

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

7. ΜΕΓΑΦΩΝΑ & ΗΧΕΙΑ

Γιάννης Μουρτζόπουλος



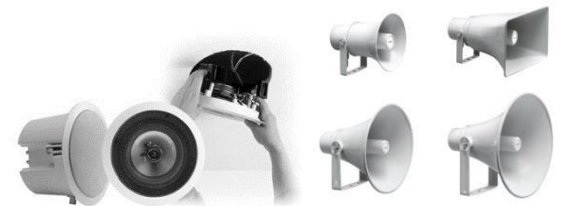
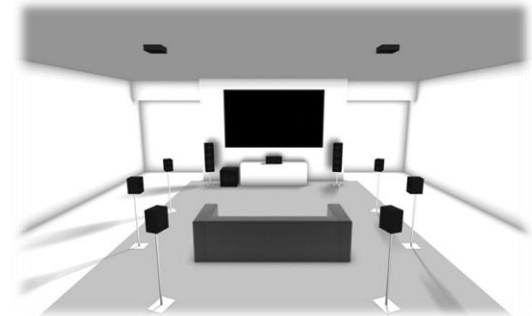
ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/

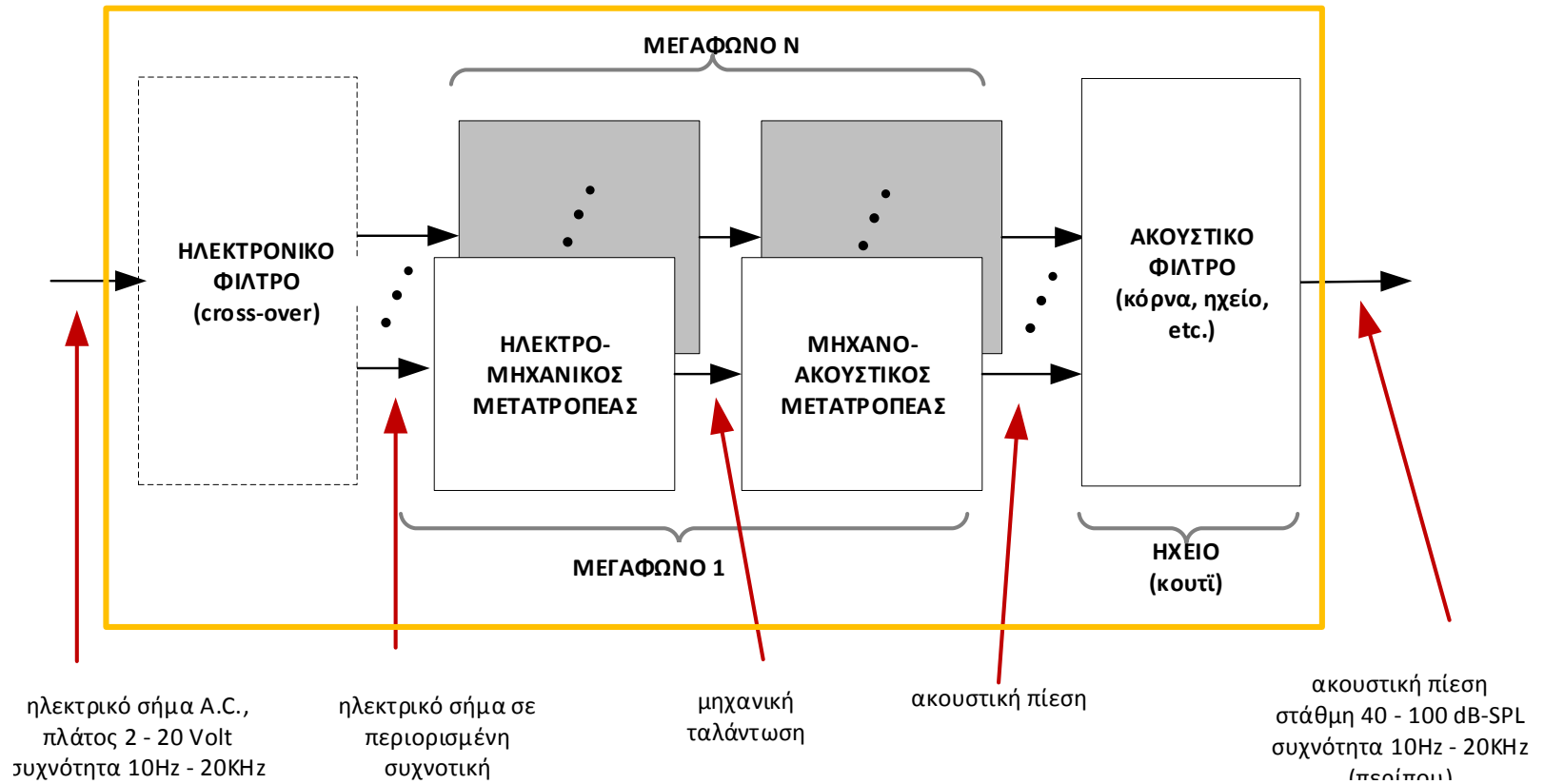
1. **μεγάφωνα – ηχεία - τύποι**

εφαρμογές και χρήσεις μεγαφώνων-ηχείων

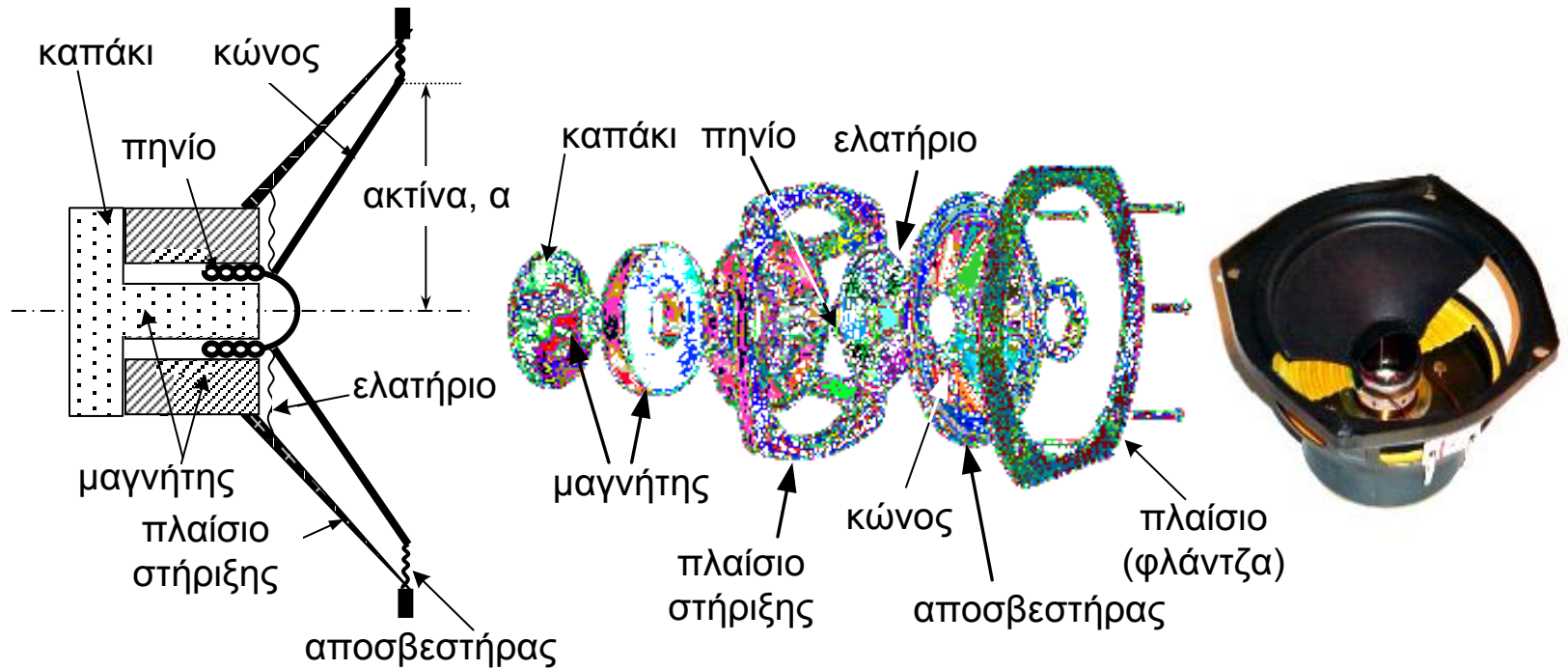
- Οικιακά συστήματα hi-fi
- Επαγγελματικά συστήματα
- Φορητά ηχοσυστήματα
- Ηχεία για υπολογιστές
- Laptop
- Τηλέφωνα σταθερά-κινητά
- tablets
- Τηλεοράσεις
- Ραδιόφωνα
- Οχήματα – συγκοινωνιακά μέσα
- Ακουστικά
- Ακουστικά βαρηκοΐας
- Εγκαταστάσεις κτηρίων
- Βιομηχανικές εφαρμογές
- Ιατρικές εφαρμογές
- Συστήματα ασφάλειας
- Φορητά ηλεκτρονικά
- Μουσικά όργανα – ενισχυτές
-



σύστημα ηχείου



το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο



το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο & ηχείο

Μονάδα
υψηλών
συχνοτήτων



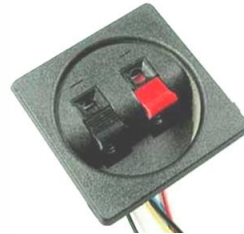
Μονάδα
μεσαίων
συχνοτήτων



Μονάδα
χαμηλών
συχνοτήτων



Κύκλωμα
διαχωρισμού
(cross-over)



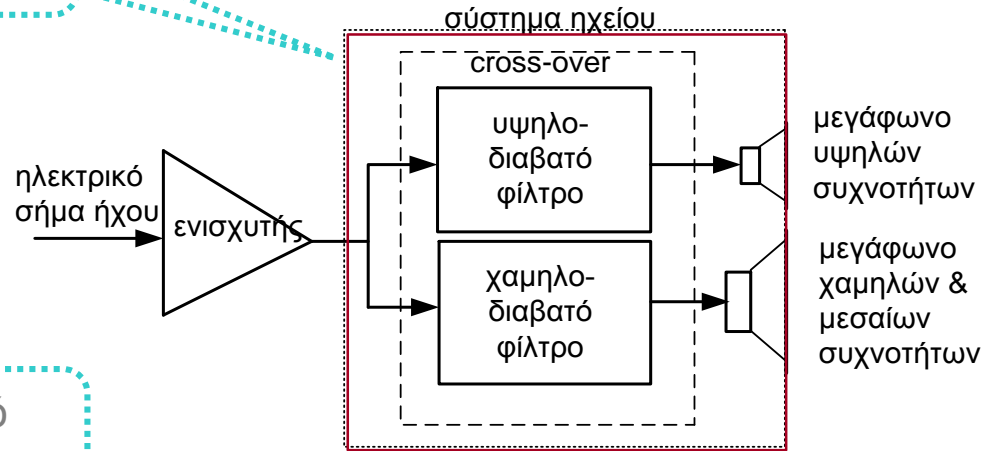
Ακροδέκτες



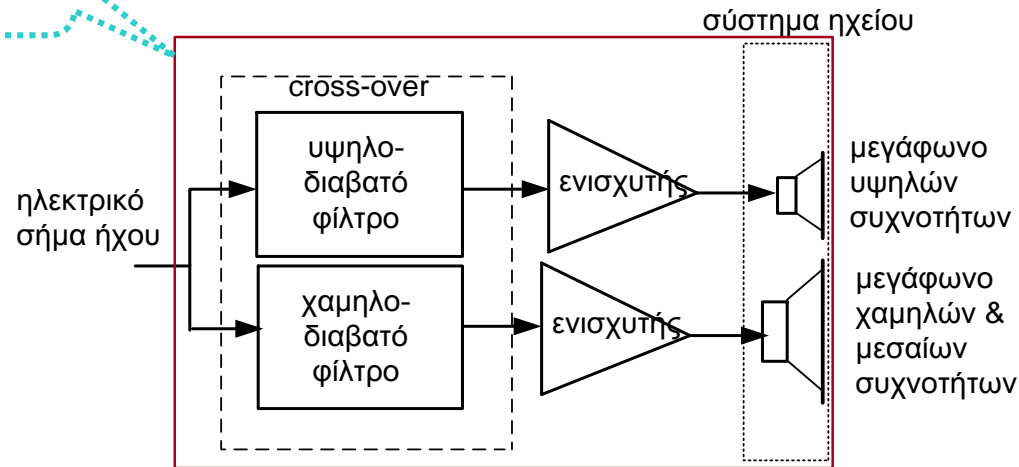
Κουτί
(ηχείο)
κλειστού
τύπου

Τύποι συστημάτων ηχείων

παθητικό ηχείο



ενεργό ηχείο

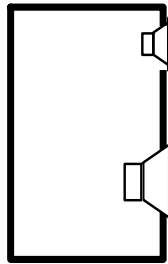


Τύποι συστημάτων ηχείων (ηλεκτροδυναμικά)



ΤΥΠΟΙ ΚΟΥΤΙΩΝ (ηχείων)

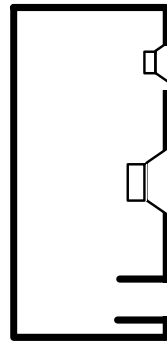
Κλειστού τύπου (closed box)



Μεγάφωνο
υψηλών
συχνοτήτων

Μεγάφωνο
μεσαίων &
χαμηλών
συχνοτήτων

Ανάκλασης χαμηλών (bass reflex)

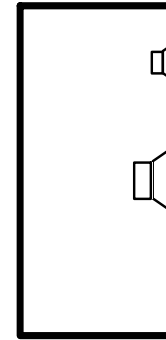


Μεγάφωνο
υψηλών
συχνοτήτων

Μεγάφωνο
μεσαίων &
χαμηλών
συχνοτήτων

Σωλήνας
εκπομπής πολύ
χαμηλών
συχνοτήτων

με σωλήνα (ducted port)



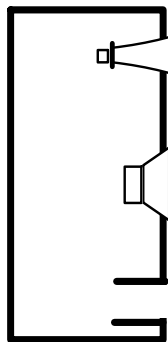
Μεγάφωνο
υψηλών
συχνοτήτων

Μεγάφωνο
μεσαίων &
χαμηλών
συχνοτήτων

Οπή εκπομπής
πολύ χαμηλών
συχνοτήτων

κατευθείαν ακτινοβολίας (vented box)

Κόρνας υψηλών (high frequency horn)

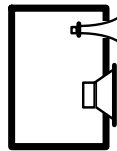


Χοάνη (κόρνα)
εκπομπής
υψηλών
συχνοτήτων

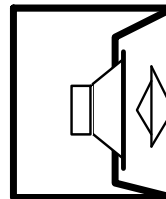
Μεγάφωνο
μεσαίων &
χαμηλών
συχνοτήτων

Σωλήνας
εκπομπής πολύ
χαμηλών
συχνοτήτων

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

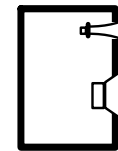


Ηχείο μεσαίων
& υψηλών
συχνοτήτων
(δορυφόρος)



Χοάνη (κόρνα)
εκπομπής πολύ
χαμηλών
συχνοτήτων

κόρνα τύπου W (W-bin)



Ηχείο μεσαίων
& υψηλών
συχνοτήτων
(δορυφόρος)

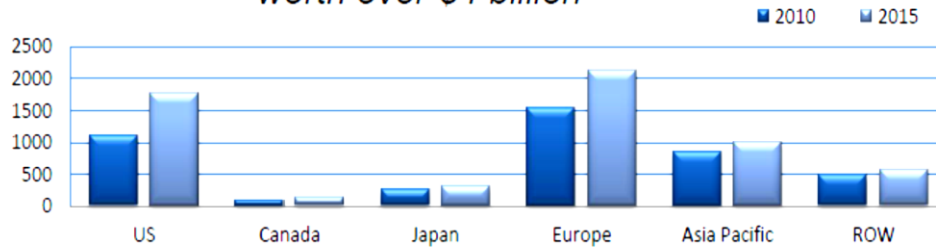


Χοάνη (κόρνα)
εκπομπής πολύ
χαμηλών
συχνοτήτων

διπλωμένη κόρνα (folded horn)

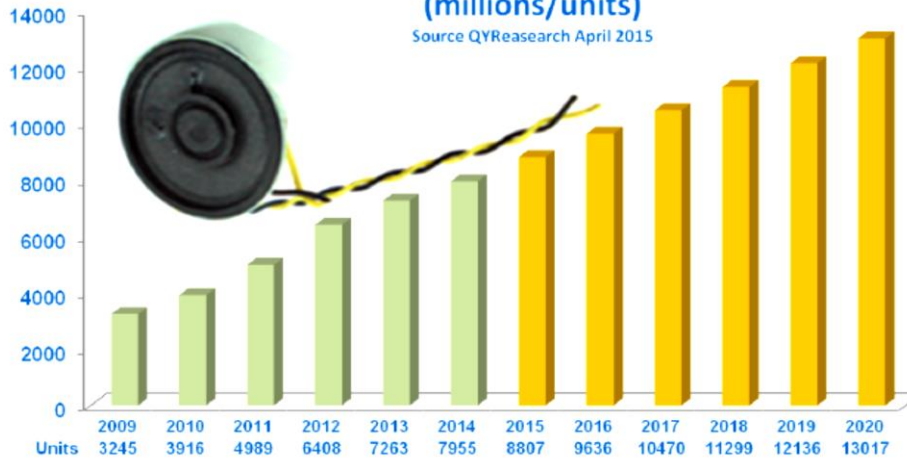
μέγεθος αγοράς μεγαφώνων - ηχείων

The home loudspeaker market is currently worth over \$4 billion

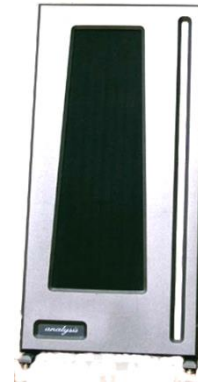
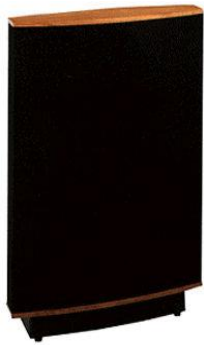


Global Micro Loudspeaker Demand (millions/units)

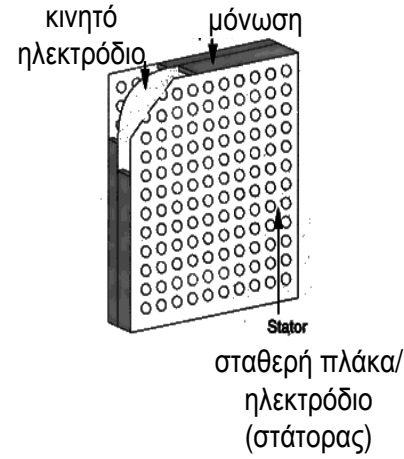
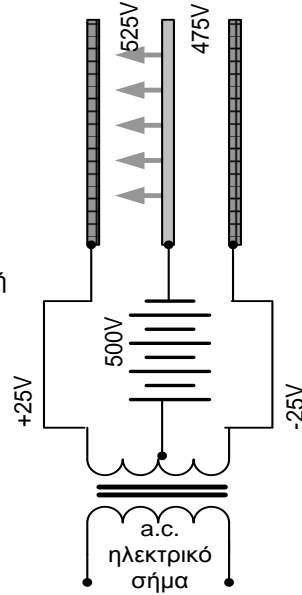
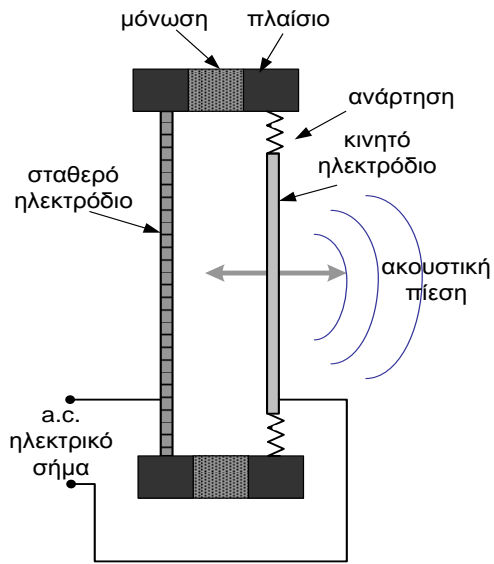
Source QYResearch April 2015



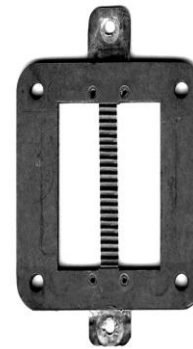
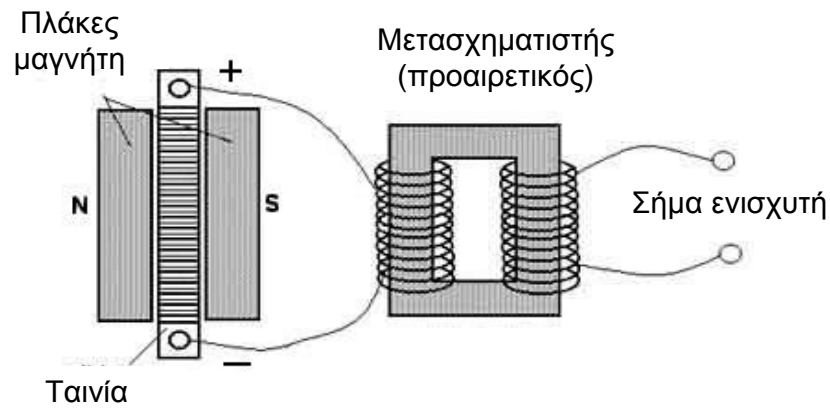
τύποι συστημάτων ηχείων (μη ηλεκτροδυναμικά)



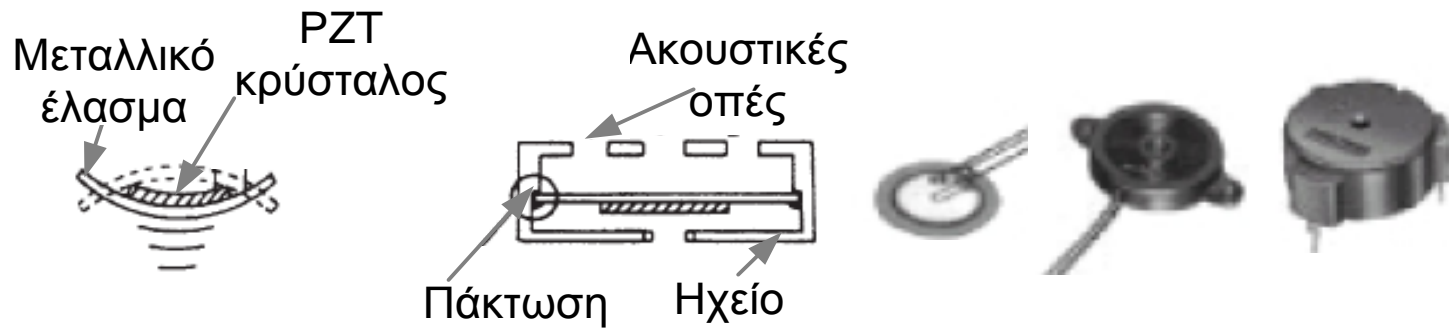
ηλεκτροστατικό μέγafωνο



μεγάφωνα ταινίας (ribbon)



