



démarrer en électronique

...en savoir plus sur les ampli-op

Eric Bogers (Elektor)

Dans l'épisode précédent, nous avons examiné les transistors à effet de champ discrets et nous avons abordé ce qui est probablement le composant le plus important de l'électronique analogique : l'amplificateur opérationnel (ampli-op). Le sujet est vaste, comme vous le verrez, et il existe de nombreuses formules en rapport avec les amplificateurs que nous pouvons utiliser (et que nous utiliserons !).

L'amplificateur opérationnel comme boîte noire

Un amateur d'électronique débutant souhaitant utiliser un ampli-op dans une application pratique s'intéresse peu à l'aspect intérieur du composant. En fait, il suffit de connaître quelques paramètres importants pour commencer à utiliser un ampli-op. Vous pouvez donc visualiser l'ampli-op comme une sorte de boîte noire avec des entrées et des sorties (**figure 1**).

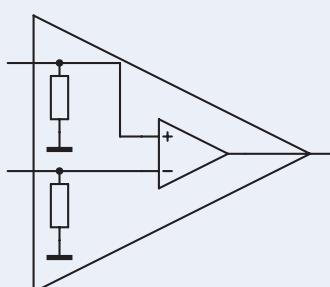
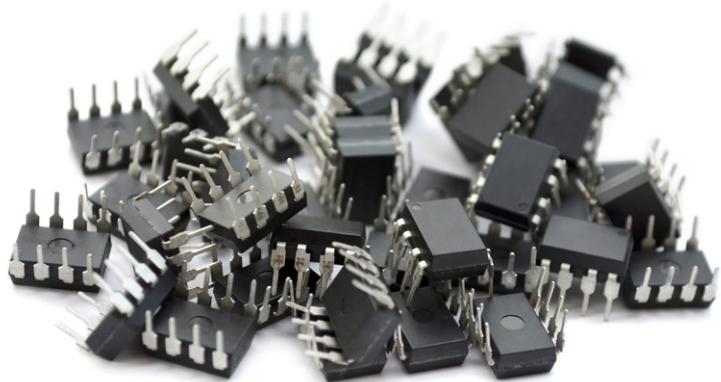


Figure 1. L'amplificateur opérationnel comme une boîte noire.



Le gain en boucle ouverte, qui se situe généralement entre 10 000 et 100 000, est le principal élément auquel vous devez prêter attention. Ce paramètre permet de calculer la tension de sortie grâce à la formule suivante, où U_{ni} est la tension sur l'entrée non inverseuse et U_i est la tension sur l'entrée inverseuse :

$$U_{out} = V_0 \cdot (U_{ni} - U_i)$$

Vous pourriez donc avoir l'impression que la valeur exacte du gain en boucle ouverte (c'est-à-dire le gain sans rétroaction négative) est d'une importance capitale. Or, ce n'est pas le cas, comme vous le verrez plus loin.

Pour les ampli-op constitués de transistors bipolaires, l'impédance d'entrée est de l'ordre de 1 MΩ. Si des transistors à effet de champ (FET) sont utilisés dans l'étage d'entrée de l'amplificateur, l'impédance d'entrée sera supérieure de plusieurs ordres de grandeur. La tension d'alimentation maximale est généralement comprise entre ± 16 V et ± 22 V, mais elle peut atteindre ± 150 V avec des ampli-op à haute tension. Le courant de sortie maximal est typiquement de l'ordre de 20 mA, bien que les ampli-op de puissance puissent supporter plusieurs ampères s'ils sont suffisamment refroidis. La fréquence de coupure sera discutée en détail plus loin.

Montages amplificateurs

Les deux montages amplificateurs, avec des ampli-op, couramment utilisés sont l'amplificateur inverseur et l'amplificateur non inverseur. Comme son nom l'indique, l'amplificateur inverseur inverse la polarité du signal d'entrée, alors que l'amplificateur non inverseur ne l'inverse pas.

Amplificateur inverseur

La **figure 2** montre le montage de base de l'amplificateur inverseur. Il ne nécessite que deux résistances externes. Pour les applications audio, on ajoute généralement une paire de condensateurs. Quel est le gain de ce circuit ? L'entrée non inverseuse est reliée à la masse, de sorte que le gain en boucle ouverte est le paramètre initial qui détermine le gain :

$$V_0 = -\frac{U_{\text{out}}}{U_V} \Rightarrow U_V = -\frac{U_{\text{out}}}{V_0}$$

L'équation suivante s'applique à la tension d'entrée :

$$U_{\text{in}} = U_{R1} + U_V = I_{R1} \cdot R_1 - \frac{U_{\text{out}}}{V_0}$$

Le gain est défini en divisant la tension de sortie par la tension d'entrée. Si vous utilisez le résultat obtenu ci-dessus dans cette formule, vous obtenez :

$$V = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{out}}}{I_{R1} \cdot R_1 - \frac{U_{\text{out}}}{V_0}}$$

La formule suivante s'applique aux courants d'entrée et de sortie du nœud en amont de l'entrée inverseuse :

$$I_{R1} = I_{R2} + I_{Ri} = I_{R2} + \frac{U_V}{R_i} = I_{R2} - \frac{U_{\text{out}}}{R_i \cdot V_0}$$

En utilisant cette valeur dans la formule de calcul du gain, on obtient :

$$V = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{out}}}{I_{R2} \cdot R_1 - \frac{U_{\text{out}} \cdot R_1}{R_i \cdot V_0} - \frac{U_{\text{out}}}{V_0}}$$

Le réseau comportant la résistance R_2 est régi par la formule suivante :

$$U_{\text{out}} = U_V - U_{R2} = -\frac{U_{\text{out}}}{V_0} - I_{R2} \cdot R_2$$

Pour calculer le courant I_{R2} :

$$I_{R2} = \frac{U_{\text{out}}}{V_0 \cdot R_2} - \frac{U_{\text{out}}}{R_2}$$

Enfin, si vous introduisez ce résultat dans la formule du gain et que vous annulez U_{out} partout où il apparaît, vous obtenez la formule exacte du gain de l'amplificateur inverseur :

$$V = \frac{1}{-\frac{R_1}{V_0 \cdot R_2} - \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_1}{R_i \cdot V_0} - \frac{1}{V_0}}$$

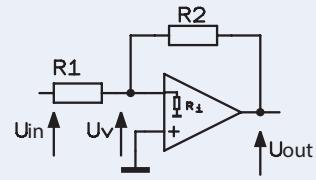


Figure 2. Amplificateur inverseur.

