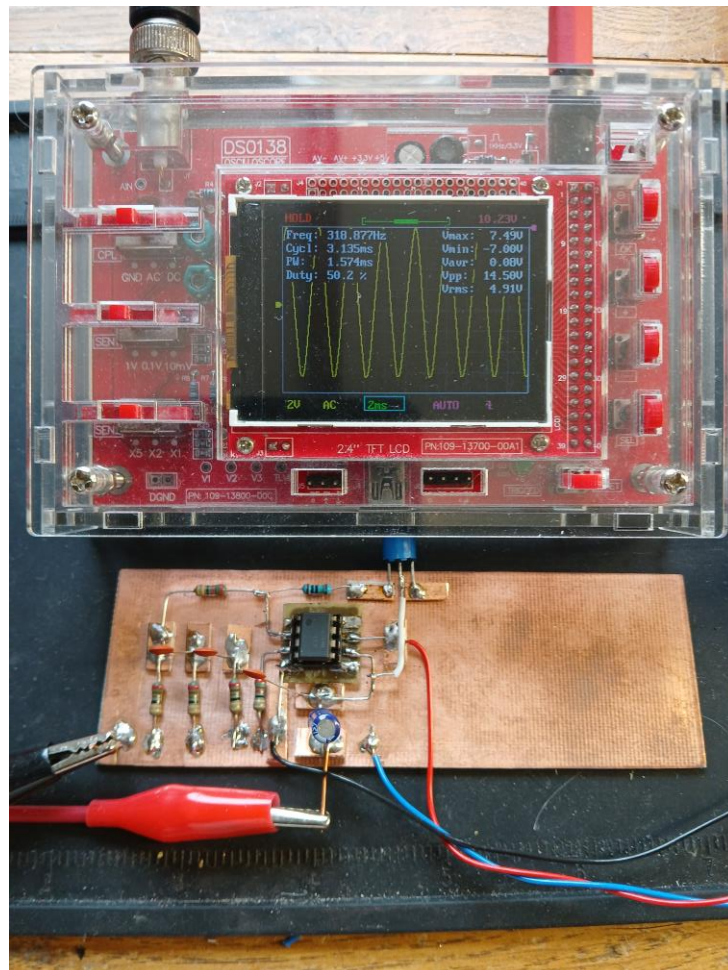


Oscillateur à boucle de déphasage.

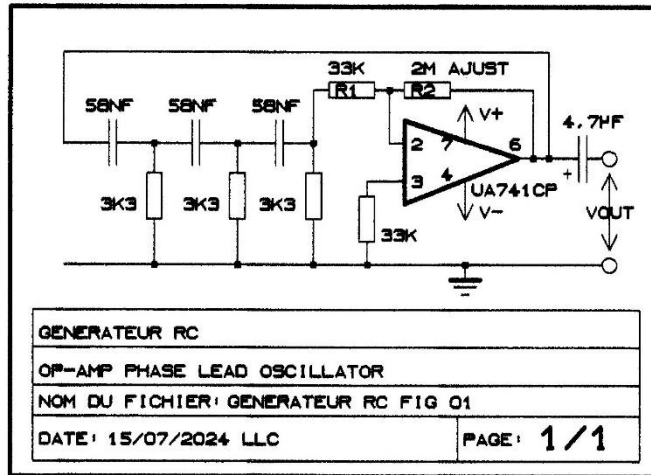
Introduction.

Dans la catégorie des oscillateurs de type RC, donc avec uniquement des résistances et des condensateurs, on trouve généralement les oscillateurs avec pont de Wien et les oscillateurs avec boucle de déphasage. On décrit ici un oscillateur avec boucle de déphasage fort simple qui ne demande que quelques composants faciles à trouver dans le commerce. On peut réaliser l'assemblage en une heure ou deux. On trouve facilement des schémas d'oscillateurs à boucle de déphasage sur le web, et bien sûr sur YouTube. En fait on n'a que le choix.