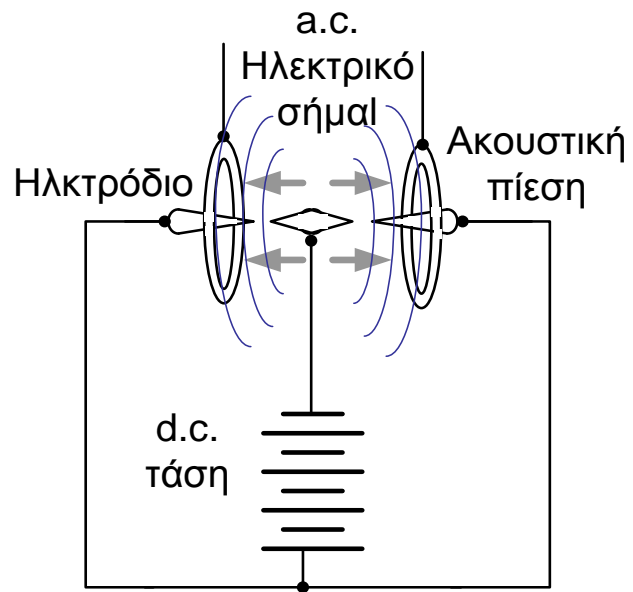
πιεζοηλεκτρικό μεγάφωνο



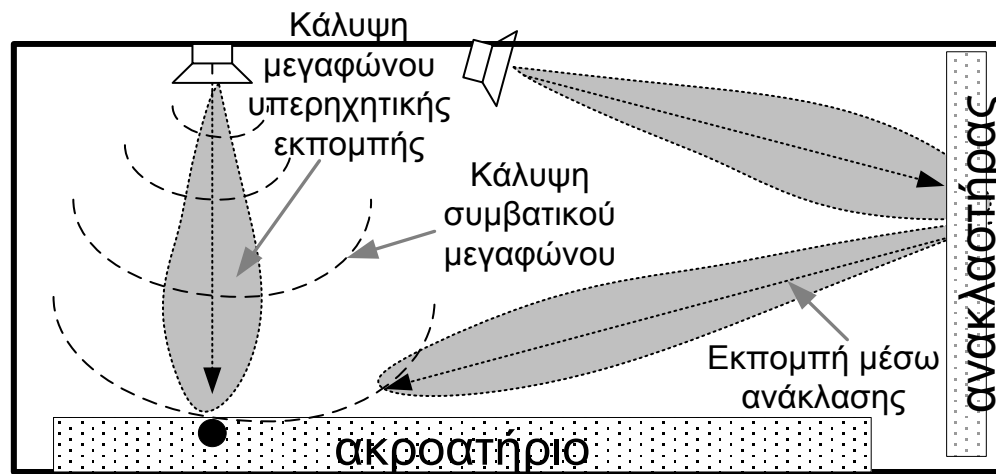
πλέον σαν μεγάφωνο MEM

MEM = micro-electro-mechanical

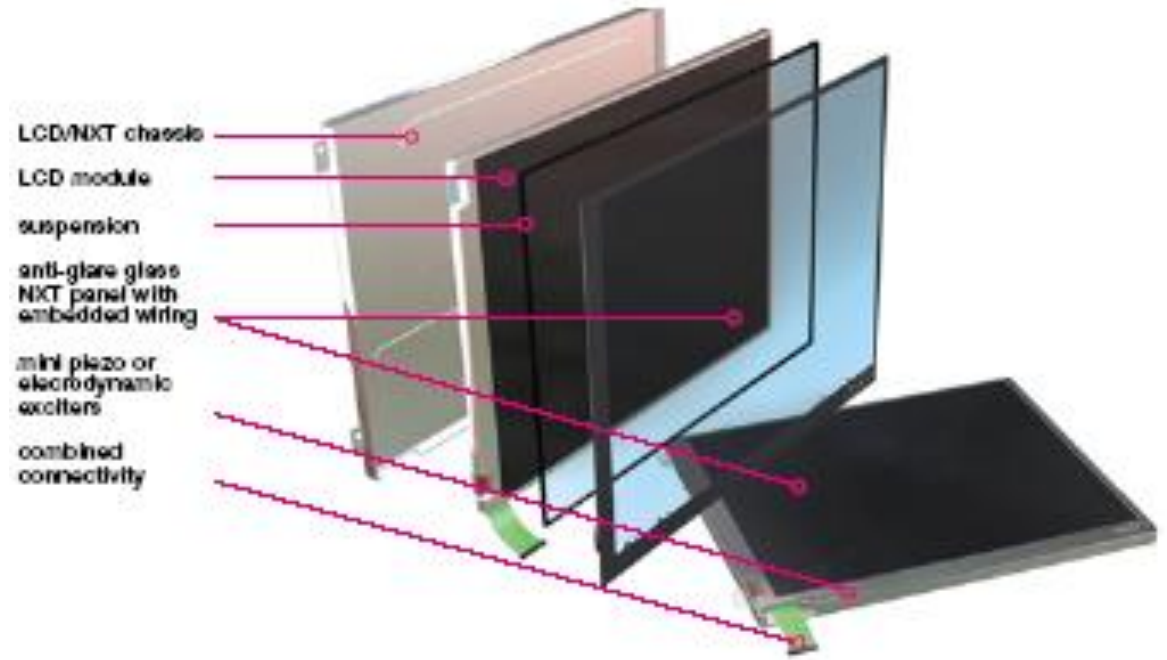
μεγάφωνο ιονισμού



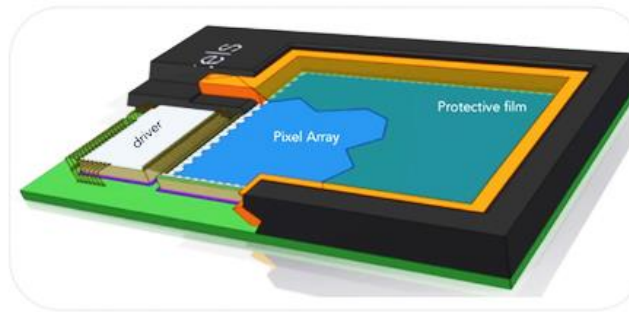
μεγάφωνα υπερηχητικής εκπομπής



πιεζοηλεκτρικά & DML στοιχεία



Packaged Pixel Array

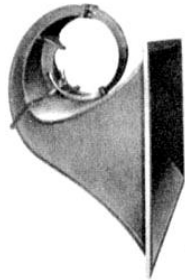


Sound Emitting Pixel

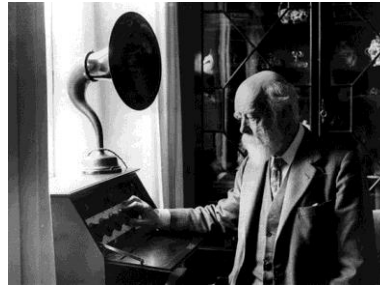


2. Ιστορικά - εξελίξεις

Ιστορία του μεγαφώνου - ηχείου



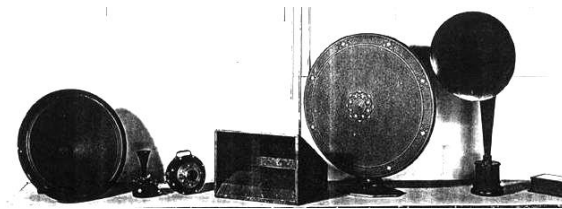
Μεγάφωνο Siemens
(1874, 1878)



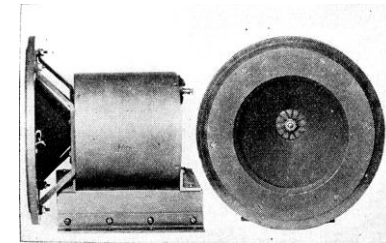
Oliver Lodge και
Μεγάφωνο (1889)



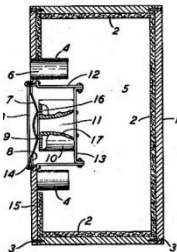
Magnavox (1915)



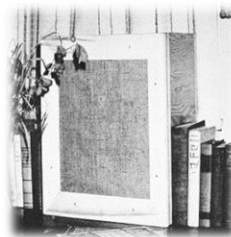
Μεγάφωνο Bell (1876-
1919)



Μεγάφωνο Rice &
Kellogg (1925)



Πατέντα για ηχείο
“Bass Reflex”
τουThuras (1930)



Ηχείο “Ακουστικής
Ανάρτησης” AR-1
(1957)

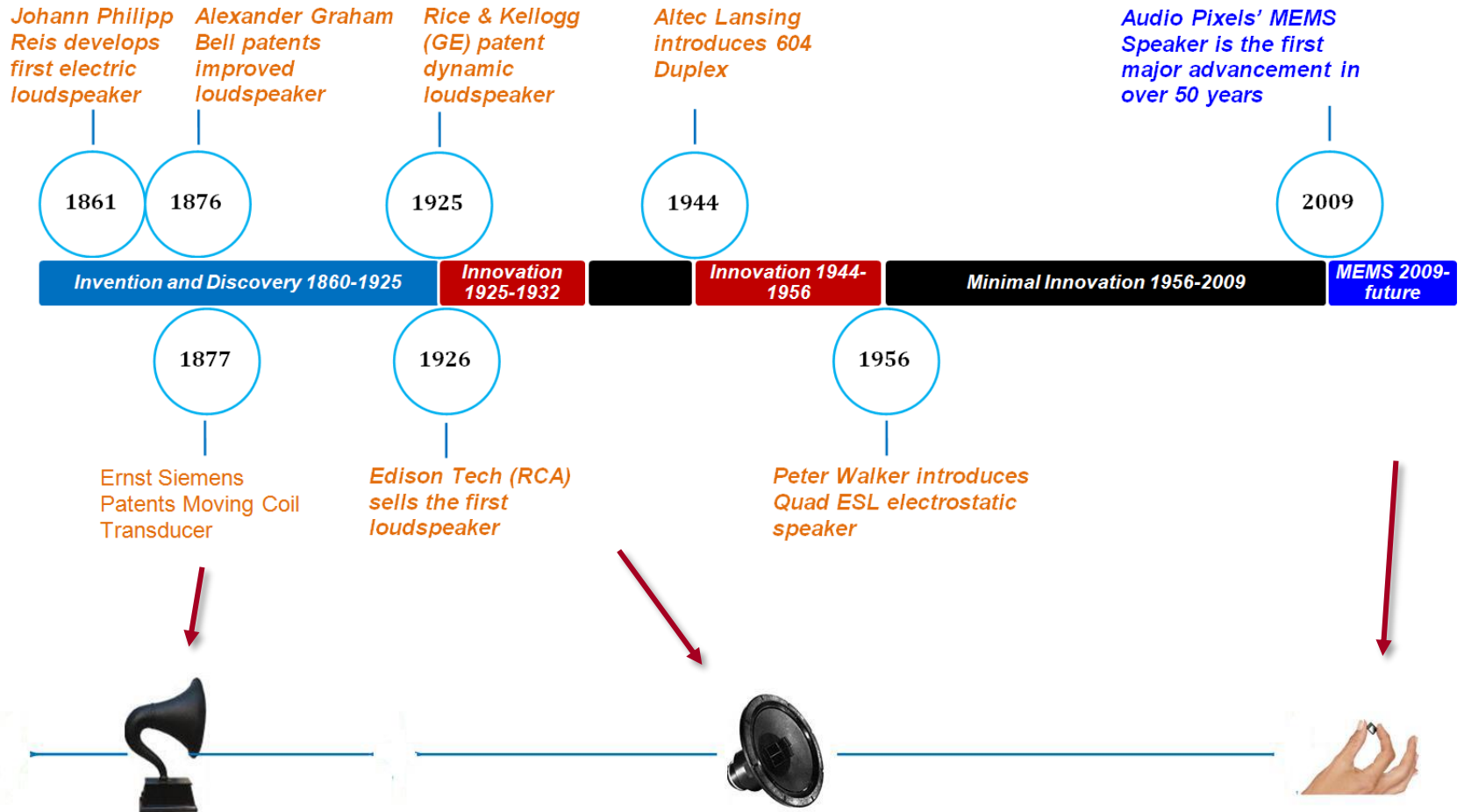


Ηχεία NXT
(1996)

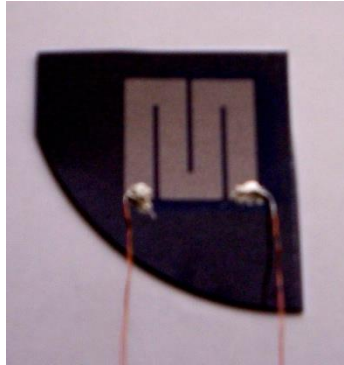


Ψηφιακό «μεγάφωνο» MEMS
Audiopixel (2009)

Ιστορία του μεγαφώνου - ηχείου

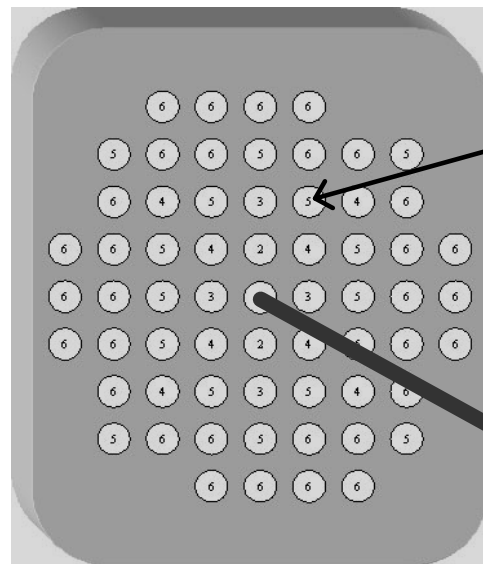


Θερμοακουστική μετατροπή



Θερμοακουστικό πρωτότυπο, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάιος 2005

ψηφιακό ηχείο συστοιχίας μικρών μεγαφώνων (DTA)



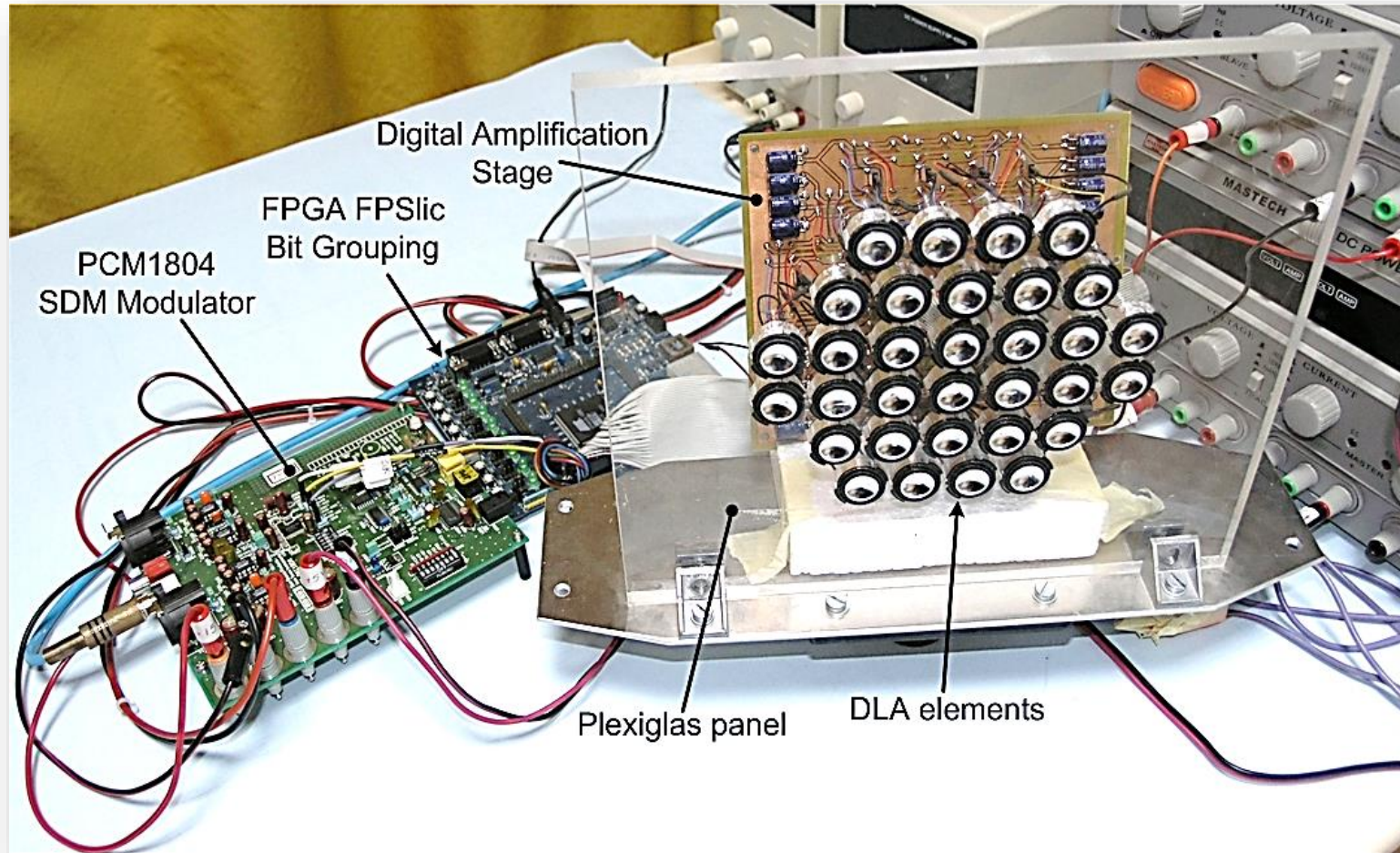
στοιχεία
εκπομπής
1 bit

ακουστική
πίεση



ψηφιακό ηχείο συστοιχίας μικρών μεγαφώνων (DTA)

Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου - 2005



ψηφιακό μεγάφωνο πλάσματος laser

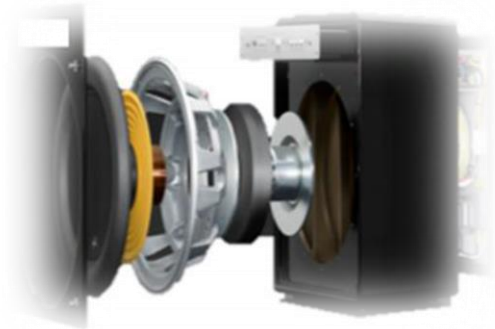
2016-: Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου & Ακουστικής



- εκπομπή ήχου **χωρίς κινούμενα μέρη**
- δημιουργία πηγών ήχου στο χώρο
- διέγερση πλάσματος από παλμικό υπερισχυρό laser
- οδήγηση laser παλμών από ψηφιακό ήχο (Σ/Δ, PWM)
- αίτηση Διπλώματος Ευρεσιτεχνίας (Παν/μιο Πατρών & Karshlue Institute of Technology)

ψηφιακό μεγάφωνο MEMS

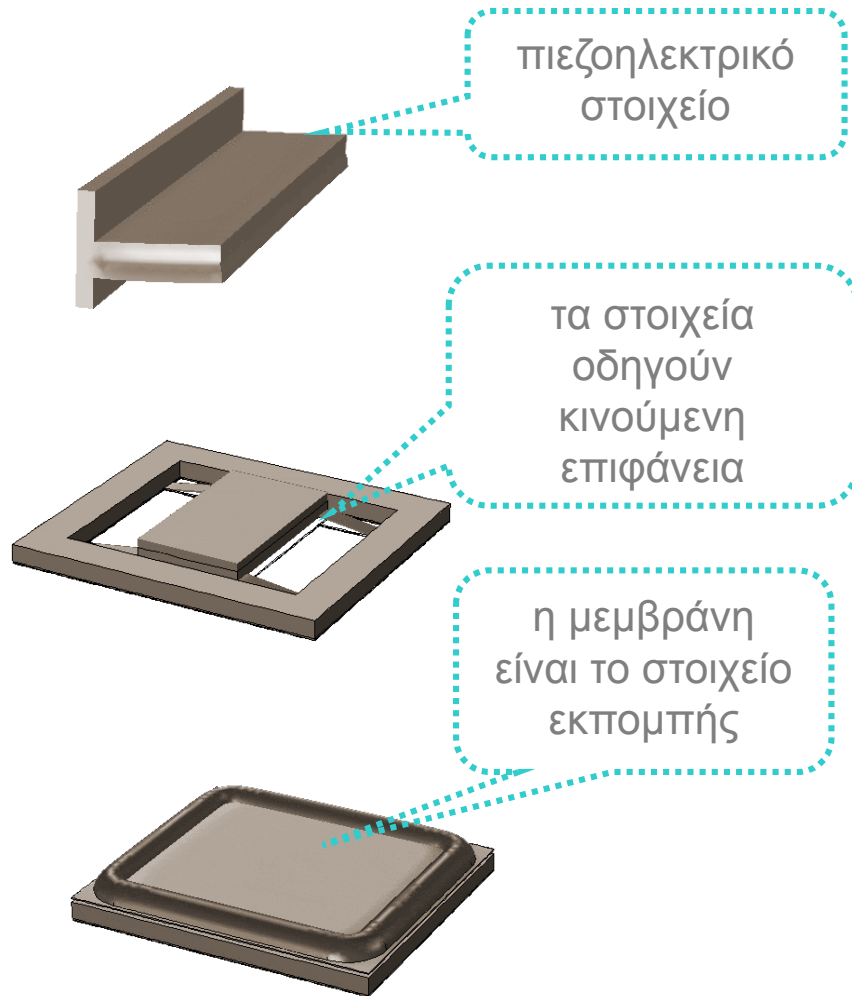
MEM = micro-electro-mechanical



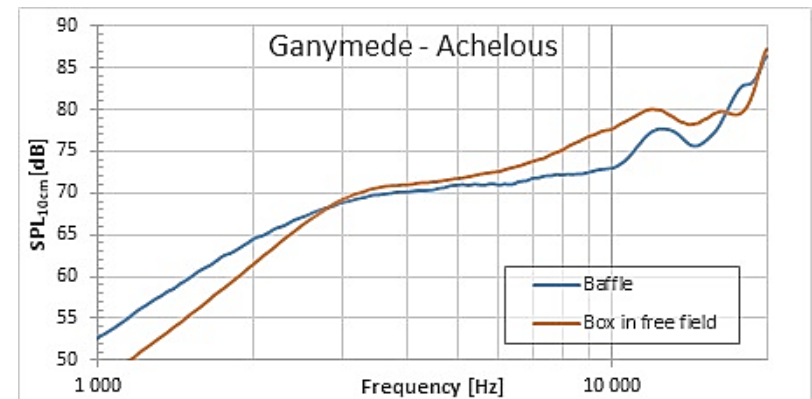
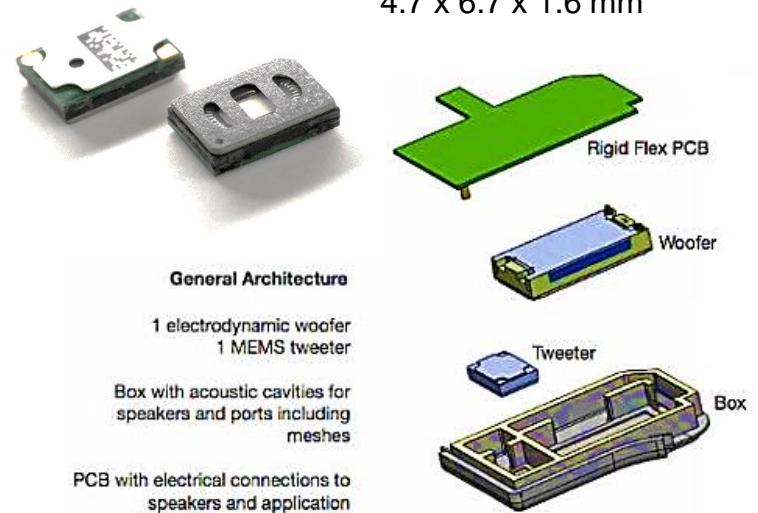
	Conventional Speaker	Audio Pixels Speaker
	Electromechanical Assembly	Semiconductor Chip
Magnet	Required	Not required
Voice Coil	Required	Not required
Cone	Required	Not required
Number of Components	4-15	1
Drive Circuitry	External	Integrated
Digital to Analog Conversion	Required	Not required
Enclosure or Chamber	Required	Not Required
Surface Mount Compatible	No	Yes



