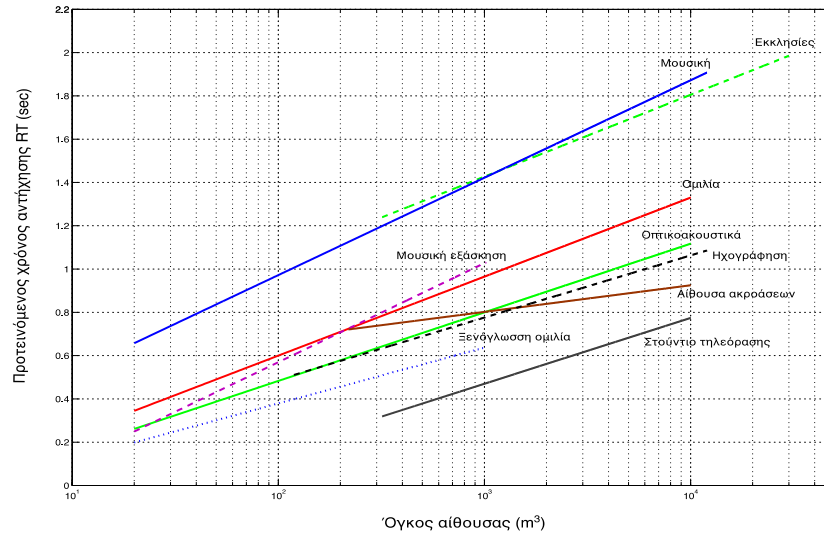


Σχήμα 6.7: Τυπική μορφή εξάρτησης του Χρόνου Αντήχησης από τη συχνότητα

Η κατασκευή του χώρου θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε ο Χρόνος Αντήχησης που εμφανίζει να είναι ο κατάλληλος ανάλογα με τις χρήσεις του κάθε χώρου. Ορισμένες τιμές του RT υποδηλώνουν καλή ποιότητα μετάδοσης ομιλίας ή μουσικής σε διαφορετικούς χώρους και παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στην σχεδίαση αρχιτεκτονικών χώρων συναυλιών, αιθουσών διαλέξεων, studio κλπ. (**Σχήμα 6.8**).

Η παραπάνω ανάλυση είναι ικανοποιητική για μία πρώτη εκτίμηση της ακουστικής ενός χώρου και μπορεί να βοηθήσει τον αρχιτέκτονα ή τον μηχανικό στην επιλογή καταλλήλων υλικών για τα τοιχώματα του χώρου αυτού. Από την πλευρά της Ηλεκτροακουστικής όμως απαιτείται λεπτομερέστερη ανάλυση του φαινομένου της

διάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους, που επιτυγχάνεται με τη χρήση Γεωμετρικής Ακουστικής και τεχνικών της Θεωρίας Σημάτων, όπως θα συζητηθεί στην επόμενη παράγραφο. Παρ' όλα αυτά, η σημασία της αντήχησης είναι καθοριστική και στην καταληπτότητα της ομιλίας, όπως θα γίνει φανερό από το παρακάτω **Παράδειγμα**.



Σχήμα 6.8: Βέλτιστη τιμή του Χρόνου Αντήχησης σε σχέση με τον όγκο και την χρήση του χώρου

Παράδειγμα

Σε ένα κλειστό χώρο με διαστάσεις $5 \times 20 \times 40 \text{ m}$ και με χρόνο αντήχησης $RT=3\text{s}$, υπάρχουν 100 ομιλητές που ο καθένας παράγει με την ομιλία του ακουστική ισχύ $100 \mu\text{W}$. Για να διαπιστωθεί αν ο «θόρυβος» που παράγεται από όλους αυτούς τους ομιλητές επιτρέπει το διάλογο δύο άλλων ατόμων που βρίσκονται στον ίδιο χώρο, θα πρέπει να υπολογιστεί η ακουστική πίεση του πεδίου αντήχησης αφού αυτό το πεδίο θεωρείται ότι δεν μεταδίδει το χρήσιμο σήμα της πηγής, που είναι:

$$P_r = \sqrt{\frac{100 \times W \times RT}{V_x \times 9,7 \times 10^{-5}}} \gg 0,28 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

οπότε η στάθμη ηχητικής πίεσης λόγω αντήχησης θα είναι ίση προς 83 dB (ref. $20 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$). Προφανώς, η συνομιλία μέσα σε μια τέτοια στάθμη θορύβου είναι αδύνατη, εκτός αν ο ένας φωνάζει δυνατά στο αυτί του άλλου, εφόσον χρησιμοποιώντας την σχέση

$$P_d^2 = \frac{\rho c W}{\pi r^2}$$

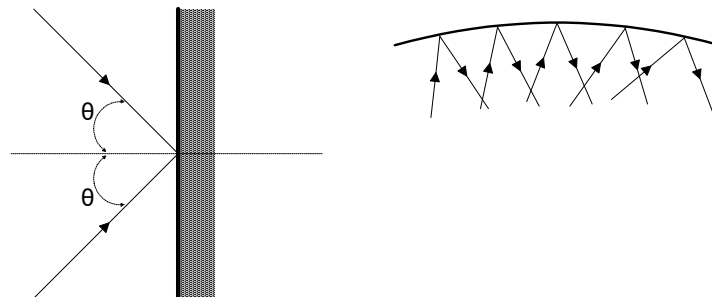
βρίσκεται ότι για $SPL=83\text{dB}$, η απαιτούμενη απόσταση πρέπει να είναι $r < 20\text{cm}$ θεωρώντας ότι επικοινωνία επιτυγχάνεται όταν η στάθμη του κατευθειάν ήχου είναι

ίση τουλάχιστον με αυτήν του ανακλωμένου ήχου. Για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία, θα πρέπει προφανώς ή να ελαττωθεί ο χρόνος αντήχησης, ή να μειωθεί η ένταση της συνομιλίας του κάθε ομιλητή. Αν συνέβαινε το δεύτερο και ο κάθε ομιλητής κατέβαζε την ισχύ της ομιλίας του κατά 10 φορές (άρα στα 10μW), τότε η ηχοστάθμη λόγω αντήχησης θα γινόταν 73dB, οπότε πλέον η επικοινωνία (σε λογική απόσταση) θα ήταν δυνατή.

6.5 Γεωμετρική Θεωρία

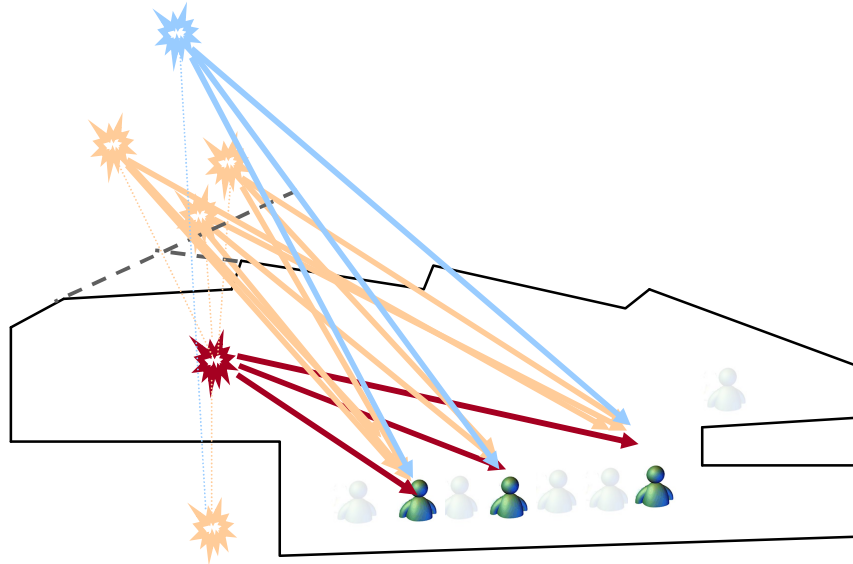
Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα και την αδυναμία της κυματικής ακουστικής να περιγράψει τη διάδοση του ήχου σε κλειστούς χώρους (ειδικά για σχετικά ψηλές συχνότητες) καθώς και τη γενική και αόριστη προσέγγιση των ενεργειακών μοντέλων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, έχουν αναπτυχθεί και άλλες, λεπτομερείς θεωρίες οι οποίες βασίζονται σε φυσικά μοντέλα διάδοσης του ήχου που βασίζονται σε γεωμετρικές αρχές.

Τα μοντέλα αυτά θεωρούν ότι ο ήχος συμπεριφέρεται σαν ακτίνα φωτός (αυτό συμβαίνει στην πράξη για σχετικά ψηλές συχνότητες >2000Hz) και ανακλάται με γωνία σταθερή και ίση προς τη γωνία πρόσπτωσης, ενώ τα φαινόμενα διάθλασης ή εξάρτησης από την συχνότητα αγνοούνται. (**Σχήμα 6.9**).



Σχήμα 6.9: Μοντέλο ανάκλασης του ήχου σε επίπεδη και καμπύλη επιφάνεια με βάση την γεωμετρική θεωρία

Τέτοια μοντέλα γενικευμένα και για πολύπλοκα σχήματα υλοποιούνται πλέον σε προγράμματα Η/Υ και επιτρέπουν την μελέτη της πορείας των ακτίνων και κατ'επέκταση την ακριβή πρόβλεψη του ακουστικού πεδίου που δημιουργεί μία ακουστική πηγή σε οποιοδήποτε σημείο σε κάποιον συγκεκριμένο γεωμετρικό χώρο. Τα προγράμματα αυτά αποτελούν και την ακριβέστερη μέθοδο μελέτης και σχεδίασης της ακουστικής διαφόρων χώρων και είναι η βάση των μεθόδων της «εικονικής ακρόασης» (**Σχήμα 6.16**).



Σχήμα 6.10: Τυπική εφαρμογή της γεωμετρικής ακουστικής θεωρίας σε αίθουσα θεάτρου

Μια τέτοια ανάλυση μπορεί να αποτρέψει συγκέντρωση πολλών ανακλάσεων στο ίδιο σημείο ή την δημιουργία άλλων ακουστικών προβλημάτων κατά την λειτουργία του χώρου. Μια περισσότερο αναλυτική προσέγγιση του θέματος αποδεικνύεται πολύπλοκη και για το λόγο αυτό, η παρακάτω ανάλυση περιγράφει εφαρμογή του μοντέλου σε απλούς, παραλληλεπίπεδους γεωμετρικούς χώρους. Έστω λοιπόν σε ένα τέτοιο χώρο μία πηγή εκπέμπει σφαιρικό κύμα μιας συχνότητας,

$$p(\omega, t, X, X') = \frac{e^{j\omega \left(\frac{\bar{r}}{c} - t \right)}}{4\pi \bar{r}} \quad (6.16)$$

όπου \bar{r} είναι το μέτρο της διανυσματικής απόστασης μεταξύ της θέσης της πηγής $X(x, y, z)$ και του δέκτη $X'(x', y', z')$. Το αποτέλεσμα της ανάκλασης εκφράζεται από μια νέα πηγή - είδωλο που σχηματίζεται σε συμμετρική θέση ως προς την αρχική και την ανακλώσα επιφάνεια (**Σχήμα 6.11**).

Έτσι, η συνολική πίεση που φθάνει στον δέκτη θα είναι της μορφής:

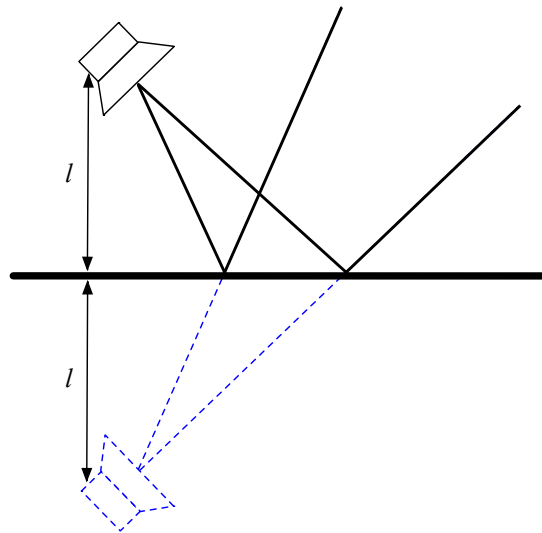
$$p'(\omega, t, X, X') = \left\{ \frac{e^{j\left(\frac{\omega}{c}|r_+|\right)}}{4\pi|r_+|} + \frac{e^{j\left(\frac{\omega}{c}|r_-|\right)}}{4\pi|r_-|} \right\} e^{-j\omega t} \quad (6.17)$$

όπου

$$\begin{aligned} |r_+| &= \sqrt{(x+x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \\ |r_-| &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \end{aligned} \quad (6.18)$$

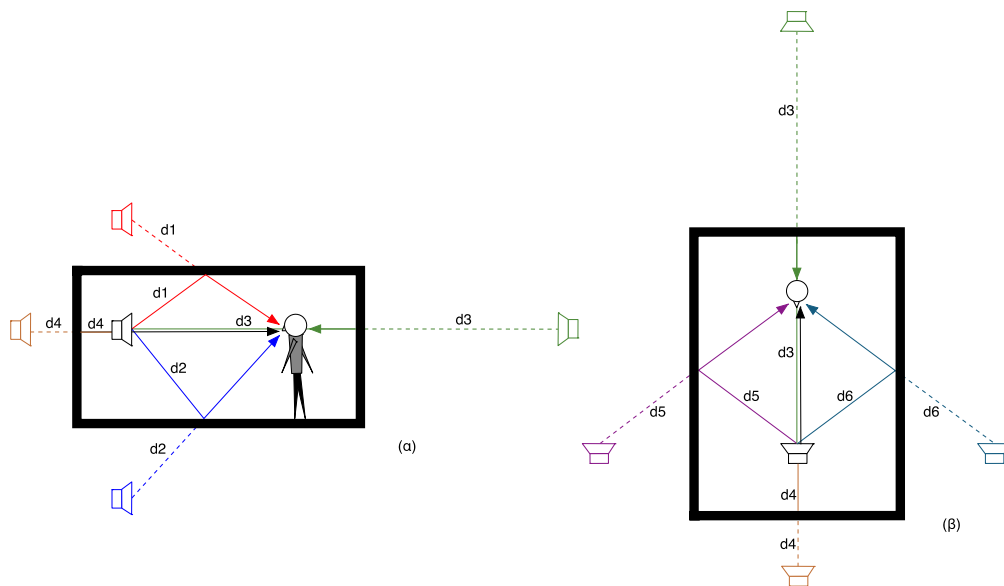
Για έναν παραλληλεπίπεδο χώρο και θεωρώντας ότι μετά από κάθε ανάκλαση στην αντίστοιχη επιφάνεια (που έχει συντελεστή ανάκλασης β) η πίεση του ήχου θα ελαττώνεται στο πλάτος της κατά β , η συνολική πίεση από όλες τις ανακλάσεις, στην θέση του δέκτη, θα είναι :

$$p(t, X, X', \omega) = \sum_{p=1}^8 \sum_{r=-\infty}^{\infty} \beta_x \beta_{x_2} \beta_{y_1} \beta_{y_2} \beta_{zz_1} \beta_{z_2} \frac{e^{j\frac{\omega}{c}|r_p+r_r|}}{4\pi|r_p+r_r|} \quad (6.19)$$



Σχήμα 6.11: Σχηματισμός ειδώλου ακουστικής πηγής

Με την μέθοδο αυτή, δημιουργούνται είδωλα από χώρους διατεταγμένους συμμετρικά προς τις πλευρές του αρχικού δωματίου (**Σχήμα 6.12**). Προφανώς αν το σήμα έχει περισσότερες από μια συχνότητες, ισχύει επίσης η ίδια σχέση και η πίεση υπολογίζεται εύκολα με κατάλληλο αλγόριθμο που θα συζητηθεί παρακάτω. Φαίνεται επίσης η διαφορά μεταξύ αυτής της σχέσης και της ανάλογης που υπολογίζεται με βάση την κυματική θεωρία, η οποία παρουσιάζει την επιπλέον δυσκολία του υπολογισμού ενός άπειρου αθροίσματος για κάθε συχνότητα. Το γεωμετρικό μοντέλο απαιτεί μόνο τον υπολογισμό της εκάστοτε καθυστέρησης και του πλάτους της κάθε ανάκλασης, που προκύπτουν από τις θέσεις (αποστάσεις) των ειδώλων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.12** για τα είδωλα 1^{ης} τάξης που δημιουργούνται σε παραλληλεπίπεδο χώρο. Κατά τη γεωμετρική ακουστική ανάλυση, πρέπει να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο των πολλαπλών ειδώλων με αποτέλεσμα το συνολικό σύστημα να είναι αρκετά πολυπλοκότερο. Αν μια ηχητική ακτίνα καταλήγει στον ακροατή ύστερα από δύο ανακλάσεις, τότε μοντελοποιείται από ένα είδωλο δεύτερης τάξης, ενώ γενικά ένα είδωλο n -οστής τάξης αντιπροσωπεύει μια ηχητική ακτίνα, η οποία καταλήγει στον ακροατή ύστερα από n ανακλάσεις. Η περιγραφή του ηχητικού πεδίου σε έναν κλειστό χώρο, επιβάλλει τη μοντελοποίηση ειδώλων μεγαλύτερων τάξεων, τα οποία υποκαθιστούν ανακλάσεις στις οποίες υπεισέρχονται περισσότερες επιφάνειες, αλλά τέτοια υλοποίηση απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

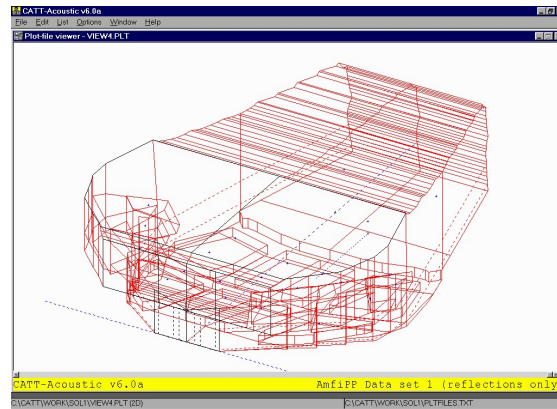


Σχήμα 6.12: Σχηματισμός ειδώλων 1^{ης} τάξης για την: (α) τομή, (β) κάτοψη ενός παραλληλεπίπεδου ακουστικού χώρου

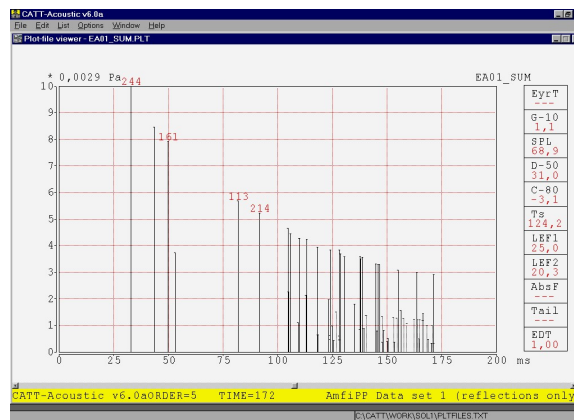
Η ευελιξία και υπολογιστική ευκολία που εμφανίζει η γεωμετρική θεωρία, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη γεωμετρικών μοντέλων χώρων για αρχιτεκτονικές εφαρμογές (π.χ. AUTOCAD), επέτρεψε (από τη δεκαετία του '90), την εξέλιξη εφαρμογών λογισμικού ακουστικής εξομοίωσης χώρων που πλέον χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε επαγγελματικές και ερευνητικές εφαρμογές. Τα λογισμικά αυτά επιτρέπουν την λεπτομερή πρόβλεψη, εκτίμηση και ανάλυση της ακουστικής ενός χώρου με βάση τα αρχιτεκτονικά του σχέδια – ακόμη και πριν την κατασκευή. . Σήμερα, στο εμπόριο υπάρχει μια πληθώρα από αντίστοιχους τίτλους λογισμικού, ενώ παράλληλα στο διαδίκτυο δίδεται πρόσβαση και σε ελεύθερο λογισμικό το οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει ακουστικές προσομοιώσεις. Η χρήση τέτοιου λογισμικού αποτελεί αντικείμενο Εργαστηριακής Άσκησης και ενδεικτικές απεικονίσεις των οθονών δίνονται στα **Σχήματα 6.13 – 6.15**. Σε γενικές γραμμές, τα λογισμικά αυτά υλοποιούν παραλλαγές της γεωμετρικής θεωρίας ακουστικής διάδοσης και οι διαφορετικές τεχνικές βασίζονται σε μεθόδους:

- υπολογισμού πορείας ακτίνων (ray tracing), ανίχνευσης κώνου (cone tracing), ή πυραμίδας (pyramid tracing)
- ακουστικών ειδώλων (image method)
- υβριδικούς υπολογισμούς (συνδυαστικές μεθόδους)

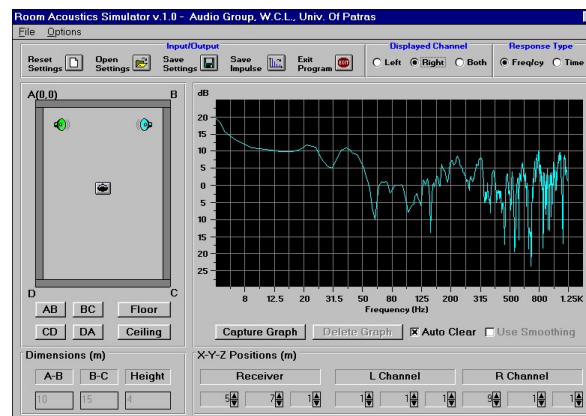
Στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω του αυξανόμενου υπολογιστικού κόστους για τον υπολογισμό ανακλάσεων υψηλής τάξης (π.χ. πάνω από $N=3$), και με δεδομένο ότι οι πολλαπλές αυτές ανακλάσεις που φθάνουν μετά από κάποια χρονική καθυστέρηση εμφανίζουν μεγάλο πλήθος και σχετικά τυχαίες καθυστερήσεις (και εκθετικά μειούμενο πλάτος), οι εφαρμογές λογισμικού υλοποιούν γεννήτριες τυχαίων αριθμών που εξομοιώνουν ικανοποιητικά την «ουρά» των κρουστικών αποκρίσεων χωρίς να απαιτούν πολύπλοκους υπολογισμούς.



Σχήμα 6.13: Παράδειγμα αρχιτεκτονικού χώρου προς μελέτη (Συνεδριακό και Πολιτιστικό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών)

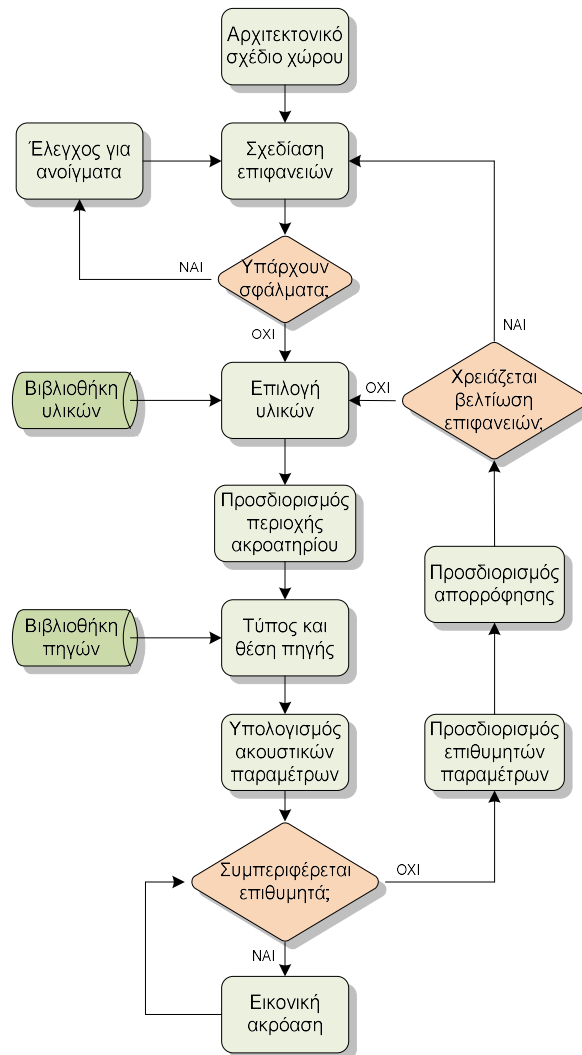


Σχήμα 6.14: Παράδειγμα υπολογισθείσας απόκρισης (ηχογράμμα)



Σχήμα 6.15: Γραφικό περιβάλλον για τον καθορισμό των παραμέτρων του χώρου και των θέσεων πηγής/δέκτη.

Η διαδικασία μελέτης ενός χώρου με χρήση τέτοιου λογισμικού εξομοίωσης, ακολουθεί τη διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Όπως φαίνεται και από το σχήμα αυτό, σε τελικό στάδιο, είναι δυνατό να γίνει και εικονική ακρόαση του χώρου, με χρήση κάποιου επιθυμητού ανηχωτικού αρχείου ήχου (μουσική, ομιλία).



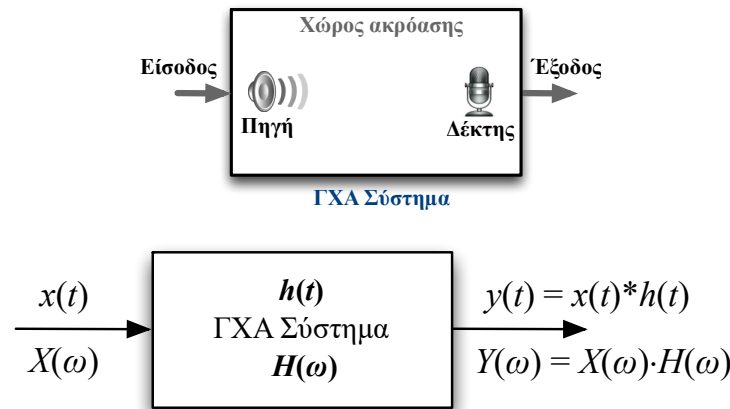
Σχήμα 6.16 διαδικασία ακουστικής μελέτης χώρου με χρήση λογισμικού ακουστικής εξομίωσης

6.6 Θεωρία σημάτων και ακουστική κλειστών χώρων

Αν θεωρήσουμε την πίεση της σφαιρικής πηγής της παραπάνω ανάλυσης σαν ιδανική συνάρτηση της μορφής $\delta(t)$, δηλαδή να περιέχει όλες τις συχνότητες, όπου

$$\begin{aligned}\delta(t) &= 1 \text{ για } t=0 \\ \delta(t) &= 0 \text{ για } t \neq 0\end{aligned}$$

τότε μπορούμε να αναλύσουμε την διάδοση του ήχου στον χώρο, με τις τεχνικές της θεωρίας σημάτων. Στην περίπτωση αυτή, η πίεση που θα παραχθεί στην θέση του δέκτη, θα είναι η κρουστική απόκριση του χώρου $h(t)$, που ονομάζεται και Room Impulse Response (RIR), δες **Σχήμα 6.17**.



Σχήμα 6.17: Προσομοίωση της διάδοσης του ήχου σε κλειστό χώρο με θεωρία συστημάτων

Με τον τρόπο αυτό, κάθε κλειστός ακουστικός χώρος περιγράφεται σαν Γραμμικό, Χρονικά Αμετάβλητο σύστημα (ΓΧΑ), το οποίο χαρακτηρίζεται από την κρουστική του απόκριση $h(t)$ για κάθε θέση πηγής και δέκτη. Έτσι, η $h(t)$ αποτελείται από τις διαφορετικές ανακλάσεις του σήματος εισόδου $\delta(t)$, που φθάνουν με διαφορετική καθυστέρηση και πλάτος στο δέκτη, οπότε γενικά:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \delta(t - t_n) \quad \text{για } n = 0, 1, 2, \dots \quad (6.20)$$

Γνωρίζοντας ότι η $h(t)$ εξαρτάται από τις συγκεκριμένες θέσεις πηγής και δέκτη, και λαμβάνοντας υπόψη την σχέση που δόθηκε για την $p'(t, x, x')$ στην προηγούμενη παράγραφο για ένα απλό δωμάτιο, χρησιμοποιώντας και τις φυσικές μεταβλητές της συγκεκριμένης περίπτωσης, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$h(t, x, x') = \sum_{p=1}^8 \sum_{r=-\infty}^{\infty} \beta_{x_1} \beta_{x_2} \beta_{y_1} \beta_{y_2} \beta_{z_1} \beta_{z_2} \frac{\delta\left(t - |r - r_r| \times \frac{1}{c}\right)}{4\pi |r_p + r_r|} \quad (6.21)$$

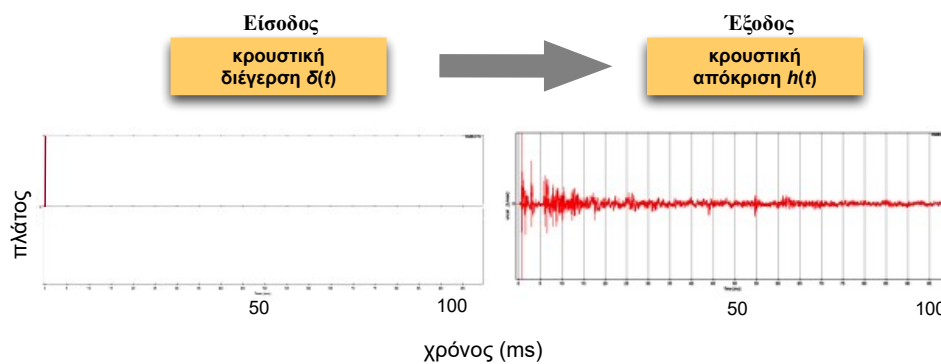
Η $|r_p|$ δίνει το διανυσματικό μέτρο της απόστασης κάθε ειδώλου από το δέκτη (**Σχήμα 6.12**) και η $|r_r|$ δίνει την (άπειρη) πρόσθεση «νέων» δωματίων διάστασης $|r_r|$. Οι $\beta_{x,y,z}$ είναι οι συντελεστές ανάκλασης κάθε επιφάνειας του αρχικού δωματίου

Επιπλέον, όπως περιγράφεται και από την αντίστοιχη Εργαστηριακή Άσκηση, η απόκριση ενός πραγματικού ακουστικού χώρου, μπορεί να μετρηθεί και είτε να αποτελέσει βάση ανάλυσης των χαρακτηριστικών του χώρου, είτε να χρησιμοποιηθεί για συνέλιξη με κάποιο ηχητικό σήμα, ώστε να εξομοιώσει τη διάδοση και καταγραφή του ήχου στον χώρο αυτό. Ενδεικτική απεικόνιση της ιδανικής κρουστικής απόκρισης πραγματικού χώρου, δίνεται στο **Σχήμα 6.18**.

Η μέτρηση ή ο υπολογισμός της $h(t)$ επιτρέπει και τον υπολογισμό του Χρόνου Αντήρησης του χώρου, καθώς και την εύρεση όλων των χαρακτηριστικών

ακουστικών παραμέτρων του χώρου. Με τον τρόπο αυτό, κάθε κλειστός ακουστικός χώρος περιγράφεται σαν γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα (φίλτρο), το οποίο χαρακτηρίζεται από την συγκεκριμένη κρουστική του απόκριση για κάθε θέση πηγής (source) και δέκτη (receiver) και σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς το σήμα που θα φθάσει στον δέκτη, για κάθε σήμα που παράγει η πηγή. Αν λοιπόν υπάρχει μια αναλυτική έκφραση για την συνάρτηση της ακουστικής πίεσης στην είσοδο, έστω η $s(t)$, τότε η συνάρτηση της ακουστικής πίεσης στο δέκτη θα είναι:

$$r(t) = h(t) * s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) s(\tau) d\tau \quad (6.22)$$



Σχήμα 6.18: Χρονική διέγερση και απόκριση σε κλειστό χώρο με θεωρία συστημάτων

Εφόσον υπάρχει μια μέτρηση του $s(t)$ και του $h(t)$ είναι προφανές ότι υπολογιστικά, μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί η παραπάνω σχέση χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες εξισώσεις διακριτού χρόνου, χρησιμοποιώντας έναν Η/Υ (σε λειτουργία μη πραγματικού χρόνου -off line) ή και σε πραγματοποιώντας τη συνέλιξη σε λειτουργία πραγματικού χρόνου (real-time). Η προσέγγιση αυτή αποτελεί και την βάση της Εικονικής Ακουστικής (Virtual Acoustics), ειδικά μάλιστα αφού υπαρκτοί ή και μη υπαρκτοί χώροι μπορούν να εισαχθούν σε λογισμικό ακουστικής εξομοίωσης (δες προηγούμενη παράγραφο) και να παράγουν κρουστικές αποκρίσεις. Άλλες τεχνικές προσομοίωσης της διάδοσης του ήχου θα συζητηθούν σε επόμενη παράγραφο.

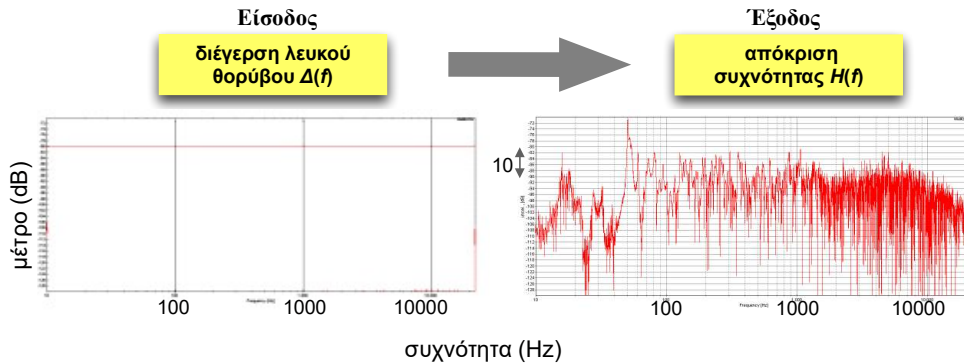
Όπως επισημάνθηκε παραπάνω (**Σχήμα 6.17**), η συγκεκριμένη σχέση εισόδου-εξόδου μπορεί να αναπαρασταθεί ισοδύναμα και στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier, όπου προκύπτει η έκφραση:

$$R(f) = H(f) \cdot S(f) \quad (6.23)$$

με $\omega = 2\pi f$ και $R(f)$, $S(f)$, $H(f)$ να είναι αντίστοιχα οι μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων $r(t)$, $s(t)$, $h(t)$. Με απλή αναδιάταξη των όρων της εξίσωσης 6.23 και σύμφωνα πάντα με την αντίστοιχη ανάλυση που έχει προηγηθεί, προκύπτει η σχέση

$$H(f) = \frac{R(f)}{S(f)} \quad (6.24)$$

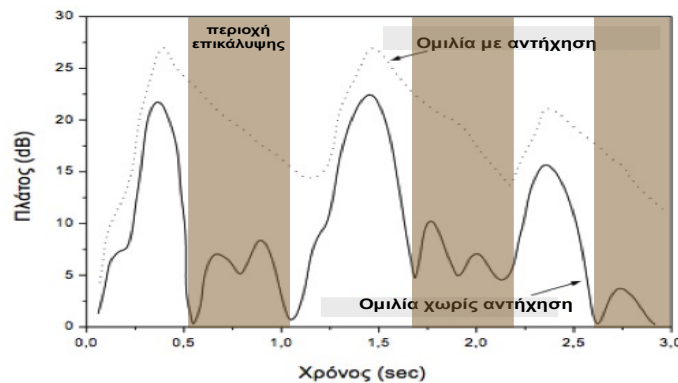
με τη συνάρτηση $H(f)$ να αποτελεί την απόκριση συχνότητας (frequency response) του χώρου ακρόασης (υπό-εξέταση σύστημα) ή την **Συνάρτηση Μεταφοράς Χώρου** (Room Transfer Function, RTF), δες **Σχήμα 6.19**.



Σχήμα 6.19 απόκρισης συχνότητας (συνάρτησης μεταφοράς) χώρου με κρουστική απόκριση που δόθηκε από το **Σχήμα 6.18**.

6.7 Καταληπτότητα ομιλίας σε χώρους με αντήχηση

Όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 6.3, η αντήχηση συντελεί στην αύξηση της ηχητικής στάθμης σε κάποια απόσταση από την πηγή (σε σχέση με την στάθμη στο ελεύθερο ακουστικό πεδίο) αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι το φαινόμενο της αντήχησης ευνοεί πάντα την μετάδοση και την κατανόηση μηνυμάτων όπως η ομιλία ή ακόμα και η μουσική. Ποιοτικές παράμετροι της ακουστικής συμπεριφοράς εξάγονται από την κρουστική απόκριση του χώρου, (λεπτομέρειες δίνονται σε Εργαστηριακή Άσκηση). Πολύ συχνά - και αυτό είναι σημαντικό για εφαρμογές όπως η τηλεφωνία και η επικοινωνία ανθρώπου μηχανής - η υπερβολική αντήχηση περιορίζει την καταληπτότητα τέτοιων σημάτων, με τρόπο ανάλογο με αυτόν της ύπαρξης ακουστικού θορύβου. Αυτό γίνεται γιατί η καθυστερημένη ενέργεια της αντήχησης από ένα φώνημα ή λέξη, διαρκεί μέχρι την επόμενη λέξη την οποία και επικαλύπτει σε κάποιο βαθμό (**Σχήμα 6.20**).



Σχήμα 6.20: Ενεργειακές περιβάλλουσες λέξεων πριν και μετά την μετάδοσή τους σε χώρο με αντήχηση που επικαλύπτει τις αρχικές λέξεις

Μια εμπειρική σχέση δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της παραμόρφωσης και του σχετικού ποσοστού μείωσης στην καταληπτότητα της ομιλίας από την αντήχηση. Αυτό το κριτήριο που προτάθηκε από τον Peutz εκφράζει την επί τοις εκατό απώλεια κατανόησης φθόγγων που περιέχουν σύμφωνα, και δίδεται σαν:

$$\%AL_{cons} = \frac{200r^2RT^2(n+1)}{VQ} \quad (6.25)$$

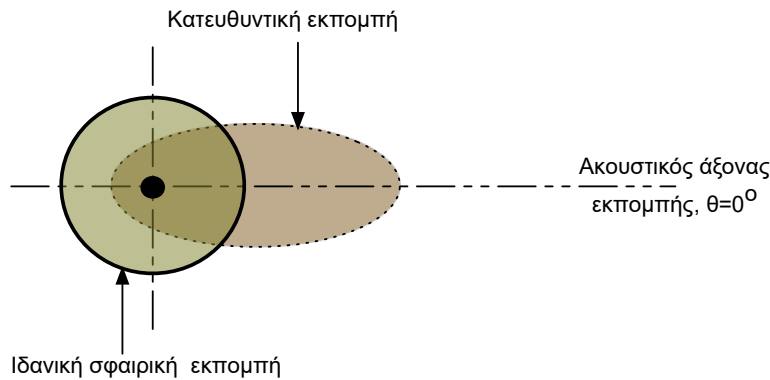
όπου r = απόσταση πηγής/δέκτη σε m, V ο όγκος του χώρου σε m^3 , RT ο χρόνος αντήχησης του χώρου σε s, Q η κατευθυντικότητα της πηγής και $n+1$ ο αριθμός ομοίων πηγών αν αυτές λειτουργούν ταυτόχρονα, πάνω από την μία πηγή (π.χ. ένας ομιλητής ή ηχείο, όπου $n=0$).

Η παραπάνω σχέση υπονοεί μια σχέση σήματος (ομιλίας) προς θόρυβο > 25 dB. Αν η τιμή της $\%A_{cons}$ είναι μικρότερη από το 10 %, δεν υπάρχει συνήθως πρόβλημα στην κατανόηση του μηνύματος. Αν η τιμή της όμως γίνει μεγαλύτερη του 15 %, τότε το μήνυμα δεν είναι αντιληπτό. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε την τιμή $\%A_{cons} = 15$ %, σαν οριακή τιμή αναφορικά με την απώλεια κατανόησης και έτσι να προσδιορίσουμε από την παραπάνω σχέση τις υπόλοιπες παραμέτρους, οι οποίες για ένα χώρο, επιτρέπουν την $\%A_{cons}$ να πάρει την τιμή, δηλαδή,

$$\begin{aligned} r_{max} &= \sqrt{15 \cdot V \cdot \frac{Q}{200 \cdot RT^2 \cdot (n+1)}} \\ Q_{min} &= 200 \cdot RT^2 \cdot \frac{(n+1)}{15 \cdot V} \\ RT_{max} &= \sqrt{\frac{15 \cdot V \cdot Q}{200 \cdot r^2 \cdot (n+1)}} \\ V_{min} &= \frac{200 \cdot r^2 \cdot RT^2 \cdot (n+1)}{15 \cdot Q} \end{aligned} \quad (6.26)$$

όπου r_{max} η μέγιστη απόσταση από την πηγή σε m, Q_{min} η ελάχιστη τιμή κατευθυντικότητας, RT_{max} η ελάχιστη τιμή χρόνου αντήχησης σε s και V_{min} ο ελάχιστος όγκος του χώρου σε m^3

Με τον τρόπο αυτό, για κάθε χώρο και για κάθε γωνία μιας κατευθυντικής ακουστικής πηγής, ορίζονται περιοχές ακροατηρίου στις οποίες η καταληπτότητα του σήματος της ομιλίας θα είναι αποδεκτή ή όχι (**Σχήμα 6.20**). Για να επιτευχθεί αύξηση της ζώνης κατανόησης προς μια κατεύθυνση (όπου πιθανώς θα βρίσκεται το ακροατήριο) πρέπει να χρησιμοποιηθεί ακουστική πηγή με κατάλληλη κατευθυντικότητα (π.χ. ηχείο στραμμένο προς εκείνη τη διεύθυνση) και αυτό γίνεται με χρήση ηχητικής εγκατάστασης, όπως θα συζητηθεί και σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6.20: Χαρτογράφηση ενός χώρου σε ζώνες κατανόησης ομιλίας

6.8 Συστήματα προσομοίωσης ακουστικής αντήχησης

Με τη βελτίωση της πιστότητας των Η/Α μετατροπέων και συστημάτων, η επιδράση των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου ηχογράφησης (θόρυβος, αντήχηση κ.τ.λ.) εμφανίστηκε δυσανάλογα αυξημένη, με αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής ειδικών χώρων (Studio) με ελεγχόμενες ακουστικές παραμέτρους στους οποίους γίνεται η ηχοληψία της μουσικής και της ομιλίας (πχ. για εγγραφή δίσκων, ραδιοφωνικές εκπομπές, κλπ). Τέτοιοι χώροι είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος και παρουσιάζουν πολύ χαμηλή τιμή αντήχησης, έτσι ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες ακουστικές παραμορφώσεις. Σε πολλές τέτοιες εφαρμογές λοιπόν, απαιτείται τεχνητή προσθήκη αντήχησης και το ίδιο συμβαίνει και σε πολλές περιπτώσεις αναμετάδοσης ήχου όπου δεν υπάρχει φυσικός χώρος και αντήχηση (συναυλίες, ομιλίες κτλ), όπου λόγω του αισθητικού ρόλου της αντήχησης σε σχέση με το μεταδιδόμενο μήνυμα, χρησιμοποιούνται και πάλι συστήματα προσομοίωσης αντήχησης έτσι ώστε να δημιουργείται η επιθυμητή αίσθηση του ακουστικού χώρου. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται από την δεκαετία του '50, και τα παλαιότερα από τα συστήματα βασίζονταν σε αναλογικές τεχνικές ενώ τα σύγχρονα σε ψηφιακές. Οι αρχικές τεχνικές ψηφιακής προσομοίωσης της ακουστικής αντήχησης βασιζόταν σε προσεγγίσεις των κρουστικών αποκρίσεων των χώρων μέσω απλοποιημένων διατάξεων ψηφιακών φίλτρων που επέτρεπαν σχετικά χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης, με δεδομένες τις περιορισμένες τεχνολογικές δυνατότητες της εποχής. Με την συνεχή αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, είναι πλέον εφικτή η προσομοίωση με χρήση μετρημένων, πραγματικών κρουστικών αποκρίσεων (δες εξίσωση 6.22) και αύξηση του ρεαλισμού στο τελικό αποτέλεσμα. Επέκταση των μεθόδων αυτών προσομοίωσης αποτελούν και οι τεχνικές «εικονικής ακρόασης» (auralisation) που χρησιμοποιούνται τόσο σε εφαρμογές παιχνιδιών σε υπολογιστές-παιχνιδομηχανές, σε οπτικοακουστικές παραγωγές και σε εφαρμογές εικονικής και επταυξημένης πραγματικότητας.

