

UE MEMS

TP 3

Accéléromètre en boucle fermée

Dimitri Galayko

1 Introduction

Ce TP représente la deuxième partie du travail de conception d'un système complet permettant de mesurer l'accélération. Dans cette partie, nous allons ajouter une contre-réaction à l'accéléromètre, ce qui permettra de rendre les mouvements de la masse très faibles, et récupérer en sortie directement la valeur de l'accélération, sous forme numérique ou analogique.

2 Actionneurs pour contre-réaction.

2.1 Dimensionnement (calculs)

Afin de pouvoir contrôler le mouvement de la masse, on ajoute des transducteurs à peignes interdigités mobiles "dans le plan" (area overlap), comme c'est présenté fig. 2 et fig. 8 de l'article de Amini (cf. fig. 1).

La contre-réaction est réalisée par deux transducteurs à mouvement latéral C_{C1} et C_{C2} placés symétriquement qui peuvent générer une force tirant la masse mobile vers la gauche ou vers la droite. On appellera ces transducteurs *actionneurs*. Puisque ce sont les transducteurs à mouvement latéral, la force ne dépend que de la tension appliquée aux transducteurs, et est proportionnelle au carré de cette tension. Dans ce travail, on appliquera une force dont la valeur est codée sur 1 bits, c.a.d., qui pourra prendre deux valeurs : $-F_{max}$ et F_{max} . Ces valeurs de la force sont obtenues lorsque l'un ou l'autre actionneur est polarisé par une tension V_0 . Les valeurs intermédiaires de la force sont obtenues par modulation à largeur d'impulsion. Le code PWM est généré par une technique de PWM classique ou bien par un modulateur Sigma-Delta. Une telle technique permet de s'affranchir de la non-linéarité quadratique dans la relation entre la force du transducteur et la tension de polarisation.

On posera $V_0 = 30$ V, et en considérant que le gap est de $4 \mu\text{m}$, et la longueur de recouvrement est de $100 \mu\text{m}$. Les actionneurs étant fait dans la même couche que le reste de la structure, l'épaisseur est la même ($120 \mu\text{m}$).

Notez que les actionneur s'appellent avec un indice "plus" ou "moins", selon le signe de la force qu'ils génèrent sur la masse mobile (cf. fig. 1).

A faire. Donnez le nombre minimal de doigts permettant de compenser une accélération de $3g$.

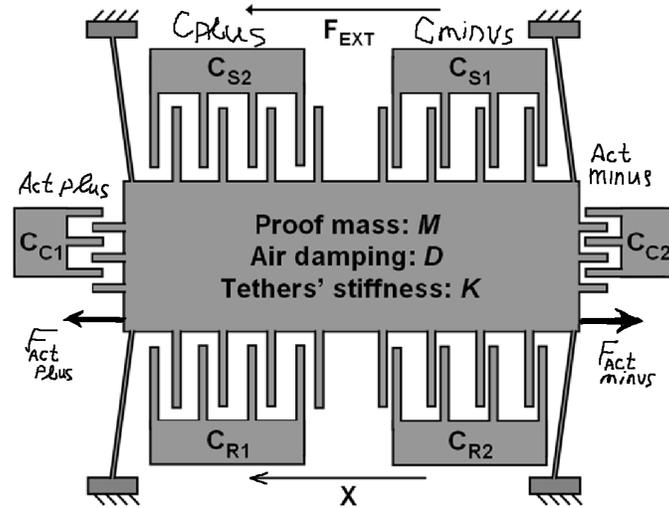


FIGURE 1 –

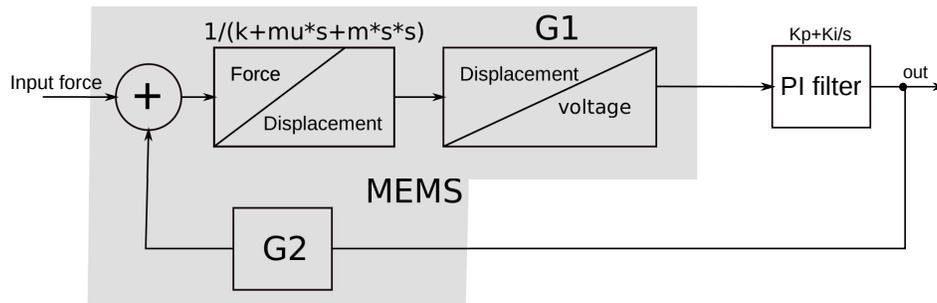


FIGURE 2 – . Diagramme fonctionnel d'accéléromètre en boucle fermée.

