

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

# ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Σημειώσεις Θεωρίας  
Ιανουάριος 2024

Νικόλαος Στεφανάκης, Κωσταντίνος Κεχράκος

1	Στάθμες ηλεκτρακουστικών μεγεθων.....	7
1.1	Μαθηματικός ορισμός του decibel.....	7
1.2	Στάθμες ηλεκτρακουστικων μεγεθων.....	9
1.2.1	Το dBm.....	9
1.2.2	Το dBu.....	10
1.2.3	dBV και dBW.....	10
1.2.4	Το dB SPL.....	10
1.3	Μέσες τετραγωνικές τιμές (RMS).....	11
1.4	Πρόσθεση ακουστικών μεγεθών.....	12
1.5	Σχέσεις Ηλεκτρακουστικών Μεγεθων.....	14
1.5.1	Σχέσεις σήματος προς θόρυβο.....	14
1.5.2	Συνακρόαση (Crosstalk).....	16
1.5.3	Διάδοση στο ελεύθερο πεδίο.....	16
1.5.4	Κατευθυντικότητα.....	16
1.5.5	Μεταβολές ισχύος.....	18
2	Equalizers.....	21
2.1	Τυπικό equalizer κονσόλας.....	21
2.2	Το EQ ως ισοσταθμιστής.....	23
2.3	Κύκλωμα crossover στα ηχεία.....	24
2.4	Φίλτρα A, B, C κατά τη μετρηση σταθμισ ηχου.....	25
2.5	Έλεγχος ηχηρότητας.....	26
2.6	Ψηφιακά φίλτρα.....	28
3	Συστήματα ήχου.....	30
3.1	Έννοια και σκοπός ενός συστήματος ήχου.....	30
3.2	Συχνοτική απόκριση (frequency response).....	31
3.3	Συχνοτική απόκριση με σχέσεις οκτάβας.....	32
3.4	Υπολογισμός της αποκρίσης συχνοτητας.....	33
3.5	Γραμμικά συστήματα ήχου.....	34
3.5.1	Συνδυασμός πολλών γραμμικών συστημάτων σε σειρά.....	35
4	Ηλεκτρικα Ανάλογα Δυναμικων Συστημάτων.....	38
4.1	Ανάλυση R,L,C κυκλωμάτων.....	38

4.1.1	Η έννοια της ηλεκτρικής εμπέδησης (impedance) .....	38
4.1.2	Συνδυασμός ηλεκτρικών στοιχείων σε σειρά και παράλληλα .....	39
4.1.3	Ποιοτική ανάλυση ηλεκρακουστικών συστημάτων .....	44
4.2	Ανάλυση μηχανικών συστημάτων .....	45
4.2.1	Μηχανική μάζα .....	46
4.2.2	Μηχανική ελαστικότητα .....	47
4.2.3	Μηχανική αντίσταση .....	48
4.3	Ανάλυση ακουστικών συστημάτων .....	48
4.3.1	Ακουστική μάζα .....	49
4.3.2	Ακουστική ελαστικότητα .....	50
4.3.3	Ακουστική αντίσταση .....	51
4.3.4	Ο Συντονιστής Helmholtz .....	52
4.4	Ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικές αναλογίες .....	54
5	Μικρόφωνα .....	56
5.1	Δυναμικά μικρόφωνα .....	56
5.2	Πυκνωτικά Μικρόφωνα .....	57
5.3	Μικρόφωνα ταινίας (ribbon) .....	58
5.4	Μικρόφωνα Άνθρακα .....	59
5.5	Πιεζοηλεκτρικά (κρυσταλλικά) μικρόφωνα .....	59
5.6	Διαχωρισμός των μικροφώνων ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργείται η ταλάντωση στο διάφραγμα .....	60
5.6.1	Μικρόφωνα πίεσης .....	60
5.6.2	Μικρόφωνα διανυσματικής διαφοράς πίεσης .....	62
5.7	Γωνιακή απόκριση μικροφώνων .....	66
5.8	Ευαισθησία μικροφώνου .....	68
5.9	Διαχωρισμός .....	69
5.10	Ηλεκτρικό ανάλογο ηλεκτροδυναμικού μικροφώνου .....	72
5.10.1	Συντονισμός .....	73
5.10.2	Ταχύτητα διαφράγματος συναρτήσει των μηχανικών στοιχείων ..	74
5.10.3	Σχέση αιτίου αποτελέσματος .....	75
6	Μεγάφωνα .....	77
6.1	Μέθοδοι ηλεκτροακουστικής μετατροπής .....	77

6.1.1	Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή.....	77
6.1.2	Πιεζοηλεκτρική μετατροπή.....	78
6.2	Συχνотική απόκριση μεγαφώνου .....	79
6.3	Ευαισθησία μεγαφώνου .....	79
6.4	Κατευθυντικότητα ηχείου.....	81
6.5	Συνδεσμολογίες ηχείων - τελικών ενισχυτών .....	83
6.6	Ηλεκτρικά ανάλογα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου .....	87
6.6.1	Ηλεκτρικό σύστημα .....	87
6.6.2	Μηχανικό σύστημα.....	88
6.6.3	Ακουστικό σύστημα .....	88
6.6.4	Συντελεστές μετασχηματισμού.....	89
6.6.5	Κατασκευή ισοδύναμου μηχανικού συστήματος.....	89
6.6.6	Ακουστική ισχύς του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.....	90
6.6.7	Κατασκευή ισοδύναμου ηλεκτρικού συστήματος.....	90
6.7	Μελέτη μεγαφώνου σε απείρω εκτεινόμενη μπάφλα.....	92
6.7.1	Εμπέδηση ακτινοβολίας .....	94
6.7.2	Ταχύτητα διαφράγματος.....	95
6.7.3	Ακουστική ισχύς και βαθμός απόδοσης. ....	96
6.7.4	Απόκριση συχνότητας.....	98
7	Δυναμικοί επεξεργαστές ήχου .....	101
7.1	Δυναμική περιοχή ηχητικού συστήματος .....	101
7.1.1	Συνολική δυναμική περιοχή κατά τη σύνδεση πολλών ηχητικών συστημάτων σε σειρά .....	104
7.2	Μεταβολή και έλεγχος δυναμικής περιοχής .....	105
7.2.1	Συμπιεστής (Compressor).....	105
7.2.2	Χρονικά χαρακτηριστικά λειτουργίας δυναμικών επεξεργαστών	108
7.2.3	Τυπικά παραδείγματα χρήσης συμπιεστή .....	109
7.2.4	Expander .....	111
7.2.5	Noise gate.....	112
7.2.6	Multiband compressor.....	113
8	Κονσόλες μίξης .....	116
8.1	Γενικά .....	116

8.2	Ανάλυση ενός καναλιού εισόδου μιας κονσόλας .....	117
8.2.1	Προενισχυτής (preamplifier).....	118
8.2.2	Ρύθμιση τόνου (ισοσταθμιστής ή equalizer) .....	119
8.2.3	Βοηθητικές εξόδους (auxiliary channels).....	119
8.2.4	Πανοραμικό ποτενσιόμετρο .....	119
8.2.5	Fader.....	121
8.2.6	Διακόπτης Mute.....	121
8.2.7	Insert (εισαγωγές/παρεμβολές σήματος).....	121
8.3	Τυπικές περιπτώσεις χρήσης.....	122
8.3.1	Η κονσόλα στο PA.....	122
8.3.2	Η κονσόλα για stage monitoring.....	123
8.3.3	Η κονσόλα στο Studio ηχογράφησης .....	124
8.4	Μπλοκ Διαγράμματα.....	126
9	Παράρτημα .....	132
9.1	Λογάριθμοι.....	132
9.1.1	Ιδιότητες λογαρίθμων και χαρακτηριστικές τιμές .....	132
9.1.2	Λογαριθμικές μονάδες στην ηλεκτρακουστική .....	132
9.2	Μιγαδικοί αριθμοί.....	133
10	Βιβλιογραφία.....	134

## **ΥΛΗ**

Η ύλη διαχωρίζεται σε παλιά και καινούρια. Ένα φοιτητής ΕΛΜΕΠΑ εξετάζεται μόνο πάνω στην καινούρια ύλη. Ένας φοιτητής ΤΕΙ, μπορεί να επιλέξει αν θέλει να εξεταστεί στην παλιά ή στην καινούρια.

Η παλιά και η καινούρια ύλη έχουν πολλές κοινές ενότητες, ωστόσο είναι κάποιες ενότητες που εντάσσονται μόνο στην παλιά ή μόνο στην καινούρια

Συγκεκριμένα:

Ενότητες που δεν είναι μέσα ούτε στην παλιά ούτε στην καινούρια ύλη: 1.4, 2.4, 2.5, 2.6, 6.7.2, 6.7.3 και 6.7.4

Ενότητες που εντάσσονται στην καινούρια ύλη αλλά όχι στην παλιά: 4, 5.10, 6.6 και 6.7

Ενότητες που εντάσσονται στην παλιά ύλη αλλά όχι στην καινούρια: 7 και 8.

## **ΘΕΜΑΤΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ**

-Θεωρητικό κομμάτι: ανάπτυξη εννοιών στη θεωρία (μαρκαρισμένα με κίτρινο στις σημειώσεις του μαθήματος)

-Ασκήσεις/ερωτήσεις κρίσεως

-Μπορεί να μπουν και θέματα πολλαπλών επιλογών, όπου θα υπάρχει όμως και αρνητική βαθμολογία.

# 1 ΣΤΑΘΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

---

## 1.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ DECIBEL

Η μονάδα bel ορίσθηκε καταρχήν για σχέσεις ηλεκτρικής ισχύος ως:

$$A(\text{bel}) = \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.1)$$

όπου  $P_1$  είναι η ισχύς αναφοράς και με  $\log$  συμβολίζεται ο λογάριθμος με βάση το 10 (ουσιαστικά από εδώ και στο εξής όταν γράφουμε  $\log$  θα εννοούμε το  $\log_{10}$ ). Η μονάδα decibel ορίσθηκε ως το δεκαπλάσιο του bel (dB), δηλαδή:

$$A(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.2)$$

Εφόσον είναι λόγος δυο ομοειδών ποσοτήτων δεν εκφράζει την τιμή ενός συγκεκριμένου μεγέθους, αλλά είναι μια αδιάστατη ποσότητα. Η σχέση αυτή ισχύει εξ ίσου για ακουστική ισχύ, για ηλεκτρική ισχύ ή για οποιοδήποτε άλλο είδος ισχύος. Όμως όταν χρειάζεται να εκφραστούν σε dB κι άλλες στάθμες εκτός της ισχύος, όπως για παράδειγμα η στάθμη ηλεκτρικών τάσεων, τότε αφού η ηλεκτρική ισχύς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης η στάθμη τάσεων θα είναι

$$L = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (1.3)$$

Η σχέση λοιπόν που εκφράζει στάθμες ισχύων δεν είναι ίδια με την σχέση που εκφράζει στάθμες τάσεων. Το ποια είναι η σχέση για το κάθε μέγεθος φαίνεται στον πίνακα 3. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, ας υπολογίσουμε το λόγο σε dB των 2 watt ως προς το 1 watt. Θα είναι:  $dB = 10 \log \frac{2}{1} = 3.01 \approx 3$ . Άρα ο λόγος των δύο ισχύων είναι 3 dB (για την ακρίβεια 3.01).

Φυσικό Μέγεθος	$10 \times \log \frac{a_2}{a_1}$	$20 \times \log \frac{a_2}{a_1}$
<u>Ακουστική</u>		
Ισχύς	x	
Ένταση	x	
Πίεση		x
Ταχύτητα σωματιδίων αέρα		x
<u>Ηλεκτρισμός</u>		
Ισχύς	x	
Ρεύμα		x
Τάση		x

Πίνακας 1.1: Χρήση των μορφών  $10 \log$  και  $20 \log$  ανάλογα με το φυσικό μέγεθος.

Ένα δεύτερο παράδειγμα για τον υπολογισμό του λόγου των 100 watt ως προς τα 10 watt. Είναι:

$$dB = 10 \log \frac{100 \text{ watt}}{10 \text{ watt}} = 10$$

Άρα ο λόγος των δυο ισχύων είναι 10 dB. Από τα παραπάνω παραδείγματα βγάζουμε δύο συμπεράσματα για την χρήση των dB στην περίπτωση της ισχύος. Όταν διπλασιάζεται η ισχύς έχουμε αύξηση 3 dB (και άρα όταν υποδιπλασιάζεται μείωση 3 dB) και όταν η ισχύς δεκαπλασιάζεται η αύξηση είναι 10 dB (και όταν υποδεκαπλασιάζεται μείωση 10 dB). Αντίστοιχα όταν διπλασιαστεί η τάση έχουμε αύξηση 6 dB (και όταν υποδιπλασιάζεται μείωση 6 dB) ενώ όταν δεκαπλασιαστεί η τάση έχουμε αύξηση 20 dB (και όταν υποδεκαπλασιάζεται μείωση 20 dB).

Ο Πίνακας 1.2 μας δείχνει πως μεταβάλλονται οι τιμές των dB για σχετικά μεγάλους λόγους ισχύων ενώ ο πίνακας 5 για μικρούς.

Ισχύς / Watt	Στάθμη σε dB ως προς 1 Watt
1	0
10	10
100	20
200	23
400	26
800	29
1,000	30
2,000	33
4,000	36
8,000	39
10,000	40
20,000	43
40,000	46
80,000	49
100,000	50

Πίνακας 1.2: Μετατροπή λόγων ισχύος σε dB

Το κλειδί στην κατανόηση της έννοιας του dB είναι ότι δεν έχει απόλυτη τιμή. Άρα πρέπει να χρησιμοποιείται μια standard τιμή αναφοράς για 0 dB ώστε κάθε τιμή σε dB πάνω η κάτω από αυτή την τιμή να μπορεί να εκφράσει μια συγκεκριμένη ποσότητα ενός μεγέθους. Αυτό γίνεται πιο σαφές με την παρακάτω διατύπωση:

*Η μέγιστη τιμή στάθμης εξόδου της κονσόλας είναι +20 dB.*

Αυτή η πρόταση δεν έχει κανένα νόημα γιατί δεν ορίζεται η μηδενική αναφορά για το dB. Είναι το ίδιο ασαφές σαν να λέμε σε κάποιον μπορώ να κάνω 20 sec χωρίς να εξηγήσει τίποτα παραπάνω.

*Η μέγιστη τιμή εξόδου της κονσόλας είναι +20 db πάνω από το 1 mW.*

Εδώ όταν έχουμε 0 dB σημαίνει ότι η ισχύς είναι 1 mW. Θα είναι:  $20 \text{ dB} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$ , οπότε

$P = 100 \text{ mW}$ . Η παραπάνω έκφραση δείχνει λοιπόν ότι η κονσόλα μπορεί να δώσει σε ένα φορτίο μέχρι και 100 mW ισχύ. Από το πρώτο παράδειγμα γίνεται φανερό η έννοια της σχετικής στάθμης και από το δεύτερο η έννοια της απόλυτης στάθμης.

## 1.2 ΣΤΑΘΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

### 1.2.1 Το dBm

Το dbm εκφράζει στάθμη ηλεκτρικής ισχύος και έχει πάντα σαν αναφορά το 1 mW. Αυτό σημαίνει ότι  $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$ . Το dBm δεν έχει άμεση σχέση με τάσεις και φορτία. Τα κυκλώματα στα οποία χρησιμοποιούνταν για μετρήσεις όταν ορίστηκε ήταν οι τηλεφωνικές γραμμές που είχαν αντίσταση 600 ohm. Εφόσον η ισχύς αναφοράς είναι 1 mW, τότε  $V = 0.775 \text{ volt}$  (αποδείξτε το). Έτσι το παραπάνω παράδειγμα γίνεται

*Η μέγιστη τιμή εξόδου της κονσόλας είναι +20 dbm.*

Αυτή η πρόταση είναι φανερό ότι έχει το ίδιο νόημα με το δεύτερο παράδειγμα του προηγούμενου κεφαλαίου, έχει δηλαδή στάθμη αναφοράς το 1 mW. Η πρόταση θα μπορούσε επίσης να είναι:

*Η μέγιστη τιμή εξόδου της κονσόλας είναι +20 dbm στα 600 ohm.*

Αυτό μας λέει ότι και το προηγούμενο, μας δίνει όμως επιπροσθέτως την πληροφορία ότι το φορτίο είναι 600 ohm. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την μέγιστη τάση για το φορτίο αυτό που βρίσκεται ότι είναι 0.775 volt rms. Το dBm χρησιμοποιείτε στις περιπτώσεις που αναφέρεται σε φορτίο το οποίο γνωρίζουμε ότι είναι 600 ohm. Στην πράξη σήμερα το dBm χρησιμοποιείτε όταν κάποια διάταξη οδηγεί πολύ μεγάλου μήκους καλώδια σαν αυτά που χρησιμοποιούνται στα P.A. συστήματα ή στις εγκαταστάσεις των studio όπου χρησιμοποιούνται τα ισοσταθμισμένα κυκλώματα 600 ohm για την μείωση του θορύβου και των απωλειών στις υψηλές συχνότητες.

Μαθηματικά, η στάθμη μιας ηλεκτρικής ισχύος  $W$  σε dBm μπορεί να οριστεί ως:

$$L (\text{σε dBm}) = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}, \text{ όπου } W_{ref} = 0.001 \text{ Watt} \quad (1.4)$$

### 1.2.2 Το dBu

Οι περισσότερες σύγχρονες συσκευές ήχου (κονσόλες, κασετόφωνα, επεξεργαστές σήματος κ.λπ.) χρησιμοποιούν τα επίπεδα τάσης και όχι τα επίπεδα ισχύος. Τα επίπεδα ισχύος δεν είναι λειτουργικά εκτός από τις διατάξεις ενισχυτών ισχύος που οι αντιστάσεις των φορτίων (ηχεία) είναι δεδομένες (4, 8, 16 ohm) όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση της έννοιας της ισχύος είναι αρκετά βολική. Όπως είπαμε και παραπάνω η αναφορά σε ισχύ προϋποθέτει την γνώση της τιμής του φορτίου που αναπτύσσεται κι αυτό κάνει τα πράγματα πολύπλοκα, κάτι που δεν είναι στην φιλοσοφία του dB.

Για τους παραπάνω λόγους ορίστηκε μια καινούρια παράμετρος, το dBu. Το dBu είναι πιο κατάλληλο για να εκφράσει τάσεις εισόδου και εξόδου. Η σχέση που συνδέει το dBu με το dBm είναι ότι εκφράζουν την ίδια τάση στη θέση μηδενισμού (0 dBm, 0 dBu) εάν και μόνον αναφέρονται στο ίδιο φορτίο με τιμή 600 ohm. Κατά συνέπεια όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει η τάση αναφοράς να είναι 0.775 volt. Εν τούτοις η τιμή του dBu δεν εξαρτάται από το φορτίο 0 dBu είναι πάντα 0.775 volt. Ένα παράδειγμα:

- Η μέγιστη τάση εξόδου της κονσόλας είναι +20 dbu

$$\text{Αυτό σημαίνει: } 20 \text{ dBu} = 20 \times \log \frac{V}{0.775} \Rightarrow V = 7.75 \text{ volt}$$

Μαθηματικά, η στάθμη μιας ηλεκτρικής τάσης σε dBu μπορεί να οριστεί ως:

$$L (\text{σε dBu}) = 20 \log \frac{V}{V_{ref}}, \text{ όπου } V_{ref} = 0.775 \text{ Volt} \quad (1.5)$$

### 1.2.3 dBV και dBW

Το dBV είναι μια έκφραση παρόμοια με το dBu, εκφράζει δηλαδή λόγο τάσεων με μόνη διαφορά την τάση αναφοράς που είναι 1 volt rms. Είναι δηλ. 0 dBV = 1 volt rms.

Με μια αντίστοιχη λογική ορίζεται και το dBW που όπως καταλαβαίνουμε έχει σαν αναφορά το 1 Watt. Είναι δηλαδή: 0 dBW = 1 Watt.

### 1.2.4 Το dB SPL

Η έννοια του dB μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει και στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL, δηλαδή Sound Pressure Level). Ο ασθενέστερος ήχος (ελάχιστος ακουστός) που μπορεί να αντιληφθεί ένα υγιές ανθρώπινο αυτί έχει εύρος 20 μPa το οποίο ισοδυναμεί με 5 δις φορές λιγότερο από την κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Αυτή η μεταβολή της πίεσης των 20 μPa είναι τόσο μικρή που προκαλεί μια απόκλιση του τυμπάνου του ανθρώπινου αυτιού μικρότερη από

τη διάμετρο ενός μορίου υδρογόνου. Κατά θαυμαστό τρόπο, το αυτί αντέχει ηχητικές πιέσεις πάνω από ένα εκατομμύριο φορές υψηλότερες των 20 μPa. Εάν, λοιπόν, η μέτρηση του ήχου γινόταν σε Pa θα προέκυπταν πολύ μεγάλα και δύσχρηστα αριθμητικά ποσά. Για αυτό χρησιμοποιείται και εδώ η κλίμακα των dB.

Το dB όπως είπαμε δεν είναι μία απόλυτη μονάδα μέτρησης. Είναι μία αναλογία μεταξύ ενός μετρούμενου μεγέθους και ενός συμφωνημένου επιπέδου αναφοράς. Εδώ χρησιμοποιούνται τα 20 μPa ως ηχητική πίεση αναφοράς. Το κατώφλι ακοής ορίζεται λοιπόν ως 0 dB SPL = 20 μPa. Κάθε φορά που πολλαπλασιάζετε επομένως η ηχητική πίεση επί 10, προστίθενται 20 dB στη στάθμη των dB SPL. Με χρήση λοιπόν της λογαριθμικής αυτής κλίμακας καθίσταται δυνατό να περιληφθεί επί του άξονα των σταθμών ηχητικής πίεσης η ευρύτερη περιοχή των εντάσεων μεταξύ των μόλις ακουστών ήχων και των ισχυρότατων ήχων. Τα 20.000.000 μPa (δηλαδή 20 Pa) αντιστοιχούν σε 120 dB. Ο πόνος για το ανθρώπινο αυτί αρχίζει στα 120 dB.

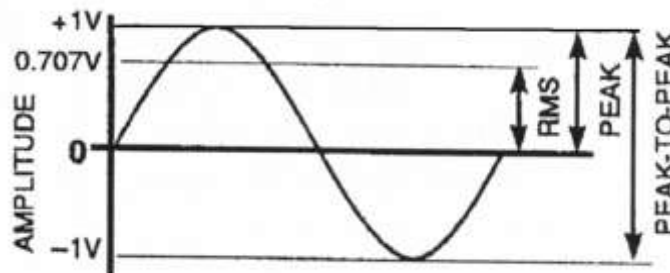
Μαθηματικά, η στάθμη ακουστικής πίεσης μπορεί να οριστεί ως:

$$L_p(\text{σε dB SPL}) = 20 \log \frac{p}{p_{ref}}, \text{ όπου } p_{ref} = 20 \mu\text{Pa} \quad (1.6)$$

### 1.3 ΜΕΣΕΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ (RMS)

Το RMS είναι μια σύντμηση για το Root Mean Square (τετραγωνική ρίζα μέσης τιμής τετραγώνων). Είναι μια μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται στην ηλεκτροακουστική για να περιγράψει την ένταση ενός ηλεκτρικού σήματος ή μιας ακουστικής διαταραχής. Το RMS είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθότι μας δίνει μία τιμή για να περιγράψουμε την ενέργεια που έχουμε σε μια κυματομορφή ηλεκτρικής τάσης ή ακουστικής πίεσης, όσο σύνθετη και αν είναι αυτή. Δεν είναι μέγιστη τιμή (peak level), ούτε μέση τιμή (average), αλλά λαμβάνεται από το τετράγωνο όλων των στιγμιαίων τάσεων μιας κυματομορφής, τον υπολογισμό του μέσου όρου των τετραγωνικών αυτών τιμών και τέλος την τετραγωνική ρίζα αυτού του αριθμού.

Για ένα ημιτονικό σήμα, η τιμή RMS προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την peak τιμή με μια σταθερά. Συγκεκριμένα, η τιμή RMS ενός ημιτονικού σήματος είναι 0,707 φορές η τιμή peak του κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Σχέση μεταξύ RMS, Peak και Peak-to-peak τιμής για ένα ημιτονικό σήμα.

Για ένα μη περιοδικό σήμα (όπως η ομιλία ή η μουσική), η τιμή RMS μπορεί μόνο να υπολογιστεί. Έχοντας ως παράδειγμα τις μεταβολές της ακουστικής πίεσης  $p(t)$ , η RMS τιμή της μεταβολής μπορεί να υπολογιστεί για ένα παράθυρο χρόνου από 0 έως  $T$  ως

$$p_{RMS} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \right)^{1/2} = \sqrt{\overline{p(t)^2}} \quad (1.7)$$

Η προκύπτουσα τιμή είναι ουσιαστικά και η τιμή που μπαίνει στον αριθμητή της σχέση για τον υπολογισμό της ακουστικής στάθμης στην Εξ. (1.6). Σε αντιστοιχία με την περίπτωση της ακουστικής πίεσης, η RMS τιμή μιας μεταβολής τάσης  $V(t)$  μπορεί να υπολογιστεί ως

$$V_{RMS} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt \right)^{1/2} = \sqrt{\overline{V(t)^2}} \quad (1.8)$$

και η τιμή  $V_{RMS}$  είναι ουσιαστικά η τιμή που μπαίνει στον αριθμητή της Εξ. (1.5) για τον υπολογισμό της στάθμης σε dBu. Βλέπουμε λοιπόν ότι οι RMS τιμές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τους υπολογισμό μιας στάθμης πίεσης σε dB SPL ή μιας στάθμης τάσης σε dBu.

Σε RMS τιμές γίνεται συχνά αναφορά από την πλευρά της ισχύος, τόσο όταν πρόκειται για ηλεκτρική όσο και για ακουστική ισχύ. Πχ σε προδιαγραφές ενισχυτών ή ηχείων βλέπει κανείς συχνά όρους όπως Watt RMS. Η RMS τιμή όταν πρόκειται για ισχύ έχει κατ' ουσία την έννοια της μέσης τιμής (average). Σε αντίθεση με την ηλεκτρική τάση και την ακουστική πίεση, οι στιγμιαίες μεταβολές είναι πάντα θετικές ποσότητες και επομένως η μέση (ή RMS) τιμή υπολογίζεται χωρίς να είναι ανάγκη το ύψωμα στο τετράγωνο και κατά ακολουθία ή χρήση της τετραγωνικής ρίζας. Έτσι, αν  $W(t)$  είναι οι στιγμιαίες μεταβολές της ισχύος μπορεί κανείς να υπολογίζει μέση τιμή με χρήση του τύπου

$$W_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt = \overline{W(t)}. \quad (1.9)$$

## 1.4 ΠΡΟΣΘΕΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ<sup>1</sup>

Εδώ θα ασχοληθούμε με την πρόσθεση ηχητικών σημάτων που προέρχονται από διαφορετικές ηχητικές πηγές. Εξετάζουμε την περίπτωση όπου ένας ήχος είναι το σύνολο από πολλές ανεξάρτητες ηχητικές πηγές, όπως θα ήταν για παράδειγμα αν βγούμε στο δρόμο, όπου ο θόρυβος δημιουργείται ταυτόχρονα από τα αυτοκίνητα, από σήματα ομιλίας των ανθρώπων, από το θόρυβο που κάνουν τα τζιτζίκια, από ένα αεροπλάνο που τυχόν περνάει κλπ κλπ.

Η μεταβολή της ακουστικής πίεσης σε ένα χώρο με πολλές πηγές μπορεί να αναπαρασταθεί από το απλό άθροισμα των συνιστωσών της ηχητικής πίεσης από κάθε πηγή.

---

<sup>1</sup> Η ενότητα 1.4 είναι μέσα στην παλιά ύλη αλλά όχι στην καινούρια.

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots \quad (1.10)$$

Για την περίπτωση του δρόμου είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι το ηχητικό σήμα από κάθε πηγή θορύβου είναι ασυσχέτιστο με κάθε άλλο σήμα. Αυτό σημαίνει ότι οι χρονικές μεταβολές δύο οποιονδήποτε διαφορετικών συνιστωσών  $p_i(t)$  και  $p_j(t)$  είναι στατιστικά αδύνατο να παρουσιάζουν κάποιο κοινό σχέδιο, η μια φανερά συσχετίση όπως λέμε μεταξύ τους. Σε μια τέτοια περίπτωση λέμε ότι οι ηχητικές πηγές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, γεγονός που αποδίδεται μαθηματικά από τη σχέση

$$\overline{p_i(t)p_j(t)} = 0 \text{ για } i \neq j \quad (1.11)$$

Υψώνοντας το αριστερό και το δεξί μέλος της Σχέσης (1.10) στο τετράγωνο και παίρνοντας τη μέση τιμή καταλήγουμε σε μια σχέση της μορφής

$$\overline{(p^2(t))} = \overline{p_1^2(t)} + \overline{p_2^2(t)} + \overline{p_3^2(t)} + \dots + 2\overline{p_1(t)p_2(t)} + 2\overline{p_1(t)p_3(t)} + 2\overline{p_2(t)p_3(t)} + \dots$$

Λόγω της (1.11) η σχέση αυτή καταλήγει στη μορφή

$$p^2 = p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots \quad (1.12)$$

όπου βέβαια, με  $p_i$  εννοούμε RMS τιμές (βλ. Εξ. 1.7), αγνοώντας όμως τον δείκτη RMS για συντομία. Το μέγεθος  $p^2$  λέγεται *μέση τετραγωνική ισχύ* και δεν είναι δηλαδή άλλο από το τετράγωνο της μέσης τετραγωνικής τιμής. Βλέπουμε λοιπόν ότι η συνολική μέση τετραγωνική ισχύ είναι ίση με το άθροισμα όλων των μέσων τετραγωνικών ισχύων  $p_1^2, p_2^2, p_3^2, \dots$  των επιμέρους ηχητικών πηγών.

Αυτό σημαίνει ότι όλες οι πηγές δρουν προσθετικά στη διαμόρφωση της συνολικής στάθμης της πίεσης. Αν λοιπόν γνωρίζω την στάθμη ηχητικής πίεσης σε dB κάθε πηγής χωριστά, τότε μπορώ να υπολογίσω τη συνολική ηχητική στάθμη. Συγκεκριμένα, αν  $L_i$  η στάθμη πίεσης της  $i$  πηγής τότε θα ισχύει  $p_i = 10^{\frac{L_i}{20}}$ , επομένως  $p_i^2 = 10^{\frac{L_i}{10}}$  και άρα, σύμφωνα με την (1.12), θα ισχύει

$$L_{ολ} = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} + \dots \right), \quad (1.13)$$

όπου  $L_{ολ} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}}$  είναι η στάθμη της ηχητικής πίεσης από όλες τις πηγές και  $L_1, L_2, L_3, \dots$ , η

στάθμη ηχητικής πίεσης της κάθε πηγής χωριστά. Από την (1.12) βλέπουμε ότι αν θεωρήσουμε ότι  $p_1 = p_2 = \dots = p_N$ , τότε η συνολική μέση τετραγωνική τιμή της πίεσης  $p$  θα είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του  $N$  (δηλαδή  $\sqrt{N}$ ), όπου  $N$  είναι ο αριθμός των πηγών, θεωρώντας ότι οι πηγές, αν και είναι διαφορετικές μεταξύ τους, συνεισφέρουν όλες με μια κοινή στάθμη ηχητικής πίεσης  $L$ . Επίσης, κάθε φορά που διπλασιάζεται ο αριθμός των ηχητικών σημάτων που

αθροίζονται σε κάποια αρτηρία της κονσόλας, θα έχουμε +3dB αύξηση στη μέση τετραγωνική τιμή του σήματος που διέρχεται από την αρτηρία (από τη χαρακτηριστική λογαριθμική τιμή  $10\log\sqrt{2} = 3 \text{ dB}$ .)

Επίσης, πολλές φορές που επεξεργαζόμαστε πολλά ηχητικά σήματα μαζί, η θεώρηση αυτή μας δίνει ένα εύκολο τρόπο να μετράμε τη στάθμη πίεσης μιας ηχητικής πηγής, παρουσία ενός θορύβου βάθους που είναι συνήθως αναπόφευκτος. Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε τη στάθμη μιας πηγής θορύβου, όπως πχ. μία ηλεκτρογεννήτρια σε κάποιο εξωτερικό χώρο. Όταν η ηλεκτρογεννήτρια δεν λειτουργεί μετράμε με το ηχόμετρο μια στάθμη  $L_0$  (σε dB) η οποία οφείλεται στον ήδη υπάρχων θόρυβο από το γύρω ακουστικό περιβάλλον (πχ. κίνηση στο δρόμο, άνεμος, τζιτζίκια κλπ, κλπ). Όταν η ηλεκτρογεννήτρια λειτουργήσει, η στάθμη θορύβου προφανώς θα αυξηθεί αλλά η ένδειξη του ηχομέτρου θα συνυπολογίζει και όλο το θόρυβο βάθους που υπάρχει. Αν  $L_{ολ}$  αυτή η ένδειξη του ηχομέτρου, τότε μπορώ να θεωρήσω ότι το ηχητικό σήμα από την ηλεκτρογεννήτρια είναι ασυσχέτιστο με το ηχητικό σήμα από το θόρυβο περιβάλλοντος και επομένως, θεωρώντας ότι η στάθμη θορύβου μόνο από την ηλεκτρογεννήτρια είναι  $L_1$  μπορώ σύμφωνα με τη Σχέση (1.13) να γράψω

$$L_{ολ} = 10\log_{10} \left( 10^{\frac{L_0}{10}} + 10^{\frac{L_1}{10}} \right). \quad (1.14)$$

Μπορώ επομένως να υπολογίζω τη στάθμη θορύβου της ηλεκτρογεννήτριας κάνοντας αφαίρεση ως

$$L_1 = 10\log_{10} \left( 10^{\frac{L_{ολ}}{10}} - 10^{\frac{L_0}{10}} \right). \quad (1.15)$$

## 1.5 ΣΧΕΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

### 1.5.1 Σχέσεις σήματος προς θόρυβο

Από εμπειρία είναι σε όλους μας γνωστό ότι μια ηχητική πληροφορία χάνεται όταν η στάθμη της είναι χαμηλή σε σχέση με άλλους ήχους που είναι ταυτόχρονα παρόντες στο ηχητικό περιβάλλον. Όταν είμαστε στο μπαρ και χτυπήσει το τηλέφωνο συχνά βγαίνουμε έξω για να μπορέσουμε να καταλάβουμε τι λέει ο συνομιλητής μας και για να μπορέσει και αυτός να καταλάβει τι του λέμε εμείς. Είναι πολλές φορές σημαντικό να εκφράζουμε το βαθμό που μια ηχητική πληροφορία υπερέρχει σε σχέση με ένα θόρυβο ή ένα άλλο η περισσότερους ήχους που συνυπάρχουν. Η πιο κοινή ονομασία ενός τέτοιου μεγέθους είναι η *σχέση σήματος προς θόρυβο* (Signal to Noise Ratio – SNR) που για την περίπτωση της πίεσης ορίζεται (σε dB)

$$SNR = 20\log_{10} \frac{P_1}{P_2}, \quad (1.16)$$

όπου  $p_1$  και  $p_2$  είναι η μέση τετραγωνική τιμή της πίεσης του κυρίως σήματος και του θορύβου αντίστοιχα. Το μέγεθος αυτό είναι σε πλήρη αντιστοιχία με το

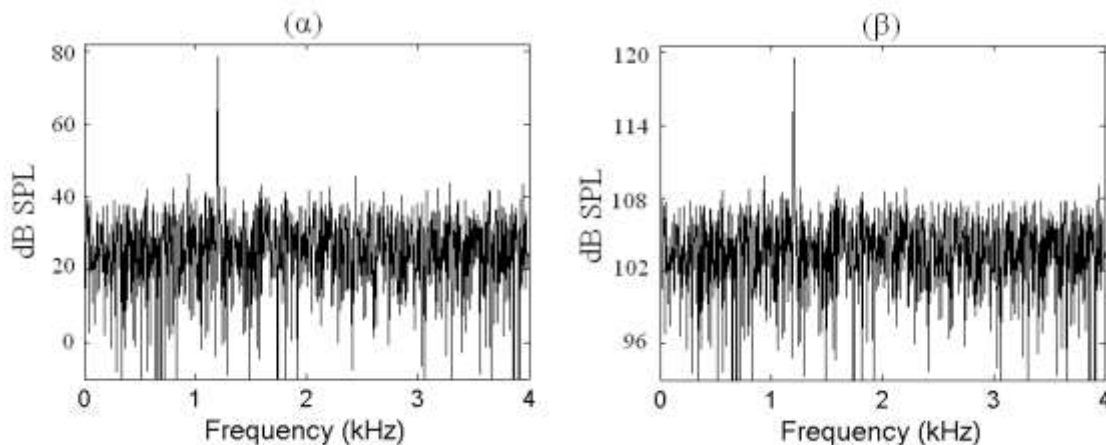
$$SNR = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2}, \quad (1.17)$$

όπου τα  $V_1$  και  $V_2$  συμβολίζουν τις αντίστοιχες RMS τιμές της τάσης του κυρίως σήματος και του θορύβου.

Από τις σχέσεις αυτές είναι φανερό ότι αν  $L_1$  και  $L_2$  οι στάθμες ηχητικής πίεσης του σήματος και του θορύβου σε (dB-SPL ή σε dBu) μπορούμε να γράψουμε

$$SNR = L_1 - L_2. \quad (1.18)$$

**Παράδειγμα:** Παρακάτω φαίνεται η απόκριση συχνότητας ενός ηχόμετρου για ένα ημιτονικό ήχο συχνότητας 1.2 kHz σε περιβάλλον θορύβου. Ποιό από τα δύο διαγράμματα φανερώνει μεγαλύτερη τιμή SNR; Χαρακτηρίστε το είδος του θορύβου που υπάρχει στη μέτρηση.



Σχήμα 1.2 Διαγράμματα πλάτους συχνότητας που δείχνουν την παρουσία σήματος 1.2 kHz σε λευκό θόρυβο

**Απάντηση:** Από τα σχήματα βλέπουμε ότι ο θόρυβος έχει σταθερό πλάτος ανά συχνότητα (ανά Hz), επομένως είναι λευκός θόρυβος. Βλέπουμε επίσης ότι η μέση στάθμη του θορύβου στο διάγραμμα (α) είναι περίπου 30 dB SPL και στο διάγραμμα (β) είναι 105 dB SPL. Η στάθμη του κυρίως σήματος είναι 80 dB SPL στο (α) και στο (β) είναι 120 dB SPL. Στο (α) φαίνεται λοιπόν ένα  $SNR=80-30=50$  dB και στο (β) ένα  $SNR=120-105=15$  dB. Επομένως, μεγαλύτερη τιμή SNR φανερώνει το διάγραμμα (α).

Η σχέσεις της μορφής  $\frac{p_1}{p_2}$  και  $\frac{V_1}{V_2}$  εμφανίζονται συχνά όχι μόνο για να εκφράσουν τη σχέση μεταξύ δύο διαφορετικών πιέσεων ή σημάτων, αλλά και για να εκφράσουν εξασθένηση ή

ενίσχυση του ίδιου του σήματος, σε σχέση με τη μεταβολή κάποιου παράγοντα όπως η απόσταση, η ισχύς, η γωνία σε σχέση με μία κατευθυντική πηγή και άλλα.

### 1.5.2 Συνακρόαση (Crosstalk)

Η διαρροή του σήματος που δημιουργείται μεταξύ των κυκλωμάτων και των καλωδίων περιγράφεται από μία τιμή σε dB που λέγεται *συνακρόαση* ή *διαχωρισμός*. Ο ορισμός της συνακρόασης και του διαχωρισμού είναι πανομοιότυπος με τον ορισμό της σχέσης σήματος προς θόρυβο, με τη διαφορά ότι τα σήματα που συγκρίνονται δεν είναι απαραίτητα θόρυβος. Η τιμή της συνακρόασης υπολογίζεται μεταξύ του αριστερού και του δεξιού καναλιού εξόδου

(main output) της κονσόλας μέσω της σχέσης:  $\text{Crosstalk(dB)} = 20 \log \frac{V_{out,Left}}{V_{out,Right}}$ , όπου έχουμε

θεωρήσει ότι το rap-rot έχει ρυθμιστεί ώστε να στέλνει όλο το σήμα στο δεξί (right) κανάλι..

### 1.5.3 Διάδοση στο ελεύθερο πεδίο

Από το μάθημα «Εισαγωγή στην Ακουστική» γνωρίζετε ότι η εξασθένηση ή ενίσχυση του σήματος ενός μικροφώνου όταν πλησιάζει η απομακρύνεται από την πηγή υπολογίζεται με

βάση τον λόγο των αποστάσεων  $\frac{r_2}{r_1}$ . Αν σε μια απόσταση  $r_1$  από την πηγή το ηχόμετρο

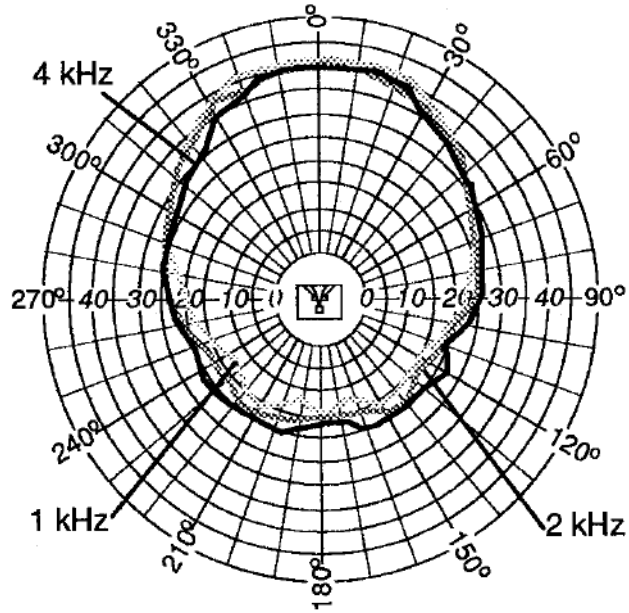
καταγράφει μια στάθμη πίεσης  $L_1$ , κατά τη μετάβαση σε μια άλλη θέση  $r_2$ , μπορώ να υπολογίσω ότι για τη νέα στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_2$  θα ισχύει

$$20 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = L_2 - L_1 = 20 \log_{10} \frac{r_1}{r_2}. \quad (1.19)$$

Αυτή η σχέση ισχύει βέβαια για τον ανεμπόδιστο ήχο, όπου η ηχητική πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από την πηγή. Περισσότερα σχετικά με τη διάδοση του ήχου στο ελεύθερο πεδίο μπορείτε να βρείτε στα κεφάλαια 2 και 8 του συγγράμματος «Ηλεκτρακουστική» του κ. Παπανικολάου.

### 1.5.4 Κατευθυντικότητα

Τα περισσότερα μικρόφωνα και ηχεία εμφανίζουν κατευθυντική συμπεριφορά. Λόγω της κατευθυντικότητας, η στάθμη ηχητικής πίεσης (ή ηλεκτρικής τάσης) που παράγεται μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει το σημείο μέτρησης (ή η πηγή) με τον άξονα του ηχείου (ή του μικροφώνου). Από τα διαγράμματα που ορίζουν την κατευθυντικότητα του ηχείου μπορεί να μας ζητηθεί να υπολογίσουμε τη στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάποια γωνία όταν μας δίνεται η στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάποια άλλη γωνία και σε κάποια άλλη απόσταση. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι μια πιο αναλυτική περιγραφή για τα ηχεία δίνεται στο Κεφ. 6.



Σχήμα 1.3. Πολικό διάγραμμα ηχείου

**Παράδειγμα:** Ένα ηχείο έχει τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Σε ένα ανηχοικό θάλαμο μετρήσαμε τη στάθμη ηχητικής πίεσης για ένα ημιτονικό σήμα 4kHz σε μία απόσταση  $r=3$  m πάνω στον άξονα ( $\theta=0^\circ$ ) και βρήκαμε 80 dB SPL. Πόση θα είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης αν στρέψουμε το ηχείο  $60^\circ$  σε σχέση με τον κύριο άξονα χωρίς να μεταβάλουμε την απόσταση;

**Απάντηση:** Από το Σχήμα 1.3 βλέπουμε ότι ο κάθε ομόκεντρος κύκλος από τον επόμενο αντιστοιχεί σε αύξηση 5 dB. Στις  $0^\circ$  το πολικό διάγραμμα αντιστοιχεί μια τιμή 40 dB, ενώ στις  $60^\circ$  αυτή η τιμή έχει μειωθεί στα 30 dB. Αυτό σημαίνει ότι στροφή του ηχείου κατά  $60^\circ$  αντιστοιχεί σε πτώση της SPL κατά 10 dB. Επομένως, η απάντηση στο ερώτημα είναι  $80-10=70$  dB SPL.

**Παράδειγμα:** Ένα ηχείο έχει τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Σε ένα ανηχοικό θάλαμο μετρήσαμε τη στάθμη ηχητικής πίεσης για ένα ημιτονικό σήμα 4kHz σε μία απόσταση  $r_1=3$  m πάνω στον άξονα ( $\theta=0^\circ$ ) και βρήκαμε 100 dB SPL. Πόση θα είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης αν στρέψουμε το ηχείο  $60^\circ$  σε σχέση με τον κύριο άξονα και αυξήσουμε την απόσταση στα  $r_2=12$  m;

**Απάντηση:** Παρατηρούμε ότι όλα τα δεδομένα είναι ίδια με πριν, αλλά έχουμε τώρα τετραπλασιασμό της απόστασης σε σχέση με πριν. Κατ' αρχάς, βλέπουμε ότι αν δε μεταβάλαμε την απόσταση, η στάθμη ηχητικής πίεσης στις  $60^\circ$  θα ήταν  $L_1=100-10=90$  dB SPL. Δεδομένου ότι τώρα μεταβάλλεται και η απόσταση, αν  $L_2$  η στάθμη ηχητικής πίεσης στα 12 m θα έχουμε σύμφωνα με την Εξίσωση (1.19),  $L_2 - L_1 = 20 \log_{10} \frac{r_1}{r_2} = 20 \log_{10} \frac{3}{12} = -12$  dB, και επομένως,

$L_2=L_1-12=90-12=78$  dB SPL.

### 1.5.5 Μεταβολές ισχύος

Μια άλλη σημαντική χρήση του λόγου πιέσεων ή του λόγου τάσεων εμφανίζεται κατά την συσχέτισή τους με την ακουστική και την ηλεκτρική ισχύ. Για παράδειγμα, αν για μια δεδομένη ακουστική ισχύ  $W_1$  (σε Watt) παίρνω μια ηχητική πίεση  $p_1$ , τότε, αν η τιμή της ισχύος μεταβληθεί σε  $W_2$ , θα πάρω μια νέα ηχητική πίεση  $p_2$  για την οποία θα ισχύει

$$L_2 - L_1 = 20 \log \frac{p_2}{p_1} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} \quad (1.20)$$

Από αυτή τη σχέση πρέπει να παρατηρήσουμε τη διαφορά στις τιμές μπροστά στον λογάριθμο 20 και 10. Αυτό έχει να κάνει ότι η ισχύς εκφράζει ενέργεια και επομένως σχετίζεται με το τετράγωνο της πίεσης. Παρατηρείστε ότι αύξηση ή μείωση της στάθμης ισχύος κατά ένα αριθμό A, σε dB, αντιστοιχεί σε αύξηση ή μείωση της στάθμης πίεσης κατά τον ίδιο ακριβώς αριθμό A. Σχέσεις σαν αυτές είναι χρήσιμες διότι μας βοηθάνε να κάνουμε εύκολα και γρήγορα πρακτικούς υπολογισμούς όπως στο παράδειγμα που ακολουθεί.

**Παράδειγμα:** Για ένα ηχητικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος 100 Watt που δουλεύει σε πλήρες φορτίο καταγράψω μια στάθμη ηχητικής πίεσης 80 dB σε κάποια θέση. Πόσο πρέπει να αυξηθεί η ισχύς για να αυξήσω τη στάθμη της πίεσης στα 86 dB;

Απάντηση: Θα είναι  $10 \log_{10} \frac{W_2}{W_1} = 86 - 80 = 6 \text{ dB}$  άρα  $\frac{W_2}{W_1} = 10^{6/10}$  άρα  $W_2 = W_1 \cdot 10^{6/10} = W_1 \cdot 4 = 400$

Watt. Παρατηρείστε ότι για να διπλασιαστεί η ηχητική πίεση (+6dB αντιστοιχούν σε διπλασιασμό της πίεσης) η συνολική ισχύς πρέπει να τετραπλασιαστεί.

**Παράδειγμα:** Για ένα ηχητικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος 100 Watt που δουλεύει σε πλήρες φορτίο καταγράψω μια στάθμη ηχητικής πίεσης 80 dB SPL σε κάποια απόσταση  $r_1$ . Ποια θα είναι η στάθμη της πίεσης αν η ισχύς μου υποδιπλασιαστεί και η απόσταση από τη πηγή διπλασιαστεί;

Απάντηση: Πρόκειται για ένα πρόβλημα με δύο μεταβολές καταστάσεων, μία λόγω της απόστασης και μία λόγω της ισχύος. Θα πρέπει προφανώς και οι δύο μεταβολές να ληφθούν υπόψη. Επομένως:

$$L_2 - L_1 = 10 \log_{10} \frac{W_2}{W_1} + 20 \log_{10} \frac{r_1}{r_2} = 10 \log_{10} \frac{1}{2} + 20 \log_{10} \frac{1}{2} = -3 - 6 = -9 \text{ dB}$$

και επομένως  $L_2 = 80 - 9 = 71 \text{ dB SPL}$ .

**Παράδειγμα:** Έχετε αναλάβει να παρέχετε ηχητική κάλυψη σε μία συναυλία εξωτερικού χώρου. Υποθέστε ότι το βάθος του ακροατηρίου είναι 30 m και ότι έχετε ένα full-range ηχείο στη διάθεσή σας με ευαισθησία ελεύθερου πεδίου “94 dB SPL at 1 meter, 1 Watt input”. Αν υποθέσουμε ότι η στάθμη στο πίσω μέρος του ακροατηρίου θέλουμε να είναι 90 dB SPL, βρείτε πόσα Watt θα πρέπει να δίνει ο ενισχυτής που συνδέεται στο ηχείο.

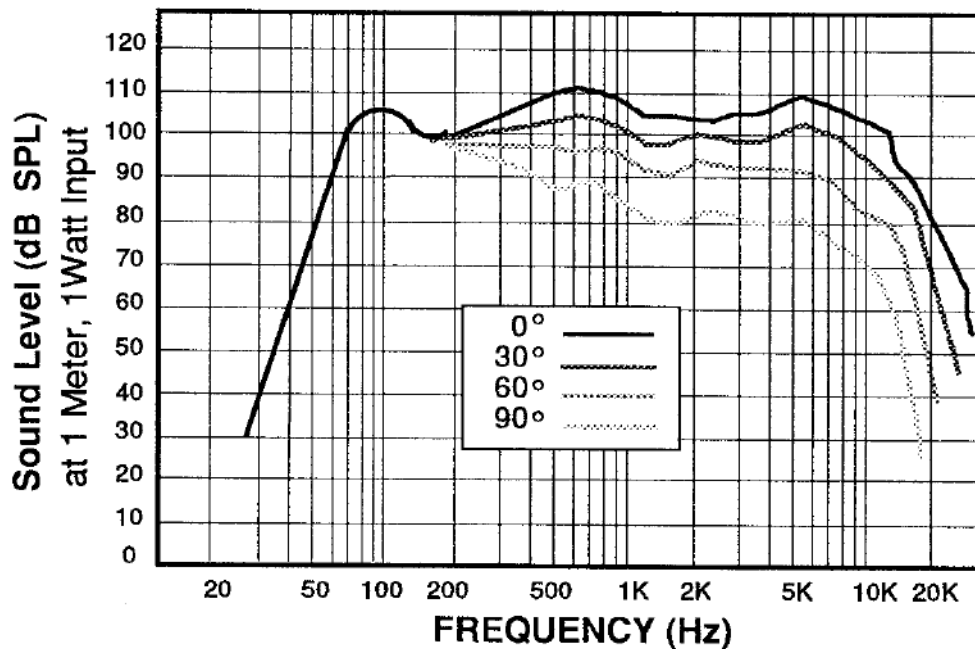
Απάντηση: Θεωρώ μια κατάσταση (1) όπου τα δεδομένα μου είναι  $L_1 = 94 \text{ dB SPL}$ ,  $r_1 = 1 \text{ m}$  και  $w_1 = 1 \text{ Watt}$ , και μια κατάσταση (2) όπου θα έχω  $L_2 = 90 \text{ dB SPL}$ ,  $r_2 = 30 \text{ m}$  και  $w_2$  είναι η άγνωστη

ποσότητα ισχύος που πρέπει να υπολογιστεί. Έχω επομένως πάλι μια εξίσωση μεταβολής καταστάσεων με άγνωστη ποσότητα το  $w_2$  και όλα τα άλλα μεγέθη γνωστά.

$$L_2 - L_1 = 20 \log \frac{r_1}{r_2} + 10 \log \frac{w_2}{w_1}$$

Η τιμή της ισχύος που απαιτείται προκύπτει 355 Watt.

**Παράδειγμα:** Ένα ηχείο, για το οποίο μας δίνεται η καμπύλη συχνοτικής απόκρισης, εκπέμπει ένα ημιτονικό σήμα 1 kHz μέσα σε ανηχοϊκό θάλαμο. Να βρεθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_2$  στα 10 m από το ηχείο αν η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κυρίως άξονα του ηχείου και του σημείου μέτρησης είναι  $30^\circ$  και για ισχύ εισόδου 1Watt. Να βρεθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_3$  στην ίδια γωνία και απόσταση όταν η ισχύς του σήματος εισόδου στο ηχείο αυξηθεί στα 10Watt.



Σχήμα 1.4. Συχνοτική απόκριση ηχείου για διαφορετικές γωνίες

Απάντηση: Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι οι καμπύλες συχνοτικής απόκρισης μετρήθηκαν σε απόσταση 1 m από το ηχείο για ισχύ εισόδου 1 Watt. Πρόκειται δηλαδή για διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης που παρέχει πληροφορία ταυτόχρονα και για την ευαισθησία του ηχείου (βλ κεφ. 6). Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι στις  $30^\circ$ , στο 1kHz, και για ένα μέτρο απόσταση από το ηχείο παίρνουμε μια στάθμη 100 dB SPL. Επειδή πρέπει να υπολογίσουμε τα SPL στα 10 μέτρα, χρησιμοποιήσουμε κατά τα γνωστά τη Σχέση (1.19). Θα είναι λοιπόν

$$L_2 - L_1 = 20 \log_{10} \frac{r_1}{r_2} = 20 \log_{10} \frac{1}{10} = -20 \text{dB} \text{ και επομένως, } L_2 = 100 - 20 = 80 \text{dB SPL. Αν η ισχύς}$$

αυξηθεί από το 1 στα 10 Watt, η διαφορά ισχύος (σε dB) θα μας δώσει την ίδια αύξηση σε SPL.

Επομένως,  $L_3-L_2=10\log_{10}\frac{W_2}{W_1}=10\log_{10}\frac{10}{1}=10\text{dB}$  και η στάθμη ηχητικής πίεσης θα είναι

$$L_3=L_2+10=90\text{dB SPL.}$$

Ένα άλλο παράδειγμα έρχεται από τον ορισμό των ηλεκτρικών μεγεθών της τάσης και της ισχύος. Υπενθυμίζεται στον αναγνώστη ότι μια ηλεκτρική τιμή τάσης  $V_1$  ορίζεται σε dBu μέσω της σχέσης

$$\text{Τάση σε dBu} = 20\log_{10}\frac{V_1}{0.775}$$

που με άλλα λόγια σημαίνει ότι  $0\text{dBu}=0.775\text{ Volt}$ . Επίσης για την ισχύ ισχύει

$$\text{Ισχύς σε dBm} = 10\log_{10}\frac{W_1}{0.001}$$

που με άλλα λόγια σημαίνει ότι  $0\text{dBm}=0.001\text{Watt} = 1\text{mW}$ . Ο ορισμός των dBu και dBm είναι τέτοιος ώστε η ισχύς, εκφρασμένη σε dBm, που καταναλώνεται σε μία αντίσταση  $600\ \Omega$  να έχει την ίδια τιμή, σε dBu, με την τάση στα άκρα της αντίστασης. Όταν λοιπόν η τιμή της αντίστασης είναι διαφορετική από  $600\ \Omega$ , είναι χρήσιμος ο παρακάτω τύπος που συνδέει την ισχύ με την τάση δεδομένου ότι η τιμή της αντίστασης είναι  $R_1$

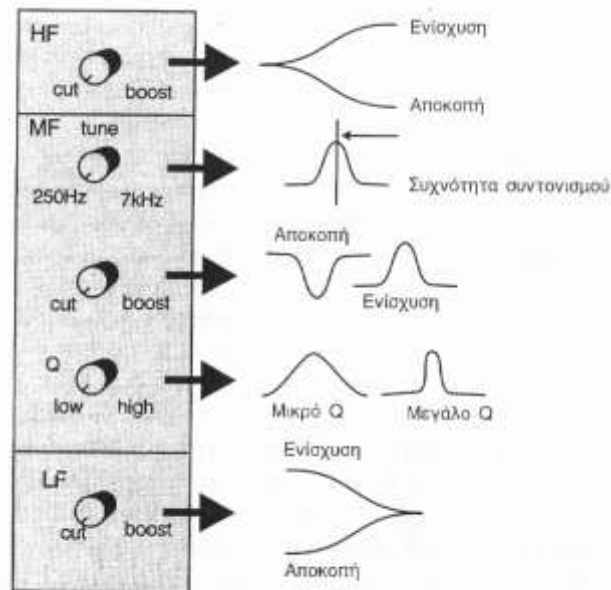
$$\text{Ισχύς σε dBm} = \text{Τάση σε dBu} + 10\log_{10}\frac{600}{R_1}. \quad (1.21)$$

## 2 EQUALIZERS

‘Equalizers’, ή ‘EQ’, ή ‘ισοσταθμιστές’, ή ‘εξισορροπητές’ ή ‘ρυθμιστές ελέγχου τόνου’ ή απλά ‘φίλτρα’, είναι μερικές από τις ονομασίες που επικρατούν για το πολύτιμο αυτό εργαλείο του μουσικού και του ηχολήπτη. Ένα equalizer είναι ένα σύστημα που έχει ως σκοπό να μεταβάλλει τα φασματικά χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος. Η μορφή και ο τρόπος κατασκευής του equalizer μεταβάλλεται ανάλογα με τη χρήση του. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικοί τύποι ισοσταθμιστών και επεξηγείται η χρήση τους ανάλογα με την περίπτωση.

### 2.1 ΤΥΠΙΚΟ EQUALIZER ΚΟΝΣΟΛΑΣ

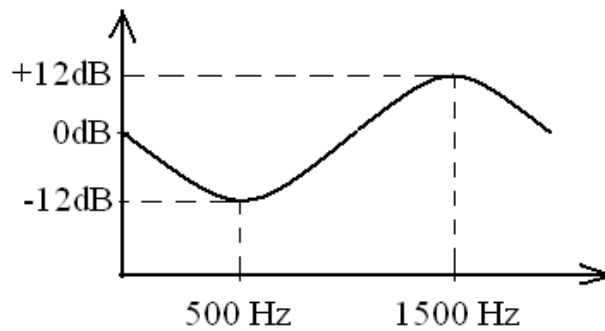
Συχνά θέλουμε να τονίσουμε ή να εξασθενήσουμε κάποιες φασματικές συνιστώσες ενός ηχητικού σήματος ώστε να του δώσουμε κάποια τεχνητά χαρακτηριστικά, με βάση αισθητικά κριτήρια. Πχ, αν εφαρμόσουμε ένα φίλτρο το οποίο εξασθενεί με τη συχνότητα, κάνουμε τον ήχο μας μουντό. Αυτό μπορεί να δώσει την αίσθηση ότι ο ήχος έρχεται από κάποιο άλλο δωμάτιο διαπερνώντας κάποιον τοίχο ή ότι έρχεται από κάποιο μακρινό μέρος, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων. Από την άλλη, τονίζοντας τις μεσαίες συχνότητες και αποκόπτοντας τις χαμηλές και τις υψηλές, μπορούμε σε ένα σήμα φωνής να δώσουμε τα χαρακτηριστική χροιά μιας τηλεφωνικής γραμμής. Μια τυπική μορφή ενός equalizer, όπως συναντάται στα κανάλια εισόδου μίας κονσόλας φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Τυπική μορφή ενός equalizer που συναντάται στα κανάλια εισόδου μίας κονσόλας

Το συγκεκριμένο equalizer είναι τριών περιοχών. Βλέπουμε ότι υπάρχει διαφορετική βαθμίδα για τις χαμηλές (LF), τις μεσαίες (MF) και τις υψηλές συχνότητες (HF). Με κατάλληλη χρήση του περιστροφικού ποτενσιόμετρου μπορούμε λοιπόν να ενισχύσουμε ή να εξασθενήσουμε την κάθε συχνοτική περιοχή. Στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων βλέπουμε ότι μπορούμε να ρυθμίσουμε περισσότερες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, μπορούμε μέσω του ποτενσιόμετρου tune να ορίσουμε την κεντρική συχνότητα στην οποία θέλουμε να επέμβουμε. Για το συγκεκριμένο equalizer βλέπουμε ότι μπορούμε να κινηθούμε οπουδήποτε από τα 250Hz έως τα 7kHz. Μία άλλη παράμετρος που έχουμε στη διάθεσή μας είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων (Q) στο οποίο θέλουμε να επέμβουμε. Ρυθμίζοντας λοιπόν το Q μπορούμε να επέμβουμε σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων (μικρό Q) ή σε στενό εύρος συχνοτήτων (μεγάλο Q), με αποτέλεσμα το φίλτρο μας να γίνεται πιο μυτερό ή πλατύ. Η παράμετρος Q λέγεται και *παράγοντας επιλεκτικότητας* του φίλτρου.