Les choses commencent à devenir intéressantes. Ici, vous pouvez raisonner comme suit : le gain en boucle ouverte est généralement beaucoup plus élevé que le rapport R_2/R_1 , tandis que l'impédance interne de l'amplificateur est également beaucoup plus élevée que les valeurs des résistances externes. En tenant compte de cela, vous pouvez obtenir une formule simplifiée permettant de calculer le gain de façon approximative :

$$V \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

Cette formule est très pratique pour calculer le gain de l'amplificateur opérationnel inverseur. Prenons un exemple de calcul pour voir la différence dans la pratique. En considérant un montage amplificateur avec $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ et $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ et en utilisant la formule simplifiée, nous obtiendrons un gain de -10. Selon la formule exacte dérivée précédemment (en supposant un gain en boucle ouverte de 100 000 et une impédance d'entrée de $1 \text{ M}\Omega$), nous obtenons un gain d'environ -9,99889 (si cela vous intéresse, vous pouvez faire le calcul vous-même). Cela signifie que la différence est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la tolérance des résistances de précision, et qu'elle peut donc être facilement ignorée. (Par ailleurs, nous avons totalement ignoré plusieurs autres facteurs, notamment l'impédance de sortie, la dérive en température, etc.)

Amplificateur non inverseur

La **figure 3** montre le schéma de base de l'amplificateur non inverseur. De même, dans cette version simplifiée, vous n'avez besoin que de deux résistances externes.

La formule suivante s'applique à la tension de sortie d'un ampli-op :

$$U_{\text{out}} = (U_{\text{in}} - U_V) \cdot V_0 \Rightarrow (U_{\text{in}} - U_V) = \frac{U_{\text{out}}}{V_0}$$

Le gain du circuit peut être défini comme suit :

$$V = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{out}}}{(U_{\text{in}} - U_V) + U_V}$$

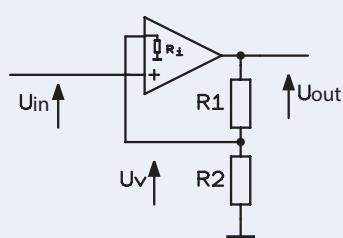


Figure 3. Amplificateur non inverseur.



En calculant la dérivée, nous comprendrons pourquoi nous avons inclus le terme U_V (apparemment dénué de sens), dans la formule ci-dessus. Si l'on inverse cette formule et que l'on utilise la tension de sortie de l'amplificateur, on obtient la formule suivante (notez que nous avons omis quelques étapes pour faciliter l'explication) :

$$\frac{1}{V} = \frac{U_{\text{out}}}{V_0 \cdot U_{\text{out}}} + \frac{U_V}{U_{\text{out}}} = \frac{1}{V_0} + \frac{U_V}{U_{\text{out}}}$$

Ici, R_1 et R_2 forment un diviseur de tension qui est chargé par la résistance R_i . Pour U_V , cela signifie

$$U_V = \frac{U_{\text{out}} \cdot (R_2 \parallel R_1)}{R_1 + (R_2 \parallel R_1)} = \frac{U_{\text{out}}}{R_1 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_i} \right) + 1}$$

Si vous introduisez cette valeur dans la formule (inversée) du gain, vous obtenez :

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_0} + \frac{1}{R_1 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_i} \right) + 1}$$

En inversant ce résultat, on obtient la formule exacte du gain :

$$V = \frac{\frac{1}{V_0} + \frac{1}{R_1 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_i} \right) + 1}}{1}$$

Dans ce cas également, il faut tenir compte que le gain en boucle ouverte est beaucoup plus élevé que le rapport R_2/R_1 , et qu'en outre la valeur de R_i est beaucoup plus élevée que celle de R_2 . Si vous appli-

quez ces considérations à la formule ci-dessus, vous arrivez finalement à la formule simplifiée du gain de l'ampli-op non inverseur :

$$V \approx \frac{R_1}{R_2} + 1$$

Il s'agit également d'une formule très pratique et réduite, et vous n'aurez souvent même pas besoin d'une calculatrice pour l'utiliser. Dans le prochain épisode, nous aborderons plus en détail la théorie des amplificateurs, puis nous nous pencherons enfin sur des montages amplificateurs pratiques. 

230756-04

Note de la redaction : la série d'articles « démarrer en électronique » est basée sur le livre « Basiskurs Elektronik » de Michael Ebner, publié par Elektor.

Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

Produits

► Livre « *Basic Electronics for Beginners* », B. Kainka (Elektor, 2020)

Version papier : www.elektor.fr/19212

Version numérique : www.elektor.fr/19213

Venez rencontrer les experts d'Elektor à **embeddedworld 2024**

Exhibition & Conference

Discutez avec nos rédacteurs, nos experts en relation client et nos responsables marketing. Étudiants, venez pour échanger avec nous. Des cadeaux vous attendent.

Rendez-vous visite, montrez-nous cet article et vous aurez une belle surprise !



elektor
design > share > earn