



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9008>

To cite this version :

Benjamin BOUDON, Jean-Claude CARMONA, François MALBURET - Nouvelle approche pour l'optimisation de systèmes mécaniques en vue de la récupération d'énergie vibratoire - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Nouvelle approche pour l'optimisation de systèmes mécaniques en vue de la récupération d'énergie vibratoire

B. BOUDON, F. MALBURET, JC. CARMONA

Arts-et-Métiers ParisTech, CNRS, LSIS, 2 Cours des Arts et Métiers 13617 AIX-EN-PROVENCE

Résumé :

La récupération d'énergie à partir des vibrations mécaniques est une préoccupation importante à l'heure actuelle car elle permet de rendre autonome les systèmes de surveillance vibratoire ou de contrôle de vibration (semi-actif). Cet article se positionne sur le thème de la récupération d'énergie vibratoire et plus particulièrement, dans la phase de conception d'un tel système, lors de l'étape de la « transformation et l'optimisation mécanique ».

Dans ce sens, l'article propose une méthode d'aide à la conception des résonateurs équipant les systèmes de récupération. Cette méthode utilise les fonctions habituelles des interfaces (débattement, isolation) plus une fonction récupération d'énergie. La démarche intègre une étape supplémentaire aux démarches classiques de mise sous forme adimensionnelle de ces fonctions afin de minimiser le nombre de paramètres de plus haut niveau à utiliser lors d'une optimisation globale.

Mots clefs : interfaces intelligentes, vibrations mécaniques, fonctions « objectifs », paramètres adimensionnels.

1 INTRODUCTION

Un des principaux intérêts de la récupération d'énergie des vibrations mécaniques est d'augmenter l'autonomie des systèmes mécatroniques ou électroniques [1] tels que pourrait l'être les systèmes de surveillance vibratoire ou les systèmes de contrôle de vibration semi-actif [11].

La récupération d'énergie à partir de l'énergie ambiante se trouvant autour d'un système est une technique en pleine évolution [1]. Différentes sources de récupération d'énergie ambiante existent : la chaleur, les vibrations mécaniques, les ondes électromagnétiques, le vent, la circulation d'eau ou l'énergie lumineuse telle que solaire [1]. Cet article se préoccupe de la récupération d'énergie à partir de vibrations mécaniques.

Le principe de la récupération d'énergie repose sur différentes étapes (« transformation et l'optimisation mécanique », « transduction », « transformation et l'optimisation électrique » et « stockage ») dont le détail de ces étapes est rappelé dans [1], [2], [3] permettant la conversion de l'énergie mécanique des vibrations en énergie électrique utile que l'on peut stocker.

Les développements réalisés dans cet article porteront sur cette étape initiale de la récupération d'énergie à partir des vibrations.

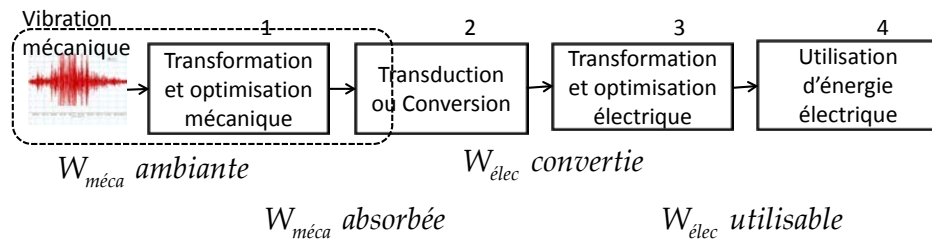


Figure 1 – Etape de la « transformation et optimisation mécanique » dans la récupération d'énergie

L'objectif de cette étape est double :

- récupérer l'énergie mécanique à l'intérieur du système récupérateur ;
- amplifier mécaniquement l'énergie mécanique récupérée.

Dans la récupération d'énergie des vibrations, dès que le degré de libertés des systèmes récupérateurs devient supérieur à deux, les différentes quantités qui peuvent être calculées (certains déplacements, certaines forces, la puissance moyenne de récupération) sont nombreuses et difficiles à exprimer et à analyser. Dans les articles suivants [7], [13], les quantités comme les déplacements et la puissance moyenne récupérable ont été évaluées. Toutefois, d'autres quantités comme la transmission de forces qui apparaissent clairement dans l'analyse fonctionnelle de la conception de systèmes récupérateurs, ne sont pas clairement exprimées.

