Option A

ÉLECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Recommandations aux candidats :

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les trois parties du problème sur des feuilles séparées et clairement repérées. Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations indiquées dans le texte, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Tournez la page S.V.P.

Deuxième Epreuve

durée : 6 heures

Les chariots filoguidés constituent l'une des composantes d'un atelier flexible qui comprend, par ailleurs :

* Un ensemble de machines-outils avec leurs systèmes de chargement et d'approvisionnement en outils.

* Un système de commande assurant l'ensemble des activités en fonction des objectifs de production.

En suivant, dans l'atelier, des trajectoires matérialisées par des fils enterrés, les chariots assurent le transport des palettes entre les postes de chargement/déchargement et les machines.

Afin d'estimer l'écart entre la trajectoire réelle et la trajectoire matérialisée par le fil, un chariot dispose d'un capteur spécifique associé à une électronique de conditionnement. Les chariots sont propulsés par des moteurs électriques. Leur autonomie énergétique est assurée par une batterie d'accumulateurs.

Le sujet proposé comporte 2 parties

Partie A : étude du capteur et de l'asservissement de propulsion.

Partie B : étude de l'électronique de conditionnement des signaux délivrés par le capteur.

Partie C : exploitation pédagogique.

Les parties A et B sont largement indépendantes, mais le candidat a tout intéret à lire au moins la partie A.1 avant d'aborder la partie B.

Partie A

Cette partie traite du capteur de position et de l'asservissement de la vitesse de déplacement du chariot.

A.1 Etude du capteur.

On se limite ici au contexte où le fil est rectiligne sur une longueur suffisante pour que l'on puisse parler de longueur infinie. Par ailleurs on considère que l'environnement du capteur est exempt de toute pièce ferromagnétique ou massivement conductrice pouvant perturber les champs et flux électromagnétiques.

Le capteur est constitué de 2 bobines identiques montées sur un cube de coté b, comprenant chacune N spires. L'une des bobines est dans un plan horizontal, et l'autre est dans un plan vertical parallèle au fil directeur :

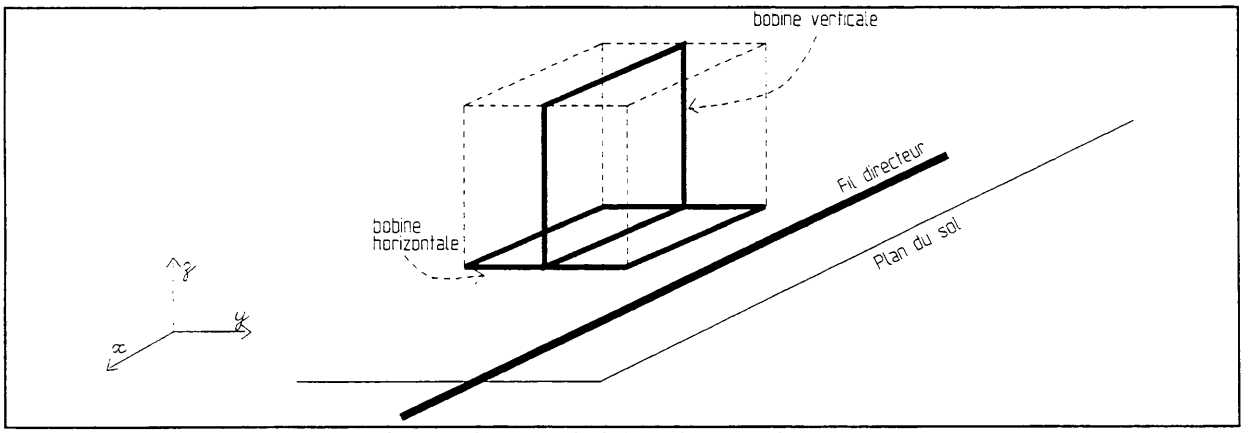

figure 1 : disposition des bobines du capteur de position

Le repérage est le suivant :

* le plan de la bobine horizontale se trouve à une distance h du fil directeur.

* le plan de la bobine verticale se trouve à une distance Y du fil directeur. Ce plan est également le plan médian du chariot. Dans la suite Y désignera donc la distance du chariot au fil :

