Fiche sur un exemple d'étude d'oscillateur quasi-sinusoïdal: l'oscillateur à pont de Wien

Les oscillateurs quasi-sinusoïdaux sont des systèmes qui doivent sortir un signal qui approche le plus possible une sinusoïde (on verra que leur structure impose l'apparition d'harmoniques dont on doit limiter l'influence). Cette sinusoïde doit, par ailleurs, être de fréquence la plus stable possible. Nous allons par la suite étudier l'exemple très classique de l'oscillateur à pont de Wien en essayant de bien détailler l'ensemble des aspects du problème (structure, qualité de la sortie…). Cette structure, de par ses performances modestes, n'a aucun intérêt en pratique. En revanche, son étude permet de soulever bon nombre de problèmes communs à l'ensemble des oscillateurs quasi-sinusoïdaux. C'est pourquoi il s'agit d'un exemple particulièrement adapté au montage d'agrégation sur les oscillateurs.

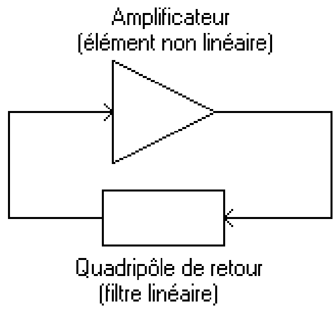
Bibliographie.

"Transmission de signaux" -- C. More -- Tec & Doc -- Lavoisier
"Physique Appliquée - Terminale Génie électronique" -- P. Martin -- Hachette
"Physique Appliquée – Terminale Génie électronique" –R. Le Goff -- Nathan

Généralités sur les oscillateurs quasi-sinusoïdaux.

Structure des oscillateurs quasi-sinusoïdaux à boucle de réaction.

Un oscillateur quasi-sinusoïdal doit comporter une cellule résonante. Cependant cette dernière comportant forcément des éléments dissipatifs, il va falloir apporter de l'énergie pour maintenir le système en oscillation. Le signal en sortie du quadripôle va donc être amplifié avant d'être à nouveau injecté dans le quadripôle résonant (ce sont donc les sources de polarisation de l'amplificateur qui apportent l'énergie nécessaire pour obtenir une sortie sinusoïdale…l'oscillateur réalise une conversion continu-alternatif).



En théorie, un système de ce type peut rester en équilibre instable. Cependant, en pratique, la moindre perturbation électrique va pousser le système hors de son état d'équilibre et les oscillations vont démarrer.

Etude des oscillateurs quasi-sinusoïdaux.

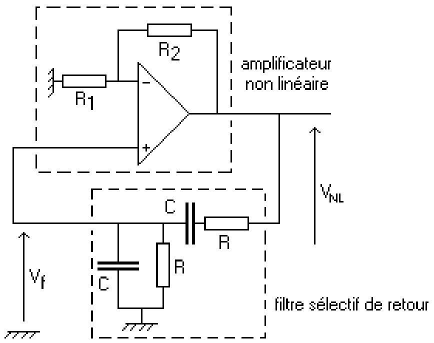
Dans l'étude d'un oscillateur, il va falloir distinguer deux étapes de fonctionnement bien distinctes.

- La première est un état transitoire : c'est le démarrage des oscillations. Les signaux sont alors suffisamment faibles pour que l'amplificateur se comporte de façon linéaire. L'étude lors de cette phase se mène comme celle d'un système bouclé linéaire classique. On va pouvoir notamment déterminer dans quelles conditions l'ensemble étudié va bien pouvoir osciller.
- La seconde est un état permanent : c'est le régime d'oscillation. Lors du démarrage, le signal oscillant va croître. Cependant, au-delà d'une certaine valeur de signal en entrée, l'amplificateur va se comporter de façon non-linéaire (saturation d'un amplificateur opérationnel par exemple). Ce phénomène va stopper la croissance du signal oscillant et provoquer l'apparition d'harmoniques (on suppose qu'il n'existe pas de système automatique de contrôle de gain permettant de rester en régime linéaire)

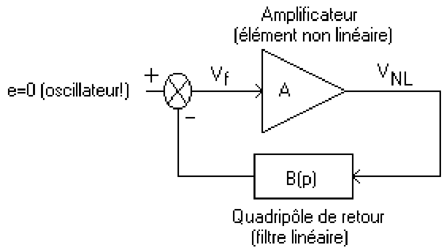
Etude théorique de l'oscillateur à pont de Wien.

