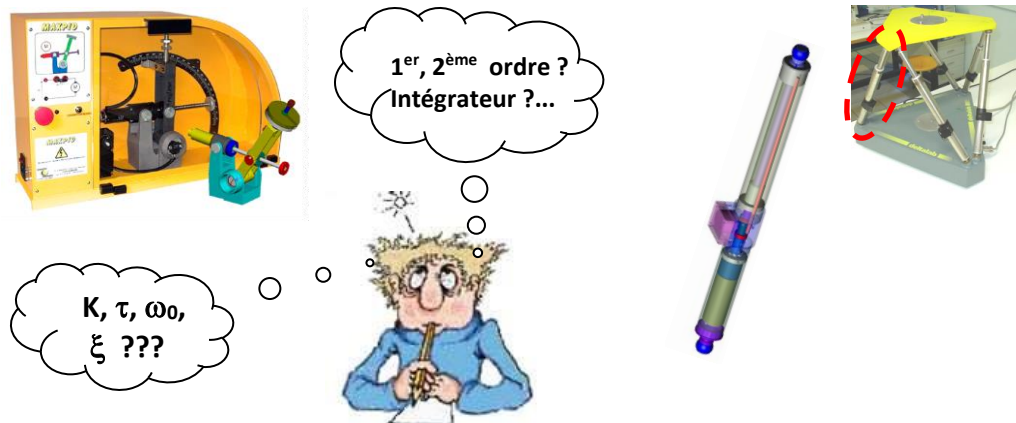


Bras de robot Maxpid : Identification temporelle du moteur à courant continu Approfondissement de la notion de saturation en tension



Introduction et présentation importante : modèles de comportement et connaissance

Modéliser un système c'est proposer une représentation **simplifiée** de ce système et qui s'en rapproche suffisamment pour pouvoir l'étudier. **Il existe deux types de modèles.**

Le modèle physique (ou modèle de connaissance) : il vous est familier car il est réalisé **grâce aux lois physiques** qui régissent son comportement (loi des mailles, loi des nœuds, PFD, champ des vitesses...). Par exemple c'est ce que nous faisons quand on modélise le comportement du moteur à courant continu par application de la loi des mailles aux composants électriques fondamentaux qui le modélisent, puis du PFD à son rotor.

Le modèle de comportement : il est réalisé par **observation du système réel**. Il est souvent utilisé pour modéliser les systèmes complexes multiphysiques pour lesquels la résolution du problème posé par l'application des lois physiques est difficile voire impossible. Dans ce cas on observe le comportement global du **système réel**, par manipulation en laboratoire, et **on choisit un modèle de comportement**, qu'on quantifie ensuite.

Si l'objectif de l'identification est de déterminer une fonction de transfert, on rappelle que vous connaissez six modèles fondamentaux de caractérisation des systèmes linéaires : proportionnel, intégral, 1^{er} ordre, 2^{ème} ordre (trois comportements possibles).

Objectif de la séance de TP

- Découvrir/Approfondir la cause de la saturation de la commande en tension du moteur CC de Maxpid.
- Déterminer les conséquences de la saturation : conséquences sur les performances ET conséquence pratique pour identifier le moteur CC « piégé dans la boucle d'asservissement ».

MODELISER C'EST CHOISIR. CHOISIR C'EST JUSTIFIER.

Durée : 2h00 avec permutation à mi-séance

AVERTISSEMENT

VOUS DEVEZ DEPLACER TOUT DOCUMENT NUMERIQUE MODIFIABLE DANS UN DOSSIER PERSONNEL AVANT OUVERTURE ET MODIFICATION.

Préparation à faire chez soi avant la séance de TP

- Lire tout le sujet
- Partie **préliminaire** à faire : doit être faite avant la séance de TP. Ne doit pas être abordée pendant la séance de TP. Sera présentée au professeur en début de séance.

Revoir les notions suivantes

- Les hacheurs (ouvrir le cours de sciences physique de M. Maimbourg) : Rôle, rapport cyclique, tension moyenne en sortie.
- Correction proportionnelle
- Fonction de transfert du 1^{er} et 2^{ème} ordre

**Vous disposez**

- Du sujet

**Vous devez rendre**

- Rédaction sur cahier de TP.