L'article est organisé de la manière suivante.

Dans le chapitre 2, pour l'étape qui concerne cet article, la « transformation et optimisation mécanique », la méthode d'analyse des résultats sous forme de fonctions « objectifs » adimensionnées est présentée [10].

Enfin, dans le chapitre 3, cette méthode est appliquée sur un modèle de récupération classique qui est le système à un degré de liberté excité en déplacement : modèle de Williams et Yates [8], que l'on retrouve dans l'étape de « Transformation et optimisation mécanique » de la récupération d'énergie dans de nombreuses références [4], [5], [6], [7], [8], [13].

2 METHODOLOGIE D'ETUDE DES SYSTEMES MECANIQUES DE « TRANSFORMATION ET OPTIMISATION MECANIQUE »

2.1 Présentation de la démarche

L'originalité de la démarche repose sur deux points.

Le premier point consiste à avoir une approche fonctionnelle plutôt que structurelle du système mécanique, en s'appuyant sur des notions d'analyse fonctionnelle. Cette approche repose, sur la définition de fonctions « objectifs », associées à des critères représentatifs des fonctions de service, telle que la récupération d'énergie, associées à des fonctions techniques telles que le débattement, l'isolation ou la puissance récupérée.

Le deuxième point est de rendre ces fonctions « objectifs » adimensionnelles ce qui permet de réduire le nombre de paramètres d'étude par rapport au nombre de paramètres physiques que l'on avait initialement. Les équations avec des paramètres physiques sont réduites à des expressions avec des paramètres ou groupements adimensionnels.

2.2 Utilisation de fonctions « objectifs »

Pour assurer qu'un système mécanique réponde aux attentes d'un utilisateur, le système mécanique peut être considéré comme un ensemble fonctionnel. Cet ensemble fonctionnel peut de manière analogue à ce que l'on fait en analyse fonctionnelle se décomposer en fonctions de service et

fonctions techniques. A ces fonctions correspondent des fonctions « objectifs » associées à des critères.

Fonction de service	Fonction technique	Critères	Fonction objectif
FS : Récupérer l'énergie	FC1 : Limiter le déplacement	< Hmaxi	$H = \frac{X}{X_{ext}}$
	FC2 : Limiter la transmission d'efforts	< Tmaxi	$T = \frac{F_T}{F_{ext}}$
	FP1 : Maximiser la récupération d'énergie	> Wmini	$W = \frac{P_{moy}}{P_{ref}}$

Tableau 1- Définition des différentes fonctions utilisées

Ces fonctions « objectifs » sont généralement des paramètres (exemple : un déplacement relatif) ou des caractéristiques observées (exemple : une puissance dissipée) et sont associées à un critère chiffré (exemple : un déplacement maximal inférieur à X mm ou une puissance récupérée supérieure à X W). Pour le cas étudié, les fonctions sont ramenées à des valeurs de références liées aux sources énergétiques. La puissance de la source pour le cas de l'énergie, l'effort ou le déplacement suivant le type d'excitation pour les grandeurs non énergétiques (efforts ou déplacements). Ces fonctions permettent d'analyser en quelle mesure le système mécanique répond aux besoins utilisateurs (ou en d'autres termes, le cahier des charges).

Dans l'étape de « transformation et optimisation mécanique », la caractéristique pour laquelle le concepteur attache le plus d'importance est la puissance récupérable par le système. Cependant, la puissance récupérable par un système est à analyser en considérant aussi d'autres caractéristiques du système ou fonctions techniques qui sont utiles dans la conception du système comme « le débattement » ou « l'isolation » du système.

2.3 Passage d'un modèle à paramètres physiques à un modèle à paramètres adimensionnels

2.3.1 Principales définitions et propriétés d'analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle s'appuie sur les définitions et théorèmes que l'on retrouve dans [10] et que l'on va rappeler très succinctement. D'abord, la physique met en évidence des grandeurs dites dérivées à partir des grandeurs fondamentales. La dimension de toutes grandeurs dérivées au sein d'un système homogène d'unités (MLT Masse Longueur Temps) s'exprime par un produit de monôme composé des grandeurs fondamentales élevées à une puissance déterminée, soit, $G : [M^m . L^l . T^t]$ où m, l, t sont des exposants entiers.

Ensuite, l'application du théorème de Vaschy-Buckingham, ou théorème des π , permet de conclure que, dans nos applications, un problème de physique dans un système à base MLT peut être décrit par une relation entre (g-3) nombres sans dimension.

