

Support technologique : Control'X

Objectifs : Control'X est la maquette de laboratoire d'un robot portique multiaxe. Ici seul l'axe X est motorisé et instrumenté. Le déplacement d'un chariot en translation est assuré par un moteur CC entraînant un réducteur puis une poulie/courroie.

La présente étude a pour but de déterminer la loi de mouvement de la partie mobile. Cela nécessite la détermination des caractéristiques de résistance de frottement et inertielle délicates à évaluer théoriquement.

Le protocole expérimental mis en place a pour objectif de déterminer ces caractéristiques.

Durée de la séance : 2 heures avec permutation à mi-séance



Démarche ingénieur

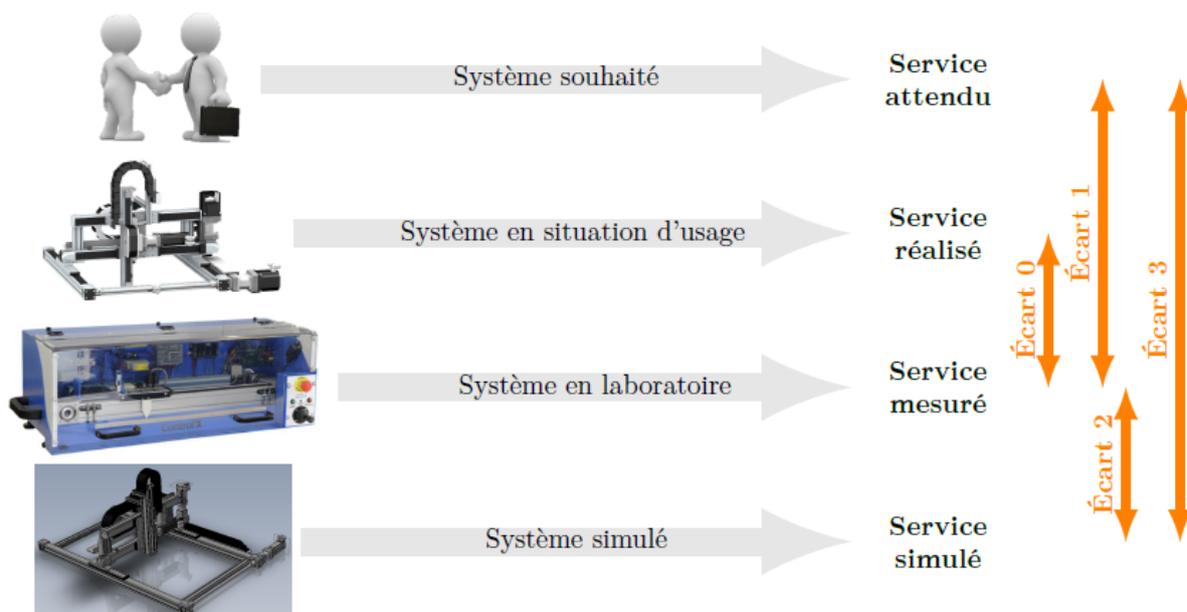


FIGURE 1 – Démarche de l'ingénieur centrée sur la mesure des écarts.

Objectif : minimiser les écarts

Préparation à faire chez soi avant la séance de TP

- Lire le sujet
- Partie 2 théorique. Devra être rendue avec le compte rendu de TP. Ne doit pas être abordée pendant la séance de TP.



Revoir les notions suivantes

- Loi reliant le couple moteur et l'intensité absorbée pour un moteur à courant continu.
- PFS et plus particulièrement le théorème du moment
- Rapport de réduction

Vous disposez

- Du sujet



Vous devez rendre

- Rédaction sur cahier de TP.



