Formulaire mécatronique 2
Kenzi Antonin 5 février 2023

Moteur à courant continu 1

1. Stator : fixe
2. Rotor : mobile
3. Collecteur : élément d'usure

Production de couple :

- spire parcourue par un courant $i_a(t)$
- Champ d'induction B

Par Laplace :

$$\vec{F} = (\vec{i_a}(t) \wedge \vec{B}) \cdot l$$

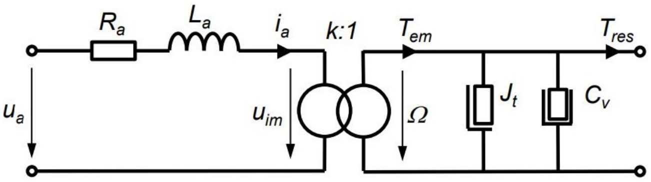
cette force produit un couple faisant tourner le moteur :

$$T_{em}(t) = k_T \cdot i_a(z)$$

cela induit une tension :

$$u_i(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = k_u \cdot \omega(t)$$

Équations du moteur Dc et de la charge 2



Équation de tension :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + u_{im}(t)$$
$$U_a(t) = U_{im} + R_a \cdot I_a = K_e \Theta + Ra \cdot cfracT_{res}k_T$$

$$I_a(s) = [U_a(s).U_{im}(s)] \cdot \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + s\frac{L_a}{R_a}}$$

Équation de mouvement :

$$Jt\frac{d\Omega(t)}{dt} = T_{em}(t) - C_v\Omega(t) - Tres(t)$$

$$\Omega(s) = [T_{em}(s).T_{res}(s)] \cdot \frac{\frac{1}{C_v}}{1 + s\frac{J_t}{C_v}}$$

avec $T_{res} = Frotement \cdot vitesse$

Équation de couplage :

$$k_T = \frac{T_{em}(t)}{i_a(t)} = \frac{u_{im}(t)}{\Omega(t)} = k_u$$

Hypothèses :

1. Linéarité : pas de saturation du fer, résistance Cst
2. Frottements négligeables, généralement < 5% du couple nominal
3. arbre rigide en torsion : ce n'est pas toujours le cas

Calcul des fonctions de transfert 3

on introduit :

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \qquad \tau_m = \frac{J_t \cdot R_a}{k_T \cdot k_E}$$

Les fonctions de transfert du moteur DC et de la charge, sans frottements visqueux, deviennent :

$$G_{u\omega} = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{k_E} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

$$G_{ui} = \frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{J_t}{k_E \cdot k_T} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

$$s_{1,2} = \frac{-\tau_m \pm \sqrt{\tau_m^2 - 4 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}}{2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

Cas particulier : $\tau_m < 4 \cdot \tau_e$

$$\frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

Cas particulier : $\tau_m \geq 4 \cdot \tau_e$

$$\frac{1}{(1 + s \cdot \tau_{max})(1 + s \cdot \tau_{min})} \quad \text{avec :} \quad \tau_{max,min} = -\frac{1}{s_{1,2}}$$

Cas particulier : $\tau_m \ggg \tau_e$

$$\frac{1}{(1 + s \cdot \tau_m)(1 + s \cdot \tau_e)}$$

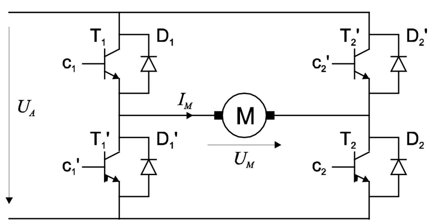
Fonction page 1.22 :

Alimentations des moteurs DC 4

Méthodes :

1. Analogique : Grande perte à basse vitesse.
2. Alimentation à découpage : pertes variateur constant

Pont en « H » :