ψηφιακό μεγάφωνο MEMS



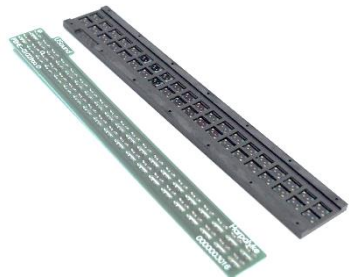
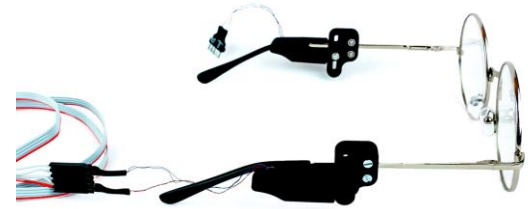
4.7 x 6.7 x 1.6 mm



νέες εφαρμογές ψηφιακών μεγαφώνων MEMS



κουτί – ηχείο για
στοιχείο MEMS



γραμμική
συστοιχία MEMS



ακουστικά για
3D ήχο με 16
στοιχεία MEMS
+ 1 woofer

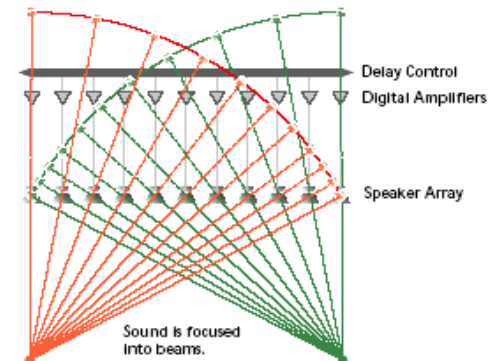


audioglasses

συστοιχίες ηχείων

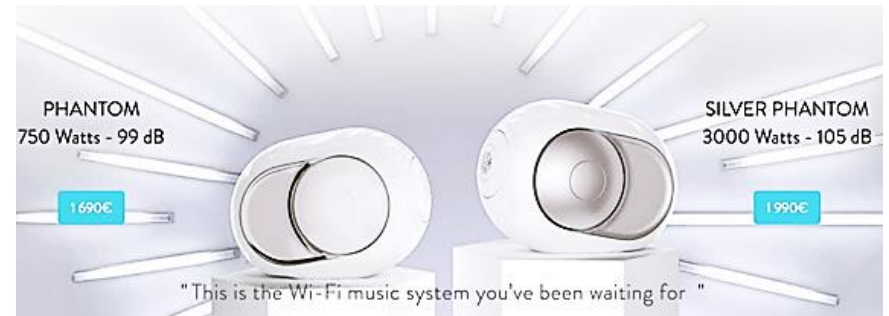
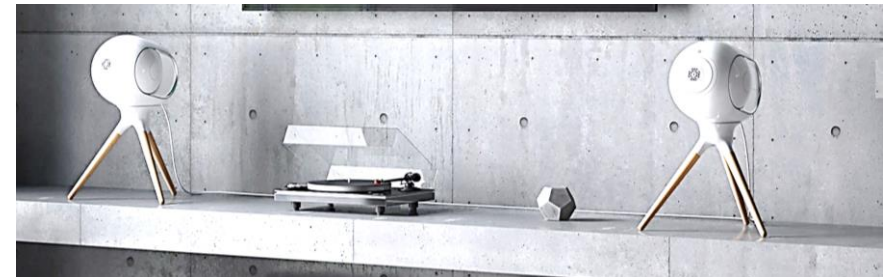
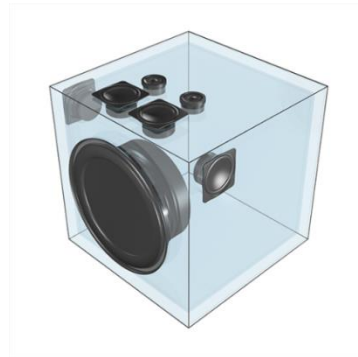


- ψηφιακή πηγή (π.χ. DVD-player)
- αναλογικός, semi-digital ή ψηφιακός AV ενισχυτής
- ενσύρματα ηχεία
- front wired / rear wireless
- single unit “sound projectors”



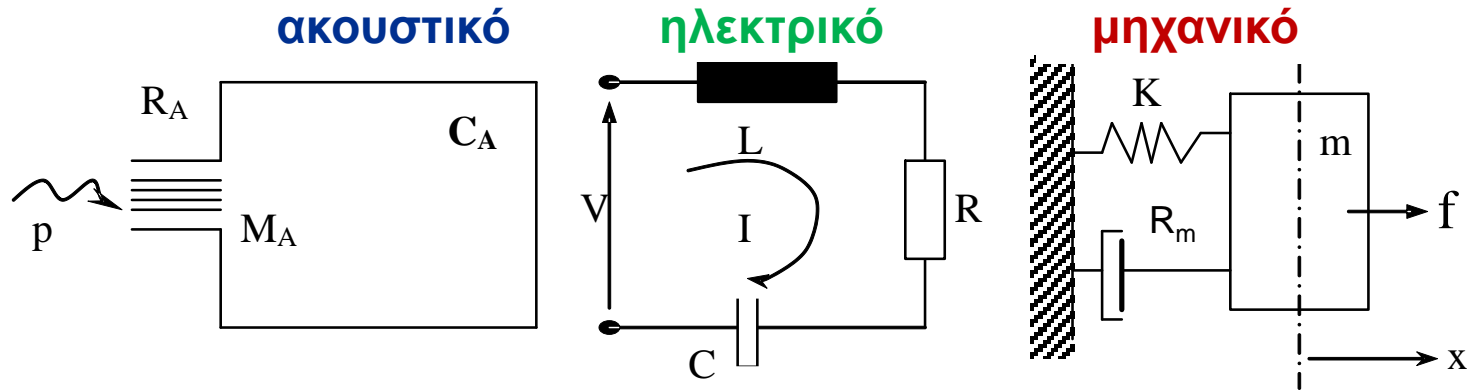
ασύρματα ηχεία:

- ασύρματη ψηφιακή πηγή (π.χ. Smartphone, web)
- ψηφιακός ενισχυτής
- ασύρματη λήψη (bluetooth, Wi-fi)
- mono, stereo projection
- φορητά, δίκτυο, multiroom



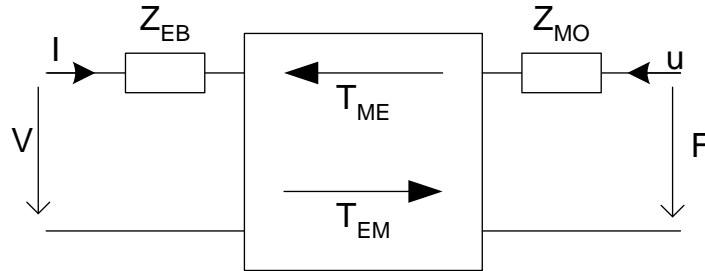
3. θεωρία

ισοδύναμες ποσότητες



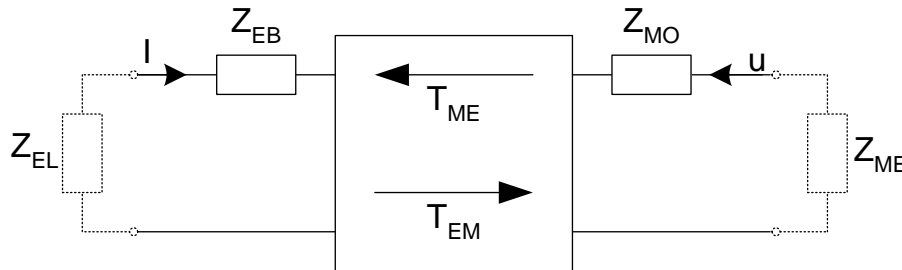
ακουστικό	ηλεκτρικό	μηχανικό
αντίδραση M_A <i>opposes change in volume velocity</i>	επαγωγή L <i>opposes change in current flow</i>	μάζα m <i>opposes change in mass velocity</i>
ενδοτικότητα C_A <i>opposes change in applied pressure</i>	χωρητικότητα C <i>opposes change in volume velocity</i>	ενδοτικότητα $C_m = 1/k$ <i>opposes change in applied force</i>
αντίσταση R_A <i>converts acoustic energy to heat</i>	αντίσταση R <i>converts electrical energy to heat</i>	απόσβεση R_m <i>converts mechanical energy to heat</i>

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



$$V = Z_{EB} I + T_{EM} u$$

$$f = Z_{MO} u + T_{ME} I$$



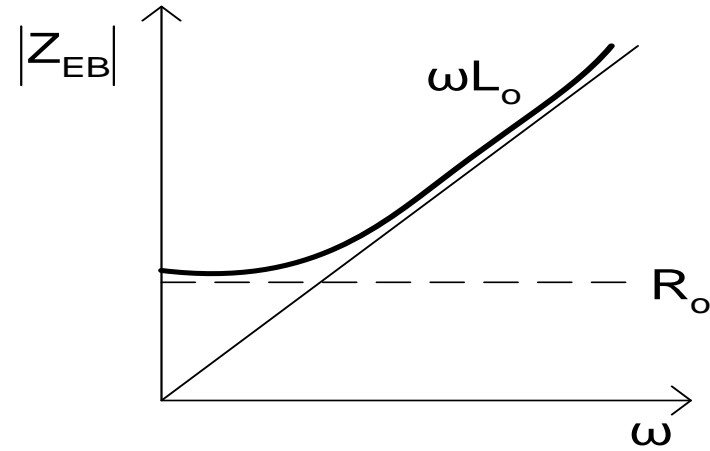
$$\left(\frac{V}{I}\right)_{F=0} = Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{(Bl)^2}{Z_{MO}} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MO}}$$

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

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

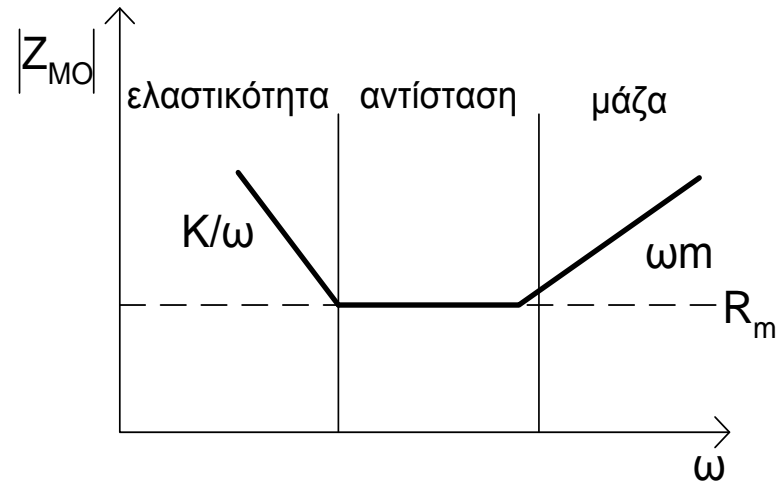
ηλεκτρικά
χαρακτηριστικά

$$Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0$$

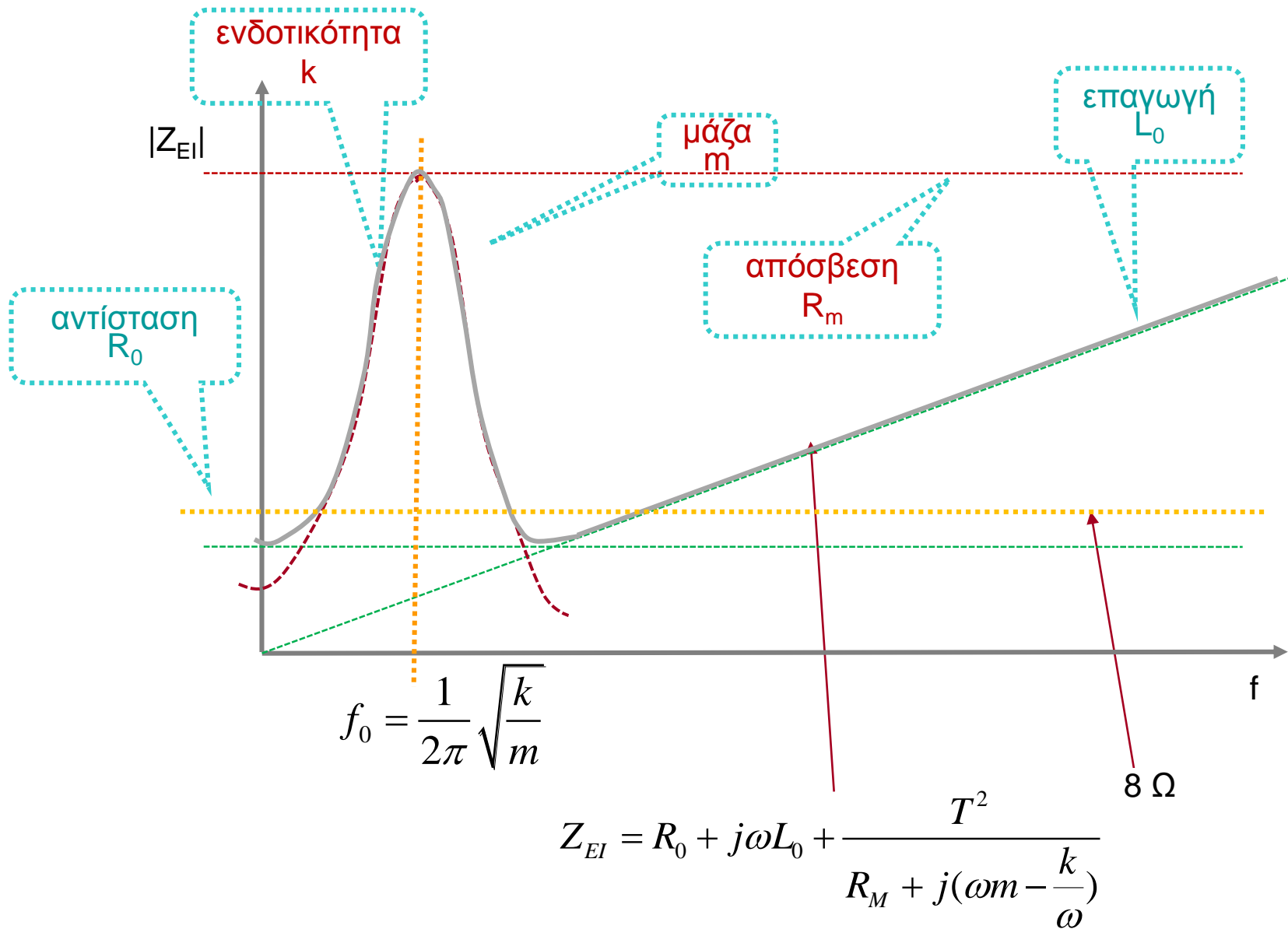


μηχανικά
χαρακτηριστικά

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



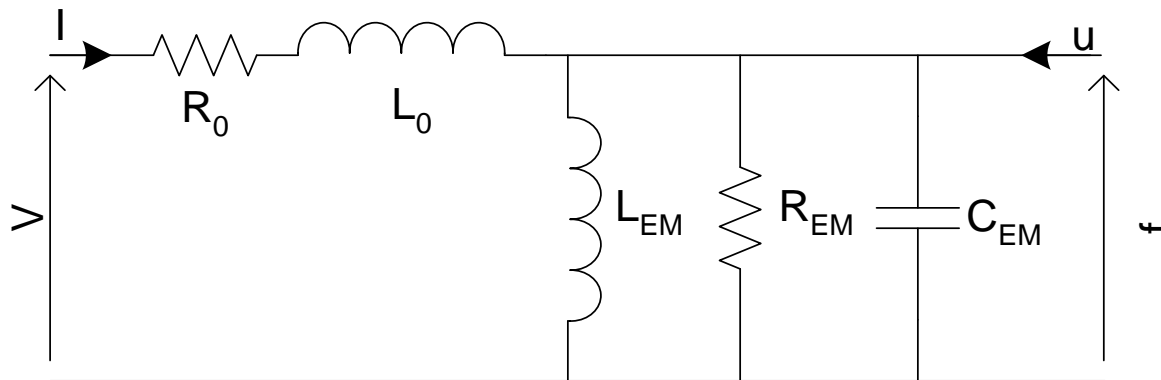
ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



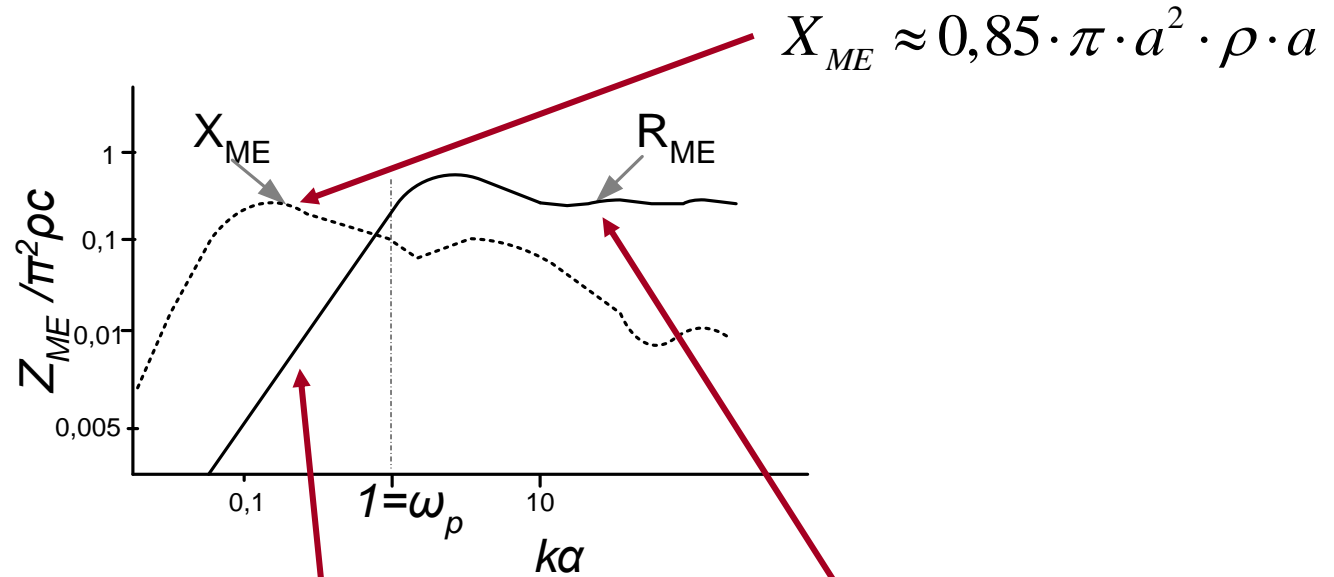
ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

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

$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_M} \quad C_{EM} = \frac{m}{T^2} \quad L_{EM} = \frac{T^2}{k}$$



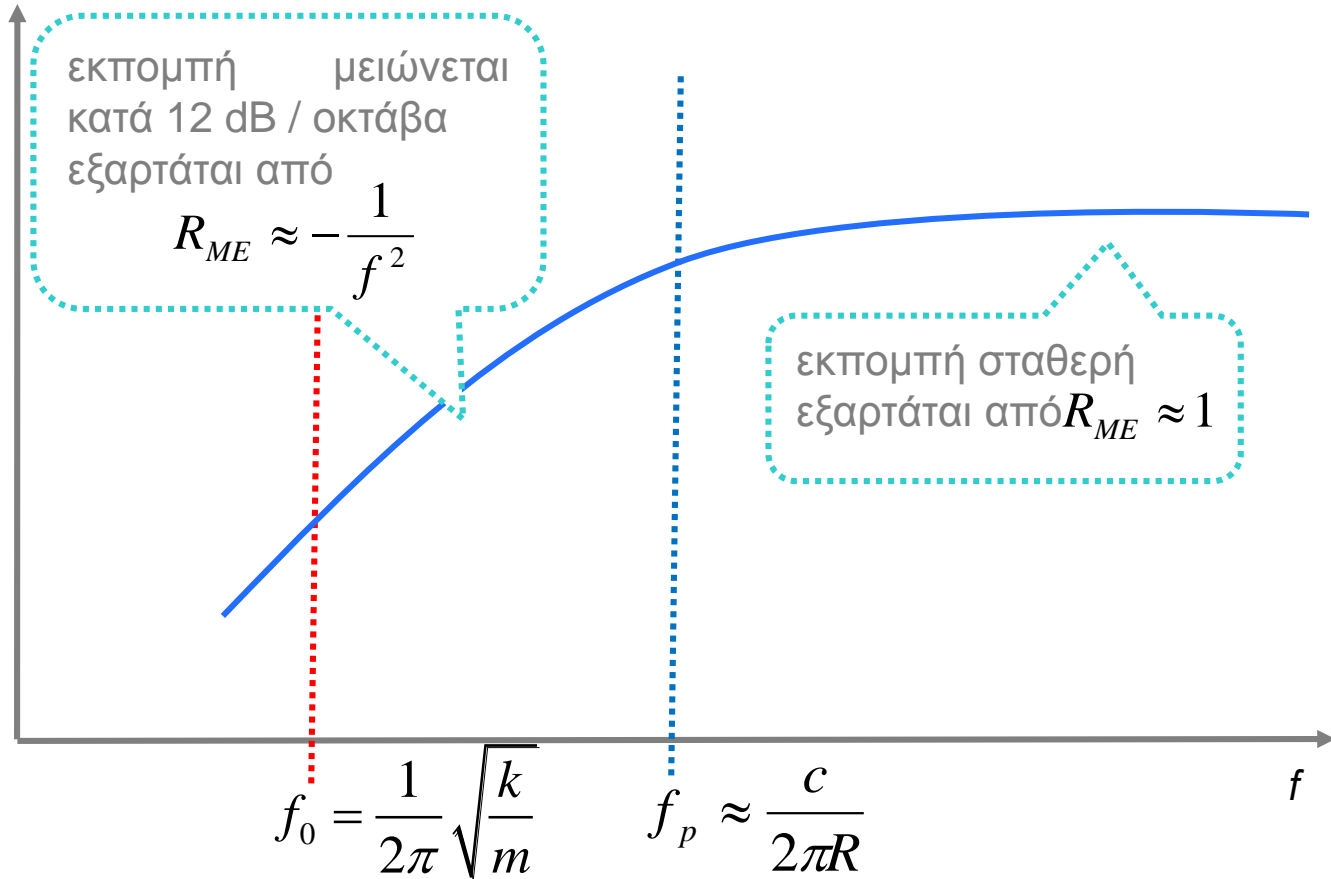
ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



