

AGREGATION INTERNE DE GENIE ELECTRIQUE

OPTION B

ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Étude d'un problème d'automatisation (durée 6 heures)

TRÉFILEUSE – RECUISEUSE

RECOMMANDATIONS AUX CANDIDATS

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

ORGANISATION DU SUJET :

SUJET : Parties 1 à 4 (13 pages)

DOCUMENTS ANNEXES : Annexes 1 à 5 (5 pages)

NOTE AUX CANDIDATS :

Les parties 1, 2, 3 et 4 sont indépendantes.

PRESENTATION DES APPLICATIONS NUMERIQUES :

Lors du passage d'une forme littérale à son application numérique il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

Après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

TRÉFILEUSE – RECUISEUSE

PRESENTATION

La tréfileuse – recuiseuse utilisée dans la société Alcatel Câble permet, à partir d'une bobine de fil de cuivre brut, de réaliser des fils électriques de section allant de 1,35 mm² à 16 mm².

La machine comporte 2 parties :

- Une partie tréfilage qui permet par passes successives d'amener le fil de la section brute à la section désirée. Le fil est tiré derrière chaque filière par un rouleau tracteur. Tous les rouleaux sont entraînés via des réducteurs à rapport de réduction réglable par un seul moteur de traction. L'ensemble de toutes les filières et des rouleaux tracteurs est immergé dans un bain refroidi pour assurer la lubrification et éviter la montée en température du fil.
- Une partie où le recuit est effectué à la volée en 3 phases :
 - zone 1 : phase de préchauffage du fil.
 - zone 2 : phase de recuit du fil.
 - zone 3 : phase de nettoyage, refroidissement puis séchage du fil.Le chauffage s'effectue, pour chaque zone, par le passage d'un courant directement dans le fil.

Un enrouleur en sortie de recuit, assure la traction du fil et l'enroulage final sur une bobine.



Le sujet comporte 4 parties :

Partie 1 : Étude du tréfilage et du recuit à la volée

Partie 2 : Étude de l'asservissement de température

Partie 3 : Étude de l'enrouleur de traction

Partie 4 : Travail pédagogique

Les quatre parties sont indépendantes, cependant **les candidats ont intérêt à lire tout le sujet** et à essayer de traiter les différentes parties dans l'ordre proposé.

Les questions sont identifiées par une police *italique* et repérées par un numéro.

DONNEES TECHNIQUES :

Données générales :

Masse volumique du cuivre :	$= 8,96 \text{ T/m}^3$
Résistivité du cuivre à 0 °C :	$\rho_0 = 1,673 \cdot 10^{-8} \text{ m}$
Chaleur massique du cuivre :	$c = 395 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance à la traction du cuivre :	$R_t = 26 \text{ daN/mm}^2$
Coefficient de température du cuivre :	$a = 0,0041$

Données relatives au tréfilage :

Vitesse nominale du fil en sortie :	$v = 24 \text{ m/s}$
Section du fil en sortie :	$S_s = 2 \text{ mm}^2$
Section du fil en entrée :	$S_e = 50 \text{ mm}^2$
Coefficient d'allongement du cuivre :	$A = 34\%$
Puissance du moteur de tréfilage :	$P_t = 150 \text{ kW}$

Données relatives au recuit :

Section du fil :	$s = 2 \text{ mm}^2$
Vitesse nominale du fil :	$v = 24 \text{ m/s}$
Température de recuit du cuivre :	$r = 600^\circ\text{C}$
Température de préchauffage au point A:	$p = 180^\circ\text{C}$
Température de séchage :	$s = 150^\circ\text{C}$
Contrôle de la température de chaque zone par gradateurs monophasés à angle de phase.	