**Παράδειγμα:** Ένα ημιτονικό σήμα συχνότητας 500 Hz και πλάτους 2 V διέρχεται μέσα από ένα equalizer του οποίου η απόκριση συχνότητας φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.2. Να βρεθεί το πλάτος του σήματος στην έξοδο του equalizer. Ποια είναι η αντίστοιχη τιμή του πλάτους για ένα ημιτονικό σήμα 1500 Hz το οποίο εισέρχεται με πλάτος 1 V στο ίδιο equalizer;



Σχήμα 2.2: Συχνοτική απόκριση equalizer

**Απάντηση:** Από το σχήμα φαίνεται ότι το σήμα συχνότητας 500 Hz εξερχόμενο από το equalizer εξασθενεί κατά 12 dB. Αυτό σημαίνει ότι αν  $V_{in}$  και  $V_{out}$  είναι το πλάτος του σήματος στην είσοδο και στην έξοδο του EQ τότε θα ισχύει:

$$20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} = -12 \text{ dB},$$

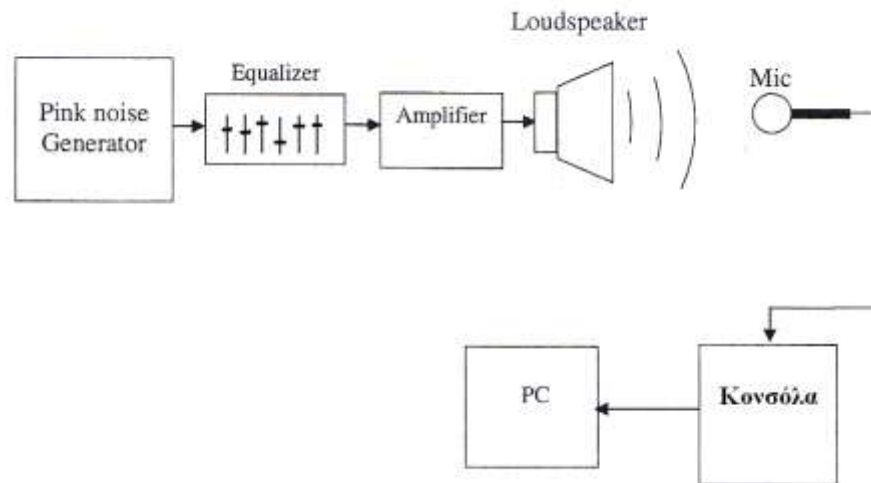
άρα,  $\log \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{12}{20}$  και επομένως,  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 10^{-\frac{12}{20}} = 0.25$ . Τελικά προκύπτει ότι

$V_{out} = 0.25 \cdot V_{in} = 0.5 \text{ Volt}$ . Αντίστοιχα, για το σήμα συχνότητας 1500 Hz θα ισχύει  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 10^{\frac{12}{20}} = 4$  και επομένως  $V_{out} = 4 \text{ Volt}$ . Η επίλυση της συγκεκριμένης άσκησης θα μπορούσε να γίνει και πιο απλά, παρατηρώντας ότι 12 dB μείωση ή αύξηση αντιστοιχούν σε δύο υποδιπλασιασμούς (-12 = -6 - 6) ή δύο διπλασιασμούς (12 = 6 + 6).

## 2.2 Το EQ ΩΣ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΤΗΣ

Αυτή είναι και η πιο συχνή χρήση τέτοιων επεξεργαστών. Ένα ηχητικό σήμα, ιδιαίτερα κατά τη λήψη του με μικρόφωνο είναι δυνατόν να αποκτήσει πλασματικά φασματικά χαρακτηριστικά, τα οποία δεν ακούγονται 'φυσικά' κατά την αναπαραγωγή. Για παράδειγμα, όταν ένας τραγουδιστής φέρνει το μικρόφωνο πολύ κοντά στο στόμα, δημιουργείται το γνωστό ως 'proximity effect' το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύονται πολύ τα μπάσα, οπότε και ο ηχολήπτης πρέπει να τα αφαιρέσει με κατάλληλη χρήση του ρυθμιστή χαμηλών συχνοτήτων. Για μια τέτοια περίπτωση, ένα equalizer σαν αυτό του Σχήματος 2.1 θα μπορούσε να κάνει τη δουλειά. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις που η αντιστάθμιση είναι πιο περίπλοκη φύσης. Εκεί χρειάζεται ένας άλλος τύπος equalizer, το γραφικό equalizer.

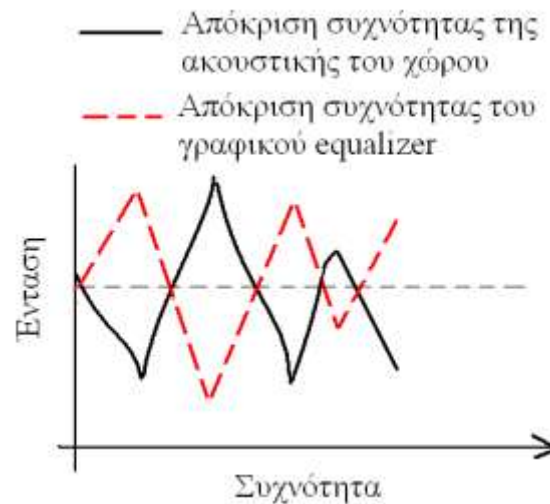
Τα γραφικά equalizer χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση της αλλοίωσης που προκαλεί στις αναπαραγώμενες από τα ηχεία συχνότητες η ακουστική ενός χώρου. Το γραφικό equalizer παρεμβάλλεται μεταξύ του ηλεκτρονικού μέσου αναπαραγωγής (κονσόλα, μίκτης, cd player, κλπ) και ενισχυτή, με σκοπό να μεταβάλει τα φασματικά χαρακτηριστικά του σήματος, πριν αυτό αναπαραχθεί από τα ηχεία, ώστε κατά τη διάδοση του ηχητικού σήματος να αντισταθμιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η επίδραση του χώρου. Η συνήθης συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του γραφικού equalizer φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τυπική συνδεσμολογία κατά τη ρύθμιση του γραφικού equalizer

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται βασικά η συνδεσμολογία κατά τη φάση ρύθμισης του γραφικού Equalizer. Συγκεκριμένα, στη θέση του ηλεκτρονικού μέσου αναπαραγωγής βρίσκεται μία γεννήτρια ροζ θορύβου. Ο ροζ θόρυβος είναι ένα σήμα που περιέχει όλες τις συχνότητες και επιπλέον έχει ομοιόμορφα κατανομημένο φάσμα ανά οκτάβα συχνοτήτων. Στο σημείο όπου θέλουμε να κάνουμε ισοστάθμιση βάζουμε ένα μικρόφωνο αναφοράς. Το μικρόφωνο οδηγεί το ηχητικό σήμα σε έναν υπολογιστή ο οποίος διαθέτει κάποιο φασματικό αναλυτή. Η φύση του ροζ θορύβου και η κατασκευή του φασματικού αναλυτή είναι τέτοια ώστε αν δεν έχουμε φασματική αλλοίωση από την ακουστική του χώρου, τότε θα δούμε μια ευθεία γραμμή

παράλληλη στον άξονα των συχνοτήτων στο φασματικό αναλυτή. Στην πραγματικότητα ωστόσο, ανάλογα με τη φύση του χώρου θα δούμε σίγουρα μια μικρή ή μεγάλη απόκλιση από την ιδανική ευθεία, όπως για παράδειγμα η μαύρη καμπύλη με μέγιστα και ελάχιστα στο διάγραμμα συχνότητας έντασης του Σχήματος 2.4. Το γραφικό Equalizer είναι προφανές ότι θα πρέπει να εξασθενήσει τις συχνοτικές περιοχές που έχουν ενισχυθεί από την επίδραση του χώρου και αντίστοιχα, να ενισχύσει τις περιοχές που έχουν εξασθενήσει. Βλέπουμε δηλαδή ότι οι ρυθμίσεις του equalizer είναι κατά κάποιο τρόπο αντικατροπτικές σε σχέση με την απόκριση του χώρου, ως προς μία ευθεία γραμμή. (βλ. Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Ισοστάθμιση με χρήση γραφικού equalizer

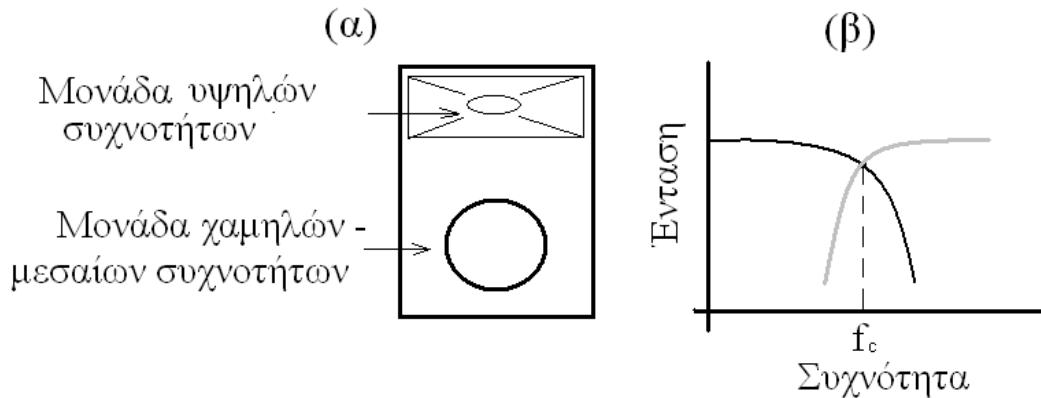
Μετά τη ρύθμιση του equalizer, οι ρυθμίσεις μένουν ως έχουν και στη θέση της γεννήτριας ροζ θορύβου μπαίνει η κονσόλα, το cd player ή οποιοδήποτε άλλο μέσο προορίζεται για την ηχητική αναπαραγωγή στο χώρο.

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο θα πρέπει να αναφέρουμε ωστόσο μερικά μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς, οι συχνότητες είναι σωστές μόνο στο σημείο και στη γειτονική περιοχή που ήταν τοποθετημένο το μικρόφωνο. Σε άλλα σημεία του χώρου πιθανόν να υπάρχει ακόμα ακουστική απόκλιση, ενώ δεν είναι απίθανο τα πράγματα να έχουν χειροτερέψει σε σχέση με πριν την ισοστάθμιση. Επίσης, τα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας μπορούν να αλλάξουν δριμύτητα αν πχ. εισέλθει κόσμος ή ακόμα και αν αλλάξει η θερμοκρασία.

### 2.3 ΚΥΚΛΩΜΑ CROSSOVER ΣΤΑ ΗΧΕΙΑ

Η αναπαραγωγή των διαφορετικών περιοχών συχνοτήτων στα ηχεία γίνεται συνήθως από διαφορετικές μονάδες. Άλλη μονάδα είναι υπεύθυνη για την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων (sub woofer), άλλη για την αναπαραγωγή των υψηλών συχνοτήτων (twitter) ενώ συχνά χρησιμοποιείται ξεχωριστή μονάδα και για τις μεσαίες συχνοτητες (mid-range). Υπάρχει επομένως η ανάγκη για τη χρήση φίλτρων με τα οποία διαχωρίζεται το συχνοτικό περιεχόμενο

του προγράμματος, ώστε η κατάλληλα φιλτραρισμένη εκδοχή του ηχητικού σήματος να πηγαίνει στην κατάλληλη βαθμίδα του μεγαφώνου. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 2.5(α) όπου φαίνεται ένα ηχείο με δύο διαφορετικές μονάδες, μία για αναπαραγωγή χαμηλών - μεσαίων συχνοτήτων και μία υψηλής. Για ένα τέτοιο ηχείο χρειάζονται δύο διαφορετικά φίλτρα των οποίων η απόκριση συχνότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5(β). Είναι φανερό ότι εκεί που μειώνεται η απόκριση του ενός φίλτρου θα πρέπει να ξεκινάει η απόκριση του άλλου ώστε να μη δημιουργείται συχνοτικό κενό. Η συχνότητα που συναντώνται τα δύο φίλτρα ονομάζεται συχνότητα crossover και συμβολίζεται με  $f_c$ .



Σχήμα 2.5: Χρήση crossover για διαχωρισμό της συχνοτικής περιοχής του ηχητικού σήματος κατά την αναπαραγωγή του από το ηχείο.

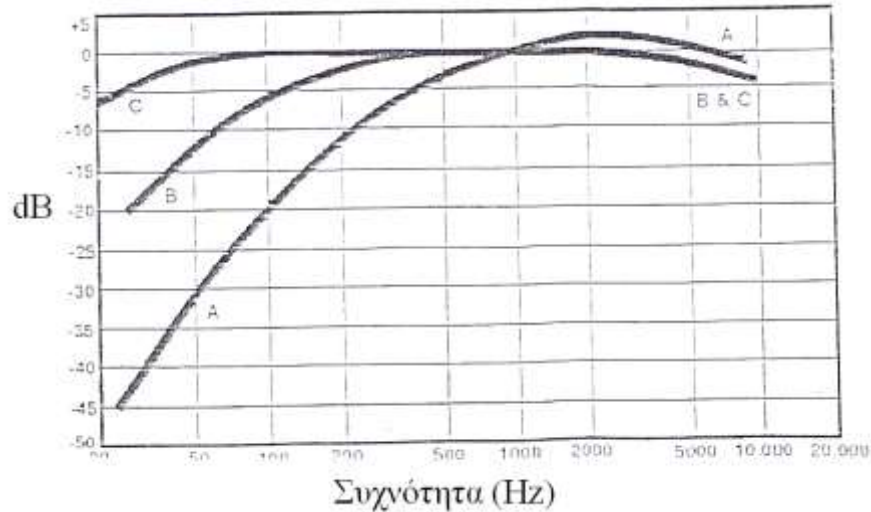
Ο συχνοτικός διαχωρισμός του ηχητικού σήματος είναι δυνατόν να γίνεται

- Μετά τον ενισχυτή, οπότε τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως παθητικά και κατάλληλα κατασκευασμένα ώστε να επεξεργαστούν σήμα ισχύος, γεγονός που τα διαφοροποιεί από τα άλλα φίλτρα στα οποία δεν υπάρχει η απαίτηση να δουλεύουν σε μεγάλα ρεύματα
- Πριν τον ενισχυτή, οπότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός ενισχυτής για κάθε μονάδα συχνοτήτων. Σε μια τέτοια περίπτωση, η συχνότητα crossover είναι δυνατόν να ρυθμίζεται από τον ηχολήπτη ανάλογα με το είδος της μουσικής και το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται.

## 2.4 ΦΙΛΤΡΑ A, B, C ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΟΥ

Λόγω της μεταβλητής ευαισθησίας της ανθρώπινης ακοής με τη συχνότητα, απαιτείται συχνά στις ακουστικές μετρήσεις η χρήση τυποποιημένων φίλτρων τα οποία εξασθενούν ή ενισχύουν κάποιες περιοχές συχνοτήτων, προσομοιώνοντας έτσι την ευαισθησία της ακοής. Αυτά είναι τα λεγόμενα φίλτρα βάρους A, B και C των οποίων η απόκριση φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Τα φίλτρα

αυτά είναι απαραίτητα όταν κάνουμε ηχητικές μετρήσεις που έχουν ως σκοπό να αποτιμήσουν το πόσο υποκειμενικά αισθητός είναι κάποιος θόρυβος σε μας. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι καμπύλες απόκρισης αυτών των φίλτρων είναι αντίστροφες των καμπύλων ίσης ηχηρότητας.



Σχήμα 2.6: Απόκριση συχνότητας των φίλτρων βάρους A, B, C..

Είναι προφανές ότι αφού δεν είμαστε ευαίσθητοι στις χαμηλές συχνότητες, ένας θόρυβος ο οποίος περιέχει μεγάλη ενέργεια στις χαμηλές, δεν θα μας είναι τόσο ενοχλητικός. Αντίθετα, ένας θόρυβος που περιέχει μεγάλη ενέργεια στις μεσαίες συχνότητες θα είναι πολύ περισσότερο ενοχλητικός. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις βάρους A, B και C, πετυχαίνουμε την κατάλληλη ζύγιση του προς μέτρηση θορύβου ώστε η στάθμη που θα υπολογιστεί να είναι αντιπροσωπευτική της μεταβλητής αυτής ευαισθησίας της ακοής. Ανάλογα με την καμπύλη βάρους που χρησιμοποιείται, το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται σε μονάδες dB(A), dB(B) και dB(C). Η επιλογή του φίλτρου αν θα είναι A, B ή C έχει να κάνει με το είδος και τη στάθμη του προς μέτρηση θορύβου. Για παράδειγμα, στις υψηλές στάθμες θορύβου που δημιουργούνται από κινητήρες αεροσκαφών χρησιμοποιείται η καμπύλη C. Η καμπύλη αυτή χαρακτηρίζεται από πιο επίπεδη απόκριση συχνότητας σε σχέση με τις άλλες καμπύλες, γεγονός που συμφωνεί με το ότι στις υψηλές στάθμες η απόκριση του αυτιού τείνει να γίνει αρκετά πιο επίπεδη (flat). Σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται η επιλεκτική δυνατότητα χρήσης, σε κάποιους ενισχυτές, ειδικού φίλτρου (loudness) που έχει ως σκοπό να ενισχύσει τις χαμηλές ή και τις υψηλές συχνότητες όταν η στάθμη ακρόασης μουσικού υλικού είναι χαμηλή. Αυτή η τεχνική παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

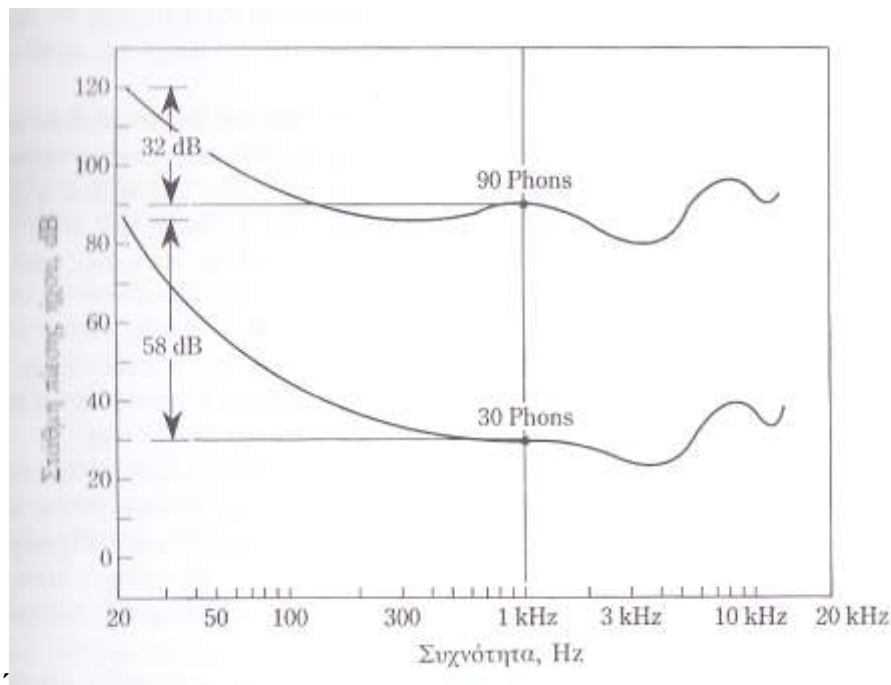
## 2.5 ΈΛΕΓΧΟΣ ΗΧΗΡΟΤΗΤΑΣ

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε βάλει ένα κομμάτι συμφωνικής μουσικής στο σπίτι μας και έχουμε ρυθμίσει την ένταση του hi-fi σε μία ευχάριστη στάθμη ηχηρότητας 60 phons. Επειδή το κομμάτι έχει εκτελεστεί στην αίθουσα συναυλίας σε στάθμη ηχηρότητας 90 phons, πρέπει να γίνει κάτι που θα δώσει στα μπάσα και στα πρίμα της μουσικής την κατάλληλη ισορροπία στη

στάθμη ακρόασης που είναι μικρότερη από τη στάθμη της αίθουσας συναυλιών. Για να επιτευχθεί λοιπόν αυτή η ισορροπία, θα πρέπει να ενισχυθούν τα μπάσα και τα πρίμα.

Αυτή ακριβώς είναι η δουλειά του κομβίου ρύθμισης ηχηρότητας (loudness) που βρίσκουμε σε κάποιους ενισχυτές. Ρυθμίζουν τα ηλεκτρικά δικτυώματα έτσι ώστε να αντισταθμίζουν την αλλαγή της απόκρισης συχνότητας του αυτιού για διαφορετικές στάθμες λειτουργίας. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Σε στάθμη ηχηρότητας 90 phon, το αυτί λειτουργεί σαν equalizer υψηλής διέλευσης συχνοτήτων εξασθενώντας το ακουστικό σήμα κατά 32 dB στα 20 Hz. Σε στάθμη ηχηρότητας 30 phon, η κλίση της καμπύλης γίνεται πιο απότομη και η ίδια εξασθένηση γίνεται 58 dB. Αυτό αν θέλουμε μπορούμε να το δούμε θεωρώντας ότι στο Σχήμα 2.6 η απόκριση συχνότητας του αυτιού στη μία περίπτωση είναι η καμπύλη (B) και στην άλλη η (A). Αν λοιπόν το υλικό του προγράμματος ηχογραφήθηκε για στάθμη ηχηρότητας 90 phon, το EQ ρύθμισης ηχηρότητας θα πρέπει να εμφανίζει ενίσχυση ίση με  $58-32=26$  dB στα 20 Hz.

Είναι προφανές ότι ένα τέτοιο φίλτρο θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με τη στάθμη ακρόασης. Θα πρέπει δηλαδή με κάποιο τρόπο το ηχητικό σύστημα βαθμιαία να αποδυναμώνει και εν τέλει να απενεργοποιεί εντελώς την επίδραση του loudness όταν η στάθμη ακρόασης είναι αρκετά δυνατή.



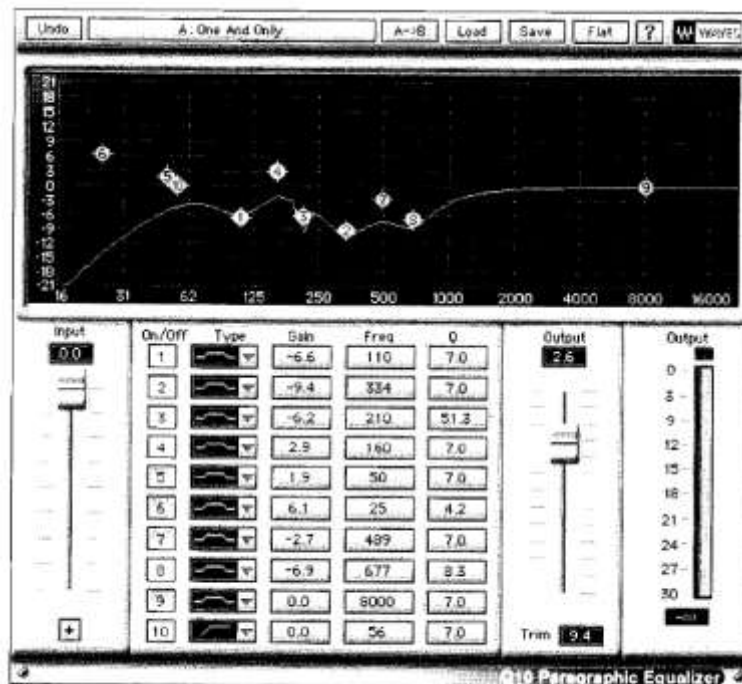
Σχήμα 2.7: Μεταβολή της απόκρισης συχνότητας του αυτιού με τη στάθμη ηχηρότητας.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η ρύθμιση της στάθμης ηχηρότητας είναι μόνο ένα ενδιάμεσο βήμα για την προσαρμογή του ηχητικού συστήματος στην πραγματική υποκειμενική ηχηρότητα. Ο έλεγχος ηχηρότητας δεν αποτελεί πλήρη λύση του προβλήματος διότι δεν είναι εύκολο να ξέρουμε τη στάθμη ακρόασης που αντιστοιχεί σε μια δεδομένη θέση της έντασης του ενισχυτή. Για παράδειγμα, τα μεγάφωνα έχουν διαφορετική ακουστική έξοδο για δεδομένη ισχύ εισόδου. Η απολαβή των προενισχυτών, ενισχυτών ισχύος, tuner και κεφαλών pick-up

διαφέρει από μάρκα σε μάρκα και από κύκλωμα σε κύκλωμα. Επίσης, οι συνθήκες στο χώρο ακρόασης κυμαίνονται από ουδέτερες μέχρι πλήρους αντήχησης. Για αυτό το λόγο, η σωστή χρήση αυτής της τεχνικής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν περισσότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό του φίλτρου.

## 2.6 ΨΗΦΙΑΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

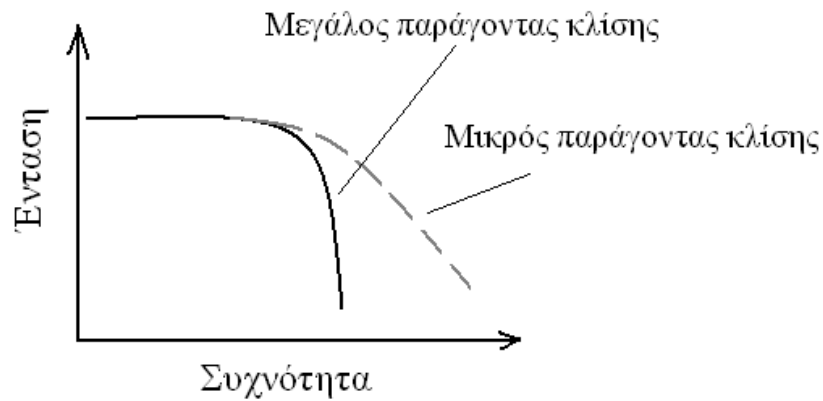
Σχεδόν όλες οι παραπάνω διεργασίες που περιγράφηκαν υποθέτοντας τη χρήση αναλογικών equalizer μπορούν σήμερα να υλοποιηθούν με τη χρήση ψηφιακής τεχνολογίας. Το ψηφιακό equalizer βασίζεται στη χρήση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing, DSP). Αν και η σκοπιμότητα των ψηφιακών equalizer δεν αλλάζει σε σχέση με τα αναλογικά, πρέπει να σημειωθεί η σημαντικά αυξημένη ευελιξία που παρέχεται από την ψηφιακή αναπαράσταση του σήματος. Για παράδειγμα, το εικονιζόμενο equalizer επιτρέπει την ανεξάρτητη ρύθμιση 10 διαφορετικών φίλτρων που μπορούν να μεταβάλλουν τόσο την κεντρική συχνότητα λειτουργίας τους, όσο και το βαθμό ενίσχυσης-εξασθένησης αλλά και το εύρος ζώνης συχνοτήτων (Q) που επεμβαίνουν.



Σχήμα 2.8: Παραμετρικό ψηφιακό equalizer 10 περιοχών σε μορφή λογισμικού της σειράς Diamond plugins της εταιρείας Waves.

Με ένα ψηφιακό equalizer μπορούμε θεωρητικά να καθορίζουμε την απόκριση συχνότητας με οποιοδήποτε θεμιτό τρόπο, κάτι που είναι αδύνατον να επιτευχθεί με αναλογικά μέσα. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα υλοποίησης φίλτρων χαμηλής ή υψηλής διέλευσης

με μεγάλο παράγοντα κλίσης, που είναι απαραίτητη κατά την ψηφιοποίηση του σήματος. Το μειονέκτημα της αναλογικής τεχνολογίας κατά την υλοποίηση τέτοιων φίλτρων είναι καταρχάς το αυξημένο κόστος κατασκευής τους και επιπλέον, η εισαγωγή παραμορφώσεων στο ηχητικό σήμα. Αντίθετα, το μόνο μειονέκτημα του ψηφιακού φίλτρου είναι η αυξημένη τάξη του φίλτρου, κάτι που όμως δεν αποτελεί πρόβλημα στους σύγχρονους επεξεργαστές.



Σχήμα 2.9: Ορισμός του παράγοντα κλίσης σε ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης συχνοτήτων.

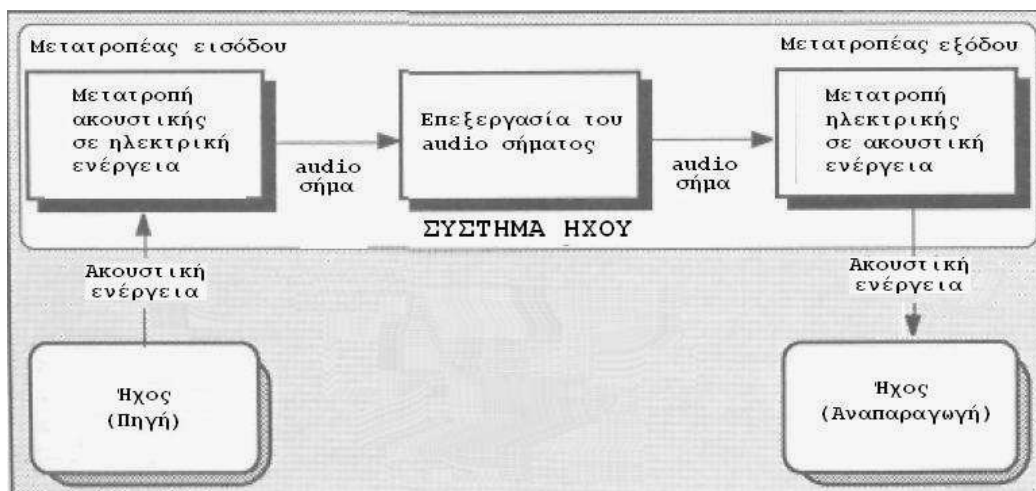
## 3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΧΟΥ

### 3.1 ΈΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΧΟΥ

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να κατανοήσουμε την έννοια και τον τρόπο λειτουργίας ενός συστήματος ήχου. Ένα σύστημα ήχου είναι γενικά μια λειτουργική διάταξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων τα οποία είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να μεταβάλουν τον ήχο. Αυτό μπορεί να γίνεται για:

1. Να βοηθήσει τους ακροατές να ακούν καλύτερα. Η ομιλία για παράδειγμα ενός ανθρώπου σε ένα μεγάλο χώρο δεν θα μπορούσε να είναι ακουστή χωρίς ένα τέτοιο κατάλληλο σύστημα.
2. Να κάνει τον ήχο πιο εντυπωσιακό για καλλιτεχνικούς λόγους. Για παράδειγμα ένα μουσικό συγκρότημα σε ένα μικρό club θα μπορούσε να ακουστεί, ο ήχος όμως δεν θα ήταν το ίδιο εντυπωσιακός χωρίς το κατάλληλο ηχητικό σύστημα.
3. Να κάνει δυνατή την κατανομή του ήχου σε διαφορετικούς χώρους ή το άκουσμα διαφορετικών ήχων στον ίδιο χώρο. Όπως για παράδειγμα σε μια διάλεξη όπου μεταφράζεται η ομιλία σε διαφορετικές γλώσσες και μεταφέρεται στους ακροατές με ακουστικά.

Υπάρχουν επίσης συστήματα ήχου που σχεδιάζονται για να αναπαραγάγουν καταγραμμένο ήχο ή να τον μεταδώσουν ραδιοφωνικά. Σε αυτήν την περίπτωση οι γενικές απαιτήσεις μπορούν να είναι παρόμοιες με το σύστημα ενίσχυσης ζωντανού ήχου εκτός από το ότι μαγνητόφωνο, το cd player, το πικαπ ή ο ραδιοδέκτης θα αντικαταστήσουν τα μικρόφωνα ή τα ηλεκτρονικά μουσικά όργανα



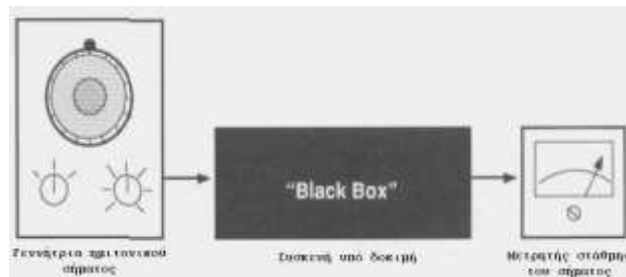
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση μιας ηλεκτρακουστικής αλυσίδας αποτελούμενης από μετατροπείς και επεξεργαστές σήματος.

Στην ηλεκτροακουστική οι συσκευές που μετατρέπουν την ενέργεια από την μια μορφή στην άλλη καλούνται **μετατροπείς** (transducers). Οι συσκευές που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά ενός ακουστικού σήματος καλούνται **επεξεργαστές** σήματος (signal processors). Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτούς τους όρους, μπορούμε να ορίσουμε το σύστημα ήχου στην συνοπτική μορφή του στο Σχήμα 3.1.

Ο μετατροπέας εισόδου (δηλ. το μικρόφωνο ή το pickup) μετατρέπει τον ήχο σε ένα κυμαινόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που είναι μια ακριβής αναπαράσταση του ήχου. Το κυμαινόμενο αυτό ρεύμα (ή τάση) αναφέρεται ως ακουστικό (audio) σήμα. Ο επεξεργαστής σήματος αλλάζει ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά του ακουστικού σήματος. Στην απλούστερη περίπτωση, απλώς αυξάνει τη ισχύ του σήματος (ένας επεξεργαστής σήματος που κάνει κάτι τέτοιο καλείται ενισχυτής). Στην πραγματικότητα, οι επεξεργαστές σήματος σε ένα σύστημα ήχου αντιπροσωπεύονται από ένα πλήθος συσκευών (προενισχυτές, μίκτες, διάφορες μονάδες effect, ενισχυτές ισχύος κ.λ.π.). Ο μετατροπέας εξόδου (δηλ. το μεγάφωνο ή τα ακουστικά) μετατρέπει το ενισχυμένο και επεξεργασμένο ακουστικό σήμα ξανά σε ήχο. Για τους μετατροπείς και τους επεξεργαστές σήματος θα μιλήσουμε αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια.

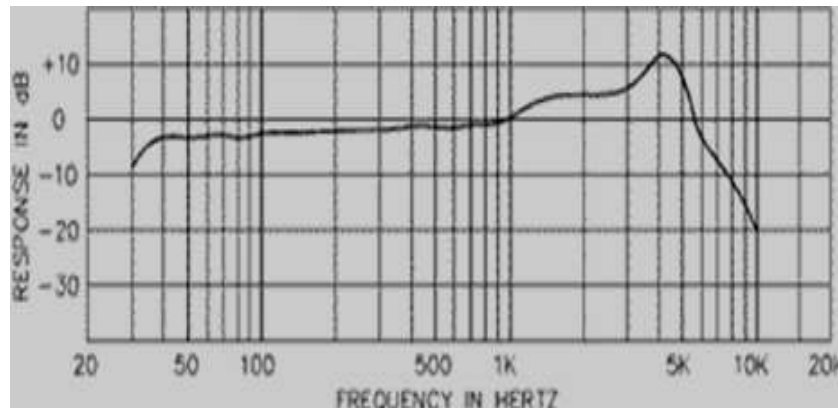
### 3.2 ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ (FREQUENCY RESPONSE)

Για κάθε σύστημα ήχου αλλά και για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά μέσω της οποίας διέρχεται ένα ακουστικό σήμα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την απόκριση στο φάσμα των συχνοτήτων. Αυτή την πληροφορία μας δίνει η συχνοτική απόκριση. Η συχνοτική απόκριση μιας διάταξης περιγράφει την σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου σε σχέση με το πλάτος και την συχνότητα. Με άλλα λόγια η συχνοτική απόκριση μας δείχνει το εύρος των συχνοτήτων που επιτρέπει ένα σύστημα η μια επιμέρους βαθμίδα να περάσει μέσα από αυτήν αλλά και την συμπεριφορά στην κάθε συχνότητα. Στο Σχήμα 3.2 έχουμε μια συσκευή αγνώστου λειτουργίας (το λεγόμενο black box) η οποία έχει μια είσοδο και μια έξοδο. Στην είσοδο συνδέουμε μια γεννήτρια είναι ημιτονικού σήματος ενώ στην έξοδο έναν μετρητή έντασης σε dB. Θεωρούμε ότι η γεννήτρια παράγει την ίδια ένταση σήματος σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Αν σαρώσουμε το ακουστικό φάσμα θα δούμε ότι η ένδειξη στο όργανο μέτρησης στην έξοδο μεταβάλλεται.



Σχήμα 3.2: Η διάταξη για την μέτρηση της συχνοτικής απόκρισης.

Σχεδιάζοντας το διάγραμμα της έντασης στην έξοδο σε dB και του ακουστικού φάσματος θα μπορούσε να έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης συσκευής

Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης, προκύπτει πάντα με πειραματικό τρόπο και επομένως είναι μια σημαντική ένδειξη για την ποιότητα της μεταφοράς του σήματος μέσα από την διάταξη που περιγράφει. Όσο πιο λίγες είναι οι αυξομειώσεις του διαγράμματος τόσο πιο αξιόπιστη αναπαράσταση του σήματος εισόδου θα είναι το σήμα στην έξοδο του συστήματος. Η πιο απλή μορφή με την οποία μπορούμε να περιγράψουμε την απόκριση συχνότητας είναι όχι με διάγραμμα αλλά αναφέρονται το εύρος συχνοτήτων και το εύρος διακύμανσης. Για παράδειγμα έχουμε:

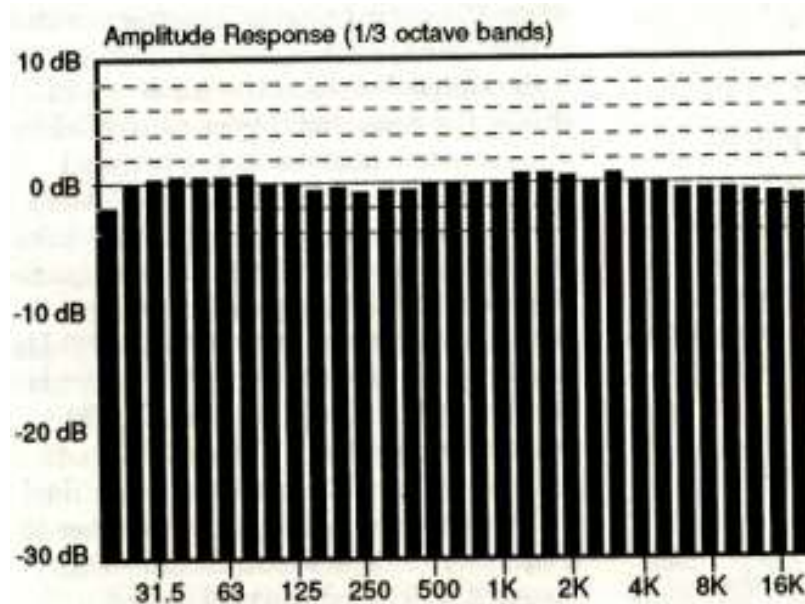
Frequency response: 30 Hz to 18 kHz,  $\pm 3$  dB.

Αυτό σημαίνει ότι η διάταξη για την οποία μιλάμε μεταξύ των συχνοτήτων 30 Hz και 18 kHz έχει διακύμανση 3 dB πάνω η κάτω από μια μέση τιμή. Προφανώς η συχνοτική απόκριση δεν έχει νόημα σαν προδιαγραφή αν δεν ξέρουμε την διακύμανση, γιατί τότε πρέπει να μαντέψουμε τον τρόπο που η διάταξη επιδρά στο σήμα μέσα στο δεδομένο συχνοτικό εύρος. Ο τρόπος που περιγράφεται η συχνοτική απόκριση παραπάνω δεν είναι ωστόσο αρκετά περιγραφικός γιατί και πάλι μας αφήνει να μαντέψουμε τις διακυμάνσεις της συχνοτικής απόκρισης μέσα στο όριο των  $\pm 3$  dB. Στο Σχήμα 3.3 βλέπουμε τι μπορεί να σημαίνει η απόκριση 30 Hz to 18 kHz,  $\pm 3$  dB.

### 3.3 ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΧΕΣΕΙΣ ΟΚΤΑΒΑΣ

Μερικές φορές η απόκριση συχνότητας δίνεται σε διάστημα μιας οκτάβας ή 1/3 της οκτάβας. Όπως έχουμε αναφέρει οκτάβα θεωρούμε ένα διάστημα στο οποίο συμβαίνει ένας διπλασιασμός συχνότητας. Τέτοιου είδους μετρήσεις και στοιχεία είναι βέβαια πολύ χαμηλότερης ανάλυσης από αυτές που περιγράψαμε προηγουμένως. Χρησιμοποιούνται πολύ στα μεγάφωνα γιατί παρέχουν καλό συσχετισμό με την ανθρώπινη ακοή, αλλά και γιατί ταιριάζουν με τα equalizer και τα φίλτρα 1/3 της οκτάβας. Συνήθως οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε μια τέτοιου είδους ανάλυση είναι συγκεκριμένες και ακολουθούν τις προδιαγραφές ISO (International Standards Organization). Όταν λοιπόν έχει κανείς ένα equalizer με ISO Standards 1/3 της οκτάβας τότε μπορεί να αξιοποιήσει τις προδιαγραφές ρυθμίζοντας το ανάλογα. Στο Σχήμα 3.4 βλέπουμε μια απόκριση συχνότητας με ανάλυση 1/3

της οκτάβας και με τις ISO Standards συχνότητες. Αυτό που είναι σίγουρο είναι ότι στις περισσότερες διατάξεις και συστήματα ήχου προσπαθούμε να έχουμε όσο το δυνατό γραμμική απόκριση στο εύρος των ακουστικών συχνοτήτων (flat or linear response)



Σχήμα 3.4: Συχνοτική απόκριση μετρημένη σε 1/3 οκτάβας.

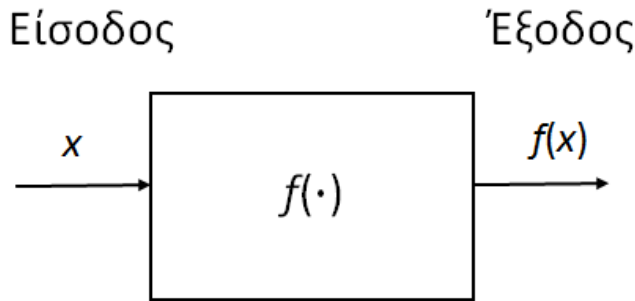
### 3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η απόκριση συχνότητας ως προδιαγραφή συνοδεύει όλα σχεδόν τα ηχητικά συστήματα και συνήθως μετριέται με κατάλληλες διατάξεις. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει και η δυνατότητα η απόκριση συχνότητας να εκτιμηθεί υπολογιστικά. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ σημαντική κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός ηχητικού συστήματος, καθότι κάποιος μπορεί με χρήση κατάλληλων μαθηματικών και φυσικών μοντέλων να προβλέψει τη συμπεριφορά του συστήματος όσο ακόμα αυτό είναι στο χαρτί ή στον υπολογιστή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί κάποιος να έχει άμεσα τη σχέση αιτίου αποτελέσματος για ένα ηχητικό σύστημα και με βάση τα μοντέλα αυτά να πάρει βέλτιστες αποφάσεις για το σχεδιασμό του. Ένα τέτοιο παράδειγμα θα δούμε και στην ενότητα 6.7 όπου θα προσπαθήσουμε να προβλέψουμε τη συχνοτική απόκριση ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.

Ο υπολογισμός της συχνοτικής απόκρισης για ηλεκτρονικά κυκλώματα που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα είναι κάτι με το οποίο ο φοιτητής του τμήματος θεωρείται εξοικειωμένος, μέσα από το μάθημα «Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά» του πρώτου εξαμήνου. Η κατασκευή ενός διαγράμματος Bode κάνοντας ποιοτική ανάλυση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος με γραμμικά παθητικά στοιχεία ορίζει τις βάσεις για τη μελέτη της συχνοτικής συμπεριφοράς ηχητικών συστημάτων, κάτι που άλλωστε θα δούμε και στις Ενότητες 4, 5 και 6.

### 3.5 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΧΟΥ

Η έννοια της γραμμικότητας είναι πολύ σημαντική για τα ηχητικά συστήματα. Τα περισσότερα ηχητικά συστήματα σχεδιάζονται ώστε να υλοποιούν μια γραμμική σχέση εισόδου-εξόδου, ωστόσο στο Κεφάλαιο 7 θα δούμε ότι υπάρχουν και συστήματα - όπως οι δυναμικοί επεξεργαστές - τα οποία σχεδιάζονται ώστε να υλοποιούν μια μη γραμμική σχέση εισόδου-εξόδου. Τι σημαίνει όμως γραμμικό σύστημα; Για να το θυμηθούμε αυτό, ας χρησιμοποιήσουμε τη μεταβλητή  $x$  για να συμβολίσουμε κάποια φυσική ποσότητα την είσοδο ενός συστήματος και ας θεωρήσουμε ότι η δουλειά που κάνει το σύστημα μπορεί να περιγράψει μέσω μιας συνάρτησης  $f()$  η οποία επενεργώντας πάνω στο  $x$  παράγει στην έξοδο μια φυσική ποσότητα που είναι ίση με  $y=f(x)$ . Σημειώνουμε εδώ ότι όταν πρόκειται για επεξεργαστές ήχου, τότε προφανώς η είσοδος και η έξοδος αφορούν το ίδιο φυσικό μέγεθος (πχ ηλεκτρική τάση ή ρεύμα). Ωστόσο, είναι κατανοητό ότι όταν πρόκειται για μετατροπείς ήχου, δηλαδή για ένα μικρόφωνο ή για ένα ηχείο, τότε η είσοδος και η έξοδος μπορούν να αφορούν διαφορετικά φυσικά μεγέθη (πχ ακουστική πίεση και τάση).



Σχήμα 3.5: Μαθηματική αναπαράσταση ενός ηχητικού συστήματος με είσοδο  $x$  και έξοδο  $f(x)$

Με απλά λόγια, ένα σύστημα ήχου είναι γραμμικό, όταν η συνάρτηση  $f()$  είναι γραμμική. Η πιο σημαντική ιδιότητα ενός γραμμικού συστήματος είναι ότι ποσοστιαίες μεταβολές στο αίτιο (είσοδο) οδηγούν στην ίδια ποσοστιαία μεταβολή στο αποτέλεσμα (έξοδο). Αυτό μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως

$$f(ax) = af(x), \quad (3.1)$$

όπου  $a$  είναι μια πραγματική σταθερά. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των γραμμικών συστημάτων είναι η αρχή της επαλληλίας ή αλλιώς η αρχή της υπέρθεσης. Την αρχή της επαλληλίας μπορούμε να την διατυπώσουμε ως εξής: Το αποτέλεσμα, το προερχόμενο από δύο ή περισσότερες αιτίες που επενεργούν ταυτόχρονα σε ένα σύστημα, ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των αποτελεσμάτων που θα είχαμε, αν η κάθε αιτία δρούσε ξεχωριστά στο ίδιο σύστημα. Μαθηματικά μπορούμε να την διατυπώσουμε ως εξής

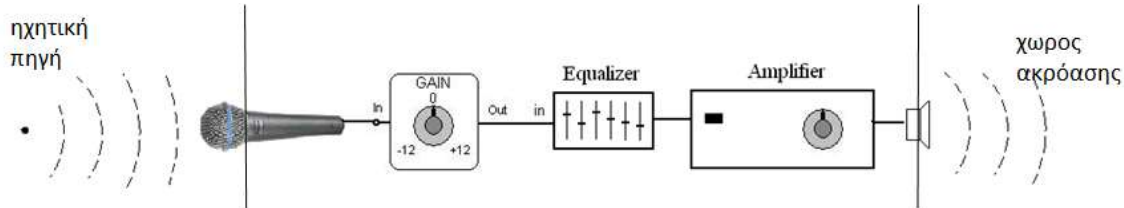
$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2). \quad (3.2)$$

Λόγω της (3.1) και (3.2), είναι λογικό ότι θα ισχύει επίσης

$$f(a_1x_1 + a_2x_2) = a_1f(x_1) + a_2f(x_2). \quad (3.3)$$

Η γραμμικότητα εν γένει είναι επιθυμητή σε ένα ηχητικό σύστημα και σχετίζεται με την πιστότητα του ήχου. Το πιο απλό γραμμικό ηχητικό σύστημα είναι ο προ-ενισχυτής, ο οποίος αυξάνει το πλάτος των μεταβολών του σήματος εισόδου. Ιδανικά θέλουμε οποιαδήποτε μεταβολή στην είσοδο να αντικατοπτρίζεται στην ίδια μεταβολή στην έξοδο, πολλαπλασιασμένη επί μία σταθερά ενίσχυσης  $\alpha$  που είναι μεγαλύτερη της μονάδας. Ένας γραμμικός προενισχυτής υλοποιεί επομένως επακριβώς τη σχέση εισόδου-εξόδου της Σχέσης (3.1) με  $\alpha > 1$ . Ο τελικός ενισχυτής και το equalizer είναι επίσης ένα γραμμικά σύστημα ήχου. Το ίδιο ισχύει για τα ηχεία και τα μικρόφωνα, αν και σε αυτές τις περιπτώσεις η είσοδος και η έξοδος αφορούν διαφορετικά φυσικά μεγέθη. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι προϋπόθεση για γραμμική συμπεριφορά σε όλα αυτά τα συστήματα είναι να είμαστε στη γραμμική περιοχή λειτουργίας, δηλαδή μέσα σε κάποια όρια πλάτους. Αν πχ σε ένα προενισχυτή δώσουμε ισχυρό σήμα εισόδου και έχουμε ρυθμίσει το κέρδος προενίσχυσης (gain) να είναι πολύ υψηλό, τότε ενδεχομένως στην έξοδο να έχουμε ψαλιδισμό. Σε μια τέτοια περίπτωση, το σύστημα είναι εκτός γραμμικής περιοχής λειτουργίας και επομένως παύει να συμπεριφέρεται γραμμικά. Στα πλαίσια της ηλεκτρακουστικής ωστόσο, δε θα μελετήσουμε τέτοιες περιπτώσεις.

### 3.5.1 Συνδυασμός πολλών γραμμικών συστημάτων σε σειρά



Σχήμα 3.6: Ηλεκτρακουστική αλυσίδα αποτελούμενη από γραμμικά ηχητικά συστήματα.

Ο συνδυασμός πολλών γραμμικών συστημάτων σε σειρά καταλήγει πάλι σε γραμμική σχέση εισόδου-εξόδου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό διότι μας επιτρέπει κάνουμε εύκολα και γρήγορα υπολογισμούς. Ας εξετάσουμε λίγο την ηλεκτρακουστική αλυσίδα του Σχήματος 3.6, υποθέτοντας ότι όλα τα συστήματα που απεικονίζονται (μικρόφωνο, προενισχυτής, equalizer, τελικός ενισχυτής και ηχείο) είναι γραμμικά και δουλεύουν στην γραμμική περιοχή λειτουργίας. Επίσης, υποθέτουμε ότι ο θόρυβος βάθους στο περιβάλλον που είναι εγκατεστημένο το μικρόφωνο και το ηχείο είναι αμελητέος. Το ίδιο θεωρούμε και για τον ηλεκτρικό θόρυβο, δηλαδή ότι η στάθμη του είναι αμελητέα συγκριτικά με τη στάθμη του σήματος και επομένως μπορούμε να τον αγνοήσουμε στους υπολογισμούς. Είναι πολύ εύκολο, αν ξέρουμε τις στάθμες ενός ηλεκτρακουστικού μεγέθους σε κάποιο στάδιο της αλυσίδας για μια κατάσταση (1), αν προβλέψουμε πως θα μεταβληθεί αυτή η στάθμη αν μεταβληθεί κάποια παράμετρος ή ποσότητα σε προγενέστερο στάδιο της αλυσίδας, ερχόμενοι έτσι σε μία κατάσταση (2).

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι σε κάποιο σημείο του χώρου ακρόασης μετράμε μια σταθερή στάθμη ήχου ίση με 78 dB SPL. Έστω τώρα ότι μεταβάλλουμε το gain του προενισχυτή αυξάνοντας το κατά 5 dB. Πόση θα γίνει η στάθμη του ήχου στο ίδιο σημείο μέτρησης? Η απάντηση είναι ότι θα αυξηθεί και αυτό κατά 5 dB και θα έχουμε έτσι στάθμη ήχου  $78+5=83$  dB SPL. Για αυτό το αποτέλεσμα μπορούμε να είμαστε βέβαιοι εφόσον όλα τα συστήματα είναι

στην γραμμική περιοχή λειτουργίας, ανεξάρτητα από το ποιες είναι οι ρυθμίσεις του Equalizer ή του ενισχυτή, τι είδους μεγάφωνο χρησιμοποιείται κλπ. Καταλαβαίνουμε επίσης, μαζί με τη στάθμη του ήχου, αύξηση κατά 5 dB θα έχουμε όχι μόνο στην έξοδο του προενισχυτή, αλλά και στην στάθμη του σήματος στην έξοδο του equalizer και στην έξοδο του τελικού ενισχυτή. Για γραμμικά συστήματα επομένως μπορούμε πούμε ότι αύξηση ή μείωση στο αίτιο κατά μια ποσότητα σε dB, οδηγεί στην ίδια αύξηση ή μείωση σε dB στο αποτέλεσμα. Αυτό μπορούμε να το διατυπώσουμε μέσω της σχέσης

$$\Delta L_{\text{αίτιο}} = \Delta L_{\text{αποτέλεσμα}} \quad (3.4)$$

Ας δούμε τώρα άλλο ένα παράδειγμα. Υποθέτουμε πάλι ότι η στάθμη του ήχου σε κάποιο σημείο του χώρου ακρόασης είναι 78 dB SPL. Έστω όμως τώρα ότι αυτό που μεταβάλλεται είναι η ισχύς της ηχητικής πηγής (τέρμα αριστερά στο Σχήμα 3.6). Συγκεκριμένα, η ισχύς της πηγής μειώνεται από τα 0.1 Watt στα 0.025 Watt. Τι αποτέλεσμα θα έχει αυτό για τη στάθμη του ήχου στο χώρο ακρόασης; Παρατηρούμε ότι η ισχύς της πηγής υποτετραπλασιάζεται. Με βάση τα όσα έχουμε πει, αυτό σημαίνει μείωση κατά 6 dB στη στάθμη ισχύος ( $10 \log \frac{0.025}{0.1} = -6$  dB). Όπως το φαντάζεστε, αυτή η μείωση κατά 6 dB θα περάσει σε όλα τα στάδια της αλυσίδας και εν τέλει θα φτάσει και στο χώρο ακρόασης, όπου πλέον θα βλέπουμε μια στάθμη ήχου ίση με  $78-6=72$  dB SPL στο σημείο παρατήρησης. Και εδώ μπορούμε να είμαστε σίγουροι για αυτό, αρκεί να ξέρουμε ότι όλα τα συστήματα είναι γραμμικά, και ότι οι παράμετροι λειτουργίας των ενδιάμεσων συστημάτων δεν έχουν αλλάξει.

Είναι προφανές ότι κανείς μπορεί να σκεφτεί και πιο σύνθετα σενάρια, όπου δύο ή παραπάνω ποσότητες ή παράμετροι λειτουργίας μεταβάλλονται ταυτόχρονα.

**Παράδειγμα:** Έστω ότι έχω μια στάθμη 78 dB SPL σε κάποιο σημείο στο χώρο ακρόασης λόγω μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σταθερή ποσότητα ακουστικής ισχύος. Πόση θα γίνει η στάθμη του ήχου αν το gain του προενισχυτή και του ενισχυτή αυξηθούν ταυτόχρονα κατά 4 dB? Η απάντηση είναι ότι τώρα έχω  $\Delta L_{\text{αίτιο}} = \Delta L_{\text{προενισχυτή}} + \Delta L_{\text{ενισχυτή}} = 8$  dB, και αυτά τα 8 dB θα περάσουν και στο χώρο ακρόασης, κάνοντας τη στάθμη στο σημείο παρατήρησης ίση με  $L_p=78+8=86$  dB SPL.

Αξίζει να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι αντίθετα με όταν μιλάμε για στάθμες φυσικών ποσοτήτων, όταν μιλάμε για μεταβολές μεγεθών (πχ αύξηση ή μείωση της στάθμης) δεν βάζουμε μονάδες στο dB. Έτσι, για παράδειγμα, είναι σωστό να πούμε ότι η στάθμη του σήματος στην έξοδο του προενισχυτή είναι -4 dBu και χρειάζεται να πούμε ότι μιλάμε για dBu και όχι πχ για dBV για να ξέρουμε με πόσα Volt έχουμε να κάνουμε. Αρκεί όμως να πούμε ότι η στάθμη του σήματος (ή του ήχου) αυξήθηκε/μειώθηκε κατά A dB, και δε χρειάζεται να βάλουμε μονάδες σε αυτήν την περίπτωση.

**Άσκηση:** Έστω μια συσκευή που στην έξοδό της έχουμε στάθμη σήματος +4dBu. Στην είσοδο της υπάρχει μια διάταξη gain (προενισχυτής) που μπορεί να μεταβάλλει το σήμα από -10 έως +20 dB.

- 1) Ποιο είναι το εύρος των στάθμεων (σε dBu) που μπορούν να εισαχθούν στη συσκευή έτσι ώστε να λειτουργεί στη στάθμη των +4dBu
- 2) Να βρεθεί και το εύρος των τάσεων

**Απάντηση:**

- 1) Έστω  $G$  το κέρδος του προενισχυτή σε dB, τότε ως γνωστόν η στάθμη εισόδου  $Lin$  και η στάθμη εξόδου  $Lout$  θα συνδέονται μέσω της σχέσης  $Lin + G = Lout$ . Στη περίπτωση που  $G = -10$  θα ισχύει:  $Lin - 10 = 4$ , άρα  $Lin = 4 + 10 = 14$  dBu. Για την περίπτωση  $G = 20$  θα ισχύει  $Lin + 20 = 4$  άρα  $Lin = 4 - 20 = -16$  dBu. Επομένως το εύρος των στάθμεων στην είσοδο είναι  $-16 \leq Lin \leq 14$  dBu
- 2) Για να βρούμε το εύρος των τάσεων θα πρέπει να μετατρέψουμε τα dBu σε Volt. Με βάση τη γνωστή σχέση για  $Lin = -16$  dBu θα ισχύει  $Vin = 0.775 \cdot 10^{-16/20} = 0.123$  Volt. Για  $Lin = 14$  dBu θα έχουμε  $Vin = 0.775 \cdot 10^{14/20} = 4.89$  Volt. Επομένως για το εύρος των τάσεων εισόδου θα ισχύει  $0.123 \leq Vin \leq 4.89$  Volt.

## 4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

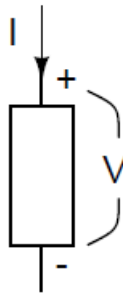
Τα δυναμικά συστήματα είναι φυσικά μοντέλα τα οποία επιτρέπουν τη μελέτη φαινομένων τα οποία χαρακτηρίζονται από χρονικές μεταβολές. Τα δυναμικά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή όχι μόνο στη φυσική και στις επιστήμες μηχανικού αλλά και στην οικονομία και την βιολογία. Στην ηλεκτρακουστική, τα αναλογικά φίλτρα, το μικρόφωνο και το ηχείο είναι δυναμικά συστήματα που μπορούν να μελετηθούν πολύ αποτελεσματικά με την χρήση ηλεκτρικού ανάλογου. Η ανάλυση που ακολουθεί υποθέτει ότι ο φοιτητής είναι εξοικειωμένος με την ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων τα οποία διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Στην ηλεκτρακουστική, η ανάλυση ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών συστημάτων γίνεται συνήθως στην Ημιτονική Μόνιμη Κατάσταση (ΗΜΚ), όπου θεωρούμε ότι η διέγερση του συστήματος γίνεται με μία ημιτονική πηγή καθορισμένης συχνότητας  $f$  και άρα γωνιακής ταχύτητας  $\omega=2\pi f$ . Για τη μελέτη ενός συστήματος στην ΗΜΚ παίζει καθοριστικό ρόλο η έννοια της Εμπέδησης. Επίσης, για την μελέτη τέτοιων συστημάτων στην ΗΜΚ, είναι απαραίτητη η χρήση μιγαδικών αριθμών. Η γνώση των μιγαδικών αριθμών θεωρείται και αυτή δεδομένη, παρέχεται ωστόσο και στο τέλος αυτού του συγγράμματος (ενότητα 9.2) ένα παράρτημα με τις ιδιότητες των μιγαδικών αριθμών.

### 4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ R,L,C ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

#### 4.1.1 Η έννοια της ηλεκτρικής εμπέδησης (impedance)

Η ηλεκτρική εμπέδηση είναι μια ιδιότητα που παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά δίκτυα δύο ακροδεκτών, τα οποία συνήθως αποτελούνται από παθητικά στοιχεία όπως η αντίσταση, το πηνίο και ο πυκνωτής. Η σχηματική αναπαράσταση για ένα τέτοιο δίκτυο είναι η παρακάτω.

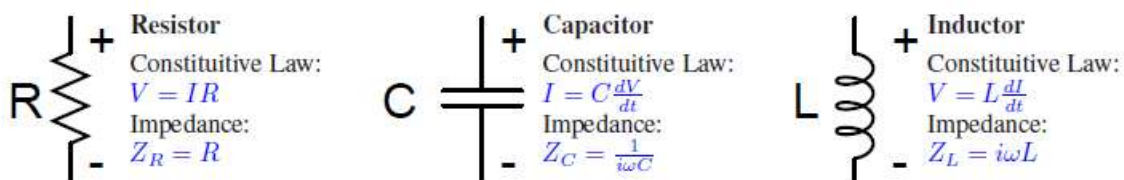


Σχήμα 4.0.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός παθητικού ηλεκτρικού δικτύου δύο ακροδεκτών

Η ηλεκτρική εμπέδηση (αλλιώς λέγεται και σύνθετη αντίσταση) είναι ένα μιγαδικό μέγεθος της μορφής  $R+jX$  το οποίο αλλάζει με τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$  και το οποίο εκφράζει το λόγο μεταξύ τάσης και ρεύματος σε μία συγκεκριμένη συχνότητα.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = R(\omega) + jX(\omega). \quad (4.0)$$

Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής εμπέδησης συμβολίζεται με  $R$  και λέγεται ηλεκτρική αντίσταση, και το φανταστικό μέρος συμβολίζεται με  $X$  και λέγεται ηλεκτρική αντίδραση. Οι μονάδες που παίρνει είναι τα ηλεκτρικά Ohm ( $\Omega$ ). Στο Σχήμα 4.0.2 βλέπουμε ότι η ηλεκτρική αντίσταση έχει μόνο πραγματικό μέρος ( $Z_R=R$ ) ενώ ο πυκνωτής και το πηνίο έχουν μόνο φανταστικό μέρος ( $Z_C=1/j\omega C$  και  $Z_L=j\omega L$  αντίστοιχα). Προφανώς σε ένα κύκλωμα που έχουμε συνδυασμό αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων οι τιμές ηλεκτρικής εμπέδησης που θα συναντάμε κατά την ανάλυση του κυκλώματος θα είναι εν γένει μιγαδικές, με τόσο πραγματικό όσο και φανταστικό μέρος.



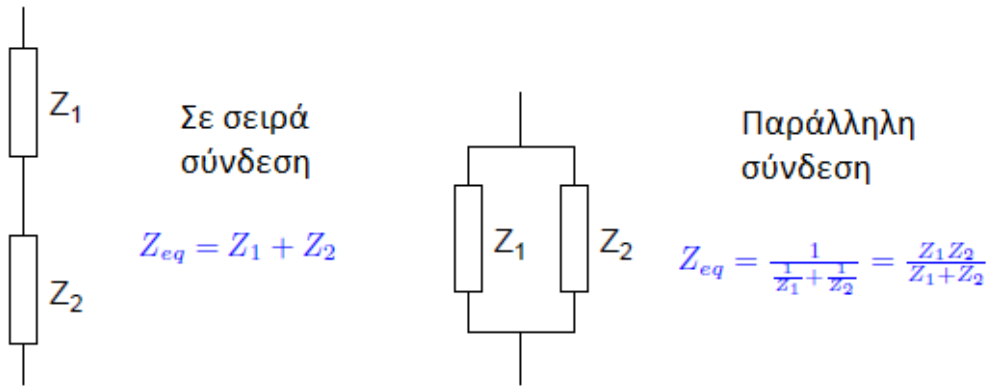
Σχήμα 4.0.2. Ηλεκτρική εμπέδηση μιας αντίστασης, ενός πυκνωτή και ενός πηνίου.