**PRELIMINAIRE : Travail personnel à faire chez soi**

Partie à faire chez vous. Ne doit pas être abordée pendant la séance de TP.

1. En pratique, qu'est-ce qu'est un modèle de connaissance (ou modèle physique).
2. En pratique qu'est-ce qu'est un modèle de comportement.
3. Décrire simplement la démarche « d'identification d'un système ».

On soumet un système du 1^{er} ordre à un échelon d'entrée $e(t)=e_0.u(t)$ où $u(t)$ est la fonction mathématique « échelon unité ».

4. Rappeler la fonction de transfert d'un système du 1^{er} ordre. Que vaut la valeur de sortie finale S_f , et la valeur de la sortie à $t = \tau$ la constante de temps $s(t = \tau)$?

On soumet un 2^{ème} ordre à un échelon d'entrée $e(t)=e_0.u(t)$.

5. Rappeler la fonction de transfert. Donner la valeur de sortie finale S_f . Donner l'expression du 1^{er} dépassement relatif D_{R1} en fonction de l'amortissement. Donner l'expression de la pulsation propre ω_n en fonction de la pulsation propre du système non amorti ω_0 .
6. Rappeler, dans l'ordre imposé ci-après, les quatre équations temporelles bien connues du moteur à courant continu :
 - Equation issue de la loi des mailles appliquée à l'induit du rotor

- Equation issue de la loi de Faraday appliquée aux spires tournant dans le champ magnétique inducteur
 - Equation issue du moment des forces de Laplace sur les spires de l'induit
 - Théorème du moment dynamique sur le rotor
7. Faire le schéma bloc d'un moteur CC conséquence des quatre équations et des notations précédentes. Bien inscrire chaque grandeur physique et son unité.
8. Hacheur : rappeler ce qu'est le rapport cyclique α . Que vaut la tension en sortie de hacheur u_{mot} en fonction de α et de la tension d'alimentation du hacheur U_{alim} ?

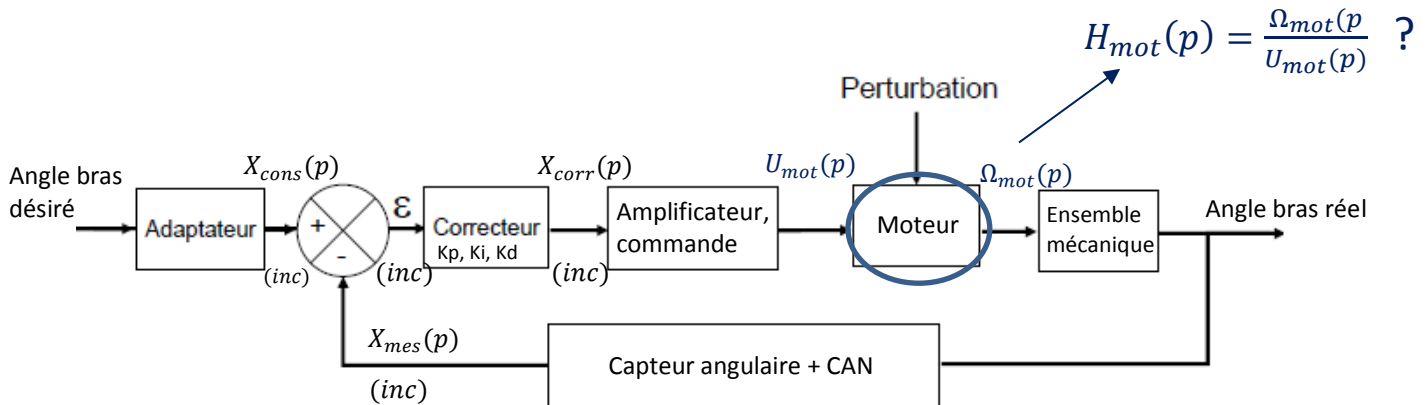
Votre travail au laboratoire comportera trois parties :

- PARTIE 1 : Expérimentation : identification du moteur seul de Maxpid
- PARTIE 2 : Simulation des effets de la saturation.