6.8.1 Συστήματα ψηφιακών φίλτρων

Τέτοια συστήματα προτάθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '60 από τον M.R.Schroeder (τότε στα Bell Labs) και σήμερα χρησιμοποιούνται στις περισσότερες

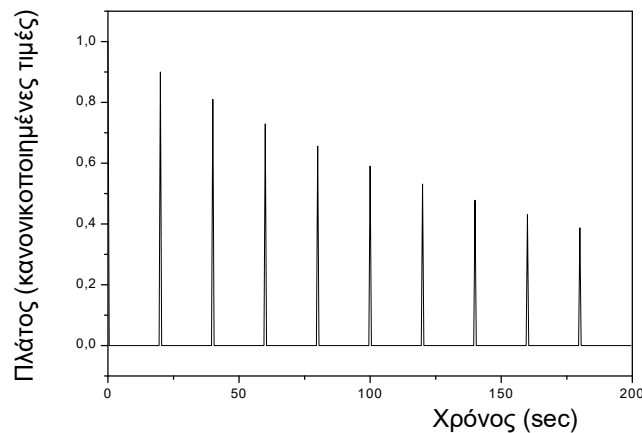
πρακτικές υλοποιήσεις. Τα φίλτρα αυτά έχουν ακουστικές αποκρίσεις παρόμοιες με αυτές των ακουστικών χώρων, όπως αυτές αναλύθηκαν στην παράγραφο 1.5, αλλά η μαθηματική δομή τους είναι αρκετά απλοποιημένη έτσι ώστε να επιτρέπεται η σχετικά εύκολη υλοποίησή τους από ψηφιακούς επεξεργαστές. Η απλούστερη μορφή ενός τέτοιου φίλτρου περιγράφει την ύπαρξη διαδοχικών και περιοδικών ανακλάσεων του ήχου (ανάλογη κατάσταση που συμβαίνει με ένα στάσιμο ηχητικό κύμα), ονομάζεται φίλτρο τύπου “χτένας” (“comb-filter”), και έχει απόκριση διακριτού χρόνου της μορφής (**Σχήμα 6.21(α)**):

$$h(nT) = \sum_{m=1}^{\infty} g^m \delta(nT - k_m T) \quad (6.27)$$

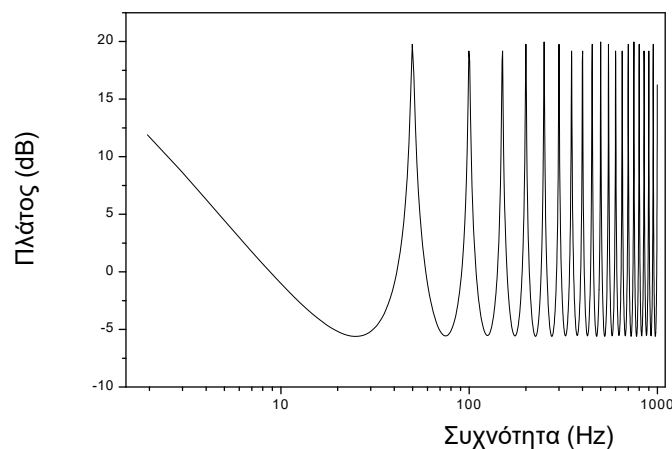
όπου T (s) είναι η περίοδος δειγματοληψίας, k_m και n είναι μεταβλητές που περιγράφουν καθυστέρηση και g^m είναι το σχετικό πλάτος της m -στής ανάκλασης ($g < 1$).

Το φάσμα πλάτους ενός τέτοιου συστήματος (**Σχήμα 6.21(β)**) είναι:

$$|H(e^{j\omega})| = \frac{1}{\sqrt{1 - g^2 - 2g \cos \omega k}} \quad (6.28)$$



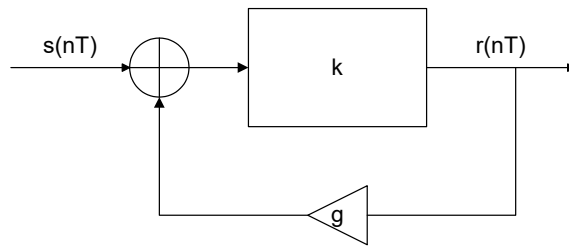
(α)



(β)

Σχήμα 6.21: (α) Χρονική και (β) φασματική απόκριση Comb-φίλτρου

Η βασική τοπολογία η οποία επιτρέπει την υλοποίηση της παραπάνω κρουστικής απόκρισης δίνεται στο **Σχήμα 6.22**.



Σχήμα 6.22: Τοπολογία υλοποίησης comb-φίλτρου

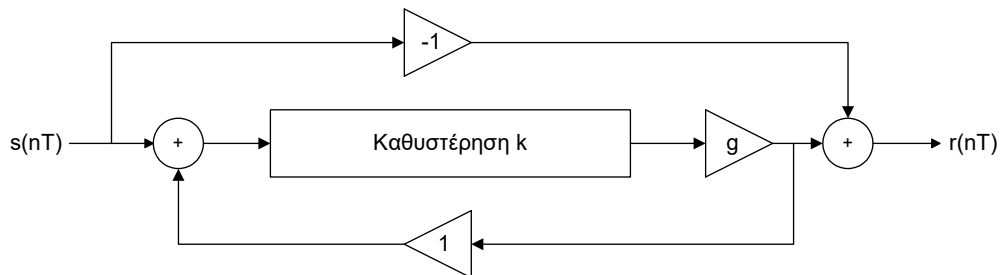
Επειδή ένα τέτοιο ψηφιακό φίλτρο προσομοιάζει μόνο ένα δυσδιάστατο σύστημα χώρου, με έντονο φασματικό χρωματισμό (όπως φαίνεται εύκολα από το φάσμα του), έχουν επιπλέον χρησιμοποιηθεί (αρχικά από τον Schroeder), περισσότερα πολύπλοκα συστήματα φίλτρων που προσθέτο-υν ανακλάσεις χωρίς τον χαρακτηριστικό χρωματισμό του σήματος από τα φίλτρα της προηγούμενης κατηγορίας. Τα φίλτρα αυτά, δεν επιρεάζουν το φάσμα του σήματος και γι'αυτό ονομάζονται “ολοδιαβατά” (“all-pass filters”), με κρουστική απόκριση:

$$h(nT) = \delta(nT) / (1 - g^2) + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} g^m \delta(nT - k_m T) \quad (6.29)$$

Το φάσμα πλάτους ενός τέτοιου συστήματος είναι:

$$|H(e^{j\omega})| = 1, \text{ για όλα τα } \omega \quad (6.30)$$

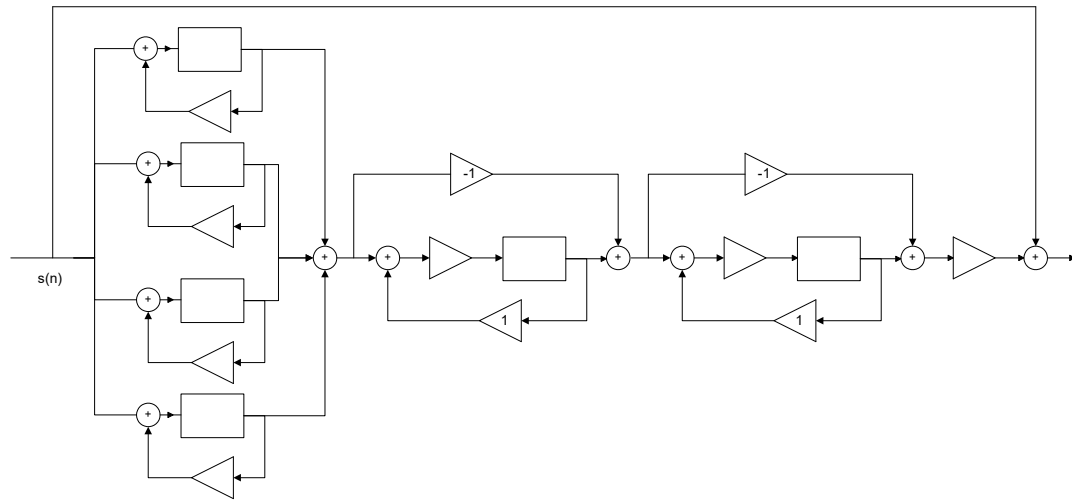
ενώ η φάση δεν είναι προφανώς γραμμική. Η βασική τοπολογία η οποία επιτρέπει την υλοποίηση της παραπάνω κρουστικής απόκρισης δίνεται στο **Σχήμα 6.23**.



Σχήμα 6.23: Τοπολογία υλοποίησης all-pass φίλτρου

Για τη δημιουργία συνθέτων συστημάτων ανάκλασης του ήχου με πυκνότητα ανακλάσεων ανάλογη με αυτή ενός πραγματικού χώρου, συνδιάζονται αρκετά φίλτρα και των δύο παραπάνω κατηγοριών, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.24**. Τόσο η κρουστική απόκριση ενός τέτοιου συστήματος, όσο και η φασματική απόκριση (και η τελική ηχητική εντύπωση) πλησιάζουν αυτής ενός πραγματικού χώρου. Η υλοποίηση τέτοιων φίλτρων απαιτεί σχετικά απλές εντολές για εξισώσεις διαφοράς και έτσι οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε συστήματα και

εφαρμογές λογισμικού (plug-in) και σε συσκευές. Περισσότερες λεπτομέρειες για τέτοια συστήματα δίνονται στο Μάθημα της Ψηφιακής Τεχνολογίας Ήχου.



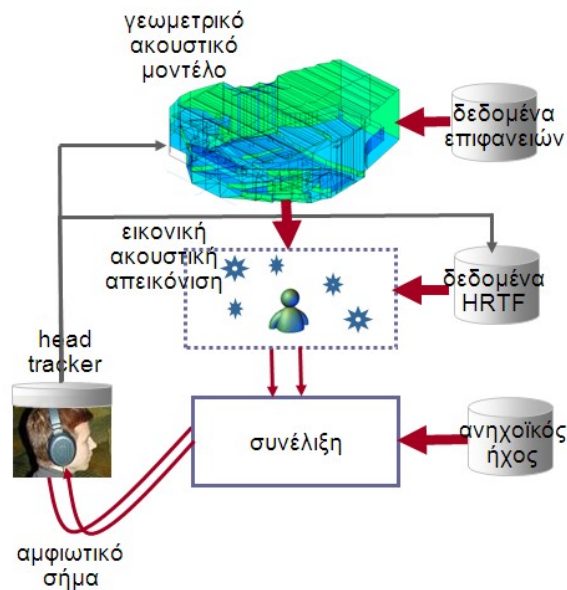
Σχήμα 6.24: Δομή σύνθετης μονάδα αντήχησης με συνδιασμό απλών φίλτρων

6.8.2 Συστήματα συνέλιξης με κρουστική απόκριση

Οι μέθοδοι αυτές, βασίζονται είτε σε χρήση μετρημένων κρουστικών αποκρίσεων πραγματικών χώρων, είτε σε προσομοιώσεις μέσω γεωμετρικής προσέγγισης της ακουστικής χώρων που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν και την βάση των συστημάτων Εικονικής Ακουστικής. Συχνά, σε τέτοια συστήματα, απαιτείται ευελιξία σε τοποθέτηση των (εικονικών) πηγών ή δεκτών, κάτι που δεν επιτρέπει τη χρήση πραγματικών μετρήσεων που λόγω πρακτικών περιορισμών, δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν σε τόσο πολλές διαφορετικές θέσεις σε κάποιο χώρο. Έτσι, είναι πρακτικότερη η χρήση εφαρμογών γεωμετρικής ακουστικής, όπου οι αποκρίσεις μπορούν να υπολογίζονται για οποιαδήποτε επιθυμητή διάταξη και θέση πηγής-δέκτη ή και για πολλαπλές πηγές-δέκτες.

Στις περιπτώσεις τέτοιων εφαρμογών, συχνά απαιτείται ακριβέστερη προσομοίωση του συγκεκριμένου (εικονικού) χώρου και επιπλέον, απαιτείται η ακριβής καταγραφή της γωνίας άφιξης της κάθε ανάκλασης (ειδικά για τις πρώτες ανακλάσεις). Έτσι μπορεί ο ακροατής (απαραίτητα με χρήση ακουστικών) να έχει ρεαλιστική τρισδιάστατη απεικόνιση της ακουστικής ενός χώρου και της θέσης και εκπομπής της πηγής σε σχέση με την επιθυμητή θέση (εικονικής) ακρόασης. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε υλοποίηση της μαθηματικής πράξης της συνέλιξης (δες εξίσωση 6.22), όπου η κρουστική απόκριση του υπό προσομοίωση χώρου είτε μετριέται, είτε υπολογίζεται με βάση ένα γεωμετρικό μοντέλο, όπως συζητήθηκε προϋγουμένως. Επιπλέον για την ακριβή προσομοίωση της τρισδιάστατης θέσης της (εικονικής) πηγής και του ακροατή στον συγκεκριμένο χώρο, αφού σε κάθε μία από τις υπολογισμένες ανακλάσεις αντιστοιχεί συγκεκριμένη γωνία άφιξης, ο αλγόριθμος καθορίζει και την γωνία αυτή (στα 2 επίπεδα). Η παράμετρος αυτή

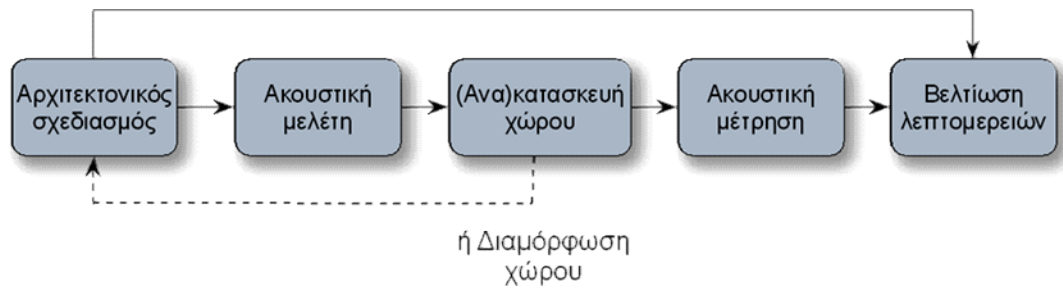
κατόπιν χρησιμοποιείται για επιλέον προ-φιλτράρισμα του σήματος εισόδου και με το (προ-υπολογισμένο) φίλτρο που αντιστοιχεί στην συνάρτηση μεταφοράς του (μέσου) εξωτερικού αυτιού για σήματα που φθάνουν στον ακροατή από την συγκεκριμένη γωνία (η συνάρτηση αυτή ονομάζεται Head Related Transfer Function, HRTF και είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για την δημιουργία της τρισδιάστατης ηχητικής εντύπωσης στον εγκέφαλο), δες **Σχήμα 6.25**. Η τεχνική αυτή αποτελεί και την βάση της “εικονικής ακρόασης” (auralisation) που χρησιμοποιείται τόσο σε μελέτες αρχιτεκτονικών χώρων, όσο σε πλήθος οπτικο-ακουστικών εφαρμογών και σε συστήματα εικονικής και επταυξημένης πραγματικότητας.



Σχήμα 6.25: Σύστημα εικονικής ακρόασης με δυνατότητα επαναπροσδιορισμού γωνίας ακρόασης

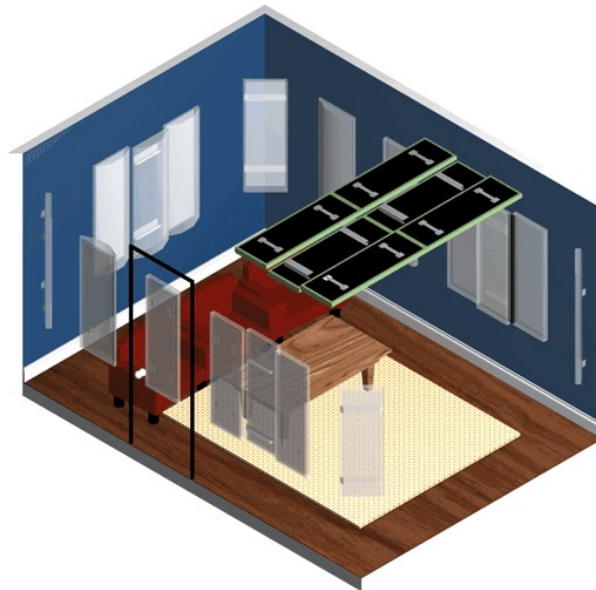
6.9 Μέθοδοι βελτίωσης της ακουστικής κλειστών χώρων

Σε πάρα πολλές περιπτώσεις, η ακουστική ενός κλειστού χώρου δεν είναι κατάλληλη με την προβλεπόμενη χρήση του και δημιουργεί είτε προβλήματα στην ποιότητα του αναπαραγόμενου σήματος, είτε και μείωση της καταληπτότητας της ομιλίας. Η διαδικασία βελτίωσης απαιτεί ακουστική μελέτη που θα ορίσει τη διαμόρφωση του χώρου – συνήθως με προσθήκη ηχοαπορρόφησης σε κατάλληλες επιφάνειες (ή και σε ειδικές περιπτώσεις – ανακατασκευή επιφανειών), ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη για τη χρήση ακουστική (π.χ. Χρόνος Αντήρησης, Καταληπτότητα, κλπ.). Η διαδικασία της μελέτης αξιοποιεί τα αρχιτεκτονικά σχέδια του χώρου ή και επιτόπιες μετρήσεις διαστάσεων και όγκου και είτε με τη χρήση υπολογισμών που βασίζονται στις σχέσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο αυτό, ή/και με τη χρήση ειδικού λογισμικού ακουστικής εξομοίωσης, υλοποιείται πρόβλεψη ή και μέτρηση των ακουστικών παραμέτρων που θα προκύψουν μετά την προτεινόμενη επέμβαση. Η διαδικασία μελέτης ή και βελτίωσης της ακουστικής, ακολουθεί τα στάδια που φαίνονται στο **Σχήμα 6.26**.



Σχήμα 6.26: Στάδια μελέτης και βελτίωσης ακουστικής κλειστού χώρου

Οι συνηθέστερες και απλούστερες επεμβάσεις, αποσκοπούν στην αύξηση της ηχοαπορρόφησης με προσθήκη κατάλληλων υλικών στις επιφάνειες του χώρου (π.χ. οροφή, πίσω – πλευρικοί τοίχοι), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.27**.

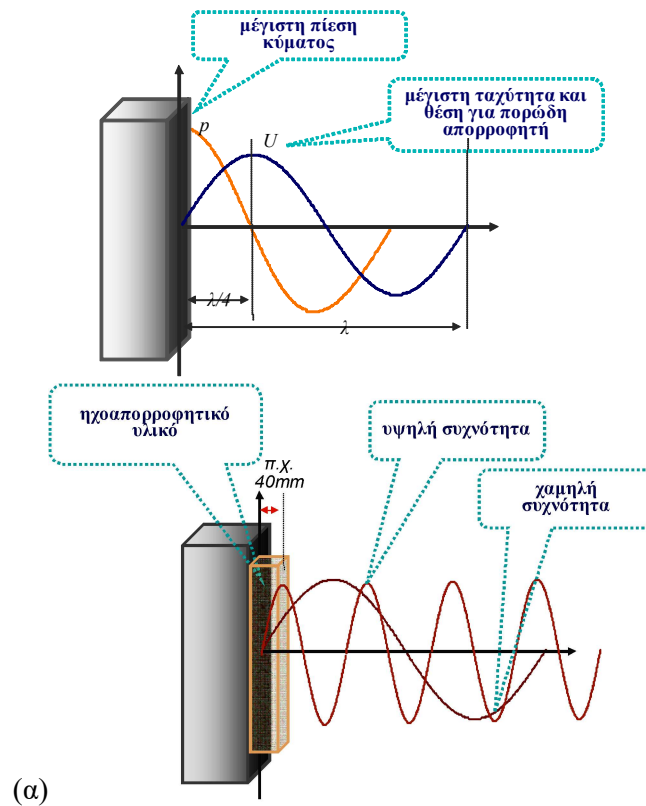


Σχήμα 6.27: Τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών στοιχείων σε κλειστό χώρο

6.9.1 Υλικά και διατάξεις για απορρόφηση του ήχου

Η συνηθέστερη και απλούστερη μορφή ηχοαπορρόφησης επιτυγχάνεται με υλικά που παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή απορρόφησης, ιδανικά σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Τέτοια υλικά μπορεί κανείς να επιλέξει από τους αντίστοιχους πίνακες (π.χ. **Πίνακας 6.1**) και συνήθως αφορούν πορώδη υλικά γενικής χρήσης, ή και ειδικά υλικά. Η απορρόφηση του ήχου γίνεται με μετατροπή της ενέργειας του κύματος σε θερμότητα, συνήθως μέσω τριβής. Το κύμα διαπερνά πορώδη υλικά σε ψηλές συχνότητες και χάνει ενέργεια μέσω τριβής και άλλων μηχανισμών. Για μέγιστη απορρόφηση το πορώδες υλικό πρέπει να τοποθετείται εκεί που η ταχύτητα των στοιχειωδών σωματιδίων είναι μέγιστη (και αντίστοιχα και η κινητική

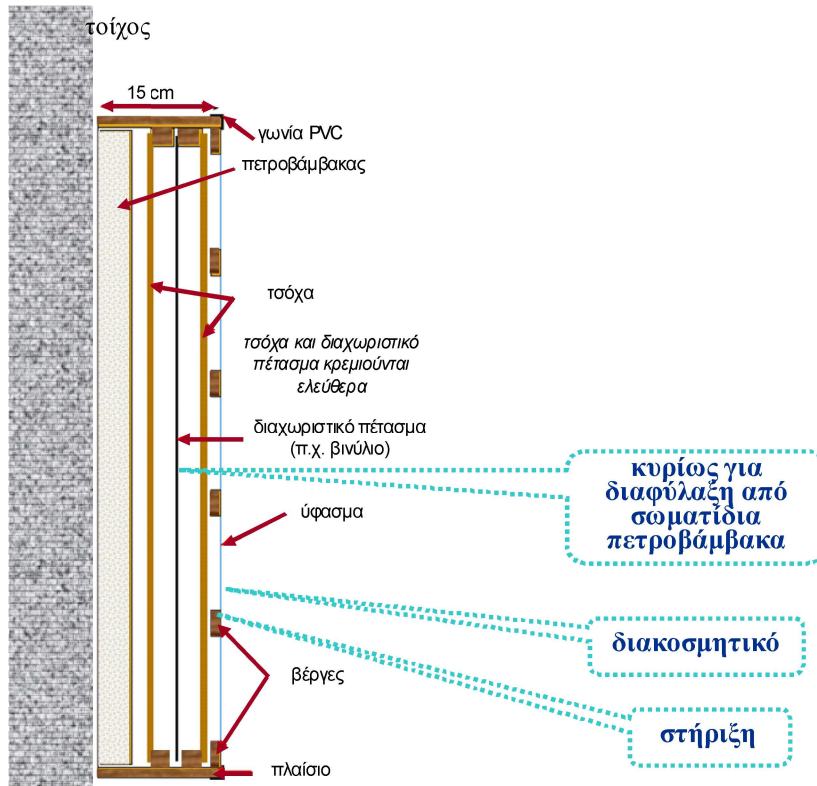
τους ενέργεια). Σημειώτεον ότι η ακουστική πίεση και σωματιδιακή ταχύτητα ενός ακουστικού κύματος είναι σε διαφορά φάσης 90° . Έτσι, πρακτικά το πάχος ενός ηχοαπορροφητικού - πορώδους υλικού που τοποθετείται πάνω σε μια επιφάνεια, θα εξαρτάται και από τη δυνατότητα του να απορροφά τη σχετική περιοχική συχνότητες (όπου και παρουσιάζεται στο ακουστικό κύμα η μέγιστη σωματιδιακή ταχύτητα), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.28**. Αυτό πρακτικά περιορίζει τη δυνατότητα που έχουν τέτοια υλικά για να απορροφούν χαμηλές συχνότητες (μεγάλα μήκη κύματος), αφού θα έπρεπε να έχουν απαγορευτικά μεγάλο πάχος.



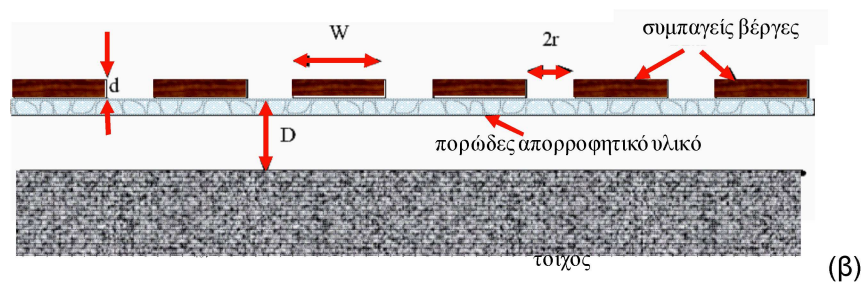
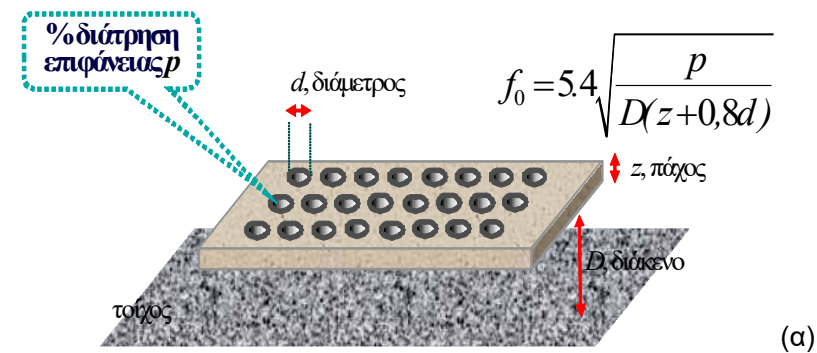
Σχήμα 6.28 (α) σχέση πίεσης και σωματιδιαδικής ταχύτητας ηχητικού κύματος που προσπίπτει σε επιφάνεια (β) εξάρτηση πάχους πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού και συχνότητας

Συνήθως, τα πορώδη υλικά (π.χ. υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας, κλπ) τοποθετούνται σε κατάλληλα πλαίσια και λόγω του ότι πρέπει να απομονώνονται από τον χώρο για αποφυγή μολύνσεων και εισπνοής μικροσωματιδίων, θα πρέπει να καλύπτονται με ηχοπερατές μεμβράνες ή κατάλληλο ύφασμα-τσόχα (**Σχήμα 6.29**).

Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται ευρύτατα υλικά με κατάλληλη διάτρηση με δεδομένο ότι οι οπές και ο εσωτερικός όγκος που δημιουργούν, παράγουν φαινόμενα συντονισμού Helmholtz που σε απόσταση από το υλικό, επιτυγχάνουν απορρόφηση του κύματος, σε συχνότητες που εξαρτώνται από τις παραμέτρους του συντονιστή (εσωτερικός όγκος, διατομή, κλπ), δες **Σχήμα 6.30**

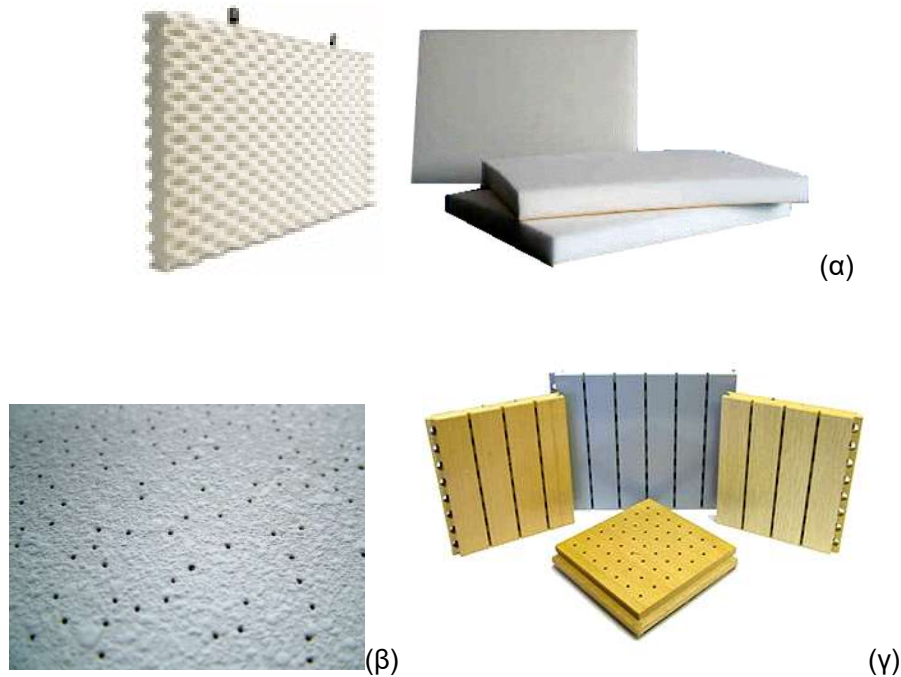


Σχήμα 6.29 διάταξη ηχοαπορροφητικού πλαισίου με χρήση πετροβάμβακα



Σχήμα 6.30 ηχοαπορροφητικά πλαίσια (α) διάτρητης επιφάνειας (β) παράλληλων διατρήσεων

Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά τέτοια ηχοαπορροφητικά στοιχεία που βασίζονται σε πορώδη υλικά ή και διάτρητες πλάκες (**Σχήμα 6.31**).



Σχήμα 6.31 τυπικά ηχοαπορροφητικά στοιχεία : (α) πορώδη (β) διάτρητης επιφάνειας (γ) επιφάνειας παράλληλων διατρήσεων

6.10 Αναφορές και βιβλιογραφία

Ζαρούχας, Θ., Φ. Κοντομίχος, Π. Χατζηαντωνίου, «Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτηριακή Ακουστική», Ε.Α.Π., Πρόγραμμα Σπουδών: Ακουστικός Σχεδιασμός - Πολυμέσα (ΑΣΠ), Θ.Ε.: Ηχομόνωση-Ηχοπροστασία (ΑΣΠ 60)- ΑΣΠ 60/Α

DIN 18041 (2004) "Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen"

ÖNORM B 8115-3 (2005) "Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik"

ANSI/ASA S12.60 (2010) "American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools"

SS 25268 (2007) "Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i byggnader - Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotel"

SN 520 181 Schallschutz im Hochbau, (2009)

Wróblewska D., "Acoustical Standards Used in Design of School Spaces", ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 118 (2010)

Sheaffer J., "Prediction and Evaluation of RT Design Criteria", ACDG (2007): http://www.acdg.co.il/pdf/RT_Criteria.pdf

- Barron M., "Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results", *Acoust. Sci. & Tech.* 26, 2 (2005)
- Κτιριοδομικός Κανονισμός Άρθρο 12, 1989, ΦΕΚ Δ 59/1989/3.2.1989, άρθρο 12, «Ηχομόνωση - Ηχοπροστασία».
- Σκαρλάτος, Δ., 2008, «Εφαρμοσμένη Ακουστική», 3η Έκδ., GOTSIS Εκδόσεις, 2008, ISBN 960-87710-1-3
- Catt-Acoustic v8 manual: <http://www.scribd.com/doc/62889654/CATT-Manual-v8-CD>
- Ease 4.3 tutorial: https://www.renkus-heinz.com/support/software-support/ease_support/tutorials/tutorials_download/EASE4.3Tutorial/EASE_4.3_Tutorial.pdf
- Odeon 10.0 manual: <http://www.odeon.dk/pdf/ODEONManual11.pdf>, tutorial: <http://www.odeon.dk/tutorials-acoustic-simulation>
- Πολυκάρπου Π. (2011), "Ακουστικός σχεδιασμός του αρχαίου θεάτρου Κουρίου της Λεμεσού Κύπρου" (Διπλωματική Εργασία), Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα, ανακτήθηκε 2 Φεβρουαρίου 2012 από το <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/4591>
- Δρόσος, Α. (2011), "Ηλεκτροακουστικές μετρήσεις και συγκριτική μελέτη συστημάτων θεατρικού ήχου" (Διπλωματική Εργασία), Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα, ανακτήθηκε 2 Φεβρουαρίου 2012 από το <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/4904>
- Σιάτρα Μ. (2010), Μέτρηση και ανάλυση ακουστικής και ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης του Συνεδριακού Κέντρου του Πανεπιστημίου Πατρών (Διπλωματική Εργασία), Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα, ανακτήθηκε 23 Φεβρουαρίου 2012 από το <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/3132>
- Rindel J. H., "Computer simulation techniques for acoustical design of rooms", *Acoustics Australia*, Vol. 23, No. 3, (1995)
- Rindel J. H., "The use of computer modeling in room acoustics", *Journal of Vibroengineering*, No3 (4) /Index 41-72 Paper of the International Conference BAL-TIC-ACOUSTIC 2000/ ISSN 1392-8716 (2000)
- Everest F. A., Pohlmann K. C., "Master Handbook of acoustics" 5th edition, McGraw Hill (2009)
- Τσιλιφίδης Α. (2011) "Signal processing methods for enhancing speech and music signals in reverberant environments", (Διδακτορική διατριβή), Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα, ανακτήθηκε 2 Φεβρουαρίου 2012 από το <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/4710>
- Ζαρούχας Θ. (2010) "Μοντελοποίηση και επεξεργασία ηχητικών δεδομένων για αναπαραγωγή σε χώρους με αντήχηση", Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα,

ανακτήθηκε 2 Φεβρουαρίου 2012 από το

<http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/3968>

Beranek, Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture, Springer; Softcover reprint of hardcover 2nd ed. 2004 edition (December 3, 2010)

Hidaka T., Beranek L. & Okano T., "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls", *Journal of Acoustical Society of America* 98 (2), Pt. 1, 1995

Takayuki Hidaka and Noriko Nishihara, Leo L. Beranek, "Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 109, No. 3, pp. 1028–1042, March 2001

L. Beranek, "Subjective Rank-Orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 89 (2003), 494-508

M. Barron, "Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results", *Acoustical Science & Technology*, 26, 2 (2005)

Leo Beranek - Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture, Springer - 2010, 2nd. edition, ISBN-10: 1441930388

Μουρτζόπουλος, Γ. (2011), Σημειώσεις Ηλεκτροακουστικής Ι, Ελλάδα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

Μουρτζόπουλος, Γ. (2011), Σημειώσεις Ηλεκτροακουστικής ΙΙ, Ελλάδα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

Davis, D and Davis, C, *Sound System Engineering* (2nd edition), USA: SAMS (1987)

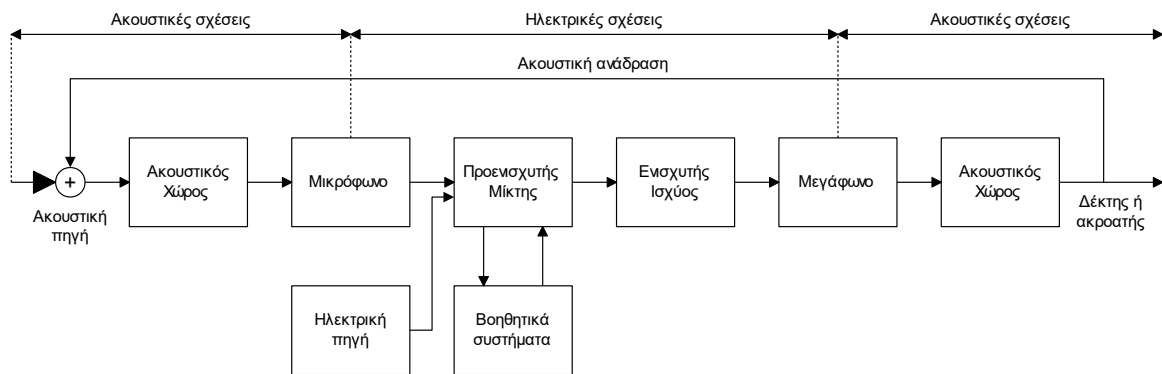
M.R. Schroeder - Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* 47, 424-431, 1970.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ηχητικές Εγκαταστάσεις: ακουστική κάλυψη

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν βασικές αρχές λειτουργίας Η/Α συστημάτων που συνδιάζουν περισσότερα από ένα υποσυστήματα από αυτά που έχουν ήδη παρουσιαστεί και τα οποία λειτουργούν σε πρακτικούς ακουστικούς χώρους (κλειστούς ή ανοιχτούς). Το **Σχήμα 7.1** δίνει τη γενική σχηματική παράσταση ενός τέτοιου συστήματος.



Σχήμα 7.1: Γενικό διάγραμμα ενός πλήρους Η/Α συστήματος

Στην πράξη, το διάγραμμα αυτό περιγράφει ηχητικά συστήματα που λειτουργούν σε εγκαταστάσεις για ομιλίες ή συναυλίες σε ανοιχτούς ή κλειστούς χώρους, μόνιμες εγκαταστάσεις σε οικοδομικά συγκροτήματα (σταθμούς, ξενοδοχεία, κλπ), συστήματα ηχογράφησης, ηχητικά συστήματα χορευτικών κέντρων, κλπ. Σε μερικές από αυτές τις εφαρμογές απαιτείται η μετάδοση της μέγιστης δυνατής ισχύος για την κάλυψη ενός μεγάλου χώρου, με πιθανή ύπαρξη υψηλής στάθμης περιβαλλοντικού θορύβου (π.χ. σε ανοιχτούς χώρους), αλλά και με στοιχειώδη πιστότητα συνολικής απόκρισης (π.χ. έχοντας μόνο σαν στόχο την αναπαραγωγή καταληπτής ομιλίας). Σε άλλες περιπτώσεις, απαιτείται υψηλή πιστότητα αναπαραγωγής (δηλαδή ελάχιστη παραμόρφωση), όπως στα ηχητικά συστήματα συναυλιών ή θεάτρου και πολύ περισσότερο στις εγκαταστάσεις των studio ηχογράφησης. Πρόσφατες εφαρμογές που συνδιάζουν αυτές τις δύο συχνά αντιφατικές ανάγκες είναι οι μεγάλες ανοιχτές συναυλίες ροκ μουσικής, οι οποίες λόγω των ιδιαζόντων οικονομικών συνθηκών, επιτρέπουν την τεχνολογική εξέλιξη ισχυρών, αλλά και ταυτόχρονα αξιόπιστων, συστημάτων αναπαραγωγής ήχου που λειτουργούν με συνολική ηλεκτρική ισχύ πολλών kW. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, τμήματα του όλου συστήματος εξετάζονται ακολουθώντας μια

«ακουστική μεθοδολογία» όπου εξετάζονται σχέσεις ακουστικής κάλυψης, ενώ άλλα μια «ηλεκτρική μεθοδολογία» όπου εξετάζονται ηλεκτρικές παράμετροι και απαιτήσεις τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό στις επόμενες παραγράφους θα εξεταστούν χωριστά οι ακουστικές και οι ηλεκτρικές παράμετροι λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων.

7.2 Ακουστικές παράμετροι λειτουργίας Η/Α εγκαταστάσεων

7.2.1 Σχέσεις απόστασης πηγής - δέκτη

Για την ικανοποιητική κατανόηση της ομιλίας (είτε αυτή παράγεται με φυσικό, είτε με ηλεκτροακουστικό τρόπο), πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω βασικές προϋποθέσεις:

- (α) Ο ήχος θα πρέπει να φθάνει στο δέκτη με ηχοστάθμη τουλάχιστο 25 dB-SPL πάνω από την στάθμη του περιβαλλοντολογικού θορύβου.
- (β) Η σχέση ενέργειας του ήχου που φθάνει κατ' ευθείαν με αυτήν του ανακλώμενου να επιτρέπει την κατανόηση της ομιλίας (δες προηγούμενο κεφάλαιο).
- (γ) Το φάσμα συχνοτήτων του ήχου στον δέκτη θα πρέπει να προσεγγίζει το φάσμα του ήχου στην πηγή.

Για τις συνθήκες (α) και (β) η απόσταση πηγής - δέκτη είναι η καθοριστική παράμετρος (όπως φαίνεται και από το παρακάτω **Παράδειγμα**).

Παράδειγμα

Έστω ότι σε ένα δωμάτιο (του οποίου τα φαινόμενα αντήχησης στο παράδειγμα αυτό θεωρούνται αμελητέα), ένας ομιλητής παράγει στάθμη 65 dB-SPL σε ένα μέτρο. Αν η στάθμη θορύβου είναι 28 dB-SPL η μέγιστη απόσταση d_n , που ένας ακροατής θα κατανοεί την ομιλία θα είναι:

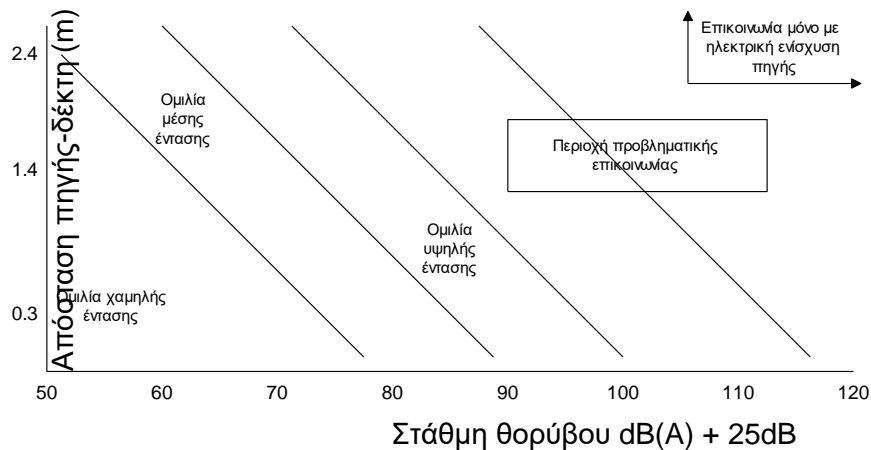
$$28 + 25 = 53 \text{ dB} \quad (\text{στάθμη θορύβου και περιθώριο κατανόησης})$$

$$65 - 53 = 12 \text{ dB} \quad (\text{χρήσιμη στάθμη σήματος ομιλίας})$$

$$20 \log_{10} d_n = 12 \text{ dB} \text{ και } d_n = 4 \text{ m.}$$

Αν ο ομιλητής παράγει 71 dB SPL, τότε $d_n = 8 \text{ m}$. Αυτό δείχνει την σημασία της στάθμης της πηγής και της απόστασης πηγής-δέκτη, για την ικανοποίηση των συνθηκών επικοινωνίας του μηνύματος.

Χρησιμοποιώντας την παράμετρο της στάθμης του θορύβου (και χρησιμοποιώντας εμπειρικά δεδομένα), σχηματίζεται ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει την αλληλοσυσχέτιση των παραμέτρων αυτών (**Σχήμα 7.2**).



Σχήμα 7.2: Αλληλοσυσχέτιση παραμέτρων κατανόησης ομιλίας

Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις (δηλ. σε συνδυασμό απαίτησης για επικοινωνία σε μεγάλη απόσταση ή και με παρουσία θορύβου), θα απαιτηθεί απαραίτητα η χρήση μιας ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης. Άρα, θεωρητικά, η παρέμβαση του ηλεκτρικού συστήματος θα πρέπει στη θέση του ακροατή να επιτυγχάνει την ίδια στάθμη σήματος σε dB-SPL με αυτήν που ήταν δυνατό να επιτευχθεί από τον ομιλητή στην «απόσταση φυσικής επικοινωνίας», d_n . Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις συναυλιών ή και αναπαραγωγής μουσικής σε χορευτικά κέντρα ο παραπάνω στόχος της “φυσικής ηχητικής αναπαραγωγής” δεν ακολουθείται και οι επιδιωκόμενες στάθμες είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που θα επιτύγχαναν οι αντίστοιχες ακουστικές πηγές (π.χ τα μουσικά όργανα σε αντίστοιχες αποστάσεις από τον ακροατή). Επιπλέον, για τη λειτουργία της συσκευής κάτω από συνθήκες αντήχησης, πρέπει να ικανοποιούνται επιπλέον προϋποθέσεις που συζητήθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Τέλος, το συνολικό σύστημα θα πρέπει να ικανοποιεί και τα κριτήρια πιστότητας της απόκρισης (συνθήκη (γ)). Για να υπολογισθεί το ποσοστό ενίσχυσης του σήματος που θα πρέπει να παραχθεί από το ηλεκτρικό τμήμα της, δηλαδή την απαιτούμενη απολαβή σε dB που να επιτρέπει τις παραπάνω συνθήκες επικοινωνίας, θα πρέπει να εξετασθούν οι παρακάτω παράμετροι.

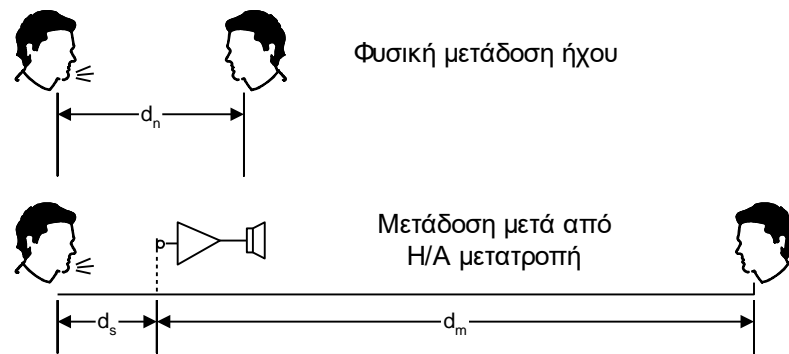
7.2.2 Απαιτούμενο ακουστικό κέρδος

Εδώ καθορίζεται η απόσταση d_n που επιτρέπει την φυσική κατανόηση της ομιλίας του ομιλητή και υπολογίζεται μια άλλη απόσταση, d_m , ($d_m > d_n$), στην οποία να επιτυγχάνεται η ίδια επικοινωνία μετά από την παρέμβαση του Η/Α συστήματος (**Σχήμα 7.3**).

Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (απολαβή) N_{ag} είναι η διαφορά σε dB-SPL μεταξύ της ακουστικής στάθμης για την απόσταση d_m με το σύστημα εκτός λειτουργίας και με το σύστημα σε λειτουργία, δηλαδή:

$$N_{ag} = 20 \log_{10} \frac{d_m}{d_s} - 20 \log_{10} \frac{d_n}{d_s} = 20 \log_{10} \frac{d_m}{d_n} \quad (7.1)$$

όπου d_s είναι η απόσταση πηγής - μικροφώνου (δες **Παράδειγμα**).



Σχήμα 7.3: Φυσική και Η/Α μετάδοση ήχου μεταξύ πηγής-δέκτη

Παράδειγμα

Έστω $d_s=1m$, $d_n=4m$, $d_m=62m$, τότε

$$N_{ag} = 20 \log_{10}(62/4) = 24dB \quad (7.2)$$

Σημείωση: Γράφουμε επίσης

$$N_{ag} = 20 \log_{10} d_m = 20 \log_{10} d_n. \quad (7.3)$$

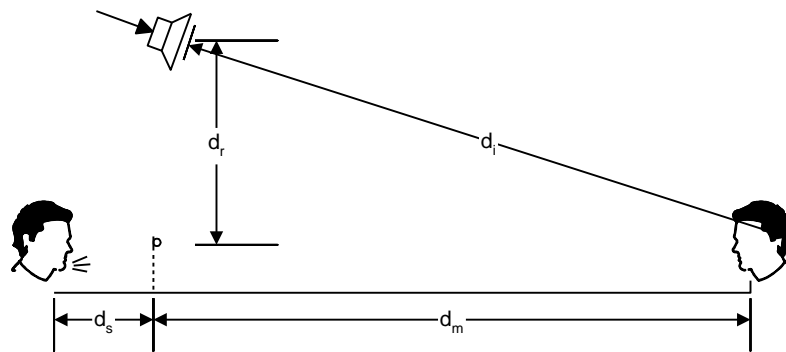
Δύο ακόμα παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον καθορισμό του N_{ag} : (1) η ευστάθεια του συστήματος λόγω πιθανής ύπαρξης ακουστικού βρόγχου ανάδραση (πχ. από τα ηχεία στα μικρόφωνα, δες **Σχήμα 7.1**), η οποία πρακτικά θα περιορίσει τη μέγιστη δυνατή τιμή του N_{ag} και (2) η χρήση περισσότερων του ενός μικροφώνων (δες **Σχήμα 7.3**). Γενικά, το φαινόμενο της ανάδρασης εξηγείται από την επανατροφοδότηση του ακουστικού σήματος που παράγουν τα μεγάφωνα/ηχεία της εγκατάστασης, μέσα από τα μικρόφωνα που πιθανά βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, που συχνά για ορισμένες συχνότητες ξεπερνάει τα περιθώρια ευστάθειας του συστήματος. Αν και το θέμα είναι σχετικά περίπλοκο και δεν είναι δυνατόν να καλυφθεί εδώ με λεπτομέρεια, στηριζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα μπορεί να καθοριστεί ένα ακουστικό κέρδος «ισορροπίας ανάδρασης» $N_{fb} = 6$ dB στους υπολογισμούς του N_{ag} .

