

TD 99



Système de freinage d'un TGV DUPLEX

Centrale Supélec – PSI – 2006

Savoirs et compétences :

Dispositif d'anti-enrayage

L'objectif de cette partie est l'étude de la loi de commande du dispositif d'anti-enrayage et plus précisément le calcul du correcteur de la boucle de régulation en vue de satisfaire un cahier des charges qui sera exprimé par la suite.

La réalisation de la régulation de glissement ne peut être effectuée directement, en particulier la seule mesure généralement disponible est celle de la vitesse V_R , aussi la vitesse V_T est obtenue par estimation. En « pratique », la mise en place de la chaîne de régulation du dispositif d'anti-enrayage du système de freinage est conçue de la façon suivante :

- elle est réalisée au travers de l'asservissement des vitesses des roues à une consigne de référence obtenue à partir de V_T ;
- la commande de l'actionneur est non linéaire, de type tout ou rien ;
- les algorithmes implémentés visent à optimiser le point de fonctionnement en vue de minimiser la distance de freinage.

Cependant, dans le cadre de cette étude, on supposera que :

- les vitesses V_R et V_T sont directement accessibles à la mesure, éventuellement entachées d'une erreur ;
- la régulation peut se ramener directement à celle du glissement ;
- le comportement de l'actionneur et de sa « commande rapprochée » est modélisé par une fonction de transfert linéaire correspondant à un comportement « moyen ».

On suppose, pour la suite, que l'architecture de la boucle de régulation est représentée sur la figure suivante où est la consigne de glissement.

Marges de stabilité, performances en boucle ouverte	
Pulsation de coupure à 0dB	$\omega_c \approx 1 \text{ rad/s}$
Marge de phase	$\Delta\Phi \geq 60^\circ$ au point de fonctionnement nominal B
Stabilité quel que soit le point de fonctionnement sur la caractéristique $\mu = f(v)$	
Réponse à un échelon de consigne de glissement	
Écart de régime permanent	Nul
Temps du 1 ^{er} maximum	$t_m \leq 3,5 \text{ s}$
Dépassement	$D \leq 18\%$
Réponse à une variation en échelon de l'adhérence	
Écart en régime permanent	Nul
Temps de réponse	$t_r \leq 9 \text{ s}$

- $H_1(p)$: fonction de transfert de l'actionneur de freinage (vérin pneumatique + électrovalve) ;
- $H_2(p)$: fonction de transfert de la roue au freinage ;
- $C(p)$: correcteur de la boucle de régulation ;
- $M(p)$: fonction de transfert de la chaîne de mesure du glissement obtenu à partir des vitesses V_T et V_R , cette chaîne comporte un filtre destiné à limiter l'impact des bruits de mesure ;
- v_m : glissement estimé à partir de V_T et de V_R .

On adoptera pour la suite :

$$H_1(p) = \frac{2000}{1 + 0,1p + 0,01p^2} \quad M(p) = \frac{1}{1 + 0,05p}.$$

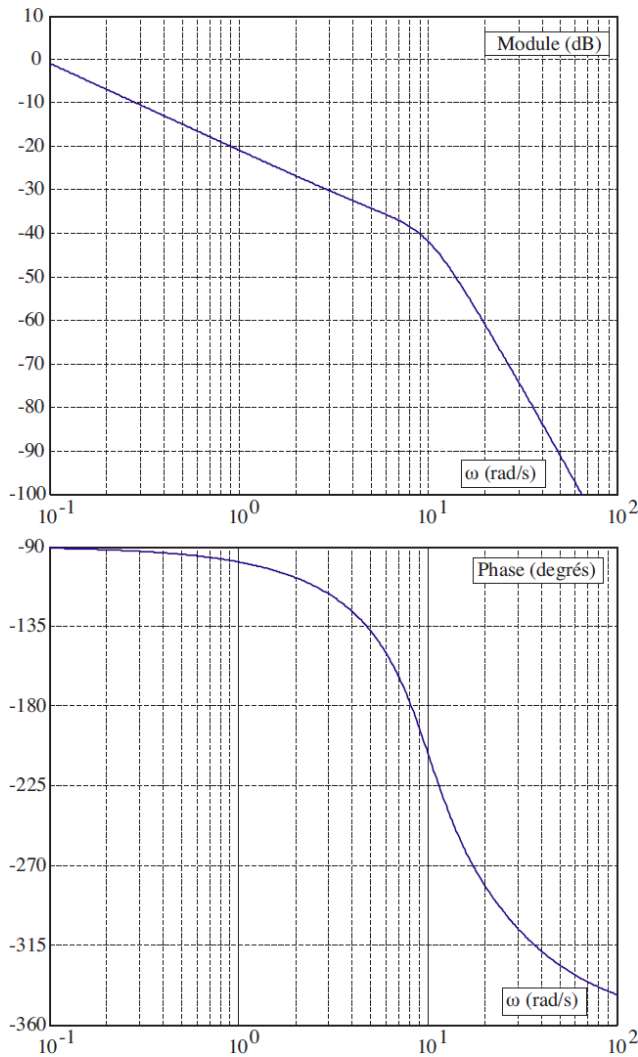
Pour une vitesse $V_T = 200 \text{ km h}^{-1}$, le cahier des charges est résumé par les données du tableau suivant et les données numériques utilisées sont données ci-dessous. Enfin, les problèmes liés à l'évolution de la vitesse V_T ne font pas l'objet de cette étude.