$$R_{ME} = \frac{\pi \omega^2 a^4 \rho}{4c} \approx 2,4 \cdot f^2 \cdot a^4$$

$$R_{ME} \approx \pi \cdot \rho \cdot c \cdot a^2$$

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

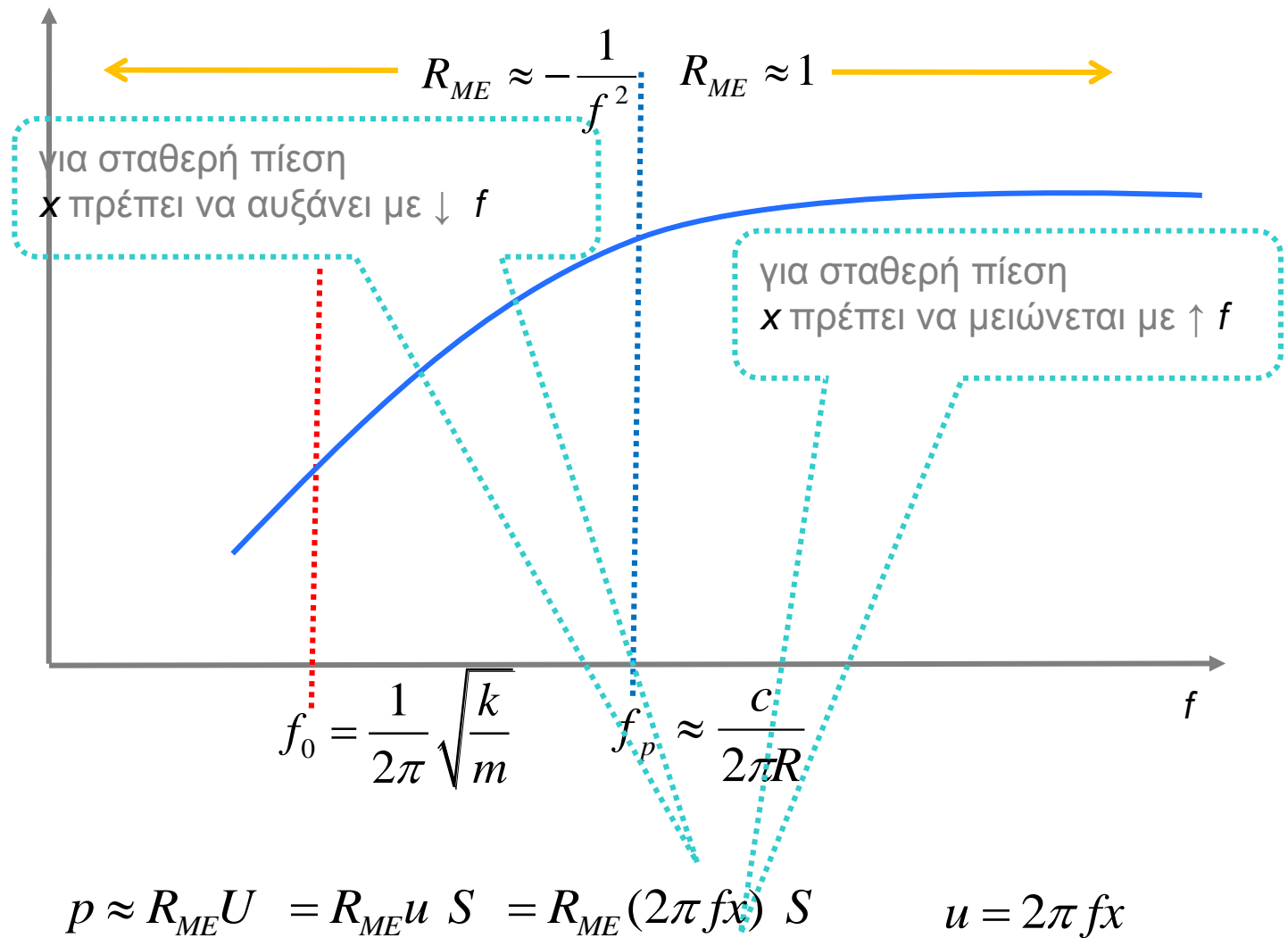


$$W_A \approx R_{ME} U^2 = R_{ME} u^2 S^2 = R_{ME} (2\pi fx)^2 S^2$$

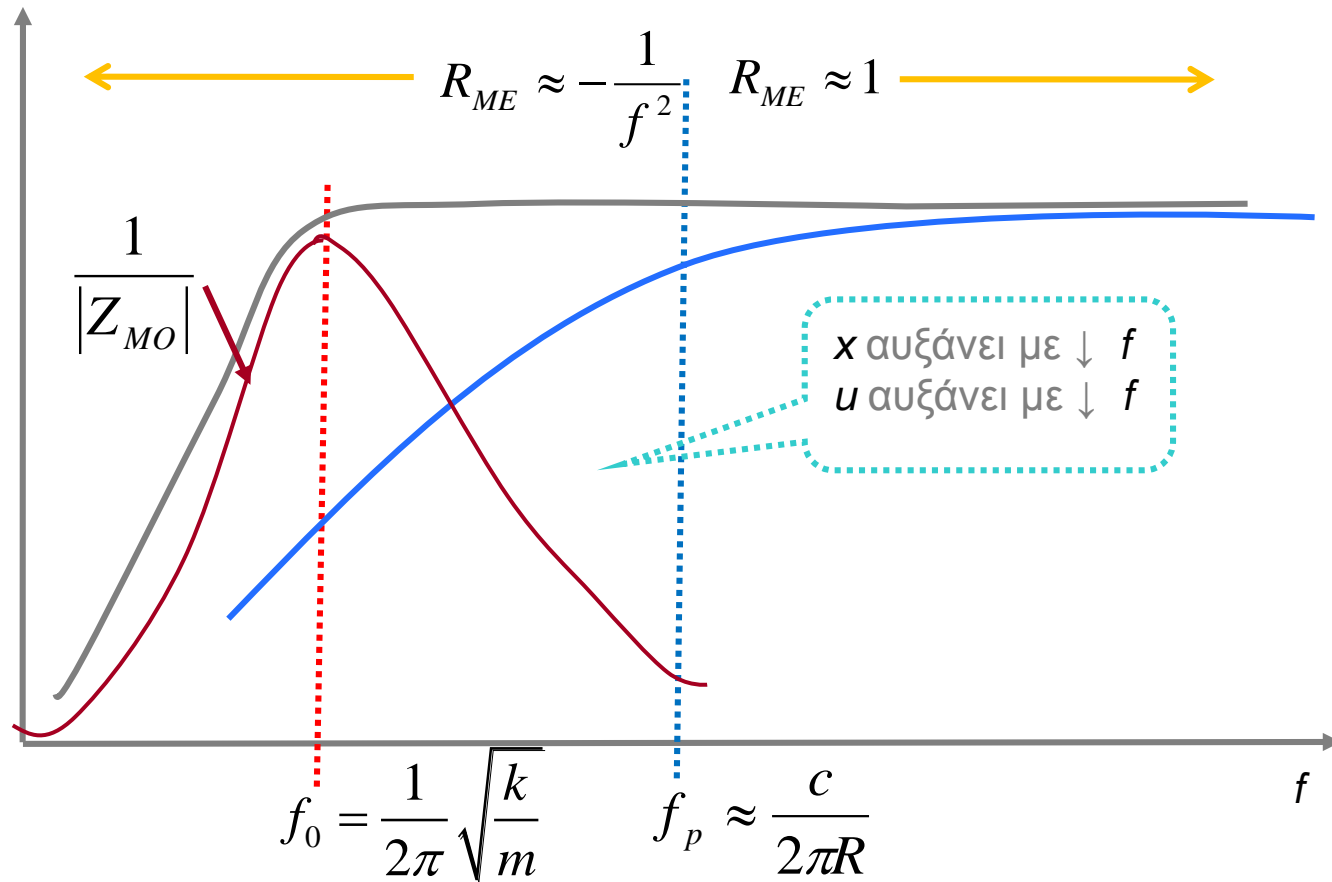
$$u = 2\pi fx$$

$$p \approx R_{ME} U = R_{ME} u S = R_{ME} (2\pi fx) S$$

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

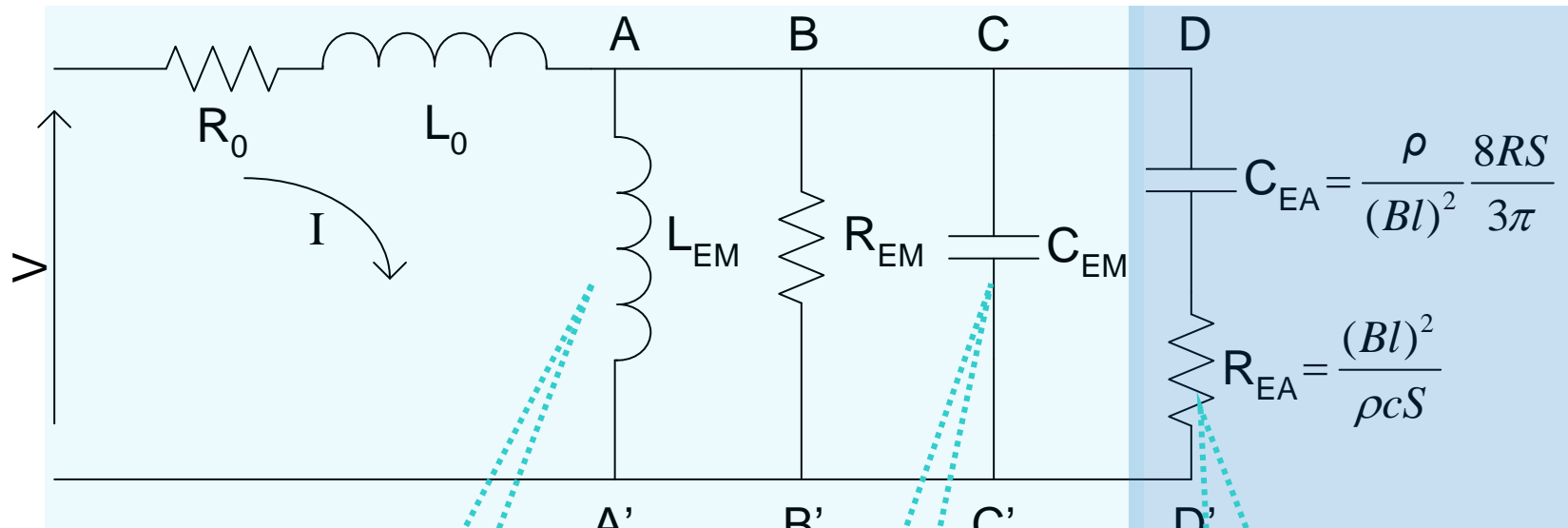


ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή



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

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



$$L_{EM} = \frac{T^2}{k}$$

$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_M}$$

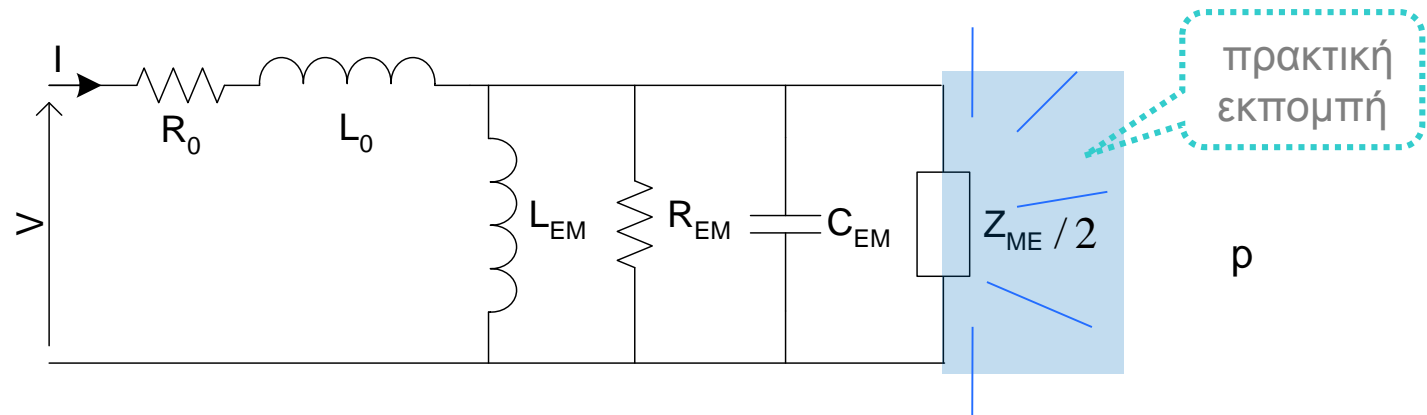
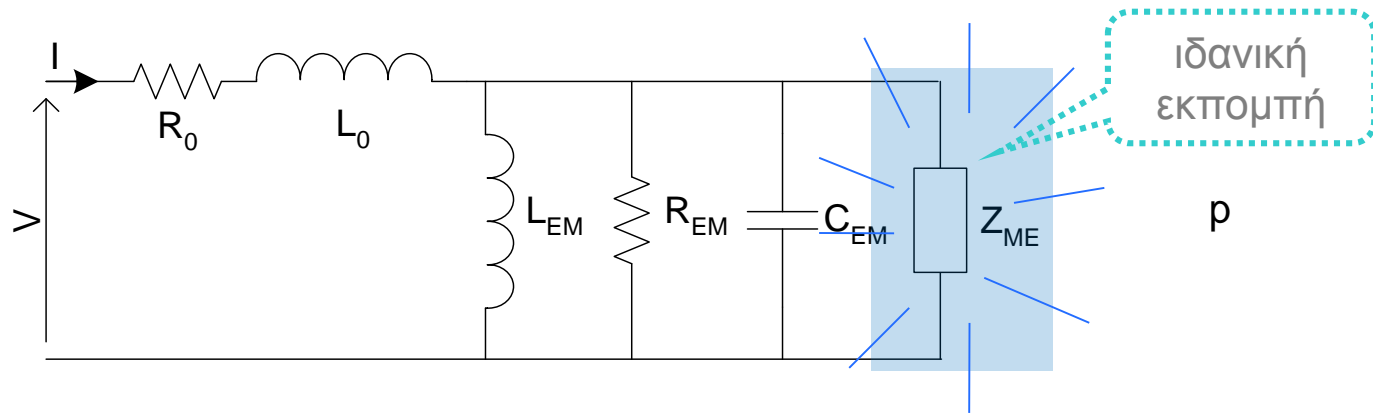
$$C_{EM} = \frac{m}{T^2}$$

έλεγχος
ελατηρίου

έλεγχος
μάζας

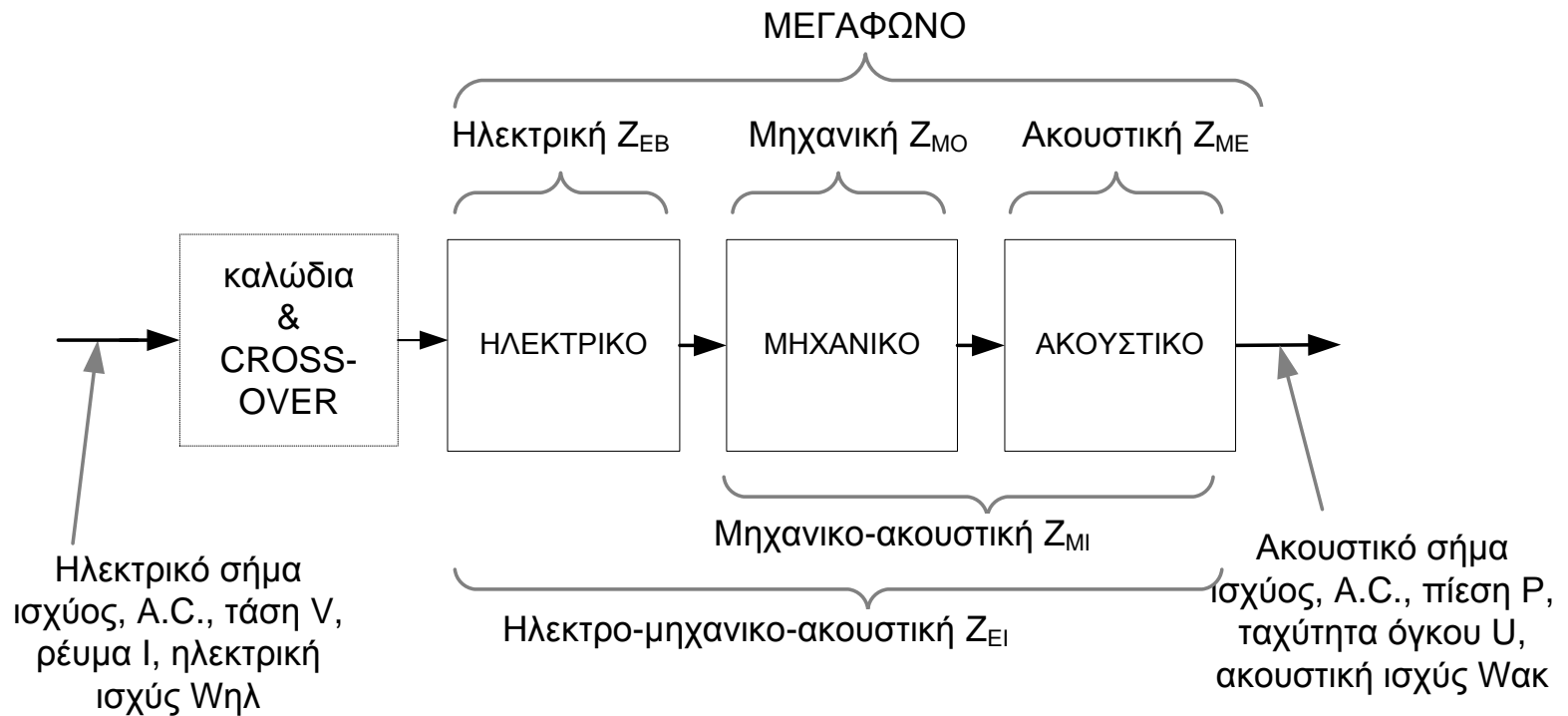
ακουστική ισχύς =
ηλεκτρική ισχύς
στην αντίσταση

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



η εκπομπή και από τις 2 πλευρές του δίσκου, είναι διπολική και μειώνει την ακουστική ισχύ στις χαμηλές συχνότητες

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

$$Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0$$

$$T^2 = (Bl)^2$$

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

$$Z_{ME} = R_{ME} + j\omega X_{ME}$$

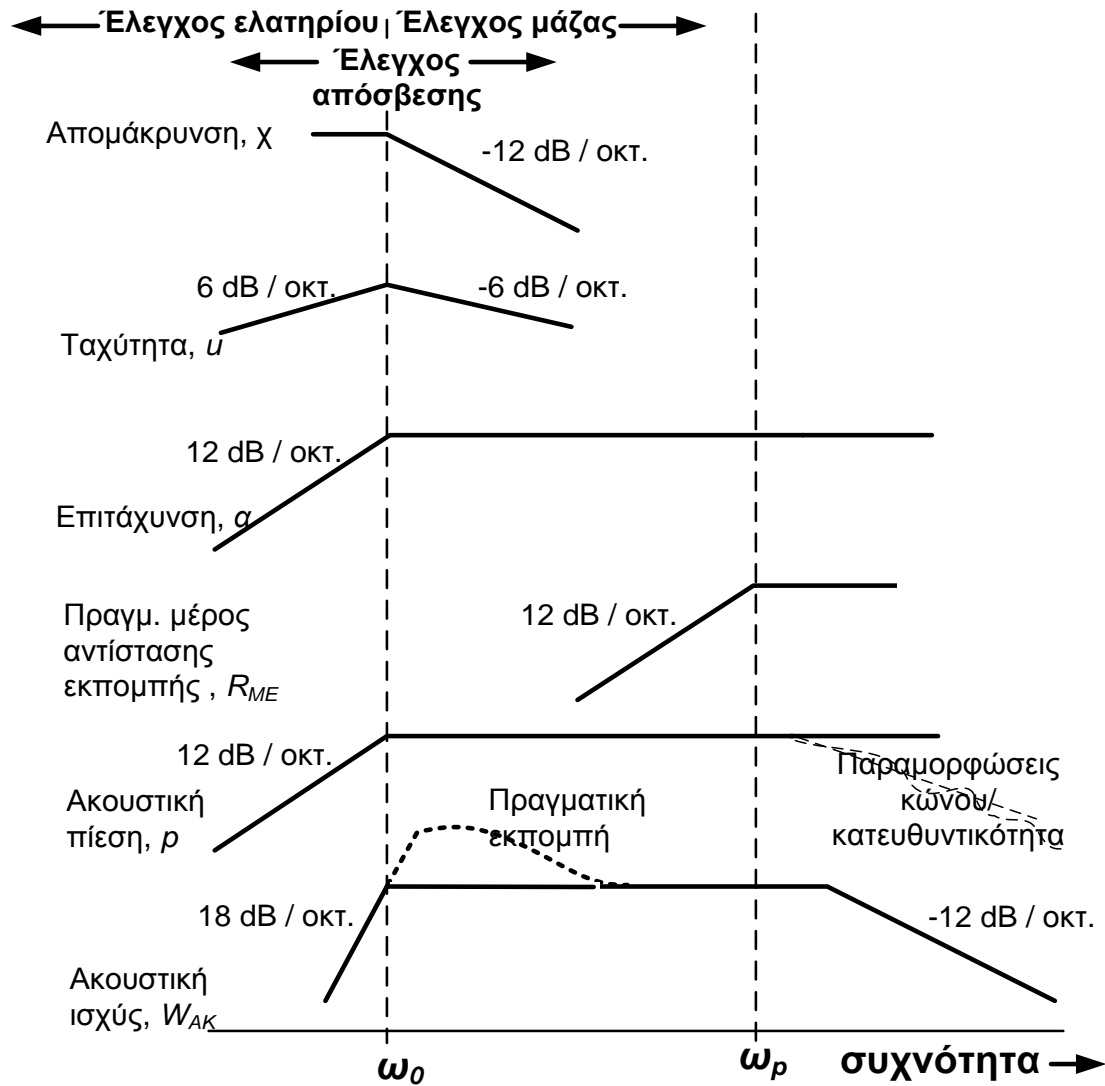
$$Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MI}}$$

$$Z_{MI} = Z_{MO} + Z_{ME}$$

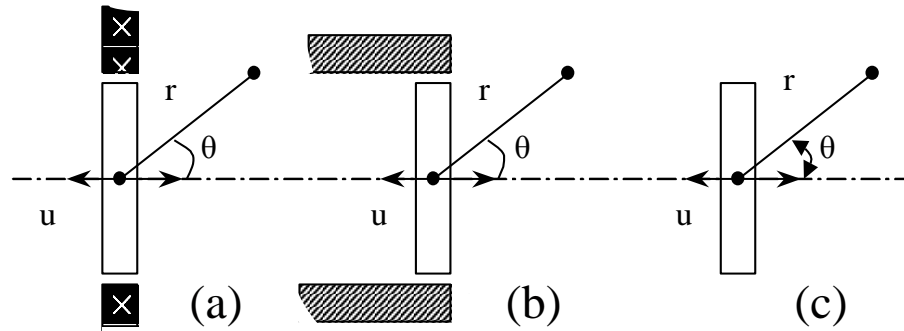
$$u = \frac{T \cdot I}{Z_{MI}}$$

$$W_{AK} = R_{ME} \cdot U^2 = R_{ME} \cdot u^2 \cdot S^2$$

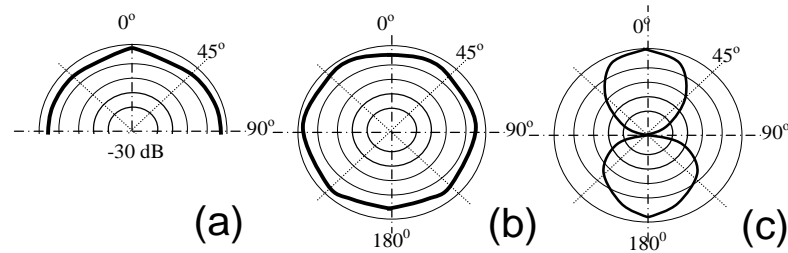
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



