



Correction DS 7 - SI

Consignes

- Copies propres et bien présentées: encadrer vos résultats, souligner les applications numériques (avec une règle bien sûr)...
- Uniquement la calculatrice est autorisée.
- Les exercices sont indépendants.
- Ne pas oublier de rendre les Documents Réponses (DR), avec vos noms dessus. Même s'ils ne sont pas remplis.

Attention, la numérotation des questions est indépendante pour chaque exercice, prenez soin de signaler de quel exercice il s'agit.

Lève vitre

Mesure de la position de la vitre

Q1. Quels sont les intérêts d'utiliser deux capteurs à effet Hall placés en quadrature ?

Le fait de mettre **deux capteurs** permet de **doubler la précision**.

Le fait de les mettre en **quadrature** permet de **connaître le sens de rotation**. En effet, si on nomme A et B les capteurs, dans un sens on aura le front montant de A puis le front montant de B. Dans l'autre sens l'ordre s'inverse.

Q2. Déterminer le plus petit déplacement de la vitre en mm qu'il est possible de mesurer avec ce capteur.

On a

$$v = r \cdot \omega$$

Par intégration, en notant d la distance, θ l'angle moteur, en supposant la vitesse constante et en prenant des conditions initiales nulles, il vient

$$d = r \cdot \theta$$

Donc pour 1/8 de tour

$$d = r \cdot \frac{\pi}{4} \quad \text{AN } d \approx 0,31 \text{ mm}$$

Q3. En prenant une raideur d'obstacle $k = 20 \text{ N/mm}$ correspondant à la dernière phalange de l'auriculaire, combien d'impulsions auront été comptées à partir du moment où la phalange commence à être écrasée jusqu'à ce que l'effort dans la phalange soit de 50 N (diagramme des exigences, figure 1) ? Commenter ce résultat.

Pour passer de 0 N à 50 N avec une raideur de $k = 20 \text{ N/mm}$, il faut parcourir une distance

$$d = \frac{50}{k} = 2,5 \text{ mm}$$

Le nombre d'impulsion est alors

$$N = 2,5 * \frac{4}{r \cdot \pi} \approx 8,16 \text{ imp}$$

Ce nombre étant supérieur à 1, on peut détecter l'écrasement avant d'arriver à 50 N.

Analyse de la qualité de la mesure de la vitesse

Q4. En supposant que le moteur tourne parfaitement à la vitesse nominale de 300 rad/s, déterminer le nombre d'impulsions moyen N_{moy} mesuré à chaque période d'échantillonnage.

Pour une vitesse constante ω , l'angle θ parcourue pendant le temps d'échantillonnage T_e est

$$\theta = \omega * T_e$$

Comme la précision est de 1/8 de tour, on a

$$N_{moy} * \frac{\pi}{4} = \omega * T_e$$

$$N_{moy} = \frac{4 * \omega * T_e}{\pi} \quad \text{AN: } N_{moy} = 3,82 \text{ imp}$$

Q5. Déterminer les deux valeurs extrêmes de rotation du moteur en tours/min.

D'après la question précédente

$$N \in \llbracket 3,4 \rrbracket$$

Et

$$\omega(\text{rad. s}^{-1}) = \frac{N\pi}{4T_e}$$

$$\omega \in [235, 314] \text{ (en rad. s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega(\text{tr. Min}^{-1}) = \frac{N\pi}{4T_e} * \frac{60}{2\pi} = \frac{30N}{4T_e}$$

Donc

$$\omega \in [2250, 3000] \text{ (en tr. Min}^{-1}\text{)}$$

Q6. Conclure quant à la pertinence de l'utilisation de la variation de la vitesse pour obtenir un résultat fiable pour la détection. Au vu de la simulation figure 4 ci-dessous, commenter également l'hypothèse de vitesse constante avant détection d'obstacle.

On remarque sur la courbe que la écart entre la vitesse sans effort et la vitesse avec effort est supérieur à 100 rad. s^{-1}

