

Système d'ouverture de porte de TGV

■ Objet de l'étude

Le transport ferroviaire, concurrencé par la voiture sur les courtes et moyennes distances et par l'avion sur les longues distances, a dû trouver des solutions adaptées pour continuer à croître. Avec le développement du train à grande vitesse, les caractéristiques du marché du transport ferroviaire de voyageurs se sont rapprochées de celles du transport aérien.



Les performances du TGV (vitesse, confort, proximité des gares) ont conduit à un essor important du trafic de voyageurs. Les opérateurs ferroviaires ont dû par conséquent adapter le cahier des charges de leurs équipements pour faire face à cette demande accrue. Le matériel voyageur a ainsi subi une évolution et une modernisation sans précédent depuis plusieurs années.

Nous nous intéresserons dans le cadre de ce travail au système « porte » autorisant la communication entre l'intérieur et l'extérieur du train.

■ Etude de la commande de la porte en mode nominal

L'objectif est d'analyser le comportement du système piloté en chaîne directe et de valider la conformité avec le cahier des charges fonctionnel donné en Annexe 1.

On se place dans la phase d'escamotage (cf. figure 1) au cours de laquelle la position angulaire du bras support (1) par rapport à (0) reste constante. On observe le même comportement pour les solides (2) et (3).

Le moteur lié au bras (1) entraîne la rotation de la roue (6). On considérera qu'il y a roulement sans glissement en I et J.

Les rayons des roues (5) et (6) sont : $R_5 = 29 \text{ mm}$ et $R_6 = 37 \text{ mm}$

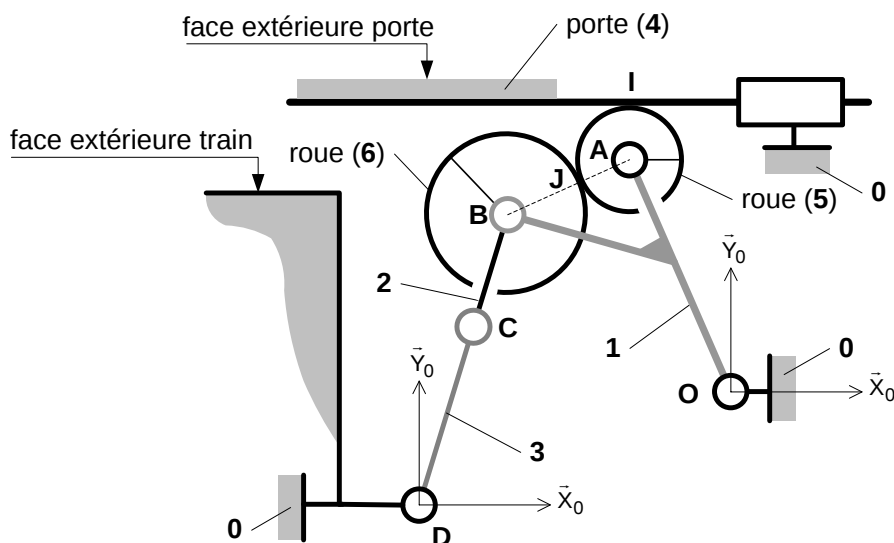


Fig. 1, schéma cinématique plan 'phase escamotage'

Afin de s'assurer d'une ouverture complète de la porte, on propose une loi de commande en vitesse du moteur. A l'instant initial, on suppose que $\dot{\theta}_m(t=0)=0$. Chronologiquement, la mise en rotation de l'actionneur s'effectue à accélération constante $\ddot{\theta}_m$ permettant d'atteindre, à l'instant t_1 , la vitesse d'escamotage de la porte définie par le cahier des charges. Puis, à l'instant t_2 , une décélération constante permet d'atteindre à l'instant t_3 , une vitesse plus faible dite « d'accostage » définie par le cahier des charges. A l'instant $t_4 = 4s$, la porte arrive en butée à la vitesse d'accostage assurant une ouverture complète.