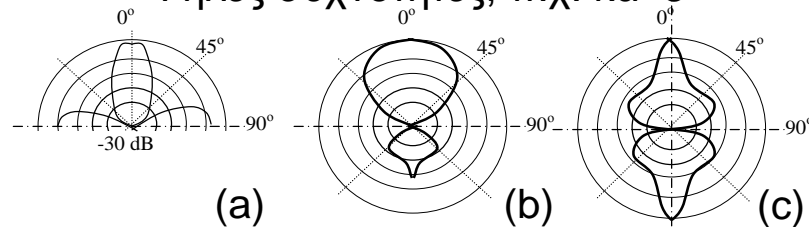
4. ακουστική εκπομπή



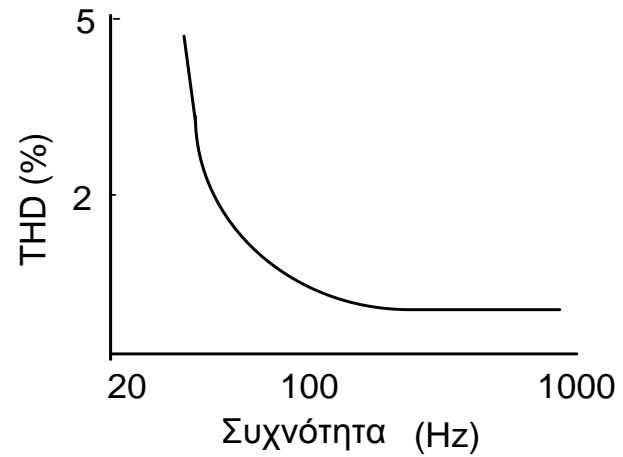
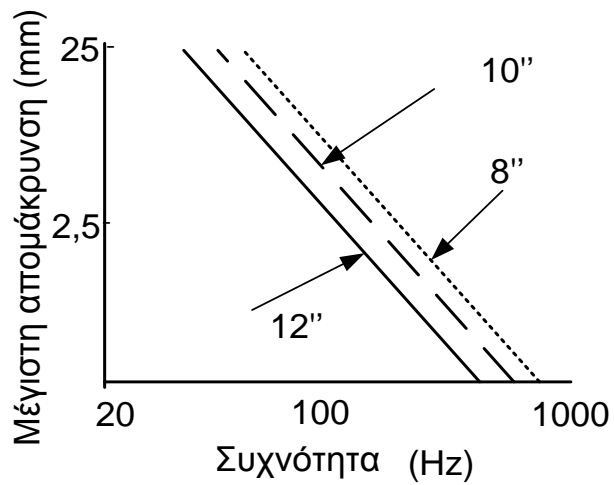
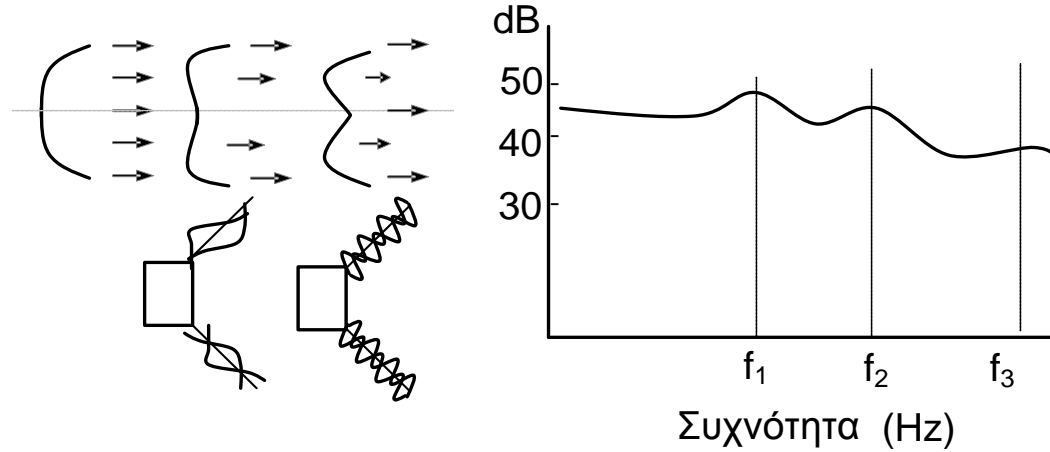
Χαμηλές συχνότητες, π.χ. $ka=1$



Ψηλές συχνότητες, π.χ. $ka=5$



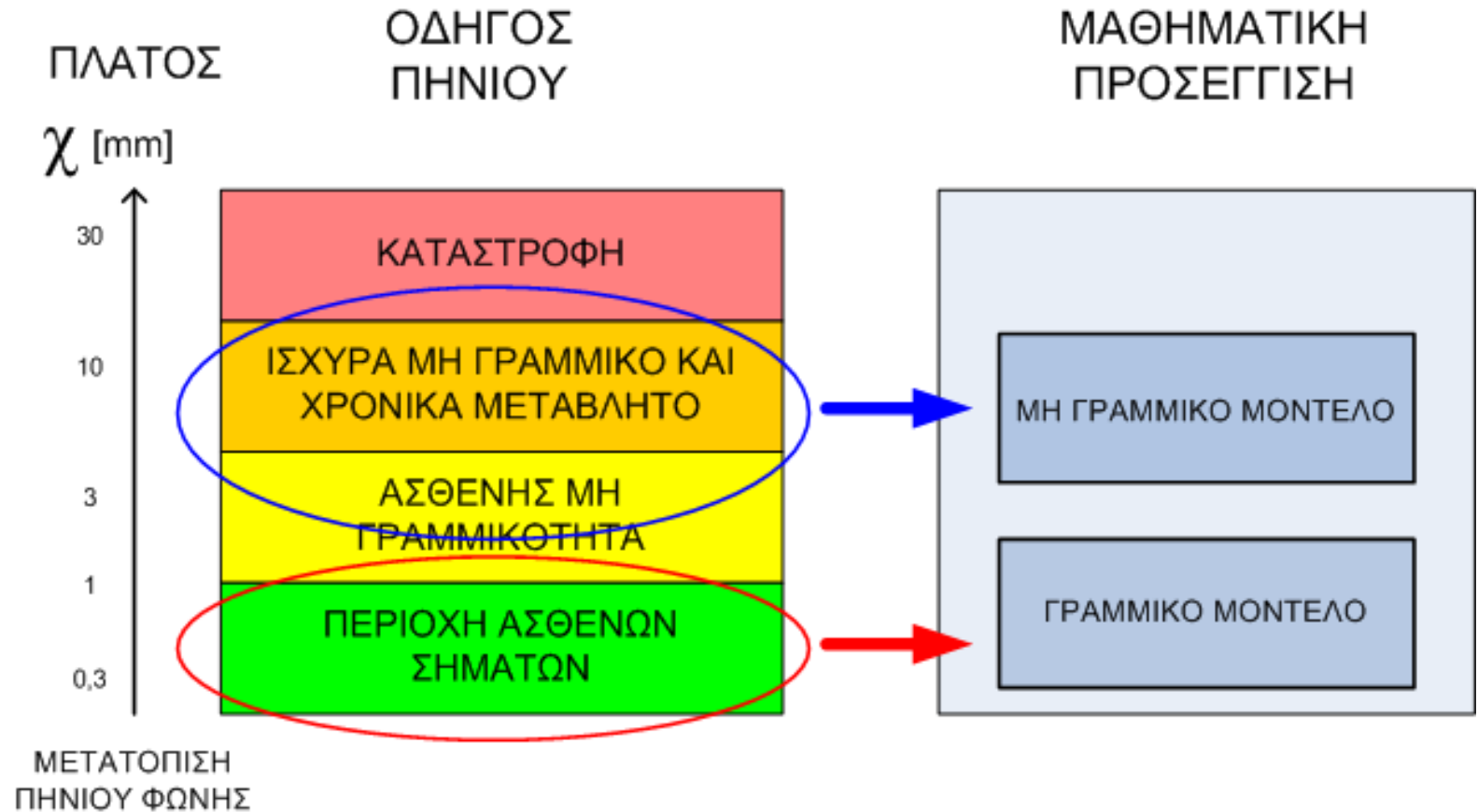
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ





5. ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά

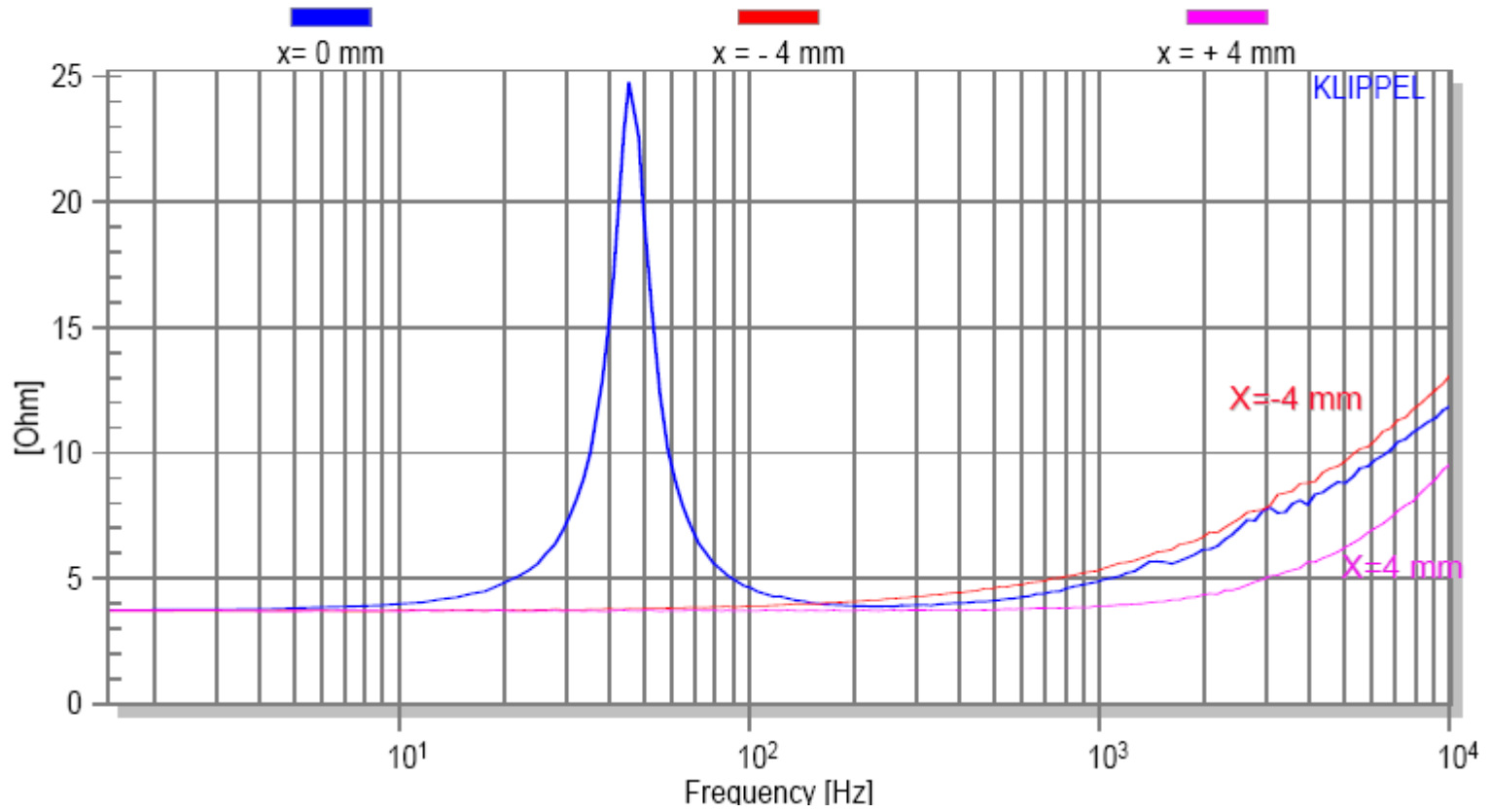
μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα



μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

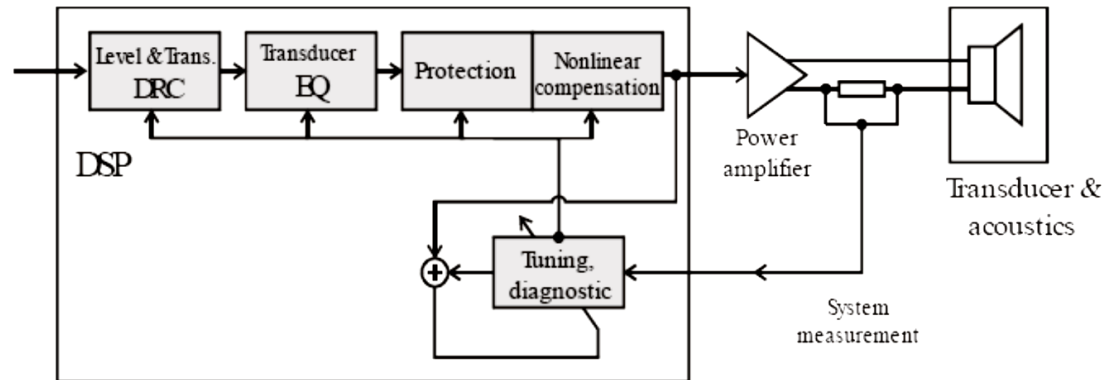
Μέτρο της ηλεκτρικής εμπέδησης

$$Z_{EI}(f)$$



μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

Ηλεκτρικός Έλεγχος Μεγάφωνων



Καθιστά σε πραγματικό χρόνο ικανή την:

- Ισοστάθμιση
- Προστασία
- Μη γραμμική αντιστάθμιση
- Ρύθμιση και διάγνωση

Effect of the Nonlinear Suspension

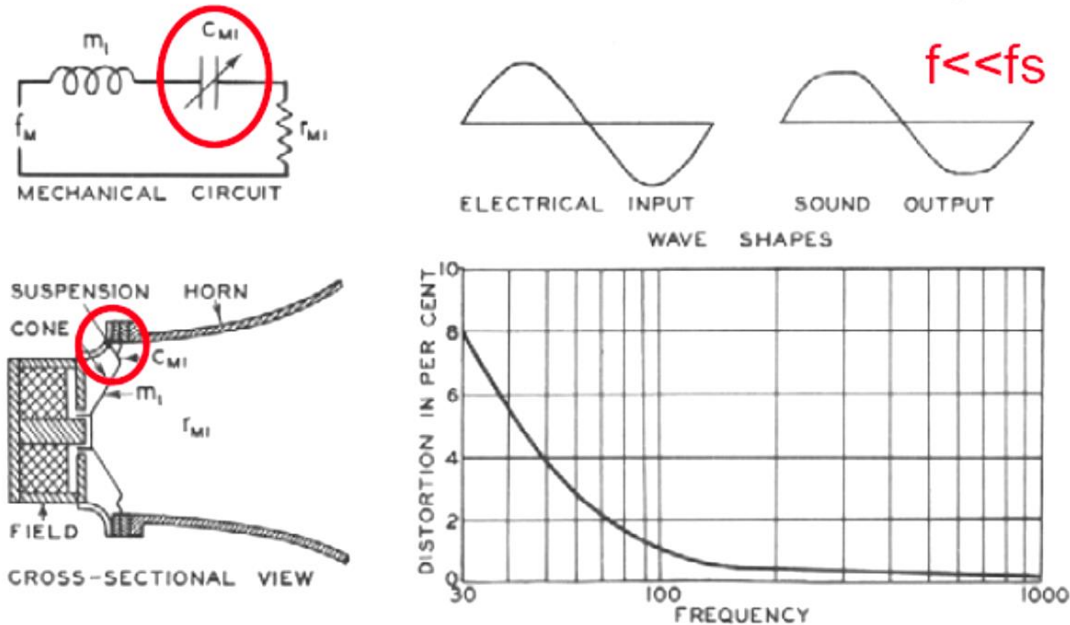
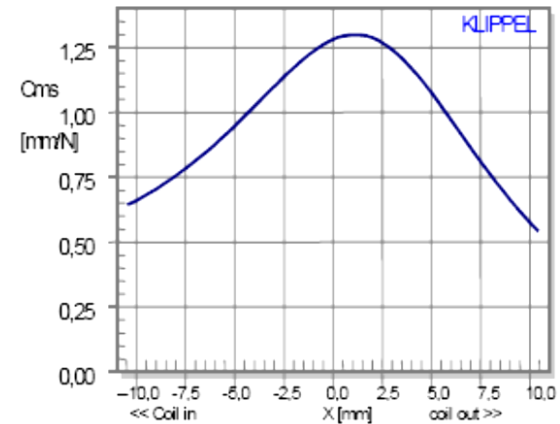
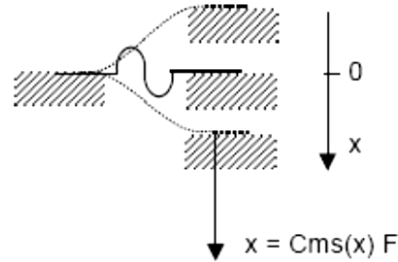
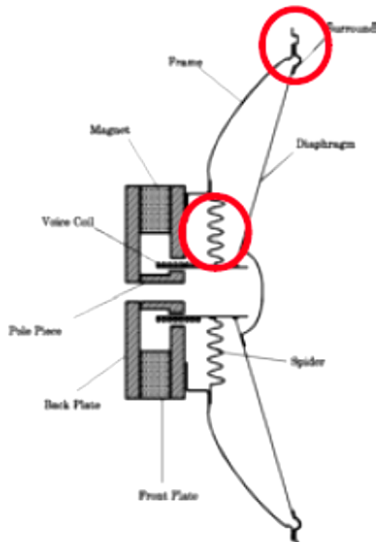


FIG. 7.10. Mechanism having a diaphragm with a nonlinear suspension system. In the mechanical circuit: m_1 = the mass of the diaphragm and voice coil. C_{M1} = the compliance of the diaphragm suspension system. r_{M1} = the mechanical resistance at the throat of the horn. f_M = the driving force. The mechanical circuit of the vibrating system and the wave shapes indicate the effect of the nonlinear element. The graph shows a typical distortion characteristic obtained on an 8-inch diameter diaphragm coupled to a large throat horn and delivering an acoustical power output of 3 watts.

Olson 1950

μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

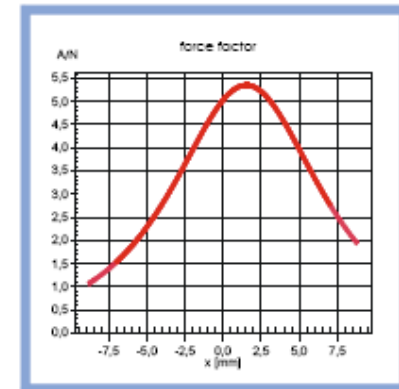
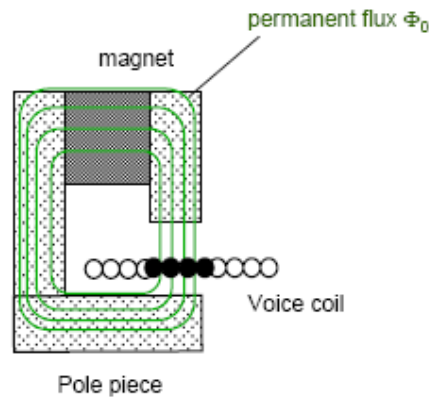
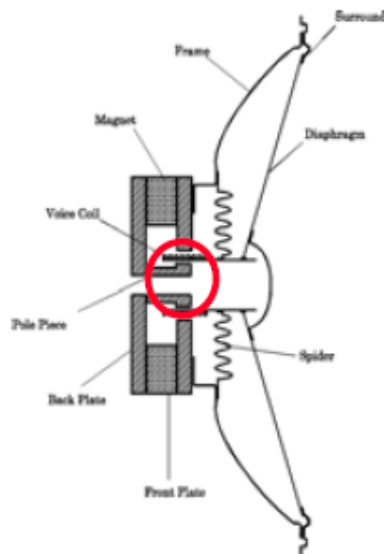
Ενδοτικότητα $C_{ms}(X)$



$C_{ms}(x)$: εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη ρύθμιση της ανάρτησης

μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

Συντελεστής Δύναμης $BI(x)$

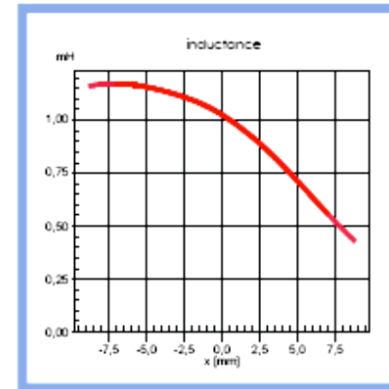
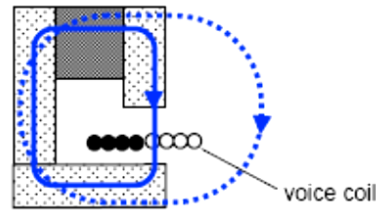
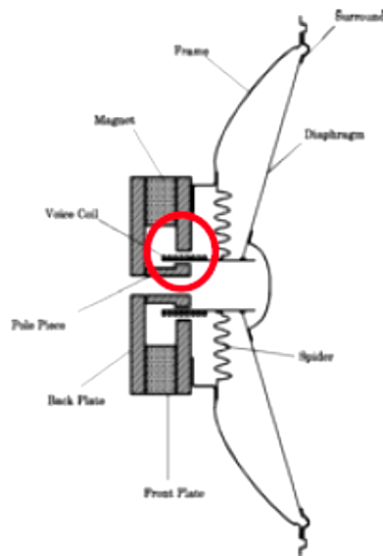


$BI(x)$ εξαρτάται από:

- Κατανομή μαγνητικού πεδίου
- Μήκος και προεξοχή του πηνίου
- Βέλτιστη θέση πηνίου φωνής

μη-γραμμικότητες σε ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα

Αυτεπαγωγή πηνίου φωνής $L_e(x)$



$L_e(x)$ εξαρτάται από:

- Γεωμετρία πηνίου, κενό, μαγνήτη
- Ιδανική θέση και μέγεθος

5. παράδειγμα

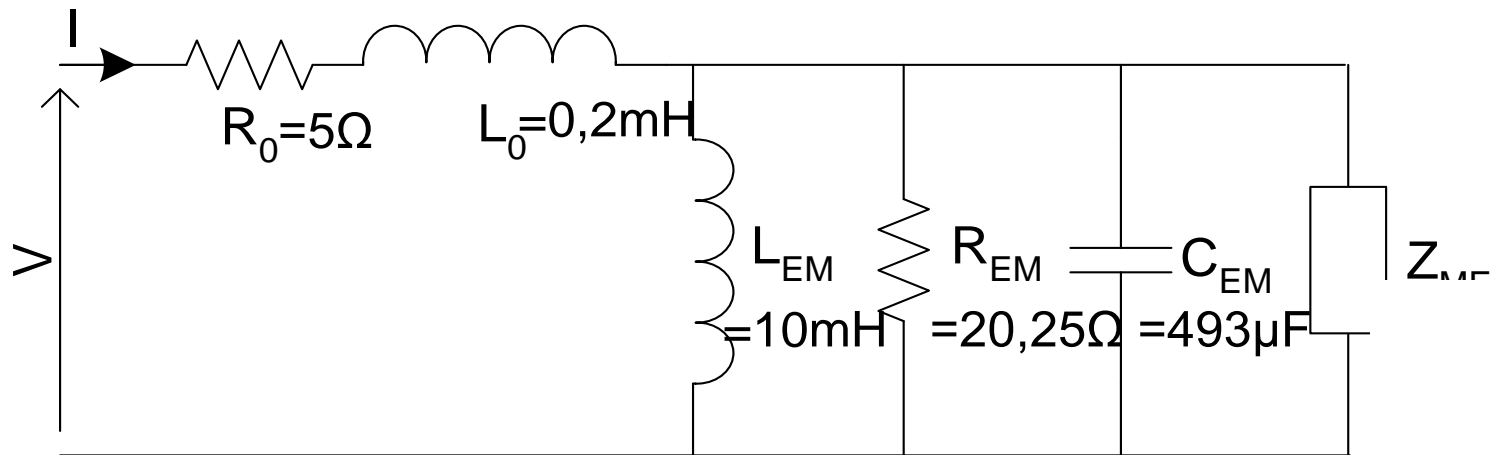
παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου

<i>Ακτίνα κώνου</i>	$\alpha = 0,1 \text{ m (8")}$
<i>Αντίσταση κώνου</i>	$R_0 = 5 \ \Omega$
<i>Εμπέδηση πηνίου</i>	$L_0 = 0,2 \text{ mH}$
<i>Μαγνητική ροή στο πηνίο (πυκνότητα)</i>	$B = 0,9 \text{ T}$
<i>Μήκος πηνίου</i>	$l = 5 \text{ m}$
<i>Μηχανική αντίσταση</i>	$R_m = 1 \text{ Ns/m}$
<i>Μηχανική σκληρότητα ανάρτησης</i>	$k = 2000 \text{ N/m}$
<i>Μηχανική μάζα</i>	$m = 10 \times 10^{-3} \text{ kg}$

παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου

$$T^2 = (Bl)^2 = 20,25$$

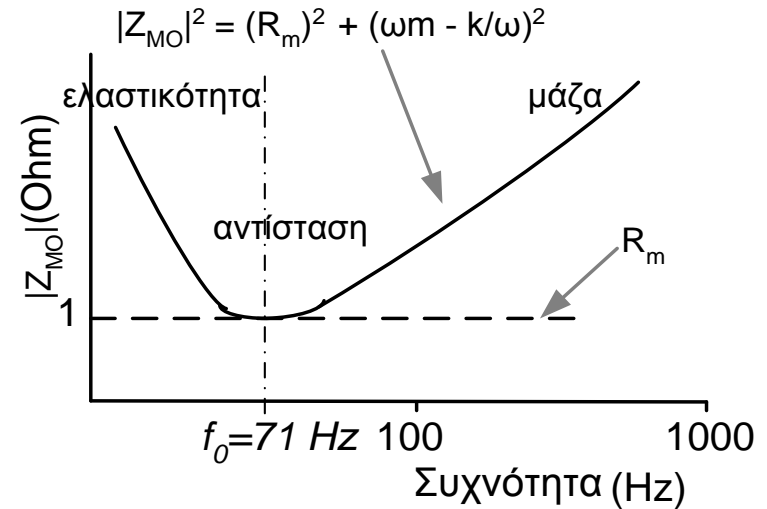
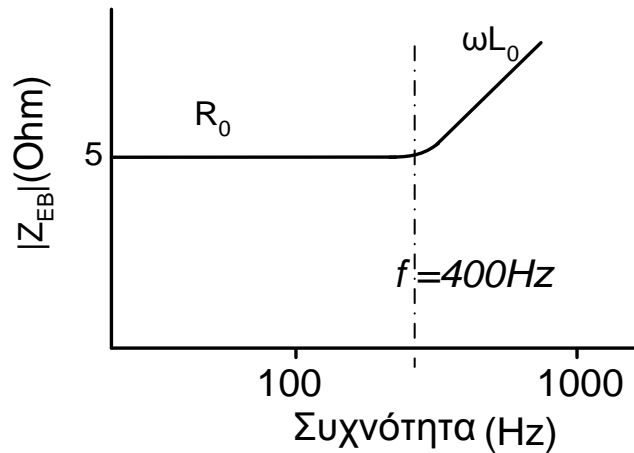
$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_m} = 20,25\Omega, \quad C_{EM} = \frac{m}{T^2} = 493\mu\text{F}, \quad L_{EM} = \frac{T^2}{k} = 10\text{mH}$$



παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου

μηχανικός
συντονισμός,
χωρίς
ακουστικό
φορτίο

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \approx 71 \text{ Hz.}$$



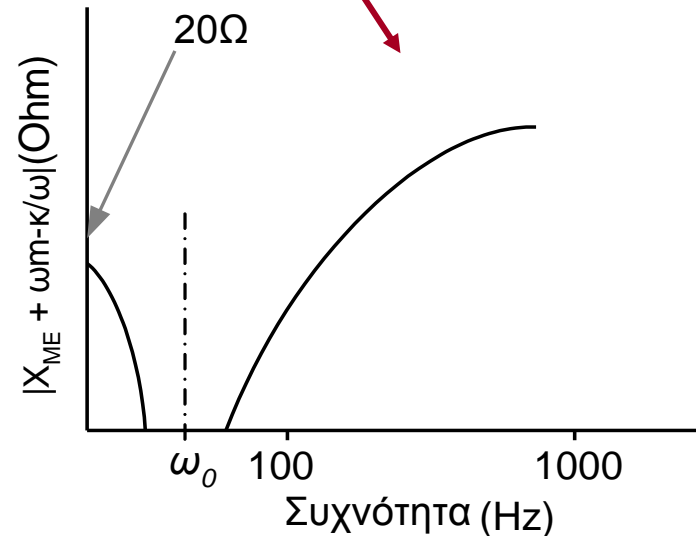
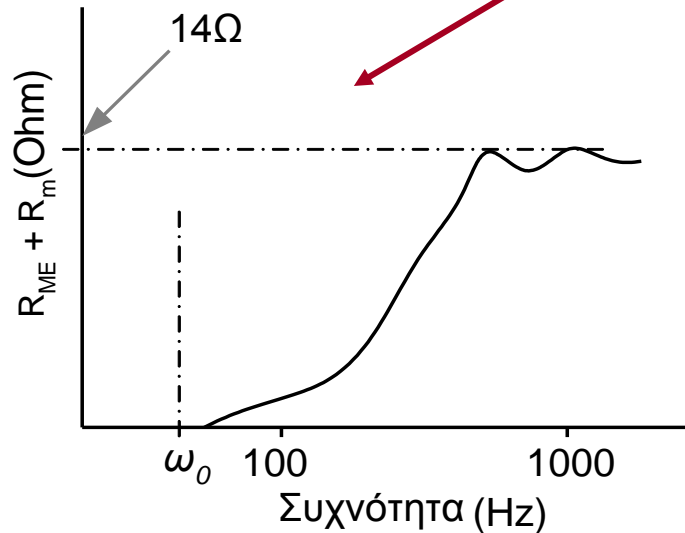
παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου

$2ka > 1$, i.e. for $f \leq 275$ Hz, $R_{ME} \approx 2,2 \cdot 10^{-5} f^2$ and $X_{ME} \approx 0,02$

$2ka > 4$, i.e. for $f > 1100$ Hz, $R_{ME} \approx 13$ Ns/m

μηχανικο-
ακουστική
εμπέδιση

$$Z_{MI} = Z_{M0} + Z_{ME} = (R_m + R_{ME}) + j \left(X_{ME} + \omega m - \frac{k}{\omega} \right)$$



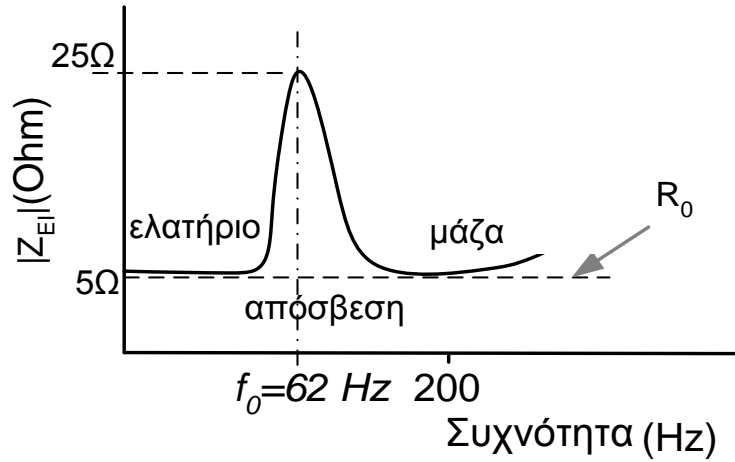
παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου

$$X_{ME} + \omega_0 m - \frac{k}{\omega_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega_0 - \frac{2000}{\omega_0} = 0 \Rightarrow \omega_0 = 389,49 \text{ rad} / \text{s} \Rightarrow f_0 \approx 62 \text{ Hz}$$

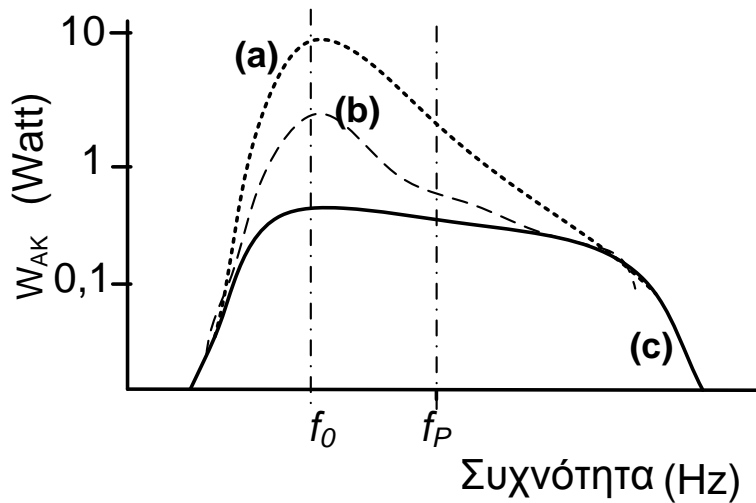
$$R_{ME} \approx 2,2 \times 10^{-5} \times (62)^2 = 0,0845 \text{ και } |Z_{MI}| \approx 1,081 \Omega.$$

μηχανικο-
ακουστικός
συντονισμός,
με ακουστικό
φορτίο

παράδειγμα μεγαφώνου - ηχείου



$$Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MI}} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{ME} + Z_{M0}}$$

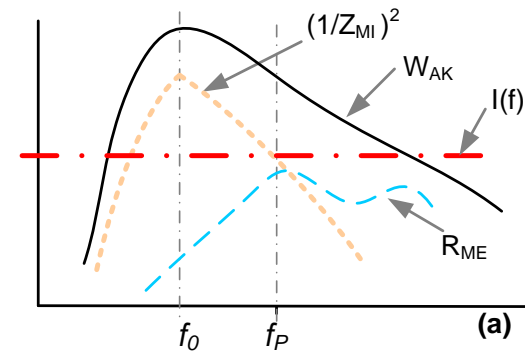


$$\eta \cong \frac{T^2 \cdot R_{ME}}{R_0 \cdot |Z_{MI}|^2}$$

εξάρτηση από ηλεκτρική τροφοδοσία

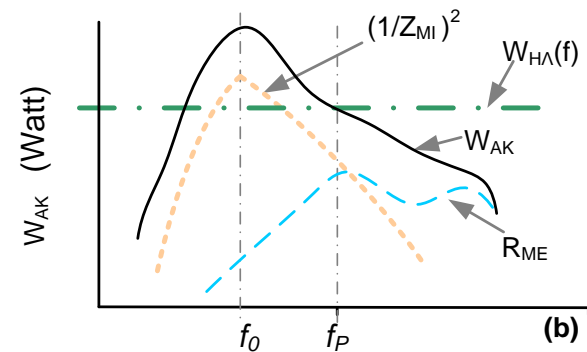
σταθερό ρεύμα
π.χ. $I = 2 \text{ Amp}$

$$W_{AK} = S^2 \left(\frac{Bl(t)}{Z_{MI}} \right)^2 R_{ME}$$



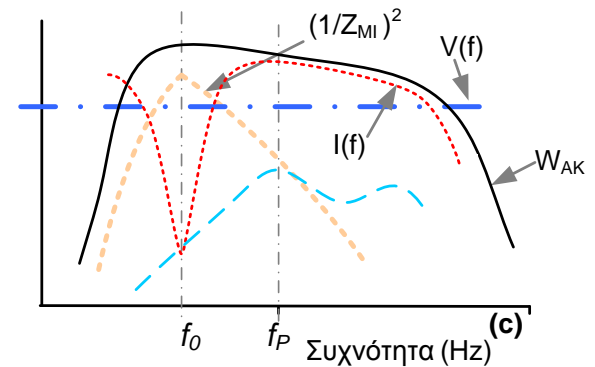
σταθερή ισχύς
π.χ. $W_{el} = 20 \text{ Watt}$

$$\eta \cong \frac{(Bl)^2 \cdot R_{ME}}{|Z_{MI}|^2 R_0}$$

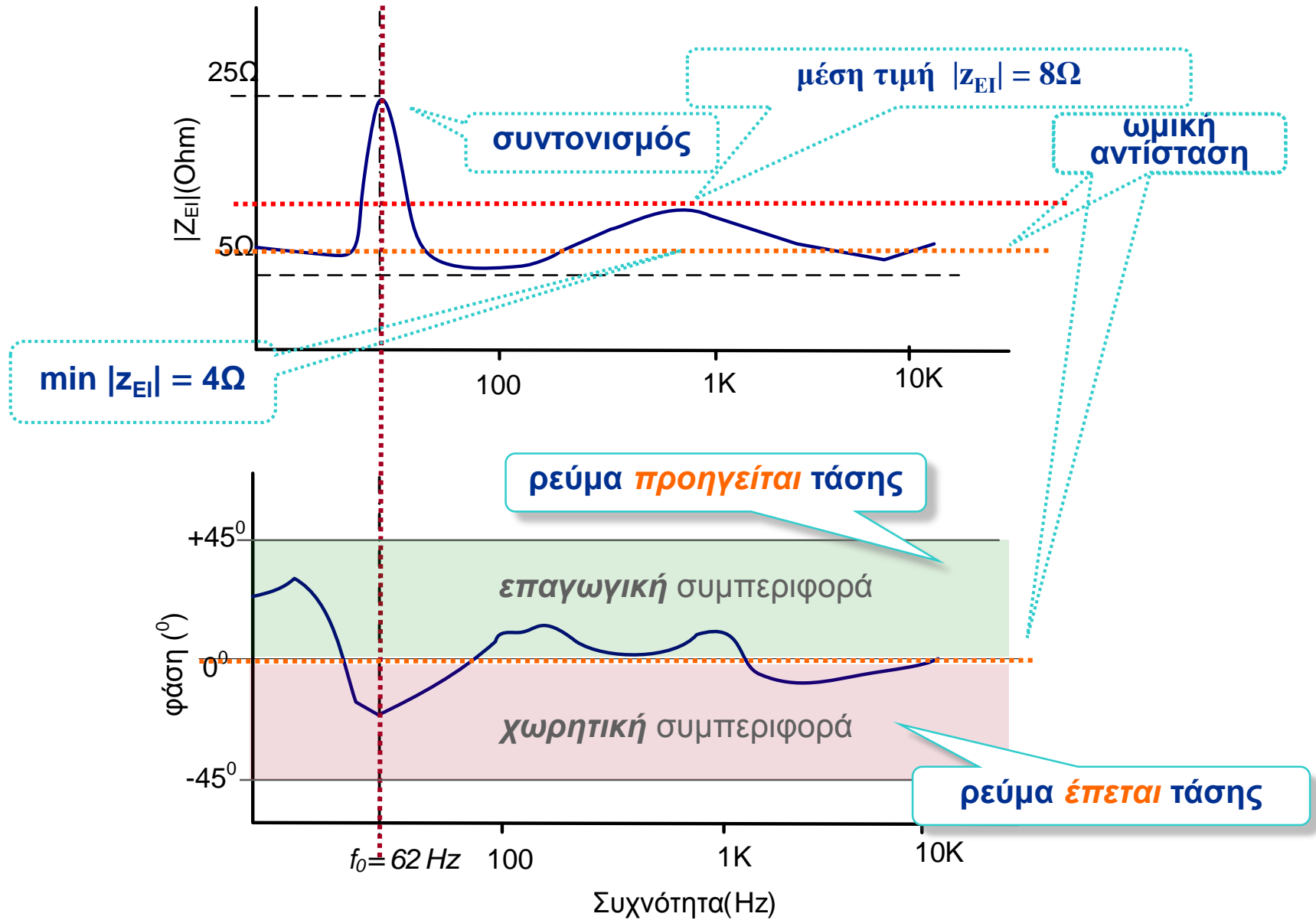


σταθερή τάση
π.χ. $V = 10 \text{ Volt}$

$$V = I \cdot Z_{EI} \quad \text{and} \quad Z_{EI} = R_0 + j\omega L_0 + \frac{T^2}{Z_{M0} + Z_{ME}}$$



εξάρτηση από ηλεκτρική τροφοδοσία



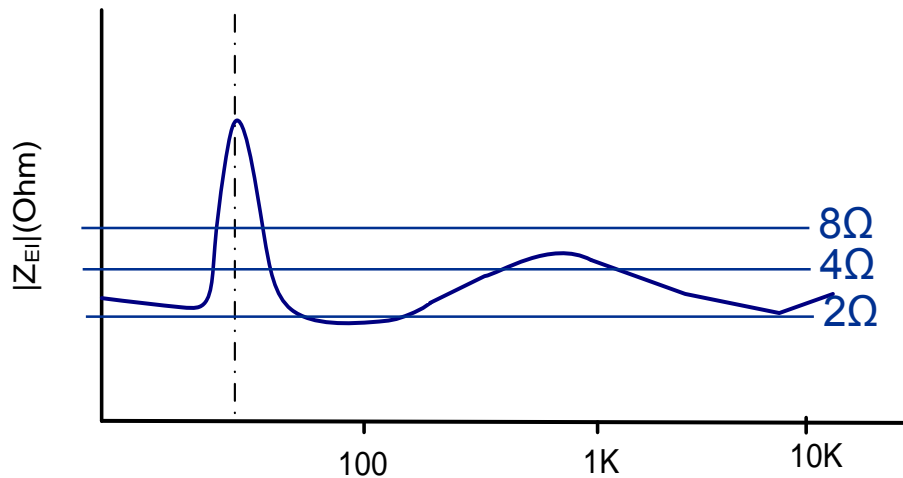
εξάρτηση από ηλεκτρική τροφοδοσία

- ο ενισχυτής, θεωρείται ότι συμπεριφέρεται σαν **γεννήτρια τάσης** (στα όρια της γραμμικής λειτουργίας του)
- Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του ηχείου $|Z_{EI}(\omega)|$ δείχνει (αντίστροφα) την **απαιτήση για ρεύμα** σε κάθε συχνότητα
- Η σύνθετη μιγαδική αντίσταση του ηχείου $Z_{EI}(\omega)$ δημιουργεί διαφορές στη **χρονική σχέση ρεύματος / τάσης**, όπως δείχνει η συνάρτηση φάσης $\phi(\omega)$
- η **συνολική ισχύς** στο φορτίο (ηχείο) δίνεται:

$$P_L(\omega) = \frac{V_L^2}{2|Z_{EI}(\omega)|} \cos \phi(\omega)$$

- Η συνάρτηση φάσης δείχνει πόσο από την (άεργη) ισχύ χάνεται σε θερμότητα στον ενισχυτή (αφού $\cos(\omega) \leq 1$), που μεταφέρει ισχύ **μόνο στο ωμικό φορτίο**
- Σε συχνότητες με **μεγάλη αλλαγή φάσης** και **μικρό μέτρο**, απαιτούν και **πολύ ρεύμα και φορτίζουν** τον ενισχυτή

Εξάρτηση από Ηλεκτρική τροφοδοσία



$$P_L(\omega) = \frac{V_L^2}{2|Z_{EI}(\omega)|} \cos \phi(\omega)$$

- η αποδιδόμενη ισχύς **αυξάνει** όσο **μειώνεται** το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του ηχείου $|Z_{EI}(\omega)|$

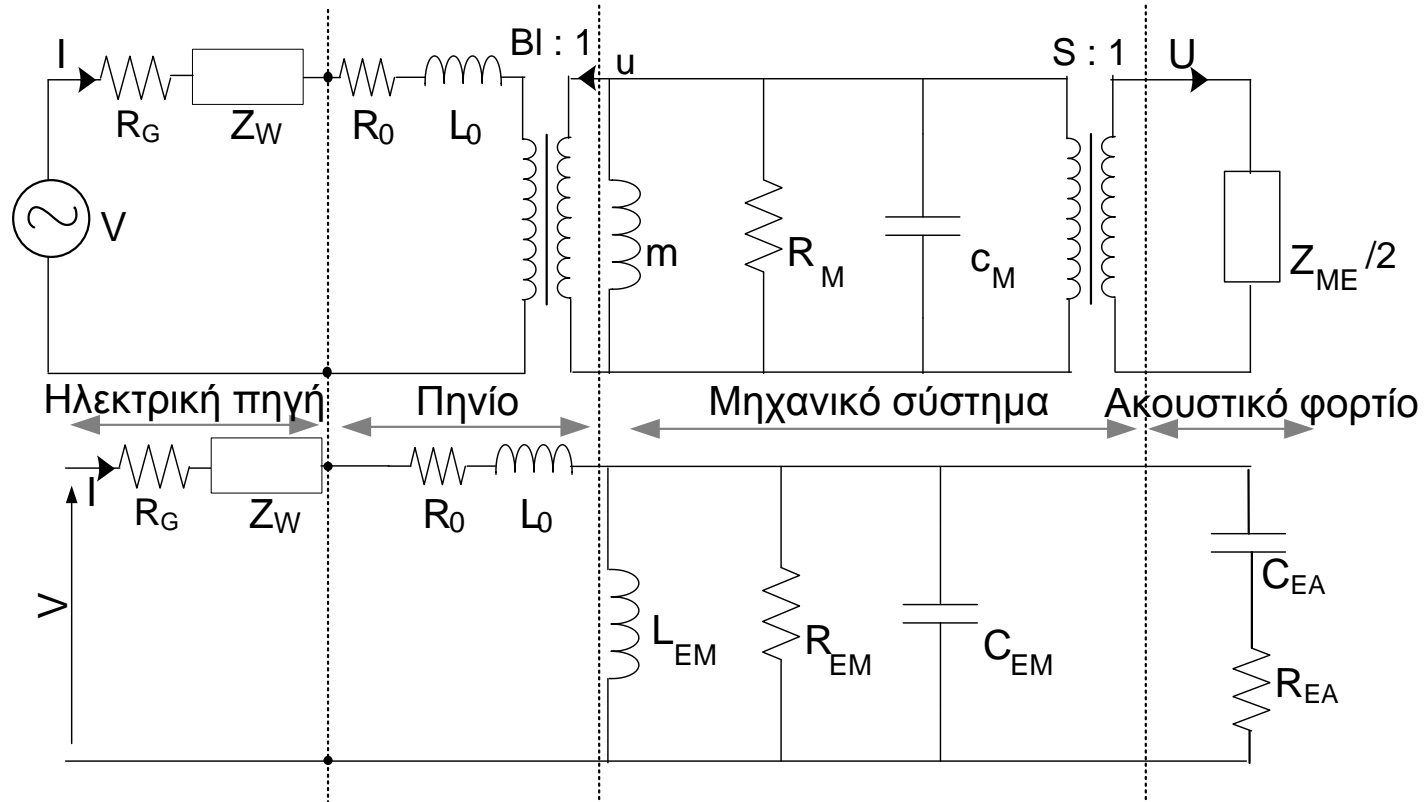
π.χ. 100 Watt rms στα 8Ω
160 Watt rms στα 4Ω
210 Watt rms στα 2Ω

...αλλά...