PARTIE 1 : Identification du moteur de Maxpid

1. Identification : modèle de comportement du moteur

Dans cette partie on se propose d'identifier le moteur de Maxpid seul. Il faut donc déterminer sa fonction de transfert $H_{mot}(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{U_{mot}(p)}$.



Le problème évident est qu'on n'a pas le moteur disponible, sorti de son contexte mécanique pour réaliser des essais indépendamment du système complet.

La principale difficulté à résoudre est l'envoi d'une consigne de tension échelon $U_{mot}(p) = U_0 \cdot u(t)$ aux bornes du moteur (On rappelle encore que $u(t)$ est la fonction mathématique échelon unité. $u(t)$ n'est pas une tension !).

En effet, à cause de l'asservissement, la tension moteur $u_{mot}(t)$ varie car elle permet de piloter au mieux la position du bras pour obtenir l'angle désiré (annulation de l'écart comparateur).

Première manipulation simple pour visualiser l'évolution de la tension moteur

Maxpid posé horizontalement sur la table, bras SANS les masses, correcteur proportionnel $K_p = 30$, consigne 40° : afficher les courbes de tension moteur et de vitesse moteur. Observer.

Puis recommencer en augmentant le gain proportionnel K_p : 100, 150, 200.

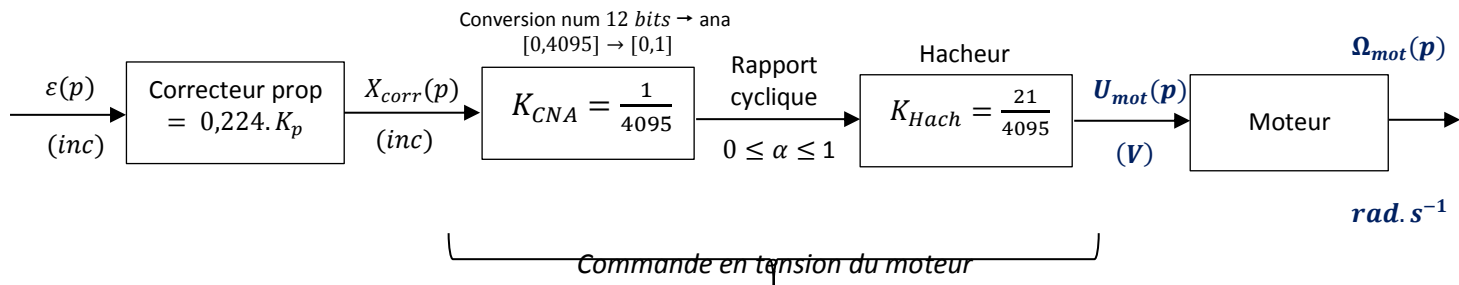
Vous remarquez qu'un « palier de tension » apparaît et augmente.

Quelle est la valeur U_{sat} de ce palier de tension ?

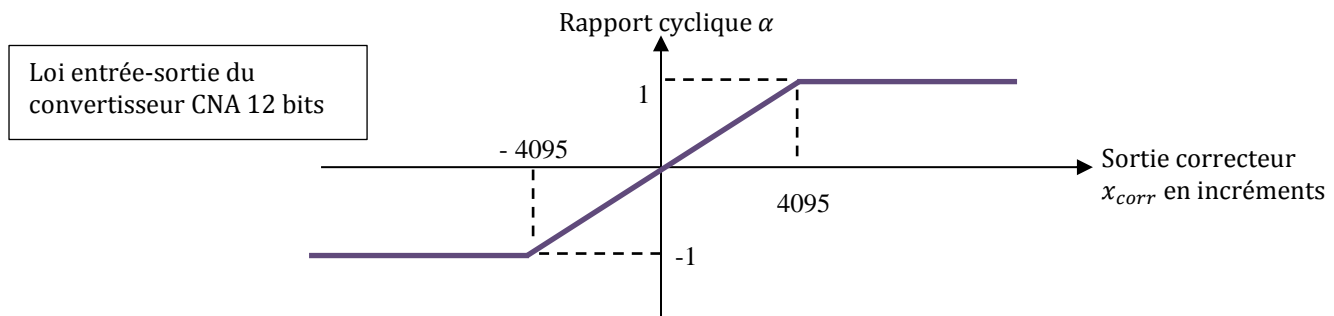
Ce palier est la conséquence de la saturation de la commande de tension en amont du moteur.