Données relatives à l'enrouleur :

Traction sur le fil :	$T_f = 3 \text{ daN/mm}^2$
Diamètre des noyaux des bobines :	$d_n = 0,4 \text{ m}$
Diamètre maximal enroulable :	$d_m = 0,80 \text{ m}$
Masse volumique de l'acier de la cloche :	$f = 7,88 \text{ T/m}^3$
Moteur asynchrone :	$U = 230/400\text{V}$
	$P = 37 \text{ kW}$
	$n = 1475 \text{ tr/min}$
	$J_{\text{rotor}} = 0,23 \text{ kg.m}^2$

PREMIERE PARTIE

1. ETUDE DU TREFILAGE ET DU RECUIT

1.1. Étude du tréfilage (annexe1) :

Le tréfilage s'effectue à volume constant, dans chaque filière le fil subi un allongement A défini en page 3.

1.1.1. *Déterminer la relation littérale entre la section de sortie et la section d'entrée du fil pour une filière, puis pour n filières.*

1.1.2. *Déterminer la relation littérale entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée du fil pour une filière, puis pour n filières.*

1.1.3. *Calculer le nombre de filières à installer pour passer de la section S_e à la section S_s .*

1.1.4. *Calculer la vitesse du fil à l'entrée de la première filière.*

Le tréfilage s'effectue à la limite de la résistance à la traction du cuivre et l'effort de traction est nul à l'entrée de chaque filière.

1.1.5. *Déterminer la puissance mécanique des tracteurs en sortie de chaque filière et vérifier la puissance totale du moteur de tréfilage.*

La puissance de tréfilage est transformée en chaleur au niveau de chaque filière à raison de 40% évacuée par la filière et 60% évacuée par le fil.

1.1.6. *Déterminer l'élévation de température qu'aurait le fil sur chaque filière en l'absence de refroidissement et en régime adiabatique.*

1.2. Étude du recuit (annexe 2) :

Après le tréfilage le fil passe dans la partie recuit comportant trois zones : le préchauffage, le recuit et le nettoyage séchage.

L'étude porte uniquement sur la zone de recuit.

La machine fonctionne à vitesse nominale, le chauffage du fil se fait de manière adiabatique par circulation d'un courant constant I dans le fil entre les points A et B. La température de préchauffage ρ du fil au point A est constante.

1.2.1. *Déterminer la longueur utile AB du fil dans la zone de recuit.*

On considère un petit élément de fil de longueur $d\lambda$ situé à une distance l du point A et à une température $\rho + \dots$.

1.2.2. *Ecrire la relation donnant l'énergie électrique dW_e fournie à l'élément de résistance dr et de longueur $d\lambda$.*

1.2.3. *Ecrire la relation donnant l'énergie thermique dW_c emmagasinée par le même élément $d\lambda$.*

- 1.2.4. Rechercher l'équation littérale de l'élévation de température θ , de l'élément dl en fonction du temps, du courant I et de la température de préchauffage θ_p .
- 1.2.5. En déduire l'équation littérale de l'élévation de température q en fonction de la vitesse v , du courant I et de la distance λ . Tracer l'allure de la courbe $q(\lambda)$, les autres paramètres étant constants.
- 1.2.6. Rechercher la relation littérale du courant I en fonction de la vitesse pour atteindre la température de recuit au point B.
- 1.2.7. Calculer le courant nécessaire au recuit à vitesse nominale.
- Le courant est fixé à sa valeur nominale.
- 1.2.8. Déterminer l'expression littérale $R(\theta_r)$ de la résistance du fil entre les points A et B en fonction de la température de préchauffage θ_p et de la température de recuit θ_r .
- 1.2.9. Calculer la tension aux bornes du segment AB.
- 1.2.10. Déterminer l'expression littérale de la puissance à fournir en fonction de la température de recuit θ_r et de la vitesse de la ligne v , puis calculer cette puissance à la vitesse nominale.
- 1.2.11. Linéariser la fonction $R(\theta_r)$ autour du point $\theta_r = 600^\circ\text{C}$ en écrivant $R(\theta_r)$ sous la forme $\rho_1 \left(1 + b(\theta_r - \theta_p)\right) \frac{L}{s}$ puis calculer ρ_1 et b .

1.3. Commande du gradateur de chauffage :

Le courant nécessaire au recuit est contrôlé par un gradateur à angle de phase placé au primaire d'un transformateur monophasé 400/55V.

