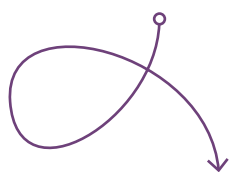


des potentiomètres logarithmiques

qui sont exponentiels !



Joseph Kreutz (Allemagne)

Idéalement, lorsque vous actionnez le potentiomètre de volume d'un amplificateur ou d'une table de mixage, vous souhaitez qu'une proportionnalité soit établie entre la course ou l'angle de rotation effectif de l'organe de commande et la sensation de niveau sonore que vous ressentez. Un résultat proche de cet idéal est obtenu grâce aux potentiomètres appelés logarithmiques, mais qui sont en réalité exponentiels. Examinons cela de plus près.

La nature nous a conçus pour pouvoir être sensibles à des stimuli dont l'amplitude varie de 1 à 1.000.000 et plus, donc 120 dB ou davantage, pour les signaux acoustiques. La loi dite de Weber-Fechner spécifie

$$\text{Sensation} = k \cdot \log(\text{stimulation physique})$$

Ici, sensation est l'impression que nous percevons et la stimulation physique la pression acoustique au niveau de nos oreilles [1]. Le facteur k est spécifique à chacun de nous, car nos caractéristiques auditives nous sont autant personnelles que notre couleur de cheveux ou celle de nos yeux. La sensibilité auditive dépend de la fréquence, de l'amplitude effective du stimulus audio et de l'âge, parce que notre audition se dégrade à mesure que nous vieillissons.

Il a été mesuré que le seuil d'audition de l'oreille humaine se situe à une pression acoustique de l'ordre de 20 μPa , qui a été fixée comme valeur

0 dB de l'échelle des pressions acoustiques exprimées en décibels. Il est aussi utile d'ajouter que si le niveau acoustique s'approche de 130 dB, un seuil de douleur est atteint. Une exposition régulière à des niveaux dépassant 100 dB peut entraîner des dommages auditifs permanents.

Le potentiomètre de volume idéal

Pour que la sensation soit autant que possible proportionnelle à la position – rotation ou translation – de l'organe de commande d'un potentiomètre, il faut que la loi respectée par le potentiomètre soit complémentaire d'une fonction logarithmique. C'est une fonction exponentielle qui remplira au mieux cette condition. On peut définir un paramètre pour représenter la position d'un potentiomètre :

$$\alpha = \frac{\text{Rotation effective}}{\text{Rotation maximum}} = \frac{\text{Translation effective}}{\text{Translation maximum}} \quad (1)$$

Comme ce réglage a un minimum en principe nul et un maximum, il en découle que $0 \leq \alpha \leq 1$. Le potentiomètre idéal devrait alors avoir une caractéristique répondant à

$$S = S_{\text{ref}} \cdot 10^{\alpha \cdot F_p} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{5\alpha}$$

Les potentiomètres de la vie réelle

La construction du potentiomètre idéal, donc exactement exponentiel, serait probablement possible, mais se heurterait à des difficultés techniques considérables qui le rendraient fort onéreux. Les fabricants ont contourné cette difficulté en constituant sa piste de deux ou trois sections de résistivité différentes, pour créer autant de segments de droite qui approximent raisonnablement la fonction exponentielle. Ce compromis s'avère parfaitement satisfaisant pour les applications courantes.