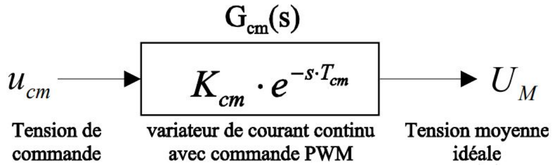


Gestion par pulse width modulation

1. Par régime stationnaire :

$$U_{M\ moyen} = U_A * \left(2 \cdot \frac{t_e}{T_P} - 1\right)$$

2. Par «sous-oscillation» :
3. Par fonction de transfert : Page 1.30



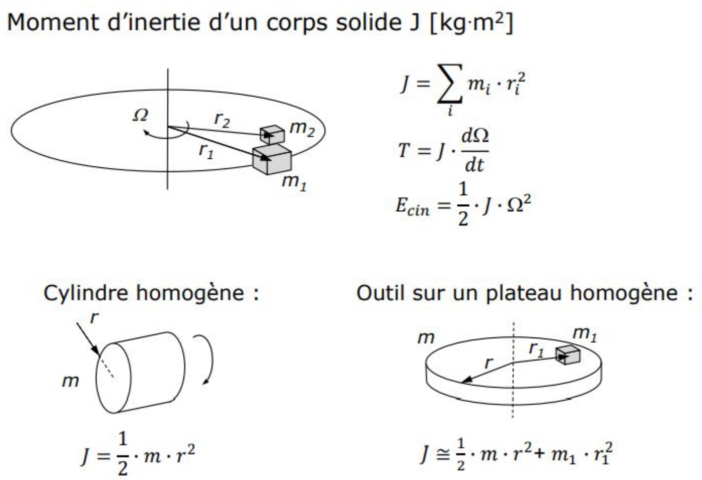
$$K_{cm} = \frac{U_A}{\hat{u_{cm}}}$$

Approximation du retard pur : Page 1.31

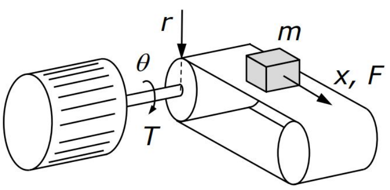
- Si analogique
  - u_h triangulaire : $T_{cm} = \dfrac{T_p}{3}$
  - u_h dent de scie : $T_{cm} = \dfrac{T_p}{2}$
- Si Numérique : $T_{cm} = T_p$

1er ordre :	Padé :
$e^{-s \cdot T_{cm}} \backsimeq \dfrac{1}{1 + s \cdot T_{cm}}$	$e^{-s \cdot T_{cm}} \backsimeq \dfrac{1 - s \cdot \frac{T_{cm}}{2}}{1 + s \cdot \frac{T_{cm}}{2}}$

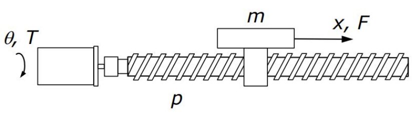
Rappel sur le moment d'inertie : Page 1.32 — 5



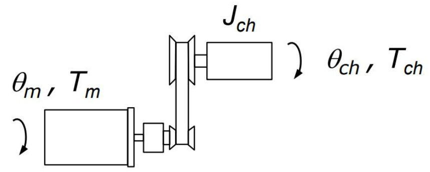
Courroie ou crémaillère : $J_{eq} = m \cdot r^2$



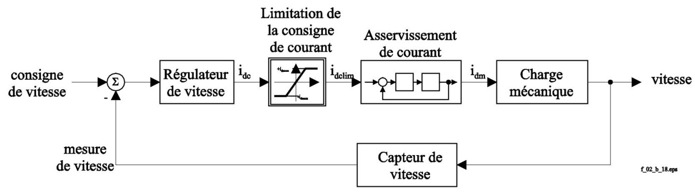
Vis-à-billes : $J_{eq} = m \cdot \left(\dfrac{p}{2\pi}\right)^2$

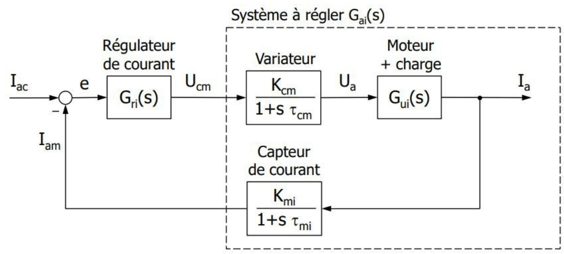


Réducteurs : $J_{eq} = J_{ch} \cdot \dfrac{1}{i^2}$ avec $i = \dfrac{\Omega_m}{\Omega_e}$



Réglage du courant / couple : Page 1.54 — 6





$$G_{ai}(s) = K_{ai} \cdot \frac{s}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_e \cdot \tau_m} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{cm}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{mi}}$$

$$K_{ai} = \frac{K_{cm} \cdot K_{mi} \cdot J_t}{k_t \cdot k_E} = \frac{\tau_m}{R_a} \cdot K_{cm}$$

