Chapitre V

Oscillateurs sinusoïdaux

I. Introduction

Un oscillateur sinusoïdal est un circuit électronique, généralement en boucle fermée, qui suite à une excitation transitoire permet d'obtenir à sa sortie un signal sinusoïdal en permanence. Le principe des oscillateurs est toujours basé sur une boucle de réaction. Cette dernière permet au système de devenir instable, on dit alors, qu'il y a oscillations.

Dans les systèmes électroniques, les oscillateurs ont souvent le rôle d'une source de référence de fréquence et bien sûr de temps (base de temps). Ils sont utilisés comme : horloge d'un micro-ordinateur, base de temps d'un oscilloscope, temporisateurs. Ils sont aussi très utilisés dans le domaine des récepteurs superhétérodyne (contenant des oscillateurs) comme : la radio, la télévision, le téléphone mobile …etc.

Les oscillateurs se divisent en deux catégories selon la nature des signaux fournis :

- ✓ Les oscillateurs sinusoïdaux (ou harmoniques) qui fournissent un signal quasi-sinusoïdal.
- ✓ Les oscillateurs à relaxation qui produisent un signal non sinusoïdal (créneaux, dents de scie…).

II. Systèmes bouclés

II.1. Principe

La structure d'un oscillateur peut se ramener à celle d'un système bouclé constitué par :

- ✓ Une chaîne directe de fonction de transfert A(p).
- ✓ Une chaîne de retour de transmittance B(p).
- ✓ Un comparateur qui réalise la différence entre le signal d'entrée et une partie du signal de sortie réinjectée à l'entrée.

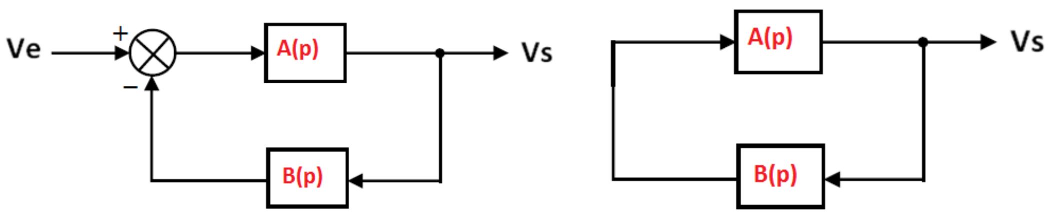

Figure 1. Système bouclé

La fonction de transfert en boucle fermée a pour expression : $T(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \frac{A(p)}{1+A(p)B(p)}$

$$p = j\omega$$

La fonction de transfert en boucle fermée montre que le gain peut devenir infini selon le gain de la boucle de retour. Ce qui donne la possibilité d'avoir un signal de sortie même en l'absence du signal d'entrée.

II.2 Conditions d'oscillations

Pour avoir des oscillations, il faut répondre aux critères de Barkhausen :

$$S(p)\big(1 + A(p)B(p)\big) = E(p)A(p)$$

Lorsque le signal d'entrée $v_e(t)$ est nul, on peut écrire que: $S(p)\big(1 + A(p)B(p)\big) = 0$

Et pour avoir $S(p) \neq 0$ il faut et il suffit que $\big(1 + A(p)B(p)\big) = 0 \Longrightarrow A(p)B(p) = -1$

D'où le critère de Barkhausen ou condition d'auto-oscillation.

Le gain total de la boucle (amplificateur + boucle de retour) doit être égal à 1 soit :

$$|A(p).B(p)| = 1$$

Du point de vue pulsation (fréquence) et pour garantir la condition d'oscillation et pour qu'un système bouclé oscille, il faut qu'il existe une fréquence $f_0$ou une pulsation ω_0 pour laquelle le gain de boucle soit égal à 1.

Remarque :

Lors du démarrage d'un oscillateur, on passe toujours de la situation IABI > 1 à la situation IABI = 1.

