

B.T.S. ELECTRONIQUE

SESSION 2005

EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE

*Calculatrice à fonctionnement autonome autorisée (circulaire 99-186 du 16.11.99)
Tout autre matériel est interdit*

Le candidat répondra aux questions posées sur le texte même de l'épreuve, qu'il inclura dans une copie double à remettre aux surveillants en quittant la salle d'examen.

Si la place allouée pour telle ou telle réponse semble insuffisante, il est possible, en le précisant clairement, d'utiliser le verso de la feuille précédente.

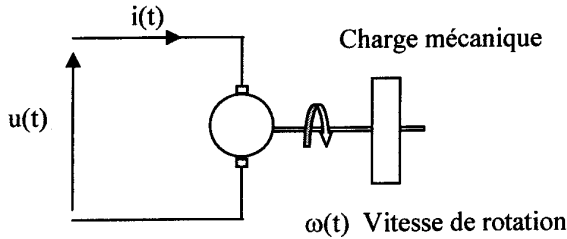
L'épreuve comporte deux parties complètement indépendantes. Plusieurs questions permettent aux candidats soit d'effectuer « des auto-contrôles », soit de poursuivre la résolution d'une partie où ils rencontreraient des difficultés.

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 1/14

PREMIERE PARTIE

1. Etude du moteur et de son asservissement

Dans cette partie, on utilisera une modélisation simplifiée du moteur à courant continu. Les caractéristiques du moteur employé, ainsi que les équations du moteur en fonctionnement linéaire, sont rappelées ci-dessous.



Le moteur a les caractéristiques suivantes :

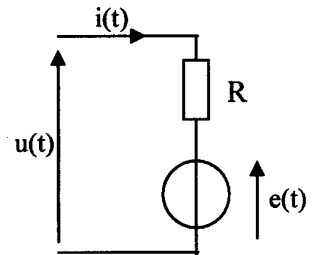
- excitation : aimant permanent ;
- point nominal de fonctionnement : 100 V, 8000 tr.min⁻¹ ;
- moment d'inertie des parties tournantes : $J = 3,50 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$;
- équations du moteur en fonctionnement linéaire :
 $e(t) = k \cdot \omega(t)$; $e(t)$ est la force-électromotrice induite ;
 $\omega(t)$ est la vitesse de rotation en rad.s⁻¹. On notera N la fréquence de rotation exprimée en tr.min⁻¹.
 $c_m(t) = k \cdot i(t)$ avec $k = 0,119 \text{ V} \cdot \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
 $c_m(t)$ est le moment du couple moteur et $i(t)$ l'intensité du courant dans l'induit
- résistance de l'induit : $R = 1,30 \Omega$; on néglige l'inductance de l'induit.

Dans ces conditions, le schéma électrique de l'induit du moteur est le suivant :

Enfin, on rappelle l'équation fondamentale de la dynamique d'un solide en rotation :

$$J \cdot \frac{d \omega(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t)$$

$c_r(t)$ étant le moment du couple résistant produit par la charge mécanique sur l'arbre du moteur.



On donne par ailleurs :

- les transformées de LAPLACE suivantes :

$$\Gamma(t) \text{ (avec } \Gamma(t)=1 \text{ pour } t \geq 0 \text{ et } \Gamma(t)=0 \text{ si } t < 0) \longleftrightarrow \frac{1}{p}$$

$$e^{-at} \longleftrightarrow \frac{1}{p+a}$$

$$1 - e^{-\frac{t}{a}} \longleftrightarrow \frac{1}{p(1+ap)}$$

- le théorème de la valeur finale : $\lim_{t \rightarrow +\infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p)$; $F(p)$ étant la transformée de Laplace de $f(t)$.

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 2/14

1.1 On réalise une étude à vide ($C_r = 0$)

1.1.1 En utilisant le modèle électrique équivalent du moteur à courant continu, établir l'équation électrique relative à l'induit.

1.1.2 A l'aide de la relation fondamentale de la dynamique, établir une expression entre $\omega(t)$ et le courant $i(t)$.