Régulateur PI — 7

- composante I
  - pour compenser le comportement dérivateur à basses fréquences
  - pour compenser les couples perturbateur à moyennes fréquences
- composante P
  - pour annuler la composante I en hautes fréquences donc, pour ne pas trop dégrader la bande passante

fonction de transfert en boucle ouverte :

$$G_{reg,PI}(s) = Goi(s) = K_{PI} \cdot \frac{1 + s \cdot \tau_{ii}}{s \cdot \tau_{ii}} \cdot G_{ai}(s)$$

Ajustage traditionnel (compensation du pôle dominant)

$\tau_{ii} = \tau_{dominant}$

Problème :

- erreur statique importante (27%)

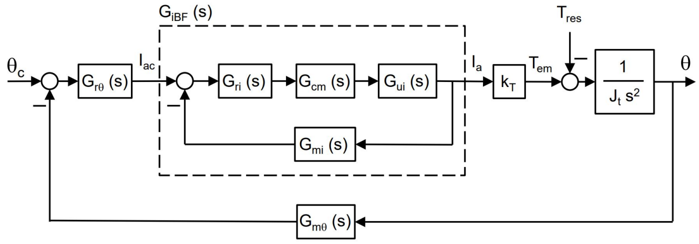
Ajustage sur les petites constantes de temps

$\tau_{ii} = N \cdot \sum \tau_{pct} = N \cdot (\tau_{cm} + \tau_{mi})$,avec N $\leq$ 10 [5...30]

Avantages :

- Système en boucle fermée avec $K_{pi} = +13dB$
- Erreur statique quasi nulle
- Bande passante quasi inchangée

régulation imbriquée position - courant : Page 1.79 8



Capteur de position

Fonction de transfert (approx.) :

$$G_{m\theta}(s) = \frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}$$

$X_{commande} \cdot N_1 = X_{mesure} \cdot N_2$

$K_{m\theta} = N_2/N_1$

Unité de la consigne de courant

Consigne exprimée en :

- Courant : $U_{ci} = I_c \cdot K'_{mi}$ avec $K'_{mi} \approxeq K_{mi}$
- Couple : $U_{ci} = T_c \cdot K'_{mi}/k'_T$ avec $k'_T \approxeq k_T$

Boucle fermée de courant

on peut utiliser la fonction de transfert en boucle fermée obtenue précédemment (calcul « exact »), ou on peut en faire une approximation du 1er ordre, dont la fonction de transfert es :

$$G_{iBF}(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}}$$

$G_{iBF}(0) \approxeq 1$

$\tau_{iBF} = 1/\omega_{m\varphi 45°}$

Système à régler : page 1.85

$$G_{a\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{I_{ac}(s)} = \underbrace{\frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}}}_{G_{iBF}(s)} \cdot k_T \cdot \underbrace{\frac{1}{J_t}\frac{1}{s^2}}_{Charge} \cdot \underbrace{\frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}}_{Capt-pos}$$

$$G_{a\theta}(s) = \underbrace{\frac{K_{m\theta} \cdot k_T}{J_t}}_{K_{a\theta}} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}$$

Régulateur

PD = $G_{r\theta} = K_{p\theta} \cdot (1 + s \cdot \tau_{d\theta})$

Ajustage

$\tau_{ref} = \sum \tau_i$ ou $1/\omega_{ref}$ à -225° sur $G_{a\theta}(s)$

$\tau_{m\theta} = \tau_{ref} - \tau_{iBF}$

$\tau_{d\theta} = N \cdot \tau_{ref}$

Puis ajuster $K_{p\theta}$ 0 dB pour ω correspondant à la marge de phase souhaitée.

limiteur de courant

Il nécessaire d'ajouter un limiteur de courant sur la consigne ce qui rend le système non-linéaire.

Réaction aux couples perturbateurs : page 1.96

$$G_{v\theta}(s) = \frac{\frac{1}{Jt \cdot s^2}}{1 + \frac{1}{Jt \cdot s^2} \cdot \frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}} \cdot K_{p\theta} \cdot (1 + s \cdot \tau_{d\theta}) \cdot G_{iBF \cdot k_T}}$$

Rigidité statique d'asservissement 9

$$K = \lim_{t\to\infty}\left[\frac{|T_{res}(t)|}{|e_\theta(t)|}\right] = \lim_{s\to 0}\left[\frac{1}{|G_{v\theta}(s)|}\right]$$

en Statique : $T_{em} = T_{res}$

$K = \lim_{s\to 0}[G_{r\theta(s)} \cdot G_{iBF} \cdot k_T]$

si regulation Position courant :

$$K = \lim_{s\to 0}\left[K_{p\theta} \cdot (1 + s \cdot \tau_{d\theta}) \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}} \cdot k_T\right] = K_{p\theta \cdot k_T}$$

si regulation position - vitesse - courant :

