

Système membrane - couche d'air mince chez transducteurs électrostatiques et piézoplastiques

Z. ŠKVOR

Faculté Electrotechnique, Université Technique Tchèque de Prague, Technická, 166 27 Praha 6, Czech Republic

System membrane - air gap of an electrostatic and piezopolymer transducer

This paper describes analog models of electromechanical transducers with a diaphragm and the thin air film based on the electrostatic and piezoelectric (with piezopolymer membrane) principles.

1. Introduction

Dans la famille des transducteurs basés sur un champ électrique, ce sont les transducteurs électrostatiques et piézoplastiques, chez lesquels le système membrane - couche d'air joue un rôle principal.

La description de ce type de transducteur est réalisée le plus souvent au moyen des schémas équivalents analogiques facilitant une synthèse et l'optimisation.

Les travaux les plus récents décrivent un système membrane - couche d'air, en considérant le milieu gazeux comme un fluide visco - thermique réel (M. Bruneau et al.) [1], [2].

Un transducteur électrostatique avec une membrane mince spécialement adapté pour la mesure de la pression acoustique dans une large bande de fréquences a été décrit par E. C. Wentz (1917), [3]. Un an après, I. B. Crandall (1918) [4] a décrit un système de transducteur électrostatique dont la membrane est amortie par les pertes dûe à l'écoulement visqueux à l'entrefer.

Pour faire l'analyse d'un transducteur électrostatique, il est très convenient de décrire les deux parties du système membrane - entrefer comme deux sous-systèmes indépendants. Grâce a cette approximation on peut obtenir un modèle simple possédant une précision suffisante dans la gamme des fréquences fondamentales.

P. M. Morse (1948) [5] a défini la raideur quasistatique de la membrane circulaire (in vacuo) comme un facteur de proportionnalité entre la force appliquée à la membrane et le déplacement moyen $\langle \xi \rangle$

$$s = \frac{F}{\langle \xi \rangle},$$
$$\langle \xi \rangle = \frac{1}{S} \iint \xi \, dS.$$

J. Merhaut (1967) [6] a déterminé un circuit équivalent de la membrane circulaire d'un transducteur électrostatique en introduisant le déplacement volumique de la membrane

$$\Xi = \iint \xi \, dS$$

et en définissant une impédance acoustique de la membrane comme le rapport du phaseur de la pression acoustique incidente sur celui du débit volumique $w = j\omega\Xi$

$$Z_a = \frac{P}{j\omega\Xi} = \frac{P}{j\omega \iint \xi \, dS}$$

Z. Škvor (1967, 1971) [7], [8] a calculé la résistance de l'entrefer d'un transducteur électrostatique avec une électrode fixe perforée. La répartition de l'écoulement a été étudiée sur un modèle hydrodynamique. Une suspension aqueuse d'un colorant en poudre mise entre deux plaques rigides dont une représentait une membrane et l'autre une électrode fixe, formait une couche mince simulant un milieu fluide incompressible. En écartant les plaques suivant une direction normale, les particules de colorant se déplaçaient en formant des figures qui représentaient les frontières entre domaines d'écoulement contigus.

De ce modèle, en retenant la loi de Poiseuille a été calculé l'amortissement de la membrane en prenant en compte l'influence de la résistance acoustique de l'entrefer.

Plusieurs auteurs ont étudié l'impédance de l'entrefer et du système membrane - entrefer: D. H. Robey (1954) [9], I. G. Petritskaya (1966) [10], J. Richter (1969) [11], J. E. Warren et al. (1973) [12], A. J. Zuckerwar (1978) [13], W. Kainz (1993) [14].

2. Le circuit équivalent du système du microphone électrostatique

Le circuit équivalent du microphone électrostatique, dont les parties fondamentales forment la membrane et l'entrefer, est très souvent représenté comme un trois-ports.

Une porte est électrique et les deux suivantes sont acoustiques. La surface externe de la membrane, sur laquelle agit la pression acoustique incidente p_i , forme l'entrée de cet hexapôle, la surface interne chargée par l'entrefer forme la troisième porte.

Le but de tous les travaux théoriques est de créer un modèle analogique du transducteur. Les équations du problème sont celles qui régissent la vibration de la membrane et l'oscillation du fluide de l'entrefer. Du point de vue de la modélisation, les deux parties, membrane et entrefer, sont des systèmes aux éléments répartis et la description est limitée par une certaine gamme de fréquences, habituellement jusqu'au premier mode de la membrane.

