

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

5. ΑΝΑΛΟΓΑ, ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ & ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Γιάννης Μουρτζόπουλος

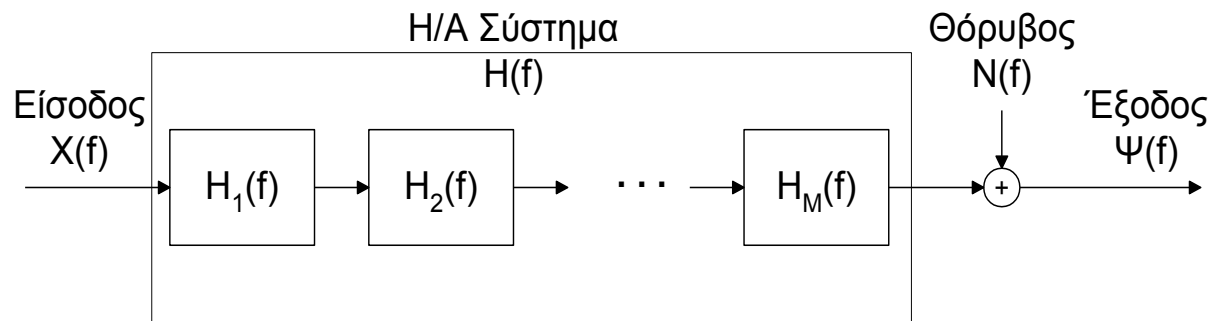
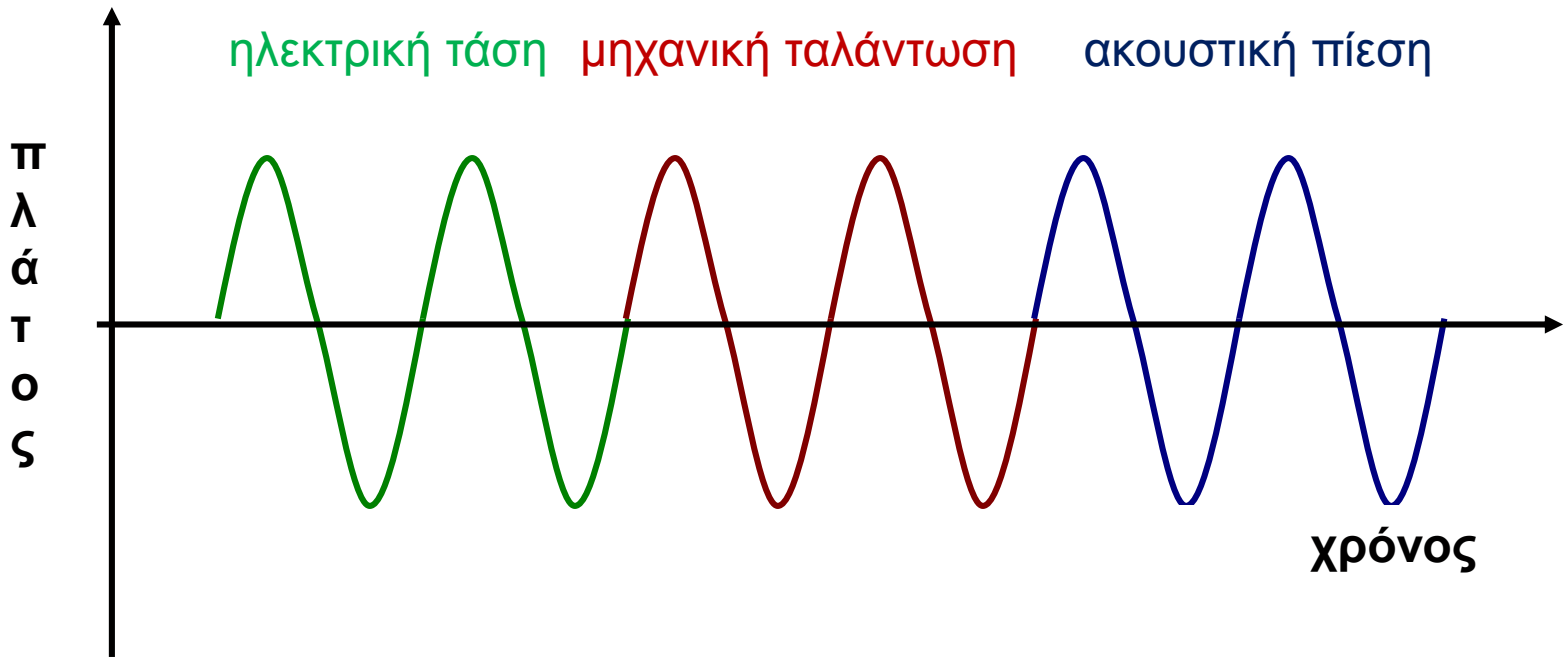


ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

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

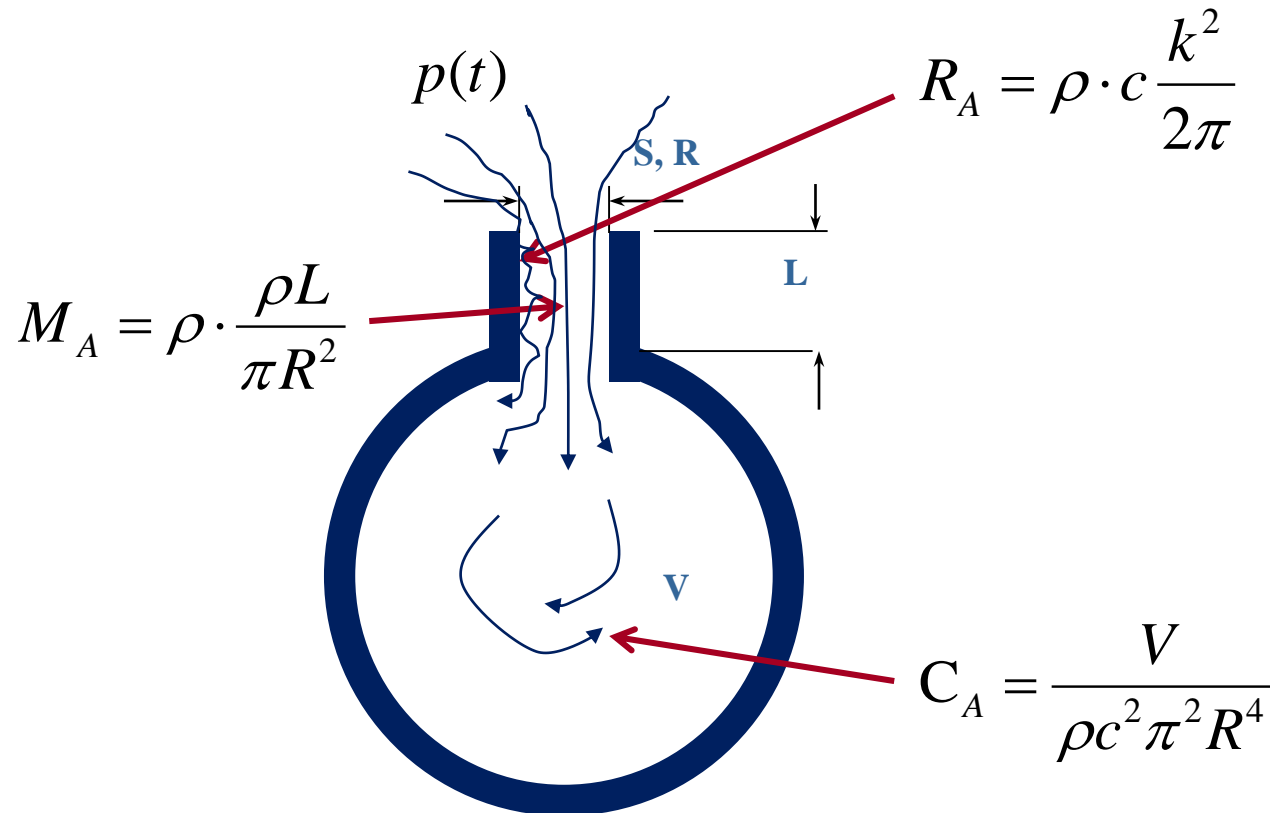
εισαγωγή

ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικά συστήματα

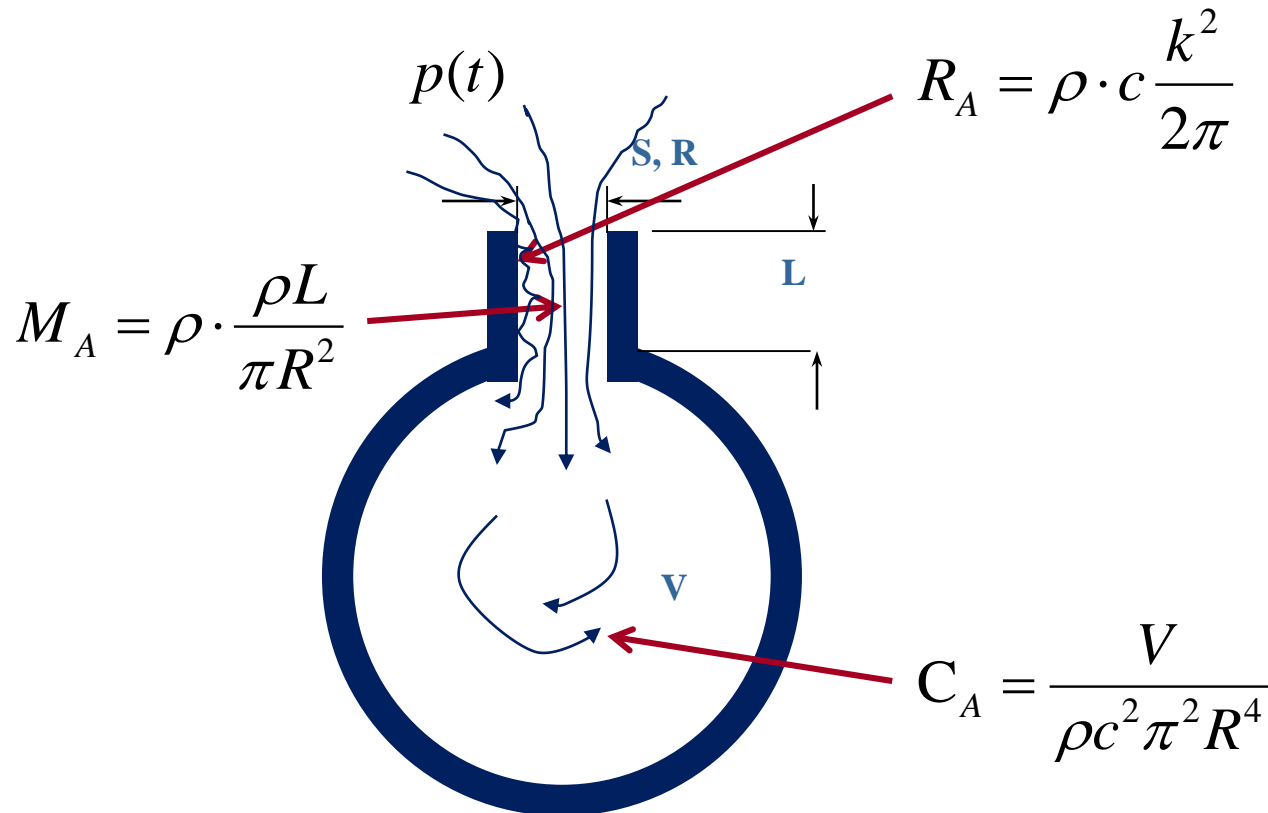


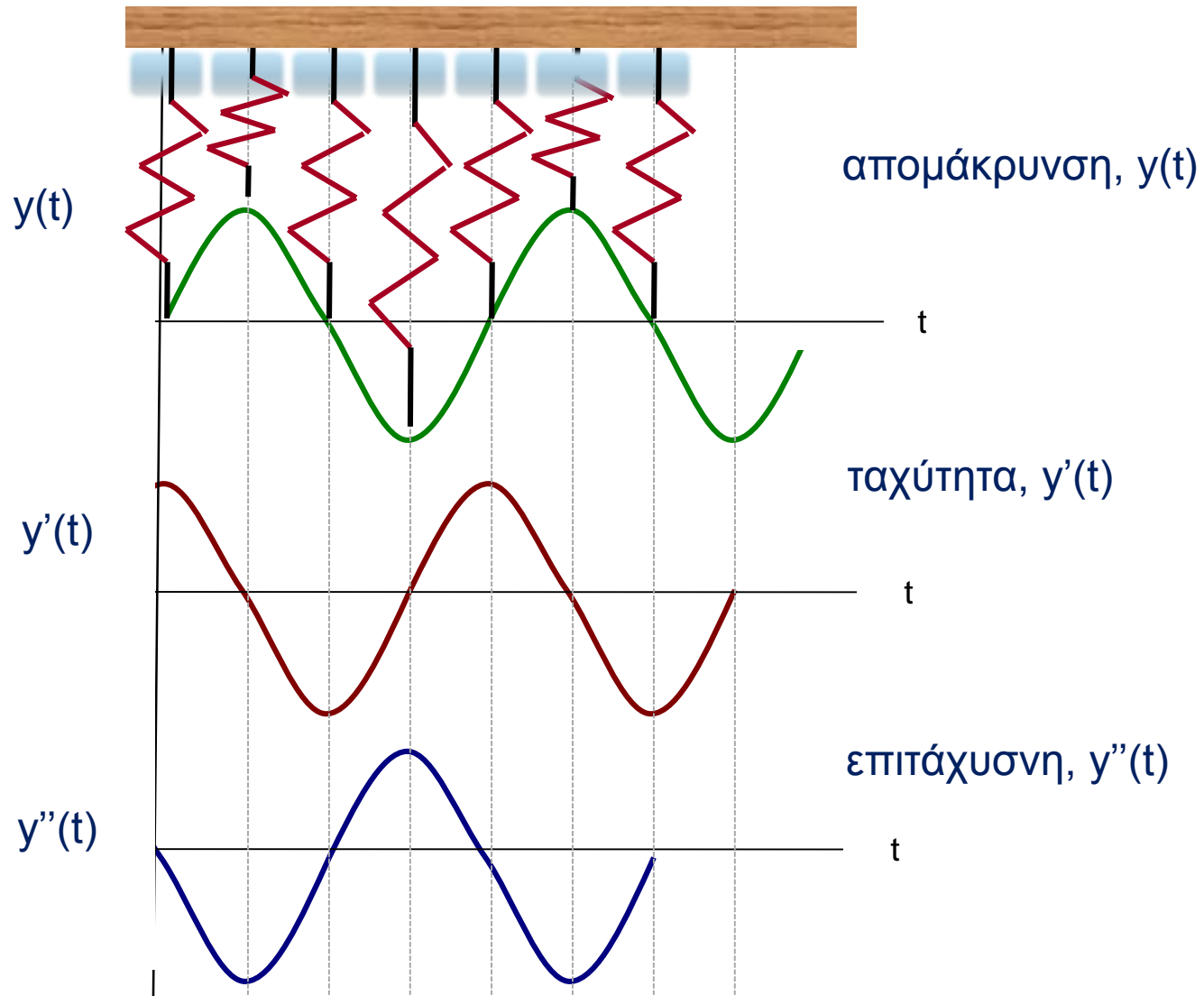
**ακουστικά – μηχανικά – ηλεκτρικά
συστήματα**

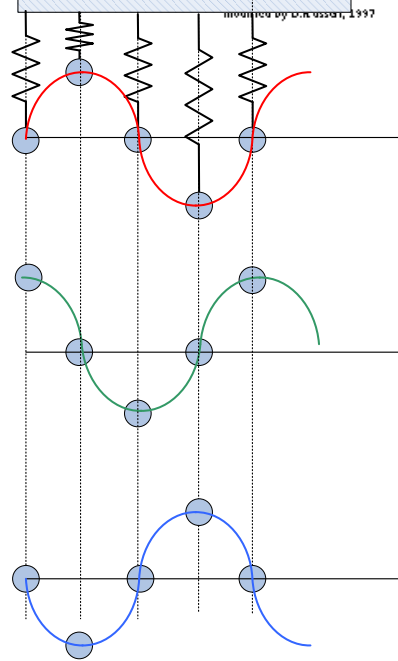
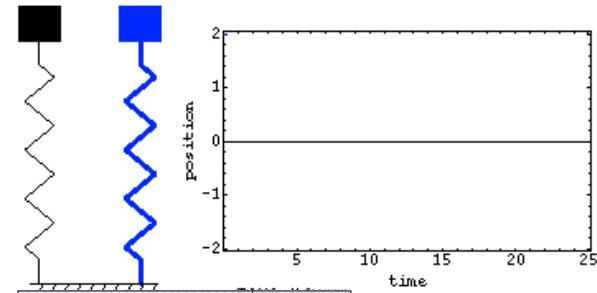
- Εγκλωβισμένος όγκος αέρα με ενδοτικότητα C_A
- Κίνηση μάζας αέρα έχει αντίδραση M_A
- Απώλεια λόγω τριβής R_A