#### 4.1.2 Συνδυασμός ηλεκτρικών στοιχείων σε σειρά και παράλληλα

Θα πρέπει να μπορούμε να υπολογίζουμε την ηλεκτρική εμπέδηση όταν έχουμε συνδυασμό πολλών παθητικών στοιχείων σε ένα κύκλωμα. Όσο πολύπλοκο και αν είναι ένα κύκλωμα, η ανάλυση μπορεί να γίνει θεωρώντας δύο βασικούς τύπους σύνδεσης: σύνδεση σε σειρά και σύνδεση παράλληλα.

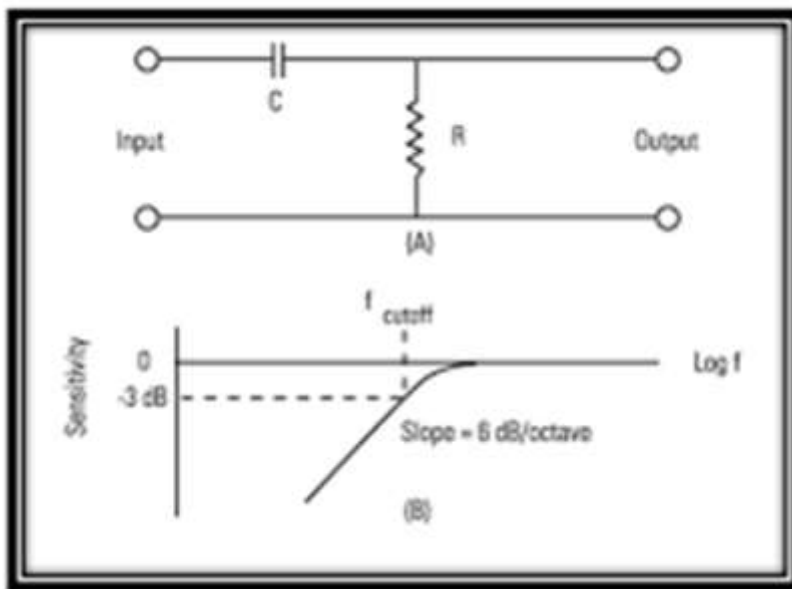
**Σύνδεση σε σειρά:** Όταν έχουμε δύο ηλεκτρικά στοιχεία με εμπεδήσεις  $Z_1$  και  $Z_2$  συνδεδεμένα σε σειρά τότε η ισοδύναμη εμπέδηση που προκύπτει από το συνδυασμό τους θα ισούται με  $Z_{ολ} = Z_1 + Z_2$ .

**Σύνδεση παράλληλα:** Όταν έχουμε δύο ηλεκτρικά στοιχεία με εμπεδήσεις  $Z_1$  και  $Z_2$  συνδεδεμένα σε σειρά τότε η ισοδύναμη εμπέδηση που προκύπτει από το συνδυασμό τους θα ισούται με  $Z_{ολ} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ .



Σχήμα 4.0.3. Ηλεκτρική εμπέδηση κατά τη σύνδεση δύο στοιχείων σε σειρά και παράλληλα

**Άσκηση:** Δείξτε ότι το παρακάτω κύκλωμα έχει συμπεριφορά υπερτατού φίλτρου και σχολιάστε τον παράγοντα κλίσης του φίλτρου.



Σχήμα 4.1: Τυπικό κύκλωμα υπερτατού φίλτρου πρώτης τάξης

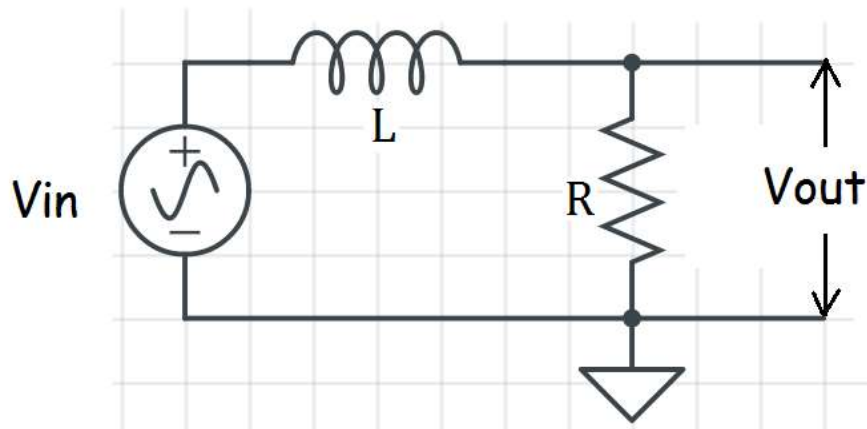
**Λύση:** Βλέπουμε ότι το κύκλωμα αποτελείται από δύο παθητικά στοιχεία. Μία αντίσταση η οποία εισάγει μια τιμή σύνθετης αντίστασης  $Z_R=R$  και έναν πυκνωτή χωρητικότητας  $C$  ο οποίος σχετίζεται με μία σύνθετη αντίσταση  $Z_C=1/j\omega C$ . Η σε σειρά σύνδεση πυκνωτή και αντίστασης δημιουργούν ένα διαιρέτη τάσης και επειδή η έξοδος του συστήματος είναι η διαφορά τάσης στα άκρα της αντίστασης, τότε θεωρώντας ως είσοδο μια εναλλασσόμενη τάση  $V_{in}$  μπορώ να συνδέσω την έξοδο,  $V_{out}$  με την είσοδο μέσω της σχέσης

$$V_{out} = \frac{R}{R+1/j\omega C} V_{in}. \quad (4.1)$$

Γνωρίζουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  συνδέεται με τη συχνότητα μέσω της σχέσης  $\omega=2\pi f$ , επομένως όταν  $f \rightarrow \infty$ , τότε και  $\omega \rightarrow \infty$  και επομένως η σύνθετη αντίσταση λόγω του πυκνωτή τείνει στο 0, δηλαδή  $Z_C \rightarrow 0$ . Σε αυτήν την περίπτωση ο παρανομαστής της Σχέσης (4.1) γίνεται πρακτικά ίσος με  $R$ , γεγονός που έχει ως επακόλουθο η έξοδος  $V_{out}$  να ισούται με την είσοδο  $V_{in}$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για μεγάλες τιμές της συχνότητας, το κύκλωμα θα παρουσιάζει μια σχέση εισόδου εξόδου ίση με  $20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$ . Από την άλλη, το τι θα συμβαίνει για χαμηλές τιμές της συχνότητας μπορούμε να το δούμε αν θεωρήσουμε ότι  $\omega \rightarrow 0$ . Βλέπουμε τότε ότι η παράσταση  $1/j\omega C$  απειρίζεται, πρακτικά δηλαδή ο παρανομαστής της σχέσης (4.0) είναι μια φανταστική ποσότητα και εξαρτάται μόνο από τον όρο  $1/j\omega C$ . Πρακτικά, για πολύ μικρές τιμές της συχνότητας το μέτρο του παρανομαστή της Σχέσης (4.1) θα τείνει στο άπειρο και επομένως η ποσότητα  $\frac{R}{R+1/j\omega C}$  θα τήνει στο 0. Με άλλα λόγια, για πολύ μικρές τιμές της συχνότητας το  $V_{out}$  θα τήνει στο 0 και επομένως η σχέση εισόδου εξόδου θα τείνει στο  $-\infty$  (αυτό διότι  $\lim_{x \rightarrow 0} \log x = -\infty$ ).

Για πολύ μικρές τιμές της συχνότητας, τέτοιες ώστε  $\frac{1}{\omega C} \gg R$ , όπως είπαμε θα έχουμε κυρίως εξάρτηση του παρανομαστή από τον όρο  $1/j\omega C$ . Σε αυτήν την περίπτωση βλέπουμε ότι η σχέση εισόδου εξόδου θα προσεγγίζει τη σχέση  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = jR\omega C$  και επομένως θα είναι γραμμικά ανάλογη του  $\omega$ . Αυτό σημαίνει ότι το  $V_{out}$  διπλασιάζεται κάθε φορά που διπλασιάζεται η συχνότητα, οπότε και θα έχουμε μία αύξηση +6dB/οκτάβα, που είναι και ο παράγοντας κλίσης του υψιπερατού φίλτρου.

**Άσκηση:** Δείξτε ότι το παρακάτω κύκλωμα έχει συμπεριφορά βαθυπερατού φίλτρου και σχολιάστε τον παράγοντα κλίσης του φίλτρου.



Σχήμα 4.2: Τυπικό κύκλωμα βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης.

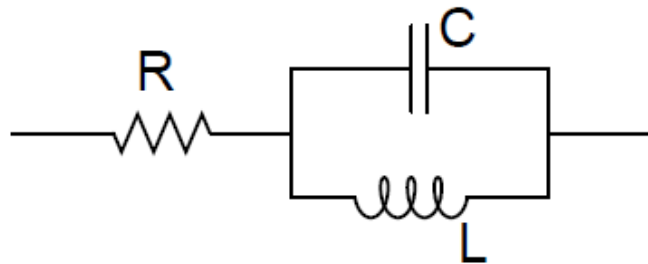
**Λύση:** Βλέπουμε ότι το κύκλωμα αποτελείται από δύο παθητικά στοιχεία. Μία αντίσταση η οποία εισάγει μια τιμή σύνθετης αντίστασης  $Z_R=R$  και έναν πηνίο με αυτεπαγωγή  $L$  το οποίο σχετίζεται με μία σύνθετη αντίσταση  $Z_L=j\omega L$ . Η σε σειρά σύνδεση πυκνωτή και αντίστασης δημιουργούν ένα διαιρέτη τάσης και επειδή η έξοδος του συστήματος είναι η διαφορά τάσης στα άκρα της αντίστασης, τότε θεωρώντας ως είσοδο μια εναλλασσόμενη τάση  $V_{in}$  μπορώ να συνδέσω την έξοδο,  $V_{out}$  με την είσοδο μέσω της σχέσης

$$V_{out} = \frac{R}{R+j\omega L} V_{in}. \quad (4.2)$$

Γνωρίζουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  συνδέεται με τη συχνότητα μέσω της σχέσης  $\omega=2\pi f$ , επομένως όταν  $f \rightarrow 0$ , τότε και  $\omega \rightarrow 0$  και επομένως η σύνθετη αντίσταση λόγω της αυτεπαγωγής τείνει στο 0, δηλαδή  $Z_L \rightarrow 0$ . Σε αυτήν την περίπτωση ο παρανομαστής της Σχέσης (4.2) γίνεται πρακτικά ίσος με  $R$ , γεγονός που έχει ως επακόλουθο η έξοδος  $V_{out}$  να ισούται με την είσοδο  $V_{in}$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για μικρές τιμές της συχνότητας, το κύκλωμα θα παρουσιάζει μια σχέση εισόδου εξόδου ίση με  $20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx 20 \log 1 = 0$  dB. Από την άλλη, το τι θα συμβαίνει για υψηλές τιμές της συχνότητας μπορούμε να το δούμε αν θεωρήσουμε ότι  $\omega \rightarrow \infty$ . Βλέπουμε τότε ότι η παράσταση  $j\omega L$  απειρίζεται, πρακτικά δηλαδή ο παρανομαστής της σχέσης (4.2) είναι μια φανταστική ποσότητα και εξαρτάται μόνο από τον όρο  $j\omega L$ . Πρακτικά, για πολύ μεγάλες τιμές της συχνότητας το μέτρο του παρανομαστή της σχέσης (4.2) θα τείνει στο άπειρο και επομένως το μέτρο της ποσότητας  $\frac{R}{R+j\omega L}$  θα τήνει στο 0. Με άλλα λόγια, για πολύ μεγάλες τιμές της συχνότητας το  $V_{out}$  θα τήνει στο 0 και επομένως η σχέση εισόδου εξόδου θα τείνει στο  $-\infty$ , γεγονός που αποδεικνύει ότι πρόκειται για βαθυπερατό φίλτρο.

Για πολύ μικρές τιμές της συχνότητας, τέτοιες ώστε  $\omega L \gg R$ , όπως είπαμε θα έχουμε κυρίως εξάρτηση του παρανομαστή από τον όρο  $j\omega L$ . Σε αυτήν την περίπτωση βλέπουμε ότι η σχέση εισόδου εξόδου θα προσεγγίζει τη σχέση  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{j\omega L}$  και επομένως θα είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $\omega$ . Αυτό σημαίνει ότι το  $V_{out}$  διπλασιάζεται κάθε φορά που υποδιπλασιάζεται η συχνότητα, οπότε και θα έχουμε μία μείωση ίση με  $-6$ dB/οκτάβα, που είναι και ο παράγοντας κλίσης του βαθυπερατού φίλτρου.

**Άσκηση:** Υπολογίστε τη σχέση που δίνει τη συνολική ηλεκτρική εμπέδηση του παρακάτω κυκλώματος συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ . Ποια θα μπορούσε να είναι μία χρήση για αυτό το κύκλωμα ως παθητικό φίλτρο?



Σχήμα 4.3. Σύνθετο κύκλωμα RLC.

Με βάση την ενότητα 4.1.2, η παράλληλη σύνδεση πυκνωτή και πηνίου ισοδυναμεί με ένα παθητικό στοιχείο με εμπέδηση  $Z_{LC}$  το οποίου η τιμή θα είναι ίση με

$$Z_{LC}(\omega) = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{j\omega L}{j\omega C}}{\frac{-\omega^2 LC + 1}{j\omega C}} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

Προφανώς για τη συνολική ηλεκτρική εμπέδηση θα πρέπει να προσθέσουμε και την ηλεκτρική αντίσταση  $R$ , επομένως

$$Z_{ολ}(\omega) = R + \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

Από την τελευταία εξίσωση βλέπουμε:

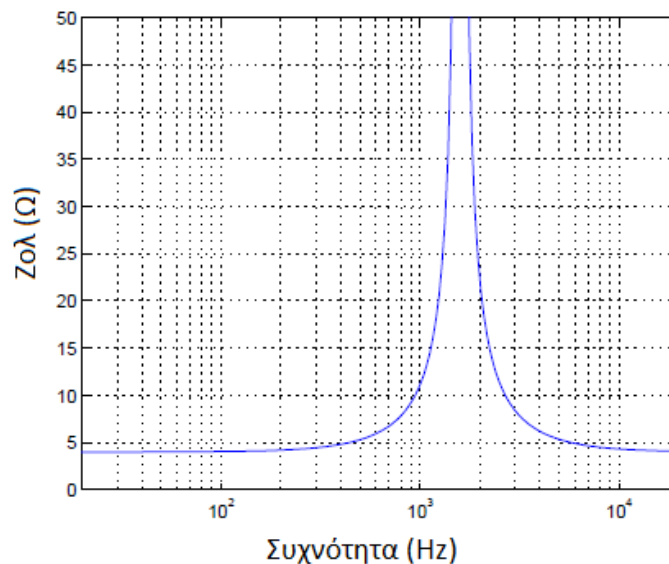
- όταν  $\omega \rightarrow 0$ , τότε ο δεύτερος όρος μηδενίζεται άρα η  $Z_{ολ}$  γίνεται ίση με  $R$
- όταν  $\omega \rightarrow \infty$ , τότε ο δεύτερος όρος πάλι τείνει στο 0 άρα η  $Z_{ολ}$  γίνεται πάλι ίση με  $R$
- όταν  $\omega \rightarrow \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , τότε ο παρονομαστής του 2<sup>ου</sup> όρου τείνει στο 0, επομένως η  $Z_{ολ}$  τείνει στο άπειρο.

Η διακύμανση της συνολικής ηλεκτρικής εμπέδησης με τη συχνότητα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ο απειρισμός του  $Z_{ολ}$  πρακτικά σημαίνει ότι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα θα είναι μηδέν σε μια περιοχή συχνοτήτων. Αυτό μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για να αποκόψουμε τελείως μια περιοχή συχνοτήτων και με αυτόν τον τρόπο να αποφύγουμε προβλήματα σχετικά με θόρυβο αλλά κυρίως προβλήματα σχετικά με ανάδραση (feedback) τα οποία ως γνωστό μπορούν να οδηγήσουν σε μικροφωνισμούς. Τέτοιου τύπου φίλτρα λέγονται notch φίλτρα.

Η συχνότητα όπου η τιμή της ηλεκτρικής εμπέδησης γίνεται άπειρη συμπίπτει με τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος, η οποία συμβολίζεται με  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ , όπου

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.3)$$

Όπως θα δούμε, η συχνότητα συντονισμού παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά ενός RLC κυκλώματος



Σχήμα 4.4 Διακύμανση του  $Z_{ολ}(\omega)$  για το RLC κύκλωμα του Σχήματος 4.3.

#### 4.1.3 Ποιοτική ανάλυση ηλεκρακουστικών συστημάτων

Συνδυάζοντας περισσότερα παθητικά στοιχεία είναι δυνατόν να υλοποιήσουμε υψιπερατά, βαθυπερατά ή ζωνοπερατά φίλτρα υψηλότερης τάξης, τα οποία θα μας δίνουν και μεγαλύτερους παράγοντες κλίσης. Η λεπτομερή ανάλυση αυτών των κυκλωμάτων δεν εμπίπτει στην ύλη της ηλεκτροακουστικής, ο φοιτητής θα πρέπει ωστόσο να μπορεί να κάνει μια ποιοτική ανάλυση δεδομένης της σχέση εισόδου εξόδου του συστήματος. Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα η είσοδος και η έξοδος είναι ηλεκτρικά μεγέθη (συνήθως τάσεις) αλλά στην ηλεκτροακουστική έχουμε συχνά μηχανικά μεγέθη, όπως δύναμη ή ταχύτητα, ακουστικά μεγέθη, όπως πίεση ή παροχή όγκου ή και συνδυασμό ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών μεγεθών.

Σε κάθε περίπτωση, η ποιοτική ανάλυση ενός ηλεκτρακουστικού συστήματος αποσκοπεί στο να βγάλουμε κάποιο ποιοτικό συμπέρασμα σχετικά με τη συμπεριφορά του, λαμβάνοντας υπόψιν όλο το συχνοτικό εύρος, δηλαδή όλο το εύρος τιμών που μπορεί να πάρει η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , και άρα και η συχνότητα  $f$  σε Hz. Σε αυτό του είδους την ανάλυση, θα πρέπει να εξετάσουμε και τις οριακές τιμές  $\omega \rightarrow 0$  (ή  $f \rightarrow 0$ ) καθώς και  $\omega \rightarrow \infty$ , (ή  $f \rightarrow \infty$ ). Όπως λοιπόν η συχνότητα (και άρα η γωνιακή ταχύτητα) μεταβάλλεται θα πρέπει να μπορούμε να παρατηρήσουμε ποσότητες που σταθεροποιούνται, μηδενίζονται ή απειρίζονται. Πχ για την περίπτωση του κυκλώματος του Σχήματος 4.2 η ποιοτική ανάλυση ανέδειξε την βαθυπερατή συμπεριφορά του φίλτρου, ενώ για το κύκλωμα του Σχήματος 4.3 η ποιοτική ανάλυση ανέδειξε την συχνοτική περιοχή αποκοπής που θα μπορούσαμε να έχουμε αν το κύκλωμα λειτουργούσε ως φίλτρο.

Για την ποιοτική ανάλυση είναι χρήσιμος ο Πίνακας 4.1, στον οποίο συνοψίζονται τυπικοί παράγοντες κλίσης σε dB ανά οκτάβα (dB/oct) καθώς και η εξάρτηση της εξόδου από τη συχνότητα ( $\omega$ ). Το σύμβολο  $\propto$  υποδηλώνει αναλογία, δηλαδή  $V_{out} \propto \omega$  σημαίνει ότι η τάση εξόδου είναι ευθέως ανάλογη του  $\omega$ , που αντιστοιχεί σε ένα παράγοντα κλίσης +6dB/octave. Τι ισχύει όμως όσον αφορά τα μεγέθη ισχύος; Επειδή η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, είναι προφανές ότι αν  $V_{out} \propto \omega$  τότε  $W_{out} \propto \omega^2$ , όπου με  $W_{out}$  συμβολίζεται η ισχύς που αποδίδεται στην έξοδο του κυκλώματος ή συστήματος. Ο παράγοντας κλίσης ωστόσο, είτε μελετάμε τάση ή ισχύ δεν αλλάζει, που έχει να κάνει με το γεγονός ότι όταν τα μεγέθη απεικονίζονται σε λογαριθμική κλίμακα, η τάση υπολογίζεται με βάση το  $20\log()$ , ενώ η ισχύς με το  $10\log()$ .

Εξάρτηση $V_{out}$ από το $\omega$	Εξάρτηση $W_{out}$ από το $\omega$	Παράγοντας κλίσης
$\frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)} \propto \omega$	$W_{out} \propto \omega^2$	+6dB/octave
$\frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)} \propto \omega^2$	$W_{out} \propto \omega^4$	+12dB/octave
$\frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)} \propto \frac{1}{\omega}$	$W_{out} \propto \frac{1}{\omega^2}$	-6dB/octave

$\frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)} \propto \frac{1}{\omega^2}$	$W_{out} \propto \frac{1}{\omega^4}$	-12dB/octave
---	--------------------------------------	--------------

Πίνακας 4.1: Τυπικοί παράγοντες κλίσης που συναντάμε στα ηλεκτρονικά φίλτρα αλλά και στην ηλεκτρακουστική γενικότερα.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η μηχανική εμπέδηση συμβολίζεται με  $Z_M$  και εκφράζει τη σχέση αιτίου αποτελέσματος μεταξύ της δύναμης  $f$  και της ταχύτητας  $u$  σε ένα στοιχείο ενός μηχανικού συστήματος. Ορίζεται ως το μιγαδικό κλάσμα της δύναμης προς την ταχύτητα. Αν το συμβολίσουμε με  $Z$  τότε μπορούμε να το εκφράσουμε ως

$$Z_M(\omega) = \frac{f(\omega)}{u(\omega)}, \quad (4.4)$$

όπου βλέπουμε ότι η μηχανική εμπέδηση είναι συνάρτηση της συχνότητας. Από εδώ και στο εξής για λόγους συντομίας θα παραλείπουμε το όρισμα ( $\omega$ ) και θα γράφουμε απλά  $Z_M$  γνωρίζοντας ότι το  $Z_M$  αναφέρεται σε κάποια συγκεκριμένη γωνιακή συχνότητα. Αν ξέρουμε τη μηχανική εμπέδηση ενός μηχανικού στοιχείου μπορούμε να εκφράσουμε δύο πράγματα: Την ταχύτητα του μηχανικού συστήματος  $u$ , δεδομένης της δύναμης  $f$  που ασκείται σε αυτό ή την δύναμη  $f$  που ασκείται στο μηχανικό σύστημα δεδομένης της ταχύτητας  $u$ . Σε κάθε περίπτωση δηλαδή υπάρχει μια γενεσιουργός αιτία (δύναμη ή ταχύτητα) και ένα αποτέλεσμα (ταχύτητα ή δύναμη). Αν ξέρουμε τη μηχανική εμπέδηση, μπορούμε δεδομένου του ενός μεγέθους να υπολογίσουμε το άλλο και έτσι να έχουμε μια πλήρης περιγραφή της συμπεριφοράς του μηχανικού συστήματος. Προφανώς, αυτά που λέμε εδώ ισχύουν και για άλλα είδους συστήματα τα οποία εξετάζουμε στη συνέχεια όπως το ηλεκτρικό και το ακουστικό σύστημα. Η ηλεκτρική και η ακουστική εμπέδηση (η οποία θα αναλυθεί παρακάτω) χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο για να καθορίζουν παρόμοιες σχέσεις αιτίου και αποτελέσματος.

Η μηχανική εμπέδηση είναι ένα μιγαδικό μέγεθος της μορφής  $R_M + jX_M$  το οποίο αλλάζει με τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$ . Το πραγματικό μέρος της μηχανικής εμπέδησης συμβολίζεται με  $R_M$  και λέγεται μηχανική αντίσταση, και το φανταστικό μέρος συμβολίζεται με  $X_M$  και λέγεται μηχανική αντίδραση. Όταν έχουμε ένα πραγματικό μηχανικό σύστημα, μπορούμε να ασκήσουμε μια δύναμη  $f$ , να μετρήσουμε την ταχύτητα  $u$  και από το λόγο τους να εκτιμήσουμε τη μηχανική εμπέδηση. Τι γίνεται όμως αν θέλουμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά ενός μηχανικού συστήματος το οποίο δεν το έχουμε κατασκευάσει ακόμα; Θα θέλαμε σε αυτήν την περίπτωση αν μπορούσαμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του όσο είναι ακόμα στα χαρτιά (θα ήταν πολύ χρονοβόρο να το φτιάχνουμε και να το χαλάμε συνέχεια μέχρι να επιτύχουμε τη συμπεριφορά που θέλουμε). Ευτυχώς υπάρχει διέξοδος σε αυτό το πρόβλημα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους της φυσικής για να το μοντελοποιήσουμε.

Συγκεκριμένα, όταν θέλουμε να θέσουμε σε κίνηση ένα μηχανικό σύστημα πρέπει να υπερνικήσουμε τρία διαφορετικά είδη δυνάμεων: Δυνάμεις αδράνειας (λόγω της μάζας των στοιχείων του μηχανικού συστήματος), ελαστικές δυνάμεις (λόγω της συμπεριφοράς

«ελατηρίου» κάποιων εκ των στοιχείων του συστήματος) και δυνάμεις λόγω μηχανικής αντίστασης (όπως για παράδειγμα η αντίσταση που προκαλεί ο αέρας στην επιφάνεια της ρακέτας μας που παίζουμε στην παραλία). Αν λοιπόν ξέρουμε από τι εξαρτήματα αποτελείται το μηχανικό μας σύστημα, μπορούμε να υπολογίσουμε και το είδος των δυνάμεων που πρέπει να υπερνικήσουμε για να θέσουμε σε κίνηση το σύστημα, ή με άλλα λόγια, μπορούμε να εκφράσουμε τη μηχανική εμπέδηση και επομένως να αποκτήσουμε έναν ακριβή τρόπο ανάλυσης της συμπεριφοράς του συστήματος. Ορίζουμε λοιπόν τα τρία δομικά στοιχεία ενός μηχανικού συστήματος: τη μηχανική μάζα, τη μηχανική ελαστικότητα και τη μηχανική αντίσταση.

#### 4.2.1 Μηχανική μάζα

Η μάζα είναι μια φυσική ποσότητα της οποίας η επιτάχυνση είναι ευθέως ανάλογη της δύναμης που ασκείται σε αυτή. Οι μονάδες είναι σε kg και συμβολίζεται με  $M_M$  (το πρώτο M είναι από τη λέξη μάζα και το δεύτερο M από το γεγονός ότι το σύστημα είναι μηχανικό) ή απλά με  $M$ . Η μάζα  $M_M$  υπακούει στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα

$$f(t) = M_M \frac{du(t)}{dt}, \quad (4.5)$$

όπου  $f(t)$  είναι η στιγμιαία τιμή της δύναμης σε Newton και  $u(t)$  η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας σε m/sec. Στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση, για γωνιακή συχνότητα  $\omega$  (το  $\omega$  είναι ίσο με  $2\pi$  επί τη συχνότητα που εξετάζουμε) η παραπάνω σχέση γράφεται ως

$$f = j\omega M_M u, \quad (4.6)$$

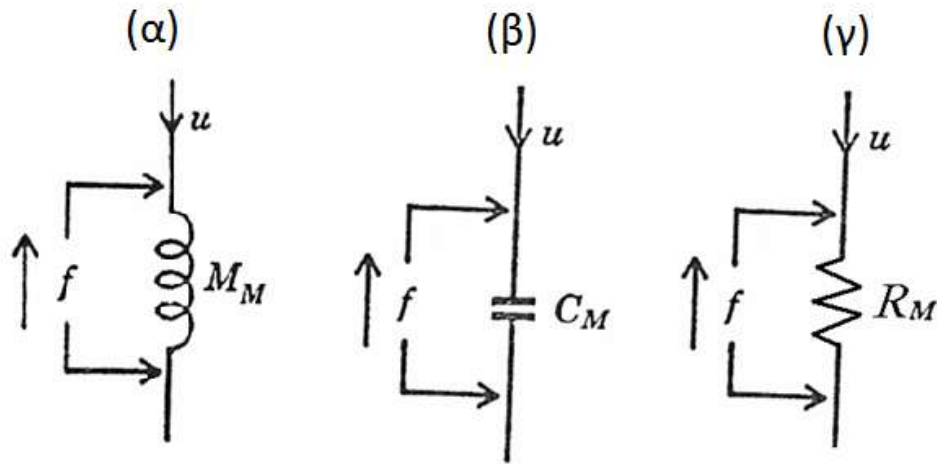
όπου  $j = \sqrt{-1}$  και τα  $f$  και  $u$  είναι η μιγαδική μέση τετραγωνική τιμή της δύναμης και της ταχύτητας. Θεωρώντας ένα μηχανικό σύστημα που περιέχει μόνο μάζα, η μηχανική εμπέδηση θα είναι

$$Z_M = \frac{f}{u} = j\omega M_M. \quad (4.7)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι δυνάμεις αδράνειας που πρέπει να νικήσουμε για να ταλαντώσουμε μία μάζα  $M_M$  αυξάνονται με τη συχνότητα. Για παράδειγμα, όσο πιο γρήγορα χτυπάμε το σέικερ για να φτιάξουμε φραπέ, τόσο μεγαλύτερη δύναμη πρέπει να βάλουμε, τόσο για να κρατάμε το σέικερ, όσο και για να το κουνάμε. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι στην περίπτωση του φραπέ ένα μέρος της δύναμης που ασκούμε πρέπει να αφιερωθεί για να υπερνικήσει τη μάζα του ίδιου του χεριού μας.

Η μηχανική εμπέδηση λόγω μάζας βλέπουμε ότι είναι καθαρά φανταστικός αριθμός. Επειδή το πρόσημο του φανταστικού αριθμού είναι θετικό, σημαίνει ότι κατά την ταλάντωση μιας μάζας με γωνιακή συχνότητα  $\omega$  η δύναμη προπορεύεται κατά  $90^\circ$  (ή  $\pi/2$ ) της ταχύτητας. Αν λοιπόν η δύναμη που ασκείται δίνεται από τη συνάρτηση  $f(t) = F \cos \omega t$  (όπου  $F$  πραγματική σταθερά) η ταχύτητα με την οποία κινείται η μάζα θα δίνεται από τη σχέση  $u(t) = U \cos(\omega t - \pi/2) = -U \sin \omega t$ , όπου και εδώ  $U$  πραγματική σταθερά. Η συμπεριφορά μιας μάζας στην οποία ασκείται μια δύναμη  $f$  και κινείται με ταχύτητα  $u$  είναι ανάλογη μιας αυτεπαγωγής (ενός πηνίου) του οποίου

στα άκρα ασκείται μια διαφορά δυναμικού  $V$  με αποτέλεσμα να διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Το ηλεκτρικό ανάλογο λοιπόν ενός μηχανικού συστήματος που αποτελείται από μάζα είναι το εικονιζόμενο στο Σχήμα 4.5(α).



Σχήμα 4.5: Ηλεκτρικό ανάλογο μιας μάζας στο (α), μηχανικής ελαστικότητας στο (β) και μηχανικής αντίστασης στο (γ).

#### 4.2.2 Μηχανική ελαστικότητα

Ελαστικότητα (ή ενδοτικότητα) είναι το μέγεθος που εκφράζει τη συμπεριφορά ενός μηχανικού συστήματος στο οποίο όταν ασκείται μια δύναμη, τότε αυτό μετατοπίζεται ανάλογα της δύναμης. Η μηχανική ελαστικότητα περιγράφει δηλαδή το ίδιο φαινόμενο που συναντάμε σε ένα ελατήριο με ακαμψία  $k$  όπου η δύναμη σχετίζεται με τη μετατόπιση  $x$  μέσω της σχέσης  $f=kx$ . Η ελαστικότητα είναι το αντίστροφο της ακαμψίας ενός ελατηρίου και συμβολίζεται με  $C_M$  (το C είναι από την αγγλική λέξη compliance). Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι m/Newton. Αν μας δίνεται η ακαμψία του συστήματος  $k$ , τότε ισχύει  $C_M=1/k$ . Η μετατόπιση είναι ίση με το ολοκλήρωμα της ταχύτητας ( $x = \int u dt$ ) και η σχέση που τη συνδέει με τη δύναμη θεωρώντας στιγμιαίες τιμές είναι της μορφής

$$f(t) = kx = \frac{1}{C_M} \int u(t) dt \quad (4.8)$$

Στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση, για γωνιακή συχνότητα  $\omega$  έχουμε τη σχέση

$$f = \frac{1}{j\omega C_M} u = \frac{-j}{\omega C_M} u. \quad (4.9)$$

Δηλαδή η δύναμη που πρέπει να καταβάλουμε για να ταλαντώσουμε ένα ελατήριο σε μια ταχύτητα  $u$  είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση η μετατόπιση συνδέεται με την ταχύτητα μέσω της σχέσης  $u = j\omega x$ . Για να έχουμε λοιπόν μεγάλες ταχύτητες σε μικρές συχνότητες θα πρέπει να ασκούμε μεγάλες μετατοπίσεις, γεγονός που σημαίνει ότι πρέπει να ασκούμε μεγάλη δύναμη στο ελατήριο.

Η μηχανική εμπέδηση λόγω ελαστικότητας βλέπουμε ότι είναι καθαρά φανταστικός αριθμός. Επειδή το πρόσημο του φανταστικού αριθμού είναι αρνητικό, σημαίνει ότι κατά την ταλάντωση ενός ελατηρίου με γωνιακή συχνότητα  $\omega$  η δύναμη καθυστερεί κατά  $90^\circ$  (ή  $\pi/2$ ) της ταχύτητας. Αν λοιπόν η δύναμη που ασκείται δίνεται από τη συνάρτηση  $f(t)=F\cos\omega t$  (όπου  $F$  πραγματική σταθερά) η ταχύτητα με την οποία κινείται η μάζα θα δίνεται από τη σχέση  $u(t)=U\cos(\omega t+\pi/2)=U\sin\omega t$ , όπου και εδώ  $U$  είναι πραγματική σταθερά. Η συμπεριφορά ενός ελατηρίου στο οποίο ασκείται μια δύναμη  $f$  και κινείται με ταχύτητα  $u$  είναι ανάλογη μιας χωρητικότητας (ενός πυκνωτή) του οποίου στα άκρα ασκείται μια διαφορά δυναμικού  $V$  με αποτέλεσμα να διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Το ηλεκτρικό ανάλογο λοιπόν ενός μηχανικού συστήματος που αποτελείται από ελαστικότητα είναι το εικονιζόμενο στο Σχήμα 4.5(β).

#### 4.2.3 Μηχανική αντίσταση

Σε ένα μηχανικό σύστημα που χαρακτηρίζεται από μηχανική αντίσταση η ταχύτητα  $u$  είναι ευθέως ανάλογη της δύναμης  $f$ , και εξαρτάται από μια σταθερά που συμβολίζεται με  $R_M$ . Οι μονάδες που παίρνει εδώ η  $R_M$  είναι τα μηχανικά Ohm. Η σχέση που συνδέει στιγμιαίες τιμές δύναμης και ταχύτητας είναι της μορφής  $f(t)=R_M u(t)$  και στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση ισχύει

$$f = R_M u. \quad (4.10)$$

Η μηχανική αντίσταση βλέπουμε ότι είναι καθαρά πραγματικός αριθμός. Αυτό σημαίνει ότι κατά την ταλάντωση ενός μηχανικού συστήματος που αποτελείται αποκλειστικά από μηχανική αντίσταση, η δύναμη είναι σε φάση με την ταχύτητα. Αν λοιπόν η δύναμη που ασκείται δίνεται από τη συνάρτηση  $f(t)=F\cos\omega t$  (όπου  $F$  πραγματική σταθερά) η ταχύτητα με την οποία κινείται η μάζα θα δίνεται από τη σχέση  $u(t)=U\cos(\omega t)$ , όπου και εδώ  $U$  πραγματική σταθερά. Η συμπεριφορά μιας μηχανικής αντίστασης στην οποία ασκείται μια δύναμη  $f$  και κινείται με ταχύτητα  $u$  είναι ανάλογη μιας ωμικής αντίστασης στις οποίες τα άκρα ασκείται μια διαφορά δυναμικού  $V$  με αποτέλεσμα να διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Το ηλεκτρικό ανάλογο λοιπόν ενός μηχανικού συστήματος που αποτελείται από μηχανική αντίσταση είναι το εικονιζόμενο στο Σχήμα 4.5(γ).

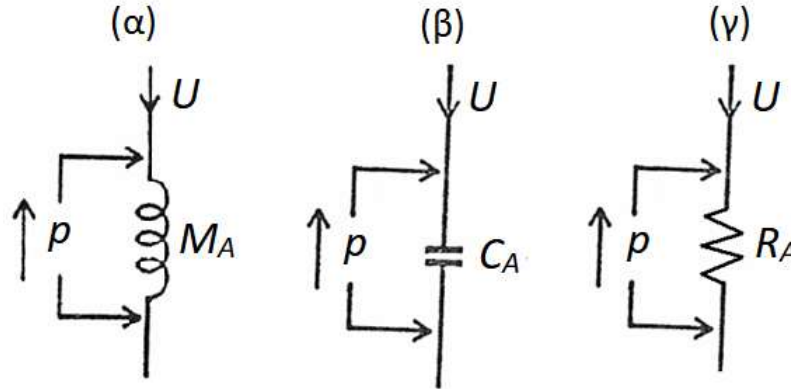
### 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η ακουστική εμπέδηση συμβολίζεται με  $Z_A$  και εκφράζει τη σχέση αιτίου αποτελέσματος μεταξύ της πίεσης  $p$  και της ταχύτητας παροχής όγκου  $U$  σε ένα ακουστικό σύστημα.

$$Z_A(\omega) = \frac{p(\omega)}{U(\omega)} \quad (4.11)$$

Εκ' πρώτης όψεως, είναι φανερό η αναλογία των μεγεθών δύναμης με πίεση και ταχύτητας με ταχύτητα παροχής όγκου. Η πίεση είναι δύναμη ανά επιφάνεια (με μονάδες  $N/m^2$ ) και η ταχύτητα παροχής όγκου είναι ταχύτητα επί επιφάνεια (με μονάδες  $m^3/s$ ). Κατ' αναλογία λοιπόν με το μηχανικό σύστημα, στο ακουστικό σύστημα ορίζεται η ακουστική μάζα, η ακουστική ελαστικότητα και η ακουστική αντίσταση. Η ακουστική εμπέδηση είναι ένα μιγαδικό μέγεθος της μορφής  $Z_A=\alpha+j\beta$  το οποίο αλλάζει με τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$ . Το πραγματικό

μέρος  $\alpha$  της ακουστικής εμπέδησης λέγεται ακουστική αντίσταση, και το φανταστικό  $\beta$ , λέγεται ακουστική αντίδραση.



Σχήμα 4.6: Ηλεκτρικό ανάλογο μιας ακουστικής μάζας στο (α), ακουστικής ελαστικότητας στο (β) και ακουστικής αντίστασης στο (γ).

#### 4.3.1 Ακουστική μάζα

Η ακουστική μάζα είναι ποσότητα αντίστοιχη της μηχανικής μάζας αλλά παίρνει μονάδες  $\text{kg}$  ανά μέτρα εις την τετάρτη ( $\text{kg}/\text{m}^4$ ). Σχετίζεται με μια μάζα αέρα η οποία επιταχύνεται από μια αιτία η οποία τείνει να μετατοπίσει τον αέρα, χωρίς όμως να τον συμπιέζει. Το φαινόμενο της επιτάχυνσης χωρίς συμπίεση είναι αυτό που ξεχωρίζει την ακουστική μάζα από άλλα στοιχεία ακουστικής εμπέδησης. Το φαινόμενο της ακουστικής μάζας το συναντάμε στην περίπτωση ενός σωλήνα ο οποίος περιέχει αέρα και στου οποίου το ένα άκρο ασκείται κάποια δύναμη θέτοντας τα μόρια του αέρα εντός του σωλήνα σε ταλάντωση (βλ και Σχήμα 4.7(α)). Έστω ότι ο σωλήνας είναι μήκους  $l$  και διατομής  $S$ . Μια δύναμη  $f(t)$  επιδρά επιταχύνοντας τη μάζα  $M_M$  του αέρα εντός του σωλήνα θέτοντάς την σε κίνηση που περιγράφεται από τη στιγμιαία ταχύτητα  $u(t)$ . Σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα θα ισχύει  $f(t) = M_M du(t)/dt$ . Αυτός ο νόμος μπορεί να εκφραστεί με ακουστικά μεγέθη αν διαιρέσουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης με τη διατομή του σωλήνα  $S$  ως εξής:

$$\frac{f(t)}{S} = \frac{M_M}{S} \frac{d(Su(t))}{Sdt} \quad \text{ή} \quad p(t) = \frac{M_M}{S^2} \frac{dU(t)}{dt}. \quad (4.12)$$

Στην τελευταία σχέση το κλάσμα της δύναμης διά της διατομής αντικαθίσταται από την ακουστική πίεση και το γινόμενο ταχύτητας επί διατομής αντικαθίσταται από την παροχή όγκου. Η σχέση μπορεί τελικά να γραφεί

$$p(t) = M_A \frac{dU(t)}{dt}, \quad (4.13)$$

όπου

- $p(t)$  η στιγμιαία μεταβολή της πίεσης σε Newton ανά  $\text{m}^2$  η οποία δρα επιταχύνοντας τη μάζα αέρα  $M_M$ ,

- $M_A = M_M/S^2$  η ακουστική μάζα σε kg ανά  $m^4$  του αέρα ο οποίος τίθεται σε επιτάχυνση. Εδώ  $M_M$  είναι η μάζα του αέρα εντός του σωλήνα. Επειδή ξέρουμε την πυκνότητα του αέρα, η συνολική μάζα του αέρα θα είναι ίση με το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  επί τον όγκο του σωλήνα ο οποίος είναι ίσος με το μήκος του  $l$  επί τη διατομή του  $S$ . Δηλαδή,  $M_M = \rho l S$  και τελικά,  $M_A = \frac{\rho l}{S}$ .
- $U(t)$  η στιγμιαία ταχύτητα παροχής όγκου σε  $m^3$  ανά sec του αέρα. Η στιγμιαία παροχή όγκου  $U(t)$  ισούται με την ταχύτητα του αέρα  $u(t)$  επί τη διατομή του σωλήνα  $S$ .

Στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση, για γωνιακή συχνότητα  $\omega$  μπορούμε να γράψουμε

$$p = j\omega M_A U, \text{ και } Z_A = j\omega M_A \quad (4.14)$$

όπου  $p$  και  $U$  είναι τώρα οι μιγαδικές μέσες τετραγωνικές τιμές της πίεσης και της παροχής όγκου. Όπως και με τη μηχανική μάζα, το ηλεκτρικό ανάλογο της ακουστικής μάζας είναι η αυτεπαγωγή. Η εμπέδηση λόγω ακουστικής μάζας είναι και εδώ ένας καθαρά φανταστικός αριθμός. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση  $p$  θα προπορεύεται της παροχής όγκου  $U$  κατά  $\pi/2$ . Λόγω της επιτάχυνσης χωρίς συμπίεση, τα μόρια του αέρα κατά μήκος όλου του σωλήνα κινούνται σε φάση. Σε οποιοδήποτε μήκος του σωλήνα και αν μετρήσουμε τη σωματιδιακή ταχύτητα  $u$ , αυτή θα καθυστερεί της  $p$  κατά  $\pi/2$ .

#### 4.3.2 Ακουστική ελαστικότητα

Η ακουστική ελαστικότητα (ή ενδοτικότητα) είναι μια ποσότητα αντίστοιχη της μηχανικής ελαστικότητας αλλά παίρνει μονάδες σε  $m^5$  ανά Newton ( $m^5/N$ ). Σχετίζεται μια έναν όγκο αέρα ο οποίος συμπιέζεται από κάποια αιτία χωρίς όμως να επιδέχεται ουσιαστική μετατόπιση του κέντρου βάρους του. Αντίθετα λοιπόν από την ακουστική μάζα, εδώ έχουμε συμπίεση χωρίς μετατόπιση. Το ακουστικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της ακουστικής ελαστικότητας είναι ένας όγκος αέρα κλεισμένος σε ένα δοχείο όγκου  $V$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7(β).

Αν τοποθετήσουμε ένα έμβολο στο άνοιγμα του δοχείου και το πιέσουμε προς τα μέσα, ελαστικές δυνάμεις του εγκλωβισμένου αέρα θα το επαναφέρουν προς τα έξω. Θεωρώντας στιγμιαίες μεταβολές της πίεσης και της παροχής όγκου, θα ισχύει τώρα

$$p(t) = \frac{1}{C_A} \int U(t) dt, \quad (4.15)$$

όπου  $C_A = C_M S^2$  είναι η ακουστική ελαστικότητα σε  $m^5/N$  η οποία προέρχεται από τον πολλαπλασιασμό της μηχανικής ελαστικότητας με το εμβαδό  $S$  του ανοίγματος και  $U(t)$  η στιγμιαία παροχή όγκου σε  $m^3/sec$  του αέρα που συμπιέζεται στο δοχείο. Στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση, για γωνιακή συχνότητα  $\omega$  μπορούμε να γράψουμε

$$p = \frac{U}{j\omega C_A} \text{ και } Z_A = \frac{1}{j\omega C_A}, \quad (4.16)$$

όπου  $p$  και  $U$  είναι τώρα οι μιγαδικές μέσες τετραγωνικές τιμές της πίεσης και της ταχύτητας παροχής όγκου. Όπως και με τη μηχανική ελαστικότητα, το ηλεκτρικό ανάλογο της ακουστικής ελαστικότητας είναι ένας πυκνωτής χωρητικότητας  $C_A$ . Η εμπέδηση λόγω ακουστικής

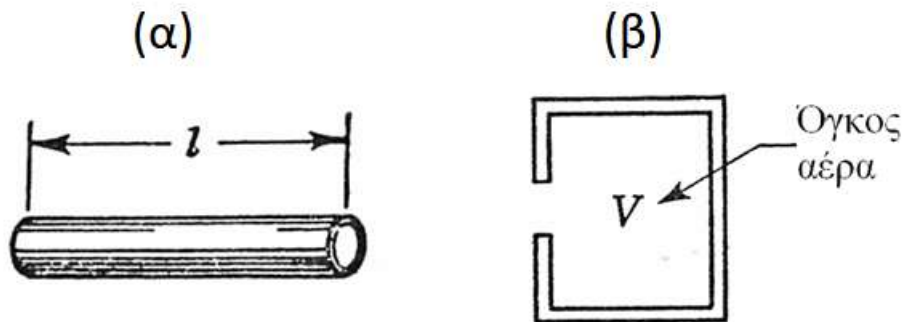
ελαστικότητας είναι και εδώ ένας καθαρά φανταστικός αριθμός. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση  $p$  θα καθυστερεί της παροχής όγκου  $U$  κατά  $\pi/2$ .

Η ακουστική ελαστικότητα σχετίζεται με τον όγκο  $V$  του δοχείου μέσω της σχέσης

$$C_A = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (4.17)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $c$  η ταχύτητα του ήχου. Η ακουστική ελαστικότητα εμφανίζεται στο πίσω μέρος του διαφράγματος ενός ηχείου κλειστού τύπου. Λόγω της ελαστικότητας του εγκλωβισμένου αέρα, η καμπίνα του ηχείου αντιδρά σαν ελατήριο με αποτέλεσμα να προκύπτουν δυνάμεις επαναφοράς οι οποίες υπερτίθενται στις δυνάμεις από τις αναρτήσεις της κατασκευής. Αντίστοιχα, μπορεί να οριστεί και η ακουστική ακαμψία, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ελαστικότητας, δηλαδή

$$k_A = \frac{1}{C_A} = \frac{\rho c^2}{V}.$$



Σχήμα 4.7: Στοιχεία για το συμβολισμό της ακουστικής μάζας στο (α) και της ακουστικής ελαστικότητας στο (β).

#### 4.3.3 Ακουστική αντίσταση

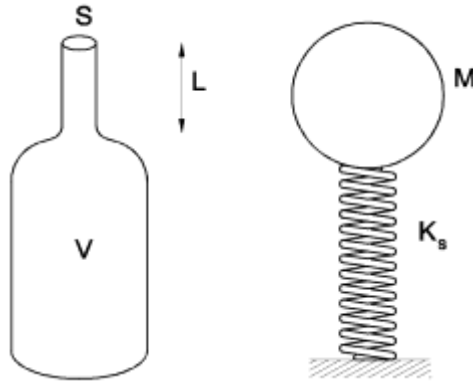
Η ακουστική αντίσταση σχετίζεται με τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας και αν και έχει διαστάσεις Newton επί sec ανά  $m^5$  ( $N \cdot s/m^5$ ), στη πράξη χρησιμοποιείται η μονάδα ακουστικό Ohm. Η ακουστική αντίσταση συμβολίζεται με  $R_A$  και συνδέει την στιγμιαία τιμή της πίεσης με την ταχύτητα παροχής όγκου μέσω της σχέσης

$$p(t) = R_A U(t). \quad (4.18)$$

Στη μόνιμη κατάσταση θα ισχύει προφανώς

$$p = R_A U \text{ και } Z_A = R_A, \quad (4.19)$$

όπου  $p$  και  $U$  είναι οι μιγαδικές μέσες τετραγωνικές τιμές της πίεσης και της ταχύτητας παροχής όγκου. Το ηλεκτρικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της ακουστικής αντίστασης είναι η ωμική αντίσταση (βλ Σχήμα 4.6(γ))



Σχήμα 4.8: Συντονιστής Helmholtz στην μορφή ενός πολύ καθημερινού αντικειμένου (αριστερά) και αντίστοιχο μηχανικό του ανάλογο (δεξιά).

#### 4.3.4 Ο Συντονιστής Helmholtz

Ο συντονισμός; Helmholtz είναι ένα φαινόμενο που το συναντάμε πάρα πολύ συχνά σε ακουστικά συστήματα και το οποίο δημιουργείται όταν έχουμε ένα οποιοδήποτε δοχείο αέρα με μία ανοικτή οπή. Το πιο απλό παράδειγμα είναι ένα άδειο γυάλινο μπουκάλι μπίρας ή αναψυκτικού. Από την εμπειρίας μας γνωρίζουμε ότι φυσώντας το μπουκάλι δημιουργείται ένα ήχος με μια πολύ διακριτή συχνότητα. Η συχνότητα αυτή συμπίπτει με τη συχνότητα συντονισμού. Την εμφάνιση του συντονισμού μπορούμε να την εξηγήσουμε αν καταλάβουμε ότι ο αέρας μέσα στο μπουκάλι έχει τόσο μάζα όσο και ελαστικότητα. Συγκεκριμένα, ο λαιμός του μπουκαλιού δημιουργεί κατά κύριο λόγο ένα στοιχείο ακουστικής μάζας, ενώ το υπόλοιπο σώμα μπορούμε να το δούμε ως ένα κλειστό δοχείο το οποίος κατά κύριο λόγο δημιουργεί ένα στοιχείο ακουστικής ελαστικότητας (Σχήμα 4.8). Όταν έχουμε ακουστικό (ή μηχανικό) σύστημα με μάζα και ελαστικότητα, τότε γνωρίζουμε ότι υπάρχει κάποια γωνιακή ταχύτητα διέγερσης  $\omega_0$  όπου η ακουστική (ή μηχανική) εμπέδηση γίνεται ελάχιστη, ακριβώς όπως αυτό που συμβαίνει σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα όπου υπάρχει πηνίο και πυκνωτής. Για ακουστικό σύστημα, τη γωνιακή συχνότητα συντονισμού αν γνωρίζουμε την ακουστική μάζα  $M_A$  και ελαστικότητα  $C_A$  μπορούμε να την υπολογίζουμε μέσω του τύπου

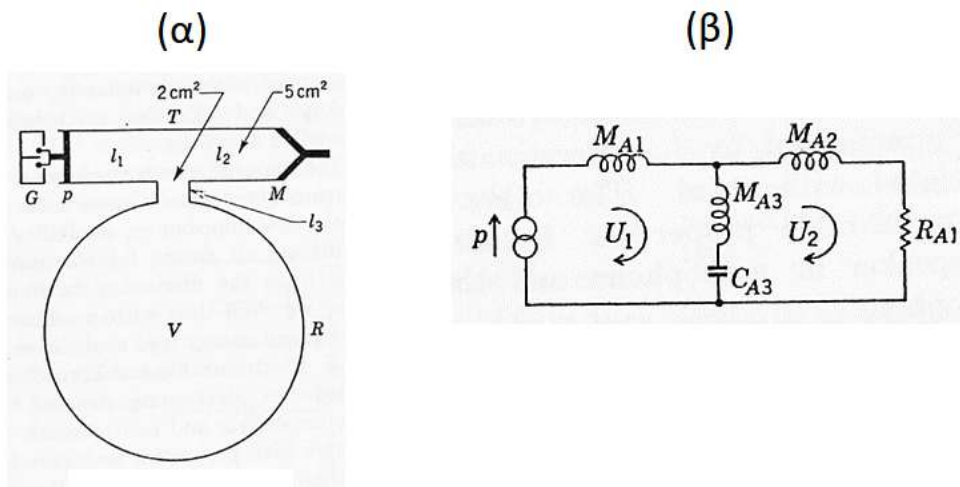
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_A C_A}} \text{ και } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}. \quad (4.20)$$

Με βάση όλα αυτά μπορούμε τώρα να εξηγήσουμε το λόγο για τον οποίο αν βάλουμε μία ποσότητα υγρού (πχ νερού) μέσα στο άδειο μπουκάλι έχουμε μετατόπιση της συχνότητας προς τα πάνω: με την εισαγωγή του νερού μειώνεται ουσιαστικά ο όγκος του αέρα και από τη Σχέση (4.17) βλέπουμε ότι αυτό οδηγεί σε μείωση της ελαστικότητας  $C_A$ . Από τη Σχέση (4.20) βλέπουμε ότι αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει σε αύξηση του  $\omega_0$ . Καλείται ο φοιτητής, λαμβάνοντας υπόψιν την ενότητα 4.3 να αποδείξει ότι η γωνιακή συχνότητα συντονισμού της Σχέσης (4.20) μπορεί να γραφεί και ως

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S}{VL}}$$

όπου  $S$ ,  $L$  η διατομή και το μήκος του λαιμού αντίστοιχα,  $V$  ο όγκος του και  $c$  η ταχύτητα του ήχου.

**Άσκηση:** Ο συντονιστής Helmholtz συχνά χρησιμοποιείται ως μέσο για την καταπίεση κάποιας ανεπιθύμητης συχνότητας από ένα ακουστικό σύστημα. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8. Μία γεννήτρια σταθερής δύναμης  $G$  παράγει μια σειρά από τόνους. Οι τόνοι ενεργοποιούν ένα μικρόφωνο  $M$  του οποίου η ακουστική εμπέδηση είναι  $500$  ακουστικά  $\Omega$ m. Αν ο σωλήνας έχει διατομή  $5 \text{ cm}^2$ ,  $l_1 = l_2 = 5 \text{ cm}$ ,  $l_3 = 1 \text{ cm}$ ,  $V = 1000 \text{ cm}^3$  και ο σωλήνας  $l_3$  έχει διατομή  $2 \text{ cm}^2$ , ποια συχνότητα δε θα εμφανίζεται στην είσοδο του μικροφώνου; ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 344 \text{ m/sec}$ )



Σχήμα 4.8: Παράδειγμα συντονιστή Helmholtz στο (α) και ηλεκτρικό ανάλογο στο (β).

**Λύση:** Για το σχεδιασμό του ηλεκτρικού ανάλογου γίνεται καταρχάς η υπόθεση ότι το ηχητικό πεδίο είναι μονοδιάστατο και ότι υπάρχει συνέχεια της πίεσης κατά μήκος της συσκευής. Με βάση αυτό το συλλογισμό βλέπουμε ότι στο σημείο που τελειώνει ο σωλήνας  $l_1$  και ξεκινάει ο σωλήνας  $l_2$  και  $l_3$  η ακουστική πίεση είναι η ίδια και επομένως στο ηλεκτρικό ανάλογο τα το ένα άκρο από κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία βρίσκεται σε κοινό δυναμικό (κοινή πίεση). Βλέπουμε επίσης ότι ένα μέρος του όγκου του αέρα μετά το σωλήνα  $l_1$  περνάει μέσα από τον  $l_3$  και επομένως οι σωλήνες  $l_1$  και  $l_2$  διαρρέονται από διαφορετικές ποσότητες όγκου αέρα ανά μονάδα του χρόνου. Για το ηλεκτρικό ανάλογο θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι κάθε σωλήνας αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο εμπέδησης μάζας και ότι η κλειστή κοιλότητα όγκου  $V$  αντιστοιχεί σε στοιχείο εμπέδησης ελαστικότητας. Το ηλεκτρικό ανάλογο το βλέπουμε στο Σχήμα 4.8(β). Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την ακουστική εμπέδηση για κάθε στοιχείο.

$$M_{A1} = M_{A2} = \frac{\rho l_1}{S_1} = \frac{1.18 * 0.05}{5 * 10^{-4}} = \frac{118 \text{ kg}}{\text{m}^4}$$

$$M_{A3} = \frac{\rho l_3}{S_3} = \frac{1.18 * 0.01}{2 * 10^{-4}} = \frac{59 \text{ kg}}{\text{m}^4}$$

$$C_{A3} = \frac{V}{\rho c^2} = \frac{10^{-3}}{1.2 * 344^2} = 7.04 * 10^{-9} \text{ m}^5/\text{N}$$

Ο συντονιστής Helmholtz αποτελείται από τα στοιχεία  $M_{A3}$  και  $C_{A3}$  σε σειρά. Για να βρούμε ποια συχνότητα θα απορροφάται τελείως πρέπει να βρούμε τη συχνότητα συντονισμού. Σύμφωνα με τα όσα ξέρουμε από την ανάλυση RLC κυκλωμάτων, για τη γωνιακή συχνότητα που συμβαίνει ο συντονισμός θα ισχύει



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_{A3}C_{A3}}} = \frac{1}{\sqrt{41.5 * 10^{-8}}} = 1552 \text{ rad/s}$$

που αντιστοιχεί στη συχνότητα  $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 257$  Hz. Στη συχνότητα συντονισμού η ακουστική εμπέδηση του κλάδου που περιέχει τα στοιχεία  $M_{A3}$  και  $C_{A3}$  είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα ο κλάδος αυτός αντιστοιχεί σε βραχυκύκλωμα! Κατά συνέπεια, όλος ο όγκος αέρα διέρχεται μέσα από το συντονιστή Helmholtz και το “ρεύμα”  $U_2$  μηδενίζεται. Κατά συνέπεια στα 257 Hz δε φτάνει ήχος στο μικρόφωνο. Παρατηρούμε ότι οι ποσότητες  $M_{A1}$  και  $M_{A2}$  δε χρειάζεται να υπολογιστούν για να απαντηθεί το ερώτημα σε αυτήν την άσκηση. Ωστόσο, εμείς εδώ τις υπολογίσαμε για εξάσκηση.

#### 4.4 ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΟ-ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ

Ο Παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις αντιστοιχίες μεταξύ ηλεκτρικών, μηχανικών και αντιστοιχών μεγεθών. Βλέπουμε ότι η τέταρτη στήλη περιέχει περιστροφικό μηχανικό σύστημα. Στην ηλεκτρακουστική δε μελετάμε τέτοια συστήματα, καταλαβαίνει κανείς ωστόσο ότι ένα τέτοιο σύστημα θα έπρεπε να ληφθεί υπόψιν στην περίπτωση που μελετάγαμε έναν ηλεκτρικό κινητήρα ή μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικές αναλογίες

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

Πίνακας 4.2 Αντιστοιχίες μεταξύ φυσικών μεγεθών σε ηλεκτρικό, μηχανικό και ακουστικό σύστημα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι νόμοι του Kirchhoff ισχύουν αυτούσιοι στα ηλεκτρικά ανάλογα των μηχανικών και ακουστικών συστημάτων. Για παράδειγμα, θεωρώντας το ηλεκτρικό ανάλογο ενός ακουστικού σύστημα θα ισχύουν οι παρακάτω προτάσεις:

- 1) Σε μία διακλάδωση το άθροισμα των ταχυτήτων όγκου θα πρέπει να αθροίζει στο 0

$$\sum_i U_i = 0 \quad (4.21)$$

- 2) Σε ένα κλειστό ακουστικό κύκλωμα η κατανομή των επιμέρους πιέσεων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ισχύει

$$\sum_j p_j = 0 \quad (4.22)$$

Η πρόταση (1) προφανώς αντιστοιχεί στο νόμο του Kirchhoff για τα ρεύματα σε μια διακλάδωση ενώ η πρόταση (2) αντιστοιχεί στο νόμο του Kirchhoff για τις μεταβολές τάσεις κατά μήκος ενός κλειστού κυκλώματος.

## 5 ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

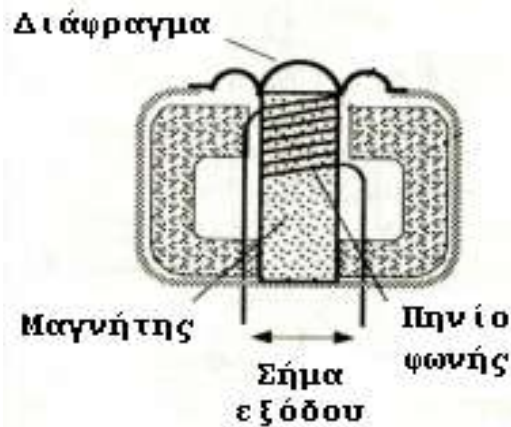
---

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφοντας την φυσική μορφή του ήχου αναφερθήκαμε στο ότι ο ήχος αρχικά διαδίδεται σαν ταλάντωση των μορίων ενός ελαστικού μέσου διάδοσης και σαν πιο σύνθετες αναφέραμε τον αέρα. Οι ταλαντώσεις των μορίων δημιουργούν πυκνώματα και αραιώματα όταν πρόκειται για τον αέρα και αυτές οι μεταβολές μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα της ίδιας μορφής. Με ποιο τρόπο όμως γίνεται αυτή η μετατροπή; Είναι γνωστό ότι η μετατροπή αυτή από το ηχητικό κύμα στο ηλεκτρικό σήμα (audio signal) γίνεται από τα μικρόφωνα. Όσον αφορά δε τον αέρα, τα μικρόφωνα είναι ο μόνος τρόπος για να γίνει η μετατροπή αυτή. Χαρακτηρίζουμε λοιπόν τα μικρόφωνα σαν ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η ποιότητα κατασκευής των μικροφώνων απαιτεί τεράστια προσοχή, γιατί η διαδικασία της μεταβολής αυτής είναι πολύ σημαντική. Είναι σημαντική γιατί μια κακής ποιότητας μετατροπή δεν μπορεί να δώσει καλό αποτέλεσμα όσο καλή και να είναι η μετέπειτα διαδικασία (προενίσχυση, επεξεργασία, καταγραφή, ενίσχυση κ.λ.π.). Αρχικά θα περιγράψουμε τα μικρόφωνα σε σχέση με τον τύπο του μετατροπέα τους, την αρχή δηλαδή που χρησιμοποιούν για την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας (ήχος) σε ηλεκτρικό ενέργεια (audio σήμα) και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων.