Pour 2 regulateur P :

$$K = \lim_{s\to 0}\left[G_{r\theta}(s) \cdot G_{r\Omega}(s) \cdot k_T\right] = K_{p\theta} \cdot K_{p\Omega} \cdot k_T$$

Gibf n'est pas pris en compte car gain statique de 1

Pour 1 des deux regulateur PI :

$K = \infty$

Dilemme du choix du coefficient N

Bonne marge de phase : N grand

peu d'erreur statique : N petit

solution : ajouter un filtre de consigne.

$$G_f\theta = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{fc\theta}}$$

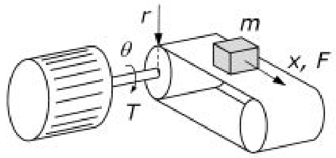
ne détériore pas la réaction aux couples perturbateurs

Evite d'exciter les hautes fréquences par la consigne mais limite la rapidité de réaction aux sauts de consignes

Effet d'une composante I

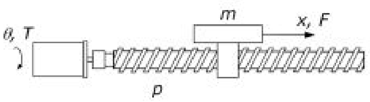
- annulerait l'erreur statique
- convient avec rigidité statique d'asservissement $K = \infty$
- provoque un bref écart de position lorsque le couple perturbateur disparait (overshoots)
- à éviter lorsqu'il s'agit de garantir un suivi de consigne à forte dynamique

1. Courroie ou crémaillère (rayon r) :



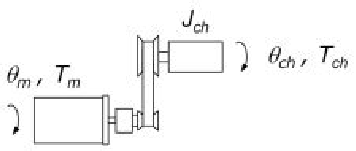
$$T_{res} = F_{res} \cdot r$$
$$e_x = e_\theta \cdot r$$
$$K_x = \frac{|F_{res}|}{|e_x|} = \frac{|T_{res}| \cdot \frac{1}{r}}{|e_\theta| \cdot r} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{|T_{res}|}{|e_\theta|}$$
$$\boxed{K_x = \frac{1}{r^2} \cdot K_\theta}$$

2. Vis à bille (pas p) :



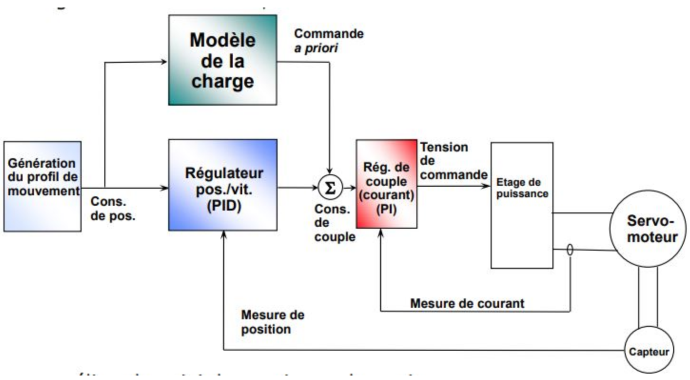
$$T_{res} = F_{res} \cdot \frac{p}{2\pi}$$
$$e_x = e_\theta \cdot \frac{p}{2\pi}$$
$$K_x = \frac{|F_{res}|}{|e_x|} = \frac{|T_{res}| \cdot \frac{2\pi}{p}}{|e_\theta| \cdot \frac{p}{2\pi}} = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 \cdot \frac{|T_r}{|e_\iota}$$
$$\boxed{K_x = \left(\frac{2\pi}{p}\right)^2 \cdot K_\theta}$$

3. Réducteur (rapport de réduction i) :

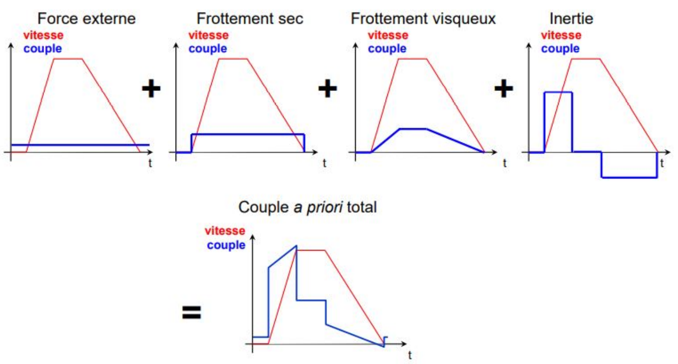


$$T_m = T_{ch} \cdot \frac{1}{i}$$
$$e_{\theta ch} = e_{\theta m} \cdot \frac{1}{i}$$
$$K_{ch} = \frac{|T_{ch}|}{|e_{\theta ch}|} = \frac{|T_m| \cdot i}{|e_{\theta m}| \cdot \frac{1}{i}} = i^2 \cdot \frac{|T_m|}{|e_{\theta m}|}$$
$$\boxed{K_{ch} = i^2 \cdot K_m}$$