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



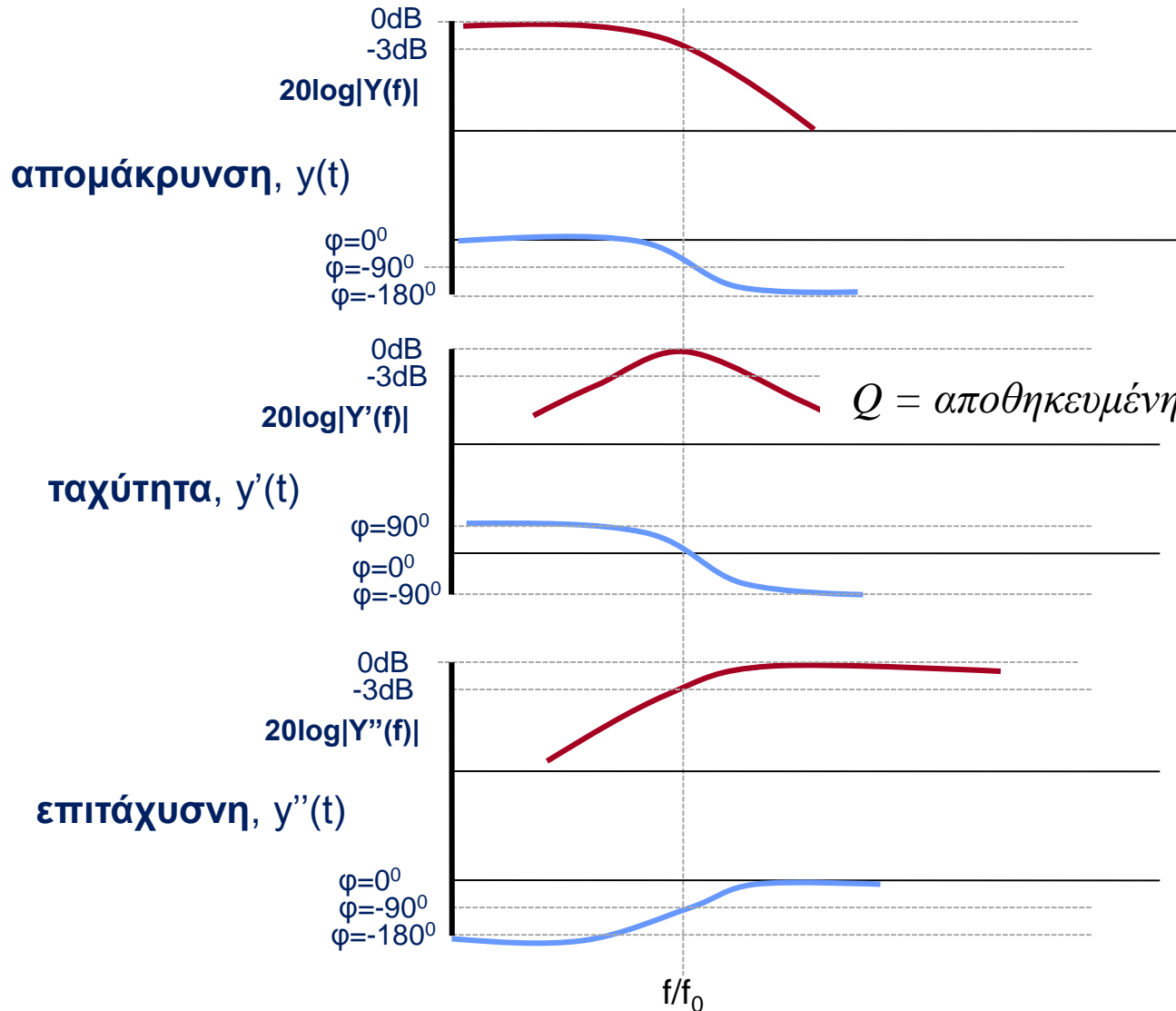




απομάκρυνση $y(t)$

ταχύτητα $y'(t)$

επιτάχυνση $y''(t)$

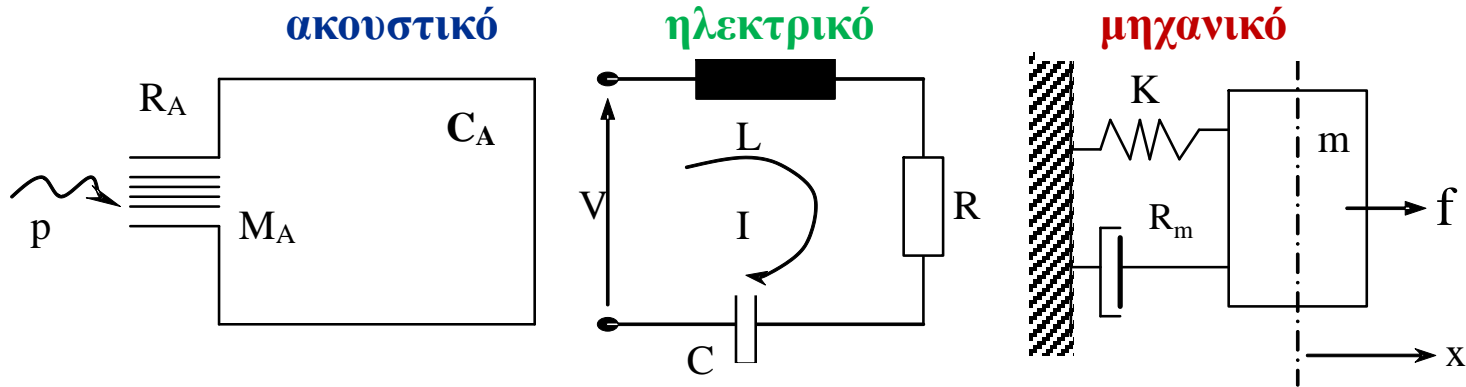


$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$Q = \text{αποθηκευμένη ενέργεια} / \text{χαμένη ενέργεια}$

$$Q_e = 2\pi f_0 \frac{L}{R}$$

$$Q_m = 2\pi f_0 \frac{C_m}{R_m}$$



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>

ισοδύναμα μεγέθη

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

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

αναλογίες εμπέδησης (impedance)

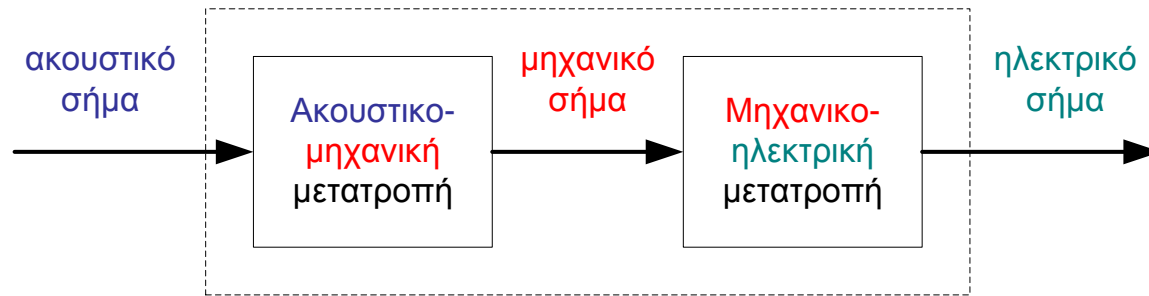
Ηλεκτρικό Σύστημα	Μηχανικό Σύστημα	Ακουστικό Σύστημα
Τάση V (Volt)	Δύναμη f (Newton)	Ακουστική πίεση p (N/m ²)
Επαγωγή L (Henry)	Μάζα m (kg)	Αντίδραση M_A (kg/m ⁴)
Φορτίο Q (Coulomb)	Απομάκρυνση x (m)	Μετάβ. Όγκο X (m ³)
Ρεύμα I (Ampere)	Ταχύτητα u (m/s)	Ταχύτητα όγκου U (m ³ /s)
Αντίσταση R (Ohm)	Απόσβεση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

αναλογίες κινητικότητας (mobility)

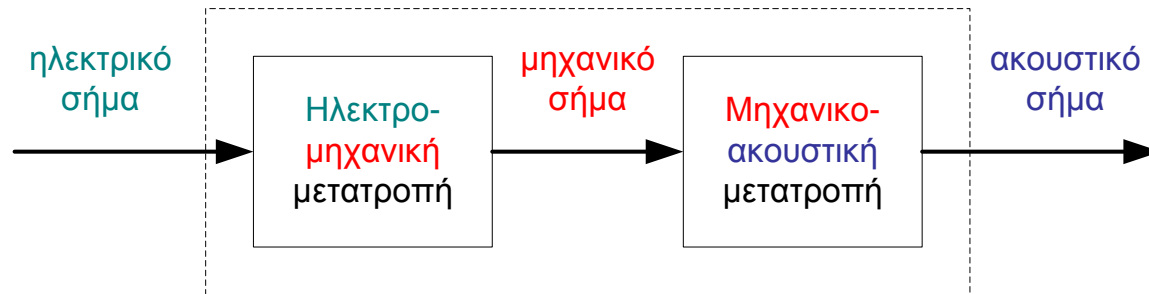
Ηλεκτρικό Σύστημα	Μηχανικό Σύστημα	Ακουστικό Σύστημα
Τάση V (Volt)	Ταχύτητα u (m/s)	Ταχύτ.ητα όγκου U (m ³ /s)
Επαγωγή L (Henry)	Ενδοτικότητα $C_m = 1/k$	Ενδοτικότητα C_A (N ⁻¹ m ⁵)
Φορτίο Q (Coulomb)	Απομάκρυνση x (m)	Μετάβ. Όγκου X (m ³)
Ρεύμα I (Ampere)	Δύναμη f (Newton)	Ακουστική πίεση p (N/m ²)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

H – A μετατροπείς (ιστορικά & τεχνολογίες)

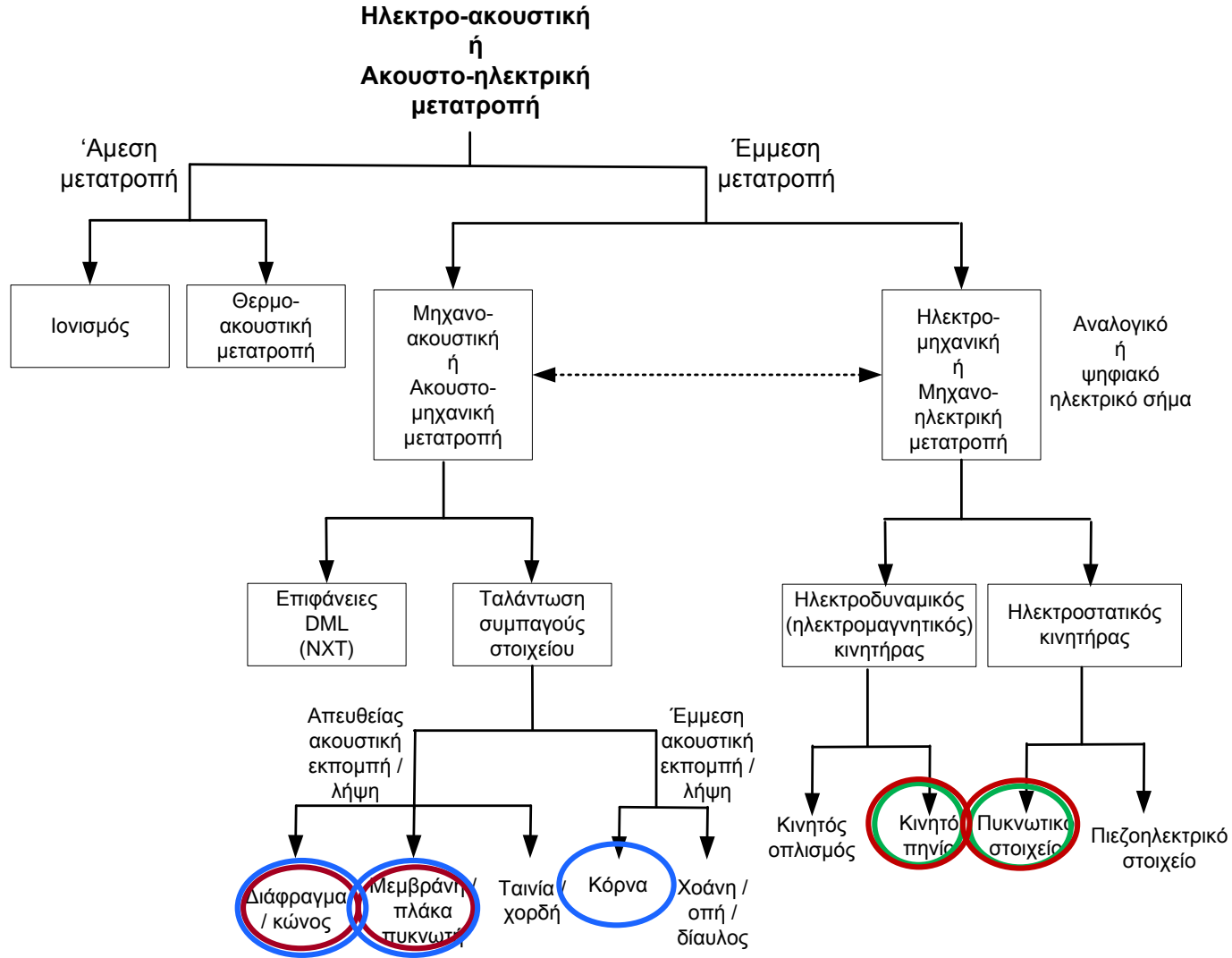
Η/Α δέκτης, π.χ. μικρόφωνο

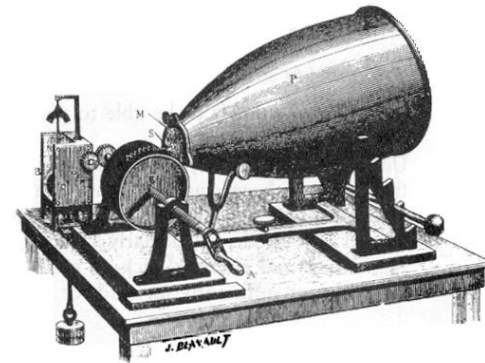
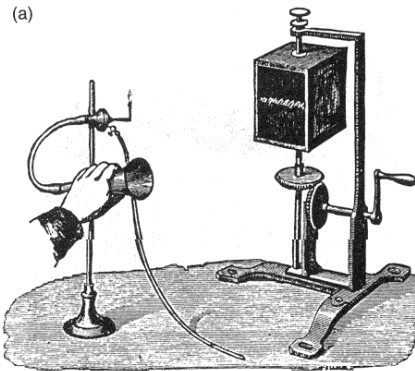


Η/Α πηγή, π.χ. μεγάφωνο

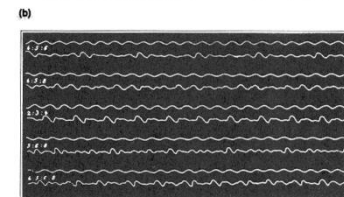
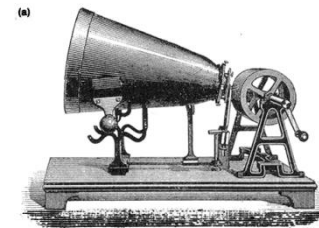
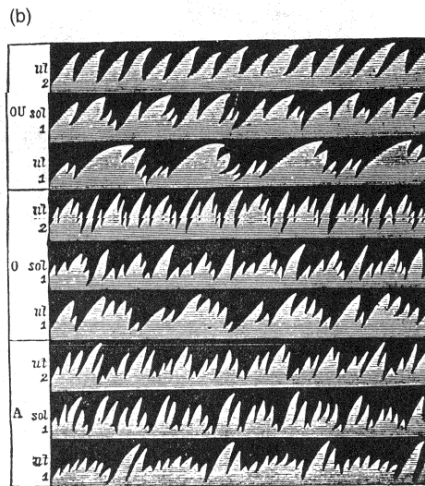


τύποι μετατροπών

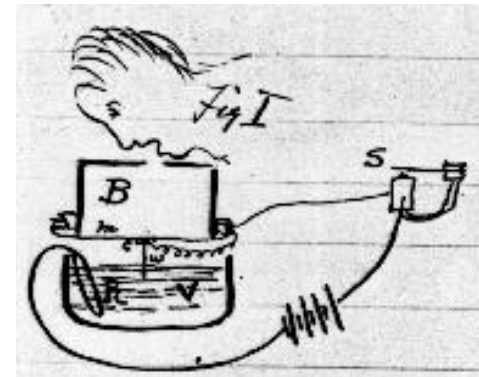
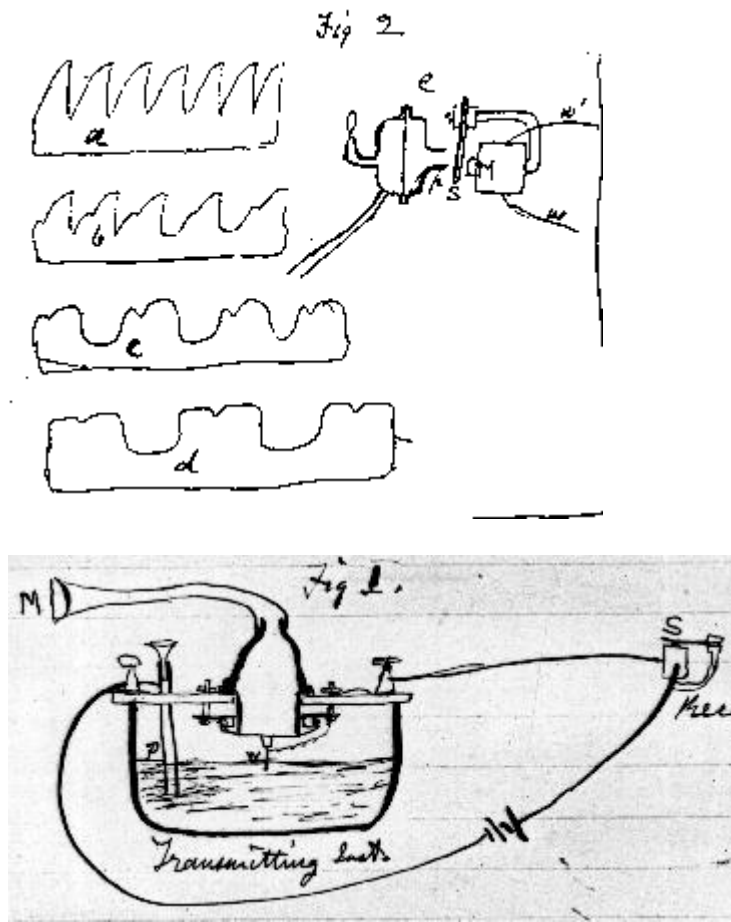




