Induction : Haut-parleur et courants de Foucault

Prenez en note tout élément pouvant figurer dans un compte-rendu de TP :
mesures, calculs d'incertitude, observations (schémas) et interprétations, méthodes expérimentales...

Améliorer mesure constante de couplage (Laser ?)

I. Mesure des coefficients de Thiele-Small d'un haut-parleur électro-dynamique

I.1. Introduction

Les calculs du cours ont montré que le haut-parleur électrodynamique se comporte du point de vue électrique comme la somme d'une impédance impédance d'origine électrique $\underline{Z}_e$ et d'une *impédance motionnelle* d'origine mécanique $\underline{Z}_m$:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{e}}{\underline{i}} = \underline{Z}_e + \underline{Z}_m \quad \text{avec} \quad \underline{Z}_e = R_e + j\omega L_e \quad \text{et} \quad \underline{Z}_m = \frac{\ell^2 B^2}{\underline{Z}_{\text{meca}}}$$

Dans cette expression apparaît le *facteur de couplage électromécanique* (ou *facteur de force*) $B\ell$, ainsi qu'une *impédance mécanique* (qui relie la vitesse à la force),

$$\underline{Z}_{\text{meca}} = \alpha + \frac{1}{j\omega C_m} + jm\omega$$

où α est appelée *résistance mécanique* (coefficient de frottement fluide appliqué à l'équipage mobile), C_m est la *souplesse* des suspensions (l'inverse d'un coefficient de raideur de ressort), et m est la masse de l'équipage mobile.[1] **Les paramètres de Thiele et Small sont les 6 constantes intervenant dans cette impédance électrique : R_e, L_e, $B\ell$, α, C_m et m.** Dans la suite on propose un protocole pour mesurer ces 6 paramètres.

On peut récrire l'impédance motionnelle sous forme canonique en faisant apparaître un facteur de qualité Q_m et une fréquence de résonance f_s :

$$\underline{Z}_m = \frac{\ell^2 B^2}{\alpha} \frac{1}{1 + jQ_m\left(x - \frac{1}{x}\right)} \quad \text{avec} \quad Q_m = \frac{1}{\alpha}\sqrt{\frac{m}{C_m}} \quad , \quad x = \frac{f}{f_s} \quad \text{et} \quad f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC_m}}.$$

I.2. Variations de l'impédance en fonction de la fréquence

• ***MANIP 1 : Résistance électrique R_e***

Mesurer la résistance R_e avec un ohm-mètre. Est-ce conforme à la valeur indiquée ?

• ***MANIP 2 : Réponse en fréquence***

- Réaliser un montage pour mesurer le module de l'impédance en fonction de la fréquence. Matériel : 1 haut-parleur, 1 GBF, 1 boite de résistances variables, 2 multimètres. On placera une résistance R de l'ordre de 1 kΩ en série avec le haut-parleur, pour limiter le courant (et donc le volume sonore...) et le maintenir à peu près constant lorsqu'on fait varier la fréquence[a].
- Relever les valeurs de tension efficace et de courant efficace pour des fréquences variant sur une échelle logarithmique entre 10 Hz et 20000 Hz. Tracer la courbe de $|\underline{Z}|$ en fonction de la fréquence, et mesurer la fréquence de résonance f_s.
  Attention : la résonance étant très aigüe, on prendra de nombreuses mesures au voisinage de f_s.

a. On transforme ainsi le GBF en générateur de courant, donc l'impédance se lit presque directement sur les variations de tension.

1. En réalité on doit prendre en compte aussi l'interaction avec l'air qui se traduit par une *impédance de rayonnement* qui s'ajoute à $\underline{Z}_{\text{meca}}$. Cela se traduit essentiellement d'une part par une masse effective m' supérieure à la masse réelle m, d'autre part par une résistance mécanique additionnelle proportionnelle à la surface de la membrane et que l'on ne prend en compte qu'au voisinage de la résonance.

• ***MANIP 3 : Mesure de l'inductance propre*** L_e
D'après l'étude théorique, on remarque qu'à haute fréquence, on a $|\underline{Z}| \approx |\underline{Z}_e| = \sqrt{R_e^2 + L_e^2\omega^2}$.
À partir des mesures précédentes, effectuer une régression linéaire permettant de déterminer L_e.