Nous allons désormais nous intéresser au cas particulier de l'oscillateur à pont de Wien. Cet oscillateur, quoi que peu performant va nous permettre d'appliquer une méthode d'approche générale pour les oscillateurs de ce type. Nous allons tout d'abord faire apparaître la structure générale d'un oscillateur quasi-sinusoïdal en identifiant l'amplificateur et le filtre sélectif. Ceci étant fait, nous verrons la condition à vérifier pour que les oscillations apparaissent. Nous pourrons alors calculer les principales grandeurs attendues (fréquence et amplitude des oscillations notamment).

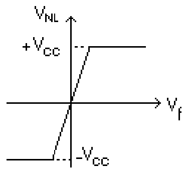
Structure de l'oscillateur à pont de Wien. Identification des différents éléments.



On va essayer de se ramener à une symbolique de système bouclé classique (sauf qu'ici, on travaille à entrée nulle puisque l'on étudie un oscillateur…)



• Dans sa zone de fonctionnement linéaire, l'amplificateur a un gain $A=1+R_2/R_1$ (pour l'étude du démarrage, ce gain sera suffisant). Cependant la tension de sortie de l'amplificateur est limitée à la plage $[-V_{cc};+V_{cc}]$. Sa caractéristique entrée-sortie, si on suppose l'amplificateur opérationnel parfait (excepté vis à vis de la saturation) est donc la suivante:



• Le filtre de retour est un filtre passe bande dont la fonction de transfert est la suivante

$$B(p)=\frac{-V_f}{V_{NL}}=-\frac{\frac{R}{1+R.C.p}}{\frac{R}{1+R.C.p}+R+\frac{1}{C.p}}=-\frac{R}{R+R+R^2.C.p+R+\frac{1}{C.p}}=\frac{-1}{3+R.C.p+\frac{1}{R.C.p}}=\frac{-\frac{1}{3}}{1+Q.\left(\frac{p}{\omega_0}+\frac{\omega_0}{p}\right)}$$

si on pose $\omega_0=1/RC$ et $Q=1/3$

Calcul des caractéristiques de sortie.

• *Le démarrage des oscillations.*

Nous verrons en automatique qu'un système bouclé du type décrit dans notre exemple est instable lorsque l'un des pôles de sa fonction de transfert en boucle fermée a une partie réelle positive. Ces pôles sont les solutions de l'équation

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

Ils peuvent être calculés en résolvant l'équation

$$p^2+\frac{\omega_0}{Q}\left(1-\frac{A}{3}\right).p+\omega_0^2=0$$

Le calcul montre que le montage est instable pour $A>3$ (on peut même montrer que le démarrage sera pseudo-oscillant pour $3<A<5$ alors qu'il sera exponentiel croissant pour $A>5$).

• *Le régime permanent: fréquence et amplitude des oscillations.*

- En régime permanent, la non linéarité de l'amplificateur se fait sentir et il n'est plus possible de raisonner aussi simplement que lors du démarrage. On va faire l'hypothèse dite du premier harmonique. Pour une amplitude de signal en entrée de l'amplificateur donnée, on regarde l'allure de la sortie (elle est affectée par la non-linéarité). De la sortie distordue, on extrait le premier harmonique. La non linéarité est alors modélisée par un gain linéaire $\overline{N}$ équivalent, rapport du premier harmonique de la sortie sur l'entrée (ce gain remplace le gain A de l'étude du démarrage).
- Une fois $\overline{N}$ calculé, la condition d'oscillation est donnée par

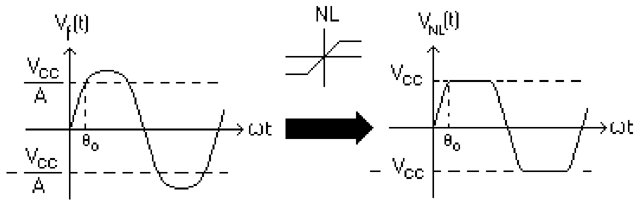
$$\overline{N}.B(j.\omega) = -1$$

La résolution de cette équation complexe nous donnera la fréquence des oscillations ainsi que leur amplitude.