SCOTT'S PHONOGRAPH



ιστορία: Alexander Graham Bell

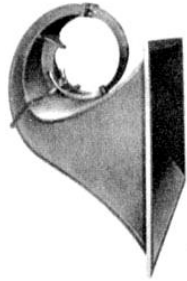


from Bell's notes, February-March 1876

ιστορία: Thomas Edison



ιστορική αναδρομή



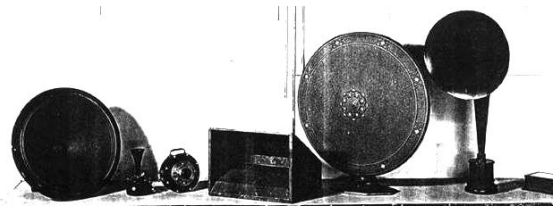
Siemens loudspeaker
(1874, 1878)



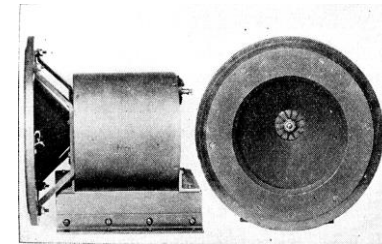
Oliver Lodge and
loudspeaker (1889)



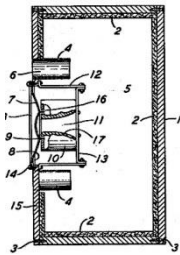
Magnavox (1915)



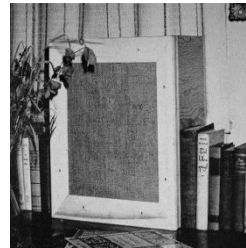
Bell loudspeakers
(1876-1919)



Rice & Kellogg
loudspeaker (1925)



bass reflex patent
byThuras (1930)



Acoustic suspension
box by AR-1 (1957)

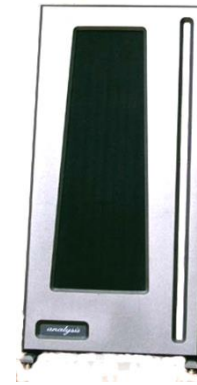


NXT speakers (1996)

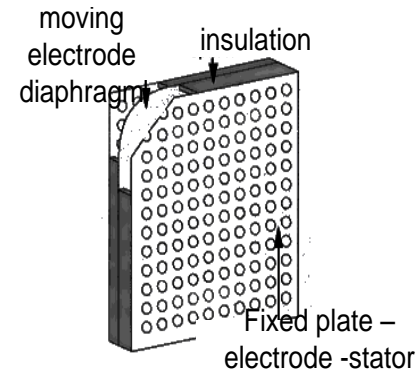
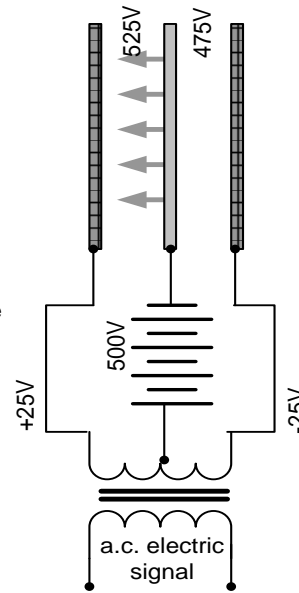
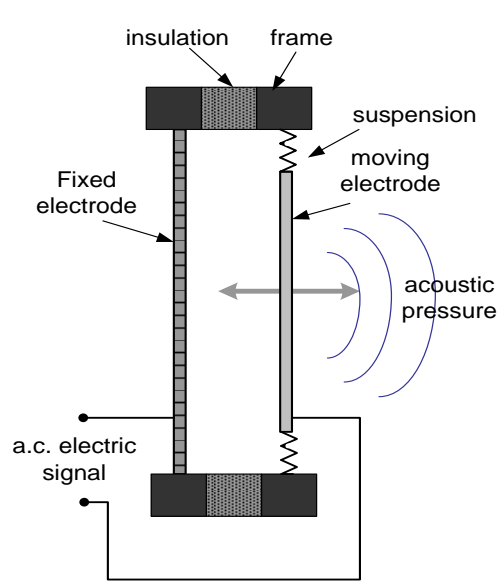
συστήματα ηχείων (ηλεκτροδυναμικά)



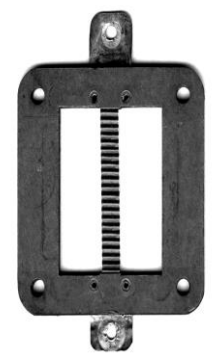
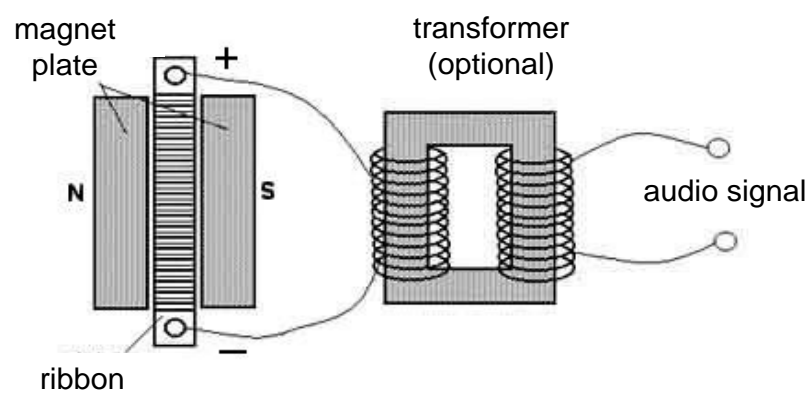
συστήματα ηχείων (μη ηλεκτροδυναμικά)



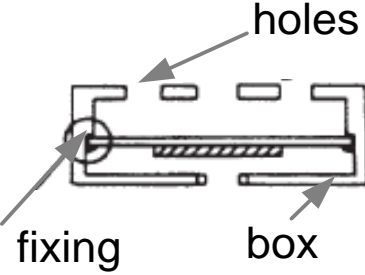
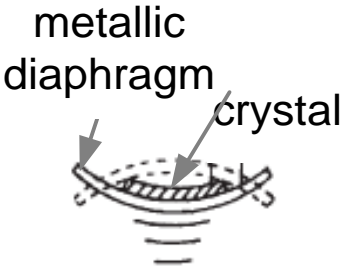
ηλεκτροστατικά ηχεία



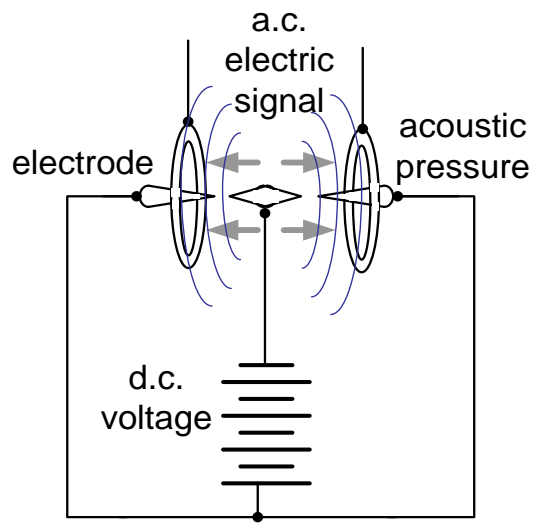
μεγάφωνα ταινίας



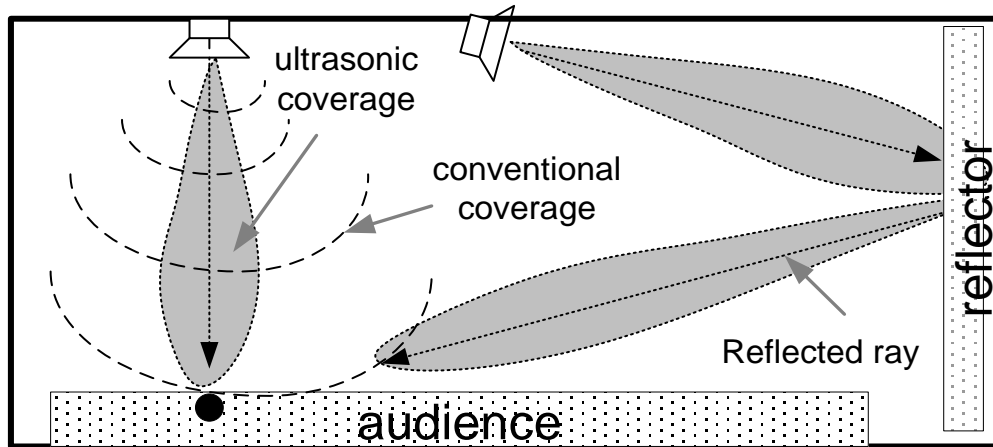
πιεζοηλεκτρικά μεγάφωνα



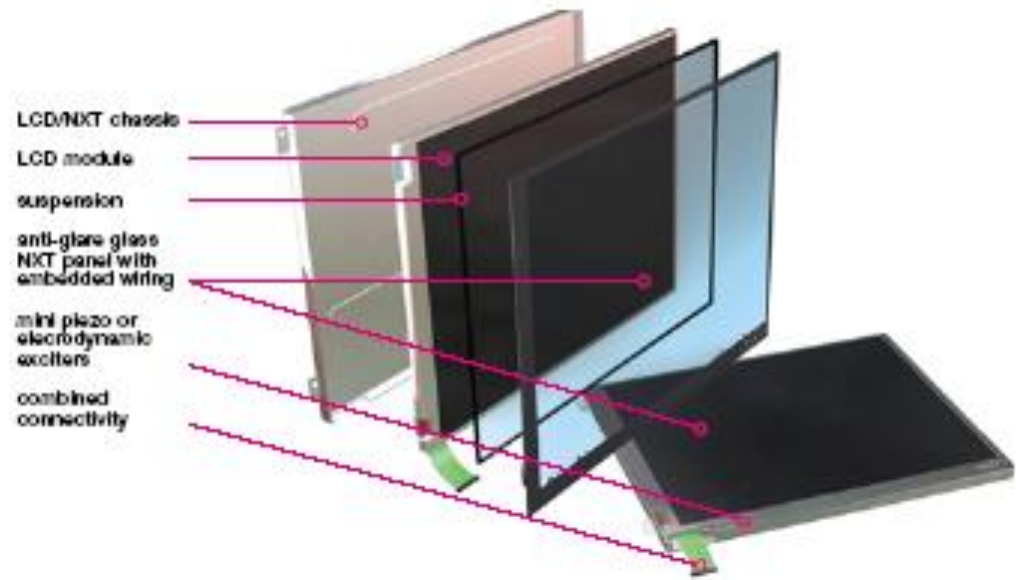
μεγάφωνα ιονισμού



μεγάφωνα υπερηχητικής εκπομπής



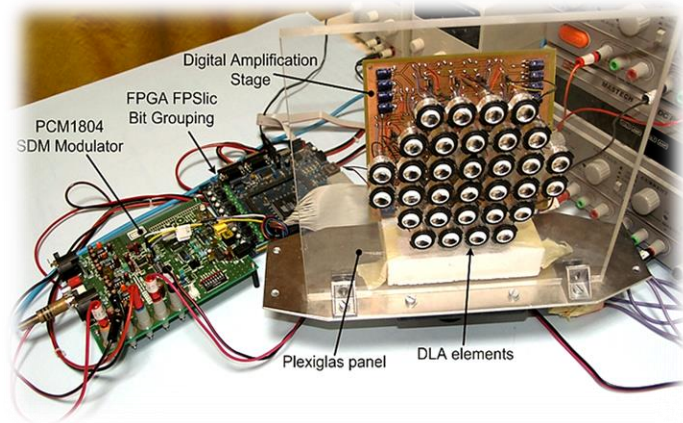
πιεζοηλεκτρικά & DML στοιχεία



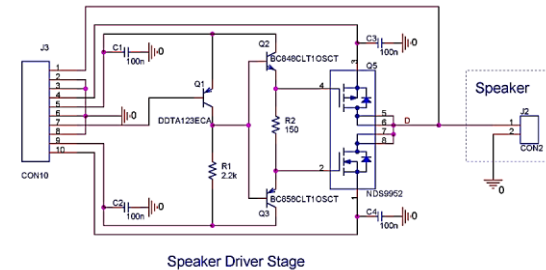
εναλλακτικές τεχνολογίες για μεγάφωνα

Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου & Ακουστικής

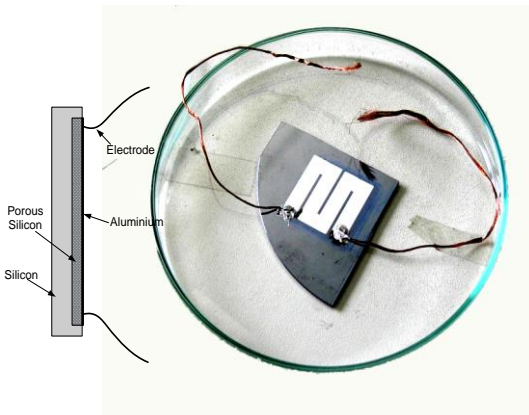
2006: πλήρως ψηφιακό μεγάφωνο



- λειτουργία με σήματα PCM και Sigma Delta
- 32 μεγάφωνα και ψηφιακοί ενισχυτές
- προγραμματισμός μέσω FPGA
- ακουστικό DAC



2009: θερμοακουστικό μεγάφωνο

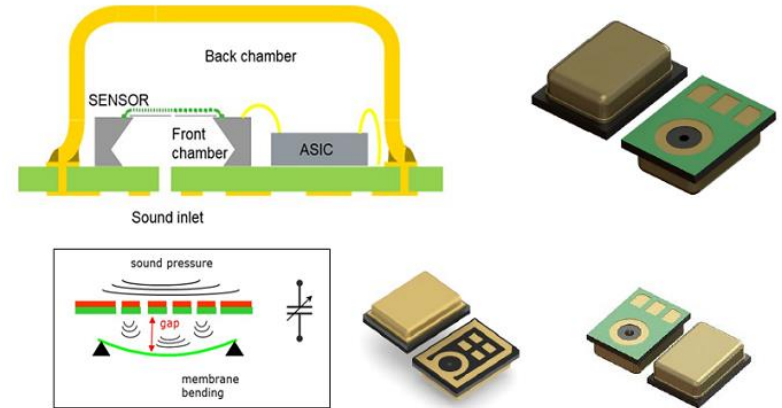
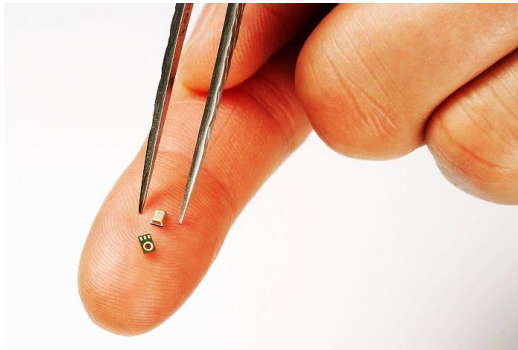


- εκπομπή ήχου *χωρίς κινούμενα μέρη*
- 30nm αλουμίνιο, 10,7 μm πορώδες πυρίτιο σε 1mm wafer κρυσταλλικού πυρίτιου
- ηλεκτροχημική διεργασία-κατασκευή Εργαστήριο Στερεάς Κατάστασης Τμήμα Φυσικής Παν/μίου Πατρών
- εντοποίηση σε πλήρως ψηφιακή αλυσίδα (ψηφιακό ενισχυτή, DSP, WLAN)

εναλλακτικές τεχνολογίες για μετατροπείς

MEMS = Micro-Electro-Mechanical

MEMS μικρόφωνα



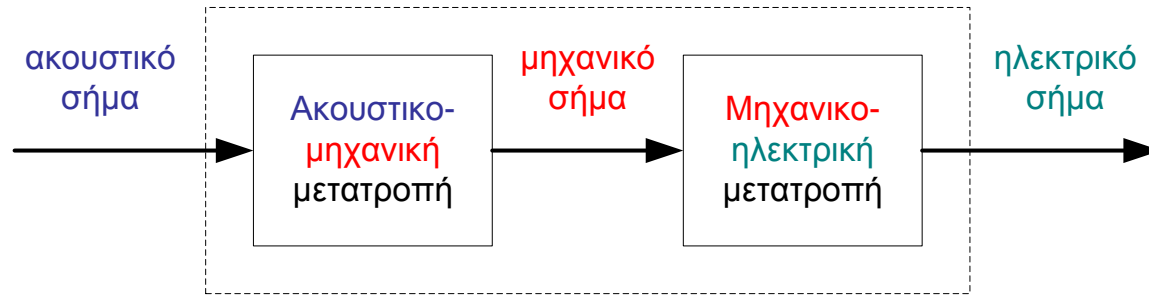
MEMS μεγάφωνα



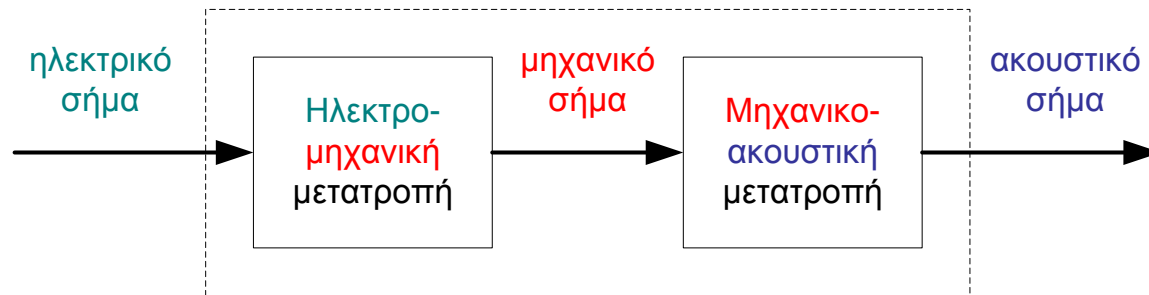
H – A μετατροπείς

(ισοδύναμο ηλεκτροδυναμικών συστημάτων)

