agrégation de physique 2002 – 2003

MP22 : transducteurs électromécaniques

Bibliographie : [1] - Mathieu *Vibrations*
[2] - Rossi *Électroacoustique* ; M. Jufer *Électromécanique*
[3] - Dictionnaire Physique expérimentale (tome 1 mécanique et tome 4 électricité) nouvelles éditions
[4] - Berty Électricité
[5] - BUP 647 (pour les électrets)
[6] - BUP 607 et 702 (pour la piézoélectricité)
[7] - BUP 777 octobre 95.

Voir surtout le tome 4 électricité nouvelle édition

1. introduction

1. 1 définition

Un transducteur électromécanique est un dispositif électromécanique assurant une conversion ou un transfert de signaux (conversion d'énergie et d'information).

Transformation « électrique ⇒ mécanique » : elle est assurée par les *moteurs* (ou actionneur) ; on s'intéresse surtout dans ce cas au transfert d'energie, on calcule des rendements (ou efficacité)

Transformation « mécanique ⇒ électrique » ; elle est assurée par les *capteurs* ; on s'intéresse surtout au transfert d'informations (sensibilité)

• Si les moteurs et capteurs sont théoriquement *réversibles*, ils le sont rarement en pratique.

Généralement, on restreint cette définition aux systèmes oscillants ; c'est ce que nous ferons ici (nous utiliserons donc la notation complexe), nous excluons les moteurs et dynamos.

Les transducteurs sont donc des *systèmes couplés* ; ils sont décrits par des équations couplées traduisant la relation existant entre un oscillateur (l'excitateur $\mathcal{E}$) et un autre oscillateur (le résonateur $\mathcal{R}$).

Chaque oscillateur pris séparément est à un degré de liberté (au minimum) ; une seule variable suffit pour décrire son évolution ; choisissons par exemple l'intensité $\boxed{i}$ pour la partie électrique et la vitesse $\boxed{v}$ pour la partie mécanique. Par ailleurs, chaque oscillateur ne peut évoluer que s'il existe une relation avec le milieu extérieur ; choisissons par exemple une tension $\boxed{U}$ appliquée et une force $\boxed{F}$ appliquée. Nous avons donc les relations : U = f(i,v) et F = g(i,v).

⇒ Si F = 0 le système fonctionne en **moteur** (actionneur)

⇒ Si U = 0 le système fonctionne en **générateur** (capteur)

A priori les phénomènes physiques mis en jeu sont rarement *linéaires* aussi, les fonctions f et g ci-dessus ne sont pas linéaires. On doit souvent procéder à une *linéarisation* au moyen d'une *polarisation* adéquate du système. On exploite ensuite les *petites oscillations autour du point de repos.*

• La *fonction de transfert* est la relation donnant la réponse en fonction de l'excitation, elle dépend de la fréquence et peut être représentée par un diagramme de Bode (réponse en amplitude). La bande passante est le domaine de fréquence dans lequel la réponse est sensiblement constante ; elle est délimitée par les fréquences de coupure.

1. 2 Le couplage

On utilise les notations complexes : $\bar{i}$ intensité, $\bar{v}$ vitesse, $\overline{Z_e}$ impédance électrique, $\overline{Z_m}$ impédance mécanique, $\bar{U}$ et $\bar{F}$ les actions extérieures (tension et force). Dans le cas de l'hypothèse linéaire, les oscillations autour du point de repos peuvent être décrites en appliquant la loi de Pouillet (loi d'Ohm) et la relation fondamentale de la dynamique (RFD) :

$$\left|\begin{array}{ll}\text{Loi de Pouillet :} & \bar{U} = \overline{Z_e}\,\bar{i} + \overline{U_{couplage}} \\ \text{RFD :} & \bar{F} + \overline{F_{couplage}} = \overline{Z_m}\,\bar{v}\end{array}\right. \quad \Rightarrow \quad \left|\begin{array}{ll}\bar{U} = \overline{Z_e}\,\bar{i} + \overline{Z_1}\,\bar{v} & (1) \\ \bar{F} = \overline{Z_2}\,\bar{i} + \overline{Z_m}\,\bar{v} & (2)\end{array}\right.$$

Les expressions de $\overline{Z_1}$ et $\overline{Z_2}$ établies à partir de $\overline{U}_{couplage}$ et $\overline{F}_{couplage}$ sont les *coefficients de couplage*, généralement $\boxed{\overline{Z_1} = \pm\overline{Z_2}}$

La résolution de ce système d'équations (1) et (2) donne, si par exemple on élimine $\bar{v}$:

$$\overline{U} = (\overline{Z_e} + \overline{Z_c})\,\overline{i} + \frac{\overline{Z_1}}{\overline{Z_m}}\,\overline{F} \quad \text{avec} \quad \overline{Z_c} = -\frac{\overline{Z_1}.\overline{Z_2}}{\overline{Z_m}}$$

$\overline{Z_c}$ est l'impédance *cinétique* ou *motionelle*, l'impédance électrique est donc *modifiée* :

$$\overline{Z_e} \Rightarrow \overline{Z'_e} = \overline{Z_e} + \overline{Z_c}$$

Suivant la nature du couplage $\boxed{\text{électrique}} \Leftrightarrow \boxed{\text{mécanique}}$, on distingue diverses conversions dont la liste et les principes de base sont rappelés ci-dessous.