Potentiomètre linéaire chargé par une résistance

Une autre possibilité d'approximer une réponse exponentielle est de charger un potentiomètre linéaire par une résistance installée entre son curseur et son point froid comme l'illustre le schéma de la **figure 1**. La réponse obtenue est caractérisée par la fonction suivante :

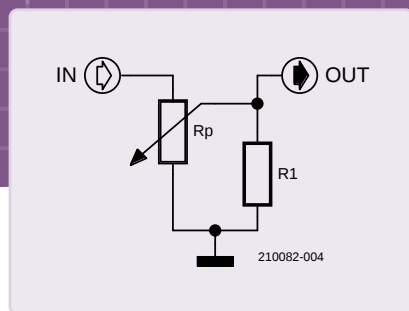


Figure 1. En ajoutant une résistance à un potentiomètre linéaire comme montré ici, il est possible d'approximer une réponse exponentielle.

$$V_{OUT} / V_{IN} = \alpha \cdot \gamma / (\alpha \cdot (1 - \alpha) + \gamma) \quad (II)$$

Ici, α représente la rotation ou la translation de l'élément de commande comme défini par (II), et γ la proportion existant entre la résistance de charge R1 et la résistance totale du potentiomètre Rp. Par exemple, si Rp = 1 MΩ et R1 = 39 kΩ, alors $\gamma = R1 / Rp = 0,039$.

Les courbes de la **figure 2** représentent en vert la loi exponentielle idéale, et en rouge la loi de variation obtenue avec un paramètre γ valant 0,039. Ce choix de γ et des valeurs de résistance correspondantes donne l'un des résultats les plus proches d'une fonction exponentielle. Il existe un écart entre la courbe idéale et cette approximation, qui se manifeste en particulier aux faibles niveaux, et que l'atténuation présente un « saut » petit, mais abrupt à l'origine du diagramme. C'est pourquoi un tel assemblage n'est pas recommandé pour un contrôle de volume d'équipements Hi-Fi [2].

Tenant compte des paramètres définis par les équations I et II, la résistance de charge $R_L(\alpha)$ vue par l'étage qui précède l'assemblage R1 et potentiomètre sera

$$R_L(\alpha) = R_p \times \alpha \times (1 - \alpha) + \gamma / (\alpha + \gamma)$$

Les valeurs sont respectivement égales à Rp pour $\alpha = 0$ et Rp//R1 pour $\alpha = 1$. Cette équation présuppose que l'impédance de l'étage qui suit le contrôle de volume soit suffisamment élevée pour n'avoir qu'un effet négligeable. L'étage qui précède un tel contrôle de volume doit être capable d'alimenter contrôle de volume.

A noter également que la valeur de la résistance totale Rp d'un potentiomètre est généralement définie avec une tolérance de $\pm 20\%$, qui en fait l'un des composants à la précision des plus exécrables.

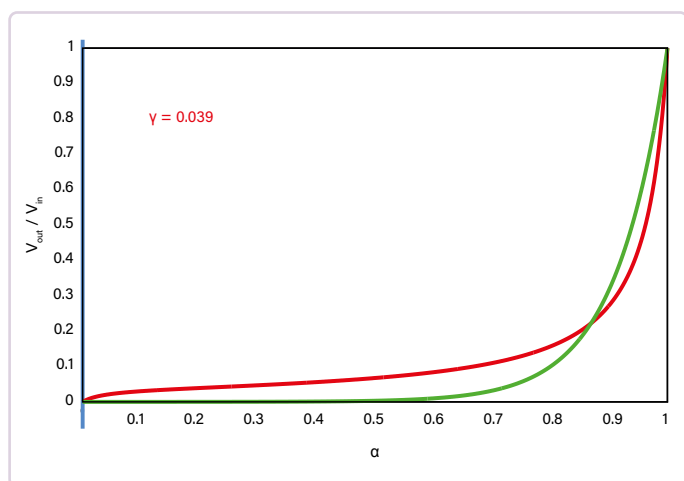


Figure 2. La courbe exponentielle idéale en vert, et en rouge la loi de variation obtenue avec un paramètre γ de 0,039. Ce choix de γ donne l'un des résultats les plus proches d'une fonction exponentielle.

Bruit thermique

Une résistance idéale produit une tension de bruit thermique égale à

$$e_n = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B} \quad (III)$$

avec $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (la constante de Boltzmann), T la température en kelvin (ici 298,15°K soit 25°C), R la valeur de résistance en ohm et B la largeur de la bande de fréquences (ici 20 kHz) dans laquelle la mesure est effectuée.

