



HAL
open science

Identification en vue de la commande pour une sustentation magnétique

Aleksander Xhuvani, Maurice Fadel, Jean Faucher

► **To cite this version:**

Aleksander Xhuvani, Maurice Fadel, Jean Faucher. Identification en vue de la commande pour une sustentation magnétique. 4 Colloque sur l'enseignement des technologies et des sciences de l'information et des systèmes 2003, Nov 2003, Toulouse, France. pp.435-438. hal-03538889

HAL Id: hal-03538889

<https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-03538889v1>

Submitted on 21 Jan 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.

IDENTIFICATION EN VUE DE LA COMMANDE POUR UNE SUSTENTATION MAGNETIQUE

Aleksander XHUVANI*, Maurice FADEL**, Jean FAUCHER**

axhuvani@yahoo.com, fadel@leei.enseeiht.fr, faucher@leei.enseeiht.fr

* Université Polytechnique de Tirana, 4, sheshi « Nene Tereza », Tirana - Albanie

** INPT-ENSEEIHT, Département de Génie Electrique-Automatique, BP 7122 - 2, rue Charles Camichel, 31071 Toulouse cedex 7

Résumé :

Ce travail présente une démarche intégrée destinée à l'apprentissage d'une méthode de commande numérique pour un dispositif électrotechnique non linéaire. On s'intéresse ici à l'identification d'un modèle mathématique, établi à partir des équations d'état, afin de définir une structure de commande et de faire la synthèse des paramètres.

Mots clés : modélisation, identification, commande numérique, méthode des moindres carrées, commande RST.

1 INTRODUCTION

Le but de cette manipulation consiste à commander un dispositif électrotechnique non linéaire instable en boucle ouverte. Pour cela on déroule les étapes de modélisation mathématique, identification des paramètres et synthèse de la loi de commande. La régulation étant linéaire, le modèle est linéarisé autour d'un point de fonctionnement.

1.1 Présentation de la maquette

Il s'agit d'un dispositif de sustentation magnétique permettant de maintenir en équilibre une sphère métallique, par action sur un électro-aimant.



fig.1 présentation de la maquette

La vue d'ensemble fait apparaître une arche en aluminium de manière à ne pas perturber le champ magnétique généré par l'électro-aimant situé immédiatement au-dessous. L'électro-aimant est en structure de type E avec une section du noyau central égale à la somme des sections des deux branches. La sphère ferromagnétique creuse possède un diamètre de 60 mm et une masse de 55 gr pour une épaisseur de 0.56 mm.

1.2 Principe de fonctionnement

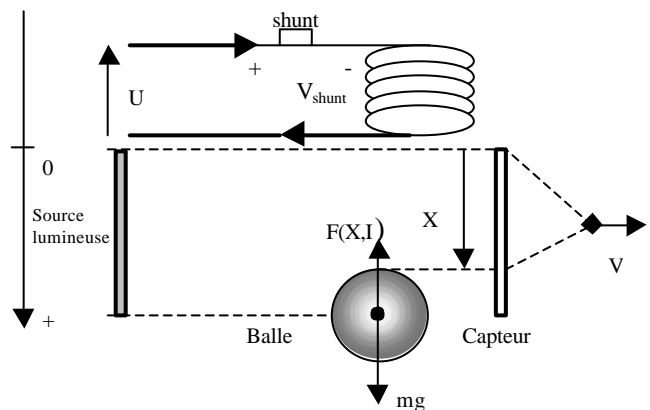


fig.2 schéma de principe

Pour mesurer la position de la sphère le dispositif est équipé d'une source lumineuse à faisceau étroit, située face à un récepteur photosensible délivrant une tension variable V , proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue. La loi de variation de la tension disponible est donnée ci-après, figure 3.