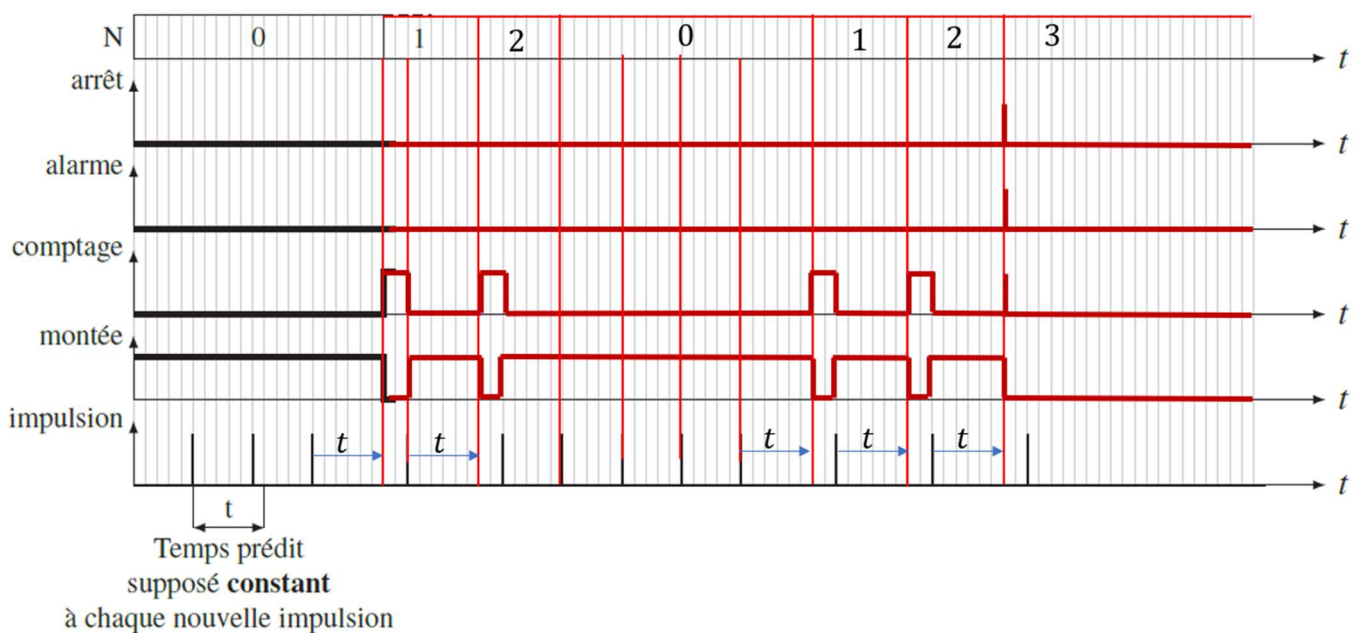
Mise en place de l'algorithme de commande

Q7. Donner l'expression des deux conditions notées « transition 1 » et « transition 2 » permettant de passer de l'état montée à l'état arrêt directement.

La question qui se pose est de savoir, en fonctionnement normal, si il n'y a pas d'obstacle, pourquoi la vitre s'arrête ? La réponse est :

1. Elle arrive en bout de course : **transition 1 = fin course haut**
2. Le conducteur arrête la vitre en appuyant sur le bouton de commande : **transition 2 : appui bouton**

Q8. Compléter le chronogramme du document réponse (page suivante) en indiquant par des créneaux les durées pendant lesquelles un état est activé et l'évolution du contenu de la variable N. La durée de l'alarme et de l'arrêt est supposée très faible et sera représentée par un dirac (une impulsion).



Lanceur de rouleau

Q1. On suppose qu'au démarrage le rouleau 1 est en équilibre statique, sous l'action des efforts \vec{F}_{41} , \vec{F}_{01} et du couple $\vec{C}_r = C_r \vec{z}$. En posant $\vec{F}_{41} = F_{41}^T \vec{x} + F_{41}^N \vec{y}$, donner l'expression de la composante tangentielle F_{41}^T (doc 2). Faire l'application numérique.

On isole le rouleau 1. Le PFS s'écrit

$$\{T_{0 \rightarrow 1}\} + \{T_{res \rightarrow 1}\} + \{T_{4 \rightarrow 1}\} = \{0\}$$

On applique le TMS en A sur \vec{z}

$$\underbrace{\vec{M}_A(0 \rightarrow 1)}_0 \cdot \vec{z} + C_r + \vec{M}_A(4 \rightarrow 1) \cdot \vec{z} = 0$$

$$C_r + \underbrace{\vec{M}_E(4 \rightarrow 1)}_0 \cdot \vec{z} + (\overline{AE} \wedge \vec{F}_{41}) \cdot \vec{z} = 0$$

$$C_r + (R\vec{y} \wedge (F_{41}^T \vec{x} + F_{41}^N \vec{y})) \cdot \vec{z} = 0$$

$$C_r = RF_{41}^T$$

Donc

$$F_{41}^T = \frac{C_r}{R_{max}} ; \text{AN} : F_{41}^T = -293 \text{ N}$$

Q2. Sachant que le coefficient de frottement entre le rouleau 1 et la courroie 4 vaut $f = 0.58$, déterminer l'expression de la composante normale F_{41}^N .