- 1.3.1. Expliquer le choix de cette configuration et du mode de commande du gradateur.

La tension de sortie du gradateur est liée à sa commande par la relation $U_s = U_e \cdot \sqrt{gc}$.

U_s : valeur efficace de la tension de sortie du gradateur

U_e : valeur efficace de la tension d'entrée du gradateur

gc : grandeur de commande en %

- 1.3.2. En considérant le transformateur parfait et en prenant comme fonction linéarisée

$$R(\theta_r) = 3,024 \cdot 10^{-8} \frac{L}{s} \left(1 + 9,13 \cdot 10^{-4} (\theta_r - \theta_p)\right) \quad \text{et} \quad \text{pour} \quad \text{la} \quad \text{puissance}$$

$P = 7,08 \cdot v \cdot (\theta_r - \theta_p)$ avec v la vitesse du fil, rechercher la relation de θ_r en fonction de gc et v puis calculer gc pour obtenir une élévation de température de 600°C à la vitesse nominale.

DEUXIEME PARTIE

2. ASSERVISSEMENT DE TEMPERATURE

Dans toute cette partie la vitesse est considérée constante et égale à la vitesse nominale.

2.1. Modélisation :

La température à l'entrée de la zone recuit est prise comme origine.

2.1.1. *Durant un intervalle de temps dt , déterminer l'énergie thermique évacuée par un élément de fil de longueur $d\lambda$, en sortie de la zone recuit.*

Le générateur, qui alimente la zone de recuit, doit fournir l'énergie évacuée ainsi que celle nécessaire à l'élévation de température d le long de toute la zone de recuit.

2.1.2. *Déterminer l'équation différentielle qui lie la température de sortie à la puissance P du générateur.*

2.1.3. *Écrire littéralement, puis numériquement la fonction $\frac{\theta(p)}{P(p)}$.*

Le capteur de température est placé 15 cm après la sortie de la zone de recuit.

2.1.4. *Calculer le retard pur introduit par la mesure et écrire, numériquement la nouvelle fonction $\frac{\theta_m(p)}{P(p)}$ (m : température mesurée).*

2.2. Correction proportionnelle :

On prendra comme fonction de transfert du recuit : $\frac{\theta_m(p)}{P(p)} = \frac{6 \cdot 10^{-3} e^{-6,25 \cdot 10^{-3} p}}{1 + 55 \cdot 10^{-3} p}$

2.2.1. *Tracer le diagramme de Bode de cette fonction de transfert.*

2.2.2. *Calculer une valeur approchée de la pulsation critique ω_c correspondant à une phase de -180° .*

Le gradateur est considéré comme un gain de 220.

2.2.3. *Calculer la valeur du gain du correcteur pour la limite de stabilité.*

2.2.4. *Calculer la valeur du gain à placer pour obtenir une marge de gain de 12db.*

2.2.5. *Calculer l'erreur statique obtenue avec la valeur du gain calculé en 2.2.4..*

Le retard pur est assimilé à l'approximation de Padé. $e^{-Tp} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}p}{1 + \frac{T}{2}p}$

2.2.6. Tracer le diagramme de Bode de l'approximation de Padé.

2.2.7. Déterminer pour le gain calculé en 2.2.4. la marge de phase obtenue pour l'ensemble.

2.3. Correction Proportionnelle Intégrale :

Le correcteur est du type P.I. parallèle. $C(p) = K + \frac{1}{Ti \cdot p}$, le retard pur est toujours assimilé à l'approximation de Padé.

2.3.1. Représenter le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur pour les cas suivants : $(K;Ti)$, $(2.K;Ti)$ et $(K;2.Ti)$.

2.3.2. En utilisant la méthode de compensation de pôles, déterminer les valeurs à donner à K et Ti pour avoir une marge de phase de 45° .

2.3.3. Pour ces réglages, déterminer la réponse $m(p)$ à un échelon de consigne de 10°C .

2.3.4. Mettre $m(p)$ sous la forme :

$$\frac{A}{p} + \frac{B(p + m\omega_0)}{(p + m\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - m^2)} + \frac{C \cdot \omega_0 \sqrt{1 - m^2}}{(p + m\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - m^2)}$$

et calculer A , B , C , m et ω_0 .