### 5.1 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

Ο πιο κοινός τύπος μικροφώνων είναι τα δυναμικά μικρόφωνα. Είναι στην ουσία μικρογραφία ενός μεγαφώνου (που θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο). Πολλές φορές μάλιστα σε συστήματα ενδοσυνεννόησης υπάρχουν διατάξεις που εκτελούν και τις δύο λειτουργίες μαζί. Στο Σχήμα 5.1 βλέπουμε την βασική κατασκευή ενός τέτοιου μικροφώνου. Αποτελείται από ένα μαγνήτη και έναν άξονα μεταξύ των δύο πόλων του μαγνήτη πάνω στον οποίο είναι τυλιγμένο το πηνίο φωνής (voice coil). Το πηνίο φωνής μπορεί να κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι δύο πόλοι του μαγνήτη. Στο πάνω άκρο του πηνίου φωνής είναι τοποθετημένο ένα διάφραγμα. Όταν ένα ηχητικό κύμα χτυπά το διάφραγμα, η επιφάνεια του δονείται στην ίδια συχνότητα. Η κίνηση του διαφράγματος μεταφέρεται στο πηνίο φωνής το οποίο κινείται μπροστά και πίσω μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Η κίνηση αυτή προκαλεί την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο ίδιων μεταβολών με αυτές της παραπάνω κίνησης. Έτσι το ηλεκτρικό ρεύμα στην έξοδο του πηνίου είναι μια αναπαράσταση του ήχου. Τα δυναμικά μικρόφωνα είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και ανθεκτικά και με καλή απόδοση και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στις ζωντανές εκδηλώσεις, όπου η φυσική αντοχή ενός μικροφώνου είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επίσης είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην υγρασία, τη σκόνη κλπ.



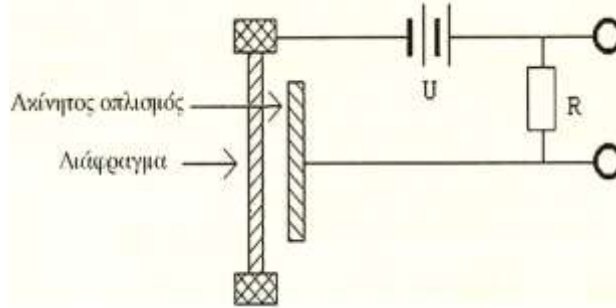
Σχήμα 5.1: Δομή δυναμικού μικροφώνου

## 5.2 ΠΥΚΝΩΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

Μετά τα δυναμικά τα πιο κοινά σε χρήση μικρόφωνα είναι τα πυκνωτικά. Σε αυτό το είδος μικροφώνων το διάφραγμα πάνω στο οποίο προσπίπτει ο ήχος είναι στην πραγματικότητα η μια πλάκα οπλισμού ενός πυκνωτή (Σχήμα 5.2). Η τιμή της χωρητικότητας μπορεί να μεταβάλλεται υπό την επίδραση των ηχητικών κυμάτων επιτρέποντας την κίνηση της πλάκας του οπλισμού. Επειδή ισχύει ως γνωστόν ότι  $U = Q/C$  μπορούμε να ανιχνεύσουμε μια μεταβολή τάσης  $U$  στις πλάκες του οπλισμού μεταβλητής χωρητικότητας  $C$  με την προϋπόθεση ότι υπάρχει κάποιος μηχανισμός που διατηρεί το φορτίο  $Q$  σταθερό. Αυτό συμβαίνει με την χρήση μπαταρίας ή την DC τάση “phantom power” από μια κονσόλα.

Τα πυκνωτικά μικρόφωνα παράγουν ένα σήμα τόσο χαμηλής τάσης που ουσιαστικά δεν έχει καμιά ισχύ, έτσι παρουσιάζουν πολύ μεγάλη αντίσταση. Γι' αυτό το λόγο κάθε πυκνωτικό μικρόφωνο συνδυάζεται απαραίτητα και με ένα ενισχυτή, πρώτον για να ενισχύει το χαμηλό σήμα και δεύτερον για να κάνει προσαρμογή της μεγάλης αντίστασης του μικροφώνου με τις διατάξεις που το συνδέουμε. Τα πρώτα πυκνωτικά μικρόφωνα είχαν ενισχυτές που λειτουργούσαν με λυχνίες και επομένως χαρακτηρίζονταν από μεγάλο μέγεθος. Τα πιο σύγχρονα χρησιμοποιούν transistor και είναι πολύ μικρότερα σε μέγεθος. Ωστόσο και αυτά με τον ενισχυτή λυχνίας χρησιμοποιούνται και σήμερα για λόγους ποιότητας.

Στα πυκνωτικά μικρόφωνα το διάφραγμα μια και έχει μικρή μάζα μπορεί να ανταποκρίνεται πολύ γρήγορα και με ακρίβεια στα ηχητικά ερεθίσματα σε σχέση με τα δυναμικά μικρόφωνα. Τα πυκνωτικά λοιπόν μικρόφωνα έχουν εξαιρετικά ηχητικά χαρακτηριστικά και γι' αυτό χρησιμοποιούνται κατά κύριο στις ηχογραφήσεις. Είναι όμως περισσότερο ευαίσθητα στους κραδασμούς και στις επιδράσεις του περιβάλλοντος και ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιούνται συχνά στις ζωντανές παραστάσεις.

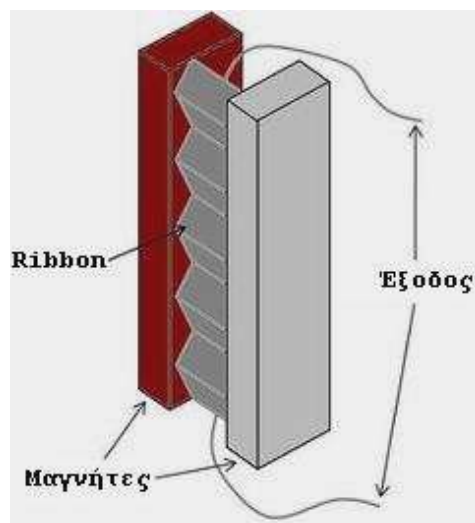


Σχήμα 5.2: Δομή πυκνωτικού μικροφώνου

### 5.3 ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ ΤΑΙΝΙΑΣ (RIBBON)

Τα μικρόφωνα ταινίας χρησιμοποιούν μια μέθοδο που μοιάζει πολύ με αυτήν των δυναμικών μικροφώνων. Μια λεπτή και ελαφριά μεταλλική ταινία τοποθετείται στο κενό ανάμεσα στους δύο πόλους ενός ισχυρού μόνιμου μαγνήτη. Η ταινία είναι σταθερή στις άκρες, μπορεί όμως να κινείται κατά μήκος όταν ένα ηχητικό κύμα πέφτει πάνω της. Όταν συμβεί αυτό η ταινία δονείται στο ρυθμό του ηχητικού κύματος. Η κίνηση αυτή του αγωγού (ταινία) μέσα στο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσει στα άκρα της μια ηλεκτρική τάση. Η τάση αυτή είναι πολύ χαμηλή όπως και η σύνθετη αντίσταση του μικροφώνου είναι επίσης πολύ χαμηλή. Για το λόγο αυτό όλα τα μικρόφωνα ταινίας διαθέτουν και ένα μετασχηματιστή για την προσαρμογή της αντίστασης. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η αρχή κατασκευής ενός μικροφώνου ταινίας.

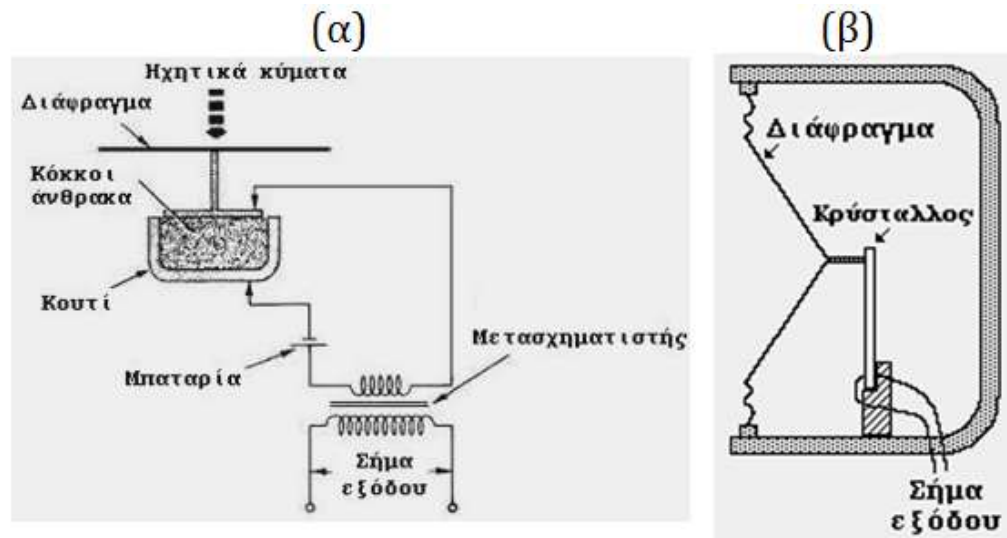
Τα μικρόφωνα ταινίας είναι και αυτά αρκετά ευαίσθητα, πολύ καλά για ακουστικά όργανα μια και έχουν εξαιρετικά ηχητικά χαρακτηριστικά με πολύ ζεστό ήχο και κυρίως ζεστά και καθαρά πρίμα. Χρησιμοποιούνται στις ηχογραφήσεις αλλά ακόμα κι εκεί με πολύ προσοχή μια και είναι εξαιρετικά ευαίσθητα (μπορούν να καταστραφούν απλά και μόνο φυσώντας μέσα στο μικρόφωνο).



Σχήμα 5.3. Δομή μικρόφωνου ribbon

## 5.4 ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ ΆΝΘΡΑΚΑ

Τα μικρόφωνα τύπου άνθρακα είναι τα πρώτα μικρόφωνα που κατασκευάστηκαν. Ένα διάφραγμα πιέζει ένα έμβολο που και αυτό με τη σειρά του πιέζει τον άνθρακα που βρίσκεται μέσα σε ένα κουτί. Το κύκλωμα κλείνει με τον άνθρακα σαν μια αντίσταση. Όταν το διάφραγμα πάλλεται, το ίδιο συμβαίνει με το έμβολο που και αυτό πάλλεται και μεταβάλλει την αντίσταση που παρουσιάζει η μάζα του άνθρακα δημιουργώντας μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα που υπάρχει λόγω της τροφοδοσίας του κυκλώματος. Το ρεύμα αυτό είναι μία αναπαράσταση του ηχητικού κύματος. Τα μικρόφωνα άνθρακα δεν φημίζονται για τα ηχητικά χαρακτηριστικά τους, είναι όμως πολύ φθηνά και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ακόμα. Ήταν για πολλά χρόνια το βασικό μικρόφωνο για τις τηλεφωνικές συσκευές. Στην έξοδο του το μικρόφωνο άνθρακα έχει συνήθως ένα μετασχηματιστή για προσαρμογή της χαμηλής αντίστασης του μικροφώνου με τα υπόλοιπα συστήματα αλλά και για την απομόνωση της DC τάσης της ηλεκτρικής πηγής. Στο Σχήμα 5.4(α) φαίνεται το διάγραμμα κατασκευής του μικροφώνου τύπου άνθρακα.



Σχήμα 5.4: Δομή μικρόφωνου άνθρακα στο (α) και κρυσταλλικού μικροφώνου στο (β).

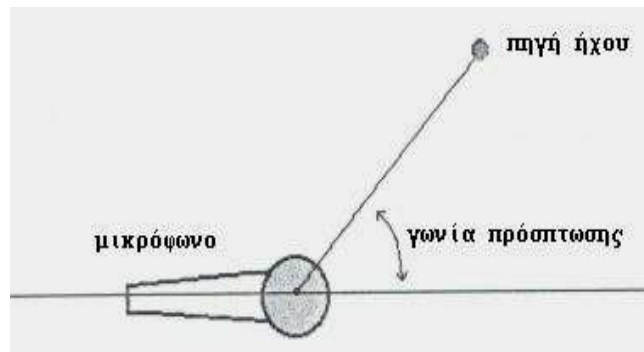
## 5.5 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ (ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ) ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

Ένας σημαντικός ακόμα τύπος μικροφώνου είναι το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο. Σε αυτά ένα ευαίσθητο διάφραγμα είναι συνδεδεμένο με μια ακίδα πάνω σε ένα κρύσταλλο. Όταν ασκείται

μια πίεση στον κρύσταλλο εξαιτίας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου αναπτύσσεται στις επιφάνειες του κρυστάλλου μια ηλεκτρική τάση. Όταν τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στο διάφραγμα αυτό δονείται ανάλογα και μεταφέρει την δόνηση αυτή στον κρύσταλλο ο οποίος παράγει μια αντίστοιχη τάση που είναι αναπαράσταση των ηχητικών κυμάτων. Στο σχήμα 5.4(β) φαίνεται ένα λειτουργικό διάγραμμα ενός τέτοιου μικροφώνου.

## 5.6 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΦΩΝΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ Η ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΣΤΟ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μικρόφωνο το οποίο βρίσκεται σε ένα ηχητικό πεδίο που παράγεται από μια σημειακή πηγή. Ονομάζουμε γωνία πρόσπτωσης τη γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που διέρχεται κάθετα από το κέντρο του διαφράγματος του μικροφώνου και από την ευθεία που ενώνει το κέντρο του διαφράγματος με τη σημειακή πηγή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Ορισμός της γωνίας πρόσπτωσης

Παρακάτω θα εξετάσουμε τις δύο βασικές κατηγορίες μικροφώνων που έχουμε ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργείται η ταλάντωση στο διάφραγμα. Αυτά είναι:

- τα μικρόφωνα πίεσης
- τα μικρόφωνα διανυσματικής διαφοράς πίεσης

### 5.6.1 Μικρόφωνα πίεσης

Στα μικρόφωνα αυτού του τύπου, η ηχητική πίεση ασκείται μόνο από την μια πλευρά του διαφράγματος. Η άλλη πλευρά είναι καλυμμένη με ένα κάλυμμα με μια μόνο οπή για να υπάρχει σταθερή ατμοσφαιρική πίεση εκατέρωθεν του διαφράγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6(α).

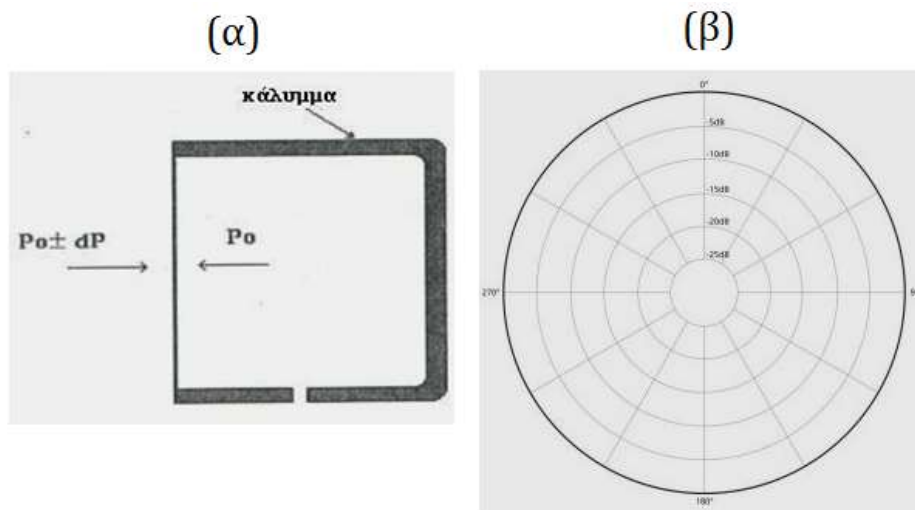
Η δύναμη που ασκείται στο διάφραγμα είναι

$$F = SdP \quad (5.1)$$

όπου  $S$  η επιφάνεια του διαφράγματος και  $dP$  η ακουστική πίεση (η ατμοσφαιρική πίεση  $P_0$  εξουδετερώνεται αφού είναι ίδια και από τις δύο πλευρές). Καθότι η πίεση είναι βαθμωτό

μέγεθος (και όχι διανυσματικό), εξυπακούεται ότι η δύναμη δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση του ηχητικού κύματος. Για το λόγο αυτό, τα μικρόφωνα πίεσης έχουν πανκατευθυντική συμπεριφορά. Τα παντοκατευθυντικά όπως μαρτυρεί και το όνομα τους (το omni είναι ένας λατινικός όρος που σημαίνει τα πάντα) λαμβάνουν τον ήχο (λιγότερο ή περισσότερο) ομοιόμορφα από όλες τις κατευθύνσεις. Το επίπεδο πολικό διάγραμμα ενός τέτοιου μικροφώνου είναι προφανώς ένας κύκλος και το πολικό του διάγραμμα σε όλο το χώρο είναι μια σφαίρα, όπως βλέπετε στο Σχήμα 5.6(β). Τα παντοκατευθυντικά μικρόφωνα ποτέ δεν χρησιμοποιούνται σε ζωντανές εκδηλώσεις γιατί απλά δεν προσφέρουν καμιά προστασία από την ανάδραση (feedback) και διότι δεν είναι κατάλληλα για διαχωρισμό των ηχητικών πηγών. Τα παντοκατευθυντικά έχουν καλύτερη απόκριση στις χαμηλές συχνότητες και καλύτερη συμπεριφορά στον θόρυβο της αναπνοής και του ανέμου. Έχουν επίσης πολλές εφαρμογές στην ηχογράφηση γι' αυτό κάθε studio έχει μερικά. Τέλος, τα παντοκατευθυντικά μικρόφωνα χρησιμοποιούνται στις ακουστικές μετρήσεις και είναι επομένως πολύ σημαντικά για την διεξαγωγή ακουστικών μελετών.

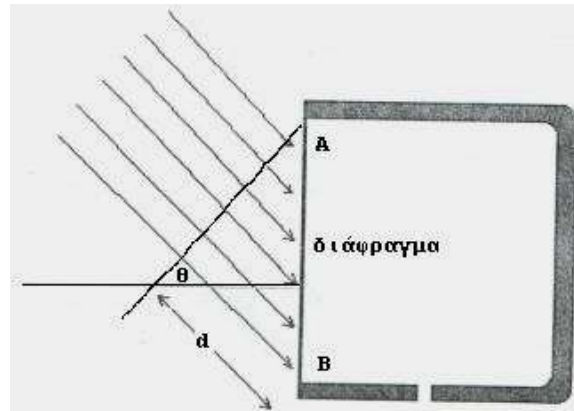
Όταν η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι  $0^\circ$  τότε μεγάλη σημασία έχει για την ταλάντωση του διαφράγματος το μήκος κύματος του ήχου που προσπίπτει. Αν το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το διάφραγμα δεν έχει πρακτικά μεγάλη σημασία η γωνία πρόσπτωσης. Αν το μήκος κύματος γίνει συγκρίσιμο με τις διαστάσεις του διαφράγματος και η διαφορά δρόμου ( $d$ ) του κύματος πλησιάζει την τιμή  $\lambda/2$  τότε στις δύο άκρες του διαφράγματος ασκείται πίεση με αντίθετη φάση και επομένως η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται στο μικρόφωνο είναι μειωμένη (Σχήμα 5.7) .



Σχήμα 5.6: Δομή μικροφώνου πίεσης στο (α) και πολικό διάγραμμα πανκατευθυντικού μικροφώνου στο (β).

Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι ότι για κάποιες συχνότητες, που μπορούν να υπολογιστούν αν γνωρίζουμε τη διάμετρο του διαφράγματος, το μικρόφωνο

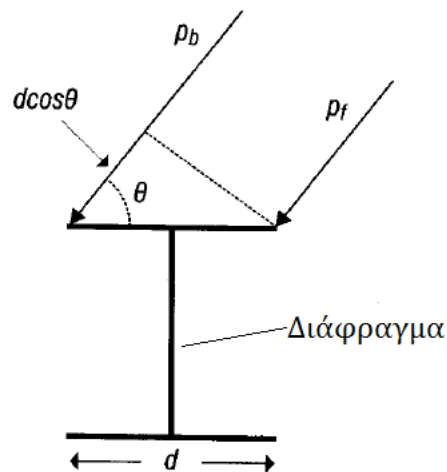
μπορεί να λειτουργήσει σαν φίλτρο αποκόπτοντας τις συχνότητες αυτές όταν προσπίπτουν με μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 5.7: Μη κάθετη πρόσπτωση ενός ηχητικού κύματος πάνω στο διάφραγμα. Για κάποιες συχνότητες οι διαφορές φάσης του κύματος πάνω στο διάφραγμα μπορούν να οδηγήσουν σε ακυρωτική συμβολή.

### 5.6.2 Μικρόφωνα διανυσματικής διαφοράς πίεσης

Στα μικρόφωνα αυτής της κατηγορίας (που ονομάζονται και μικρόφωνα ταχύτητας) το διάφραγμα δεν είναι κλειστό από τη μια μεριά αλλά δέχεται την ηχητική πίεση και από τις δύο όψεις, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Σχήμα 5.8. Η μετακίνηση του διαφράγματος γίνεται από τη συνισταμένη δύναμη που προκύπτει από τις δύο πιέσεις.



Σχήμα 5.8. Επίπεδο κύμα προσπίπτων πάνω σε ένα μικρόφωνο διανυσματικής διαφοράς πίεσης με δικατευθυντική απόκριση.

Ας κάνουμε την ανάλυση στη μόνιμη κατάσταση θεωρώντας ένα επίπεδο κύμα με γωνιακή συχνότητα  $\omega=2\pi f$  το οποίο προσπίπτει πάνω στο διάφραγμα με γωνία  $\theta$ . Η πίεση στην μπροστινή (front) επιφάνεια θα είναι

$$p_f = P_0 \cos \omega t \quad (5.2)$$

ενώ στην πίσω (back) μεριά του διαφράγματος θα είναι

$$p_b = P_0 \cos (\omega(t + \Delta t)), \quad (5.3)$$

όπου  $P_0$  είναι το πλάτος της ακουστικής πίεσης λόγω του επίπεδου κύματος και το  $\Delta t$  οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαδρομών και είναι ίσο με  $\Delta t = \frac{d \cos \theta}{c}$ , όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του ήχου και  $d$  είναι το μήκος του σωλήνα. Η δύναμη που αναπτύσσεται στο διάφραγμα θα ισούται με

$$F = S(p_f - p_b) = SP_0(\cos \omega t - \cos (\omega(t + \Delta t))). \quad (5.4)$$

Από την τριγωνομετρική σχέση  $\cos(a + b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b$  προκύπτει ότι

$$\cos(\omega(t + \Delta t)) = \cos \omega t \cdot \cos \omega \Delta t - \sin \omega t \cdot \sin \omega \Delta t.$$

Εδώ τώρα, επειδή η ποσότητα  $\omega \Delta t$  είναι αρκετά μικρή ισχύουν οι προσεγγίσεις  $\cos \omega \Delta t = 1$  και  $\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$

Αντικαθιστώντας αυτές τις προσεγγίσεις στην Εξ. (5.4), προκύπτει ότι

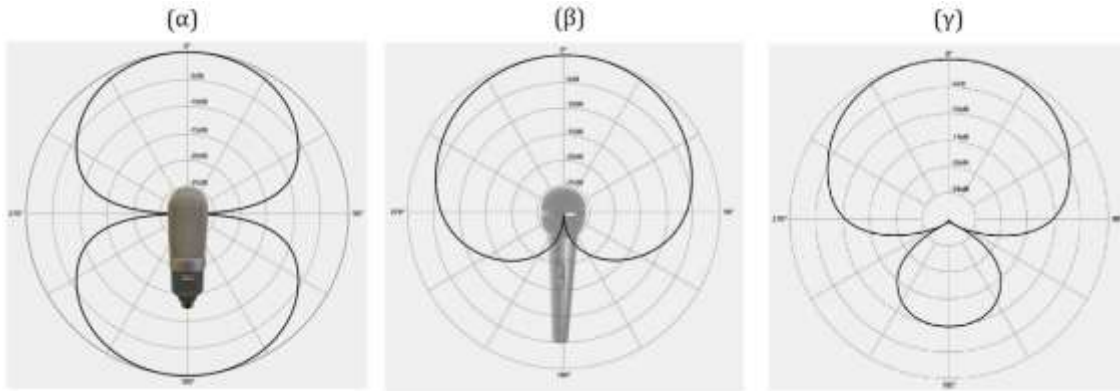
$$F = SP_0 \omega \Delta t \cdot \sin \omega t \quad (5.5)$$

και αντικαθιστώντας όπου  $\Delta t$  το  $\frac{d \cos \theta}{c}$  προκύπτει εν τέλει ότι

$$F = SP_0 \frac{2\pi f d \cdot \cos \theta}{c} \sin \omega t \quad (5.6)$$

Η σχέση (5.6) φανερώσει τώρα την εξάρτηση της δύναμης από τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ . Βλέπουμε ότι το μέτρο (απόλυτη τιμή) της δύναμης  $F$  θα είναι μέγιστη για γωνίες  $0^\circ$  και  $180^\circ$  ενώ για γωνίες πρόσπτωσης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  η δύναμη μηδενίζεται. Η ανάλυση σε πολικές συντεταγμένες θα μας δώσει δύο κύκλους επαπτόμενους στο κέντρο του διαφράγματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.9(α). Μικρόφωνα με τέτοια πολική απόκριση λέγονται και δικατευθυντικά.

Επιπλέον, βλέπουμε ότι ενώ το αίτιο (δηλ. η πίεση του προσπίπτων κύματος) περιγράφεται από τη συνάρτηση  $\cos \omega t$  το αποτέλεσμα περιγράφεται από τη συνάρτηση  $\sin \omega t$ , το οποίο φανερώσει ότι η δύναμη που αναπτύσσεται στο διάφραγμα είναι σε διαφορά φάσης  $\pi/2$  rad σε σχέση με την ακουστική πίεση.



Σχήμα 5.9: Πολικό διάγραμμα δικατευθυντικού μικροφώνου στο (α) και καρδιοειδούς μικροφώνου στο (β) και υπερκαρδιοειδούς μικροφώνου στο (γ).

Μια άλλη περίπτωση μικροφώνου που είναι επιλεκτικό ως προς τη γωνία πρόσπτωσης φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Εδώ βλέπουμε τώρα ότι ο επιπλέον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει ο ήχος στη πίσω πλευρά του διαφράγματος είναι

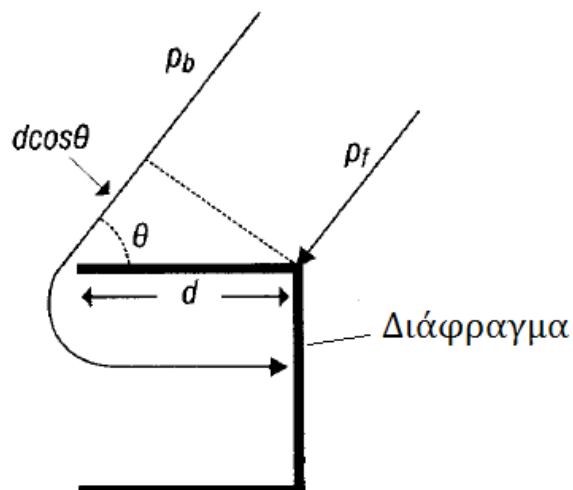
$$\Delta t = d + \frac{d \cos \theta}{c}. \quad (5.7)$$

Αντικαθιστώντας το  $\Delta t$  στην Εξ. (5.5), προκύπτει μια νέα συνάρτηση που συνδέει τη δύναμη  $F$  με τη γωνία πρόσπτωσης η οποία είναι

$$F = SP_0 \frac{2\pi f d \cdot (1 + \cos \theta)}{c} \sin \omega t. \quad (5.8)$$

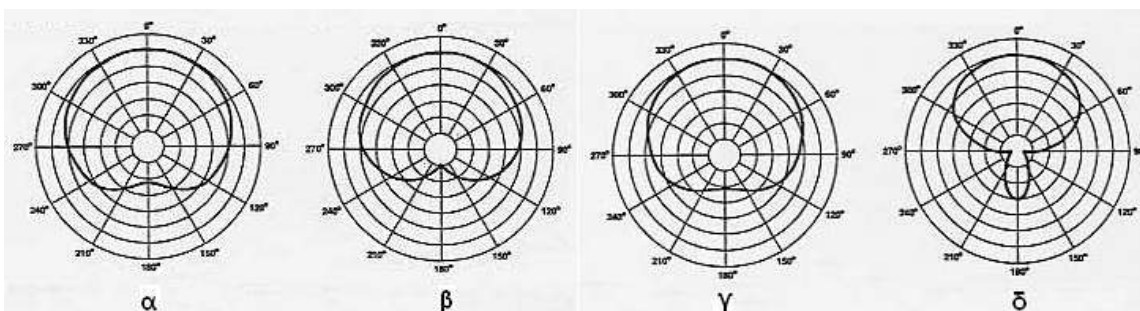
Βλέπουμε τώρα ότι το μέτρο της δύναμης είναι μέγιστο όταν  $\theta=0^\circ$  και ελάχιστο όταν  $\theta=180^\circ$ . Το πολικό διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 5.9(β) και λόγω του σχήματός του ονομάζεται καρδιοειδές.

Καταλαβαίνει κανείς από όλα αυτά ότι οι διαφορετικές κατευθυντικές συμπεριφορές προκύπτουν λόγω της διαφοράς στη διαδρομή του ήχου (και κατά συνέπεια λόγω της χρονικής διαφοράς  $\Delta t$ ) μπροστά και πίσω από το διάφραγμα. Μεταβάλλοντας το  $\Delta t$  μπορούμε να μεταβάλλουμε την γωνιακή απόκριση του μικροφώνου παίρνοντας επιπλέον κατευθυντικές συμπεριφορές όπως για παράδειγμα το διάγραμμα ακτινοβολίας του υπερκαρδιοειδούς μικροφώνου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9(γ). Το υπερκαρδιοειδές είναι μικρόφωνο μεγάλης κατευθυντικότητας. Ωστόσο σε αντίθεση με το καρδιοειδές έχει ένα μεγαλύτερο πίσω λοβό. Λαμβάνει δηλαδή από την πίσω πλευρά περισσότερο. Χρησιμοποιείται όπου απαιτείται μεγάλη κατευθυντικότητα.

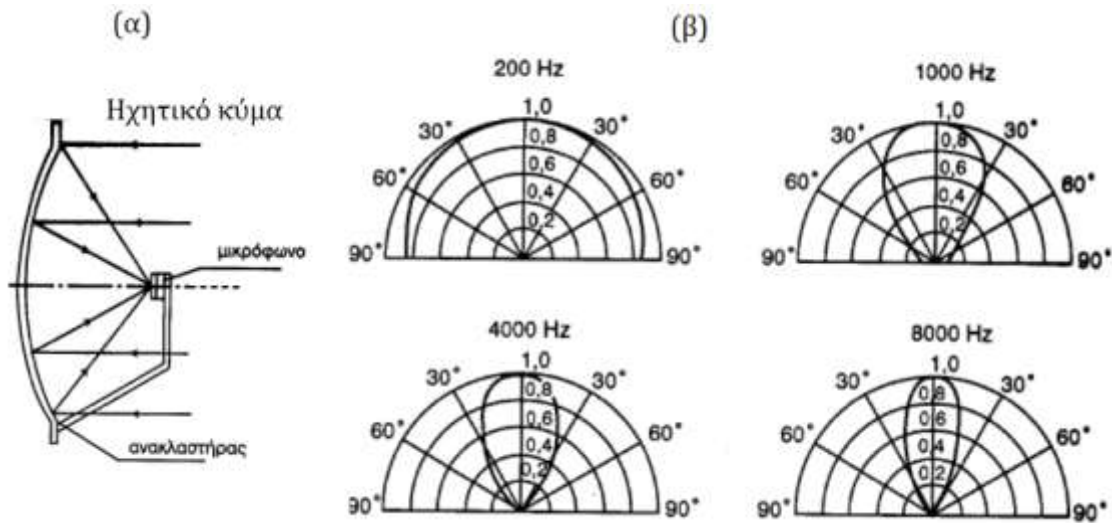


Σχήμα 5.10: Επίπεδο κύμα προσπίπτων πάνω σε ένα μικρόφωνο διανυσματικής διαφοράς πίεσης με καρδιοειδή απόκριση.

Θα πρέπει ωστόσο να καταλάβουμε ότι τα πολικά διαγράμματα του σχήματος 5.9 προκύπτουν υπό ιδανικές συνθήκες και στην πραγματικότητα, αν και ένα μικρόφωνο σχεδιάζεται να έχει συγκεκριμένη κατευθυντική συμπεριφορά, η απόκρισή του σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης εξαρτάται και από τη συχνότητα. Η απόκριση ενός πραγματικού καρδιοειδούς μικροφώνου φαίνεται για διαφορετικές συχνότητες στο Σχήμα 5.11 και η απόκριση ενός υπερκατευθυντικού παραβολικού μικροφώνου φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Παρατηρείστε ότι τα πολικά διαγράμματα σχεδιάζονται τόσο σε λογαριθμική (Σχήμα 5.11) όσο και σε γραμμική κλίμακα (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.11: Τα τέσσερα αυτά πολικά διαγράμματα προέρχονται από το ίδιο καρδιοειδές μικρόφωνο και ελήφθησαν για 250, 1000, 2000 και 5000 Hz αντίστοιχα, για τις περιπτώσεις α, β, γ, και δ. Φαίνεται η διαφορετική κατευθυντικότητα για κάθε περίπτωση και κυρίως αυτής για τα 5000 Hz.



Σχήμα 5.12. Δομή παραβολικού μικροφώνου στο (α) και διαγράμματα ακτινοβολίας για διαφορετικές συχνότητες στο (β).

## 5.7 ΓΩΝΙΑΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΙΚΡΟΦΩΝΩΝ

Η γωνιακή απόκριση, όπως και η συχνοτική απόκριση είναι ένα μέγεθος που συνήθως ορίζεται σε dB, και μπορεί να διατυπωθεί μέσω της σχέσης

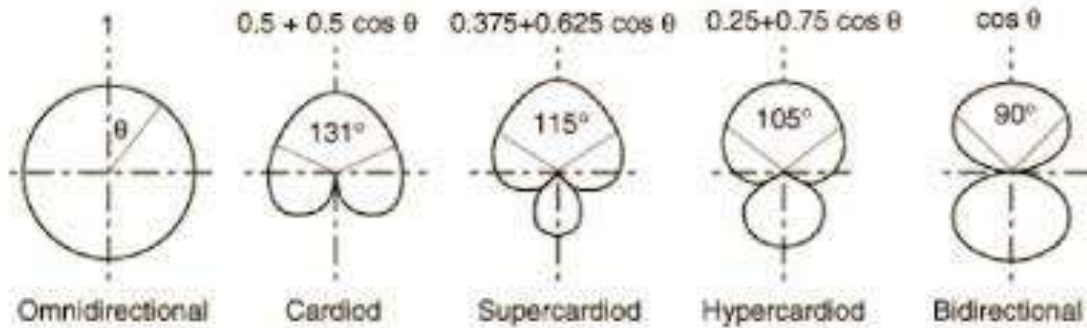
$$D(\theta) = 20 \log \frac{V(\theta)}{V(\theta = 0)}$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης, και  $V(\theta)$  είναι η τάση (RMS) στην έξοδο του μικροφώνου. Δεδομένου ότι η γωνιακή απόκριση σε ένα μικρόφωνο (όπως και σε ένα ηχείο) μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά με την συχνότητα, μία εναλλακτική και πιο ακριβής διατύπωση της γωνιακής απόκρισης θα ήταν η

$$D(\theta, \omega) = 20 \log \frac{V(\theta, \omega)}{V(\theta = 0, \omega)}$$

όπου  $\omega = 2\pi f$  είναι η γωνιακή ταχύτητα. Σε κάθε περίπτωση, βλέπουμε ότι στον παρανομαστή του κλάσματος έχουμε την απόκριση του μικροφώνου για  $\theta = 0^\circ$ . Επειδή αυτή είναι συνήθως και η γωνία που συμπίπτει με τον άξονα του μικροφώνου, όπου η απόκριση είναι μέγιστη, αυτό σημαίνει ότι το  $D(\theta)$  (όπως και το  $D(\theta, \omega)$ ) θα είναι πάντα μικρότερο του 0. Η γωνιακή απόκριση όπως έχουμε δει μέχρι τώρα περιγράφεται συνήθως μέσω πολικού διαγράμματος. Δεν αποκλείονται ωστόσο περιπτώσεις όπου η ευαισθησία ως προς τη γωνία διατυπώνεται μέσω κάποιου τύπου. Για το πανκατευθυντικό, το καρδιοειδές, το υπερκαρδιοειδές και το δικατευθυντικό μικρόφωνο, υπάρχει συγκεκριμένος τύπος που μας περιγράφει την κατευθυντική συμπεριφορά. Αυτοί οι τύποι φαίνονται και στο Σχήμα 5.X. Βλέπουμε ότι αυτές οι γωνιακές αποκρίσεις δίνονται σε γραμμική κλίμακα, είναι συναρτήσεις το  $\cos\theta$  και μπορούν να

δώσουν τιμές μέσα σε ένα εύρος από -1 έως 1. Για να πάρουμε τη γωνιακή απόκριση σε λογαριθμική κλίμακα (dB), θα χρησιμοποιήσουμε αυτούς τους τύπου μέσα σε απόλυτη τιμή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1.



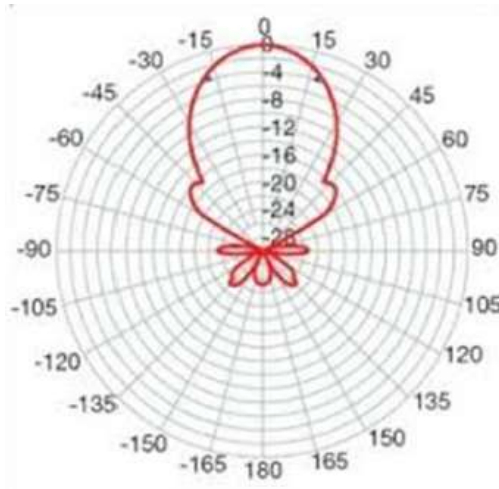
Σχήμα 5.13 Γωνιακές αποκρίσεις τυπικών κατευθυντικών μικροφώνων σε γραμμική κλίμακα.

Πανκατευθυντικό (omnidirectional)	$D(\theta)=0$
Καρδιοειδές (Cardioid)	$D(\theta) = 20\log  0.5+0.5\cos(\theta) $
Υπερκαρδιοειδές 1 (Supercardioid)	$D(\theta) = 20\log  0.375+0.625\cos(\theta) $
Υπερκαρδιοειδές 2 (Hypercardioid)	$D(\theta) = 20\log  0.25+0.75\cos(\theta) $
Δικατευθυντικό (Bidirectional)	$D(\theta) = 20\log  \cos(\theta) $

Πίνακας 5.1: Τύποι για τον υπολογισμό της γωνιακής απόκρισης τυπικών κατευθυντικών μικροφώνων.

### Άσκηση 5.1:

Έχουμε ένα μικρόφωνο του οποίου τα πολικά χαρακτηριστικά στο 1KHz φαίνονται στο σχήμα δεξιά. Ένα επίπεδο ακουστικό κύμα συχνότητας 1kHz προσπίπτει πάνω στον άξονα του μικροφώνου και παράγει μια ηλεκτρική στάθμη εξόδου -8 dBu. Ποιά θα ήταν η στάθμη εξόδου σε dBu αν το μικρόφωνο ήταν στραμμένο  $-45^\circ$  ως προς την κατεύθυνση του επίπεδου κύματος? Να διατυπωθεί επίσης και ο λόγος των τάσεων εξόδου (σε Volt) για τις δύο αυτές καταστάσεις.



Απάντηση:

Από το πολικό διάγραμμα παρατηρούμε ότι στις  $-45^\circ$  έχουμε απώλεια  $-16$  dB σε σχέση με τις  $0^\circ$ . Από αυτό συμπεραίνουμε ότι η στάθμη θα είναι μειωμένη κατά  $16$  dB και επομένως θα έχουμε  $L_{-45} = -8 - 16 = -24$  dBu. Επίσης, αν ορίσουμε ως  $V_0$  και ως  $V_{-45}$  τις τάσεις εξόδου για πρόσπτωση του κύματος στις  $0^\circ$  και  $-45^\circ$  αντίστοιχα θα ισχύει  $L_{-45} - L_0 = -16 = 20 \log(V_{-45}/V_0)$ , άρα κάνοντας απολογαριθμοποίηση προκύπτει ότι  $V_{-45}/V_0 = 10^{-16/20} = 0.158$ , δηλαδή η τάση εξόδου στις  $-45^\circ$  είναι το  $15.8\%$  αυτής στις  $0^\circ$  πρόσπτωση.

## Άσκηση 5.2

Για ένα ιδανικό δικατευθυντικό μικρόφωνο να βρεθεί ο λόγος των RMS τάσεων εξόδου για δύο επίπεδα κύματα ίδιας έντασης, το πρώτο στα  $250$  Hz και για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1 = 60^\circ$  και το δεύτερο στα  $1500$  Hz και για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_2 = 0^\circ$ . Να διατυπωθεί η σχέση των τάσεων εξόδου και σε dB. Υπόδειξη: θεωρείστε ότι η τάση εξόδου του μικροφώνου είναι ανάλογη της γενεσιουργού δύναμης  $F$

### Απάντηση:

Για ένα ένα ιδανικό δικατευθυντικό μικρόφωνο η δύναμη πάνω στο διάγραμμα σχετίζεται με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης μέσω της Εξίσωσης (5.6). Βλέπουμε ότι από την εκφώνηση δε μας δίνεται το  $S$ ,  $d$  και  $c$ , αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα διότι είναι ίδια στις δύο καταστάσεις 1 και 2 επομένως απαλείφονται. Συγκεκριμένα, για την κατάσταση 1 θα ισχύει

$$|F_1| = \frac{SP_0(2\pi f_1 d \cdot \cos\theta_1)}{c} \quad (5.9)$$

με  $f_1 = 250$  ενώ για την κατάσταση 2 θα ισχύει

$$|F_2| = \frac{SP_0(2\pi f_2 d \cdot \cos\theta_2)}{c} \quad (5.10)$$

με  $f_2 = 1500$ . Προφανώς το  $P_0$  θα είναι ίδιο και στις δύο καταστάσεις αφού τα επίπεδα κύματα θεωρούμαι ότι είναι ίδιας έντασης. Διαιρώντας την (5.9) και (5.10) κατά μέλη βλέπουμε ότι

$$\frac{|F_2|}{|F_1|} = \frac{f_2 \cos\theta_2}{f_1 \cos\theta_1} = \frac{1500 \cdot 1}{250 \cdot 0.5} = \frac{1500}{125} = 12. \text{ Αφού η τάση εξόδου είναι ανάλογη της } F, \text{ τότε προφανώς θα ισχύει και ότι } \frac{V_2}{V_1} = 12. \text{ Σε λογαριθμική κλίμακα θα έχουμε } L_2 - L_1 = 20 \log 12 = 21.6 \text{ dB.}$$

## 5.8 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ

Η ευαισθησία ενός μικροφώνου είναι μια ποσότητα που προσδιορίζει το πλάτος της ηλεκτρικής τάσης στην έξοδο προς την ακουστική πίεση στην είσοδο. Η ευαισθησία συνήθως μετριέται για καθαρό τόνο στο  $1$  kHz, αν και σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ροζ θόρυβος. Επιπλέον, η ευαισθησία υπολογίζεται για μηδενική γωνία πρόσπτωσης. Οι μονάδες μες τις οποίες προσδιορίζεται η ευαισθησία ποικίλουν. Μπορεί άλλοτε να διατυπώνεται σε mV/Pa, άλλοτε σε dBV/Pa και άλλοτε απλά σε dB. Η τυπική διαδικασία μέτρησης θεσπίζει τη δημιουργία στάθμης ηχητικής πίεσης  $94$  dB SPL στο  $1$  kHz. Τα  $94$  dB SPL αντιστοιχούν σε ακουστική πίεση  $1$  Pa. Αν διεγείρουμε λοιπόν με αυτό τον ήχο ένα μικρόφωνο, τότε η μετρούμενη ποσότητα ηλεκτρικής τάσης (μέση τετραγωνική τιμή – RMS) προσδιορίζει κατευθείαν την ευαισθησία ενός

μικροφώνου σε mV/Pa. Ενδεικτικά, η τιμή της ευαισθησίας ενός μικροφώνου μπορεί να κυμαίνεται από -50dBV/Pa ( $\approx 3.2$  mV/Pa) έως -30dBV/Pa ( $\approx 32$  mV/Pa), γεγονός που προσδιορίζει ότι ακόμα και σε μία υψηλή στάθμη πίεσης η έξοδος από το μικρόφωνο διαμορφώνεται σε μερικά mV.

**Παράδειγμα:** Ένα μικρόφωνο παράγει ηλεκτρική τάση 12mV RMS όταν διεγείρεται με στάθμη ήχου 90 dB SPL. Υπολογίστε την ευαισθησία του σε mV/Pa και dBV/Pa.

Απάντηση: Βλέπουμε ότι η στάθμη ήχου δεν είναι 94 dB SPL, οπότε η μετρούμενη ποσότητα ηλεκτρικής τάσης (12 mV RMS) δεν αντιστοιχεί στην ευαισθησία του μικροφώνου. Μπορούμε ωστόσο να υπολογίσουμε την RMS τιμή τάσης που θα παρήγαγε το μικρόφωνο στα 94 dB SPL, θεωρώντας ότι το μικρόφωνο είναι ένας γραμμικά μετατροπέας ακουστικής πίεσης σε τάση. Κατ' αρχάς, βλέπουμε ότι τα 12 mV αντιστοιχούν σε  $20\log(0.012/1) = -38.4$  dBV. Δεδομένου ότι αυτή η τάση παράγεται για 90 dB SPL, μπορούμε να καταλάβουμε ότι θα είναι αυξημένη κατά 4dB αν η στάθμη ήχου ήταν 94 dB SPL. Επομένως, η ευαισθησία του μικροφώνου θα είναι  $-38.4 + 4 = -34.4$  dBV/Pa. Για την διατύπωση σε mV/Pa, μπορούμε κάνοντας απολογαριθμοποίηση να υπολογίσουμε ότι τα  $-34.4$  dBV αντιστοιχούν σε  $10^{-34.4/20} = 0.019$  Volt, επομένως η απάντηση είναι 19mV/Pa.

## 5.9 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

Η κατευθυντικότητα ενός μικροφώνου είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό διότι προσδιορίζει το πόσο «καθαρή» θα είναι η λήψη του σήματος καθώς και πόσο θα διαχωρίζεται το επιθυμητό ακουστικό σήμα από περιβαλλοντικό θόρυβο ή από άλλες πηγές ήχου που συνυπάρχουν με την επιθυμητή. Στο μάθημα «Ακουστική Χώρων» θα μάθετε επίσης ότι η κατευθυντικότητα είναι ένα μέσο για να πετύχουμε καλύτερη αναλογία μεταξύ απευθείας ήχου και ανακλώμενου ήχου μέσα σε ένα χώρο με αντήχηση.

Ορίζουμε λοιπόν τον διαχωρισμό, ως την απόσταση, σε dB, μεταξύ της στάθμης του σήματος που προέρχεται από την επιθυμητή πηγή ήχου,  $L_{\epsilon\pi}$ , και στη στάθμη που προέρχεται από μία ή περισσότερες ανεπιθύμητες πηγές ήχου,  $L_{\alpha\nu}$ . Στα αγγλικά, ο διαχωρισμός μπορεί να αποδοθεί με τον όρο Signal to Interference Ratio (SIR)

$$\text{Διαχωρισμός} = SIR = L_{\epsilon\pi} - L_{\alpha\nu} = 20\log \frac{V_{\epsilon\pi}}{V_{\alpha\nu}} \quad (5.11)$$

Βλέπουμε ότι στην ουσία ο ορισμός του διαχωρισμού είναι ίδιο με αυτόν του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), με την διαφορά τώρα ότι το ανεπιθύμητο σήμα δεν είναι απαραίτητα θόρυβος.

Όταν μια επιθυμητή πηγή ήχου συνυπάρχει με άλλες πηγές ήχου τότε έχουμε δύο βασικούς τρόπους για να πετύχουμε καλό διαχωρισμό με τη χρήση μικροφώνου

- Πρώτον, ρυθμίζοντας την απόσταση του μικροφώνου ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιθυμητή πηγή και όσο το δυνατόν πιο μακριά από τις ανεπιθύμητες πηγές. Σύμφωνα με το νόμο της αντίστροφης απόστασης, το SIR θα αυξάνεται κατά 6 dB κάθε φορά που υποδιπλασιάζεται η απόσταση του μικροφώνου από την επιθυμητή πηγή ή κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση από την ανεπιθύμητη πηγή.

- Δεύτερον, βάζοντας το μικρόφωνο έτσι ώστε η επιθυμητή πηγή να βρίσκεται σε σημείο μέγιστης γωνιακής απόκρισης ενώ οι ανεπιθύμητες πηγές να βρίσκονται σε γωνίες μειωμένης απόκρισης. Τυπικά, τα μικρόφωνα τοποθετούνται έτσι ώστε να έχουμε  $0^\circ$  γωνία πρόσπτωσης με την επιθυμητή πηγή ήχου (στα αγγλικά αυτό αποδίδεται με τον όρο on-axis). Βεβαίως, για να έχει αποτέλεσμα το τελευταίο, θα πρέπει το μικρόφωνο να έχει κατευθυντική συμπεριφορά και είναι προφανές ότι τα πανκατευθυντικά μικρόφωνα δεν μπορούν να βοηθήσουν στον διαχωρισμό αφού η απόκρισή τους δεν διαφοροποιείται με τη γωνία.

Δίδεται παρακάτω ένας γενικός τύπος για τον υπολογισμό του διαχωρισμού σε dB στο ελεύθερο πεδίο όταν είναι γνωστά οι αποστάσεις  $r_{\varepsilon\pi}$  και  $r_{\alpha\nu}$ , η ακουστική ισχύς  $W_{\varepsilon\pi}$  και  $W_{\alpha\nu}$  και οι γωνιακές αποκρίσεις  $D(\theta_{\varepsilon\pi})$  και  $D(\theta_{\alpha\nu})$  σε dB, λόγω της κατευθυντικότητας του μικροφώνου.

$$SIR = 20\log\frac{r_{\alpha\nu}}{r_{\varepsilon\pi}} + 10\log\frac{W_{\varepsilon\pi}}{W_{\alpha\nu}} + D(\theta_{\varepsilon\pi}) - D(\theta_{\alpha\nu}) \quad (5.12)$$

Ο δείκτης «επ» και «αν» αναφέρεται προφανώς στην επιθυμητή και ανεπιθύμητη πηγή αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο παραπάνω τύπος ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι οι δύο ανταγωνιστικές πηγές είναι πανκατευθυντικές. Στην πράξη δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί ο διαχωρισμός αναλυτικά. Αυτό διότι τα  $W_{\varepsilon\pi}$  και  $W_{\alpha\nu}$  δεν τα γνωρίζουμε ακριβώς, αλλά ακόμα και αν τα γνωρίζουμε, οι πηγές έχουν κατευθυντικότητα που δεν είναι όμως γνωστή. Τέλος, ο διαχωρισμός εξαρτάται από τη συχνότητα διότι ως γνωστό και η κατευθυντικότητα εξαρτάται από τη συχνότητα. Εν γένει, όσο αυξάνει η συχνότητα τόσο μεγαλώνει η επιλεκτικότητα του μικροφώνου ως προς τη γωνία, και άρα και ο διαχωρισμός που μπορούμε να πετύχουμε.

### Άσκηση 5.3

Θεωρήστε δύο πανκατευθυντικές ηχητικές πηγές ίδιας ισχύος  $W_B = W_A$  τοποθετημένες σύμφωνα με το Σχήμα 5.14(β) στο ελεύθερο πεδίο. Επίσης, θεωρήστε ότι η πηγή A είναι η επιθυμητή και η B η ανεπιθύμητη. Να υπολογιστεί

- 1) ο διαχωρισμός, σε dB, που επιτυγχάνεται με τη χρήση κατευθυντικού μικροφώνου στο 1 kHz δεδομένου του πολικού διαγράμματος (οι ομόκεντροι κύκλοι απέχουν 6 dB μεταξύ τους)
- 2) πώς διαμορφώνεται ο διαχωρισμός στις ίδιες συχνότητες αν θεωρηθεί ότι η ισχύς της B πηγής είναι 100 φορές μεγαλύτερη αυτής της A?
- 3) πώς διαμορφώνεται ο διαχωρισμός στις ίδιες συχνότητες αν θεωρηθεί ότι η ισχύς της B πηγής είναι 10 φορές μικρότερη αυτής της A?
- 4) ποιός τύπος κατευθυντικής συμπεριφοράς θα βελτιστοποιούσε το διαχωρισμό για τη συγκεκριμένη γεωμετρία?

### Απάντηση:

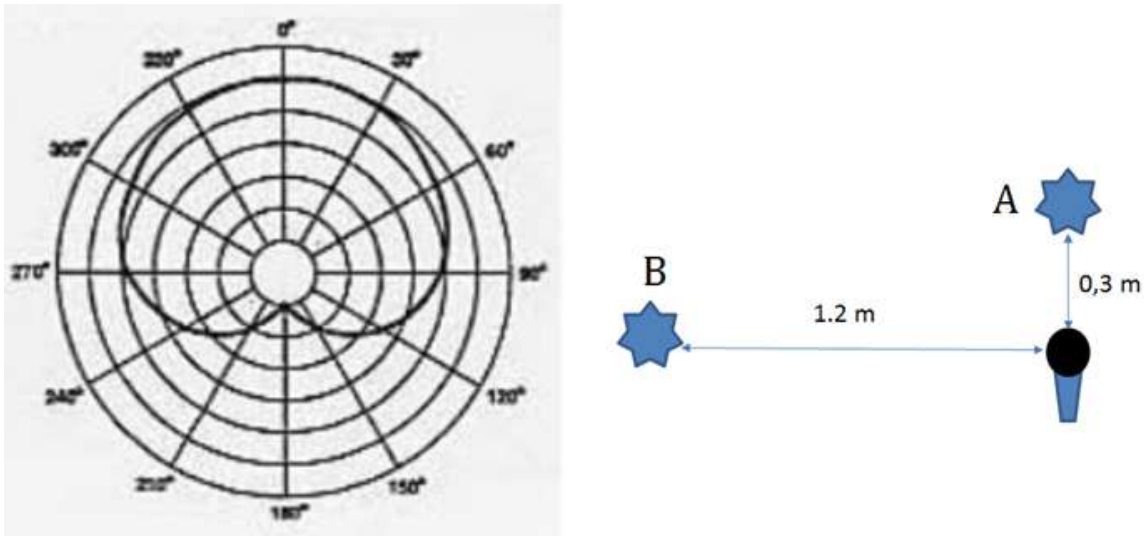
- 1) Από τα δεδομένα του σχήματος φαίνεται ότι η απόσταση του μικροφώνου από την επιθυμητή πηγή είναι  $r_A = 0.3$  και από την ανεπιθύμητη  $r_B = 1.2$  m. Επίσης, η γωνία πρόσπτωσης από την A πηγή είναι  $\theta_{\varepsilon\pi} = 0^\circ$  ενώ από την B πηγή  $\theta_{\alpha\nu} = 270^\circ$ . Σύμφωνα με

το πολικό διάγραμμα θα έχουμε επομένως  $D(\theta_{\text{επ}})-D(\theta_{\text{αν}})=6 \text{ dB}$ . Δεδομένου ότι  $W_B = W_A$ , με βάση την Σχέση (5.12) θα ισχύει

$$SIR = 20 \log \frac{1.2}{0.3} + 10 \log 1 + 6 = 18 \text{ dB},$$

και επομένως ο διαχωρισμός είναι 18 dB.

- 2) Όταν  $W_B = 100W_A$ , τότε ο δεύτερος όρος στην παραπάνω εξίσωση είναι  $10 \log 0.01 = -20$  και επομένως ο διαχωρισμός θα ισούται με -2 dB. Σε αυτήν την περίπτωση, η πηγή B θα υπερσχύει της A παρόλα τα μέτρα που έχουμε λάβει για αύξηση του διαχωρισμού.
- 3) Όταν  $W_B = 0.01 W_A$  τότε ο δεύτερος όρος στην παραπάνω εξίσωση είναι  $10 \log 10 = 10$  και ο διαχωρισμός θα ισούται με 28 dB.
- 4) Ένα δικατευθυντικό μικρόφωνο είναι ιδανικό για την μεγιστοποίηση του διαχωρισμού (βλ. Σχήμα 5.9(α)), καθότι βλέπουμε ότι η επιθυμητή πηγή θα είναι σε σημείο μέγιστης απόκρισης ενώ η ανεπιθύμητη πηγή σε σημείο μηδενικής απόκρισης. Θεωρητικά δηλαδή, δε θα περνάει καθόλου σήμα από την πηγή B στο μικρόφωνο και επομένως ο διαχωρισμός θα είναι (θεωρητικά μόνο μπορεί να συμβεί αυτό)  $+\infty \text{ dB}$ .



Σχήμα 5.14: Πολικό διάγραμμα μικροφώνου και γεωμετρική διάταξη του προβλήματος.

#### Άσκηση 5.4

Για τη διάταξη του σχήματος 5.14 και θεωρώντας ότι  $W_B = W_A$  να υπολογιστεί ο διαχωρισμός, σε dB, που επιτυγχάνεται με τη χρήση (1) πανκατευθυντικού μικροφώνου, (2) καρδιοειδούς μικροφώνου, (3) supercardioid μικροφώνου, (4) hypercardioid μικροφώνου και (5) δικατευθυντικού μικροφώνου. Για τη γωνιακή απόκριση των μικροφώνων μπορείτε να βασιστείτε στον Πίνακα 5.1.

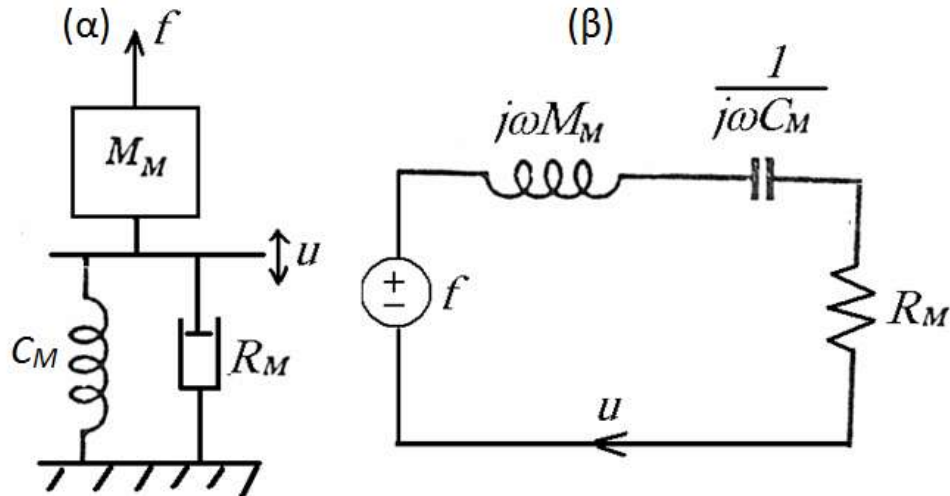
#### Απάντηση:

Από τις συναρτήσεις που μας δίνουν τη γωνιακή απόκριση στον Πίνακα 5.1 είναι εύκολο να υπολογιστούν τα  $D(\theta_{\text{επ}})$  και  $D(\theta_{\text{αν}})$  δεδομένου ότι  $\cos 0^\circ = 1$  και  $\cos 270^\circ = 0$ .

- 1) Για πανκατευθυντικό μικρόφωνο ο διαχωρισμός εξαρτάται μόνο από την απόσταση και επομένως θα είναι  $SIR = 20 \log \frac{1.2}{0.3} = 12 \text{ dB}$
- 2) Για καρδιοειδές μικρόφωνο έχω ότι  $D(\theta=0^\circ) = 20 \log |0.5 + 0.5 \cos 0| = 0 \text{ dB}$  και  $D(\theta=270^\circ) = 20 \log |0.5 + 0.5 \cos 270| = -6 \text{ dB}$ . Άρα ο διαχωρισμός θα είναι  $SIR = 12 + 0 - (-6) = 18 \text{ dB}$
- 3) Για supercardioid μικρόφωνο έχω ότι  $D(\theta=0^\circ) = 20 \log |0.375 + 0.625 \cos 0| = 0 \text{ dB}$  και  $D(\theta=270^\circ) = 20 \log |0.375 + 0.625 \cos 270| = -8.5 \text{ dB}$ . Άρα ο διαχωρισμός θα είναι  $SIR = 12 + 0 - (-8.5) = 20.5 \text{ dB}$
- 4) Για hypercardioid μικρόφωνο έχω ότι  $D(\theta=0^\circ) = 20 \log |0.25 + 0.75 \cos 0| = 0 \text{ dB}$  και  $D(\theta=270^\circ) = 20 \log |0.25 + 0.75 \cos 270| = -12 \text{ dB}$ . Άρα ο διαχωρισμός θα είναι  $SIR = 12 + 0 - (-12) = 24 \text{ dB}$
- 5) Για το δικατευθυντικό μικρόφωνο, παρατηρούμε ότι όταν το  $\theta$  τείνει στις  $270^\circ$  η συνάρτηση  $20 \log |\cos \theta|$  τήνει στο πλην άπειρο  $(-\infty)$ , γεγονός που αποδεικνύει ότι σε αυτήν την περίπτωση ο διαχωρισμός θα είναι θεωρητικά άπειρος.