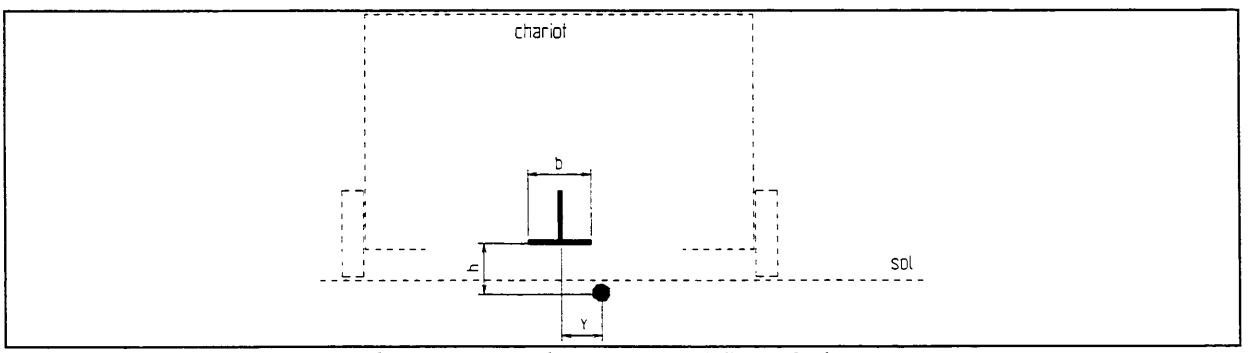

figure 2 : repérage des positions, vue de l'avant du chariot

On rappelle qu'un fil rectiligne infiniment long parcouru par un courant i crée un champ magnétique axysimétrique :

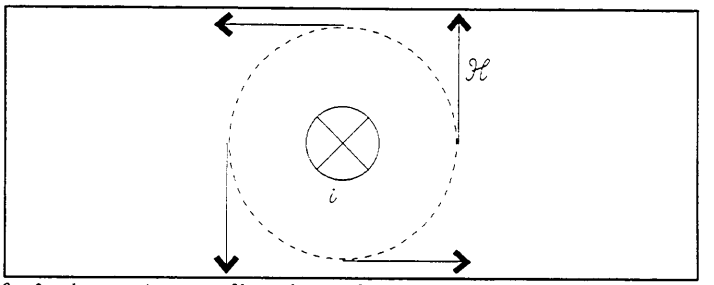

fig. 3 : champ crée par un fil rectiligne infiniment long, courant dirigé vers l'avant

et que l'on a $\int_{(C)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = i$, où *(C)* est un contour fermé encerclant le courant i.

A.1.1. Calculer le module du champ à une distance r du fil.

flux au travers de la bobine horizontale

Le chariot est à une distance Y du fil, qui est parcouru par un courant i, compté positivement dans le sens de x. Un point du plan de la bobine horizontale peut être repéré par $(x, Y+y, h)$

A.1.2.1. Calculer le module du champ en un point du plan de la bobine horizontale.

A.1.2.2. Calculer le flux au travers d'une surface élémentaire de la bobine horizontale, centrée en $(x, Y+y, h)$, de largeur dy et de longueur b.

A.1.2.3. Calculer le flux $\Phi_h(Y)$ au travers d'une spire de la bobine horizontale lorsque le chariot est à la distance Y.

A.1.2.4. Etudier la fonction $\Phi_h(Y)$, et en donner les points particuliers.

A.1.2.5. Quel est le domaine d'utilisation du dispositif comme capteur de position ?

flux au travers de la bobine verticale

A.1.3. Sans nécessairement reprendre en détail les questions précédentes, donner l'allure générale de $\Phi_v(Y)$

utilisation en régime sinusoïdal

On a maintenant $i = I_0 \sin(\omega t)$.

A.1.4.1. Exprimer la f.e.m aux bornes de la bobine horizontale.

On prend h = 3 cm, b = 10 cm, N = 10, I_0 = 0,4 A.

A.1.4.2. Calculer l'amplitude de la f.e.m pour une fréquence du courant directeur de 4 kHz, à une distance $Y = \pm 3$ cm.

A.1.4.3. Comment distinguer la situation $Y = +3$ cm de la situation $Y = -3$ cm ?

A.1.4.4. En admettant que la loi $\Phi_h(Y)$ soit linéaire dans le domaine d'évolution de Y, quel doit être le gain de la chaîne de conditionnement pour obtenir une sensibilité de 2V/cm à 4 kHz ?

A.2 Asservissement de propulsion

L'asservissement de direction dépendant de la vitesse de déplacement, on souhaite conserver celle-ci constante.

Etude de la propulsion

Celle-ci est assurée par un moteur à courant continu à flux constant marqué : ($\mathbf{U_N = 48\ V}$, $\mathbf{N_N = 2000\ tr/min}$). Pour identifier la motorisation, on superpose un échelon de **2 V** au régime permanent $\mathbf{U_0 = 24\ V}$. On relève simultanément le courant et la vitesse du moteur (méthode de Pasek). Le détail autour de l'instant $t = 0$ est donné en figure 5.