Η/Α δέκτης, π.χ. μικρόφωνο



Η/Α πηγή, π.χ. μεγάφωνο

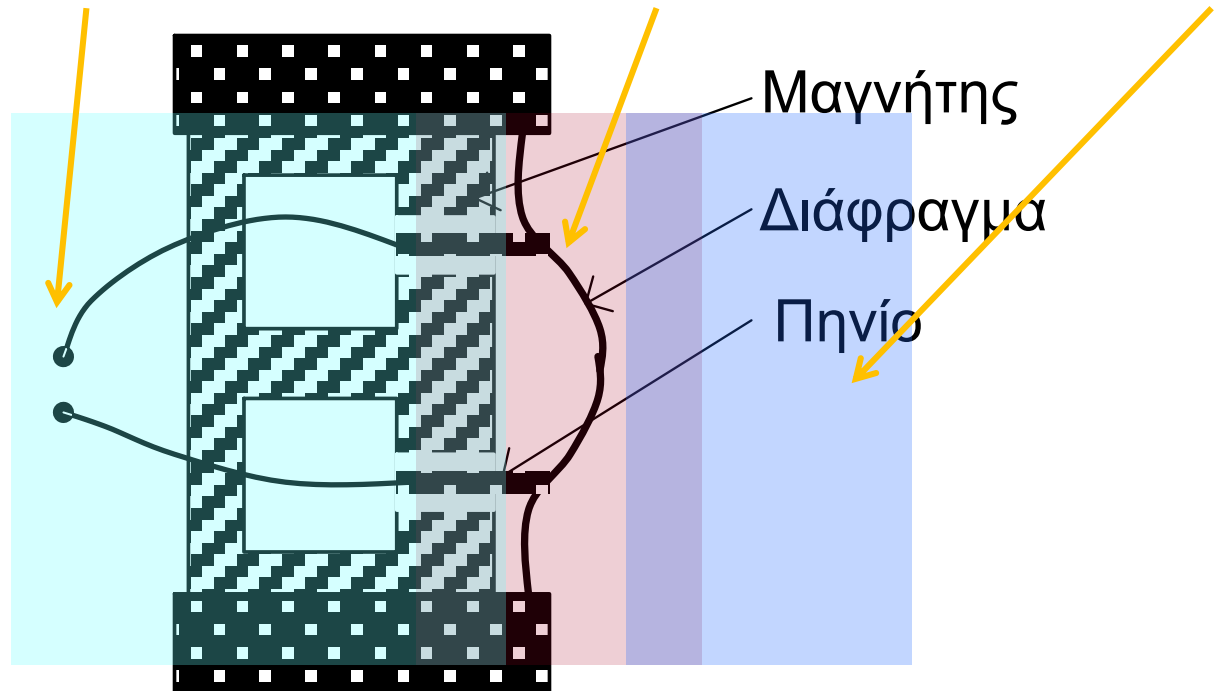


ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

ηλεκτρικό σήμα, π.χ. $v(t)$

μηχανικό σήμα, π.χ. $f(t)$

ακουστικό σήμα, π.χ. $p(t)$

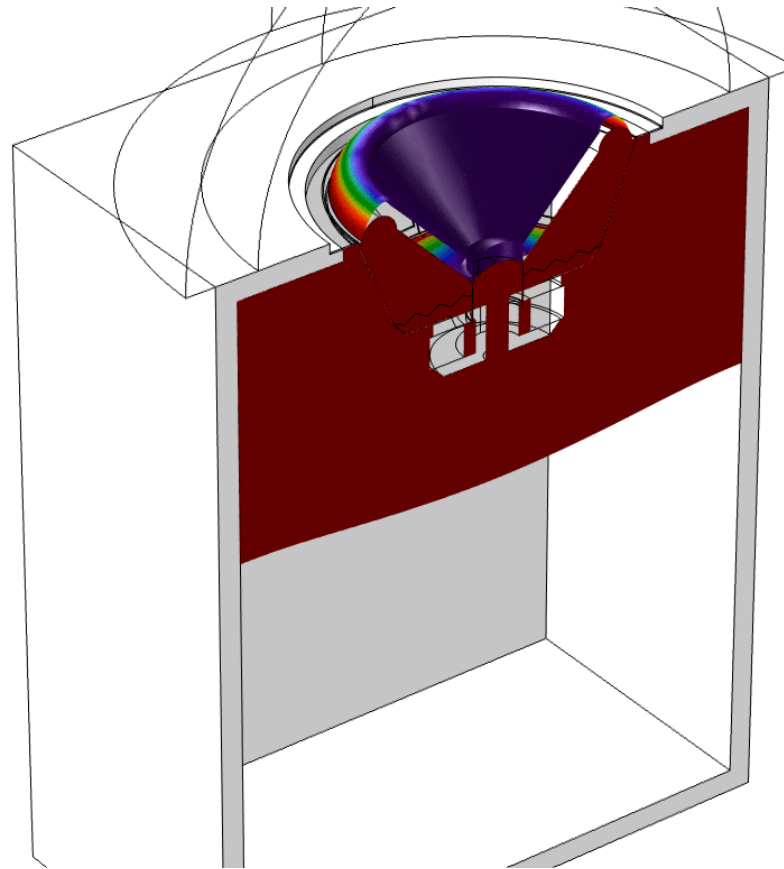


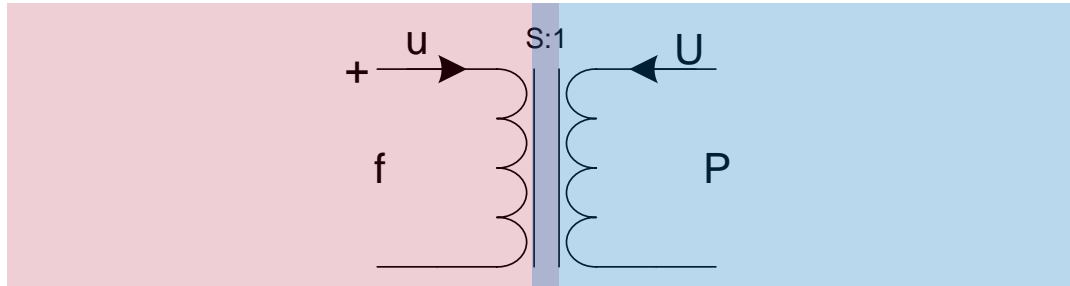
μεγάφωνο



μικρόφωνο

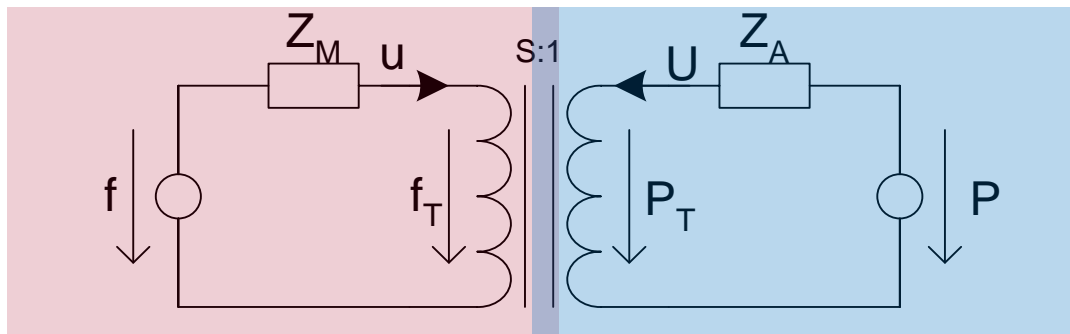
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας





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

$$U(t) = S \cdot u(t)$$

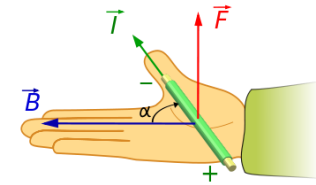
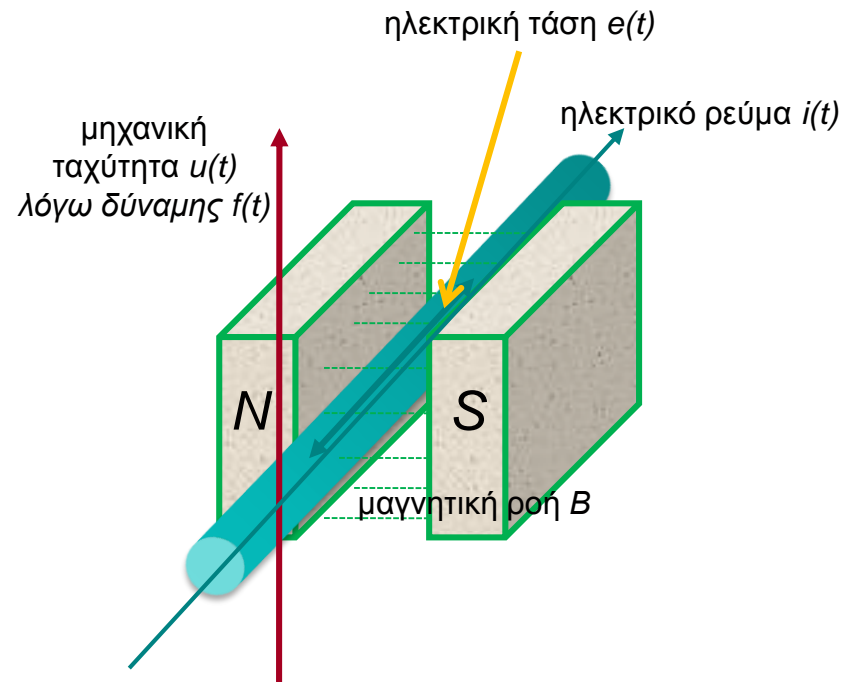


$$f(t) = Z_M u(t) + f_T(t) = Z_M u(t) + S^2 Z_A u(t) + S p(t)$$

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

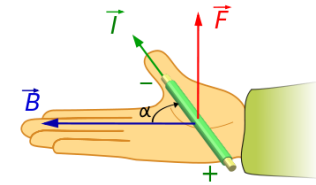
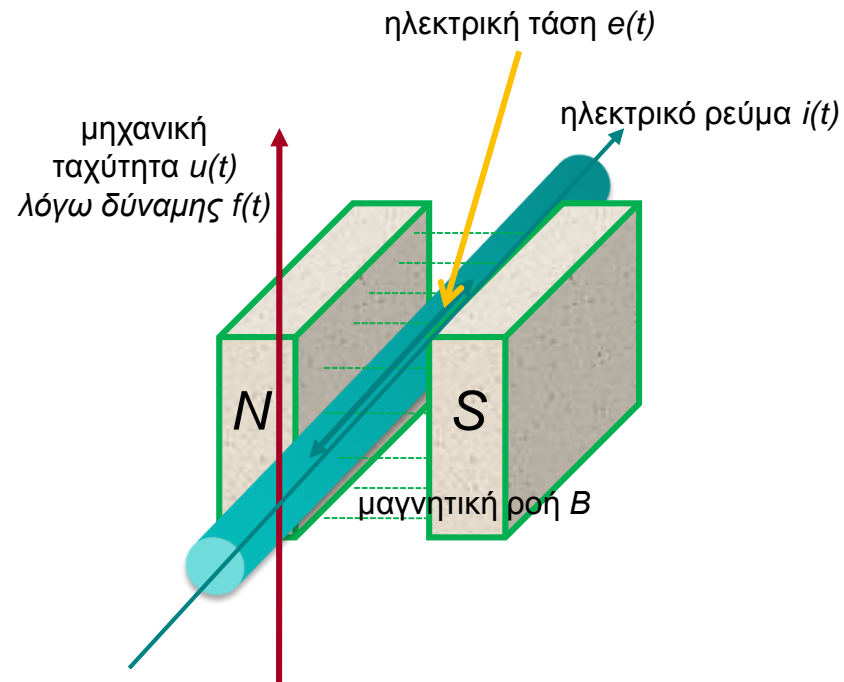
μηχανο-ηλεκτρική μετατροπή

