


Μάθημα: «Ηλεκτροακουστική & Ακουστική Χώρων»
Διάλεξη 2^η: «Ηλεκτροακουστικοί Μετατροπείς - Μικρόφωνα»

Φλώρος Ανδρέας
 Επίκ. Καθηγητής



Από το προηγούμενο μάθημα...

- Μικρόφωνα
- Προενισχυτές
 - Μικροφώνου
 - Τάσης
- Μείκτες
- Ενισχυτές ισχύος
- Μεγάφωνα
- Ηχεία
- Διασυνδέσεις




Από το προηγούμενο μάθημα...



- Στάθμη ηχητικής πίεσης (Sound Pressure Level – SPL ή L_p)

$$dB - SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \cdot P_{ref} = 2 \times 10^{-5} N/m^2$$

- Στάθμη έντασης ήχου (Intensity Level – IL ή L_I)

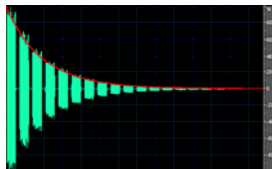
$$dB - IL = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right), \quad I_{ref} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

- Στάθμη ισχύος ήχου (PoWer Level – PWL ή L_W)

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



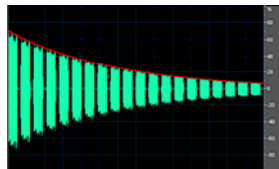
Η «αίσθηση» της ηχοστάθμης

**Σταδιακή μείωση στάθμης
θορύβου κατά 3 dB**




Χρόνος

**Σταδιακή μείωση στάθμης
θορύβου κατά 1 dB**




Χρόνος



Χρήση των μεγεθών

Sound Power



Power, W
[W = J/s]

$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB}$
($W_0 = 1 \text{ pW}$)

Sound Intensity

Intensity, I
[J/s/m² = W/m²]

$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$
($I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$)

Sound Pressure

Pressure, p
[N/m² = Pa]

$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB}$
($p_0 = 20 \text{ μPa}$)

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c}$$

Electro Acoustics

Παράδειγμα #1

- Σημειακή ηχητική πηγή στο ελεύθερο πεδίο παράγει 0.01Watt. Ποιά η στάθμη ηχητικής πίεσης σε απόσταση 1.5 μέτρου;

Sound Power

W = 0.01 Watt

$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \text{ dB}$
 $= 10 \log_{10} \frac{0.01}{10^{-12}} \text{ dB}$
 $L_w = 100 \text{ dB}$

Sound Intensity

?

Sound Pressure

?

Απάντηση: 85.64dB-SPL

Electro Acoustics

Παράδειγμα #2

- Ομιλητής (σφαιρική πηγή) παράγει ήχο ισχύος 0.001W που φθάνει σε μικρόφωνο σε απόσταση 2 μέτρων. Στον ίδιο χώρο λειτουργεί κι ένα σύστημα εξαερισμού (σφαιρική πηγή) ισχύος 0.0005W.
 - Προσδιορίστε την ηχητική στάθμη στη θέση του μικροφώνου μόνο από τον ομιλητή
 - Υπολογίστε την ελάχιστη απόσταση που πρέπει να τοποθετηθεί το σύστημα εξαερισμού ώστε στη θέση του μικροφώνου να υπάρχει διαφορά στάθμης 20dB μεταξύ των δύο ηχητικών πηγών

Απάντηση: 14m

Electro Acoustics

Παράδειγμα #3

- Δύο ηχητικές πηγές εκπέμπουν ηχητικά κύματα διαφορετικής συχνότητας. Αν η στάθμη ηχητικής πίεσης σε μία συγκεκριμένη θέση του πεδίου είναι 75 και 80 dB-SPL αντίστοιχα, βρείτε τη συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης εξαιτίας των δύο πηγών.