1.1.3 En utilisant les résultats précédents, déterminer l'équation différentielle régissant $\omega(t)$.

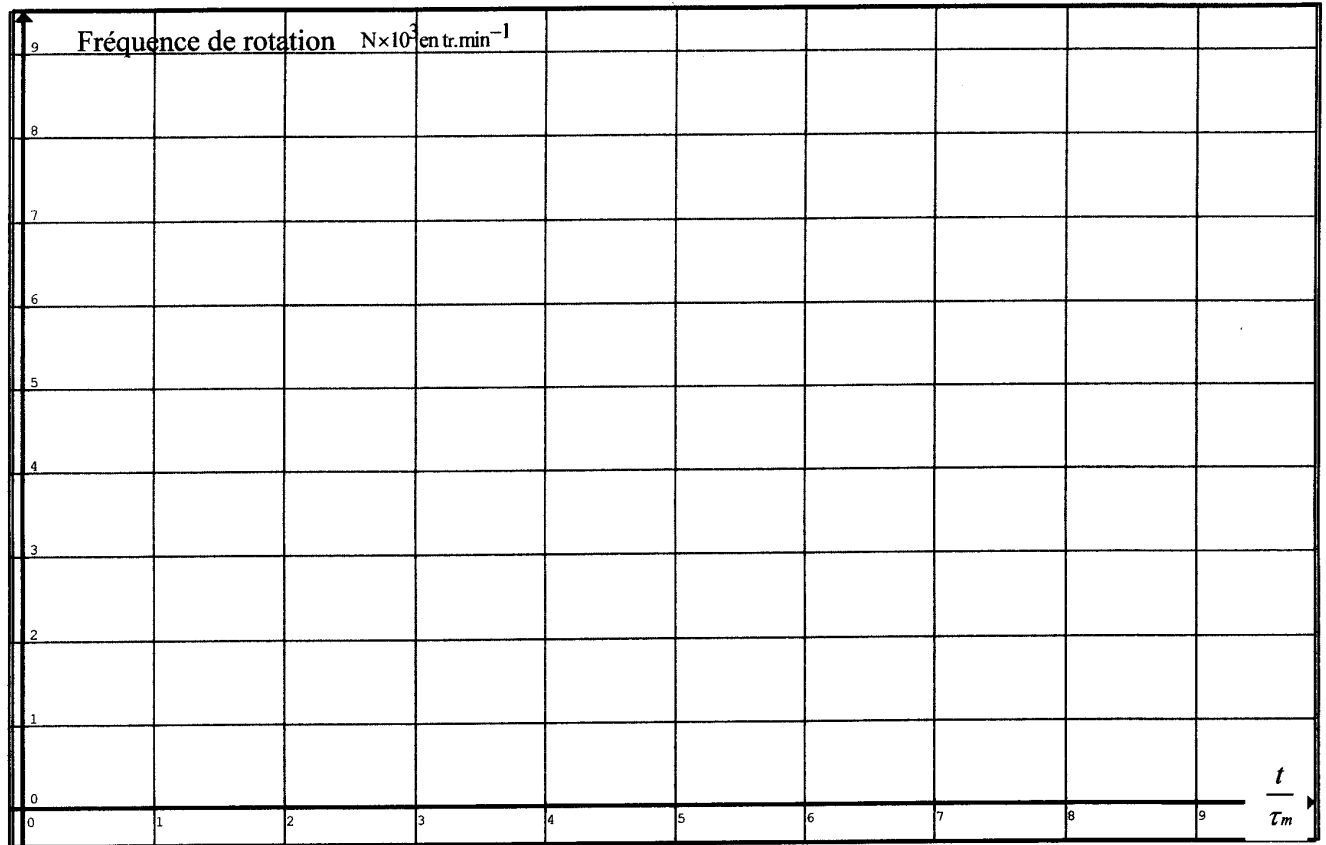
1.1.4 Résoudre cette équation différentielle et donner une expression de $\omega(t)$, sachant que $u(t)=0$ pour $t < 0$ et $u(t)=U_0=100$ V pour $t \geq 0$.
En déduire la valeur de la constante de temps mécanique τ_m du système et la valeur de la fréquence de rotation N_0 en tours par minute du moteur en régime permanent. Cette valeur est-elle cohérente avec les données du moteur ?

Pour la suite du problème, on posera $\tau_m = \frac{R \cdot J}{k^2}$ et on prendra $\tau_m = 3,2$ ms.

1.1.5 Donner le temps de réponse à 5%.

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	3/14

1.1.6 · Tracer le graphe de $N(t)$ en y représentant la tangente à l'origine



SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 4/14

1.1.7 Calcul de la réponse indicielle du moteur alimenté par un échelon de tension.

On note $U(p)$ et $\Omega(p)$ les transformées de Laplace respectives de $u(t)$ et $\omega(t)$.

En utilisant le résultat de la question 1.1.3, montrer que : $\Omega(p) = \frac{U(p)}{k(1 + \tau.p)}$

puis, à l'aide de la table des transformées de Laplace, retrouver l'expression de $\omega(t)$ du 1.1.5, sachant que $u(t)$ est un échelon de tension d'amplitude $U_0 = 100$ V.

1.2 Le couple résistant est désormais non nul

1.2.1 Exprimer, dans ce nouveau cas, la relation fondamentale de la dynamique d'un solide en rotation.

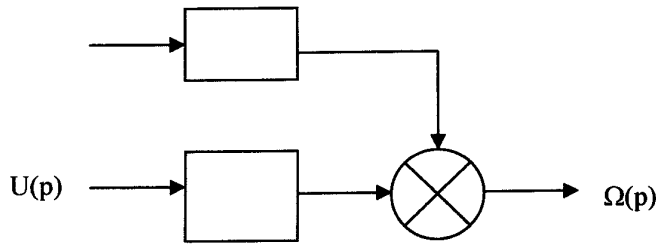
1.2.2 En utilisant la transformée de Laplace et la relation précédente montrer que $\Omega(p)$ se met sous la forme :

$$\Omega(p) = F(p).U(p) + G(p).C_r(p)$$

et exprimer $F(p)$ et $G(p)$ en fonction de \mathcal{T}_m , R et k.