Saturation de tension de la commande du moteur : d'où ça vient ?

La commande en tension du moteur CC peut-être modélisée selon le schéma bloc ci-dessous.



La conversion numérique-analogique 12 bits vers un intervalle de valeur [0,1] correspondant au rapport cyclique envoyé au hacheur, n'est pas linéaire. Cela n'apparaît pas dans le schéma bloc ci-dessus, où on note juste la partie linéaire $K_{CNA} = \frac{1}{4095}$. La loi entrée-sortie de la conversion CNA est en fait :



Question

Pour une consigne de 40° et une correction proportionnelle $K_p=30$, déterminer par le calcul s'il y aura saturation de la tension de commande, au lancement de l'asservissement ? (au lancement, $t=0s$, on rappelle que la sortie vaut 0° , donc le retour capteur $X_{mes} = 0$. Donc l'écart ε est égal à...).

Le gain de l'adaptateur de consigne : $44 \text{ inc}/^\circ$, nécessaire pour ce calcul bien simple.

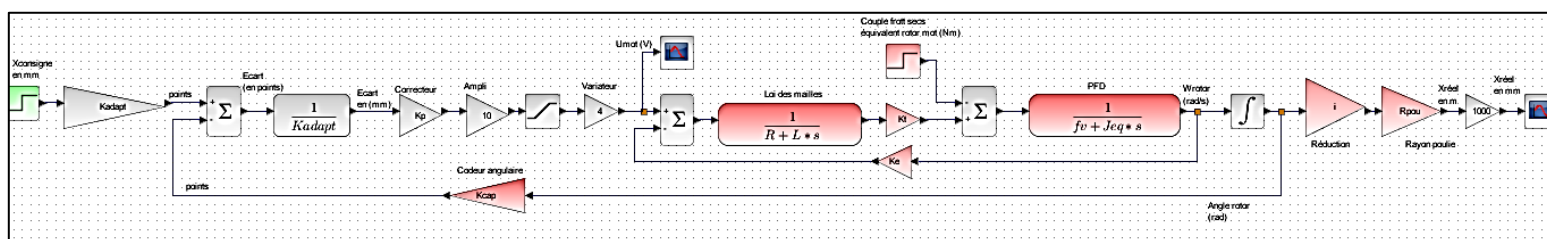
Problème inverse

Pour une consigne de 40° , à partir de quelle valeur de K_p y a-t-il saturation de la tension moteur ?

Application au système Control'X

Le schéma bloc de Control'X est donné ci-dessous.

Les résultats graphiques de deux essais sont donnés : position chariot (mm) et tension moteur (V).

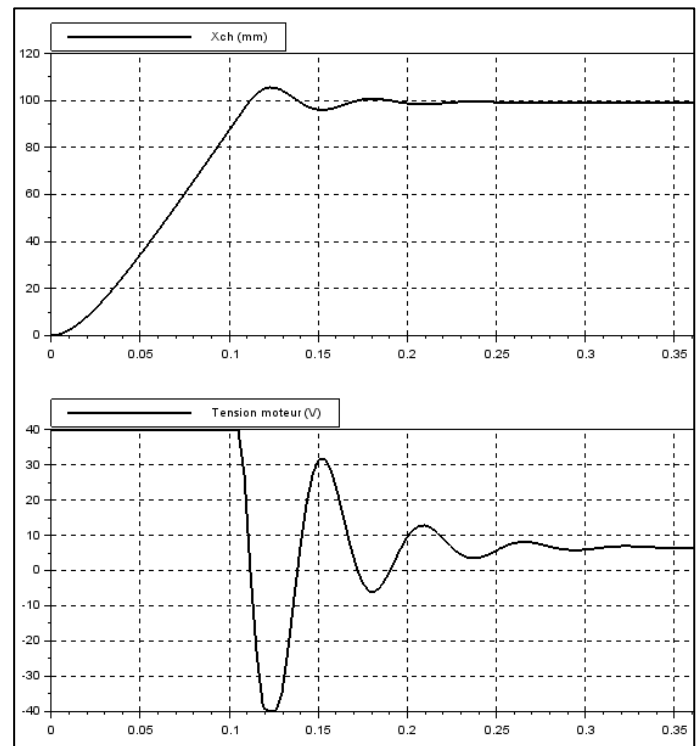


Quelle est la tension de saturation de la commande du MCC ?

