

logiciel de calcul de filtres

Outils de conception de filtres analogiques

Alfred Rosenkränzer (Allemagne)

Si vous connaissez (ou du moins si vous savez où trouver) les formules de conception des filtres analogiques, vous êtes en mesure d'effectuer les calculs à la main. Aujourd'hui, cette approche semble quelque peu désuète si l'on veut aller au-delà des types les plus simples de filtres à réseau RC. Il existe désormais des logiciels de CAO adéquats et les fabricants de circuits intégrés en mettent même gratuitement à disposition. Cet article s'intéresse principalement à un logiciel créé par Texas Instruments.

Dans l'article *Conception de filtres analogiques (partie 2)* paru dans Elektor (11-12/2020) [1], nous avons abordé la structure de filtres actifs. Nous y avons parlé de l'existence de logiciels spécialisés qui allègent notablement l'effort de conception de telles configurations. Il n'est plus autant nécessaire d'avoir une compréhension détaillée des modèles mathématiques pour atteindre son but, mais les lecteurs intéressés par les formules peuvent les trouver sans peine dans la littérature, par ex. chez Tietze/Schenk [2].

Comme logiciel type de conception de filtre sur PC, nous avons choisi le programme *FilterPro* et son successeur en ligne *Filter Design Tool*.

FilterPro

Depuis quelque temps, Texas Instruments ne développe plus le programme *FilterPro* activement, mais il reste néanmoins un outil très utile. La version pour Windows la plus récente est téléchargeable ici [3]. Après avoir installé et lancé le programme, l'écran illustré

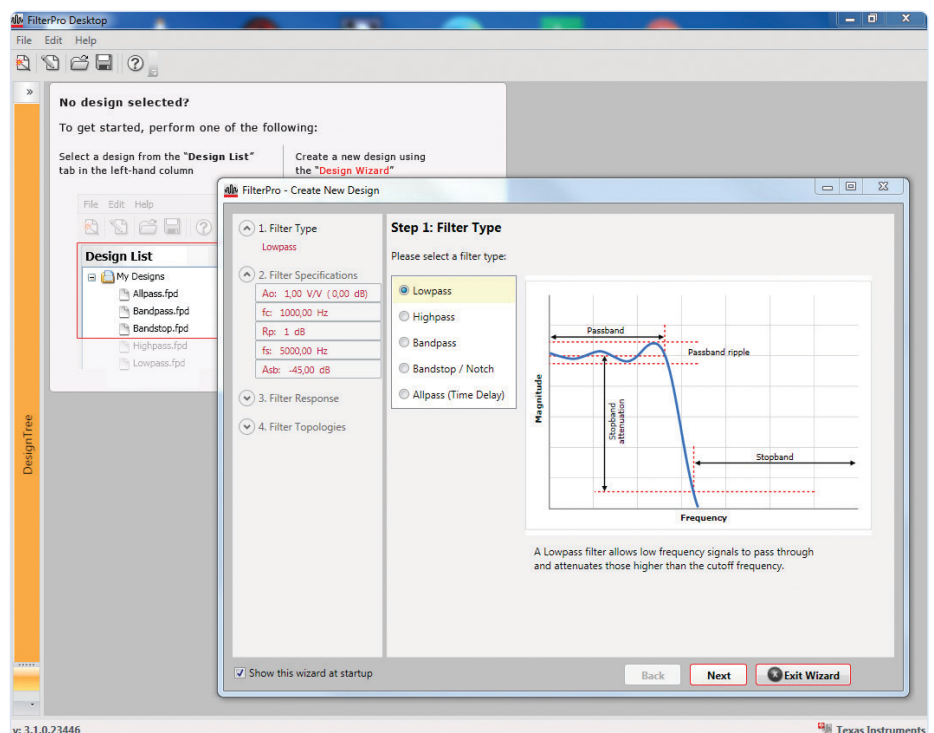


Figure 1. Menu de démarrage de FilterPro Desktop avec l'assistant de filtre.

à la **figure 1** se présente à l'utilisateur. Dans cette fenêtre, nous voyons l'assistant de filtre. S'il n'apparaît pas automatiquement, on peut le lancer avec la *baguette magique* (en haut à gauche). L'assistant vous guide pas à pas dans les étapes de conception. Dans la 1^{ère},

vous choisissez le type de filtre (*passe-bas, passe-haut, etc.*). La partie droite de l'illustration montre les paramètres qui doivent être saisis à l'étape suivante : bande passante, ondulation dans la bande passante, bande rejetée, etc.