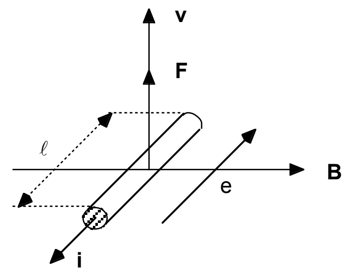
1. 3 Inventaire

On peut distinguer cinq types de conversions électromécaniques, successivement : électrodynamiques, électro-magnétiques, électrostatiques, piézo-électriques, magnétostrictives.

a) La conversion électrodynamique

• Interactions entre grandeurs électriques et mécaniques dans un circuit mobile dans un champ magnétique. Cette conversion est basée sur les lois de Lenz-Faraday et Laplace (figure). Avec les orientations de la figure T15, on obtient :

$$\left|\begin{array}{lll} de = (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}).\mathbf{d}\ell & \Rightarrow & e = -B\ell v \\ d\mathbf{F} = i\mathbf{d}\ell \wedge \mathbf{B} & \Rightarrow & F = Bi\ell \end{array}\right.$$



• En régime sinusoïdal, en écrivant la loi de Pouillet et la relation fondamentale de la dynamique (RFD), on obtient les équations :

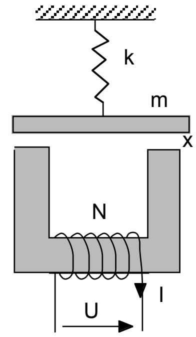
$$\left|\begin{array}{l} \overline{U} = \overline{Z_e}\,\overline{i} + B\ell\overline{v} \\ \overline{F} = B\ell\overline{i} - \overline{Z_m}\,\overline{v} \end{array}\right. \qquad B\ell \text{ est le } \textit{coefficient de couplage électrodynamique}$$

⇒ La linéarité est souvent assurée par un champ « radial ».
– Si $\overline{F} = 0$ le fonctionnement en *moteur* est illustré par le moteur à courant continu, le galvanomètre, le haut-parleur,…
– Si $\overline{U} = 0$ le fonctionnement en *générateur* (ou *capteur*) est illustré par le microphone, la génératrice à courant continu, le phonocapteur,…

b) Conversion électro-magnétique

Interactions entre grandeurs magnétiques et mécaniques dans un circuit à réluctance variable.
Cette conversion est basée sur la loi de Lenz et sur la force magnétique dans les circuits à réluctance variable (figure) :

$$\left|\begin{array}{l} e = -\dfrac{d(Li)}{dt} = U \\ F = -\dfrac{\partial}{\partial x}(\dfrac{1}{2}Li^2) \end{array}\right.$$



Ces deux relations sont non linéaires ; moyennant une polarisation par un flux constant $\Phi_o = L_oI_o$ on les linéarise aisément.
Ainsi $\Phi = \phi_o + \phi$ et $I = I_o + i$ (avec $\phi << \phi_o$ et $i << I_o$)

Soit d_o l'entrefer au repos. Le déplacement est : $d(x) = d_o - x(t)$; l'application du théorème d'Ampère donne :

$$\mathcal{R}\,\Phi = NI$$

Avec $\mathcal{R}$ = réluctance, si $\mu >> \mu_o$ alors $\mathcal{R} \cong \mathcal{R}_o(1 - \dfrac{x}{d_o})$ avec $\mathcal{R}_o \cong \dfrac{2d_o}{\mu_o S}$

où S est la section du circuit magnétique.

L'inductance L s'écrit donc : $L = L_o/(1-\dfrac{x}{d_o}) \cong L_o(1+\dfrac{x}{d_o})$ et par suite (les constantes correspondant aux polarisations) :

$$\left|\begin{array}{l} e = -\dfrac{d(LI)}{dt} = -L\dfrac{dI}{dt} - I\dfrac{dL}{dt} \cong -L_o\dfrac{dI}{dt} - \dfrac{IL_o}{d_o}\dfrac{dx}{dt} + Cte \cong -L_o\dfrac{di}{dt} - \dfrac{\phi_o}{d_o}\dfrac{dx}{dt} + Cte \\ F = -\dfrac{\partial}{\partial x}(\dfrac{1}{2}LI^2) = \dfrac{1}{2}\dfrac{1}{L_od_o}\Phi^2 \cong \dfrac{1}{2}\dfrac{1}{L_od_o}(\phi_o + \dfrac{\phi_o x}{d_o} + L_oi)^2 + Cte \cong \dfrac{\phi_o}{d_o}i + \dfrac{\phi_o^2}{L_od_o^2}x + Cte \end{array}\right.$$

On obtient ainsi les deux équations linéaires couplées (pour les parties variables) :

$$e \cong -L_o\frac{di}{dt} - \frac{\phi_o}{d_o}\frac{dx}{dt} \quad \text{et} \quad F \cong \frac{\phi_o}{d_o}i + \frac{\phi_o^2}{L_od_o^2}x$$