Objectif détaillé

L'objectif concret de cette activité pratique est de déterminer expérimentalement les trois données ci-dessous :

- Couple de frottement sec rapporté au rotor moteur, de tout l'équipage mobile {chariot, courroie, 2 poulies, réducteur, rotor moteur, roulements} : C_{fs}
- Coefficient de frottement visqueux rapporté au rotor moteur, de tout l'équipage mobile : f_v (N.m.s/rad)
- Moment d'inertie équivalent ramené au rotor moteur de tout l'équipage mobile : J_{eq}

On rappelle la loi de mouvement de Control'X ramenée au rotor équivalent, obtenue par application du théorème de l'énergie puissance à l'ensemble mobile de Control'X :

$$J_{eq} \frac{d\omega_{mot}}{dt} = C_{mot} - f_v \omega_{mot} - C_{fs} - C_r \quad (E1)$$

- ω_{mot} = vitesse de rotation du rotor moteur
- J_{eq} = moment d'inertie équivalent de l'ensemble mobile ramené au rotor moteur
- C_{mot} = couple moteur électromagnétique (=moment des forces de Laplace du stator sur le rotor)
- $f_v \omega_{mot} = C_v$ = couple de frottement visqueux de l'ensemble mobile ramené au rotor moteur. f_v est le coefficient de frottement visqueux, positif.
- C_{fs} = Couple de frottement sec de l'ensemble mobile, constant, ramené au rotor moteur.
- C_r = couple résistant (ou même « moteur » d'ailleurs) provenant de toutes autres causes (pente, ressort à tirer...). Dans la plupart des cas pour Control'X, $C_r = 0...$ à moins qu'on utilise le ressort didactique ! Pour ce TP : $C_r = 0$.

Rappel

On rappelle que dans un moteur à courant continu le couple électromagnétique fourni par le stator au rotor est proportionnel au courant absorbé (moment des forces de Laplace).

Avertissement

Vous disposez d'un début de tableau de calcul numérique qu'il faudra compléter.

Control'X : loi de mot					
Essai n°	Vitesse (mm/s)	I (A)	ω (rad/s)	C_{mot} (Nm)	T (A)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

PARTIE 1 : EXPERIMENTATION

Reportez-vous aux annexes en toute fin de document pour l'utilisation de Control'X : mise en route, réalisation d'un essai, acquisition des données.

Pour évaluer (C_{fs}, f_v) , puis J_{eq} on propose les protocoles expérimentaux ci-dessous. Les lire entièrement avant application étape par étape.

1ère expérience

Essais à vitesse constante : détermination de C_{fs} et f_v .

- Lancer plusieurs essais en boucle fermée avec consigne de vitesse en trapèze : vitesse du palier de 100mm/s à 1500mm/s. Valeur d'accélération par défaut. Veiller à réinitialiser le chariot entre chaque essai.
- Pour chaque essai, relever l'intensité et la vitesse angulaire du moteur sur l'intervalle temporel où ces données sont les plus constantes.
- Ouvrir la feuille de calcul : « loi_mvt_controlX_etudiant ». Compléter le tableau avec vos mesures : y saisir les valeurs de I_{mot} et ω_{mot} .
- Tracer le nuage de points : C_{mot} en ordonnée, et ω_{mot} en abscisse.
- En vertu de l'équation (E1) comment peut-on déduire f_v et C_{fs} de ce tracé ?
- Déduire les valeurs de f_v et C_{fs} du Control'X. Attention aux unités.

Comparer ces valeurs aux données constructeur du moteur Sanyo en annexe. Mais... est-ce comparable ?..

2ème expérience - J_{eq} par la constante de temps

Réponse à un échelon de tension moteur : détermination de J_{eq} .

Position du problème

Si on soumet le moteur de Control'X à un échelon de tension $u_{mot}(t) = U_0 \cdot u(t)$, la vitesse du rotor $\omega_{mot}(t)$ croît selon une allure exponentielle asymptotique. Le choix d'un modèle 1^{er} ordre pour la fonction de transfert du moteur, $H_{mot}(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{U_{mot}(p)}$ est donc pertinent.

La constante de temps du moteur issue du modèle physique est : $\tau_{mot} = \frac{R \cdot J_{eq} + f_v L}{R \cdot f_v + K_e^2}$.