2.3.5. Ecrire l'expression temporelle de $m(t)$.

TROISIEME PARTIE

3. ETUDE DE L'ENROULEUR DE TRACTION

L'enrouleur est du type cloche à bobine fixe (annexe 3).

En sortie de recuiseuse le fil sort dans une plage de vitesse de 30 m/s pour une section de 1,35 mm² à 4,4 m/s pour une section de 16mm². La traction sur le fil est fixée à 3 daN/mm² pour rester dans le domaine élastique du cuivre.

3.1.Choix du moteur :

3.1.1. *Exprimer la vitesse de rotation du moteur en fonction du diamètre d'enroulage.*

3.1.2. *Exprimer le couple du moteur en fonction du diamètre d'enroulage et de la section du fil.*

3.1.3. *Calculer pour les quatre cas ci-dessous, la vitesse de rotation du moteur en rad/s et tr/min, le couple moteur et la puissance mécanique. Vous présenterez vos résultats sous forme de tableau.*

s = 1,35 mm ²	diamètre d'enroulage = 0,4m
s = 1,35 mm ²	diamètre d'enroulage = 0,8m
s = 16 mm ²	diamètre d'enroulage = 0,4m
s = 16 mm ²	diamètre d'enroulage = 0,8m

3.1.4. *Pour le fil du plus gros diamètre, et en considérant que le diamètre d'enroulage correspond au diamètre moyen, calculer une valeur approchée du temps nécessaire pour enrouler une bobine entière.*

3.1.5. *Calculer le moment d'inertie de la cloche.*

La montée en vitesse se fait en 3 minutes avec une accélération constante, l'arrêt se faisant dans les mêmes conditions.

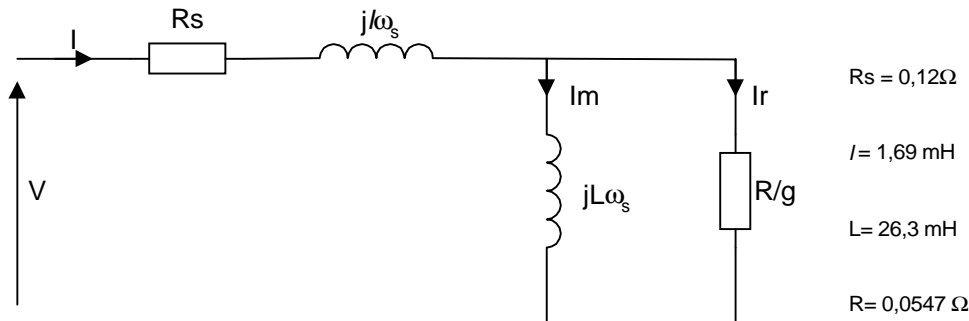
3.1.6. *Calculer le couple moteur nécessaire durant les phases d'accélération et de décélération pour les quatre cas de la question 3.1.3..*

3.1.7. *Représenter l'allure du couple moteur en fonction du temps pendant un cycle complet d'enroulage pour un fil de section de 16 mm².*

3.1.8. *Expliquer le choix du moteur de l'enrouleur.*

3.2. Commande du moteur :

Le modèle d'une phase du moteur asynchrone en régime sinusoïdal avec fuites ramenées au stator est donné ci-dessous. Le circuit magnétique est non saturé.



- 3.2.1. Exprimer le couple électromagnétique en fonction de I_r , g , ω_s et des éléments du schéma équivalent.
- 3.2.2. Montrer que le couple électromagnétique est proportionnel au produit $I_m \cdot I_r$.
- 3.2.3. Calculer la valeur efficace du flux rotorique Φ_r correspondant au fonctionnement nominal du moteur.
- 3.2.4. Calculer la valeur efficace du courant I_m0 permettant d'obtenir ce flux nominal.
- 3.2.5. Représenter sur un diagramme de Fresnel, les vecteurs \vec{V} , \vec{I}_r , \vec{I}_m , \vec{I} et $\vec{\Phi}_r$ en prenant \vec{V} comme référence.
- 3.2.6. Déterminer la relation littérale du module de \underline{I}_r en fonction du module de \underline{I} .
- 3.2.7. En déduire la relation littérale du couple électromagnétique en fonction de I et r (r : pulsation des courants rotoriques).

