

N° SUJET	NIVEAU	SUJET
MP04	/	Capteurs de grandeurs mécaniques

INTRODUCTION / OBJECTIFS

- Introduction : un capteur nous permet d'accéder à une grandeur physique d'entrée en la transformant en une grandeur physique de sortie sous une forme plus adaptée à la mesure. Les premiers capteurs auxquels on peut penser sont nos mains, nos yeux, nos oreilles mais ils ne sont pas toujours adéquates pour certaines mesures.

I. CAPTEUR DE POSITION : LVDT

Le dispositif est constitué de 3 bobines accolées (L_1 , L_0 et L_2 avec $L_1 = L_2$) au milieu desquelles un noyau de fer doux peut être déplacé. Celle du milieu (L_0 ; $n = 250$ spires) est parcourue par un courant sinusoïdal de fréquence égale à 1000 Hz (GBF) et constitue le circuit primaire. Le champ magnétique variable créé au sein de cette bobine est alors canalisé par le noyau de fer doux dans les 2 autres bobines qui constituent 2 enroulements secondaires, ce qui explique, par induction électromagnétique, l'apparition de tensions induites U_1 et U_2 dans ces bobines.

Pour une position centrale du noyau de fer doux, la tension $U_s = U_1 + U_2$ récupérée sur l'oscilloscope s'annule, c'est-à-dire lorsque les tensions induites U_1 et U_2 sont égales en valeurs absolues et en opposition de phase. Si le noyau se déplace dans une direction, c'est-à-dire s'il est excentré, par ex. vers la bobine de droite la tension dans la bobine secondaire correspondante augmente tandis que l'autre bobine subit une réduction de tension complémentaire de sorte que $U_s > 0$ et inversement ($U_s < 0$) lorsque le noyau est majoritairement dans la bobine 2.

Gamme de mesures

En imposant, la position $x = 0$ cm lorsque l'extrémité droite du noyau de fer doux est au bord de la bobine la plus à droite, la gamme de mesure du capteur est a priori $[0 ; \approx 9]$ cm (avec 9 cm la position de l'extrémité droite du noyau de fer doux lorsque l'extrémité gauche du noyau de fer doux atteint le bord de la bobine le plus à gauche) ; or en réalisant des mesures du maximum de la tension U_s pour différentes positions du noyau de fer doux, du fait de la symétrie particulière du montage, la droite expérimentale réelle correspond à un V ce qui signifie qu'à une valeur de U_s correspond 2 positions possibles pour le noyau du fer doux ; donc une gamme rigoureuse de mesures restreinte à $[0 ; \approx 4,5]$ cm.

Cela dit, pour des raisons pratiques, j'ai volontairement inversé le signe des mesures de position obtenues lorsque le noyau de fer doux était plutôt à « gauche » pour ne pas avoir à traiter 2 valeurs de pentes ; ce qui mène au graphique suivant : droite $U_s(V) = f(x \text{ (cm)})$ d'équation $y = a + bx$ avec $a = 2,756 \pm 0,044$ et $b = -0,629 \pm 0,008$.

Résolution

$$R = \frac{\delta(U_s)}{|b|} = \frac{2 * 10 * 10^{-3} / 2^8}{0,629} = 1,2 * 10^{-4} \text{ cm} = 1,2 \mu\text{m}$$

Ce qui est bien plus petite que celle de la règle égale à 1 mm mais bien plus grand que la résolution de 0,1 μm pour les LVDT de pointe.

Précision

En déplaçant aléatoirement le noyau de fer doux (tout en restant dans la gamme de mesures autorisée), je vais estimer la valeur x de la position grâce à la droite d'étalonnage et vérifier cette valeur avec la règle.

Pour ce déplacement en particulier, je lis un maximum de tension U_s de $1,21 \pm 0,03 \text{ V}$ ce qui correspond à une position $x = 1,21 - \frac{2,756}{-0,629} = 2,5 \pm 0,1 \text{ cm}$

Le calcul d'incertitude sur x est un peu fastidieux... (mais donne bien environ 0,1 cm ; avec quelques termes négligeables) :

Ce que j'ai comparé à la valeur lue avec la règle : $x = 2,4 \pm 0,1 \text{ cm}$; les intervalles se recoupent ... ce qui semble plutôt cohérent puisque la droite d'étalonnage a été établie en associant une valeur de la tension U_s à une position estimée à la règle.

II. CAPTEUR DE DEPLACEMENT : PAR INTERFEROMETRIE

Un morceau de fer entouré d'un solénoïde a pour extrémité un miroir mobile qui forme avec un miroir réglable, un laser et une lame semi-réfléchissante (2 prismes accolés) un montage de type interféromètre de Michelson. Le dispositif est sensible et il est difficile d'obtenir les anneaux. Lorsque le solénoïde est parcouru d'un courant ($< 2 \text{ A}$), soumis au champ magnétique, le morceau de fer se déforme et les anneaux rentrent ou sortent de la figure.