Προσοχή: Άθροιση πολλαπλών ασυσχετίστων ηχητικών πηγών

$$L_T = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{p_{ref}^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{p_1}{p_{ref}} \right)^2 + \left(\frac{p_2}{p_{ref}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{p_n}{p_{ref}} \right)^2 \right)$$

Electro Acoustics

Συσχετισμένες ηχητικές πηγές

Combination due to reflection Combination due to multiple sources

In-phase addition
Out-of-phase addition

Electro Acoustics

Ασυσχετίστες ηχητικές πηγές

Uncorrelated reflection due to long delay Uncorrelated multiple sources

Electro Acoustics

Γενικά θέματα Ηλεκτροακουστικών Μετατροπών

Electro Acoustics

Ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς

- Μετατρέπουν ακουστική/ηλεκτρική/μηχανική ενέργεια που παράγεται σε κάποιο υποσύστημα σε κάποια άλλη μορφή
 - Συνδιάζουν πολλαπλά στάδια ενεργειακής μετατροπής

Η/Α δέκτης, π.χ. μικρόφωνο

ακουστικό σήμα → [Ακουστικο-μηχανική μετατροπή] → μηχανικό σήμα → [Μηχανικο-ηλεκτρική μετατροπή] → ηλεκτρικό σήμα

Η/Α πηγή, π.χ. μεγάφωνο

ηλεκτρικό σήμα → [Ηλεκτρο-μηχανική μετατροπή] → μηχανικό σήμα → [Μηχανικο-ακουστική μετατροπή] → ακουστικό σήμα

Χρήση ηλεκτρομαγνητικού ή πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για μηχανο/ηλεκτρική μετατροπή

Χρήση μεμβράνης ή διαφράγματος για μηχανο/ακουστική μετατροπή

Electro Acoustics

Λίγη ιστορία...

- Τα πρώτα συστήματα Η/Α μετατροπέων
 - Phonoautograph
 - Leon Scott
 - Καταγραφή του ήχου σε παλλόμενη μεμβράνη με σταθερή πένα
 - Αδύνατη η αναπαραγωγή
 - Phonograph (μηχανο-ακουστικό σύστημα φωνόγραφου)
 - Thomas Edison
 - Εγγραφή σε κύλινδρο μαλακού υλικού (π.χ. Κερί)
 - Bell (σύστημα τηλεφώνου) – 1880
- Βάση η θεωρία του Maxwell



Edison Phonograph:
<http://tools.wikimedia.de/~gmaxwell/jorbis/30rbisPlayer.php?path=Avertising+Record.ogg&wikid=en>



Λίγη ιστορία... (συν.)

- Ηλεκτροδυναμικοί μετατροπέες (δεκαετία 1920)
 - Olson, Rice/Kellog
 - Πιεζοηλεκτρικοί
- Distributed Mode Loudspeakers (1997)
 - Η επιφάνεια εκπομπής δεν συμπεριφέρεται ως «συμπαγής»
- Ψηφιακά μικρόφωνα / ηχεία (2000 – σήμερα)
 - Μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό στο ηχείο



Ψηφιακά μικρόφωνα




Ψηφιακά ηχεία



Ευαισθησία μετατροπών


- Ορίζεται ως «ο λόγος του παραγόμενου έργου προς την εισερχόμενη ενέργεια»
- Αποτελεί μέτρο της απόδοσης του μετατροπέα
- Καθορίζει την απόκρισή του
- Π.χ. για μικρόφωνα
 - $S=(V/P)_{f=0}$
- Συνήθως εκφράζεται σε dB

$$SL = 20 \log \frac{S}{S_{ref}}$$
 - $S_{ref} = 1V/Pa$



Μοντελοποίηση ηλεκτροακουστικών συστημάτων

- Αναπαράσταση των ηλεκτροακουστικών συστημάτων ως ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων
- Στόχος η ανάλυση της λειτουργίας τους, ανεξάρτητα από το φυσικό μηχανισμό λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων τους
 - Ακουστικό
 - Μηχανικό
 - Ηλεκτρικό
- «Αναγωγή» σε ένα ισοδύναμο σύστημα αναφοράς με κοινές ιδιότητες φυσικής και μαθηματικών













Μοντελοποίηση ηλεκτροακουστικών συστημάτων (συν.)

- Τα ηλεκτρικά κυκλώματα αποτελούνται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία
 - Αντιστάσεις
 - Πυκνωτές
 - Πηνία / μετασχηματιστές
 - Πηγές σταθερής τάσης
 - Πηγές σταθερού ρεύματος
- Τα αντίστοιχα ακουστικά μεγέθη είναι
 - Ακουστική πίεση -> Ηλεκτρική τάση
 - Ταχύτητα όγκου -> Ηλεκτρικό ρεύμα




Αναλογίες στοιχείων και συστημάτων

Ηλεκτρικά	Μηχανικά	Ακουστικά
Αυτεπαγωγή L 	Μάζα m 	Αντίδραση M _A 
Χωρητικότητα C 	Ενδοτικότητα C _{in} = 1/k 	Υποχωρητικότητα C _A 
Αντίσταση R 	Απόσβεση R _A 	Αντίσταση R _A 



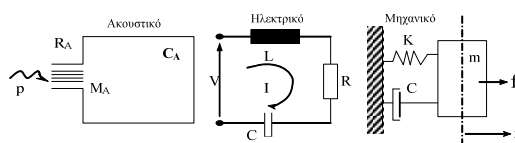
Αναλογίες στοιχείων και συστημάτων (συν.)