Pour réaliser une commande en couple de la machine asynchrone, on réalise un autopilotage fréquentiel (annexe 4).

Le flux rotorique est maintenu constant par action sur I .

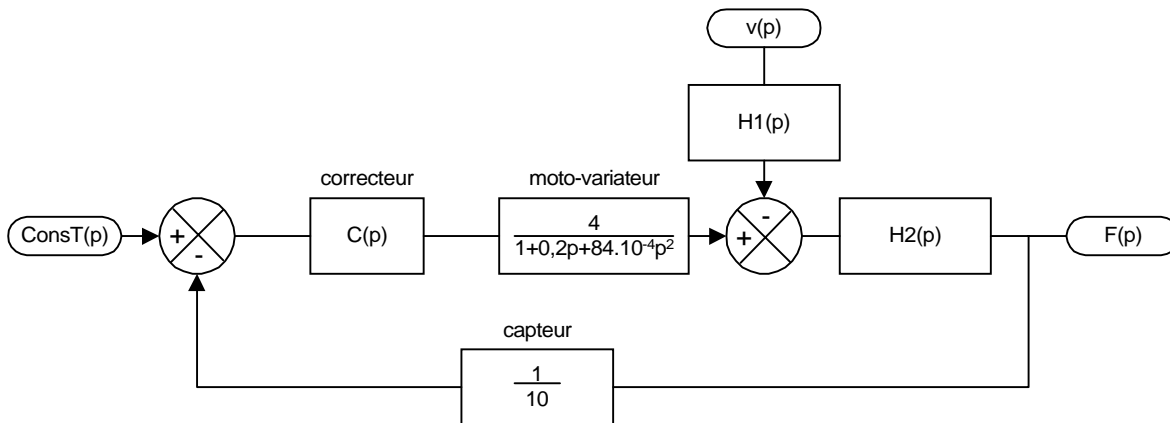
- 3.2.8. Rechercher la fonction littérale puis numérique que doit contenir le bloc F1 pour conserver le flux rotorique constant.
- 3.2.9. Montrer que dans ces conditions, le couple électromagnétique est directement proportionnel à r , et exprimer numériquement $C_e = f(r)$.

3.3. Étude de l'asservissement de traction :

Dans cette partie, on considère le diamètre d'enroulement constant égal à 0,6m, le diamètre du fil de 1,6 mm et une vitesse nominale pouvant atteindre 24 m/s.

3.3.1. *Écrire l'équation de l'effort de traction en fonction de la vitesse de ligne, du couple moteur et des grandeurs du système. L'inertie et le diamètre du fil seront négligés.*

Le schéma bloc de l'asservissement de traction est donné ci-dessous :



3.3.2. *Exprimer littéralement, puis numériquement les fonctions $H1(p)$ et $H2(p)$.*

3.3.3. Étude du fonctionnement en asservissement :

La vitesse v est supposée constante, le correcteur est de la forme $k \frac{1 + T_{ip}}{T_{ip}}$.

Le correcteur est réglé sur la plus grande constante de temps de manière à obtenir un dépassement de 5% sur la réponse indicielle.

3.3.3.1. *Calculer les valeurs à donner à k et T_i .*

3.3.3.2. *Déterminer le temps de réponse à 95% de la valeur finale (annexe 5).*

3.3.3.3. *Calculer la valeur à donner à la consigne pour obtenir la traction désirée en régime établi.*

3.3.4. Étude du mode régulation :

La consigne de traction est constante et réglée à sa valeur nominale avant le démarrage de la ligne.