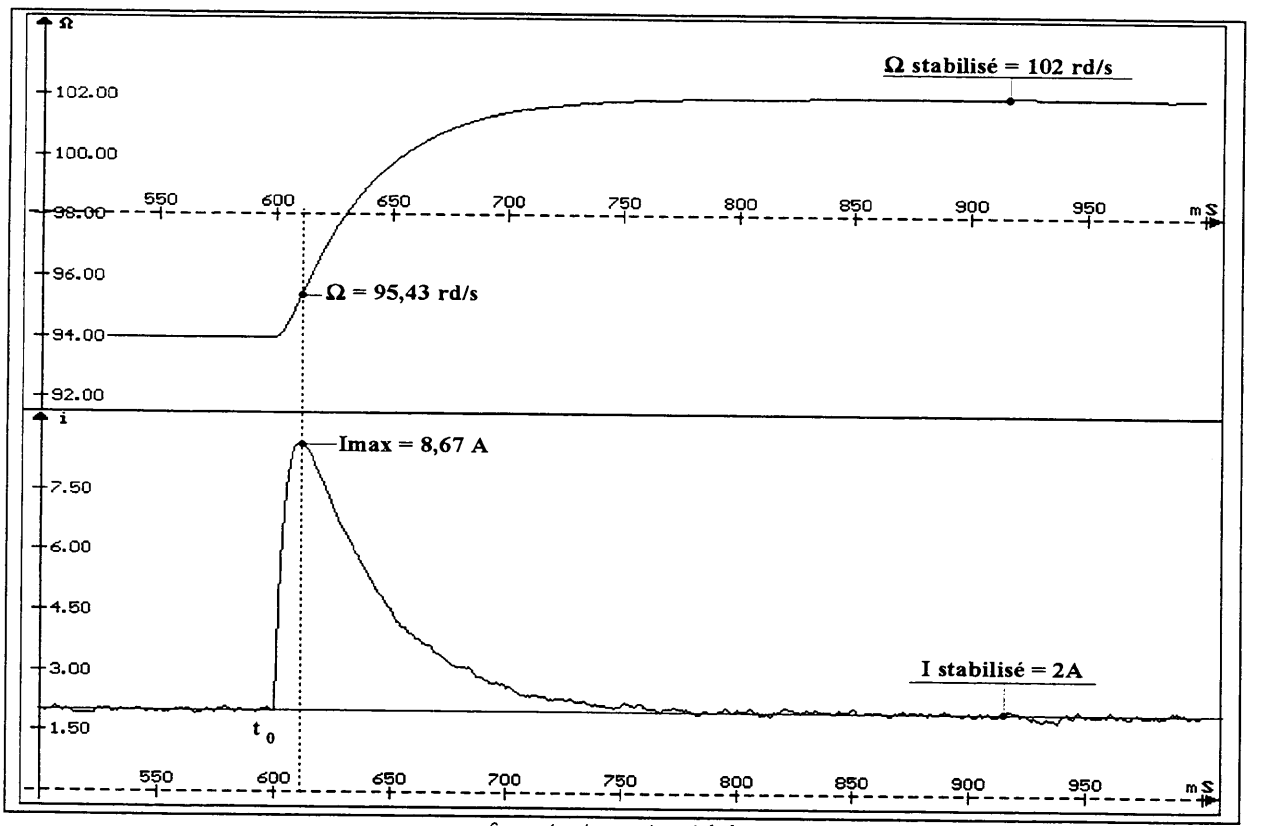

figure 4 : réponse à un échelon

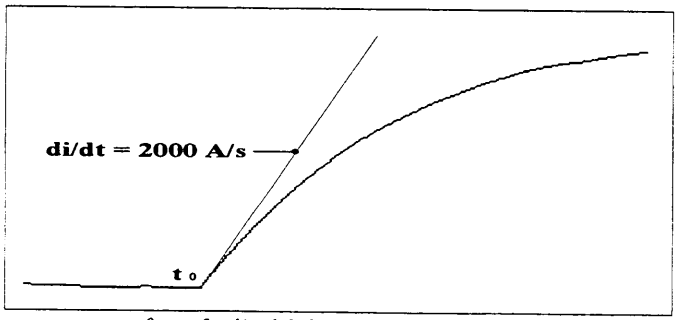

figure 5 : détail de la montée du courant en t_0

Tournez la page S.V.P.

A.2.1.1. A l'aide de ces relevés, montrer que le frottement visqueux est négligeable.

A.2.1.2. En se servant de points particuliers, déterminer la valeur des différents éléments de la motorisation (L, K_t, K_e, J, R et C_{sec}) pour compléter le schéma-bloc classique du moteur à courant continu (figure 6)