On attribue la contraction ou la dilatation des anneaux au fait qu'ils rentrent ou qu'ils sortent en vérifiant expérimentalement en poussant ou en tirant LÉGEREMENT le solénoïde.

On montre, en faisant varier l'intensité qui parcourt le solénoïde (utiliser une alimentation qui permet de faire varier finement I), l'existence de 2 régimes : de 0 à 0,8 A le centre de la figure est mobile et environ 3 anneaux rentrent (dilatation) dans la figure & de 0,8 à 2 A le centre de la figure est fixe alors qu'environ 2 anneaux sortent (contraction) de la figure.

Gamme de mesures (le capteur c'est tout simplement l'interféromètre de Michelson ici)

La borne supérieure correspond à la longueur de cohérence du laser (environ 30 cm pour le laser He-Ne) ; mais nous n'aurons bien entendu pas la possibilité d'exploiter l'ensemble de la gamme de mesure car le morceau de fer ne se déformera jamais d'autant !

Résolution

L'image est plutôt floue sur l'écran donc on estime que la résolution est au mieux égale à la distance correspondante au défilement d'un anneau ; c'est-à-dire égale à $\lambda/2$. Cela dit pour des interféromètres de qualité, on sait détecter facilement un dixième voire un millième de frange.

Si l'on souhaite dorénavant caractériser un peu plus le phénomène physique (taux d'élongation longitudinale par ex.), il faudrait lier la variation de longueur du matériau au champ magnétique dans lequel baigne le morceau de fer. Pour cela, une pince ampèremétrique nous permet de visualiser la rampe de courant sur l'oscilloscope (attention à la conversion courant / tension) alors que la photodiode permet de voir défiler les anneaux (mais ne permet pas de distinguer le régime où les anneaux rentrent de celui où ils sortent).

On constate sur l'oscilloscope (en mode mono-coup) une première zone où le centre bouge (car les pics d'intensité sont rapprochés) puis une deuxième zone où les pics sont plus espacés (correspondant à un régime de centre fixe). Il faudrait donc travailler dans cette deuxième zone (là où nous avons constaté que le matériau se contractait) et remonter au coefficient de magnétostriction (une valeur du champ magnétique pour une valeur de déformation relative). En extrayant le morceau de fer du dispositif, on peut connaître sa longueur.

III. CAPTEUR DE VITESSE : PAR EFFET DOPPLER

On utilise l'effet Doppler pour remonter à la vitesse du mobile. On travaille en réflexion donc attention au facteur 2. Un circuit électrique (détection synchrone : multiplieur + passe-bas) permet de récupérer la variation de fréquence Δf . La valeur de la résistance du filtre passe-bas est prise égale à $20\text{ k}\Omega$ comme un compromis entre un gain le plus grand possible et une bande passante la plus grande possible (tout en coupant la somme des fréquences émetteur + récepteur).

Gamme de mesures

La valeur supérieure de la gamme est donnée en quelque sorte par la fréquence de coupure du filtre passe-bas mais encore une fois on ne pourra pas exploiter l'ensemble de la gamme de mesures autorisée car le banc et le moteur ne nous permettent pas d'atteindre des vitesses trop importantes.

Il s'agit de comparer la vitesse du mobile obtenue par le calcul de l'effet Doppler avec celle calculée par une mesure du temps de parcours (50 cm à chaque fois). ➔ mesures statistiques.

Précision

Pour une certaine tension appliquée au moteur (correspondant à une vitesse convenable du mobile), on fait une mesure de Δf (à l'oscillo) et de t_{chrono} (au chrono) et on compare les vitesses calculées correspondantes. Si les intervalles de confiance se recoupent, on considère le capteur de vitesse précis.

Résolution

Pour cette même tension appliquée, on compare alors la résolution du capteur Doppler (indépendante de la vitesse !) à celle obtenue par le calcul au chronomètre (dépendante de la vitesse !). On constate que la résolution du capteur est bien meilleure.

$$R^{\text{Doppler}} = \frac{\delta \Delta f}{b} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{\simeq 1} = 10^{-3} \text{ cm/s} \qquad R^{\text{Chrono}} = v_{\text{mobile}}^{\text{chrono}} * \frac{\delta t_{\text{chrono}}}{t_{\text{chrono}}}$$

IV. CAPTEUR DE FORCE : BALANCE A JAUGE DE CONTRAINTE

Le montage électronique est bien expliqué sur la notice du dispositif en ligne. Choisir $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$ pour limiter l'auto-échauffement et la dérive du signal en sortie de l'amplificateur (mais pas plus grand sinon le signal est trop faible ; même si R_s est choisie égale à $50\text{ }\Omega$; ce qui permet un gain élevé).

On fait une droite d'étalonnage $U_s = f(m)$ et on en déduit une masse inconnue.

Gamme de mesures

On peut faire des mesures pour des masses allant de 0 à 200 g .

Sensibilité

C'est la droite de la pente d'étalonnage ($\simeq -0,69\text{ mV/g}$).

Précision

On vérifie à la balance électronique que l'on a la bonne masse mais on tourne un peu en rond (car on a étalonné le dispositif avec cette balance...)

