



Contrôle actif de vibration par un actionneur électrodynamique à capteur virtuel

Florentin Ménage, Adrien Mamou-Mani, Serge Puvilland

► To cite this version:

Florentin Ménage, Adrien Mamou-Mani, Serge Puvilland. Contrôle actif de vibration par un actionneur électrodynamique à capteur virtuel. 16ème Congrès Français d'Acoustique, (CFA) 2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. <hal-03848489>

HAL Id: hal-03848489

<https://hal.science/hal-03848489v1>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Contrôle actif de vibration par un capteur/actionneur électrodynamique

F. Ménage ^a, A. Mamou-Mani ^a, S. Puvilland ^a

^a HyVibe, 51 rue de Maubeuge, 75009 Paris, France



Les actionneurs inertiels électrodynamiques sont des systèmes compacts permettant d'exciter les surfaces sur lesquelles ils sont fixés. Ils peuvent être utilisés pour de la diffusion sonore ou du contrôle actif de vibration. Par exemple, ils peuvent être combinés à un capteur vibratoire colocalisé afin d'ajouter de l'amortissement à une surface. Cependant, l'ajout d'un capteur vibratoire est coûteux et la colocalisation avec l'actionneur peut être impossible pour des raisons d'encombrement. Cette communication présente l'utilisation d'actionneurs inertiels en mode capteur/actionneur afin de s'affranchir du besoin d'un capteur externe. Le capteur/actionneur est piloté en tension et le courant est mesuré à l'aide d'une résistance de shunt. La combinaison de la tension et du courant permet de mesurer la force contre-électromotrice, proportionnelle à la dérivée de l'élongation de la suspension de l'actionneur. Cette grandeur est contrôlée dans une boucle de rétroaction. Nous présentons des simulations de contrôle sur des surfaces de différentes mobilités ainsi que des résultats expérimentaux sur une plaque fine encastrée en aluminium.

1 Introduction

Les actionneurs inertiels électrodynamiques (ou excitateurs audio) sont des systèmes compacts permettant d'exciter les surfaces auxquelles ils sont fixés. Un actionneur de ce type combiné à une surface suit le même principe de fonctionnement qu'un haut-parleur. Dans le cas du haut-parleur conventionnel, l'aimant est immobile et la bobine est attachée à une membrane. Dans le cas de l'excitateur, l'aimant est la plupart du temps mobile et la bobine est fixée à une surface. Lorsque des actionneurs électrodynamiques sont combinés à des surfaces dans le cadre de diffusion sonore, on parle de DML (Distributed Mode Loudspeaker) [1].

Les actionneurs électrodynamiques peuvent aussi être utilisés afin d'effectuer du contrôle actif de vibration. Par exemple, ils peuvent être combinés à un capteur vibratoire colocalisé afin d'ajouter de l'amortissement à une structure [2] [3]. Dans certaines applications, il est impossible d'ajouter un capteur colocalisé pour des raisons d'encombrement, de coût ou encore de robustesse. Les techniques de captation virtuelle (virtual sensing) proposent une alternative aux capteurs physiques. De telles méthodes sont appliquées à des actionneurs électrodynamiques à base fixe [4] [5] [6] et à des actionneurs inertiels [7].

Dans cette communication, nous présentons une méthode de contrôle actif de vibration par rétroaction à l'aide d'un actionneur inertiel sans capteur vibratoire. Une étude analytique de l'actionneur inertiel est d'abord proposée dans la section 2. Nous présentons ensuite une méthode de contrôle de vibration par rétroaction sur une grandeur captée virtuellement, que nous simulons sur deux cas simples. Une preuve expérimentale de concept sur une plaque fine encastrée en aluminium est présentée dans la section 3. Les limites de la méthode ainsi que ses applications seront discutées dans la section 4.