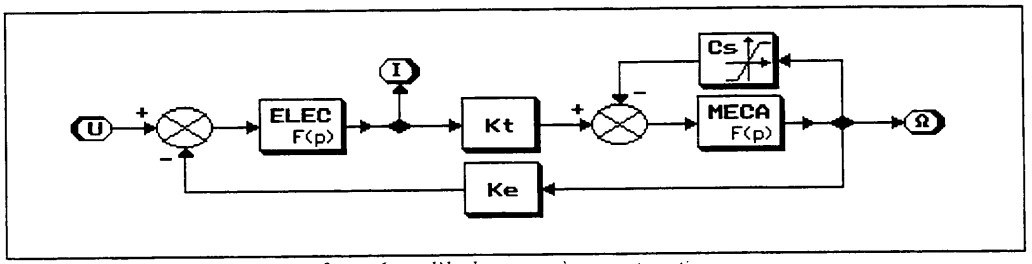

figure 6 :modèle du moteur à courant continu

A.2.1.3. Calculer la fonction de transfert $H1(p) = \dfrac{\Omega(p)}{U(p)}$ *en régime dynamique (on ne tient pas compte de Csec) en littéral puis en valeur numérique.*

A.2.1.4. Mettre H1(p) sous la forme d'un produit de deux premiers ordres :

$$\frac{A}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)}$$

Pour réaliser l'asservissement de vitesse du chariot, on propose le système suivant :

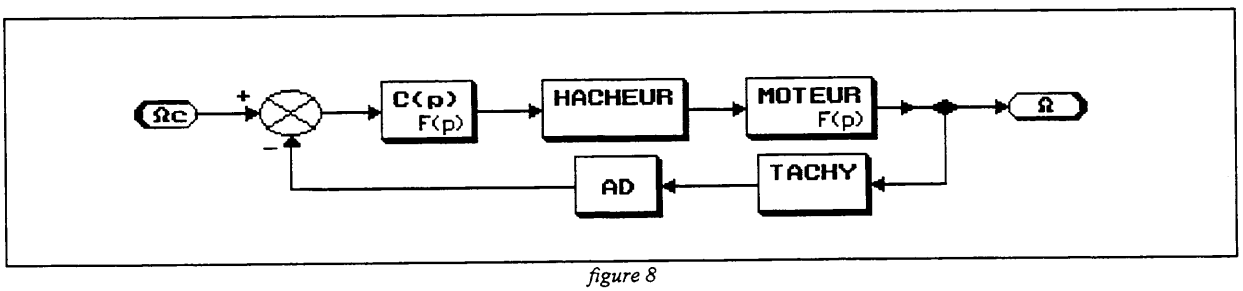

figure 8

Le hacheur est considéré comme un gain pur de **10 (20 dB),** la génératrice tachymétrique délivre **20 mV** par **tr/min**, on prend **MOTEUR (p)** = $\dfrac{4}{(1+0{,}004p)(1+0{,}040p)}$ et **AD = 0,2**.

A.2.1.5. On justifiera la valeur de 0,2 prise pour AD

<u>Réglage d'un correcteur proportionnel C(p) = C</u>

A.2.2.1. Tracer les diagrammes de Bode du système en boucle ouverte.

A.2.2.2. En déduire la marge de phase $M\varphi_1$ *du système.*

A.2.2.3. A quel gain C1 faut-il régler le correcteur C pour obtenir une marge de phase de 45°?

A.2.2.4. On règle C(p) à C2 = 10, que vaut l'erreur statique de position (en %) ?

A.2.2.5. A quelle valeur C3 faut-il régler C(p) pour abaisser l'erreur statique à 1 % ? Discuter le résultat en observant la nouvelle marge de phase.

Réglage d'un correcteur Proportionnel Intégral

On choisit de prendre $C(p) = C4(p) = \mathbf{K_4}\dfrac{1+\tau_4 p}{\tau_4 p}$,

A.2.3.1. Tracer rapidement les diagrammes asymptotiques de Bode de ce correcteur.

A.2.3.2. Pour placer C4(p), on remplace le pôle dominant du système par un pôle 0. Déterminer τ_4 et K_4 pour conserver une marge de phase de 45°.

A.2.3.3. Calculer alors l'erreur statique de positon pour une consigne Ωc = 1V (échelon).

A.2.3.4. Calculer l'erreur de traînage pour une consigne Ωc = 1V/s (rampe).

A.2.3.5. Calculer la valeur maximale de l'entrée rampe Ωc_{max} (en V/s) que l'on peut appliquer au système pour limiter le courant moteur à 30 A (on néglige Csec).

A.2.3.6. Proposer une structure de correcteur qui permette l'annulation de l'erreur de traînage.

A.2.3.7. Proposer un schéma de réalisation de C4(p) à l'aide d'un seul amplificateur opérationnel qui permette d'ajuster le gain sans modifier la constante de temps.

Tournez la page S.V.P.

Partie B

Cette partie traite de l'électronique de conditionnement des signaux capteur, depuis les bobines jusqu'à la quantification et le filtrage numérique. Une exploitation pédagogique du système technique est ensuite envisagée.