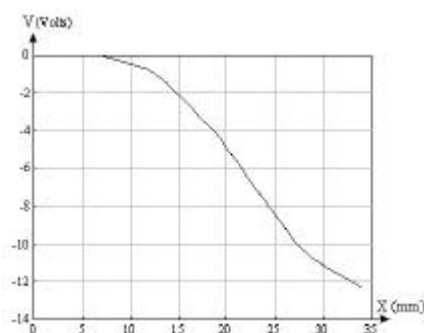


fig.3 loi de variation de la tension

La bobine est alimentée par un dispositif électronique analogique réalisant la fonction de source de courant.

2 MODELISATION DE LA SUSPENSION MAGNETIQUE

Conformément à la figure 2, nous pouvons exprimer la loi fondamentale de la dynamique.

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -F + m \cdot g \quad (1) \text{ avec } F = -\frac{dW'(I,x)}{dx} \text{ et où } W'$$

représente la coénergie totale $W' = \frac{1}{2} \cdot L(x) \cdot I^2$,

$$\text{soit } F = \frac{I^2}{2} \cdot \left(\frac{-dL}{dx} \right). \quad (2)$$

La force F dépend du courant I et de la variation d'inductance en fonction de la position de la sphère, indiquée par la tension V du capteur. Il s'agit d'un système non linéaire que nous pouvons linéariser autour d'une position d'équilibre caractérisé par (V_0, I_0) lorsqu'on tient compte de la relation (1). A l'équilibre la force F vaut $F_0 = mg$. En admettant que $X = -a \cdot V + b$, on écrit :

$$F = F_0 + \frac{\partial F}{\partial I} \cdot \Delta I + \frac{\partial F}{\partial V} \cdot \Delta V \text{ en posant } K_i = \frac{\partial F}{\partial I} = I \cdot \frac{dL}{dV}$$

$$\text{et } K_v = \frac{\partial F}{\partial V} = a \cdot \frac{I^2}{2} \cdot \frac{d^2L}{dV^2} \quad (3)$$

Etant donné que l'inductance L diminue de manière monotone avec la distance X , les paramètres K_i et K_v sont positifs et la force magnétique F par rapport à X peut être approximée (figure 4) par l'inverse d'un polynôme :

$$f(X) = \frac{1}{a_0 + a_1X + \dots + a_nX^n} \quad (4)$$

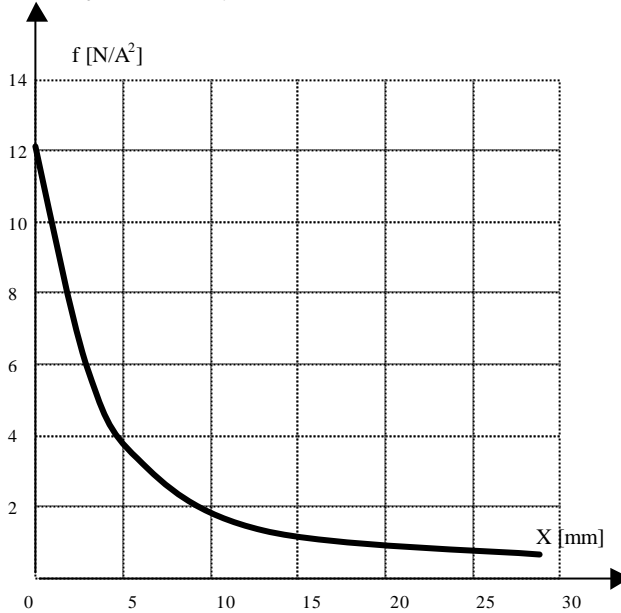


fig.4 allure de $f(X)$

Or, la distance X est calculée à partir de la tension V du capteur. A l'aide de l'expression $X = -a \cdot V + b$ et tenant compte de la dépendance de la force F du courant I , la relation (4) devient dans ce cas :

$$f(V,I) = \frac{I^2}{c_0 + c_1V + c_2V^2 + \dots + c_nV^n} \quad (5)$$

On écrit, alors, les équations d'état comme suit :

$$U = R \cdot I + \frac{d(L \cdot I)}{dt} \quad (6)$$

$$a \cdot m \frac{d^2V}{dt^2} = -m \cdot g + \frac{I^2}{c_0 + c_1V + c_2V^2 + \dots + c_nV^n}$$

avec :

- $R \Rightarrow$ résistance électrique de la bobine
- $L \Rightarrow$ inductance de la bobine
- $I \Rightarrow$ intensité du courant traversant la bobine
- $U \Rightarrow$ tension d'alimentation de la bobine.