παραγωγή δύναμης = μεγάφωνο

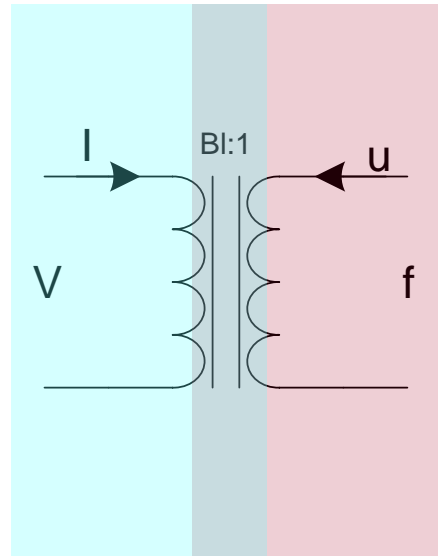


μηχανο-ηλεκτρική μετατροπή

παραγωγή ρεύματος = μικρόφωνο

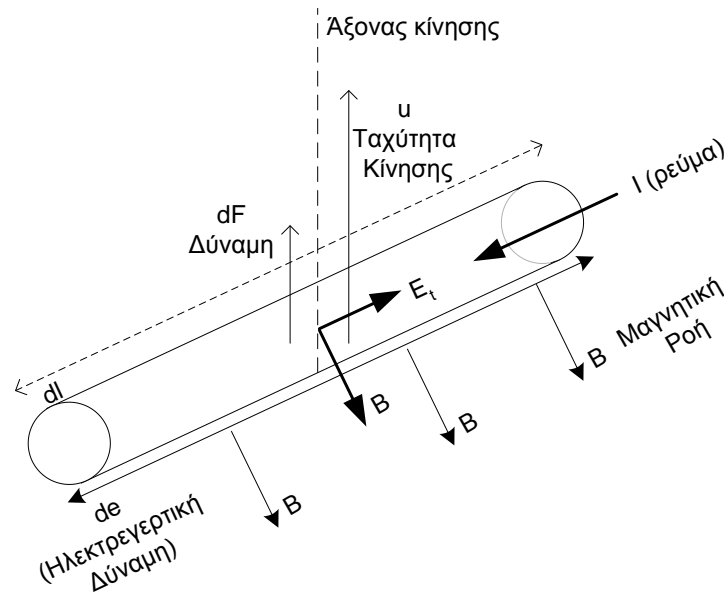


μηχανο-ηλεκτρική μετατροπή



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

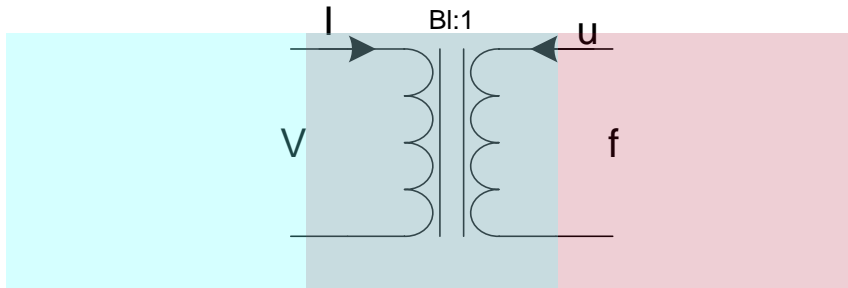
$$e = \int_l dedl = -Blu$$



$$df = Bidl$$

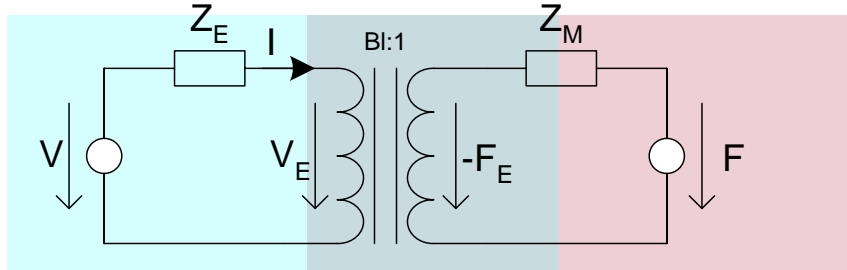
$$f = \int_l dfdl = Bli$$

μηχανο-ηλεκτρική μετατροπή



$$V(t) = Bl.u(t)$$

$$f(t) = Bl.I(t)$$



$$-V + Z_E I + V_E = 0$$

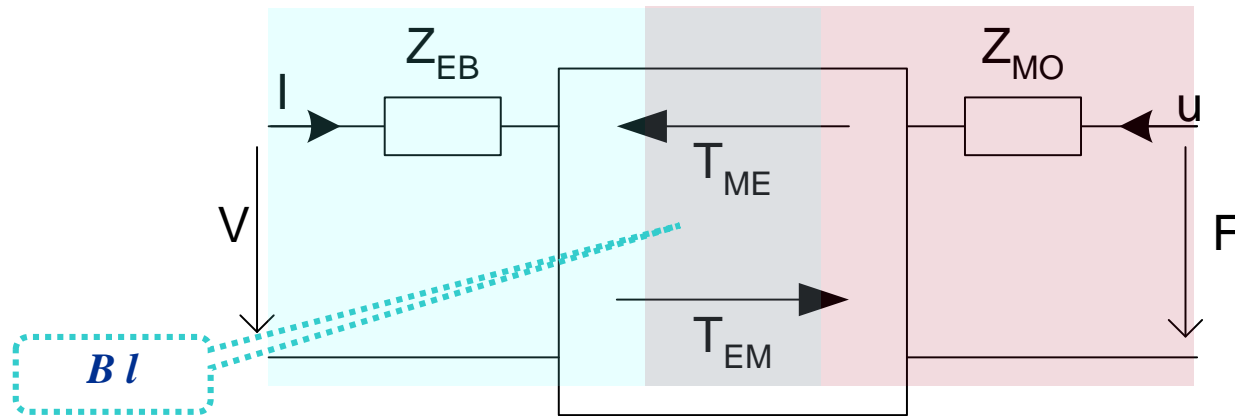
$$f + f_E - Z_M u = 0$$

$$V_E = Blu \quad f_E = -BlI$$

$$V = Z_E I + Blu \quad f = Z_M u - BlI$$

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

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



κανονικές εξισώσεις

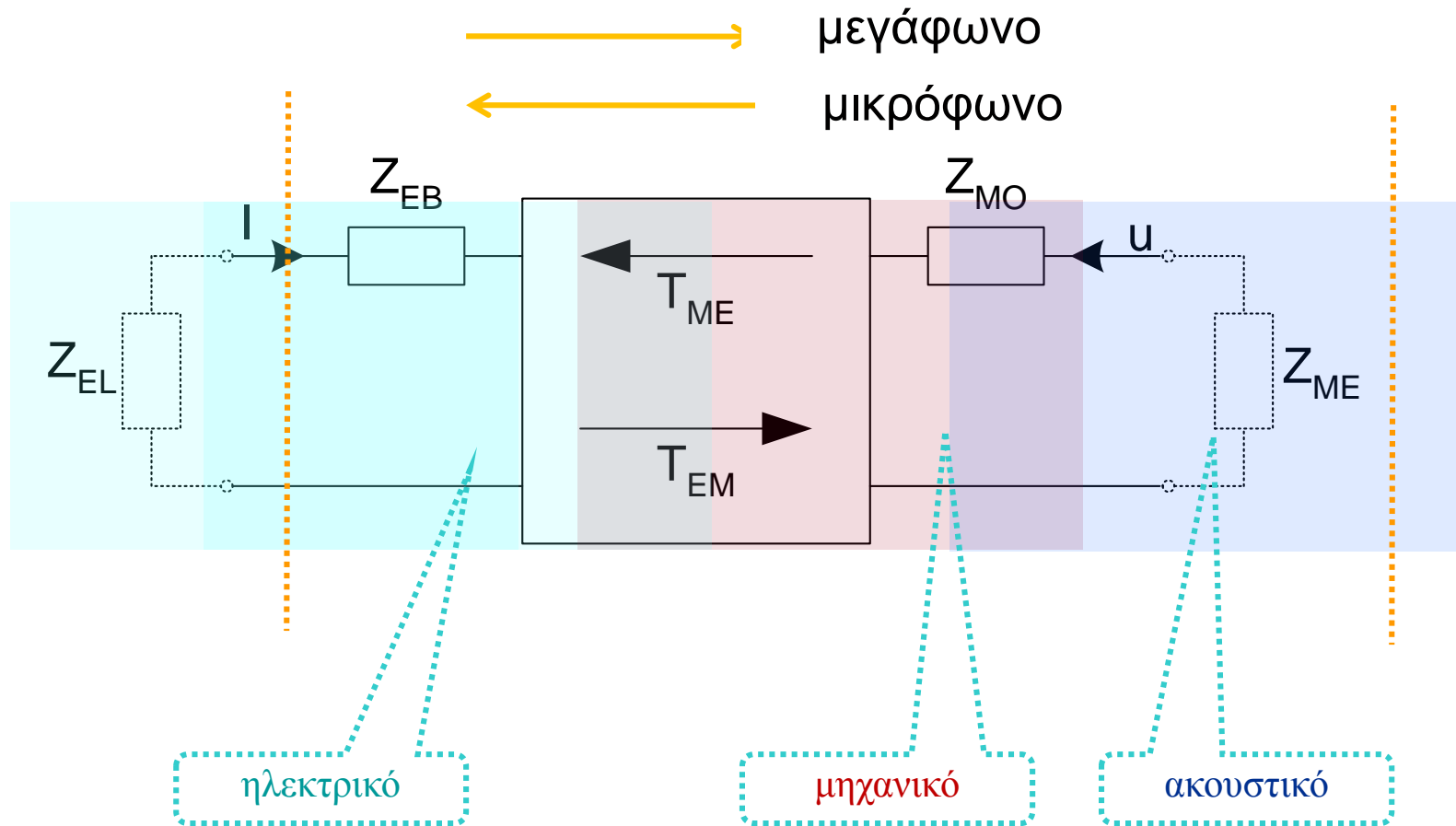
$$V = Z_{EB} I + T_{EM} u \quad f = Z_{MO} u + T_{ME} I$$

σύνθετη αντίσταση

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

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

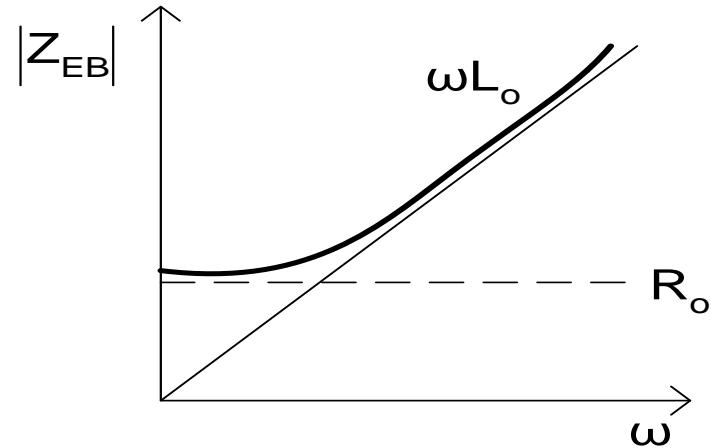
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

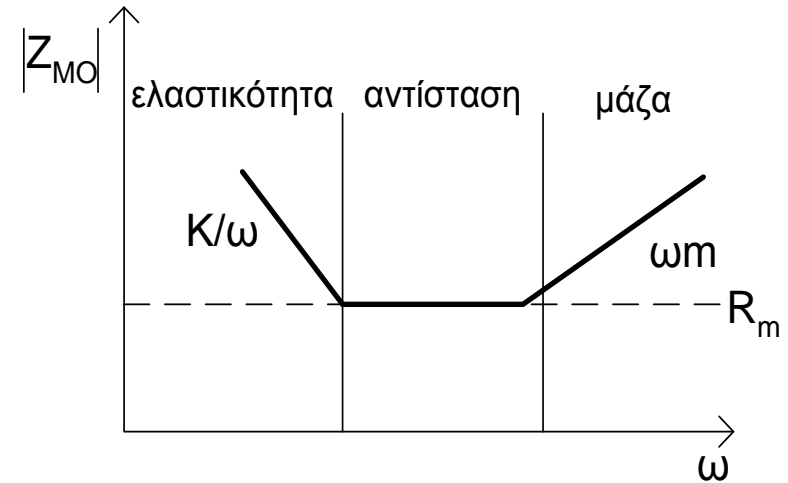
ηλεκτρικά
χαρακτηριστικά

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

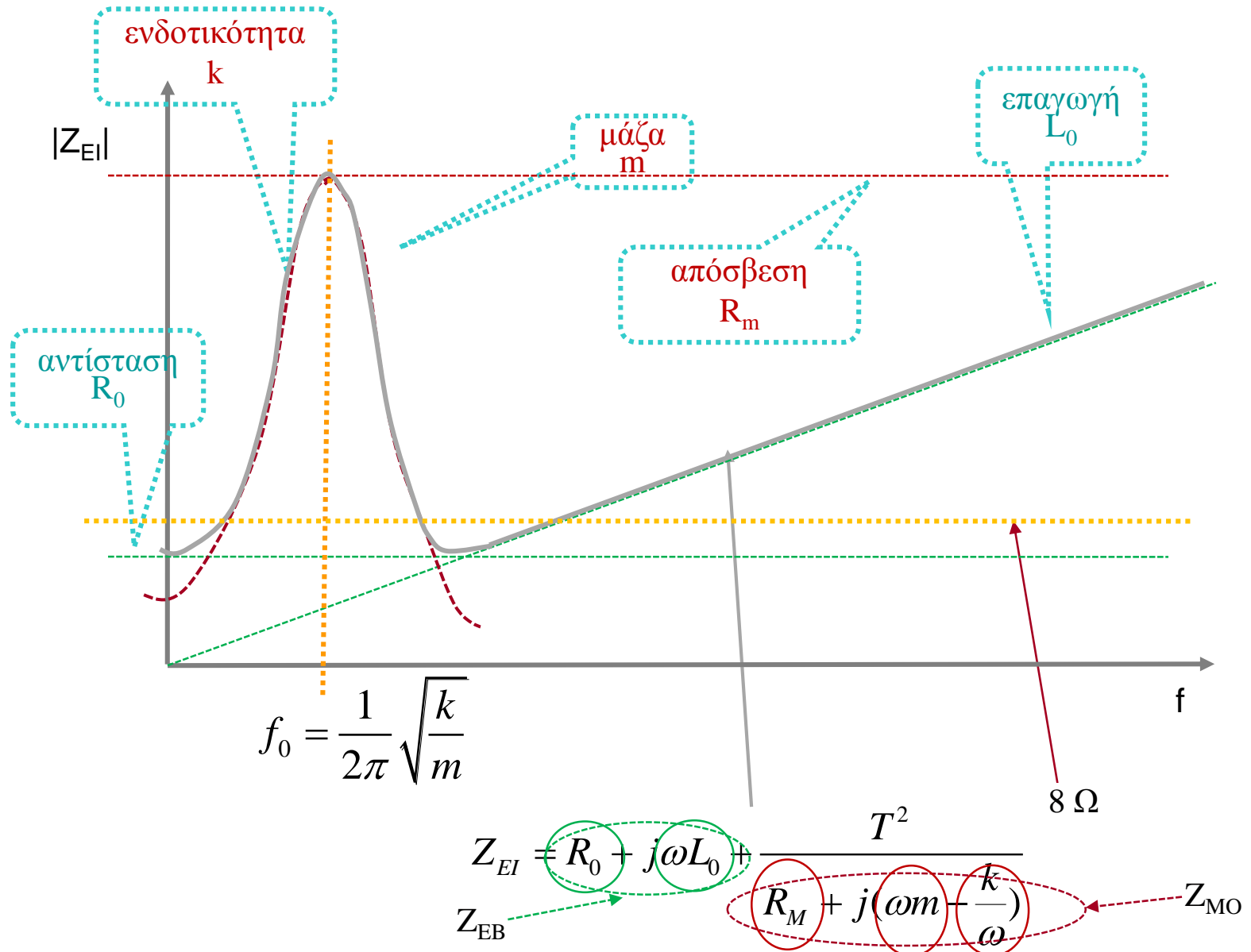


μηχανικά
χαρακτηριστικά

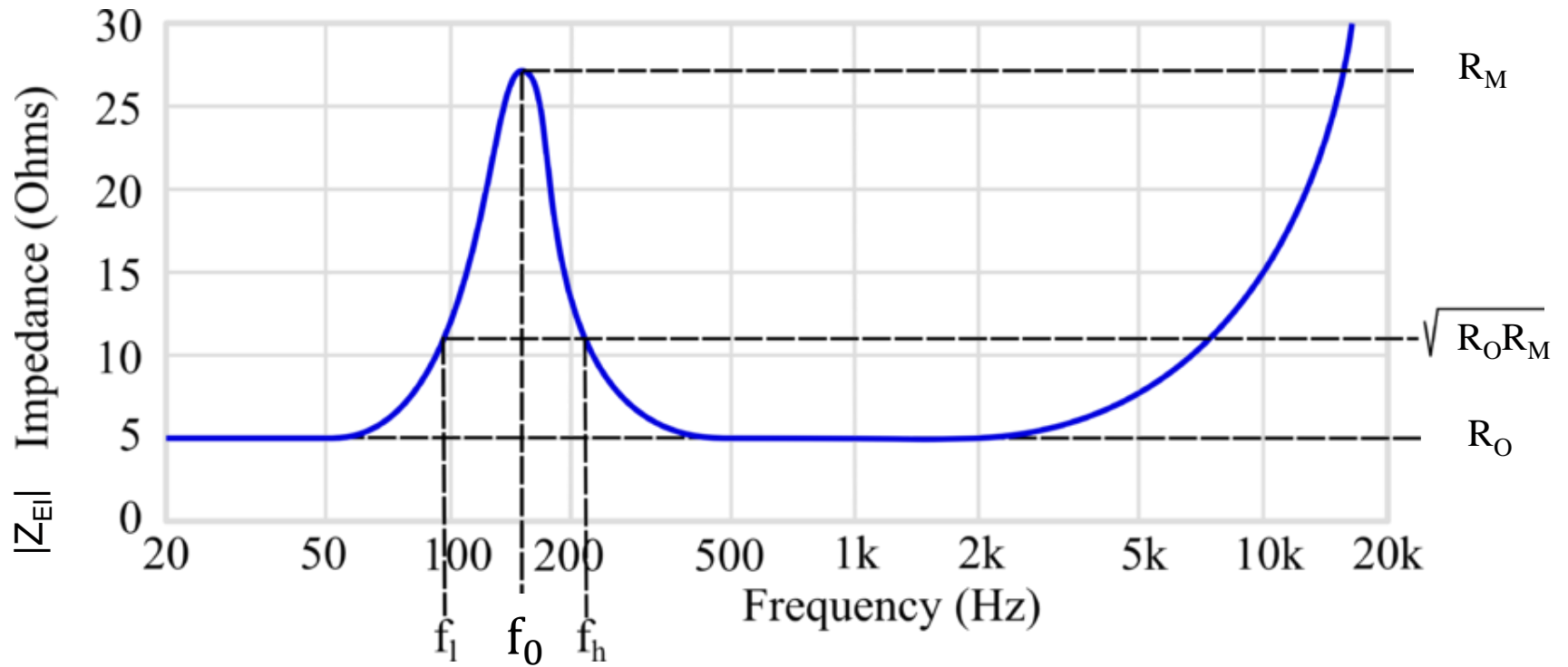
$$Z_{MO} = R_M + j\left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)$$



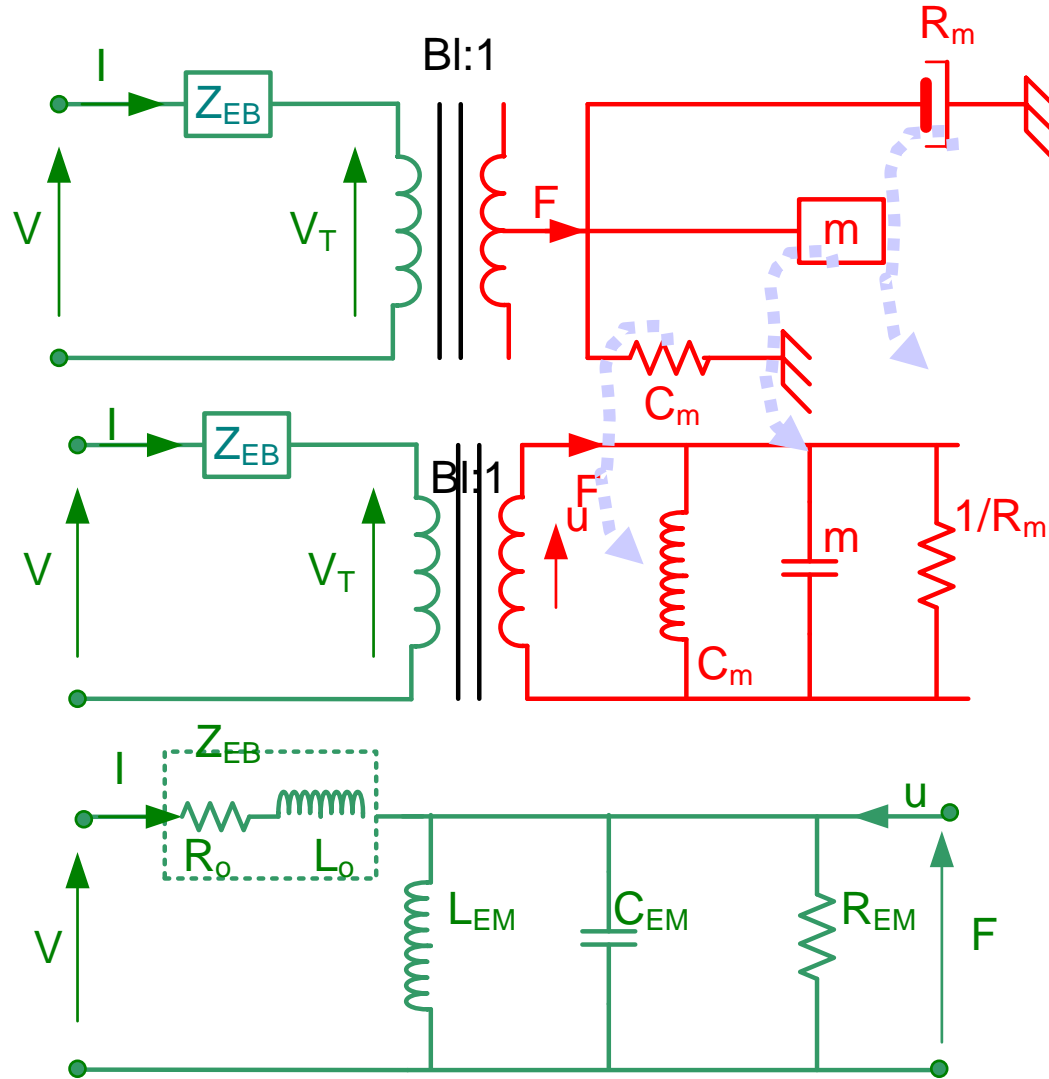
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