Si on se place à la limite du glissement, on a en norme

$$F_{41}^T = f F_{41}^N$$

Donc

$$F_{41}^N = \frac{F_{41}^T}{f} ; \text{AN} F_{41}^N = 508 \text{ N}$$

Q3. En supposant que L est la largeur de la courroie et que la répartition de pression p_1 entre la courroie 4 et le rouleau 1 est uniforme, déterminer l'expression de F_{41}^N en fonction de p_1 , β , L et R_{max} (doc 5).

F_{41}^N est la résultante des forces de pression sur le rouleaux donc

$$F_{41}^N = L \int_{-\frac{\beta}{2}}^{\frac{\beta}{2}} d\vec{F}_{41}^N \cdot \vec{y} = -L \int_{-\frac{\beta}{2}}^{\frac{\beta}{2}} p_1 R \vec{n} \cdot \vec{y} d\psi = -L \int_{-\frac{\beta}{2}}^{\frac{\beta}{2}} p_1 R \cdot \cos \psi d\psi$$

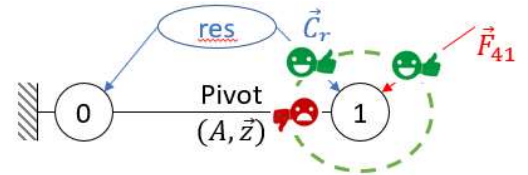
$$F_{41}^N = -2LRp_1 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Pour les questions suivantes, on prendra $F_{41}^T = -300 \text{ N}$ et $F_{41}^N = -500 \text{ N}$.

Q4. En prenant $\beta = 30^\circ$, calculer la largeur L de la courroie, pour que la pression de contact p_1 ne dépasse pas $1 \text{ daN} \cdot \text{cm}^{-2}$.

D'après Q3... attention aux unités

$$L = -\frac{F_{41}^N}{2Rp_1 \sin\frac{\beta}{2}} ; L_{min} = 1,6 \text{ cm}$$



Q5. En précisant le système isolé, exprimer la norme F_{65} de l'effort de la tige 6 sur le carter 5. Faire une application numérique.

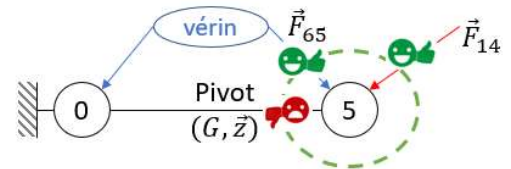
On a un vérin (6+7). En hypothèse de système plan, les pivots en H et F correspondent à des forces. On a donc un système soumis à 2 forces. L'action de 6 → 5 peut être modélisé par le torseur

$$\{T_{6 \rightarrow 5}\}_F = \begin{cases} \vec{F}_{65} = F_{65} \frac{\overrightarrow{FH}}{\|\overrightarrow{FH}\|} = F_{65} \frac{c\vec{x} + d\vec{y}}{\sqrt{c^2 + d^2}} \\ \vec{0} \end{cases}$$

On isole 5 et on applique le TMS en G sur \vec{z}

$$\underbrace{\vec{M}_G(0 \rightarrow 5)}_0 \cdot \vec{z} + \vec{M}_G(6 \rightarrow 5) \cdot \vec{z} - \vec{M}_G(4 \rightarrow 1) \cdot \vec{z} = 0$$

$$(\overrightarrow{GF} \wedge \vec{F}_{65}) \cdot \vec{z} - (\overrightarrow{GE} \wedge \vec{F}_{41}) \cdot \vec{z} = 0$$



$$\left((a\vec{x} + b\vec{y}) \wedge F_{65} \frac{c\vec{x} + d\vec{y}}{\sqrt{c^2 + d^2}} \right) \cdot \vec{z} - ((\delta\vec{x} + \gamma\vec{y}) \wedge (F_{41}^T\vec{x} + F_{41}^N\vec{y})) \cdot \vec{z} = 0$$

$$F_{65} \frac{(ad - bc)}{\sqrt{c^2 + d^2}} - (\delta F_{41}^N - \gamma F_{41}^T) = 0$$

$$F_{65} = \frac{\sqrt{c^2 + d^2}}{(ad - bc)} (\delta F_{41}^N - \gamma F_{41}^T) ; \text{ AN } F_{65} = -980 \text{ N}$$

Q6. Sachant que la pression d'huile p_H est de 6 bars, calculer la section utile S_u du vérin.

On a

$$F_{65} = S_u p_H$$

Donc

$$S_u = \frac{F_{65}}{p_H} ; \text{ AN } S_u = 1630 \text{ mm}^2$$

1. Commande en position d'un robot porte-sonde

1.1 Mise en situation

Grâce à la télé-échographie robotisée, il devient possible de réaliser une échographie sur un patient situé sur un site isolé (appelé site patient, **(a)** de la Figure 1), alors même que le spécialiste en imagerie médicale se trouve sur un site distant de celui où est pratiqué l'examen (appelé site expert, **(b)** de la Figure 1).