La résistance série introduite par un potentiomètre dans le circuit de la figure 1 vaudra au maximum le quart de sa valeur totale ($\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot R_p$ avec $\alpha = 0,5$), soit 250 kΩ si Rp = 1 MΩ, et la tension de bruit correspondante s'élèvera donc à

$$e_n = \sqrt{4 \cdot 1,8 \cdot 10^{-23} \cdot 298,15 \cdot 250.000 \cdot 2 \cdot 10^4} \approx 9,07 \mu V$$

La tension de bruit maximum sera atténuée par le diviseur constitué de la résistance série imputable au potentiomètre et de R1 (39 kΩ). Sa contribution se réduira de ce fait à 1,22 μV.

Le bruit généré par la résistance de 39 kΩ doit aussi être considéré. Il s'élève à 3,58 μV pour une température de 25°C et une bande passante de 20 kHz. Sa contribution au bruit total est de 3,1 μV. Ainsi, la tension de bruit thermique maximal est

$$e_{n,max} = 3,1 \cdot 10^{-6} + 1,22 \cdot 10^{-6} = 4,32 \mu V$$

Ceci représente une amélioration de 6,4 dB par rapport au potentiomètre seul.

Dans de nombreux produits commerciaux, la piste du potentiomètre est en carbone, ce qui produit un bruit supérieur à celui calculé avec l'équation III. Certains fabricants proposent des potentiomètres à piste plastique ou « cermet », une combinaison d'un métal et d'une céramique. Ils sont moins sensibles à l'usure et présentent généralement une tension de bruit inférieure que ceux en carbone. Il va de soi qu'il conviendra de choisir pour R1 un composant à faible bruit, à film métallique par exemple.

Une conclusion générale et évidente de ce qui précède reste qu'en électronique, lorsqu'il importe d'éviter le bruit thermique, les circuits doivent inclure des résistances de valeur la plus faible possible.

Comparaison des solutions

La difficulté de construire un potentiomètre de caractéristique exponentielle a été contournée par les deux méthodes exposées. Laquelle des deux est la meilleure ?

S'il s'agit d'un contrôle de volume pour un équipement domestique, l'approximation par segments de droite proposée par les fabricants qui offrent des potentiomètres dits « logarithmiques » reste une solution parfaitement acceptable, car aux faibles niveaux l'atténuation reste raisonnablement proche d'une exponentielle idéale et tend

progressivement vers une valeur effectivement nulle : consultez pour cela les courbes publiées par les fabricants.

Pour un contrôle de volume destiné à une table de mixage ou en entrée d'un amplificateur, un potentiomètre linéaire chargé par une résistance donnera toute satisfaction, même si le contrôle aux bas niveaux présente des anomalies. L'association d'une résistance avec un potentiomètre linéaire permet aussi une substantielle réduction du niveau de bruit thermique, avantage non négligeable dans nombre d'applications. Pensez ici aux matériels professionnels. ◀

210082-04



Produits

- > **D. Self, *Small Signal Audio Design (2nd Edition)***
www.elektor.fr/18046
- > **Elektor Fortissimo-100 Kit amplificateur de puissance**
www.elektor.fr/20273

LIENS

[1] Courbe isosonique : https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_isosonique

[2] D. Self, « *Small Signal Audio Design (2nd Edition)* », Routledge, 2014 : <https://www.elektor.fr/18046>

elektor e-zine

Your dose of electronics



Chaque semaine où vous n'êtes pas abonné à l'e-zine d'Elektor est une semaine de grands articles et de projets électroniques qui vous manquent !

Alors, pourquoi attendre plus longtemps ? Abonnez-vous dès aujourd'hui à www.elektor.fr/ezine et recevez également le livre gratuit du projet Raspberry Pi !



elektor
design > share > earn