Ainsi au sens des faibles variations autour de X_0 , (donc V_0) on peut exprimer le modèle dynamique du système comme suit :

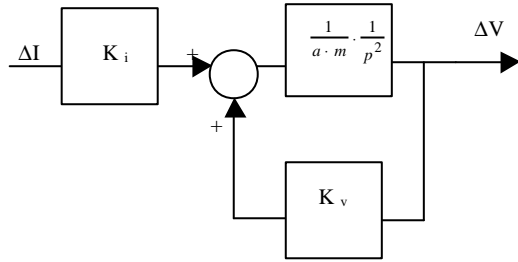


fig.5 modèle dynamique linéarisé du système

A partir de ce modèle dynamique on peut déduire la transmittance :

$$H(p) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{G}{\left(\frac{p}{v_0} + 1 \right) \left(\frac{p}{v_0} - 1 \right)} \quad (7)$$

$$\text{avec : } G = \frac{K_i}{K_v} \text{ et } v_0^2 = \frac{K_v}{a \cdot m} \quad (8)$$

La forme de la relation (7) illustre l'instabilité structurelle.

3 IDENTIFICATION

Disposant de deux vecteurs de mesures V_{shunt} et $V_{capteurs}$, (jusqu'ici nommé V) il nous reste à identifier les coefficients du dénominateur de la relation (5).

On note habituellement $\mathbf{q}^T = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ le vecteur des paramètres à identifier. Avec cette notation on peut écrire :

$$\mathbf{q}_0 = c_0 ;$$

$$\mathbf{q}_1 = c_1 ;$$

.....

$$\mathbf{q}_n = c_n.$$

Afin d'identifier le vecteur \mathbf{q} , on construit une fonction, dite de coût, au sens des moindres carrés que l'on notera $J(\mathbf{q})$, comme suit :

$$J(\mathbf{q}) = \sum_{k=1}^{np} \left[D_k - \left(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}_1 V_k + \mathbf{q}_2 V_k^2 + \dots + \mathbf{q}_n V_k^n \right) \right]^2 \quad (9)$$

où : $np \Rightarrow$ le nombre de points de mesure et

$$D_k = \frac{I_k^2}{m \cdot g} = \frac{1}{f(X)} \quad (\text{avec } I_k = \frac{V_{shunt}^k}{R_{shunt}}) \quad (10)$$

Ensuite, afin de minimiser $J(\mathbf{q})$, on utilisera la méthode des moindres carrés, qui consiste à chercher le minimum de la fonction de coût $J(\mathbf{q})$ par une formule directe, résultant de la relation :

$$\frac{d}{d\mathbf{q}} J(\mathbf{q}) = 0 \quad (11)$$

On construit ainsi le système linéaire suivant, avec $n+1$ inconnues :

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{np} V_k^0 & \sum_{k=1}^{np} V_k^1 & \dots & \sum_{k=1}^{np} V_k^{n-1} \\ \sum_{k=1}^{np} V_k^1 & \sum_{k=1}^{np} V_k^2 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \sum_{k=1}^{np} V_k^{(i-1)+(j-1)} & \dots \\ \sum_{k=1}^{np} V_k^{n-1} & \dots & \dots & \sum_{k=1}^{np} V_k^{2(n-1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{np} D_k V_k^0 \\ \sum_{k=1}^{np} D_k V_k^1 \\ \dots \\ \sum_{k=1}^{np} D_k V_k^{n-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

La solution du système (12) est obtenue par une méthode de résolution des systèmes algébriques linéaires.

4 EXPERIENCE

Dans le tableau suivant, on présente les résultats d'un essai effectué sur le montage.