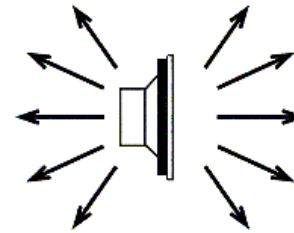
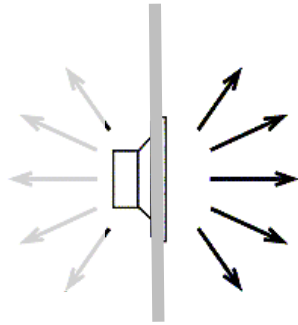
- αυξάνει η μη-γραμμικότητα των τρανζίστορ (THD)
- αυξάνει το ρεύμα εξόδου στα τρανζίστορ (φθορά)
- αυξάνει τα θερμικά φορτία στον ενισχυτή (φθορά)
- αυξάνει η απώλεια σε καλώδια (μειώνεται η απόδοση του ενισχυτή)
- ψαλιδισμός του σταδίου τροφοδοσίας (THD)

6. ισοδύναμα κυκλώματα

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας – ισοδύναμα κυκλώματα

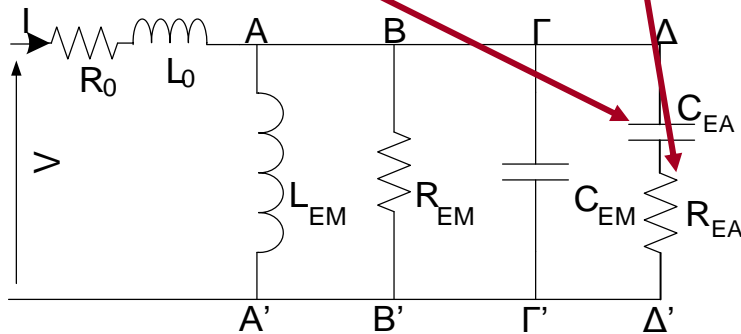


ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας – ισοδύναμα κυκλώματα

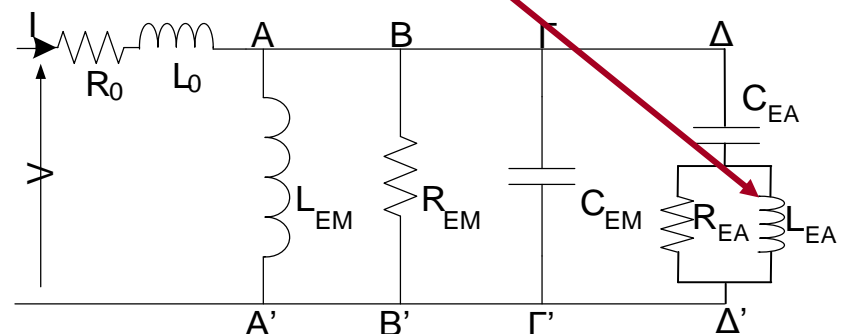


$$C_{EA} = \frac{\rho \delta a S}{3\pi T^2} \quad R_{EA} = \frac{T^2}{\rho c S}$$

$$L_{EA} = \frac{T^2 \rho a}{(\rho c)^2 S} \quad T^2 = (Bl)^2$$



άπειρος αποσβεστήρας



ελεύθερο μεγάφωνο

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας – ισοδύναμα κυκλώματα

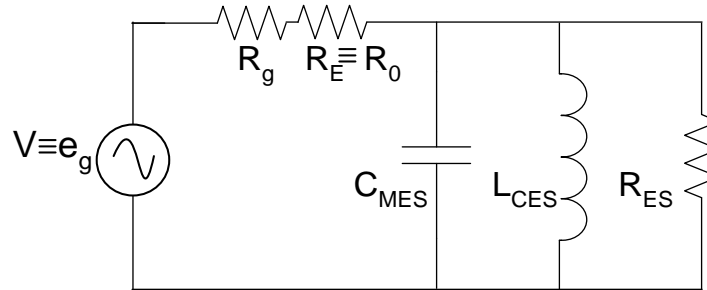
συντελεστές ποιότητας – συνδυάζουν όλες τις παραμέτρους του μεγαφώνου

$$Q_e = \frac{R_0 \sqrt{k_{TOT} m}}{(Bl)^2} \quad Q_m = \sqrt{\frac{k_{TOT} m}{R_m}} \quad Q_r = \sqrt{\frac{k_{TOT} m}{R_{ME}}}$$

$$Q_{mr} = \frac{Q_m Q_r}{Q_m + Q_r} \quad Q_T = \frac{m\omega_0}{R_m + R_{ME} + (Bl)^2 / R_0}$$

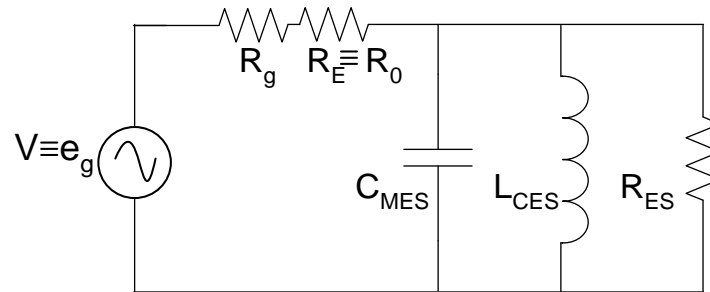
$$H_p(\omega) = \frac{(j\omega / \omega_0)^2}{(j\omega / \omega_0)^2 + (j\omega / \omega_0) Q_T^{-1} + 1} \left(\frac{Bl}{R_0} \frac{a^2 \rho}{2mr} \right)$$

μόνο 6 Thiele-Small παράμετροι



<i>Αντίσταση πηνίου</i>	$R_0 \equiv R_g$	
<i>Ηλεκτρικός συντελεστής ποιότητας</i>	Q_{ES}	$Q_{ES} = \omega_0 C_{MES} R_0$
<i>Μηχανικός συντελεστής ποιότητας</i>	Q_{MS}	$Q_{MS} = \omega_0 C_{MES} R_{ES}$
<i>Συχνότητα συντονισμού μεγαφώνου</i>	$f_S \equiv f_0$	
<i>Επιφάνεια κώνου</i>	S_D	
<i>Ισοδύναμος όγκος αέρα</i>	V_{AS}	$V_{AS} = \rho c^2 C_{EM}$

παράμετροι Thiele – Small



$$C_{MES} = \frac{mS^2}{T^2} = C_{EM} S^2$$

$$L_{CES} = \frac{T^2}{kS^2} = \frac{L_{EM}}{S^2}$$

$$R_{ES} = \frac{T^2}{R_m S^2} = \frac{R_{EM}}{S^2}$$

$$Q_{ES} = \omega_0 C_{MES} R_0$$

$$Q_E = Q_{ES} \frac{R_0 + R_g}{R_0}$$

$$Q_{MS} = \omega_0 C_{MES} R_{ES}$$

$$Q_T = \frac{Q_E Q_M}{Q_E + Q_M}$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$$

$$V_{AS} = \rho c^2 C_{EM}$$

$$\eta(f_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}} \quad T_0^2 = 1/\omega_0^2 = C_{MES} L_{CES} = m/k \quad T_0 = \frac{mS^2 R_0}{Q_{TS} ((Bl)^2 + mS^2 R_0 R_m)}$$

7. σύστημα ηχείου

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας σε κλειστό ηχείο

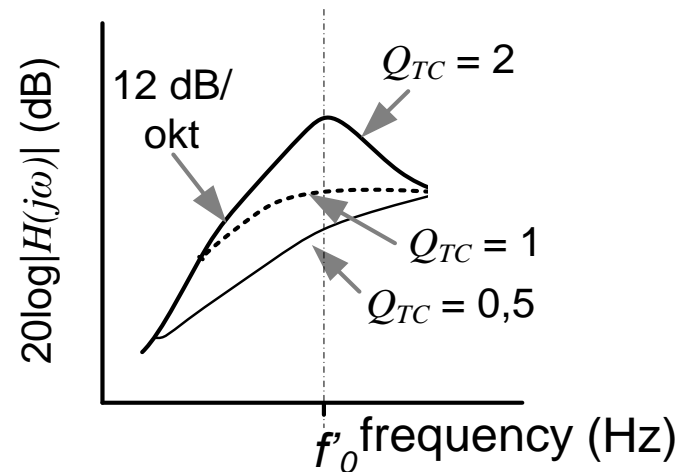
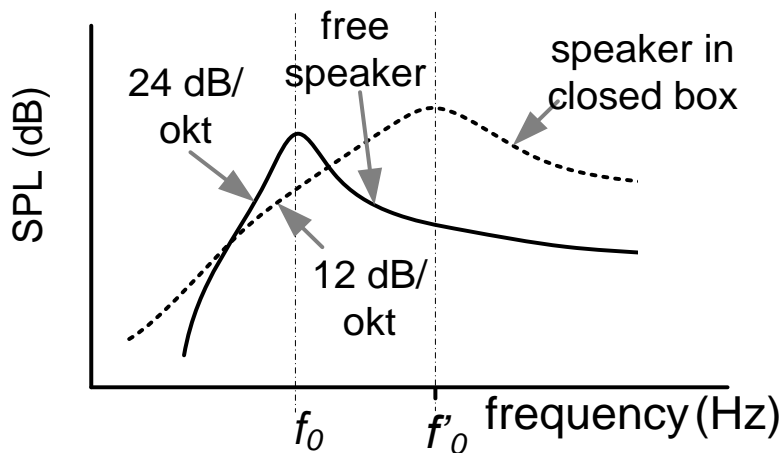
$$X_{ME} + \omega_0 m - \frac{k}{\omega_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega_0 - \frac{2000}{\omega_0} = 0 \Rightarrow \omega_0 = 389,49 \text{ rad/s} \Rightarrow f_0 \approx 62 \text{ Hz}$$

$$k_A = (\pi a^2)^2 \frac{\rho c^2}{V_{tb}}$$

$$k_{TOT} = k + k_A = 2000 + 2809 = 4809 \text{ N/m}$$

συντονισμός σε κλειστό ηχείο, με ακουστικό φορτίο

$$X_{ME} + \omega'_0 m - \frac{k_{TOT}}{\omega'_0} = 0 \Rightarrow 0,02 \frac{\omega'_0}{2\pi} + 10^{-2} \omega'_0 - \frac{4809}{\omega'_0} = 0 \Rightarrow \omega'_0 = 604,04 \text{ rad/s} \Rightarrow f'_0 \approx 96 \text{ Hz}$$



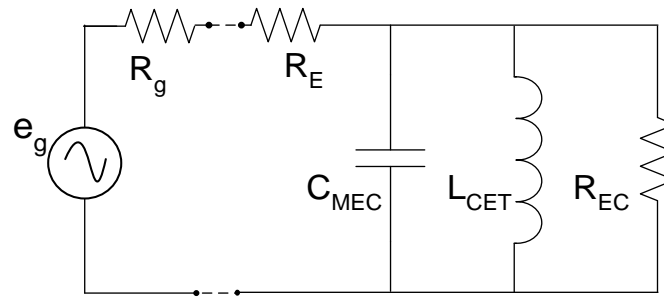
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΗΧΕΙΟΥ

$$C_{MEC} = \frac{mS^2}{T^2} = C_{MES}$$

$$L_{CET} = \frac{T^2}{k_{TOT}S^2}$$

$$R_{EC} = \frac{T^2}{R_m S^2 + R_{AB} S^2}$$

$$\alpha = C_{AS} / C_{AB}$$



$$R_{ATC} = R_{AS} + R_{AB} + \frac{T^2}{(R_g + R_0)S^2}$$

$$Q_{EC} = \omega'_0 C_{MEC} R_0$$

$$Q_{MC} = \omega'_0 C_{MEC} R_{EC}$$

$$Q_{EC} / Q_{ES} = \sqrt{\alpha + 1}$$

$$Q_{TC} = \frac{1}{\omega'_0 C_{AT} R_{ATC}}$$

$$C_{AS} / C_{AT} = \alpha + 1$$

$$\omega'_0 / \omega_0 = f'_0 / f_0 = T_0 / T'_0 = \sqrt{\alpha + 1}$$

$$H(s) = \frac{s^2 T_0^2}{s^2 T_0^2 + s T'_0 / Q_{TC} + 1}$$

$$\eta(f_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AS}}{c^3 Q_{ES}}$$

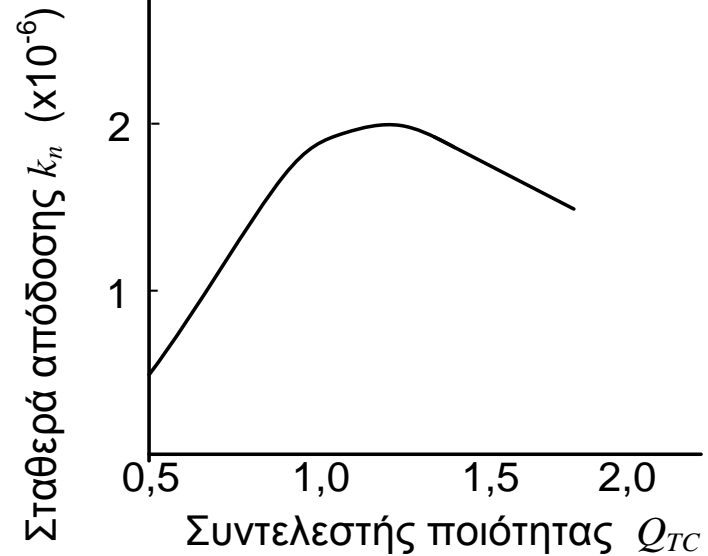
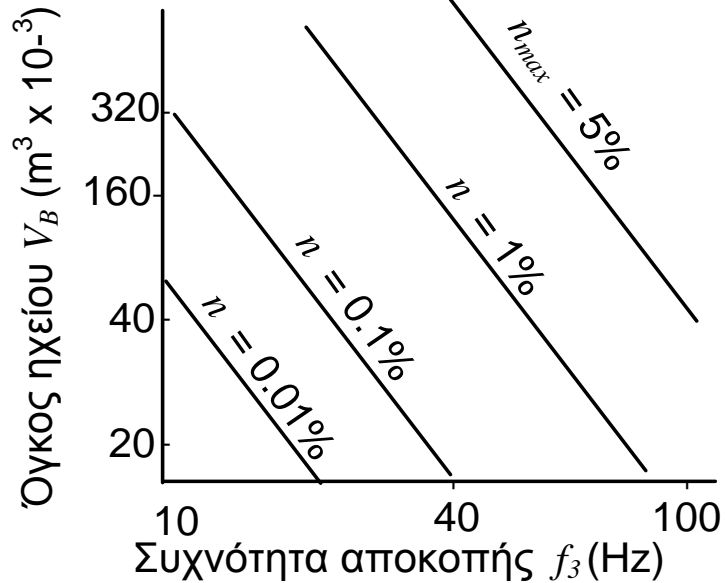
$$\eta(f'_0) \approx \frac{4\pi^2 f_0^3 V_{AT}}{c^3 Q_{EC}}$$

$$V_{AT} = \rho c^2 C_{AT}$$

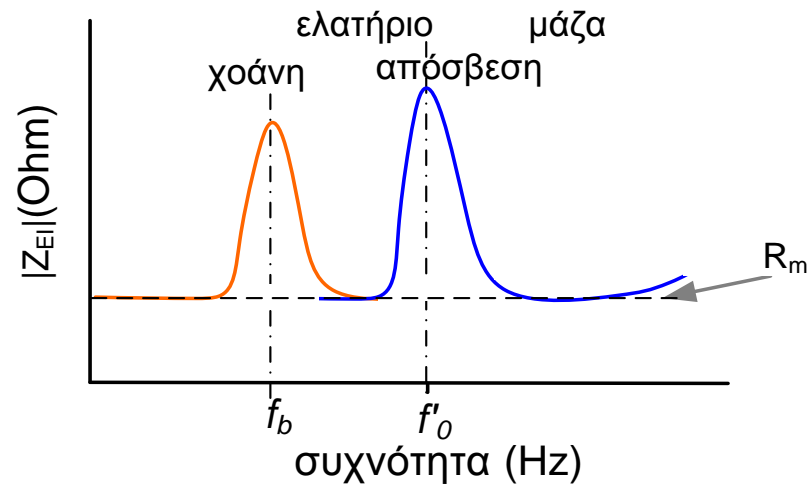
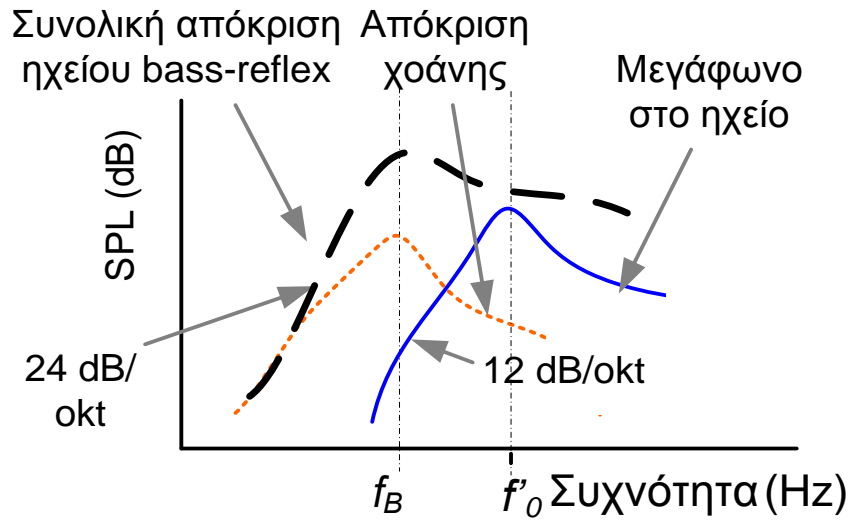
απόδοση σε κλειστό κουτί

$$\eta(f_0') = k_n f_3^{\beta} V_B$$

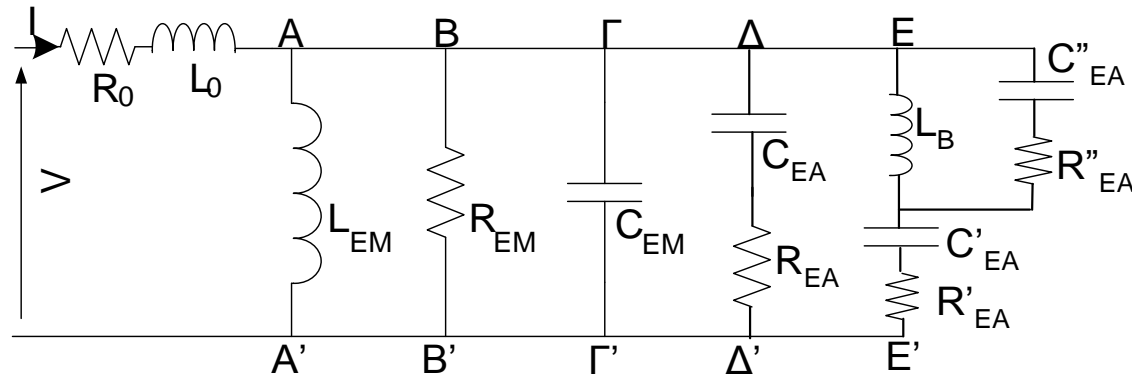
$$k_n = \frac{4\pi^2 f_0^{\beta} V_{AT}}{c^3 f_3^3 V_B Q_{EC}}$$



Ηχεία ανάκλασης χαμηλών



ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας σε ηχείο bass-reflex



$$C_{EA} = \frac{\rho \delta a S}{3\pi T^2}$$

$$R_{EA} = \frac{T^2}{\rho c S}$$

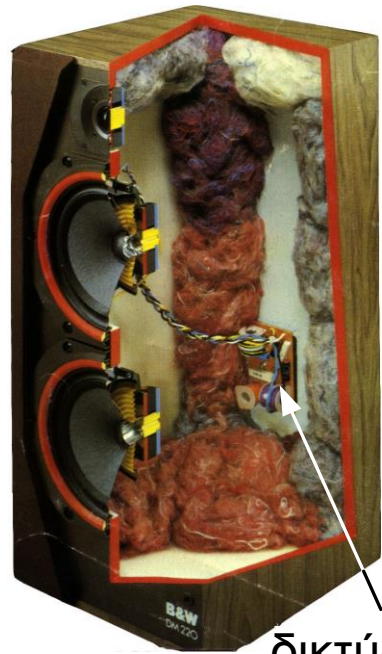
$$L_B = \frac{T^2 V_B}{\rho c^2 S}$$

$$C'_{EA} = \frac{\rho 8 b S^2}{3\pi T^2 S_p} \quad R'_{EA} = \frac{T^2 S_p}{\rho c S^2}$$

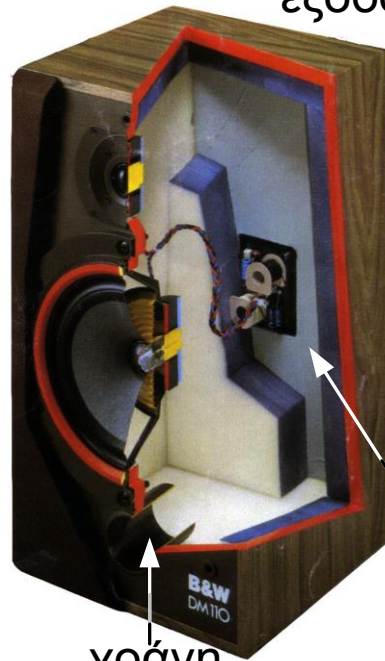
επιφάνεια τρύπας

$$C''_{EA} = \frac{\rho S_p S}{2\pi g T^2} \quad R''_{EA} = \frac{T^2 2\pi g^2}{\rho c S}$$