Afin de garantir le temps d'ouverture, on utilise les valeurs maximales admissibles des vitesses d'escamotage et d'accostage définies par le cahier des charges. On suppose que les valeurs absolues des accélérations et des décélérations sont identiques et que toutes les liaisons sont parfaites.

Q 1 A partir de la description temporelle, tracer l'allure de la loi de commande en vitesse $\dot{\theta}_m(t)$ du moteur. Déterminer les valeurs (en rad.s^{-1}) de $\dot{\theta}_m(t=t_1)$ et $\dot{\theta}_m(t=t_3)$;

La durée moyenne d'escamotage est de 4 s. La translation de la porte (4) le long de la caisse du train est notée $y_4(t)$. On fait l'hypothèse qu'à l'instant initial, correspondant au début de la phase d'escamotage étudiée, la porte est immobile avec $y_4(t=0)=0$ et $\theta_m(t=0)=0$. Grâce à une redéfinition du paramétrage et dans un souci de simplification, on considère qu'au cours de cette phase $\omega_m(t) \geq 0$ et $y_4(t) \geq 0$. L'étude du moteur à courant continu commandé par l'induit assurant le déplacement de la porte donne les équations suivantes :

$$\begin{cases} u_m(t) = K_e \cdot \omega_m(t) + R \cdot i_m(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_m(t) & (1) \\ K_c \cdot i_m(t) - C_r(t) = J \cdot \frac{d}{dt} \omega_m(t) + f \cdot \omega_m(t) & (2) \end{cases}$$

Les données du constructeur permettent d'obtenir les valeurs suivantes :

$$K_e = 0,86 \text{ V.s.rad}^{-1}, K_c = 0,86 \text{ N.m.A}^{-1}, R = 0,5 \Omega, L = 1 \text{ mH}, u_m \in [-24\text{V}; +24\text{V}]$$

Le calcul de l'inertie équivalente de l'ensemble mobile en phase d'escamotage ramenée sur l'axe moteur mène au résultat suivant : $J = 0,23 \text{ kg.m}^2$ et on estime que $f = 10^{-2} \text{ N.m.s.rad}^{-1}$.

On note $\Omega_m(p)$ la transformée de Laplace de $\omega_m(t)$, $Y_4(p)$ la transformée de Laplace de $y_4(t)$, $\Theta_m(p)$ la transformée de Laplace de $\theta_m(t)$, $U_c(p)$ la transformée de Laplace de $u_c(t)$...

La commande en chaîne directe de l'actionneur piloté en tension $u_c(t)$ peut être modélisée par le schéma bloc donné sur la figure 2, soit :