- Dans le cas de notre exemple, nous allons calculer $\overline{N}$.

Nous allons supposer que $V_f(t) = V.\sin(\omega.t)$ (V et ω sont les inconnues que nous recherchons).

$V_{NL}(t)$ vaut $A.V_f(t)$ tant que $V_f(t)$ est inférieure, en valeur absolue, à V_{cc}/A. Sinon elle vaut $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$.



On constate que la non-linéarité n'introduit pas de déphasage (il n'y a pas d'hystérésis) ce qui signifie que le gain équivalent $\overline{N}$ sera réel. L'amplitude du premier harmonique de V_{NL} est notée V_{NL1} et elle vaut

$$V_{NL1} = \frac{2}{T}\int_T V_{NL}(t).\sin(\omega.t).dt = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} V_{NL}(\theta).\sin\theta.d\theta = \frac{4}{\pi}\left[\int_0^{\theta_0} A.V.\sin^2\theta.d\theta + \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} V_{cc}.\sin\theta.d\theta\right]$$

Sachant que $V_{cc}=A.V.\sin\theta_0$, on trouve

$$\overline{N} = \frac{2.A}{\pi}.\left(\theta_0 + \frac{\sin(2\theta_0)}{2}\right)$$

- La condition $\overline{N}.B(j.\omega) = -1$ nous donne que

$\boxed{\omega = \omega_0}$ et que $\boxed{\overline{N} = \frac{2.A}{\pi}.\left(\theta_0 + \frac{\sin(2\theta_0)}{2}\right) = 3}$ ce qui permet de trouver V (approche graphique)

rq : l'hypothèse du premier harmonique sera d'autant plus justifiée que les harmoniques ont peu d'incidence sur l'entrée de l'amplificateur, c'est à dire que le filtre de retour est sélectif.

Effet de la non linéarité sur la stabilité en fréquence.

La relation $\overline{N}.B(j.\omega) = -1$ permet d'écrire $\mathrm{Arg}(\overline{N}) + \mathrm{Arg}(B(j\omega)) = \pi$ ce qui conduit à la fréquence d'oscillation. En différentiant la dernière relation , on trouve

$$\delta\theta + d\phi = 0 \text{ (}\phi\text{ argument de B)} \quad \text{soit} \quad \delta\theta = -\left(\frac{\partial\phi}{\partial\omega}\right)_{\omega_0}.d\omega$$

on peut alors écrire que $\dfrac{\delta\omega}{\delta\theta} \approx \dfrac{-1}{\left(\dfrac{\partial\phi}{\partial\omega}\right)_{\omega_0}}$

Dans le cas du pont de Wien, on a

$$B(p)=\frac{-\frac{1}{3}}{1+Q.\left(\frac{p}{\omega_0}+\frac{\omega_0}{p}\right)}\approx\frac{-\frac{1}{3}}{1+2.j.Q.\frac{\delta\omega}{\omega_0}} \quad \text{soit} \quad \phi\approx-\mathrm{Arc}\tan\left(2.Q.\frac{\delta\omega}{\omega_0}\right) \quad \text{et donc} \quad \frac{\delta\omega}{\delta\theta}\approx\omega_0/2.Q$$

Le fait que le filtre de retour ait un fort coefficient de qualité permet de rendre l'oscillateur moins sensible aux éventuelles variations d'état de l'amplificateur (si les variations donnent lieu une variation de phase de ce dernier…).

Observations et mesures à effectuer.