## 5.10 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΝΑΛΟΓΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ

Το ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα μηχανικό σύστημα που περιλαμβάνει μάζα, ελαστικότητα και μηχανική αντίσταση. Η μάζα περιλαμβάνει τη μάζα όλου του μηχανισμού και συγκεκριμένα αυτή του διαφράγματος, του πηνίου και του φορέα του. Το άθροισμά τους ισούται με  $M_M$ . Η ελαστικότητα προέρχεται από τις αναρτήσεις της κατασκευής οι οποίες έχουν ως σκοπό να επαναφέρουν το διάφραγμα στην αρχική του θέση μετά από τη μετατόπιση και ισούται με  $C_M$ . Στην κατασκευή υπάρχει επίσης μηχανική αντίσταση η οποία συμβολίζεται με  $R_M$ . Το μηχανικό ανάλογο του κινητού μηχανισμού του ηλεκτροδυναμικού μικροφώνου απεικονίζεται στο σχήμα 5.18(α). Βλέπουμε ότι πρόκειται για μια μάζα σε συνδυασμό με την παράλληλη σύνδεση ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα πάνω σε μια άκαμπτη βάση. Ανά πάσα στιγμή, όλα τα τμήματα του μηχανισμού κινούνται με την ίδια ταχύτητα  $u$ . Αν λοιπόν θυμηθούμε ότι η ταχύτητα είναι το ανάλογο του ρεύματος, αυτό σημαίνει ότι κατά το σχεδιασμό του ηλεκτρικού ανάλογου όλα τα στοιχεία μηχανικής εμπέδησης θα πρέπει να είναι σε σειρά (έτσι ακριβώς όπως όλα τα στοιχεία που βρίσκονται σε σειρά σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα). Το ηλεκτρικό ανάλογο του μηχανισμού φαίνεται στο σχήμα 5.15(β).



Σχήμα 5.15: Μηχανικό ανάλογο (α) και ηλεκτρικό ανάλογο (β) ηλεκτροδυναμικού μικροφώνου.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε μικρόφωνο πίεσης και ότι η διατομή του διαφράγματος είναι  $S$  (σε  $m^2$ ), τότε μεταβολές της ακουστικής πίεσης  $p$  θα δημιουργούν πάνω στο διάφραγμα δύναμη ίση με

$$f = pS. \quad (5.13)$$

Η γενεσιουργός αιτία είναι επομένως η ακουστική πίεση που πολλαπλασιασμένη επί το  $S$  δημιουργεί μια γεννήτρια δύναμης. Η συνολική μηχανική εμπέδηση  $Z_M$  που «βλέπει» η γεννήτρια δύναμης ισούται με το άθροισμα των επιμέρους μηχανικών εμπεδήσεων κάθε στοιχείου, δηλαδή,

$$Z_M = j\omega M_M + 1/j\omega C_M + R_M. \quad (5.14)$$

Από αυτή τη σχέση μπορούμε να εκφράσουμε την ταχύτητα στη μόνιμη κατάσταση για γωνιακή συχνότητα  $\omega$  ως  $u = f/Z_M$ , όπου εδώ το  $u$  είναι ένας μιγαδικός αριθμός ο οποίος εκφράζει την RMS (μέση τετραγωνική τιμή) τιμή της ταχύτητας, αλλά και τη διαφορά φάσης σε σχέση με τη γενεσιουργό αιτία της κίνησης  $f$ . Ενδεχομένως τώρα να θέλουμε να υπολογίσουμε μόνο το μέτρο της  $u$ ,  $|u| = |f|/|Z_M|$ . Θυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι το μέτρο ενός μιγαδικού αριθμού  $\alpha + j\beta$  είναι ίσο με  $(\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}$  και επομένως το μέτρο του  $Z_M$  θα ισούται με

$$|Z_M| = [(R_M)^2 + (\omega M_M - 1/\omega C_M)^2]^{1/2} \quad (5.15)$$

### 5.10.1 Συντονισμός

Από τη Σχέση (5.15) παρατηρούμε ότι το μέτρο της μηχανικής εμπέδησης μεταβάλλεται με τη συχνότητα. Επίσης, για κάποια γωνιακή συχνότητα  $\omega = \omega_0$  οι δύο όροι  $\omega M_M$  και  $1/\omega C_M$  θα παίρνουν την ίδια τιμή και επομένως θα αλληλοαναιρούνται

$$\omega_0 M_M - 1/\omega_0 C_M = 0. \quad (5.16)$$

Η συχνότητα αυτή είναι προφανώς η συχνότητα συντονισμού και μπορεί εύκολα να υπολογιστεί λύνοντας ως προς  $\omega_0$  στη σχέση (5.16)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_M C_M}}, \quad f_0 = \omega_0 / 2\pi = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_M C_M}}. \quad (5.17)$$

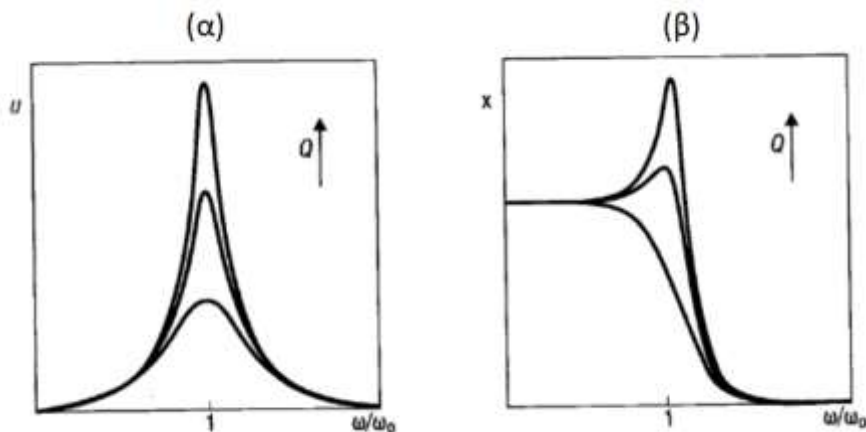
Σε αυτή τη συχνότητα το μιγαδικό μέρος της  $Z_M$  γίνεται ίσο με 0 και επομένως το μέτρο της γίνεται ελάχιστο. Αυτό σημαίνει ότι στη συχνότητα συντονισμού το μέτρο της ταχύτητας γίνεται μέγιστο.

### 5.10.2 Ταχύτητα διαφράγματος συναρτήσει των μηχανικών στοιχείων

Η συμπεριφορά του συστήματος στη συχνότητα συντονισμού εξαρτάται επομένως σε μεγάλο βαθμό από την τιμή της μηχανικής αντίστασης  $R_M$ . Αν αυτή δε είναι μηδενική, τότε το μέτρο της ταχύτητας γίνεται άπειρο! Στην φύση είναι αδύνατον βέβαια να υπάρξει μηχανικό σύστημα με μηδενική απόσβεση (δηλαδή να ισχύει  $R_M=0$ ). Τη συμπεριφορά του συστήματος στη συχνότητα συντονισμού την περιγράφει και ένα μέγεθος που λέγεται συντελεστής ποιότητας,  $Q$ , ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί ως

$$Q = \frac{1}{R_M} \cdot \sqrt{\frac{M_M}{C_M}} \quad (5.18)$$

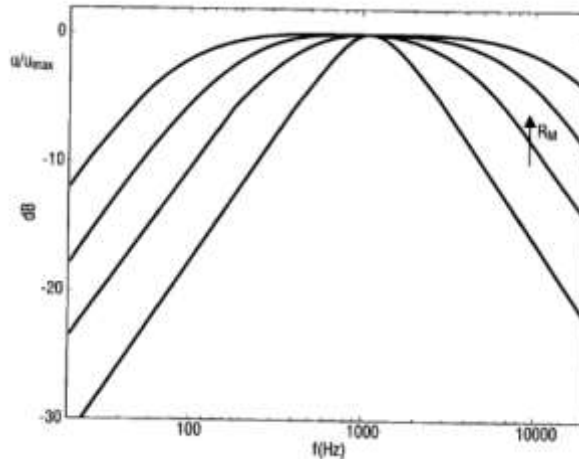
Ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  εκφράζει την οξύτητα του συντονισμού, μας λέει δηλαδή κατά κάποιο τρόπο πόσο απότομα αυξάνεται η ταχύτητα του συστήματος καθώς προσεγγίζουμε τη συχνότητα συντονισμού  $f_0$ . Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζεται ο τρόπος που η ταχύτητα και η μετατόπιση του διαφράγματος μεταβάλλονται συναρτήσει της συχνότητας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή ποιότητας  $Q$ .



Σχήμα 5.16: Ταχύτητα (α) και μετατόπιση (β) του διαφράγματος συναρτήσει του λόγου  $\omega/\omega_0$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή ποιότητας  $Q$ .

Θα πρέπει να αποφεύγεται η σύγχυση του όρου «συντελεστής ποιότητας» με την ποιότητα του μικροφώνου γενικά. Η τιμή του  $Q$  δεν μας λέει πόσο ποιοτικό είναι ένα μικρόφωνο, απλά μας δίνει κάποια πληροφορία από πλευράς φυσικής συμπεριφοράς του μικροφώνου.

Από όλα αυτά θα πρέπει να έχει γίνει κατανοητό ότι οι παράμετροι  $R_M, M_M$  και  $C_M$  πρέπει να επιλεχτούν με προσοχή διότι επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση συχνότητας του μικροφώνου. Για μεσαίες τιμές της ελαστικότητας  $C_M$  και της μάζας  $M_M$  η συχνότητα συντονισμού βρίσκεται στη μέση του ακουστικού φάσματος, τυπικά στο 1kHz. Είναι συχνά επιθυμητή η αύξηση της μηχανικής αντίστασης  $R_M$  έτσι ώστε να επιτευχθεί μια πιο επίπεδη απόκριση συχνότητας, κάτι που συνήθως γίνεται με την προσθήκη πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού στο πίσω μέρος του διαφράγματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στα δυναμικά μικρόφωνα (θα δούμε στο Κεφάλαιο 6 ότι παρόμοια τακτική ακολουθείται και για τα ηλεκτροδυναμικά ηχεία). Στο Σχήμα 5.17 απεικονίζεται η εξάρτηση της ταχύτητας (συγκεκριμένα του  $20\log(u/u_{\max})$  όπου  $u_{\max}$  η μέγιστη ταχύτητα στη συχνότητα συντονισμού) από τη συχνότητα για διαφορετικές τιμές της μηχανικής αντίστασης  $R_M$ . Παρατηρείστε ότι αύξηση της  $R_M$  εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και επομένως οδηγεί σε μια πιο επίπεδη απόκριση συχνότητας μικροφώνου.



Σχήμα 5.17: Διακύμανση του  $20\log(u/u_{\max})$  συναρτήσει της συχνότητας και της μηχανικής αντίστασης  $R_M$

### 5.10.3 Σχέση αιτίου αποτελέσματος

Λόγω της Σχέσης (5.14) η σχέση μεταξύ ταχύτητας και δύναμης στο διάφραγμα μπορεί να γραφεί

$$\frac{u}{f} = \frac{1}{R_M + j\omega M_M + 1/j\omega C_M}. \quad (5.19)$$

Η ηλεκτρική τάση στην έξοδο του μικροφώνου σχετίζεται με την ταχύτητα μέσω της  $V=BuI$ . Λόγω και του ότι  $f=\rho S$  (Σχέση 5.13), κάνοντας τις κατάλληλες μετατροπές στην (5.19) καταλήγουμε ότι

$$\frac{V}{p} = \frac{SB I}{R_M + j\omega M_M + 1/j\omega C_M}. \quad (5.20)$$

Η (5.20) μας δίνει μια απευθείας σχέση μεταξύ αιτίου (ακουστική πίεση) και αποτελέσματος (ηλεκτρική τάση) στο ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο και επομένως είναι σημαντική για τη μελέτη της συμπεριφοράς του μικροφώνου.

**Άσκηση:** Για ένα μικρόφωνο με διάμετρο 2.54 cm δίνονται: πάχος διαφράγματος  $\tau=50\mu\text{m}$ , πυκνότητα υλικού  $\rho=2700\text{kg/m}^3$ ,  $k=6 \cdot 10^5 \text{ N/m}$  και  $R_M=1.2\text{kg/s}$ . Να ευρεθεί η μέγιστη τιμή της ταχύτητας και της μετατόπισης που μπορούμε να έχουμε για στάθμη ηχητικής πίεσης στο διάφραγμα 90 dB SPL.

**Απάντηση:** Σύμφωνα με τη θεωρία μας, η ταχύτητα μεγιστοποιείται στη συχνότητα συντονισμού του μικροφώνου. Για να τη βρούμε ως υπολογίσουμε καταρχάς τη μάζα του διαφράγματος. Γνωρίζουμε ότι η μάζα είναι το γινόμενο πυκνότητας υλικού επί τον όγκο. Ο τελευταίος μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι το διάφραγμα είναι κυκλικής διατομής και σταθερού πάχους, δηλαδή κύλινδρος. Η διάμετρος είναι 2.54 cm (0.0254 m) επομένως η ακτίνα είναι  $a=0.0254/2=0.0127 \text{ m}$  και η διατομή  $S=\pi a^2=5.07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Ο όγκος του διαφράγματος είναι επομένως  $V=\tau S=2.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$  και επομένως η μάζα θα είναι  $M_M=\rho V=6.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$ . Η μηχανική ακαμψία μας δίνεται μέσω του  $k=6 \cdot 10^5 \text{ N/m}$  οπότε η ελαστικότητα θα είναι

$C_M = \frac{1}{k} = 1.67 \cdot 10^{-6}$ . Μπορούμε τώρα επομένως να υπολογίσουμε τη γωνιακή ταχύτητα στη συχνότητα συντονισμού μέσω του γνωστού τύπου  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_M M_M}} = 93934 \text{ rad/s}$  άρα και τη συχνότητα συντονισμού ως  $f_0=\omega_0/2\pi=15 \text{ kHz}$ . Στη συχνότητα αυτή, η μηχανική εμπέδηση έχει μόνο πραγματικό μέρος και ισούται με τη μηχανική αντίσταση, είναι δηλαδή  $Z_M=R_M=1.2\text{kg/s}$ . Η ταχύτητα  $u$  επομένως θα συνδέεται με τη δύναμη  $f$  μέσω της σχέσης  $u=f/R_M$ . Η δύναμη από την άλλη θα είναι ίση με  $f=pS$ , όπου  $p$  η πίεση σε Pa. Τα 90 dB SPL μετατρέπονται σε Pa μέσω της σχέσης  $20 \log \frac{p}{p_{ref}} = 90$ , όπου γνωρίζουμε ότι  $p_{ref}=2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  και επομένως κάνοντας απολογαριθμοποίηση βρίσκουμε  $p=2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{90}{20}} = 0.632 \text{ Pa}$ . Εν τέλει, η δύναμη στα 90 dB SPL ισούται με  $f=0.632 \cdot 5.07 \cdot 10^{-4}=3.2 \cdot 10^{-4} \text{ N}$  και η ταχύτητα του διαφράγματος μπορεί να υπολογιστεί  $u=3.2 \cdot 10^{-4}/1.2=2.7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Στη μόνιμη κατάσταση, η ταχύτητα  $u$  συνδέεται με τη μετατόπιση  $x$  μέσω της σχέσης

$$u = j\omega x \text{ και άρα } |u| = \omega |x|. \quad (5.21)$$

Επομένως, μπορώ να υπολογίσω το μέτρο της μετατόπισης αν διαιρέσω την ταχύτητα με την γωνιακή ταχύτητα επομένως  $|x|=|u|/\omega=2.87 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ . Παρατηρούμε ότι ακόμα και σε μία αρκετά μεγάλη στάθμη ήχου της τάξης των 90 dB SPL η ταχύτητα και η μετατόπιση του διαφράγματος περιορίζονται σε πολύ χαμηλές τιμές.

## 6 ΜΕΓΑΦΩΝΑ

---

Ένα από τα πρώτα τεχνολογικά επιτεύγματα που επέτρεψαν την χρήση της τεχνολογίας στο χώρο του ήχου και της μουσικής είναι τα μεγάφωνα. Είναι διατάξεις που κάνουν ακριβώς την αντίθετη διαδικασία από τα μικρόφωνα. Πρόκειται δηλ. για ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς που μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα μεγάλης ισχύος σε μηχανικές ταλάντωσης και στη συνέχεια σε ηχητικά κύματα.

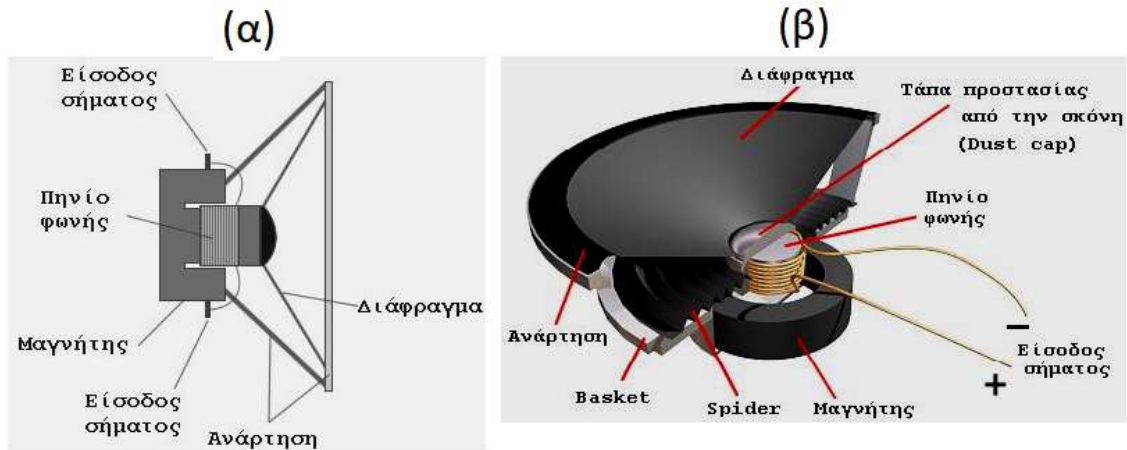
### 6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ

Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι ηλεκτροακουστικής μετατροπής στα μεγάφωνα, αλλά δύο μέθοδοι επικρατούν συντριπτικά, το ηλεκτρομαγνητικά προσαρμοσμένο διάφραγμα και το πιεζοηλεκτρικά προσαρμοσμένο διάφραγμα. Από τα δύο το πρώτο είναι κατά πολύ το πιο συνηθισμένο.

#### 6.1.1 Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή

Στο μεγάφωνο αυτό υπάρχει ένα πηνίο που είναι τοποθετημένο στο μαγνητικό πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη, το οποίο ονομάζεται πηνίο φωνής (voice coil). Πάνω στο πηνίο αυτό είναι στερεωμένο ένα διάφραγμα ή κώνος που είναι συνήθως από πεπιεσμένο χαρτί ή από αλουμίνιο. Γύρω του υπάρχει ένα μεταλλικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίζεται με μια ειδική ανάρτηση που χρησιμοποιείται και για την απόσβεση των ταλαντώσεων. Το πηνίο φωνής και ο κώνος κινούνται ελεύθερα στο διάκενο που σχηματίζει ο μαγνήτης. Για να διατηρηθεί αυτός ο άξονας κίνησης χρησιμοποιείται μια δεύτερη ανάρτηση που έχει πτυχές σαν δακτυλίους και επειδή το υλικό της είναι λεπτό σαν ιστός αράχνης ονομάζεται spider. Το πηνίο δέχεται το εναλλασσόμενο ρεύμα που αναπαριστά το ηχητικό κύμα. Το μεταβαλλόμενο αυτό ρεύμα καθώς περνάει μέσα από το μαγνητικό πεδίο προκαλεί την ανάπτυξη δυνάμεων Laplace πάνω στο πηνίο το οποίο μπορεί να κινείται. Έτσι μπορεί να κινεί με την ίδια συχνότητα και τον κώνο που είναι κολλημένος πάνω του. Η κίνηση αυτή του κώνου θέτει σε κίνηση τα μόρια του αέρα και παράγεται ήχος.

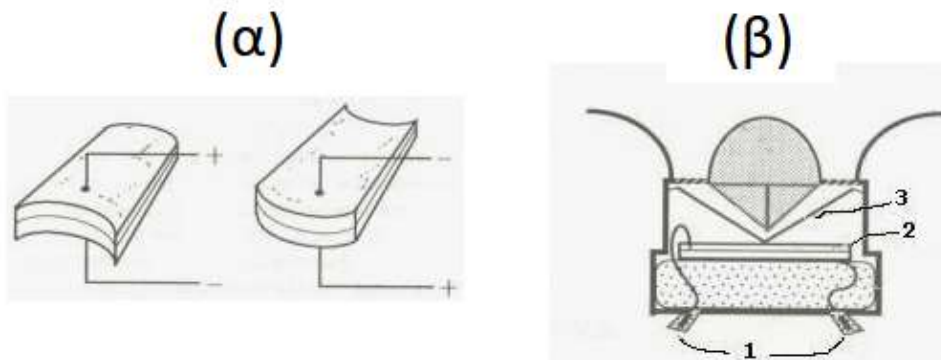
Η δύναμη Laplace δίνεται από την σχέση  $f = B \cdot I \cdot l$ , όπου  $B$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος και  $l$  το μήκος του πηνίου. Όσο μεγαλύτερη είναι λοιπόν ή ένταση του μαγνητικού πεδίου και ή ένταση του ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη ή δύναμη που αναπτύσσεται και επομένως ή ένταση του ήχου που παράγεται



Σχήμα 6.1: Μεγάφωνο με ηλεκτρομαγνητική μετατροπή σαν αρχή λειτουργίας (α) και όπως είναι στην πραγματικότητα (β).

### 6.1.2 Πιεζοηλεκτρική μετατροπή

Η άλλη μέθοδος μετατροπής που χρησιμοποιείται είναι βασισμένη στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια ιδιότητα ορισμένων κρυσταλλικών υλικών. Όταν ένας τέτοιος κρύσταλλος παραμορφώνεται μηχανικά παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Αφ' ετέρου, εάν ένα ηλεκτρικό δυναμικό εφαρμοσθεί στον κρύσταλλο, αλλάζει διαστάσεις. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στους ακουστικούς μετατροπείς είναι γενικά του τύπου που είναι γνωστού ως διμορφικά (bimorphs). Οι κρύσταλλοι αυτοί είναι στοιχεία κατασκευασμένα με δύο στρώματα πιεζοηλεκτρικού υλικού. Στο Σχήμα 6.2(α) φαίνεται ο τύπος παραμόρφωσης των διμορφικών αυτών κρυστάλλων όταν μια τάση εφαρμόζεται σε αυτούς. Στο Σχήμα 6.2(β) φαίνεται η κατασκευή ενός χαρακτηριστικού πιεζοηλεκτρικού μεγαφώνου. Το σήμα έρχεται από τον ενισχυτή ισχύος (1). Ο κρύσταλλος (2), στη συνέχεια, ενώνεται με ένα διάφραγμα (3). Τα πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα χρησιμοποιούνται μόνο σαν υψηλής συχνότητας μεγάφωνα (συνήθως ενεργώντας επάνω από 5 kHz) μια και οι αποκρίσεις τους πέφτουν πολύ στις μεσαίες και στις χαμηλές συχνότητες.



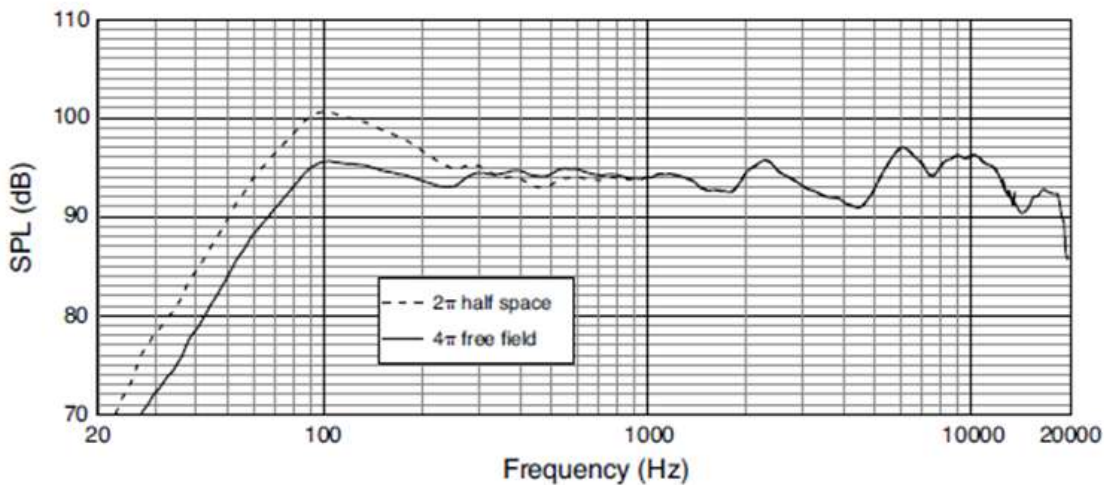
Σχήμα 6.2: Παραμόρφωση διμορφικού στοιχείου ύπο την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στο (α) και τρόπος αξιοποίησής τους για μεγάφωνο που λειτουργεί με πιεζοηλεκτρική μετατροπή (β).

## 6.2 ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ

Η συχνотική απόκριση είναι μια σύγκριση στο πεδίο συχνοτήτων της στάθμης ακουστικής πίεσης (έξοδος) ενός μεγαφώνου με την στάθμη ισχύος της εισόδου. Μια χαρακτηριστική προδιαγραφή συχνотικής απόκρισης μεγαφώνου full range είναι:

$$30 \text{ Hz} - 15.000 \text{ Hz}, \pm 3 \text{ dB}$$

Η προδιαγραφή αυτή μας λέει ότι μέσα στο δηλωμένο συχνотικό εύρος (δηλ. 30 Hz – 15.000 Hz), εάν συγκρίνουμε την στάθμη ακουστικής πίεσης με την στάθμη ισχύος του σήματος στο μεγάφωνο σε οποιαδήποτε συχνότητα, ο λόγος μεταξύ των δύο θα είναι  $\pm 3$  dB, δηλ. σε ένα παράθυρο 6 dB ( $+ 3$  dB -  $-3$  dB) = 6 dB. Η συχνотική απόκριση μπορεί επίσης να δίνεται ως γραφική παράσταση, όπως δηλ. στο Σχήμα 6.3. Μια πιο αναλυτική ματιά στη συχνотική απόκριση μεγαφώνου γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ανάλογου στην Ενότητα 6.7.4.



Σχήμα 6.3. Συχνотική απόκριση μεγαφώνου

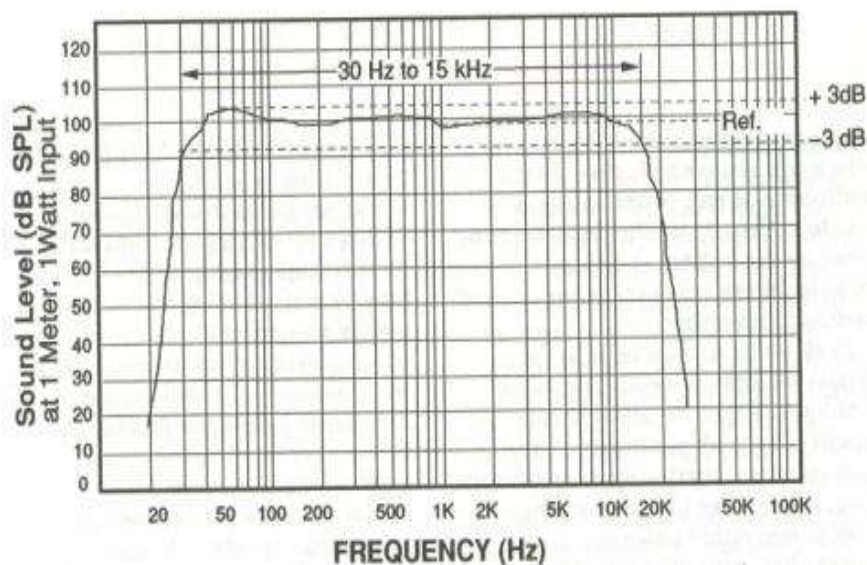
## 6.3 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ

Η ευαισθησία ενός μεγαφώνου είναι μια ποσότητα που προσδιορίζει τη στάθμη της ηχητικής πίεσης στο ελεύθερο πεδίο και σε απόσταση 1 m από το ηχείο για ισχύ εισόδου  $W_e=1$  Watt. Η ευαισθησία υπολογίζεται πάνω στον άξονα του ηχείου. Η μέτρηση ιδανικά γίνεται σε ανηχοικό θάλαμο με χρήση ευρυζωνικού σήματος διέγερσης όπως ροζ ή λευκός θόρυβος. Ένα παράδειγμα για την ευαισθησία ενός ηχείου είναι:

## 92 dB SPL at 1 m and 1 Watt input

Θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η ισχύς αφορά την ηλεκτρική ισχύ στην είσοδο του μεγαφώνου και δεν είναι ακουστική ισχύ. Εν γένει, η ακουστική ισχύς σε ένα ηχείο είναι αρκετά μικρότερη της ηλεκτρικής ισχύς, γεγονός που οφείλεται στο μικρό βαθμό απόδοσης που επιτυγχάνεται κατά την ηλεκτρακουστική μετατροπή. Κάποιοι κατασκευαστές μπορεί εναλλακτικά να διατυπώσουν την ευαισθησία για 1 Watt είσοδο και στάθμη του ήχου στα 4 πόδια (αντί για ένα μέτρο), ή 1 milliwatt και 30 πόδια απόσταση. Δεδομένου ότι το μεγάφωνο είναι ένας γραμμικός μετατροπέας της ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική, τότε είναι προφανές ότι όλες αυτές οι προδιαγραφές είναι ισοδύναμες και μπορούμε εύκολα να πάμε από τη μία στην άλλη, ή να υπολογίσουμε την στάθμη σε κάποιο σημείο στο χώρο για οποιαδήποτε τιμή ισχύος εισόδου, εφόσον βέβαια αυτή δεν υπερβαίνει κάποια όρια. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ασκήσεις που αφορούν την προδιαγραφή της ευαισθησίας του ηχείου έχουν ήδη διατυπωθεί και λυθεί στην Ενότητα 1.9.

Στο Σχήμα 6.4 βλέπουμε μία περίπτωση όπου η ευαισθησία δίνεται σε μορφή διαγράμματος στάθμης – συχνότητας. Το ότι το διάγραμμα περιλαμβάνει πληροφορία σχετική με την ευαισθησία του ηχείου το καταλαβαίνουμε από τον κατακόρυφο άξονα ο οποίος γράφει “dB SPL at 1 Meter, 1 Watt Input”. Με ένα τέτοιο διάγραμμα έχουμε ταυτόχρονη πληροφορία για την ευαισθησία του ηχείου και για τη συχνотική του απόκριση. Ωστόσο, για να αποφευχθεί παρεξήγηση ο κατασκευαστής θα πρέπει να ξεκαθαρίσει αν η μέτρηση έγινε διεγείροντας το ηχείο με ένα ευρυζωνικό σήμα που περιέχει όλες τις συχνότητες (πχ λευκός θόρυβος ή sweep tone) ή αν έγινε με καθαρούς τόνους σε πολλές διαφορετικές συχνότητες.

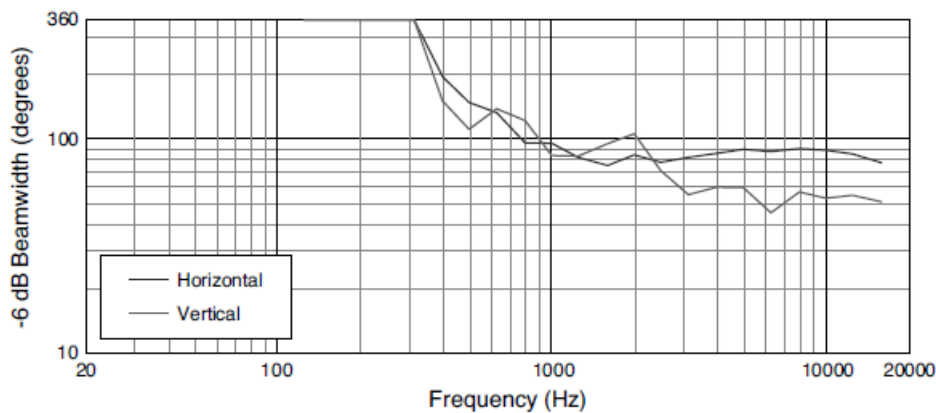


Σχήμα 6.4: Ευαισθησία μεγαφώνου για διαφορετικές συχνότητες.

## 6.4 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΗΧΕΙΟΥ

Κάθε μεγάφωνο ακτινοβολεί ηχητικά κύματα με διαφορετική ένταση, ανάλογα με τη γωνία. Η διασπορά του μεγαφώνου στο χώρο μπορεί να δίνεται από διάγραμμα κάλυψης (coverage), από διαγράμματα πλάτους δέσμης (beamwidth) από ομάδες καμπυλών συχνοτικής απόκρισης για κάποιες κατευθύνσεις στον χώρο ή τέλος από πολικά διαγράμματα (polar plot).

Ως κάλυψη (coverage) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από τα σημεία που η στάθμη ακουστικής πίεσης είναι μέχρι 6 dB χαμηλότερη από την στάθμη πάνω στον κεντρικό άξονα του ηχείου (δηλ. την γωνία των 0°). Η πληροφορία μπορεί να δίνεται από διάγραμμα, όπως στο Σχήμα 6.5, όπου βλέπουμε πως η κάλυψη μεταβάλλεται με τη συχνότητα. Παρατηρείστε ότι στις χαμηλές συχνότητες το ηχείο είναι πρακτικά πανκαταυθεντικό.



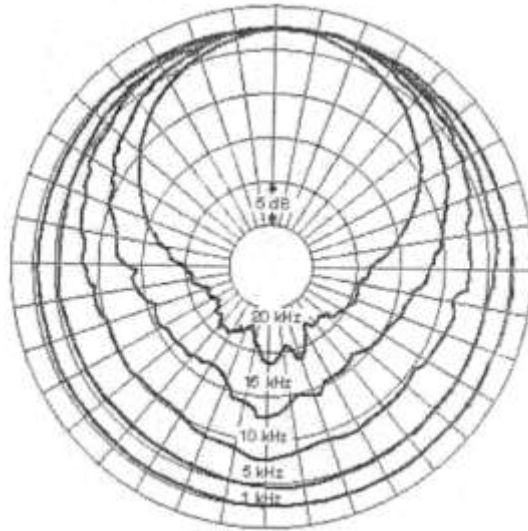
Σχήμα 6.5. Κάλυψη μεγαφώνου συναρτήσει της συχνότητας

Ένας από τους πιο εποπτικούς τρόπους για την αναπαράσταση της κατευθυντικότητας είναι μέσω του πολικού διαγράμματος, όπως για παράδειγμα αυτό του Σχήματος 6.6. Το πολικό διάγραμμα μας πληροφορεί για το πώς μεταβάλλεται η στάθμη της ηχητικής πίεσης (dB) που δημιουργεί το ηχείο στο ελεύθερο πεδίο για μια συγκεκριμένη συχνότητα όταν η απόσταση από το ηχείο είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται η γωνία ως προς τον άξονα του ηχείου. Η απόσταση της κάθε καμπύλης για κάποια γωνία  $\theta$  από το κέντρο του κύκλου προκύπτει στην ουσία από τη γωνιακή απόκριση

$$D_L(\theta, f) = 20 \log\left(\frac{p(\theta)}{p(\theta=0)}\right), \quad (6.1)$$

όπου το  $f$  υπονοεί ότι η γωνιακή απόκριση είναι συνάρτηση της συχνότητας. Λόγω της κατευθυντικής συμπεριφοράς, ένα ηχείο ακτινοβολεί περισσότερο πάνω στον άξονα ( $\theta=0^\circ$ ) από ότι για άλλες γωνίες ( $\theta \neq 0$ ). Ένα τυπικό ηχείο γίνεται όλο και πιο κατευθυντικό όσο αυξάνεται η συχνότητα. Το πολικό διάγραμμα του Σχήματος 6.6 βλέπουμε την ακτινοβολία του ηχείου στα 1, 5, 10 και 15 kHz. Παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες συμπίπτουν πάνω στον άξονα ( $\theta=0^\circ$ ), δηλαδή το ηχείο σε όλες τις συχνότητες έχει την ίδια ευαισθησία ελεύθερου πεδίου. Αυτή η συμπεριφορά είναι συνηθισμένη για τα ηχεία του εμπορίου, και οφείλεται στην προσπάθεια

των κατασκευαστών να επιτύχουνε μια όσο το δυνατόν πιο επίπεδη απόκριση συχνότητας (flat response) πάνω άξονα του ηχείου. Είναι δηλαδή επιθυμητό όλες οι συχνότητες να ακούγονται το ίδιο πάνω στον άξονα, ώστε κατά αυτόν τον τρόπο τοποθέτησης να εξασφαλίζεται μια αντικειμενική αναπαράσταση της αναπαραγόμενης ηχητικής πληροφορίας. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ασκήσεις που αφορούν την προδιαγραφή της κατευθυντικότητας του ηχείου έχουν ήδη διατυπωθεί και λυθεί στην Ενότητα 1.8 και 1.9.



Σχήμα 6.6: Πολικό διάγραμμα μεγαφώνου για συχνότητες 1, 5, 10, 15 και 20 kHz.

Τι αποτέλεσμα έχει η απαίτηση για επίτευξη μιας flat απόκρισης στον άξονα όσον αφορά την ακουστική ισχύ του ηχείου σε κάθε συχνότητα; Αυτό το σημαντικό ερώτημα μπορούμε να το απαντήσουμε αν κατανοήσουμε το εξής. Η ακουστική ισχύς που μας παρέχει το ηχείο μας σε κάθε συχνότητα εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο ακτινοβολείται η ηχητική ενέργεια, ανεξάρτητα με το πώς αυτή μοιράζεται στο χώρο, δηλαδή το πώς αυτή η ενέργεια κατανέμεται ως προς τη γωνία  $\theta$ . Κατά συνέπεια, όταν μιλάμε για ισχύ θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν τη ακτινοβολία του ηχείου προς όλες τις γωνίες από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ . Με βάση αυτή τη θεώρηση, η ακουστική ισχύ που ακτινοβολεί το ηχείο μου σε κάποια συχνότητα είναι ανάλογη του εμβαδού που περικλείεται από την καμπύλη γωνιακής κατευθυντικότητας. Κατά συνέπεια, αφού η κατευθυντικότητα αυξάνεται με τη συχνότητα, η ακουστική ισχύς θα πρέπει να μειώνεται με τη συχνότητα αν θέλουμε μια flat απόκριση πάνω στον άξονα.

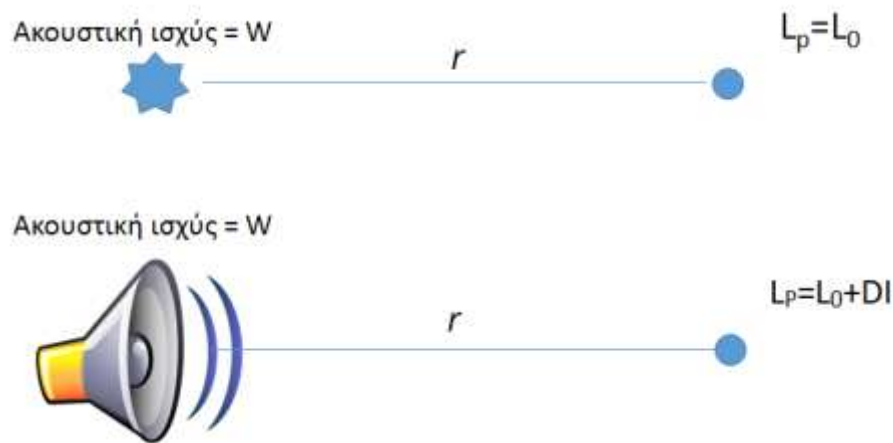
Ο παράγοντας κατευθυντικότητας του ηχείου συμβολίζεται με το  $Q$  και μας δίνει μια μία μετρική για το πόσο κατευθυντικό είναι ένα ηχείο. Ορίζεται ως

$$Q(f) = \frac{\text{ακτινοβολουμένη ενεργεια ανα επιφανεια πανω σε συγκεκριμενο αξονα}}{\text{μεση ακτινοβολουμένη ενεργεια ανα επιφανεια σε ολες τις κατευθυνσεις}}$$

και επομένως θα έχουμε  $Q(f)=1$  για πανκατευθυντικό ηχείο και  $Q(f)>1$  για κατευθυντικό ηχείο. Παρόμοια μετρική είναι ο δείκτης κατευθυντικότητας ο οποίος ορίζεται ως

$$DI(f) = 10 \log Q(f). \quad (6.2)$$

Προφανώς θα ισχύει  $DI(f)=0$  για πανκατευθυντικό ηχείο και  $DI(f)>0$  για κατευθυντικό ηχείο. Η χρησιμότητα του παράγοντα και του δείκτη κατευθυντικότητας για υπολογισμούς ακουστικών μεγεθών μπορεί να γίνει κατανοητή αν κάνουμε την παρακάτω σύγκριση. Έστω ένα πανκατευθυντικό ηχείο που ακτινοβολεί  $W$  ακουστικά Watt σε μία συχνότητα  $f$  και διαμορφώνει μια στάθμη ήχου  $L_0$  dB SPL πάνω στον άξονα του ηχείου σε απόσταση  $r$ . Έστω τώρα ένα κατευθυντικό ηχείο που ακτινοβολεί τα ίδια ακριβώς ακουστικά Watt (στην ίδια συχνότητα) και το οποίο έχει δείκτη κατευθυντικότητας  $DI(f)$ . Τότε για την ίδια απόσταση  $r$  πάνω στον άξονα του ηχείου θα δημιουργείται προφανώς μεγαλύτερη στάθμη ακουστικής πίεσης. Η αύξηση στη στάθμη ήχου μάλιστα θα είναι ίση με  $DI(f)$ . Αυτή η μεταβολή κατάστασης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7: Χρησιμότητα του δείκτη κατευθυντικότητας σε υπολογισμούς ακουστικών μεγεθών.

## 6.5 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΗΧΕΙΩΝ - ΤΕΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

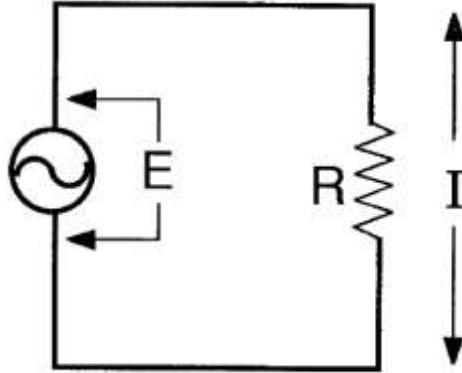
Το πιο βασικό χαρακτηριστικό ενός ενισχυτή είναι η ισχύς που μπορεί να αποδώσει κατά τη σύνδεσή του με ένα ή περισσότερα ηχεία. Η RMS ισχύς των τελικών ενισχυτών συμβολίζεται με  $W_e$  και δηλώνεται με βάση κάποια τιμή σύνθετης αντίστασης φορτίου, δηλαδή την τιμή της σύνθετης αντίστασης εισόδου του ηχείου ή της συνδεσμολογίας των ηχείων που συνδέονται. Από την άλλη, για κάθε παθητικό ηχείο υπάρχει και μια ονομαστική τιμή σύνθετης αντίστασης. Στην Ενότητα 6.6 θα δούμε ότι η σύνθετη αντίσταση εισόδου ενός ηχείου μεταβάλλεται με τη συχνότητα και ότι η ονομαστική τιμή συμπίπτει ουσιαστικά με την λεγόμενη «μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση του ηχείου». Μια τυπική προδιαγραφή ενισχυτή δίνεται παρακάτω για ένα ενισχυτή ο οποίος επιτρέπεται να συνδεθεί με ηχείο η συνδεσμολογία ηχείων μέχρι και 4 Ω.

RMS ισχύς εξόδου:

Stereo, 8 Ω, 240 W/κανάλι

Stereo, 4 Ω, 400 W/κανάλι

Βλέπουμε ότι ουσιαστικά ο ενισχυτής αποδίδει 240 W RMS σε κάθε κανάλι (Left-Right) όταν η αντίσταση φορτίου (δηλαδή του ηχείου) είναι 8 Ω και 400 W RMS σε κάθε κανάλι όταν συνδέεται με αντίσταση φορτίου 4Ω. Το πώς η αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος συνδέεται με τη μείωση της αντίστασης φορτίου μπορούμε να το καταλάβουμε ως εξής:



Σχήμα 6.8: Τυπικό AC κύκλωμα για τη σύνδεση τελικού ενισχυτή με ηχείο.

Στο Σχήμα 6.8 η έξοδος του ενισχυτή αναπαρίσταται σαν μια απλή AC πηγή τάσης, όπου  $E$  είναι η RMS τιμή της τάσης, και η σύνθετη αντίσταση φορτίου του ηχείου προσομοιώνεται από μία απλή ωμική αντίσταση  $R$ . Από το νόμο του Ohm γνωρίζουμε ότι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι  $I = \frac{E}{R}$  και επομένως η RMS ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση θα είναι

$$W_e = IE = \frac{E^2}{R}. \quad (6.3)$$

Από αυτή την απλοϊκή ανάλυση βλέπουμε ότι υποδιπλασιασμός της αντίστασης φορτίου θεωρητικά συνεπάγεται διπλασιασμό της αποδιδόμενης ισχύος (η αλλιώς αύξηση +3dB). Παρ' όλα αυτά, στην προδιαγραφή που αναφέρθηκε προηγουμένως, βλέπουμε ότι η αποδιδόμενη ισχύς στα 4Ω είναι κατά κάτι μικρότερη της αναμενόμενης (δηλαδή μικρότερη των 480 W). Αυτό είναι συνηθισμένο και οφείλεται ενδεχομένως σε μια μικρή αντίσταση εξόδου του ενισχυτή που είναι διάφορη του 0. Ωστόσο, στα προβλήματα που εμείς θα συναντήσουμε από εδώ και στο εξής δε θα λαμβάνουμε υπόψιν τέτοιους περιορισμούς και θα υπολογίζουμε την αποδιδόμενη ισχύ με απευθείας χρήση της Σχέσης (6.3), θεωρώντας ότι ο ενισχυτής είναι μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης σταθερού πλάτους.

Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ποιοι περιορισμοί ισχύουν κατά τη σύνδεση ενισχυτή με ηχεία ώστε να αποφύγουμε λάθη που μπορούν να βλάψουν τον ενισχυτή ή τα ηχεία. Εν τέλει μπορούμε να έχουμε καταστροφή του εξοπλισμού σε δύο περιπτώσεις.

A) Αν συνδέσουμε την έξοδο του ενισχυτή σε μικρότερη αντίσταση από την επιτρεπτή

B) Αν εισάγουμε στο ηχείο περισσότερη ισχύ από αυτή που μπορεί να αντέξει.

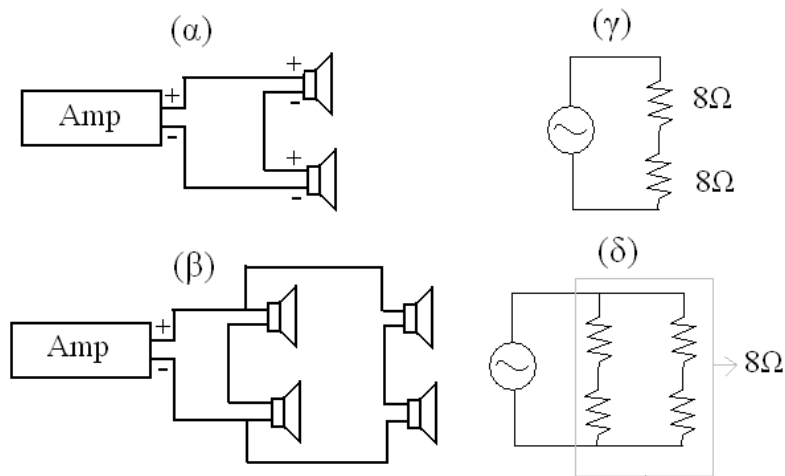
Στην περίπτωση (A) ο ενισχυτής θα προσπαθήσει να δώσει παραπάνω ισχύ (και άρα ρεύμα) από όσο έχει σχεδιαστεί να δίνει. Αν υπάρχει προστατευτικό κύκλωμα τότε αυτό μπορεί να

ενεργοποιηθεί και ο ενισχυτής να σταματήσει να δουλεύει χωρίς να πάθει ζημιά. Από την άλλη, στην περίπτωση (B), το ηχείο είναι που κινδυνεύει, ειδικά αν λειτουργήσει για πολύ ώρα σε ισχύ μεγαλύτερη της ονομαστικής. Το πιο συνηθισμένο εδώ είναι η υπερθέρμανση και εν τέλει το κάψιμο του πηνίου φωνής. Μα βάση αυτά, μπορούμε να ασχοληθούμε με τα προβλήματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Στα προβλήματα αυτά, εξετάζουμε τη θα συμβεί μόνο για ένα κανάλι του ενισχυτή (πχ το left). Θεωρούμε δηλαδή είτε ότι ο ενισχυτής είναι μονοφωνικός, είτε ότι αυτό που εφαρμόζουμε στο ένα κανάλι εφαρμόζεται και στο άλλο, επομένως και η ανάλυση για το άλλο κανάλι είναι περιττή.

**Άσκηση:** Δίνεται ένας τελικός ενισχυτής με χαρακτηριστικά 400W RMS στα 8 Ω. Προτείνεται συνδυασμούς αν έχουμε τέσσερα ηχεία των 100W RMS, στα 8 Ω το καθένα, για κάθε κανάλι. Σχεδιάστε τη συνδεσμολογία και αναφέρετε την αποδιδόμενη ισχύ σε κάθε περίπτωση.

Απάντηση:

Η πιο απλή περίπτωση είναι ο ενισχυτής να συνδεθεί απευθείας στο ένα ηχείο. Τότε ο ενισχυτής θα μπορεί να αποδίδει όλα τα Watt, τα οποία όμως είναι αρκετά περισσότερα από την ονομαστική τιμή των ηχείων. Αυτή η συνδεσμολογία δεν είναι ιδιαίτερα προτεινόμενη, καθότι σε δυνατές εντάσεις μπορεί το ηχείο να πάθει βλάβη από τα πολλά Watt. Μια άλλη συνδεσμολογία που επίσης δεν είναι προτεινόμενη είναι να συνδεθούν δύο ηχεία σε παράλληλη συνδεσμολογία. Τότε όμως, ο ενισχυτής θα βλέπει 4 Ω (αντί για 8) κάτι που μπορεί να έχει απρόβλεπτες συνέπειες για τον ενισχυτή ή και για τα ηχεία.



*Σχήμα 6.9: (α) Σύνδεση του ενισχυτή με δύο ηχεία σε σειρά και ισοδύναμο κύκλωμα στο (γ). Σύνδεση του ενισχυτή με δύο παράλληλους κλάδους δύο ηχείων εν σειρά και ισοδύναμο κύκλωμα στο (δ).*

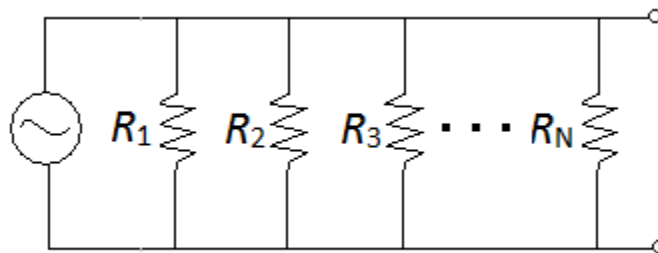
Μια δυνατή συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 6.9(α), όπου ο ενισχυτής συνδέεται με δύο ηχεία σε σειρά. Η αντίσταση που βλέπει σε αυτήν την περίπτωση ο ενισχυτής είναι  $8+8=16\ \Omega$  και επομένως αποδίδει ισχύ  $400/2=200\ \text{W RMS}$ . Αυτή η ισχύς μοιράζεται  $100\ \text{W RMS}$  σε κάθε ηχείο, οπότε ούτε ο ενισχυτής, ούτε τα ηχεία έχουν πρόβλημα. Βλέπουμε όμως ότι δεν

αξιοποιούμε όλη τη διαθέσιμη ισχύ του ενισχυτή. Για αυτό το λόγο, μπορούμε να φτιάξουμε και τη συνδεσμολογία που φαίνεται στο σχήμα 6.9(β).

Στη δεύτερη περίπτωση, η ισοδύναμη αντίσταση που βλέπει ο ενισχυτής υπολογίζεται μέσω του τύπου  $R_{ολ} = \frac{1}{\frac{1}{16} + \frac{1}{16}} = \frac{16}{2} = 8 \Omega$ . Ο ενισχυτής επομένως θα αποδώσει την ονομαστική του ισχύ (400 W RMS), τροφοδοτώντας με 100 W RMS κάθε ηχείο. Έτσι έχουμε αξιοποιήσει όλη την διαθέσιμη ισχύ του ενισχυτή.

Γενικά, αν έχουμε πολλούς παράλληλους κλάδους (βλ. Σχήμα 6.10) με σύνθετη τιμή αντίστασης  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_N$ , η συνολική τιμή της σύνθετης αντίστασης υπολογίζεται μέσω του τύπου

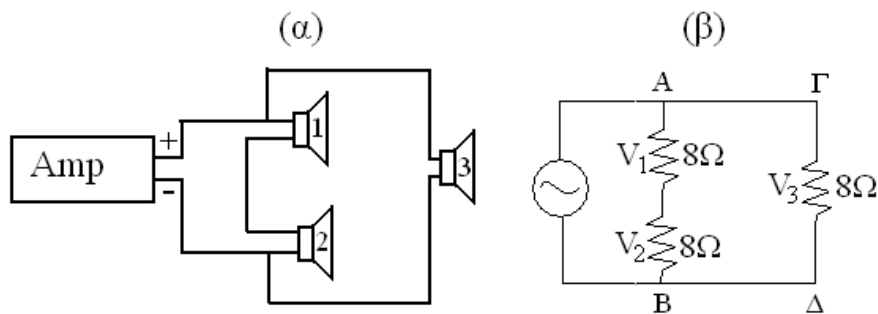
$$R_{ολ} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}}$$



Σχήμα 6.10: Υπολογισμός ολικής σύνθετης αντίστασης συνδεσμολογία με πολλούς παράλληλους κλάδους.

Αν έχουμε N παράλληλους κλάδους και κάθε κλάδος έχει την ίδια σύνθετη αντίσταση (δηλαδή  $R_1=R_2=\dots=R_N=R$ ) τότε η ολική σύνθετη αντίσταση δίνεται από τον πολύ απλό τύπο  $R_{ολ} = \frac{R}{N}$ .

**Άσκηση:** Στην παρακάτω συνδεσμολογία (Σχήμα 6.11 (α)) όλα τα ηχεία είναι 8 Ω. Αν οι προδιαγραφές του ενισχυτή μας λένε “4Ω”, εξετάστε αν η εικονιζόμενη σύνδεση είναι ασφαλής από την πλευρά του ηχείου ή των μεγαφώνων. Αν τα ηχεία 1 και 2 λειτουργούν στα 100 W RMS, πόση είναι η ελάχιστη ισχύς που πρέπει να αντέχει το ηχείο 3;



Σχήμα 6.11: Σύνδεση ενισχυτή με τρία ηχεία

**Απάντηση:** Στο σχήμα (β) κατασκευάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα. Έχουμε λοιπόν μία σύνθετη αντίσταση  $16 \Omega$  παράλληλα με  $8 \Omega$ . Η συνολική σύνθετη αντίσταση που βλέπει ο ενισχυτής είναι  $R_{ολ} = \frac{1}{\frac{1}{16} + \frac{1}{8}} = 5,33 \Omega$ . Βλέπουμε επομένως ότι αφού ο ενισχυτής «κατεβαίνει» στα  $4 \Omega$ , δεν θα υπάρχει πρόβλημα, άρα η σύνδεση είναι επιτρεπτή. Όσον αφορά το άλλο ερώτημα, βλέπουμε ότι αφού οι κλάδοι AB και ΓΔ είναι παράλληλοι θα ισχύει  $V_{AB} = V_{\Gamma\Delta}$  και επομένως,  $V_1 + V_2 = V_3$ . Επίσης θα είναι  $V_1 = V_2$ , από το οποίο συμπεραίνουμε ότι η τάση στα άκρα του τρίτου ηχείου είναι διπλάσια από την τάση στα άκρα καθενός από τα ηχεία 1 και 2 ( $V_3 = 2V_1 = 2V_2$ ). Για το ρεύμα μπορούμε επίσης να δούμε ότι λόγω των  $16 \Omega$  στον κλάδο AB και των  $8 \Omega$  στον κλάδο ΓΔ θα είναι  $I_{\Gamma\Delta} = 2I_{AB}$ . Από όλα αυτά συμπεραίνουμε ότι το ρεύμα και η τάση στο 3 ηχείο είναι διπλάσια από το ρεύμα και την τάση σε κάθε ένα από ηχεία 1 και 2, δηλαδή ισχύει  $I_{\Gamma\Delta} \cdot V_3 = 4I_{AB} \cdot V_1 = 4I_{AB} \cdot V_2$ , και επομένως, η ισχύς που θα πρέπει να αντέχει το τρίτο ηχείο είναι τετραπλάσια από την RMS ισχύ λειτουργίας των ηχείων 1 και 2 (δηλαδή  $400 \text{ W RMS}$  τουλάχιστον).

**Άσκηση:** Θεωρώντας ότι 2 όμοια ηχεία μπορούν να συνδεθούν σε ένα κανάλι ενισχυτή τόσο παράλληλα όσο και σε σειρά, ποια από τις δύο συνδεσμολογίες θα προτείνετε? Υπολογίστε το κέρδος σε dB SPL που μπορούμε να έχουμε θεωρητικά στην βέλτιστη περίπτωση έναντι της υποδεέστερης.

**Απάντηση:** Έστω R η ονομαστική τιμή αντίστασης του κάθε ηχείου. Αν συνδεθούν σε σειρά, τότε η συνολική αντίσταση που θα βλέπει ο ενισχυτής θα είναι  $2R$ , ενώ αν συνδεθούν παράλληλα, η αντίσταση που θα βλέπει ο ενισχυτής θα είναι  $R/2$ . Στην δεύτερη περίπτωση, η αντίσταση είναι υποτετραπλάσια της πρώτης και άρα καταλαβαίνουμε και από την Σχέση (6.3) ότι ο ενισχυτής θα δώσει τετραπλάσια Watt. Το όφελος από πλευράς στάθμης ήχου μπορούμε να το υπολογίσουμε αν λάβουμε υπόψιν μια μεταβολή κατάστασης όπου έχουμε τετραπλασιασμό ισχύος. Συγκεκριμένα, θα είναι  $\Delta L = 10 \log(W_2/W_1) = 10 \log 4 = 6 \text{ dB}$ , άρα θα έχουμε αύξηση της στάθμης του ήχου κατά  $6 \text{ dB}$ .

## 6.6 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ

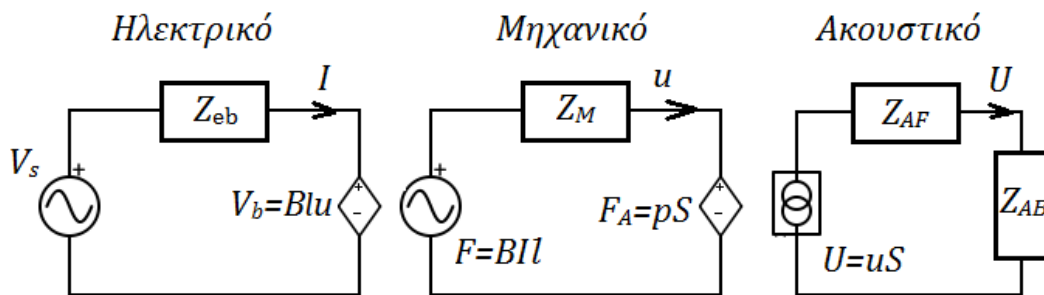
Στο Σχήμα 6.12 βλέπουμε τα τρία επιμέρους τμήματα του μεγαφώνου και τον τρόπο που συμβάλλουν για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική. Η ανάλυση που ακολουθεί γίνεται στη ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, όπου για λόγους απλότητας όμως παραλείπεται η εξάρτηση από τη συχνότητα, οπότε αντί πχ για  $V_s(\omega)$  και  $Z_M(\omega)$  θα γράφουμε απλά  $V_s$  και  $Z_M$ . Είναι επίσης προφανές ότι τα μεγέθη αυτά είναι μιγαδικά και ότι όταν πρόκειται για τάση, ρεύμα, δύναμη, ταχύτητα, πίεση και παροχή όγκου το μέτρο των μιγαδικών αυτών αριθμών ισούται με το πλάτος της ταλάντωσης.

### 6.6.1 Ηλεκτρικό σύστημα

Η τάση  $V_s$  είναι η γενεσιουργός αιτία για την κίνηση του διαφράγματος του μεγαφώνου και για τη δημιουργία του ήχου. Η τάση  $V_s$  είναι η τάση που θα μετρήσουμε στους ακροδέκτες του μεγαφώνου. Το  $Z_{eb}$  είναι η ηλεκτρική εμπέδηση στα άκρα του πηνίου φωνής το οποίο ενδέχεται εκτός από πραγματικό μέρος ( $\omega$ μική αντίσταση) να έχει και φανταστικό (κυρίως επαγωγική αντίσταση). Κατά την εφαρμογή της τάσης  $V_s$  δημιουργείται ένα ρεύμα  $I$  το οποίο δημιουργεί

την ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $F$  που είναι απαραίτητη για την κίνηση του διαφράγματος του μεγαφώνου. Καθώς όμως το διάφραγμα κινείται με ταχύτητα  $u$ , δημιουργείται μια τάση λόγω αυτεπαγωγής  $V_b=Bl u$  η οποία αντιτίθεται στη δημιουργία του ρεύματος  $I$ . Από το κύκλωμα αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό ότι το ρεύμα και η τάση θα συνδέονται από τη σχέση

$$I = \frac{V_s - V_b}{Z_{eb}} \quad (6.4)$$



Σχήμα 6.12. Ηλεκτρικά ανάλογα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.

### 6.6.2 Μηχανικό σύστημα

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που ασκείται στο διάφραγμα λόγω του ρεύματος  $I$  είναι ίση με  $F=BIl$  όπου  $l$  είναι το μήκος του πηνίου. Η δύναμη  $F$  είναι λοιπόν, από την οπτική γωνία του μηχανικού συστήματος, η γενεσιουργός αιτία για την κίνηση του διαφράγματος. Για να ταλαντωθεί λοιπόν το διάφραγμα, η δύναμη αυτή πρέπει να υπερνικήσει τη μάζα, την ακαμψία και την αντίσταση του διαφράγματος, όλα τα οποία συμπεριλαμβάνονται μέσα στη μηχανική εμπέδηση  $Z_M$ . Για τη μηχανική εμπέδηση είναι προφανές ότι αυτή αυτή θα απαρτίζεται από τη μάζα του διαφράγματος και του πηνίου, την ελαστικότητα λόγω των αναρτήσεων του μεγαφώνου και από μηχανικές αντιστάσεις οι οποίες οφείλονται σε δυνάμεις τριβής. Το καινούριο στοιχείο που εισάγεται τώρα στο κύκλωμα του μηχανικού συστήματος, είναι η αντίσταση που προκαλεί ο αέρας στο διάφραγμα κατά την κίνησή του. Η δύναμη λόγω του αέρα αντιτίθεται στην κίνηση του διαφράγματος και προφανώς είναι ίση με  $F_A=\rho S u$  όπου  $\rho$  είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ του μπροστινού και του πισινού μέρους του διαφράγματος και  $S$  το εμβαδό του διαφράγματος.