- Υποχωρητικότητα ή Ενδοτικότητα C_A
 - Η ικανότητα ενός εγκλωβισμένου όγκου αέρα να αποθηκεύει ακουστική ενέργεια
- Ακουστική αντίδραση M_A
 - Αντίσταση του μέσου στη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης
- Ακουστική αντίσταση R_A
 - Ενεργειακή απόσβεση λόγω τριβής
 - Π.χ. λόγω διέλευσης από το κάλυμα ενός ηχείου



Αναλογίες στοιχείων και συστημάτων (συν.)

- Βασικός συντονιστής



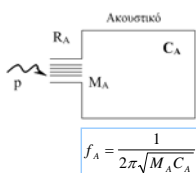
Ο βασικός ακουστικός συντονιστής (Helmholtz)

- Ισχύουν οι εξισώσεις:

$$k_A = \frac{1}{C_A} \quad C_A = \frac{V}{(\pi \cdot R^2) \rho c^2} \quad M_A = \frac{\rho L}{\pi R^2} \quad R_A = \frac{\rho c k^2 S^2}{2\pi}$$

- όπου

- R η ακτίνα του στομίου
- L το μήκος του στομίου
- V ο όγκος του δοχείου
- $k = \omega_A / c = 2\pi f_A / c$

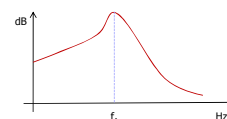


Παράδειγμα #4

- Δίνεται δοχείο όγκου $V=0.001\text{m}^3$, ακτίνας στομίου $R=0.01\text{m}$ και μήκος «λαιμού» $L=0.002\text{m}$. Να βρεθεί η συχνότητα ακουστικού συντονισμού, ο συντελεστής ποιότητας και το κέρδος της ακουστικής πίεσης στη συχνότητα συντονισμού

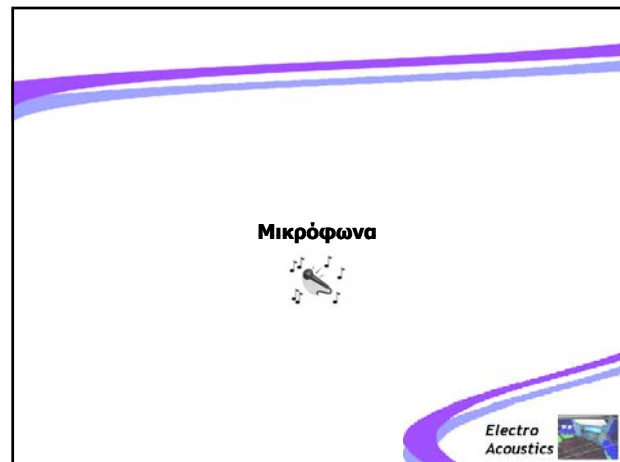
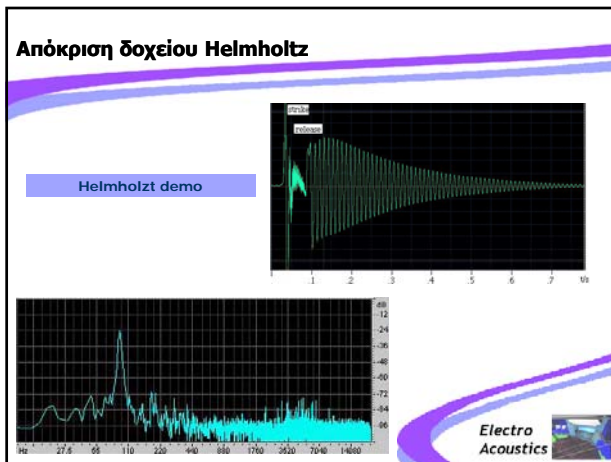
Συντελεστής ποιότητας: δείχνει πόσο «αχμηρή» είναι η απόκριση στη συχνότητα συντονισμού f_A

$$Q_A = \frac{\omega_A M_A}{R_A}$$



Απάντηση: $f_A=684\text{Hz}$, $Q_A=3.23\text{N sec m}^{-2}$ Κέρδος $G_A=20\log Q_A=80\text{dB}$