Pour une consigne de 100mm, à partir de quelle valeur de la correction proportionnelle K_p a-t-on saturation ?

Conclusion

La saturation de la tension d'alimentation du moteur dépend de deux facteurs : le gain du correcteur et la consigne imposée.



Deuxième manipulation : identification du moteur CC de Maxpid

Il s'agit donc de déterminer $H_{mot_ID}(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{U_{mot}(p)}$ par expérimentation.

Maintenant, on a connaissance de la saturation possible de la commande du moteur de Maxpid. On va provoquer une saturation assez longue pour créer un échelon de tension aux bornes du moteur, pour pouvoir lui appliquer une tension échelon, et, donc, identifier sa fonction de transfert.

- Faire un réglage de correction élevé
- Imposer une consigne assez élevée (éviter les butées haute et basse du bras !)
- Afficher : la consigne, la tension moteur, la vitesse moteur
- Lancer le bras, visualiser la réponse en vitesse : choisir un modèle (proportionnel, intégral, 1^{er} ordre, 2^{ème} ordre ?)
- Déterminer $H_{mot_ID}(p)$.

Conclusion

Comparer avec les résultats simulés si vous êtes en deuxième heure de la séance.

2. Modèle de connaissance (ou modèle physique, « théorique »)

La fonction de transfert d'un moteur CC conséquence des quatre équations bien connues (loi des mailles de l'induit, deux couplages électromécaniques, PFD au rotor) est :

$$H_{mot_th}(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{U_{mot}(p)} = \frac{K_t}{LJ_{eq}p^2 + (RJ_{eq} + Lf)p + K_tK_e + Rf}$$

L	Inductance de l'induit ($6,2 \cdot 10^{-4}$ H)	Kt	Constante de couple ($5,25 \cdot 10^{-2}$ Nm/A)
Jeq	Mt d'in. rapporté au rotor, sans les masses ($1,0 \cdot 10^{-5}$ kg.m ²)	Ke	Constante de fem ($5,25 \cdot 10^{-2}$ Vs/rad) = Kt
f	Coefficient de frottement visqueux (Ns/rad)	R	Résistance de l'induit (R=2,1 Ω)

Par expérience et habitude on sait que, pour un petit moteur, l'influence de l'inductance L est négligeable sur son comportement indiciel. On peut donc considérer L nulle dans la fonction de transfert.

De même la quantité $R \cdot f$ peut être négligée par rapport à $K_e \cdot K_t$.

- Simplifier la fonction de transfert $H_{mot-th}(p)$ et la mettre sous la nouvelle forme canonique simplifiée.
- Modèle de connaissance : déterminer la fonction de transfert $H_{mot-th}(p)$.
- Comparer la fonction de transfert $H_{mot-th}(p)$ « théorique » à la FT identifiée $H_{mot-ID}(p)$.
- Comparer avec la « constante de temps électromécanique » du moteur donnée par le constructeur Maxon. (voir l'extrait de la documentation constructeur ci-dessous)