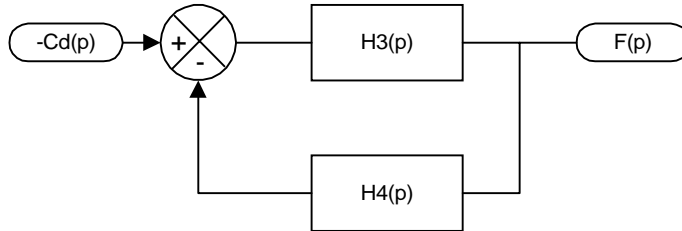
La ligne passe de la vitesse nulle à la vitesse nominale en 3 minutes selon une accélération constante, le réglage du correcteur est inchangé et la fonction de transfert du

moto - variateur est assimilée à : $\frac{4}{1 + 0,14p}$

3.3.4.1. Montrer que la mise en vitesse de la ligne provoque un créneau de couple de perturbation Cd .

3.3.4.2. Calculer l'amplitude de ce créneau et sa transformée de Laplace.

3.3.4.3. Mettre le schéma bloc sous la forme ci-dessous et exprimer numériquement $H3(p)$ et $H4(p)$.



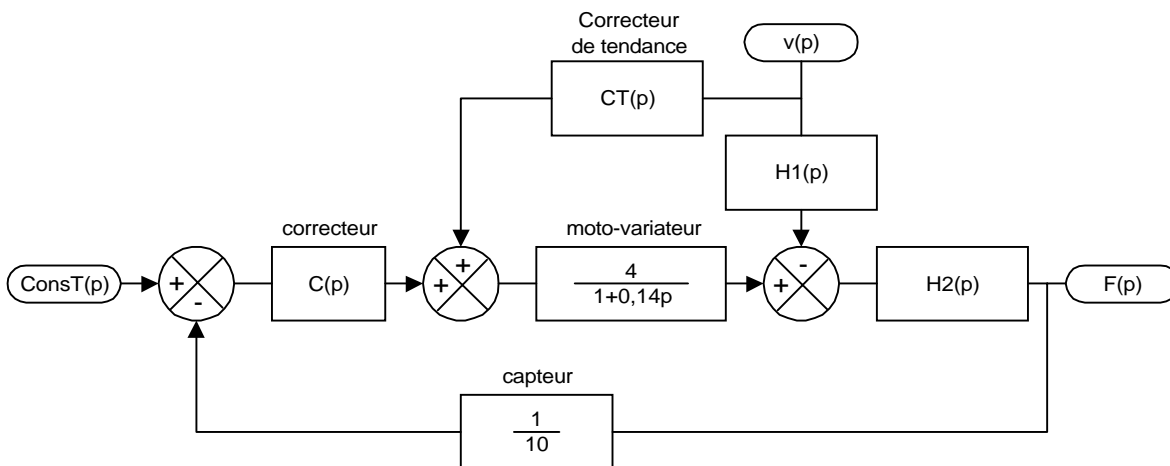
3.3.4.4. Exprimer l'effort perturbateur de traction $F(p)$ puis $F(t)$ pendant l'intervalle $[0, 180s]$.

3.3.4.5. En déduire l'erreur statique sur la force F pendant le démarrage.

3.3.5. Représenter l'effort de traction réel pendant le démarrage sur une durée de 4 minutes.

3.3.6. Calculer les extremums de cette courbe et commenter ces valeurs.

Pour atténuer les problèmes pendant le démarrage, on place un correcteur de tendance sur l'erreur corrigée.