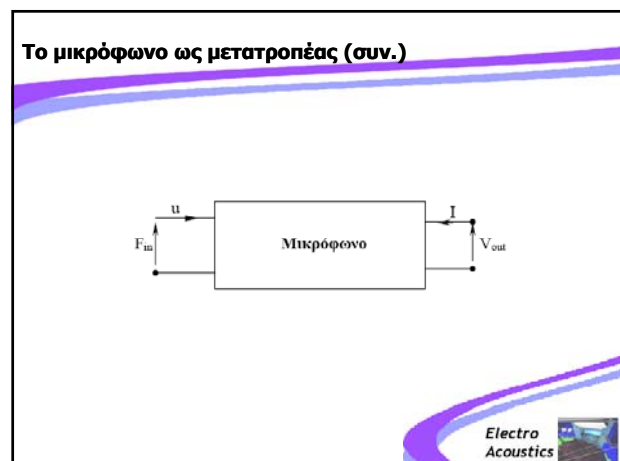


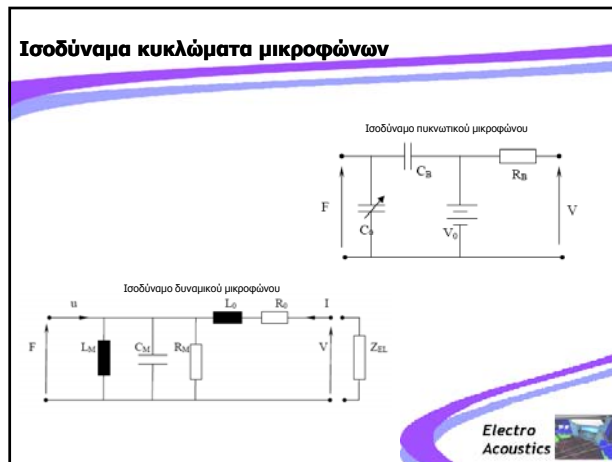
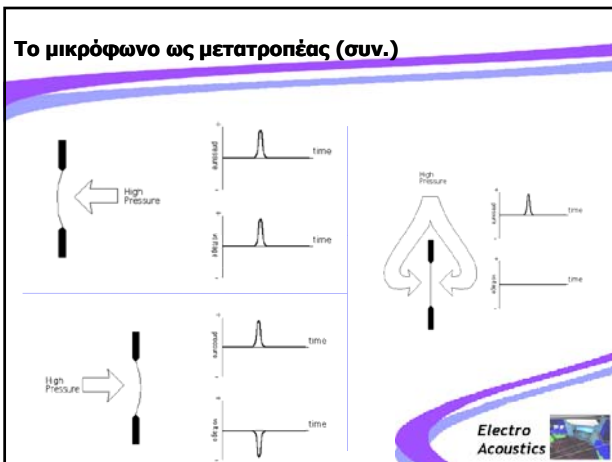


Το μικρόφωνο ως μετατροπέας

- Μετατροπή ακουστικής ενέργειας σε ηλεκτρική
- Βασικό στοιχείο μετατροπής: το διάφραγμα
 - Μετατρέπει την μεταβολή της ακουστικής πίεσης σε ηλεκτρική τάση
- Κατηγορίες μικροφώνων
 - Ηλεκτροδυναμικά
 - Κινητού πηνίου ή ταινίας (ribbon)
 - Ηλεκτροστατικά (πυκνωτικά)
 - Πιεζοηλεκτρικά
 - Κρυσταλλικά
 - Μεταβολή αντίστασης σώματος κρυστάλλων λόγω άσκησης πίεσης

Electro Acoustics





Βασικά χαρακτηριστικά μικροφώνων

The slide is mostly blank, with the title "Βασικά χαρακτηριστικά μικροφώνων" (Basic characteristics of microphones) centered on the page. The label "Electro Acoustics" is visible in the bottom right corner.

Ευσαιθησία μικροφώνων

- Ορισμός ευαισθησίας μικροφώνων

$$S = \left(\frac{V}{p} \right)_{f=0}$$

- Ορισμός στάθμης ευαισθησίας μικροφώνων

$$S.L_n = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}} \quad \text{ref} = 1V/1Pa$$

The slide defines microphone sensitivity and sensitivity level. It includes the formula for sensitivity $S = \left(\frac{V}{p} \right)_{f=0}$ and the formula for sensitivity level $S.L_n = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}}$ with a reference value of $1V/1Pa$. The label "Electro Acoustics" is visible in the bottom right corner.