Επιπλέον, για κάθε προσθήκη ενός ακόμα μικροφώνου, θεωρείται αύξηση της πηγής κατά μια όμοια πηγή που συνεπάγεται πρόσθεση 3 dB-SPL στο N_{ag} (δες Η/Α I). Άρα και $N_{om} = 10 \log(N_{mic})$ dB, όπου N_{mic} είναι ο αριθμός των ομοίων μικροφώνων. Άρα, πρακτικά, το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος ορίζεται σαν:

$$N_{ag} = 20 \log_{10} d_m - 20 \log_{10} d_n - \log_{10}(N_{mic}) - N_{fb} \quad (7.4)$$

7.2.3 Παραγόμενο ακουστικό κέρδος

Με την προσθήκη του Η/Α συστήματος οι περισσότεροι παράμετροι απόστασης πηγής - δέκτη πρακτικά μεταβάλλονται, ώστε κάτω από αυτές τις συνθήκες (βλέπε **Σχήμα 7.4**), η τιμή του ακουστικού κέρδους να εξαρτάται από νέες παραμέτρους.



Σχήμα 7.4: Παράμετροι απόστασης πηγής-δέκτη

Οι νέες αυτές παράμετροι είναι η απόσταση μικροφώνου - μεγαφώνου d_f και η απόσταση μεγαφώνου - ακροατή d_l . Το παραγόμενο ακουστικό κέρδος P_{ag} , δίδεται από την εξής σχέση:

$$P_{ag} = 20 \log_{10} d_m + 20 \log_{10} d_f - 20 \log_{10} d_s - 20 \log_{10} d_l \quad (7.5)$$

Προφανώς πρέπει να είναι $P_{ag} - N_{ag} = 0$, οπότε ισχύει:

$$\cancel{20 \log_{10} d_m} - 20 \log_{10} d_n + 10 \log_{10} (N_{mic}) + N_{sb} \equiv \cancel{20 \log_{10} d_m} + 20 \log_{10} d_f - 20 \log_{10} d_f - 20 \log_{10} d_l \Rightarrow \\ 20 \log_{10} d_s - 20 \log_{10} d_f - 20 \log_{10} d_n + 10 \log_{10} (N_{mic}) + N_{fb} \quad (7.6)$$

Οι σχέσεις αυτές επιτρέπουν τον καθορισμό των μεγίστων τιμών των αποστάσεων, για τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά (όπως φαίνεται και από το παρακάτω **Παράδειγμα**).

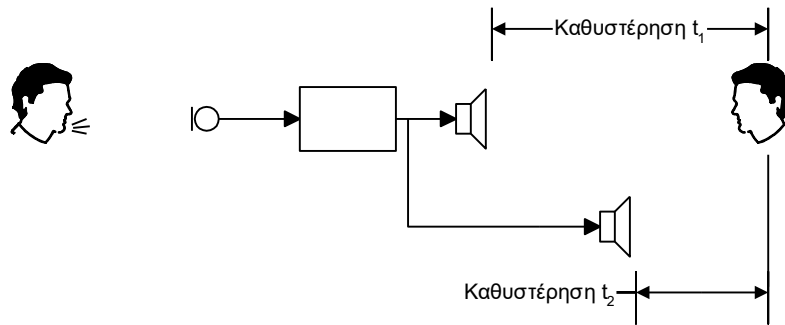
Παράδειγμα

Για το παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου και για $d_m = 52 \text{ m}$, $d_n = 1 \text{ m}$, $d_f = 22 \text{ m}$, $d_l = 45 \text{ m}$, βρίσκεται εύκολα ότι $N_{ag} = P_{ag} = 30 \text{ dB}$, συνεπώς ικανοποιείται η συνθήκη $N_{ag} - P_{ag} = 0$.

7.2.4 Σχέσεις χρονικής καθυστέρησης

Οι σχέσεις αυτές αφορούν τις διαφορετικές καθυστερήσεις που εμφανίζονται στη διάδοση του ήχου στον αέρα και μέσα από το Η/Α σύστημα (σαν ηλεκτρικό σήμα), (**Σχήμα 7.5**). Οι καθυστερήσεις αυτές προκαλούν τριών ειδών προβλήματα:

- (α) Προβλήματα κατανόησης ομιλίας
- (β) Προβλήματα ποιότητας του ήχου
- (γ) προβλήματα μετατόπισης του ακουστικού ειδώλου της πηγής.



Σχήμα 7.5: Δημιουργία καθυστερήσεων ηχητικής διάδοσης

Τα προβλήματα αυτά πρωτοαναλύθηκαν από τους Haas, Fay - Hall, Lochner - Burger, Bolt - Doak κ.ά. Η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της καθυστέρησης επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις, για ορισμένη σχέση διαφοράς πλάτους μεταξύ του αρχικού και του καθυστερημένου ήχου σε σχέση με την σχετική τους καθυστέρηση (**Σχήμα 7.6**).

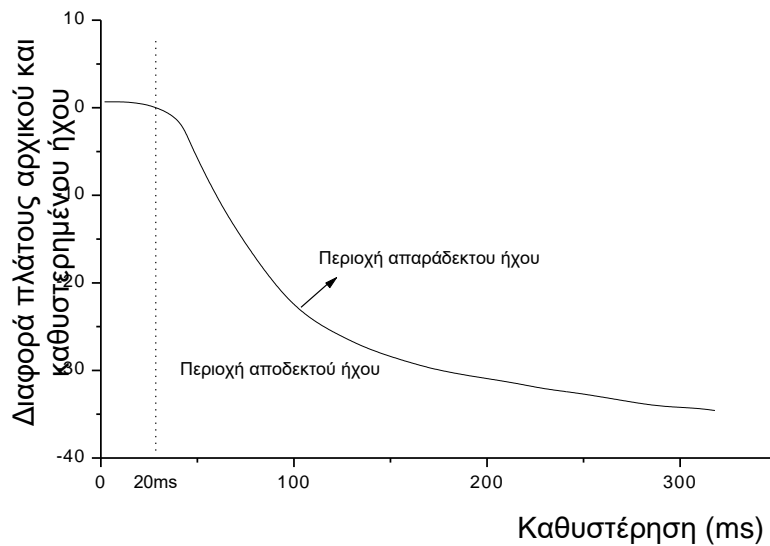
Το φαινόμενο Haas καθορίζει το ότι ο ακροατής εντοπίζει τον ήχο στη διεύθυνση της πηγής που δεν εμφανίζει καθυστέρηση (χάνοντας έτσι την ορθή εντύπωση της ύπαρξης και της θέσης των δύο πηγών) και απαιτείται αύξηση του πλάτους του καθυστερημένου σήματος για να επανέλθει η αρχική ισορροπία και ο ακροατής να έχει την υποκειμενική εικόνα της ύπαρξης των 2 ηχητικών πηγών. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε ηχητικές εγκαταστάσεις όπου ενδέχεται ο ακροατής να έχει την εντύπωση ότι ο ομιλητής δεν παρουσιάζεται στην κανονική του θέση, αλλά ο ήχος που παράγει έρχεται από την κοντινότερη σε αυτόν θέση όπου υπάρχει το μεγάφωνο που αναπαράγει το σήμα της ομιλίας.

Για τη λύση των προβλημάτων αυτών απαιτείται (δες **Παράδειγμα**):

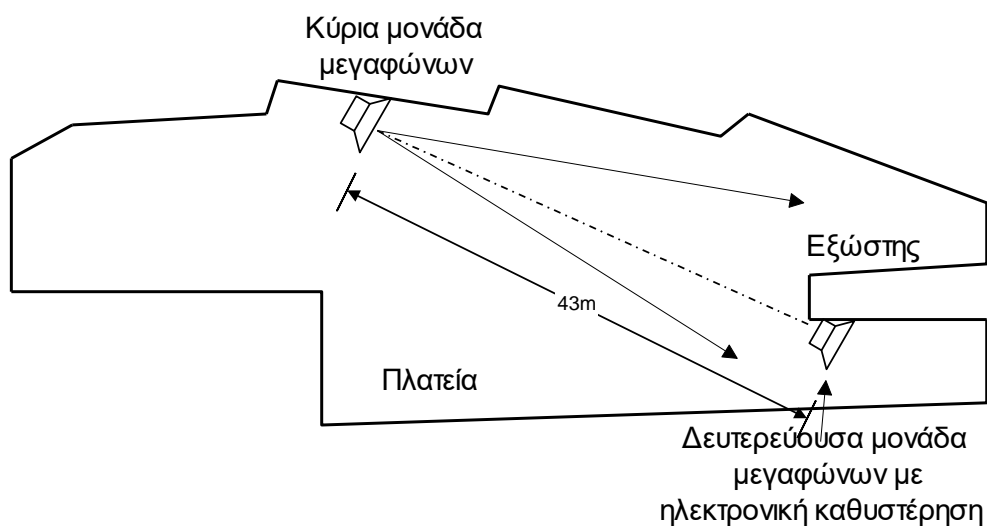
- (α) Η προσθήκη τεχνητής καθυστέρησης στο ηλεκτρικά διαδιδόμενο σήμα ίσης με $\frac{d_m - d_l}{c}$ (**Σχήμα 7.7**).
- (β) Για την αποφυγή του φαινομένου Haas απαιτείται η επιπλέον προσθήκη καθυστέρησης 20 ms στο ίδιο σήμα. Η καθυστέρηση αυτή επιτρέπει την σταθεροποίηση του ηχητικού ειδώλου στην θέση της αρχικής ακουστικής πηγής.

Παράδειγμα

Δεδομένου ότι οι τελευταίες θέσεις της πλατείας στην εγκατάσταση του χώρου που φαίνεται στο **Σχήμα 7.7** λαμβάνουν από το κύριο σύστημα μεγαφώνων ελάχιστο σήμα, χρειάζεται η προσθήκη ενός υποσυστήματος μεγαφώνων κάτω από τον εξώστη. Στην περίπτωση αυτή, αν η καθυστέρηση του ήχου από την κεντρική μονάδα μεγαφώνων είναι της τάξης 75 ms ($d_l \approx 43$ m), τότε το σήμα του μεγαφωνικού υποσυστήματος πρέπει να καθυστερήσει περίπου $75 + 20 = 95$ ms.



Σχήμα 7.6: Φαινόμενο Haas



Σχήμα 7.7: Τυπική διάταξη για την αντιμετώπιση του φαινομένου Haas

Γενικά, η σχετική καθυστέρηση από δύο πηγές δεν πρέπει σε καμιά περίπτωση να ξεπερνά τα 40 ms γιατί τότε θα προκύπταν σοβαρά προβλήματα κατανόησης της ομιλίας. Σε περίπτωση που τέτοιες καθυστερήσεις είναι αδύνατο να αποφευχθούν, λόγω των διαστάσεων του χώρου που θα πρέπει να καλυφθεί ηχητικά, τότε είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί κατάλληλα η εγκατάσταση έτσι ώστε με προσεκτική επιλογή της θέσης, της κατευθυντικότητας και της ισχύος των μεγαφωνικών μονάδων, να επιτυγχάνεται η ελάχιστη χωρική επικάλυψη από την λειτουργία τους. Τέτοια προβλήματα θα συζητηθούν σε επόμενες παραγράφους. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να εξετάζεται και η ύπαρξη ανακλώμενης ενέργειας και θα πρέπει να υπολογίζεται το κριτήριο $15\%AL_{cons}$, όπως αυτό διατυπώθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο.

7.3 Χαρακτηριστικά και χρήση μικροφώνων

7.3.1 Ευαισθησία μικροφώνων

Όπως συζητήθηκε στο κεφάλαιο Μικρόφωνα, η ευαισθησία $S.L.$ ενός μικροφώνου σε dBV βρίσκεται από την σχέση:

$$S.L. = 20 \log_{10} V + 94 - L_p \quad (7.7)$$

όπου V είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος για τη μετρούμενη τιμή στάθμης ακουστικής πίεσης L_p (dB SPL), χρησιμοποιώντας στάθμη αναφοράς 1 V/Pa (94 dB). Για να υπολογίσουμε την ευαισθησία εξόδου σε dBm, χρησιμοποιούμε την σχέση

$$S.W. = S.L. - \log |Z_{EI}| + S.G. \quad (7.8)$$

όπου $|Z_{EI}|$ είναι το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εξόδου του μικροφώνου και $S.G.$ το κέρδος εισόδου του συστήματος αναφοράς, π.χ. του προενισχυτή-μίκτη.

Παράδειγμα

Αν έχουν μετρηθεί: $V = 0,001$ V για 94 dB SPL, τότε $S.L. = -80$ dB με αναφορά το 1 V/Pa, και αν $|Z_{EI}| = 200$ Ω και $S.G. = 40$ dBm, τότε:

$$S.W. = -80 - 10 \log 200 + 40 = -58 \text{ dBm.}$$

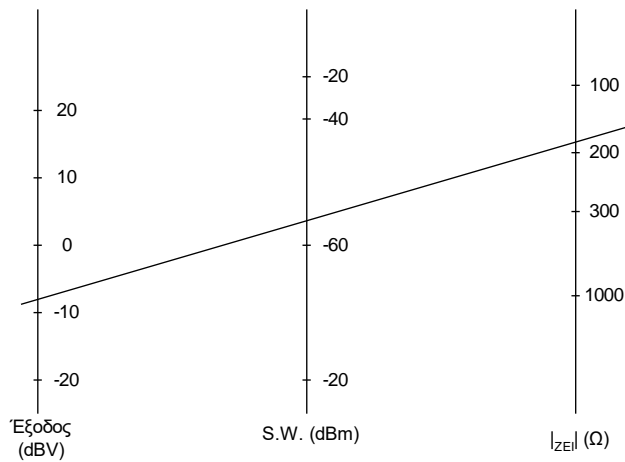
Στο κεφάλαιο για τα μικρόφωνα, δόθηκε πίνακας με τη βοήθεια του οποίου βρίσκεται η ευαισθησία στάθμης εξόδου σε V ενός μικροφώνου, για διαφορετικές τιμές ακουστικής στάθμης σε dB SPL που εξαρτώνται από την ευαισθησία του μικροφώνου. Με το παρακάτω διάγραμμα (**Πίνακας 7.1**), μπορούμε να βρούμε την ευαισθησία στάθμης ισχύος του μικροφώνου σε dBm, για διαφορετικές τιμές της αντίστασής του, ώστε το μικρόφωνο να εμφανίζει μια δεδομένη έξοδο σε dBV.

Η επιλογή της τιμής της στάθμης ευαισθησίας ενός μικροφώνου εξαρτάται από:

- (α) την στάθμη ακουστικής πίεσης που παράγει η πηγή,
- (β) την απόσταση πηγής – μικροφώνου.

π.χ. ένας ομιλητής ή τραγουδιστής παράγουν διαφορετικές τιμές dB SPL, άρα με υψηλή τιμή ευαισθησίας θα παράγει συχνά υψηλή ισχύ εξόδου, οπότε ενδέχεται να απαιτηθεί μετασχηματιστής πριν από τον προενισχυτή / μίκτη. Αντίθετα αν στην ίδια εφαρμογή χρησιμοποιηθεί μικρόφωνο χαμηλής ευαισθησίας, τότε συνολικά ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα εμφανιστεί χαμηλότερος για την ίδια έξοδο του προενισχυτή.

Πίνακας 7.1: Συσχέτιση στάθμης ευαισθησίας, στάθμης εξόδου και αντίστασης μικροφώνου



7.3.2 Κατευθυντικότητα μικροφώνων

Πέρα από την ευαισθησία, είναι επίσης γνωστό ότι η βέλτιστη χρήση του μικροφώνου πρέπει να αξιοποιεί και τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητάς του. Όπως είναι ήδη γνωστό, η χρήση ενός μονοκατευθυντικού μικροφώνου (π.χ. καρδιοειδούς) συνίσταται σε περιπτώσεις όπου η πηγή εμφανίζει σχετικά χαμηλή στάθμη ακουστικής πίεσης και σχετικά μικρές αποστάσεις πηγής - μικροφώνου. Ο συνδιασμός αυτός όμως, παρουσιάζει συνήθως χειρότερη απόκριση συχνότητας σε σύγκριση με ένα δικάτευθυντικό μικρόφωνο, το οποίο συνίσταται κυρίως για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται απόρριψη ήχων που έρχονται από κατευθύνσεις με γωνία θ διαφορετική των 0° και των 90° .

7.3.3 Αντίσταση μικροφώνων

Στην ιδανική περίπτωση, η τιμή της σύνθετης αντίστασης του μικροφώνου θα πρέπει να ταυτίζεται με αυτήν του προενισχυτή. Όπως συζητήθηκε και στο σχετικό κεφάλαιο, τα μικρόφωνα (δυναμικά) εμφανίζουν σχετικά μικρή και σταθερή με την συχνότητα αντίσταση, της τάξης των 150 έως 300 Ω. Επειδή όμως η τάση εξόδου των μικροφώνων είναι επίσης χαμηλή, δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν «γεννήτριες τάσης». Το πρόβλημα εμφανίζεται στην σύνθεσή τους με τους προενισχυτές, οι οποίοι εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση εισόδου, που λειτουργεί σαν φορτίο για την έξοδο του μικροφώνου. Τέτοιου είδους προβλήματα προσαρμογής των δύο αυτών συστημάτων θα συζητηθούν στην επόμενη παράγραφο.

7.4 Συστήματα ηχείων και ακουστική κάλυψη

7.4.1 Γενικές απαιτήσεις

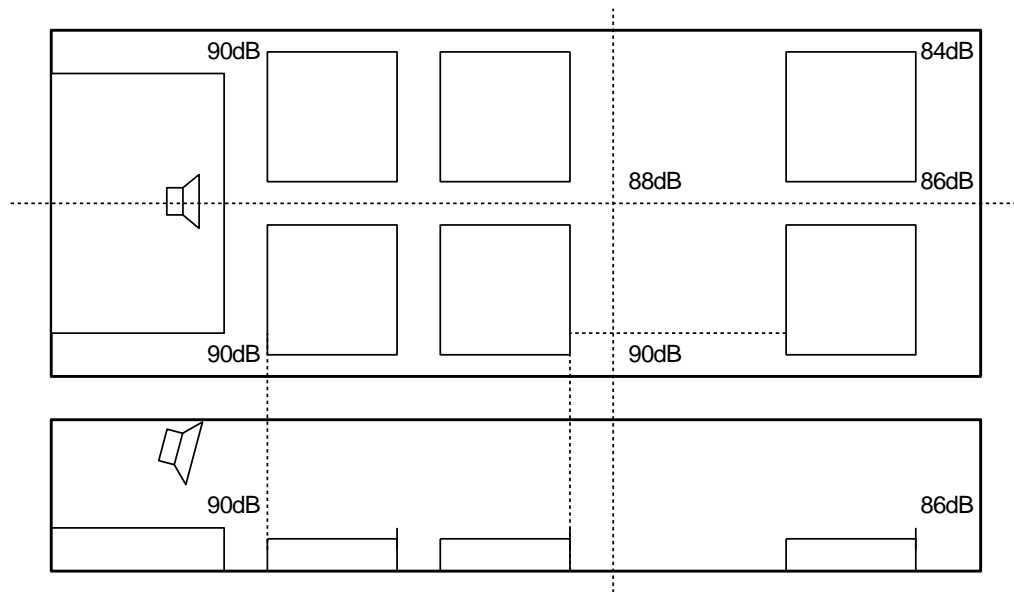
Τα χαρακτηριστικά και η τοποθέτηση του συστήματος μεγαφώνων/ηχείων είναι συνήθως το πιο προβληματικό τμήμα της όλης εγκατάστασης, καθώς οι επιλογές είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν μόνο με την χρήση καταλλήλου λογισμικού ή και μετρήσεων. Σε γενικές γραμμές, με τη σωστή τοποθέτηση των ηχείων

επιτυγχάνονται οι στόχοι λειτουργίας της ηχητικής συσκευής που έχουν ήδη περιγραφεί, δηλαδή:

- (α) Η ομοιόμορφη κατανομή της ακουστικής ισχύος σε όλες τις θέσεις ακροατηρίου με ελάχιστη παρουσία προβλημάτων κατανόησης ή ποιότητας από αντήχηση, καθυστερημένες ανακλάσεις, κ.λπ., στο δέκτη.
- (β) Η ομοιόμορφη μετάδοση όλων των συχνοτήτων του αρχικού σήματος σε όλες τις θέσεις του ακροατηρίου.

Για την ικανοποίηση της συνθήκης (β) συχνά επιβάλλεται ξεχωριστή διαδικασία ισοστάθμισης που πραγματοποιείται μετά από την εγκατάσταση του συστήματος και που θα συζητηθεί στις επόμενες παραγράφους.

Δεδομένου ότι η τιμή της στάθμης ήχου που θα πρέπει να επιτυγχάνεται από την συσκευή για μία συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει καθοριστεί εκ των προτέρων, με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί, η ικανοποίηση της πρώτης από τις παραπάνω συνθήκες επιτυγχάνεται όταν σε όλο τον χώρο που θα πρέπει να καλυφθεί ηχητικά, δεν εμφανίζονται διαφορές μεγαλύτερες από ένα προκαθορισμένο όριο στην στάθμη του αναπαραγόμενου ήχου (π.χ. ± 2 dB). Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 7.8** μία τέτοια διακύμανση μπορεί να παρουσιάζεται, στις δύο ακραίες πλευρικές θέσεις καθώς επίσης και μεταξύ των ακραίων εμπρόσθιων και οπίσθιων θέσεων του ακροατηρίου.



Σχήμα 7.8: Τυπικό παράδειγμα διακύμανσης ηχοστάθμης από ηχητική εγκατάσταση

Στην πράξη, το όριο της διακύμανσης της ηχοστάθμης εξαρτάται από την εφαρμογή ή τις προδιαγραφές που ορίστηκαν στην ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας ηχητικής κάλυψης. Προφανώς, σε ορισμένες εφαρμογές η ομοιογενής ηχητική κάλυψη είναι περισσότερο σημαντική από άλλες (π.χ. για μετάδοση μηνύματος σε αίθουσα αεροδρομίου σε σύγκριση με την αναπαραγωγή μουσικής υπόκρουσης σε ένα πολυκατάστημα). Επιπλέον, σε ηχητικές εγκαταστάσεις

μεγάλης κλίμακας, η βελτιστοποίηση των παραπάνω συνθηκών είναι εξαιρετικά σημαντική από οικονομοτεχνική άποψη αφού σε αντίθετη περίπτωση θα αυξηθεί δυσανάλογα το κόστος αγοράς, μεταφοράς/τοποθέτησης και χρήσης των μη βέλτιστων ηχητικών συσκευών.

Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται με τους εξής τρόπους:

- (α) με χρήση μεγαφώνων, ηχείων ή και συστοιχιών ηχείων με κατάλληλα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας
- (β) με την βέλτιστη τοποθέτηση και ηλεκτρική τροφοδοσία των ηχείων αυτών σε σχέση με την συγκεκριμένη διάταξη του χώρου και του ακροατηρίου

Πρακτικά, σε μία εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας ο μηχανικός ήχου έχει την επιλογή της χρήσης ηχείων ευρείας γωνίας κάλυψης (short-throw), που όμως δεν επιτρέπουν την επίτευξη ικανοποιητικής στάθμης σε κάποια απόσταση από αυτά (οπότε θα πρέπει να τοποθετηθούν επιπλέον ηχεία για τις απομακρυσμένες θέσεις του ακροατηρίου), ή ηχείων υψηλής κατευθυντικότητας (long-throw) που επιτρέπουν την κάλυψη σε τέτοιες απομακρυσμένες θέσεις, αφήνοντας όμως ακάλυπτες πλευρικές περιοχές του ακροατηρίου (που και πάλι θα πρέπει να καλυφθούν από βοηθητικά ηχεία). Συχνά, συνδιάζονται και οι δύο επιλογές, ενώ η όλη διαδικασία της βελτιστοποίησης μπορεί να παρομοιαστεί με τον ομοιογενή φωτισμό του χώρου του ακροατηρίου με κατάλληλους προβολείς.

Δεδομένης της σημασίας της κατευθυντικότητας των ηχείων σε ανάλογες εφαρμογές, στην επόμενη παράγραφο θα συζητηθούν ειδικά θέματα τα οποία σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά αυτά.

2.4.2 Κατευθυντικότητα μεγαφώνων και ηχείων

Η πιο καθοριστική παράμετρος για την βέλτιστη κατανομή της ακουστικής ισχύος σε μεγάλους χώρους είναι η κατευθυντικότητα Q του συστήματος ηχείων. Αγνοώντας τα φαινόμενα αντήχησης, είναι γνωστό ότι η στάθμη ηχητικής πίεσης σε σημεία που βρίσκονται πάνω στον ακουστικό άξονα του μεγαφώνου/ηχείου, θα είναι διάφορη από αυτήν που παράγεται σε άλλες γωνίες εκπομπής που βρίσκονται σε ίση απόσταση, σύμφωνα με την κατευθυντικότητα Q του ηχείου. Από την σχέση για την απαιτούμενη στάθμη, προκύπτει και η σχέση για την «απαιτούμενη ηχητική ισχύ», A_{pr} , ώστε να επιτευχθεί σε απόσταση d_i από το μεγάφωνο/ηχείο η δεδομένη στάθμη L_p (dB-SPL), δηλαδή:

$$A_{pr} = 10 \frac{[L_p - 0.5] 4\pi \cdot d_i^2}{10 \quad Q \cdot 10^{12}} \quad (\text{W ακουστ.}) \quad (7.9)$$

Συνήθως οι τιμές της παραμέτρου Q με υψηλή κατευθυντικότητα είναι $Q \approx 20$ για εγκαταστάσεις ανοιχτών χώρων, σε αντίθεση με τα μη κατευθυντικά συστήματα οικιακής χρήσης όπου $Q \approx 3$. Για συστήματα υψηλής τιμής Q , η απαιτούμενη ισχύς η οποία προέρχεται από την ηλεκτρική ισχύ E_{pr} είναι χαμηλότερη και έτσι, η συνολική απόδοση της εγκατάστασης αυξάνει.

Για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής Q σε μία επαγγελματική εγκατάσταση θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ηχεία και συστοιχίες ηχείων με κατάλληλο Q , λαμβάνοντας υπόψη ότι διαφορετικοί τύποι μεγαφώνων καθώς και οι συνδυασμοί τους, εμφανίζουν διαφορετικές τιμές κατευθυντικότητας. Συχνά σε τέτοιες εφαρμογές, η κατευθυντικότητα ορίζεται (εκτός από ποσότητα Q), και σαν “γωνία κάλυψης”, φ_0 (σε μοίρες) για το οριζόντιο επίπεδο ή και φ_k για το κάθετο επίπεδο. Η γωνία αυτή πάντα ορίζεται για μία συγκεκριμένη τιμή ελάτωσης της ηχοστάθμης σε σχέση με την εκπεμπόμενη τιμή στον ακουστικό άξονα (π.χ. για -3, -6, -9, -12 dB, αλλά συνήθως για -6 dB) και καθορίζει το εύρος κάλυψης μέσα στο οποίο η διακύμανση της ηχοστάθμης δεν θα ξεπερνά αυτό το καθορισμένο όριο. Η γωνία κάλυψης των ηχείων (κυρίως για επαγγελματικές εφαρμογές) δίνεται από τον κατασκευαστή, σε συνδυασμό με την τιμή Q , αλλά μπορεί ακόμα να υπολογισθεί από το πολικό διάγραμμα της κατευθυντικότητας του συγκεκριμένου ηχείου. Η κατευθυντικότητα Q σχετίζεται με τις γωνίες κάλυψης (στα 2 επίπεδα) με την σχέση:

$$Q = \frac{180^0}{\arcsin \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \cdot \sin \frac{\varphi_k}{2} \right)} \quad (7.10)$$

και

$$DI = 10 \log Q \quad (7.11)$$

Τα συμβατικά μεγάφωνα κώνου είναι τα λιγότερο κατευθυντικά στοιχεία με κατευθυντικότητα και κάλυψη που εξαρτάται από την συχνότητα. Στην πράξη, για μονάδες κώνου, ισχύει ότι $Q < 10$. Όταν τέτοιες μονάδες συνδιαστούν σε ηχείο υπό μορφή κολώνας (με κάθετη τοποθέτησή τους), η κατευθυντικότητα αυξάνει στο κάθετο επίπεδο, και η κάθετη γωνία κάλυψης μειώνεται κατά το μισό για κάθε μεγάφωνο που προστίθεται (δηλαδή από $\varphi_k=180^0$ γίνεται $\varphi_k=22,5^0$ για 8 κάθετα τοποθετημένα μεγάφωνα, που αντιστοιχεί σε $Q = 16$), αλλά η κατευθυντικότητα συνεχίζει να εξαρτάται από την συχνότητα. Σε αντίθεση, τα μεγάφωνα τύπου κόρννας εμφανίζουν υψηλή κατευθυντικότητα και σταθερή κάλυψη σε σχέση με την συχνότητα, τυπικά έχοντας $\varphi_k=25^0$ και $\varphi_0=50^0$ (για την περιοχή συχνότητας 200-4000 Hz), αλλά έχουν τα μειονεκτήματα της κακής απόκρισης συχνότητας (ακόμη και για εκπομπή στον ακουστικό τους άξονα) και της υψηλής αρμονικής παραμόρφωσης. Με παρόμοιο τρόπο συστήματα με πολλαπλές κόρννες επιτρέπουν την επίτευξη οποιασδήποτε μορφής κατευθυντικότητας, αλλά εμφανίζουν μειονεκτήματα σε σχέση με την ηχητική τους πιστότητα.

Στην πρακτική που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια, συστήματα με υψηλή τιμή Q χρησιμοποιούνται σε κατάλληλη τοποθέτηση και γωνία ώστε να κατευθύνουν τον ήχο στις απομακρυσμένες θέσεις του ακροατηρίου. Επιπλέον, άλλα συστήματα με χαμηλότερη τιμή Q , χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των κοντινών θέσεων, ενώ παλαιότερα συνηθιζόταν και η διαφοροποίηση της ηλεκτρικής τροφοδοσίας των διαφόρων μεγαφώνων ώστε να επιτυγχάνεται διαφορετική κάλυψη σε κοντινές ή μακρινές αποστάσεις. Πέρα από τις παραπάνω ιδιότητες των συστημάτων που παρουσιάζουν υψηλό Q σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας (π.χ. σε ανοιχτές

συναυλίες), η χρήση τέτοιων ηχείων είναι επίσης επιθυμητή και σε κλειστούς χώρους λόγω της μικρότερης διέγερσης αντήχησης και την επίτευξη καλύτερου λόγου κατευθειάν/ανακλώμενο ήχου. Οι αρχές αυτές εφαρμόζονται στο παρακάτω **Παράδειγμα** και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κάλυψη του ακουστικού χώρου.

Παράδειγμα

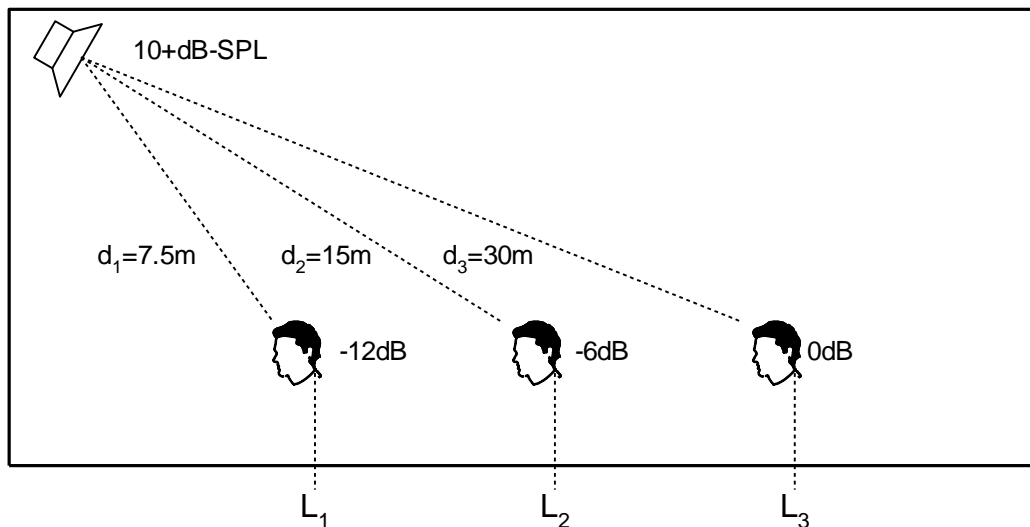
Δίδεται ο χώρος του **Σχήματος 7.9**, με αποστάσεις $d_1 = 30\text{ m}$, $d_2 = 15\text{ m}$, $d_3 = 7,5\text{ m}$ και σχετικές τιμές κατευθυντικότητας $Q_1 = 1$, $Q_2 = 4$ και $Q_3 = 16$ για τις αντίστοιχες διευθύνσεις (γωνίες) που αντιστοιχούν σε 3 περιοχές του ακροατηρίου. Για παραγόμενη ηχοστάθμη 104 dB-SPL σε 1 m από το μεγάφωνο, θα είναι :

$$\text{για την θέση 1, } L_p = 104 - 20\log 30 + 10\log 1 = 76\text{ dB}$$

$$\text{για την θέση 2, } L_p = 104 - 20\log 15 + 10\log 4 = 76\text{ dB}$$

$$\text{για την θέση 3, } L_p = 104 - 20\log 7,5 + 10\log 16 = 76\text{ dB}$$

και συνεπώς η στάθμη του ήχου για κάθε θέση θα είναι η ίδια. Για το παράδειγμα αυτό προφανώς αγνοούνται τα φαινόμενα αντήχησης του χώρου, αλλά σαν άσκηση θα πρέπει να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ηχοστάθμες για ύπαρξη αντήχησης με τιμή $RT = 4\text{ s}$.



Σχήμα 7.9: Παράδειγμα αξιοποίησης κατευθυντικότητας ηχείων

7.4.3 Τρόποι τοποθέτησης ηχείων

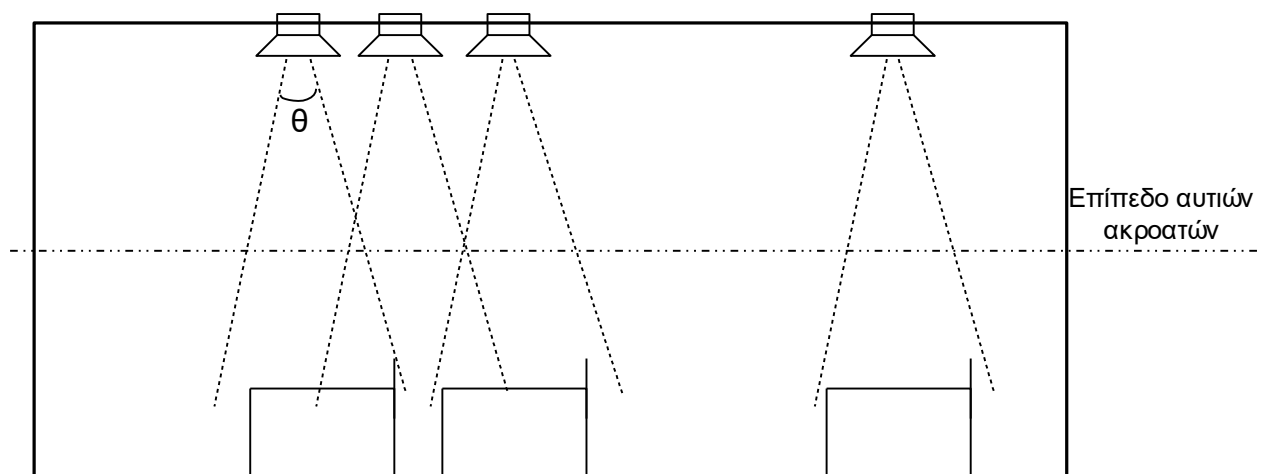
Οι διαφορετικές επιλογές για την τοποθέτηση ηχείων δίνονται στο **Σχήμα 7.10** και είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 7.10: Επιλογές για την τοποθέτηση των ηχείων

(α) κατανεμημένο σύστημα (distributed system)

Ο πιο απλός τρόπος τοποθέτησης είναι η υλοποίηση ενός κατανεμημένου συστήματος ηχείων **Σχήμα 7.11**. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται όταν απαιτείται μία στοιχειώδης ηχητική κάλυψη του χώρου με χαμηλές σχετικά ηχητικές στάθμες και χωρίς ο ακροατής να χρειάζεται να συσχετίσει το ηχητικό σήμα με κάποια πηγή με την οποία έχει οπτική επαφή. Για παράδειγμα, μία τέτοια μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση σε ένα χώρο αεροδρομίου, σταθμού, πολυκαταστήματος και εξωτερικούς βοηθητικούς χώρους ενός συνεδριακού κέντρου ή θεάτρου, για την μετάδοση μηνυμάτων ή και μουσικής υποβάθρου. Μία ανάλογη προσέγγιση θα εφαρμοζόταν και για την κάλυψη ενός κτηριακού συγκροτήματος ή και ενός πλοίου. Σε αντίθεση, μία τέτοια τοποθέτηση δεν είναι η κατάλληλη για την αναπαραγωγή μουσικής σε υψηλές στάθμες (πχ. για μία συναυλία ή σε χορευτικό κέντρο), η για την κάλυψη μίας ομιλίας ή θεατρικής παράστασης.



Σχήμα 7.11: Τοποθέτηση ηχείων κατανεμημένου συστήματος στην οροφή

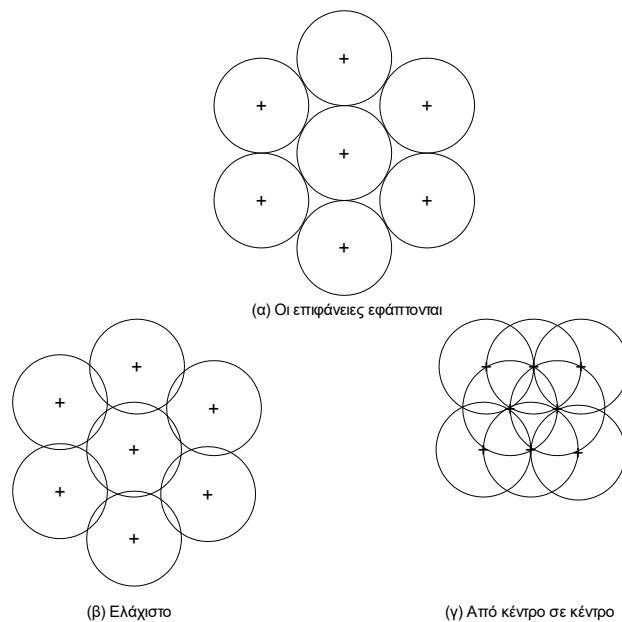
Για ένα καταναμημένο σύστημα, χρησιμοποιούνται ηχεία ή μεγάφωνα τοποθετημένα σε κανονικά διαστήματα, στην οροφή, στους πλευρικούς τοίχους ή και σε κατάλληλες βάσεις στο πάτωμα του προς κάλυψη χώρου. Σε συστήματα οροφής, χρησιμοποιούνται μεγάφωνα με διάμετρο 20, 30 ή 40 cm των οποίων η τοποθέτηση πρέπει να επιτρέπει επικάλυψη των πολικών τους αποκρίσεων στο μέσο επίπεδο των αυτιών του ακροατηρίου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιογενής απόκριση με διαφορές μικρότερες των ± 2 dB. (**Σχήμα 7.8**).

Σε μία τέτοια περίπτωση, ο αριθμός N των μεγαφώνων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν δίνεται από την εμπειρική σχέση:

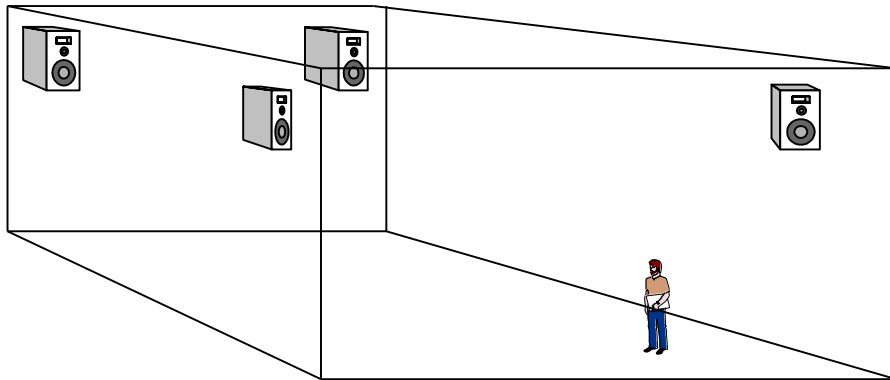
$$N = \frac{0,27 \cdot S_{op}}{2\pi \left[(0,3L - 1,21) \tan \frac{\theta}{2} \right]^2} \quad (7.12)$$

όπου L (m) είναι το ύψος του χώρου, S_{op} (m²) είναι η επιφάνεια της οροφής, θ (°) είναι η γωνία πολικής απόκρισης του μεγαφώνου. Αφού οριστεί ο απαιτούμενος αριθμός ηχείων, οι ακριβείς θέσεις τοποθέτησής τους θα καθοριστούν από γεωμετρικά κριτήρια, με στόχο την επικάλυψη των πολικών τους αποκρίσεων (**Σχήμα 7.12**). Επειδή τέτοια συστήματα επιτυγχάνουν υψηλό ποσοστό καταληπτότητας ομιλίας, είναι περισσότερο κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές, όπως για σταθμούς τρένων, αεροδρόμια, κλπ. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές είναι αποδεκτό το να εμφανίζεται ανομοιογένεια στην στάθμη ακουστικής πίεσης της τάξης των ± 6 dB-SPL, οπότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν κυρίως για λόγους οικονομίας, συστήματα με λιγότερα ηχεία από αυτά που ορίζει η παραπάνω σχέση.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα ηχεία ενός καταναμημένου συστήματος τοποθετούνται στους πλαϊνούς τοίχους (**Σχήμα 7.13**).



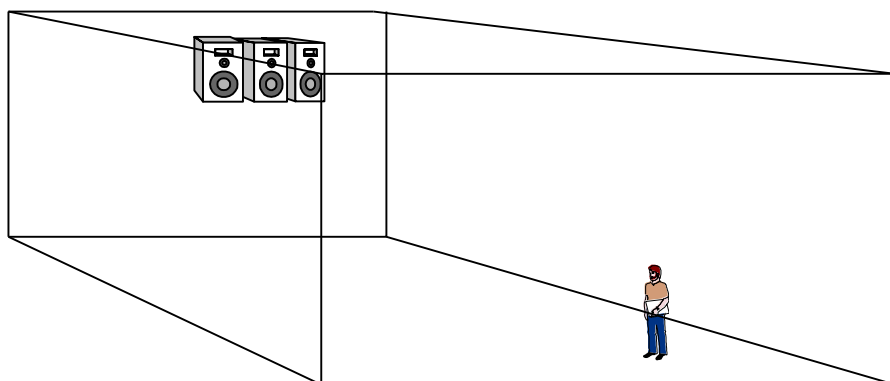
Σχήμα 7.12: Μέθοδοι εξαγωνικής επικάλυψης ηχείων οροφής



Σχήμα 7.13: Τοποθέτηση ηχείων κατανεμημένου συστήματος σε πλαϊνούς τοίχους

(β) κεντρικό σύστημα (central system)

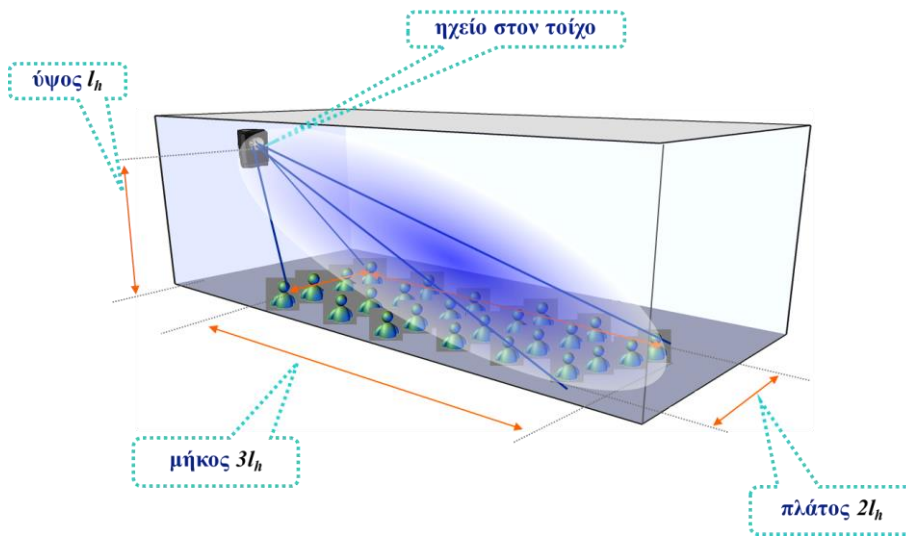
Σε μερικές περιπτώσεις, και για την κάλυψη μικρών σχετικά χώρων, χρησιμοποιείται μόνο ένα κεντρικό σύστημα ηχείων (ή και ζευγάρι ηχείων για στερεοφωνική μετάδοση) που, είτε τοποθετείται κοντά στην σκηνή, είτε κρεμιέται σε κατάλληλο σημείο της οροφής (**Σχήμα 7.14**). Τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν καλύτερη «φυσικότητα» στην ηχητική αναπαραγωγή και επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση του ακουστικού ειδώλου που ο ακροατής το εκλαμβάνει ότι βρίσκεται στην φυσική του θέση (πχ. στην σκηνή), αφού αποφεύγονται τα γνωστά προβλήματα που πηγάζουν από την ευαισθησία του αισθητηρίου της ακοής σε πηγές που είναι τοποθετημένες σε οριζόντιο επίπεδο (πχ. στην οροφή όπως στην περίπτωση του ισοκατανεμημένου συστήματος). Μειονέκτημα μίας τέτοιας λύσης είναι η δυσκολία επίτευξης ομοιογενούς ηχητικής κάλυψης, ιδιαίτερα σε χώρους με μεγάλες διαστάσεις ή και μη συμμετρική γεωμετρία. Για τον υπολογισμό της ηχοστάθμης που παράγεται από ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιούνται οι γνωστές σχέσεις (πχ. εξίσωση Hopkins-Stryker για κλειστό χώρο). Τέτοιες λύσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη μίας συναυλίας, ομιλίας, εκδήλωσης ή και για την μόνιμη εγκατάσταση σε οικιακούς χώρους, κέντρα, κλπ.