Réalisation.

Le schéma que l'on a retenu se trouve ci-dessous. On a réalisé le montage avec la méthode Manhattan (plus facile pour commencer) et puis on a utilisé une plaque d'expérimentation à trous en îlots isolés de type Eurocard (présente mieux). La boucle de déphasage est constituée de 3 cellules RC avec $R = 3300 \text{ Ohms}$ et $C = 58000 \text{ pF}$ mesurés. Pour l'amplificateur, on a choisi un amplificateur opérationnel UA741CP, que l'on alimente – une fois n'est pas coutume – de manière symétrique en +9VCC et -9VCC. L'oscillateur fonctionne aussi avec +/- 6VCC ou +/- 12VCC.



Quelques caractéristiques de fonctionnement.

Le gain de l'amplificateur opérationnel. La boucle de déphasage réduit le signal d'entrée d'un facteur 29. Il faut donc, théoriquement, que l'amplificateur ait un gain d'au moins 29 pour que l'oscillateur fonctionne. C'est le premier critère de Barkhausen. Le gain de l'amplificateur opérationnel se calcule comme suit :

$$\beta = \frac{R2}{R1 + R}$$

Avec $R = 3300 \text{ Ohms}$, $R1 = 33 \text{ kOhms}$ et $R2$, une résistance ajustable entre 1 et 2 MOhms. En pratique, l'oscillateur démarre lorsque $\beta = 37$ et il se stabilise pour $\beta = 45$. On peut augmenter le gain, mais cela n'affecte pas beaucoup le fonctionnement de l'oscillateur (voir graphique).

Le branchement de l'amplificateur opérationnel. Chaque cellule RC opère un déphasage de +/- 60 degrés, et donc au total un déphasage de +/- 180 degrés d'angle. Pour avoir un déphasage de 360 degrés d'angle, et satisfaire le deuxième critère de Barkhausen, il faut entrer par la borne inverseuse de l'amplificateur opérationnel UA741CP.

La fréquence d'oscillation. Pour les oscillateurs à boucle de déphasage, la fréquence d'oscillation se calcule comme suit :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2n}}$$

Avec n le nombre de cellules de déphasage, dans ce cas $n = 3$, $R = 3300 \text{ Ohms}$ et $C = 58000 \text{ pF}$. On obtient : f_0 théorique = 340 Hz. La fréquence mesurée à l'oscilloscope varie entre 318 et 346 Hz en fonction de la tension d'alimentation ou du gain de l'amplificateur. La valeur moyenne est bien 340 Hz pour $VCC \pm 12 \text{ VCC}$ (voir graphique).

L'angle de déphasage de la boucle. On calcule l'angle de déphasage d'une cellule RC avec la formule suivante, où X_c est la réactance capacitive du condensateur à la fréquence de résonance, et R la résistance. Pour la fréquence, on a utilisé la valeur de 340 Hz.

$$\alpha = \arctan \frac{X_c}{R}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