Pour obtenir la masse m de l'équipage mobile, on la modifie en accolant une masse additionnelle m_{add} à l'enveloppe. Cela provoque une modification de la fréquence de résonance, qui devient

$$f_s' = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{(m+m_{\text{add}})C_m}}$$

• ***MANIP 4 : Mesure de la masse*** m ***à l'aide d'une masse additionnelle***

- Coller délicatement une masse connue m_{add} de patafix [a] au milieu de l'enveloppe, en prenant soin de ne pas la déformer.
  Remarque : prendre m_{add} *du même ordre de grandeur que* m *(*$\sim 5\,g$*).*
- Mesurer la nouvelle fréquence de résonance.
- En déduire m, puis C_m.

a. S'il est difficile de la coller sans forcer, on utilisera du scotch.

Pour mesurer le facteur de force $B\ell$, on ajoute un objet non métallique posé sur l'enveloppe (après avoir ôté m_{add}), et on augmente le courant jusqu'à atteindre un niveau permettant de soulever la masse posée [2]. Lorsqu'on atteint ce seuil, l'accélération maximale de la membrane compense celle de la pesanteur :

$$\omega V_{\max} = g\,.$$

On se place à basse fréquence, de sorte que $\underline{Z}_e \approx R_e$. L'équation électrique en RSF s'écrit alors $\underline{e} = R_e\underline{i} - B\ell\underline{v}$, ce qui donne en valeurs maximales :

$$E_{\max} = R_e I_{\max} - B\ell V_{\max} \quad \text{avec} \quad V_{\max} = \frac{g}{2\pi f} \quad \Rightarrow \boxed{B\ell = \frac{R_e I_{\max} - E_{\max}}{V_{\max}} = \frac{2\sqrt{2}\pi f}{g}\left(R_e I_{\text{eff}} - E_{\text{eff}}\right)}\,.$$

La dernière égalité permet d'accéder à $B\ell$ directement par la mesure des valeurs efficaces obtenues aux multimètres.

Q1. À quelle fréquence est-il préférable de travailler pour effectuer cette mesure ? Vérifier que l'on a bien $\underline{Z}_e \approx R_e$.

• ***MANIP 5 : Mesure du facteur de force*** $B\ell$

- Poser un bouchon en plastique ou un jeton (de supermarché ou de casino...) au centre de la membrane.
- Mesurer les valeurs efficaces de la tension E_{eff} aux bornes du haut-parleur et du courant I_{eff} qui le traverse lorsque l'amplitude seuil est atteinte pour laquelle le bouchon se met à vibrer.
- En déduire la valeur de $B\ell$.

Q2. Grâce à la valeur de $|\underline{Z}|$ à la résonance, en déduire la valeur de α.

2. Il est nécessaire de réduire R à quelques dizaines d'ohms pour atteindre un courant suffisant.

II. Mesure de la conductivité d'un métal via le freinage par courants de Foucault

On lâche un aimant de masse m de forme cylindrique dans un tube métallique en cuivre ou en aluminium. En modélisant l'aimant par un dipôle magnétique de moment $\vec{\mu}$, des calculs théoriques (accessibles en SPE) montrent que l'effet de la dissipation des courants de Foucault se traduisent par une force de frottement fluide additionnelle de coefficient α. On obtient donc par le PFD l'équation différentielle suivante (avec un axe vertical ascendant) :

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + \frac{v}{\tau} = -g \quad \text{avec} \quad v = \dot{z} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{m}{\alpha} = \frac{1024m}{45e\sigma}\left(\frac{R^2}{\mu_0\mu}\right)^2 ,$$

où σ est la conductivité du métal, e l'épaisseur du tube, et R le rayon moyen du tube. L'aimant atteint donc une vitesse limite $v_\ell = -g\tau$ au bout de quelques τ.

- ***MANIP 6 : Mesure de la conductivité du métal***
  - À l'aide d'un teslamètre, mesurer le champ magnétique au contact de l'aimant. En déduire une évaluation du moment dipôlaire μ de l'aimant.
  - Mesurer la vitesse limite de chute v_ℓ. En déduire la conductivité du métal. Comparer avec les autres groupes.
- ***MANIP 7 : Vérification de la loi en R^4***
  - En utilisant des tubes de rayons différents et de même matière, vérifier la dépendance en R^4 du temps caractéristique.