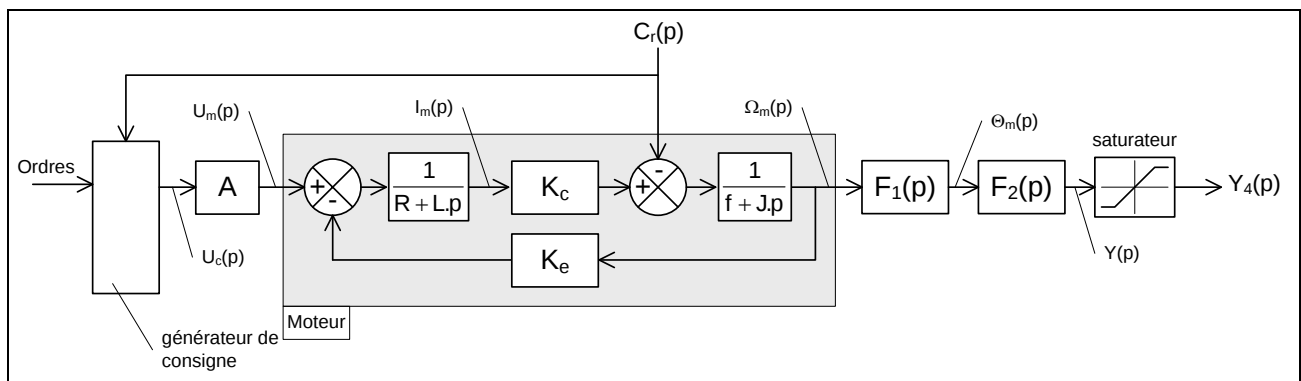


Fig. 2, modèle de commande

La fonction de transfert de l'amplificateur de puissance est modélisée par un gain pur A supposé unitaire.

Q 2 Montrer que la fonction de transfert du moteur non perturbé peut se mettre sous la forme $\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{K_m}{(1+T_1 \cdot p)(1+T_2 \cdot p)}$. Déterminer l'expression du gain statique K_m . Déterminer les valeurs numériques (en s) des deux constantes de temps T_1 et T_2 .

On soumet le système (cf. Figure 2) non perturbé à une entrée définie par $u_c(t) = u_0 \cdot u(t)$ avec $u(t)$: signal du type échelon unitaire, u_0 : tension en V. La réponse temporelle $y_4(t)$ est tracée sur la figure 3 pour trois valeurs distinctes de u_0 .