FIGURE 1 – Principe de la télé-échographie

La Figure 2 décrit le robot porte-sonde constitué :

- d'une structure porteuse 0;
- d'un module de rotation, composé des sous-ensembles 1, 2 et 3, permettant d'orienter la sonde en lui imposant trois rotations suivant les axes 1 à 3;
- du porte-sonde 4 sur lequel est fixé la sonde échographique S. La translation suivant l'axe 4 permet de contrôler l'effort de contact sonde/peau du patient.

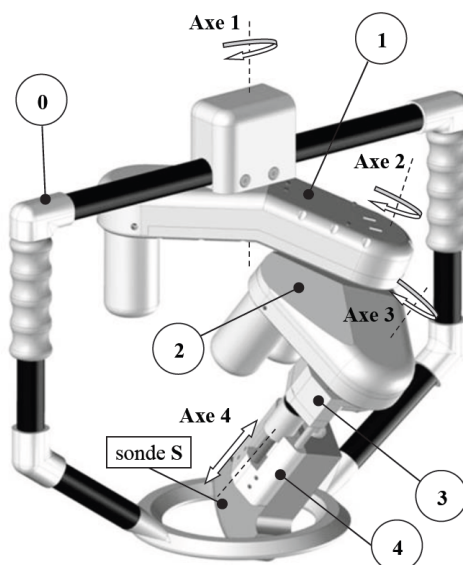


FIGURE 2 – Robot porte-sonde

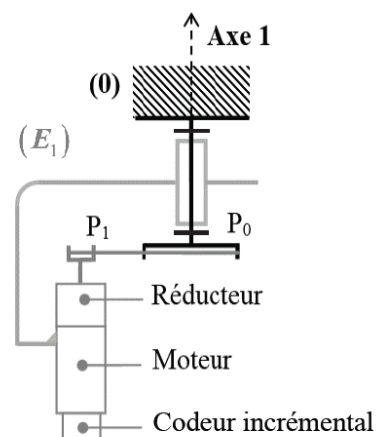


FIGURE 3 – Chaîne cinématique associée à l'axe 1

1.2 Commande en position du robot porte-sonde

On se limite ici à l'étude de la commande du premier axe, dont la structure est présentée en Figure 3. Le principe associé à cette commande est décrit par la Figure 4. La structure de commande de la position angulaire θ_1 est composée de deux boucles imbriquées disposant chacune d'un réseau correcteur :

- une boucle interne de vitesse, gérée par le variateur ;
- une boucle externe de position, gérée par la carte d'axes.

Un codeur incrémental, solidaire de l'axe moteur permet après traitement numérique d'obtenir une image de la position angulaire θ_1 et de la vitesse angulaire ω_1 de l'axe 1, grandeurs mises en oeuvre au niveau des deux boucles d'asservissement. La consigne de position est élaborée par la carte d'axes, par intégration du profil de vitesse généré.

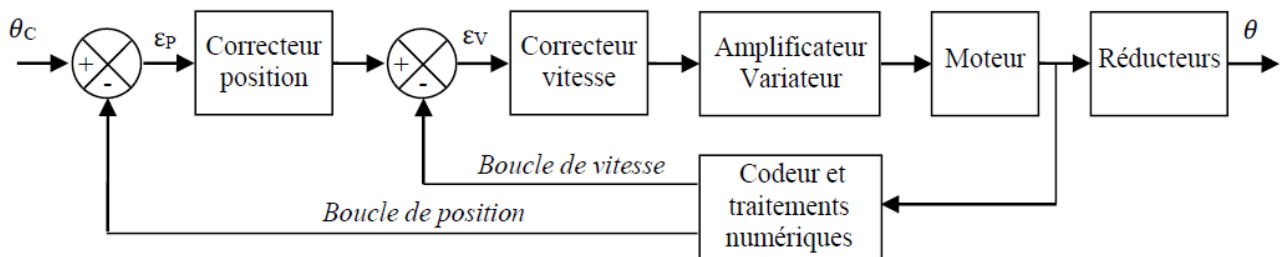


FIGURE 4 – Structure de l'asservissement d'un axe

1.2.a Modélisation de l'axe 1

L'objectif est d'élaborer un modèle de connaissance de l'axe 1 et de réaliser la synthèse de la commande.