Σχήμα 7.14: Κεντρική συστοιχία ηχείων

Προφανώς για στερεοφωνική αναπαραγωγή θα απαιτηθεί η χρήση δεξιάς και αριστερής συστοιχίας, αλλά σε μεγάλους χώρους τέτοια αναπαραγωγή συχνά δεν αποδίδει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

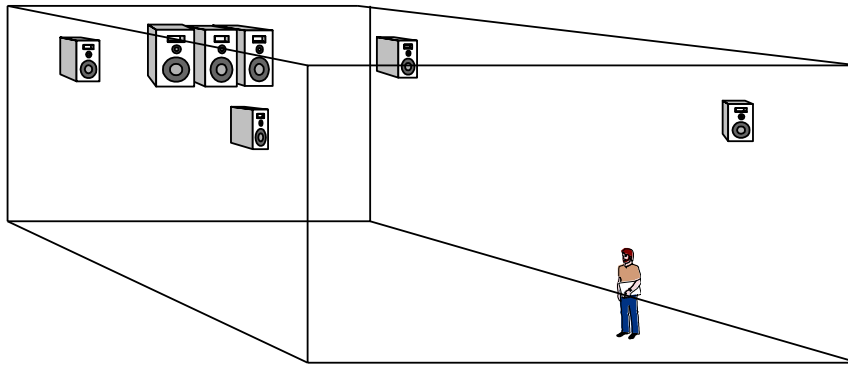
Η χρήση ενός αναρτημένου κεντρικού ηχείου, είναι πολύ διαδεδομένη σε πολλές εγκαταστάσεις μικρής – μεσαίας κλίμακας (π.χ. για διαλέξεις) και με δεδομένο ότι τα περισσότερα ηχεία για τέτοιες χρήσεις εμφανίζουν δεδομένες γωνίες κάλυψης στο οριζόντιο (ευρεία γωνία) και στο κάθετο επίπεδο (στενή γωνία), το πλάτος και βάθος ακουστικής κάλυψης που επιτυγχάνουν, εξαρτάται από το ύψος l_h (m) ανάρτησης (**Σχήμα 7.15**).



Σχήμα 7.15: Ενδεικτικά μήκη ακουστικής κάλυψης από σύνηθες επαγγελματικό αναρτημένο κεντρικό ηχείο

(γ) κεντρικό σύστημα και βοηθητικά ηχεία

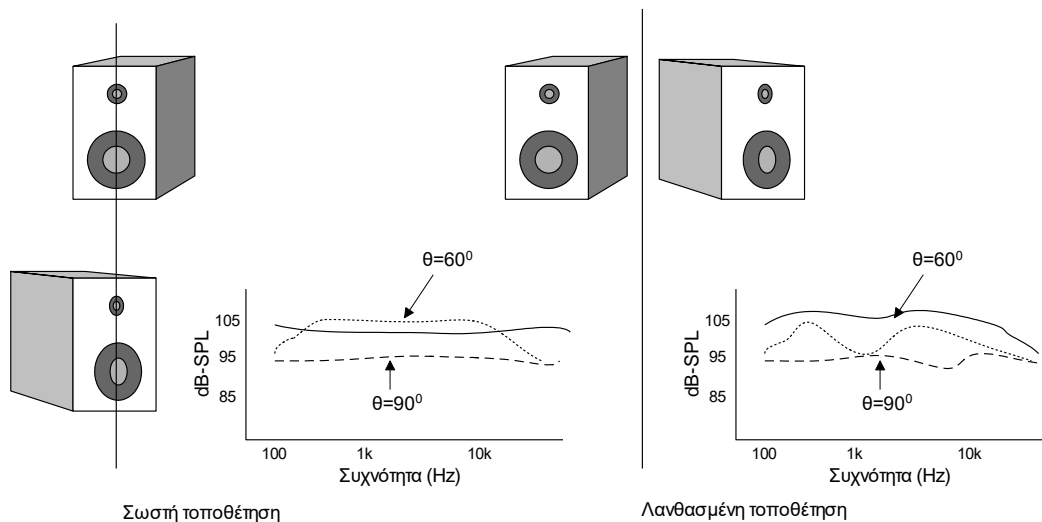
Σε πολλές όμως περιπτώσεις, με τις παραπάνω λύσεις δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν οι αρχικοί στόχοι για ομοιογενή ηχοστάθμη, και έτσι απαιτείται η χρήση ενός κεντρικού συστήματος σε συνδιασμό με κάποιες καταναμημένες μονάδες ή και συστοιχίες ηχείων (**Σχήμα 7.16**). Η λύση αυτή δίνεται στις περιπτώσεις κάλυψης μεγάλης κλίμακας εκδηλώσεων (συναυλιών, ομιλιών, κλπ). Η περίπτωση αυτή είναι και η πλέον σύνθετη για μελέτη και ανάλυση, αφού πρέπει να λειφθεί μέριμνα στην αποφυγή (κατά το δυνατό) της ηχητικής επικάλυψης από δύο ή περισσότερες πηγές που είναι τοποθετημένες σε απόσταση (με κατάλληλη τοποθέτηση και αξιοποίηση της κατευθυντικότητας των ηχείων) και με την χρήση κατάλληλης καθυστέρησης ώστε να αντιμετωπισθούν προβλήματα ηχητικής παρεμβολής. Στην πράξη, κάθε ένα από τα συστήματα ηχείων που θα χρησιμοποιηθεί θα αποτελείται από αρκετές μονάδες ηχείων που με σωστό υπολογισμό θα επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα κατευθυντικότητας.



Σχήμα 7.16: Κατανεμημένο σύστημα με βοηθητικά ηχεία

7.4.4 Τρόποι συνδυασμού ηχείων

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 7.17**, σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η κάλυψη ακροατηρίου σε μεγάλο πλάτος παρά σε μεγάλο βάθος. Στις περιπτώσεις αυτές καθίσταται αναγκαία η χρησιμοποίηση περισσότερων του ενός συστημάτων ηχείων τα οποία συχνά στην πράξη συνδιάζουν μεγάφωνα κώνου και κόρνας, για αυξημένη οριζόντια γωνία πολικής απόκρισης. Η τοποθέτηση του είδους αυτού συχνά εμφανίζει προβλήματα λόγω της επικάλυψης των αποκρίσεων των διαφόρων μεγαφώνων, με αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιογένειας στην απόκριση της οριζόντιας κάλυψης.



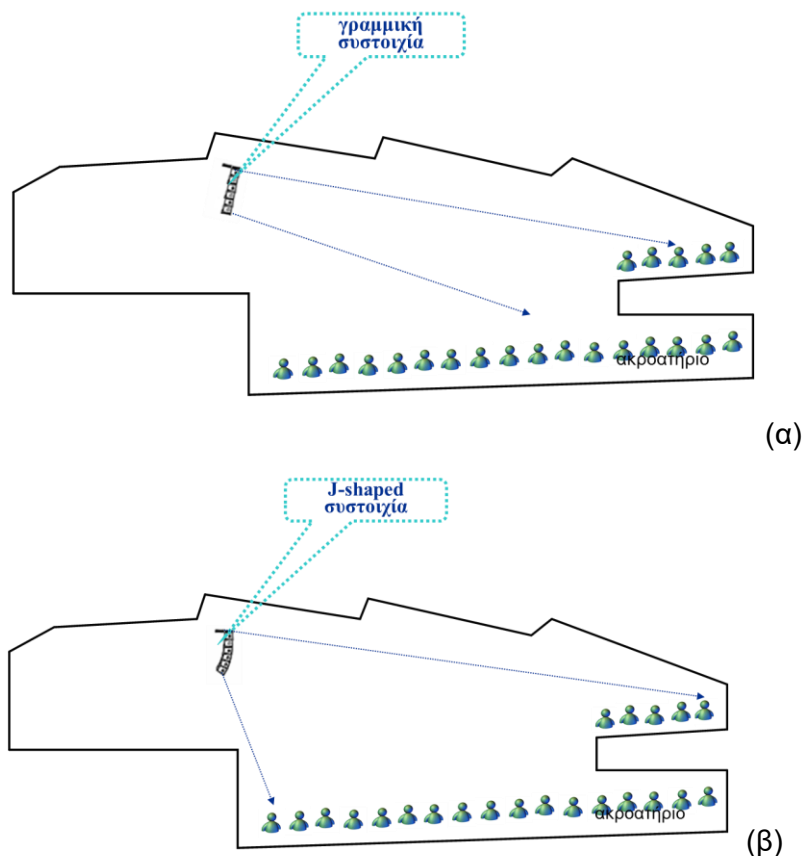
Σχήμα 7.17: Διαφορές στην απόκριση συχνότητας σε σχέση με την τοποθέτηση ηχείων

Επιπλέον, σε ηχεία που χρησιμοποιούνται για επαγγελματικές εφαρμογές (συναυλίες, club, κλπ.), η κάλυψη μεσαίων-ψηλών συχνοτήτων βασίζεται σε μεγάφωνα κόρνας, που αφενός εμφανίζουν υψηλή στάθμη ευαισθησίας, αφετέρου δε επιτυγχάνουν υψηλή και ελεγχόμενη κατευθυντικότητα (π.χ. γωνία κάλυψης στο κάθετο επίπεδο 45° , γωνία κάλυψης στο οριζόντιο επίπεδο 110°), δηλαδή όταν αναρτηθούν σε κάποιο ύψος, επιτρέπουν την βέλτιστη κάλυψη σε σχετικά μεγάλο βάθος και πλάτος ακροατηρίου (δηλαδή τη συνηθισμένη διάταξη σε κάποια εκδήλωση ή χώρο).

Τέτοιες μονάδες μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων συχνά καλύπτουν ικανοποιητικά και χαμηλές συχνότητες (κάτι που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του κώνου του μεγαφώνου χαμηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιείται ή και την χρήση μεθόδου bass-reflex), παρόλο που η κατευθυντικότητα σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων δεν είναι αρκετή. Για την επέκταση της απόκρισης σε χαμηλές συχνότητες (τυπικά από 20 – 150 Hz) χρησιμοποιούνται επιπλέον μονάδες sub-woofer που τοποθετούνται συνήθως στο επίπεδο της σκηνής και που η κατευθυντικότητά τους είναι χαμηλή και έτσι δύσκολα ελέγχεται η βέλτιστη κάλυψη του ακροατηρίου.

7.4.5 Συστοιχίες ηχείων

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ακουστική κάλυψη χώρων και εκδηλώσεων μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, ειδικά για συναυλίες, επιτυγχάνεται με τη χρήση γραμμικών συστοιχιών ηχείων (line arrays). Γενικά τέτοια συστήματα αποτελούνται από πολλαπλές μονάδες ηχείων μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων (π.χ. από 2 έως και 16) τοποθετημένες σε γραμμική διάταξη. Ο αριθμός των μονάδων σε μεγάλο βαθμό καθορίζει και τη συνολική γωνία (κάθετης) κάλυψης που επιτυγχάνουν τέτοιες συστοιχίες, ενώ για βελτιστοποίηση της κάλυψης και σε μπροστινές θέσεις, η διάταξη της συστοιχίας ρυθμίζεται έτσι ώστε να προσομοιάζει το γράμμα J (J-shaped array), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 7.18**.



Σχήμα 7.18: Συστοιχίες με 6 μονάδες ηχείων (α) γραμμική, (β) J-shaped

Πέρα από τον έλεγχο της κατευθυντικότητας, οι παραπάνω συστοιχίες εμφανίζουν και εγγενές πλεονέκτημα ακουστικής διασποράς προς τον ακουστικό τους άξονα σε σχέση με διακριτές πηγές, που ως γνωστό, η ηχοστάθμη L_{pdn} σε κάποια απόσταση d προκύπτει από την αρχική ηχοστάθμη L_p που μειώνεται κατά 6 dB με κάθε διπλασιασμό της απόστασης, δηλαδή ισχύει:

$$L_{pd} = L_p - 20 \log_{10} d \quad (7.13\alpha)$$

Σε αντίθεση, για γραμμικές συστοιχίες, ισχύει η σχέση:

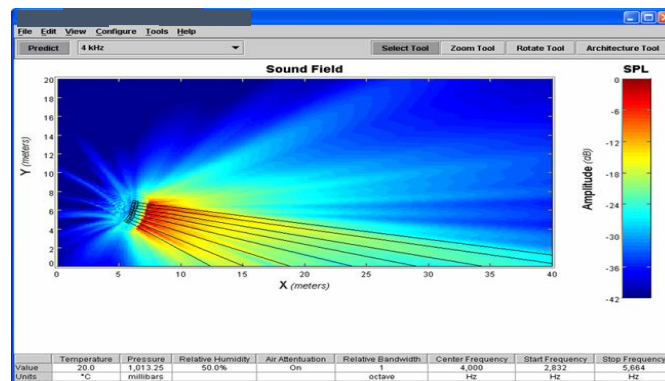
$$L_{pd} = L_p - 10 \log_{10} d \quad (7.13\beta)$$

δηλαδή εμφανίζεται κέρδος 3 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Η παραπάνω σχέση ισχύει για απόσταση εκπομπής d_A (m) που σχετίζεται με το μήκος l_A (m) της συστοιχίας και την εκπεμπόμενη συχνότητα f (Hz), δηλαδή για:

$$d \leq d_A \text{ όπου } d_A = \frac{(l_A)^2 f}{2c} \quad (7.13\gamma)$$

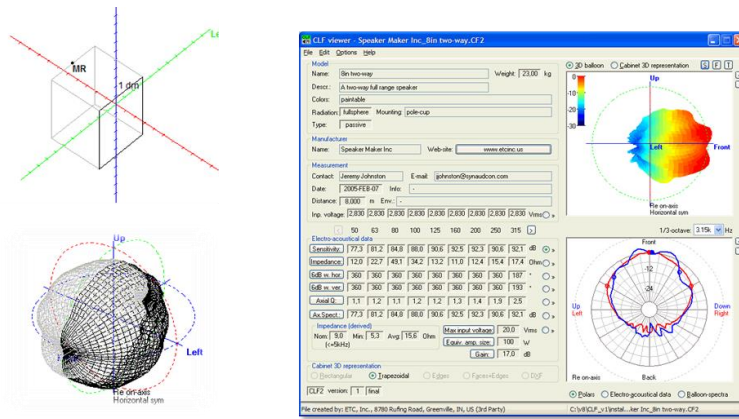
7.4.6 Λογισμικό πρόβλεψης ηχητικής κάλυψης

Για τη βέλτιστη μελέτη της ακουστικής κάλυψης με χρήση συστοιχιών ηχείων, συνήθως γίνεται χρήση εφαρμογών λογισμικού που εμφανίζουν χάρτες κάλυψης του ακροατηρίου (**Σχήμα 7.19**).



Σχήμα 7.19: Χαρτογράφηση ηχητικής κάλυψης με J-shaped συστοιχία

Για την εισαγωγή των δεδομένων κατευθυντικότητας των διαφορετικών τύπων ηχείων και συστοιχιών εφαρμογές λογισμικού ακουστικής εξομοίωσης, χρησιμοποιούνται τυποποιημένα αρχεία που παρέχονται από τους κατασκευαστές (π.χ. αρχεία .clf, δες <http://www.clfgroup.org/clfdocuments.htm>). Τέτοια δεδομένα ηχείων απεικονίζονται στο **Σχήμα 7.20**.



Σχήμα 7.20: Δεδομένα κατευθυντικότητας ηχείων μέσω αρχείων .clf

7.4.6 Ακουστική κάλυψη σε κλειστούς χώρους

Η ανάλυση που έγινε στις προηγούμενες παραγράφους, αφορούσε ακουστική κάλυψη που επιτυγχάνουν ηχητικές εγκαταστάσεις σε ανοιχτούς χώρους (ελεύθερο ηχητικό πεδίο). Σε κλειστούς χώρους, το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται, αποτελείται αφενός από το πεδίο που δημιουργεί το απευθείας διαδιδόμενο σήμα (που αναλύθηκε προηγουμένως), αλλά και από το αντηχητικό πεδίο που παράγεται από τις ανακλάσεις αυτού του ήχου. Έτσι, όπως συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 6, η συνολική ηχοστάθμη που παράγεται σε κάποια απόσταση από το ηχείο, υπολογίζεται από την εξίσωση Hopkins-Stryker:

$$L_p = PWL + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 0,5 \quad (dB) \quad (7.14)$$

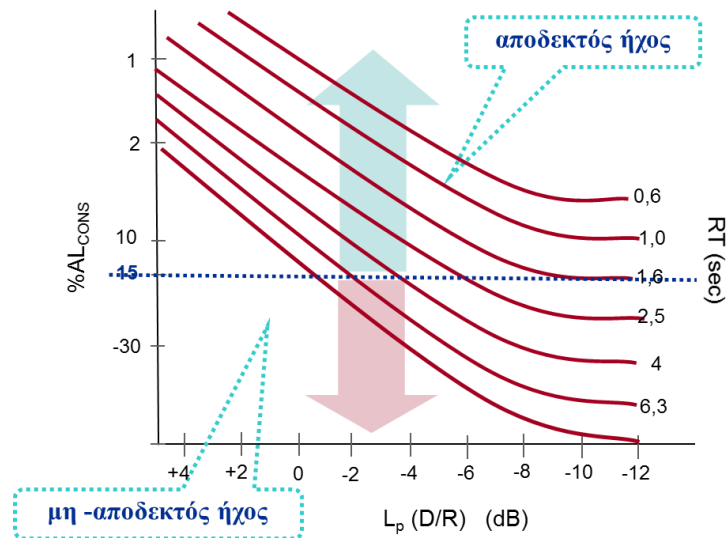
Επιπλέον, με δεδομένο ότι αυτή η ηχοστάθμη θα είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με το απευθείας διαδιδόμενο σήμα λόγω της αντήχησης, είναι σημαντικό να εξετάζεται η σχετική συνεισφορά του κάθε πεδίου που δημιουργείται, μέσω της ηχοστάθμης του λόγου απευθείας / ανακλώμενου σήματος:

$$L_p \left(\frac{P_d}{P_r} \right) = 10 \log \left(\frac{Q \times R}{16\pi r^2} \right) \quad (7.15)$$

Συνδυαστικά, θα πρέπει επίσης να εξετάζεται και η καταληπτότητα της ομιλίας, η οποία για την μέγιστη απαιτούμενη απόσταση κάλυψης στο χώρο d_{max} (που έστω έχει όγκο V και εμφανίζει Χρόνο Αντήχησης RT), θα εξαρτάται τελικά από την ελάχιστη αποδεκτή τιμή της κατευθυντικότητας του ηχείου, δηλαδή:

$$Q_{min} = \frac{200d_{max}^2 RT^2}{15V} \quad (7.16)$$

Ενδεικτικό νομόγραμμα που συσχετίζει τις παραπάνω παραμέτρους δίνεται από το Σχήμα 7.21.



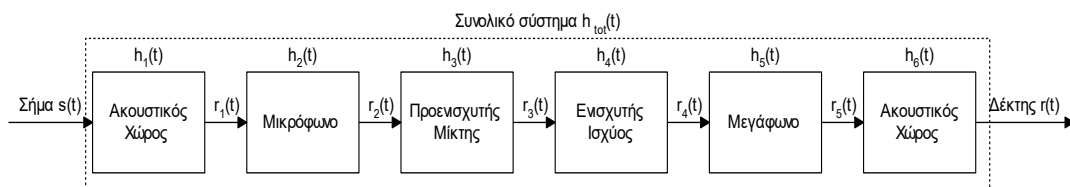
Σχήμα 7.21: Συσχέτιση καταληπτότητας ομιλίας, Χρόνου Αντήρησης και λόγου ηχοστάθμης απευθείας / ανακλώμενο ήχο

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ηχείων και της τοποθέτησής τους, τελικά αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, που τελικά μπορεί να επιτευχθεί με χρήση κατάλληλου λογισμικού ακουστικής εξομοίωσης (δες Κεφάλαιο 6).

7.5 Ισοστάθμιση εγκατάστασης

7.5.1 Θεωρητικές αρχές ισοστάθμισης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πέρα από τις σχέσεις που συζητήθηκαν μέχρι τώρα, απαιτείται και η συνολική βελτιστοποίηση της απόκρισης συχνότητας της ηχητικής εγκατάστασης, αφού το φάσμα του ήχου που φθάνει στον ακροατή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό παρόμοιο με αυτό του αρχικού σήματος στην είσοδο του συστήματος. Αναλυτικά, οι πολύπλοκες παραμορφώσεις που εμφανίζονται σε μια σύνθετη ηχητική εγκατάσταση αντιμετωπίζονται με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης σημάτων. Για το γενικό διάγραμμα μιας εγκατάστασης (**Σχήμα 7.22**), είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μια σειρά γραμμικών σχέσεων εισόδου/εξόδου, στο χρόνο ή στη συχνότητα, που καθορίζονται από τα σήματα εισόδου/εξόδου $s(t)$ και $r(t)$ και τις επιμέρους αποκρίσεις των υποσυστημάτων $h_i(t)$ (δες και Κεφάλαιο 6)



Σχήμα 7.22: Υποσυστήματα ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης

Προφανώς ισχύει:

$$r(t) = s(t) * [h_1(t) * h_2(t) * \dots * h_n(t)] = s(t) * [h_{tot}(t)] \quad (7.17)$$

και κατ' αντιστοιχία στο πεδίο συχνότητας

$$R(\omega) = S(\omega) \cdot [H_{tot}(\omega)] \quad (7.18)$$

Για ιδανική λειτουργία του συστήματος προφανώς θα πρέπει να ισχύει:

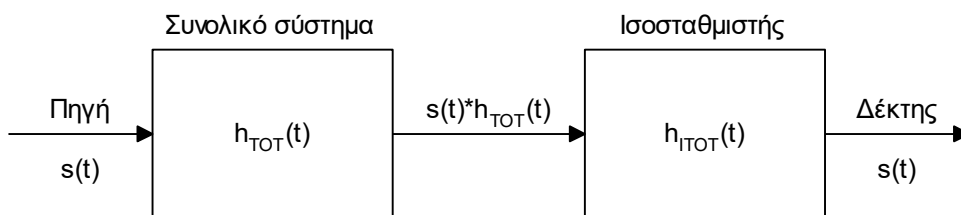
$$\begin{aligned} h_{TOT}(t) &\rightarrow \delta(t), & t = 0: \\ h_{TOT}(t) &= 0, & t \neq 0 \\ \text{ή} & & H_{TOT}(\omega) \rightarrow 1, \text{ για όλα τα } \omega \end{aligned} \quad (7.19)$$

Στην πράξη οι παραπάνω συνθήκες δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν, αλλά θεωρητικά μπορούν να αντισταθμιστούν με τη χρήση τεχνικών ισοστάθμισης (equalisation), υποθέτοντας ότι η $h_{TOT}(t)$ είναι γνωστή ή έχει μετρηθεί. Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις, η μέτρηση αυτής της συνάρτησης αντικαθίσταται από την υποκειμενική εκτίμηση της μορφής της από το χρήστη/μηχανικό του συστήματος, ο οποίος προσαρμόζει την απόκριση του συστήματος (με έλεγχο «μπάσων» και «πρίμων»), ώστε να αντισταθμίσει με αυτό τον τρόπο την αρχική παραμόρφωση του συστήματος. Η θεωρητική αρχή της τεχνικής ισοστάθμισης απαιτεί την προσθήκη ενός «αντίστροφου φίλτρου» (συστήματος) με απόκριση $h_{ITOT}(t)$, που όταν συνδυαστεί με το αρχικό ηχοσύστημα θα επιτυγχάνει τις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας που απαιτούνται, δηλαδή θα πρέπει:

$$h_{TOT}(t) * h_{ITOT}(t) = \delta(t) \quad (7.20\alpha)$$

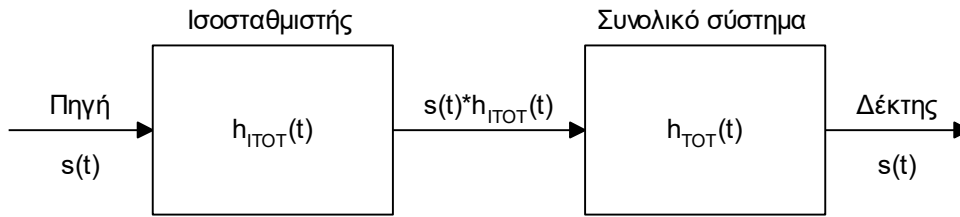
$$H_{TOT}(\omega) \cdot H_{ITOT} = 1 \quad (7.20\beta)$$

Προφανώς στην ιδανική περίπτωση, η σύζευξη των δύο αυτών συστημάτων θα πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή (**Σχήμα 7.23**).



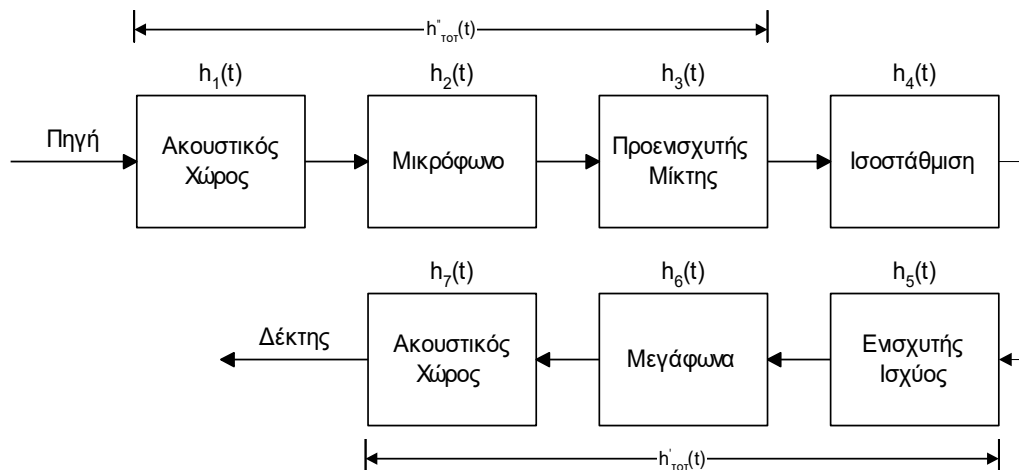
Σχήμα 7.23: Ιδανική σύζευξη συνολικού ηλεκτροακουστικού συστήματος και ισοσταθμιστή

Πρακτικά μια τέτοια υλοποίηση θα ήταν αδύνατη και γι'αυτό υλοποιείται ο ισοδύναμος τρόπος που δίνεται στο **Σχήμα 7.24**.



Σχήμα 7.24: Πρακτική σύνδεση ισοσταθμιστή – συνολικού ηλεκτροακουστικού συστήματος

Έτσι, στην πράξη η τεχνική της ισοστάθμισης βασίζεται στο «προ-φιλτράρισμα» του σήματος εισόδου έτσι ώστε, όταν φθάσει στην έξοδο, να εμφανίσει αναίρεση της συνολικής του παραμόρφωσης. Και πάλι, πρακτικές κυρίως δυσκολίες καθορίζουν την προσθήκη του συστήματος «προ-φιλτραρίσματος» (δηλ. του ισοσταθμιστή) σε κάποια ενδιάμεση θέση μέσα στην όλη αλυσίδα της εγκατάστασης (**Σχήμα 7.25**).



Σχήμα 7.25: Ηλεκτροακουστική διάταξη με προ-φιλτράρισμα σήματος εισόδου

Κατ' επέκταση μια τέτοια συνδεσμολογία θα επέτρεπε ισοστάθμιση μόνο του συστήματος $h'_{ΤΟΤ}(t)$. Αυτό δεν είναι και τόσο άσχημο όσο αρχικά φαίνεται, αφού όπως έχει συζητηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, οι αποκρίσεις των μεγαφώνων και η απόκριση του ακουστικού χώρου κατά την αναπαραγωγή του ήχου εμφανίζουν τις εντονότερες παραμορφώσεις στα Η/Α συστήματα. Επιπλέον αποδείχτηκε στην πράξη ότι οι $h_2(t)$ και $h_3(t)$ προσεγγίζουν την ιδανικά απαιτούμενη απόκριση και υποθέτοντας ότι η απόσταση ομιλητή - μικροφώνου είναι μικρή, τότε το ίδιο συμβαίνει και για την $h_1(t)$.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλη η παραπάνω ανάλυση ισχύει για δεδομένη θέση του δέκτη και της πηγής (αλλά για τους παραπάνω λόγους, η μεταβολή της απόκρισης λόγω αλλαγής θέσης της πηγής, θεωρείται αμελητέα). Στην πράξη, οι μεταβολές στην ακουστική απόκριση του χώρου ακρόασης (ή του ακροατηρίου) και οι μεταβολές λόγω της πολικής απόκρισης των ηχείων (ειδικά σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας), όπως άλλωστε ήδη προαναφέρθηκε, θα μεταβάλουν δραστικά

την συνολική απόκριση στις διαφορετικές περιοχές του ακροατηρίου και κατ' επέκταση θα απαιτήσουν και διαφορετική μορφή ισοστάθμισης. Πρακτικά, το πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να λυθεί πλήρως, και αντιμετωπίζεται με την απλοποίηση της φασματικής μορφής της προς ισοστάθμιση απόκρισης (π.χ. με φασματική ανάλυση ακρίβειας 1/3 οκτάβας) ή και με τον υπολογισμό του χωρικού μέσου της απόκρισης, έτσι ώστε μόνο τα προσεγγιστικά ολικά χαρακτηριστικά παραμόρφωσης να είναι δυνατό να ισοσταθμιστούν σε εκτεταμένη περιοχή του ακροατηρίου.

Επιπλέον, η μορφή ενός τέτοιου συστήματος ισοστάθμισης δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί με τη χρήση αναλογικών τεχνικών, αλλά μπορεί να υλοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών, όπως θα συζητηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Οι δυσκολίες υλοποίησης τέτοιων τεχνικών με αναλογικές μεθόδους/συστήματα οδηγεί σε λύσεις που συζητούνται στην επόμενη παράγραφο.

7.5.2 Πρακτική υλοποίηση ισοστάθμισης

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, στην πράξη απαιτείται η χρήση ενός συστήματος ισοστάθμισης με γενικές ιδιότητες που δίνονται από την εξίσωση 7.19. Λόγω των ιδιοτήτων του δέκτη, δηλαδή του συστήματος ακοής, πρέπει στην πράξη να ισχύει:

$$H_{ITOT}(\omega)H'_{TOT}(\omega)=1, \omega_L \leq \omega \leq \omega_H \quad (7.21)$$

όπου ω_L και ω_H , καθορίζουν τις κατώτερες και ανώτερες συχνότητες ακοής (20 - 20000Hz). Επίσης, όπως ήδη συζητήθηκε, στην πράξη οι παραπάνω σχέσεις μεταφοράς συνήθως εκφράζονται από το μέτρο τους, δηλαδή:

$$H_{TOT}(\omega) = |H_{TOT}(\omega)|e^{j\arg[H_{TOT}(\omega)]} \quad (7.22)$$

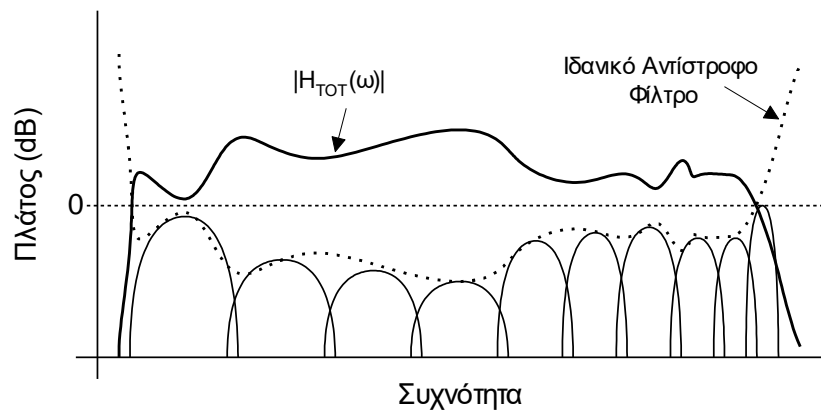
Η χρήση αναλογικών τεχνικών επιτρέπει στο πλάτος της συνάρτησης απόκρισης στην πράξη (και πάλι κατά προσέγγιση) να έχει το «αντίστροφο σύστημα» χαρακτηριστικά της μορφής:

$$|H_{ITOT}(\omega)| \cdot |H_{TOT}(\omega)| = 1, \omega_L \leq \omega \leq \omega_H \quad (7.23)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι σε αυτήν την περίπτωση η ισοστάθμιση θα επιτύχει μόνο κατά προσέγγιση τον αρχικό της στόχο, δηλαδή (**Σχήμα 7.22**):

$$|R_I(\omega) = |S(\omega)| \text{ για } \omega_L \leq \omega \leq \omega_H \quad (7.24)$$

Και στην πράξη, λόγω της πρόσθεσης και των επιπλέον αποκρίσεων φάσεων του συστήματος ισοστάθμισης, θα είναι:



Σχήμα 7.26: Χρήση αναλογικών τεχνικών ισοστάθμισης

$$R_i(\omega) \neq S(\omega) \quad (7.25)$$

$$r_i(t) \neq s(t) \quad (7.26)$$

Επίσης από τις παραπάνω σχέσεις και υποθέτοντας ότι η συνάρτηση $|H'_{TOT}(\omega)|$ έχει μετρηθεί, τότε η μορφή της ζητούμενης συνάρτησης του «αντιστρόφου φίλτρου» θα είναι (**Σχήμα 7.26**):

$$H_{TOT}(\omega) = \frac{1}{|H'_{TOT}(\omega)|} \quad (7.27)$$

Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι τα αναλογικά συστήματα ισοστάθμισης («Γραφικοί Ισοσταθμιστές»), επιτυγχάνουν μόνο προσεγγιστική διόρθωση των παραμορφώσεων του πλάτους της απόκρισης συχνότητας του ολικού συστήματος και μάλιστα η διόρθωση αυτή επιτυγχάνεται για συγκεκριμένη μόνο περιοχή του ακροατηρίου. Επιπλέον, λόγω της ίδιας φασικής τους απόκρισης, συχνά επιβαρύνουν την συνολική φασική / χρονική απόκριση του συστήματος. Τέτοια προβλήματα σε μεγάλο βαθμό είναι δυνατό να αντιμετωπισθούν με την χρήση ψηφιακών συστημάτων ισοστάθμισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Ηχητικές εγκαταστάσεις: ηλεκτρικές σχέσεις & χαρακτηριστικά

8.1 Γενικές σχέσεις εισόδου / εξόδου

Ενας σημαντικός ρόλος σε μία ηχητική εγκατάσταση καταλαμβάνεται από υποσυστήματα τα οποία είναι καθαρά ηλεκτρονικά και τα οποία προσθέτουν την απαραίτητη ενίσχυση σε ηλεκτρικά σήματα που γενικά προέρχονται από μετατροπή ακουστικών σημάτων. Οι ενισχυτές λειτουργούν λοιπόν σαν “μετασχηματιστές” ηλεκτρικών AC σημάτων (αυξάνοντας το πλάτος των σημάτων αυτών, χωρίς αν είναι δυνατό την προσθήκη άλλων αλλαγών ή παραμορφώσεων), και για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, χρησιμοποιούν ενέργεια από κάποιο κατάλληλο στάδιο τροφοδοσίας. Πολύ απλά λοιπόν, η τάση εξόδου V_o οποιοδήποτε τέτοιας ενισχυτικής διάταξης, θα είναι ίση με $V_o = V_{in} k$, όπου k είναι ο λόγος ενίσχυσης (κέρδος) του ενισχυτή.

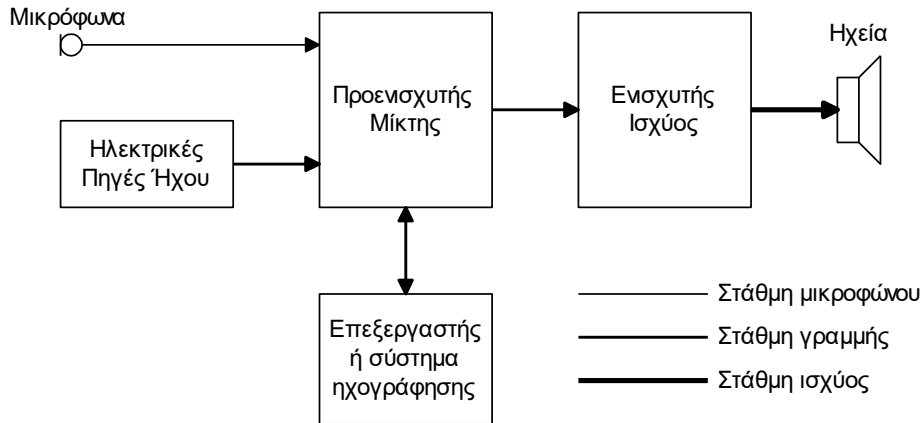
Ο λόγος για την ύπαρξη αυτών των υποσυστημάτων είναι προφανής αφού οι ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς λειτουργούν με πολύ χαμηλό συντελεστή απόδοσης και έτσι δεδομένου ότι το ηλεκτρικό σήμα εξόδου ενός μικροφώνου (για ένα ακουστικό σήμα) μπορεί να είναι της τάξης των 10mV, και εαν αυτό το σήμα χρησιμοποιούταν για την κατευθείαν οδήγηση ενός τυπικού μεγαφώνου, τότε το ακουστικό σήμα που θα παραγόταν θα είχε ακουστική ισχύ της τάξης των $2 \times 10^{-9}W$, δηλαδή θα ήταν πολύ κάτω από το κατώφλι ακουστότητας. Έτσι, είναι απαραίτητη η σημαντική αύξηση της ισχύος του ηλεκτρικού σήματος, αφ'ενός για να υπερνικηθεί η χαμηλή απόδοση των μετατροπέων, αφ'ετέρου για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ηχητική στάθμη στην θέση του δέκτη, η οποία όπως συζητήθηκε θα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα επιτύγχανε μόνη της η πηγή και που περιγράφηκε από το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος της εγκατάστασης.

Από τα προηγούμενα είναι προφανές ότι στη γενική της μορφή, μία ηχητική εγκατάσταση θα περιλαμβάνει υποσυστήματα τα οποία λειτουργούν με διαφορετικές στάθμες ηλεκτρικού σήματος. Οι στάθμες αυτές ανήκουν σε 3 διαφορετικές περιοχές τιμών και έτσι ορίζουν και τις ανάλογες κατηγορίες (**Σχήμα 8.1**) :

- **σήματα στάθμης μικροφώνου** (mic/phono): από -80dBm έως -20dBm (πχ. 77.5mV σε 600Ω),
- **σήματα στάθμης γραμμής** (line): από -20dBm έως και +30dBm (πχ. 24,5 V σε 600Ω),
- **σήματα στάθμης ισχύος** (power): από +30dBm και πάνω.

Η παραπάνω ομαδοποίηση χρησιμοποιώντας στάθμες σήματος ισχύος (σε dBm) είναι γενικά χρήσιμη στην περίπτωση αυτή, αφού στην εγκατάσταση

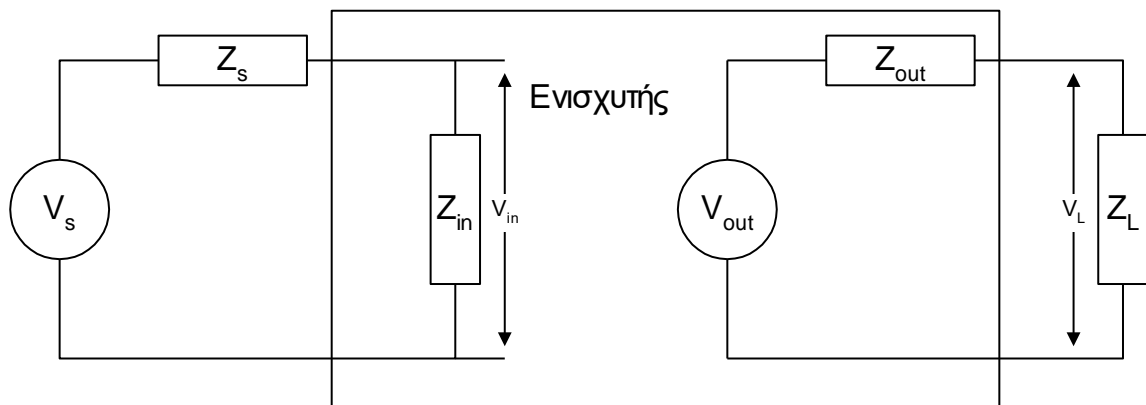
περιλαμβάνονται υποσυστήματα με διαφορετικές αντιστάσεις εισόδου/εξόδου. Μια περισσότερο αναλυτική θεώρηση της εγκατάστασης θα απαιτούσε χρήση της γνωστής θεωρίας των διθύρων, όπου καθένα από τα παραπάνω υποσυστήματα θα περιγραφόταν με τον γνωστό τρόπο που επαναλαμβάνεται στο παρακάτω **Παράδειγμα**.



Σχήμα 8.1: Στάθμες ηλεκτρικών σημάτων σε ηχητική εγκατάσταση

Παράδειγμα

Μία χαρακτηριστική περίπτωση υποσυστήματος στην εγκατάσταση που περιγράφεται σαν ένα δίθυρο, είναι ένα ενισχυτικό στοιχείο με είσοδο κάποια πηγή τάσης, και έξοδο κάποιο φορτίο (Σχήμα 8.2).



Σχήμα 8.2: Βασική δομή διθύρου ενισχυτικού στοιχείου

Στην περίπτωση έστω ότι $V_{in}=1V$, $|Z_{in}|=10\text{ K}\Omega$, $|Z_L|=8\Omega$, και η ενίσχυση είναι τέτοια, ώστε $V_{out}=2V_{in}=2V$. Επίσης η $|Z_{out}|$ θεωρείται αμελητέα, κάτι που συνήθως συμβαίνει στους ενισχυτές ισχύος. Τότε,

$$W_{in}=(V_{in})^2 / |Z_{in}|=1 \times 10^{-4} W \tag{8.1a}$$

και

$$(W_{in})_{dBm}=-10dBm \tag{8.1\beta}$$

Όμοια,

$$(W_{out})_{dBm}=26.9dBm \quad (8.1δ)$$

Το κέρδος λειτουργίας G του ενισχυτή σε dB, ($G=20\log k$), δίνεται από τη σχέση

$$G=20\log V_{in}/V_L=(W_{out})_{dBm}-(W_{in})_{dBm}=10\log(W_{out}/W_{in})=37dB \quad (8.1ε)$$

Εδώ λοιπόν φαίνεται η ευκολία του υπολογισμού της στάθμης εξόδου κάθε υποσυστήματος σε dBm και του κέρδους ενίσχυσης κάθε βαθμίδας σε dB.