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

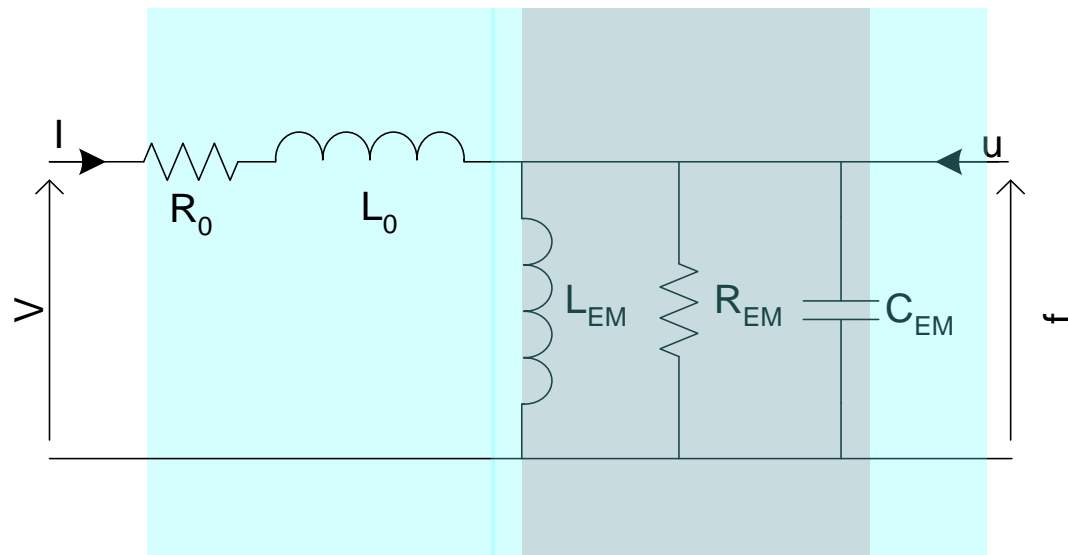
$$C_{EM} = \frac{m}{T^2}$$

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

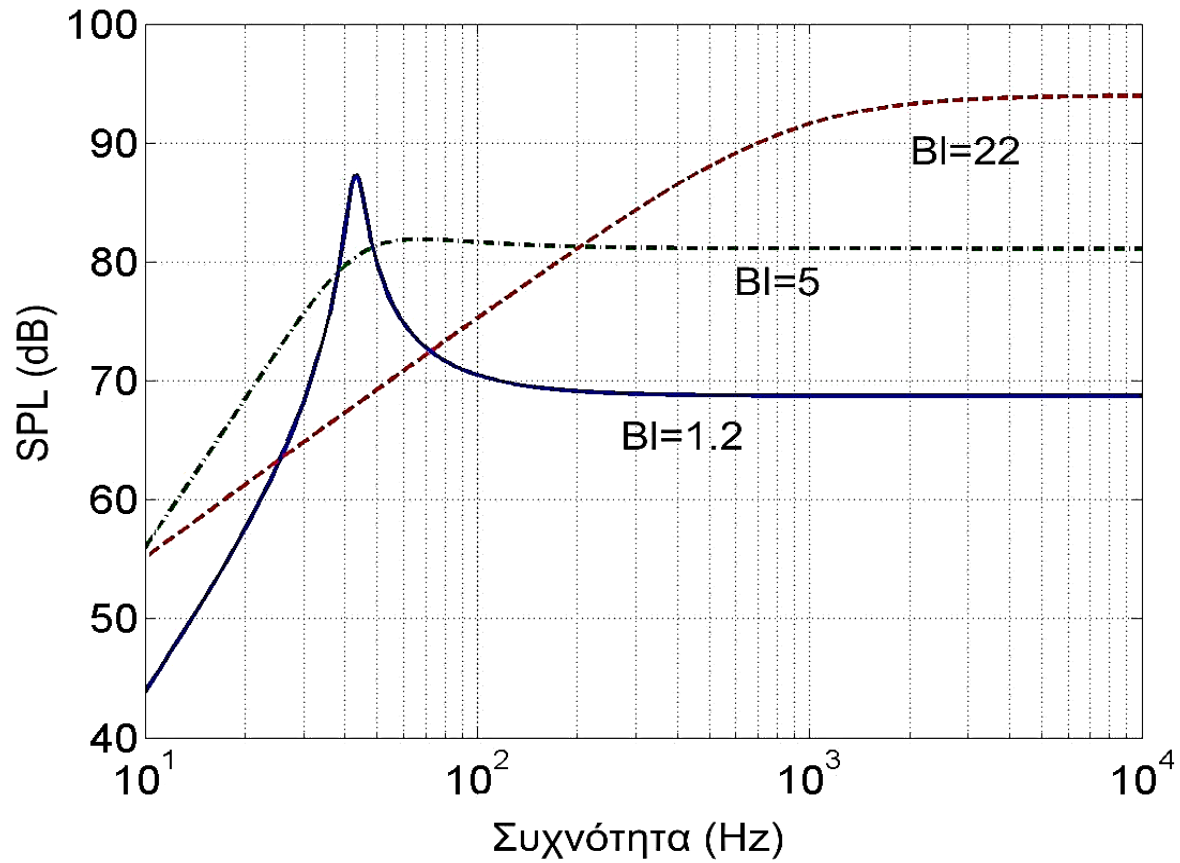
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

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

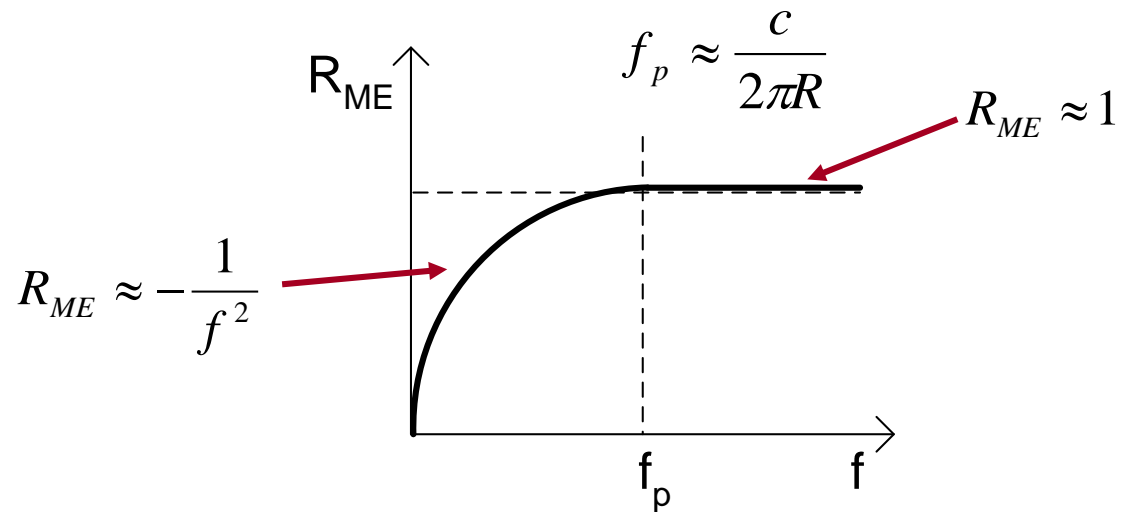
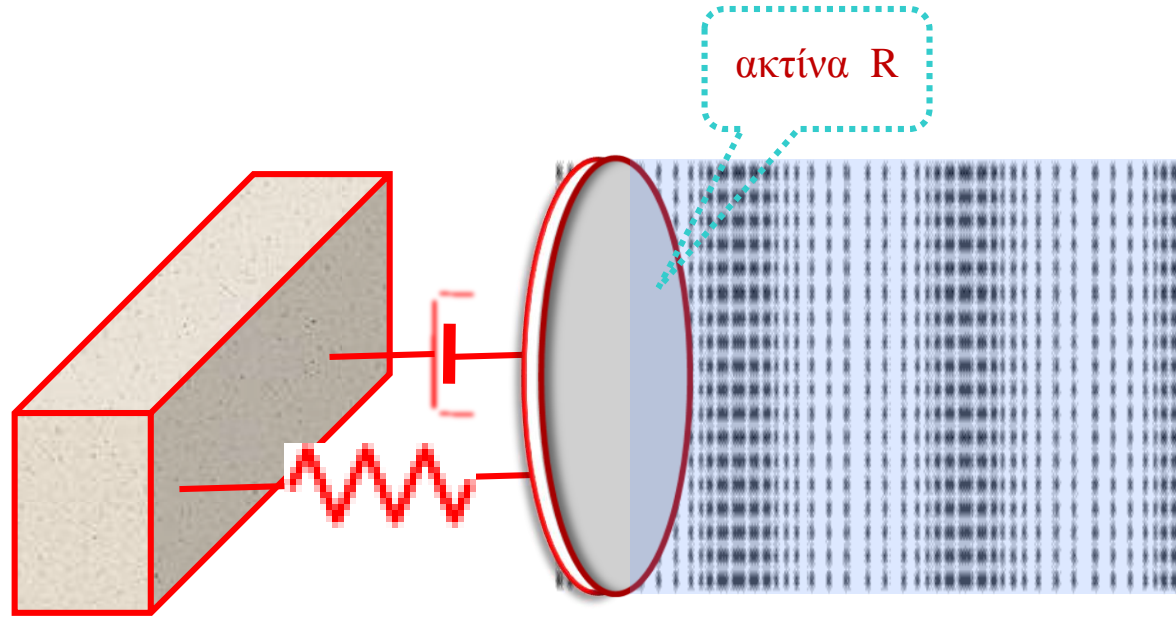
$$R_{EM} = \frac{T^2}{R_M} \quad C_{EM} = \frac{m}{T^2} \quad L_{EM} = \frac{T^2}{k}$$



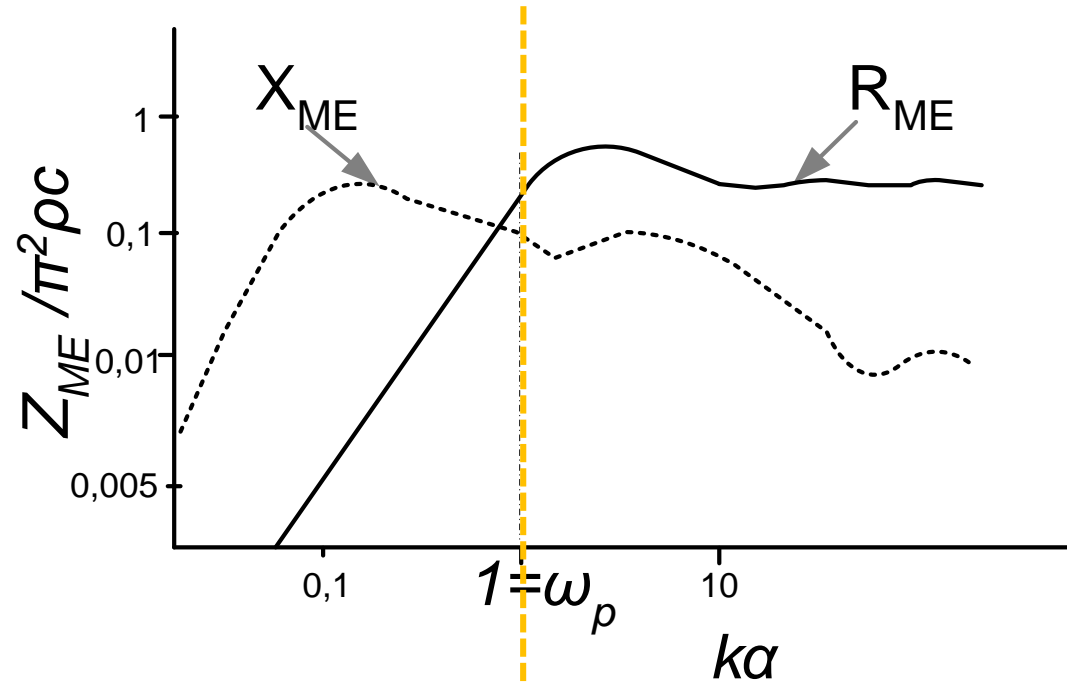
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπείας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας

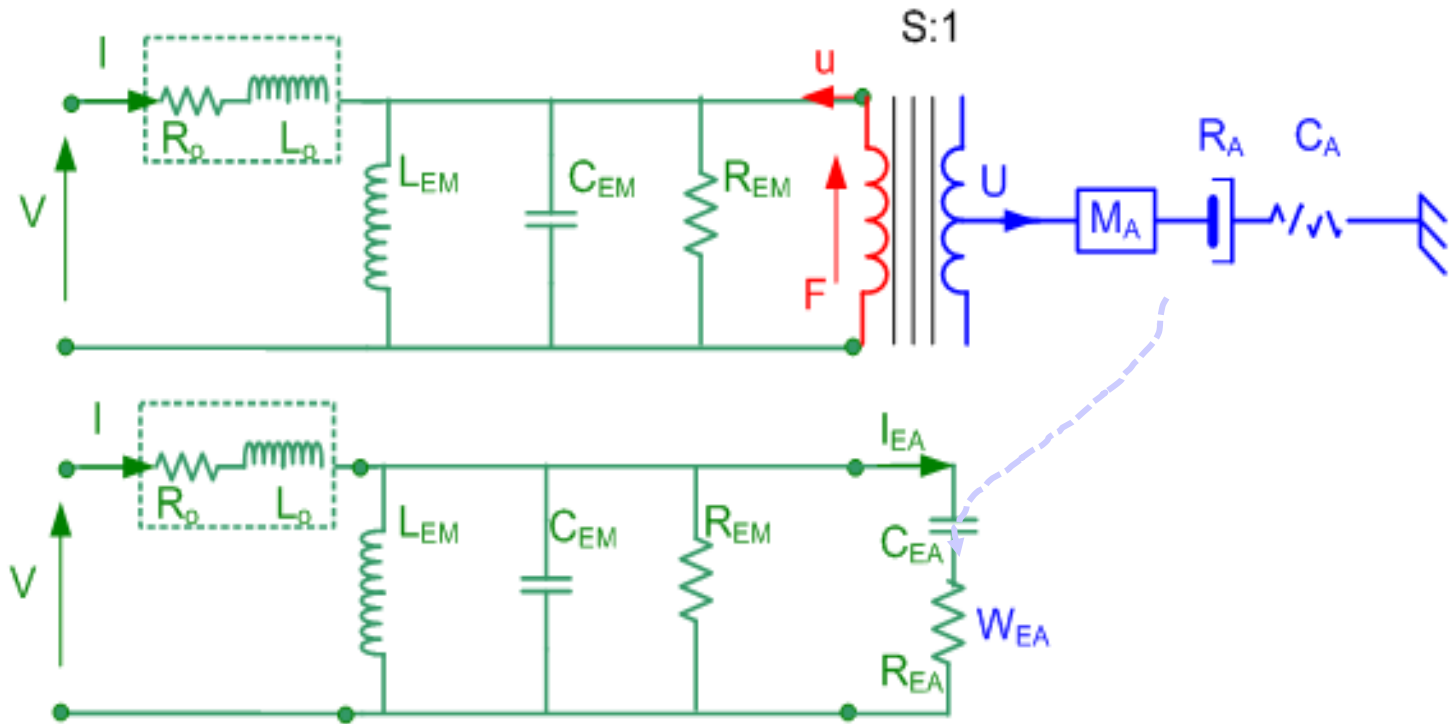


$$R_{ME} = \frac{\pi \omega^2 a^4 \rho}{4c} \approx 2,4 \cdot f^2 \cdot a^4$$

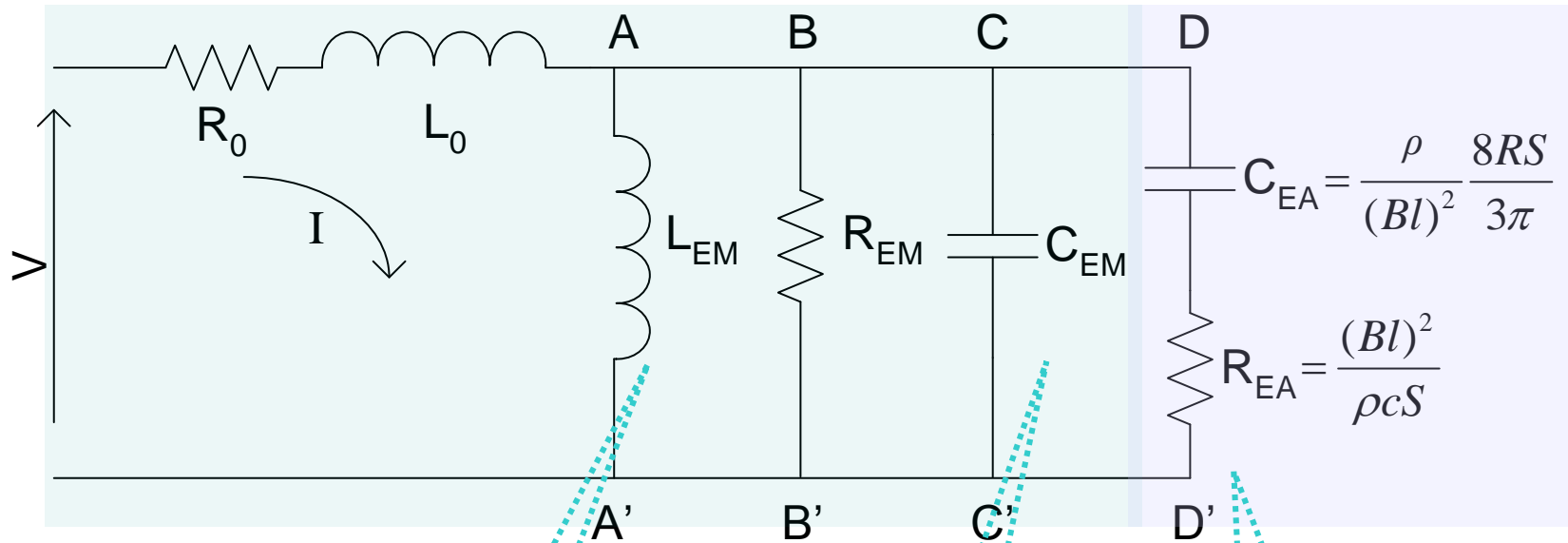
$$R_{ME} \approx \pi \cdot \rho \cdot c \cdot a^2$$

$$X_{ME} \approx 0,85 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \rho \cdot a$$