2 Etude théorique

2.1 Modélisation d'un actionneur inertiel électrodynamique couplé à une surface

Un actionneur inertiel électrodynamique est présenté de manière schématique dans la Figure 1. Sous hypothèse d'excitation harmonique $e^{j\omega t}$, de linéarité du système et

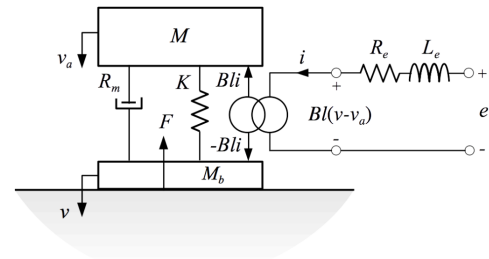


FIGURE 1 – Représentation schématique d'un actionneur inertiel fixé à une structure [7]

d'une excitation ponctuelle, les équations de la dynamique du système s'écrivent [7] :

$$\begin{cases} j\omega M v_a = Z_{ms}(j\omega)(v - v_a) - BLi \\ j\omega M_b v = -Z_{ms}(v - v_a) + BLi - F \\ e = Z_e(j\omega)i + BL(v - v_a) \end{cases} \quad (1)$$

Où l'on note

- M la masse mobile constituée par l'aimant
- M_b la masse de la bobine
- v la vitesse de la structure
- v_a la vitesse de la masse mobile
- K la raideur de la suspension
- R_m la résistance mécanique
- $Z_{ms}(\omega) = R_m + K/j\omega$ l'impédance mécanique de la suspension
- R_e la résistance DC
- L_e l'inductance de la bobine
- e la tension aux bornes de l'actionneur
- i le courant parcourant l'actionneur
- $Z_e(\omega) = R_e + j\omega L_e$ l'impédance électrique bloquée du transducteur.
- BL le facteur de force
- F la force exercée par la structure sur la bobine

Lorsque l'actionneur est fixé à une structure de mobilité $Y(\omega) = v/F$, il est possible de représenter le système complet sous forme de schéma électrique équivalent, présenté dans la Figure 2.

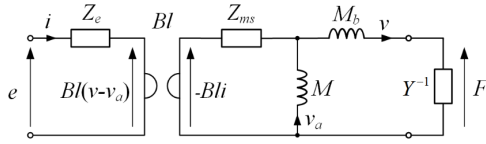


FIGURE 2 – Circuit équivalent (analogie impédance) d'un actionneur inertiel électrodynamique couplé à une structure de mobilité d'entrée [7]

En combinant les équations du système (1), on montre comment l'impédance électrique d'entrée Z_{in} est affectée par les caractéristiques mécaniques de la structure et de l'actionneur via la force contre électromotrice $BL(v - v_a)$. L'impédance électrique est la somme entre l'impédance bloquée et l'impédance motionnelle du couple actionneur/surface.

$$Z_{in}(\omega) = \frac{e}{i} = Z_e(j\omega) + \frac{BL(v - v_a)}{i} \quad (2)$$

$$Z_{in}(\omega) = \underbrace{Z_e(j\omega)}_{\text{Impédance électrique bloquée}} + \underbrace{\frac{(BL)^2}{Z_{ms}(\omega) + j\omega \frac{M(1+j\omega M_b Y)}{1+j\omega(M+M_b)Y}}}_{\text{Impédance motionnelle}} \quad (3)$$

2.2 Présentation du contrôleur

En mesurant simultanément la tension et le courant, on estime en temps réel la dérivée de l'élongation de la suspension. On appellera cette grandeur la vitesse relative, notée v_r .

$$v_r(t) = v(t) - v_a(t) = \frac{1}{BL}(u(t) - R_e i(t) - L_e \frac{di(t)}{dt}) \quad (4)$$

La vitesse relative mesurée est proche de la mesure de la vitesse surfacique lorsque la mobilité de la surface est grande devant celle de la masse mobile. En négligeant la masse de la bobine M_b , cela correspond à l'équivalence suivante :

$$v_r \sim v \Leftrightarrow |j\omega MY| \gg 1 \quad (5)$$

Le schéma du contrôleur proposé est présenté dans la Figure 3. Nous utilisons une mesure virtuelle de vitesse relative dans une boucle de rétroaction afin d'amortir les modes surfaciques observables dans l'impédance électrique motionnelle.