Les travaux récents (M. Bruneau et al.) [1], [2] décrivent l'entrefer comme une couche fluide viscothermique à partir des équations de Navier - Stokes, de la conservation de la masse et de Fourier pour la conduction de la chaleur sous leurs formes linéarisées.

En négligeant les pertes dues à la conduction de la chaleur on peut déduire un modèle classique du transducteur.

La membrane excitée sur la surface externe par une pression acoustique incidente p_i et sur la surface interne chargée par l'entrefer, possède une impédance mécanique

$$Z_M^{ie} = \frac{F_i - F_e}{\frac{j\omega}{S} \iint \xi dS} = \frac{p S}{\langle v \rangle} = \frac{p S^2}{w} = \frac{(p_i - p_e) S^2}{\langle v \rangle S}$$

- ou S est la surface de la membrane,
 - ξ le déplacement de la membrane,
 - $\langle v \rangle$ la vitesse moyenne,
 - $w = \langle v \rangle S$ le débit volumique,
 - $F_i = p_i S$ la force due à la pression acoustique incidente,
 - $F_e = p_e S$ la force due à la charge acoustique de l'entrefer effectuant sur la membrane.
- L'impédance acoustique de la couche d'air de l'entrefer est

$$Z_{Ea} = \frac{p_e}{w}$$

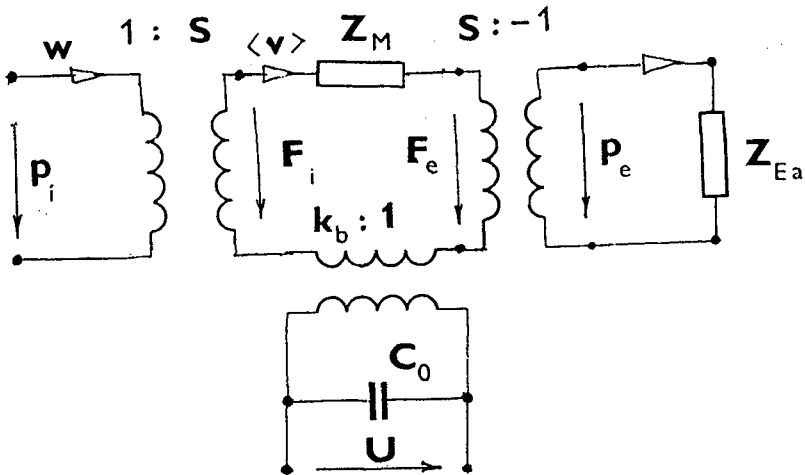


Fig. 1

La Fig.1 décrit un schéma équivalent du transducteur électrostatique dont la troisième porte est représentée par les bornes électriques avec la capacitance C_0 , la tension électrique de sortie U et le rapport du transducteur

$$k_b = \frac{Q_0}{h}$$

Q_0 étant la charge électrique de polarisation et h l'épaisseur de l'entrefer.

L'impédance acoustique de la membrane circulaire (in vacuo) (i.e. [8], [15]) est comme suit

$$Z_{Ma} = \frac{Z_M}{S^2} = \frac{k_M^2 v}{j\omega} \frac{1}{S} \frac{J_0(k_MR)}{J_2(k_MR)}$$

où k_M est le nombre d'onde,

$$k_M = \omega \sqrt{\frac{m_1}{v}} = \frac{\omega}{c_m}$$

m_1 la masse surfacique,

v la tension de la membrane,

c_m la vitesse d'ondes sur la membrane,

R le rayon de la membrane.

L'impédance mécanique du système membrane - entrefer est

$$Z_{ME}^* = Z_M + Z_{Ea} S^2 + \frac{k_b^2}{j\omega C_0}$$

ou, en négligeant le troisième terme

$$Z_{ME}^* \approx Z_{ME} = Z_M + Z_{Ea} S^2$$

La sensibilité du microphone est

$$\eta = \frac{U}{P_i} = \frac{S k_b}{k_b^2 + j\omega C_0 Z_{ME}}$$

et pour

$$\omega C_0 Z_{ME} > k_b^2$$

on a

$$\eta \approx \frac{k_b S}{C_0 j\omega Z_{ME}}$$

En supposant le déplacement moyen de la membrane on peut déduire les éléments du système membrane - entrefer présentés sur la Fig.2 pour la gamme des fréquences fondamentales:

$$Z_M \approx m_M + \frac{1}{j\omega c_M}$$

est l'impédance mécanique de la membrane, où

m_M représente l'inertance de la membrane circulaire

$$m_M = 1,4458 m_1 \pi R^2 \quad [15]$$

c_M la compliance mécanique de la membrane

$$c_M = \frac{1}{8,3612 \pi v} \quad [15]$$

c_{E1} la compliance mécanique de l'entrefer

$$c_{E1} = \frac{h}{\rho c^2 \pi R^2}$$

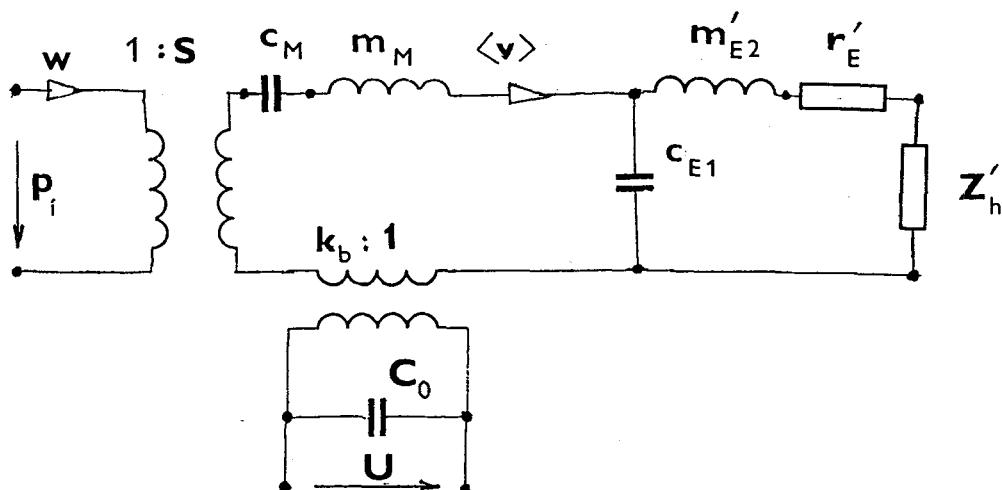


Fig.2

r'_E la résistance mécanique de l'entrefer dûe aux pertes visqueuses

$$r'_E = 3\mu \frac{\pi R^4}{h^3} \quad [15] ,$$

m'_{E2} l'inertance de l'entrefer

$$m'_{E2} = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi R^4}{h} \quad [15] ,$$

Z'_h l'impédance mécanique du réservoir périphérique transformée sur la membrane vibrant avec une vitesse moyenne $\langle v \rangle$.

La résistance r'_E calculée à partir de la loi de Poiseuille [7] pour le mode en piston est

$$r_E = \frac{3\mu}{2} \frac{\pi R^4}{h^3} = \frac{F_r}{v_0} ,$$

ou F_r est la force d'amortissement effectuante sur la membrane, et v_0 la vitesse uniformément répartie sur la membrane.

En supposant la vitesse moyenne (en cas de déplacement parabolique) $\langle v \rangle = v_0/2$, on obtient

$$r'_E = \frac{3\mu \pi R^4}{h^3}$$

Cette valeur est en bon accord avec le terme

$$r = \frac{11}{4} \mu \frac{\pi R^4}{h^3}$$

derivé de [4].

Le schéma, ainsi que les valeurs des éléments de la Fig.2 sont très voisines de celles calculées en [2] pour la gamme des fréquences fondamentales.

Pour la plupart des applications, la description du transducteur présentée ici a une précision suffisante.

Cependant, pour des applications plus pointues il est possible d'affiner la description.

3. Transducteur piézoplastique et son circuit équivalent

Le transducteur piézoplastique est de la famille des transducteurs, qui sont très proches de ceux basés sur le principe électrostatique.

Sur la Fig.3 nous présentons comme exemple un transducteur piézoplastique de forme spirale [16],[17], [18], [19] fonctionnant comme un écouteur.