Commande a priori 10



Connaisance parfaite de la réaction du système



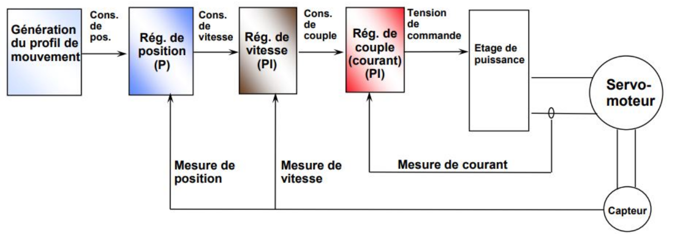
Standard de facto (>95% des cas) 11

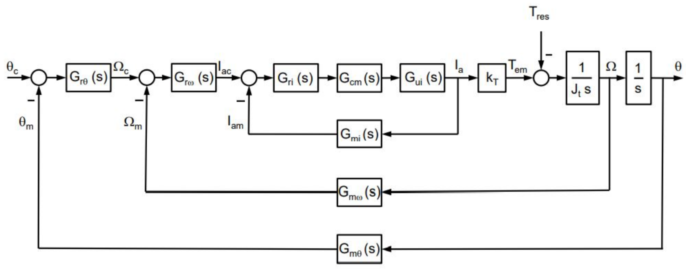
Régulateur ajustés séparement :

→ régulateur de courant, en fonction du moteur

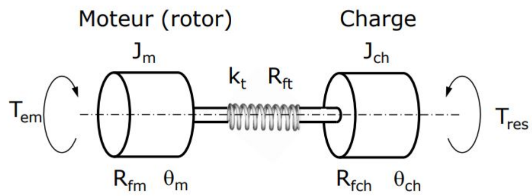
→ régulateur de vitesse, en fonction de la charge mécanique

→ régulateur de position, pour assurer la rigidité parfois exploitant un autre capteur (en aval du réducteur)



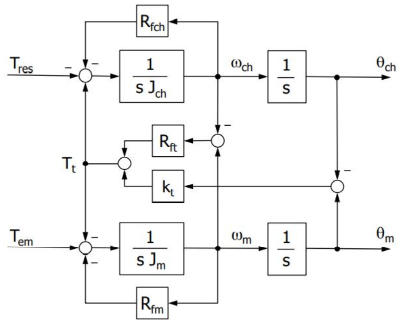


Arbre élastique 12



T_{em} , T_{res}	:	Couple électromagnétique / résistant	[Nm]
J_m , J_{ch}	:	Moment d'inertie côté moteur / charge	[kgm²]
R_{fm} , R_{fch}	:	Coef. de frot. visqueux côté moteur / charge	[Nm/(rad/s)]
θ_m , θ_{ch}	:	Position angulaire du moteur / de la charge	[rad]
k_t	:	Rigidité de la transmission	[Nm/rad]
R_{ft}	:	Coef. de frot. visqueux de la transmission	[Nm/(rad/s)]

$$\frac{\theta_m(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s^2\, J_{ch} + s(R_{ft} + R_{fch}) + k_t}{a_4\, s^4 + a_3\, s^3 + a_2\, s^2 + a_1\, s}$$