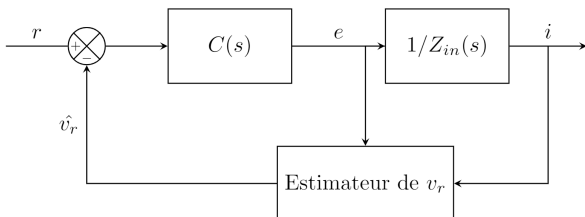


FIGURE 3 – Schéma du contrôleur par captation virtuelle

2.3 Simulation

On simule l'effet du contrôleur proposé sur un actionneur résonant à 35 Hz, couplé à deux modes surfaciques à 90 Hz et 150 Hz. La surface excitée est fortement mobile dans un premier cas et faiblement mobile dans un second. Les résultats de simulation de ces deux cas sont présentés respectivement dans les Figures 4 et 5. Dans chaque figure, le graphique du bas représente l'impédance électrique $\frac{e}{i}$ et le graphique du haut la fonction de transfert entre la tension et la vitesse relative $\frac{v_r}{e}$, avec et sans contrôleur. On observe que les pics d'impédance électrique coïncident avec les pics de vitesse relative. La différence entre l'impédance bloquée Z_e et l'impédance couplée Z_{in} correspond en effet à l'impédance motionnelle présentée dans l'équation (3). Dans les deux cas, un pic important est visible à 35 Hz et correspond au mode de résonance de l'actionneur. Les pics à 90 Hz et à 150 Hz correspondent aux modes de surface. Plus la mobilité de la surface est grande, plus les modes surfaciques sont visibles dans la vitesse relative et l'impédance électrique. Ainsi, l'amplitude des pics à 90 Hz et 150 Hz est beaucoup plus importante dans la Figure 4 que dans la Figure 5.

Le contrôleur utilisé permet d'amortir les modes de vitesse relative. On voit en effet que les pics de vitesse relative sont aplatis par le contrôle. Dans le cas d'une surface à forte mobilité, le contrôle amortit les modes de vitesse relative à 35 Hz, 90 Hz et 150 Hz. Dans le cas d'une surface à faible mobilité, seul le mode de résonance d'actionneur à 35 Hz est affecté significativement par le contrôle.

Par ailleurs, on observe en hautes fréquences l'impact de l'inductance L_e sur l'impédance électrique et sur la vitesse relative. Cet impact est pris en compte dans l'estimation de la vitesse relative par l'équation (4).

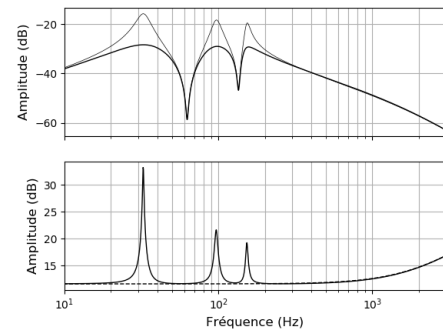


FIGURE 4 – Simulation d'un actionneur couplé à une surface fortement mobile à deux modes. Figure du haut : fonction de transfert entre la tension et la vitesse relative sans contrôle (ligne fine) et avec contrôle (ligne épaisse). Figure du bas : Impédance électrique bloquée (pointillés) et impédance électrique couplée (trait plein).

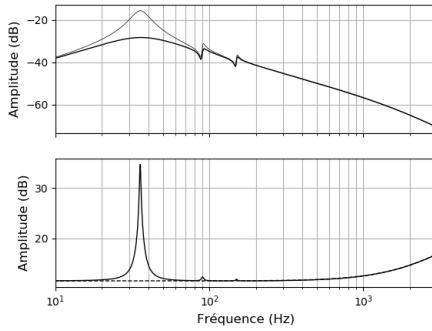


FIGURE 5 – Simulation d'un actionneur couplé à une surface faiblement mobile à deux modes. Figure du haut : fonction de transfert entre la tension et la vitesse relative sans contrôle (ligne fine) et avec contrôle (ligne épaisse). Figure du bas : Impédance électrique bloquée (pointillés) et impédance électrique couplée (trait plein).

3 Expérimentation

Dans cette section, nous nous plaçons dans un cas où la mobilité de la surface est suffisamment importante pour que les modes surfaciques soient visibles dans l'impédance électrique. Nous présentons une preuve de concept expérimentale en appliquant le contrôleur de la section 2 à une plaque fine d'aluminium encastrée.