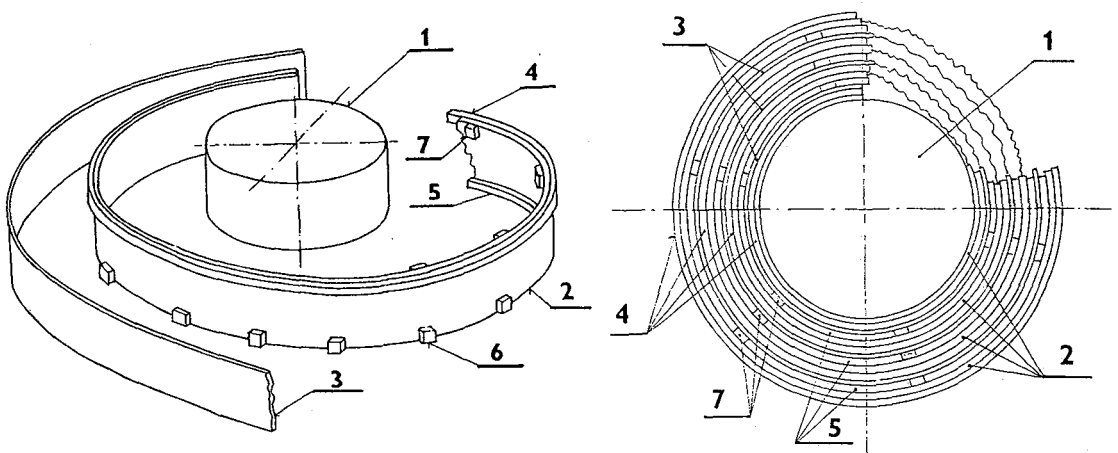


Fig.3

Sur le noyau 1 est enroulée une bande piézoplastique 2 avec les pièces 4, 5, 6, 7 et une bande séparatrice 3. Les bandes de forme cylindrique 2 et 3 forment entre elles des entrefers. La bande piézoplastique en changeant sa longueur sous l'influence du champ électrique d'excitation, vibre dans la direction radiale, étant chargée par les couches minces d'air entre les bandes 2 et 3. Ce système possède le schéma équivalent dessiné sur la Fig.4, ou

U_3 est la tension électrique d'excitation,

c_N la compliance de la bande,

m_N la masse de la bande,

$C_{e0N} = \epsilon_{33}^T N \frac{1-k_{31}^2}{h} 2\pi R b$ la capacitance de transducteur,

N le nombre de tours de la bande,

h l'épaisseur de la bande piézoplastique,

ϵ_{33}^T la permittivité du matériel piézoplastique,

k_{31} le coefficient de couplage électromécanique,

R le rayon moyen de la bande,

b la largeur de la bande,

$Z_2 = j \rho_0 c_0 N 2\pi R H \left(-\cot kb + \frac{1}{kb} \right)$ l'impédance de l'entrefer,

k le nombre d'onde ,

H l'épaisseur de l'entrefer,

$R_m = 8 \mu \pi R b \frac{N}{H}$ la résistance de l'entrefer,

$k_{bN} = N 2\pi b \frac{d_{31}}{s_{11}^E}$ le coefficient du transducteur,

$c_m = \frac{H}{\rho_0 c_0^2 N b 2\pi R}$ la compliance de l'entrefer.

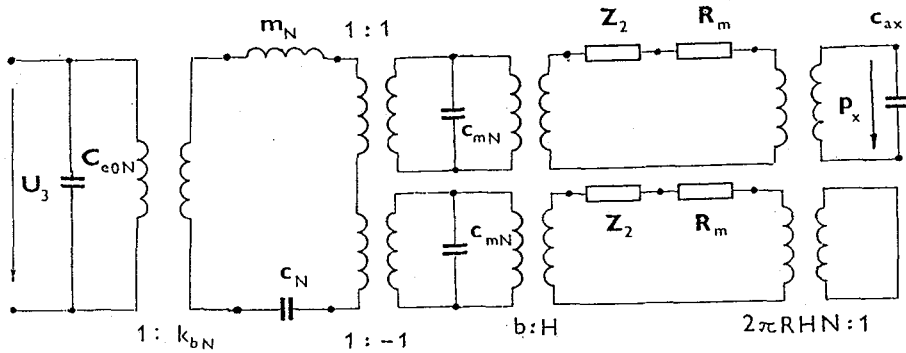


Fig.4

La réponse d'un écouteur à la bande piézoplastique chargé d'un côté par une cavité de volume 1,4 cm³ (l'autre côté étant sans charge acoustique), est représentée, pour la tension $U_3 = 5$ V, sur la Fig.5.