Ο καθορισμός των κατάλληλων παραμέτρων του κάθε υποσυστήματος επιτρέπει την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του συνολικού συστήματος. Από το βασικό σύστημα του **Σχήματος 8.1** οι παράμετροι ενδιαφέροντος θα είναι: *στάθμη σήματος πηγής, ευαισθησία, κατευθυντικότητα και αντίσταση μικροφώνου, κέρδος, αντίσταση εισόδου και εξόδου του προενισχυτή/μίκτη, κέρδος, αντίσταση εισόδου και εξόδου και ισχύς του ενισχυτή ισχύος και η ευαισθησία, απόκριση συχνότητας, αντίσταση και κατευθυντικότητα των μεγαφώνων/ηχείων.*

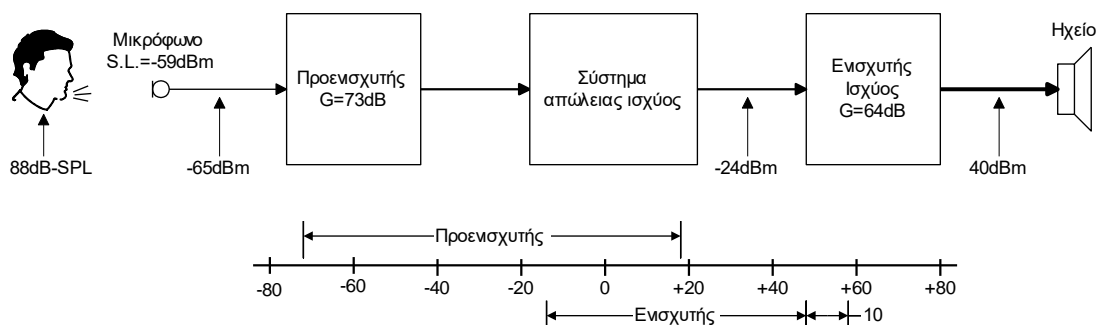
Αρχικά πρέπει να οριστεί η συνηθισμένη μορφή των φυσικών μεγεθών που συσχετίζουν τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος. Με αναφορά τα παραπάνω, είναι δυνατό να ορίσουμε σε dBV (στάθμη τάσης) ή σε dBm (στάθμη ισχύος) την είσοδο ή την έξοδο του κάθε υποσυστήματος. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να γίνεται γνωστή η τιμή της αντίστοιχης σύνθετης αντίστασης. Για παράδειγμα, ισχύς 0,001 W (0 dBm), αντιστοιχεί σε 0,775 V στα 600 Ω, σε 1 W στα 30 dBm, ή -12 dBm είναι 0,195 V στα 600 Ω, κ.ο.κ., Ανάλογα, για ορισμένη τιμή αντίστασης οι εκάστοτε τιμές σε dBV αντιστοιχούν σε τιμές τάσης, όπως π.χ. -10 dBV (0,3 V) σε αντίσταση 10 kΩ ή -54 dBV (2 mV), κ.ο.κ. Για ευκολία ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν στην παρακάτω παράγραφο μονάδες στάθμης ισχύος dBm, οι οποίες επιτρέπουν την εκτίμηση του σχετικού κέρδους εκάστου υποσυστήματος. Προφανώς, γνωρίζοντας την τιμή της σχέσης ευαισθησίας του μικροφώνου και την αντίσταση εξόδου, μπορούμε να βρούμε την έξοδο σε dBm για μια δεδομένη τιμή στάθμης dB SPL της ακουστικής πηγής. Λόγω του ότι η τιμή στάθμης ισχύος της ηλεκτρικής εισόδου ενός μικροφώνου σε dBm είναι μικρή, παρεμβάλλεται το υποσύστημα του προενισχυτή/μίκτη, ο οποίος ανάλογα με την τιμή του κέρδους εισόδου αυξάνει την τιμή αυτή έτσι ώστε ο τελικός ενισχυτής να την μετατρέψει σε εκείνη την τιμή εξόδου που επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες αυξημένης ακουστικής πίεσης σε dB SPL. Σε όλες τις πρακτικές περιπτώσεις, το κέρδος λειτουργίας εκάστου υποσυστήματος, ορίζεται **κατά 10 dB κάτω του ιδανικού**, ώστε να επιτρέπει τη χρήση σημάτων μεταβατικής συμπεριφοράς, χωρίς όμως αυτά να προκαλούν μη γραμμικές παραμορφώσεις. Σε άλλες περιπτώσεις εμφανίζεται μια υπερκάλυψη κέρδους μεταξύ εξόδου και εισόδου σε δύο υποσυστήματα, με αποτέλεσμα να παρεμβάλλεται μετασχηματιστής για εσκεμμένη απώλεια ισχύος.

Παράδειγμα

Δίδεται ένα μικρόφωνο ευαισθησίας -59 dBm (για 94 dB SPL αναφορά). Αν η ακουστική πηγή παράγει $88 = 94 - 6$ dB, τότε η ισχύς εξόδου του μικροφώνου θα είναι $-59-6 = -65$ dBm. Υποθέτουμε ότι για την ενίσχυση του σήματος αυτού θα

χρησιμοποιηθεί ενισχυτής ισχύος 100 W (=50 dBm), και σταθερό κέρδος εισόδου/εξόδου 64 dB (Σχήμα 8.3).

Βλέπουμε ότι στην περίπτωση αυτή θα απαιτηθεί η χρήση προενισχυτή/μίκτη που να επιτρέπει τη μετάδοση του σήματος των -65 dB σε 50 dBm, δηλαδή να παρουσιάζει ισχύ της τάξης των $65 + 50 = 115$ dBm. Έστω ότι για πρακτικούς ή άλλους λόγους χρησιμοποιείται ένας μη ιδανικός για την εφαρμογή αυτή ενισχυτής/μίκτης με κέρδος εισόδου εξόδου 87 dB και ισχύ εξόδου 18 dBm, για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του. Για να εξετάσουμε την προσαρμογή του υποσυστήματος αυτού αναφορικά με τις ανάγκες του ενισχυτή ισχύος, θα πρέπει να βρεθεί η συνολική έξοδος από αυτό το σύστημα. Επειδή η έξοδος του προενισχυτή είναι 18 dBm, επιτρέποντας 10 dB για μεταβατικά, βρίσκουμε ότι για ομαλή λειτουργία σε ιδανικές συνθήκες η έξοδος του θα είναι $18 - 10 = 8$ dBm. (Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε κέρδος εισόδου 73 dB αντί των 87 dB). Για τον ενισχυτή ισχύος, η ιδανική τιμή ισχύος εισόδου θα είναι $50 - 64 = -14$ dBm, και λόγω της ύπαρξης των μεταβατικών, $-14 - 10 = -24$ dBm. Συνεπώς ο δεδομένος προενισχυτής θα προσφέρει σε ιδανικές συνθήκες + 8 dBm κέρδος, ενώ ο ενισχυτής θα απαιτεί -24 dBm κέρδος εισόδου. Η προενίσχυση λοιπόν θα υπερκαλύπτει τον ενισχυτή κατά $8 + 24 = 32$ dBm, που για ομαλή λειτουργία θα πρέπει να αφαιρεθούν με την προσθήκη κατάλληλου μετασχηματιστή απώλειας ισχύος.



Σχήμα 8.3: Παράδειγμα διαβάθμισης κέρδους σε Η/Α εγκατάσταση

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η τυπική συνολική ενίσχυση (κέρδος) που απαιτείται για την μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος του μικροφώνου σε σήμα ισχύος που θα τροφοδοτήσει τα ηχεία με ικανοποιητική ισχύ, είναι τυπικά της τάξης των 110 dB. Η περιοχή αυτή κέρδους είναι εξαιρετικά μεγάλη και αυτός είναι ένας από τους λόγους που στα συστήματα αυτά είναι αναγκαία η χρήση μίας πρώτης βαθμίδας ενίσχυσης, αυτής του προενισχυτή, η οποία και αυξάνει την χαμηλή στάθμη ισχύος που παράγουν τα μικρόφωνα (και οι κεφαλές των αναλογικών πικ-απ) σε στάθμες γραμμής οι οποίες και μπορούν στην συνέχεια να ενισχυθούν από τις βαθμίδες ενίσχυσης ισχύος σε σήματα τα οποία μέσω των ηχείων να επιτύχουν τις ζητούμενες στάθμες ήχου. Ο άλλος λόγος της ύπαρξης του

υποσυστήματος προενίσχυσης (που θα συζητηθεί παρακάτω) είναι και η επεξεργασία και ο συνδιασμός σημάτων από πολλές πηγές οι οποίες και στην συνέχεια θα μεταδοθούν σε κοινό ενισχυτή ισχύος (εξ' ου και ο όρος "μίκτης").

Όπως προαναφέρθηκε, τα κέρδη λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει ομαλή επικάλυψη μεταξύ του σήματος εξόδου του ενός και της περιοχής λειτουργίας εισόδου του επομένου και γι' αυτό τον λόγο, το κέρδος λειτουργίας καθενός από αυτά τα υποσυστήματα ορίζεται κατά 10 dB κάτω του ιδανικού, έτσι ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία των υποσυστημάτων και για ηχητικά σήματα με έντονο μεταβατικό χαρακτήρα τα οποία σε άλλη περίπτωση θα δημιουργούσαν μη-γραμμικές παραμορφώσεις αφού θα οδηγούσαν τις βαθμίδες ενίσχυσης σε λειτουργία εκτός των κανονικών ορίων τους. Σε άλλες περιπτώσεις είναι πιθανή υπερκάλυψη κέρδους μεταξύ εξόδου και εισόδου δύο διαδοχικών υποσυστημάτων με αποτέλεσμα την ανάγκη χρήσης ενός μετασχηματιστή απώλειας ισχύος. Στην πράξη, τα περισσότερα σύγχρονα υποσυστήματα περιλαμβάνουν ρυθμιστικά του κέρδους λειτουργίας τους, έτσι ώστε ο χρήστης να έχει την δυνατότητα ρύθμισης τέτοιων προβλημάτων.

8.2 Λειτουργία προενισχυτή

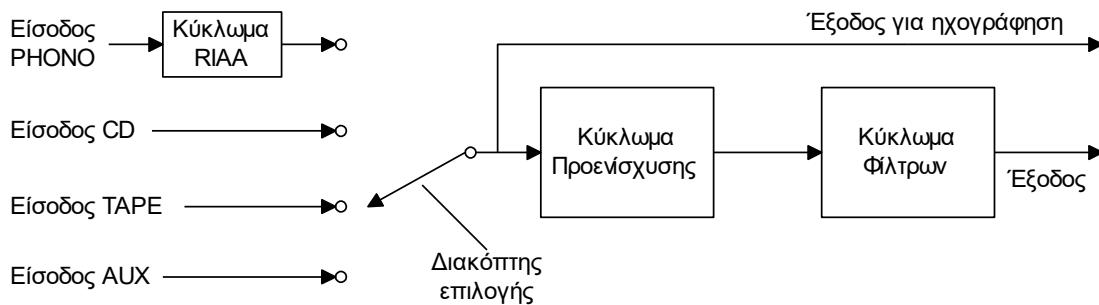
Τα υποσυστήματα αυτά υλοποιούν 3 λειτουργίες:

- (α) την ενίσχυση των σημάτων χαμηλής ισχύος που προέρχονται από μικρόφωνα ή άλλες ανάλογες πηγές,
- (β) την επιλογή ή και πρόσθεση (μίξη) σημάτων από πολλαπλές πηγές που χρησιμοποιούνται εναλλάκτικα ή και ταυτόχρονα από την εγκατάσταση, και
- (γ) την επεξεργασία των παραπάνω σημάτων (με χρήση φίλτρων ή και εξωτερικών υποσυστημάτων).

Ανάλογα με την χρήση της εγκατάστασης, οι παραπάνω λειτουργίες εμφανίζουν διαφορετική μορφή, αφού σε μία οικιακή εγκατάσταση απαιτείται απλή επιλογή μεταξύ του είδους της πηγής (πχ. CD-player ή κασσετόφωνο) και πιθανά μία απλή ρύθμιση του τόνου ("μπάσα/πρίμα"), (**Σχήμα 8.4**) ενώ σε μία επαγγελματική εγκατάσταση απαιτείται ταυτόχρονη άθροιση/επιλογή πολλαπλών εισόδων, είτε από μικρόφωνα, είτε από ηλεκτρικές πηγές (πχ. ηλεκτρονικά μουσικά όργανα) και επιπλέον, μία περισσότερο σύνθετη επεξεργασία των σημάτων (πχ. φιλτράρισμα διαφόρων περιοχών συχνότητας, προσθήκη τεχνητής αντήχησης, κλπ). (**Σχήμα 8.5**) Τέτοιες χρήσεις θα συζητηθούν αναλυτικότερα σε επόμενη παράγραφο. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι προενισχυτές περιλαμβάνουν κυκλώματα τα οποία εκτελούν τις παραπάνω λειτουργίες, ενώ στην περίπτωση που ο προενισχυτής περιλαμβάνει είσοδο για σήματα από μαγνητική κεφαλή πικ-απ (phono), περιέχεται μία επιπλέον βαθμίδα φασματικής ισοστάθμισης του σήματος (RIAA de-emphasis). Πρόσφατα, πολλές από τις λειτουργίες προενίσχυσης/μίξης για στάθμες σημάτων γραμμής και για επαγγελματικές κυρίως εφαρμογές, έχουν αρχίσει να αντικαθίστανται από ψηφιακά συστήματα, τα οποία και θα συζητηθούν αναλυτικά σε άλλο Κεφάλαιο.

3.2.1 Τοπολογίες κυκλωμάτων προενίσχυσης

Ιστορικά, τα κυκλώματα των προενισχυτών ξεκίνησαν με ισορροπημένες ή μη τοπολογίες που περιλάμβαναν μετασχηματιστές εισόδου (λόγου 1:10 έως 1:20) και κυκλώματα λυχνίας που επιτύγχαναν μία πρώτη ενίσχυση της τάξης των 20 - 25 dB. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και δεδομένου ότι οι απαιτήσεις από το κύκλωμα προενίσχυσης είναι να επιτυγχάνει υψηλό κέρδος, μεγάλο εύρος απόκρισης συχνότητας και να εμφανίζει υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου (και χαμηλή εξόδου), τα παραπάνω κυκλώματα αντικαταστάθηκαν από κατάλληλες τοπολογίες τελεστικών ενισχυτών (op-amps) οι οποίες και με μικρές σχετικά τροποποιήσεις χρησιμοποιούνται και στις υπόλοιπες βαθμίδες του προενισχυτή (δηλαδή στην βαθμίδα των φίλτρων, στους αθροιστές ή και ακόμη και στο κύκλωμα RIAA).



Σχήμα 8.4: Δομή προενισχυτή για οικιακή χρήση (ένα κανάλι στερεοφωνικού προενισχυτή)

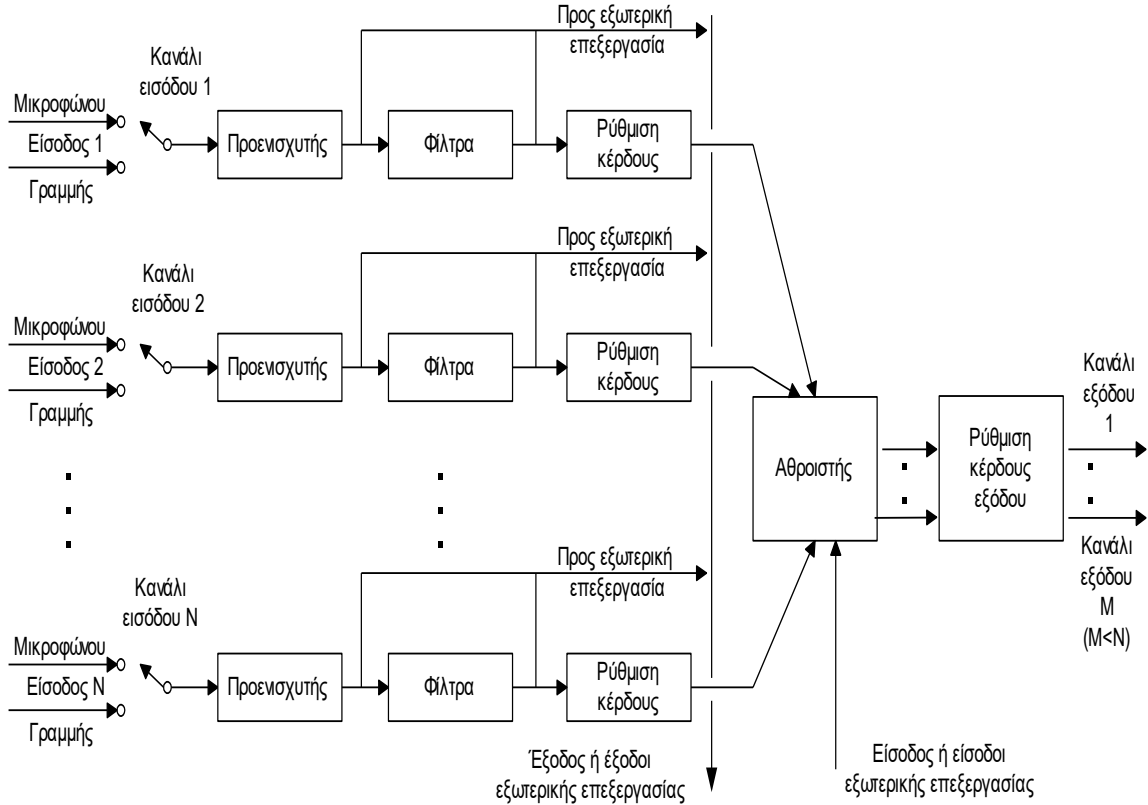
Γενικά, τα σύγχρονα κυκλώματα συσκευών ήχου που χρησιμοποιούν τελεστικούς ενισχυτές είναι τα: απομονωτές σταδίων εισόδου/εξόδου προενισχυτών (αποτροπή εξάρτησης από το φορτίο της εξόδου), κυκλώματα RIAA (**Σχήμα 8.6**), προενισχυτές γραμμής, ενεργά δικτυώματα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-over), κυκλώματα ρύθμισης τόνου (ισοσταθμιστές, ρυθμιστικά “μπάσων/πρίμων”), ενισχυτές ακουστικών, στάδια εξόδου μετατροπέν Ψηφιακού σήματος σε Αναλογικό (DAC), στάδια εισόδου μετατροπέν Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό (ADC), κλπ. Παρ’ όλο που οι διάφορες τοπολογίες τελεστικών ενισχυτών έχουν παρουσιαστεί από άλλα μαθήματα, εδώ θα γίνει μία γρήγορη ανασκόπηση των χαρακτηριστικών αυτών των κυκλωμάτων. Όπως είναι γνωστό, τα κυκλώματα με βάση τους τελεστικούς ενισχυτές λειτουργούν με αντιστάσεις εισόδου, εξόδου, ενώ τα όρια τάσης εξόδου του προενισχυτή καθορίζονται από την τάση τροφοδοσίας V_c . Το θέμα της τροφοδοσίας των ενισχυτικών διατάξεων θα συζητηθεί στις επόμενες παραγράφους.

Στα κυκλώματα αυτά, συνήθως υπάρχει και βρόγχος ανάδρασης ο οποίος είναι απαραίτητος για την ευστάθεια του κυκλώματος, αφού σε περίπτωση λειτουργίας μιας τοπολογίας ανοιχτού κυκλώματος μικρές τιμές (διαφορών) τάσης εισόδου θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσανάλογη τάση (και παραμόρφωση) στο σήμα εξόδου. Έτσι, στις τοπολογίες με χρήση βρόγχου ανάδρασης υπάρχουν η ανάστροφη και ορθή τοπολογία (**Σχήμα 8.7**). Προφανώς για την περίπτωση του ανάστροφου τελεστικού, είναι:

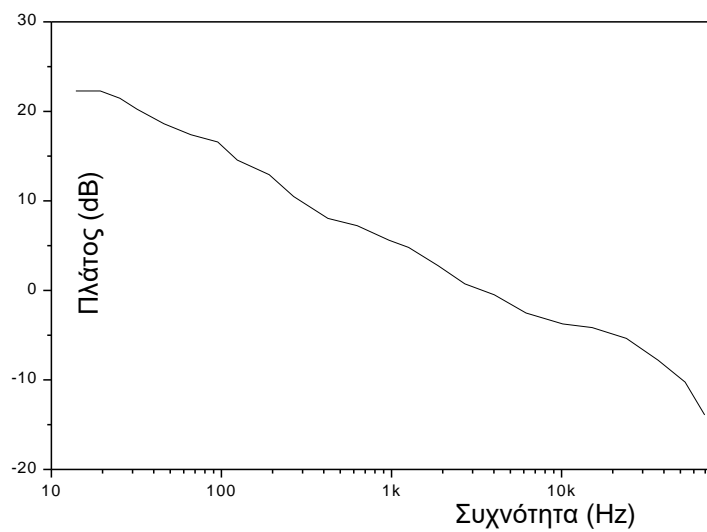
$$\text{κέρδος} = H(f) = V_{out} / V_{in} = -|Z_2| / |Z_1| \quad (8.2)$$

ενώ στην περίπτωση του ορθού τελεστικού, είναι:

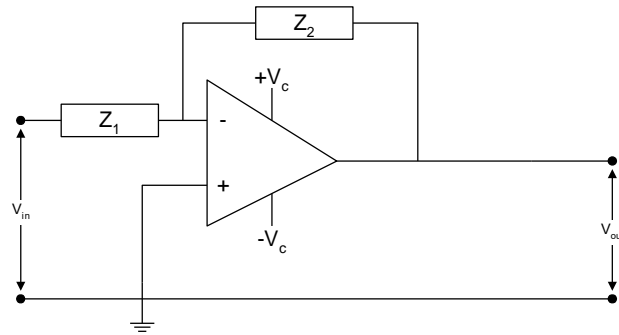
$$\text{κέρδος} = H(f) = V_{out} / V_{in} = |Z_1| / |Z_2| + 1 \quad (8.3)$$



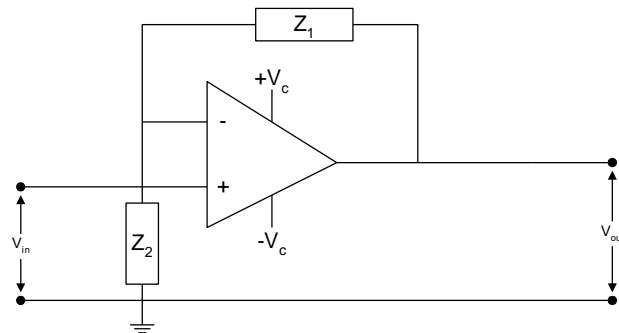
Σχήμα 8.5: Δομή προενισχυτή / μίκτη για επαγγελματική χρήση



Σχήμα 8.6: Τυπική μορφή απόκρισης συχνότητας σταδίου RIAA



Ανάστροφος



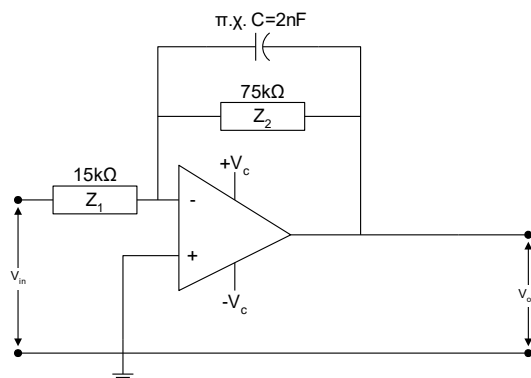
Ορθός

Σχήμα 8.7: Τοπολογίες τελεστικών ενισχυτών

Είναι επίσης προφανές ότι τυχόν εξάρτηση των Z_1 και Z_2 από την συχνότητα έχει σαν αποτέλεσμα η συνολική απόκριση του κυκλώματος $H(f)$, να εξαρτάται από την συχνότητα, δηλαδή το κύκλωμα να λειτουργεί σαν φίλτρο (**Παράδειγμα**).

Παράδειγμα

Για να σχεδιαστεί ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο με κέρδος=5 στην περιοχή απόκρισης, μπορεί να ακολουθηθεί η τοπολογία του **Σχήματος 8.8**, όπου έστω η μεν $|Z_1|=15k\Omega$ και η Z_2 έχει αντικατασταθεί από ένα δικτύωμα με αντίσταση $75k\Omega$ στις χαμηλές συχνότητες και βραχυκύκλωση στις ψηλές συχνότητες (μέσω παράλληλης σύνδεσης της αντίστασης των $75k\Omega$ με πυκνωτή του οποίου και η τιμή καθορίζει την συχνότητα αποκοπής του φίλτρου).

**Σχήμα 8.8:** Παράδειγμα τοπολογίας χαμηλοδιαβατού φίλτρου με κέρδος 5.

8.2.2 Προδιαγραφές προενισχυτών

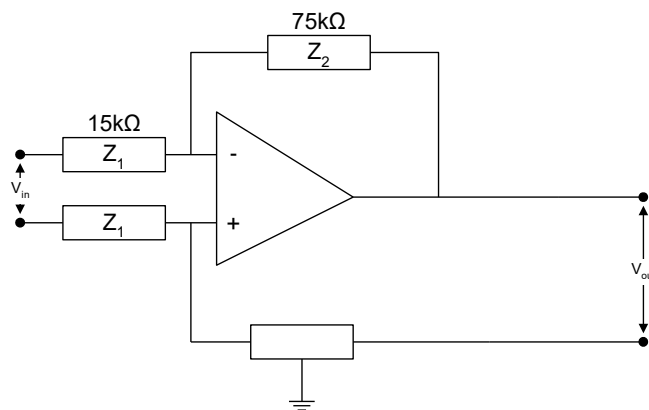
Πέρα από τις γενικές προδιαγραφές που ισχύουν για όλα τα συστήματα (πχ. απόκριση συχνότητας, λόγος σήματος προς θόρυβο, αρμονική παραμόρφωση, κλπ), για τα κυκλώματα προενίσχυσης ισχύουν και οι παρακάτω ειδικές προδιαγραφές.

(α) Λόγος Απόρριψης Κοινού Τρόπου (Common Mode Rejection Ratio, CMRR)

Καθορίζει την δυνατότητα απόρριψης σημάτων θορύβου που εμφανίζονται στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή και ορίζεται σαν:

$$CMRR(f) = 20 \log \frac{H_o(f)}{H_{cm}(f)} \approx 20 \log \frac{V_o}{kV_{cm}} \quad (\text{dB}) \quad (8.4)$$

όπου $H_o(f)$ είναι η απόκριση για σήματα εισόδου ίσα και με αντίθετη φάση $H_{cm}(f)$ η απόκριση για σήματα εισόδου ίσα και σε φάση, V_o είναι η τάση εξόδου, k είναι το κέρδος ανοικτού κυκλώματος και V_{cm} είναι η κοινή τάση του θορύβου. Προφανώς, η απόδοση του προενισχυτή είναι καλύτερη για μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου αυτής. Τα σύγχρονα ολοκληρωμένα στοιχεία τελεστικών ενισχυτών επιτυγχάνουν τιμές $CMRR > 120\text{dB}$, αλλά γενικά, για να επιτευχθούν τόσο ψηλές τιμές σε πρακτικές υλοποιήσεις απαιτείται η σχεδίαση ισορροπημένης τοπολογίας στο στάδιο εισόδου (Σχήμα 8.9), κάτι που παλαιότερα γινόταν με χρήση μετασχηματιστών.



Σχήμα 8.9: Ισορροπημένη τοπολογία στο στάδιο εισόδου βαθμίδας προενίσχυσης

(β) Γινόμενο Κέρδους επί Εύρος Απόκρισης (Gain X Bandwidth Product, GBP)

Χαρακτηρίζει την δυνατότητα του τελεστικού να ενισχύσει αποτελεσματικά τα σήματα εισόδου για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, κάτι που είναι προφανώς και το επιθυμητό και μειώνεται με την χρήση αυξημένης αρνητικής ανάδρασης στην τοπολογία. Για παράδειγμα, αν σε έναν τελεστικό το Εύρος Απόκρισης, $B=100\text{kHz}$, και το κέρδος $G < 40\text{dB}$, (δηλαδή $k=100$), τότε $GBP=10\text{MHz}$. Δεδομένου του GBP για ένα ολοκληρωμένο στοιχείο προενισχυτού, είναι προφανές ότι μία συγκεκριμένη υλοποίηση θα πρέπει να συμβιβάζει τις απαιτήσεις κέρδους και εύρους απόκρισης.

(γ) Βαθμός Ανύψωσης (Slew Rate)

Χαρακτηρίζει την δυνατότητα του κυκλώματος να ανταποκριθεί γρήγορα στις αλλαγές στάθμης του σήματος εισόδου και μετριέται σε $V/\mu\text{s}$. Προφανώς, η μεγαλύτερη τιμή

αυτής της παραμέτρου είναι και η πλέον επιθυμητή και πρακτικά οι τιμές της αλλάζουν σχετικά σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το σύστημα (πχ. από 1V/μs μέχρι και 3000V/μs).

(δ) Λόγος Απόρριψης Τροφοδοσίας (Power Supply Rejection Ratio, PSRR)

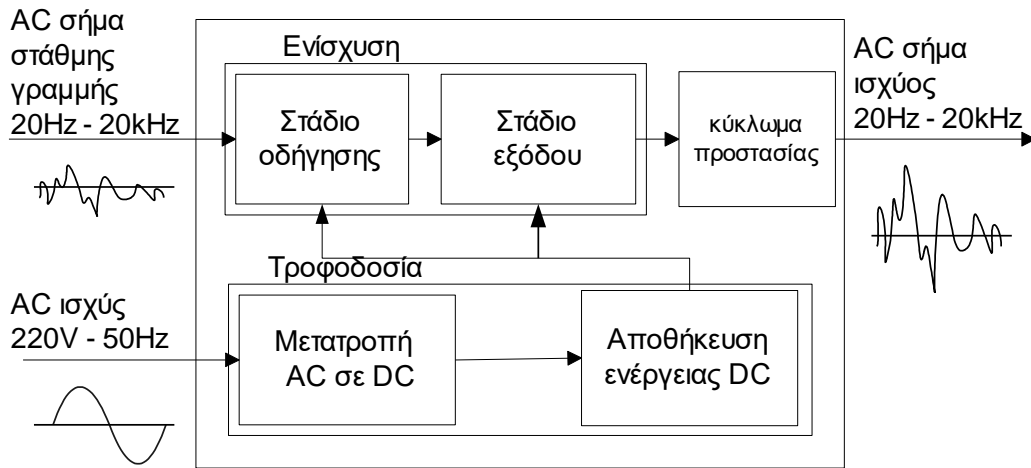
Χαρακτηρίζει την ανεξαρτησία της ενίσχυσης σε σχέση με τυχόν διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας V_c του τελεστικού και ορίζεται σαν $PSRR = \Delta V_o / \Delta V_c$ (μV/V). Προφανώς, η μικρότερη τιμή αυτής της παραμέτρου είναι και η πλέον επιθυμητή.

8.3 Ενισχυτές ισχύος

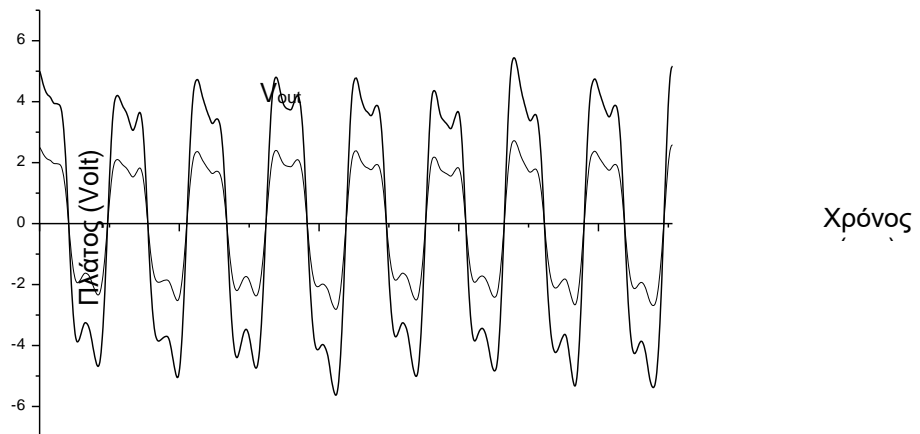
Οι ενισχυτές ισχύος (ή «τελικοί» ενισχυτές) παράγουν την αύξηση της στάθμης των σημάτων στάθμης γραμμής, έτσι ώστε να οδηγήσουν τα ηχεία της εγκατάστασης με την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ, που τυπικά είναι της τάξης των 10-600W για οικιακές εφαρμογές, και 100W-2kW για επαγγελματικές εφαρμογές (που συχνά συνδιάζουν πολλαπλές τέτοιες μονάδες με αποτέλεσμα την παραγωγή συνολικής ισχύος της τάξεως έως και μερικών MW). Έτσι, ανάλογα με την εφαρμογή, εμφανίζονται και διαφορετικές απαιτήσεις από τα συστήματα αυτά, με αποτέλεσμα σημαντικές διαφοροποιήσεις στην υλοποίησή τους. Παρ' όλο που οι διάφορες τοπολογίες ενισχυτών ισχύος έχουν παρουσιαστεί από άλλα μαθήματα, εδώ θα γίνει μία γρήγορη ανασκόπηση των χαρακτηριστικών αυτών των κυκλωμάτων. Επιπλέον, η απαίτηση για παραγωγή υψηλών σταθμών ισχύος από τα συστήματα αυτά, τα διαφοροποιεί σε τοπολογία από τα συστήματα των προενισχυτών που συζητήθηκαν παραπάνω. Στην πράξη, οι ενισχυτές ισχύος μετατρέπουν το AC σήμα εισόδου πλάτους της τάξης του 1V (δηλαδή στάθμης γραμμής) και συχνοτήτων 20Hz-20kHz, σε σήματα εξόδου πλάτους της τάξης των 10-100V (δηλαδή στάθμης ισχύος) και συχνοτήτων 20Hz-20kHz, χρησιμοποιώντας την ενέργεια του σταδίου τροφοδοσίας που έχει σαν είσοδο την AC τάση των 220V και της (ημιτονοειδούς) συχνότητας των 50Hz (**Σχήμα 8.10**). Επιπλέον, για την βέλτιστη μεταφορά τάσης, η αντίσταση εξόδου τους θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλή.

8.3.1 Τροφοδοσία ενισχυτών

Δεδομένου ότι κάθε ενισχυτική διάταξη πρέπει να αυξάνει σημαντικά το πλάτος και την ισχύ του σήματος εισόδου αντλώντας ενέργεια από το υποσύστημα τροφοδοσίας, η δυνατότητα και στιβαρότητα του υποσυστήματος αυτού είναι καθοριστικές στην απόδοση του συνολικού συστήματος. Δεδομένου τώρα ότι η έξοδος του ενισχυτή θα είναι $V_o = V_{in} k$, είναι προφανές ότι η τροφοδοσία θα πρέπει να επιτρέπει την σταθερή (με λόγο k) αύξηση του κέρδους, ανεξάρτητα της συχνότητας, άρα η τροφοδοσία πρέπει να επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό της κάθε τάσης εισόδου με μία σταθερή DC τάση, ανεξάρτητα των πιθανών μεταβολών του φορτίου εξόδου με την συχνότητα (που έχουν ήδη συζητηθεί). Έτσι, το υποσύστημα τροφοδοσίας πρέπει να παράγει σταθερή DC τάση V_c (και προφανώς και $-V_c$ για τις αρνητικές τιμές του σήματος εισόδου V_{in}), οι οποίες καθορίζουν και τα μέγιστα όρια στα οποία θα μπορεί να φθάσει η τάση εξόδου V_{out} (**Σχήμα 8.11**).

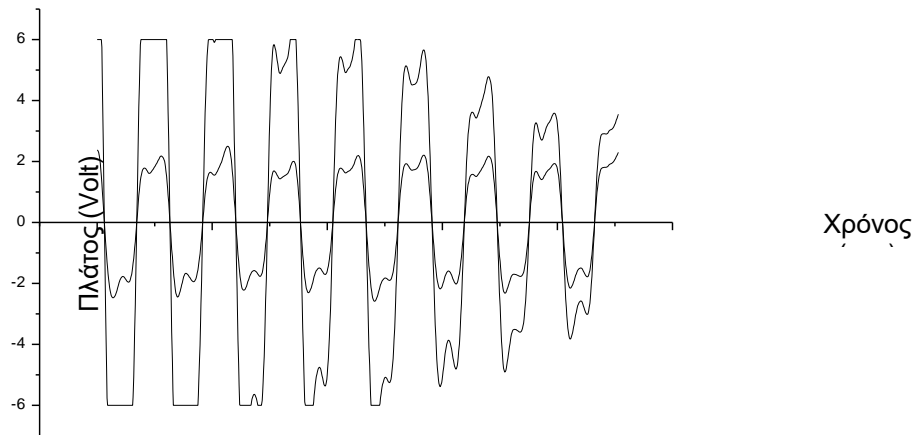


Σχήμα 8.10: Δομή ενισχυτή ισχύος (ένα κανάλι στερεοφωνικού ενισχυτή)



Σχήμα 3.11: Παράδειγμα ενίσχυσης κυματομορφής ($V_c=6V$)

Όμως, είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή, υπάρχει και η πιθανότητα των παρακάτω προβλημάτων (**Σχήμα 8.12**). Στην περίπτωση του παραπάνω Σχήματος, η τάση τροφοδοσίας δεν ήταν αρκετή (για το συγκεκριμένο κέρδος λειτουργίας) για να καλύψει τα στιγμιαία μεταβατικά χαρακτηριστικά (κορυφές) του σήματος εισόδου, με αποτέλεσμα τον ψαλιδισμό των κορυφών αυτών στο σήμα εξόδου. Επίσης, είτε λόγω του παραπάνω προβλήματος ή και λόγω πιθανής μεταβολής (με το στιγμιαίο συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος) του φορτίου εξόδου, η αυξημένη απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος από το τροφοδοτικό, είχε σαν αποτέλεσμα την αδυναμία παραγωγής της σταθερής τάσης/ρεύματος και την στιγμιαία πτώση (“γονάτισμα”) της τάσης τροφοδοσίας και τον ψαλιδισμό του σήματος.



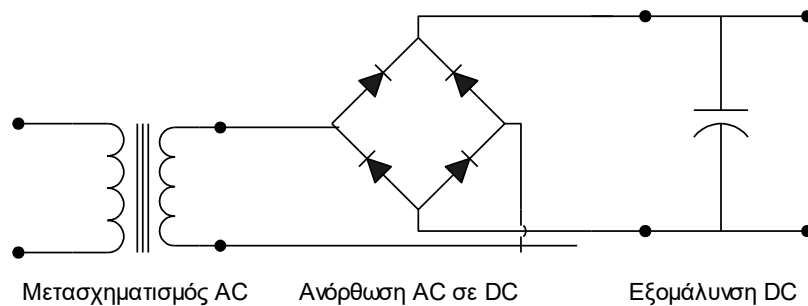
Σχήμα 8.12: Παράδειγμα ψαλιδισμού και στιγμιαίας πτώσης τάσης τροφοδοσίας ενισχυτή ισχύος

Γενικά, τέτοιοι ψαλιδισμοί του σήματος εξόδου παράγουν έντονα ακουστές παραμορφώσεις, που σε κάποιο βαθμό έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της χροιάς του σήματος (με προσθήκη “τραχύτητας” λόγω της παραγωγής μη-αρμονικών φασματικών συνιστωσών), σε δε ακραίες περιπτώσεις, την παραγωγή κρουστικών ήχων κατά την αναπαραγωγή του σήματος (συχνά με καταστροφικές επιπτώσεις στα μεγάφωνα). Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι το τροφοδοτικό ενός ενισχυτή (και σε μικρότερο βαθμό και ενός προενισχυτή) θα πρέπει αφ’ενός να έχει την δυνατότητα παραγωγής της απαιτούμενης τιμής DC τάσης τροφοδοσίας (και του ρεύματος που θα απαιτήσουν τα τρανζίστορ του σταδίου ενליσχυσης), αφ’ετέρου δε να είναι σταθερό (δηλ. να έχει αποθέματα) στην παραγωγή της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος του, έτσι ώστε να μπορεί να ανταπεξέρθει σε πιθανές αυξημένες απαιτήσεις λόγω της μορφής του σήματος ή και της μεταβολής των χαρακτηριστικών του φορτίου εξόδου (δες Κεφάλαιο αντίστασης μεγαφώνων,). Στην πράξη, οι παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιούνται με γνωστές και από άλλα μαθήματα τοπολογίες, που συνήθως περιλαμβάνουν 3 στάδια (**Σχήμα 8.10**):

- **τον μετασχηματισμό της AC τάσης του δικτύου** στην AC τάση που απαιτείται στα επόμενα στάδια. Για το στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές είτε κυβικού σχήματος (E-I) ή τοροειδούς σχήματος που έχουν καλύτερη απόδοση λόγω απόρριψης σημάτων θορύβου.
- **την ανόρθωση της AC τάσης σε DC τάση** με την χρήση του γνωστού δικτύωματος των 4 διόδων (κατευθύνουν το ρεύμα προς μία μόνο διεύθυνση, χωριστά για τις απαιτούμενες θετικές και αρνητικές τάσεις τροφοδοσίας).
- **την εξομάλυνση και αποθήκευση της DC τάσης** με την χρήση πυκνωτών μεγάλης συνολικά χωρητικότητας που αφ’ενός επενεργούν σαν χαμηλωδιαβατά φίλτρα στην ανορθωμένη τάση, αφ’ετέρου παρέχουν την απαιτούμενη σταθερότητα σε τυχόν μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ισχύος από τα επόμενα στάδια του ενισχυτή (που συζητήθηκαν και προηγουμένως). Από

πρακτική άποψη είναι προτιμότερο η υψηλή χωρητικότητα να επιτυγχάνεται με την χρήση πολλών πυκνωτών μικρότερης χωρητικότητας.

Σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται και διακοπτικά («ψηφιακά») στάδια τροφοδοσίας. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την μείωση του όγκου/βάρους του τροφοδοτικού του ενισχυτή μέσω αύξηση της συχνότητας λειτουργίας του τροφοδοτικού από 50 Hz σε 50kHz ή και 100kHz. Σε πρώτη φάση, ένα διακοπτικό τροφοδοτικό ανορθώνει και εξομαλύνει την AC τάση. Σε δεύτερη φάση, με χρήση διακοπτικών τρανζίστορ υψηλής ταχύτητας, μετατρέπει την DC τάση σε υψίσυχη AC τάση η οποία με χρήση μετασχηματιστή μετατρέπεται σε τάση με το κατάλληλο πλάτος η οποία τελικά και ανορθώνεται και εξομαλύνεται με τον συνήθη τρόπο (**Σχήμα 8.14**). Τα τροφοδοτικά αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε επαγγελματικά συστήματα ενίσχυσης



Σχήμα 8.14: Βαθμίδα ανόρθωσης και εξομάλυνσης ενός τροφοδοτικού

8.3.2 Στάδια εξόδου ενισχυτών

8.3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

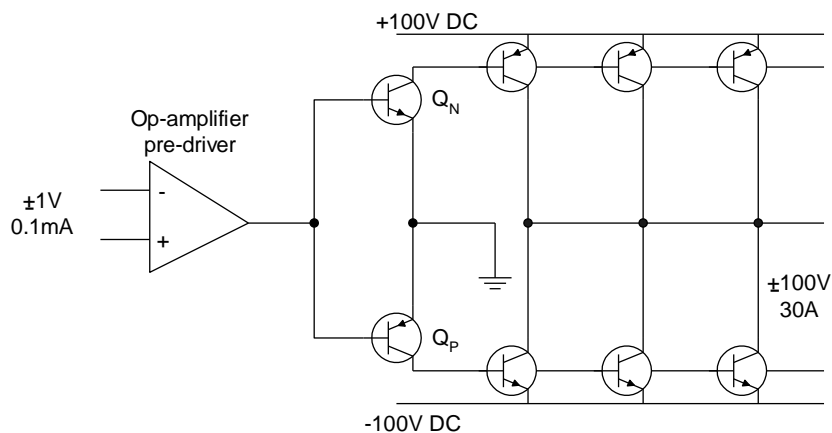
Τα στάδια αυτό των ενισχυτών εκτελεί τον κύριο ρόλο της αύξησης του ρεύματος και της τάσης του σήματος εισόδου, πχ. από 1V και 0,1mA, στα 100V και 30A. Πρακτικά, και δεδομένου ότι τα σήματα εισόδου στα στάδια αυτά είναι σχετικά υψηλής στάθμης (στάθμης γραμμής), η ενίσχυση αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση καταλλήλων διατάξεων τρανζίστορ ισχύος, που ως γνωστό αυξάνουν το πλάτος από τα σήματα εισόδου αντλώντας ισχύ από την DC τάση τροφοδοσίας.

Όπως είναι γνωστό και από τα μαθήματα των Ηλεκτρονικών, ένα τέτοιο στάδιο θα πρέπει να μεταβιβάζει το σήμα στην έξοδο με την μικρότερα δυνατή απώλεια κέρδους (και άρα πρέπει να εμφανίζει χαμηλή αντίσταση εξόδου), να παρουσιάζει υψηλή πιστότητα (που στην πράξη και δεδομένης της σχετικής ευκολίας στην επίτευξη ομαλής απόκρισης, αυτό σχετίζεται με την επίτευξη χαμηλής τιμής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης, THD, κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας) και να επιτυγχάνει υψηλή απόδοση με την έννοια ότι θα πρέπει να αξιοποιεί με τον αποδοτικότερο τρόπο την ισχύ που παράγει το στάδιο τροφοδοσίας με την χαμηλότερη θερμική επιβάρυνση στα τρανζίστορ.

Για την πλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων και δεδομένου ότι το σύνηθες κέρδος στο ρεύμα είναι της τάξης του 50-100, απαιτείται η χρήση πολλαπλών σταδίων ενίσχυσης με πιθανώς διαφορετική μεταξύ τους τοπολογία. Για παράδειγμα, είναι

σύνηθες ότι το τελευταίο στάδιο ενίσχυσης θα χρησιμοποιεί τρανζίστορ ισχύος που θα είναι προσαρμοσμένα σε κατάλληλους μεταγωγείς θερμότητας (heat sinks), ενώ τα προηγούμενα στάδια θα χρησιμοποιούν τρανζίστορ οδήγησης ή προ-οδήγησης ή και τελεστικούς ενισχυτές (τοπολογία που συζητήθηκε σε προηγούμενες παραγράφους), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8.15**.

Επιπλέον, η απαίτηση για λειτουργία του ενισχυτή με χαμηλές τιμές THD (στην πράξη για τις εφαρμογές που συζητούνται, κάτω από 0,1%) αναγκάζει την χρησιμοποίηση βρόγχου ανάδρασης στα στάδια ενίσχυσης (όπως θα συζητηθεί εκτενέστερα παρακάτω). Η σοβαρότερη όμως απαίτηση είναι αυτή της υψηλής απόδοσης και χαμηλής θερμικής φόρτισης των τρανζίστορ, κάτι που αναγκάζει και την επιλογή ειδικών τοπολογιών για τα στάδια αυτά, που παραδοσιακά κατατάσσονται σε ειδικές τάξεις (κατηγορίες), που θα παρουσιαστούν στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 8.15: Διαδοχικά στάδια ενίσχυσης σε ενισχυτή ισχύος

8.3.2.2 Κατάταξη των σταδίων εξόδου

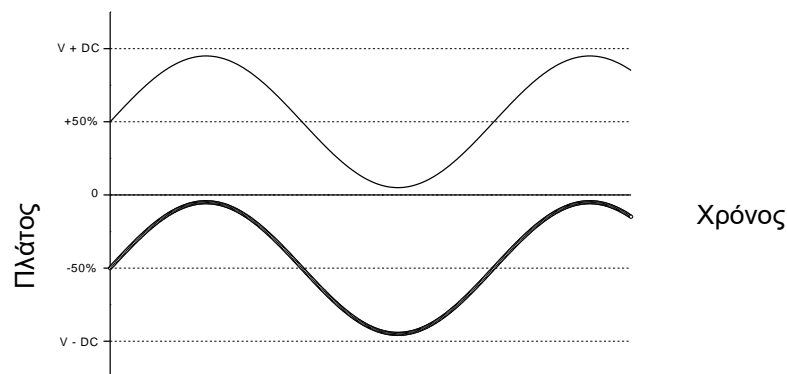
Η διαφορετική κατάταξη των σταδίων αυτών σε κατηγορίες προκύπτει από την μορφή της κυματομορφής του σήματος (ρεύματος στον συλλέκτη) που παράγεται όταν εφαρμόζει στην είσοδο του σταδίου αυτού κάποιο ηχητικό σήμα. Η σημασία μιας τέτοιας διαφοροποίησης σχετίζεται με το ότι τα ηχητικά σήματα έχουν AC χαρακτήρα, με πλάτος που διαφέρει σημαντικά σε κάθε χρονική τιμή και με στατιστικές διακυμάνσεις που δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν εκ των προτέρων.