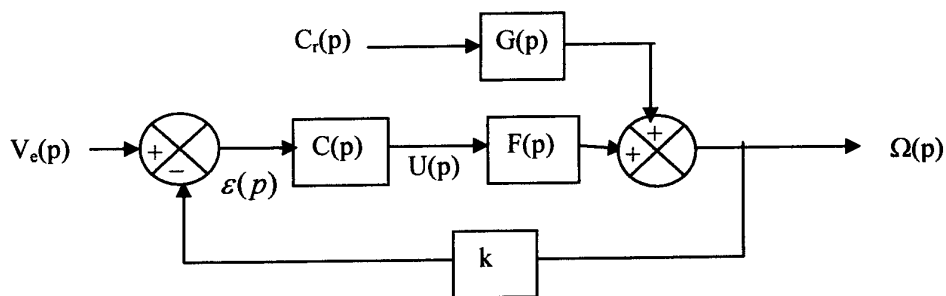
SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 5/14

1.2.3 · Montrer que le système peut se mettre sous la forme du schéma bloc ci-dessous qu'on complètera.



1.2.4 Le moteur tournant à la fréquence de rotation ω_0 , on applique un échelon de couple résistant dont l'amplitude du moment a la valeur $C_{r0} = 1,2 \text{ N.m}$.
Donner l'expression de la nouvelle vitesse de rotation ω_{0r} du moteur en régime permanent, puis la valeur N_{0r} de la fréquence exprimée en tours par minute et enfin l'écart relatif entre les fréquences de rotation à vide et en charge.

1.3 Afin de limiter, les variations de vitesses liées à la charge, on réalise un asservissement de vitesse du moteur à courant continu suivant la figure ci-dessous :



Le régulateur effectue une régulation proportionnelle : $C(p) = A$

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	6/14

1.3.1. En boucle fermée, montrer que $\Omega(p)$ peut s'exprimer sous la forme :

$$\Omega(p) = \frac{T_1}{1 + \tau_1 p} \cdot V_e(p) + \frac{T_2}{1 + \tau_1 p} \cdot C_r(p)$$

T_1, T_2, τ_1 sont des constantes qu'on déterminera en fonction de A, k et τ_m

Remarque : le système fonctionnant en régime linéaire, on pourra utiliser le théorème de superposition.

1.3.2. On règle le régulateur à $A = 4$ et le moteur est à vide ($C_r(t) = 0$)

On applique un échelon de tension d'amplitude V_{E0} .

Exprimer la vitesse de rotation ω_0 en régime permanent et calculer V_{E0} pour obtenir $N_0 = 8000 \text{ tours.min}^{-1}$.

1.3.3. Le moteur tourne à la fréquence de rotation nominale $N_0 = 8000 \text{ tours.min}^{-1}$ et on applique un échelon de couple résistant de moment $C_{r0} = 1,2 \text{ N.m}$.

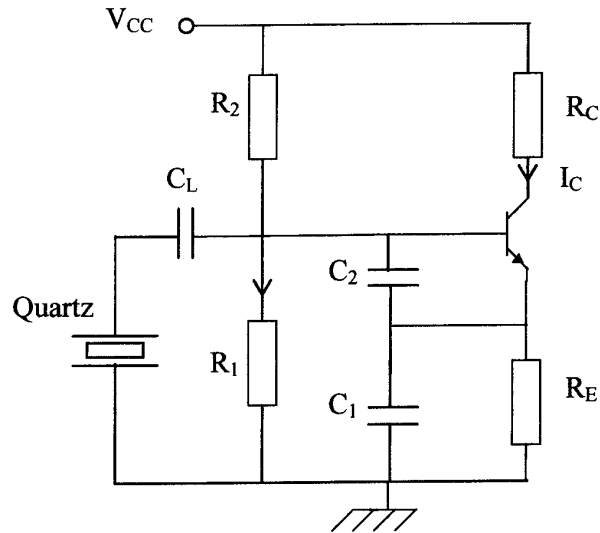
Calculer la nouvelle fréquence de rotation en régime permanent N_{1r} puis conclure sur l'efficacité du système bouclé en calculant l'écart relatif entre les fréquences N_{1r} et N_0 .

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	7/14

DEUXIEME PARTIE

2.Etude d'un oscillateur.

L'une des cartes du projet nécessite un oscillateur stable fonctionnant à une fréquence voisine de 12 MHz. Cet oscillateur, représenté sur ci-dessous, utilise un amplificateur à transistor associé à un quadripôle de réaction utilisant un quartz.



2.1.Etude de la polarisation du transistor.

Le coefficient β d'amplification statique du transistor (on sait que $\beta = \frac{I_C}{I_B}$) est égal à 100 et la tension base-émetteur V_{BE} est voisine de 0,6V. On donne : $V_{CC}=9,0V$; $R_C=3,3\text{ k}\Omega$; $R_E=2,2\text{ k}\Omega$.