απόσταση τρύπας και woofer

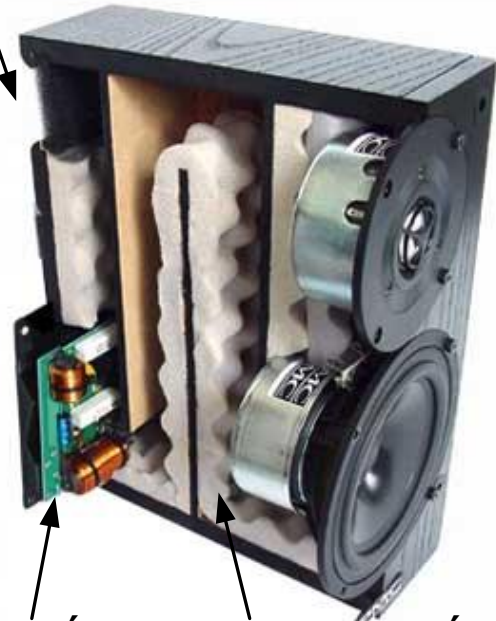


δικτύωμα
cross-over



χοάνη
χαμηλών

έξοδος χαμηλών



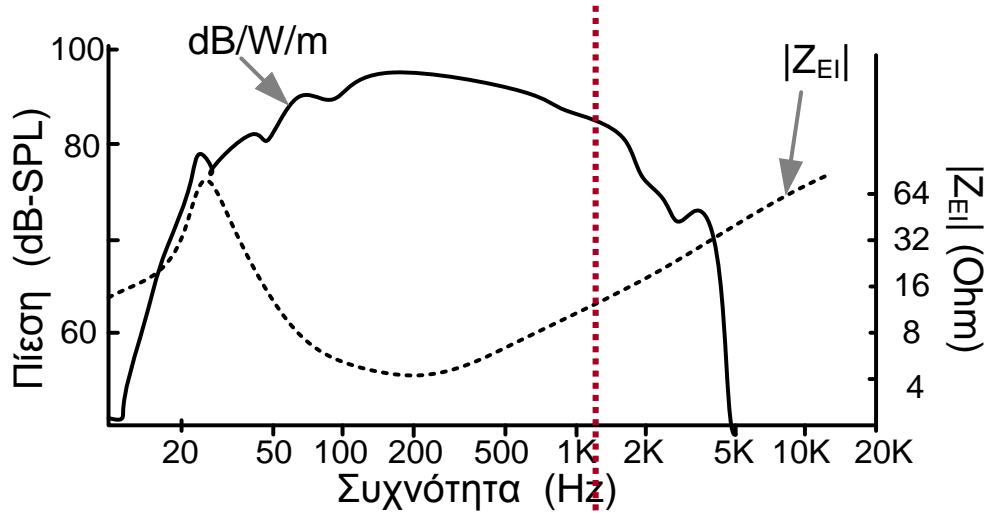
δικτύωμα
cross-over

εσωτερικές
σωληνώσεις

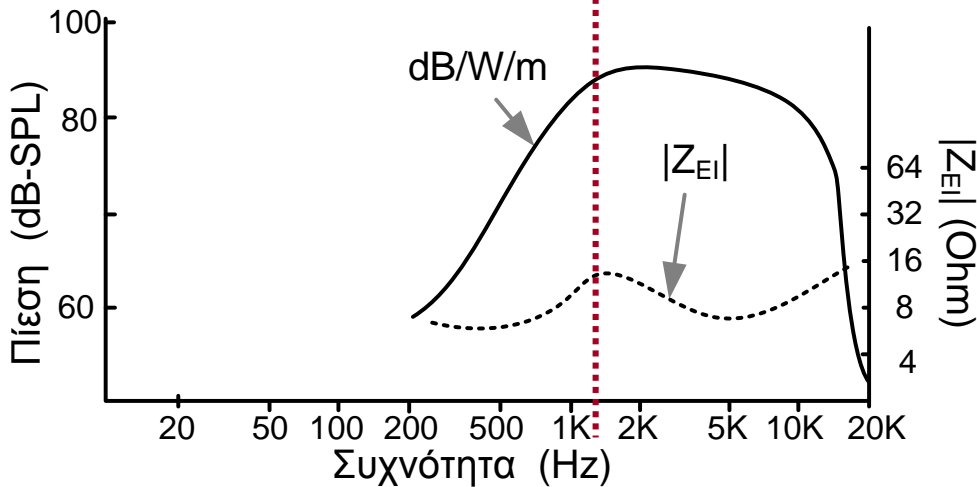
8. κυκλώματα διαχωρισμού

Λειτουργία πολλαπλών δρόμων

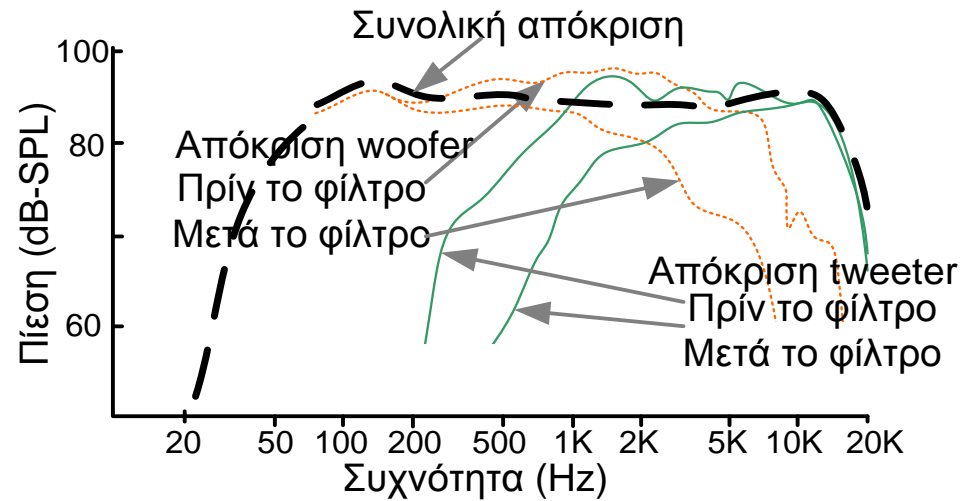
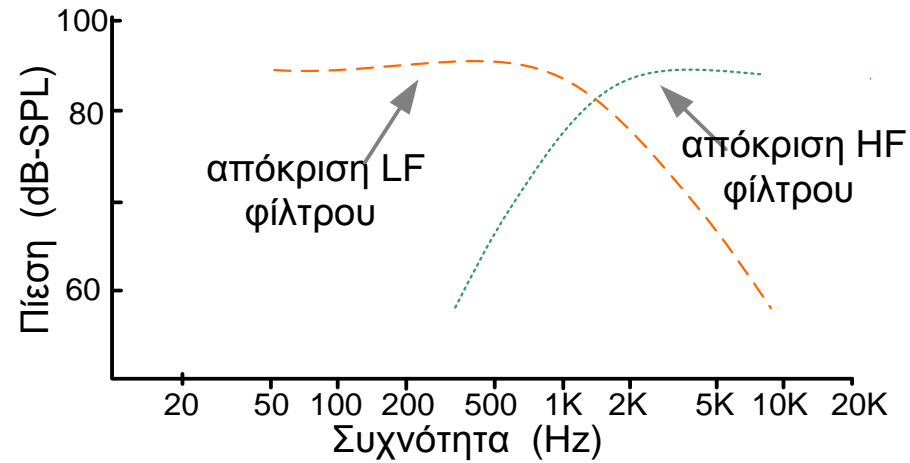
μεγάφωνο
χαμηλών-μεσαίων
woofer



μεγάφωνο
μεσαίων-ψηλών
tweeter



Λειτουργία πολλαπλών δρόμων

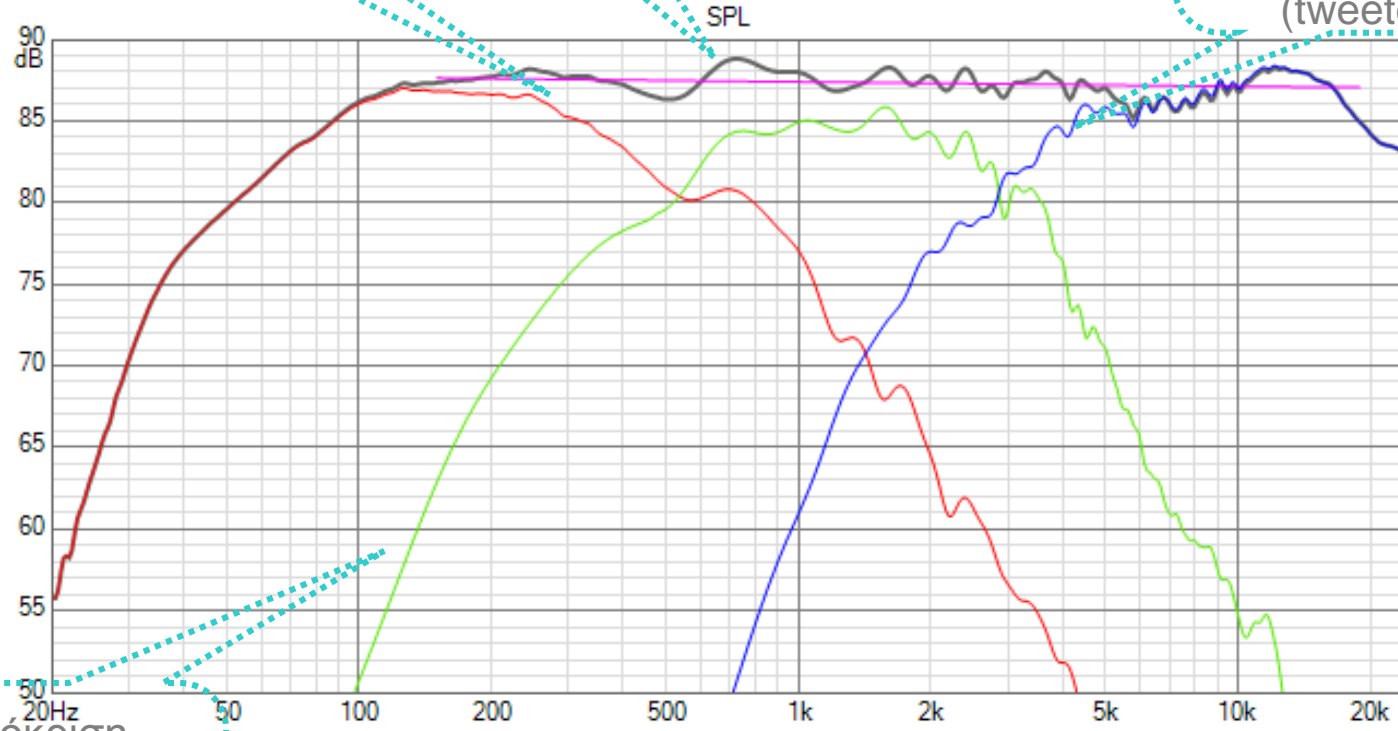


Λειτουργία πολλαπλών δρόμων

απόκριση
μεγαφώνου
χαμηλών
συχνοτήτων
(woofer)

συνολική
απόκριση
συστήματος

απόκριση
μεγαφώνου
ψηλών
συχνοτήτων
(tweeter)



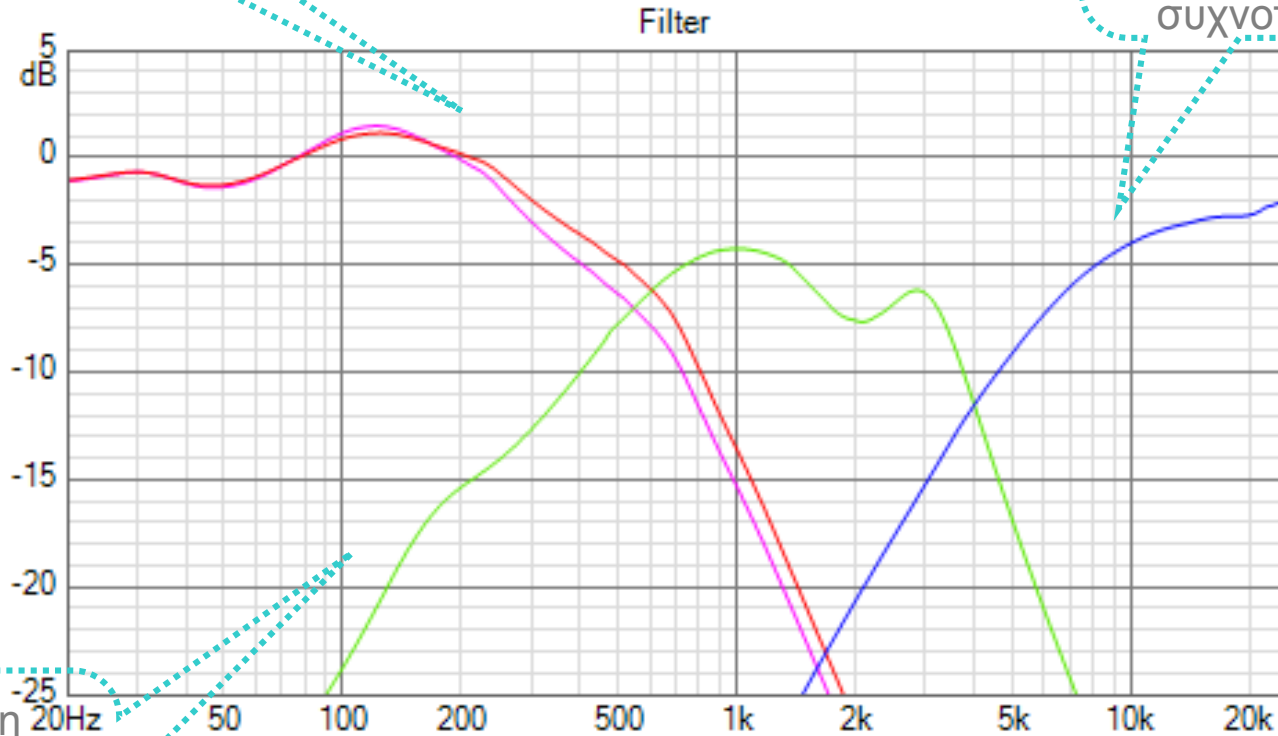
απόκριση
μεγαφώνου
μεσαίων
συχνοτήτων
(midrange)

σχεδιασμός ηχείου 3 δρόμων με το λογισμικό **VituixCAD**
αποκρίσεις μεγαφώνων

Λειτουργία πολλαπλών δρόμων

απόκριση
φίλτρου
μεγαφώνου
χαμηλών
συχνοτήτων

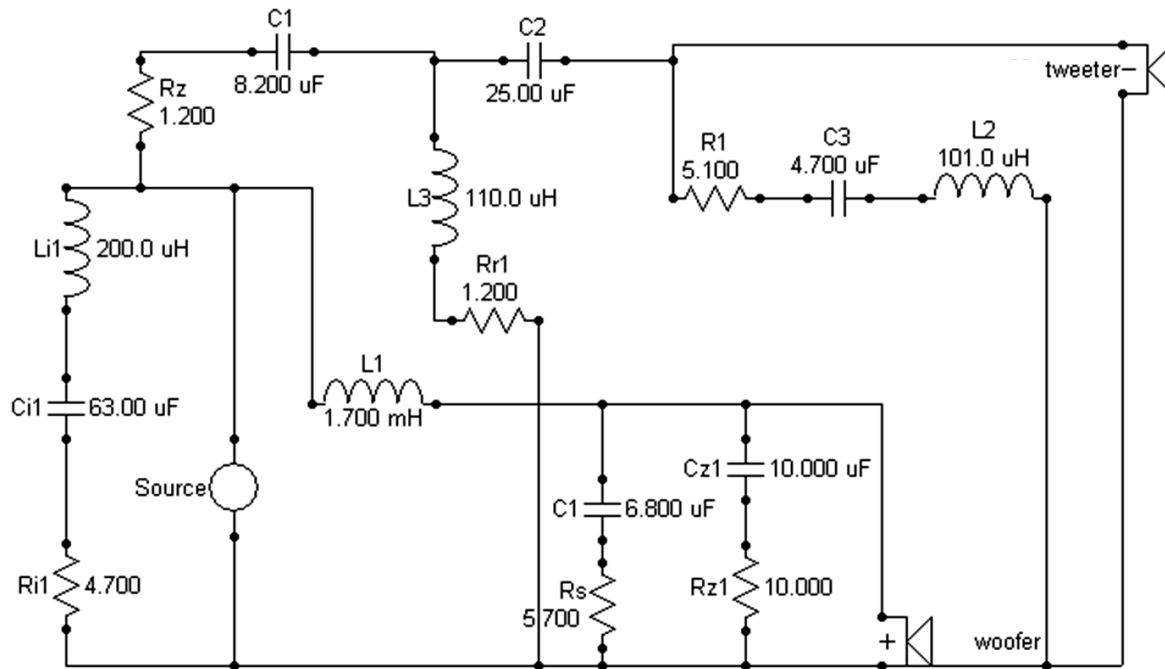
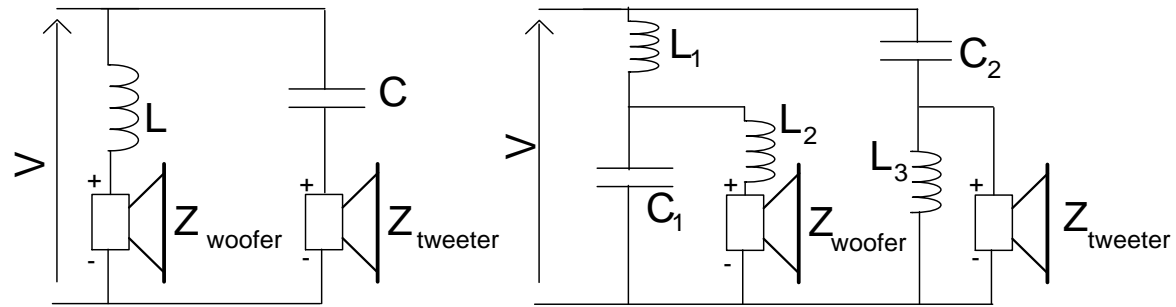
απόκριση
φίλτρου
μεγαφώνου
ψηλών
συχνοτήτων



απόκριση
φίλτρου
μεγαφώνου
μεσαίων
συχνοτήτων

σχεδιασμός ηχείου 3 δρόμων με το λογισμικό **VituixCAD**
αποκρίσεις φίλτρων *cross-over*

κυκλώματα διαχωρισμού συχνοτήτων (cross-overs)



9. διαδικασία σχεδιασμού

σχεδιασμός ηχείων: διαδικασία

επιλογή των μονάδων μεγαφώνων (από τις διαθέσιμες στο εμπόριο, επιλογή που είναι καθοριστική για την ποιότητα και το κόστος της τελικής υλοποίησης)



εξομοίωση της απόκρισης του συνολικού συστήματος με τη χρήση προσομοιωτικών εργαλείων σε υπολογιστή (π.χ. προγράμματα *Lear*, *Calshod*, *Vituixcad*)



κατασκευή πρωτοτύπου (με καμπίνα ηχείου και δικτύωμα cross-over)



μέτρηση της ακουστικής απόκρισης, π.χ. δες *Εργαστηριακή Άσκηση 3*



τυχόν επανασχεδιασμός χαρακτηριστικών του cross-over για απαιτούμενες διορθώσεις στην απόκριση, ή και τροποποιήσεις στην καμπίνα



τυχόν διορθώσεις με βάση ακροάσεις του συστήματος

σχεδιασμός ηχείων: μέτρηση παραμέτρων μεγαφώνων

Μέτρηση R_0 (Ω), της ωμικής DC αντίστασης μεγαφώνου. Μέτρηση a (m), της ακτίνας μεγαφώνου



Μέτρηση $|Z_{EI}(f)|$, του μέτρου εμπέδισης του μεγαφώνου, με τη συχνότητα, όπως στην **Άσκηση 3**.



Καθορισμός f_0 (Hz), τη συχνότητα συντονισμού για την οποία $|Z_{EI}(f)| = |Z_{EI}(f)|_{max}$



Καθορισμός f_1 και f_2 (Hz) για τις οποίες

$$|Z_{EI}(f_1, f_2)| = \sqrt{\frac{|Z_{EI}(f)|_{max}}{R_0}}$$



Υπολογισμός Q_{MS} , που είναι ο μηχανικός συντελεστής ποιότητας του μεγαφώνου

$$Q_{MS} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{|Z_{EI}(f)|_{max}}{R_0}}$$



Υπολογισμός V_{AS} , όπου

$$V_{AS} = \rho c^2 C_{AS} = \frac{\rho c^2 S^2}{(Bl)^2} L_{EM} = \frac{\rho c^2 S^2}{a^2}$$



Υπολογισμός Q_{TS} , όπου

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{TS}}{Q_{ES} + Q_{TS}} \quad Q_{ES} = R_{AE} C_{AS} / 2\pi f_0 \quad R_{AE} = \frac{(Bl)^2}{S^2} (R_0 + R_G)$$

σχεδιασμός ηχείων: μέτρηση παραμέτρων μεγαφώνων

Μέτρηση R_0 (Ω), της ωμικής DC αντίστασης μεγαφώνου. Μέτρηση a (m), της ακτίνας μεγαφώνου



Μέτρηση $|Z_{EI}(f)|$, του μέτρου εμπέδισης του μεγαφώνου, με τη συχνότητα, όπως στην **Άσκηση 3**.

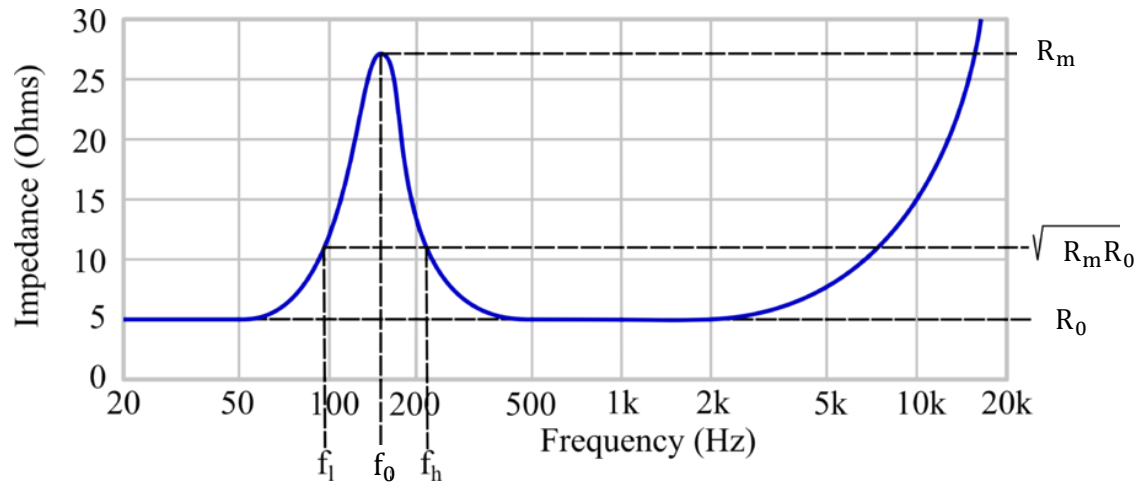


Καθορισμός f_0 (Hz), τη συχνότητα συντονισμού για την οποία $|Z_{EI}(f)| = |Z_{EI}(f)|_{max}$



Καθορισμός f_1 και f_2 (Hz) για τις οποίες

$$|Z_{EI}(f_1, f_2)| = \sqrt{\frac{|Z_{EI}(f)|_{max}}{R_0}}$$



σχεδιασμός ηχείων: υπολογισμός παραμέτρων κουτιού

Επιλέγεται ο επιθυμητός συντελεστής ποιότητας του ηχείου Q_{TC} , που καθορίζει την μορφή της απόκρισης στην περιοχή του συντονισμού μεγαφώνου στο ηχείο, π.χ. $Q_{TC} = 0,5$



Καθορίζεται αν $Q_{TC} > Q_{TS}$, οπότε αν όχι επιλέγονται άλλη μονάδα μεγαφώνου χαμηλών (και επαναλαμβάνεται όλη η προηγούμενη διαδικασία).

Υπολογίζεται ο όρος α μεταξύ ενδοτικότητας του μεγαφώνου στον αέρα και στο κουτί,



$$\alpha = \left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}} \right)^2 - 1$$

Υπολογίζεται ο V_B (m^3), όπου είναι ο εσωτερικός όγκος του ηχείου. Αν ο όγκος που υπολογίστηκε είναι αποδεκτός, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα



$$V_B = V_{AS} / \alpha$$

Υπολογίζεται η συχνότητα συντονισμού / αποκοπής του μεγαφώνου στο ηχείο, f'_0 (Hz) όπου



$$f'_0 = f_0 Q_{TC} / Q_{TS}$$

ικανοποιητικά χαρακτηριστικά;



Καθορίζονται οι εξωτερικές διαστάσεις του ηχείου με βάση τον όγκο V_B που υπολογίστηκε. Για να αποφεύγονται στάσιμα κύματα στο εσωτερικό του ηχείου, οι διαστάσεις Πλάτος X Ύψος X Βάθος θα πρέπει να ακολουθούν τις αναλογίες 1 : 1,14 : 1,39 ή 1 : 1,28 : 1,54 ή 1 : 1,60 : 2,23.



ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

<http://www.wcl.ece.upatras.gr/AudioGroup/>