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



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

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

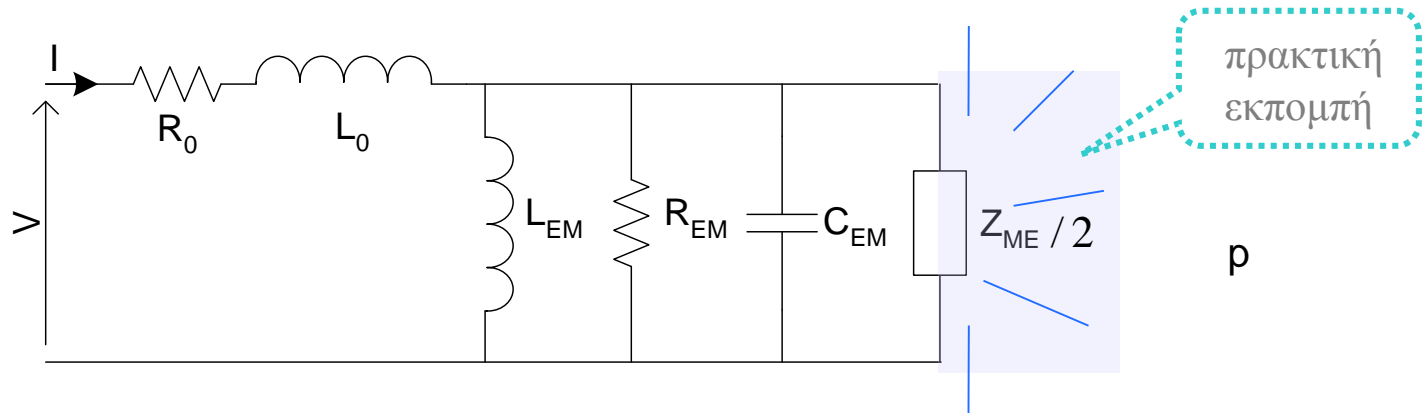
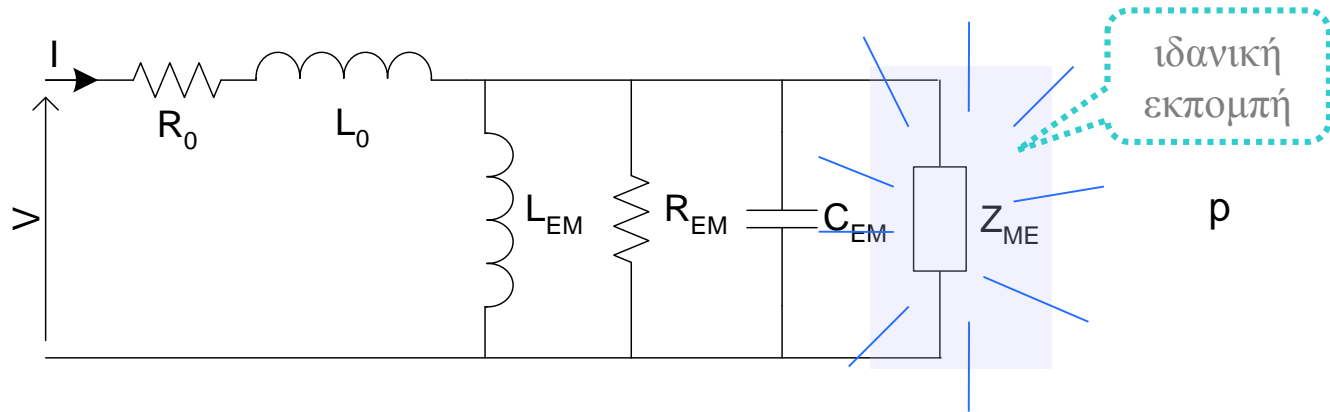
$$C_{EM} = \frac{m}{T^2}$$

έλεγχος
ελατηρίου

έλεγχος
μάζας

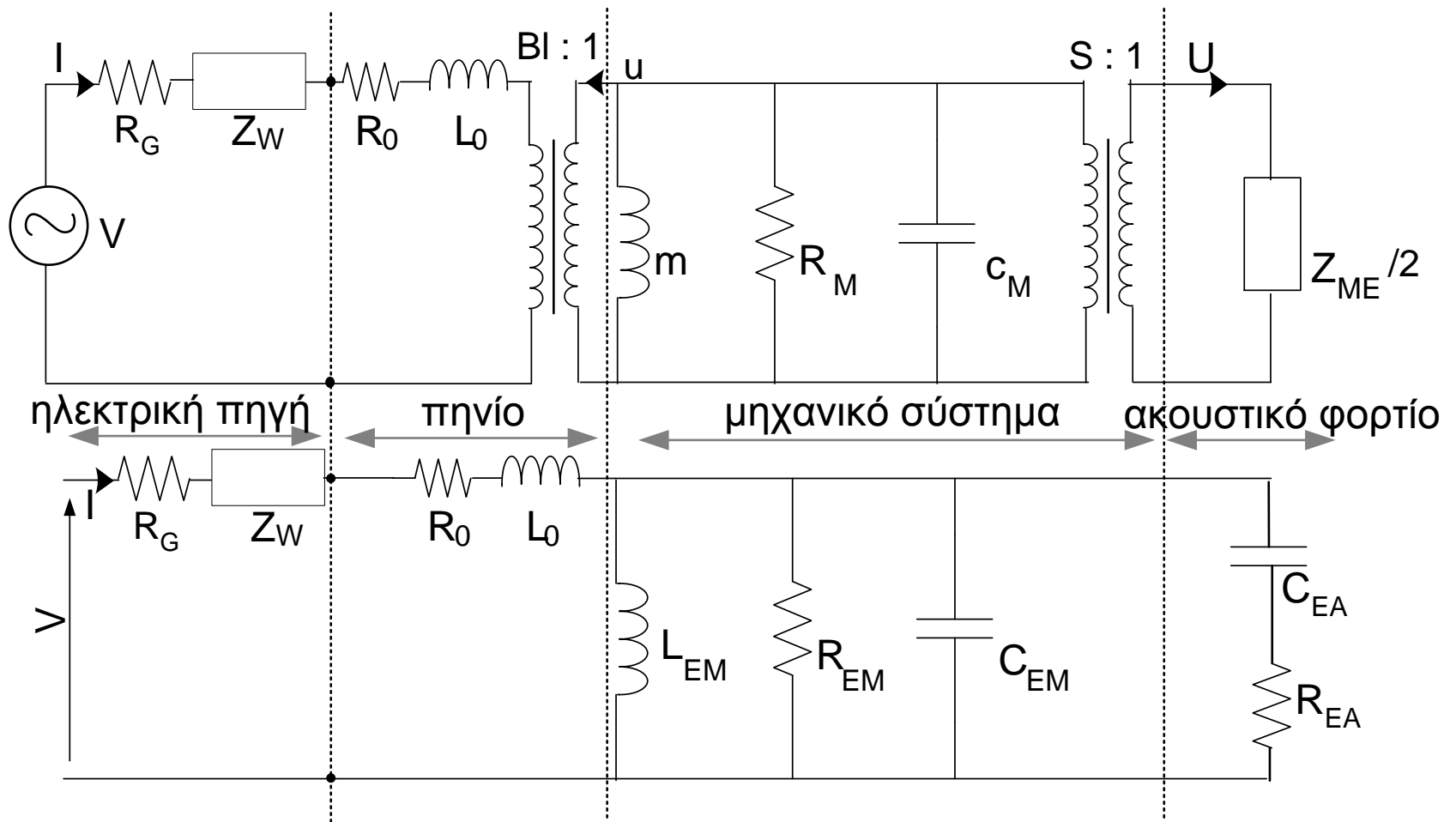
ακουστική ισχύς =
ηλεκτρική ισχύς
στην αντίσταση

ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



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

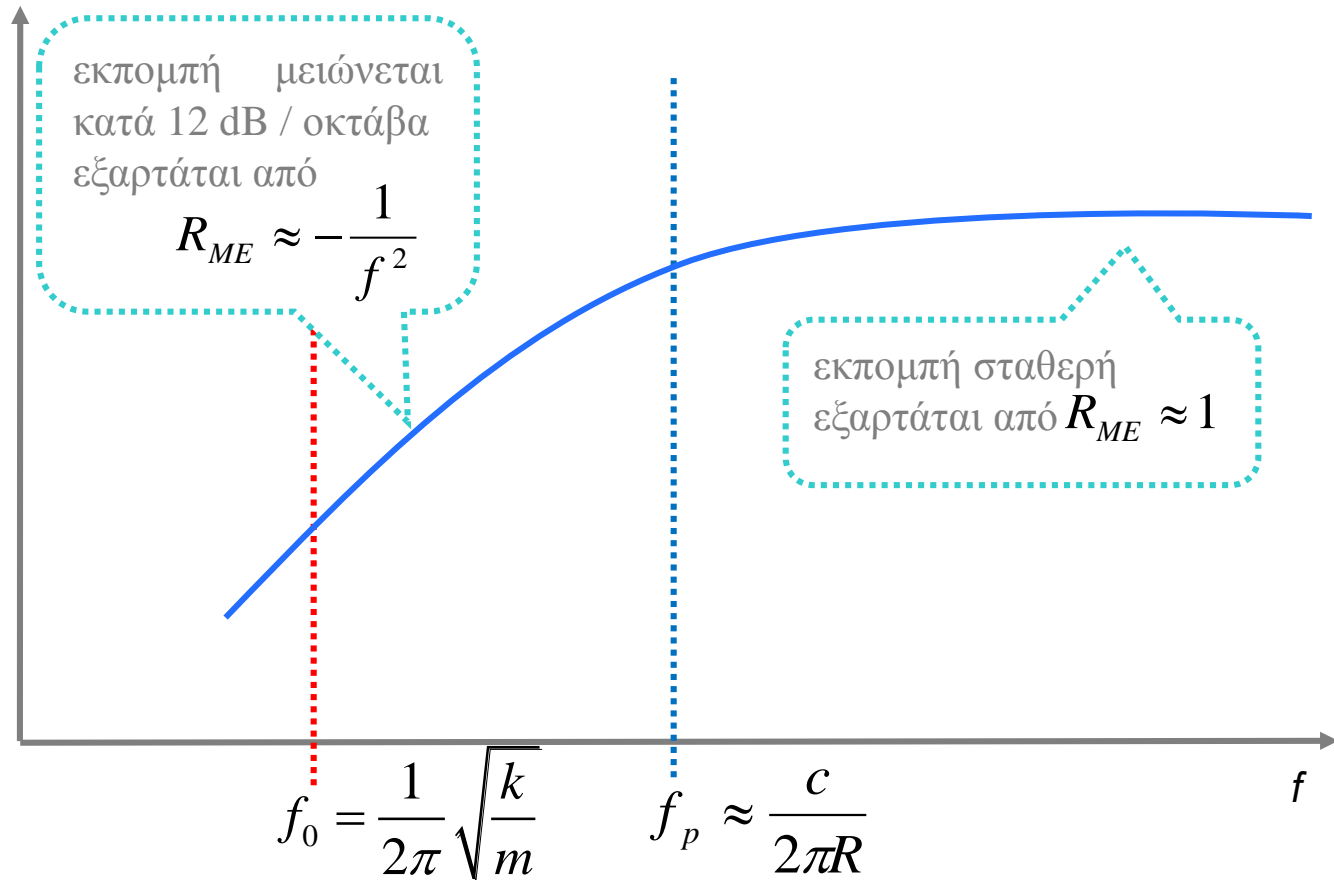
ο ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας



H – A μετατροπείς

(λειτουργία ηλεκτροδυναμικών συστημάτων)

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

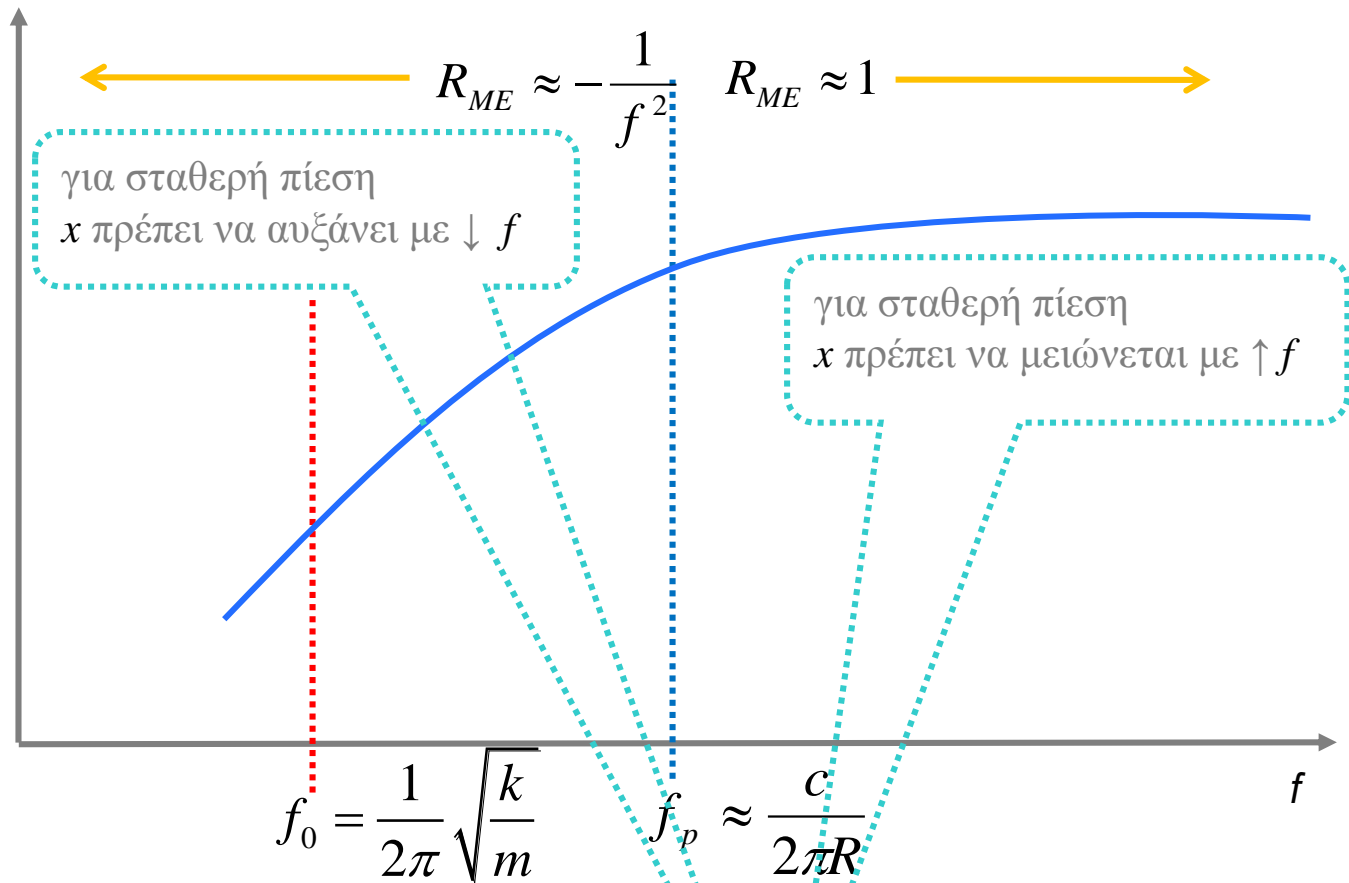


$$W_A \approx R_{ME} U^2 = R_{ME} u^2 S^2 = R_{ME} (2\pi fx)^2 S^2$$

$$u = 2\pi fx$$

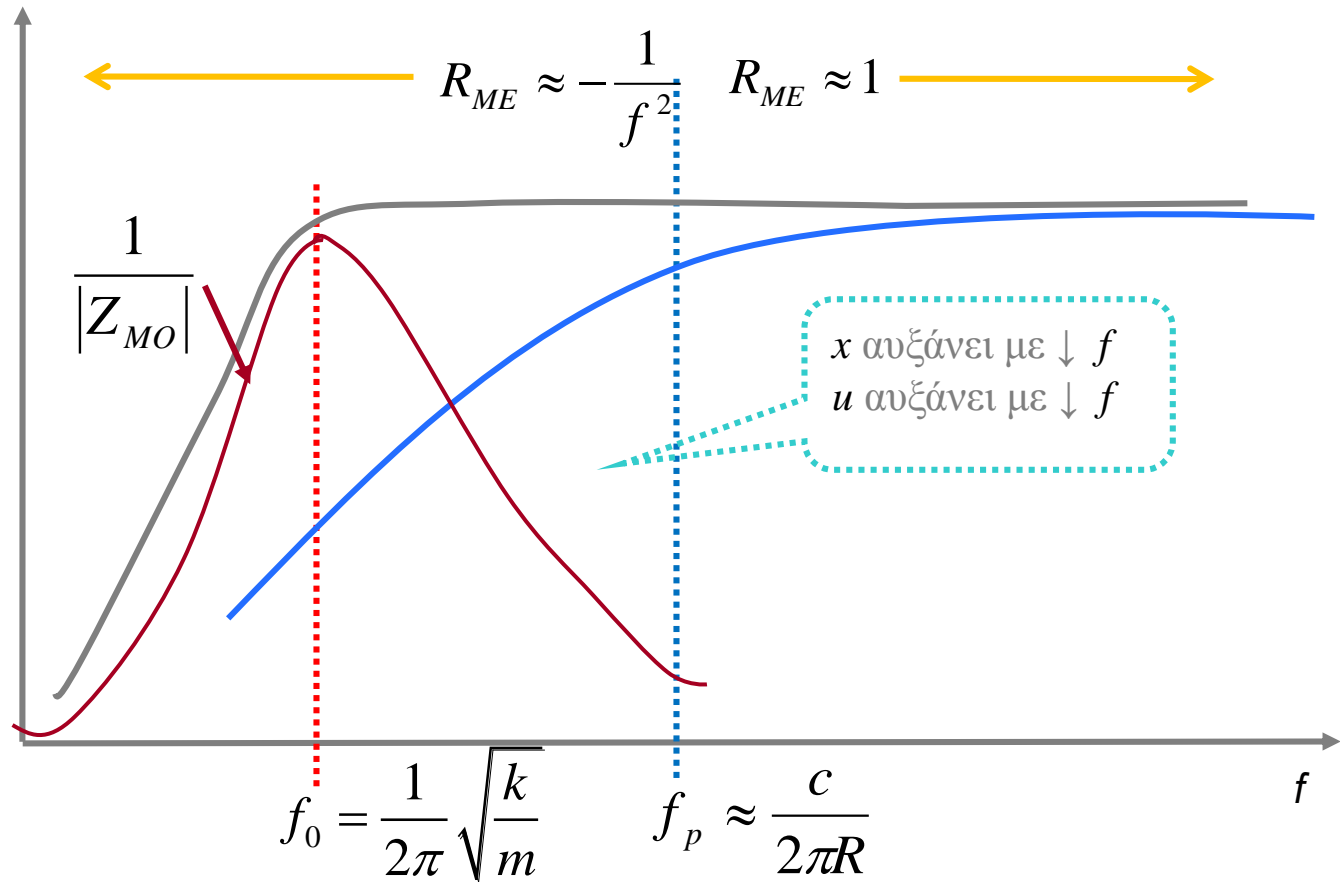
$$p \approx R_{ME} U = R_{ME} u S = R_{ME} (2\pi fx) S$$