Résistance induit MCC	R (Ω)	Constante de f.c.e.m.	K_e V/(rad/s)
Inductance induit MCC	L (H)	Constante de couple	K_c Nm/A
Coefficient de frottement visqueux ensemble mobile	f_v Nm/(rad/s)	Remarque : $K_e = K_c$	$Vs/rad = Nm/A$

Voir annexe : données constructeur du moteur CC, Sanyo

Manipulation : J_{eq} expérimental.

- Faire un essai avec un échelon de consigne de déplacement élevé (100 mm par exemple). Afficher la tension moteur et sa vitesse
- Vérifier que la commande de tension moteur $u_{mot}(t)$ sature, produisant ainsi un échelon de tension en entrée moteur.
- Vérifier que pendant la saturation, la vitesse moteur $\omega_{mot}(t)$ d'allure exponentielle, atteint sa vitesse maxi.
- Par lecture du graphique : déterminer la constante de temps.
- Déduire le moment d'inertie équivalent de l'ensemble mobile ramené au rotor moteur.

Comparer avec le moment d'inertie du rotor moteur Sanyo en annexe. Mais... est-ce comparable ?!..

3ème expérience - J_{eq} par le PFD

Réponse mécanique à un couple moteur constant

L'objectif est l'exploitation des données au démarrage du chariot et à vitesse constante pour une loi de vitesse en trapèze.

- Réécrire l'équation (E1) dans le cas particulier du démarrage (vitesse nulle, accélération non nulle).
- Lancer un essai en trapèze permettant d'avoir une accélération contrôlée/imposée
- Relever l'accélération du chariot et calculer le couple moteur sur l'intervalle de temps où ils sont le plus constant.
- Déduire le moment d'inertie de l'ensemble mobile ramené à l'arbre moteur J_{eq} .

Comparer avec le moment d'inertie déterminé avec l'expérience précédente.



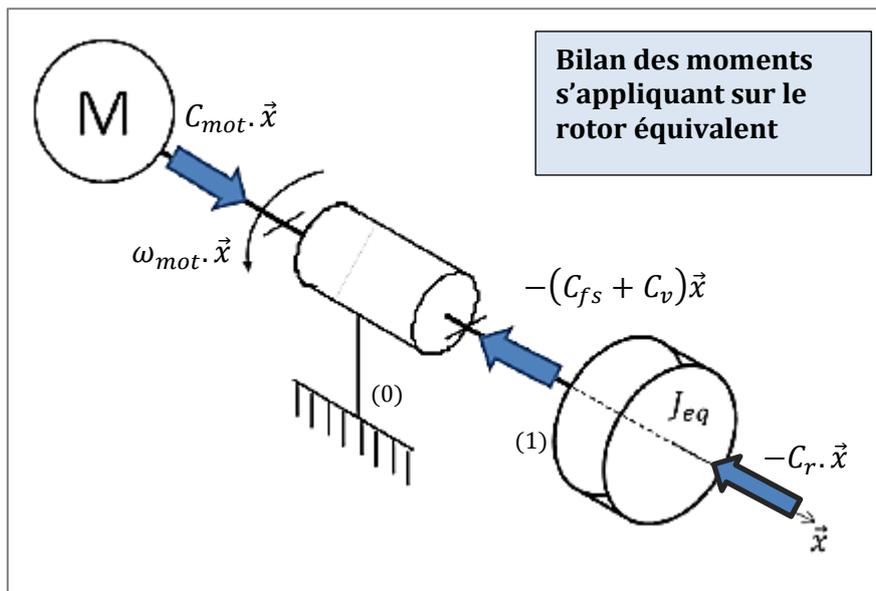
Fin de la partie 1 : permutation.

PARTIE 2 : THEORIE PREPARATOIRE

Cette partie se prépare avant la séance de TP... chez soi. Elle doit être prête et rédigée avant la séance.