### 6.6.3 Ακουστικό σύστημα

Η κίνηση του διαφράγματος, η οποία περιγράφεται από τη μιγαδική τιμή της ταχύτητας  $u$  είναι τώρα η γενεσιουργός αιτία για τη δημιουργία του ήχου, που είναι και ο τελικός σκοπός της όλης κατασκευής. Καθώς το διάφραγμα με εμβαδό  $S$  ταλαντώνεται, δημιουργεί μια παροχή όγκου αέρα  $U=uS$  και μια διαφορά πίεσης μεταξύ του μπροστινού και του πισινού μέρους του διαφράγματος  $p$ . Τα  $Z_{AF}$  και  $Z_{AB}$  αναπαριστούν εδώ την ακουστική εμπέδηση που βλέπει το μπροστινό (το  $F$  βγαίνει από τη λέξη front) και το πισινό (το  $B$  από της λέξη back) μέρος του διαφράγματος. Τα  $Z_{AF}$  και  $Z_{AB}$  είναι κατά κανόνα μιγαδικές ποσότητες και περιέχουν ένα πραγματικό μέρος, το οποίο εκφράζει το ωφέλιμο ποσοστό που μετατρέπει την κίνηση του διαφράγματος σε ακουστική ενέργεια, και ένα φανταστικό μέρος, το οποίο εκφράζει

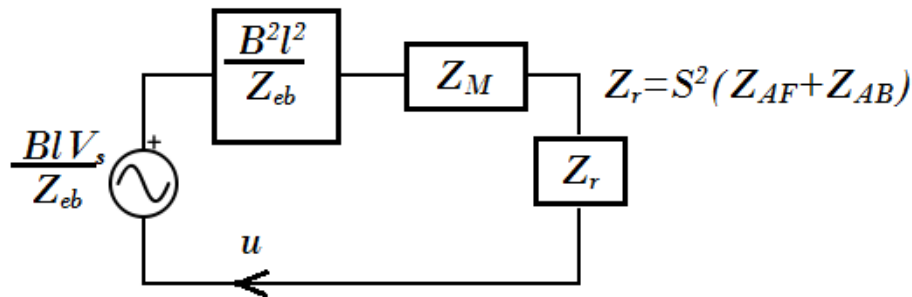
φαινόμενα ακουστικής μάζας και ακουστικής ελαστικότητας που αναπτύσσονται από τον αέρα πάνω στο διάφραγμα. Τα  $Z_{AF}$  και  $Z_{AB}$  εξαρτώνται από τον τύπο του ηχείου (πχ. αν είναι κλειστού τύπου ή ανοικτού τύπου) και τις διαστάσεις της κατασκευής σε σχέση με το μήκος κύματος της συχνότητας  $f$  για την οποία γίνεται η ανάλυση.

#### 6.6.4 Συντελεστές μετασχηματισμού

Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, μεσολαβεί ένας όρος που είναι ανάλογος του γινομένου της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $B$  με το μήκος του πηνίου  $l$ . Το γινόμενο  $Bl$  συνδέει την ηλεκτρομαγνητική δύναμη με το ρεύμα μέσω της σχέσης  $F=BlI$  και την πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου με την ταχύτητα  $u$  μέσω της σχέσης  $V_b =Bl u$ , απ' όπου έπεται ότι  $u=V_b /Bl$ . Η σταθερά  $Bl$  λέγεται συντελεστής μετασχηματισμού και εκφράζει τη σύζευξη του ηλεκτρικού συστήματος με το μηχανικό. Αντίστοιχα, κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ακουστική, ο συντελεστής μετασχηματισμού είναι η επιφάνεια του διαφράγματος  $S$ . Οι αντίστοιχες σχέσεις μεταξύ μηχανικών και ακουστικών μεγεθών είναι  $p=F/S$  και  $U=uS$ .

#### 6.6.5 Κατασκευή ισοδύναμου μηχανικού συστήματος

Είναι θεμιτό αν μπορούσαμε να έχουμε ένα σύστημα στο οποίο το αποτέλεσμα, που είναι η κίνηση του διαφράγματος, να συνδέεται απευθείας με την πρωταρχική γενεσιουργό αιτία, που είναι η τάση  $V_s$ . Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Kirchof στα τρία προηγούμενα συστήματα μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα μόνο κύκλωμα, το οποίο να περιέχει μαζί την αιτία και το αποτέλεσμα. Στο Σχήμα 6.13 αυτό γίνεται μεταφέροντας τα ηλεκτρικά και ακουστικά στοιχεία από την πλευρά του μηχανικού συστήματος, καταλήγοντας έτσι στο λεγόμενο ισοδύναμο μηχανικό σύστημα.



Σχήμα 6.13. Ισοδύναμο μηχανικό σύστημα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Στο παραπάνω σχήμα, το  $\frac{BlV_s}{Z_{eb}}$  έχει το χαρακτήρα μιας γεννήτριας δύναμης, ενώ τα  $\frac{B^2 l^2}{Z_{eb}}$  και  $Z_r$  έχουν το χαρακτήρα μηχανικής εμπέδησης, έχοντας όμως προκύψει από το ηλεκτρικό και το ακουστικό σύστημα αντίστοιχα κατά τη μεταφορά τους στο μηχανικό ισοδύναμο. Από αυτό το κύκλωμα μπορούμε λοιπόν να συσχετίσουμε απευθείας την ταχύτητα του διαφράγματος  $u$  με την τάση  $V_s$ . Ο φοιτητής καλείται από το παραπάνω κύκλωμα να εξάγει τη σχέση

$$u = \frac{BlV_s}{Z_{eb}(Z_M+Z_r)+(Bl)^2} \quad (6.5)$$

η οποία συνδέει απευθείας την ταχύτητα του διαφράγματος με την τάση  $V_s$  του ενισχυτή.

### 6.6.6 Ακουστική ισχύς του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Το μηχανικό ισοδύναμο του Σχήματος 6.13 είναι πολύ σημαντικό γιατί μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την ακουστική ισχύ που ακτινοβολεί το μεγάφωνο, συναρτήσει της ταχύτητας του διαφράγματος  $u_c$  και της εμπέδησης λόγω ακτινοβολίας  $Z_r$ . Συγκεκριμένα, η ακουστική ισχύς θα είναι

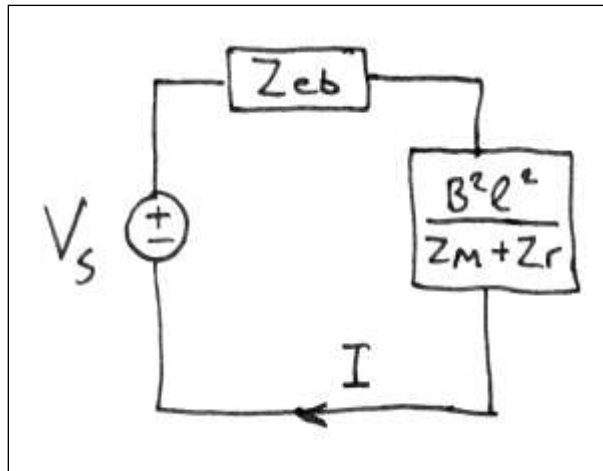
$$W = \frac{1}{2} |u|^2 \operatorname{Re}\{Z_r\} = \frac{1}{2} |u|^2 R_r, \quad (6.6)$$

όπου  $|u|$  είναι το πλάτος της ταχύτητας, η συνάρτηση  $\operatorname{Re}\{\}$  επιστρέφει το πραγματικό μέρος ενός μιγαδικού αριθμού και  $R_r$  είναι προφανώς το πραγματικό μέρος της  $Z_r$ . Βλέπουμε στην εξίσωση (6.6) ότι η αντίδραση ακτινοβολίας (δηλ το φανταστικό μέρος της  $Z_r$ ) δεν λαμβάνεται υπόψιν καθότι δυνάμεις με διαφορά φάσεις  $90^\circ$  ως προς την ταχύτητα δεν παράγουν έργο. Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και σε λογαριθμική μορφή ως εξής:

$$10 \log W = 10 \log \left( \frac{1}{2} |u|^2 \right) + 10 \log (\operatorname{Re}\{Z_r\}), \quad (6.7)$$

με την ισχύ σε αυτήν την περίπτωση να έχει μονάδες dBW (με  $W_{\text{ref}}$  ίσο με 1 Watt).

### 6.6.7 Κατασκευή ισοδύναμου ηλεκτρικού συστήματος



Σχήμα 6.14: Ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

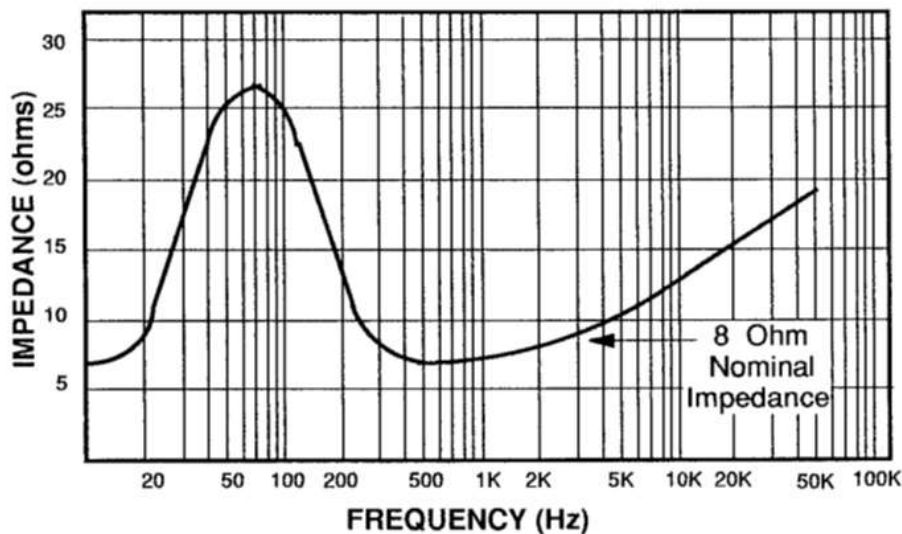
Αντίστοιχα με το ισοδύναμο μηχανικό σύστημα μπορούμε να κατασκευάσουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα και από εκεί να υπολογίσουμε ηλεκτρικά μεγέθη όπως ισχύ. Στο ηλεκτρικό σύστημα του Σχήματος 6.14 η μηχανική και ακουστική εμπέδηση  $Z_M$  και  $Z_r$  έχει περάσει μέσα στο ηλεκτρικό σύστημα σαν ηλεκτρική εμπέδηση μέσω του όρου  $\frac{B^2 l^2}{Z_M + Z_r}$ . Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρική εμπέδηση που βλέπει η πηγή τάσης λόγω του μηχανικού και ακουστικού συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη των  $Z_M$  και  $Z_r$ . Αυτό οφείλεται στην  $V_b$  που όπως είπαμε προηγουμένως δημιουργείται λόγω της κίνησης του διαφράγματος (και άρα του πηνίου) και η οποία αντιτίθεται στη δημιουργία του ρεύματος  $I$ . Όσο πιο μεγάλα είναι λοιπόν τα  $Z_M$  και  $Z_r$ , τόσο πιο μικρή η ταχύτητα του διαφράγματος  $u$  (και η  $V_b$ ) και άρα τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα  $I$  το οποίο αναπτύσσεται στο πηνίο. Από το ίδιο σχήμα μπορούμε να καταλάβουμε γιατί η  $Z_{eb}$  παίρνει το  $b$  στο όνομά της από τη λέξη blocked. Η  $Z_{eb}$  για να μετρηθεί

πρέπει να ακινητοποιηθεί το διάφραγμα (πχ. μπλοκάροντας με κάποιο τρόπο την κίνησή του). Σε αυτήν την περίπτωση, το  $Z_M$  τείνει στο άπειρο, και ο όρος  $\frac{B^2 l^2}{Z_M + Z_r}$  ουσιαστικά μηδενίζεται (γίνεται βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρικό ισοδύναμο). Έτσι, οποιαδήποτε μέτρηση ηλεκτρικής εμπέδησης γίνεται αφορά μόνο την  $Z_{eb}$ . Από το ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα φαίνεται καθαρά ότι η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση θα ισούται με

$$Z_{o\lambda} = Z_{eb} + \frac{B^2 l^2}{Z_M + Z_r}. \quad (6.8)$$

Από το ηλεκτρικό ισοδύναμο βλέπουμε ότι η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση που βλέπει ο ενισχυτής δεν εξαρτάται μόνο από παθητικά ηλεκτρικά στοιχεία (όπως η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του πηνίου) αλλά και από μηχανικά και ακουστικά μεγέθη

Ένα τυπικό διάγραμμα που απεικονίζει το μέτρο της ηλεκτρικής εμπέδησης  $Z_{o\lambda}$  συναρτήσει της συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Από αυτό παρατηρούμε ότι η σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» ο ενισχυτής κορυφώνεται στα 70 περίπου Hz και μετά ελαττώνεται μέχρι τα 8 Ohm που ουσιαστικά είναι και η πιο συνηθισμένη ονομαστική τιμή για τα ηχεία. Σε τι οφείλεται όμως αυτή η αύξηση? Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα 70 Hz αντιστοιχούν στη συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου. Στη συχνότητα συντονισμού, η ταχύτητα του διαφράγματος είναι μέγιστη, οπότε και η  $V_b$  μεγιστοποιείται. Επειδή είπαμε ότι η  $V_b$  αντιτίθεται στη δημιουργία ρεύματος, ο ενισχυτής αυτό το βλέπει ως αύξηση της σύνθετης αντίστασης. Ένας άλλος τρόπος να εξηγηθεί η κορύφωση αυτή είναι μέσω της σχέσης (6.6). Στη συχνότητα συντονισμού τα φανταστικό μέρη στον παρανομαστή  $Z_M + Z_r$  ισούνται με μηδέν, οπότε και το μέτρο του παρανομαστή ( $|Z_M + Z_r|$ ) γίνεται ελάχιστο.



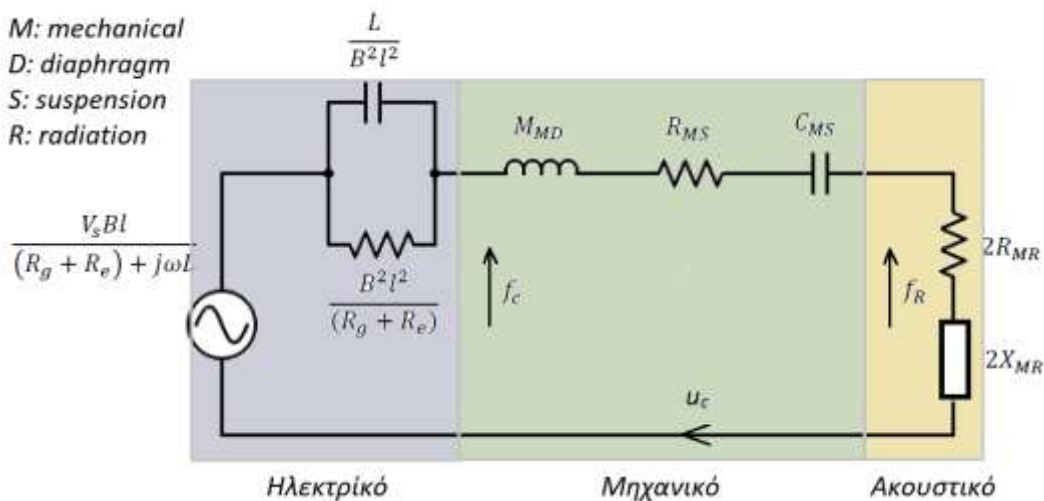
Σχήμα 6.15: Τυπική διακύμανση του μέτρου της ηλεκτρικής εμπέδησης συναρτήσει της συχνότητας που «βλέπει» ο ενισχυτής σε ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο.

Από το ίδιο διάγραμμα μπορεί να παρατηρήσει κανείς από το 1 kHz και μετά μία αυξητική τάση για την συνολική εμπέδηση με τη συχνότητα. Αυτό οφείλεται καθαρά στην  $Z_{eb}$  η οποία εκτός από ωμικές αντιστάσεις εμπεριέχει και επαγωγική αντίσταση λόγω του πηνίου φωνής του

ηχείου. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης στις υψηλές συχνότητες γίνεται ευθέως ανάλογο του  $\omega L$ , όπου  $L$  είναι η τιμή αυτεπαγωγής του πηνίου.

## 6.7 ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ ΣΕ ΑΠΕΙΡΩΣ ΕΚΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΠΑΦΛΑ

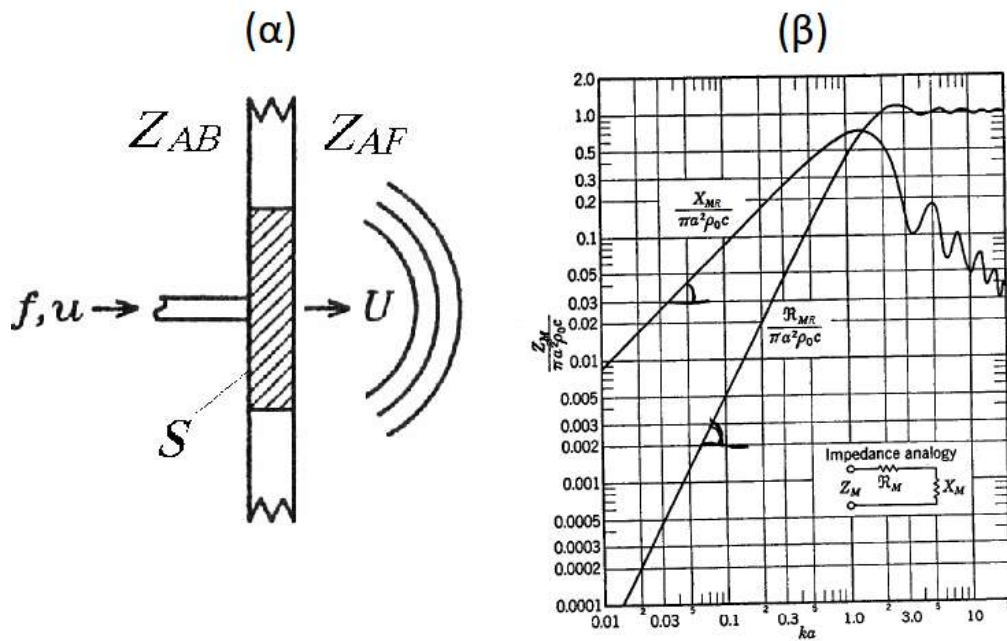
Ήρθε η ώρα να δούμε πιο αναλυτικά το συνολικό κύκλωμα ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, από την πλευρά του μηχανικού ισοδύναμου του Σχήματος 6.13. Αυτό θα το δούμε για τον πιο απλό τρόπο κατασκευής που είναι το μεγάφωνο τοποθετημένο σε απείρως εκτεινόμενη μπάφλα. Όταν κατασκευάζουμε ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο πρέπει να βρούμε ένα τρόπο για να διαχωρίζουμε την ακτινοβολία του μπροστινού μέρους του διαφράγματος από αυτή από του πίσω μέρους. Αυτό είναι απαραίτητο διότι σε αντίθετη περίπτωση, η ακτινοβολία του πίσω μέρους θα συμβάλει αρνητικά με αυτή του μπροστινού, με αποτέλεσμα να μειωθεί η ακουστική ακτινοβολία και κατά συνέπεια ο βαθμός απόδοσης του μεγαφώνου. Η πιο απλή υπόθεση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι το μεγάφωνο τοποθετείται σε μία απείρως εκτεινόμενη ανακλαστική επιφάνεια (infinite baffle), σύμφωνα με το Σχήμα 6.17(α). Σε μια τέτοια περίπτωση, η ακουστική εμπέδηση που βλέπει το μπροστινό μέρος του διαφράγματος  $Z_{AF}$  είναι ίση με αυτή που βλέπει το πίσω μέρος του διαφράγματος  $Z_{AB}$ , αφού οι συνθήκες που επικρατούνε μπρος και πίσω θεωρούμε ότι είναι ταυτόσημες. Συνέπεια αυτής της θεώρησης είναι φυσικά ότι ό,τι ηχητική ακτινοβολία έχουμε δεξιά από την ανακλαστική επιφάνεια θα έχουμε και αριστερά. Βέβαια, μόνο μια πλευρά της ηχητικής ακτινοβολίας αξιοποιείται στην πράξη (στο σχήμα αυτή είναι η δεξιά πλευρά). Το πραγματικό και φανταστικό μέρος της  $Z_{AF}$  και  $Z_{AB}$  είναι προφανώς ίσα, οπότε το ίδιο ισχύει και για τους όρους  $S^2 Z_{AF}$  και  $S^2 Z_{AB}$  τα οποία συμβολίζουν τώρα μηχανικές εμπεδήσεις, αφού τα βλέπουμε από την σκοπιά του μηχανικού ισοδύναμου (είναι πολλαπλασιασμένα με το συντελεστή μετασχηματισμού  $S^2$  όπου  $S$  είναι ουσιαστικά η επιφάνεια του διαφράγματος). Λόγω λοιπόν αυτής της ισότητας, το συνολικό πραγματικό και φανταστικό μέρος της μηχανικής εμπεδήσης ακτινοβολίας θα είναι  $2R_{MR} = \text{Re}\{S^2 Z_{AF} + S^2 Z_{AB}\}$  και  $2X_{MR} = \text{Im}\{S^2 Z_{AF} + S^2 Z_{AB}\}$  αντίστοιχα, όπου  $\text{Re}\{\}$  και  $\text{Im}\{\}$  είναι αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος ενός μιγαδικού αριθμού.



Σχήμα 6.16: Μηχανικό ισοδύναμο ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου σε απείρως εκτεινόμενη μπάφλα.

Τα φυσικά μεγέθη που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.16 εξηγούνται παρακάτω:

- $V_s$ : Τάση στην έξοδο του ενισχυτή ( Volt)
- $R_g$ : Ηλεκτρική αντίσταση εξόδου ενισχυτή (Ohm)
- $L$ : Αυτεπαγωγή του πηνίου φωνής (Henry)
- $R_E$ : Ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου φωνής (Ohm)
- $B$ : Πυκνότητα μαγνητικής ροής (Tesla ή Weber/m<sup>2</sup>)
- $l$ : Μήκος του μηνίου (m)
- $M_{MD}$ : μάζα του διαφράγματος και του πηνίου (kgf)
- $C_{MS}$ : Ελαστικότητα της ανάρτησης (m/N)
- $R_{MS}$ : Μηχανική αντίσταση της ανάρτησης (Mechanical Ohms)
- $2R_{MR}$  και  $2X_{MR}$ : πραγματικό και φανταστικό μέρος της μηχανική εμπέδησης λόγω ακουστικής ακτινοβολίας (Mechanical Ohms)
- $u_c$  (ή απλά  $u$ ): ταχύτητα διαφράγματος (m/s)
- $f_c$  και  $f_R$ : δύναμη που ασκείται πάνω στο διάφραγμα συνολικά και λόγω της εμπέδησης ακτινοβολίας αντίστοιχα



Σχήμα 6.17: Διάφραγμα σε απείρωσ εκτεινόμενη μπάφλα στο (α) και διακύμανση της εμπέδησης λόγω ακτινοβολίας για ένα τέτοιο μεγάφωνο με ακτίνα διαφράγματος  $a$  στο (β).

### 6.7.1 Εμπέδηση ακτινοβολίας

Το επόμενο βήμα για να έχουμε μια ολοκληρωμένη ανάλυση του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου είναι να δούμε τις τιμές που παίρνουν οι εμπειρήσεις λόγω ακτινοβολίας  $R_{MR}$  και  $X_{MR}$ . Ένα χαρακτηριστικό της αντίστασης ακτινοβολίας είναι ότι δεν έχει σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται με τη συχνότητα (το ίδιο ισχύει και για την αντίδραση ακτινοβολίας  $X_{MR}$  αλλά αυτό δεν είναι παράξενο καθώς εν γένει οι αντιδράσεις είναι εξαρτώνται από τον όρο  $\omega$ ). Η μεταβολή του  $R_{MR}$  και  $X_{MR}$  φαίνεται συναρτήσει της συχνότητας στο διάγραμμα 6.16(β).

Ο κατακόρυφος άξονας είναι λογαριθμικός και κανονικοποιημένος ως προς την ποσότητα  $\pi a^2 \rho c$ , όπου  $a$  είναι η ακτίνα του διαφράγματος,  $\rho$  η πυκνότητα και  $c$  η ταχύτητα του αέρα. Από την άλλη, ο οριζόντιος άξονας είναι λογαριθμικός και κανονικοποιημένος ως προς το γινόμενο  $ka$  όπου  $a$  η ακτίνα του διαφράγματος (το οποίο θεωρείται ότι είναι ένας κυκλικός δίσκος) και  $k=\omega/c$  ο κυματάριθμος. Αυτό σημαίνει λοιπόν ότι οι τιμές που παίρνει η ακουστική εμπέδηση δεν εξαρτώνται μόνο από τη συχνότητα, αλλά από τη σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και των διαστάσεων του διαφράγματος. Αυτό σημαίνει ότι ένα διάφραγμα με διάμετρο 15 cm θα βλέπει την ίδια ακουστική εμπέδηση στα 400 Hz με αυτή που ένα διάφραγμα με διάμετρο 60 cm βλέπει στα 100 Hz. Επειδή  $k=2\pi/\lambda$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος, το γινόμενο  $ka$  ισούται με  $\pi/\lambda$  όπου  $\pi$  η περίμετρος του διαφράγματος.

**Παράδειγμα:** Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 6.16(β), ποια είναι η τιμή της μηχανικής εμπέδησης λόγω ακτινοβολίας του διαφράγματος στα 54.6 Hz αν η ακτίνα του διαφράγματος είναι  $a=10$  cm? (θεωρείστε  $c=343$  m/s και  $\rho=1.14$  kg/m<sup>3</sup>).

Απάντηση: Στα 54.6 Hz ισχύει  $k=2\pi f/c=1$  και άρα  $ka=0.1$ . Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι για  $ka=0.1$  παίρνουμε  $\frac{R_{MR}}{\pi a^2 \rho c} = 0.005$  και  $\frac{X_{MR}}{\pi a^2 \rho c} = 0.8$ . Επομένως,  $R_{MR}=0.005\pi a^2 \rho c=0.061$  mechanical ohms (ή απλά  $\Omega$ ) και  $X_{MR}=0.8\pi a^2 \rho c=9.8 \Omega$ . Η τιμή της μηχανικής εμπέδησης λόγω ακτινοβολίας θα ισούται με  $Z_i=R_{MR}+jX_{MR}=0.061+9.8j \Omega$ .

Όσον αφορά την αντίσταση ακτινοβολίας, δηλαδή το  $R_{MR}$ , μπορούμε να το προσεγγίζουμε αναλυτικά, χωρίς δηλαδή τη χρήση διαγράμματος. Παρατηρείστε ότι για τιμές το  $ka < 1$  το  $R_{MR}$  εμφανίζεται ως μία ευθεία γραμμή που έχει σταθερή κλίση. Στην ουσία, το  $R_{MR}$  σε αυτήν την περιοχή μεταβάλλεται με το τετράγωνο της συχνότητας και μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από τον τύπο

$$R_{MR}(\omega) = \frac{0.5\pi a^4 \omega^2 \rho}{c}, \quad (6.9)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα και  $c$  ταχύτητα του ήχου. Για τιμές του  $ka > 2$  βλέπουμε ότι η τιμή του  $R_{MR}$  σταθεροποιείται και κυμαίνεται με πολύ μικρές αυξομειώσεις γύρω από την τιμή  $\pi a^2 \rho c$ . Επομένως, για  $ka > 2$  θα ισχύει

$$R_{MR}(\omega) = \pi a^2 \rho c. \quad (6.10)$$

Όσον αφορά την μηχανική αντίδραση λόγω ακτινοβολίας, δηλαδή το  $X_{MR}$ , είναι ότι για  $ka < 0.5$  παρατηρούμε μια αύξηση ανάλογη με τη συχνότητα  $\omega$ . Σε αυτήν την περιοχή (δηλαδή  $ka < 0.5$ ) η αντίδραση ακτινοβολίας δημιουργείται λόγω της μάζας του αέρα. Το  $X_{MR}$  μπορεί να υπολογιστεί από την αναλυτική σχέση

$$X_{MR} = \omega M_{MR}, \text{ όπου } M_{MR} = 2.67a^3\rho. \quad (6.11)$$

Επειδή η ακουστική ισχύς που αποδίδει ένα μεγάφωνο εξαρτάται από την  $R_{MR}$  και όχι την  $X_{MR}$ , γίνεται κατανοητό σε αυτήν την Ενότητα ότι το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο είναι ένας κακός ακτινοβολητής ακουστικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες, και πιο συγκεκριμένα για συχνότητες όπου  $ka \ll 1$ . Αυτό εξηγείται από την απότομη πτώση της τιμής της  $R_{MR}$  με τη συχνότητα που φαίνεται τόσο από το Σχήμα 6.17(β) όσο και από τη σχέση (6.9). Γίνεται ταυτόχρονα κατανοητός ο λόγος για τον οποίο χρειαζόμαστε μεγάφωνα μεγάλων διαστάσεων (δηλαδή μεγάλης ακτίνας  $a$ ) για να έχουμε ικανοποιητικό αποτέλεσμα στη μπάσα περιοχή συχνοτήτων. Τα δύο παρακάτω παραδείγματα ενδυναμώνουν την κατανόηση αυτού του φαινομένου.

**Παράδειγμα:** Συγκρίνεται την ταχύτητα  $u$  και τη μέγιστη μετατόπιση  $x$  που πρέπει να εκτελεί το διάφραγμα ενός μεγαφώνου με ακτίνα  $\alpha_1 = 6$  cm σε σχέση με ένα μεγάφωνο ακτίνας διαφράγματος  $\alpha_2 = 12$  cm ώστε να ακτινοβολούν την ίδια ακουστική ισχύ στα 91 Hz.

Για  $\alpha_1 = 6$  cm = 0,06 m υπολογίζουμε  $ka_1 = 2\pi f \alpha_1 / c = 6.28 * 91 * 0.06 / 344 = 0.1$ . Για  $\alpha_2 = 12$  cm = 0.12 m προκύπτει  $ka_2 = 0.2$ . Από το Σχήμα 6.17(β) βλέπουμε ότι  $\frac{R_{MR1}}{\pi \alpha_1^2 \rho c} = 0.005$  και  $\frac{R_{MR2}}{\pi \alpha_2^2 \rho c} = 0.02$ . Διαιρώντας

κατά μέλη βλέπουμε ότι  $\frac{R_{MR1}}{R_{MR2}} = \frac{0,005\alpha_1^2}{0,02\alpha_2^2} = \frac{1}{16}$ . Παρατηρούμε ότι η αντίσταση ακτινοβολίας του μεγάλου διαφράγματος είναι 16 φορές μεγαλύτερη του μικρότερου! Για να ακτινοβολούν την ίδια ισχύ, από τη σχέση (6.6) βλέπουμε ότι θα πρέπει  $|u_1|^2 R_{MR1} = |u_2|^2 R_{MR2}$ , απ' όπου προκύπτει ότι θα πρέπει  $u_1 = 4u_2$ , δηλαδή η ταχύτητα στο μικρό διάφραγμα θα πρέπει να είναι τετραπλάσια αυτής στο μεγάλο. Η μετατόπιση σχετίζεται με την ταχύτητα μέσω της σχέσης  $u = j\omega x$ , οπότε καταλαβαίνουμε ότι αφού  $u_1 = 4u_2$  θα πρέπει και  $x_1 = 4x_2$ , δηλαδή και η μετατόπιση στο μικρό διάφραγμα ( $\alpha_1 = 6$  cm) θα πρέπει να είναι τετραπλάσια αυτής στο μεγάλο ( $\alpha_2 = 12$  cm) για να ακτινοβολείται η ίδια ισχύς στα 91 Hz.

### 6.7.2 Ταχύτητα διαφράγματος

Η ταχύτητα του διαφράγματος για το μεγάφωνο σε απείρως εκτεινόμενη μπάφλα μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μηχανικό ισοδύναμο του Σχήματος 6.16. Δίνεται στη Σχέση (6.12) μια μαθηματική διατύπωση για χαμηλές και μεσαίες συχνότητες η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι  $\omega^2 L^2 \ll (R_g + R_e)^2$ , και επομένως η επαγωγικές αντιστάσεις που εμφανίζονται στο διάγραμμα λόγω του  $L$  μπορούν να απαλείφουν.

$$u = \frac{V_s B l}{(R_g + R_e)(R_M + jX_M)}, \quad (6.12)$$

όπου

$$R_M = \frac{B^2 l^2}{R_g + R_e} + R_{MS} + 2R_{MR}, \quad (6.13)$$

είναι η συνολική (ηλεκτρική+μηχανική+ακουστική) αντίσταση στο κύκλωμα και

$$X_M = \omega M_{MD} + 2X_{MR} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \quad (6.14)$$

είναι η συνολική (ηλεκτρική+μηχανική+ακουστική) αντίδραση.

Για το μέτρο της ταχύτητας είναι προφανές ότι θα ισχύει

$$|u| = \frac{V_s B l}{(R_g + R_e) \sqrt{R_M^2 + X_M^2}}. \quad (6.15)$$

ενώ από την (6.13) μπορεί κανείς να εξάγει και ότι το τετράγωνο της ταχύτητας θα ισούται με

$$|u|^2 = \frac{V_s^2 B^2 l^2}{(R_g + R_e)^2 (R_M^2 + X_M^2)}. \quad (6.16)$$

### 6.7.3 Ακουστική ισχύς και βαθμός απόδοσης.

Έχοντας τώρα δεδομένη την ταχύτητα του διαφράγματος  $u_c$  αλλά και γνωρίζοντας τη μηχανική αντίσταση λόγω ακτινοβολίας  $R_{MR}$  από την ανάλυση στην Ενότητα 6.7.1, μπορούμε να υπολογίσουμε την ακουστική ισχύ ακτινοβολίας του μεγαφώνου για κάθε συχνότητα συναρτήσει και της ακτίνας του διαφράγματος  $a$ . Συγκεκριμένα, για μεγάφωνο σε απείρω εκτεινόμενη μπάφλα η ακουστική ισχύς έχει ήδη διατυπωθεί μέσω της Σχέσης (6.6) και επαναλαμβάνεται εδώ

$$W = \frac{1}{2} |u|^2 2R_{MR} = |u|^2 R_{MR} \quad (6.17)$$

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η σχέση αυτή εκφράζει την ακουστική ισχύ που ακτινοβολείται τόσο από το μπροστινό όσο και από το πισινό μέρος του διαφράγματος, και επομένως στην πράξη η ακουστική ισχύς που ακτινοβολείται στο ακροατήριο είναι η μισή ακριβώς, δηλαδή

$$W_{\text{ακροατήριο}} = \frac{1}{2} |u|^2 R_{MR}. \quad (6.18)$$

Αυτό που έχει επίσης ενδιαφέρον να υπολογίσουμε είναι ο βαθμός απόδοσης του μεγαφώνου, ο οποίος προσδιορίζει το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ακουστική. Η ηλεκτρική ισχύ που αποδίδει ο ενισχυτής μεγιστοποιείται όταν η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή (δηλαδή το  $R_g$ ) συμπίπτει με την αντίσταση φορτίου και στη συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι

$$W_e = \frac{V_s^2}{4R_g}. \quad (6.19)$$

Διαιρώντας την (6.17) με την (6.19) προκύπτει ο βαθμός απόδοσης. Ο συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού του βαθμού απόδοσης ονομάζεται Maximum Power Available Efficiency (PAE) και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$PAE = \frac{W}{W_e} \times 100 = \frac{800 B^2 l^2 R_g R_{MR}}{(R_g + R_e)^2 (R_M^2 + X_M^2)}. \quad (6.20)$$

Υπόψιν ότι στη Σχέση (6.20) δε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ ακτινοβολίας από το μπρος ή πίσω μέρος του μεγαφώνου οπότε στην πράξη ο βαθμός απόδοσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ο υποδιπλάσιος.

**Παράδειγμα:** Για ένα διάφραγμα ακτίνας 13 cm σε απείρω εκτεινόμενη μπάφλα, υπολογίστε το βαθμό απόδοσης του μεγαφώνου με τα χαρακτηριστικά που δίνονται παρακάτω, για τη

συχνότητα συντονισμού.  $R_g$ : 2 Ohms,  $L$ :  $7 \times 10^{-4}$  Henry,  $R_e$ : 8 Ohms,  $B$ : 1 Weber/m<sup>2</sup>,  $l$ : 9 m,  $M_{MD}$ : 0,011 kgr,  $C_{MS}$ :  $1.79 \times 10^{-4}$  m/N,  $R_{MS}$ : 0.5 mechanical Ohms,  $R_{MR}$ :  $1.53 \times 10^{-6} \omega^2$  (Mechanical Ohms),  $X_{MR} = \omega M_{MR}$  όπου  $M_{MR} = 0.00694$  kgr,  $\alpha$ : 0.13 m. Δίνεται επίσης η ταχύτητα του ήχου  $c = 344$  m/s και η πυκνότητα του αέρα  $\rho = 1.18$  kgr/m<sup>3</sup>.

Απάντηση: Η συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου είναι αυτή που μηδενίζει τη σχέση (6.14). Συγκεκριμένα, ψάχνουμε τιμή για την  $\omega_0$  τέτοια ώστε  $\omega_0(M_{MD} + 2M_{MR}) - \frac{1}{\omega_0 C_{MS}} = 0$ . Θα είναι

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(M_{MD} + 2M_{MR})C_{MS}}} = \frac{1}{\sqrt{0.025 * 1.79 * 10^{-4}}} = 473 \text{ rad/s}$$

και η συχνότητα συντονισμού θα είναι επομένως  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 75.3$  Hz. Για  $\omega = \omega_0$  παρατηρώ ότι  $k\alpha = 0.36 < 1$  οπότε με βάση τη Σχέση (6.9) μπορώ να υπολογίσω ότι  $R_{MR} = \frac{0.5\pi\alpha^4\omega^2\rho}{c} = 0.345$  mechanical Ohms. Μπορούμε επίσης με απλή αντικατάσταση στη Σχέση (6.13) να υπολογίσουμε τη συνολική μηχανική αντίσταση

$$R_M = \frac{1^2 9^2}{8+2} + 0.5 + 2 \cdot 0.345 = 8.79 \text{ Ohms.}$$

Ο βαθμός απόδοσης μπορεί τώρα να υπολογιστεί μέσω της σχέσης (6.20) με απλή αντικατάσταση των τιμών:

$$PAE = \frac{8001^2 9^2 2 \cdot 0.345}{10^2 \cdot 8.79^2} = 5.8\%.$$

Ακόμα δηλαδή και στη συχνότητα συντονισμού όπου η ταχύτητα του διαφράγματος είναι μέγιστη, ο βαθμός απόδοσης είναι μόλις 5.8%. Σημειώνεται επίσης ότι αν υποθέσουμε ότι η ακουστική ισχύς που ακτινοβολείται από το πίσω μέρος του μεγαφώνου δεν αξιοποιείται, τότε ο βαθμός απόδοσης είναι ο μισός, δηλαδή 2.9%. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές του βαθμού απόδοσης ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου απευθείας ακτινοβολίας. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται σημαντικά στα ηχεία τύπου χοάνης, τα οποία όμως δεν θα μελετηθούν στην παρούσα ενότητα.

**Άσκηση:** Για συχνότητες αρκετά πάνω από τη συχνότητα συντονισμού ο βαθμός απόδοσης ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου σε απείρως εκτεινόμενη ανακλαστική επιφάνεια μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση

$$n = \frac{B^2 l^2 R_{MR}}{(R_g + R_e) |Z_M|^2}$$

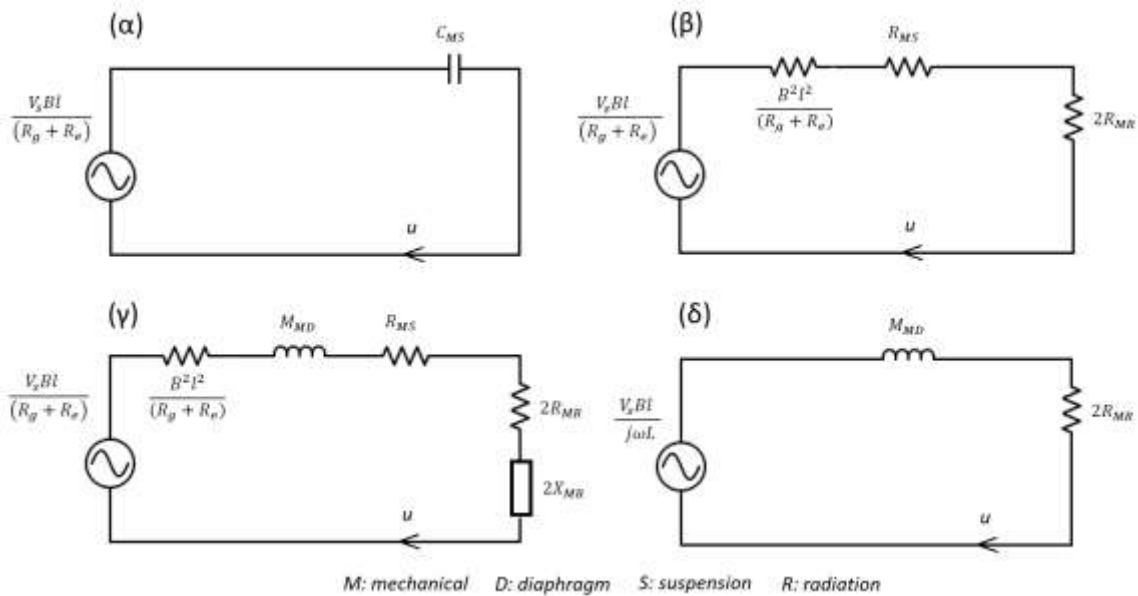
όπου  $R_{MR}$  η μηχανική αντίσταση λόγω ακτινοβολίας του μεγαφώνου η οποία δίνεται από τη σχέση  $R_{MR} = \frac{\rho}{2c} \pi \alpha^4 \omega^2$ , για  $k\alpha \ll 1$  και από τη σχέση  $R_{MR} = \rho c \pi \alpha^2$  για  $k\alpha > 2$ , όπου  $\alpha$  η ακτίνα του διαφράγματος. Θεωρώντας ότι η μηχανική εμπέδηση  $Z_M$  εξαρτάται κυρίως από τη μάζα του διαφράγματος και του πηνίου,

1) δείξτε ότι για  $k\alpha \ll 1$ , ο βαθμός απόδοσης του μεγαφώνου δεν μεταβάλλεται με τη συχνότητα.

2) Περιγράψτε τον τρόπο που ο βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται με τη συχνότητα για την περίπτωση  $ka > 2$  και σχολιάστε τον παράγοντα κλίσης.

#### 6.7.4 Απόκριση συχνότητας

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να προσδιορίσουμε τη συχνотική απόκριση του μεγαφώνου που μελετάμε μέσα από ένα διάγραμμα ισχύος-συχνότητας. Η ανάλυση που ακολουθεί είναι ποιοτική και όχι ποσοτική, που σημαίνει ότι δεν έχουμε ως στόχο να προσδιορίσουμε ακριβώς την ισχύ σε κάθε συχνότητα, αλλά να προσδιορίσουμε την κλίση των καμπυλών, στις διάφορες συχνотικές ζώνες όπου αναλύεται η συχνотική συμπεριφορά.



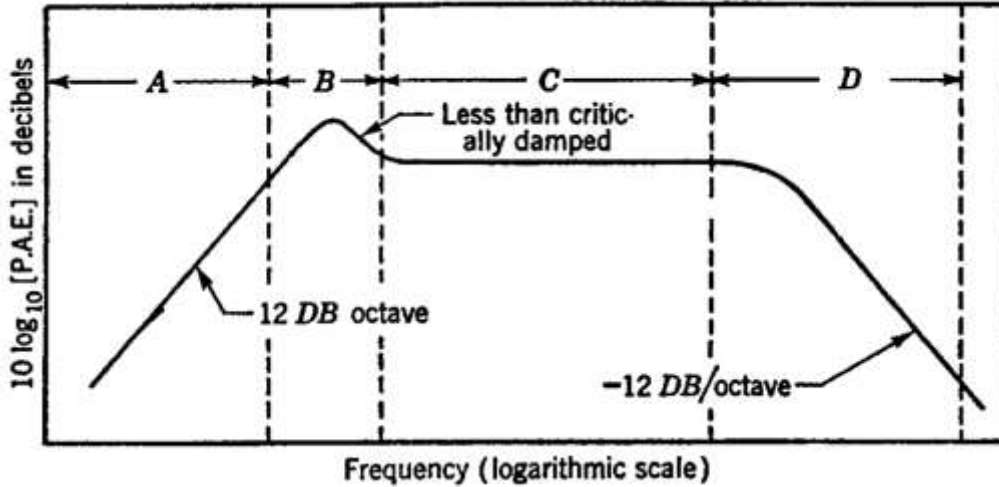
Σχήμα 6.18: Ισοδύναμο μηχανικό σύστημα στις (α) χαμηλές συχνότητες, (β) στη συχνότητα συντονισμού, (γ) στις συχνότητες πάνω από τη συχνότητα συντονισμού και (δ) στις υψηλές συχνότητες.

**Χαμηλές συχνότητες:** Στις χαμηλές συχνότητες είναι γνωστό ότι οι χωρητικές αντιστάσεις παίρνουν τη μέγιστη τιμή και στην περίπτωση του μεγαφώνου που μελετάμε, υπερσχύουν έναντι άλλων αντιστάσεων επαγωγικών ή ωμικών. Θα ισχύει επίσης  $ka < 1$  και  $\omega^2 L^2 \ll (R_g + R_e)^2$  γεγονός που μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε την πηγή δύναμης από τη σχέση

$$F = \frac{V_s Bl}{(R_g + R_e)} \text{ αντί της αρχικής } F = \frac{V_s Bl}{(R_g + R_e) + j\omega L}.$$

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πηγή δύναμης είναι σταθερή και δε μεταβάλλεται με τη συχνότητα. Το μηχανικό ισοδύναμο φαίνεται από το Σχήμα 6.18 (α). Παρατηρούμε ότι το στοιχείο που πρακτικά καθορίζει τη συμπεριφορά στο κύκλωμα είναι η μηχανική αντίδραση λόγω ακαμψίας των αναρτήσεων που έχουμε στο μεγαφώνο. Για τη μηχανική ακαμψία γνωρίζουμε ότι  $Z_M = 1/j\omega C_{MS}$ , γεγονός που σημαίνει ότι θα ισχύει  $u = \frac{F}{Z_M} = -jF\omega C_{MS}$  και επομένως η ταχύτητα στο κύκλωμα είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας ( $u \propto \omega$ ). Στην ίδια συχνотική περιοχή γνωρίζουμε επίσης από την ανάλυση στην Ενότητα 6.7.1 ότι η αντίσταση ακτινοβολίας είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας

( $R_{MR} \propto \omega^2$ ). Από τη Σχέση (6.17) βλέπουμε τώρα ότι η ακουστική ισχύς είναι το γινόμενο του τετραγώνου της ταχύτητας επί της αντίστασης ακτινοβολίας. Συνολικά δηλαδή, η ισχύς θα είναι ανάλογη του  $\omega$  εις την τέταρτη δύναμη, δηλαδή  $W \propto \omega^4$ . Από την ανάλυση στην Ενότητα 4.1.1 συμπεραίνουμε ότι στις χαμηλές συχνότητες, αν απεικονίσουμε την ισχύ και τη συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα, θα έχουμε μία κλίση 12 dB/octave. Αυτό το κομμάτι της συχνοτικής απόκρισης απεικονίζεται την περιοχή A του Σχήματος 6.19.



Σχήμα 6.19: Συχνοτική απόκριση του μεγαφώνου (A) στις χαμηλές συχνότητες, (B) στη συχνότητα συντονισμού, (C) στις συχνότητες πάνω από τη συχνότητα συντονισμού και (D) στις υψηλές συχνότητες.

**Συχνότητα συντονισμού:** Στη συχνότητα συντονισμού όπως είναι γνωστό οι μηχανική αντίδραση είναι ίση με 0 και η ταχύτητα του διαφράγματος εξαρτάται μόνο από τις μηχανικές αντιστάσεις. Το μηχανικό ισοδύναμο φαίνεται στο Σχήμα 6.18(β). Επίσης, η ταχύτητα συντονισμού αναμένεται ότι παίρνει τη μέγιστη τιμή. Η συχνοτική ζώνη που παρατηρείται αυτή τη συμπεριφορά είναι σχετικά στενή και απεικονίζεται στην περιοχή B του Σχήματος 6.19.

**Συχνότητες πάνω από τη συχνότητα συντονισμού:** Εδώ τώρα θεωρούμε ότι είμαστε σε μια συχνοτική ζώνη όπου εξακολουθεί να ισχύει  $ka < 1$  και  $\omega^2 L^2 \ll (R_g + R_e)^2$ . Τώρα όμως, αφού είμαστε πάνω από τη συχνότητα συντονισμού, κυρίαρχο ρόλο παύουν να παίζουν οι ελαστικές δυνάμεις και κυριαρχούν οι δυνάμεις λόγω αδράνειας της μάζας. Το μηχανικό ισοδύναμο φαίνεται στο Σχήμα 6.18(γ) όπου βλέπουμε ότι εκτός από τη μάζα του διαφράγματος και του πηνίου  $M_{MD}$ , λαμβάνεται υπόψιν και η αντίδραση λόγω ακτινοβολίας  $X_{MR}$ . Λόγω του ότι  $\omega^2 L^2 \ll (R_g + R_e)^2$ , η πηγή δύναμης παραμένει αμετάβλητη με τη συχνότητα και αφού κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας, καταλαβαίνουμε ότι η ταχύτητα  $u$  θα είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας  $\omega$ , δηλαδή  $u \propto \frac{1}{\omega}$ . Ωστόσο, επειδή είμαστε ακόμα σε μια συχνοτική ζώνη όπου  $ka < 1$ , για την αντίσταση ακτινοβολίας εξακολουθεί να ισχύει  $R_{MR} \propto \omega^2$ . Εν τέλει, λόγω και της Εξίσωσης (6.17) γίνεται κατανοητό ότι  $W \propto \frac{1}{\omega^2} \omega^2 = 1$ , δηλαδή η ισχύς δεν εξαρτάται από τη συχνότητα! Πρόκειται λοιπόν για μία συχνοτική ζώνη όπου η ισχύς είναι σταθερή και δε μεταβάλλεται με τη συχνότητα, και απεικονίζεται από τη ζώνη C στο Σχήμα 6.19. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε μία επίπεδη απόκριση συχνότητας και είναι ως ένα βαθμό επιθυμητό.

**Υψηλές συχνότητες:** Εδώ τώρα θεωρούμε ότι είμαστε σε μια συχνοτική ζώνη όπου ισχύει  $ka > 2$  και  $\omega^2 L^2 \gg (R_g + R_e)^2$ . Η δύναμη που ασκείται στο διάφραγμα προσεγγίζεται τώρα από τον τύπο  $F = \frac{V_s B l}{j \omega L}$ , βλέπουμε επομένως ότι το μέτρο της είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας.

Όπως και στην προηγούμενη συχνοτική ζώνη, στο μηχανικό ισοδύναμο κυριαρχούν οι αντιδράσεις λόγω αδράνειας της μάζας (βλ. Σχήμα 6.18(δ)). Λόγω λοιπόν της  $F$  αλλά και του ότι στη μηχανική εμπέδηση  $Z_M$  κυριαρχεί ο όρος  $j \omega M_{MD}$ , καταλαβαίνουμε από τη σχέση  $u = \frac{F}{Z_M}$  ότι η ταχύτητα του διαφράγματος  $u$  θα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας, δηλαδή  $u \propto \frac{1}{\omega^2}$ . Από την άλλη, επειδή  $ka > 2$  ξέρουμε από την ανάλυση στην ενότητα 6.7.1 ότι η αντίσταση λόγω ακτινοβολίας είναι σταθερή και αμετάβλητη με τη συχνότητα. Εν τέλει, αφού  $W \propto u^2$ , το  $W$  θα είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετάρτης δύναμης του  $\omega$  δηλαδή  $W \propto \frac{1}{\omega^4}$ . Λόγω του ότι το διάγραμμα ισχύος συχνότητας του Σχηματος 6.19 οι άξονες είναι λογαριθμικοί, αυτό οδηγεί σε μία κλίση ίση με  $-12\text{dB/octave}$ .

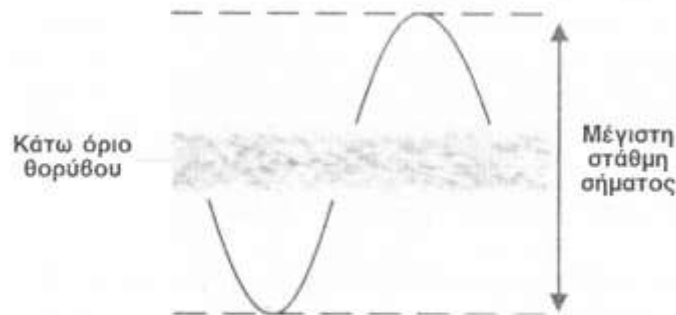
Αν και η ανάλυση αυτή έγινε θεωρώντας διάφραγμα σε απείρως εκτεινόμενη επίπεδη μπάφλα, είναι ενδεικτική της απόκρισης συχνότητας (και των λόγων που οδηγούν σε αυτή) για οποιοδήποτε ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο. Επεξηγεί το λόγο που είναι πρακτικά αδύνατο ένα μόνο ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο να μπορεί να αναπαράγει τις συχνότητες αποτελεσματικά σε όλο το ακουστό συχνοτικό εύρος. Αναδεικνύει ότι ένα μεγάφωνο με μεγάλο διάφραγμα (και ακτίνα διαφράγματος  $a$ ) και χαμηλή συχνότητα συντονισμού θα πλεονεκτεί στις χαμηλές συχνότητες αλλά θα φτάνει σχετικά σύντομα σε κάποιο άνω συχνοτικό όριο όπου θα αρχίζει η περιοχή D στο Σχήμα 6.19. Από την άλλη, ένα μεγάφωνο με μικρό διάφραγμα (και άρα μάζα  $M_{MD}$ ) θα είναι πιο αποδοτικό στις υψηλές συχνότητες αλλά θα μειονεκτεί στις χαμηλές συχνότητες. Εν τέλει, γίνεται κατανοητός ο λόγος που έχουν καθιερωθεί τα ηχεία πολλών δρόμων και ο φοιτητής παραπέμπεται στην Ενότητα 2.3 για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτού του τύπου τα ηχεία και τον τρόπο που πολλές μονάδες συνδυάζονται με τη χρήση διαχωριστών συχνοτήτων (crossovers).

## 7 ΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ ΗΧΟΥ

### 7.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

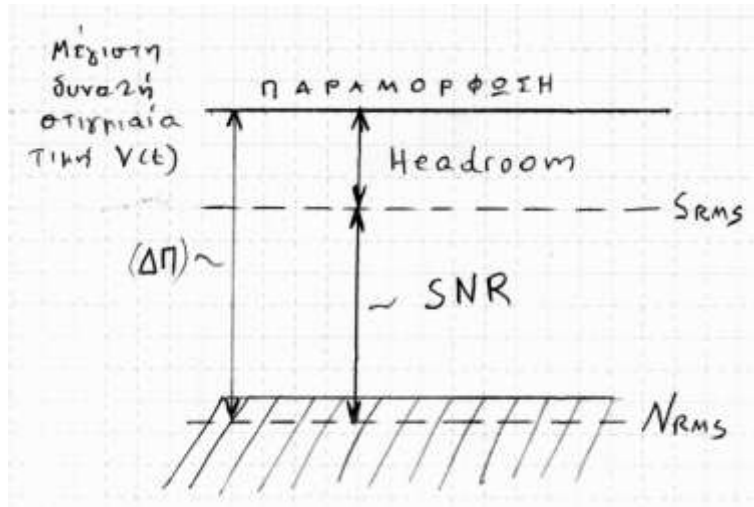
Η δυναμική περιοχή είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ηχητικού συστήματος και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την πιστότητα τόσο στην αναπαραγωγή όσο και στην ηχογράφηση του ήχου. Υπό μία έννοια, δυναμική περιοχή είναι η διαφορά, σε dB, μεταξύ των πιο δυνατών και πιο ήσυχων περασμάτων του προγράμματος που μπορούν να αποδοθούν με ευκρίνεια από το ηχοσύστημα. Εκφράζει τη μέγιστη διαφορά σε ακουστές στάθμες του προγράμματος. Η δυναμική περιοχή πολλές φορές λανθασμένα ταυτίζεται με την μέγιστη ηχητική στάθμη ή τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ του συστήματος. Θα πρέπει να κατανοήσει ο αναγνώστης ότι αυξάνοντας το volume του ενισχυτή στο hifi ή στον υπολογιστή δεν αυξάνουμε και τη δυναμική περιοχή, όπως αυτή ορίζεται με βάση ηλεκτρικά μεγέθη για το ηχητικό μας σύστημά. Αντίθετα, η δυναμική περιοχή θεωρητικά παραμένει σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνοντας το volume αυξάνουμε στον ίδιο βαθμό και τη στάθμη του θορύβου που είτε υπερτίθενται στο σήμα από τα κυκλώματα του εν χρήσει ηχητικού συστήματος, είτε προϋπάρχει στο σήμα λόγω της περιορισμένης δυναμικής περιοχής του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την ηχογράφηση του ηχητικού υλικού.

Κατ' ουσία, η δυναμική περιοχή εκφράζει την απόσταση ανάμεσα σε δύο απόλυτες στάθμες που ορίζονται σε κάθε ηλεκτρονικό σύστημα: τη μέγιστη απόλυτη στάθμη του συστήματος και το κάτω όριο θορύβου. Και τα δύο φαίνονται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Μέγιστη στάθμη σήματος και κάτω όριο θορύβου

Είναι φανερό ότι ένα σήμα πολύ μικρής στάθμης κινδυνεύει να 'πνιγεί' μέσα στο θόρυβο, ενώ από την άλλη, ένα σήμα πολύ μεγάλης στάθμης κινδυνεύει να παραμορφώσει (ψαλιδιστεί). Για να μεταδοθεί επομένως με ευκρίνεια μία ηχητική πληροφορία, θα πρέπει να κινείται μεταξύ της 'Σκύλας' του θορύβου και της 'Χάρυβδης' της παραμόρφωσης.



Σχήμα 7.2: Δυναμική περιοχή και headroom σε ένα αναλογικό ηχητικό σύστημα

Ποιες όμως είναι οι αιτίες του θορύβου σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα; Σε ένα αναλογικό ηχοσύστημα, ο θόρυβος προέρχεται κυρίως από παρεμβολές που δημιουργούνται από τα ενεργά στοιχεία του κυκλώματος, όπως οι τελεστικοί ενισχυτές και τα τρανζίστορ, τα οποία τροφοδοτούνται με τάσεις πολλές φορές άνω των 20 V. Ακόμα όμως και σε ένα παθητικό σύστημα, όπως το δυναμικό μικρόφωνο, ο ηλεκτρονικός θόρυβος είναι παρών και οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων στην αντίσταση του πηνίου (θερμικός θόρυβος). Δεν υπάρχει επομένως απόλυτη ησυχία ούτε στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Ο κλασικός συμβολισμός για την επεξήγηση της δυναμικής περιοχής φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Η δυναμική περιοχή τυπικά εκτείνεται από τη μέση τετραγωνική τιμή του θορύβου μέχρι την μέγιστη απόλυτη στάθμη. Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι ένας τέτοιος ορισμός της δυναμικής περιοχής, αν και έχει σημασία για τεχνικούς σκοπούς, δεν αντιπροσωπεύει τη υποκειμενικά αισθητή δυναμική περιοχή, όπως αυτή ορίζεται για το ανθρώπινο αισθητήριο όργανο της ακοής. Συγκεκριμένα, όταν ακούμε, η ένταση ενός ήχου δεν εξαρτάται τόσο από τις μέγιστες στιγμιαίες τιμές της ηχητικής πίεσης, αλλά από τη μέση τετραγωνική της τιμή. Η μέση τετραγωνική τιμή της πίεσης είναι βέβαια ανάλογη της αντίστοιχης τιμής της τάσης με την οποία αναπαρίσταται το ηχητικό σήμα. Είναι αξιοσημείωτο ότι το σύστημα ακοής του ανθρώπου, σε αναλογία με τη Σχέση (1.7) και (1.8) εκτελεί κάτι σαν ολοκλήρωση κατά την επεξεργασία του ακουστικού σήματος. Είναι λοιπόν φανερό ότι αν θέλουμε ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος για τη δυναμική περιοχή ενός ηχοσυστήματος θα πρέπει να συγκρίνουμε ενέργειες (μέσες τετραγωνικές τιμές του σήματος) και όχι στιγμιαίες απόλυτες στάθμες. Για αυτό το λόγο, ορίζεται η σχέση σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio, SNR)

$$SNR = 20 \log \frac{S_{RMS}}{N_{RMS}}, \quad (7.1)$$

όπου  $S_{RMS}$  και  $N_{RMS}$  είναι η μέση τετραγωνική τιμή του σήματος εισόδου και του θορύβου αντίστοιχα. Αυτή η σχέση δίνει τιμές σε dB μικρότερες από αυτές της δυναμικής περιοχής (βλ. πχ. Σχήμα 7.2), γεγονός που οφείλεται στο ότι η μέση τετραγωνική τιμή ενός σήματος είναι πάντα μικρότερη από την μέγιστη απόλυτη τιμή του σήματος  $s(t)$ , κάτι που μαθηματικά μπορούμε να το διατυπώσουμε ως

$$S_{RMS} < \max\{|s(t)|\} . \quad (7.2)$$

Για παράδειγμα, για ένα ημιτονικό σήμα  $s(t)=V_0\sin\omega t$ , όπου  $V_0$  είναι το πλάτος, η μέση τετραγωνική τιμή σχετίζεται με το πλάτος μέσω της σχέσης

$$S_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{\sqrt{2}}, \quad (7.3)$$

κάτι που φαίνεται και από το Σχήμα 1.1.

Ένα μέγεθος που έχει σημασία είναι ο λόγος της μέγιστης στιγμιαίας τιμής προς τη μέση τετραγωνική τιμή του σήματος

$$\frac{\max\{|s(t)|\}}{S_{RMS}}. \quad (7.4)$$

Ο λόγος αυτός εκφράζει ένα μέγεθος το οποίο σχετίζεται με τη μεταβλητότητα του σήματος, το πόσο δηλαδή μεγαλύτερες είναι οι μέγιστες στιγμιαίες τιμές του πλάτους από τη μέση τετραγωνική του τιμή. Η αναμενόμενη τιμή του συγκεκριμένου λόγου για ηχητικά σήματα ομιλίας είναι γύρω στο 8:1 ενώ για κλασσική μουσική γύρω στο 30:1. Φαίνεται λοιπόν ότι η διαφορά στη στατιστική μεταξύ των ηχητικών σημάτων αντανακλάται σε διαφορετική σχέση μεταξύ δυναμικής περιοχής και μέσης τετραγωνικής τιμής. Για παράδειγμα, η παραδοχή για σήμα ομιλίας μας υπαγορεύει ότι η δυναμική περιοχή του συστήματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε  $(\Delta\text{Π})=8S_{RMS}$  ενώ για σήμα κλασσικής μουσικής θα πρέπει  $(\Delta\text{Π})=30S_{RMS}$  κοκ, όπου με  $S_{RMS}$  εννοούμε τη μέση τετραγωνική τιμή του σήματος στα πιο δυνατά περάσματα του προγράμματος. Η διαφοροποίηση αυτή μας αναγκάζει να θεωρήσουμε ένα μέγεθος το οποίο το ονομάζουμε headroom του οποίου η τιμή σε dB είναι τέτοια ώστε  $(\Delta\text{Π})=\text{SNR}+\text{Headroom}$  (βλ. Σχήμα 7.2.)