Modélisation de la motorisation

La motorisation de l'axe 1 est réalisée à l'aide d'un moteur électrique à courant continu et aimants permanents, dont le comportement peut être modélisé par les équations suivantes :

$$u_m(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad e(t) = k_e \omega_m(t)$$

$$J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) \quad C_m(t) = k_c i(t)$$

Avec :

$u_m(t)$: tension aux bornes du moteur (en V)

$e(t)$: force contre-électromotrice (en V)

$i(t)$: intensité (en A)

$\omega_m(t)$: vitesse de rotation du moteur (en rad/s)

$C_m(t)$: couple moteur (en Nm)

$C_r(t)$: le couple résistant (perturbation) (en Nm)

J_{eq} : inertie équivalente en rotation de l'arbre moteur ($8,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$)

R : résistance électrique du moteur ($4,1 \Omega$)

k_e : constante de force contre-électromotrice ($1,6 \cdot 10^{-2} \text{ V/(rad/s)}$)

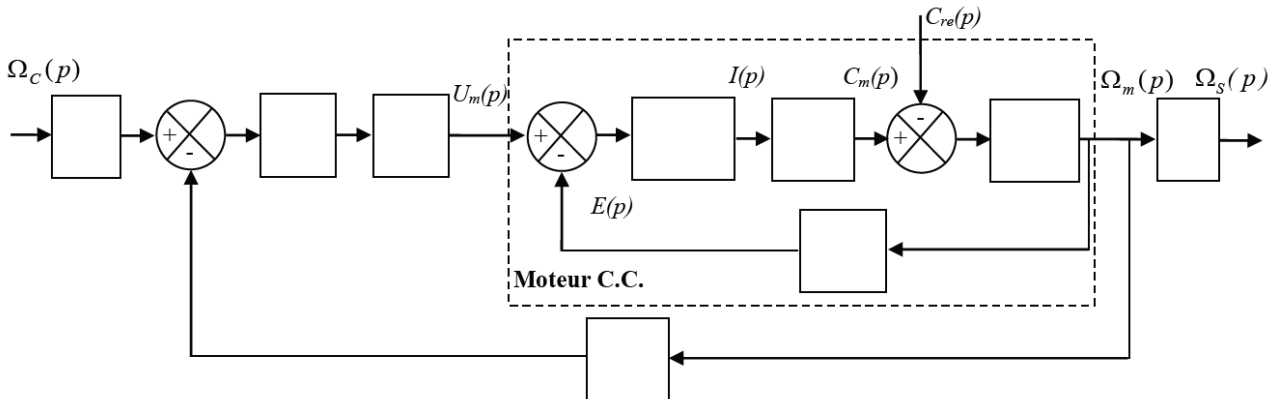
k_c : constante de couple ($1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Nm/A}$)

L : inductance de l'induit ($0,18 \text{ mH}$)

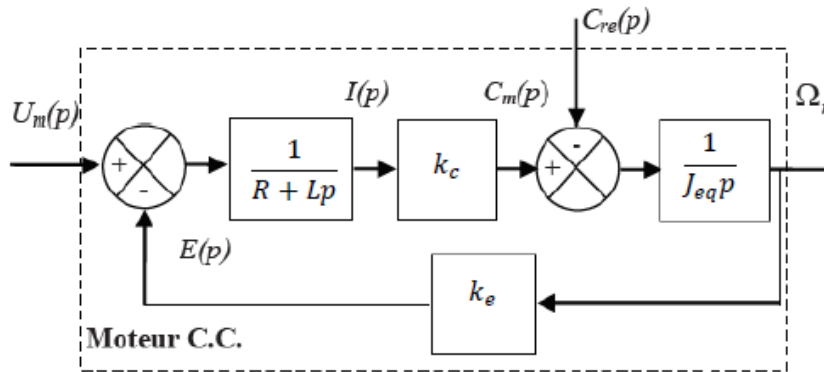
Question 1: Passer les équations précédentes dans le domaine de Laplace, on considère les conditions initiales nulles.

Réponse 1: $U_m(p) = E(p) + RI(p) + LpI(p)$
 $E(p) = k_e \Omega_m(p)$
 $J_{eq} p \Omega_m(p) = C_m(p) - C_r(p)$
 $C_m(p) = k_c I(p)$

On donne le schéma-bloc incomplet suivant :



Question 2: Compléter la partie *Moteur C.C.* de ce schéma-bloc dans les documents réponses. Recopier le sur votre copie ou penser à détacher les documents réponses et les rendre avec votre copie.



Réponse 2:

Question 3: Déterminer les expressions littérales des fonctions de transfert

$H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)}$ quand $C_r(p) = 0$, et $H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)}$ quand $U_m(p) = 0$, sous forme canonique.