Q1. Soit un arbre (1) de moment d'inertie J_{eq} , en pivot dans un bâti (0) et subissant quatre actions mécaniques extérieures :

- couple moteur C_{mot}
- couple de frottement visqueux $C_v (>0)$
- couple de frottement sec C_{fs} , avec $C_{fs} > 0$. Sa vitesse angulaire instantanée est $\omega(t)$. Le couple de frottement visqueux est proportionnel à la vitesse angulaire : $C_v = f_v \cdot \omega(t)$, avec $f_v > 0$.
- Couple résistant C_r autre que frottements secs ou visqueux



Par application du Théorème de l'Energie Puissance à l'arbre (1) (ou du théorème du moment dynamique, c'est comme vous voulez), selon son axe de rotation, écrire la loi de mouvement de l'arbre 1 (équation E1).

Remarque : pour ce TP : $C_r = 0$. (il faut utiliser le ressort didactique pour avoir $C_r \neq 0$... ce qui n'est pas le cas dans ce TP)

Q2. Traiter les deux cas particuliers ci-dessous.

- Vitesse constante : écrire l'expression de C_{mot} (\Rightarrow équation E2).
- Vitesse nulle : réécrire la loi de mouvement E1 (\Rightarrow équation E3).

Q3. Rappeler la loi reliant le couple moteur C_{mot} à l'intensité absorbée I_{mot} pour un moteur à courant continu. Préciser les unités.

Préciser la valeur constructeur intéressante (voir annexe au sujet).

PARTIE 3 : SIMULATION

Comparaison avec les données constructeur ou empirique

On donne en annexe les données constructeur des différents composants du Control'X. Les caractéristiques inertielles sont indiquées. A VOUS DE LES TROUVER.

Aide n°1 : on donne ci-dessous l'expression de l'énergie cinétique totale de l'ensemble mobile exprimée en fonction de la vitesse de rotation du rotor moteur ω_{mot} :

$$E_c(mobile/b\hat{a}ti) = \frac{1}{2} \cdot [J_{mot} + J_{gt} + J_{red} + J_{ac} + 2 \times J_{pou} \times k_{red}^2 + (M_{cou} + M_{ch})(R_{pou} \cdot k_{red})^2] \cdot \omega_{mot}^2$$

Où :

J_{mot} = moment d'inertie du rotor moteur seul

J_{gt} = moment d'inertie de la génératrice tachymétrique (elle est fixée sur le rotor)

J_{red} = moment d'inertie du réducteur rapporté au rotor moteur

J_{ac} = moment d'inertie de l'accouplement motoréducteur

J_{pou} = moment d'inertie d'une poulie

M_{cou} = masse de la courroie (les deux parties qui translatent, tendue et molle)

M_{ch} = masse du chariot

k_{red} = rapport de réduction du réducteur (<1)