2.1.1. Dessiner le schéma du circuit valable en continu.

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	8/14

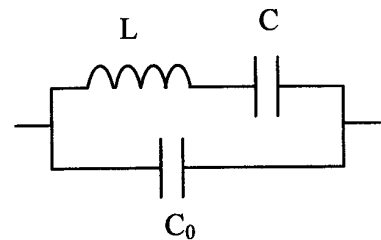
2.1.2. Calculer la valeur I_C de l'intensité du courant collecteur permettant d'obtenir un point de repos pour lequel $V_{CE}=4,0V$.

2.1.3. Calculer la valeur de R_1 pour obtenir une intensité I_{R1} du courant parcourant cette résistance qui vaut $10 I_B$.

2.1.4. Déterminer la valeur de R_2 qui permet d'obtenir le point de repos souhaité.

2.2. Etude du quartz.

Le quartz admet le modèle donné ci-contre, avec pour valeurs numériques : $C = 0,018 \text{ pF}$; $C_0 = 3,7 \text{ pF}$; $L = 9,3 \text{ mH}$.



L'impédance du quartz peut se mettre sous la forme
$$\underline{Z} = \frac{-j}{C_0 \omega} \times \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2}$$

où ω_s est la pulsation de résonance série et ω_p la pulsation de résonance parallèle.

2.2.1. ω_s étant la pulsation pour laquelle l'impédance \underline{Z} est nulle, exprimer ω_s en fonction de L et C.

2.2.2. ω_p étant la pulsation pour laquelle l'admittance \underline{Y} est nulle, exprimer ω_p en fonction de L , C, et C_0 .

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 9/14

2.2.3. En fonction de la fréquence f , l'impédance \underline{Z} s'écrit $\underline{Z} = \frac{-j}{C_0 2\pi f} \times \frac{1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}$. Calculer numériquement f_s et f_p .

On exprimera les fréquences en mégahertz avec cinq chiffres significatifs.

2.2.4. On définit la réactance X du quartz par $\underline{Z}=jX$.

2.2.4.1. Exprimer $X(f)$.

2.2.4.2. Suivant les valeurs de la fréquence, le quartz a un comportement inductif ou capacitif. En étudiant le signe de X , indiquer le comportement du quartz pour chaque domaine de fréquences.

Pour $f < f_s$ le quartz est

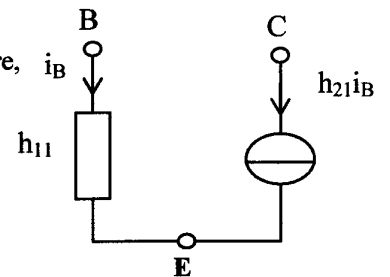
Pour $f_s < f < f_p$ le quartz est

Pour $f > f_p$ le quartz est

2.3. Etude de l'oscillateur.

En régime variable, le transistor est défini par le modèle équivalent représenté ci-contre,

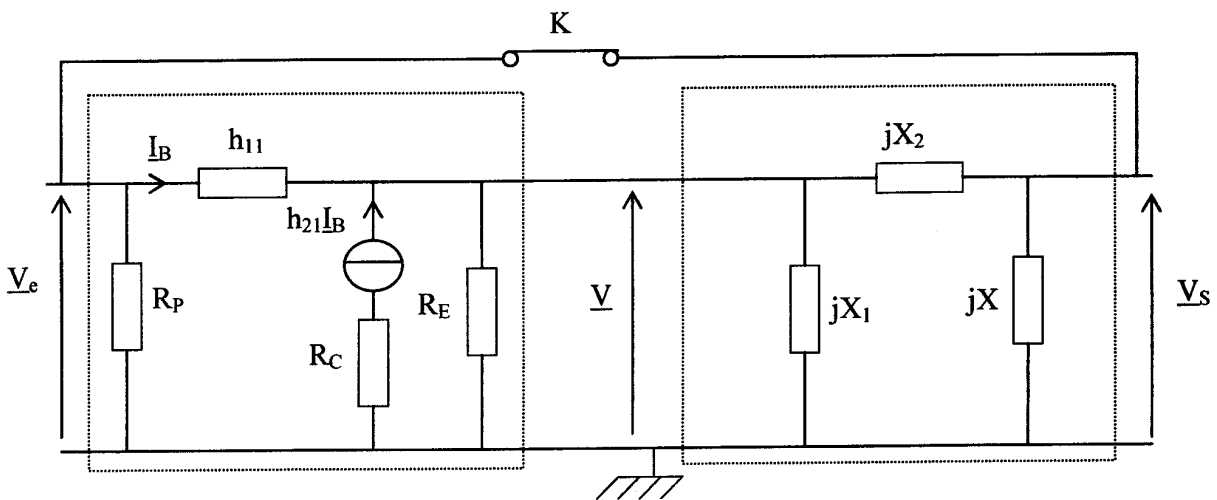
avec $h_{21}=50$ et $h_{11}=2k\Omega$. A la fréquence des oscillations, l'impédance du condensateur C_L (qui figure dans la représentation de l'oscillateur) est négligeable.



SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	10/15

2.3.1. Schéma équivalent de l'oscillateur valable en régime sinusoïdal.

A l'aide d'un ou deux schémas intermédiaires, montrer que le schéma équivalent de l'oscillateur est représenté ci-dessous et identifier R_p, X_1, X_2 et X .



2.3.2. Etude du quadripôle de réaction.

On se place en boucle ouverte, l'interrupteur K est donc ouvert.

Calculer la transmittance $\underline{T}_B(j\omega) = \frac{V_s}{V}$ en fonction des réactances X et X_2 .

Montrer que \underline{T}_B est réelle quelle que soit la fréquence.

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	11/14

2.3.3. Etude du quadripôle amplificateur.

La transmittance $T_A(j\omega) = \frac{V}{V_E}$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$T_A(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{h_{11}}{h_{21} + 1} \left(\frac{1}{R_E} + Y_E \right)}$$

avec Y_E admittance d'entrée du quadripôle de réaction.

L'interrupteur K étant ouvert, déterminer cette admittance Y_E en fonction des réactances X, X_1 et X_2 .

2.3.4. Conditions pour obtenir des oscillations

On suppose que la fermeture de K ne modifie pas la transmittance $T_B(j\omega)$ du quadripôle de réaction.

2.3.4.1. Exprimer, en fonction des transmittances précédemment exprimées, la transmittance en boucle ouverte $T_{B0} = \frac{V_S}{V_e}$, ainsi que la valeur que doit prendre T_{B0} pour que le montage soit le siège d'oscillations sinusoïdales quand on ferme K.

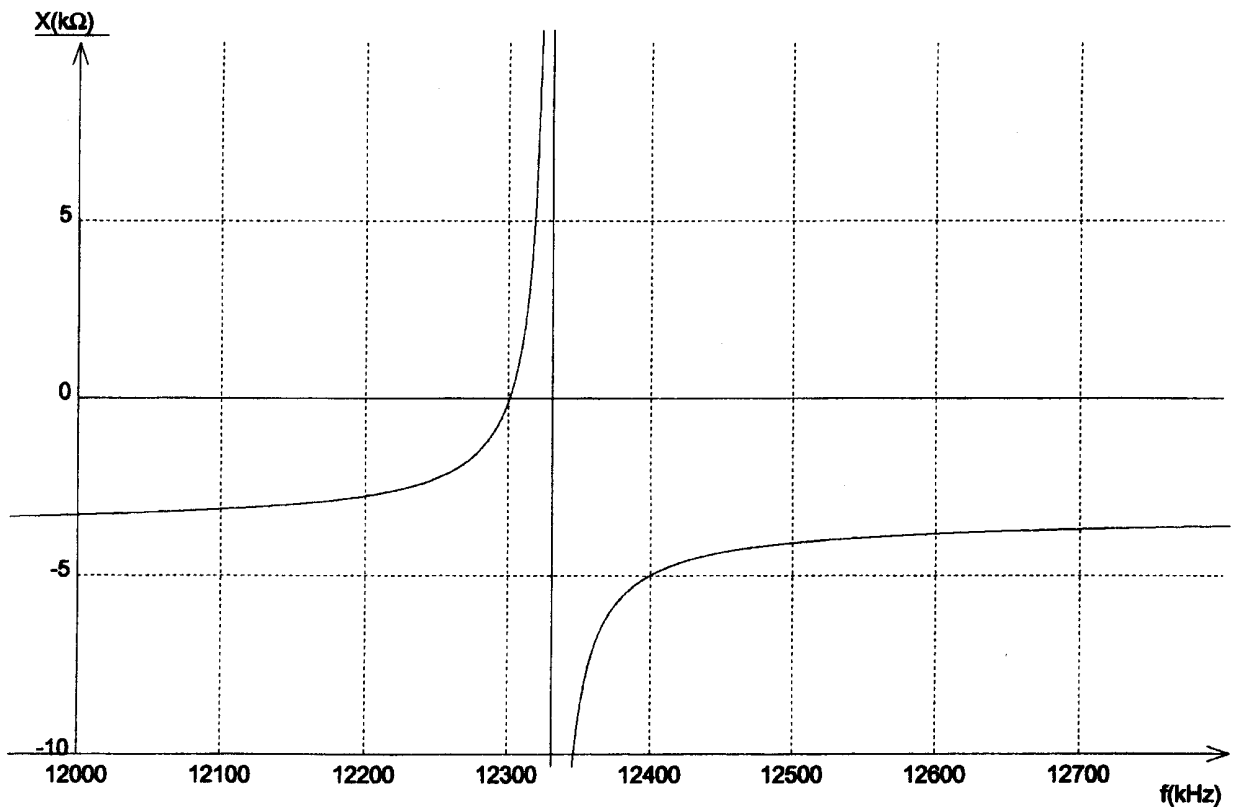
2.3.4.2. Montrer que la condition précédente ne peut être vérifiée que si $Y_E=0$.