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή



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

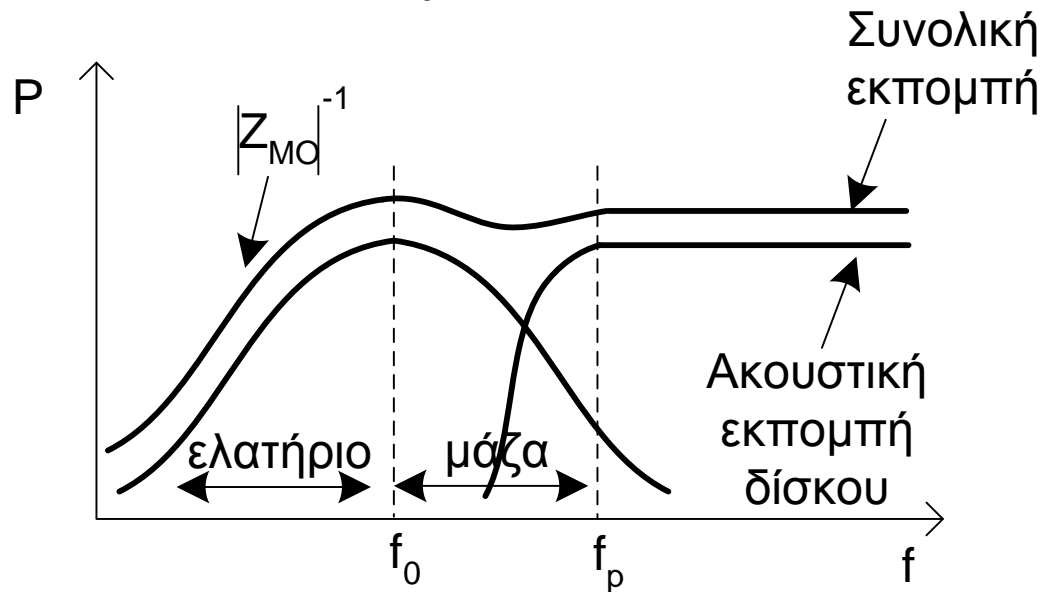
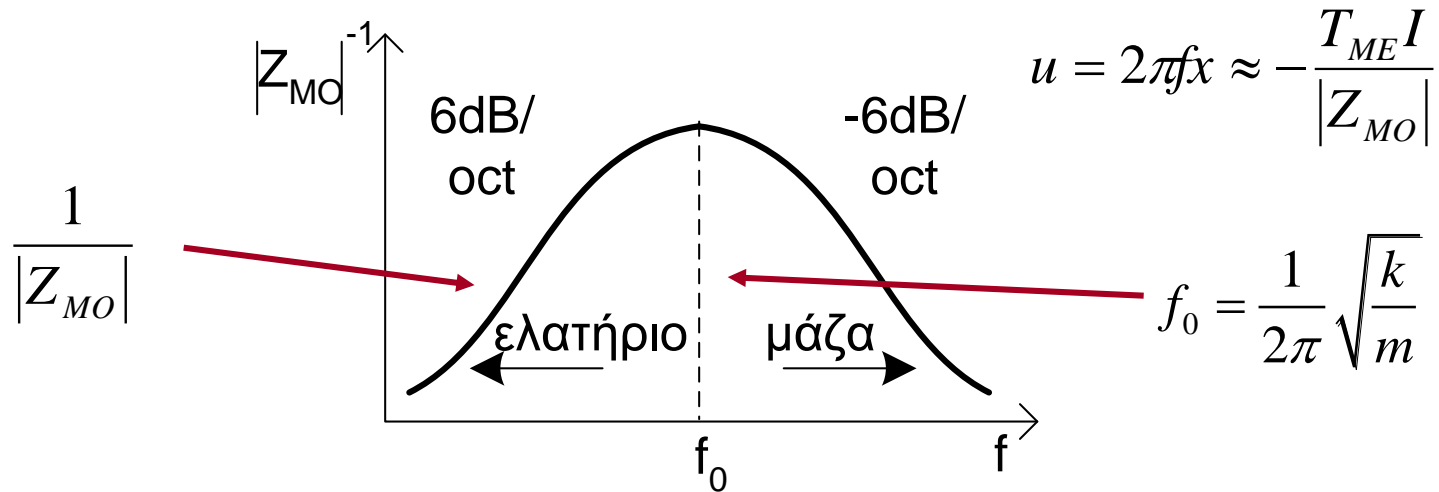
ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή



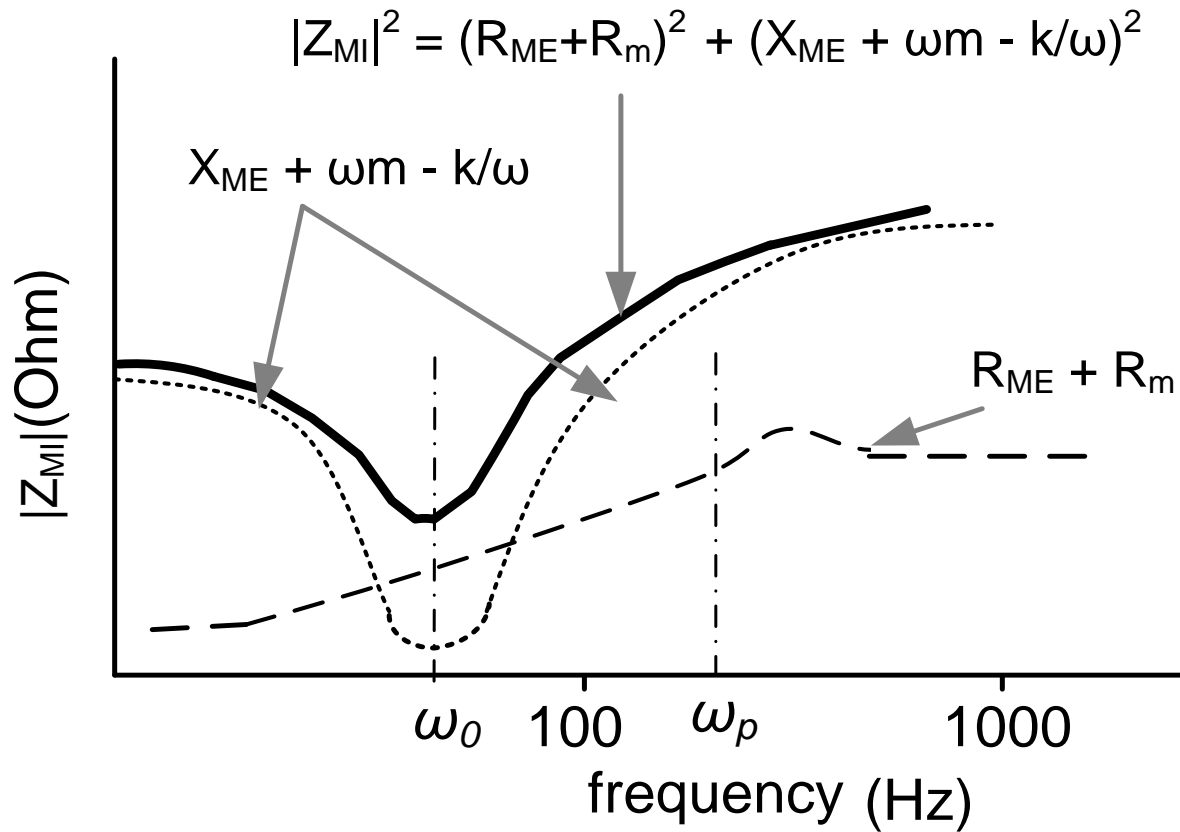
$$p \approx R_{ME} U = R_{ME} u S = R_{ME} (2\pi f x) S$$

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

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

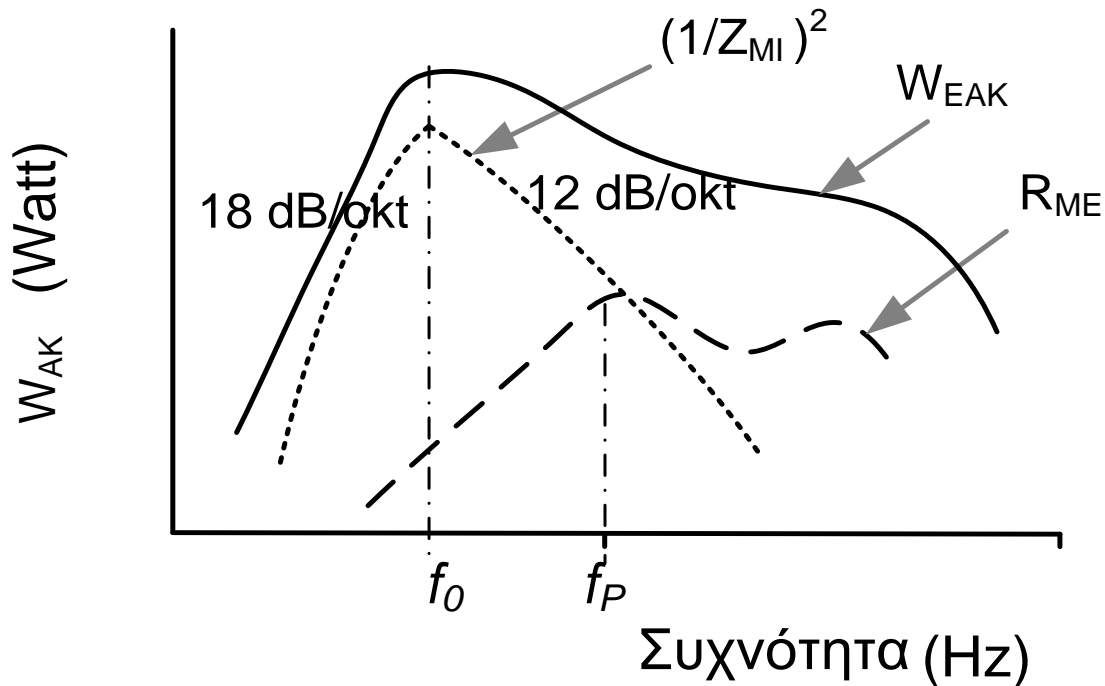


ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

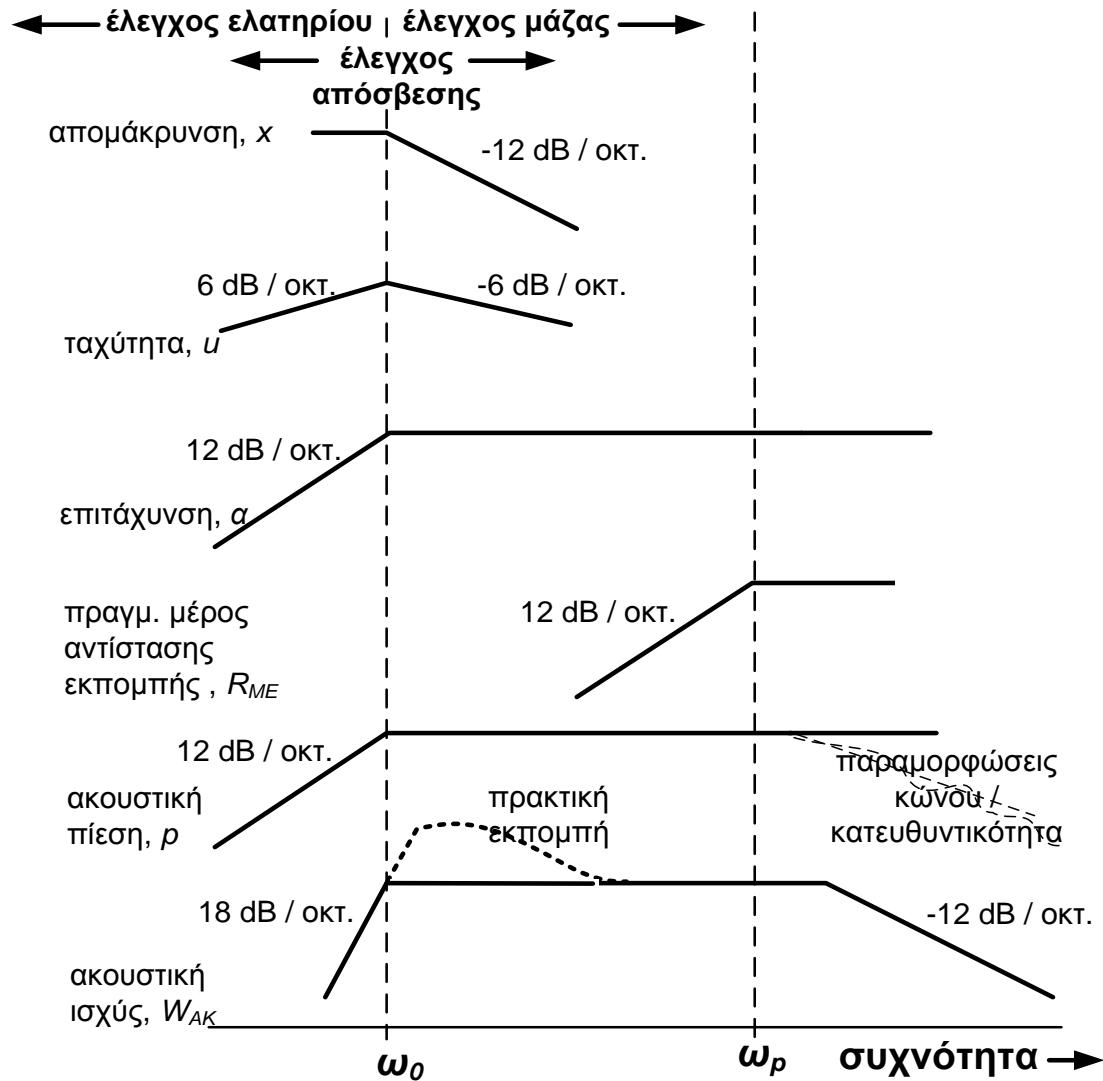


ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : ακουστική εκπομπή

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



ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : σύνοψη



ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : σύνοψη

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

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

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

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

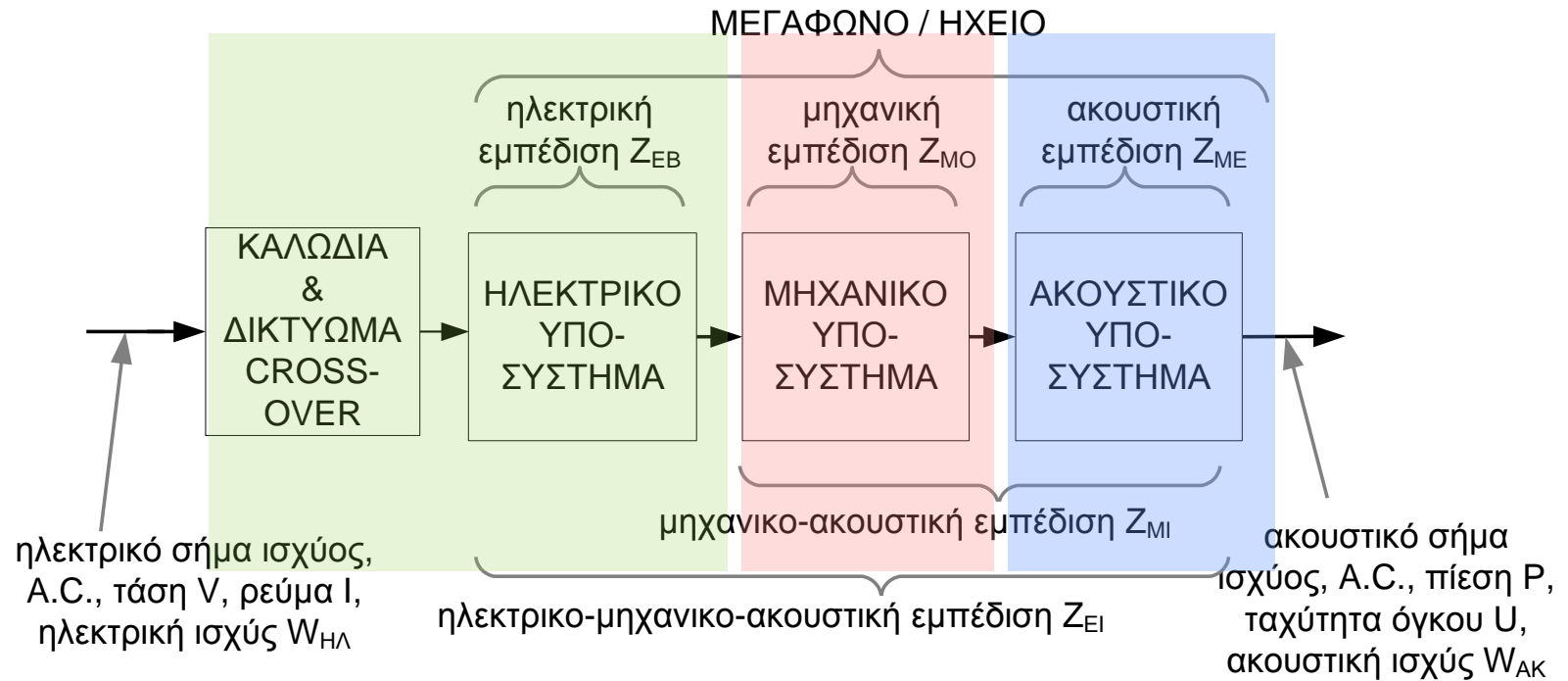
$$Z_{EI} = Z_{EB} + \frac{T^2}{Z_{MI}}$$

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

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

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

ηλεκτροδυναμικός μετατροπέας : σύνοψη





ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

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