3.1 Matériel expérimental



FIGURE 6 – Photo d'un HyVibe Pro [3]

Les mesures présentées sont effectuées à l'aide du HyVibe Pro présenté dans [3], visible Figure 6. Le HyVibe

Pro est un système SISO (une entrée une sortie) avec une latence de $22.5 \mu\text{s}$. Un amplificateur audio est intégré afin de rendre le système autonome. Le HyVibe Pro permet d'imposer une tension aux bornes de l'actionneur et de mesurer le courant le parcourant à l'aide d'une résistance de shunt. Les résultats présentés dans la section suivante sont des mesures électriques et vibratoires effectuées sur une plaque en aluminium encastrée (Figure 7), ressemblant à celle utilisée dans [4].



FIGURE 7 – Un actionneur inertiel fixé à une plaque fine d'aluminium encastrée. Dimensions : 28.5 cm x 43 cm x 1.5 mm

3.2 Captation virtuelle de vitesse

La Figure 8 présente une mesure d'impédance électrique lorsque l'actionneur est fixé à la plaque d'aluminium. On observe de nombreux pics dans l'impédance qui témoignent d'un fort couplage entre la surface et l'actionneur. Le premier pic correspond au mode de résonance de l'actionneur et les suivants à des modes surfaciques. Afin de mesurer

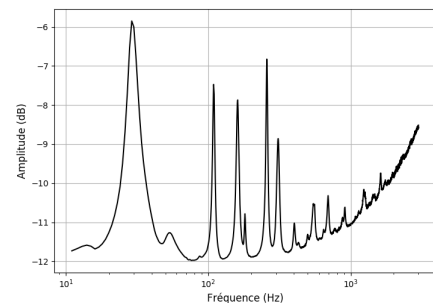


FIGURE 8 – Impédance électrique mesurée

virtuellement la vitesse relative, une étape de calibration est nécessaire. En effet, les paramètres d'actionneur fournis par les constructeurs de l'actionneur ne suffisent pas et ne

décrivent pas assez précisément son comportement. De plus, il faut prendre en compte les déphasages liés à des éléments hardware tels que l'amplificateur audio. La Figure 9 présente une comparaison entre la vitesse relative mesurée avec deux capteurs vibratoires et la mesure virtuelle effectuée grâce au capteur de courant. On remarque que l'estimation est bonne jusqu'à 500 Hz. Au-delà, le déphasage devient important et la force contre-électromotrice mesurée est bruitée. Le fait d'estimer la vitesse relative jusqu'à quelques centaines de Hz est satisfaisant car les modes les plus importants à contrôler se situent dans cette zone fréquentielle.

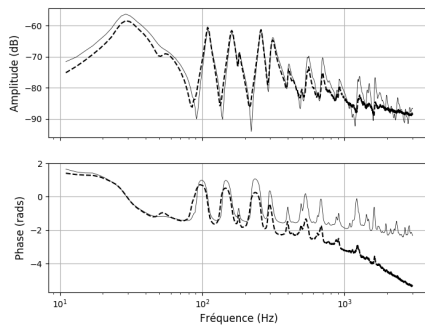


FIGURE 9 – Fonctions de transfert mesurées entre la tension et la vitesse relative mesurée à l'aide de deux accéléromètres (ligne pleine) et d'un capteur de courant (en pointillés)

3.3 Effet du contrôleur

Une fois la calibration effectuée, on contrôle la vitesse relative. La Figure 11 présente l'effet du contrôleur sur la vitesse surfacique au point de fixation de l'actionneur. D'un point de vue qualitatif, on peut voir que le contrôleur apporte de l'amortissement à la surface car il élargit les premiers pics. D'un point de vue quantitatif, on a mesuré les facteurs d'amortissement sur les modes bien séparés en basses fréquences à l'aide de la méthode de la bande passante à 3 dB [8]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. Le contrôleur permet de multiplier le facteur d'amortissement des 4 premiers principaux modes surfaciques par un facteur compris entre 1.6 et 3.2. On remarque qu'en dessous du premier mode de surface, la réponse fréquentielle est aussi affectée. En effet, dans cette zone fréquentielle, le mode de résonance de l'actionneur est contrôlé. A partir de 400 Hz, le contrôleur n'ajoute plus d'amortissement aux modes de surface. On observe un léger phénomène de débordement causé par une mauvaise estimation de la vitesse relative.