2.3.4.3. En déduire une relation entre les réactances X, X_1 et X_2 .

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée : 4 heures	Coefficient : 5	Nombre total de pages : 14	N° de page : 12/14

2.3.4.4. Déduire de la relation précédente le signe de X et la nature du quartz à la fréquence des oscillations. Quelles sont les valeurs possibles de la fréquence des oscillations ?

2.3.4.5 A l'aide de la courbe X(f), retrouvez les résultats de la question précédente.

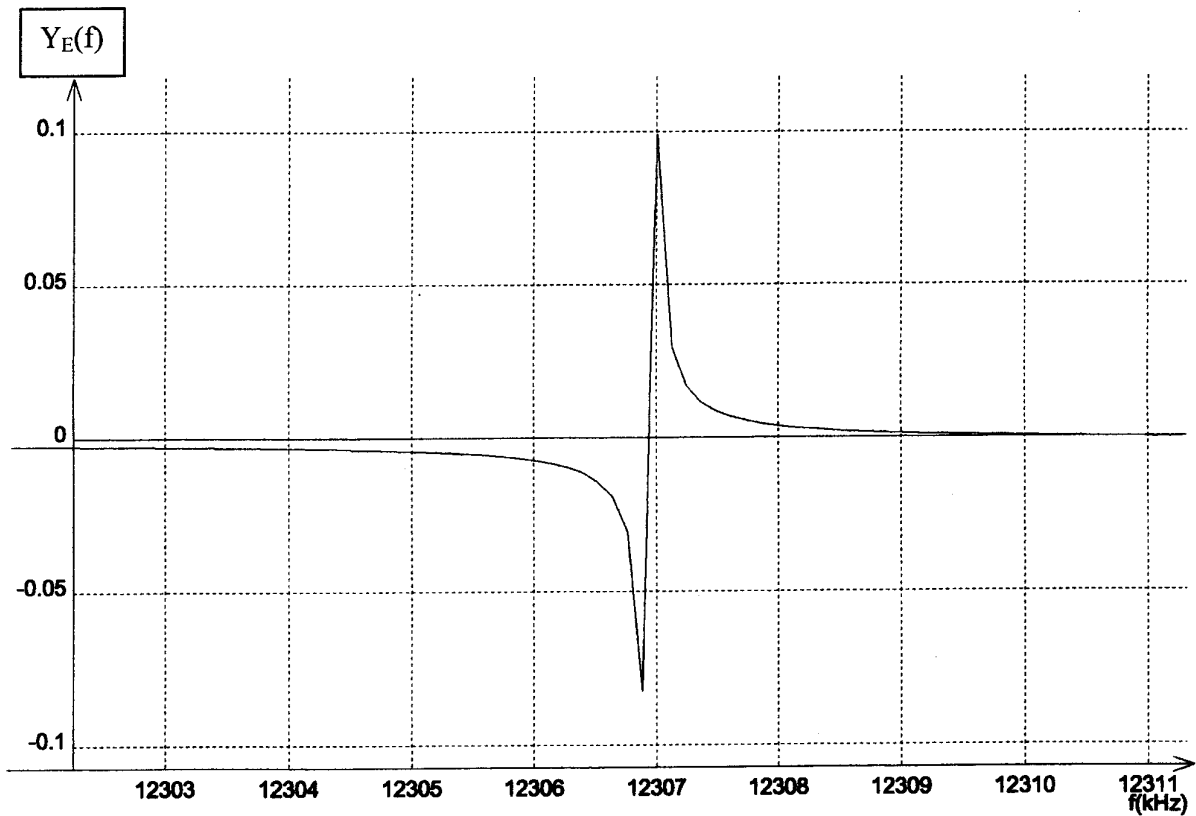


Courbe X(f)

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	13/14

2.3.5. Calcul de la fréquence des oscillations

A l'aide de la courbe $Y_E(f)$ (qui représente l'allure de \underline{Y}_E dans le cas où $C_1=C_2=15\text{ nF}$) et de la question 2.3.4.2, déterminer la fréquence des oscillations.



Courbe $Y_E(f)$

SESSION 2005		CODE : ELPHYSA	
B.T.S. ELECTRONIQUE			
EPREUVE : DE PHYSIQUE APPLIQUEE			
Durée :	Coefficient :	Nombre total de pages :	N° de page :
4 heures	5	14	14/14

1.1.1. $u(t) = e(t) + R.i(t)$
 $u(t) = k.\omega(t) + R.i(t)$

1.1.2. $J.\frac{d\omega(t)}{dt} = c_m(t) = k.i(t)$

1.1.3 D'après 1.1.2 $i(t) = \frac{u(t) - k\omega(t)}{R}$
 D'où $J.\frac{d\omega(t)}{dt} = c_m(t) = k.i(t) = k.\frac{u(t) - k\omega(t)}{R}$