Μέτρηση ευαισθησίας μικροφώνων

$S.L. = 20 \log_{10} V + 94 - \{dB_{SPZ}\}$ Με αναφορά το 1V και 1Pa
 $S.L. = 20 \log_{10} V + 74 - \{dB_{SPZ}\}$ Με αναφορά το 1V και 0.1Pa
 Π.χ. Για $V=1mV$ και $\{dB_{SPZ}\}=94dB$, τότε $S.L. = -80dB$ (με αναφορά το 1V και 0.1Pa)

Electro Acoustics

Μέτρηση ευαισθησίας μικροφώνων (συν.)

ΣΤΑΘΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ dB _{ref}	ΕΞΟΔΟΣ ΤΑΣΗΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ (V)	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ dB (ref = 1 V/Pa)
100	200 mV	-40
90	100 mV	-50
80	10 mV	-60
70	1 μV	-70
60	100 μV	-80
50	10 μV	-90
40	1 μV	-100
30		-110

Electro Acoustics

Κατευθυντικότητα μικροφώνων

- Γενικά, για ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς, η ευαισθησία εξαρτάται από
 - τη διεύθυνση ως προς τον άξονά τους
 - τη συχνότητα
- Η μεταβολή της ευαισθησίας εκφράζεται ως κατευθυντικότητα του μετατροπέα
 - Συνάρτηση $H(\theta, \phi)$ ή $S(\theta, \phi)$
- Παράδειγμα:
 - Για ένα μεγάφωνο ισχύει: $P(r, \theta, \phi) = P(r) \cdot H(\theta, \phi)$

Electro Acoustics

Πολικές συντεταγμένες – Μία περιήληψη

Electro Acoustics

Σφαιρικές συντεταγμένες – Μία περίληψη

$\chi(r, \theta, \phi)$

r

θ

ϕ

x

y

z

Electro Acoustics

Κατευθυντικότητα μικροφώνων (συν.)

$p(r, \theta) = p_m(r) H(\theta, r)$

0°

270°

90°

180°

Διευκατευθυντικά

0°

270°

90°

180°

Διευκατευθυντικά

0°

270°

90°

180°

Μονοκατευθυντικά

Η κατευθυντικότητα οφείλεται στο φαινόμενο της ενασκαμής από το διάφραγμα και εξαρτάται από τη συχνότητα

Electro Acoustics

Κατευθυντικότητα μικροφώνων (συν.)

Common polar patterns for microphones
(microphone facing up in diagram)

Omnidirectional	Cardioid	Hypercardioid	Bi-directional	Shotgun

Electro Acoustics

Κατευθυντικότητα μικροφώνων (συν.)

Πανοκατευθυντικό

Καρδιοειδές

Υπερκαρδιοειδές


Electro Acoustics

Κατευθυντικότητα μικροφώνων (συν.)

- Γενική σχέση κατευθυντικότητας μικροφώνων

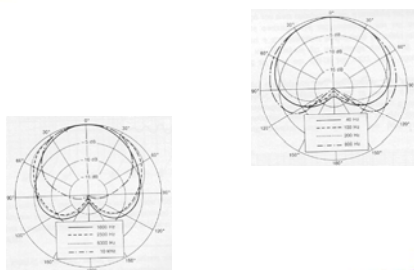
$$S = P + G \cdot \cos(\alpha)$$

Polar Pattern	P	G
Omnidirectional	1	0
Subcardioid	0.75	0.25
Cardioid	0.5	0.5
Supercardioid	0.333	0.666
Hypercardioid	0.25	0.75
Bidirectional	0	1



Electro Acoustics

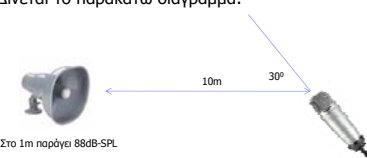
Κατευθυντικότητα μικροφώνων (συν.)



Electro Acoustics

Παράδειγμα #5

- Δίνεται το παρακάτω διάγραμμα:



Καρδιοειδές $H(\theta) = (1 + \cos\theta)/2$
 $S = 0.00002 \text{ V/Pa}$

- Ποιά η τάση στην έξοδο του μικροφώνου;

Στο 1m παράγει 88dB-SPL

Electro Acoustics

ΤΕΛΟΣ (για σήμερα...)



Electro Acoustics