Réponse 3: Pour $C_r(p) = 0$, la formule de Black donne :

$$\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{\frac{k_c}{(R + Lp)J_{eq}p}}{1 + \frac{k_c k_e}{(R + Lp)J_{eq}p}}$$

$$H_1(p) = \frac{1}{k_e} \frac{1}{1 + \frac{J_{eq}R}{k_c k_e} p + \frac{J_{eq}L}{k_c k_e} p^2}$$

Pour $U_m(p) = 0$:

$$\frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)} = \frac{-\frac{1}{J_{eq}p}}{1 + \frac{k_c k_e}{(R + Lp)J_{eq}p}}$$

$$H_2(p) = -\frac{R}{k_c k_e} \frac{1 + \frac{L}{R} p}{1 + \frac{J_{eq}R}{k_c k_e} p + \frac{J_{eq}L}{k_c k_e} p^2}$$

On pose $\tau_e = \frac{L}{R}$ et $\tau_m = \frac{J_{eq}R}{k_c k_e}$, respectivement constantes de temps électrique et électromécanique du moteur à courant continu.

Question 4: Déterminer les valeurs numériques des constantes de temps τ_e et τ_m . Une constante de temps peut-elle être négligée devant l'autre ?

Réponse 4: L'application numérique donne $\tau_e = 4,4 \cdot 10^{-5} s$ et $\tau_m = 0,14 s$.

On remarque que $\tau_e \ll \tau_m$, on peut alors négliger τ_e devant τ_m .

Question 5: Montrer, en précisant l'expression de K_m , que $H_1(p)$ peut être simplifiée par :

$$H_1(p) = \frac{K_m}{(1 + \tau_e p)(1 + \tau_m p)}$$

Réponse 5: En développant l'expression souhaitée de $H_1(p)$:

$$H_1(p) = \frac{K_m}{1 + \tau_e p + \tau_m p + \tau_m \tau_e p^2}$$

On peut alors négliger τ_e devant τ_m et en remplaçant, il vient :

$$H_1(p) = \frac{1}{k_e} \frac{1}{1 + \frac{J_{eq}R}{k_c k_e} p + \frac{J_{eq}L}{k_c k_e} p^2}, \text{ on en déduit } \boxed{K_m = \frac{1}{k_e}}.$$

Modélisation de la boucle de vitesse

La Figure 5 présente la structure de la boucle de vitesse associée à la commande de l'axe 1.

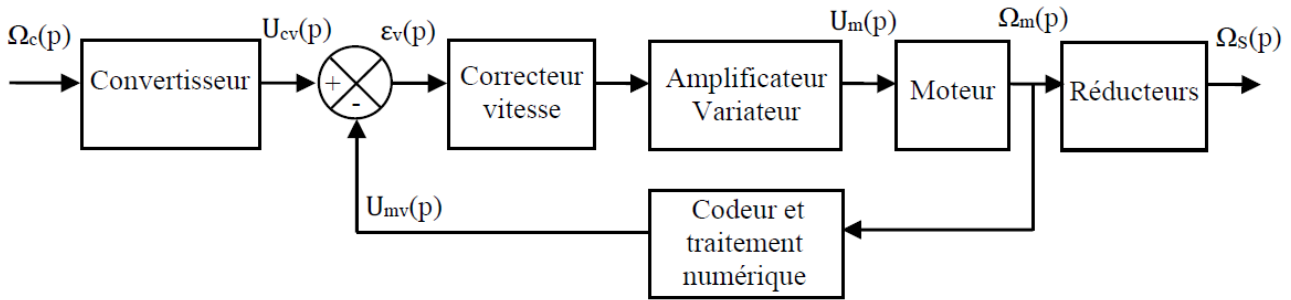


FIGURE 5 – Asservissement en vitesse d'un axe

On donne les notations suivantes pour les gains des différents composants intervenant dans la commande de l'axe 1 :

- Convertisseur : K_{conv} ;
- Correcteur vitesse : $C_v(p)$;
- Amplificateur/variateur : $K_A = 9,4$;
- Codeur et traitement : $K_{vit} = 8,3 \cdot 10^{-3} V / (rad/s)$;
- Réducteurs : K_r ;

La partie "réducteurs" est composée d'un réducteur à train simple ainsi que d'un système de poulie. La poulie P_0 a pour diamètre $D_0 = 42mm$ et la poulie P_1 a pour diamètre $D_1 = 13mm$. Le réducteur à engrenage est quant à lui présenté sur la Figure 6.