La méthode de Maxwell permet de déterminer de manière systématique les groupements adimensionnels. A partir des étapes suivantes :

- détermination des dimensions des grandeurs en fonction des unités de base ;
- détermination des groupements adimensionnels à l'aide d'une matrice ;
- écriture de l'équation en fonction des groupements adimensionnels.

Ces différentes étapes seront appliquées pour rendre adimensionnelles des fonctions « objectifs », notamment la puissance moyenne récupérée, sur le cas d'un modèle de récupération à un degré de liberté.

2.3.2 Intérêt de la constitution des groupements adimensionnels

L'analyse dimensionnelle permet donc :

- de déterminer des nombres adimensionnels invariants qui caractérisent les phénomènes et qui donc restent semblable lorsqu'on change d'échelle.
- de simplifier l'analyse et la présentation des résultats du fait de la diminution du nombre de variables effectives.
- de simplifier la mise en œuvre par la réduction du nombre d'essais.

3 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE SUR UN MODELE CLASSIQUE DANS LA RECUPERATION D'ENERGIE

3.1 Fonctions « objectifs »

Dans cette partie, la méthode développée dans la partie précédente va être appliquée sur le modèle de Williams et Yates qui est modèle à un degré de liberté masse/ ressort/ amortissement excité en déplacement. Ce modèle est utile quand l'action de la structure génératrice des vibrations est connue par l'intermédiaire de son mouvement. Les résultats seront exposés en regard avec les résultats du système à un degré de liberté masse/ ressort/ amortissement excité en effort dont le développement ne sera pas rappelé.

3.1.1 Modélisation

L'amortisseur en parallèle de la raideur modélise l'élément récupérateur. Dans certaines références [11], [12], un autre amortisseur en parallèle peut être présent pour modéliser le frottement mécanique de la liaison. Dans les modèles qui suivent, le frottement mécanique sera négligé.

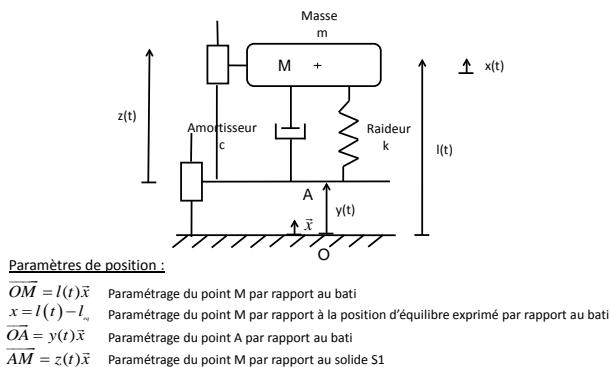


Figure 2 - Système à un ddl excité en déplacement effort

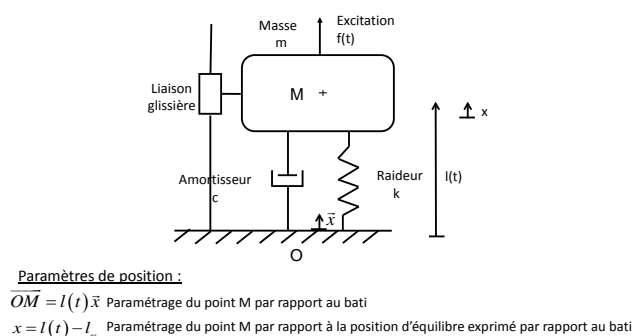


Figure 3 - Système à un ddl excité en

3.1.2 Equations des systèmes

L'application du principe fondamental de la dynamique appliquée à la masse sismique et l'expression de l'équation exprimée autour de la position d'équilibre permet d'aboutir à l'équation classique suivante.

Pour le système excité en déplacement :
$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

3.1.3 Détermination des fonctions objectifs

Seul le régime permanent lié aux excitations forcées est étudié. L'analyse des fonctions techniques se fait alors à partir de critères proposés dans le tableau 1 :

- la fonction « débattement » H est caractérisée par le rapport du déplacement de la masse sismique avec l'excitation en effort ou l'excitation en déplacement.
- la fonction « isolation » T , ou transmittance, est caractérisée par le rapport de la force transitant par la liaison entre les deux structures avec l'excitation en effort ou l'excitation en déplacement
- la fonction « récupération d'énergie » W est caractérisée par le rapport de la fonction puissance récupérée ou dissipée sur la puissance de source d'énergie.