Έτσι, στην πράξη τα στοιχεία του σταδίου εξόδου θα πρέπει να λειτουργούν έτσι ώστε να καλύπτουν τις στιγμιαίες απαιτήσεις για την ενίσχυση των τοπικών κορυφών του σήματος και επίσης να μπορούν να άγουν ρεύμα και στις δύο διευθύνσεις (για τα θετικά και αρνητικά ρεύματα που συνιστούν το διπολικό ηχητικό σήμα). Δεδομένου ότι τα τρανζίστορ άγουν σε μία διεύθυνση, η τελευταία απαίτηση καλύπτεται από ειδικές τοπολογίες (είτε push-pull, είτε Τάξης Α). Και οι δύο παραπάνω απαιτήσεις σχετίζονται άμεσα με το πρόβλημα της απόδοσης και της θερμικής φόρτισης του σταδίου εξόδου. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν υποθεθεί ότι το τρανζίστορ εξόδου τροφοδοτείται από σταθερή τάση πόλωσης 100V, αλλά λόγω της μορφής του σήματος, υπάρχει στιγμιαία απαίτηση για τάση εξόδου 40V στα 8Ω, δηλαδή ρεύματος 5A και παραγωγής ισχύος 200W.

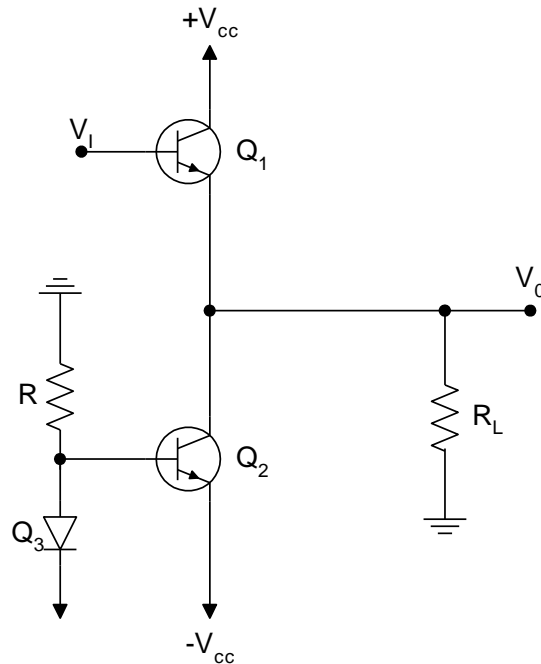
Προφανώς, τα υπόλοιπα 60V με το ίδιο ρεύμα των 5A θα παράγουν ισχύ 300W που θα μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι, αν δεν υπάρξει κατάλληλος σχεδιασμός ενός τέτοιου σταδίου, ειδικά με χρήση καταλλήλων μεταγωγέων θερμότητας, η θερμική ευστάθεια του ενισχυτή θα είναι προβληματική και φυσικά η συνολική απόδοση θα είναι πολύ χαμηλή. Τα προβλήματα αυτά οδηγούν στην χρήση συνδιασμού τρανζίστορ για την υλοποίηση του σταδίου εξόδου (σε αντίθεση με την χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων) με την χρήση διαφόρων τοπολογιών που προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την λειτουργία του σταδίου αυτού.

Αν για απλοποίηση θεωρήσουμε σαν είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου, τότε για να επιτευχθεί η ισόρροπη ενίσχυση για τον συνολικό κύκλο του σήματος (για τον οποίο η τάση και το ρεύμα παίρνουν διαδοχικά θετικές και αρνητικές τιμές), τότε η τάση (ή το ρεύμα) πόλωσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την διπλάσια της μέγιστης τιμής του σήματος, έτσι ώστε το τρανζίστορ να άγει και για τις 360° του κύκλου του σήματος. (**Σχήμα 8.16α**). Έτσι, στην περίπτωση αυτή το ενισχυμένο σήμα θα εμφανίζεται με τάση εξόδου αυξημένη με την τάση DC ίση με το (αρνητικό) μέγιστο του σήματος. Η τοπολογία **Τάξης A** επιτρέπει τέτοια μορφή λειτουργίας και είναι η παραδοσιακή υλοποίηση ενισχυτικών διατάξεων που πρωτοεμφανίστηκε από το 1917 περίπου. Προφανώς, η θερμική φόρτιση σε μία τέτοια τοπολογία θα είναι πολύ υψηλή αφού η επιπρόσθετη πόλωση του τρανζίστορ για να καλύψουν το (διπλάσιο) της μέγιστης τιμής του σήματος (**Σχήμα 8.16β**), θα εμφανίζεται σαν θερμική απώλεια. Έτσι η ιδανική απόδοση των ενισχυτών Τάξης A πάντα θα είναι μικρότερη του 50%, ενώ στην πράξη δεν ξεπερνά το 10%. Η χαμηλή αυτή απόδοση αναγκάζει την χρήση τέτοιων ενισχυτών μόνο σε οικιακές εφαρμογές όπου και η αναγκαστικά χαμηλή ισχύς τους, είναι συνήθως ικανοποιητική. Το κύριο πλεονέκτημά τους έγκειται στο ότι το ενισχυμένο σήμα εξόδου (ρεύμα και τάση) θεωρητικά δεν εμφανίζει παραμορφώσεις σε όλο τον κύκλο λειτουργίας του.

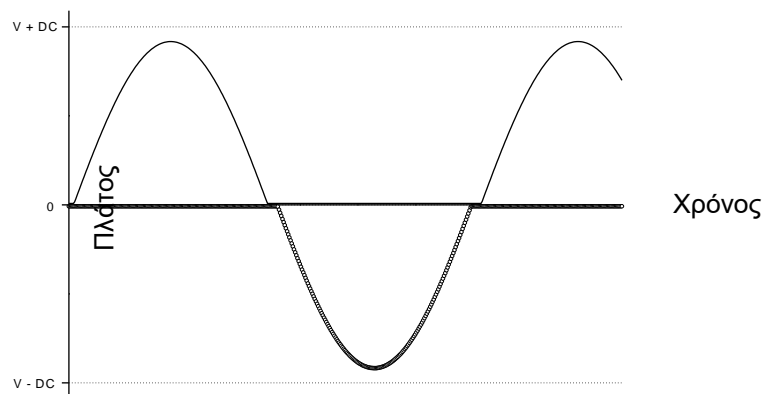
Οι αυξημένες απαιτήσεις σε ισχύ που δεν είναι δυνατό να καλυφθούν από την παραπάνω τοπολογία, οδήγησαν από το τέλος της δεκαετίας του '40 στην δημιουργία των ενισχυτών **Τάξης B**. Στην περίπτωση αυτή τα τρανζίστορ πολώνονται με μηδενικό DC ρεύμα και άγουν μόνο κατά τον μισό (θετικό ή αρνητικό) κύκλο της περιόδου του σήματος (**Σχήμα 8.17α**).



Σχήμα 8.16α: Ενίσχυση ημιτονικής κυματομορφής σε ενισχυτή τάξης A

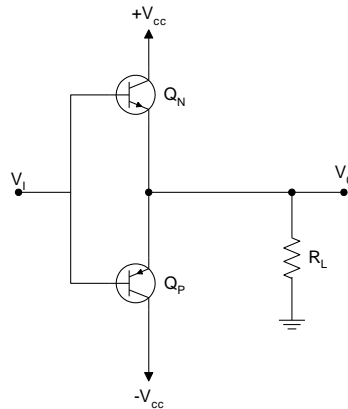


Σχήμα 8.16β: Τυπική μορφή σταδίου εξόδου ενισχυτή τάξης A



Σχήμα 8.17α: Ενίσχυση ημιτονικής κυματομορφής σε ενισχυτή τάξης B

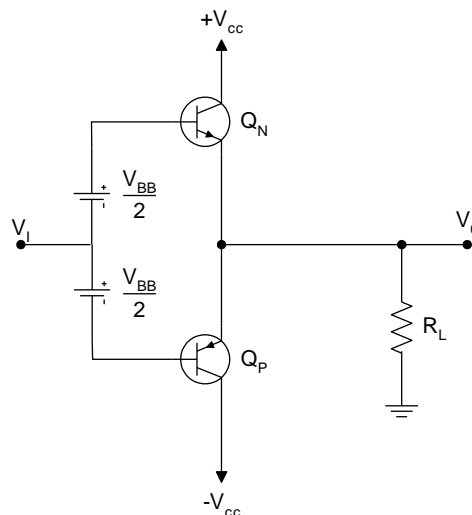
Έτσι, κάθε σήμα πρέπει να διαχωριστεί σε θετικό και αρνητικό κύκλο λειτουργίας (μία μη-γραμμική μαθηματική επέμβαση) και το κάθε τμήμα να ενισχυθεί χωριστά από διαφορετικά τρανζίστορ και κατόπιν να επανασυντεθεί στην τελική έξοδο (φορτίο), **Σχήμα 8.17β**. Προφανώς η απόδοση σε μία τέτοια τοπολογία θα είναι υψηλότερη, θεωρητικά πλησιάζοντας το 78,5%, ενώ στην πράξη φθάνει το 40%. Το πλεονέκτημα αυτό κάνει τους ενισχυτές Τάξης B κατάλληλους για επαγγελματικές ηχητικές εφαρμογές. Μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η πιθανή παραμόρφωση που δημιουργείται στην κυματομορφή του σήματος, ιδίως σε τιμές κοντά στις μηδενικές διαβάσεις (παραμόρφωση περάσματος), η οποία έχει μη-γραμμικό χαρακτήρα με ιδιάζοντα φασματικά (και άρα ηχητικά) χαρακτηριστικά.



Σχήμα 8.17β: Τυπική μορφή σταδίου εξόδου ενισχυτή τάξης B

Σε πολλές πρακτικές υλοποιήσεις ενισχυτών, κυρίως για οικιακές εφαρμογές χρησιμοποιείται η **Τάξη AB** κατά την οποία τα τρανζίστορ πολώνονται με μη μηδενικό DC ρεύμα, πολύ χαμηλότερο από το μέγιστο πλάτος του σήματος και έτσι η γωνία αγωγής τους να είναι μεγαλύτερη των 180° αλλά και πολύ μικρότερη των 360° . Έτσι, για το μεγαλύτερο τμήμα του κύκλου άγει το ένα τρανζίστορ, ενώ για τον υπόλοιπο κύκλο άγει το δεύτερο τρανζίστορ. Με τον τρόπο αυτό, για μικρές τιμές σήματος (και ισχύος) ο ενισχυτής λειτουργεί σε Τάξη A (με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά), ενώ για υψηλές τιμές ισχύος, η λειτουργία γίνεται σε Τάξη B.

Η τοπολογία αυτή εμφανίζει ένα συνδυασμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των δύο αυτών Τάξεων. Μία εκτεταμένη ανάλυση των τοπολογιών αυτών γίνεται στα βιβλία Ηλεκτρονικών (π.χ. Sedra/Smith: Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Τόμος Β). (Σχήμα 8.18).



Σχήμα 8.18: Τυπική μορφή σταδίου εξόδου ενισχυτή τάξης AB

Δεδομένου ότι η τοπολογία **Τάξης C** χρησιμοποιείται για διατάξεις RF και όχι για ηχητικές εφαρμογές, οι τοπολογίες **Τάξης D, E, F**, που αναπτύχθηκαν από τα μέσα της δεκαετίας του '60, αφορούν ενισχυτές των οποίων το στάδιο εξόδου λειτουργεί είτε κάτω από την τροφοδοσία διακοπτικού τροφοδοτικού, είτε σε πλήρως ψηφιακή

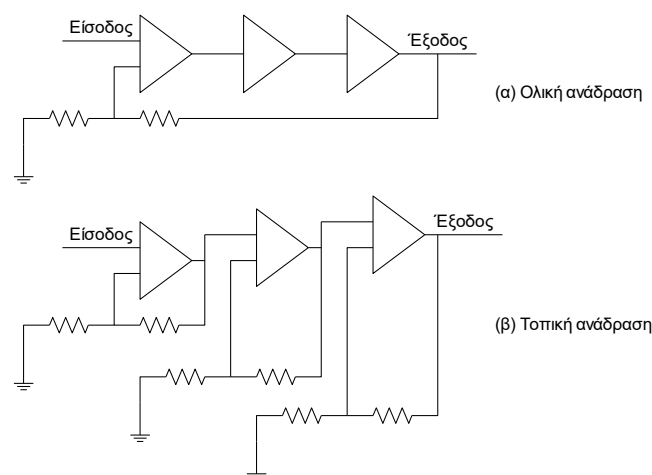
υλοποίηση (με ψηφιακό ηχητικό σήμα στην είσοδο), όπου και η ενίσχυση υλοποιείται με τρανζίστορ MOSFET τα οποία σε γενικές γραμμές λειτουργούν σε Τάξη Α, αλλά με αυξημένη απόδοση που μπορεί να φθάσει το 90%. (Η βασική περιγραφή της αρχής λειτουργίας των ψηφιακών ενισχυτών θα δοθεί παρακάτω).

Τέλος, οι τοπολογίες **Τάξης G** και **H**, που αναπτύχθηκαν από το τέλος της δεκαετίας του '70, κυρίως για επαγγελματικές ηχητικές εφαρμογές, αφορούν στάδια εξόδου των οποίων τα τρανζίστορ πολώνονται είτε από πολλαπλές γραμμές τροφοδοσίας (με διαφορετικές τάσεις), είτε από τρανζίστορ που πολώνονται από χαμηλή ή υψηλή τάση, ανάλογα με τις απαιτήσεις που επιβάλλει το σήμα εισόδου.

8.3.2.3 Χρήση Ανάδρασης και κυκλωμάτων προστασίας

Στις περισσότερες υλοποιήσεις ενισχυτών ισχύος χρησιμοποιείται αρνητική ανάδραση, ανάλογη με αυτή που έχει ήδη παρουσιαστεί και στην περίπτωση των τελεστικών ενισχυτών η οποία έχει πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα, όπως: (α) την απευαισθητοποίηση του κέρδους του ενισχυτή από μεταβολές στο φορτίο (δες την ανάλυση των χαρακτηριστικών των ηχείων), (β) την μείωση των μη-γραμμικών παραμορφώσεων (όπως για παράδειγμα την μείωση των παραμορφώσεων περάσματος των ενισχυτών Τάξης Β ή και ΑΒ), (γ) τον βέλτιστο έλεγχο των τιμών αντιστάσεων εισόδου/ εξόδου, (δ) την βελτίωση της τιμής SNR και της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή. Μία πλήρης ανάλυση του θέματος της χρήσης ανάδρασης γίνεται στο μάθημα των Αναλογικών Ολοκληρωμένων Ηλεκτρονικών και στα αντίστοιχα βιβλία (π.χ. Sedra/Smith : Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Τόμος Β).

Σε πρακτικές υλοποιήσεις της αρνητικής ανάδρασης σε ενισχυτές ισχύος, η επιλογή εμφανίζεται μεταξύ της χρήσης τοπικής ανάδρασης (local feedback) ή ολικής ανάδρασης (global feedback) (**Σχήμα 8.19**). Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει ο πλεονέκτημα της πλέον βέλτιστης λειτουργίας του βρόγχου στα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης βαθμίδας και της επίτευξης ευσταθέστερης υλοποίησης, με το μειονέκτημα της πολυπλοκότητας της λύσης αυτής. Στην περίπτωση της χρήσης ολικής ανάδρασης, υλοποιείται μία λιγότερο αποδωτική αλλά πολύ πιο απλή λύση.



Σχήμα 8.19: Τυπική διάταξη σταδίου ενίσχυσης με χρήση (α) ολικής και (β) τοπικής ανάδρασης

Μία επιπλέον πρακτική σχεδιαστική επιλογή στην χρήση της ανάδρασης σχετίζεται και με το ποσό της ανάδρασης που θα χρησιμοποιηθεί. Η επιλογή της χρήσης ισχυρής αρνητικής ανάδρασης, πέρα από την θεωρητική πιθανότητα δημιουργίας αστάθειας, συχνά καταλήγει και στην εμφάνιση περισσότερο εντόνου και ασυνεχούς ψαλιδισμού (σε περιπτώσεις αδυναμίας του σταδίου τροφοδοσίας που έχουν ήδη περιγραφεί) που ηχητικά προσδίδει στον ενισχυτή ένα τραχύ χαρακτήρα, σε ανάλογες συνθήκες λειτουργίας. Έχει όμως το πλεονέκτημα της καλύτερα ελεγχόμενης λειτουργίας σε πολλές άλλες συνθήκες λειτουργίας (για διαφορετικά σήματα και φορτία) που ηχητικά μεταφράζεται σε διαυγέστερο ήχο σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας. Σε αντίθεση, η χρήση ασθενούς αρνητικής ανάδρασης, περιορίζει την δυνατότητα ελέγχου του φορτίου ή και των μή-γραμμικών παραμορφώσεων με αποτέλεσμα την λιγότερο διαυγή ηχητική απόδοση, με το πλεονέκτημα της ομαλότερης λειτουργίας σε συνθήκες κοντά στο όριο ψαλιδισμού. Τέλος, στους περισσότερους ενισχυτές ισχύος υλοποιείται και στάδιο (κύκλωμα) προστασίας από βραχυκύκλωμα στην έξοδο, το οποίο ανιχνεύει τυχόν υπερβολικές απαιτήσεις σε ρεύμα στο στάδιο εξόδου και στην περίπτωση αυτή διακόπτει την λειτουργία του ενισχυτή.

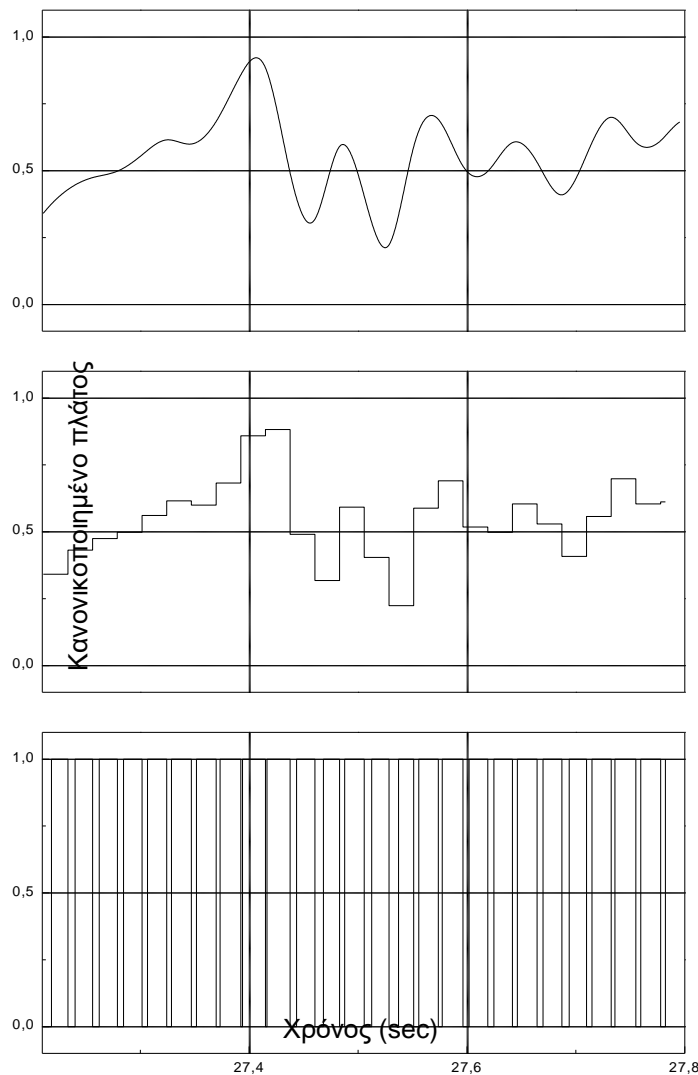
8.4 Ψηφιακοί ενισχυτές

Τα τελευταία χρόνια, αυξάνονται οι απαιτήσεις για την υλοποίηση ψηφιακών ενισχυτών ισχύος (Τάξης D), για τους παρακάτω λόγους: (α) ύπαρξη των ηχητικών σημάτων της πηγής σε ψηφιακή μορφή (π.χ. αποθηκευμένα σε δίσκο CD), (β) ανάγκη για σύμκριση του μεγέθους και αύξηση της απόδοσης και μείωση της κατανάλωσης των ηχητικών συσκευών (ειδικά των φορητών), (γ) μετάδοση και διανομή του ηχητικού σήματος σε ψηφιακή μορφή, μέχρι το τελικό στάδιο αναπαραγωγής.

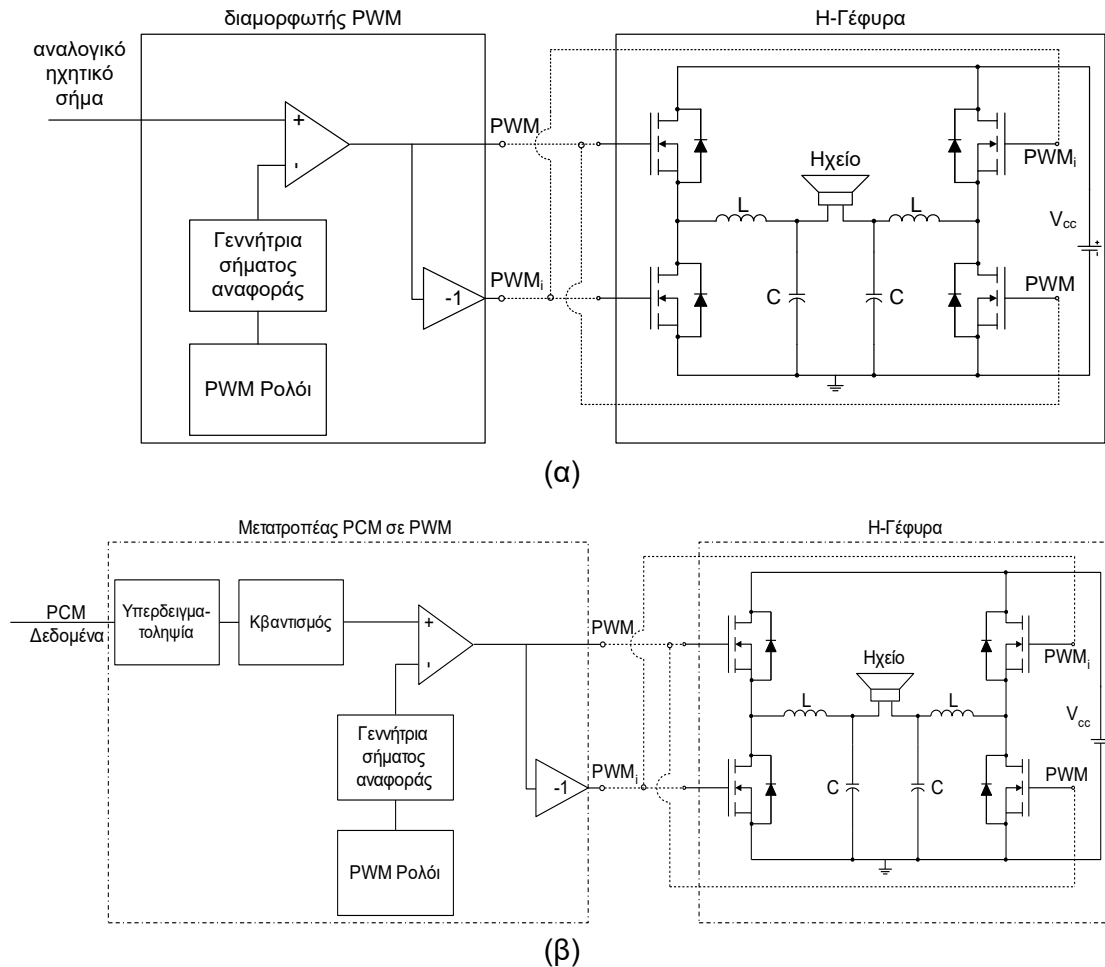
Οι ψηφιακοί ενισχυτές πετυχαίνουν τους παραπάνω στόχους και θεωρητικά επιτρέπουν την παραγωγή υψηλής ισχύος με ικανοποιητική απόκριση και με εξαιρετικά μικρό μέγεθος, που προκύπτει από την θψηλή τους απόδοση, που θεωρητικά είναι της τάξης του 90%.

Οι ψηφιακοί ενισχυτές λειτουργούν έχοντας σαν είσοδο αναλογικά ή ψηφιακά ηχητικά σήματα τα οποία διαμορφώνονται σε παλμούς PWM (**Σχήμα 8.20**).. Στην περίπτωση ενισχυτή Τάξης D που χρησιμοποιεί αναλογικό ηχητικό σήμα (**Σχήμα 8.21α**), το σήμα διαμορφώνεται σε σειρά παλμών PWM με χρήση γεννήτριας υψίσυχνου πριονωτού σήματος αναφοράς. Για την περίπτωση του πλήρως ψηφιακού ενισχυτή Τάξης D, η είσοδος είναι ήδη ψηφιοποιημένο ηχητικό σήμα, που στην συνήθη τους τυποποίηση είναι μορφής 16-bit PCM (π.χ. από δίσκους CD), **Σχήμα 8.21β**). Σε κάθε περίπτωση, οι παλμοί αυτοί μπορούν να ενισχυθούν κατ' ευθείαν από κατάλληλα διακοπτικά στοιχεία (τρανζίστορ MOSFET) και να μετατραπούν σε αναλογικό σήμα (στο ηχείο), χωρίς την ανάγκη παρεμβολής πολύπλοκου μετατροπέα D/A (Digital to Analogue Converter). Στην πράξη, η μετατροπή αυτή πετυχαίνεται με ένα απλό (χαμηλοδιαβατό) φίλτρο εξομάλυνσης.

Τα προβλήματα στις υλοποιήσεις αυτές δημιουργούνται για τους εξής λόγους: (α) η μετατροπή του σήματος σε PWM δημιουργεί ισχυρές μη-γραμμικές παραμορφώσεις που μπορεί να ελαττωθούν μόνο αν αυξηθεί η ταχύτητα λειτουργίας του ρολογιού που παράγει την παλμοσειρά ή και η ροή (δειγματοληψία) των αρχικών δεδομένων με χρήση της μεθόδου Υπερδειγματοληψίας (O/S, Oversampling), (β) τα ενισχυτικά διακοπτικά στοιχεία MOSFET δεν είναι δυνατό να λειτουργήσουν αποδοτικά ή και χωρίς παραμορφώσεις σε υψηλές τιμές ρολογιού. Προφανώς, οι δύο παραπάνω συνθήκες είναι αντικρουόμενες και στην πράξη το PCM σήμα εισόδου συχνότητας δειγματοληψίας 44100kHz θα πρέπει να υπερδειγματιστεί σε συχνότητα της τάξης των 2-3 MHz πριν την μετατροπή σε σήμα PWM, συχνότητας 5-6 GHz, έτσι ώστε να διατηρεί την αρχική ηχητική του ποιότητα. (**Σχήμα 8.21**).



Σχήμα 8.20: Παράδειγμα κωδικοποίησης δεδομένων σε ψηφιακό ενισχυτή: (α) αρχική αναλογική κυματομορφή (β) ψηφιακό σήμα εισόδου (γ) PWM ακολουθία παλμών



Σχήμα 8.21: Τυπική διάταξη ψηφιακού ενισχυτή Τάξης D (α) με βάση αναλογικό ηχητικό σήμα εισόδου (β) με βάση ψηφιακό ηχητικό σήμα εισόδου

8.5 Χαρακτηριστικά λειτουργίας ενισχυτών ισχύος

8.5.1 Ηλεκτρική Ισχύς

Η παράμετρος αυτή ορίζεται από τις δεδομένες ανάγκες της κάθε εφαρμογής και σχετίζεται με τις ακουστικές παραμέτρους λειτουργίας της Η/Α εγκατάστασης. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς W_{HL} σε Watt ενός ενισχυτή ισχύος και για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, εξαρτάται από:

- (α) Την απόσταση d_l (δες **Σχήματα 8.3** και **8.4**), δηλαδή τη μεγαλύτερη απόσταση ακροατή - μεγαφώνου, η οποία καθορίζει την πτώση της στάθμης του ήχου από τη θέση του μεγαφώνου μέχρι τον ακροατή.
- (β) Την ευαισθησία του μεγαφώνου (ηχείου), που όπως συζητήθηκε ορίζεται σαν dB-SPL /1W/1m.
- (γ) Τη μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που είναι δυνατό να μετατραπεί σε ακουστική ισχύ από τον Η/Α μετατροπέα (μεγάφωνο) χωρίς παραμορφώσεις ή και καταστροφή του ή και για αποτροπή ασταθούς λειτουργίας της εγκατάστασης λόγω του φαινομένου της ακουστικής ανάδρασης.

Όπως συζητήθηκε, η ακριβής τιμή της στάθμης dB-SPL υπολογίζεται για τη θέση του πλέον απομακρυσμένου ακροατή, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήνυμα πρέπει να φθάσει στη θέση εκείνη με στάθμη 25 dB-SPL πάνω από την στάθμη θορύβου της θέσης αυτής.

Οι συνθήκες (α) και (β) συνδυάζονται στην σχέση που επιτρέπει τον υπολογισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος W_{HL} για επίτευξη μιας επιθυμητής στάθμης κατά την αναπαραγωγή του ήχου:

για ανοιχτό χώρο και προκύπτει η σχέση:

$$W_{HL} = 10^{\frac{L_p - SW + 20 \log(d_i)}{10}} \quad (\text{Watt}) \quad (8.5\alpha)$$

Συχνά δίνεται ένα επιπλέον περιθώριο 10 dB για την κάλυψη μεταβατικών φαινομένων στο σήμα, οπότε η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$W_{HL} = 10^{\frac{L_p + 10 - SW + 20 \log(d_i)}{10}} \quad (\text{Watt}) \quad (8.5\beta)$$

όπου L_p (dB-SPL) είναι η απαιτούμενη στάθμη ήχου στην απόσταση d_i σε (m) πέρα από την στάθμη που επιτυγχάνεται σε απόσταση ενός μέτρου. SW είναι η στάθμη ευαισθησίας του μεγαφώνου-ηχείου σε dB-SPL/1W/1m. Όμοια, για δεδομένη τιμή της ηλεκτρικής ισχύος του ενισχυτή η μέγιστη στάθμη αναπαραγωγής υπολογίζεται από την σχέση:

$$\max\{L_p\} = 10 \log_{10} \left(\frac{W_A}{10} \right) - 20 \log d_i + SW \quad (8.6)$$

όπου W_A (W) είναι η δεδομένη τιμή ηλεκτρικής ισχύος του ενισχυτή.

Για αναπαραγωγή του ήχου σε κλειστούς χώρους, η παραγόμενη ηχοστάθμη θα συμπεριλαμβάνει και το αντηχητικό πεδίο (δες Κεφάλαιο 6) και άρα, η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς από τον ενισχυτή, θα είναι:

$$W_{HL} = 10^{\frac{L_p - SW - 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi d_i^2} + \frac{4}{R}\right) + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi} + \frac{4}{R}\right)}{10}} \quad (\text{Watt}) \quad (8.7)$$

όπου L_p (dB-SPL) είναι η απαιτούμενη στάθμη ήχου στην απόσταση d_i σε (m) πέρα από την στάθμη που επιτυγχάνεται σε απόσταση ενός μέτρου, SW είναι η στάθμη ευαισθησίας του μεγαφώνου-ηχείου σε dB-SPL/1W/1m, Q η κατευθυντικότητα του μεγαφώνου-ηχείου και R η σταθερά δωματίου

Παράδειγμα

Δίδεται μεγάφωνο με $SW=99\text{dB-SPL}/1\text{W}/1\text{m}$. Να υπολογιστεί η τιμή της W_{HL} για να επιτευχθεί στάθμη ήχου 90 dB-SPL σε απόσταση $d_i=62\text{m}$.

Η μεταβολή(πτώση) της ηχοστάθμης σε dB-SPL για $d_i=62$ σε σχέση με το 1m, είναι: $\Delta\{L_p\}=20\log_{10}62 \approx 30\text{dB}$. Στην τιμή αυτή, προστίθεται η τιμή των 10dB για τη λειτουργία του συστήματος σε μεταβατικά σήματα, οπότε σε 1m θα πρέπει να

επιτυγχάνεται στάθμη $30+10+90=130\text{dB-SPL}$. Αφού το 1W παράγει με το δεδομένο σύστημα 99dB , στο 1m , στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να παράγεται ισχύς $130-99=31\text{dB}$ επιπλέον του 1W , άρα:

$$W_{\text{ΗΛ}} = 10^{31/10} = 1259 \text{ W} \quad (8.8)$$

Σημείωση: Το ίδιο αποτέλεσμα βρίσκεται με την κατευθείαν χρήση της εξίσωσης (8.5β). Το παραπάνω παράδειγμα κάνει προφανή την σημασία της τιμής της στάθμης ευαισθησίας $S.W.$ για την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος από τον ενισχυτή. Για το ίδιο παράδειγμα φαίνεται εύκολα ότι η πιθανότητα να υπάρξει ένα πρακτικό μεγάφωνο/ ηχείο που να ικανοποιεί την συνθήκη (γ) για την παραπάνω τιμή της $W_{\text{ΗΛ}}$ είναι πολύ μικρή. Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιούνται διατάξεις με αρκετά μεγάφωνα/ ηχεία. Παρ' όλα αυτά, αν η στάθμη ευαισθησίας του μεγαφώνου ήταν $SW=113\text{dB-SPL}/1\text{m}/1\text{W}$, τότε $W_{\text{ΗΛ}}=50\text{W}$ που εύκολα καλύπτει την συνθήκη (γ) και προφανώς απαιτεί έναν πολύ μικρότερο ενισχυτή.

Στην πράξη, συχνά οι προδιαγραφές της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει ένας ενισχυτής μπορεί να οριστούν και με περιγραφικούς όρους, όπως:

- **ισχύς συνεχούς σήματος (continuous power)**, όπου δίνεται η συνεχής ισχύς του ενισχυτή για ημιτονοειδές σήμα ή σήμα λευκού θορύβου με την μέγιστη μέση δυνατή τιμή εισόδου. Η περίπτωση αυτή περιγράφει την μέση τιμή ισχύος του ενισχυτή για μεγάλη χρονική διάρκεια και είναι η πλέον δυσμενής συνθήκη μέτρησης ισχύος που επιφέρει και την μεγαλύτερη θερμική φόρτιση του. Η προδιαγραφή αυτή μπορεί και να οριστεί ακριβέστερα αν μετρηθεί η rms ισχύς του ενισχυτή για συνεχές σήμα.
- **ισχύς μέγιστου σήματος (peak power)**, όπου δίνεται η στιγμιαία μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ισχύος, για την μέγιστη τιμή σήματος εισόδου διάρκειας μικρότερης του $1/10\text{s}$. Η προδιαγραφή αυτή είναι χρήσιμη μόνο σε σχέση με την εκτίμηση της ικανότητας απολαβής της ισχύος από το συγκεκριμένο μεγάφωνο/ηχείο.
- **ισχύς σήματος “μουσικής” ή “προγράμματος” (music / program power)**, όπου δίνεται μία τυπική ισχύς του ενισχυτή για ένα (ακαθόριστο) σήμα εισόδου με διακύμανση των τιμών του πλάτους του ανάλογη με αυτήν ενός μουσικού σήματος. Η στατιστική αυτή κατανομή των ελαχίστων/μέγιστων πρέπει να παρουσιάζεται για διάρκεια της τάξης του λεπτού.

8.5.2 Αρμονική παραμόρφωση

Φαινόμενα παραμόρφωσης εμφανίζονται σε περιπτώσεις λειτουργίας του ενισχυτή που έχουν ήδη συζητηθεί. Στην πράξη, όταν ο ενισχυτής λειτουργεί σε συνθήκες ισχύος κοντά στη μέγιστη απόδοσή του (δηλαδή για τις μέγιστες τιμές ή και ισχυρά μεταβατικά του σήματος εισόδου, θεωρώντας ένα σταθερό κέρδος λειτουργίας), ώστε να επιτευχθεί η ακουστική κάλυψη μεγάλων ανοιχτών χώρων, τότε εμφανίζονται

τέτοιες παραμορφώσεις που προέρχονται από τον ψαλιδισμό (clipping) των κορυφών του σήματος. Για αποδεκτή αναπαραγωγή, η τιμή της αρμονικής παραμόρφωσης (THD) θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η στάθμη των παραμορφώσεων να είναι τουλάχιστο 15dB κάτω των 25dB που δίδονται σαν ελάχιστη τιμή SNR για επικοινωνία (δηλαδή συνολικά -35dB σε σχέση με το σήμα). Αυτό το οριακά αποδεκτό αποτέλεσμα, αντιστοιχεί σε 1,78% αρμονική παραμόρφωση. Προφανώς σε χώρους με χαμηλή στάθμη περιβαλλοντολογικού θορύβου η αρμονική παραμόρφωση θα πρέπει να είναι πολύ χαμηλότερη.

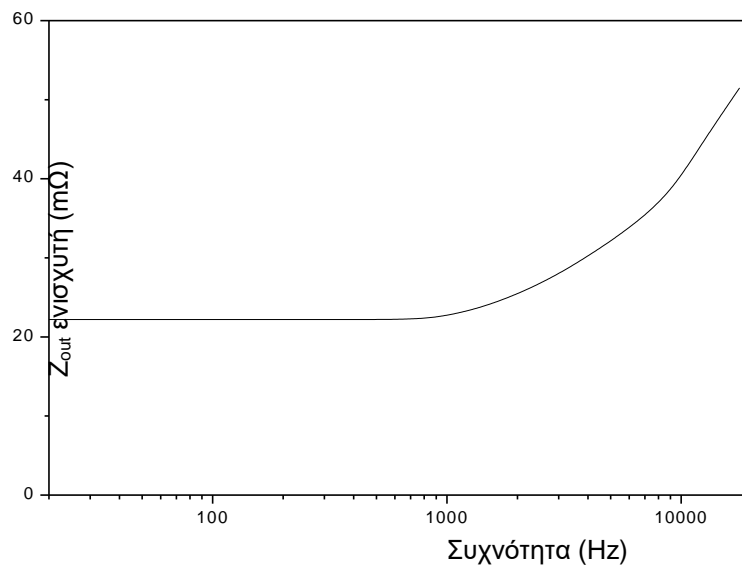
Ένα επιπλέον πρόβλημα στην περίπτωση που ένας ενισχυτής λειτουργεί σε συνθήκες που παράγουν υψηλή παραμόρφωση (για υψηλές τιμές σήματος εισόδου), είναι το γεγονός ότι παρ'όλο η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου του θα περιορίζεται από τις δυνατότητες του σταδίου τροφοδοσίας και δεν θα αυξάνει για τις υψηλότερες τιμές του σήματος εισόδου (όπως έχει ήδη περιγραφεί), το ψαλιδισμένο σήμα εξόδου που θα παράγεται (πέρα από την ηχητική παραμόρφωση του), θα εμφανίζει αυξημένη συνολική ισχύ που θα προέρχεται από τις παραγόμενες από τον ψαλιδισμό υψίσυχνες φασματικές συνιστώσες. Η ισχύς αυτή που θα μεταφερθεί στο ηχείο/μεγάφωνο (κυρίως στην μονάδα υψηλών συχνοτήτων), θα προκαλέσει επιπλέον παραμορφώσεις σε αυτό, αυξημένη θερμική φόρτιση και πιθανή καταστροφή.

Τα σύγχρονα επαγγελματικά συστήματα ενίσχυσης εμφανίζουν τιμές THD της τάξης των 0,01 έως 0,1% στη μέγιστη απόδοσή τους. Στην πράξη αυτό ισχύει για συνεχές ημιτονικό σήμα εισόδου και για την μέγιστη ισχύ λειτουργίας του ενισχυτή (που περιγράφεται στις προδιαγραφές) σε φορτίο που επίσης περιγράφεται (π.χ. THD=0,05%, από 20Hz-20kHz, για 200W/κανάλι σε 8 Ω).

8.5.3 Χαρακτηριστικά εισόδου/εξόδου

Οι ενισχυτές ισχύος εμφανίζονται είτε σαν μονοφωνικοί ή στερεοφωνικοί με ισχύ που ανάλογα με την εφαρμογή καλύπτει συνήθως την περιοχή 20-1000W ανά κανάλι. Τυπικές τιμές κέρδους λειτουργίας G (dB), είναι στην περιοχή των 24-60dB και rms τιμές τάσης εξόδου (για μέγιστη ημιτονοειδή είσοδο) είναι της τάξης των 10-100V. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} είναι της τάξης των 5-20kΩ, για επαγγελματικούς ενισχυτές, 10-200kΩ για οικιακούς ενισχυτές, έτσι ώστε να παρουσιάζεται προσαρμογή στην σύζευξή τους με συστήματα προενισχυτών/μικτών. Αφού οι ενισχυτές αυτοί τροφοδοτούν συστήματα μεγαφώνων, η μέγιστη ισχύς εξόδου ορίζεται από τον κατασκευαστή να εμφανίζεται για το συγκεκριμένο φορτίο (σύνθετη αντίσταση) που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα και που συνήθως είναι 8, 4 ή και 2Ω. Έτσι, για παράδειγμα ο κατασκευαστής ορίζει ονομαστική ισχύ 400W (ανά κανάλι) για φορτίο 4 Ω και παράλληλα καθορίζει ότι ο ενισχυτής θα μπορεί και να λειτουργήσει με ελάχιστο φορτίο 2 Ω. Για φορτία (ή συνδιασμούς φορτίων) με αντίσταση 2Ω (που πιθανώς να παρουσιάζουν για μερικές συχνότητες ακόμη μικρότερη αντίσταση), θα εμφανίζονται τα γνωστά προβλήματα παραμόρφωσης και υπερφόρτισης που έχουν ήδη συζητηθεί. Για φορτίο 8Ω, η ισχύς θα είναι περίπου η μισή, δηλ. 200W, κάτι που συχνά ορίζεται επίσης από τον κατασκευαστή.

Για την βέλτιστη μεταφοράς της τάσης στο φορτίο αυτό, και όπως έχει ήδη συζητηθεί, η σύνθετη αντίσταση εξόδου Z_{out} των ενισχυτών ισχύος είναι συνήθως πολύ χαμηλή, της τάξης μερικών mΩ (Σχήμα 8.22). Έτσι όταν οι ενισχυτές συνδέονται με το φορτίο εξόδου που εμφανίζει υψηλότερη αντίσταση (παρόλο τον μιγαδικό και συχνотικά μεταβαλλόμενο χαρακτήρα που έχει ήδη περιγραφεί), εμφανίζεται στην έξοδο Λόγος Απόσβεσης (Damping Factor) που ισούται με το λόγο των σύνθετων αντιστάσεων εξόδου του ενισχυτή και του φορτίου, που συχνά είναι της τάξης των 500. Μία υψηλή τιμή του λόγου απόσβεσης είναι επιθυμητή για τον αποτελεσματικό έλεγχο της κίνησης του διαφράγματος του μεγαφώνου, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 8.22: Τυπική μορφή αντίστασης εξόδου ενισχυτή ως συνάρτηση της συχνότητας

Μία άλλη σημαντική παράμετρος λειτουργίας των ενισχυτών ισχύος είναι ο Ρυθμός Ανύψωσης (Slew Rate), ο οποίος έχει ήδη οριστεί σε προηγούμενη παράγραφο και περιγράφει την ικανότητά του στο να ανταποκριθεί σε σήμα εισόδου με βηματική μορφή, μετρούμενος σε V/ms. Τυπικά, ενισχυτές ισχύος μέχρι και 100 W_{rms}/κνάλι, αναμένεται να έχουν τιμές Slew Rate της τάξης του 10 V/ms, ενώ ενισχυτές υψηλής ισχύος, αναμένεται να έχουν τιμές της τάξης των 30V/ms (κυρίως αφού θα πρέπει να ανταποκριθούν σε μεγαλύτερο εύρος τιμών τάσης). Οι υψηλότερες τιμές Slew Rate είναι γενικά επιθυμητές, αλλά αν αυτές είναι εξαιρετικά υψηλές δημιουργούν προβλήματα παραγωγής φασματικών συνιστωσών εκτός του ακουστού φάσματος (RF) που καταλήγουν στην απώλεια ισχύος και την φόρτιση των μεγαφώνων υψηλών συχνοτήτων.

Τέλος, η απόκριση συχνότητας των συγχρόνων ενισχυτών ισχύος, δεν παρουσιάζει συνήθως διακυμάνσεις και είναι επίπεδη σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων που συχνά υπερβαίνουν την ακουστική περιοχή (20Hz-20kHz). Σημαντικότερη παράμετρος είναι η δυνατότητα του ενισχυτή να εμφανίζει το ίδιο εύρος απόκρισης και σε υψηλές τιμές ισχύος, όπου σε παλαιότερες τοπολογίες που βασιζόταν στην χρήση

μετασχηματιστών εξόδου, η απόκριση περιοριζόταν κάτω από αυτές τις συνθήκες λειτουργίας.