R_{pou} = rayon de la poulie

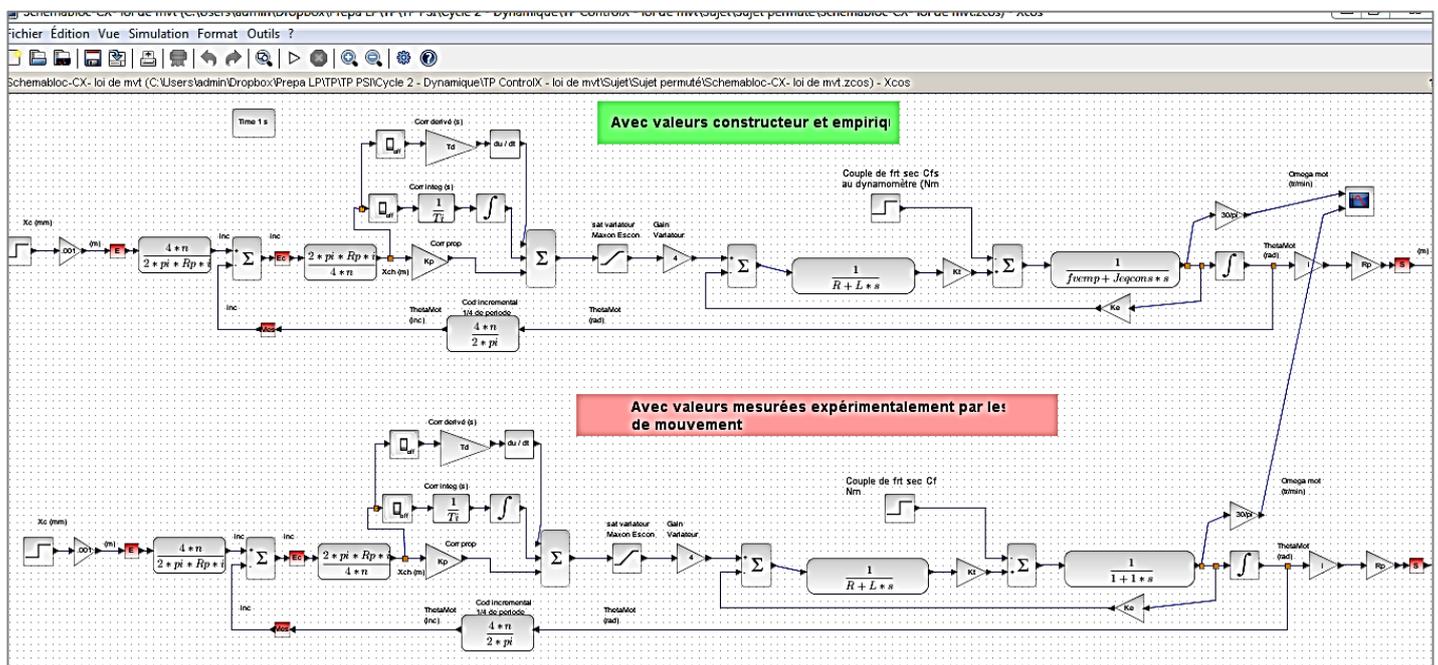
Q4. Déterminer J_{eq} du constructeur noté : J_{eqcons} . Comparer. Conclure.

Aide N°2 : la formule est déjà saisie dans la feuille de calcul Excel : « Calcul J_{eq} Control'X – élèves ». Transporter ce document dans un dossier personnel. Ouvrez-le puis déterminer J_{eqcons} .

Conséquence des différences des valeurs constructeur/expérimentale

Pour chaque étudiant : ouvrez Scilab sur un PC « informatique ».

Ouvrez le document « Schemabloc-CX- loi de mvt » : il inclut deux schéma bloc.



Le schéma bloc « constructeur » : valeurs J_{eqcons} , C_{fs-dyn} , f_{v-emp} .

Le schéma bloc « expérimental loi de mouvement » : valeurs J_{eq} , C_{fs} , f_v .

Saisissez ces six valeurs aux endroits adéquats (écrasez les valeurs dans les blocs, c'est plus visuel). Lancer la simulation.

Q5. Conclusion

Evaluer maintenant l'influence de l'écart entre chaque valeur indépendamment en saisissant la même valeur pour deux grandeurs et les deux valeurs différentes pour la troisième.

Q6. Conclusion détaillée pour chacune des trois grandeurs.

Evaluation simple de C_{fs} et f_v

Il n'existe pas de donnée constructeur du couple de frottement sec équivalent C_{fs} , ni du coefficient de frottement visqueux équivalent f_v .

Vous allez tout de même évaluer C_{fs} simplement.

Aller discrètement sur le système et faite la manipulation suivante.

Q7. Evaluer les forces de frottements de l'ensemble mobile rapporté au chariot F_{fs} : tirer avec un dynamomètre sur le chariot et noter F_{fs-dyn} . Rapporter cet effort au rotor moteur grâce à la loi entrée sortie :

$$C_{fs-dyn} = F_{fs-dyn} \times R_{pou} \times k_{red}$$

Q8. Comparer C_{fs} et C_{fs-dyn} , J_{eq} et J_{eqcons} .