$|A(j\omega_0).B(j\omega_0)| > 1 \Longrightarrow |A(j\omega_0).B(j\omega_0)| = 1$

Conditions de démarrage d'oscillations $\Longrightarrow$ conditions d'entretien d'oscillations

II.3 Stabilité de l'amplitude

Lorsque l'amplitude du signal de sortie augmente, l'amplificateur sort de son domaine linéaire et le signal est forcément écrêté par l'étage d'amplification, ce qui conduit à une diminution de l'amplification qui sera ainsi ramenée à la valeur $|A(j\omega_0).B(j\omega_0)| = 1$ (conditions d'entretien d'oscillations).

Pour assurer une stabilité d'amplitude , on doit normaliser la construction de l'oscillateur autour d'un amplificateur dont l'amplification diminue aux fortes amplitudes où on introduit dans le système bouclé un moyen qui permet de faire varier le gain en fonction de l'amplitude du signal de sortie (CAG : contrôle automatique du gain)

Exemple : construire un amplificateur à transistor à une caractéristique non-linéaire qui limite l'excursion aux fortes amplitudes sans faire apparaître d'écrêtage du signal en sortie.

II.3 Stabilité de fréquence

La fréquence d'oscillation est en général fixée par la condition sur la phase :

$$arg\big(A(j\omega)B(j\omega)\big) = 0$$

Toute variation de déphasage sera alors compensée par une variation de la fréquence f_0 afin que la condition de Barkausen sur la phase reste vérifiée.

Pour réaliser des oscillateurs stables, on utilise des dispositifs à fort coefficient de qualité, ce sont les résonateurs (résonateurs piézoélectriques).

III. Différents types d'oscillateurs sinusoïdaux

Constitution :

L'oscillateur sinusoïdal est un système bouclé placé volontairement dans un état d'instabilité. Il est constitué d'une chaîne directe (amplification) et d'un quadripôle de réaction.

- ✓ La chaîne directe de la boucle fermée, est généralement un amplificateur à base d'un transistor ou d'un amplificateur opérationnel AOP.
- ✓ La chaine de retour est à base de filtres réalisés par des résistances, capacités et bobines.

Généralement, c'est le réseau de la contre réaction qui donne le nom de l'oscillateur sinusoïdal comme :

- ✓ Colpitts
- ✓ Hartley
- ✓ Clapp
- ✓ Pont de Wien
- ✓ Déphasage
- ✓ Quartz

III.1 Oscillateurs à pont de Wien (oscillateur RC)

Il est constitué d'un étage amplificateur non inverseur et d'une chaîne de réaction (quadripôle RC). La réaction étant tension-série

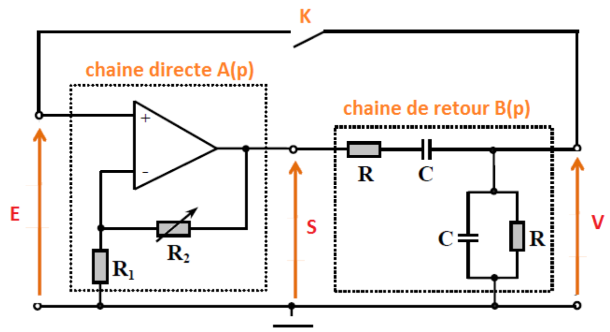

Figure 2. Oscillateur à pont de Wien

La méthode la plus simple pour l'étude d'un oscillateur, exige la détermination de sa fonction de transfert, donc déterminer sa chaîne directe $A(p)$ et sa chaîne de retour $B(p)$.

Il faut ensuite déterminer les conditions d'auto-oscillation sur les éléments du filtre ainsi que sur la fréquence d'auto-oscillation.