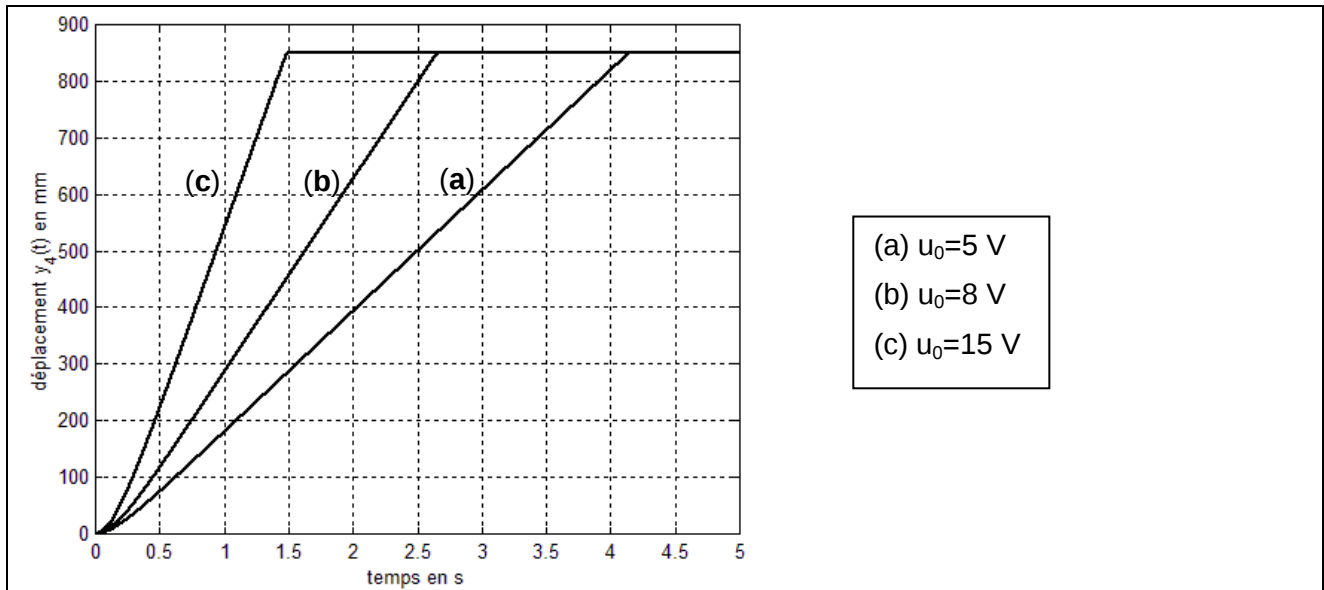


Fig. 3, réponse temporelle $y_4(t)$

Q 3

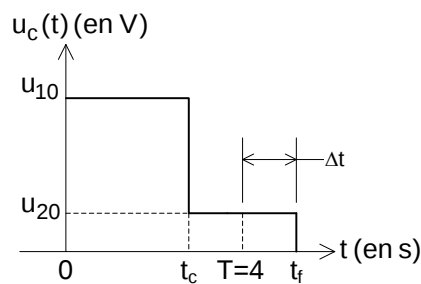
- En observant la figure 3, proposer une description conditionnelle (si $y(t)$...alors...) du bloc saturateur de la figure 2 en utilisant les variables $y_4(t)$ et $y(t)$. Quelle contrainte mécanique est modélisée par ce bloc ?
- Justifier le caractère non linéaire du saturateur.

On cherche à calibrer un signal de commande plus conforme au cahier des charges et respectant un temps d'escamotage de 4 s. Après estimation et comparaison des différentes échelles de temps, on adopte le modèle simplifié suivant : le moteur se comporte comme un gain pur, soit $\Omega_m(p) = 1,16 \cdot U_m(p)$. On soumet le système de commande non perturbé à un signal défini par $u_c(t) = u_0 \cdot [u(t) - u(t - T)]$ avec $u(t)$ échelon unitaire, $u(t - T)$ échelon unitaire retardé de T (T=4s), u_0 tension en V.

Q 4

- Tracer sur votre feuille l'allure temporelle du signal de commande $u_c(t)$ précédemment défini ;
- Déterminer alors l'expression de $y_4(t)$ pour $0 < t \leq T$. Quelle est la valeur de $y_4(t)$ pour $t > T$? En déduire la valeur de la tension u_0 (en V) satisfaisant le cahier des charges ;
- Compléter alors votre tracé en superposant en couleur l'allure complète de $y_4(t)$. Indiquer les valeurs remarquables déterminées précédemment ;
- Estimer la vitesse d'accostage de la porte (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Cette valeur est-elle conforme au cahier des charges fonctionnel ?

En conservant les hypothèses consenties précédemment, on affine la forme du signal de commande $u_c(t)$ dont l'allure est précisée sur la figure 4. On note u_{10} et u_{20} les deux niveaux distincts de tension (avec $u_{10} > u_{20}$), Δt le temps de maintien après accostage avant arrêt de l'alimentation du moteur à $t = t_f$. Ce temps est fixé à $\Delta t = 0,5$ s.

Fig. 4, définition du signal de commande $u_c(t)$

Q 5

- En utilisant les conclusions de la question précédente, justifier en quelques lignes la forme du nouveau signal de commande $u_c(t)$ présentant cette fois un double niveau de tension ;
- Déterminer la valeur (en V) des deux tensions u_{10} et u_{20} permettant de satisfaire les valeurs maximales admissibles (vitesse d'escamotage et vitesse d'accostage) définies par le cahier des charges fonctionnel ;
- Déterminer alors la valeur de t_c (en s) permettant d'obtenir une ouverture complète de la porte en 4s ;
- Tracer alors l'allure de l'évolution temporelle de $y_4(t)$. Placer les points remarquables, notamment $y_4(t=t_c)$ dont la valeur (en mm) sera déterminée.

On cherche à présent à quantifier l'influence du couple résistant $C_r(t)$ sur les performances de la commande. Le signal de commande $u_c(t)$ est de la forme définie par la figure 4. Pour les questions suivantes, on suppose que $C_r(t) = C_{r0} \cdot u(t)$ avec $u(t)$: signal du type échelon unitaire, C_{r0} : amplitude du couple résistant en N.m.