• Caractérisation des éléments de l'oscillateur (étude des éléments séparés):

- La non linéarité est constituée par un amplificateur opérationnel monté en amplificateur non inverseur (on choisira la valeur maximale de gain (cas le plus défavorable) que l'on sera susceptible d'appliquer par la suite…en gros prendre 5…pourquoi au fait?). Pour bien la caractériser, nous allons nous intéresser à la saturation (effet non linéaire), à la bande passante de l'ampli (effet linéaire) ainsi qu'à l'effet du slew-rate. En continu (ou éventuellement à une fréquence assez basse), on relève la caractéristique $V_s(V_e)$ pour des valeurs croissantes de V_{emax}. On mesure alors la pente de la zone linéaire et les valeurs des saturations. On fait alors augmenter la fréquence et on relève jusqu'à quelle fréquence la caractéristique précédente est conservée (le produit gain bande et le slew-rate vont alors entrer en jeux). Cette fréquence devra être prise en compte dans la conception de notre oscillateur.
- Le filtre de retour est lui aussi caractérisé. On mesurera notamment la fréquence centrale f_0 (avec la phase!) ainsi que le gain en fonction de la fréquence (prendre assez de points) et on essaiera de faire une estimation du facteur de qualité avec un fittage sur IGOR (comparer le résultat du fittage avec le modèle théorique obtenu par une mesure des valeurs des composants…discussion sur les erreurs systématiques introduites par nos multimètres).

• Etude du démarrage des oscillations (cette fois, la bête est montée…vous étudiez ses caractéristiques…):

- On va déjà chercher à vérifier la valeur de la résistance (et donc du gain de l'ampli) qui permet d'observer le démarrage des oscillations et confronter à la valeur attendue (il y aura certainement des erreurs systématiques qui traînent…). Plutôt que de mesurer la résistance, on pourra chercher à visualiser en XY l'allure de la réponse de la non linéarité et mesurer sa pente A dans la zone linéaire.
- On va ensuite observer le démarrage des oscillations par une observation en monocoup à l'oscilloscope car on observe un régime transitoire (au fait, pourquoi ça démarre et pourquoi l'amplitude se stabilise-t-elle?). On pourra travailler avec un gain A légèrement supérieur à 3 pour avoir un démarrage pseudo-oscillant puis augmenter le gain jusqu'à une valeur légèrement supérieure à 5 afin d'observer un démarrage exponentiel. On en profitera pour faire une mesure de la pseudo-période. On peut également jeter un coup d'œil dans le plan de phase ($X=v_s$, $Y=dv_s/dt$).

• Etude de la sortie en régime établi.

- On va mesurer la fréquence et l'amplitude des oscillations pour différentes valeurs du gain de l'amplificateur. On va ensuite confronter ces mesures aux valeurs théoriques attendues (avec un calcul utilisant le modèle du premier harmonique).
- Pour juger de la qualité du signal, on doit alors dans un premier temps s'intéresser à l'allure du spectre obtenu (notamment à l'amplitude relative des harmoniques de rang supérieur à 1). On peut notamment s'intéresser à l'incidence du gain de l'amplificateur sur les harmoniques…
- La qualité de l'oscillateur dépend également de sa stabilité en fréquence. Pour cela on peut effectuer des mesures de fréquence pour différents états de la non linéarité (par exemple, faire varier la tension de polarisation de l'amplificateur opérationnel, même si cela risque d'avoir plus d'effet sur l'amplitude que sur la fréquence des oscillations). Il faut savoir que les oscillateurs ayant un filtre de retour avec un facteur de qualité médiocre (c'est le cas ici) sont plus sensibles aux variations de la non linéarité et constituent donc des oscillateurs de mauvaise qualité... C'est pourquoi on privilégie les oscillateurs avec filtre de retour très sélectif (par exemple avec un quartz)…Un exemple d'oscillateur à quartz sera présenté dans une fiche ultérieure…
- Faire débiter l'oscillateur sur une résistance de sortie (qq kΩ) et mesurer la fréquence d'oscillation. Quel est le problème posé ? Comment l'éviter ?

remarque pratique.

On cherchera à utiliser deux résistances et deux capacités assez proches pour faire le filtre de retour. On pourra notamment utiliser des résistances de précision et obtenir la valeur des capacités C par la mesure à l'oscilloscope du temps de réponse à 63% du circuit RC formé par une résistance de précision (connue précisément) et par C…