Cas particulier de f_v .

Il existe une valeur de f_v , empirique et déterminée par tâtonnement en comparant les réponses indicielles simulée et expérimentale de Control'X : $f_{v-emp} = 1,24 \cdot 10^{-5} \text{ Nms/rad}$.

Q9. Comparez f_{v-emp} et f_v .



Fin des parties 2-3 : permutation.

FIN DU SUJET

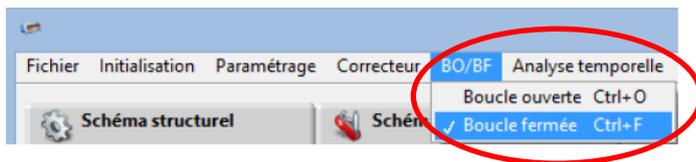
Annexe 1 : utilisation de Control'X



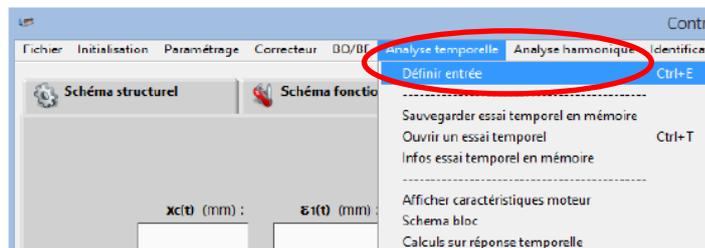
Mise en marche générale du système

- Appuyer sur le bouton marche/arrêt situé derrière le système.
- Fermer le capot de protection
- Déverrouiller le gros bouton rouge d'arrêt d'urgence
- Armer le système (petit bouton vert) => la lumière verte s'allume.

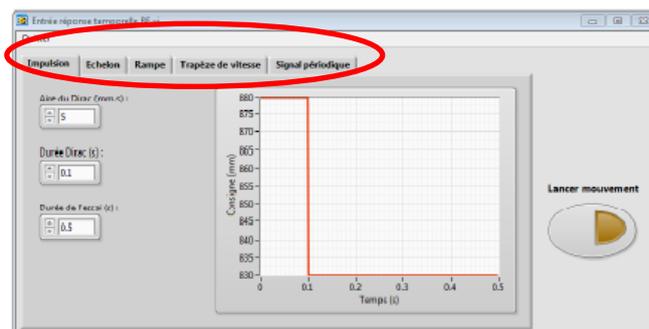
Lancer un essai



Choix du bouclage :
boucle ouverte ou
fermée



Pour effectuer un essai
temporel



Choix de l'entrée
imposée : impulsion,
échelon, rampe, trapèze,
périodique.

Annexe 2 : acquisition des mesures sur Control'X

Affichage des grandeurs physiques acquises par les capteurs

Après avoir lancé un mouvement, la fenêtre ci-dessous apparaît.