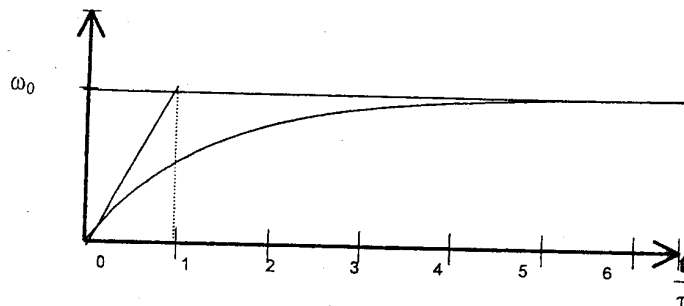
On a donc $\frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{k^2}{R.J}\omega(t) = \frac{k}{R.J}u(t)$

1.1.4. $\omega(t) = \frac{U}{k} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ avec $\frac{U}{k} = 804 \text{ rad/s}$ et $\tau = \frac{R.J}{k^2} = 3,2 \text{ ms}$

En régime permanent $\omega_0 = 8020 \text{ tr.min}^{-1}$. Cette valeur est cohérente avec les données puisque l'on trouve une vitesse à vide supérieure à la vitesse nominale.

1.1.5 Temps de réponse à 5% : $t_r = 3 \tau = 9,6 \text{ ms}$

1.1.6. $\omega(t)$ en tr.mn^{-1}



1.1.7.

$$\tau p \Omega(p) + \Omega(p) = \frac{U(p)}{k} \Rightarrow \Omega(p) = \frac{U(p)}{k(1 + \tau.p)}$$

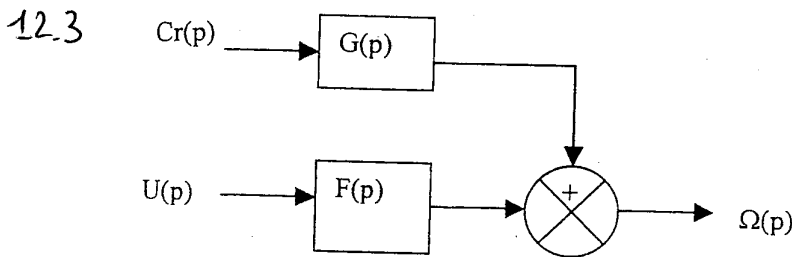
$$\Omega(p) = \frac{U_0}{k(1 + \tau.p)p} \quad \omega(t) = \frac{U_0}{k} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

12.1. $J \frac{d\omega}{dt} = k.i(t) - C_r(t)\omega$

12.2 $Jp\Omega(p) = k \times \frac{U(p) - k\Omega(p)}{R} - C_r(p)$; $\left(\frac{k^2}{R} + Jp\right)\Omega(p) = \frac{k}{R}U(p) - C_r(p)$

$\left(1 + \frac{JR}{k^2}p\right)\Omega(p) = \frac{1}{k}U(p) - \frac{R}{k^2}C_r(p)$; $\Omega(p) = \frac{1/k}{1 + \frac{JR}{k^2}p}U(p) - \frac{R/k^2}{1 + \frac{JR}{k^2}p}C_r(p)$

$\Omega(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \frac{k}{k^2}U(p) - \frac{R}{1 + \tau p} \frac{R}{k^2}C_r(p)$



12.4 $\omega_{0r} = \frac{U_0}{k} - \frac{R}{k^2}C_{r0}$ Nouvelle vitesse 6970 tr.min⁻¹

13.1 $C_r(p)=0$
 $\Omega(p) = \frac{A}{k.(A+1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\tau}{A+1}p} V_E(p)$

avec $T_1 = \frac{A}{k.(A+1)}$ et $\tau_1 = \frac{\tau}{A+1}$

$\Omega(p) = -\frac{R}{k^2.(A+1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\tau}{A+1}p} C_r(p)$

avec $T_2 = -\frac{R}{k^2.(A+1)}$ et $\tau_2 = \tau_1$

13.2

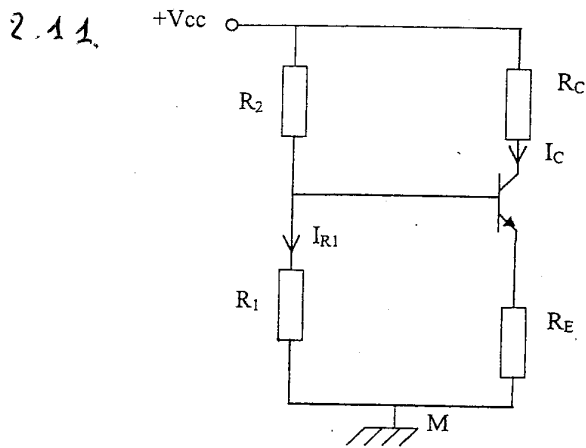
$\Omega_0 = T_1 V_{E0}$

$\omega_0 = V_{E0} \frac{A}{k.(A+1)}$

$V_{E0} = 126V$

13.3 $\omega_{1r} = T_1 V_{E0} + T_2 C_{r0}$ $\omega_{1r} = 7793 \text{ tr.min}^{-1}$

L'asservissement diminue la perte de vitesse causée par le couple résistant.



