

Récupération d'énergie vibratoire par voie électromagnétique sous excitation aléatoire

C. Drezet, N. Kacem, N. Bouhaddi, E. Foltete

Institut FEMTO-ST, UMR 6174, Département Mécanique Appliquée, UBFC, 24
Chemin de l'Épitaphe 25000 Besançon

Résumé étendu :

Ce travail porte sur l'étude d'un récupérateur d'énergie vibratoire électromagnétique soumis à une excitation aléatoire de type bruit-blanc. On utilise un modèle éprouvé pour extraire une règle de dimensionnement du récupérateur optimal soumis à une source vibratoire bruit-blanc et l'expression de la puissance maximale récupérable.

Les récents progrès faits dans le domaine de l'électronique, notamment l'apparition de modules ultra-basse consommation, permettent d'envisager l'exploitation des vibrations ambiantes comme source d'énergie pour des capteurs autonomes [1-2]. La plupart des travaux présentés dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire considèrent une excitation déterministe (sinusoïdale) [3-4] alors que dans la pratique, on rencontre très souvent des sources de vibrations aléatoires [5].

Dans la suite, on commence par présenter un modèle de récupérateur d'énergie vibratoire électromagnétique. Ce modèle est ensuite utilisé pour établir une règle de dimensionnement simple sur la récupération d'énergie sous excitation en bruit-blanc. Cette règle est ensuite l'objet d'une validation à travers une simulation numérique.

Le modèle utilisé ici est schématisé sur la figure 1 : le récupérateur est soumis à une excitation à la base $y(t)$ qui induit un mouvement absolu $x(t)$ de la masse m suspendue par un ressort de raideur k . L'énergie cinétique de la masse m est alors dissipée sous forme mécanique (amortissement c_m) et électrique par l'intermédiaire du couplage de coefficient γn .

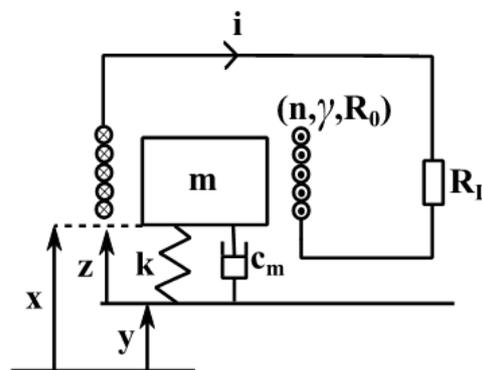


Figure 1. Schéma du modèle de récupérateur d'énergie vibratoire électromagnétique

L'énergie électrique ainsi créée (courant i) est alors distribuée dans un circuit de charge assimilé à une impédance R_L et dissipée dans la résistance interne de la bobine n^2R_0 .

Où n correspond au nombre de tours dans la bobine, $\dot{\gamma}$ est la dérivée du flux traversant la bobine et R_0 est sa résistance intrinsèque. L'inductance de la bobine est négligée.

Les équations (1) représentent le comportement dynamique du récupérateur d'énergie ainsi modélisé.

$$\begin{cases} m\ddot{z} + c_m\dot{z} + kz + n\gamma i = -m\ddot{y} \\ (n^2R_0 + R_L)i = n\gamma\dot{z} \end{cases} \quad (1)$$

La puissance instantanée P récupérée dans la résistance de charge R_L est $R_L i^2$, on peut alors exprimer la puissance moyenne récupérée par l'équation (2).

$$P_{moy} = R_L \frac{n^2\gamma^2}{(n^2R_0 + R_L)^2} \langle \dot{z} \rangle_{RMS}^2 \quad (2)$$

Où $\langle \dot{z} \rangle_{RMS}$ est la valeur RMS de la vitesse relative $\dot{z}(t)$.

On suppose ici que l'excitation $\ddot{y}(t)$ est un processus aléatoire de type bruit-blanc que l'on caractérise par sa densité spectrale de puissance S_0 en g^2/Hz . $\langle \dot{z} \rangle_{RMS}^2$ correspond alors au second moment spectral du processus aléatoire stationnaire $z(t)$ et peut s'écrire sous la forme suivante [6] :

$$\langle \dot{z} \rangle_{RMS}^2 = \frac{1}{2} \frac{\pi S_0}{2\xi\omega_0} \quad (3)$$

Où ξ est le taux d'amortissement global du récupérateur d'énergie.

On peut alors écrire l'expression de la puissance moyenne récupérée :

$$P_{moy} = \frac{\pi S_0}{2} \frac{R_L n^2 \gamma^2 m}{(n^2 R_0 + R_L)((n^2 R_0 + R_L)c_m + n^2 \gamma^2)} \quad (4)$$

À noter que la puissance moyenne récupérée ne dépend pas de la pulsation de résonance du récupérateur $\omega_0 (= \sqrt{k/m})$.