8.6 Θέματα συνδεσμολογίας σε ηχητικές εγκαταστάσεις

8.6.1 Προσαρμογή σύνθετης αντίστασης μεταξύ των υποσυστημάτων

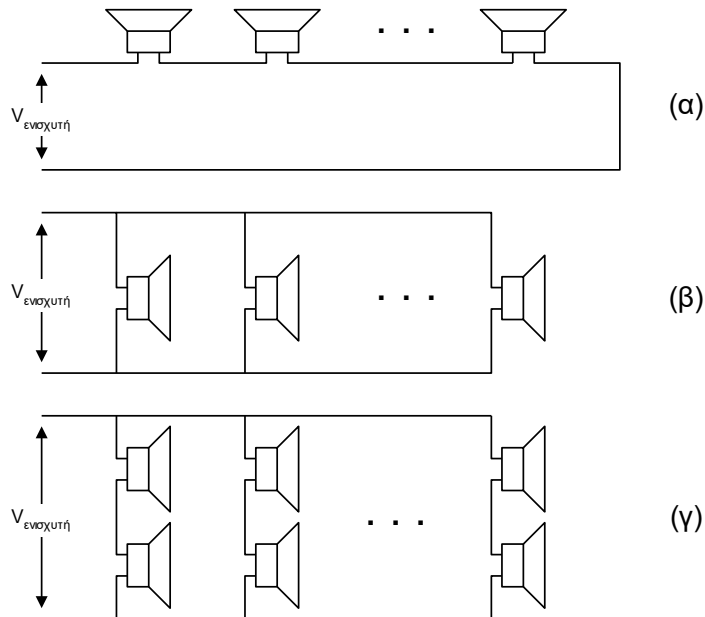
Σε ηχητικές εγκαταστάσεις, οι διαφορετικοί τύποι συνδέσεων αφορούν τα υποσυστήματα που λειτουργούν σε συγκεκριμένες στάθμες σήματος (δηλ. σήματα *μικροφώνου, γραμμής, ισχύος*). Επιπλέον, σε όλη την διάταξη και όπως έχει ήδη συζητηθεί, μόνο τα μεγάφωνα και τα ηχεία έχουν χαρακτηριστικά σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές φάσης και έτσι η μιγαδική τιμή της εμπέδισής τους (z) θα πρέπει να λαμβάνεται υπ'όψη όπως επίσης και η μορφή της συνάρτησης αυτής σε σχέση με την συχνότητα, ενώ σε αντίθεση, οι συνδέσεις των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων και οι παθητικοί καταναλωτές ισχύος, εμφανίζουν μικρές μεταβολές φάσης και έτσι η ωμική τιμή της σύνθετης αντίστασής τους είναι αρκετή για να καθορίσει τις συνθήκες σύζευξης. Επιπλέον, όπως συζητήθηκε και σε προηγούμενα Κεφάλαια, η διαφορά συνθηκών λειτουργίας κύκλωμα των υποσυστημάτων για ανοιχτό και κλειστό κύκλωμα είναι της τάξης των -6 dB. Δηλαδή, όταν η αντίσταση του κλειστού κυκλώματος είναι ίση με την αντίσταση της πηγής, τότε εμφανίζεται πτώση τάσης. Όπως έχει ήδη συζητηθεί, συνήθως ένα μικρόφωνο με αντίσταση της τάξης των 200Ω , θα πρέπει να συνδέεται με έναν μίκτη/προενισχυτή με υψηλή αντίσταση εισόδου (π.χ. $10 \text{ k}\Omega$), επιτρέποντας έτσι την εκμετάλλευση του κέρδους των 6 dB, το οποίο θα χανόταν σε περίπτωση ταύτισης στις δύο τιμές αντίστασης. Το αντίστροφο συμβαίνει στο άλλο άκρο ενός Η/Α συστήματος όπου η εσωτερική αντίσταση του ενισχυτή θα πρέπει να είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίσταση που παρουσιάζουν τα μεγάφωνα. Προφανώς, η ισχύς που απαιτείται από τον ενισχυτή, για μία συγκεκριμένη τιμή τάσης, είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης του ηχείου. Είναι επίσης προφανές ότι η αντίσταση ενός ηχείου θα πρέπει να είναι πάντοτε (και για όλες τις συχνότητες) μεγαλύτερη του μηδενός, αλλιώς η έξοδος του ενισχυτή θα βραχυκυκλώσει και η απαίτηση σε ρεύμα θα τείνει σε άπειρη τιμή με πρακτικό αποτέλεσμα την αδυναμία του τροφοδοτικού του να παράγει το ρεύμα αυτό με τα επακόλουθα που ήδη συζητήθηκαν.

Στην πράξη, ονομαστικές τιμές αντίστασης του μεγαφώνου/ηχείου μικρότερες των 4Ω δημιουργούν προβλήματα στους ενισχυτές, αφού για ορισμένες συχνότητες η αντίσταση αυτή μπορεί να είναι και χαμηλότερη των 2Ω . Τέτοια φορτία δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε επαγγελματικές εγκαταστάσεις, αφού οι αυξημένες απαιτήσεις σε ρεύμα μακροπρόθεσμα θα καταπονήσουν θερμικά τον ενισχυτή και η αντίσταση των συχνά μεγάλων σε μήκος καλωδίων (από τον ενισχυτή στα ηχεία, που θα αναλυθεί παρακάτω) θα εμφανιστεί να αποτελεί σημαντικό τμήμα του φορτίου και της απώλειας ισχύος του ενισχυτή. Σε αντίθεση με αυτές τις περιπτώσεις, η διασύνδεση ηλεκτρονικών υποσυστημάτων (π.χ. προενισχυτής με ενισχυτή, ηλεκτρικές πηγές με προενισχυτή, κλπ), δεν εμφανίζει ιδιαίτερες απαιτήσεις

προσαρμογής, με τιμές αντιστάσεων που στην πράξη βρίσκονται σε συμβατά μεταξύ τους και λογικά όρια.

8.6.2 Τρόποι σύνδεσης ηχείων

Τα μεγάφωνα/ηχεία που έχουν επιλεγεί σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν ήδη συζητηθεί, θα πρέπει να συνδεθούν στον ενισχυτή με τέτοιο τρόπο ώστε η αντίσταση που θα εμφανίζουν να έχει τιμές τις οποίες δέχεται στην συγκεκριμένη έξοδό του ο ενισχυτής (συνήθως 4 , 8, ή και 16 Ω). Οι δύο βασικοί τρόποι σύνδεσης ηχείων είναι η σειριακή και η παράλληλη σύνδεσή τους, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 8.23**.



Σχήμα 8.23: Τρόποι σύνδεσης ηχείων (α) σειριακή (β) παράλληλη (γ) συνδυασμός σειριακής και παράλληλης

(α) Σειριακή σύνδεση ηχείων

Στην περίπτωση της σειριακής σύνδεσης (**Σχήμα 8.23α**), η συνολική (σύνθετη) αντίσταση που βλέπει ο ενισχυτής, είναι το άθροισμα των τιμών των επιμέρους αντιστάσεων, δηλαδή

$$Z_{\text{tot}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \quad (8.9)$$

Αν $z_1 = z_2 = z_n$ τότε $z_{\text{tot}} = n \cdot z_n$. Από την σχέση αυτή φαίνεται ότι το πλεονέκτημα μιας τέτοιας σύνδεσης είναι ότι μπορεί να αυξήσει την συνολική αντίσταση στην περίπτωση χαμηλών αρχικών τιμών για το κάθε ηχείο. Επιπλέον, μία τέτοια σύνδεση είναι απλή στην υλοποίησή της. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η διασύνδεση διακόπτεται αν τυχόν ένα από τα ηχεία καταστραφεί, και ότι η συνολική απόκριση είναι κακή κυρίως λόγω αλληλοεπίδρασης των επιμέρους φορτίων και μειωμένης δυνατότητας ελέγχου της απόκρισης από τον ενισχυτή.

(β) Παράλληλη σύνδεση ηχείων

Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης (**Σχήμα 8.23β**), το αντίστροφο της συνολικής (σύνθετης) αντίστασης που βλέπει ο ενισχυτής, είναι το άθροισμα των αντιστρόφων τιμών των επιμέρους αντιστάσεων, δηλαδή

$$z_{tot} = 1 / [1/z_1 + 1/z_2 + \dots + 1/z_n] \quad (8.10)$$

Αν $z_1 = z_2 = z_n$ τότε $z_{tot} = z_n / n$. Το πλεονέκτημα μιάς τέτοιας σύνδεσης είναι ότι η απόκριση της συνολικής εγκατάστασης δεν υποβαθμίζεται και τυχόν καταστροφή ενός ηχείου δεν διακόπτει την διασύνδεση. Για τους λόγους αυτούς, η μορφή σύνδεσης αυτή είναι και η προτιμότερη για επαγγελματικές εγκαταστάσεις όπου απαιτήται σχετικά υψηλή πιστότητα (πχ. εγκαταστάσεις για συναυλίες, κέντρα, κλπ). Το μειονέκτημα είναι προφανώς ότι δεν είναι δυνατό να λειτουργήσει για πολύ μεγάλο αριθμό ηχείων, αφού η μείωση της συνολικής αντίστασης θα επιφέρει τα γνωστά προβλήματα στον ενισχυτή. Έτσι, για συστήματα μεγάλης κλίμακας, είναι απαραίτητη η χρήση πολλαπλών ενισχυτών ισχύος που ο καθένας καλύπτει μία ομάδα παράλληλα συνδεδεμένων ηχείων.

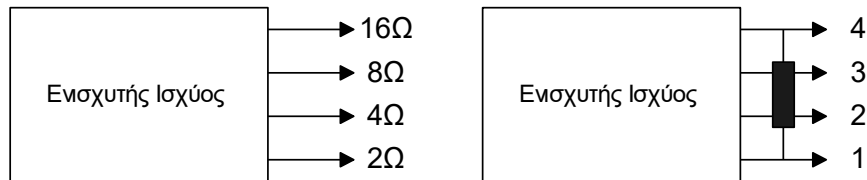
(γ) Συνδιασμός σειριακής και παράλληλης σύνδεσης

Σε μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις, που χρησιμοποιούν έναν ενισχυτή και επειδή είναι πιθανό ότι καμία από τις παραπάνω διατάξεις δεν θα πετυχαίνει την κατάλληλη τιμή συνολικής αντίστασης στην οποία λειτουργεί ο ενισχυτής, ειδικά λόγω των γνωστών απαιτήσεων χρήσης πολλαπλών ηχείων ή συστοιχιών συχνά σε κατανεμημένες θέσεις στον χώρο, είναι δυνατό να υλοποιηθεί ένας συνδιασμός των 2 παραπάνω μεθόδων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8.23γ**.

Στην περίπτωση αυτή η συνολική αντίσταση υπολογίζεται από τις εξισώσεις (8.9, 8.10). Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι η πολυπλοκότητά της και η αυξημένη εξάρτηση από έναν και μόνο ενισχυτή, ενώ θα ήταν προτιμότερη η χρήση περισσότερων ενισχυτών με παράλληλη σύνδεση των ηχείων. Έτσι, η λύση αυτή εφαρμόζεται μόνο σε μερικές μόνιμες εγκαταστάσεις με μειωμένες απαιτήσεις απόδοσης.

(δ) Σύνδεση μέσω μετασχηματιστή

Σε ορισμένες περιπτώσεις εγκαταστάσεων χαμηλής πιστότητας (πχ. εγκατάστασης για ένα ξενοδοχείο), τα προβλήματα προσαρμογής των ηχείων που η συνολική τους αντίσταση δεν συμπίπτει με τις τιμές των 4 Ω, 8 Ω, ή 16 Ω που συνήθως ορίζονται στους ακροδέκτες του ενισχυτή, χρησιμοποιείται και μετασχηματιστής εξόδου, ή και συνδιασμοί στην σύνδεση στους ακροδέκτες του ενισχυτή (δες **Σχήμα 8.24**).



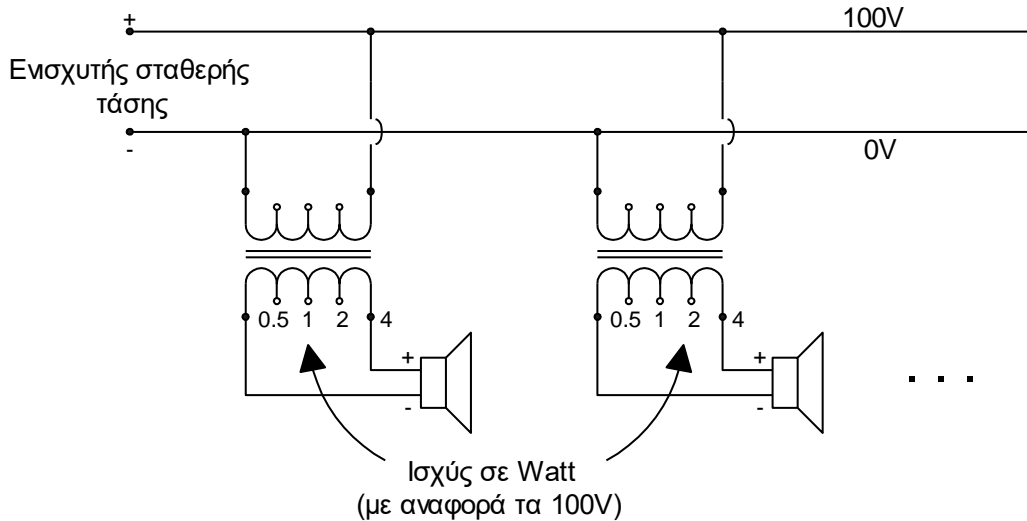
Σχήμα 8.24: Χρήση μετασχηματιστή για προσαρμογή συνολικής αντίστασης ηχείων στην έξοδο ενισχυτή

Αυτό συμβαίνει επειδή $|z| = \left(\sqrt{|z_L|} - \sqrt{|z_H|} \right)^2$, όπου $|z|$ είναι η μεταξύ δύο ακροδεκτών αντίσταση, $|z_L|$ είναι η χαμηλότερη τιμή αντίστασης ενός ακροδέκτη, $|z_H|$ η υψηλότερη τιμή της αντίστασης ενός άλλου ακροδέκτη, και έτσι ο τρόπος του **Σχήματος 8.24** μπορεί να επιτύχει πολλές πιθανές τιμές συνολικής αντίστασης που απαιτούνται από την διάταξη των ηχείων. Με ανάλογο τρόπο, η χρήση μετασχηματιστή εξόδου, επιτρέπει την ευέλικτη επιλογή της επιθυμητής τιμής της αντίστασης ανάλογα με την ρύθμιση των στροφών του πηνίου, αλλά με μείωση της ποιότητας της απόκρισης του συστήματος. Ειδικά συστήματα τέτοιων μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις που απαιτούν τη χρήση πολλών κατανεμημένων ηχείων (π.χ. σε αεροδρόμια, ξενοδοχεία, κλπ). Σε τέτοιες περιπτώσεις η συνολική ισχύς του ενισχυτή σε dBm ισούται με την ισχύ που κατανέμεται στα ηχεία (σε dBm) + την ισχύ που αποσβένεται στους μετασχηματιστές (σε dBm).

(ε) Σύνδεση «σταθερής τάσης»

Σε ανάλογες εφαρμογές με την προηγούμενη περίπτωση, η πλέον διαδεδομένη μορφή σύνδεσης ενός μεγάλου αριθμού ηχείων σε έναν ενισχυτή, είναι η λεγόμενη σύνδεση «σταθερής τάσης» (Constant-Voltage, CV). Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιούνται ενισχυτές ισχύος με κατάλληλη (CV) έξοδο, που παράγουν σταθερή (μέγιστη) τάση εξόδου για ένα μεγάλο φάσμα τιμών φορτίου (π.χ. 25 V, 100 V για την Ευρώπη, ή και 70 V για την Αμερική). Στην έξοδο αυτή του ενισχυτή, συνδέεται μία γραμμή που καλύπτει όλη την διάταξη και στην οποία συνδέονται παράλληλα ηχεία μέσω μετασχηματιστών οι οποίοι και επιτρέπουν την ρύθμιση της τάσης που κατανέμεται στο κάθε ηχείο (**Σχήμα 8.25**). Στην πράξη, μία τέτοια εγκατάσταση θα λειτουργεί με ειδικά μεγάφωνα/ηχεία τα οποία και συμπεριλαμβάνουν τους μετασχηματιστές. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατή η κατά βούληση κατάργηση μερικών ηχείων και η ρύθμιση της στάθμης που παράγουν ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης θέσης που είναι τοποθετημένα. Επιπλέον, η λειτουργία της διάταξης με υψηλές τιμές τάσης, επιτρέπει την εμφάνιση χαμηλών τιμών ρεύματος (για συγκεκριμένη ισχύ) με αποτέλεσμα την μείωση των (ωμικών) απωλειών στα καλώδια και την δυνατότητα αύξησης του συνολικού μήκους τους. Τα μειονεκτήματα τέτοιων διατάξεων απορρέουν από την κατανομή της ισχύος σε πολλές μονάδες (κάτι που προφανώς μειώνει την δυνατότητα παραγωγής υψηλής στάθμης ήχου) και την περιορισμένη δυνατότητα απόκρισης των μετασχηματιστών σε χαμηλές συχνότητες (κάτι που περιορίζει την ποιότητα του παραγόμενου σήματος). Έτσι, οι διατάξεις αυτές είναι κατάλληλες για χρήση σε κατανεμημένα

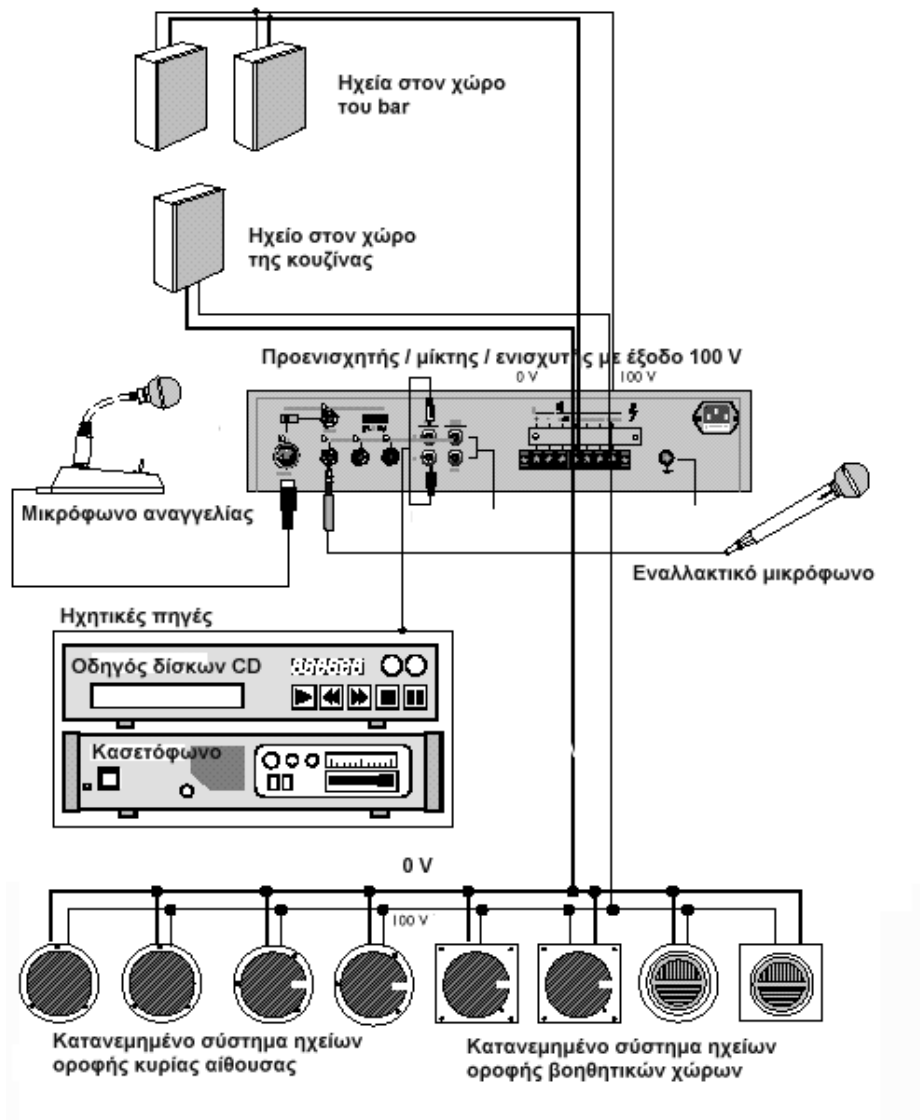
συστήματα που αναπαράγουν μουσική υποβάθρου ή και ομιλία (π.χ. για ξενοδοχεία, πλοία, πολυκαταστήματα, βοηθητικούς χώρους αθλητικών εγκαταστάσεων, αεροδρόμια, κλπ). Μία τυπική υλοποίηση εγκατάστασης με χρήση κατανεμημένου συστήματος δίνεται στο **Παράδειγμα**.



Σχήμα 8.25: Σύνδεση σταθερής τάσης

Παράδειγμα

Στο **Σχήμα 8.26** φαίνεται μία τυπική δομή και συνδεσμολογία μίας ηχητικής εγκατάστασης που βασίζεται στην χρήση κατανεμημένου συστήματος ηχείων και που λειτουργεί σε χώρο εστιατορίου / bar. Όπως φαίνεται, γίνεται χρήση προενισχυτή / μίκτη/ ενισχυτή με έξοδο «σταθερής τάσης» 100V, στην οποία και συνδέονται το κατανεμημένο σύστημα ηχείων. Όπως γίνεται συχνά σε αυτές τις περιπτώσεις, τα ηχεία διαχωρίζονται σε περιοχές (τις λεγόμενες «ζώνες») οι οποίες στην περίπτωση αυτή είναι οι ακόλουθες: (α) ζώνη κυρίας αίθουσας εστιατορείου όπου καλύπτεται με ηχεία οροφής, (β) ζώνη βοηθητικών χώρων (διαδρόμων, κλπ.) η οποία επίσης καλύπτεται από ηχεία οροφής, (γ) ζώνη του bar η οποία καλύπτεται από ηχεία τοίχου, και (δ) ζώνη κουζίνας που καλύπτεται από ένα ηχείο τοίχου. Η σχετική στάθμη του ήχου σε κάθε ζώνη μπορεί να ρυθμιστεί από τον μετασχηματιστή του κάθε ηχείου. Σαν πηγές χρησιμοποιείται οδηγός δίσκων CD, κασετόφωνο και μικρόφωνα αναγγελίας μηνυμάτων.

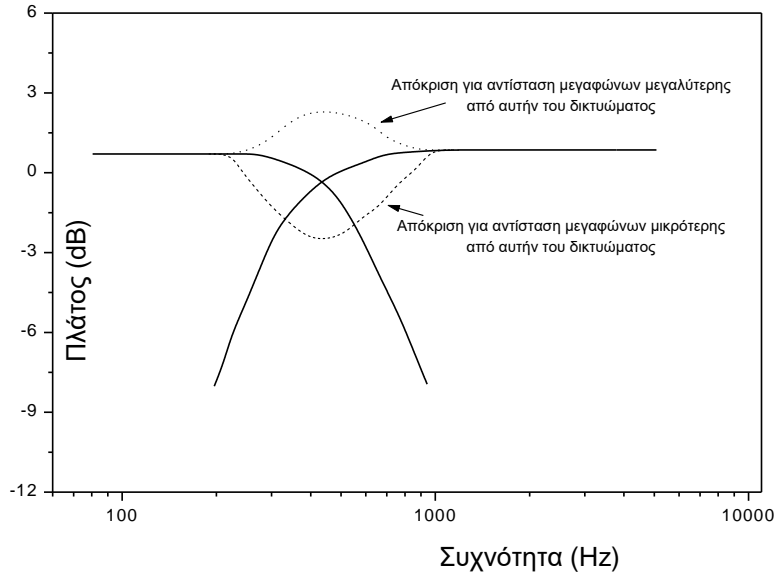


Σχήμα 8.26: Τυπική δομή και συνδεσμολογία ηχητικής εγκατάστασης με χρήση καταναμημένου συστήματος ηχείων και διασύνδεση “σταθερής τάσης”.

(στ) Σύνδεση σε διαχωρισμένες περιοχές συχνότητας (bi-amplification)

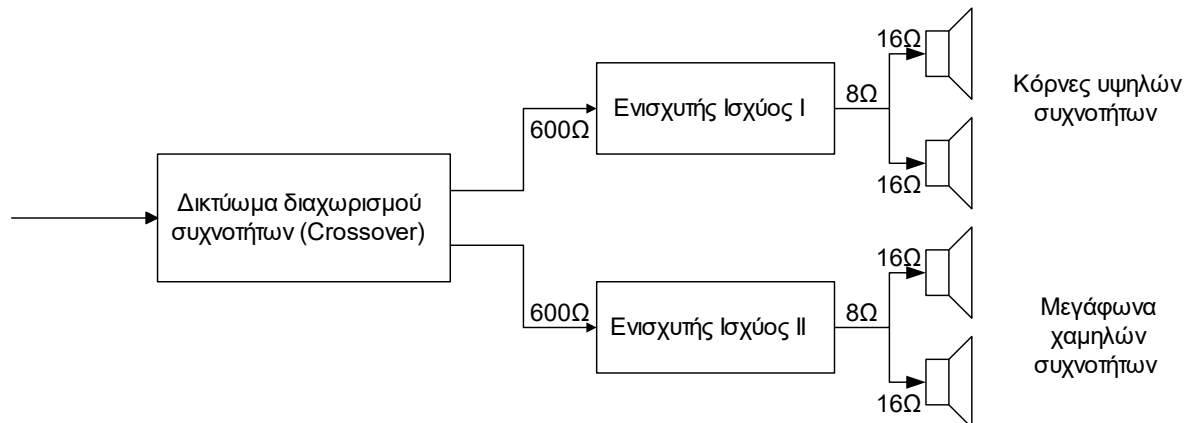
Σε πολλές περιπτώσεις εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας που απαιτείται να παράγουν υψηλές ηχοστάθμες, είναι προτιμότερος ο διαχωρισμός του σήματος σε περιοχές συχνότητων (με την χρήση παθητικών φίλτρων, cross-over) για την τροφοδοσία συστοιχιών μεγαφώνων που λειτουργούν στην αντίστοιχη περιοχή συχνότητων. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του διαχωριστή συχνότητων θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένη με τις αντιστάσεις των μεγαφώνων γιατί σε αντίθετη περίπτωση ενδέχεται να εμφανιστούν παραμορφώσεις στην απόκριση συχνότητας του συστήματος (**Σχήμα 8.27**). Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας, καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την παραμόρφωση, απόκριση και ευελιξία επιτυγχάνονται με τη χρήση πολλαπλών ενισχυτών (bi-amplification, tri-amplification, κλπ). Η μέθοδος αυτή είναι

και η ενδεικτική για την υλοποίηση εγκαταστάσεων υψηλής ισχύος ή/και υψηλής πιστότητας (ειδικά για συναυλίες).



Σχήμα 8.27: Προσαρμογή αντιστάσεων διαφορετικών βρόγχων

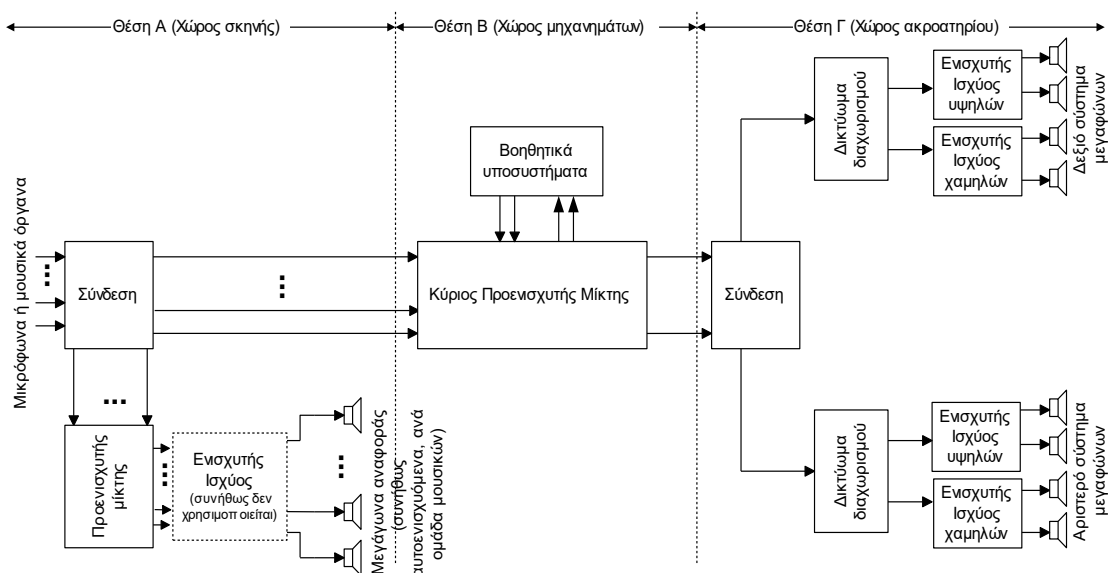
Στις περιπτώσεις αυτές, το σήμα στάθμης γραμμής (πχ. από την έξοδο του προενισχυτή/μίκτη) διέρχεται αρχικά από το κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων και κατόπιν, η κάθε περιοχή σήματος ενισχύεται ξεχωριστά από ανεξάρτητους ενισχυτές ισχύος οι οποίοι και τροφοδοτούν με την κατάλληλη ισχύ τις διάφορες διατάξεις μεγαφώνων (**Σχήμα 8.28**). Το σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης αυτής, είναι ότι η ισχύς που κατανέμεται σε κάθε περιοχή συχνότητας μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα και σύμφωνα με την ευαισθησία, συνολική αντίσταση και κατευθυντικότητα της αντίστοιχης διάταξης μεγαφώνων/ηχείων και του προβλεπόμενου ρόλου της στην ηχητική κάλυψη της συγκεκριμένης εγκατάστασης. Στην πράξη, σημαντικά οικονομικά ωφέλη απορρέουν από μία τέτοια προσέγγιση, αφού το κυρίως μεγάλο τμήμα της ισχύος απαιτείται για την τροφοδοσία των ηχείων χαμηλών συχνοτήτων, ενώ μικρότερης ισχύος ενισχυτές απαιτούνται για τις μονάδες υψηλών συχνοτήτων που γενικά εμφανίζουν και μεγαλύτερη ευαισθησία, ειδικά μάλιστα σε περιπτώσεις χρήσης μονάδων τύπου κόρνας (δες παρακάτω **Παράδειγμα**).



Σχήμα 8.28: Τυπική διάταξη για διασύνδεση σε διαχωρισμένες περιοχές συχνοτήτων

Παράδειγμα

Μία τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται για ηχητική κάλυψη εφαρμογής μεγάλης κλίμακας, με υψηλή πιστότητα και σε υψηλές ηχοστάθμες (π.χ. για συναυλίες ροκ μουσικής σε ανοιχτούς χώρους με περισσότερους από 10000 ακροατές), δίνεται στο **Σχήμα 8.29**. Η θέση Α αντιστοιχεί με υποσύστημα που είναι τοποθετημένο στο χώρο της σκηνής και η θέση Β αντιστοιχεί στη θέση του μηχανικού ήχου (συνήθως στο μέσο του χώρου του ακροατηρίου), ενώ η θέση Γ αντιστοιχεί στη θέση που τοποθετούνται τα μεγάφωνα που καλύπτουν το ακροατήριο. Όταν η διάταξη του ακροατηρίου καλύπτει μεγάλη έκταση, και σύμφωνα με αυτά που ήδη συζητήθηκαν, είναι πιθανό να απαιτηθεί και η χρήση επιπλέον συστοιχιών ηχείων (τροφοδοτημένων με ανάλογο τρόπο) που βέβαια θα λειτουργούν με την κατάλληλη σχετική καθυστέρηση ως προς το κύριο σύστημα ηχείων.



Σχήμα 8.29: Τυπική διάταξη για υλοποίηση εγκατάστασης για συναυλία σε ανοιχτό χώρο

Σε ένα τυπικό παράδειγμα υλοποίησης της παραπάνω εγκατάστασης, τοποθετήθηκαν 3 κύριες διατάξεις μεγαφώνων/ηχείων και 1 διάταξη ηχείων αναφοράς (stage monitors), με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- (1) Μία εμπρόσθια κύρια διάταξη ηχείων (αριστερά και δεξιά της σκηνής) που χρησιμοποιούσε 2 σειρές από 5 ηχεία για τις χαμηλές συχνότητες και κόννες υψηλής συχνότητας και που λειτουργούσε σαν δέσμη υψηλής κατευθυντικότητας (με 30° κάθετη και 100° οριζόντια γωνία κάλυψης). Επιπλέον, στην ίδια θέση χρησιμοποιήθηκαν και 4 κύρια ηχεία που επέτρεψαν κάλυψη χαμηλής κατευθυντικότητας για τις κοντινές θέσεις του ακροατηρίου.
- (2) Μία πλευρική διάταξη (δεξιά και αριστερά) που χρησιμοποιούσε συστοιχία χαμηλής κατευθυντικότητας με 4 ηχεία «μεσαίων/υψηλών» και 4 ηχεία χαμηλών συχνοτήτων.

- (3) Μία παρόμοια διάταξη, χαμηλής κατευθυντικότητας που τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος του χώρου του ακροατηρίου.
- (4) Ένα σύστημα αναφοράς σκηνής (stage monitors) που χρησιμοποιούσε διάταξη 4 ηχείων τοποθετημένων σε κατάλληλα σημεία στη σκηνή, κοντά στον κάθε μουσικό.

Η κάθε μια από τις παραπάνω διατάξεις χρησιμοποιούσε ενισχυτές ισχύος που οδηγούσαν τα ηχεία στην αντίστοιχη περιοχή συχνότητας. Έτσι για παράδειγμα, τα ηχεία μεσαίων/υψηλών συχνοτήτων οδηγήθηκαν από 2 ενισχυτές των 250 W σε 8 Ω μετά από κατάλληλο διαχωρισμό συχνοτήτων, ενώ παρόμοια συστήματα χρησιμοποιήθηκαν και για τις υπόλοιπες διατάξεις ηχείων. Προφανώς, η πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος οδηγεί σε ανομοιογενή συμπεριφορά της απόκρισης συχνότητας του συνολικού συστήματος και έτσι είναι απαραίτητη η χρήση ισοστάθμισης όπως έχει ήδη συζητηθεί.

(η) Χαρακτηριστικά καλωδίων

Σε όλες τις περιπτώσεις εγκαταστάσεων, η διασύνδεση του ενισχυτή ισχύος και των μεγαφώνων / ηχείων θα πρέπει να γίνει με κατάλληλα καλώδια τα οποία και θα μεταφέρουν το σήμα στάθμης ισχύος. Η απώλεια ισχύος στα καλώδια εξαρτάται από το μήκος του καλωδίου, την διάμετρό του και την “αντίσταση” του μεγαφώνου / ηχείου και στην πράξη, η ωμική αντίσταση ενός καλωδίου ορίζεται σε Ω / m . Έτσι, για μήκος 30 μέτρων, η απώλεια ισχύος μπορεί να κυμαίνεται από 0,4 έως και 2,4 dB (για ηχείο 4 Ω), και από 0,2 έως 1,3 dB (για ηχείο 8 Ω), αναλόγως της διαμέτρου του καλωδίου. Προφανώς, μεγαλύτερου διαμετρήματος καλώδια μειώνουν την απώλεια ισχύος και επιτρέπουν τροφοδοσία σε μεγαλύτερο απόσταση από τον ενισχυτή. Στην περίπτωση εγκαταστάσεων “σταθερής τάσης” 100 V, και για πτώση τάσης κατά 1 dB κατά μήκος της γραμμής, το μέγιστο μήκος του καλωδίου κυμαίνεται από 100 έως και 1900 m, για διαμέτρημα καλωδίου 0,3mm² έως 6mm² (και για ισχύ λειτουργίας τα 100 W).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Παραδείγματα Η/Α συστημάτων και εγκαταστάσεων

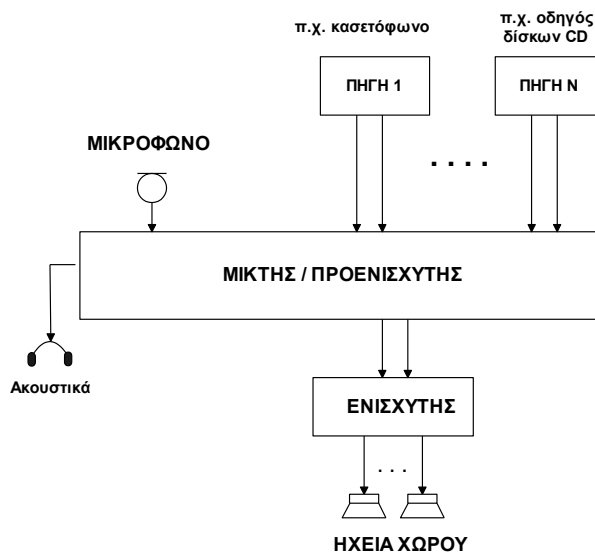
9.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή δίνονται σχηματικές περιγραφές της τυπικής δομής των συνηθέστερων ηχητικών εγκαταστάσεων, όπου συνδυάζονται τα υποσυστήματα που ήδη περιεγράφηκαν, δηλαδή τα στοιχεία πηγής (μικρόφωνα, ηλεκτρικές πηγές), τα ηλεκτρικά στοιχεία (προενισχυτές, ενισχυτές, επεξεργαστές) και τα ηχεία. Οι λεπτομέρειες της επιλογής των επιμέρους αυτών υποσυστημάτων, καθώς και οι λεπτομέρειες της συνδεσμολογίας και της τοποθέτησής τους δόθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, και Κεφάλαια.

9.2 Επαγγελματικά ηχητικά συστήματα και συσκευές

9.2.1 Εγκατάσταση κέντρων διασκέδασης

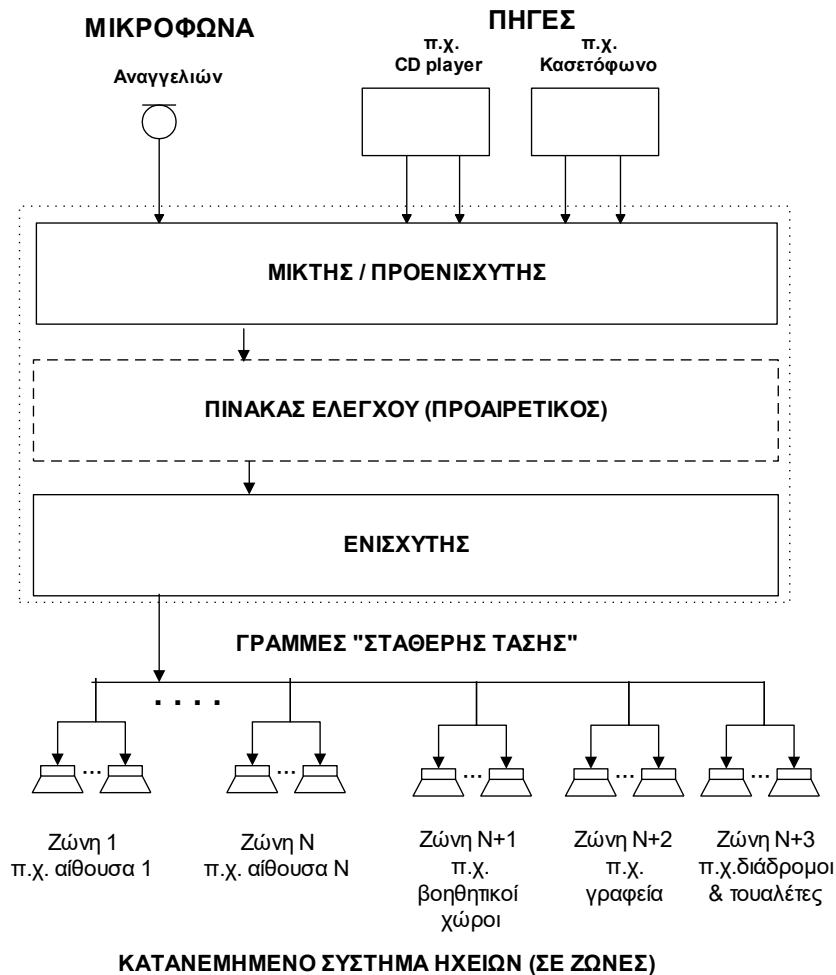
Σε αυτές τις εφαρμογές απαιτείται συνδυασμένη χρήση ηλεκτρικών πηγών αναπαραγωγής μουσικής (π.χ. οδηγών δίσκων CD, ψηφιακό ή αναλογικό μαγνητόφωνο, υπολογιστή, κλπ), με μικρόφωνα αναγγελίας και η αναπαραγωγή του ήχου (σε μονοφωνικό ή στερεοφωνικό τρόπο) σε στάθμες που αρχίζουν από χαμηλές (π.χ. για μουσική υποβάθρου σε εστιατόρεια), έως και υψηλές (π.χ. για χορευτικά κέντρα). Μία τέτοια τυπική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 9.1**



Σχήμα 9.1: Τυπική δομή ηχητικής εγκατάστασης κέντρων διασκέδασης

9.2.2 Εγκαταστάσεις ξενοδοχείων, σταθμών συγκοινωνιακών μέσων και πολυκαταστημάτων

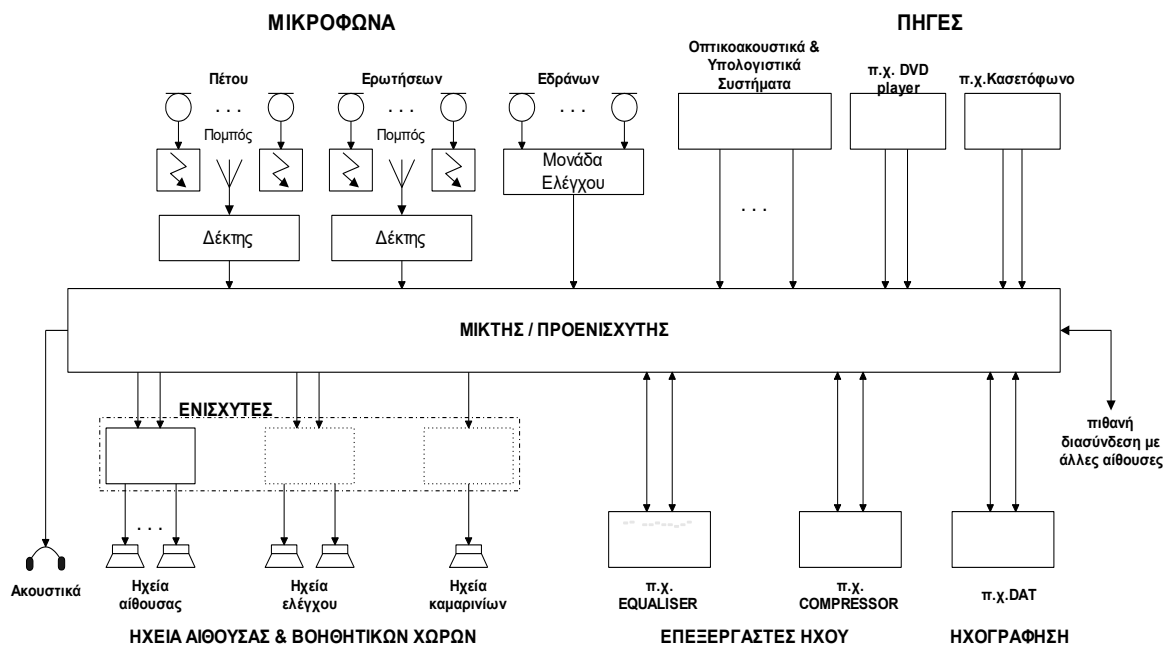
Οι εγκαταστάσεις αυτές απαιτούν την μετάδοση αναγγελιών με χρήσιμες πληροφορίες (που θα πρέπει να φθάνουν στους ακοατές με καταληπτό τρόπο), καθώς και μουσικής υποβάθρου σε χαμηλές σχετικά στάθμες. Τα σήματα πηγής προέρχονται από ηλεκτρικές πηγές και μικρόφωνα. Λόγω της ανάγκης κάλυψης πολλαπλών χώρων (αιθουσών, γραφείων, κλπ) και συχνά μεγάλης επιφάνειας, συνήθως επιλέγεται η χρησιμοποίηση κατανεμημένου συστήματος που βασίζεται σε διασύνδεση ηχείων «σταθερής τάσης» (π.χ. σε γραμμή 100V, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως). Μία τέτοια τυπική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 9.2**. Όπως φαίνεται στο Σχήμα αυτό, τα ηχεία κατανέμονται σε περιοχές («ζώνες»), με κοινές λειτουργικές ανάγκες και επιπλέον υπάρχει και η προεραϊκή δυνατότητα κεντρικού ελέγχου της διανομής του ήχου στις ζώνες αυτές με την χρήση κατάλληλης συσκευής ελέγχου (Πίνακας ελέγχου).



Σχήμα 9.2: Τυπική δομή ηχητικής εγκατάστασης ξενοδοχείων, σταθμών συγκοινωνιακών μέσων και πολυκαταστημάτων

9.2.3 Εγκαταστάσεις αιθουσών διαλέξεων και συνεδριακών κέντρων

Στις αίθουσες αυτές απαιτείται η ηχητική αναμετάδοση ομιλίας, από ομιλητές που βρίσκονται είτε στην θέση του κυρίως ομιλητή και του προεδρείου, είτε στην περιοχή του ακροατηρίου (π.χ. για την συμμετοχή τους στην συζήτηση ή στην εκδήλωση ερωτήσεων). Επιπλέον, συχνά γίνεται και αναμετάδοση ήχου από ηλεκτρικές πηγές (π.χ. συστήματα υπολογιστών, οδηγούς δίσκων CD, βίντεο, κλπ). Η βέλτιστη κάλυψη των αναγκών των ομιλητών απαιτεί την χρήση αριθμού σταθερών μικροφώνων εδράνου (π.χ. για το προεδρείο) και ενός αριθμού ασυρμάτων μικροφώνων πέτου για τους ομιλητές που τυχόν κινούνται ή και ασυρμάτων μικροφώνων χειρός για το ακροατήριο. Επιπλέον, συχνά απαιτείται και η βελτιστοποίηση του ήχου με την χρήση εξωτερικών επεξεργασιών και η ηχογράφηση των εκδηλώσεων για αρχειακούς λόγους. Μία τυπική δομή μίας τέτοιας εγκατάστασης φαίνεται στο **Σχήμα 9.3**.