Grandeurs mesurées		Grandeurs calculées		
V_{capteur} [V]	V_{shunt} [mV]	I [A]	I^2 [A ²]	$f(X)$ [N/A ²]
-2.5	275	0.5851	0.3423	1.576
-3	287	0.6213	0.386	1.447
-3.5	305	0.6702	0.4492	1.281
-4	325	0.7106	0.505	1.128
-4.5	353	0.7872	0.6197	0.956
-5	393	0.8362	0.6992	0.772

Sachant que : $R_{\text{shunt}} = 0.47\Omega$; $m = 0.055$ [kg] ; $g = 9.81$ [m/s²] ; $mg = 0.53955$ [kg s²/m] et $a = 1.82$ [mm/Volts], on peut calculer :

$$I = \frac{V_{\text{shunt}}}{R_{\text{shunt}}} \text{ ensuite } I^2, \quad f(X) = \frac{mg}{I^2} \text{ et donc } D_k = \frac{1}{f(X)}$$

pour l'identification des coefficients du polynôme [vecteur \mathbf{g}].

Après l'identification, on calcule les coefficients de la transmittance comme suit :

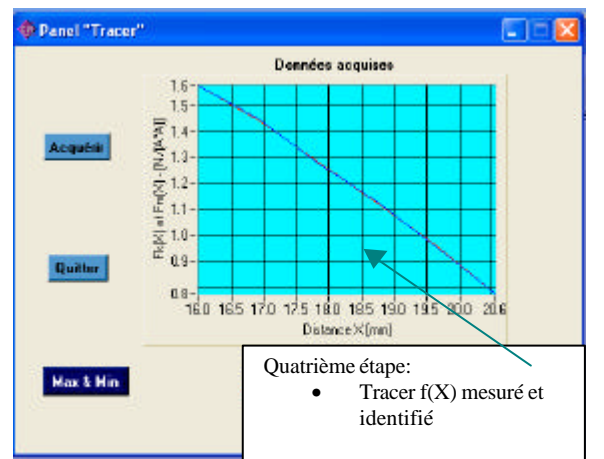
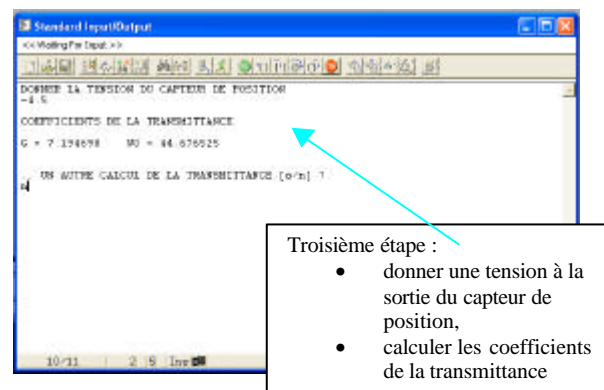
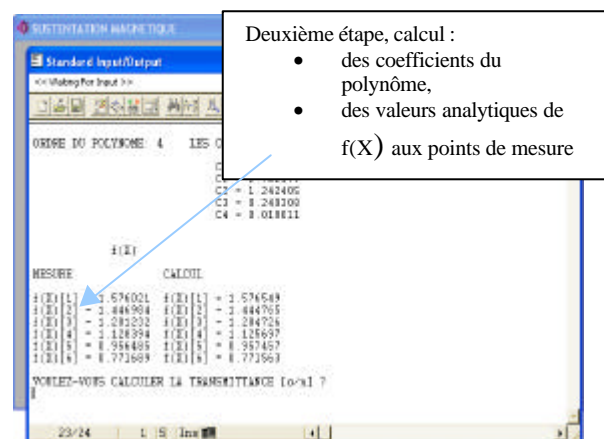
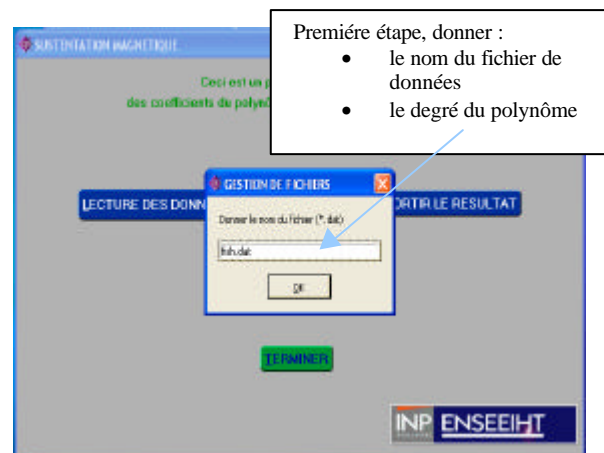
$$G = \frac{-2}{\sqrt{mg}} \cdot \frac{\sqrt{q_0 + q_1 V + \dots + q_n V^n}}{q_1 + 2q_2 V + \dots + nq_n V^{n-1}} \quad (13) \quad \text{et}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{g(q_1 + 2q_2 V + \dots + nq_n V^{n-1})}{a(q_0 + q_1 V + \dots + q_n V^n)}} \quad (14)$$