Une étude simultanée de ces trois fonctions pourra permettre de déterminer la puissance maximale dissipée dans le système, donc l'énergie récupérable, tout en respectant des objectifs de débattement et d'isolation.

3.1.3.1 Fonction débattement H

A l'aide de l'équations 1, il peut être démontré de façon classique [7] que, pour le système excité en déplacement, la fonction H s'écrit :

$$H = \left| \frac{X}{X_{st}} \right| = \left| \frac{Z}{Z_{st}} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m}{k} \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c \omega}{k}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\text{avec : } Z_{st} = \frac{m \omega^2 Y}{k}$$

3.1.3.2 Fonction isolation T

La transmittance se détermine en analysant les efforts transmis du bâti à la masse.

On trouve de façon classique [11] que :

$$T = \left| \frac{F_T}{F_0} \right| = \frac{\sqrt{k^2 + (c \omega)^2}}{\sqrt{(m \omega^2 - k)^2 + (c \omega)^2}} \quad (3)$$

$$\text{avec : } |F_0| = m \omega^2 Y$$

3.1.3.3 Fonction récupération d'énergie W

Le calcul de la puissance mécanique peut être réalisé à partir de deux définitions qu'il conviendra de bien choisir suivant la définition du système d'étude : la puissance galiléenne des actions mécaniques extérieures au système et la puissance des inter-efforts associée au système étudié. On distingue par ailleurs la puissance fournie par l'excitation et la puissance dissipée par le système.

Les modèles présentés ne prennent pas en compte le frottement mécanique. La puissance dissipée par le système sera donc égale à la puissance fournie au système par l'excitation.

Ainsi, la puissance dissipée par le système est la puissance qui sera potentiellement récupérable. Elle se détermine en calculant la puissance dissipée au niveau des amortisseurs que l'on considérera comme nos éléments récupérateurs.

Le calcul « classique » de la puissance moyenne se fait de la manière suivante :

$$P_{moy} = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4)$$

L'utilisation des complexes permettant de calculer une puissance complexe simplifie les calculs à mener. La démonstration de l'équivalence dans les deux façon de calculer la puissance moyenne (par intégration ou par les complexes) se trouve dans [12].

$$\text{La puissance complexe s'écrit alors : } \underline{P} = \frac{1}{2} \underline{f}(t) \underline{v}^*(t) \quad (5)$$

Et la puissance moyenne se déduit en prenant la partie réelle de la puissance complexe :

$$P_{moy} = \text{Re}(\underline{P}) \quad (6)$$

Pour le système excité en déplacement, la puissance moyenne récupérable dans le système en fonction du déplacement peut s'écrire :

$$P_{moy} = \text{Re}(\underline{P}) = -\frac{1}{2} c \omega^2 Z^2 \quad (7)$$

Ainsi, la puissance moyenne récupérable dans le système en fonction du déplacement exciteur que l'on retrouve formulée sous diverses formes dans [4], [5], [6], [7], [8] peut s'écrire :

$$P_{moy} = \text{Re}(\underline{P}) = -\frac{1}{2} \frac{c m^2 \omega^6 Y^2}{\left(k - m \omega^2\right)^2 + (c \omega)^2} \quad (8)$$

On peut alors exprimer la fonction « récupération d'énergie » :

$$W = \frac{P_{moy}}{P_{ref}} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{3}{2}}} \frac{m c \omega^6}{\left(k - m \omega^2\right)^2 + (c \omega)^2} \quad \text{avec } P_{ref} = m Y^2 \omega_p^3 \quad (9)$$

3.1.4 Mise sous forme adimensionnelle de ces fonctions

Dans cette partie, la méthode basée sur l'analyse dimensionnelle est appliquée pour déterminer les groupements adimensionnels pour chaque fonction « objectif » définie précédemment. Dans cette partie, seule l'analyse dimensionnelle permettant d'obtenir une expression réduite de la puissance dissipée est présentée.

La relation liant toutes les grandeurs dans l'expression de la puissance dissipée peut s'écrire sous la forme :

$$f(P, Y, \omega, m, c, k) = 0 \quad (10)$$

3.1.4.1 Détermination des dimensions des grandeurs en fonction des unités de base

Les grandeurs s'expriment de la manière suivante en fonction des unités de base : $P : [M.L^2.T^{-3}]$;

$Y : [L]$; $\omega : [T^{-1}]$; $m : [M]$; $c : [M.T^{-1}]$; $k : [M.T^{-2}]$.