Déplacer le curseur pour obtenir les valeurs correspondantes

Choix des signaux à observer en ordonnées

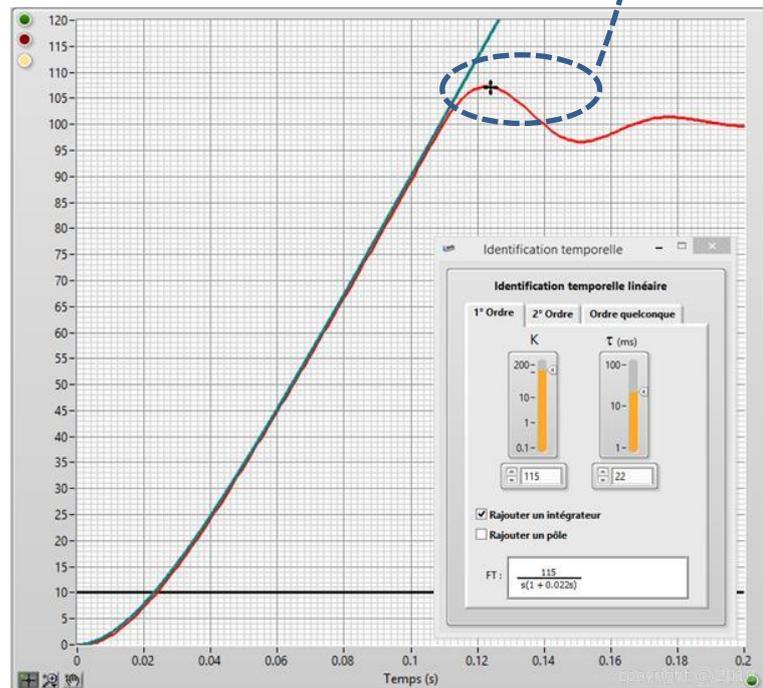
Choix du signal en abscisse

Y	t : temps (s)	0.02
<input checked="" type="checkbox"/> c : consigne (mm ou V)		300
<input checked="" type="checkbox"/> x : position (mm)		7.323
<input type="checkbox"/> e1 : écart 1 (mm ou V)		292.677
<input type="checkbox"/> e2 : écart corrigé (mm ou V)		292.677
<input type="checkbox"/> e3 : écart corrigé (V)		10
<input type="checkbox"/> u : tension moteur moyenne(V)		39.931
<input type="checkbox"/> i : intensité (A)		4.418
<input type="checkbox"/> v : vitesse axe (mm/s)		681.882
<input type="checkbox"/> w : vitesse moteur (tr/min)		791.981
<input type="checkbox"/> q : position moteur (°)		51.025
<input type="checkbox"/> f : effort extérieur (N)		-3.011
<input type="checkbox"/> x2 : x règle magnétique (mm)		-7.37
<input type="checkbox"/> s : signal optionnel		0
<input type="checkbox"/> formule 1		176.413
<input type="checkbox"/> formule 2		-638.562

Seules grandeurs qui ne sont pas mesurées mais calculées

Curseur : à déplacer pour obtenir les valeurs numériques correspondantes

La (ou les) courbes apparaissent comme l'exemple ci-dessous.



Attention, lors d'impression de plusieurs courbes :

Une courbe de forte amplitude (valeurs numériques élevées) peut « écraser » une courbe dont les valeurs sont faibles. Cette dernière peut donc avoir l'air « plate » et à valeurs quasi-nulles, alors que ce n'est pas le cas. Il faut alors afficher la courbe « écrasée » seule pour bien visualiser ses variations.

ANNEXE 3 : DOCUMENTATION TECHNIQUE DU MOTEUR CC SANYO

5.1 Documents moteur Sanyo T511-T012-EL8

5.1.1 Caractéristiques moteur fournies par le constructeur

Caractéristique	Température	Symbole	Unité	Valeur	Observations
Puissance nominale	**	P_{nom}	W	110	
Tension nominale	**	U_{nom}	V	75	
Couple nominal	**	C_{nom}	N.m	0.34	
Courant nominal	**	I_{nom}	A	2.0	
Vitesse nominale	**	ω_{nom}	tr/min	3000	soit 314 rad/s
Couple maxi en continu	**	C_{cont}	N.m	0.42	
Couple maxi instantané	**	C_{max}	N.m	3.4	
Courant maxi en continu	**	I_{cont}	A	2.2	
Courant maxi instantané	**	I_{max}	A	18	
Vitesse maximale			tr/min	5000	soit 523 rad/s
Couple de friction	*	$C_{frotts-moteur}$	N.m	0.022	
Accélération instantanée	maxi	**	rad/s ²	91.9×10^3	
Coefficient de frottement visqueux	*	$f_{D-moteur}$	N.m/min	0.013×10^{-3}	soit $0.124e-3$ N.m/(rad/s)
Constante de couple	*	k ou k_c	N.m/A	0.21	
Constante de force contre électromotrice	*	k ou k_e	V/min	21.8×10^{-3}	soit $0.2083V/(rad/s)$
Moment d'inertie du rotor	*	J_{mot}	kg.m ²	0.037×10^{-3}	
Résistance d'induit	*	r	Ω	5.1	
Inductance d'induit	*	L	mH	3.2	
Constante de temps mécanique	*	$T_{méca}$	ms	4.3	
Constante de temps électrique	*	$T_{élec}$	ms	0.63	
Constante de temps thermique	**		min	30	
Résistance thermique	**		K/W	2.4	
Température limite	**		°C	105	