On note $M = 8200 \text{ kg}$, $V_T = 200 \text{ km h}^{-1}$, $\frac{I}{r^2} = 400 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m s}^{-2}$.

Analyse des réponses fréquentielles en boucle ouverte

$$\text{On donne } H_2(p) = \frac{r^2 / (I V_{T0})}{p} = \frac{45 \cdot 10^{-6}}{p}.$$

Question 1 En prenant $C(p) = 1$, compléter par le tracé asymptotique le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte fourni en figure suivante en justifiant le tracé.



Synthèse du régulateur de la boucle de régulation

On décide d'implémenter un régulateur de type P.I. dont la fonction de transfert est : $C(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$.

Question 2 Calculer la valeur que doit prendre l'argument de $C(p)$ afin d'assurer la marge de phase imposée par le cahier des charges à la pulsation de coupure ω_c souhaitée.

Question 3 Calculer la valeur minimale $T_{i\min}$, que l'on peut conférer à la constante T_i de l'action intégrale du régulateur.

Question 4 En adoptant $T_i = T_{i\min}$, déterminer alors le gain K_r du régulateur permettant de satisfaire la pulsation de coupure et la marge de phase souhaitées.

Question 5 Le système étant bouclé par le régulateur dimensionné à la question précédente, déterminer la marge de gain. Conclure sur les marges de stabilité obtenues.

Vérification du cahier des charges vis-à-vis de la consigne de glissement

Le correcteur de la boucle de régulation du dispositif d'anti-enrayage a été déterminé à partir de considérations sur la réponse fréquentielle en boucle ouverte (pulsation de coupure à 0 dB et marge de phase). Aussi l'objectif de cette partie est de vérifier que le correcteur déterminé permet de satisfaire le cahier des charges. Cette vérification concerne d'une part les performances vis-à-vis des variations de la consigne de glissement : temps du 1^{er} maximum, dépassement, écart en régime permanent et d'autre part la réponse vis-à-vis des variations d'adhérence.

Au regard de la réponse fréquentielle en boucle fermée $F(p) = \frac{v_1(p)}{v_c(p)}$, on décide de modéliser la transmittance correspondante par la fonction suivante :

$$F(p) = \frac{v_1(p)}{v_c(p)} = \frac{K_c (1 + \tau_1 p)}{(1 + \tau_2 p)^2 \left(1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right)}$$

On suppose sans aucune justification que $\omega_0 > \frac{1}{\tau_2}$.

Question 6 En examinant les diagrammes de Bode fournis sur la figure suivante de la fonction de transfert en boucle fermée $F(p) = \frac{v_1(p)}{v_c(p)}$, justifier l'expression adoptée et compléter les diagrammes fournis par leur tracé asymptotique.

Question 7 Proposer les valeurs numériques pour les différents paramètres associés à cette fonction de transfert.

Question 8 En justifiant, montrer que l'on peut approcher la fonction de transfert par la forme suivante :

$$F(p) = \frac{K_f (1 + \tau_1 p)}{(1 + \tau_2 p)^2}$$

Question 9

Question 10