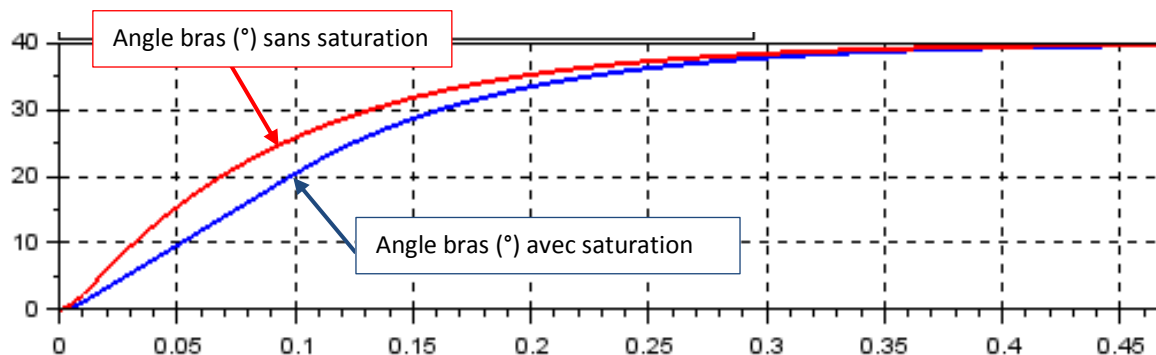
Puissance utile max. à U_a	W	69
Rendement maximum	%	85.5
Constante de temps électromécanique	ms	5.23
Inertie	gcm ²	69.6
Résistance aux bornes	Ohm	2.07
Inductivité	mH	0.62
Résistance thermique Boîtier/Ambiant	K/W	6.5

3. Et maintenant, le petit plus ! Le regard aguerri du pro !

⇒ Comment détecter une saturation de la commande moteur en regardant la réponse temporelle en sortie de boucle ?

☞ Faites un essai permettant de saturer la tension moteur (forte consigne 70°, et K_p élevé 150). Afficher uniquement 3 grandeurs : angle bras réel (°), tension de commande (V), vitesse du rotor moteur (rad/s).

Vous remarquez que la sortie (angle réel du bras) est une droite (croissance linéaire). Alors que sans saturation, la sortie n'est pas droite (forme de « S » avec inflexion).



☞ Expliquer pourquoi la sortie croît linéairement avec le temps quand il y a saturation.



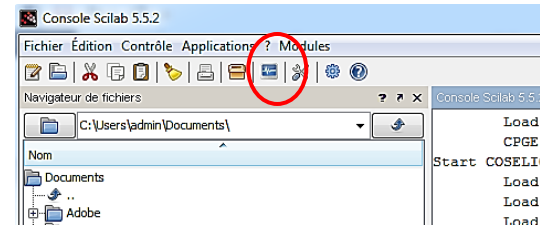
FIN DE LA PARTIE 1 : Permutation

PARTIE 2 : SIMULATION DES EFFETS DE LA SATURATION

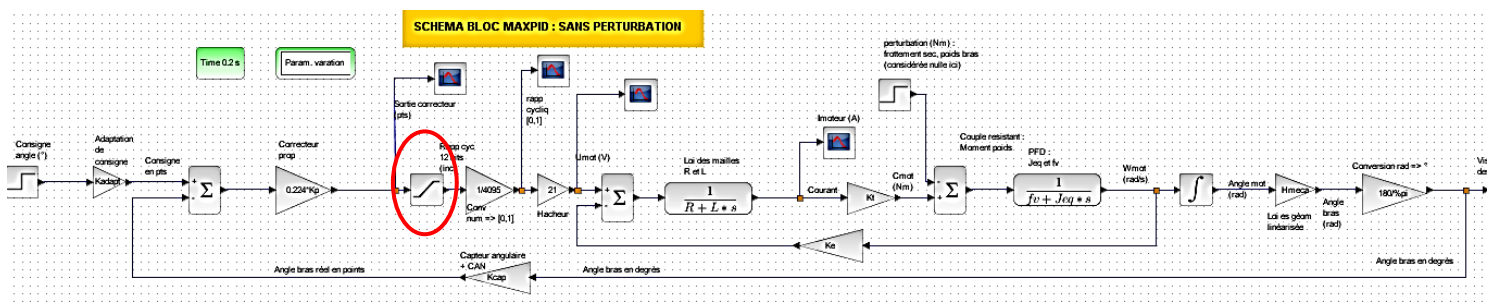
4. Présentation du modèle Scilab/Xcos

Ouvrez le logiciel Scilab 5.32b à partir du bureau du PC (**dans le dossier « logiciel mathématique »**), et non par une recherche Windows (sinon vous ouvrirez une mauvaise version sans vous en rendre compte).