Présentation

Si le fil est parcouru par un courant $I_0 \, sin(\omega t)$ et que le chariot est à une distance Y, les bobines horizontale et verticale sont sièges de f.e.m respectivement :

$$e_h(Y,t) = E_h(Y) \cdot \sin\left(\omega t + \pi \cdot signe(Y)\right), \text{ avec } \begin{cases} signe(Y) = 0 \; si \; Y \geq 0 \\ signe(Y) = 1 \; si \; Y < 0 \end{cases}$$

$$e_v(Y,t) = E_v(Y) \cdot sin(\omega t)$$

Les allures de $E_h(Y) \cdot sin(\pi \cdot signe(Y))$ et $E_v(Y)$ pour $\frac{\omega}{2\pi} = 10 \; kHz$ sont données figure B1.

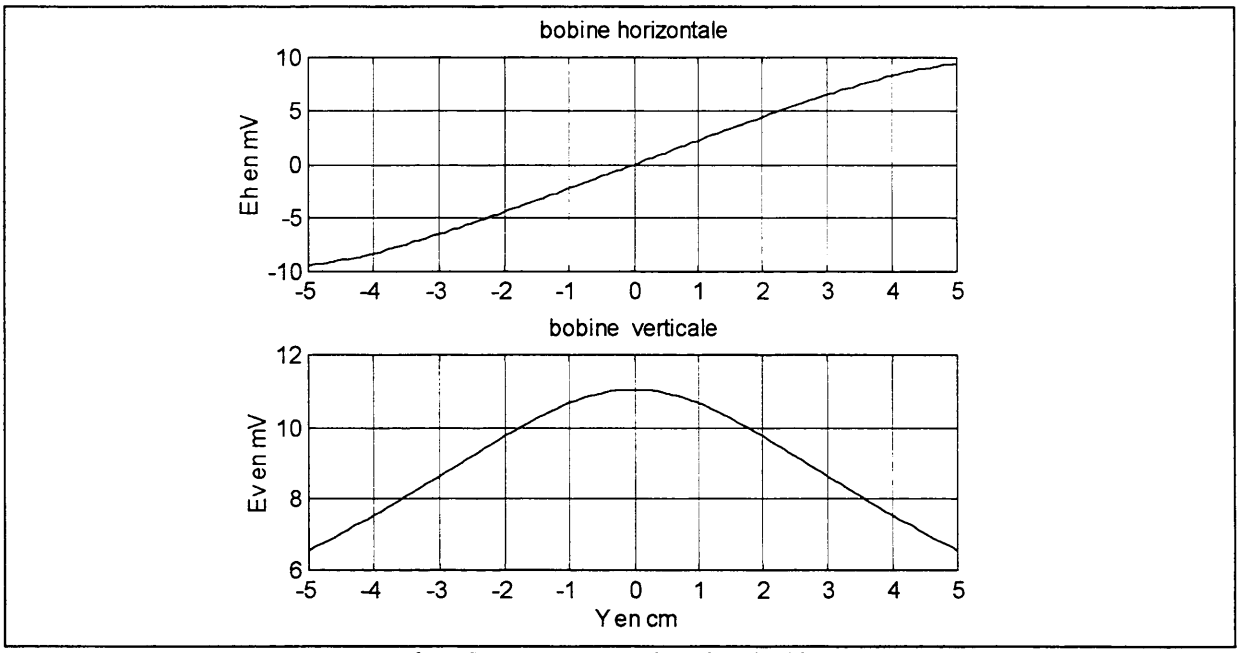

figure B1, pour un courant de guidage de 10 kHz

Pour pouvoir guider les chariots selon des trajectoires différentes, on utilise des fils directeurs différents, parcourus par des courants de fréquences différentes :

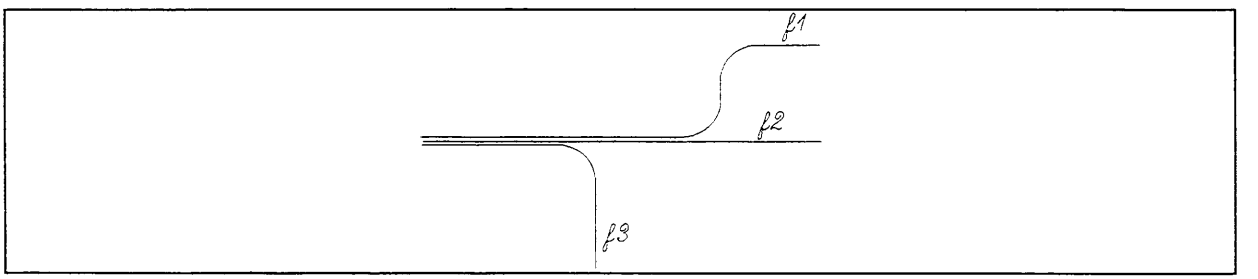

figure B2 : exemple de trajectoires

La sélection de la fréquence à suivre est transmise au chariot par télécommande. Six fréquences sont utilisées, réparties en progression géométrique entre 4,8 et 12 kHz :

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
4,8 kHz	5,8 kHz	6,9 kHz	8,3 kHz	10 kHz	12 kHz

Jusqu'à six fils directeurs peuvent être présents sous le capteur d'un chariot.