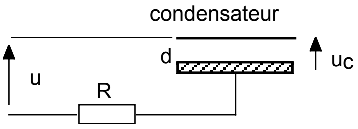
• En régime sinusoïdal on peut donc écrire (en utilisant les équations électriques ci-dessus et RFD) :

$$\left|\begin{array}{l}\overline{U} = \overline{Z}\,\overline{i} + \dfrac{\phi_o}{d_o}\overline{v} \\ \overline{F} = \overline{Z_m}\,\overline{v} - \dfrac{\phi_o}{d_o}\overline{i}\end{array}\right. \qquad \frac{\phi_o}{d_o} \text{ est le coefficient de couplage}$$

– Fonctionnement en *moteur* : les écouteurs téléphoniques,…
– Fonctionnement en *générateur* : phonocapteurs à réluctance variable, capsules microphones téléphoniques,...

c) Conversion électrostatique

Interactions entre grandeurs électriques et mécaniques dans un condensateur dont une des armatures est mobile (figure).
Cette conversion est basée sur la relation entre la charge et le potentiel et sur la force électrostatique :



$$\left|\begin{array}{l}u_c = \dfrac{Q}{C} \\ F_c = -\dfrac{\partial W}{\partial x} = -\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{1}{2}\dfrac{Q^2}{C}\right)\end{array}\right. \qquad \text{avec } C = \varepsilon_o\frac{S}{d} = \varepsilon_o\frac{S}{d_o - x} = \varepsilon_o\frac{S}{d_o}\frac{1}{1 - x/d_o} = \frac{C_o}{1 - x/d_o} \cong C_o\left(1 + \frac{x}{d_o}\right)$$

Ces relations étant non linéaires, on utilise une polarisation : $Q = Q_o + q = C_oU_o + q$ ($q \ll Q_o$)
En utilisant des approximations similaires au cas de la conversion électro-magnétique, on obtient sans difficulté les relations linéaires :

$$u_c \cong Cte + \frac{q}{C} - \frac{U_o}{d_o}x \quad \text{et} \quad F_c \cong Cte + \frac{U_o}{d_o}q$$

• En régime sinusoïdal on peut donc écrire (en utilisant les équations électriques et RFD):

$$\left|\begin{array}{l}\overline{u_c} \cong \overline{Z}\,\overline{i} - \dfrac{U_o}{j\omega d_o}\overline{v} \\ \overline{F_c} \cong \dfrac{U_o}{j\omega d_o}\overline{i} + \overline{Z_m}\,\overline{v}\end{array}\right. \qquad \frac{U_o}{j\omega d_o} \text{ est le coefficient de couplage}$$

On rappelle que $x = v/j\omega$ et $q = i/j\omega$.

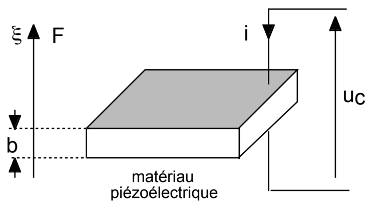
REMARQUE

La polarisation est une contrainte incontournable ; dans la pratique on utilise de préférence des transducteurs électrostatiques à électret *; ce sont des matériaux diélectriques susceptibles de conserver une* polarisation électrique permanente.

– Les applications de cette conversion sont du même type que ci-dessus mais concernent généralement du matériel de très haute qualité.

d) Conversion piézoélectrique

Interactions entre grandeurs électriques et mécaniques dans certains cristaux déformables.
Cette conversion est basée sur la *polarisation électrique Q* de certains matériaux sous l'action de *contraintes* mécaniques, et inversement sur la *déformation* sous l'effet d'un *champ électrique*.
• Si on applique une force F, il y a une déformation qui induit des moments dipolaires, donc une polarisation électrique et par suite apparition de charges Q (figure).
Inversement, l'application d'une tension u_c induit un champ électrique qui entraîne des contraintes donc une déformation ξ



Dans la limite linéaire :

$$\left|\begin{array}{l}Q = kF \quad \text{k est le } \textit{module piézo électrique de charge}, \text{ il s'exprime en C.N}^{-1} \\ \xi = ku_c \quad \text{k s'exprime ici en m.V}^{-1}\end{array}\right.$$

Dans le cas général, on écrira : $\left|\begin{array}{l}Q = C_ou_c + kF \\ \xi = ku_c + C_mF\end{array}\right.$

Et par suite, en régime sinusoïdal : $\left|\begin{array}{l}\overline{i} = q/j\omega \cong \overline{Y_e}\,\overline{u_c} + j\omega k\overline{F} \\ \overline{v} = \xi/j\omega \cong \overline{Y_m}\,\overline{F} + j\omega k\overline{u_c}\end{array}\right.$

où les grandeurs « Y » sont homogènes à des admittances.
– Naturellement les applications sont très nombreuses.

e) Conversion magnétostrictive (citée pour mémoire)

« Analogue » de la piézoélectricité pour le magnétisme : déformation de certains matériaux ferromagnétiques sous l'action de **B**... et inversement (voir par exemple "La Recherche" septembre 1995).