Chaîne directe $A(p)$

$A(p)=\frac{S(p)}{E(p)}=1+\frac{R_2}{R_1}$

Chaîne de retour $B(p)$

$B(p)=\frac{V(p)}{S(p)}=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}$ avec $Z_1=\frac{1+RCp}{RCp}$ et $Z_2=\frac{R}{1+RCp}$ alors on aura : $B(p)=\frac{RCp}{1+3RCp+(RCp)^2}$

Conditions d'oscillation : lorsqu'on ferme l'interrupteur K : $V(p)=E(p)$

$A(p)B(p)=1=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{RCp}{1+3RCp+(RCp)^2}\right)=1 \Longrightarrow \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=3+RCp+\frac{1}{RCp}$

En remplaçant p par $j\omega$ on aura :

$\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=3+j\left(RC\omega-\frac{1}{RC\omega}\right)$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire et par identification, on aura :

La partie réelle : $\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=3$ et la partie imaginaire : nulle $RC\omega-\frac{1}{RC\omega}=0$

Condition d'auto oscillation sur les résistances : $R_2=2R_1$.

Condition d'auto oscillation sur la fréquence d'oscillation : $\omega_{oscill}=\frac{1}{RC} \Longrightarrow f_{oscill}=\frac{1}{2\pi RC}$

L'expression de la fréquence trouvée reflète que la sortie de l'oscillateur délivre un signal quasi sinusoïdal.

L'oscillation sinusoïdale prend naissance lorsque $R_2 \geq 2R_1$

III.2 Oscillateur Colpitts (oscillateur LC)

Il est constitué d'un étage amplificateur à base d'un AOP et d'une chaîne de réaction (quadripôle LC).

La réaction étant tension-série

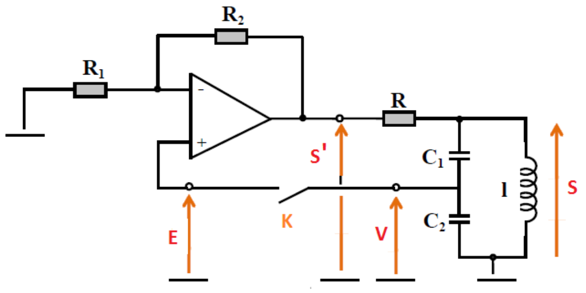

Figure 3. Oscillateur Colpitts

La détermination de la fonction de transfert, exige de déterminer la chaîne directe $A(p)$ et la chaîne de retour $B(p)$.

On passe ensuite à la détermination des conditions d'auto-oscillation sur les éléments du filtre ainsi que sur la fréquence d'oscillation.

Chaîne directe $A(p)$

$\frac{S\acute{}(p)}{E(p)} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ et $\frac{S(p)}{S\acute{}(p)} = \frac{Z}{R+Z}$

$Z = \left(Lp // \frac{1}{C_e p}\right) = \frac{Lp}{1+LC_e p^2}$ et $C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

$$A(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{Z}{R+Z}\right) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{Lp}{Lp + R(1 + LC_e p^2}\right) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{1}{1 + R(C_e p + \frac{1}{Lp})}\right)$$

Chaîne de retour $B(p)$

$$V(p) = \frac{C_1 p}{C_1 p + C_2 p} S(p) \Rightarrow B(p) = \frac{V(p)}{S(p)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{C_e}{C_2} \text{ où } C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Conditions d'oscillation : lorsqu'on ferme l'interrupteur K : $V(p) = E(p)$

$$A(p)B(p) = 1 \Longrightarrow \left[\frac{C_e}{C_2}\right]\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{1}{1 + R(C_e p + \frac{1}{Lp})}\right) = 1 \Longrightarrow$$

$$\left[\frac{C_e}{C_2}\right]\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1 + R\left(C_e p + \frac{1}{Lp}\right) = 1 + jR\left(C_e \omega - \frac{1}{L\omega}\right)$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire et par identification on aura :

La partie réelle : $\left[\frac{C_e}{C_2}\right]\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=1$ et la partie imaginaire : nulle $R\left(C_e\omega-\frac{1}{L\omega}\right)=0$