Αν λοιπόν ξέρουμε τη φύση του σήματος εισόδου, το headroom είναι ένα μέγεθος που μπορούμε να το ορίζουμε εμείς ώστε να ικανοποιείται η σχέση

$$\text{Headroom} = 20\log\left(\frac{\max\{|s(t)|\}}{S_{RMS}}\right). \quad (7.5)$$

Ο διαχωρισμός της μέγιστης απόλυτης στιγμιαίας τιμής από τη μέση τετραγωνική τιμή του σήματος διαφαίνεται και στα χαρακτηριστικά των επαγγελματικών ηχητικών συστημάτων τα οποία ορίζουν το μέγιστο πλάτος τάσης του συστήματος (peak level) και τη νόμιμη στάθμη λειτουργίας (nominal level, RMS level). Η νόμιμη στάθμη λειτουργίας στις περισσότερες κονσόλες είναι +4dBu και η συνήθης τιμή του headroom είναι της τάξης των 20dB. Αυτό το headroom επιτρέπει στα μέγιστα στιγμιαία πλάτη του σήματος να αγγίζουν τα 24 dBu, διατηρώντας έτσι ένα λόγο 10:1 σε σχέση με τη μέση τετραγωνική τιμή, κάτι που είναι απαραίτητο για μουσικά σήματα..

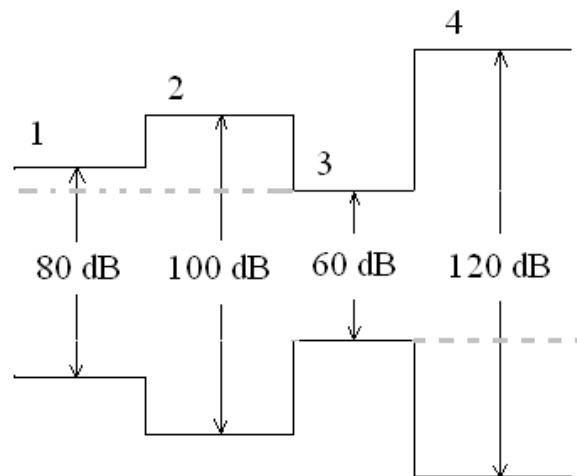
**Παράδειγμα:** Ένα αναλογικό σύστημα ήχου λειτουργεί σε στάθμες  $\pm 5$  Volt. Ποια η νόμιμη στάθμη λειτουργίας σε Volt δεδομένου ότι έχουμε ορίσει headroom 20dB;

**Απάντηση:** Καταρχάς, παρατηρούμε ότι αφού το σήμα μας κινείται μεταξύ  $\pm 5$  Volt, το πλάτος θα είναι ίσο με 5Volt. Από τη σχέση (7.5) βλέπουμε ότι  $20\log\frac{5}{V_{RMS}} = 20$  επομένως κάνοντας

απολογαριθμοποίηση βλέπουμε ότι  $V_{RMS}=0.5$  V. Δηλαδή, η νόμιμη στάθμη λειτουργίας είναι ίση με το 10% της μέγιστης απόλυτης στάθμης.

### 7.1.1 Συνολική δυναμική περιοχή κατά τη σύνδεση πολλών ηχητικών συστημάτων σε σειρά

Τόσο κατά την ηχογράφηση όσο και κατά την αναπαραγωγή ενός ηχητικού γεγονότος, παρεμβάλλονται συνήθως αρκετά διαφορετικά ηχητικά συστήματα. Δεδομένου ότι το κάθε ηχητικό σύστημα μπορεί να έχει διαφορετική δυναμική περιοχή από το άλλο, γεννιέται ένα ερώτημα σχετικά με την συνολική δυναμική περιοχή που προκύπτει από τη σύνδεση των διαφορετικών αυτών συσκευών. Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται ένα απλό παράδειγμα σύνδεσης τεσσάρων διαφορετικών ηχητικών συστημάτων σε σειρά. Η δυναμική περιοχή κάθε συστήματος κυμαίνεται από 60 έως 120 dB. Θα πρέπει ο αναγνώστης να καταλάβει ότι η συνολική δυναμική περιοχή της αλυσίδας δυστυχώς εξαρτάται το πιο αδύναμο κομμάτι του εξοπλισμού. Στο εικονιζόμενο παράδειγμα δηλαδή, η δυναμική περιοχή της όλης συνδεσμολογίας είναι το πολύ 60 dB. Αυτό το καταλαβαίνουμε αν σκεφτούμε ως εξής: Τα μέγιστα πλάτη του σήματος δε μπορούν να είναι μεγαλύτερα από το μέγιστο πλάτος του 3<sup>ου</sup> συστήματος, διότι αλλιώς θα είχαμε παραμόρφωση στην έξοδο του 3. Επίσης, η στάθμη θορύβου στην έξοδο της συνδεσμολογίας θα είναι το λιγότερο ίση με το κατώφλι θορύβου του συστήματος 3, αφού όπως είπαμε ο θόρυβος από κάθε συσκευή υπερτίθεται στο τελικό σήμα εξόδου.

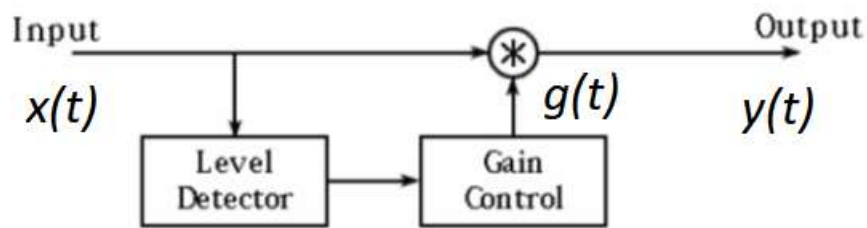


Σχήμα 7.4: Η δυναμική περιοχή μιας συνδεσμολογίας εξαρτάται από τον πιο «αδύναμο κρίκο» της αλυσίδας.

Από όλα αυτά συμπεραίνουμε ότι κατά τη διασύνδεση πολλών ηχητικών συστημάτων σε σειρά, η δυναμική περιοχή κάθε υποσυστήματος θα πρέπει να είναι ανάλογης τάξης με τα άλλα. Θα είναι κρίμα να παρεμβάλουμε ένα σύστημα χαμηλής σχετικά ποιότητας σε μια αλυσίδα από επαγγελματικής ποιότητας εξοπλισμό, καθότι αυτό θα μπορούσε να περιορίσει τη συνολική δυναμική περιοχή της συνδεσμολογίας.

## 7.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Μέχρι τώρα έχουμε μιλήσει για ηχητικά συστήματα τα οποία υποθέτουμε ότι είναι γραμμικά, δηλαδή υλοποιούν γραμμικές σχέσεις εισόδου εξόδου. Στα περισσότερα ηχητικά συστήματα (συμπεριλαμβανομένων των μικροφώνων και των μεγαφώνων), η γραμμικότητα στη συμπεριφορά είναι επιθυμητή και θεωρείται μάλιστα χαρακτηριστικό ποιοτικής λειτουργίας. Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις όπου χρειαζόμαστε ηχητικά συστήματα που εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Στις εφαρμογές αυτές υλοποιούνται μη – γραμμικές σχέσεις εισόδου / εξόδου (π.χ. λογαριθμικές εξισώσεις) που επιτρέπουν τον επιλεκτικό έλεγχο της δυναμικής περιοχής του σήματος εισόδου, με συμπίεση, περιορισμό (συστολή) ή επέκταση του πλάτους του επεξεργασμένου σήματος. Η χρήση τέτοιων συστημάτων είναι πολύτιμη σε διάφορες ηχητικές εφαρμογές, όπως ο συμπιεστής (compressor), το noise gate και το expander.



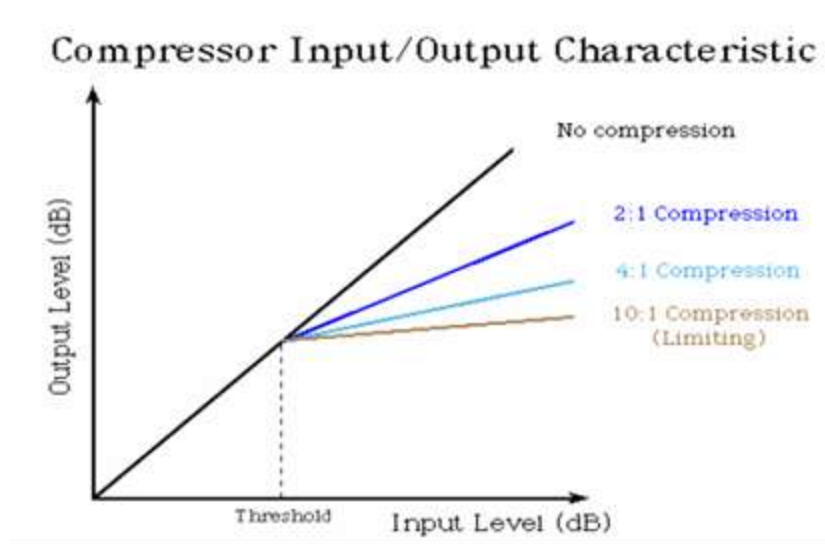
Σχήμα 7.5: Block διάγραμμα συστήματος μεταβολής και ελέγχου δυναμικής περιοχής

Μια απλοϊκή αναπαράσταση της λειτουργίας των δυναμικών επεξεργασιών φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Γίνεται λοιπόν χρήση ενός πλευρικού βρόγχου ο οποίος υπολογίζει την στάθμη του ηχητικού σήματος εισόδου, την απεικονίζει σε μία άλλη τιμή (κέρδος) με βάση προκαθορισμένη και επιλεγμένη από τον χρήστη μη-γραμμική σχέση εισόδου-εξόδου και τελικά, με την χρήση αυτής της τιμής κέρδους  $g(t)$ , μεταβάλλει τοπικά το σήμα εισόδου  $x(t)$ , σύμφωνα με την σχέση

$$y(t) = g(t)x(t). \quad (7.6)$$

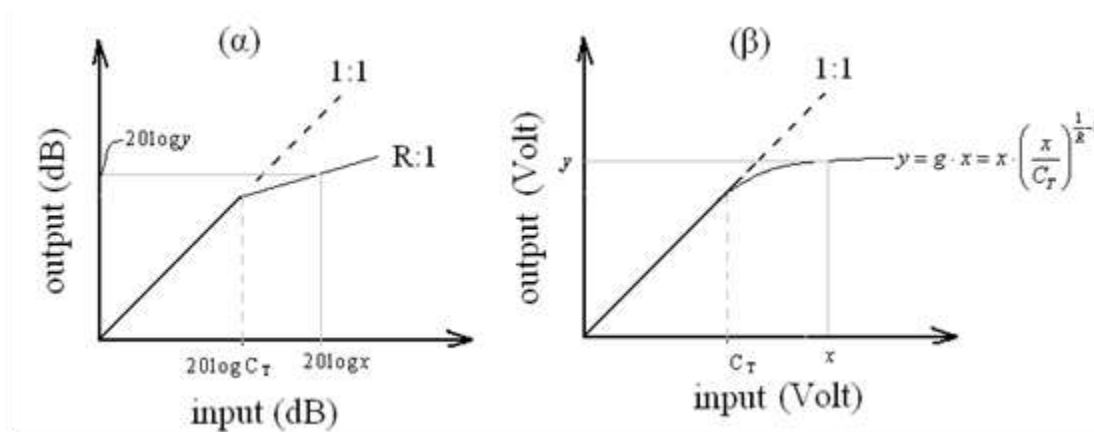
### 7.2.1 Συμπιεστής (Compressor)

Ο συμπιεστής έχει ως σκοπό τον περιορισμό της δυναμικού εύρους του σήματος. Η στατική τοπική απεικόνιση του πλάτους εισόδου σε κέρδος γίνεται τυπικά μέσα από καμπύλες όπως φαίνονται στο Σχήμα 7.6. Οι καμπύλες αυτές εκφράζουν την τιμή του κέρδους  $g(t)$  μέσω του λόγου συμπίεσης  $R$  και του κατωφλίου συμπίεσης  $L_T$ . Το κατώφλι συμπίεσης ορίζει την τιμή πλάτους του σήματος εισόδου πάνω από την οποία επενεργεί η μη-γραμμική μεταβολή κέρδους μέσω της Σχέση (7.6).



Σχήμα 7.6: Σχέσεις εισόδου-εξόδου για διάφορους λόγους συμπίεσης  $R$

Οι τιμές  $R$  και  $L_T$  ορίζονται από τον χρήστη, ανάλογα με τα ηχητικά δεδομένα και την συγκεκριμένη εφαρμογή. Μια επεξήγηση για τη λειτουργία του συμπιεστή μπορεί να είναι η εξής: όταν το πλάτος του σήματος εισόδου ( $L_{IN}$ ) δεν ξεπερνάει το κατώφλι συμπίεσης  $L_T$  τότε ο συμπιεστής πρακτικά δε λειτουργεί και το σήμα διέρχεται από το συμπιεστή ανεπηρέαστο. Στην αντίθετη περίπτωση, αν το σήμα εισόδου είναι  $M$  dB πάνω από την τιμή  $L_T$ , τότε το πλάτος στην έξοδο ( $L_{out}$ ) θα είναι μόνο  $\frac{M}{R}$  dB πάνω από το  $20\log C_T$ , όπου  $R$  είναι ο λόγος συμπίεσης. Παρατηρούμε από το Σχήμα 7.7(α) ότι η συμπίεση του σήματος έχει γραμμική σχέση στη λογαριθμική κλίμακα εισόδου – εξόδου (όταν δηλαδή στους άξονες έχουμε dB). Θα πρέπει να έχουμε όμως κατά νου ότι η σχέση αυτή είναι εκθετική στη γραμμική κλίμακα, όταν δηλαδή στους άξονες έχουμε γραμμικές μονάδες όπως τάση σε Volt (βλ. σχήμα 7.7(β)).

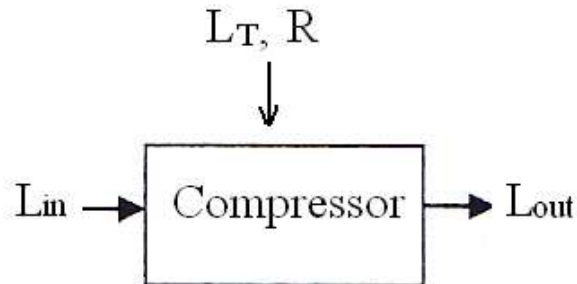


Σχήμα 7.7: Σχέση εισόδου-εξόδου (α) σε λογαριθμική κλίμακα και (β) σε γραμμική κλίμακα για ένα συμπιεστή με κατώφλι συμπίεσης  $L_T=20\log C_T$  και λόγο συμπίεσης  $R:1$  Με  $x$  και  $y$  συμβολίζεται αντίστοιχα η είσοδος και η έξοδος σε γραμμικές μονάδες (πχ. Volt).

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω είναι εύκολο τώρα να κατασκευάσουμε τη μαθηματική σχέση η οποία θα δίνει τη στάθμη εξόδου  $L_{out}$  του ηχητικού σήματος συναρτήσει της στάθμης

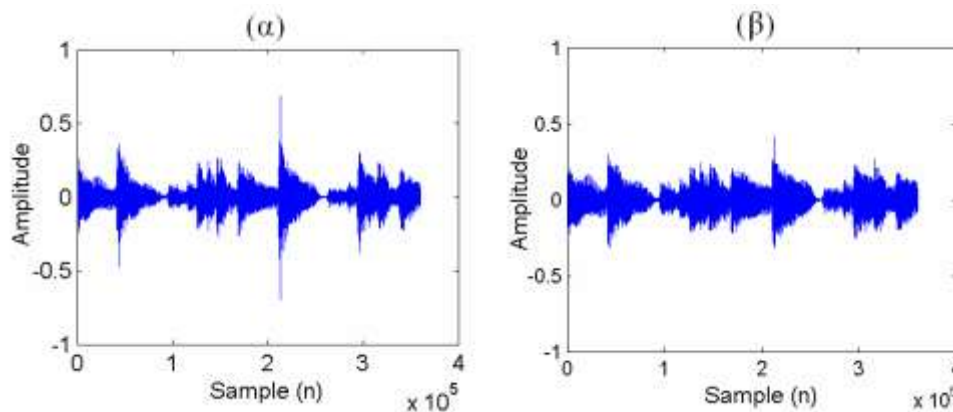
εισόδου  $L_{IN}$ , του κατώφλιου συμπίεσης  $L_T$  και του λόγου συμπίεσης  $R$ . Συγκεκριμένα, εφόσον η στάθμη εισόδου ξεπερνάει το κατώφλι συμπίεσης, η στάθμη εξόδου  $L_{out}$  μπορεί να υπολογιστεί μέσω του τύπου

$$L_{OUT} = L_T + \frac{L_{IN} - L_T}{R}. \quad (7.7)$$



Σχήμα 7.8: Η στάθμη εξόδου  $L_{OUT}$  του σήματος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί εάν ξέρουμε τη στάθμη εισόδου  $L_{IN}$ , το κατώφλι συμπίεσης  $L_T$  και το λόγο συμπίεσης  $R$ .

Από την τελευταία εξίσωση βλέπουμε ότι για μεγάλους λόγους συμπίεσης  $R$  ο όρος  $\frac{L_{IN} - L_T}{R}$  γίνεται πολύ μικρός και επομένως η στάθμη εξόδου  $L_{OUT}$  πρακτικά συμπίπτει με το κατώφλι συμπίεσης. Ένα σύστημα που λειτουργεί με πολύ μεγάλο λόγο συμπίεσης (τυπικά 10:1 και άνω) είναι το limiter. Το limiter παρεμβάλλεται συνήθως μεταξύ της εξόδου της κονσόλας και του τελικού ενισχυτή, έχοντας ως σκοπό να προστατεύει τον ενισχυτή και τα ηχεία από απότομες μη φυσιολογικές εξάρσεις του σήματος, όπως πχ. από πτώση μικροφώνου, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν έως και σε καταστροφή των μονάδων χαμηλών συχνοτήτων των ηχείων.



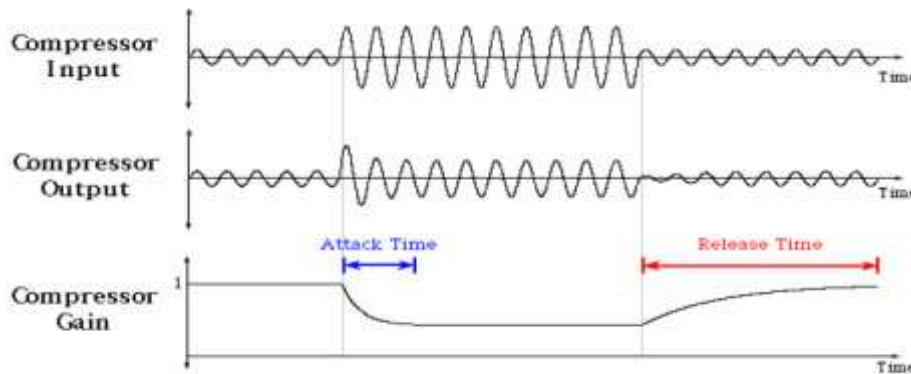
Σχήμα 7.9: Επίδραση της συμπίεσης σε ένα ηχητικό σήμα φωνής (α) πριν την επεξεργασία και (β) μετά την επεξεργασία, όπου εκτός από συμπίεση έχει εφαρμοστεί και μια ήπια ενίσχυση του σήματος.

**Παράδειγμα:** Να βρεθεί η στάθμη εξόδου  $L_{OUT}$  ενός ηχητικού σήματος το οποίο εισέρχεται σε ένα συμπιεστή στα α) 0 dBu και β) -16 dBu. Για το συμπιεστή θεωρείστε κατώφλι συμπίεσης  $L_T = -10$  dBu και λόγο συμπίεσης  $R = 5:1$ .

Απάντηση: α) Παρατηρούμε ότι η στάθμη του σήματος είναι 10 dB πάνω από το κατώφλι συμπίεσης. Ο λόγος συμπίεσης  $R = 5:1$  μας λέει ότι αυτά τα 10 dB θα απεικονίζονται σε μια δυναμική περιοχή μόνο  $10:5 = 2$  dB. Με άλλα λόγια, η στάθμη του σήματος θα αυξηθεί μόνο 2 dB πάνω από το κατώφλι  $L_T$ . Επομένως, η στάθμη του σήματος εξόδου θα είναι  $L_{OUT} = -10 + 2 = -8$  dBu. Αυτή η τιμή μπορεί επίσης να προκύψει απευθείας με απλή αντικατάσταση στη Σχέση (7.7). Όσον αφορά το ερώτημα (β), παρατηρούμε ότι τα -16 dBu είναι κάτω από το κατώφλι συμπίεσης επομένως ο συμπιεστής δε θα επιδράσει στο σήμα. Η στάθμη εξόδου θα παραμείνει στην ίδια τιμή με τη στάθμη εισόδου, άρα  $L_{OUT} = -16$  dBu.

### 7.2.2 Χρονικά χαρακτηριστικά λειτουργίας δυναμικών επεξεργασιών

Για την προοδευτική μετάβαση του κέρδους από τις καταστάσεις γραμμικής/μη-γραμμικής επεξεργασίας, τα παραπάνω ενεργειακά χαρακτηριστικά λειτουργίας (όπως το  $C_T$  και το  $R$ ) συμπληρώνονται και με χρονικά χαρακτηριστικά, όπως η αρχή (attack) και το τέλος (release) της μη-γραμμικής επεξεργασίας. Οι μεταβάσεις αυτές εξομαλύνονται με τοπική εκθετική καμπύλη μετάβασης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10.



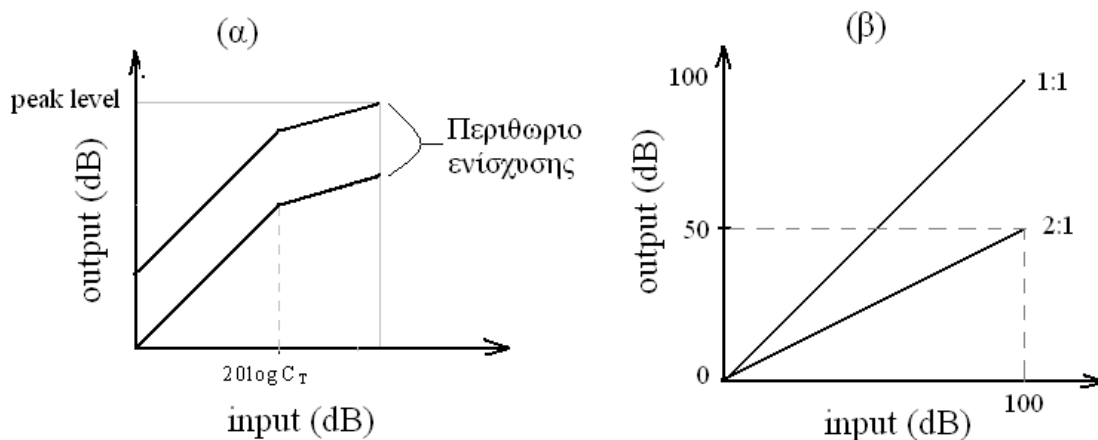
Σχήμα 7.10: Ορισμός του attack και του release κατά την υλοποίηση συμπίεσης.

Βλέπουμε ότι η παράμετρος του attack καθορίζει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί, από τη στιγμή που η στάθμη του σήματος περάσει το κατώφλι συμπίεσης, μέχρι να ξεκινήσει η συμπίεση του σήματος. Από την άλλη, η παράμετρος release καθορίζει το χρονικό διάστημα που θα περάσει μέχρι ο συμπιεστής να επιστρέψει στη γραμμική περιοχή λειτουργίας. Η ρύθμιση των παραμέτρων αυτών καθορίζεται με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά του σήματος. Πολύ μικρές τιμές του attack και του release time θα είναι ενδεχομένως επιθυμητές σε σήματα με απότομες εξάρσεις οι οποίες δε διαρκούν μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο η απότομη μεταβολή του κέρδους μπορεί να κάνει τη μετάβαση από ένα χαμηλό σε ένα υψηλό πέρασμα να μην ακούγεται φυσική. Από την άλλη, αύξηση του attack time, επιτρέπει μια πιο ομαλή ελάττωση της στάθμης του σήματος και κάνει το πέρασμα να ακούγεται πιο φυσικό. Ωστόσο, μεγάλη τιμή του release time ενδεχομένως να παρατείνει ανεπιθύμητα τη δράση του συμπιεστή σε χρονικά τμήματα όπου η στάθμη του σήματος έχει ήδη επανέλθει σε χαμηλές στάθμες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10.

Κάποιες μονάδες συμπίεσης, όπως για παράδειγμα limiters που χρησιμοποιούνται για ραδιοφωνική μετάδοση, λειτουργούν λαμβάνοντας υπόψιν το στιγμιαίο πλάτος του σήματος (peak level detection). Άλλες μονάδες λαμβάνουν υπόψιν τη μέση τετραγωνική τιμή του σήματος (RMS detection). Κατά τη λειτουργία σε peak level detection, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με ένα υψηλό λόγο συμπίεσης, απαγορεύουμε εντελώς στο σήμα εξόδου υπερβεί προκαθορισμένες στάθμες, ούτε καν για κλάσματα του δευτερολέπτου. Από την άλλη, κατά τη λειτουργία υπό RMS detection, η στάθμη του σήματος υπολογίζεται για ένα μεγαλύτερο χρονικό παράθυρο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να επιτρέπεται στο σήμα να υπερβεί την προκαθορισμένη στάθμη για κάποιο χρονικό διάστημα, πριν ο συμπιεστής ελαττώσει τη στάθμη του. Είναι προφανές ότι οι παράμετροι attack και release time έχουν νόημα περισσότερο για συμπιεστές που λειτουργούν υπό καθεστώς RMS detection παρά για peak detection.

### 7.2.3 Τυπικά παραδείγματα χρήσης συμπιεστή

Η χρήση συμπιεστή γίνεται τόσο για αισθητικούς όσο και για πρακτικούς λόγους. Στη ροκ μουσική για παράδειγμα ο συμπιεστής χρησιμοποιείται για να γίνει ο ήχος πιο συμπαγής. Το μπάσο είναι ένα δημοφιλές compressor όργανο. Για ηχητικό σήμα φωνής ένας compressor είναι σχεδόν πάντα απαραίτητος. Δεδομένου ότι μετά την συμπίεση το σήμα έχει περιορισμένη δυναμική περιοχή (βλ και Σχήμα 7.9), είναι συνήθως χρήσιμη και εφικτή η σταθερή αύξηση του συνολικού κέρδους. Το πώς δημιουργείται αυτή η δυνατότητα περαιτέρω ενίσχυσης του σήματος φαίνεται στο Σχήμα 7.11(α).

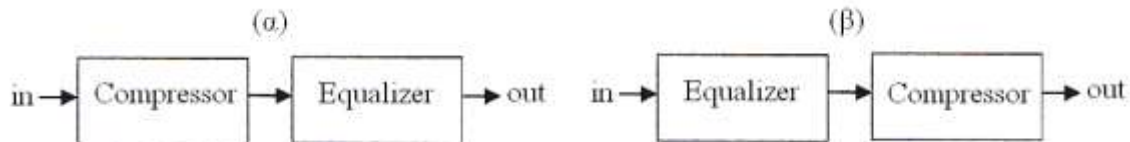


Σχήμα 7.11: (α) Όσο πιο χαμηλό το κατώφλι συμπίεσης και όσο πιο υψηλός ο λόγος συμπίεσης τόσο μεγαλώνει το περιθώριο ενίσχυσης του σήματος. (β) χαμηλώνοντας εντελώς το κατώφλι συμπίεσης και με ένα ήπιο λόγο συμπίεσης 2:1 είναι δυνατόν να «χωρέσουμε» δυναμικό εύρος 100 dB σε κασετόφωνο δυναμικής περιοχής μόνο 50 dB.

**Παράδειγμα:** Έστω ότι ένα ηχητικό σήμα εισέρχεται σε ένα ηχητικό σύστημα στη μέγιστη επιτρεπόμενη νόμιμη στάθμη λειτουργίας των  $L_0 = +4$  dBu. Να βρεθεί το περιθώριο ενίσχυσης του σήματος σε dB που μπορεί να αποδώσει ένας κομπρέσορας που συνδέεται πριν το ηχητικό σύστημα με λόγο συμπίεσης  $R = 4:1$  και κατώφλι συμπίεσης  $L_T = -8$  dBu.

**Απάντηση:** Είναι προφανές ότι το ηχητικό σήμα περνώντας μέσα από τον συμπιεστή εξέρχεται με μειωμένο δυναμικό εύρος και άρα η στάθμη εισόδου στο ηχητικό σύστημα θα είναι μικρότερη από πριν. Συγκεκριμένα, αφού  $L_T = -8$  dBu η στάθμη εξόδου από τον συμπιεστή, σύμφωνα με τη Σχέση (7.7) θα είναι  $L_{OUT} = -8 + \frac{4 - (-8)}{4} = -8 + 3 = -5$  dBu. Αφού η στάθμη του σήματος κατά την είσοδο στο ηχητικό σύστημα επιτρέπεται να είναι έως τα +4 dBu, το περιθώριο ενίσχυσης σε dB θα είναι ίσο με  $Gain = +4 - (-5) = 9$  dB.

**Παράδειγμα:** Θεωρείστε ένα equalizer ρυθμισμένο να προσδίδει αποκοπή 6 dB στα 800 Hz και έναν RMS συμπιεστή με παραμέτρους  $L_T = 0$  dBu και  $R = 4:1$ . Υπολογίστε την RMS στάθμη (σε dBu) με την οποία θα εξέρχεται ένα ημιτονικό σήμα συχνότητας 800 Hz και πλάτους 2.75 V από την σε σειρά συνδεσμολογία α) compressor – equalizer και β) equalizer – compressor. Τι παρατηρείται;



**Απάντηση:** Κατ' αρχάς πρέπει να προσδιορίσουμε την RMS στάθμη εισόδου του ημιτονικού σήματος στην είσοδο της αλυσίδας. Θα είναι  $V_{RMS} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 1.945$  Volt και σε λογαριθμικές μονάδες η RMS στάθμη εισόδου θα είναι  $20 \log \frac{1.945}{0.775} = 8$  dBu. Με χρήση της Σχέσης (7.7) βρίσκω ότι στην περίπτωση (α), η στάθμη με την οποία εξέρχεται το σήμα από τον συμπιεστή είναι  $L_{OUT} = 0 + \frac{8-0}{4} = 2$  dBu. Περνώντας από το equalizer η στάθμη μειώνεται κατά 6 dB επομένως η στάθμη εξόδου στην περίπτωση (α) τελικά θα είναι  $L_{OUT} = 2 - 6 = -4$  dBu. Στην περίπτωση (β) παρατηρούμε ότι το σήμα θα εξέρχεται στα  $8 - 6 = 2$  dBu από το equalizer. Η στάθμη του σήματος από την έξοδο του συμπιεστή θα είναι  $L_{OUT} = 0 + \frac{2-0}{4} = 0.5$  dBu. Παρατηρούμε ότι αλλάζοντας τη σειρά των μονάδων equalizer και compressor αλλάζει και η στάθμη εξόδου του σήματος από την αλυσίδα. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην μη γραμμική επεξεργασία που υπόκειται το σήμα από το δυναμικό επεξεργαστή και μας υπαγορεύει ότι θα πρέπει να περιμένουμε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το σε ποια θέση βάζουμε ένα δυναμικό επεξεργαστή σε μια αλυσίδα από ηχητικά εφφέ.

Μια πολύ βασική χρησιμότητα του συμπιεστή εμφανίζεται όταν ενώ έχουμε ένα ηχητικό σήμα μεγάλου δυναμικού εύρους, ο εξοπλισμός που διατίθεται για την μετάδοση ή ηχογράφηση του σήματος έχει περιορισμένο δυναμικό εύρος. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι σε μια συναυλία το ηχητικό γεγονός καταλαμβάνει ένα δυναμικό εύρος 100 dB και εμείς θέλουμε να το ηχογραφήσουμε σε ένα κασετόφωνο όπου η διαθέσιμη δυναμική περιοχή είναι μόνο 50 dB. Για να χωρέσουμε λοιπόν τα 100 dB στα 50 dB διαθέσιμου δυναμικού εύρους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μικρό λόγο συμπίεσης  $R = 2:1$  και να χαμηλώσουμε εντελώς το κατώφλι συμπίεσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.11(β). Επειδή όμως κατά την μετάδοση - ηχογράφηση έχουμε περιορισμό του δυναμικού εύρους του σήματος, πρέπει να γίνεται κάτι κατά την αναπαραγωγή του συγκεκριμένου αρχείου που να επιτρέπει αποκατάσταση του

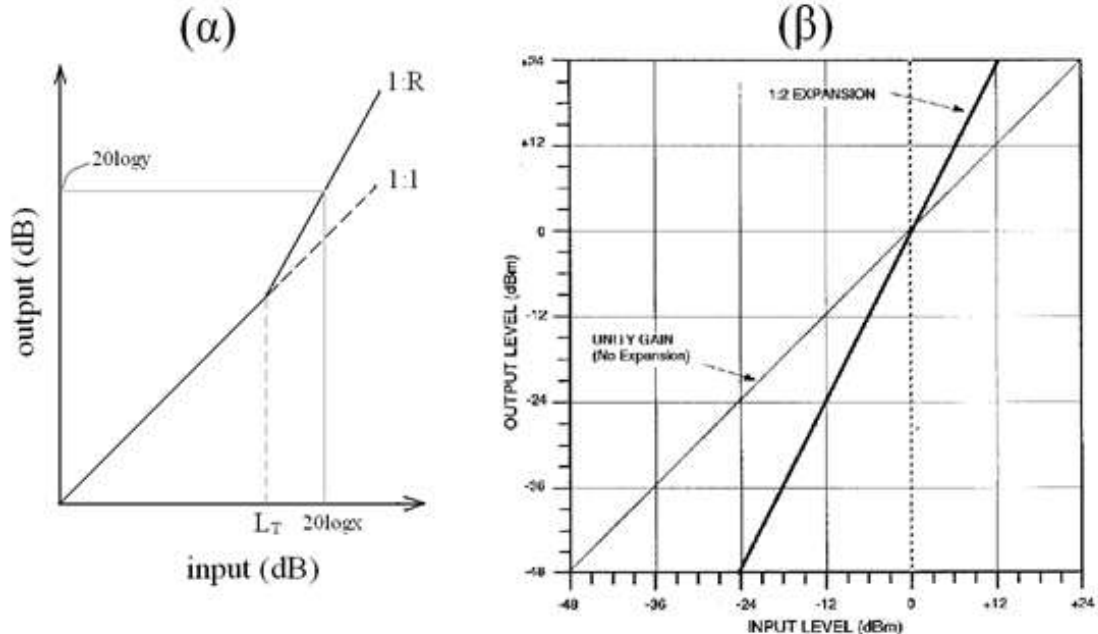
αρχικού δυναμικού εύρους του σήματος. Αυτή επέκταση του δυναμικού εύρους γίνεται εφικτή με τη χρήση expander.

#### 7.2.4 Expander

Μία μονάδα expander κάνει θεωρητικά το αντίθετο από ότι ένας compressor: οδηγεί σε επέκταση του δυναμικού εύρους του σήματος λαμβάνοντας υπόψιν παρόμοιες παραμέτρους όπως κάποιο κατώφλι ενεργοποίησης (ή κατώφλι επέκτασης)  $L_T$  και κάποιο λόγο επέκτασης  $1:R$ . Η στάθμη εξόδου  $L_{OUT}$  ενός ηχητικού σήματος δεδομένης της στάθμης εισόδου μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά σύμφωνα με τον τύπο

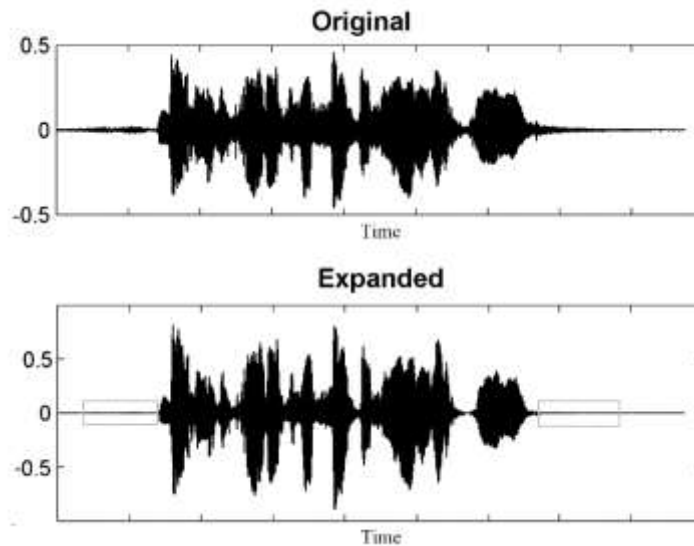
$$L_{OUT} = L_T + (L_{IN} - L_T)R. \quad (7.8)$$

Στο Σχήμα 7.12 φαίνονται δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις λειτουργίας expander. Στο σχήμα (α) ο expander επιδρά από μια στάθμη του σήματος ( $L_T$ ) και πάνω ενισχύοντας περεταίρω τις υψηλές στάθμες και αφήνοντας ανεπηρέαστες τις χαμηλές. Στο σχήμα (β) ο expander επιδρά σε όλο το δυναμικό εύρος του σήματος εισόδου. Παρατηρούμε ότι τα 36 dB δυναμικού εύρους του σήματος εισόδου (από -24 έως 12) αντικατροπτίζονται σε 72 dB δυναμικού εύρους στην έξοδο (από -48 έως 24). Ο expander σε μια τέτοια περίπτωση επιδρά ενισχύοντας τις υψηλές στάθμες και εξασθενώντας τις χαμηλές στάθμες. Για παράδειγμα, ένα σήμα που εισέρχεται στα -12 dB εξέρχεται στα -24 dB ενώ ένα σήμα που εισέρχεται στα 12 dB εξέρχεται στα 24 dB. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η δουλειά που θα έκανε ένα τέτοιο expander είναι ακριβώς η αντίθετη από τη δουλειά που κάνει ο compressor.



Σχήμα 7.12: (α) Τυπική καμπύλη εισόδου-εξόδου ενός expander και (β) χαρακτηριστικά λειτουργίας expander κατά την αποκατάσταση συμπιεσμένης δυναμικής περιοχής

Ένα παράδειγμα από τη χρήση ενός τέτοιου expander σε ένα σήμα φωνής φαίνεται στο Σχήμα 9. Στο πάνω διάγραμμα φαίνεται η αρχική κυματομορφή του σήματος και στο κάτω διάγραμμα φαίνεται η κυματομορφή του σήματος κατά την έξοδό του από το expander. Παρατηρούμε ότι οι κορυφές (εξάρσεις) του σήματος έχουν γίνει ακόμα πιο απότομες και πιο ευδιάκριτες από πριν. Από την άλλη, χρονικές περιοχές με μικρή στάθμη σήματος έχουν καταπιεστεί ακόμα πιο πολύ, με αποτέλεσμα σχεδόν να εξαφανίζεται το σήμα (οι περιοχές αυτές περικλείονται από τα γκρι ορθογώνια πλαίσια στο διάγραμμα). Υπό ένα τέτοιο καθεστώς λειτουργίας ένα expander μπορεί να επιτελέσει λειτουργία αποθρομβοποίησης (de-noising), αν και η κατασκευή του δεν είναι εξαρχής ορισμένη για αυτό το σκοπό.



Σχήμα 7.13: Κυματομορφή σήματος φωνής πριν (original) και μετά τη χρήση expander (expanded).

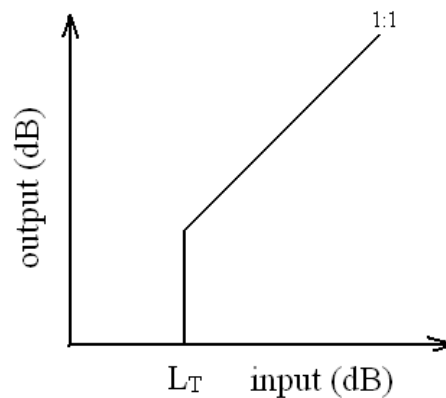
### 7.2.5 Noise gate

Ένας από τους πιο απλούς αλλά και πιο χρήσιμους δυναμικούς επεξεργαστές είναι τα λεγόμενα noise gates. Αυτές οι διατάξεις υπολογίζουν τη στάθμη του σήματος και επιτρέπουν στο σήμα να διέλθει μόνο εφόσον η στάθμη του ξεπερνάει κάποιο καθορισμένο κατώφλι  $L_T$ . Σε περίπτωση που η στάθμη του σήματος είναι μικρότερη από το κατώφλι  $L_T$ , το noise gate “κλείνει”, επιβάλλοντας απόλυτη σιωπή. Το σκεπτικό για την κατασκευή μιας τέτοιας συσκευής προέρχεται από τη επιθυμία μείωσης της στάθμης θορύβου σε μικροφωνικές διατάξεις και γενικότερα, για την αποφυγή ανεπιθύμητης διαρροής σήματος σε πολυφωνικές διατάξεις ηχογράφησης.

Το noise gate για παράδειγμα είναι χρήσιμο κατά την ηχογράφηση ενός σετ από drums. Για να ηχογραφηθεί ένα drumset θα πρέπει να τοποθετήσουμε ένα ξεχωριστό μικρόφωνο σε κάθε στοιχείο της drums, με σκοπό από τη μία να καλύψουμε όλες τις ακουστικές πηγές του σετ, αλλά και να μπορούμε να επέμβουμε ξεχωριστά σε κάθε τύμπανο ή σε κάθε πιατίνι κατά το στάδιο της ηχητικής επεξεργασίας. Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι έχουμε τοποθετήσει ένα μικρόφωνο στη μπότα (kick drum) και ένα μικρόφωνο στο ταμπούρο (snare drum) τα οποία είναι δύο από τα πιο βασικά στοιχεία του ρυθμού στη ροκ μουσική. Όταν ο drummer χτυπάει

το ταμπούρο, τότε αναπόφευκτα ένα μέρος του σήματος διαρρέει στο μικρόφωνο της μπότας. Αντίστοιχα, όταν ο drummer χτυπάει τη μπότα, ένα μέρος του σήματος διαρρέει στο μικρόφωνο του ταμπούρου. Αν λοιπόν θέλαμε να βάλουμε ένα equalizer στο σήμα που προέρχεται από την μπότα με σκοπό να τονίσουμε κάποιες συχνότητες της μπότας, τότε αναπόφευκτα θα τονίζαμε τις ίδιες συχνότητες και στο σήμα του ταμπούρου που έχει διαρρεύσει στο κανάλι αυτό. Προφανώς, κάτι αντίστοιχο θα συνέβαινε αν θέλαμε να επέμβουμε στον ήχο του ταμπούρου. Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη για απομόνωση των ακουστικών πηγών, κάτι που δεν είναι εφικτό λόγω του φαινομένου της διαρροής που μόλις περιγράψαμε. Εδώ λοιπόν έρχεται το noise gate να βοηθήσει την κατάσταση προσφέροντας ένα είδος τεχνητής απομόνωσης στις ακουστικές πηγές. Συνδέοντας ένα noise gate στην έξοδο του μικροφώνου της μπότας και ρυθμίζοντας κατάλληλα το κατώφλι  $L_T$ , μπορούμε να επιβάλλουμε στο gate να “ανοίγει” μόνο όταν ο drummer βαραίει τη μπότα και να μένει κλειστό κατά την υπόλοιπη διάρκεια. Αυτό βασίζεται στο ότι το ηλεκτρικό σήμα που αντιστοιχεί στη μπότα θα είναι ισχυρότερο από το σήμα που έχει διαρρεύσει από το ταμπούρο ή από τα άλλα στοιχεία της drums. Αντίστοιχα, το μικρόφωνο του ταμπούρου θα πρέπει να “ανοίγει” μόνο όταν διέρχεται ένα ισχυρό σήμα το οποίο προέρχεται από το χτύπημα του ταμπούρου. Έτσι θα μπορούσαμε λοιπόν να απομονώσουμε κάθε στοιχείο της drums, επιβάλλοντας ρυθμίσεις οι οποίες δε θα επηρεάζουμε ηχητικές συνιστώσες διαφορετικές από αυτές για τις οποίες διατίθεται το κάθε μικρόφωνο.

Η χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου μιας μονάδας gate φαίνεται στο σχήμα 7.14. Εκτός από το κατώφλι  $L_T$ , ο χρήστης μπορεί επίσης να ρυθμίζει χρονικά χαρακτηριστικά όπως το attack και το release, τα οποία επιδρούν με τρόπο παρόμοιο που ισχύει για τις μονάδες compressor που περιγράψαμε προηγουμένως.

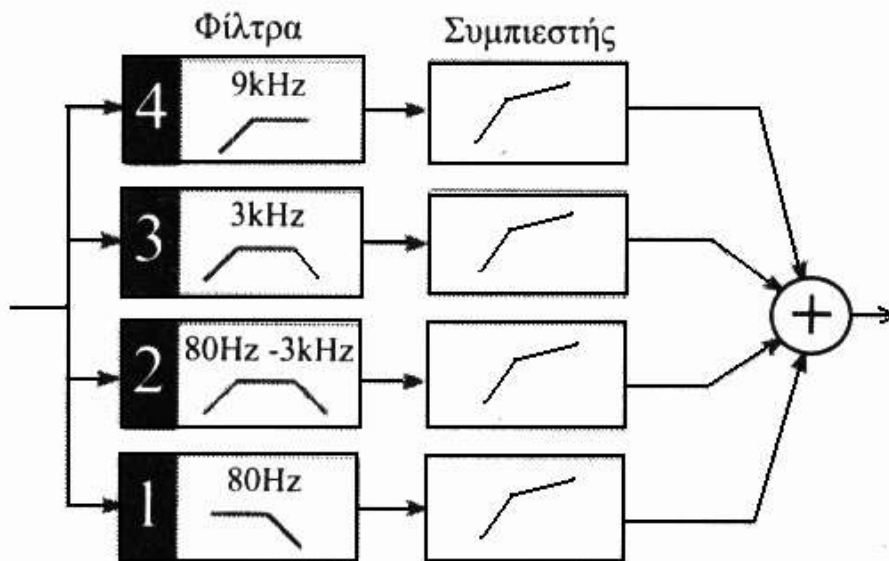


Σχήμα 7.14: Τυπικό διάγραμμα εισόδου – εξόδου μιας μονάδας noise gate.

### 7.2.6 Multiband compressor

Κατά την δυναμική επεξεργασία ενός ηχητικού σήματος θα θέλαμε πιθανόν να επέμβουμε σε κάποιες συγκεκριμένες συχνотικές περιοχές, αφήνοντας ανεπηρέαστες κάποιες άλλες. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μονοφωνικό αρχείο το οποίο προήλθε από την ηχογράφηση μπάσου και βιολιού ταυτόχρονα. Δυστυχώς δεν έχουμε σε ξεχωριστά κανάλια το μπάσο και το βιολί, αλλά είναι και τα δύο μέσα σε ένα κανάλι. Κατά την ακρόαση του αρχείου δημιουργείται

η επιθυμία να κάνουμε τον ήχο του μπάσου πιο συμπαγή, αλλά δε θα θέλαμε με αυτήν την πράξη να επηρεάσουμε και το βιολί. Υπάρχει άραγε κάποιος τρόπος να κάνουμε συμπίεση στο δυναμικό εύρος του μπάσου χωρίς να επηρεαστεί ο ήχος του βιολιού; Ευτυχώς, τα δύο αυτά μουσικά όργανα έχουν αρκετά διαφορετικό φάσμα. Το μπάσο περιέχει κυρίως χαμηλές συχνότητες ενώ το βιολί κυρίως μεσαίες και χαμηλές. Θα μπορούσαμε λοιπόν να επιτύχουμε το ζητούμενο ως εξής: Αν περάσουμε το ηχητικό σήμα από ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης συχνοτήτων, θα πάρουμε ένα σήμα το οποίο θα περιέχει κυρίως τις χαμηλές συχνότητες του μπάσου και ελάχιστο βιολί. Από την άλλη, αν περάσουμε το σήμα από ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης το οποίο αφήνει ανεπηρέαστες τις μεσαίες και χαμηλές συχνότητες και κόβει τις χαμηλές, θα πάρουμε στην έξοδο ένα σήμα που περιέχει κυρίως το βιολί και ελάχιστο μπάσο. Είναι προφανές ότι τα δύο αυτά φίλτρα θα πρέπει να επενεργούν σε παράλληλη διάταξη.



Σχήμα 7.14:Τυπική μορφή ενός multi-band compressor τεσσάρων συχνοτικών περιοχών

Στην έξοδο του φίλτρου χαμηλής διέλευσης μπορούμε τώρα να συνδέσουμε ένα συμπιεστή και να ορίσουμε τις επιθυμητές παραμέτρους για την συμπίεση του μπάσου. Αν φανταστούμε περισσότερα από δύο τέτοια φίλτρα τα οποία επενεργούν παράλληλα, σε σειρά το καθένα με κάποιο συμπιεστή, παίρνουμε το σχήμα του multi-band compressor που φαίνεται στο Σχήμα 7.15.

Στο σχήμα 7.15 φαίνεται λοιπόν μια συσκευή η οποία διαχωρίζει το σήμα σε 4 διαφορετικές συχνοτικές περιοχές ή μπάντες (εξού και ο όρος multi-band). Κάθε μπάντα έχει το δικό της κομπρέσορα. Σε αρκετές τέτοιες εφαρμογές, ο χρήστης μπορεί να ορίζει μόνος του τη θέση κάθε μπάντας στο συχνοτικό φάσμα, δηλαδή σε ποια συχνότητα θα ξεκινάει και θα τελειώνει κάθε μπάντα. Παρατηρείστε ότι η πρώτη μπάντα ορίζεται από ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης, η τελευταία από ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης, ενώ για τις ενδιάμεσες μπάντες χρειάζονται φίλτρα διέλευσης ζώνης συχνοτήτων (ζωνοπερατά φίλτρα). Προφανώς, η αρχή και το τέλος κάθε μπάντας θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να καλύπτεται όλο το ακουστικό φάσμα. Μετά

από τη δυναμική επεξεργασία, τα σήματα από κάθε μπάντα προστίθενται μεταξύ τους και έτσι ανακατασκευάζεται ένα σήμα πλήρους συχνοτικού φάσματος.

## 8 ΚΟΝΣΟΛΕΣ ΜΙΞΗΣ

---

### 8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι όροι mixer (μίκτης), console (κονσόλα), mixing console, board, μικροφωνική και desk χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για το είδος αυτό των συσκευών. Όλοι χρησιμοποιούνται ακριβώς για να δηλώσουν συσκευές που συνδυάζουν και επαναδρομολογούν audio σήματα από ένα σύνολο εισόδων σε ένα σύνολο εξόδων συνήθως μαζί με κάποια επιπρόσθετη επεξεργασία σήματος και ρύθμιση της στάθμης τους.

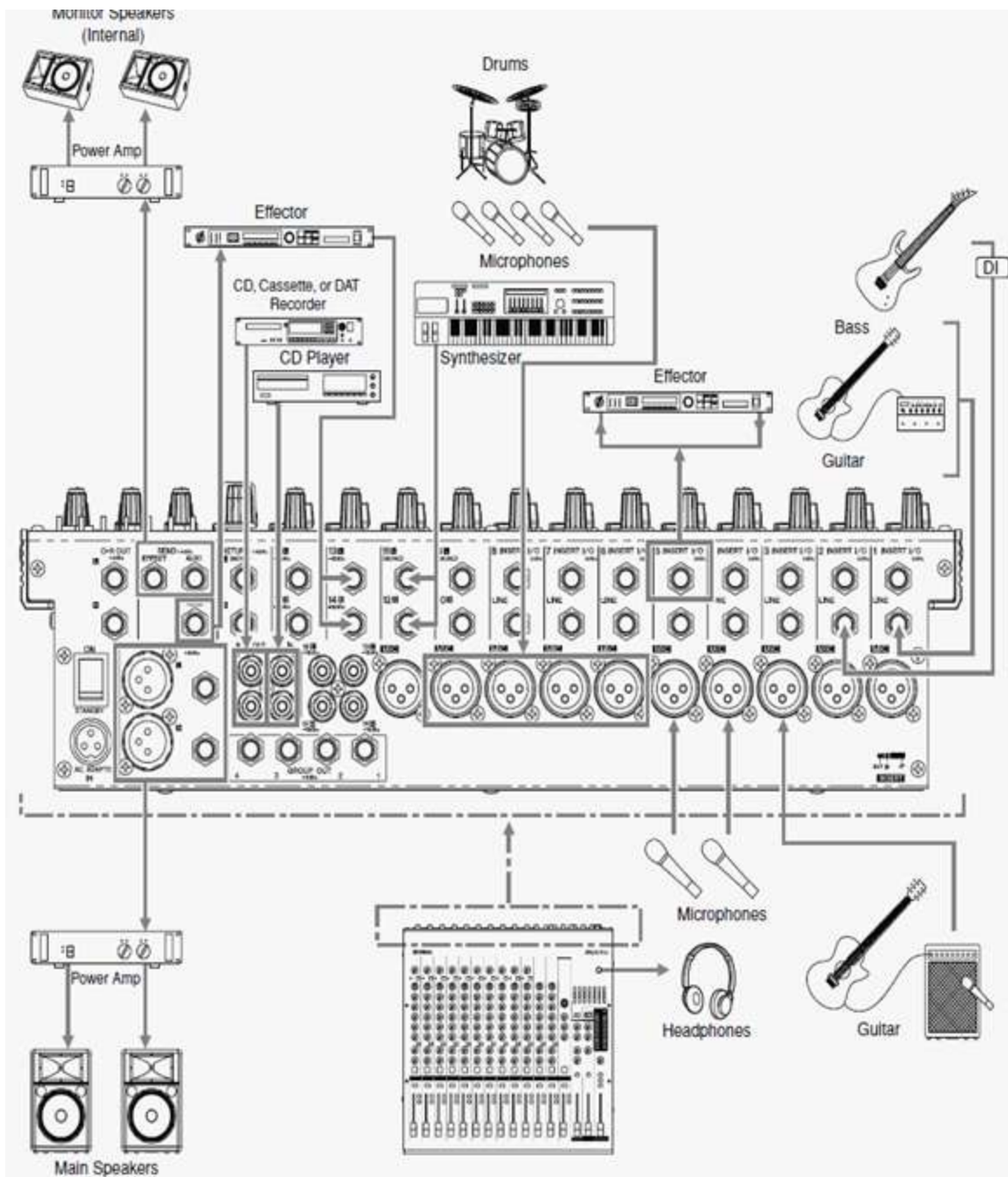
Σε κάθε ηχητικό σύστημα studio ή P.A., η κονσόλα μίξης είναι η συσκευή που όλα τα σήματα «συναρμολογούνται» μαζί. Η διαδικασία αυτή είναι που ονομάζεται μίξη. Οτιδήποτε μπαίνει ως είσοδος στην κονσόλα (μικρόφωνα, μουσικά όργανα κ.λπ.), μπορεί να βγει και ως έξοδος για να πάει στους ενισχυτές και από εκεί στα ηχεία, στα ηχεία παρακολούθησης (monitor) και αν αυτό είναι επιθυμητό, σε διάφορες μονάδες εφέ (βλ. και Σχήμα 8.1). Γι' αυτόν το λόγο η κονσόλα αποτελεί την «καρδιά» ενός τέτοιου ηχητικού συστήματος.

Μια διάκριση των όρων αυτών έγκειται στο ότι ο μίκτης αναφέρεται γενικά σε μια μικρή μονάδα με λιγότερες από 12 εισόδους ενώ οι μεγαλύτερες μονάδες είναι οι κονσόλες μίξης. Ο όρος μικροφωνική χρησιμοποιείται συνήθως για τις αυτοενισχυόμενες κονσόλες. Ο όρος κονσόλα είναι απλώς μια συντόμευση του όρου κονσόλα μίξης, ο όρος board χρησιμοποιείται μερικές φορές για να περιγράψει μια κονσόλα μίξης και τέλος ο όρος desk είναι ένας σχετικά δημοφιλής βρετανικός όρος για αυτές τις συσκευές.

Κάθε διαφορετικός τύπος κονσόλας έχει τις δικές του ιδιομορφίες, που θα τις ανακαλύψετε στο βιβλίο οδηγιών χρήσης της (manual), αλλά η βασική κατασκευή είναι πάντα η ίδια. Κατ' αρχάς το πιο σημαντικό είναι ο αριθμός των καναλιών εισόδου. Όσο περισσότερα κανάλια υπάρχουν τόσο περισσότερες πηγές σήματος μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα.

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, μια κονσόλα μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιοχές:

- Την περιοχή εισόδου, όπου έρχονται τα σήματα από τα μικρόφωνα, καθώς και τα σήματα από το ή τα μαγνητόφωνα ή τις μονάδες επεξεργασίας.
- Την περιοχή εξόδου, από όπου τα σήματα αυτά, συνδυασμένα και επεξεργασμένα, οδεύουν προς το μαγνητόφωνο, τον τελικό ενισχυτή, τα monitors ή τα ακουστικά των μουσικών και αλλού.
- Την περιοχή παρακολούθησης, η οποία αποτελείται από τα όργανα ένδειξης τα οποία απεικονίζουν τη στάθμη του σήματος σε διάφορα σημεία της κονσόλας (πχ. βελόνες ή leds).

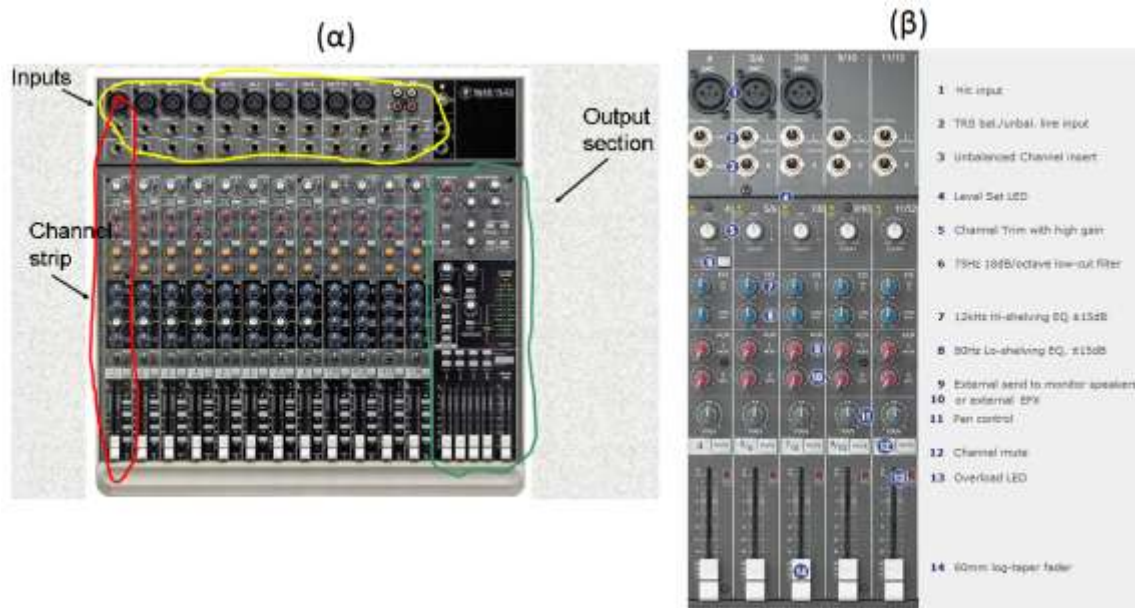


Σχήμα 8.1 Συνδεσμολογία συσκευών με κονσόλα

## 8.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΙΑΣ ΚΟΝΣΟΛΑΣ

Υπάρχει μια λογική σειρά λειτουργίας κάθε καναλιού υποδοχής που κάνει ευκολονόητη τη χρήση του. Το σήμα «ρέει» από πάνω προς τα κάτω κι εσείς μπορείτε να επεξεργαστείτε ενδιάμεσα και να το προσαρμόσετε στις ανάγκες σας, μέσω διαφόρων ρυθμιστικών και διακοπών. Όλα τα ανεξάρτητα κανάλια εισόδου είναι κατασκευασμένα και λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς

τρόπο. Αν μπορείτε να χειριστείτε λοιπόν ένα κανάλι, τότε μπορείτε να χειριστείτε και όλα τα υπόλοιπα και σχεδόν όλη την κονσόλα μίξης.



Σχήμα 8.2 Διεπαφή χρήστη σε μία κονσόλα (α) και πιο λεπτομερή απεικόνιση των ρυθμιστών για κανάλια εισόδου στο (β).

### 8.2.1 Προενισχυτής (preamplifier)

Στην κορυφή του καναλιού υπάρχει ένας προενισχυτής μικροφώνου. Οι προενισχυτές χρησιμοποιούνται για να ωθήσουν το αδύνατο  $-70$  dBu με  $-50$  dBu σήμα των μικροφώνων στα επίπεδα από  $-20$  dBu έως  $+4$  dBu. Ο προενισχυτής είναι το πρώτο ενεργό στάδιο, το πρώτο ηλεκτρονικό κύκλωμα που επεξεργάζεται το σήμα μικροφώνων που συνδέεται με μια κονσόλα. Οι προενισχυτές όταν χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν το σήμα από τα pickup κιθάρων ενεργούν περισσότερο ως μετατροπείς σύνθετης αντίστασης παρά ως προενισχυτές τάσης, δεδομένου ότι τα pickup των κιθάρων μπορούν να παραγάγουν τάσεις που είναι ήδη ίσες με τη line τάση μιας κονσόλας.

Η σχεδίαση του προενισχυτή είναι πολύ σημαντικό πράγμα δεδομένου ότι αυτό είναι το κύκλωμα με το περισσότερο gain, και ως εκ τούτου έχει τον μεγαλύτερο κίνδυνο να ενισχυθεί η παραμόρφωση και ο θόρυβός του. Σημαντικό ρόλο παίζει και η σύνθετη αντίσταση της πηγής που συνδέεται με τον προενισχυτή μιας εισόδου. Αυτός είναι και ο λόγος που ένας προενισχυτής σχεδιασμένος για ηλεκτρική κιθάρα (η οποία έχει σύνθετη αντίσταση πολλών δεκάδων kohm) δεν θα μας δώσει καλό ήχο για ένα μικρόφωνο (το οποίο έχει σύνθετη αντίσταση της τάξης 50 έως 200 ohm).