3.4 Comparaison avec un contrôle à capteur vibratoire

Dans la section précédente, nous avons montré que le contrôle par capteur/actionneur permet d'amortir les modes de surface. La Figure 11 présente une comparaison entre un amortissement actif réalisé à l'aide d'un capteur de courant et un amortissement actif réalisé à l'aide d'un

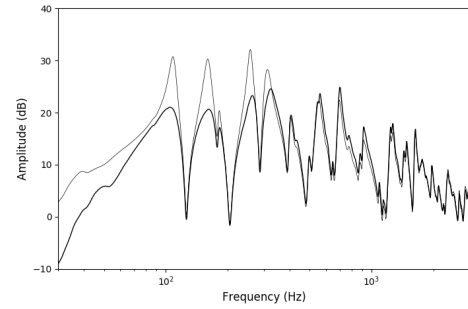


FIGURE 10 – Fonction de transfert entre la tension et la vitesse surfacique sans contrôle (ligne fine) et avec contrôle par capteur de courant (ligne épaisse)

f (Hz)	108	160	258	312
ξ_{BO} (%)	3.6	3.5	2.5	3.6
ξ_{BF} (%)	11.6	8.5	5.0	5.7
ξ_{BF}/ξ_{BO}	3.2	2.5	2.0	1.6

TABLEAU 1 – ξ_{BO} représente les taux d'amortissement en boucle ouverte, ξ_{BF} représente les taux d'amortissements en boucle fermée, et ξ_{BF}/ξ_{BO} représente l'effet multiplicatif de la boucle de contrôle sur les taux d'amortissements.

capteur vibratoire sur la même bande de fréquences. Pour les fréquences supérieures à 80 Hz, l'effet du contrôle avec un capteur de courant est identique à celui du contrôle avec un capteur vibratoire. Pour les fréquences inférieures à 80 Hz, la condition d'approximation (5) n'est pas respectée. Par conséquent, la vitesse relative n'est pas une bonne approximation de la vitesse surfacique et l'effet du contrôle par capteur/actionneur diffère de celui avec capteur vibratoire. Le contrôle dans cette zone n'a cependant pas d'effet négatif sur l'amortissement de la structure. Le contrôleur proposé permet donc bien de remplacer le capteur vibratoire afin de rajouter de l'amortissement à une structure.

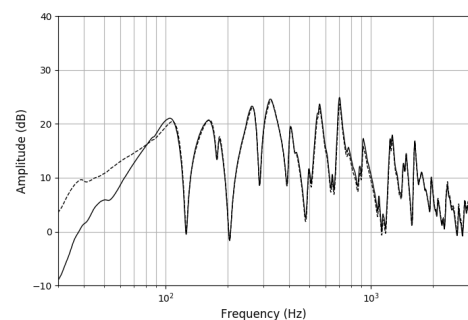


FIGURE 11 – Fonction de transfert entre la tension et la vitesse surfacique avec contrôle par captation virtuelle (ligne pleine), idem avec capteur vibratoire (ligne en pointillés)

4 Discussion

4.1 Limites de la méthode proposée

Une limite du contrôleur proposé est que l'observabilité de la vitesse surfacique dépend des caractéristiques mécaniques de la surface et de l'actionneur. Le cas le plus facile à traiter est celui où la masse mobile est grande voire infinie (base fixe), avec une mobilité de surface très grande. Dans le cas où la masse mobile et la mobilité de la surface sont faibles, la vitesse de la surface excitée ne sera pas semblable à la vitesse relative et aura peu d'impact sur l'impédance électrique. Un second point est l'estimation de la vitesse relative en moyennes et hautes fréquences. La mesure de la vitesse relative repose sur un modèle électrique simplifié de l'actionneur, imparfait dans ces zones fréquentielles. En réalité, des phénomènes plus complexes tels que les courants de Foucault décrits dans la littérature des haut-parleurs conventionnels entrent en jeu [9]. Ils seraient cependant difficile à compenser dans le cas d'une mesure en temps réel car ce sont des phénomènes à modéliser par des systèmes d'ordre fractionnaire.