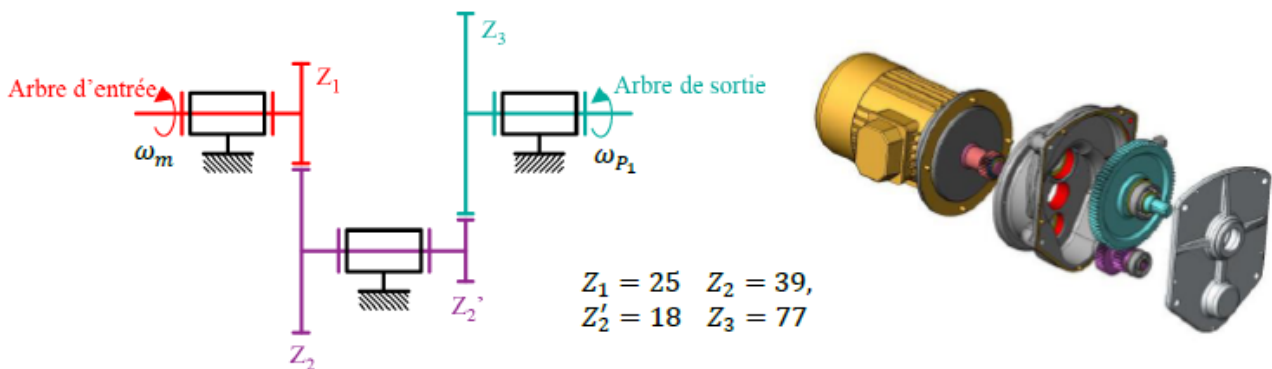


FIGURE 6 – Réducteur à engrenage du moteur

Question 6: Déterminer les rapports de réduction $r_e = \frac{\omega_{P1/0}}{\omega_{m/0}}$ du train d'engrenage et

$r_p = \frac{\omega_{P1/0}}{\omega_{P0/0}}$ des poulies et en déduire l'expression et la valeur numérique de K_r .

Réponse 6: Il s'agit d'un train simple, ainsi il vient directement :

$$r_e = \frac{\omega_{P_1/0}}{\omega_{m/0}} = (-1)^2 \frac{Z_1 Z'_2}{Z_2 Z_3} \text{ soit } r_e = \frac{Z_1 Z'_2}{Z_2 Z_3} = 0,15.$$

$$\text{On a } \omega_{P_1/0} D_1 = \omega_{P_0/0} D_0 \text{ soit } r_p = \frac{D_0}{D_1} = 3,2.$$

Le gain K_r vaut $\frac{\Omega_s}{\Omega_m}$, on en déduit $K_r = \frac{\omega_{P_0/0}}{\omega_{m/0}}$, à partir des deux relations précédentes, il vient

$$K_r = \frac{r_e}{r_p} = 4,6 \cdot 10^{-2}.$$

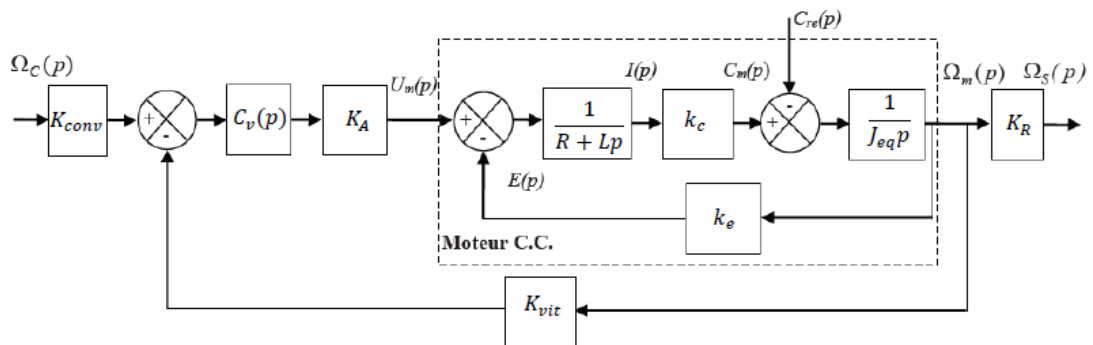
Question 7: Déterminer l'expression du gain K_{conv} ainsi que sa valeur numérique et unité associée.

Réponse 7: Pour que le système soit correctement asservi, il faut que $\epsilon_v(p) = 0$ lorsque que l'entrée est égale à la sortie, c'est à dire $\Omega_c(p) = \Omega_s(p)$. Or :

$$\epsilon_v(p) = K_{conv} \Omega_c(p) - K_{vit} \Omega_m(p) = K_{conv} \Omega_c(p) - \frac{K_{vit}}{K_r} \Omega_m(p)$$

$$\text{On en déduit } K_{conv} = \frac{K_{vit}}{K_r} = 0,18 \text{ V.s.rad}^{-1}.$$

Question 8: Compléter le schéma-bloc à trous précédent en y faisant figurer les fonctions de transfert sous forme littérale dans le domaine de Laplace avec des conditions initiales nulles.