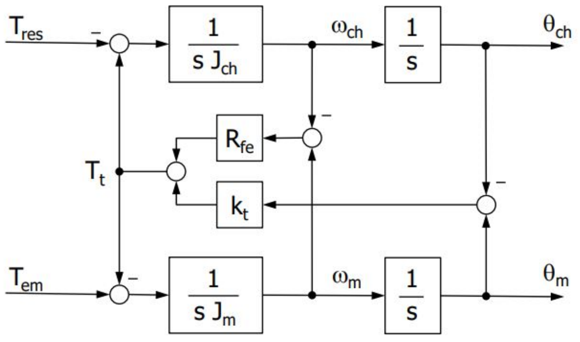


avec :

$$a_4 = J_m \cdot J_{ch}$$
$$a_3 = J_m \cdot (R_{ft} + R_{fch}) + J_{ch} \cdot (R_{ft} + R_{fm})$$
$$a_2 = (J_m + J_{ch}) \cdot k_t + (R_{fch} + R_{fm}) \cdot R_{ft} + R_{fch} \cdot R_{fm}$$
$$a_1 = J_m \cdot j_{ch}$$

avec simplification :
$$a_4 = J_m \cdot J_{ch}$$
$$a_3 = (J_m + J_{ch}) \cdot R_{fe}$$
$$a_2 = (J_m + J_{ch}) \cdot k_t$$
$$a_1 = 0$$

$$R_{fe} = \frac{J_m\, R_{fch} + J_{ch}\, R_{fm}}{J_m + J_{ch}} + R_{ft}$$

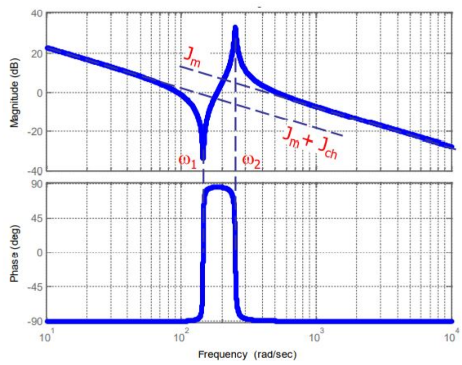


$$\frac{\theta_m(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s^2\,J_{ch} + s\,R_{fe} + k_t}{J_m J_{ch}\,s^4 + R_{fe}(J_m + J_{ch})\,s^3 + k_t(J_m + J_{ch})\,s^2}$$

$$\frac{\theta_{ch}(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s\,R_{fe} + k_t}{J_m J_{ch}\,s^4 + R_{fe}(J_m + J_{ch})\,s^3 + k_t(J_m + J_{ch})\,s^2}$$

$$\frac{\theta_{ch}(s)}{\theta_m(s)} = \frac{s\,R_{fe} + k_t}{s^2\,J_ch + s\,R_{fe} + k_t}$$

Réponse harmonique : page 1.117

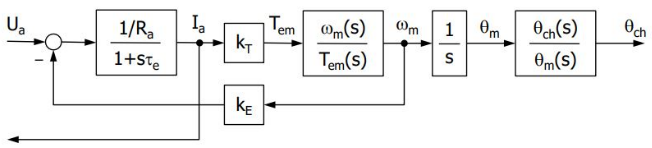


$$\omega_1^2 = \frac{1}{J_{ch}} \cdot k_t$$

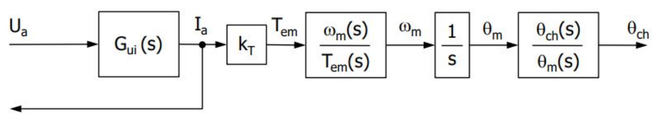
$$\omega_2^2 = \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_{ch}}\right) \cdot k_t$$

$$\omega_2^2 - \omega_1^2 = \frac{1}{J_m} \cdot k_t$$

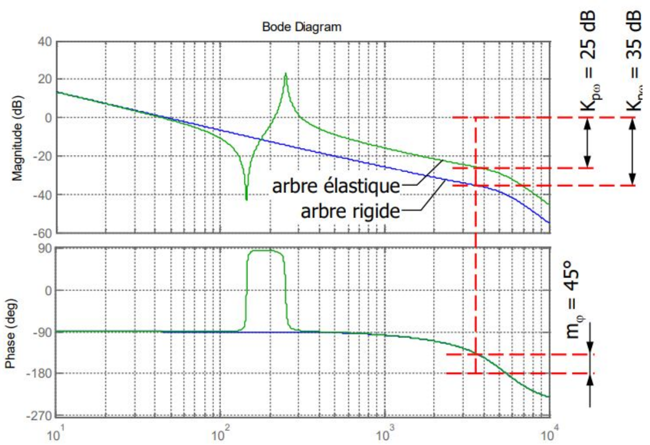
Effet de l'arbre élastique en régulation de courant