Q 6

- L'intensité et la vitesse de rotation du moteur s'établissent très rapidement comparativement à l'évolution globale. En négligeant les termes dérivés dans les équations fournies, la fonction de transfert simplifiée du moteur perturbé peut s'exprimer sous la forme $\Omega_m(p) = K_m \cdot U_m(p) - K_p \cdot C_r(p)$. Déterminer l'expression du gain K_p et donner sa valeur numérique en précisant l'unité.
- Montrer qu'en conservant les valeurs numériques des tensions u_{10} et u_{20} déterminées précédemment, si $C_{r0} > 0$ alors $y_4(t=T) < 850$ mm. Conclure quant à la capacité de cette structure de commande à respecter l'ensemble des critères du cahier des charges fonctionnel.

Afin de garantir le même niveau de performances de la commande malgré la présence du couple perturbateur, il est nécessaire d'adapter le signal de commande $u_c(t)$ et en particulier les nouvelles valeurs des tensions notées u_{10}^* et u_{20}^* .

Q 7

- Montrer que $u_{10}^* = K \cdot C_{r0} + u_{10}$ et $u_{20}^* = K \cdot C_{r0} + u_{20}$, $K \in \mathbb{R}$. Déterminer l'expression de K en fonction de K_m et K_p ;
- Déterminer la valeur maximale de C_{r0} (en N.m) compatible avec la tension admissible aux bornes du moteur électrique.

En toute rigueur, le temps lié à la mise en rotation du moteur n'est pas totalement négligeable. Il est impératif d'affiner le modèle de commande simplifié précédemment défini. Le générateur de consigne est réglé en conséquence et la figure 5 présente l'évolution temporelle du déplacement $y_4(t)$ et de la vitesse $\dot{y}_4(t)$.

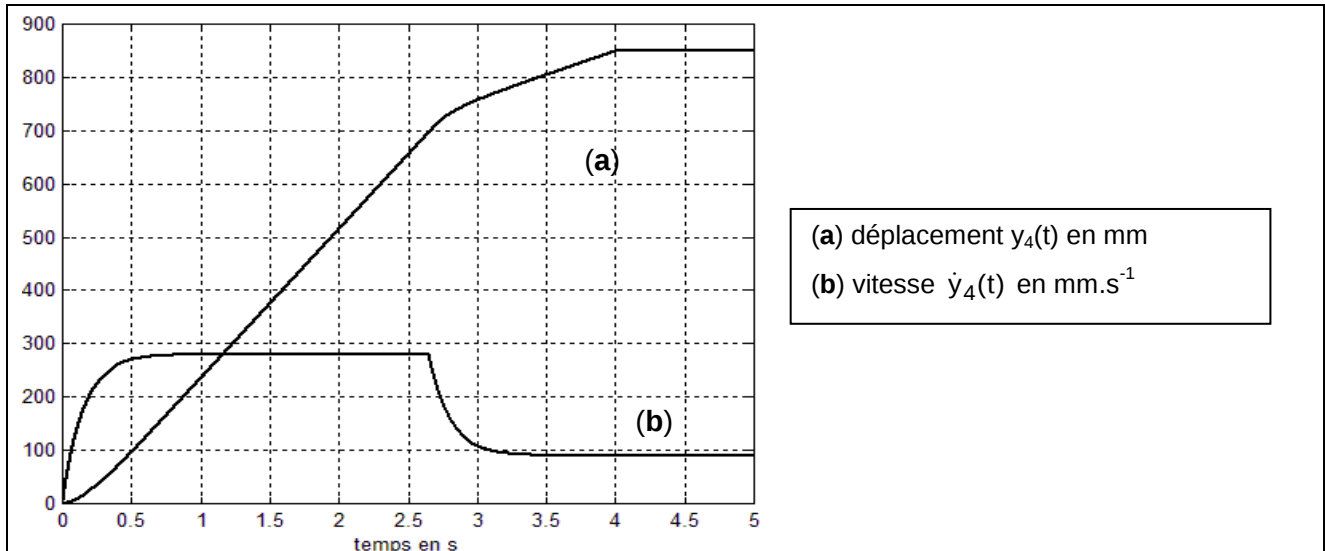


Fig. 5, évolution temporelle de $y_4(t)$ et de $\dot{y}_4(t)$

Q 8

- Indiquer de manière qualitative, les différences notables entre votre tracé (Q5d) et la figure 5. Dans quelles zones observe-t-on ces différences ?
- Le générateur de consigne ainsi réglé nous permet-il de valider le cahier des charges fonctionnel ?