Résolution

On compare les résolutions du capteur à celle de la balance électronique. Celle du capteur est de l'ordre de 10^{-4} g alors que celle de la balance vaut 10^{-2} g mais le capteur a une réponse qui varie beaucoup... alors que la valeur affichée sur la balance se stabilise rapidement.

ATTENTION, LES RESOLUTIONS CALCULEES DANS L'ENSEMBLE DU MONTAGE SONT PUREMENT THEORIQUES ; LES INCERTITUDES SONT EN GENERAL BEAUCOUP PLUS IMPORTANTES ET NE PERMETTENT PAS DE REELEMENT ATTEINDRE CES RESOLUTIONS.

CONCLUSION

Nous avons montré le principe de différents capteurs en utilisant des phénomènes physiques variés. On a vu des capteurs précis mais il faut faire attention à bien distinguer les différentes caractéristiques entre elles : par ex. on peut être précis sans avoir une bonne résolution et inversement.

QUESTIONS / INFORMATIONS

- **Applications des dispositifs présentés**

LVDT → génie civil

Interférométrie → commun pour les mesures de longueurs

Doppler → radar autoroutier

Balance à jauge de contrainte → fonctionnement d'une balance électronique.

- **Montage LVDT :**

Pourquoi considérer qu'une seule pente (alors que la courbe réelle en fait apparaître deux) ? Par souci pratique pour ne pas avoir à réaliser l'opération de moyenne (dur dur...).

Avantage d'utiliser l'oscilloscope par rapport à un voltmètre ? Résolution meilleure sur l'oscillo mais attention, voir JBD pour les multimètres de compét ! (mieux que l'oscillo !)

Comment choisir la fréquence ? 1000 Hz car compromis entre amplitude du signal renvoyé par la bobine (pour les trop hautes fréquences, effets résistifs).

Lorsque l'on change la position du noyau de fer doux de gauche à droite on modifie la phase du signal → suggestion : pour utiliser la gamme de mesure complète $[0 ; \approx 9 \text{ cm}]$ on peut faire une détection synchrone. On peut par exemple montrer la nécessité de faire cela en faisant apparaître sur l'oscillo le signal envoyé dans la bobine centrale et déclencher sur celui-ci. On voit alors que le signal de sortie $U_s = U_1 + U_2$ change bien de phase lorsque le noyau de fer doux passe du côté droit au côté gauche et inversement alors que dans le cas que j'ai présenté ce n'était pas le cas.

Ne pas comparer la précision du LVDT à celle de la règle car on a étalonné le LVDT avec la règle justement...

Bien préciser que le capteur rester linéaire pour la gamme de mesures ! (noyau de fer doux à l'intérieure des bobines).

- **Montage Interférométrie :**

Ici, par souci de présentation dans la salle de cours, le laser était au niveau des yeux de tous mais le jour J il faut bien entendu mettre tout ça plus bas. Le montage prend de la place (projection sur un écran avec une focale de 1 m pour avoir des anneaux assez gros).

Dans ce montage, c'est différent du montage LVDT dans le sens où l'on mesure une différence de position et non une position absolue.

Le fer se dilate puis se contracte en effet ; mais pour du nickel on n'observerait que contraction.

En faisant une rampe de courant et en opérant rapidement, on s'affranchit des effets dus à l'auto-échauffement du système.

Il est possible de mettre aussi un signal triangulaire en entrée.

- **Montage effet Doppler :**

Pour le traitement de la caractéristique « précision » de ce capteur, je me suis restreint à $\pm\sigma$ car les intervalles se recoupaient déjà ... pas besoin de se placer dans des intervalles de confiance à 95 % vu que ça fonctionne déjà à 68 %.

Une modification de la fréquence perçue correspond aussi à une modification de la phase.

On pourrait obtenir une vitesse plus précise encore (que la détermination faite grâce au chronomètre) avec des fourches optiques disposées sur le banc.

- **Montage de la balance à jauge de contrainte :**

Nom du pont utilisé et fonctionnement : pont de Wheatstone. Le but est d'équilibrer le pont lorsque la balance est à vide (pas de masse) et la résistance de la jauge varie lorsqu'une masse vient déséquilibrer le pont.

Pourquoi attendre 10 secondes avant de prendre la mesure ? La valeur lue sur le voltmètre varie trop... il faut bien se donner un critère pour prendre la mesure à un instant donné.

Attention, sur le circuit présenté du pont de Wheatstone, la résistance de sortie R_s ne sert qu'à amplifier la différence de tension entre le + et le - ; on parle d'amplificateur différentiel ; ce n'est pas un amplificateur opérationnel classique !

On prend les résistances R_1 et R_2 importantes ($10 \text{ k}\Omega$) pour limiter l'auto-échauffement mais pas trop pour ne pas avoir un signal trop faible en sortie (même si la résistance $R_s = 50 \Omega$ permet une multiplicateur par 1000).

On pourrait peut-être limiter les dérives des valeurs lues sur le voltmètre par une détection synchrone ? voir JBD.