3.1.4.2 Détermination des groupements adimensionnels

Pour faciliter la détermination des groupements adimensionnels, il peut être intéressant de former la matrice (unités du système de base MLT x grandeurs intervenant dans la relation du phénomène physique).

	P	Y	ω	m	c	k
M	1	0	0	1	1	1
L	2	1	0	0	0	0
T	-3	0	-1	0	-1	-2

Tableau 2 : matrice des groupements adimensionnels

Les groupements adimensionnels π correspondent à un groupement de variables sans dimension donc tel que :

$$\pi = M^0 L^0 T^0 \quad (11)$$

$$\text{et tel que : } \pi = P^{\alpha_1} Y^{\alpha_2} \omega^{\alpha_3} m^{\alpha_4} c^{\alpha_5} k^{\alpha_6} \quad (12)$$

L'analyse de l'homogénéité des équations 11 et 12 permettent d'écrire trois équations :

$$\begin{cases} 1\alpha_1 + 0\alpha_2 + 0\alpha_3 + 1\alpha_4 + 1\alpha_5 + 1\alpha_6 = 0 \\ 2\alpha_1 + 1\alpha_2 + 0\alpha_3 + 0\alpha_4 + 0\alpha_5 + 0\alpha_6 = 0 \\ -3\alpha_1 + 0\alpha_2 - 1\alpha_3 + 0\alpha_4 - 1\alpha_5 - 2\alpha_6 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Le système est composé de 3 équations pour 6 inconnues. Pour résoudre, il faut choisir trois inconnues principales en fonction desquelles les autres variables seront exprimées.

On choisit les trois groupements adimensionnels suivants :

$$\pi_1 = \frac{\omega}{\omega_p} \quad \text{avec} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \pi_2 = \frac{P}{mY^2\omega_p^3} \quad \text{et} \quad \pi_3 = \lambda = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

3.1.4.3 Ecriture de l'équation pertinente en fonction des groupements adimensionnels

L'équation peut alors se mettre sous la forme

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (14)$$

$$\text{Ou encore } \pi_2 = g(\pi_1, \pi_3) \quad (15)$$

Au final, la fonction récupération d'énergie s'écrit :

$$W = \pi_2 = -\frac{\pi_3(\pi_1)^6}{1 - 2(\pi_1)^2 + (\pi_1)^4 + 4(\pi_1)^2\pi_3^2} \quad (16)$$

De la même manière, nous effectuons la mise sous forme adimensionnelle des autres fonctions « objectifs ». Nous obtenons au final les trois fonctions « objectifs » sous leur forme réduite ou adimensionnelle dans le cas des deux systèmes (excité en déplacement et excité en effort).

	Système excité en effort	Système excité en déplacement
Fonctions	$H = \frac{1}{\sqrt{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}}$	$H = \frac{1}{\sqrt{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}}$
	$T = \frac{\sqrt{(4\pi_1^2\pi_3^2 + 1)}}{\sqrt{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}}$	$T = \frac{\sqrt{(4\pi_1^2\pi_3^2 + 1)}}{\sqrt{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}}$
	$W = \pi_2 = -\frac{\pi_3(\pi_1)^2}{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}$	$W = \pi_2 = -\frac{\pi_3(\pi_1)^6}{(1-\pi_1^2)^2 + (2\pi_1\pi_3)^2}$
Groupements adimensionnels	$\pi_1 = \frac{\omega}{\omega_p}, \pi_2 = \frac{mP\omega_p}{F^2} \text{ et } \pi_3 = \lambda = \frac{c}{2\sqrt{km}}$	$\pi_1 = \frac{\omega}{\omega_p}, \pi_2 = \frac{P}{mY^2\omega_p^3} \text{ et } \pi_3 = \lambda = \sqrt{\frac{c^2}{km}}$

Tableau 3 : fonctions « objectifs » en fonction des paramètres adimensionnels

3.2 Logique d'optimisation à partir des fonctions adimensionnelles

Les trois fonctions objectives sont prêtes pour être utilisées dans un algorithme d'optimisation. Un algorithme d'optimisation multi-objectifs et multi-contraintes permet de déterminer un jeu de paramètres de notre mécanisme qui satisfasse nos spécifications.