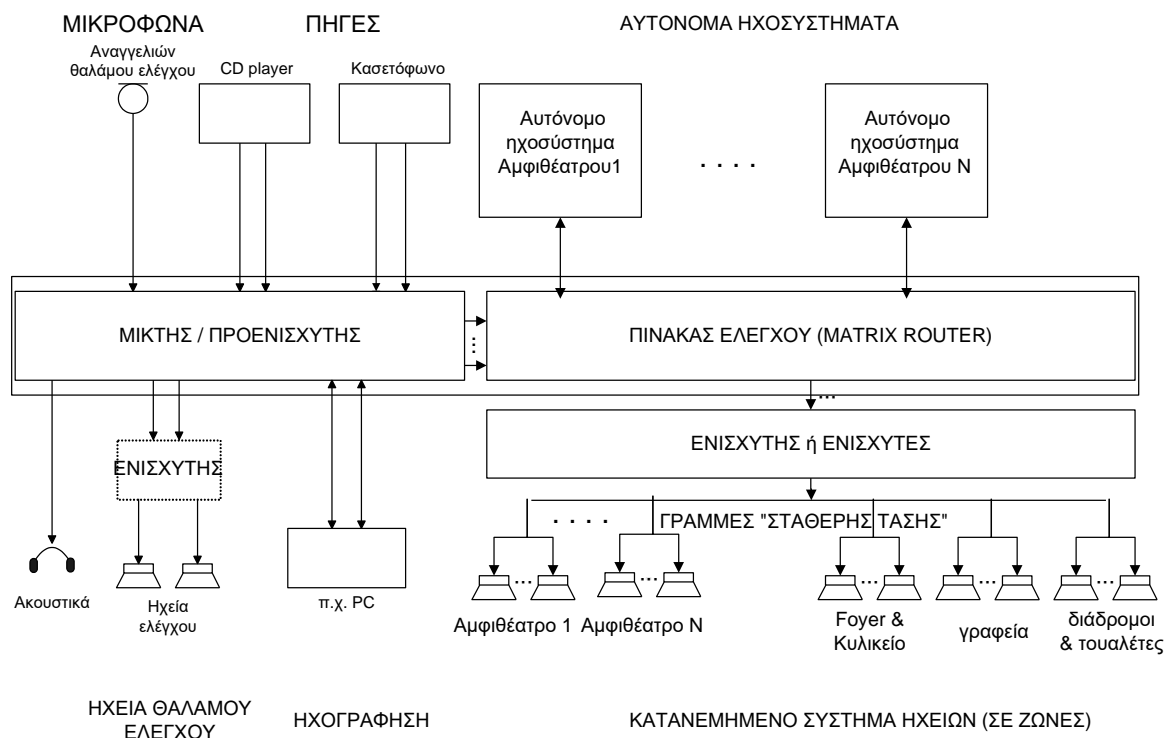


Σχήμα 9.3: Τυπική δομή ηχητικής εγκατάστασης αιθουσών διαλέξεων

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα αυτό, η κάλυψη μίας τέτοιας αίθουσας επιτυγχάνεται με την χρήση ηχείων ή συστοιχιών ηχείων οροφής ή πλευρικών τοίχων που τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις εμπρός και επάνω από την θέση του προεδρείου / ομιλητών.

Συχνά, εγκαταστάσεις για τέτοιες αίθουσες θα πρέπει να συνδιαστούν σε έναν περισσότερο σύνθετο χώρο όπως ενός συνεδριακού κέντρου, όπου αναξάρτητα τέτοια ηχοσυστήματα θα πρέπει μεν να λειτουργούν σε κάθε μία από τις αίθουσες διαλέξεων, αλλά επιπλέον θα πρέπει να είναι δυνατός και ο κεντρικός έλεγχος και διανομή του ήχου και των αναγγελιών σε όλες τις αίθουσες και στους βοηθητικούς χώρους του κέντρου. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί την χρήση ενός κεντρικού προενισχυτή / μίκτη με εισόδους τόσο τις εξόδους των επιμέρους ανεξαρτήτων

ηχοσυστημάτων των αιθουσών διαλέξεων, όσο και πηγών για την μετάδοση μουσικής υποβάθρου και αναγγελιών. Ο έλεγχος της διανομής του ήχου στις επιμέρους περιοχές («ζώνες») γίνεται και εδώ μέσω της χρήσης κατάλληλης συσκευής ελέγχου ("matrix router") και η κάλυψη των χώρων αυτών επιτυγχάνεται και εδώ με την χρήση καταναμημένου ηχοσυστήματος (με ηχεία οροφής ή πλευρικών τοίχων) και την διασύνδεσή τους σε γραμμή «σταθερής τάσης» 100 V. Μία τέτοια τυπική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 9.4**. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα, στην περίπτωση αυτή υπάρχει και η ανάγκη χρησιμοποίησης ειδικού θαλάμου ελέγχου, όπου και ο τεχνικός του συστήματος θα ελέγχει την λειτουργία της με την χρήση τοπικού ηχοσυστήματος αναφοράς.



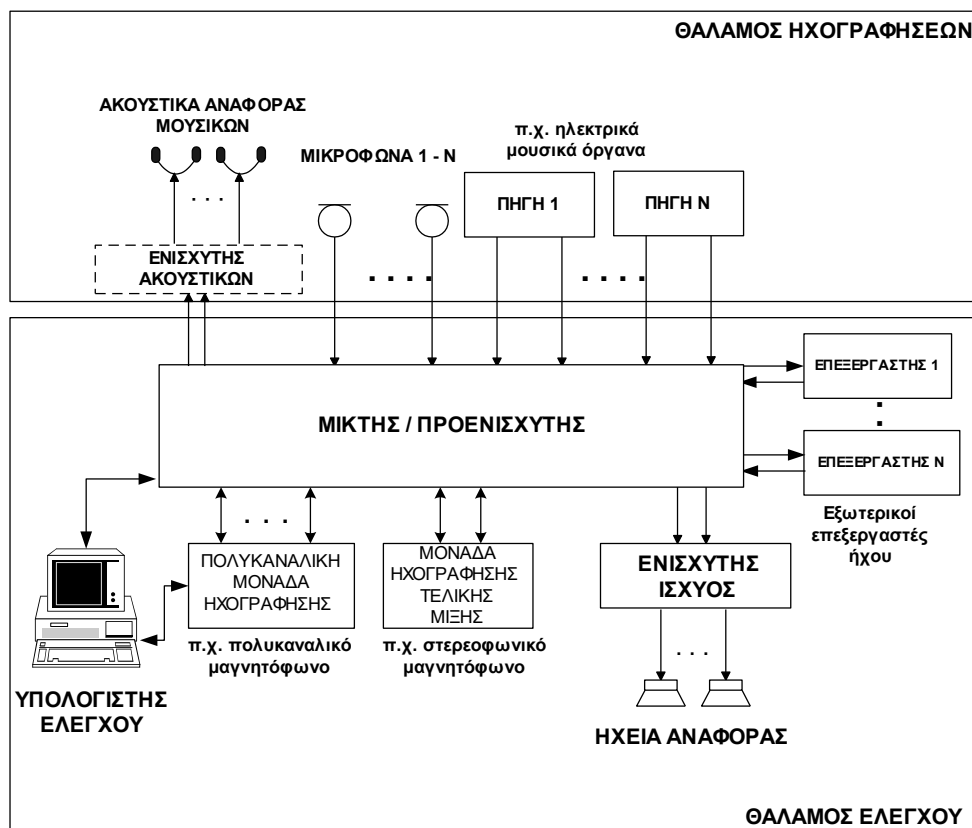
Σχήμα 9.4: Τυπική δομή κεντρικής ηχητικής εγκατάστασης συνεδριακού κέντρου

9.2.4 Εγκαταστάσεις για studio ηχοληψίας και ραδιοφωνικούς σταθμούς

Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η ακουστικά ελεγχόμενη ηχογράφηση ή μετάδοση διαφόρων ηχητικών πηγών που στην περίπτωση των studio ηχοληψίας, προέρχονται κυρίως από μουσικά όργανα ή και από προ-ηχογραφημένο υλικό σε κάποιο μαγνητόφωνο. Ο συνδιασμός και επεξεργασία των σημάτων αυτών γίνεται με την χρήση κονσόλας μίκτη / προενιχυτή, εξωτερικών επεξεργαστών και πολυκαναλικών ή και στερεοφωνικών υποσυστημάτων αποθήκευσης (π.χ. μαγνητοφώνων ή και ψηφιακών υποσυστημάτων). Η αναπαραγωγή των ήχων αυτών θα πρέπει να γίνεται σε υψηλή πιστότητα, σε ειδικό θάλαμο ελέγχου (control room) του studio, ο οποίος και θα πρέπει να είναι ακουστικά μονωμένος τόσο από τον κυρίως θάλαμο ηχοληψίας, όσο και από εξωτερικούς θορύβους. Επιπλέον, τόσο ο θάλαμος

ηχοληψίας, όσο και ο θάλαμος ελέγχου θα πρέπει να παρουσιάζουν κατάλληλη και ελεγχόμενη ακουστική απόκριση, όπως έχει ήδη συζητηθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Μία τυπική διάταξη μίας τέτοιας εγκατάστασης φαίνεται στο **Σχήμα 9.5**.

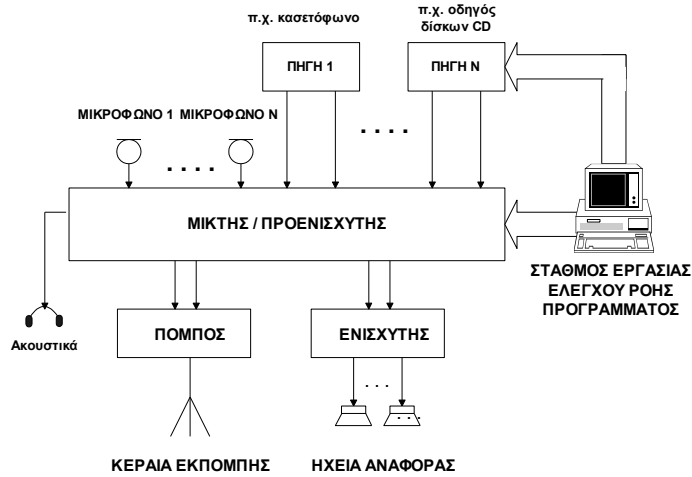
Στην περίπτωση των studio ραδιοφωνικών σταθμών, ισχύουν παρόμοιες (αν και σχετικά υποβαθμισμένες) απαιτήσεις για ηχομόνωση και ελεγχόμενη ακουστική συμπεριφορά και επιπλέον συνήθως δεν απαιτείται η χρήση ειδικού θαλάμου ηχοληψίας, αφού ο τυχόν ταυτόχρονος έλεγχος του εκπεμπόμενου σήματος (όταν αυτό προέρχεται από μικρόφωνα που λειτουργούν στον ίδιο χώρο) μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ακουστικών, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9.6**.



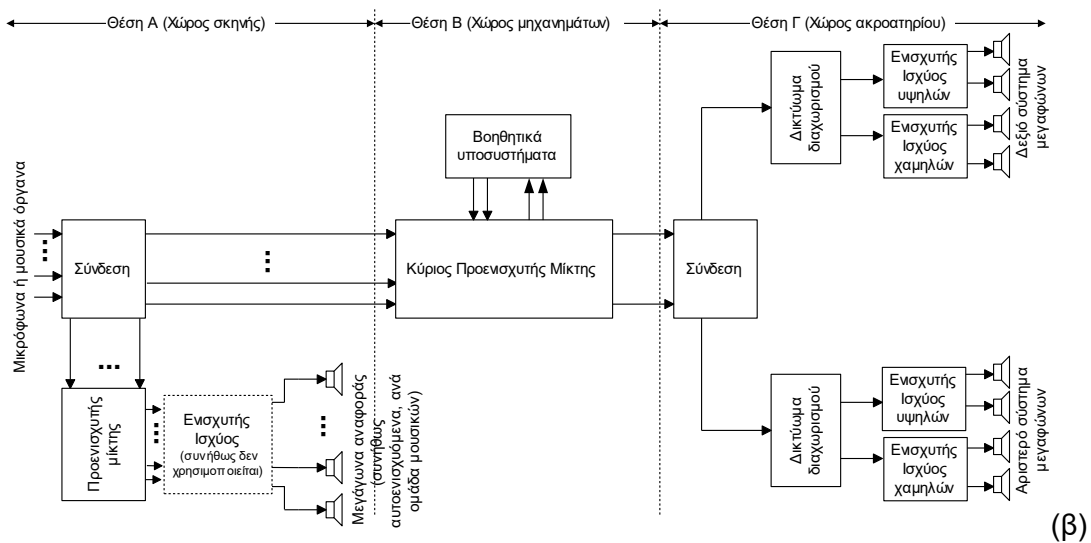
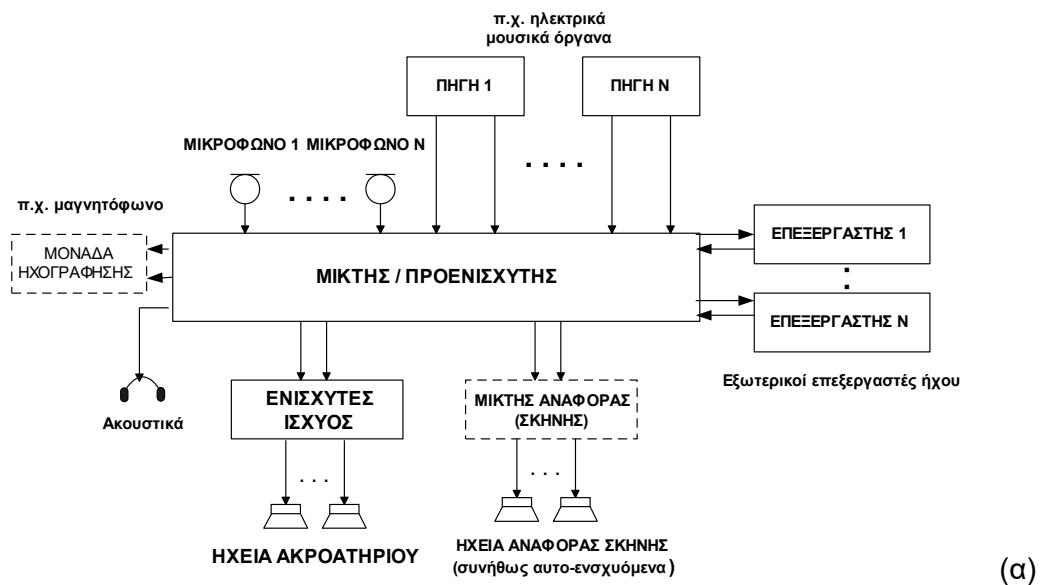
Σχήμα 9.5: Τυπική δομή εγκατάστασης studio ηχοληψίας

9.2.5 Εγκαταστάσεις για συναυλιακούς χώρους

Τυπικά τέτοιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται για κάλυψη εκδηλώσεων όπως οι συναυλίες, οι ομιλίες και οι αθλητικές εκδηλώσεις. Οι βασικές αρχές λειτουργίας όλων αυτών των εγκαταστάσεων υπερκαλύπτονται από πλευράς πολυπλοκότητας και πιστότητας, από τις εγκαταστάσεις για συναυλίες, που έχουν ήδη παρουσιαστεί προηγουμένως και που φαίνονται και στο **Σχήμα 9.7**.

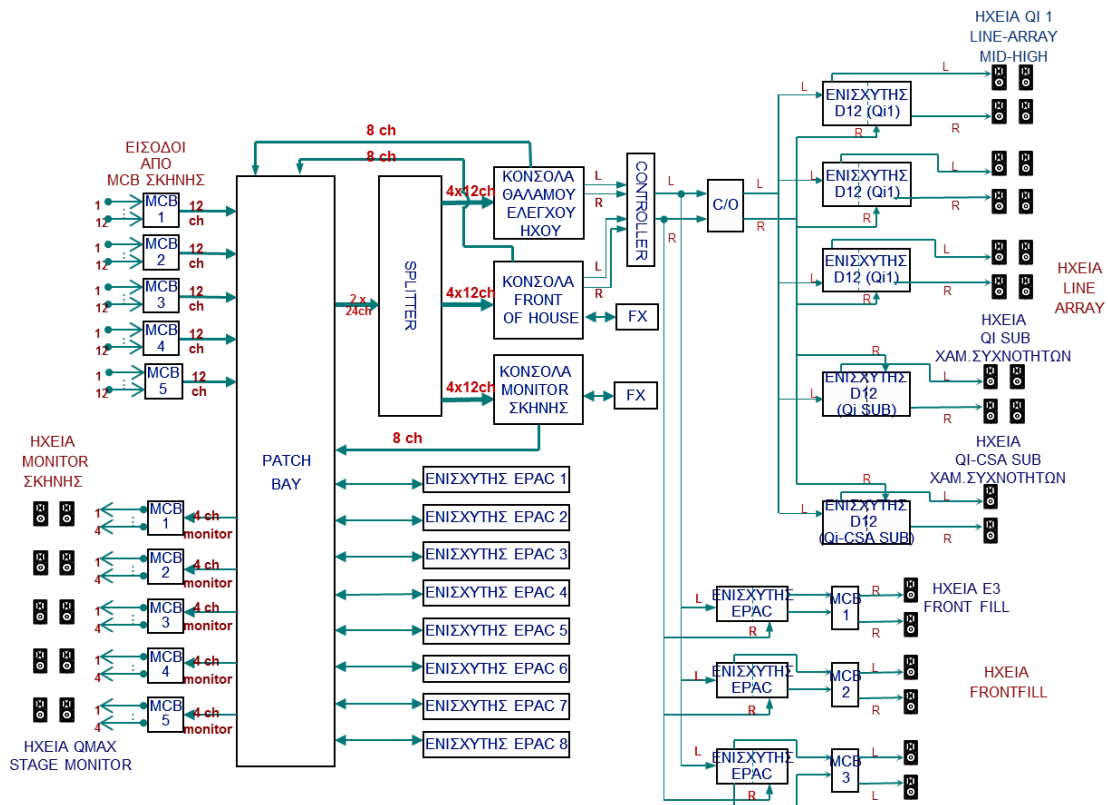


Σχήμα 9.6: Τυπική δομή εγκατάστασης για ραδιοφωνικό studio



Σχήμα 9.7: Τυπική δομή εγκατάστασης για συναυλίες σε ανοιχτούς χώρους (α) γενική δομή (β) κατανομή συσκευών στον χώρο

Σε σχέση με εγκαταστάσεις σε κλειστούς χώρους, συνήθως αφορούν μόνιμα συστήματα τα οποία έχουν τοποθετηθεί μετά από προσεκτική ανάλυση των αναγκών χρήσης, κάλυψης της μόνιμης διάταξης του ακροατηρίου και της ακουστικής του χώρου. Μια λεπτομερέστερη και ειδική διάταξη για την εγκατάσταση του μεγάλου Αμφιθεάτρου του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου (ΣΠΚ) του Πανεπιστημίου Πατρών, δίνεται στο **Σχήμα 9.8**. Λεπτομέρειες δίνονται και στην διπλωματική εργασία: Δρόσος, Α. (2011), *Ηλεκτροακουστικές μετρήσεις και συγκριτική μελέτη συστημάτων θεατρικού ήχου* <http://nemertes.lis.upatras.gr/jsrui/handle/10889/4904>



Σχήμα 9.8: δομή Η/Α εγκατάστασης για το μεγάλο Αμφιθέατρο του ΣΠΚ του Πανεπιστημίου Πατρών

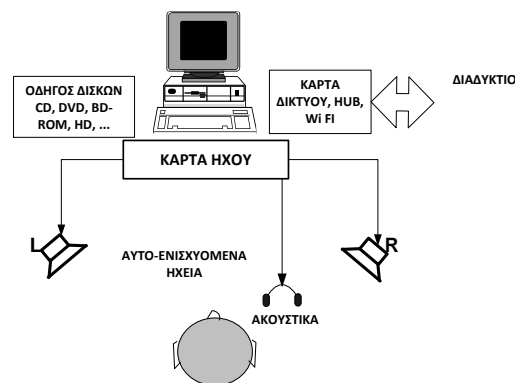
Στο σχήμα αυτό, φαίνονται 60 κανάλια εισόδου που συγκεντρώνονται ανά 12 σε 5 κυτία MCB στο χώρο της σκηνής. Στα ίδια κυτία MCB επιστρέφουν 8 κανάλια που οδηγούν ηχεία ελέγχου (monitor) σκηνής για χρήση από τους μουσικούς. Τα ηχεία αυτά οδηγούνται από τους ενισχυτές EPAC 1 – 8. Η δρομολόγηση γίνεται μέσα από πίνακα Patch Bay. Από τα κανάλια εισόδου τα 48 κανάλια, οδηγούνται μέσω διαχωριστή (splitter) σε 3 εναλλακτικές κονσόλες προενίσχυσης / μίξης: (α) την κυρίως κονσόλα της αίθουσας (FOH) που χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς ήχου για κάλυψη συναυλιών, (β) κονσόλα του θαλάμου ελέγχου που εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη απλών συνεδριακών εκδηλώσεων (βρίσκεται σε θάλαμο στον εξώστη), (γ) κονσόλα ελέγχου (monitor) σκηνής που χρησιμοποιείται από μηχανικούς ήχου αποκλειστικά για τη ρύθμιση του ήχου που μεταδίδεται στα ηχεία πάνω στη σκηνή (η κονσόλα βρίσκεται στα παρασκήνια). Η επεξεργασία στις κονσόλες αυτές συνοδεύεται και από εξωτερικές μονάδες επεξεργασιών (FX). Τα

πολλαπλά κανάλια εισόδου, στην επιλεγμένη κονσόλα που χρησιμοποιείται για τη συγκεκριμένη εκδήλωση (είτε την κονσόλα FOH, είτε την κονσόλα του θαλάμου στον εξώστη που επιλέγονται από το διακόπτη Controller), συνδυάζονται σε 2 στερεοφωνικά κανάλια (L / R) και μέσω διαχωριστή συχνοτήτων (Cross Over, C/O) οδηγούνται σε 2 δρόμους ανά κανάλι: για τη συστοιχία (line array) ηχείων μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων, είτε τα ηχεία χαμηλών συχνοτήτων. Τα ηχεία σε κάθε δρόμο οδηγούνται από τους ενισχυτές ισχύος D12. Επιπλέον, για την κάλυψη του ακροατηρίου στις μπροστινές θέσεις της πλατείας του ΣΠΚ, χρησιμοποιούνται 6 μικρά ηχεία (front fill) τοποθετημένα περιμετρικά στο εμπρός μέρος της σκηνής. Τα ηχεία αυτά οδηγούνται από τους 3 ενισχυτές (EPAC).

9.3 Οικιακά και ατομικά ηχητικά συστήματα και συσκευές

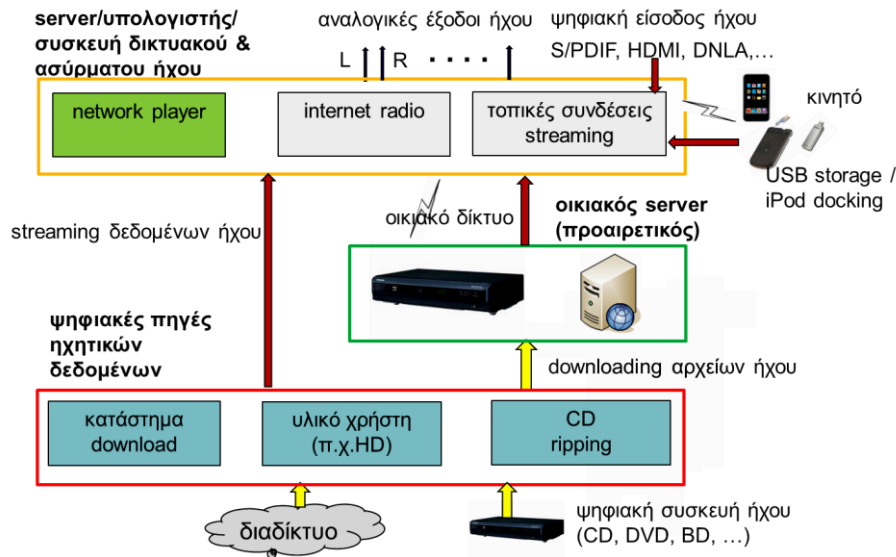
9.3.1 Στερεοφωνικά ηχοσυστήματα

Παρόλο που παραδοσιακά η οικιακή / ατομική ακρόαση ήχου βασιζόταν σε εξειδικευμένες αναλογικές ή και ψηφιακές συσκευές αποθήκευσης και αναπαραγωγής (δίσκοι-πικάπ βινυλίου, κασετόφωνα, CD-players, mp3 players, κλπ.), με την εξάπλωση της χρήσης του διαδικτύου, οι ηχητικές πηγές και συσκευές, αξιοποιούν πλέον συνήθως τους υπολογιστές και το διαδίκτυο για τέτοιες χρήσεις. Τυπικά, η πλειοψηφία των ηχητικών δεδομένων που έχει ηχογραφηθεί και είναι διαθέσιμη, είναι στερεοφωνικά (2 κανάλια) και η ακρόαση σε οικιακό ή ατομικό περιβάλλον γίνεται είτε μέσα από 2 ηχεία (πιθανώς αυτό-ενισχυόμενα), είτε από ακουστικά, έχοντας σαν πηγές ψηφιακά ηχητικά δεδομένα που είτε είναι αποθηκευμένα είτε λαμβάνονται σε υπολογιστή που τα αναπαράγει μέσα από κάρτα ήχου (D/A μετατροπή). Μία τέτοια τυπική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 9.9**.



Σχήμα 9.9: τυπική δομή ατομικού – οικιακού ηχοσυστήματος με βάση υπολογιστή

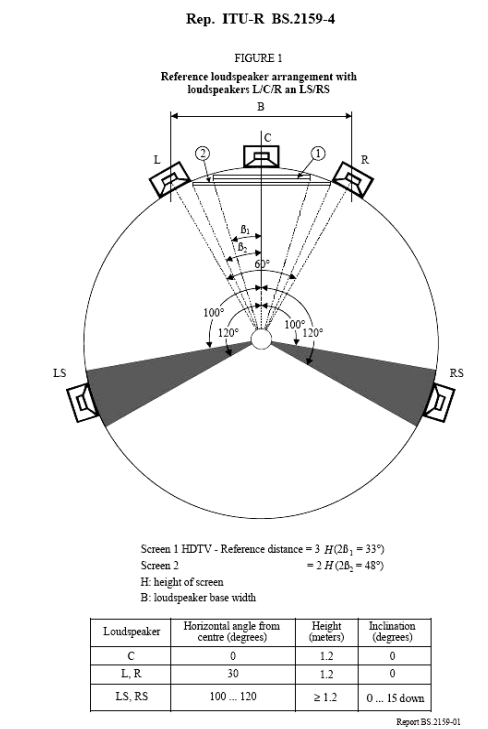
Είναι επίσης δυνατό, η λήψη των δεδομένων να γίνεται μέσω πολλαπλών πηγών ή και συνδυασμού downloading (κατεβάσματος) και ασύρματου – δικτυακού streaming (μετάδοσης ροής). Η τελική αναπαραγωγή μπορεί να γίνεται και από εξειδικευμένες συσκευές διαδικτύου ήχου (**Σχήμα 9.10**).



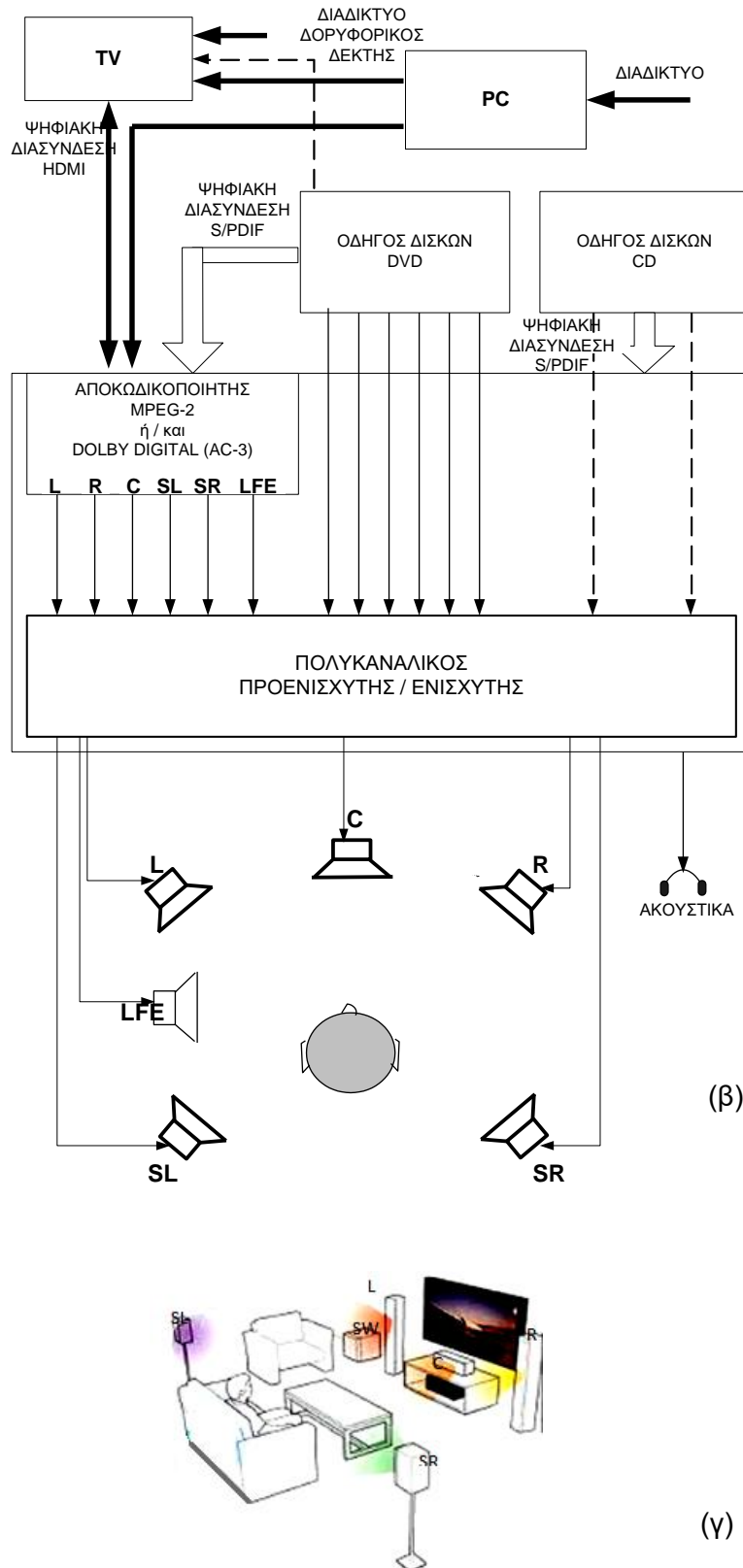
Σχήμα 9.10: τυπική δομή οικιακού ηχοσυστήματος με downloading και streaming

9.3.2 Πολυκαναλικά ηχοσυστήματα

Συνήθεις διατάξεις βασίζονται σε συστήματα “home theatre” με 5.1 κανάλια και ηχεία: (δεξί-L, αριστερό-R, κεντρικό-C, δεξί πλευρικό-LS ή SL, αριστερό πλευρικό-RS ή SR, ηχείο χαμηλών-LFE ή SW). Σημειωτέον ότι τα κανάλια L και R, είναι τα αντίστοιχα για στερεοφωνική αναπαραγωγή, τα πλευρικά κανάλια αναπαράγουν συνήθως χωρική πληροφορία, το κεντρικό κανάλι την ομιλία – διαλόγους και το ηχείο subwoofer (κανάλι .1), συχνότητες κάτω από 150Hz. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9.11, ο πολυκαναλικός ενισχυτής περιλαμβάνει κατάλληλο στάδιο προενίσχυσης με δέκτες για ψηφιακά ηχητικά δεδομένα και αποκωδικοποιητές για συμπιεσμένα δεδομένα ήχου (π.χ. mp3, Dolby Digital, MPEG2).



(α)

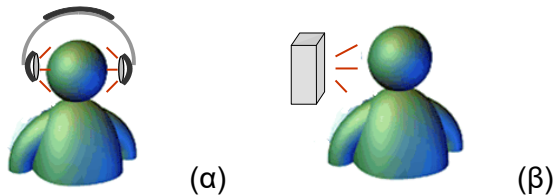


Σχήμα 9.11: τυπική δομή οικιακού πολυκαναλικού ηχοσυστήματος (Home Theater) (α) πηγές και συνδεσμολογία για αναπαραγωγή μέσω πολυκαναλικού AV ενισχυτή, (β) προδιαγραφές ITU-R για την τοποθέτηση ηχείων και θέσης ακρόασης, (γ) τυπική διάταξη οπτικοακουστικού συστήματος 5.1

9.4 Κατηγορίες ηχοσυστημάτων

9.4.1 Συστήματα ατομικής ακρόασης

Τέτοια συστήματα είναι είτε φορητά και σε αυτή την περίπτωση η ακρόαση γίνεται μέσα από ακουστικά, είτε βασίζονται σε μικρά συνήθως αυτοενισχυόμενα ηχεία (ή ένα ηχείο) που τοποθετείται σε γραφείο και κοντά στον ακροατή (**Σχήμα 9.12**).



Σχήμα 9.12: συστήματα ατομικής ακρόασης (α) ακουστικά, (β) ηχείο

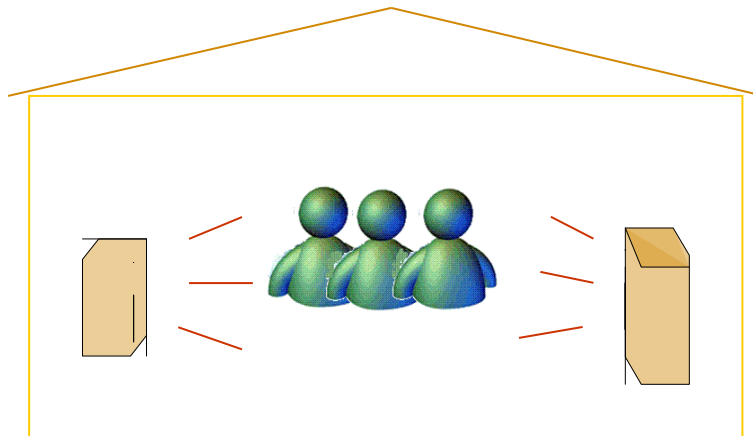
Με δυνατότητες διαδικτυακής και ασύρματης διασύνδεσης, τέτοια συστήματα πλέον δεν απαιτούν πλέον οδήγηση από εξειδικευμένες πηγές ήχου και συνήθως αναπαράγουν ψηφιακό ήχο από κινητά τηλέφωνα ή υπολογιστές μέσω κατεβάσματος αρχείων (downloading) ή μετάδοσης ροής (streaming). Η πιστότητα τέτοιων συστημάτων είναι περιορισμένη και τεχνικά προκλήσεις αφορούν την βελτιστοποίηση ακρόασης μέσω ακουστικών (με καταστολή εξωτερικού θορύβου, προσαρμογή στον συγκεκριμένο ακροατή, ισοστάθμιση, διεύρυνση της χωρικής εικόνας, κλπ.), ενώ για τα μικρά επιτραπέζια ή φορητά αυτοενισχυόμενα ηχεία, κυρίως απαιτείται διεύρυνση της απόκρισης συχνότητας ειδικά στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων και η εξομοίωση αναπαραγωγής στερεοφωνικού ή και πολυκαναλικού ήχου από ένα ηχείο. Η ακρόαση μέσω ακουστικών συχνά γίνεται σε εξαιρετικά ψηλές ηχοστάθμες (πάνω από 100 dB), οι οποίες για μακροχρόνια-συστηματική έκθεση μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στην ακοή. Όπως θα συζητηθεί και σε επόμενες παραγράφους, η αναπαραγωγή μέσα από ακουστικά επιτρέπει την πιο ρεαλιστική αναπαραγωγή τρισδιάστατης θέσης πηγών στον εικονικό χώρο και έτσι επιτρέπει χρήση σε εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας.

9.4.2 Συστήματα οικιακής ακρόασης

Παραδοσιακά τέτοια συστήματα (**Σχήμα 9.13**) είναι στερεοφωνικά (με 2 ηχεία) και οδηγούνται από συμβατικές πηγές ήχου (π.χ. δίσκους), βασισμένα σε διατάξεις προενισχυτή /ενισχυτή ισχύος ή «ολοκληρωμένου» ενισχυτή. Αναλόγως με τη διαρρύθμιση του οικιακού χώρου, η ιδανική διάταξη ηχείων – θέσης ακρόασης (στις αιχμές ισόπλευρου τριγώνου) δεν είναι πάντοτε εφικτή και ταυτόχρονα, η ακουστική των δωματίων συχνά υποβαθμίζει την πιστότητα ηχητικής αναπαραγωγής. Με την λειτουργία οικιακού δικτύου, ως πηγή ηχητικών δεδομένων μπορεί πλέον να βασίζεται υλικό από downloading ή streaming από το διαδίκτυο ή και κάποιος αποθηκευτικός χώρος (π.χ. σκληρός δίσκος).

Μια επέκταση της στερεοφωνικής αναπαραγωγής επιτυγχάνεται μέσω από πολυκαναλικά ηχοσυστήματα (surround. Home theatre, κλπ.) όπου ο ήχος

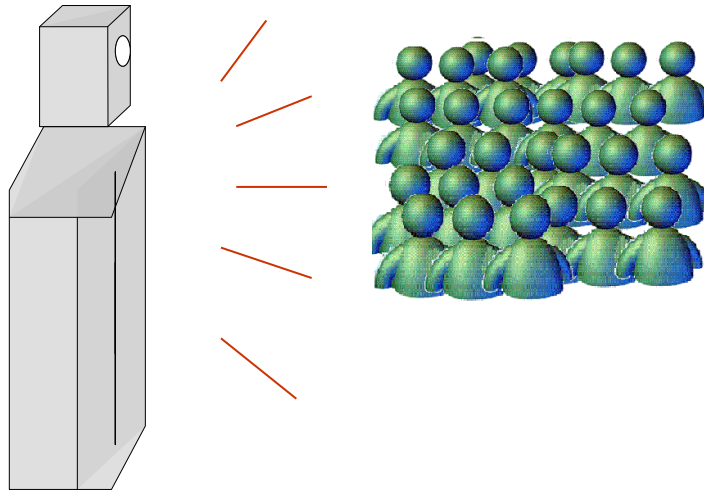
αναπαράγεται από πολλαπλά κανάλια / ηχεία, συνήθως μέσω διάταξης 5.1 ηχείων (2 εμπρόσθια, 2 πλευρικά, 1 κεντρικό) και ένα ηχείο για αναπαραγωγή πολύ χαμηλών συχνοτήτων – subwoofer (είναι το κανάλι .1). Ως πηγές σε ένα τέτοιο ηχοσύστημα είναι συνήθως οπτικοακουστικά δεδομένα αποθηκευμένα σε δίσκους DVD ή BD, σκληρό δίσκο – υπολογιστή ή ακόμη και διαδικτυκές πηγές που χρησιμοποιούν πολυκαναλικό ήχο (συντά κωδικοποιημένο σε τυποποίηση Dolby Digital, DTS, MPEG2, MPEG4, κλπ.). Με δεδομένο ότι στη μεγάλη πλειοψηφία τους, τέτοια ηχοσυστήματα χρησιμοποιούνται για αναπαραγωγή κινηματογραφικών ταινιών, ταυτόχρονη σύνδεση της πηγής γίνεται και με οθόνη TV. Σε άλλες περιπτώσεις, ο τηλεοπτικός δέκτης συνδέεται με δορυφορικές ή διαδικτυακές πηγές και αναπαράγει πολυκαναλικό ήχο μέσω ηχείων τύπου soundbar που αξιοποιούν και πλευρικές ανακλάσεις του αναπαραγόμενου ήχου για να εξομοιώσουν την αναπαραγωγή από πλευρικά ηχεία.



Σχήμα 9.13: σύστημα οικιακής ακρόασης

9.4.3 Συστήματα μαζικής ακρόασης

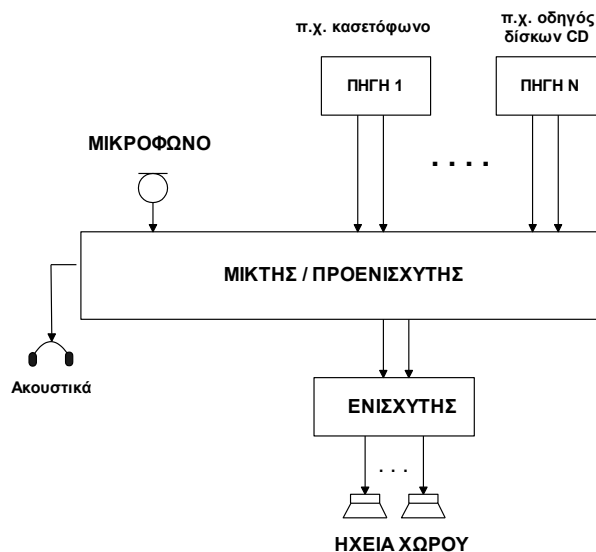
Σε δημόσιους, ανοιχτούς ή στεγασμένους χώρους, σε μόνιμη ή παροδική βάση, τοποθετούνται ηχοσυστήματα για κάλυψη μεγάλων ακροατηρίων, τόσο για αναπαραγωγή ομιλίας, όσο και μουσικής (ζωντανής ή προηχογραφημένης). Τέτοια συστήματα καλούνται να επαυξήσουν την ηχοστάθμη πηγών ώστε να επιτύχουν επιθυμητή ηχητική κάλυψη (από άποψη καταληπτότητας αναπαραγόμενης ομιλίας ή ηχοστάθμης μουσικής) σε ακροατήρια από 10 – 10000 άτομα. Έτσι, αναλόγως του μεγέθους του ακροατηρίου και της συνεπαγόμενης επιφάνειας κάλυψης και της εφαρμογής-χρήσης, εμφανίζουν διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές και είναι:



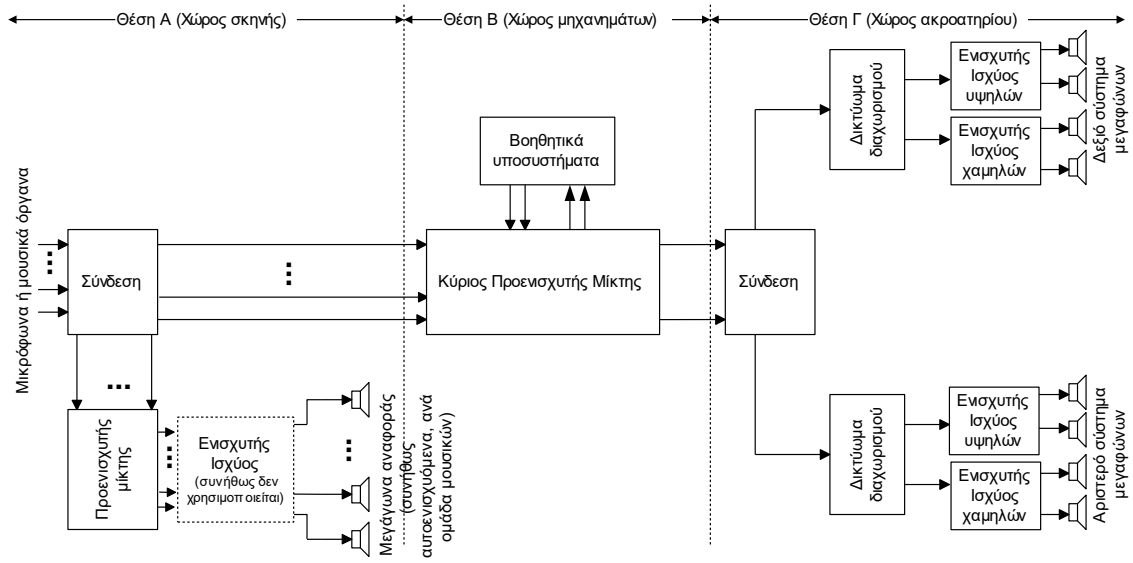
Σχήμα 9.14: σύστημα μαζικής ακρόασης

- μικρής κλίμακας, π.χ. για υποβοήθηση ομιλίας σε χώρους διαλέξεων, διδασκαλίας, εκκλησίες, αναπαραγωγή μουσικής σε μπαρ, εστιατόρια, club, κλπ.
- μεσαίας κλίμακας, π.χ. για υποβοήθηση ομιλίας σε συνεδριακούς ή ανοιχτούς χώρους, σε γήπεδα και αθλητικούς χώρους, μεγάλες εκκλησίες, αναπαραγωγή μουσικής σε συναυλιακούς χώρους, μεγάλα club, κλπ.
- μεγάλης κλίμακας, π.χ. για συναυλίες και φεστιβάλ, μεγάλες αθλητικές εκδηλώσεις, μόνιμες εγκαταστάσεις σε βιομηχανίες, κλπ.

Σε κάθε περίπτωση, προτεραιότητα αποτελούν οικονομοτεχνικά κριτήρια, το κόστος, η ευκολία προσαρμογής στο χώρο και προφανώς η κάλυψη των απαιτήσεων σε ηχοστάθμη, πιστότητα και ομοιογενή κάλυψη του ακροατηρίου. Συνήθως, η αναπαραγωγή γίνεται χωρίς δυνατότητα στερεοφωνίας, αλλά και σε υπερβολικά ψηλή ηχοστάθμη με αποτέλεσμα την αύξηση της παραμόρφωσης, την κόπωση και τη δημιουργία προβλημάτων στην ακοή του ακροατηρίου και την ηχορύπανση.



Σχήμα 9.15: Τυπική δομή ηχητικής εγκατάστασης κέντρων διασκέδασης



Σχήμα 9.16: σύστημα μαζικής ακρόασης