2.2 Modélisation de la structure avec les actionneurs sans la contre-réaction

Reprennez le dernier exercice du TP2, où un accéléromètre sans contre-réaction a été modélisé, muni d'un circuit de mesure de la position à l'aide des capacités commutées. Modélisez la réponse transitoire de l'accéléromètre pour un créneau de l'accélération externe de 0 à $1g$. Pour cela, il suffira de configurer la source *Vforce* pour qu'elle génère une tension DC égale à $1g \cdot m$.

Modélisez la nouvelle structure de l'accéléromètre munie des actionneurs de contre-réaction (fichier *structure_complete_sans_CR.cir*). Testez cette structure en appliquant une tension $+30\text{ V}$ à un des actionneur, et observer la réponse du circuit de mesure de la capacité. Comparez avec la dynamique du phénomène transitoire observé pour un créneau d'accélération externe dans la question précédente.

Notez la manière d'additionner les forces mécaniques lorsque l'on a ajouté deux actionneurs générant les forces $F_{act\ plus}$ et $F_{act\ minus}$.

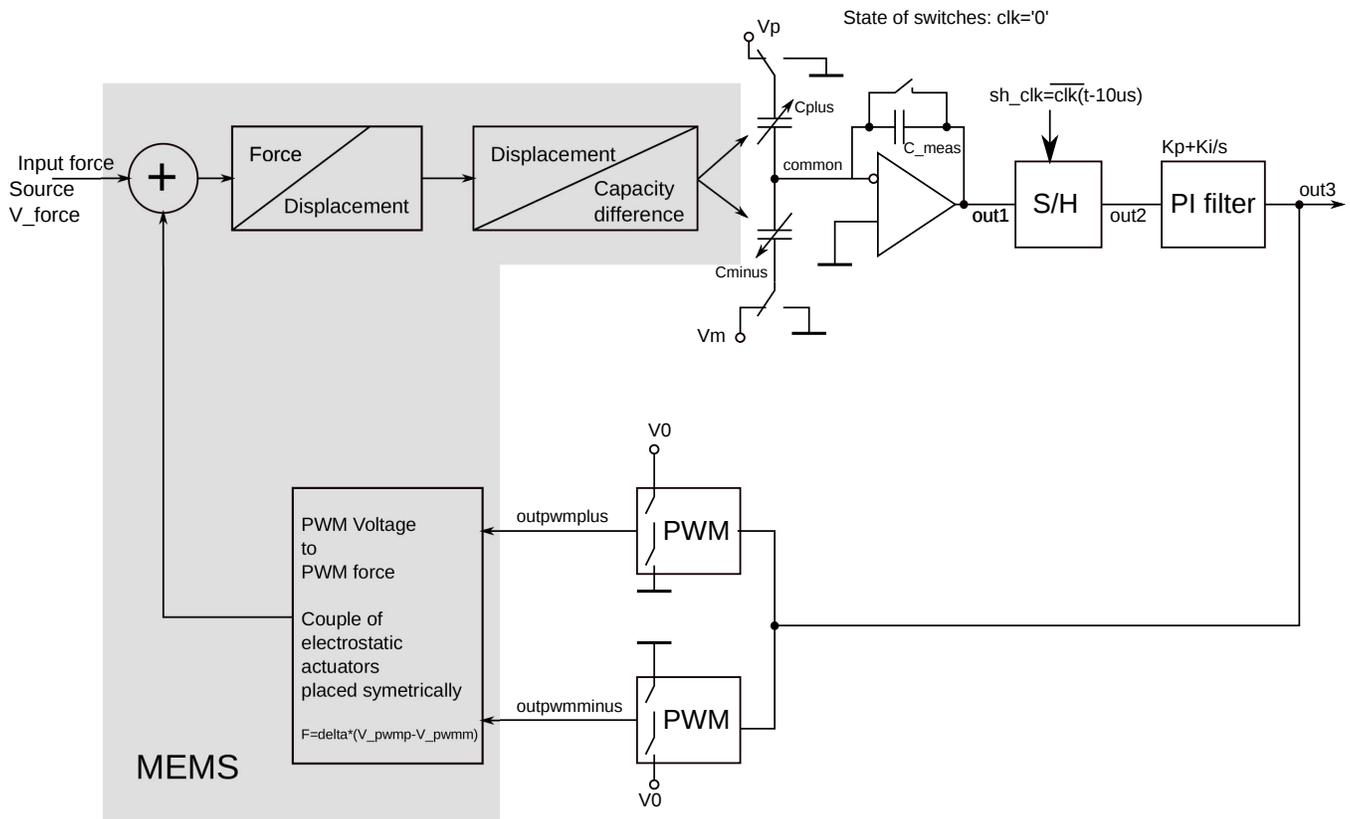


FIGURE 3 –

3 Modélisation d'un accéléromètre en boucle fermée

3.1 Contre-réaction par commande PI

Dans cette partie, on étudie le système dont le schéma fonctionnel est donné fig. 2. Ce système est composé de notre accéléromètre de base qui convertit une force d'entrée en position selon une fonction de transfert $H(s)$, ensuite cette tension est convertie en tension avec un coefficient G_1 , ensuite un filtre correcteur de type "Proportionnel intégral" est ajouté, et ensuite un retour est appliquée à l'entrée, avec un coefficient G_2 .

Ecrivez la fonction de transfert de ce système dans le domaine de Laplace. Etudiez les propriétés de cette fonction de transfert à l'aide du script scilab fourni par l'enseignant, et proposer des valeurs des coefficients du filtre proportionnel-intégral, en supposant que $G_1=G_2=1$ (ainsi, on intègre ces coefficients dans les coefficients du filtre).

4 Accéléromètre analogique : PWM