B.1 Etude de l'électronique de conditionnement

Le schéma structurel complet est donné en annexes sous l'appellation "carte de guidage". Les documentations techniques des circuits LM565 et LM1496 sont également en annexes. Plusieurs questions nécessitent de s'y référer.

La f.e.m de la bobine horizontale (correspondant à la composante verticale du champ) est appliquée au circuit référencé MN1 (LM1496). Celle de la bobine verticale (champ horizontal) est appliquée aux circuits MN9 (LM565) et MN4 (LM1496). Pour pouvoir se déplacer en marche avant ou arrière, le chariot dispose d'un jeu de deux capteurs, que l'on peut sélectionner par le biais d'inverseurs commandés par les relais K_1 et K_2. Le fonctionnement est parfaitement symétrique, et l'état de ces relais n'intervient pas.

B.1.1 Etude du principe du conditionnement

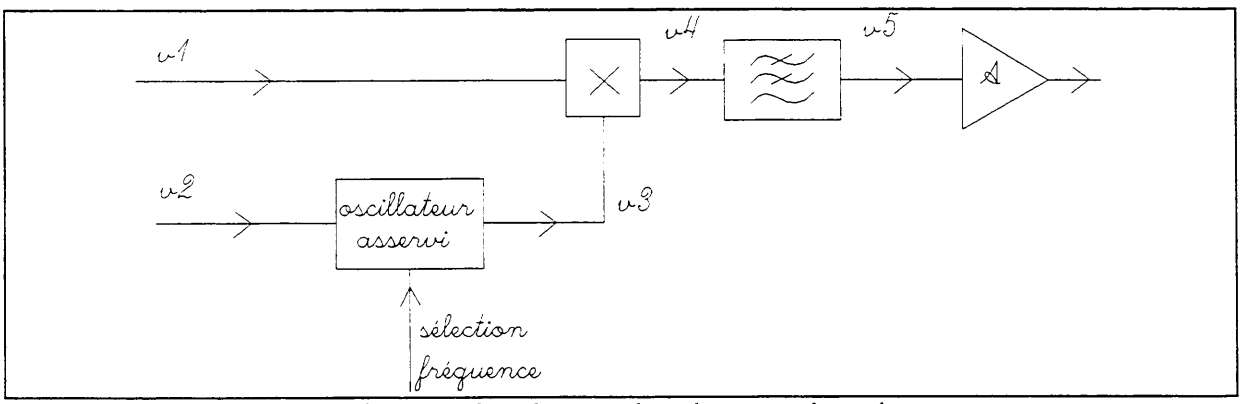

figure B3 : schéma de principe du conditionnement du signal

Le signal $v_1(t)$ provient de la bobine horizontale. Il vaut :

$$v_1(t) = \sum_{\substack{\text{fréquences} \\ \text{présentes}}} E_h(Y_i) \cdot \sin(\omega_i t + \pi \cdot signe(Y_i))$$

Le signal $v_2(t)$ provient de la bobine horizontale. Il vaut :

$$v_2(t) = \sum_{\substack{\text{fréquences} \\ \text{présentes}}} E_v(Y_i) \cdot \sin(\omega_i t)$$

Si la fréquence i est sélectionnée, on a $v_3(t) = E\sin(\omega_i t)$. Le multiplieur a un gain M.

B.1.1.1) Exprimer $v_4(t)$, sortie du multiplieur.

B.1.1.2) Exprimer v_5 si le filtre passe-bas élimine tout composante alternative.

Tournez la page S.V.P.

L'oscillateur asservi délivre en fait un signal carré centré de fréquence f_i d'amplitude E.

B.1.1.3) Exprimer $v_4(t)$ dans ces conditions.

B.1.1.4) Quelles sont les conditions sur les fréquences pour que l'on puisse avoir, après filtrage passe bas, v_5 proportionnelle à Y_i ? Justifier le choix de la plage de fréquences utilisée.

B.1.2 Etude de l'oscillateur asservi

Celui-ci est organisé autour de la boucle à verrouillage de phase (BVP) LM565.

B.1.2.1 étage d'entrée.

Une bobine a une inductance propre $L \approx 200\ mH$.

B.1.2.1.1) Donner le schéma équivalent de la bobine et de l'étage d'entrée du LM565.

B.1.2.1.2) Montrer qu'il est pratiquement équivalent à un filtre passe-bas du premier ordre dont on calculera la fréquence de coupure.

B.1.2.1.3) Quel est l'intéret de cette fréquence de coupure.