Nous avons montré que le respect du cahier des charges au cours du cycle d'utilisation du système d'ouverture était assujéti au calibrage correct de la loi de commande étudiée précédemment. La détermination des caractéristiques de cette loi fait appel à la connaissance du couple résistant $C_r(t)$. Or l'évolution de cette grandeur en fonctionnement n'est pas accessible directement par un capteur contrairement au courant de l'induit $i_m(t)$ et de la fréquence de rotation du moteur $\omega_m(t)$.

Il est cependant possible de reconstruire une information (estimation) sur la valeur du couple résistant (notée $\hat{C}_r(t)$) grâce à une chaîne qui utilise des grandeurs issues de mesures effectuées directement sur l'ensemble variateur-moteur ($i_m(t)$ et $\omega_m(t)$). La figure 6 donne l'architecture de cette chaîne :

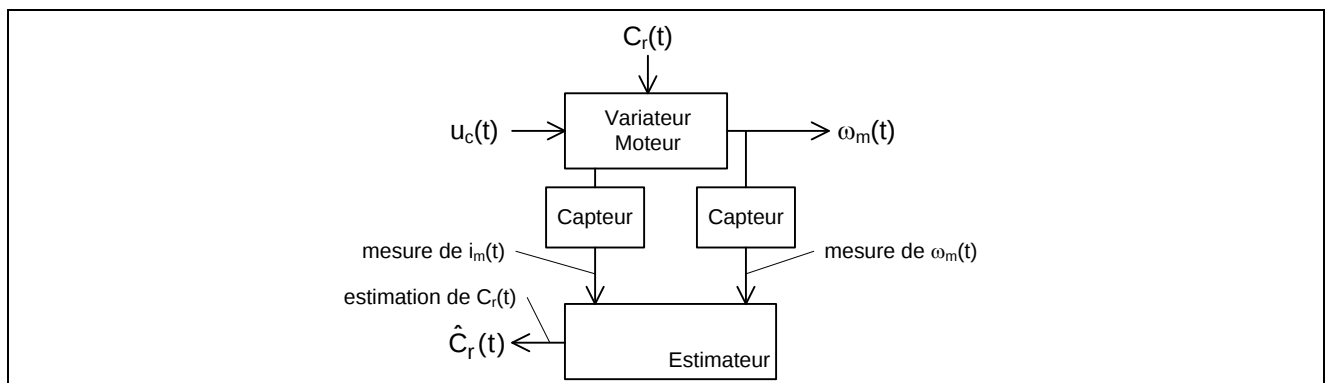


Fig. 6, architecture de la chaîne d'estimation

Une modélisation de cette architecture réelle est cependant indispensable pour concevoir l'estimateur. On suppose que la chaîne décrite précédemment se réduit au schéma bloc suivant (cf. figure 7) :