Πάνω, κάτω ή και στο πλάι του, βρίσκουμε ένα διακόπτη επιλογής μικροφώνου ή line (απευθείας εισόδος). Μ' αυτόν τον διακόπτη μπορείτε να επιλέξετε ποια μορφή εισόδου θα χρησιμοποιήσετε, δηλαδή μικρόφωνο ή line ενός π.χ. synthesizer, ηλεκτρικής κιθάρας, μικροφώνου κλπ., τα οποία θα συνδέσετε στην υποδοχή του καναλιού. Μερικές φορές υπάρχουν δύο ξεχωριστές υποδοχές, μία για mic, μία για line. Ο λόγος ύπαρξης του διακόπτη

επιλογής (ή των διαφορετικών υποδοχών) είναι γιατί το σήμα ενός μικροφώνου είναι αρκετά πιο χαμηλό από το line και γι' αυτό πρέπει να ενισχυθεί περισσότερο. Με το ρυθμιστή απολαβής σήματος (gain), μπορείτε να ρυθμίσετε το επίπεδο ενίσχυσης του. Σε πολλές κονσόλες μίξης υπάρχουν κόκκινα ενδεικτικά υπερφόρτωσης, που δείχνουν ότι το κανάλι έχει σήμα στάθμης παραπάνω από το κανονικό (οπότε έχουμε παραμόρφωση).

### 8.2.2 Ρύθμιση τόνου (ισοσταθμιστής ή equalizer)

Στους σχετικά πιο φθηνούς μίκτες θα δείτε μόνο δύο κουμπιά ρύθμισης τόνου, ένα για μπάσα και ένα για πρίμα. Στις πιο ακριβές κονσόλες συχνά υπάρχει ένα τρίτο κουμπί για ρύθμιση των μεσαίων συχνοτήτων ή ακόμη καλύτερα και ένας παραμετρικός ισοσταθμιστής. Για τους ρυθμιστές τόνου ισχύουν αυτά που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2 και επομένως δε θα αναφερθούμε εδώ περεταίρω.

### 8.2.3 Βοηθητικές εξόδους (auxiliary channels)

Για κάθε auxiliary κανάλι υπάρχουν ρυθμιστές (συνήθως περιστροφικού τύπου) που μας επιτρέπουν να στείλουμε το σήμα έξω από το mixer και προς κάποιο σύστημα ακρόασης (monitor) ή προς κάποια ειδική μονάδα εφέ. Αυτό γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Στο πίσω μέρος της κονσόλας υπάρχει μια σειρά υποδοχών με τους όρους send (έξοδος) και return (επιστροφή, δηλ. είσοδος). Σ' αυτές τις υποδοχές θα συνδέσετε το εφέ που θέλετε, π.χ. κάποια συσκευή reverb, echo, delay κ.λ.π. Η είσοδος του εφέ συνδέεται με την έξοδο send του mixer. Η έξοδος από το εφέ στέλνεται πίσω στο mixer μέσω της υποδοχής return.

Τώρα μπορείτε χρησιμοποιώντας τα ρυθμιστικά auxiliary γι' αυτό το κανάλι, να ρυθμίσετε τη στάθμη την μονάδα Εφέ. Συνήθως το mixer διαθέτει και κεντρικά ρυθμιστικά auxiliary (δηλ. master auxiliary) που επιδρούν στις εντάσεις όλων των auxiliary.

Το ίδιο ισχύει και για το monitor, με τη διαφορά ότι εδώ δε χρειαζόμαστε επιστροφή του σήματος στο mixer, αφού αυτή η σύνδεση είναι μόνο έξοδος που μας επιτρέπει να κάνουμε ακρόαση μέσω κάποιου ηχητικού σήματος.

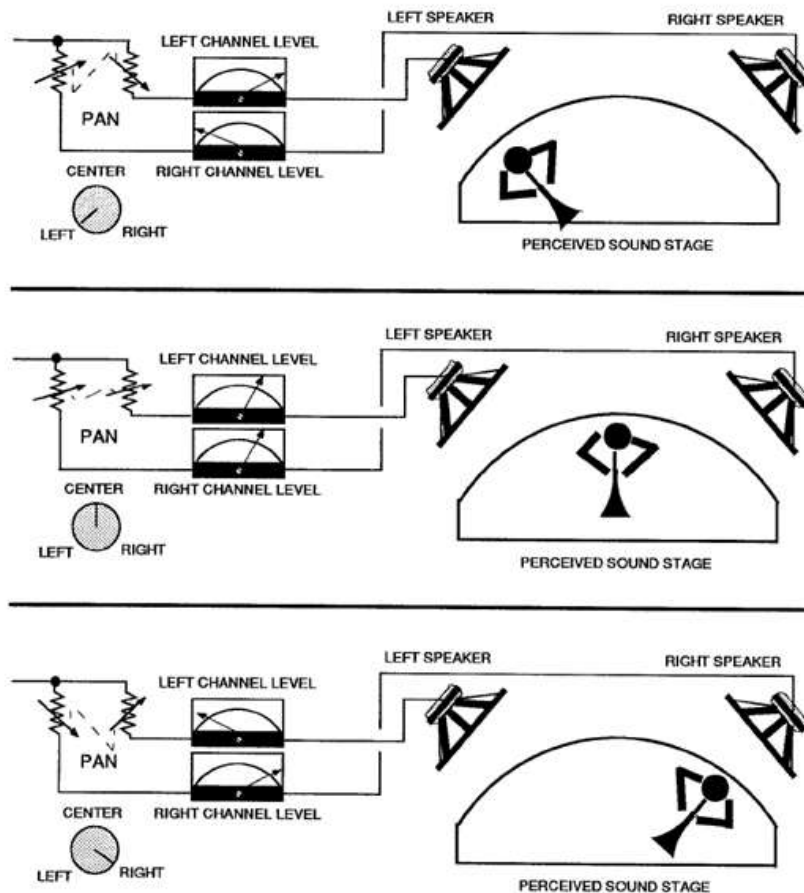
Αν υπάρχει κάποιος διακόπτης με την ένδειξη pre/post (πριν/μετά), μπορείτε να διαλέξετε αν θα στείλετε το σήμα προς τις βοηθητικές εξόδους πριν αυτό περάσει από το fader (εξασθενητής/ρυθμιστής έντασης του καναλιού), ή μετά, δηλαδή pre - fader ή post - fader. Αν ο διακόπτης είναι στη θέση pre, το fader δεν αυξομειώνει την ένταση των βοηθητικών σημάτων όπως αυτά φεύγουν από τις εξόδους του mixer, αλλά δίνεται προτεραιότητα στα ρυθμιστικά των βοηθητικών. Αν κάνετε μίξη με ακουστικά σε studio, αυτή η θέση είναι πιθανότατα η καλύτερη, αφού σας επιτρέπει να φτιάξετε την δικιά σας μίξη χρησιμοποιώντας τα ρυθμιστικά των βοηθητικών. Αν ο διακόπτης είναι στη θέση post, το fader αυξομειώνει τις εντάσεις των σημάτων όπως αυτές φεύγουν από τις βοηθητικές εξόδους, δηλαδή έχει προτεραιότητα η ρύθμιση.

### 8.2.4 Πανοραμικό ποτενσιόμετρο

Το πανοραμικό ποτενσιόμετρο αποτελείται από δύο συζευγμένες μεταβλητές αντιστάσεις. Ο σκοπός αυτής της συνδεσμολογίας είναι να δώσει στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίσει τη συμμετοχή του κάθε καναλιού εισόδου στο left και στο right κανάλι εξόδου και να

διαμορφώσει κατ' αυτόν τον τρόπο την στερεοφωνική εικόνα. Μεταβάλλοντας τη θέση του περιστροφικού ποτενσιόμετρου, η τιμή της μίας αντίστασης αυξάνεται, τη στιγμή που αυτή της άλλης ελαττώνεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα είναι δυνατόν να αποστέλλεται στις δύο εξόδους με οποιαδήποτε θεμιτή αναλογία, στρέφοντας την ηχητική εικόνα από τέρμα αριστερά μέχρι τέρμα δεξιά, με τον τρόπο που φαίνεται και στο Σχήμα 8.3. Η σύζευξη μεταξύ των δύο αντιστάσεων αναπαρίσταται με τη διακεκομμένη γραμμή.

Όταν το πανοραμικό ποτενσιόμετρο βρίσκεται στο κέντρο, τότε οι τιμές των δύο αντιστάσεων είναι ίσες και η στάθμη του σήματος εξισώνεται στα δύο κανάλια. Η ισχύς που αποδίδεται από τον τελικό ενισχυτή σε κάθε ηχείο είναι ακριβώς η ίδια (προϋποθέτει φυσικά ότι τα δύο ηχεία είναι πανομοιότυπα), κάτι που μπορούμε να το αναπαραστήσουμε ως  $W_L = W_R = W_{tot}/2$ , όπου  $W_L$  είναι η ισχύς στο αριστερό ηχείο,  $W_R$  η ισχύς στο δεξί ηχείο και  $W_{tot}$  η συνολικά αποδιδόμενη ισχύς που ισούται με το άθροισμα  $W_L + W_R$ . Ένα από τα μυστικά του πανοραμικού ποτενσιόμετρου είναι ότι σε όποια θέση και αν το στρέψουμε, η συνολική ισχύς  $W_{tot}$  δεν αλλάζει. Για παράδειγμα, όταν στρέφουμε την πανοραμική εικόνα προς τα δεξιά, το σήμα στο αριστερό ηχείο μειώνεται και στο δεξί ηχείο αυξάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολικά αποδιδόμενη ισχύς  $W_{tot}$  να παραμένει σταθερή. Όταν λοιπόν το πανοραμικό ποτενσιόμετρο είναι τέρμα δεξιά ή τέρμα αριστερά, τότε τα αντίστοιχα ηχεία παίζουν +3 dB δυνατότερα από ότι παίζει το καθένα όταν το ποτενσιόμετρο είναι στο κέντρο (θυμηθείτε ότι διπλασιασμός της ισχύος αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 3 dB).



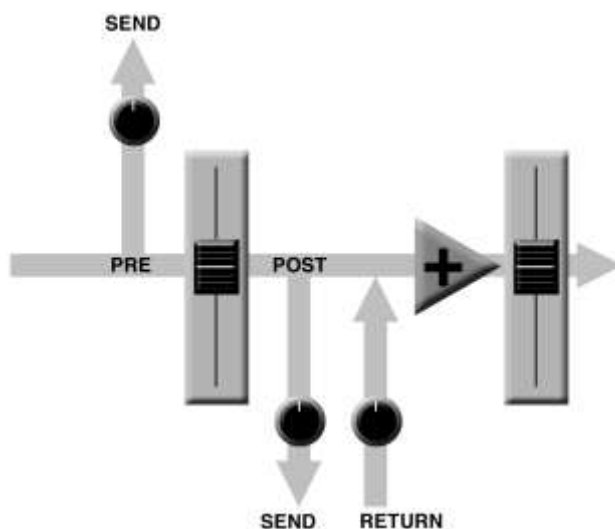
Σχήμα 8.3. Τρόπος λειτουργίας του πανοραμικού ποτενσιόμετρου.

### 8.2.5 Fader

Το fader είναι υπεύθυνο για την ένταση (volume) του ήχου κάθε καναλιού. Ο ρυθμιστής αυτός είναι συνήθως ένα συρόμενο ποτενσιόμετρο, αλλά μερικές κονσόλες μίξης, πιο μικρές σε μέγεθος, έχουν περιστρεφόμενα κουμπιά.

### 8.2.6 Διακόπτης Mute

Ένα κανάλι μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας χρησιμοποιώντας τον διακόπτη mute, δηλαδή να γίνει «βουβό». Είναι σημαντικό η λειτουργία αυτού του διακόπτη να γίνεται «καθαρά» και χωρίς θορύβους, αλλιώς σε κάποια ηχογράφηση που θα χρειαστεί να κάνετε mute ένα κανάλι στη διάρκεια της μίξης, μπορεί να γραφτεί ο θόρυβος του on-off στη μαγνητοταινία. Κατά τα άλλα η παρουσία ενός διακόπτη mute βοηθάει πάρα πολύ στη ρύθμιση του κάθε καναλιού ξεχωριστά, γιατί ανοιγοκλείνοντας τους διακόπτες, μπορείτε κατά περίπτωση να εντοπίσετε κάποια παραμόρφωση, ή και να κάνετε ακρόαση από το monitor μόνο ενός καναλιού κλείνοντας τα υπόλοιπα κλπ.

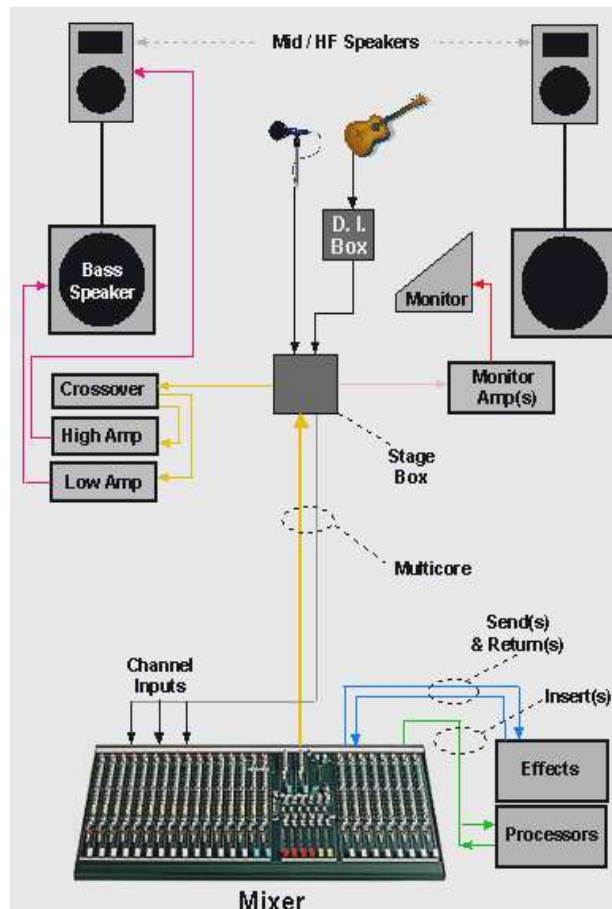


Σχήμα 8.4. Σχηματική απεικόνιση εισαγωγής και επιστροφής σήματος, όπου γίνεται κατανοητή και η διαφορά μεταξύ pre- και post- fader δρομολόγησης.

### 8.2.7 Insert (εισαγωγές/παρεμβολές σήματος)

Δίπλα στις υποδοχές mic/line υπάρχουν συνήθως δύο άλλες υποδοχές για βύσμα-καρφί (ή μία στέρεο βύσμα-καρφί) που ονομάζονται send (έξοδος) και return (επιστροφή). Αυτές είναι τα insert (βλ. Σχήμα 8.2(β)) και συμπληρώνουν (ή αντικαθιστούν) τις βοηθητικές υποδοχές auxiliary. Όπου υπάρχουν, σας προσφέρουν τη δυνατότητα επιπλέον σύνδεσης κάποιου εξωτερικού εφφέ όπως πχ ενός συμπιεστή (compressor).

### 8.3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ



Σχήμα 8.5: Η κονσόλα στο PA

#### 8.3.1 Η κονσόλα στο PA

Ο όρος Public Address System (ή P.A) χαρακτηρίζει τα ηχητικά συστήματα που απευθύνονται προς το κοινό σε μία μουσική συναυλία, ομιλία ή θεατρική παράσταση. Η P.A κονσόλα έχει επομένως ως πρωταρχικό σκοπό να ρυθμίσει τον ήχο που θα ακούει το κοινό, αν και καμιά φορά αναλαμβάνει και το δευτερεύον ρόλο του να ρυθμίσει το πως ακούνε και οι μουσικοί πάνω στη σκηνή. Το Σχήμα 8.5 δείχνει πώς τα κύρια συστατικά σε ένα σύστημα ήχου συνδέονται το ένα με το άλλο. Τα βέλη παρουσιάζουν την κατεύθυνση της ροής σημάτων.

Τα χαμηλού επιπέδου σήματα από τα pick-up των μουσικών οργάνων και από τα μικρόφωνα καθοδηγούνται στις εισόδους των καναλιών μέσω καλωδίου multi. Στις εισόδους της κονσόλας, τα σήματα ενισχύονται σε στάθμη line από τους προενισχυτές των εισόδων. Προτού να αναμιχθούν μαζί, τα line σήματα μπορούν να οδηγηθούν στους επεξεργαστές σήματος μέσω των insert. Μπορούν επίσης να προστεθούν εφε μέσω send-return. Από τις εξόδους της κονσόλας το μιξαρισμένο σήμα - που είναι ακόμα σε επίπεδο line - στέλνεται στα crossover και στους ενισχυτές των monitor. Μερικές φορές τα σήματα επιστροφής χρησιμοποιούν χωριστό καλώδιο multi, αλλά πιο συχνά το ίδιο καλώδιο χρησιμοποιείται και για των δύο κατευθύνσεων

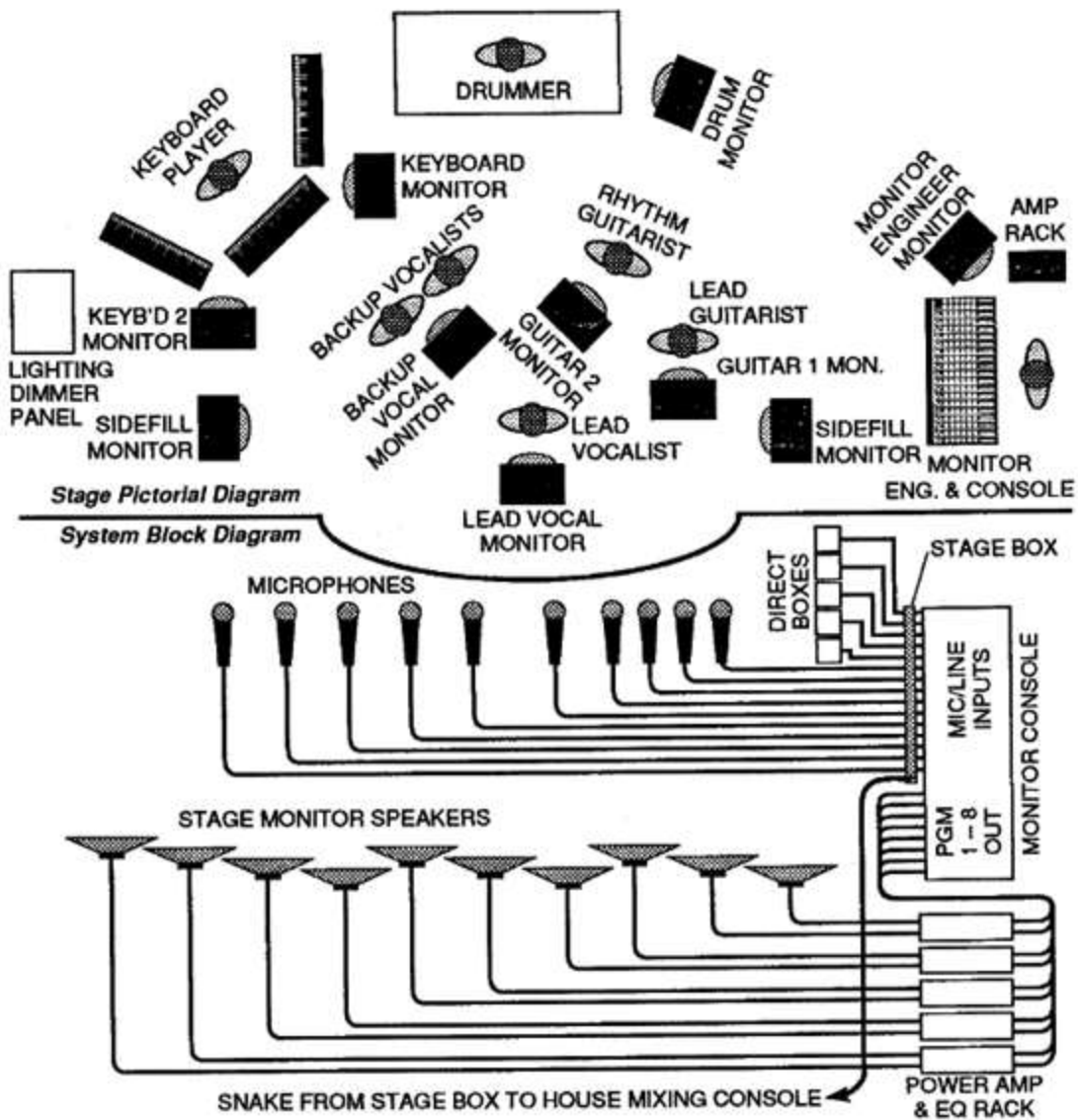
σήματα. Στα μικρότερα συστήματα δεν χρειάζεται απαραίτητα το καλώδιο multi, και μερικοί μίκτες συμπεριλαμβάνουν μονάδες εφε.

Τα μεγαλύτερα συστήματα διαφέρουν γενικά μόνο σε ποσότητα. Από πλευράς εισόδου και επεξεργασίας σήματος μπορούν να υπάρξουν περισσότερα κανάλια (με περισσότερες δυνατότητες ελέγχου) στην κονσόλα, μεγαλύτερο καλώδιο multi και περισσότερα εφε και επεξεργαστές σήματος. Στις μεγαλύτερες παραγωγές το stage box θα έχει περισσότερους από ένα συνδέτες καλωδίων multi, έτσι ώστε ένα άλλο καλώδιο multi και ένας άλλος μίκτης να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα monitor. Σε μεγαλύτερα stage μπορούν επίσης να υπάρξουν χωριστά μικρότερα καλώδια multi, (το 8-κάναλο multi είναι συνηθισμένο) που να τροφοδοτούν group σημάτων πάνω στο stage. Από πλευράς εξόδου το crossover μπορεί να έχει περισσότερες ζώνες συχνότητας, τροφοδοτώντας περισσότερους ενισχυτές ισχύος που στη συνέχεια τροφοδοτούν ηχεία με περισσότερα μεγάφωνα. Μπορούν ακόμη και να υπάρξουν μονάδες delay-line για ένα χρονοκαθυστερημένο σήμα, μια και θα υπάρχουν ηχεία μακριά από την σκηνή καθώς επίσης να χρησιμοποιήσουν τις ενεργά (active) crossover. Εντούτοις, το βασικό σχεδιάγραμμα θα ακολουθήσει ακόμα την ίδια μορφή.

### 8.3.2 Η κονσόλα για stage monitoring

Για να διεξαχθεί σωστά μια συναυλία και για να μπορούν οι μουσικοί να αποδώσουν το μέγιστο των δυνατοτήτων τους είναι απαραίτητο να ακούνε πάνω στη σκηνή μια καλή και ισορροπημένη εκδοχή αυτού που παίζουνε, τη στιγμή που το παίζουνε. Επίσης, είναι απαραίτητο ένας μουσικός να ακούει όχι μόνο το όργανό του, αλλά και τα άλλα όργανα, ώστε να υπάρχει συγχρονισμός πάνω στη σκηνή. Γενικά η P.A κονσόλα συχνά δεν μπορεί να καλύψει όλες τις ηχητικές ανάγκες των μουσικών πάνω στη σκηνή. Για να επιτευχθεί λοιπόν μια καλή ηχητική ισορροπία πάνω στη σκηνή χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα ηχεία *monitors* τα οποία βρίσκονται πάνω στη σκηνή και είναι εστραμμένα προς τους μουσικούς. Όπως ακριβώς και η βασική κονσόλα, χρειάζεται τώρα και εδώ μια ξεχωριστή συσκευή η οποία να ρυθμίζει ποιο μουσικό όργανο και με ποια ένταση θα πηγαίνει σε κάθε ηχείο monitor. Αυτή η κονσόλα λέγεται κονσόλα μόνιτορ (monitor console ή monitor mixing console). Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 8.6.

Για να ανταπεξέλθει λοιπόν μια stage κονσόλα στις ανάγκες μιας πολυμελούς μπάντας θα πρέπει να διαθέτει ένα αρκετό μεγάλο πλήθος από εξόδους, εκτός από εισόδους, αφού φανταστείτε ότι σε κάθε monitor ηχείο θα πρέπει είναι αφιερωμένη και διαφορετική έξοδος της κονσόλας. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση των auxiliary καναλιών στα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως. Με τα ρυθμιστικά του κάθε auxiliary καναλιού, ο ηχολήπτης καθορίζει αν και κατά πόσο θα στέλνεται το κάθε σήμα εισόδου σε κάθε μία από τις auxiliary εξόδους της κονσόλας. Κάθε auxiliary έξοδος είναι φυσικά συνδεδεμένη και με διαφορετικό monitor ηχείο. Συνήθως μεταξύ κονσόλας και monitor ηχείου παρεμβάλλεται και κάποιο γραφικό equalizer. Η δουλειά του equalizer σε αυτές τις περιπτώσεις σχετίζεται με την αποτροπή του φαινομένου του feedback. Το feedback είναι γνωστό και ως μικροφωνισμός, και αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο δημιουργείται σφύριγμα (βόμβος) όταν το μικρόφωνο τοποθετείται κοντά στο ηχείο.

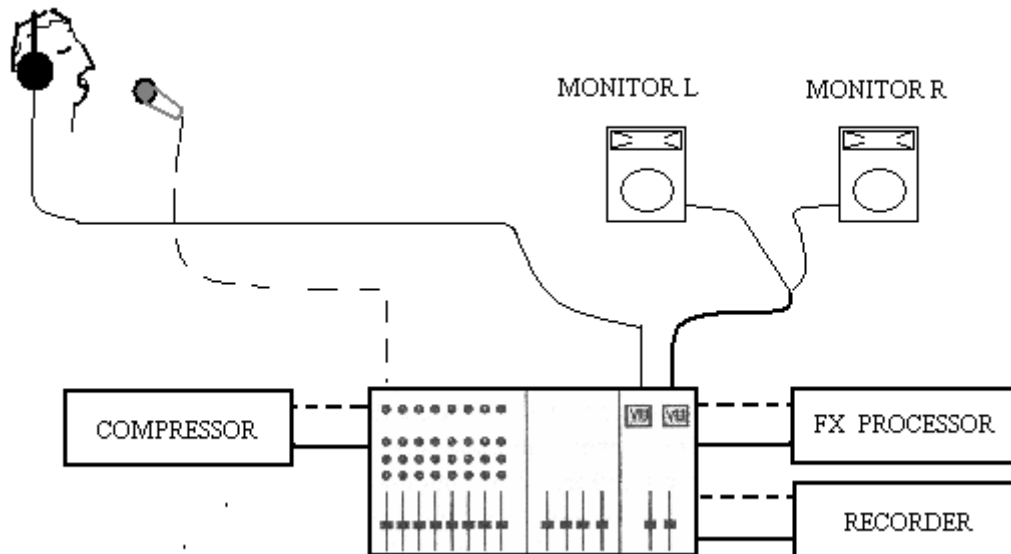


Σχήμα 8.6. Χρήση της κονσόλας για stage monitor mixing. Κάθε έξοδος της κονσόλας διατίθεται και σε διαφορετικό ηχείο monitor.

### 8.3.3 Η κονσόλα στο Studio ηχογράφησης

Σε αυτό το παράδειγμα θα περιγράψουμε τη χρήση της κονσόλας για ηχογράφηση στο στούντιο. Όπως θα γνωρίζεται, εκτός αν πρόκειται για live ηχογράφηση όπου όλοι οι μουσικοί παίζουν και ηχογραφούν ταυτόχρονα, συνηθίζεται να εφαρμόζεται μια τεχνική που λέγεται layering. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, τα μουσικά όργανα και οι φωνές δεν ηχογραφούνται ταυτόχρονα, αλλά δημιουργείται κάποια ηχητική βάση, πάνω στην οποία έρχεται ο κάθε μουσικός και προσθέτει το όργανό του χωριστά. Ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι έχει ήδη ηχογραφήσει ο drummer, ο μπασίστας και ο κιθαρίστας και ότι είναι η σειρά του τραγουδιστή. Ο τραγουδιστής τη στιγμή που τραγουδάει θέλει να ακούει τα ντραμς, το μπάσο και την κιθάρα σε μια ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ τους. Αυτό είναι απαραίτητο για να συγχρονιστεί με το

κομμάτι, αλλά και για να έχει αίσθηση του τόνου (pitch) ή της κλίμακας του κομματιού. Η συγκεκριμένη απαίτηση καλύπτεται λοιπόν από τη διασύνδεση της κονσόλας με το μέσο ηχογράφησης, που στο σχήμα αναφέρεται ως RECORDER, και το οποίο μπορεί να είναι μαγνητοταινία, σκληρός δίσκος κ.α. Κατά την ηχογράφηση, εισέρχεται στην κονσόλα η προηχογραφημένη βάση και στέλνεται στα ακουστικά του τραγουδιστή, ενώ την ίδια στιγμή το σήμα της φωνής εξέρχεται ενισχυμένο από την κονσόλα και στέλνεται σε κάποιο καθορισμένο κανάλι του recorder. Την ίδια στιγμή, το σήμα της φωνής πρέπει ενδεχομένως να υπόκειται σε κάποια επεξεργασία όπως compression (συμπίεση) ή προσθήκη αντήχησης. Για αυτό το λόγο παρεμβάλλονται οι συσκευές του compressor και του Fx Processor που φαίνονται στο Σχήμα 8.7. Κάθε στιγμή, εξέρχεται από την κονσόλα το ανεπεξέργαστο σήμα (dry) και εισέρχεται το επεξεργασμένο σήμα (wet) από την κατάλληλη συσκευή. Ο ηχολήπτης προφανώς είναι υπεύθυνος για να συνδυάζει όλα αυτά τα σήματα και να καθορίζει τη μίξη τόσο στα ακουστικά του τραγουδιστή όσο και στα monitor του control room (για να ακούει και ο ίδιος).



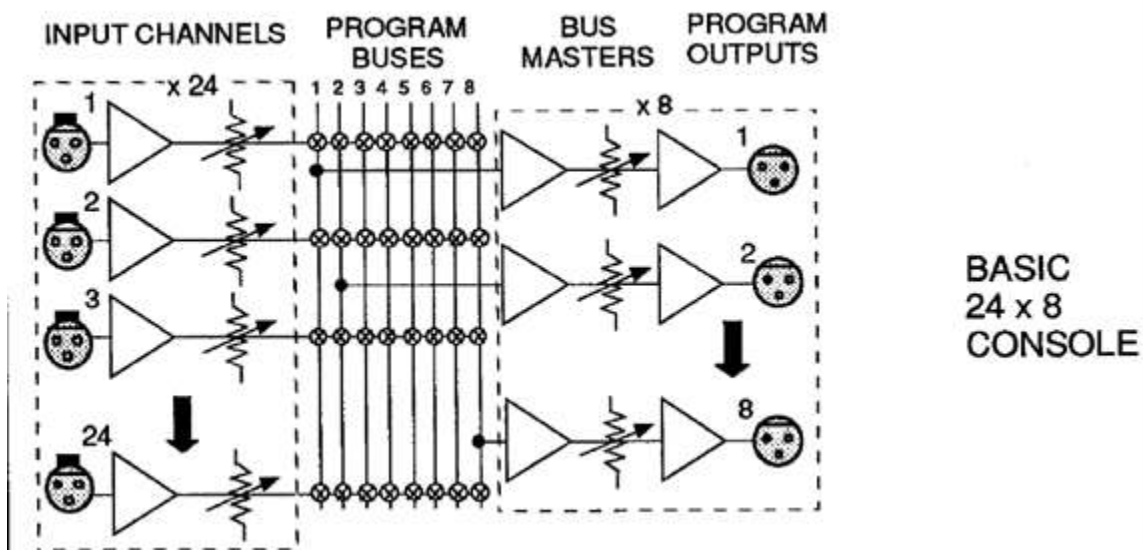
*Σχήμα 8.7. Χρήση της κονσόλας για ηχογράφηση στο στούντιο. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν είσοδο στην κονσόλα και οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν έξοδο από την κονσόλα.*

Από αυτά τα παραδείγματα φαίνεται καταρχάς η ανάγκη για εξειδίκευση της κονσόλας μίξης ανάλογα με το είδος της εφαρμογής (συναυλία, monitor console ή main console, studio ηχογράφησης κλπ) και λαμβάνεται μια πρώτη εντύπωση για την προέλευση ή τον προορισμό των σημάτων εισόδου και εξόδου της κονσόλας αντίστοιχα. Κατανοώντας τις απαιτήσεις που έχουμε ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, γίνεται ταυτόχρονα ευκολότερη και η κατανόηση των block διαγραμμάτων κονσόλας που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες.

## 8.4 ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Το block διάγραμμα είναι μια γραφική περιγραφή της ροής του σήματος μέσα από μία συσκευή και των λειτουργιών που αυτή παρεμβάλλει. Το block διάγραμμα θεωρεί τη συσκευή σαν ένα σύνολο από διαφορετικές λειτουργίες που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με μια συγκεκριμένη σειρά.

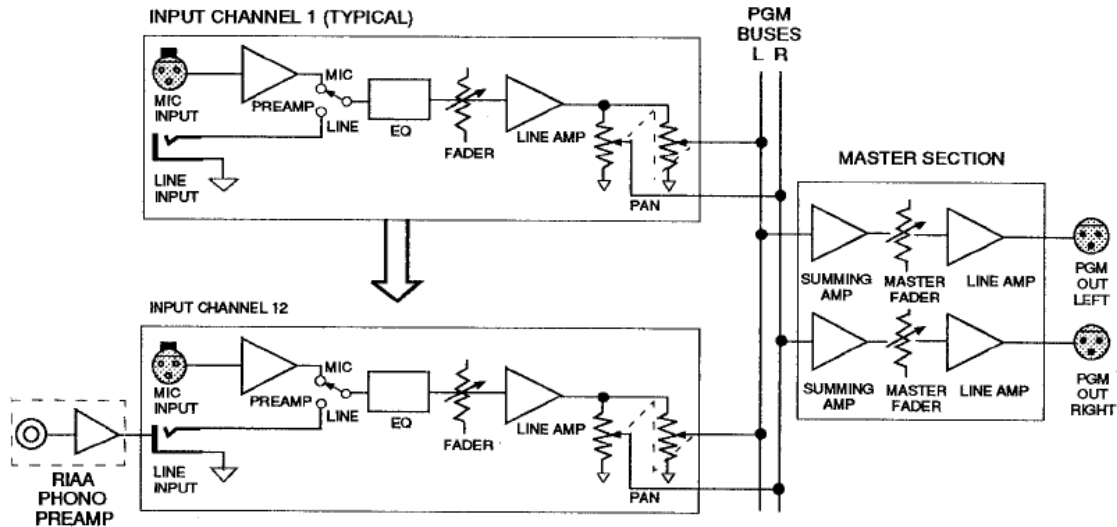
Στο πρώτο μπλοκ διάγραμμα που παραθέτουμε παρακάτω (Σχήμα 8.8) φαίνεται η ροή του σήματος σε μια κονσόλα 24 εισόδων και 8 εξόδων (24 in – 8 out). Για οικονομία στο χώρο, απεικονίζονται μόνο οι 4 από τις 24 εισόδους και μόνο οι 3 από τις 8 εξόδους. Από το χαρακτηριστικό σχήμα που έχουν οι υποδοχείς εισόδου και εξόδου καταλαβαίνουμε ότι η κονσόλα τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο δέχεται βύσμα XLR. Αυτόματα αυτό σημαίνει ότι τα σήματα εισόδου και εξόδου είναι ισοσταθμισμένα (balanced). Το τρίγωνο με τον μεταβλητό αντιστάτη αμέσως μετά την είσοδο του σήματος φανερώνουν την ύπαρξη προενισχυτή ο οποίος χρειάζεται για να προσαρμόσει το σήμα στις στάθμες έντασης που είναι επιθυμητές για την περαιτέρω μεταφορά και επεξεργασία του σήματος εισόδου.



Σχήμα 8.8. Block διάγραμμα κονσόλας 24 in – 8 out (μονο). Το σύμβολο ⊗ υποδηλώνει ενδεχομένως την ύπαρξη πανοραμικού ποτενσιόμετρου το οποίο καθορίζει σε ποιο βαθμό στέλνεται το κανάλι εισόδου στο κάθε κανάλι εξόδου.

Το σήμα εισόδου, συνεχίζοντας τη διαδρομή του, περνάει από κάθε μία από τις 8 κεντρικές αρτηρίες της κονσόλας (αρτηρία = bus). Σε κάθε αρτηρία, υπερτίθεται το σήμα από κάθε είσοδο και αποστέλνεται στην έξοδο. Παρατηρείστε ότι κάθε κανάλι εξόδου είναι συνδεδεμένο με μία μόνο αρτηρία κάθε φορά, ενώ κάθε κανάλι εισόδου είναι συνδεδεμένο με όλες τις αρτηρίες. Με το σύμβολο υπονοείται η ύπαρξη διακόπτη ο οποίος καθορίζει αν θα στέλνεται το κανάλι εισόδου στην κάθε αρτηρία και επομένως και στο αντίστοιχο κανάλι εξόδου. Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, το κάθε υποδηλώνει ουσιαστικά την ύπαρξη ενός τέτοιου διακόπτη. Επειδή έχουμε να μοιράσουμε 24 κανάλια εισόδου σε 8 κανάλια εξόδου χρειαζόμαστε 8 κεντρικές αρτηρίες και  $24 \times 8 = 192$  περιστροφικά ποτενσιόμετρα (auxiliary sends).

Για να γίνει σωστά η πρόσθεση των σημάτων εισόδου χρειάζεται ένας προσθετικός ενισχυτής (summing amplifier) για κάθε αρτηρία. Ο προσθετικός ενισχυτής αναπαρίσταται πάλι στο σχήμα από ένα τρίγωνο. Το σύμβολο της μεταβλητής αντίστασης μετά από τον προσθετικό ενισχυτή υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιου ποτενσιόμετρου (περιστροφικού ή συρόμενου τύπου) το οποίο επηρεάζει την τελική ένταση του κάθε καναλιού εξόδου. Το τελευταίο τρίγωνο που συναντάμε σε κάθε έξοδο συμβολίζει την ύπαρξη ενός επιπλέον ενισχυτή ο οποίος συνήθως είναι απαραίτητος για να γίνει σωστά η διασύνδεση με τον όποιο εξοπλισμό συνδέεται με την έξοδο της κονσόλας. Σε πολλές περιπτώσεις, η τελευταία αυτή βαθμίδα είναι απαραίτητη για τη μετατροπή του σήματος από unbalanced σε balanced κανάλι εξόδου.

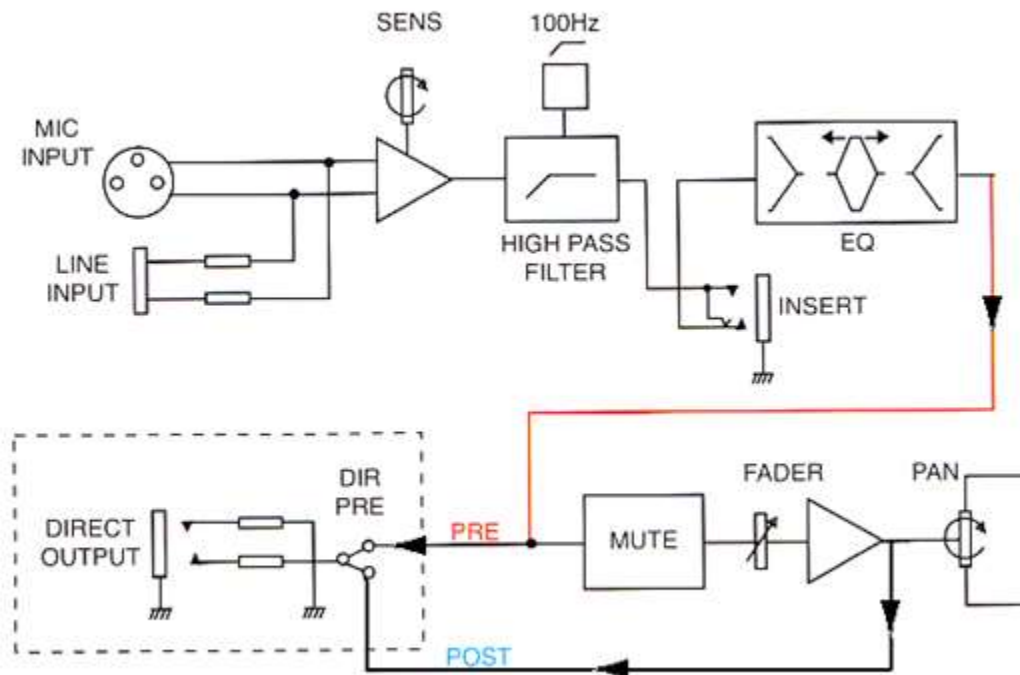


Σχήμα 8.9: Block διάγραμμα κονσόλας 12 in – 2 out (1 stereo).

Στο Σχήμα 8.9 φαίνεται το block διάγραμμα μιας κονσόλας 12 εισόδων που συνδέονται με μία στερεοφωνική έξοδο. Στο πρώτο στάδιο εισόδου παρατηρούμε την δυνατότητα σύνδεσης είτε ενός XLR (mic input) είτε ενός μονοφωνικού καρφιού (line input). Επειδή ο διακόπτης που φαίνεται στο σχήμα μπορεί να είναι είτε στη θέση mic είτε στη θέση line, σημαίνει ότι στην κονσόλα θα προχωρήσει το σήμα μόνο από το μικρόφωνο ή μόνο από το καρφί αλλά όχι και τα δύο. Το ποια από τις υποδοχές θα λειτουργήσει εξαρτάται από το αν υπάρχει καρφί ή όχι στην υποδοχή. Παρατηρούμε επίσης ότι δεν υπάρχει προενισχυτής συνδεδεμένος σε σειρά με την είσοδο line. Από το σχήμα της υποδοχής του mic input (βύσμα XLR) καταλαβαίνουμε ότι το συγκεκριμένο σήμα εισόδου είναι ισοσταθμισμένο (balanced). Όσον αφορά το line input, δε βλέπουμε να παρεμβάλλεται κάποιος διαφορικός ενισχυτής ή μετασηματιστής πριν την σύνδεσή του με τα επόμενα στάδια της κονσόλας, οπότε είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το σήμα είναι unbalanced. Στο αμέσως επόμενο στάδιο της κονσόλας παρατηρούμε ένα equalizer για το οποίο όμως δε μας δίνονται λεπτομέρειες όσον αφορά τις παραμέτρους που μπορούμε να ρυθμίσουμε. Μετά το equalizer συναντούμε το κεντρικό fader του καναλιού εισόδου. Μεταξύ του fader και του πανοραμικού ποτενσιόμετρου (pan) βλέπουμε ένα ενισχυτή (line amp). Ο ενισχυτής αυτός προσδίδει ένα σταθερό κέρδος τάσης στο σήμα (πχ +15dB) και είναι απαραίτητος για να γίνει σωστά η διασύνδεση του σήματος με τα επόμενα στάδια της κονσόλας. Το πανοραμικό ποτενσιόμετρο αποτελείται από δύο συζευγμένες μεταβλητές

αντιστάσεις. Ο σκοπός αυτής της συνδεσμολογίας είναι να δώσει στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίσει τη συμμετοχή του κάθε καναλιού εισόδου στο left και στο right κανάλι εξόδου και να διαμορφώσει κατ' αυτόν τον τρόπο την στερεοφωνική εικόνα. Μεταβάλλοντας τη θέση του περιστροφικού ποτενσιόμετρου, η τιμή της μίας αντίστασης αυξάνεται, τη στιγμή που αυτή της άλλης ελαττώνεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα είναι δυνατόν να αποστέλλεται στις δύο εξόδους με οποιαδήποτε θεμιτή αναλογία, στρέφοντας την ηχητική εικόνα από τέρμα αριστερά μέχρι τέρμα δεξιά, με τον τρόπο που φαίνεται και στο σχήμα 8.3.

Συνεχίζοντας την ανάλυση στο μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 8.9, βλέπουμε πάλι την ύπαρξη ενός προσθετικού ενισχυτή σε κάθε κανάλι εξόδου ο οποίος είναι απαραίτητος για την άθροιση όλων των σημάτων εισόδου που διαμορφώνουν το τελικό σήμα εξόδου στο αριστερό και δεξί κανάλι του προγράμματος. Παρατηρούμε ότι η ένταση του left και του right καναλιού εξόδου καθορίζεται μέσω δύο fader (master fader) που λειτουργούν αυτόνομα το ένα σε σχέση με το άλλο, δηλαδή δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ τους. Τα fader αυτά καθορίζουν την τελική ένταση και συνήθως δε συμβάλλουν στη διαμόρφωση της στερεοφωνικής εικόνας. Η στερεοφωνική εικόνα καθορίζεται από τα πανοραμικά ποτενσιόμετρα σε κάθε κανάλι εισόδου, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Στο τελικό στάδιο της κονσόλας βλέπουμε πάλι έναν ενισχυτή ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του σήματος από unbalanced σε balanced, πιθανόν προσδίδοντας και κάποια επιπλέον ενίσχυση στη στάθμη του σήματος.



Σχήμα 8.10.: Block διάγραμμα ενός καναλιού εισόδου το οποίο διαθέτει insert και direct out.

Στο Σχήμα 8.10 παρατίθεται το block διάγραμμα από ένα κανάλι εισόδου μιας κονσόλας που διαθέτει insert και direct out. Και πάλι εδώ βλέπουμε τη δυνατότητα να συνδέσουμε είτε XLR

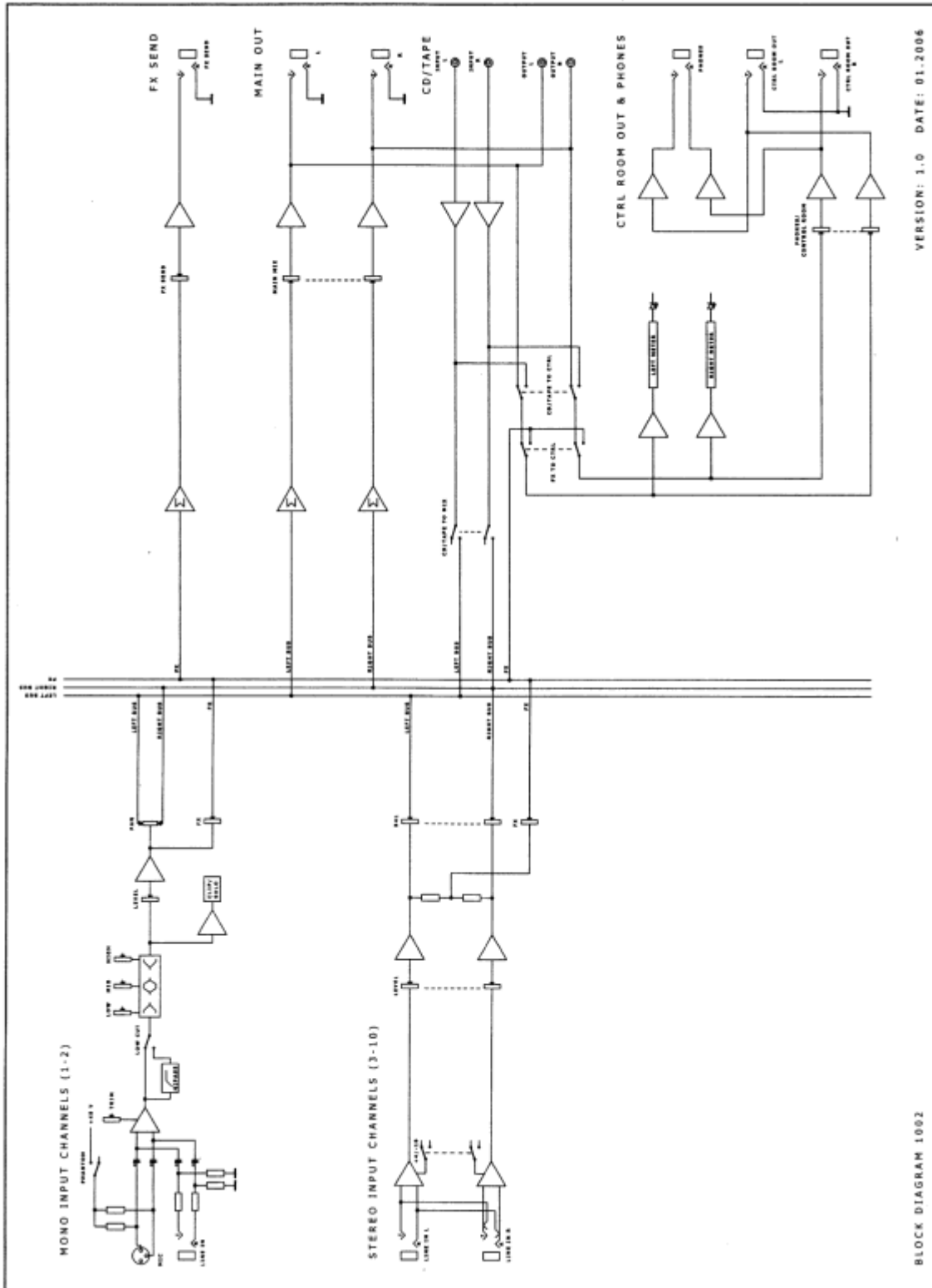
είτε καρφί στην είσοδο της κονσόλας, με τη διαφορά ότι τώρα και η line είσοδος περνάει από το διαφορικό προενισχυτή. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα διαγράμματα, βλέπουμε τώρα να απεικονίζονται δύο αγωγοί κατά τη σύνδεση του mic και line input στο διαφορικό ενισχυτή, γεγονός που δηλώνει ξεκάθαρα ότι η mic και η line εισόδοι είναι ισοσταθμισμένες. Μετά από το διαφορικό ενισχυτή το σήμα έχει μετατραπεί σε unbalanced και εισέρχεται από ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης, με συχνότητα αποκοπής 100 Hz, το οποίο είναι δυνατόν να επενεργεί πάνω στο σήμα ή να παρακάμπτεται εντελώς, ανάλογα με τη θέση του διακόπτη (on/off).

Η υποδοχή insert χρησιμεύει για τη σύνδεση περιφερειακού εξοπλισμού, όπως πχ. ενός compressor, για την περεταίρω επεξεργασία του σήματος. Για να ενεργοποιηθεί η υποδοχή insert θα πρέπει να συνδέσουμε ένα στερεοφωνικό καρφί, δηλαδή βύσμα με δύο αγωγούς (εκτός από τη γείωση), ώστε με τον ένα αγωγό να στέλνουμε το ανεπεξέργαστο (dry) σήμα και με τον άλλο να επιστρέφει το επεξεργασμένο (wet) σήμα. Αν δεν εισαχθεί κάποιο βύσμα στην υποδοχή insert, τότε οι δύο αγωγοί είναι βραχυκυκλωμένοι και το σήμα συνεχίζει ανενόχλητο την πορεία του στο equalizer.

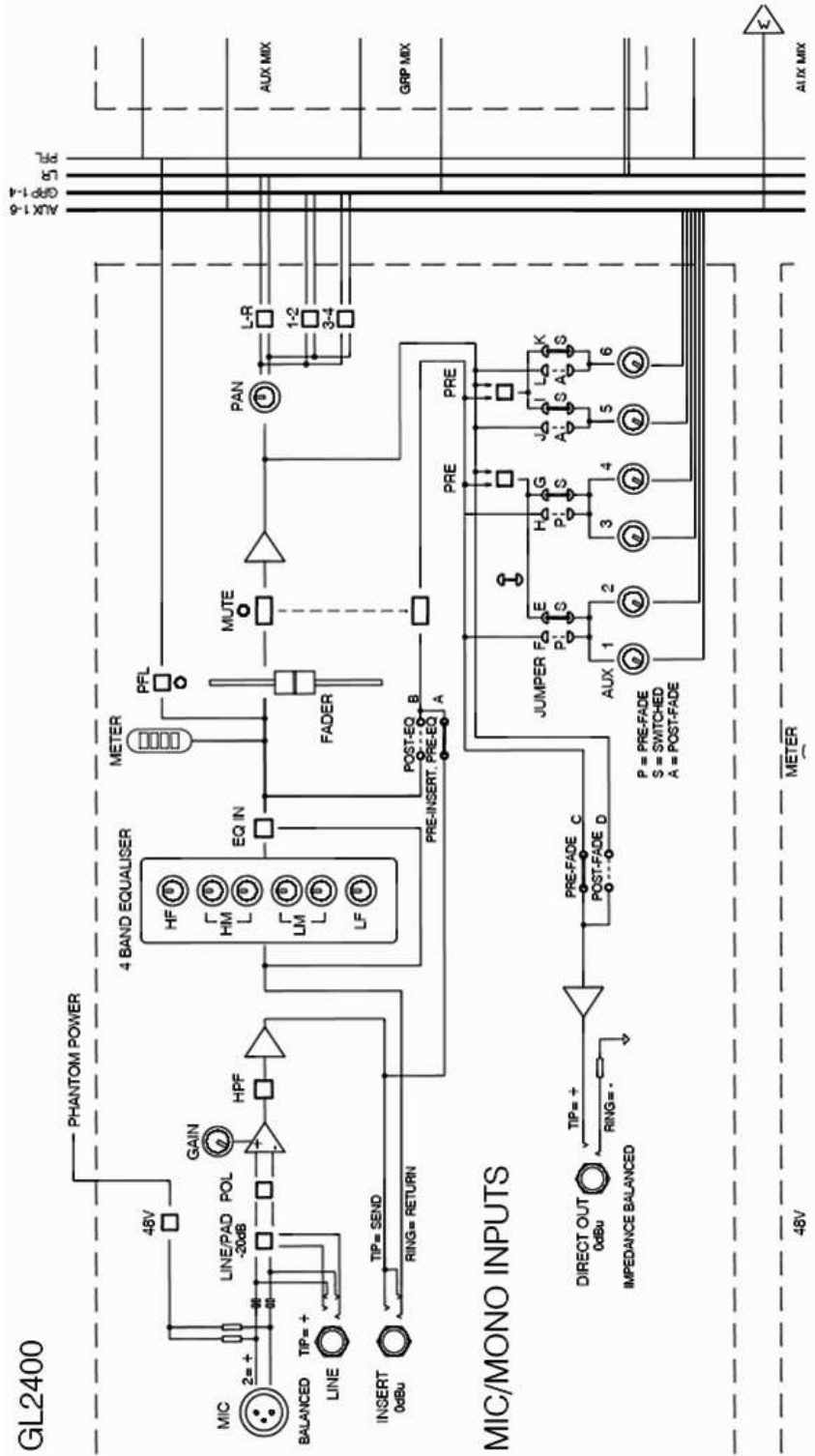
Το συγκεκριμένο equalizer βλέπουμε ότι είναι τριών περιοχών συχνοτήτων: χαμηλών, μεσαίων και υψηλών. Από το Σχήμα 8.10 καταλαβαίνουμε ότι στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες μπορούμε να ρυθμίσουμε μόνο ενίσχυση – εξασθένηση, ενώ στις μεσαίες συχνότητες μπορούμε εκτός αυτού να μεταβάλλουμε και την κεντρική συχνότητα. Το σήμα μετά συνεχίζει την πορεία του προς δύο διαφορετικές κατευθύνσεις: προς το πανοραμικό ποτενσιόμετρο (pan) και προς μία έξοδο που λέγεται direct output. Η έξοδος αυτή είναι χρήσιμη γιατί μας επιτρέπει να πάρουμε μια εκδοχή του σήματός (ενισχυμένη από τον προενισχυτή) και να τη στείλουμε στο μέσο ηχογράφησης (μαγνητοταινία, σκληρός δίσκος, κλπ), χωρίς να χρειάζεται να δεσμεύουμε κάποια από τις εξόδους της κονσόλας που τις θέλουμε για το PA, τα monitors των μουσικών ή για ακουστικά. Όπως μπορούμε να δούμε, το σήμα φτάνει στο direct output μέσω δύο διαφορετικών διαδρομών που μπορούμε να επιλέξουμε εναλλακτικά. Στη μία περίπτωση, το σήμα διέρχεται από το mute, μετά από το fader και έπειτα στέλνεται στο direct output. Αυτή η επιλογή, η οποία λέγεται post-fader, εξασφαλίζει ουσιαστικά ότι το σήμα που λαμβάνουμε από το direct output επηρεάζεται από κάθε χειρισμό του mute και του fader. Η άλλη επιλογή λέγεται pre-fader, και στέλνει το σήμα απευθείας μετά το equalizer, πριν δηλαδή περάσει από το mute και το fader. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να έχουμε μία ενισχυμένη εκδοχή του σήματος, χωρίς αυτό να επηρεάζεται από οποιονδήποτε χειρισμό του mute και του fader. Πρέπει να πούμε τέλος ότι η συγκεκριμένη έξοδος του direct output είναι τύπου ισοσταθμισμένης σύνθετης αντίστασης (impedance balanced). Αυτό σημαίνει ότι το καρφί που συνδέουμε στο direct output για να πάρουμε το σήμα βλέπει ακριβώς την ίδια σύνθετη αντίσταση στον αγωγό που φέρει το σήμα και στη γείωση, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την αλληλεξουδετέρωση του θορύβου που υπάγεται στο καλώδιο, κατά τη διέλευση του από διαφορικό ενισχυτή.

Ο φοιτητής καλείται να προσπαθήσει να διαβάσει και κατανοήσει και τα παρακάτω block διαγράμματα τα οποία θα αναλυθούν στο μάθημα αλλά δε θα γίνει εδώ περισσότερος λόγος. Στο Σχήμα 8.11 απεικονίζεται το block διάγραμμα της κονσόλας του εργαστηρίου όπου βλέπουμε ότι έχουμε και στερεοφωνικές εισόδους εκτός από μονοφωνικές, ενώ στο Σχήμα 8.12 απεικονίζεται ένα μπλοκ διάγραμμα από κονσόλα του εμπορίου.

### Block Diagram of XENYX 1002



Σχήμα 8.11. Block διάγραμμα της κονσόλας του εργαστηρίου.



Σχήμα 8.12 Block διάγραμμα κονσόλας.

## 9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

### 9.1 ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΙ

#### 9.1.1 Ιδιότητες λογαρίθμων και χαρακτηριστικές τιμές

$\log ab = \log a + \log b$	$20\log A = 10\log A^2$
$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$	$20\log \sqrt{2} = 10\log 2 = 3$
$\log a^b = b \log a$	$20\log 2 = 6$
$\log_{10} a = b \Leftrightarrow a = 10^b$	$20\log \frac{1}{2} = -6$
	$\log 10 = 1$ άρα $20\log 10 = 20$

#### 9.1.2 Λογαριθμικές μονάδες στην ηλεκτρακουστική

$$\text{dB SPL} = L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}}, \text{ όπου } p \text{ πίεση σε } \mu\text{Pa},$$

Άρα, 0dB SPL αντιστοιχούν σε  $p = p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$

$$\text{dBu} = 20 \log_{10} \frac{V}{0.775}, \text{ όπου } V \text{ τάση σε Volt},$$

Άρα, 0dBu = 0.775 Volt

$$\text{dBm} = 10 \log_{10} \frac{W}{0.001}, \text{ όπου } W \text{ ισχύς σε Watt}$$

Άρα 0dBm = 0.001 Watt = 1mW

$$\text{dBW} = 10 \log_{10} \frac{W}{1}, \text{ όπου } W \text{ ισχύς σε Watt}$$

Άρα 0dBW = 1 Watt

## 9.2 ΜΙΓΑΔΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

Συνιστάται μία επανάληψη από τα μαθηματικές πηγές που έχετε διδαχτεί. Συνοψίζω ωστόσο παρακάτω κάποιες χρήσιμες ιδιότητες και ορισμούς για τους μιγαδικούς αριθμούς.

$$z = a + jb, \quad j = \sqrt{-1} \text{ και } j^2 = -1$$

Πραγματικό μέρος  $\text{Re}\{z\} = a$ ,

Φανταστικό μέρος  $\text{Im}\{z\} = b$

Συζυγής μιγαδικού αριθμού: αν  $z = a + jb$ , τότε  $\bar{z} = a - jb$  και  $z\bar{z} = a^2 + b^2$

Μέτρο μιγαδικού αριθμού:  $|z| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{z\bar{z}}$

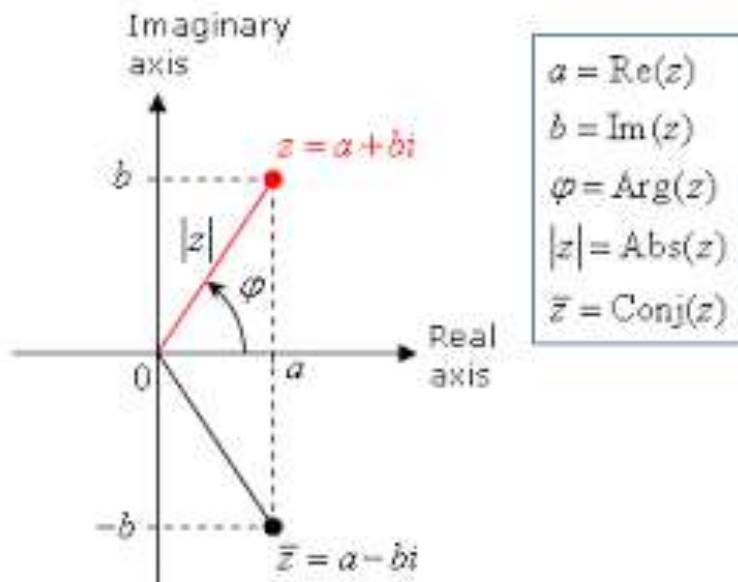
Πρόσθεση μιγαδικών:  $(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$

Διαίρεση μιγαδικών:  $\frac{a+jb}{c+jd} = \frac{(a+jb)(c-jd)}{(c+jd)(c-jd)} = \frac{(a+jb)(c-jd)}{c^2+d^2} = \frac{ac+bd+j(bc-ad)}{c^2+d^2}$

Μιγαδικοί με φανταστικό μέρος μόνο:  $\frac{1}{jb} = \frac{j}{j^2b} = \frac{j}{-b} = \frac{-j}{b}$  επίσης  $|jb| = b$

Μιγαδικό phasor  $e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi$

Κάθε μιγαδικός αριθμός  $z = a + jb$  μπορεί να γραφεί στη μορφή  $z = re^{j\varphi}$ , όπου  $r = |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$  είναι το μέτρο του μιγαδικού αριθμού και  $\varphi$  είναι η γωνία ( $\text{Arg}(z)$ ) που σχηματίζει ο μιγαδικός αριθμός στο μιγαδικό επίπεδο



Σχήμα Π1: Αναπαράσταση μιγαδικού αριθμού στο μιγαδικό επίπεδο

## 10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- T. D. Rossing, F. R. Moore, and P. A. Wheeler, *The science of sound*, Addison Wesley (2002).
- L. L. Beranek, *Acoustics*, American Institute of Physics (1986).
- Γ. Παπανικολάου, *Ηλεκτρακουστική*. (2005).
- G. Davis, G. and G.D. Davis, *The sound reinforcement handbook*. Hal Leonard Corporation (1989)