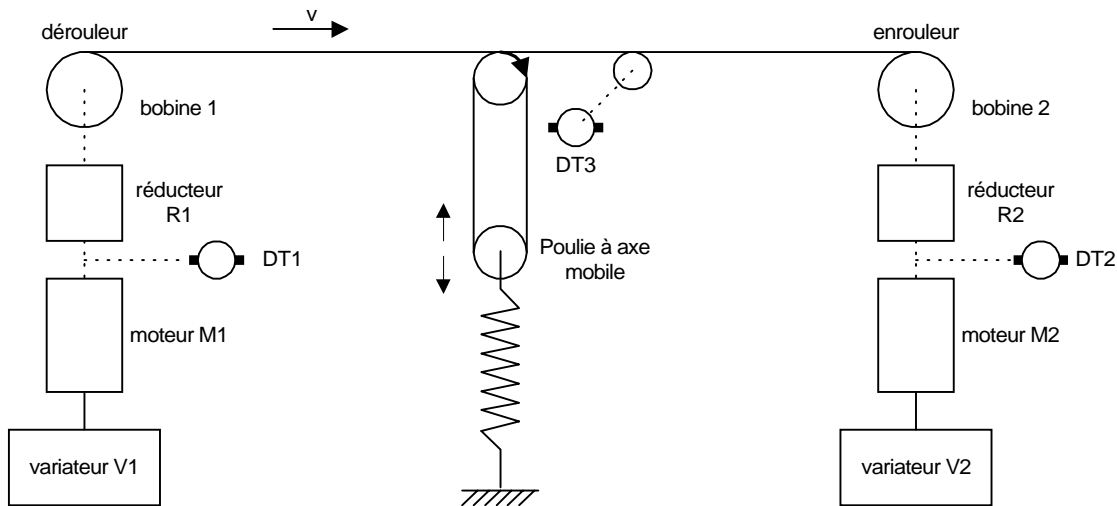
3.3.7. Déterminer la fonction de transfert de ce correcteur pour annuler l'effet du couple perturbateur sur la force F pendant le démarrage.

QUATRIEME PARTIE

4. Partie pédagogique :

L'objectif de cette partie est de rédiger un sujet d'essais de système pour une classe de deuxième année de B.T.S. électrotechnique à partir d'un enrouleur - dérouleur didactisé. Bien que l'enrouleur ne soit pas de type cloche, son fonctionnement est proche de celui présenté dans la partie 3, ce qui permet de l'utiliser en tant que transposition du système industriel.

Synoptique de l'enrouleur – dérouleur :



Caractéristiques techniques :

Vitesse nominale de défilement du fil :	6 m/s
Traction maximale sur le fil :	200 N
Diamètre des bobines :	$D_{min} = 0,2m, D_{max} = 0,3m$
Ressort de traction :	$F = 60 + 780 \lambda$ (F en N et λ en

m)

R1, R2 : réducteur de rapport de réduction	1/3
M1, M2 : Moteur à courant continu à aimants permanents	$P = 2,2 \text{ kW}$ $n = 2750 \text{ tr/min}$ $U = 310V$ $I = 8,5A$

V1, V2 : Variateur WNTC 4025, 4 quadrants, alimentation triphasée 380V
DT1, DT2, DT3 : dynamo – tachymétrique : $60mV/tr.min^{-1}$

4.1. Étude du fonctionnement :

4.1.1. Représenter symboliquement le sens réel de la vitesse et du couple exercé par les 2 bobines pendant une phase d'enroulage.

4.1.2. Préciser en vous justifiant les grandeurs qui doivent être asservies pour l'enrouleur et le dérouleur.

4.1.3. Préciser le comportement de l'enrouleur et du dérouleur en cas de casse du fil.

4.2. Séquence d'essais de système :

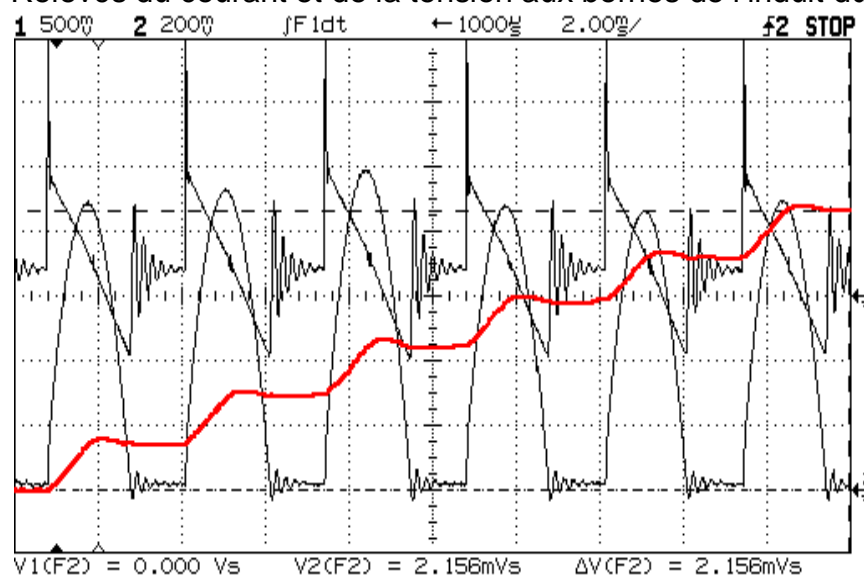
Écrire une partie d'un sujet d'essais de système, pour des étudiants de deuxième année de BTS, ayant pour objectif l'étude des puissances mises en jeu au niveau de l'enrouleur et du dérouleur du système didactisé. Vous préciserez plus particulièrement le travail de préparation demandé aux étudiants ainsi que les essais à réaliser et le matériel utilisé.