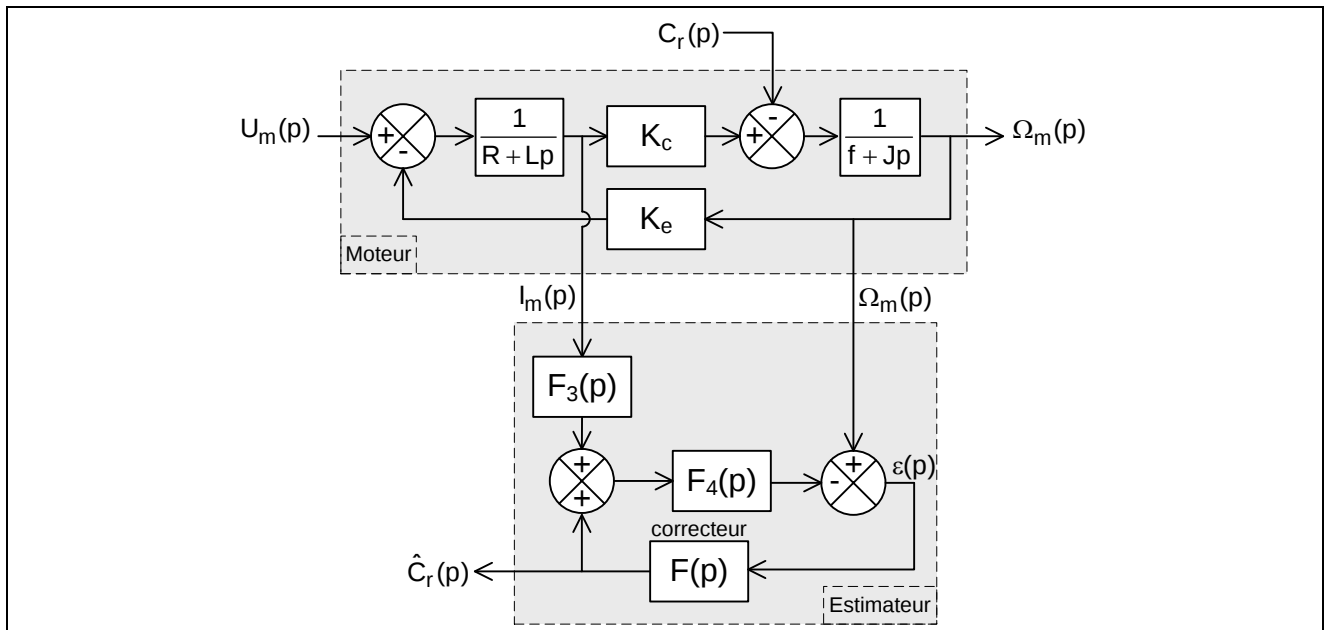


Fig. 7, schéma bloc du moteur et de l'estimateur

avec $\hat{C}_r(p)$: estimation du couple résistant et $F(p)$: fonction de transfert du correcteur. En toute rigueur, $I_m(p)$ et $\Omega_m(p)$ représentent des grandeurs mesurées directement sur le système réel.

L'objectif est de construire un estimateur qui nous permette de nous ramener à un problème d'asservissement où la consigne est la grandeur de perturbation $C_r(p)$ et la sortie sa valeur estimée $\hat{C}_r(p)$.

Pour obtenir une bonne estimation, l'estimateur doit être précis et rapide.

Le cahier des charges est le suivant :

- Erreur en position nulle ;
- Erreur de traînage inférieure à 1% ;
- Temps de réponse à 5% inférieur à 0,05 s.

Q 9

- a. D'après le schéma bloc du moteur, déterminer $\Omega_m(p)$ en fonction de $C_r(p)$ et $I_m(p)$;
- b. D'après le schéma bloc de l'estimateur, déterminer $\varepsilon(p)$ en fonction de $\Omega_m(p)$, $\hat{C}_r(p)$ et $I_m(p)$ et déterminer $\hat{C}_r(p)$ en fonction de $\varepsilon(p)$;
- c. En déduire la relation entre $\hat{C}_r(p)$, $C_r(p)$ et $I_m(p)$. Déterminer $F_3(p)$ et $F_4(p)$ afin que l'estimateur puisse se mettre sous la forme du schéma bloc suivant (cf. figure 8) :