4.2 Application du contrôleur à l'audio

Le contrôle actif de vibration appliqué à l'audio a été utilisé pour la première fois par Philips [10]. L'accélération de la membrane d'un subwoofer est asservie afin d'aplatir la réponse fréquentielle et de réduire la distorsion. Le contrôle actif de vibration est aussi appliqué dans le cas des DML en ajoutant de l'amortissement virtuel aux surfaces excitées [3] [11]. Ces approches nécessitant des capteurs de vibration, peut-on remplacer ces derniers par des capteurs virtuels ? Nous avons montré dans cette communication qu'il était possible de s'affranchir de capteur vibratoire sous hypothèse de linéarité du système. Cependant, le facteur de force Bl est en réalité dépendant de l'élongation de la suspension [12]. Dès lors, la force contre-électromotrice mesurée s'écrit $Bl(x)(v - v_a)$ et n'est plus proportionnelle à la vitesse relative. Le contrôleur utilisé doit être soigneusement conçu afin d'éviter l'ajout de distorsion. D'autre part, la qualité de la mesure de courant est essentielle. En effet, une perturbation sur le courant ou un bruit de mesure peuvent être amplifiés par le contrôleur. En outre, la captation virtuelle suppose une résistance R_e constante. Or, la résistance électrique varie en fonction de la température et un actionneur excité chauffe. Une piste d'amélioration est de concevoir un estimateur de vitesse qui prend en compte les variations de résistance électrique au cours du temps.

5 Conclusion

Cette communication propose une méthode de contrôle actif de vibration en utilisant un actionneur inertiel électrodynamique sans capteur vibratoire. Il est montré qu'en mesurant le courant parcourant l'actionneur, il est possible d'estimer la vitesse d'élongation de la suspension de l'actionneur. Le contrôle de cette grandeur dans une

boucle de rétroaction permet d'ajouter de l'amortissement à une structure faiblement amortie en s'affranchissant d'un capteur vibratoire.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Pablo Martin pour le travail fourni durant son stage.

Références

- [1] J. Borwick, "The distributed mode loudspeaker (DML)" in *Loudspeaker and headphone handbook*, Oxford : Focal Press, 3rd Edition (2001).
- [2] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures*, 3rd Edition, Springer (2011).
- [3] A. Mamou-Mani, F. Ménage et al. Active Vibration Control Applied to Flat Panel Loudspeakers Using the HyVibe Pro, *International Congress : NVH Comfort*, Le Mans, France, 13-14 octobre 2021.
- [4] C. Paulitsch, P. Gardonio and S. J. Elliott, Active vibration damping using self-sensing, electrodynamic actuators, *Smart Materials and Structures*, **15** (2006).
- [5] M. Verma, V. Lafarga, C. Collette, Perfect collocation using self-sensing electromagnetic actuator : Application to vibration control of flexible structures, *Sensors and Actuators A : Physical*, **313** (2020).
- [6] Y. Okada, K. Matsuda, H. Hashitani, Self-sensing active vibration control using the moving-coil-type actuator, *Journal of Vibration and Acoustics*, **117** (1995).
- [7] R. Boulandet et al., Utilisation d'un exciteur inertiel électrodynamique en mode capteur/actionneur et ses applications en vibro-acoustique, *13ème Congrès Français d'Acoustique (CFA)*, Le Mans, 11-15 avril 2016.
- [8] C.W. De Silva, *Vibration : Fundamentals and Practice*, CRC Press (2000).
- [9] J. Vanderkooy, A model of loudspeaker driver impedance incorporating Eddy current in the pole structure, *Journal of the Audio Engineering Society* **37** (1989).
- [10] J. Klaassen and S. de Koning, Motional feedback with loudspeakers, *Phillips Technical Review*, **29** (1968).
- [11] J. Ho, Flat acoustic sources with frequency response correction based on feedback and feed-forward distributed control *The Journal of the Acoustical Society of America* **137** (2015).
- [12] W. Klippel, "Nonlinear Adaptive Controller for Loudspeakers with Current Sensor", *Journal of The Audio Engineering Society* (1999).