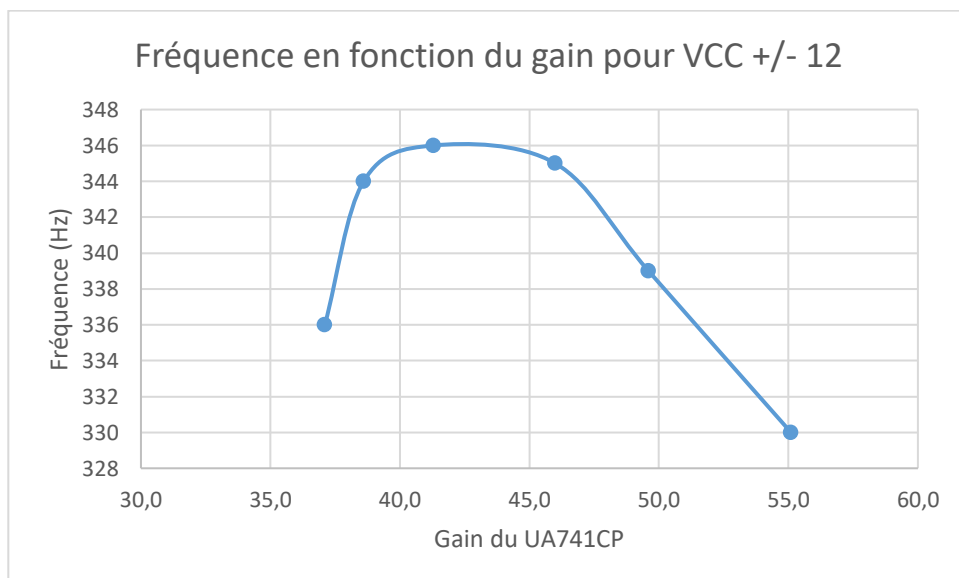
$$\alpha = \text{arc tang} \frac{10 \exp 12}{2\pi * 340 * 58000 * 3300} = 67,8 \text{ degrés}$$

Pour la boucle totale, l'angle de déphasage est donc de $3 * 67.8 = 203,4$ degrés, ce qui est plus élevé que les 180 degrés attendus! Pas d'explication.

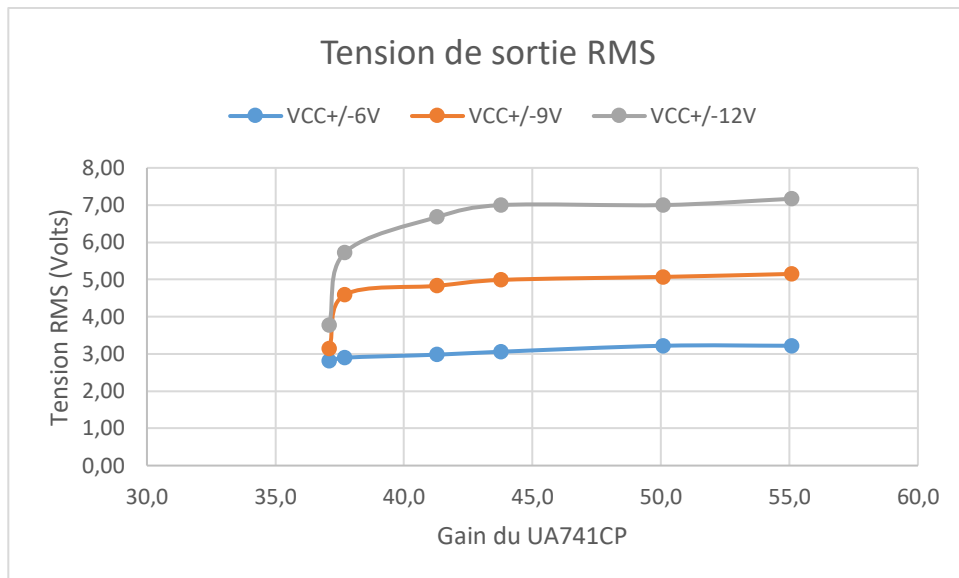
Boucle avance de phase ou retard de phase. Dans la réalisation ci-dessus, la boucle est dite « en avance de phase ». La tension de sortie de l'amplificateur est en avance sur la tension d'entrée. On peut aussi modifier le schéma pour réaliser une boucle « en retard de phase ». Il faut pour cela remplacer les résistances par les condensateurs et vice versa. Dans ce cas, la tension de sortie de l'amplificateur est en retard sur la tension d'entrée.

Quelques mesures.

Graphique N°01. Ce graphique montre la variation de la fréquence de résonance en fonction du gain de l'amplificateur opérationnel. On voit que la fréquence passe par un maximum et que la valeur moyenne est de 340 Hz, comme prévu par le calcul théorique.