La condition d'auto-oscillation sur les résistances donne:

$$1+\frac{R_2}{R_1}=\frac{C_e}{C_2}=1+\frac{C_2}{C_1} \Longrightarrow \frac{R_2}{R_1}=\frac{C_2}{C_1}$$

La condition d'auto-oscillation sur la fréquence d'oscillation :ω_{oscill}

$$LC_e\omega^2=1 \qquad \omega_{oscill}=\frac{1}{\sqrt{LC_e}}=\sqrt{\frac{1}{L}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right)} \;;\; f_{osc}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_e}}$$

L'oscillation sinusoïdale prend naissance lorsque $\frac{R_2}{R_1}\geq\frac{C_2}{C_1}$

III.3 Oscillateur Hartley (oscillateur LC)

L'oscillateur de Hartley est identique à celui de Colpitts, la différence réside dans la permutation des bobines avec les condensateurs dans le réseau de réaction et inversement.

Il est constitué d'un étage amplificateur à base d'AOP et d'une chaîne de réaction (quadripôle LC). La réaction étant tension-série.

Détermination de la chaîne directe $A(p)$ et de la chaîne de retour $B(p)$.

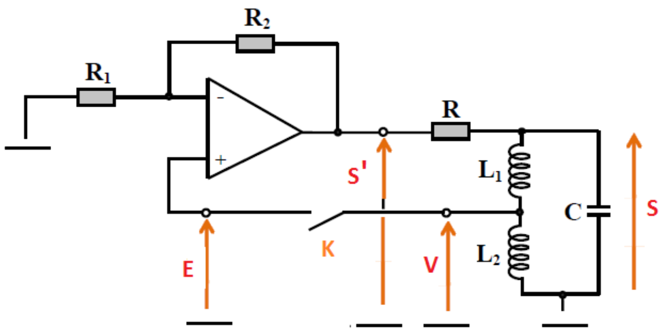

Figure 4. Oscillateur Hartley

Chaîne directe $A(p)$

$\frac{S(p)}{E(p)}=1+\frac{R_2}{R_1}$ et $\frac{S(p)}{S(p)}=\frac{Z}{R+Z}$

$Z=\left(Lp//\frac{1}{Cp}\right)=\frac{Lp}{1+LCp^2}$ et les deux bobines en série $Z_L=Z_{L1}+Z_{L2}$

$$A(p)=\frac{S(p)}{E(p)}=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{Z}{R+Z}\right)=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{Lp}{Lp+R(1+LCp^2)}\right)$$

$$A(p)=\frac{S(p)}{E(p)}=\frac{1+\frac{R_2}{R_1}}{1+R(Cp+\frac{1}{Lp})}$$

Chaîne de retour $B(p)$

$$V(p)=\frac{Z_{L_2}}{Z_{L_1}+Z_{L_2}}S(p)\Rightarrow B(p)=\frac{V(p)}{S(p)}=\frac{L_2}{L_1+L_2}=\frac{L_2}{L}$$

Avec $Z_L = Lp$

Conditions d'oscillation : lorsqu'on ferme l'interrupteur K : $V(p)=E(p)$

$$A(p)B(p)=\frac{S(p)}{E(p)}\frac{V(p)}{S(p)}=1$$

$$A(p)B(p)=\frac{S(p)}{E(p)}\frac{V(p)}{S(p)}=1\Rightarrow\frac{\left[\frac{L_2}{L}\right]\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)}{1+R\left(Cp+\frac{1}{Lp}\right)}=1$$

$$\left[\frac{L_2}{L}\right]\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=1+R\left(Cp+\frac{1}{Lp}\right)\longrightarrow\left[\frac{L_2}{L}\right]\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=1+jR\left(C\omega-\frac{1}{L\omega}\right)$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire et par identification on aura :

La partie réelle : $1+\frac{R_2}{R_1}=\frac{L}{L_2}=1+\frac{L_1}{L_2}$

La partie imaginaire : $C\omega-\frac{1}{L\omega}=0$

La condition d'auto-oscillation sur les résistances:

$$1+\frac{R_2}{R_1}=\frac{L}{L_2}=1+\frac{L_1}{L_2}\Longrightarrow\frac{R_2}{R_1}=\frac{L_1}{L_2}$$