REPONSE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU A UN ECHELON DE TENSION U_{mot}

Si on retient un modèle 1^{er} ordre pour le MCC :

Constante de temps : $\tau = \frac{R \cdot J_{eq} + f_v \cdot L}{R \cdot f_v + K_e^2}$ avec $f_v \cdot L$ qui est souvent négligeable devant $R \cdot J_{eq}$

Gain statique : $K_{mot} = \frac{\omega_\infty}{U_{mot}} = \frac{K_e}{R \cdot f_v + K_e^2}$

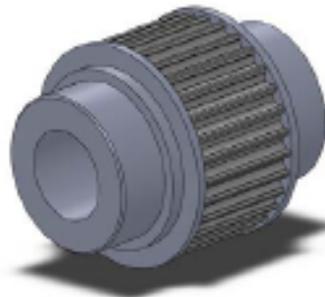
ANNEXE 4 : DOCUMENTATION TECHNIQUE DU REDUCTEUR



Caractéristique	Symbole	Unité	Valeur	Observations
Nombre d'étage			1	Train épicycloïdal
Rapport de réduction	$1/i$		1/3	($\omega_{sortie}/\omega_{entrée}$)
Couple de sortie nominal		N.m	28	
Couple de sortie max		N.m	45	
Couple d'urgence		N.m	66	Autorisé 1000 fois
Jeu angulaire		arcmin	< 10	Ramené sur la sortie (à priori)
Vitesse d'entrée max		tr/min	13000	
F_R max pour 300000 h		N	340	
F_A max pour 300000 h		N	450	
F_R max		N	700	
F_A max		N	800	
Rigidité en torsion		N.m/arcmin	2.3	7.907×10^3 N.m/rad
Masse		kg	0.9	
Moment d'inertie	J_r	kg.cm ²	0.135	$0.135 \cdot 10^{-4}$: ramené sur l'entrée
Rendement		%	97	
Durée de vie		h	30000	
Température de fonctionnement		°C	-25 à +90	

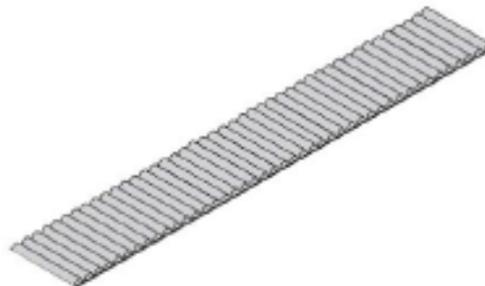
ANNEXE 5 : DOCUMENTATION TECHNIQUE POULIE ET COURROIE

5.6 Poulies crantées



Caractéristique	Symbole	Unité	Valeur	Observations
Type				25 HTD 5M
Largeur		mm	25	
Pas	p^*	mm	5	
Nombre de dents	Z		31	
Rayon primitif	R	mm	24.67	Avance de 155 mm/tour
Avance par tour	a	mm	155	
Moment d'inertie	J_p	kg.m ²	$4.2 \cdot 10^{-5}$	Calculé avec SolidWorks (aluminium)

5.7 Courroie



Caractéristique	Symbole	Unité	Valeur	Observations
Type				25 HTD 5M
Largeur		mm	25	
Pas	p^*	mm	5	
Longueur primitive de courroie	l_c	mm	1670	
Masse linéique	λ_c	kg/m	0.096	
Masse	m_c	kg	0.16	
Raideur spécifique	r_s	N	0.572×10^6	*
Tension recommandée		N	[570, 710]	