4.3. Exploitation des relevés :

Deux relevés ont été effectués sur le système. L'un sur l'induit du moteur de l'enrouleur, l'autre à l'entrée du variateur du dérouleur.

Les mesures ont été effectuées avec une sonde de tension 200V/V sur la voie V1 et une sonde de courant 10A/V sur la voie V2.

Relevés du courant et de la tension aux bornes de l'induit du moteur de l'enrouleur :



L'oscilloscope nous donne :

$$V1_{avg} = 289 \text{ mV}$$

$$V1_{rms} = 457 \text{ mV}$$

$$V2_{avg} = 370 \text{ mV}$$

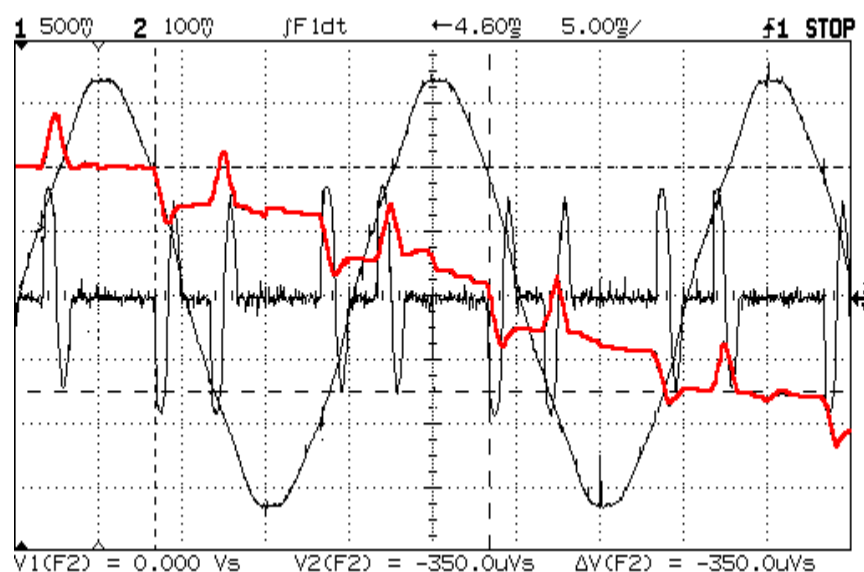
$$V2_{rms} = 507 \text{ mV}$$

$$F2 = \int V1 \cdot V2 \cdot dt$$

Valeurs entre les 2 curseurs :

$$F2 = 2,156 \text{ mV}^2\text{s}$$

Relevé de la tension simple et du courant dans la phase 1 d'alimentation du variateur du dérouleur.



L'oscilloscope nous donne :

$$V1_{rms} = 1,15 \text{ V}$$

$$V2_{rms} = 75 \text{ mV}$$

$$F2 = \int V1 \cdot V2 \cdot dt$$

Valeurs entre les 2 curseurs :

$$F2 = -350 \text{ V}^2\text{s}$$

4.3.1. Calculer en précisant votre méthode les puissances mises en jeu au niveau du moteur de l'enrouleur et en amont du variateur du dérouleur puis commenter vos résultats.