Les courbes de réponses ($R = 5$ mm, $N = 5$, $H = 60$ μ m, $b = 15$ mm, $h = 25$ μ m - film piézoplastique PVDF - Solef) théorique..... et mesurée_____ sont en bon accord.

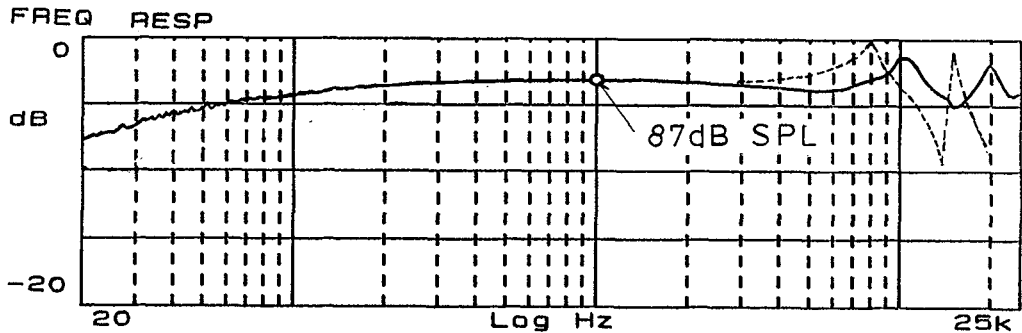


Fig.5

4. Résumé

Nous avons présenté deux types de modèles de transducteurs basés sur la théorie simplifiée facilitant une étude synthétique et analytique efficace, étant très utile pour la réalisation des transducteurs.

5. Bibliographie

- [1] Bruneau, M., et al.: Modélisation des microphones miniatures: Effets des couches limites visco-thermique. J. Ph. IV, Coll.C1, Vol.2, Avril 1992, 2^{ème} Conf. Fr. d'Acoust., Arcachon
- [2] Bruneau, M. et al.: An electrical network to modelling the strong coupling between a vibrating membrane and a fluid film. To be published in Acta Acustica
- [3] Wentz, E. C.: Phys. Review, Vol.X, Series II, 1917, No.1, pp.39 - 63
- [4] Crandall, I. B.: Phys. Review, Vol.XI, Series II, 1918, No.6, pp.449 - 460
- [5] Morse, P. M.: Vibration and Sound, Sec. ed., Mc Graw- Hill , N.Y., 1948, pp.195 - 203
- [6] Merhaut, J.: Acustica, 19, No.5, 1967/68, pp. 284 - 292
- [7] Škvor, Z.: Acustica, 19, No.5, 1967/68, pp. 295 - 299
- [8] Škvor, Z.: Hochfrequenz und Elektroakustik, 80, No.3, Leipzig 1971, pp. 85 - 92
- [9] Robey, D. H.: J. Acoust. Soc. Am., 26, 1954, pp. 740 - 745
- [10] Petritskaya, I. G.: Sov. Phys. Acoust., 12 (2) , 1966, pp. 193 - 198
- [11] Richter, J.: Acustica 22, No.2, 1969/70, pp. 95 - 106
- [12] Warren, J. E. et al. :J. Acoust. Soc.Am., 54 (5), 1973, pp.1201 - 1213
- [13] Zuckerwar, A. J.: J. Acoust. Soc. Am., 64 (5), 1978, pp. 1278 - 1285
- [14] Kainz, W.: Coupled Acoustic Systems, Fortschritte VDI, Reihe 11, Nr.186, Düsseldorf, 1993
- [15] Škvor, Z.: Vibrating Systems and their Equivalent Circuits. Elsevier Sc. Publ., Amsterdam, 1991
- [16] CZ Pat. Appl. 277814, 277815
- [17] Škvor, Z.: Transducteurs électroacoustiques et électromécaniques et leurs circuits équivalents, J. Phys. Vol.2, Coll.No.1, Suppl.JP III, No.4, 2^{ème} Congr. Fr. Acoust.Vol. 1, C1-349-356
- [18] Škvor, Z. et al.: Acta Polytechnica, CTU, Vol .32, No.1/1992, pp.59 - 64
- [19] Lotton, P.: Rapport de stage D. E. A., Acoust. Appl., CTU Prague, LAUM, Le Mans, 1991