La condition d'auto-oscillation sur la fréquence d'oscillation :ω_{oscill}

$$C\omega-\frac{1}{L\omega}=0\Longrightarrow\omega_{osc}=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{C(L_1+L_2)}}\longrightarrow f_{osc}=\frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_1+L_2)}}$$

L'oscillation sinusoïdale prend naissance lorsque $\frac{R_2}{R_1}\geq\frac{L_1}{L_2}$

III.4 Oscillateur à Quartz

Un oscillateur à quartz est un composant électronique qui oscille à une fréquence très stable lorsqu'il est stimulé électriquement. Les propriétés piézoélectriques remarquables du minéral de quartz (cristal naturel de silice) permettent d'obtenir des fréquences d'oscillation très précises, qui font du quartz un élément important dans le monde de l'électronique.

L'oscillateur électronique à base d'un cristal de quartz, est qualifié d'une grande stabilité et d'une haute précision grâce à des résonateurs à micro-onde.

III.4.1 L'effet piézoélectrique

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains matériaux de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et inversement de se déformer lorsqu'on leur applique une tension électrique (champ électrique).
Le quartz est un transducteur qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

Le champ électrique est appliqué par une différence de potentiel entre les deux électrodes placées dans le quartz. Lorsque le champ est coupé, le quartz génère à son tour un champ électrique en reprenant sa forme initiale, provoquant une différence de potentiel entre les électrodes. L'alternance de ces deux états, entretenue par un composant actif, se stabilise sur une des fréquences de résonance du quartz.

III.4.2 Modélisation

Le symbole et le modèle équivalent du schéma électrique du quartz sont donnés par la figure ci-dessous :

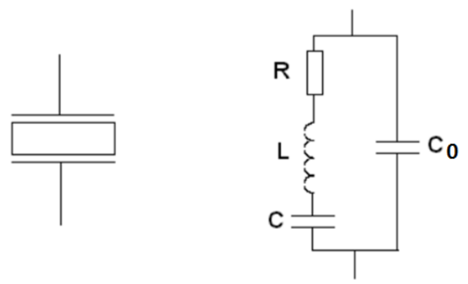

Figure 5. Symbole et schéma électrique équivalent d'un quartz

Un quartz peut être modélisé comme un circuit électrique possédant deux fréquences de résonance proche l'une de l'autre, l'une à faible impédance (série), et l'autre à haute impédance (parallèle).
Le schéma électrique du quartz est constitué par les éléments suivants:

- ✓ Une capacité C, une bobine L et une résistance R montées en série dont les valeurs dépendent de la nature et des caractéristiques du quartz.

- ✓ Une capacité C_0 qui caractérise les armatures métalliques formant un condensateur plan avec le diélectrique (quartz).

III.4.3 Impédance Z du quartz

Selon le schéma électrique équivalent d'un quartz, on remarque l'existence de deux impédances montées en parallèle Z_S (C, L et R)// Z_0 (C_0).

L'impédance du composant (si on néglige l'effet de la résistance R)

$$Z = \frac{\left(\frac{1}{C_0\, p}\right)\left(Lp + \frac{1}{Cp}\right)}{Lp + \frac{1}{C_0\, p} + \frac{1}{Cp}} = \left(\frac{1}{C_0\, p}\right)\left(\frac{1 + \frac{1}{LCp^2}}{1 + \frac{1}{Lp^2}\left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C}\right)}\right)$$

Le quartz est caractérisé par deux pulsations de résonance série et parallèle appelées aussi résonance et antirésonance très proche l'une de l'autre.

$$\omega_S = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad \omega_P = \frac{1}{\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}} = \omega_S \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

Bonne lecture

S. MOKHNACHE et N. ZERROUG 2020