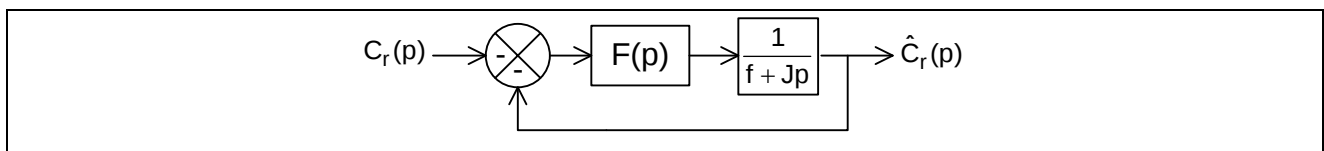


Fig. 8, schéma bloc équivalent

On choisit le correcteur suivant : $F(p) = K_{cor} \frac{1 + T_{cor} \cdot p}{T_{cor} \cdot p}$.

Q 10 Comment appelle-t-on ce correcteur ? Par rapport à l'emploi d'un correcteur proportionnel, pourquoi permet-il d'avoir une estimation de C_r plus précise ?

Q 11 Quel doit être le gain statique en boucle fermée de la fonction de transfert de l'estimateur ? Est-ce le cas ?

Q 12 On cherche à régler le correcteur. Déterminer T_{cor} afin que le zéro du correcteur compense le pôle de l'estimateur non corrigé. Faire l'application numérique.

Q 13 Déterminer K_{cor} pour vérifier l'erreur de traînage imposée par le cahier des charges. Faire l'application numérique.

Q 14 Tracer (sur le document réponse) en rouge les diagrammes de Bode (asymptotiques et réels) de la fonction : $H(p)=1/f+J.p$, en bleu les diagrammes de Bode du correcteur $F(p)$ et en vert les diagrammes de bode de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'estimateur. Faire apparaître les points caractéristiques. On rappelle que $J = 0,23 \text{ kg.m}^2$ et que $f = 10^{-2} \text{ N.m.s.rad}^{-1}$.

Q 15 Tracer sur la copie les réponses à un échelon de couple $Cr(t) = C_0$ de l'estimateur avec et sans correction. Faire apparaître sur chaque tracé l'erreur statique et le temps de réponse à 5%.

Q 16 Vérifie-t-on tous les critères du cahier des charges de l'estimateur ?

ANNEXE 1

Extrait du cahier des charges fonctionnel :

	Fonction	Critères	Niveaux
FT1	Ouvrir/Fermer la porte	• Dégager un accès au wagon suffisant : respecter une amplitude D du déplacement en phase d'escamotage ;	$D = 850 \text{ mm}$
		• Limiter le temps total d'ouverture : respecter un temps d'ouverture t_0 ;	$t_0 \leq 5 \text{ s}$
		• Permettre une ouverture manuelle : respecter un effort maximum à produire soient F_l en phase de décalage et F_t en phase d'escamotage ;	$F_l < 200 \text{ N}$ $F_t < 160 \text{ N}$
		• Limiter la vitesse en bout de porte en phase de décalage ;	$V < 1 \text{ m.s}^{-1}$
		• Limiter la vitesse de déplacement de la porte en phase d'escamotage ;	$V \leq 0,28 \text{ m.s}^{-1}$
		• Limiter la vitesse d'accostage de la porte en fin de phase d'escamotage ;	$V \leq 0,09 \text{ m.s}^{-1}$
		• Respecter un espacement d entre la porte et la caisse du train en phase d'escamotage ;	$d > 40 \text{ mm}$
		• Limiter la puissance consommée du moteur d'ouverture ;	$P \leq 30 \text{ W}$
		• Assurer la stabilité du système de décalage : limiter la fréquence de rotation Ω de la biellette (3) par rapport à la caisse ;	$\Omega < 140 \text{ tr.mn}^{-1}$
		• Encombrement et masse du système d'ouverture les plus faibles possibles ;	

NOM :

Prénom