Graphique N°02. On a porté la tension de sortie RMS en fonction du gain de l'amplificateur opérationnel et de la tension d'alimentation. On constate que l'oscillateur démarre pour un gain de 37 environ et se stabilise pour un gain de 45. Ce qui est bien plus élevé que le gain minimum théorique de 29.



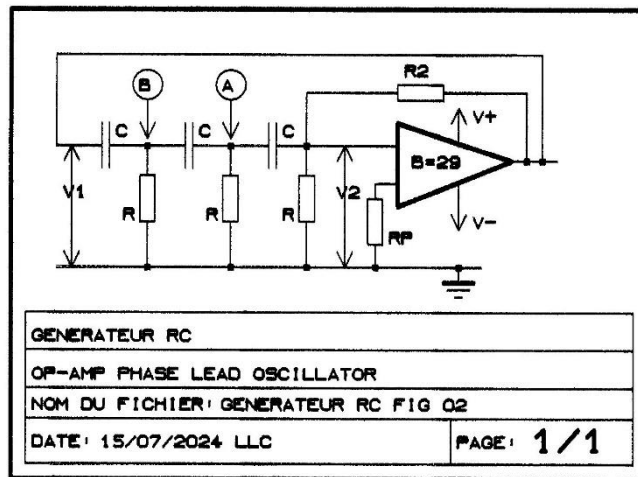
Appréciation.

Voilà un petit montage super facile qui permet de se familiariser avec les oscillateurs à boucle de déphasage. La fréquence d'oscillation est bien celle qui est prévue par calcul. Le gain de l'amplificateur doit être significativement supérieur à 29 pour fonctionner correctement. Le signal de sortie est une belle sinusoïde, même aux valeurs de gain et de tension alimentation les plus élevées. Le niveau de sortie va jusque ... 20 VPP !

Références.

- The RC Oscillator Circuit sur www.electronics-tutorials.ws
- Phase Shift Oscillator using AMP sur Learn and Grow sur YouTube
- RC Phase Shift Oscillator sur <https://circuitdigest.com>
- Oscillateur à déphasage sur ressources.univ-lemans.fr
- LM741-MIL datasheet de Texas Instruments

Annexe : calcul de la fonction de transfert pour l'oscillateur à déphasage.



Pour les calculs ci-dessous, on va poser $X = \omega CR$, c'est plus facile. On va commencer par calculer Vb . Ensuite on calculera Va en fonction de Vb et puis on calculera $V2$. Et enfin on calculera la fonction de transfert que l'on recherche, soit $H = V2/V1 = Vout/Vin$. A partir de là, on déduira le gain minimum pour l'amplificateur opérationnel.

Calcul de Vb . On applique la loi de Kirchoff au point B.

$$j\omega C(V1 - Vb) + j\omega C(Va - Vb) = \frac{Vb}{R}$$

$$j\omega CR (V1 - Vb + Va - Vb) - Vb = 0$$

$$jXV1 + jXVa = Vb(1 + 2jX)$$

$$\therefore Vb = \frac{jXV1 + jXVa}{1 + 2jX}$$

Calcul de Va . On applique la loi de Kirchoff au point A.

$$j\omega C(Vb - Va) + j\omega C(V2 - Va) = \frac{Va}{R}$$

$$j\omega CR(Vb - Va + V2 - Va) - Va = 0$$

$$jXVb + jXV2 - 2jXVa - Va = 0$$

$$jXVb + jXV2 = Va(1 + 2jX)$$

On remplace Vb par la valeur que l'on a calculée ci-dessus :

$$\frac{(jX)^2 V1 + (jX)^2 Va}{1 + 2jX} + jXV2 = Va(1 + 2jX)$$

$$\frac{(jX)^2 V1 + (jX) * (1 + 2jX)V2}{1 + 2jX} = Va(1 + 2jX) - \frac{(jX)^2 * Va}{1 + 2jX}$$

$$(jX)^2 + (jX) * (1 + 2jX)V2 = Va(1 + 2jX)^2 - (jX)^2 * Va$$

$$(jX)^2 + (jX) * (1 + 2jX)V2 = Va * ((1 + 2jX)^2 - (jX)^2) = Va * ((1 + 4jX + 3(jX)^2))$$

$$\therefore Va = \frac{(jX)^2 V1 + (jX) * (1 + 2jX)V2}{1 + 4jX + 3(jX)^2}$$

Maintenant on va calculer $V2 = V_{out}$. On considère pour cela le pont diviseur de tension formé par la résistance R et le condensateur C en série.