Réponse 8:

On pourrait montrer que le schéma-bloc peut se ramener au schéma à retour unitaire de la Figure 7, avec $G_1(p) = \frac{k_c}{R} \frac{1}{1 + \tau_e p}$, $G_2(p) = \frac{R}{k_c} \frac{1}{1 + \tau_m p}$ et $K = K_{vit} K_A K_m$.

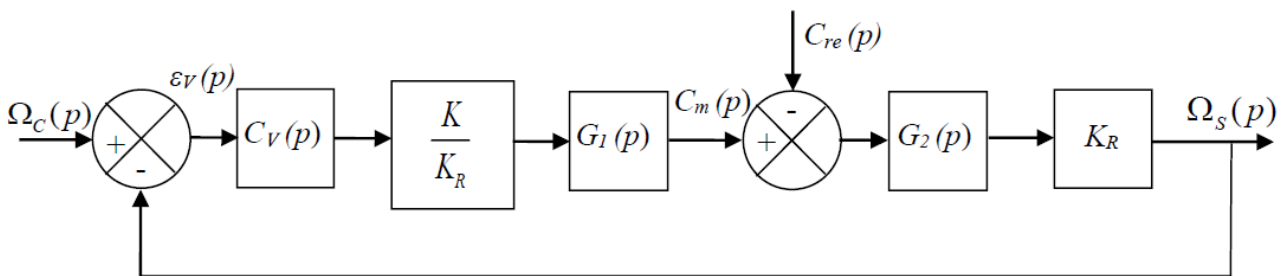


FIGURE 7 – Schéma-bloc équivalent pour la boucle de vitesse

Pour la suite nous prendrons $\tau_m = 0,14s$, $\tau_e = 10^{-4}s$ et $K = 4,9$.

Question 9: A partir du schéma-bloc à retour unitaire de la Figure 7, déterminer l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p) = \frac{\Omega_s(p)}{\epsilon_V(p)}$ en fonction de $C_v(p)$, τ_e , τ_m et K . On considère $C_{re}(p) = 0$.

Réponse 9: Il suffit de multiplier tous les blocs de la chaîne directe :

$$H_{BO}(p) = \frac{C_v(p)K}{(1 + \tau_e p)(1 + \tau_m p)}.$$

1.2.b Synthèse de la commande : boucle de vitesse

Le système est considéré en l'absence de perturbation (étude en suivi de consigne). Le correcteur de la boucle de vitesse est un correcteur Proportionnel Intégral, de fonction de transfert :

$$C_V(p) = K_i \frac{1 + \tau_m p}{\tau_m p}$$

Question 10: Déterminer, en fonction des paramètres K_i , τ_e , τ_m et K , l'expression littérale de la fonction de transfert en vitesse sous la forme canonique d'un système du second ordre. Préciser la valeur de K_v , le gain de cette fonction, et les expressions littérales du taux d'amortissement ξ et de la pulsation propre ω_0 .

Réponse 10: A partir de la réponse à la question précédente, ou en considérant la chaîne directe de la Figure 7 :

$$H_{BO}(p) = \frac{K}{(1 + \tau_e p)(1 + \tau_m p)} K_i \frac{1 + \tau_m p}{\tau_m p} = \frac{K K_i}{(1 + \tau_e p) \tau_m p}$$

La fonction de transfert en vitesse correspond à la fonction de transfert en boucle fermée, d'où :

$$H_v(p) = \frac{H_{BO}(p)}{1 + H_{BO}(p)} = \frac{K K_i}{(1 + \tau_e p) \tau_m + K K_i}$$

$$\text{Ainsi } H_v(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_m}{K K_i} p + \frac{\tau_m \tau_e}{K K_i} p^2}.$$

$$\text{On en déduit } K_v = 1, \omega_0 = \sqrt{\frac{K K_i}{\tau_m \tau_e}} \text{ et } \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_m}{K K_i \tau_e}}.$$

Le gain K_i du correcteur est fixé de manière à obtenir la réponse la plus rapide sans dépassement en boucle fermée. On rappelle que pour un modèle du second ordre, la réponse la plus rapide sans dépassement est obtenue pour un facteur d'amortissement $\xi = 1$, valeur pour laquelle on a $t_{5\%} \omega_0 = 5$.

Question 11: Déterminer l'expression de K_i ainsi que sa valeur numérique. Déterminer la valeur du temps de réponse $t_{5\%}$ de la boucle de vitesse pour cette valeur de K_i .

Réponse 11: Pour $\xi = 1$, il vient $K_i = \frac{\tau_m}{4K\tau_e} \underline{71}$.

Ainsi $\omega_0 = 5.10^3 \text{ rad.s}^{-1}$. On en déduit $t_{5\%} 5.10^3 = 5 \underline{1 \text{ ms}}$.