5 LOGICIEL

Le logiciel, écrit en langage ANSI C intégré dans l'environnement LabWindows CVI version 4, permet d'identifier les coefficients du polynôme, dont l'inverse est utilisé afin d'approximer analytiquement l'expression $f(X)$. Il donne la possibilité de choisir l'ordre n du polynôme et calcule ensuite les paramètres du vecteur \mathbf{g} , ainsi que les coefficients de la transmittance pour une valeur donnée de V_{capteur} . Le logiciel est convivial et le fait qu'il permet de choisir de manière souple l'ordre du modèle mathématique offre aux élèves la possibilité de comparer des résultats pour différentes

valeurs de celui-ci. Par la suite on expose les étapes d'exécution du logiciel **SusMag_LW**.



6 COMMANDE

Elle est réalisée à l'aide d'un ordinateur muni d'une carte d'acquisition permettant la gestion des entrées-sorties. Le logiciel de commande assure la saisie des paramètres et réalise la commande en temps réel du système. La structure de commande est du type RST avec possibilité de définir un modèle de poursuite.

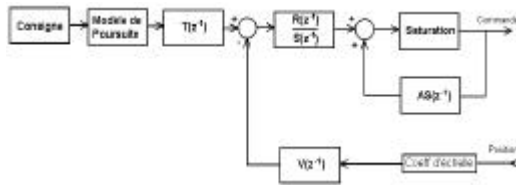


fig.5 structure de commande RST

Les polynômes dans les blocs sont les suivants:

$$\begin{aligned} T(z^{-1}) &= t0 + t1.z^{-1} + t2.z^{-2} + t3.z^{-3} + t4.z^{-4} \\ R(z^{-1}) &= r0 + r1.z^{-1} + r2.z^{-2} + r3.z^{-3} + r4.z^{-4} \\ S(z^{-1}) &= 1 + s1.z^{-1} + s2.z^{-2} + s3.z^{-3} + s4.z^{-4} \\ V(z^{-1}) &= v0 + v1.z^{-1} + v2.z^{-2} + v3.z^{-3} + v4.z^{-4} \\ AS(z^{-1}) &= as1.z^{-1} + as2.z^{-2} + as3.z^{-3} + as4.z^{-4} + as5.z^{-5} \end{aligned}$$

Le polynôme AS permet de définir une procédure d'anti-saturation, lorsqu'on utilise un intégrateur dans la chaîne directe.

6.1 Réalisation de la commande

On donnera par la suite les réponses obtenues à l'aide d'une commande RST sans apport de zéros. Les paramètres de commande sont obtenus par placement d'un pôle d'ordre 4 de dynamique 15 rad/s. A la période d'échantillonnage T_e de 5 ms, l'approche polynomiale de synthèse conduit à:

$$\begin{aligned} r0 &= 3.38899 & s1 &= -1.24082 \\ r1 &= -6.05593 & s2 &= 0.24082 \\ r2 &= 2.69230 & T &= 0.02540 \end{aligned}$$

Les figures 6 et 7 présentent respectivement la réponse du système à de fortes amplitudes pour :

- une consigne triangulaire,
- une consigne rectangulaire.