L'adimensionnalisation des fonctions objectives facilitent l'optimisation et permet, dans certains cas simples comme ce système, de pouvoir donner une représentation de ces différentes fonctions.

4 CONCLUSION

Après avoir rappelé l'intérêt ainsi que les moyens mis en œuvre dans la récupération d'énergie des vibrations, le chapitre 2 a présenté une méthodologie d'étude des systèmes mécaniques intervenant dans la récupération d'énergie des vibrations. Les fonctions objectifs adimensionnelles permettent la détermination des paramètres de conception d'un système récupérateur comportant de multiples contraintes : déplacement, transmission d'efforts et puissance récupérée. La définition des contraintes de conception est effectuée au travers des fonctions « objectifs ». L'adimensionnalisation permet de réduire le nombre de paramètres d'étude.

Lors du chapitre 3, la méthodologie basée sur la définition de fonctions « objectifs » adimensionnelles a été appliquée sur le modèle le plus utilisé dans la récupération d'énergie : le système à un degré de liberté excité en déplacement, modèle de Williams et Yates. Cette méthodologie a abouti à l'obtention de trois fonctions objectifs adimensionnelles (la fonction « débattement » H, la fonction « isolation » T et la fonction « récupération d'énergie » W) qui permettent la recherche des paramètres de conception tels que les fonctions satisfassent à un objectif précis (par exemple, limiter le déplacement tout en maximisant l'énergie récupérée).

La méthodologie présentée ici pourra être utilisée sur des systèmes plus complexes comme la liaison rotor/ fuselage d'un hélicoptère où la récupération d'énergie est envisageable.

References

- [1] ANTON S. R. and SODANO H. A., "A review of power harvesting using piezoelectric materials 2003-2006," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, 2007, doi:10.1088/0964-1726/16/3/R01.
- [2] JEAN-MISTRAL C., et al., "A complete study of Electroactive polymers for energy scavenging: Modelling and Experiments," DTIP 2007, Stresa, lago Maggiore : Italy (2007), ISBN: 978-2-35500-000-3.
- [3] GUYOMAR D., et al., "Synchronized switch harvesting applied to selfpowered smart systems: Piezoactive microgenerators for autonomous wireless transmitters," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, pp. 151-160, 2007, doi:10.1016/j.sna.2007.04.009.
- [4] EL-HAMI M., et al., "Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 92, pp. 335-342, 2001, doi:10.1016/S0924-4247(01)00569-6.
- [5] MITCHESON P. D., et al., "Architectures for vibration-driven micropower generators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, pp. 429-440, Jun 2004, doi:10.1109/jmems.2004.830151.
- [6] ROUNDY S., et al., "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, vol. 26, pp. 1131-1144, 2003, doi: 10.1016/S0140-3664(02)00248-7.
- [7] STEPHEN N. G., "On energy harvesting from ambient vibration," *Journal of sound and vibration*, 2005, doi:10.1016/j.jsv.2005.10.003.
- [8] WILLIAMS C. B. and YATES R. B., "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 52, pp. 8-11, 1996, doi: 10.1016/0924-4247(96)80118-X.
- [9] MARZENCKI M., et al., "Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 145-146, pp. 363-370, 2008, doi: 10.1016/j.sna.2007.10.073.
- [10] BAKER W., PETER E., WESTINE S., DODGE F. T. *Similarity methods in engineering dynamics: theory and practice of scale modeling*, Elsevier, 1991, ISBN-10: 0876715641.
- [11] KRYSINSKI T., MALBURET F., *Mechanical Vibrations: Active and Passive Control*, Wiley-Iste, 2006, ISBN: 9781905209293
- [12] MAMMOSSER D., FOLTETE E., COLLET M., "Optimization of the power flow extracted from a flexible structure using a control approach", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Volume 18, Issue 4, pages 361–381, June 2011, DOI: 10.1002/stc.374.
- [13] TANG X. and ZUO L., "Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems," *Journal of sound and vibration*, vol. 330, pp. 5199-5209, 2011.
- [14] MAPELLI F., et al., "Energy recovering from vibrations in road vehicle suspensions," 2011, pp. 67-75, doi: 10.1016/j.jsv.2011.05.019.
- [14] MAPELLI F., et al., "Energy recovering from vibrations in road vehicle suspensions," *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2011, pp. 67-75, ISBN: 978-144199715-9.