B.1.2.2 polarisation de l'oscillateur commandé en tension (OCT)

B.1.2.2.1) Indiquer le principe de sélection d'une fréquence centrale de l'OCT et calculer la résistance permettant d'obtenir une fréquence centrale de 8.3 kHz.

B.1.2.2.2) A partir de la documentation constructeur, déterminer la plage de poursuite de la boucle. Justifier le choix de la progression des fréquences.

B.1.2.3 modèle de la BVP

B.1.2.3.1) Donner le modèle de fonctionnement de la BVP en boucle fermée. A partir du schéma et de la documentation, déterminer la bande passante et le facteur d'amortissement.

B.1.2.3.2) Quel est le rôle de la structure organisée autour du comparateur LM339 ?

B.1.2.4 détection de présence du courant de guidage

On sélectionne la fréquence f_i. La fréquence centrale de l'OCT vaut $f_c = f_i + \Delta f_i$

B.1.2.4.1) Que valent la fréquence de l'OCT et la tension v_5, (définie figure B3), si le courant de fréquence f_i n'est pas présent sous le capteur ?

B.1.2.4.2) Même question si le courant de fréquence f_i est présent sous le capteur et si le chariot est à une distance $Y = 0$ du fil ?

B.1.2.4.3) Comment distinguer les 2 situations ?

B.1.3 Etude du multiplieur

La fonction multiplication est réalisée par le circuit LM1496N. Les extraits de schéma des figures 4 et 5 utilisent le même repérage (broches et transistors) que le schéma de la structure interne donnée dans la documentation technique. L'étude du circuit se fait ici dans son contexte, c'est à dire tel qu'il est câblé dans la "carte guidage".

On rappelle que, selon le modèle d'Ebers-Moll pour les transistors bipolaires, la relation entre le courant collecteur et la tension base-émetteur est donnée par :

$I_c = I_s e^{\frac{V_{be}}{U_t}}$ avec $I_s \approx 10^{-11}\ A$ et $U_t \approx 25\ mV$ à la température ambiante.

B.1.3.1) Pour un transistor parcouru par un courant de polarisation I_0, donner le gain en petites variations $\frac{\delta I_c}{\delta V_{be}}$.

B.1.3.2) Montrer que l'ensemble des transistors Q5 à Q9 est équivalent au schéma de la figure B4 et calculer I_0.

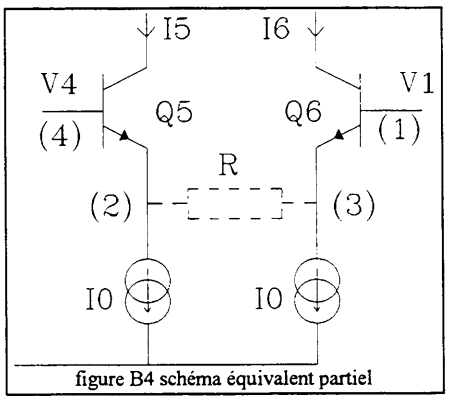

figure B4 schéma équivalent partiel

B.1.3.3) Etablir la relation :

$$\delta(I_5 - I_6) = f\left(\delta(V_4 - V_1)\right)$$

B.1.3.4) A partir du schéma de la figure B5, donner la relation :

$$\delta\left(I_{S_1} - I_{S_2}\right) = f\left(\delta(V_8 - V_{10}), \delta(I_5 - I_6)\right)$$

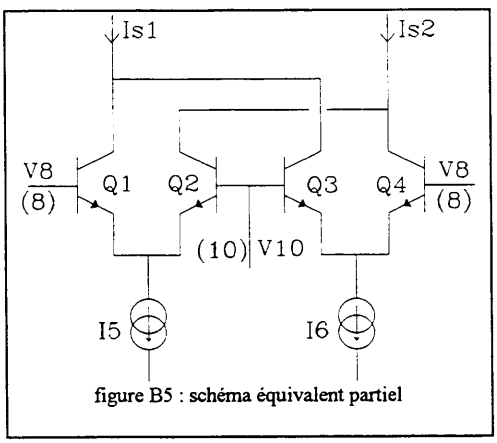

figure B5 : schéma équivalent partiel

L'oscillateur asservi fournit, en sortie du comparateur LM339, un signal carré d'amplitude 8 V crête à crête.

B.1.3.5) Etudier le circuit d'attaque du multiplieur et en déduire l'amplitude du signal $V_8 - V_{10}$.

Cette amplitude est incompatible avec la notion de "petits signaux".

B.1.3.6) Donner l'expression de $\delta\left(I_{S_1} - I_{S_2}\right)$ si l'on prend $V_8 - V_{10} = \pm 2\ V$

Compte tenu de la structure en sortie du multiplieur :

B.1.3.7) Calculer le gain du multiplieur vis à vis de $V_4 - V_1$

B.1.3.8) Calculer la fréquence de coupure du filtre.

B.1.3.9) Calculer le gain de la chaîne totale de démodulation du signal fourni par la bobine horizontale.