$$V2 = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{\frac{j\omega CR + 1}{j\omega C}} = \frac{j\omega CR Va}{1 + j\omega CR} = \frac{jX Va}{1 + jX}$$

$$V2 = \frac{(jX)^3 V1 + (jX)^2 * (1 + 2jX)V2}{(1 + 4jX + 3(jX)^2) * (1 + jX)}$$

$$V2 * (1 + 4jX + 3(jX)^2) * (1 + jX) = (jX)^3 V1 + (jX)^2 * (1 + 2jX)V2$$

$$V2 * ((1 + 4jX + 3(jX)^2) * (1 + jX) - (jX)^2 * (1 + 2jX)) = (jX^3)V1$$

D'où on tire la fonction de transfert :

$$H = \frac{V2}{V1} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(jX)^3}{(1 + 4jX + 3(jX)^2) * (1 + jX) - (jX)^2 * (1 + jX)}$$

$$H = \frac{(jX)^3}{1 + 4jX + 3(jX)^2 + jX + 4(jX)^2 + 3(jX)^3 - (jX)^2 - 2(jX)^3}$$

$$H = \frac{(jX)^3}{1 + 5jX + 6(jX)^2 + (jX)^3}$$

$$H = \frac{1}{\frac{1}{(jX)^3} + \frac{5}{(jX)^2} + \frac{6}{jX} + 1} = \frac{1}{\left(1 - \frac{5}{X^2}\right) + \left(-\frac{1}{jX^3} + \frac{6}{jX}\right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{5}{X^2}\right) + \left(\frac{j}{X^3} - \frac{6j}{X}\right)}$$

$$\therefore H = \frac{1}{\left(1 - \frac{5}{X^2}\right) + j\left(\frac{1}{X^3} + \frac{6}{X}\right)}$$

A la fréquence de résonance, la partie imaginaire de la fonction de transfert est nulle. On a donc

$$\frac{1}{X^3} - \frac{6}{X} = 0$$

$$X^2 = (2\pi fRC)^2 = \frac{1}{6}$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$

Dans cette formule, on voit apparaître un facteur $\sqrt{6}$ au dénominateur. L'expression générale est $\sqrt{6n}$ où n est le nombre de cellules de déphasage. Dans le cas qui nous concerne n=3.

Pour que l'oscillateur fonctionne, il faut que le premier critère de Barkhausen soit satisfait. Il faut que le gain de l'amplificateur opérationnel compense la perte de signal dans la boucle de déphasage. Ce qui s'écrit $\beta \cdot H \geq 1$, avec β le gain de l'ampli opérationnel et H la fonction de transfert que l'on vient de calculer. Le gain de l'ampli opérationnel est $(-R2 / R)$, avec un signe – qui exprime le déphasage de 180 degrés.

$$\frac{\left(-\frac{R2}{R}\right)}{1 - \frac{5}{X^2}} \geq 1$$

$$-\frac{R2}{R * \left(1 - \frac{5}{X^2}\right)} \geq 1$$

$$\frac{R2}{29R} \geq 1 \text{ ou encore } \frac{R2}{R} \geq 29$$

Ce qui se lit : Il faut que le gain de l'amplificateur opérationnel soit supérieur ou égal à 29 pour que l'oscillateur fonctionne. En pratique, le gain doit être plus élevé !

Rédigé par LLC le 20.07.2024 - Edition N°01.