On souhaite maintenant maximiser P_{moy} . Pour cela, on commence par adapter l'impédance de charge :

R_L dont la valeur optimale est $n^2 R_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{R_0 c_m}}$. Si l'on maximise le coefficient de couplage électromécanique ou l'on minimise les pertes (i.e. $\frac{\gamma^2}{R_0 c_m} \rightarrow +\infty$), on peut déduire l'expression de la puissance moyenne maximale récupérable par un récupérateur électromagnétique d'énergie vibratoire excité par un bruit-blanc :

$$P_{moy\ max} = \frac{\pi S_0 m}{2} \quad (5)$$

D'un point de vue conception, ce résultat a une importance primordiale car la formule simple permet d'estimer rapidement la masse mobile m nécessaire pour assurer la production de puissance voulue à partir de la densité spectrale de puissance S_0 de la source.

On propose de vérifier ces résultats grâce à un exemple de simulation numérique.

Pour cela, on effectue 100 tirages dans l'espace des variables de l'équation (4) puis, en utilisant la méthode d'intégration temporelle de Runge-Kutta implantée dans Matlab, on détermine pour chaque échantillon l'impédance de charge $R_{L\text{ optimale}}$ maximisant P_{moy} et $P_{\text{moy max}}$ en maximisant $\frac{\gamma^2}{R_0 c_m}$. On peut alors pour chaque échantillon tracer un point $\left(n^2 R_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{R_0 c_m}}, R_{L\text{ optimale}} \right)$ sur la figure 2a et un point $\left(\frac{\pi S_0 m}{2}, P_{\text{moy max}} \right)$ sur la figure 2b.

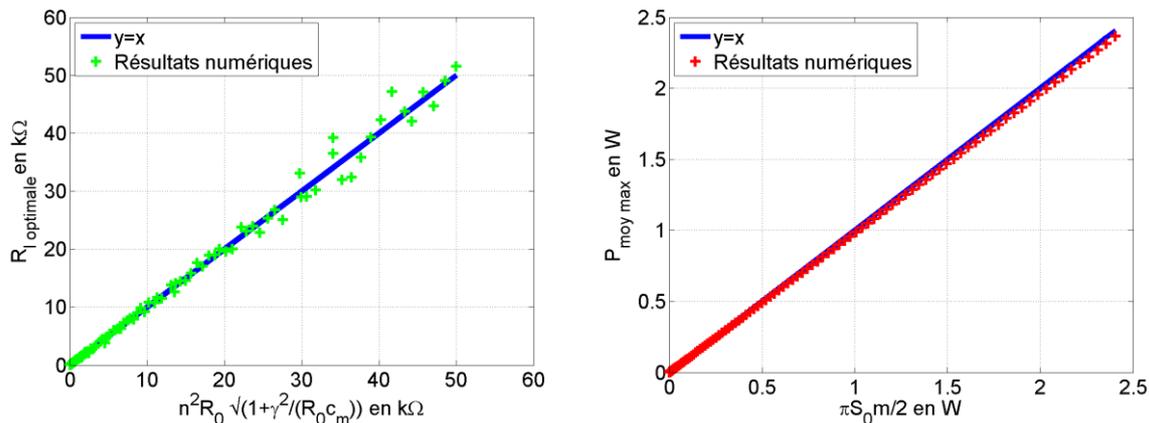


Figure 2. a. (à gauche) Impédance de charge optimale : théorique vs numérique, b. (à droite) Puissance moyenne récupérable maximale : théorique vs numérique.

On remarque que sur les deux graphiques de la figure 2, les points correspondant aux 100 échantillons sont répartis suivant la première bissectrice $y=x$; après lissage, on calcule des coefficients de corrélation au sens des moindres carrés de $r^2=0.993$ et $r^2=0.999$ pour les figure 2a et 2b respectivement. Ceci implique la validation numérique de la relation $R_{L\text{ optimal}} = n^2 R_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{R_0 c_m}}$ et de l'équation (5).

Ce travail a permis d'explicitier un critère de dimensionnement à la fois simple et primordial dans le cadre de la récupération d'énergie vibratoire large-bande. En effet, on a exprimé la relation d'adaptation d'impédance ainsi que la borne maximale de l'énergie récupérable ($\frac{\pi S_0 m}{2}$); ce résultat a ensuite été validé numériquement.

Références

- [1] R. Schaijk, *Energy Harvesting for Wireless Autonomous Sensors Systems*, Document IMEC.
- [2] E-M. Yeatman, *Advances in Power Sources for Wireless Sensor Nodes*, Proc. The International Workshop Wearable and Implantable Body Sensor Networks, pp. 20-21, 2004.
- [3] N. G. Stephen, *On energy harvesting from ambient vibration*, Journal of Sound and Vibration, 293 pp. 409-425, 2006.
- [4] R. Ramlan, M. J. Brennan, B. R. Mace, I. Kovacic, *Potential benefits of a non-linear stiffness in an energy harvesting device*, Nonlinear Dynamics, 59 pp. 545-558, 2010.
- [5] L. Gammaitoni, F. Travasso, F. Orfei, H. Vocca, I. Neri, *Vibration Energy Harvesting: Linear and Nonlinear Oscillator Approaches*, INTECH Open Access Publishers, 2011.
- [6] A. Preumont, *Random Vibration and Spectral Analysis*, Kluwer Academic Publishers, 1994.