2.1.2 $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$; $I_C = 0,91 \text{ mA}$

2.1.3 $V_{BM} = V_{BE} + R_E I_E$; $V_{BM} = 2,6 \text{ V}$; $I_{R1} = 10 \frac{I_C}{\beta}$; $I_{R1} = 0,091 \text{ mA}$; $R_1 = \frac{V_{BM}}{I_{R1}}$; $R_1 = 29 \text{ k}\Omega$

2.1.4 $R_2 = \frac{V_{CC} - V_{BM}}{I_{R1} + I_B}$; $R_2 = 64 \text{ k}\Omega$

2.2.1 $Z=0 \Rightarrow jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = 0 \Rightarrow \omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

2.2.2 $\underline{Y}=0 \Rightarrow jC_0\omega + \frac{1}{jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} = jC_0\omega + \frac{jC\omega}{1 - LC\omega^2} = 0 \Rightarrow \frac{jC_0\omega - jLC_0C\omega^3 + jC\omega}{1 - LC\omega^2} = 0$

$C_0 + C - LC_0C\omega^2 = 0 \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \frac{CC_0}{C+C_0}}}$

2.2.3 $f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$; $f_s = 12,301 \text{ MHz}$;

$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$; $f_p = 12,331 \text{ MHz}$

2.2.4.1

$$X = \frac{-1}{C_0 2\pi f} \times \frac{1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}$$

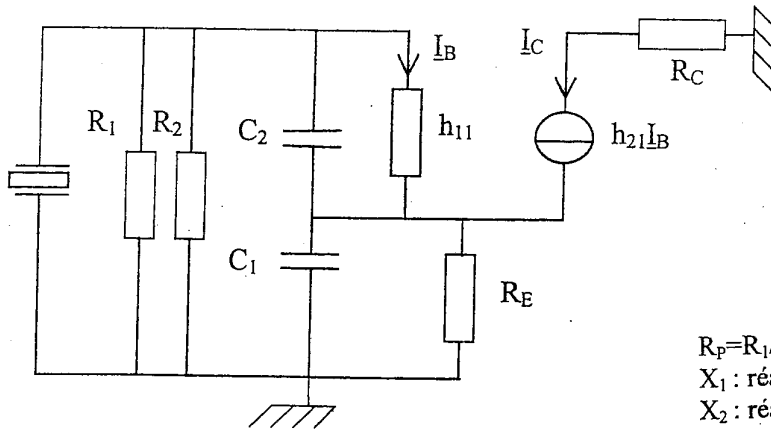
2.2.4.2

Pour $f < f_s$ le quartz est ... $X < 0$ capacitif.....

Pour $f_s < f < f_p$ le quartz est ... $X > 0$ inductif....

Pour $f > f_p$ le quartz est $X < 0$ capacitif.....

2.3.1.



$R_p = R_1 // R_2$;
 X_1 : réactance de C_1 ;
 X_2 : réactance de C_2 ;
 X : réactance du quartz

2.3.2.1
$$\underline{T}_B = \frac{jX}{jX + jX_2} \quad \underline{T}_B = \frac{X}{X + X_2} \quad \underline{T}_B \text{ est bien réelle}$$

2.3.2.2
$$\underline{Y}_e = \frac{1}{jX_1} + \frac{1}{jX_2 + jX} \quad \underline{Y}_e = -j \frac{X + X_1 + X_2}{X_1(X_2 + X)}$$

2.3.3
$$\underline{Y}_E = \frac{X_1 + X_2 + X}{jX_1(X + X_2)}$$

2.3.4.1 $\underline{T}_{BO} = \underline{T}_A \times \underline{T}_B$ Oscillations si $\underline{T}_{BO} = 1$

2.3.4.2 Si $\underline{T}_{BO} = 1$ alors $\underline{T}_A(j\omega) \cdot \underline{T}_B(j\omega)$ est réel.
 On sait (2.3.2.1) que $\underline{T}_B(j\omega)$ est un réel, il faut donc que $\underline{T}_A(j\omega)$ soit elle aussi réelle or l'expression suivante
$$\underline{T}_A(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{h_{11}}{h_{21} + 1} \left(\frac{1}{R_E} + \underline{Y}_E \right)}$$
 ne peut être réelle que si \underline{Y}_E est réelle or d'après 2.3.3 \underline{Y}_E est un imaginaire pure, la seule solution est que $\underline{Y}_E = 0$

2.3.4.3 $\underline{Y}_e = 0 \Rightarrow X + X_1 + X_2 = 0$

2.3.4.4 Sachant que $X_1 = \frac{-1}{C_1\omega}$ et $X_2 = \frac{-1}{C_2\omega}$ il faut donc que X soit positif. Le quartz est donc homogène à une inductance à la fréquence des oscillations. Et donc d'après 2.2.4.2 $f_s < f < f_p$

2.3.4.5 D'après la courbe X est positif sur l'intervalle [12,3 MHz ; 12,33 MHz] ce qui correspond bien aux valeurs de f_s et f_p calculée à la question 2.2.3

2.3.5. La valeur de la fréquence pour laquelle $\underline{Y}_E = 0$ est légèrement inférieure à 12,307 MHz. Remarque cette fréquence est bien telle que $f_s < f < f_p$