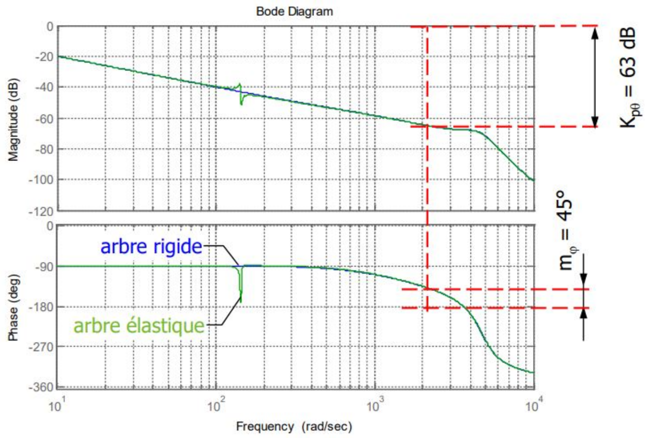
- En pratique, on peut négliger l'oscillation de la tension induite lié à l'élasticité de l'arbre
- On conserve ainsi la fonction de transfert du moteur $G_{ui}(s)$



Effet de l'arbre élastique en régulation de vitesse



Effet de l'arbre élastique en régulation de position



Convertion PVC to PC

$$K_{p\theta} = K_{p\theta} \cdot K_{p\Omega}$$

$$\tau_{p\theta} = \frac{1}{K_{p\theta}}$$

Rappel :

Équation de tension :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + u_{im}(t)$$

$$I_a(s) = [U_a(s).U_{im}(s)] \cdot \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + s\frac{L_a}{R_a}}$$

Équation de mouvement :

$$Jt\frac{d\Omega(t)}{dt} = T_{em}(t) - C_v\Omega(t) - T_{res}(t)$$

$$\Omega(s) = [T_{em}(s).T_{res}(s)] \cdot \frac{\frac{1}{C_v}}{1 + s\frac{J_t}{C_v}}$$

Équation de couplage :

$$k_T = \frac{T_{em}(t)}{i_a(t)} = \frac{u_{im}(t)}{\Omega(t)} = k_u$$

Équation utile :

$$u_a(t) = U_{in} + R_a \cdot i_a = k_e\Omega + R_a\frac{T_{res}}{k_t}$$

avec

$T_{res} = F_{frot} \cdot V$ par moteur

Constante de temps :

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$$

$$\tau_m = \frac{J_t \cdot R_a}{k_T \cdot k_E}$$

Fonctions de transfert :

$$G_{u\omega} = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{k_E} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

$$G_{ui} = \frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{J_t}{k_E \cdot k_T} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

Pôles :

$$s_{1,2} = \frac{-\tau_m \pm \sqrt{\tau_m^2 - 4 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}}{2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e}$$

si : $\tau_m \leqslant 4 \cdot \tau_e$

$$\frac{1}{(1 + s \cdot \tau_{max})(1 + s \cdot \tau_{min})}$$

avec : $$\tau_{max,min} = -\frac{1}{s_{1,2}}$$

si : $\tau_m \ggg \tau_e$

$$\frac{1}{(1 + s \cdot \tau_m)(1 + s \cdot \tau_e)}$$

Rappel sur le moment d'inertie

Courroie ou crémaillère : $J_{eq} = m \cdot r^2$

Vis-à-billes : $J_{eq} = m \cdot \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2$

Réducteurs : $J_{eq} = J_{ch} \cdot \frac{1}{i^2}$ avec $i = \frac{\Omega_m}{\Omega_e}$

Réglage du courant / couple

$$G_{ai}(s) = K_{ai} \cdot \frac{s}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_e \cdot \tau_m} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{cm}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{mi}}$$

$$K_{ai} = \frac{K_{cm} \cdot K_{mi} \cdot J_t}{k_t \cdot k_E} = \frac{\tau_m \cdot K_{cm}}{R_a}$$

Capteur de position

$$G_{m\theta}(s) = \frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}$$

$X_{commande} \cdot N_1 = X_{mesure} \cdot N_2$

$K_{m\theta} = N_2/N_1$

Unité de la consigne de courant

- Courant : $U_{ci} = I_c \cdot K'_{mi}$ avec $K'_{mi} \approxeq K_{mi}$
- Couple : $U_{ci} = T_c \cdot K'_{mi}/k'_T$ avec $k'_T \approxeq k_T$