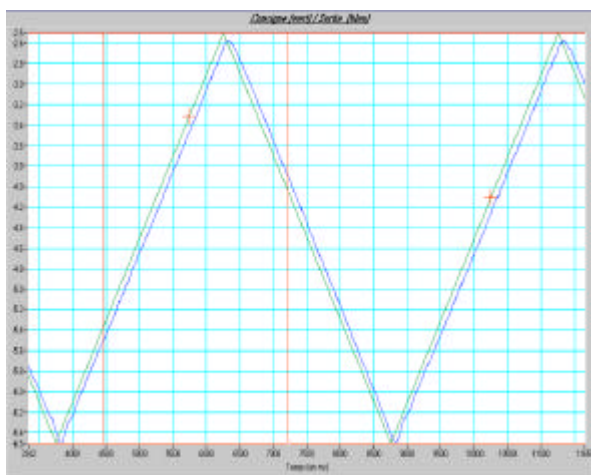


fig.6 réponse du système à une consigne triangulaire

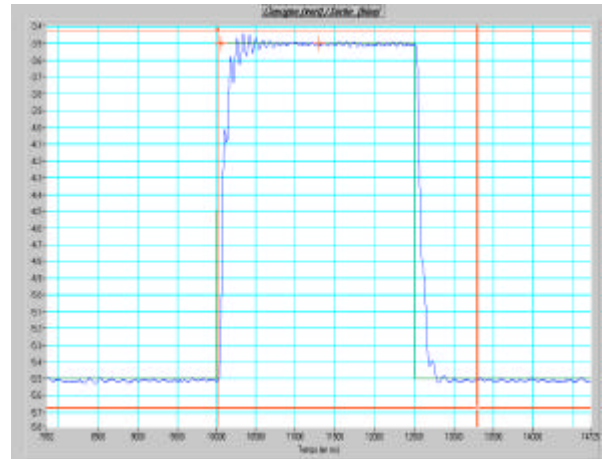


fig.7 réponse du système à une consigne rectangulaire

7 CONCLUSION

L'ensemble de ces opérations permet à l'élève d'observer l'évolution des performances dynamiques du dispositif. Il étudiera l'influence de l'ordre choisi pour la fonction représentative de la force d'attraction. Il notera que la bonne adéquation avec l'expérience ne s'obtient qu'en choisissant un ordre n du polynôme égal ou supérieur à 5. Les essais en boucle fermée valident l'ensemble des résultats, au niveau de la modélisation par une représentation convenable du dispositif et au niveau de l'identification par une bonne restitution du comportement. On notera le caractère non linéaire de cette application se traduisant par des faibles oscillations de la position lorsque la sphère se rapproche de l'électro-aimant.

Sur le plan pédagogique, la mise en place sur une même plateforme de moyens d'identification et de pilotage en temps réel, favorise l'apprentissage des concepts propres à la théorie de la commande, en déroulant de manière systématique les méthodes constituant la démarche de commande.

Bibliographie

- [1] "Asservissements et Automatismes Logiques" - Polycopié de TP Automatique II^{ème} année ENSEEIHT, Département GEA - S. CAUX, B. SARENI, B. DAGUES, M. FADEL
- [2] "Asservissements de position d'un mobile en suspension magnétique" - Documentation constructeur DIDASTEL PROVENCE, Marseille
- [3] "Identification d'une sustentation magnétique" - Note interne LEEI-ENSEEIH 2001 - A. XHUVANI, M. FADEL, J. FAUCHER
- [4] "Lois de commande pour un actionneur électromécanique destiné au positionnement" - ICCE 2003 Alger - M. FADEL