Pour réaliser la contre-réaction, il y a deux méthodes : une commande en PWM, et une commande par un modulateur Sigma-Delta (une variante de PWM).

Le schéma de principe de fonctionnement d'un accéléromètre en boucle fermée par PWM est donné fig. 3.

Les schémas du filtre PI et celui des échantillonneurs-bloqueurs sont donnés fig. 4.

A faire : Démontrez que cette boucle réalise un retour négative, c.a.d., une contre-réaction.

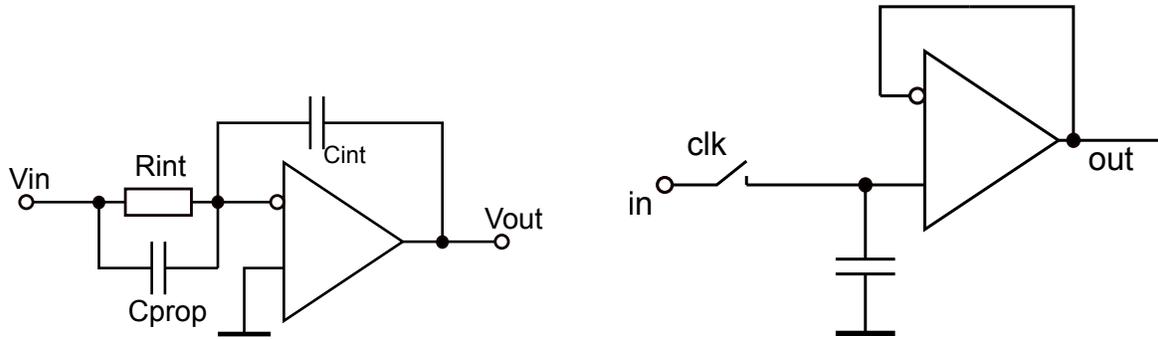


FIGURE 4 –

A faire : Calculez les valeurs des coefficients $G1$ et $G2$ de la fig. 2. En déduisez les valeurs réelles (dénormalisées) des coefficients du filtre, et proposez des valeurs pour les capacités C_{prop} , C_{int} et pour la résistance R_{int} du circuit de la fig. 4. Pour faire cet exercice, on prend les paramètres suivants : $V_0=30$ V, $V_p=3$ V, la fréquence des capacités commutées est 5 kHz, la fréquence de PWM est 50 kHz.

A faire : Modélisez l'architecture avec le modèle défini dans le fichier *accelerometre_pwm_integral.cir*. Augmentez la fréquence des capacité commutées à 50kHz, et constatez la modification du fonctionnement (l'amplitude de l'erreur résiduelle).

Vous ferez vos modélisation avec, en entrée, (i) une source d'accélération continue (1g), et (ii) avec une source d'accélération sinusoïdale, d'amplitude 1g et de fréquence 100 Hz.

A faire : Lorsque vous modéliserez la mesure de l'accélération sinusoïdale à 100Hz, constatez les retards qui existent le long de la chaîne du traitement (entre l'accélération externe, le déplacement, les signaux out1, out 2, out3).

5 Accéléromètre à sortie numérique : Sigma-Delta

Nous avons maintenant remplacer le modulateur PWM par un modulateur Sigma-Delta. On gagne deux avantages :

- réduction des harmoniques liées à la modulation PWM : dans un modulateur Sigma-Delta l'erreur de quantification est un bruit (et non pas un signal périodique), dont l'énergie est étalée dans le domaine fréquentielle, et donc on peut obtenir un rapport signal sur bruit plus important.
- La sortie est un signal numérique compatible avec les techniques numériques de traitement du signal.