Boucle fermée de courant

$G_{iBF}(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}}$

$G_{iBF}(0) \approxeq 1$

$\tau_{iBF} = 1/\omega_{m\varphi 45°}$

Système à régler

$$G_{a\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{I_{ac}(s)} = \underbrace{\frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}}}_{G_{iBF}(s)} \cdot k_T \cdot \underbrace{\frac{1}{J_t}\frac{1}{s^2}}_{Charge} \cdot \underbrace{\frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}}_{Capt-pos}$$

$$G_{a\theta}(s) = \underbrace{\frac{K_{m\theta} \cdot k_T}{J_t}}_{K_{a\theta}} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{iBF}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}}$$

Régulateur

PD = $G_{r\theta} = K_{p\theta} \cdot (1 + s \cdot \tau_{d\theta})$

Ajustage

$\tau_{ref} = \sum \tau_i$ ou $1/\omega_{ref}$ à -225°

$\tau_{m\theta} = \tau_{ref} - \tau_{iBF}$

$\tau_{d\theta} = N \cdot \tau_{ref}$

Réaction aux couples perturbateurs

$$G_{v\theta}(s) = \frac{\frac{1}{Jt \cdot s^2}}{1 + \frac{1}{Jt \cdot s^2} \cdot \frac{K_{m\theta}}{1 + s \cdot \tau_{m\theta}} \cdot K_{p\theta} \cdot (1 + s \cdot \tau_{d\theta}) \cdot G_{iBF \cdot k_T}}$$

Rigidité statique d'asservissement

$$K = \lim_{t\to\infty}\left[\frac{|T_{res}(t)|}{|e_\theta(t)|}\right] = \lim_{s\to 0}\left[\frac{1}{|G_\theta(s)|}\right]$$

en Statique :
$T_{em} = T_{res}$

$$K = \lim_{s\to 0}[G_{r\theta(s)} \cdot G_{iBF} \cdot k_T]$$

si regulateur PD :

$$K = \lim_{s\to 0}\left[K_{p\theta} \cdot (1+s\cdot\tau_{d\theta}) \cdot \frac{1}{1+s\cdot\tau_{iBF}} \cdot k_T\right] = K_{p\theta\cdot k_T}$$

$$G_f\theta = \frac{1}{1+s\cdot\tau_{fc\theta}}$$

Kx Rigidité

Courroie ou crémaillère : $K_x = \dfrac{K_\theta}{r^2}$

Vis-à-billes : $K_x = \left(\dfrac{2\pi}{p}\right)^2 \cdot K_\theta$

Réducteurs : $K_x = K_m \cdot i^2$

Arbre élastique

$$\frac{\theta_m(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s^2\,J_{ch} + s(R_{ft}+R_{fch}) + k_t}{a_4\,s^4 + a_3\,s^3 + a_2\,s^2 + a_1\,s}$$

avec simplification : $\begin{array}{l} a_4 = J_m \cdot J_{ch} \\ a_3 = (J_m + J_{ch}) \cdot R_{fe} \\ a_2 = (J_m + J_{ch}) \cdot k_t \\ a_1 = 0 \end{array}$

$$R_{fe} = \frac{J_m\,R_{fch} + J_{ch}\,R_{fm}}{J_m + J_{ch}} + R_{ft}$$

$$\frac{\theta_m(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s^2\,J_{ch} + s\,R_{fe} + k_t}{J_m J_{ch}\,s^4 + R_{fe}(J_m+J_{ch})\,s^3 + k_t(J_m+J_{ch})\,s^2}$$

$$\frac{\theta_{ch}(s)}{T_{em}(s)} = \frac{s\,R_{fe} + k_t}{J_m J_{ch}\,s^4 + R_{fe}(J_m+J_{ch})\,s^3 + k_t(J_m+J_{ch})\,s^2}$$

$$\frac{\theta_{ch}(s)}{\theta_m(s)} = \frac{s\,R_{fe} + k_t}{s^2\,J_c h + s\,R_{fe} + k_t}$$

Convertion PVC to PC

$$K_{p\theta} = K_{p\theta} \cdot K_{p\Omega}$$

$$\tau_{p\theta} = \frac{1}{K_{p\theta}}$$

Formule Sympa

$$P_{moyen} = \frac{nb_{freinage} \cdot Energie_{cynetique}}{T_{cycle}} = \frac{\frac{1}{2}J_t \cdot \omega^2}{T_{cycle}}$$

$P = T_{em} \cdot \omega$
$T_{em} = J_t \cdot \alpha$

$$\alpha_{rms}\big|_{t_{cycle}} = \alpha_{rms}\big|_{profil} \cdot \sqrt{\frac{t_{deplacement}}{t_{cycle}}}$$