Ouvrir Xcos (clic sur icône).



Ouvrir le modèle : « Schema_bloc_Maxpid_sans_perturbation ». Le schéma bloc ci-dessous s'affiche.



Quelques informations sur le traitement de l'information de Maxpid et la commande en tension du moteur CC :

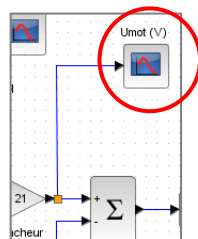
- Traitement de l'information est numérique sur 12 bits.
- Commande en tension par hacheur dévolteur quatre quadrants
- Pilotage du hacheur par un rapport cyclique variant de 0 à 1.
- Hacheur alimenté par une tension continue de 21 V.

Vous remarquez sur le schéma bloc la présence du bloc saturation.

Ouvrez le bloc saturation, puis le contexte pour voir la valeur de la saturation imposée.

- ☞ Quelle est la valeur de la saturation (=valeur maxi possible en sortie de bloc) ?
- ☞ Expliquer la raison simple et logique de cette valeur de saturation ?

☞ Mettre en place trois « scopes » (= écrans de visualisation) pour visualiser les courbes d'évolution de : la tension moteur, le rapport cyclique, la sortie correcteur.



5. Lancement de la simulation – effet de la correction sur la saturation

- ☞ Dans le bloc « paramètre variation » saisir deux corrections proportionnelles Kp différentes, 30 et 100 : [30 100]
- ☞ Saisir une consigne de 10°
- ☞ Durée d'étude : à vous de voir, c'est rapide. *Time 0,2 s* serait un bon début.
- ☞ Lancer la simulation. Surtout : agrandir la fenêtre de visualisation des courbes car il y en a beaucoup.

Analyser/Conclure

- ☞ Valeur maxi de la commande de tension moteur ?

☞ Evolution du rapport cyclique : comparer les courbes pour les deux valeurs de K_p . Si on n'avait pas utilisé le bloc saturation, que se passerait-il ? Pourquoi le modèle serait-il aberrant ?

☞ Evolution de la sortie du correcteur (en nombre de points, ou incréments) : mêmes questions que précédemment.

☞ Evolution de l'angle du bras : **quelle performance** de l'asservissement est (nécessairement) affectée par la présence de saturation de la commande moteur ? Quantifier la « performance » dans les deux cas.

6. 2ème simulation – réponse avec/sans saturation

L'objectif est de visualiser les conséquences de la Non-saturation.

Autrement dit, quelle réponse temporelle donne le modèle si on ne modélise pas la saturation, bien réelle sur le système.

🖥 Pour cela, saisissez dans le bloc « paramètre variation », les deux valeurs de SATuration : 4095 (saturation) et une valeur énorme (disons 10^6 , par exemple) qui permettra au signal de monter très haut sans jamais saturer.

🖥 Lancer une simulation pour des valeurs courantes : consigne 50° , correction $K_p=80$.

☞ Analyse/conclusion : relever les aberrations conséquences de ce modèle sans mise en place de la saturation.

7. 3ème simulation – utilisation de la saturation pour identifier le moteur CC

🖥 Epurer le schéma bloc en supprimant les deux scopes : rapport cyclique, et le scope intensité.

🖥 Mettre un scope montrant la vitesse du rotor moteur $\omega_{mot} \text{ (rad/s)}$.

🖥 Lancer une simulation avec un angle consigne de 60° , $K_p=150$.

☞ En quoi la saturation devient intéressante pour identifier le moteur CC ?

✂ Dédurre les caractéristiques de la fonction de transfert de 1^{er} ordre du moteur CC : $\tau_{mot-sim}$ et $K_{mot-sim}$?

On donne la fonction de transfert complète d'un moteur CC, issue du modèle physique avec une simplification 1^{er} ordre :

$$H_{mot}(p) = \frac{K_t}{(L \cdot f_v + R J) \cdot p + (K_t K_e + R f_v)}$$

✂ Dédurre les valeurs « théoriques » : constante de temps τ_{th} et gain statique K_{th} . Comparer avec les valeurs précédemment relevées sur la simulation.

FIN DU SUJET