L'architecture du système est donnée fig. 5, et le modèle dans le fichier *accelerometre_sigma_delta.cir*.

A faire : Modélisez le système avec, en entrée, une source d'accélération continue (1g), et avec une source d'accélération sinusoïdale, d'amplitude 1g et de fréquence 100 Hz. Pour la dernière simulation, faite une *fft* de la sortie du sigma-delta, et mettez en évidence la mise en forme du bruit spécifique à la modulation sigma-delta.

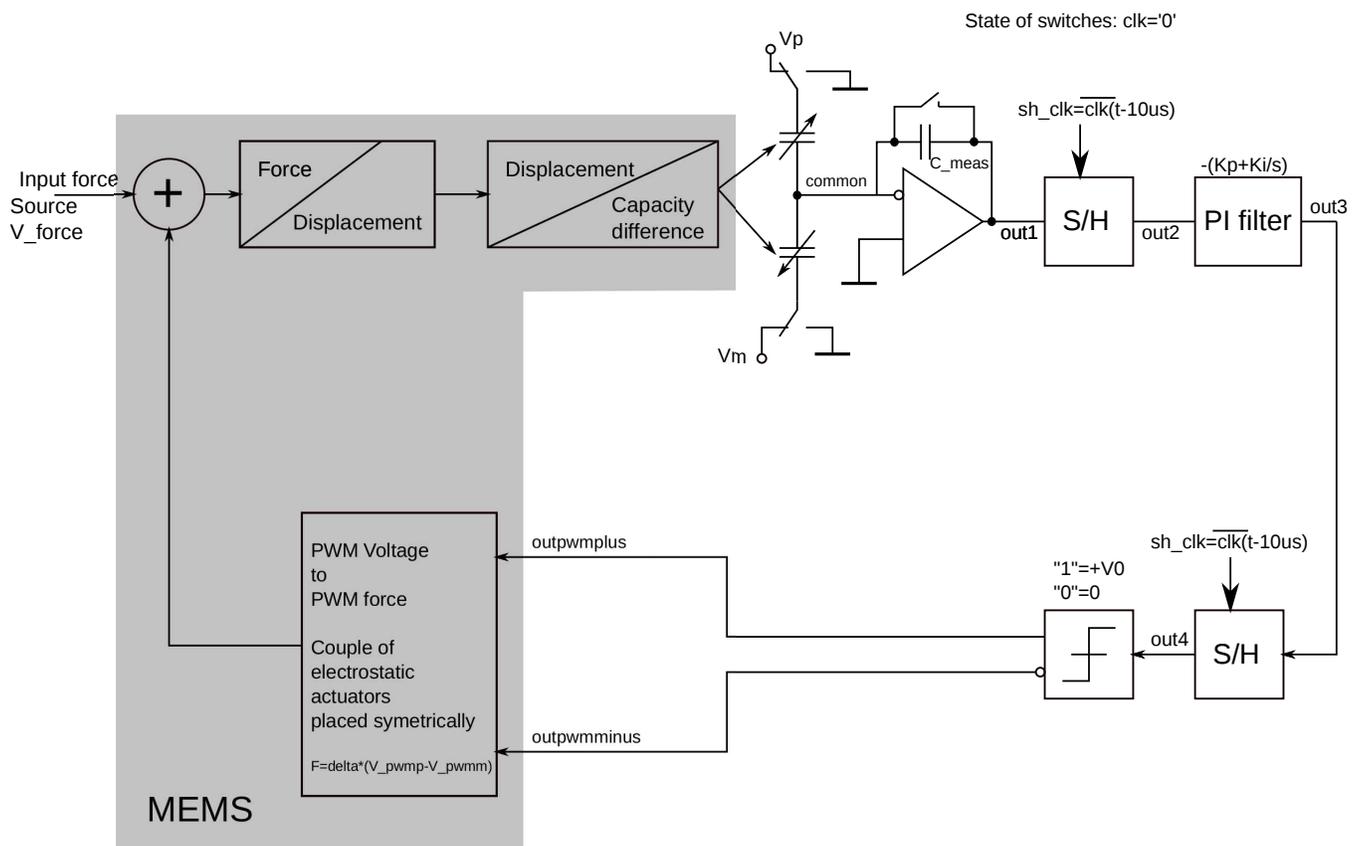


FIGURE 5 –