Tournez la page S.V.P.

La structure est identique pour la démodulation du signal fourni par la bobine verticale, sauf pour le gain de l'amplificateur final..

B.1.3.10) Déterminer la distance au fil à partir de laquelle le signal de guidage sera décrété absent.

B.2 influence du bruit, échantillonnage et filtrage numérique

Les bobines du capteur étant de surface relativement importante et l'environnement particulièrement pollué , elles captent un ensemble de perturbations électromagnétiques importantes, à spectre large. On considère ici qu'elles sont le siège d'une f.e.m de bruit blanc de densité de puissance monolatérale qui peut atteindre $5 \cdot 10^{-11}\ V^2/Hz$.

B.2.1 Rapport signal à bruit

On rappelle que si un filtre de fonction de transfert $H(f)$ et attaqué par un bruit de densité spectrale de puissance $N(f)$, la densité spectrale de puissance en sortie est $N(f) \cdot |H(f)|^2$. En présence d'un bruit blanc de densité monolatérale N_0, la bande équivalente de bruit d'un filtre, B_{eq}, est définie par :

$$N_0 \cdot B_{eq} = \int_0^\infty N_0 \cdot |H(f)|^2 \, df$$

B.2.1.1) Calculer la bande équivalente de bruit d'un filtre passe-bas du premier ordre de fréquence de coupure f_C.

Le chariot est à 3 cm du fil. Le courant de guidage a une fréquence de 10 kHz. On considère que les fréquences de coupure des filtres du premier ordre placés en entrée et sortie du circuit multiplieur sont respectivement de 3,9 kHz et 100 Hz. On admet que le signal provenant de l'oscillateur asservi n'apporte pas un bruit significatif.

B.2.1.2) Calculer le rapport signal à bruit en entrée du circuit multiplieur.

B.2.1.3) Calculer la valeur efficace du bruit en sortie de la chaîne de démodulation.

B.2.2 échantillonnage et quantification

Une partie des fonctions de guidage étant assuré par un calculateur numérique, la tension image de la position est quantifiée par un convertisseur analogique-numérique de pleine échelle $\pm 10 V$.

B.2.2.1) Rappeler l'expression du bruit de quantification d'un convertisseur analogique numérique fonctionnant par arrondi.

B.2.2.2) Quelle doit être la bande équivalente de bruit du filtrage à réaliser pour ramener le niveau du bruit d'origine électromagnétique à celui du bruit de quantification d'un convertisseur 8 bits.

On choisit de réaliser un filtre numérique de bande équivalente de bruit de 10 Hz, dite bande utile. Le signal est quantifié avec un convertisseur 10 bits. Le bruit de quantification est

donc négligeable. On prend un échantillon tout les T_e. L'échantillon pris à l'instant nT_e est noté $y(n)$.

L'échantillonnage va provoquer un repliement du bruit dans la bande utile. Le filtre de sortie du multiplieur sert de filtre anti-repliement.

B.2.2.3) Quelles sont les bandes de fréquences qui seront repliées dans la bande utile.

B.2.2.4) Quel est le critère qui doit permettre de fixer la fréquence d'échantillonnage ?

On ne considère que la première bande repliée.

B.2.2.5) Calculer la puissance de bruit repliée dans la bande utile pour f_e=7.2 kHz

B.2.3 Filtrage numérique

On se propose de réaliser un filtrage par moyennage :

$$s(n)=\frac{1}{N}\left(y(n)+y(n-1)+\cdots+y(n-N+1)\right)$$

B.2.3.1) Donner la fonction de transfert M(z) de ce filtre. Exprimer M(z) sous forme d'une fraction rationnelle en z.

Pour étudier le filtre dans le domaine fréquentiel, on remplace z par $e^{j\omega T_e}$.

B.2.3.2) Montrer que $\left|M(j\omega)\right|=\left|M(z)_{z=e^{j\omega T_e}}\right|=\frac{1}{N}\frac{\sin\left(\frac{N\omega T_e}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T_e}{2}\right)}$

La bande équivalente de bruit d'un tel filtre est $\frac{f_e}{2N}$

B.2.3.3) Calculer le nombre d'échantillons à prendre pour réaliser le filtre souhaité.

Tournez la page S.V.P.

Partie C

Application pédagogique

La détection synchrone, pour la mesure en présence de bruit de l'amplitude et de la phase d'une porteuse est une fonction essentielle du système que constitue le chariot filoguidé. Celui-ci peut donc être le support d'un processus d'apprentissage de la fonction "DETECTION SYNCHRONE" dans les classes de brevet de technicien supérieur ou de diplôme universitaire de technologie en électronique.

Donner de façon succincte le déroulement de séquences constituant le processus d'apprentissage, en spécifiant leurs objectifs pédagogiques ainsi que leur contenu.