Dans la 2^e étape, vous entrez les caractéristiques du filtre : voir la **figure 2**. Le 1^{er} paramètre est le gain. Bien qu'un gain >1 soit souvent souhaitable, mieux vaut commencer avec un gain unitaire, c.-à-d. de 1.

Quand on spécifie la fréquence de coupure du filtre, il convient de se rappeler que les structures d'approximation des filtres (par ex. *Bessel* et *Butterworth*) la définissent comme la fréquence à laquelle l'amplitude de la réponse chute de 3 dB. Pour les filtres de *Chebyshev*, en revanche, c'est la fréquence à laquelle l'ondulation de l'amplitude tombe sous un seuil donné. Ensuite, on entre l'ondulation autorisée dans la bande passante. Pour les filtres qui ne donnent pas d'ondulation, par ex., Bessel et Butterworth, la valeur par défaut convient. Il existe deux façons de spécifier l'ordre du filtre. Vous pouvez soit cocher la case *Set Fixed*, puis saisir l'ordre souhaité dans la case située immédiatement à sa droite (voir fig. 2), soit ne pas cocher la case *Set Fixed* et spécifier l'atténuation requise par l'application à une fréquence donnée. Le programme choisira alors automatiquement un ordre approprié. C'est un bon moyen de comparer la complexité des solutions offrant différents types d'approximation.

Dans la 3^e étape, vous choisissez le *type de réponse*, c'est-à-dire le type d'approximation du filtre (voir **fig. 3**). Le graphique montre les courbes d'amplitude, de phase et de délai de groupe en fonction de la fréquence. La molette de défilement sert à zoomer sur une zone, et cliquer-glisser permet de faire défiler le graphique. Un clic droit permet de revenir à l'affichage complet d'origine. Notez que l'axe des fréquences est logarithmique.

La 4^e et dernière étape consiste à choisir la topologie (**fig. 4**). Ici, vous avez le choix entre *rétroaction multiple* pour les amplificateurs asymétriques, *Sallen-Key* (également asymétrique) et *rétroaction multiple (entièrement différentielle)*. Ces termes sont expliqués en détail dans [1].

Quand vous cliquez sur *Finish*, le circuit s'affiche avec les valeurs des composants, un tableau des caractéristiques du filtre et deux graphiques montrant les courbes d'amplitude, de phase et de délai de groupe du filtre (**fig. 5**). Zoom et défilement sont aussi actifs sur ces graphiques.

Un résultat important, placé au milieu du tableau, est la valeur *Min GBW reqd.* Il s'agit du produit *gain × bande passante* minimal de l'amplificateur pour que le circuit de filtrage se comporte comme souhaité ; pour le dispositif utilisé, plus ce produit est faible, moins le circuit sera performant.

Le facteur de qualité *QualityFactor (Q)* est également expliqué dans [1].

Application pratique

Contrairement à leurs homologues passifs, les filtres actifs ont deux degrés de liberté pour le choix des valeurs des composants. Par ex., cliquez sur la valeur de C1 et réduisez-la d'un facteur 10 en la faisant passer de 10 à 1 nF et C2 changera proportionnellement. Les deux résistances augmentent également d'un facteur 10. La réponse du filtre est identique pour

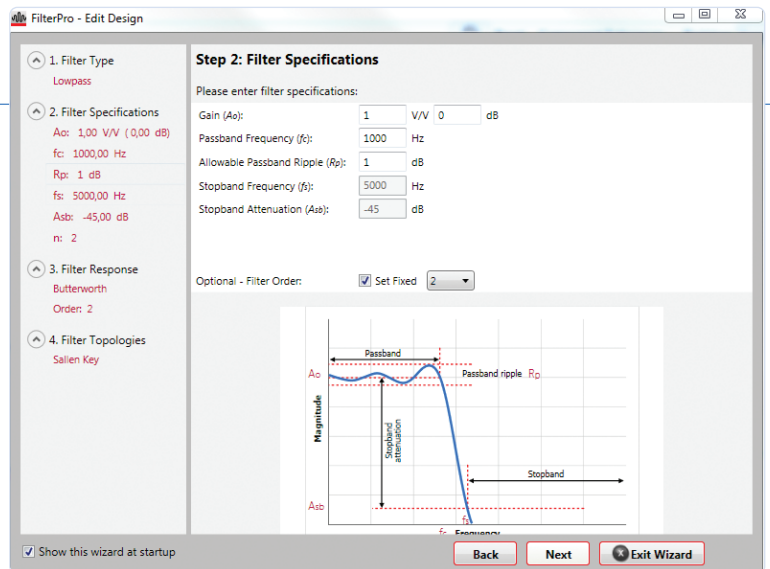


Figure 2. Saisie des caractéristiques du filtre.

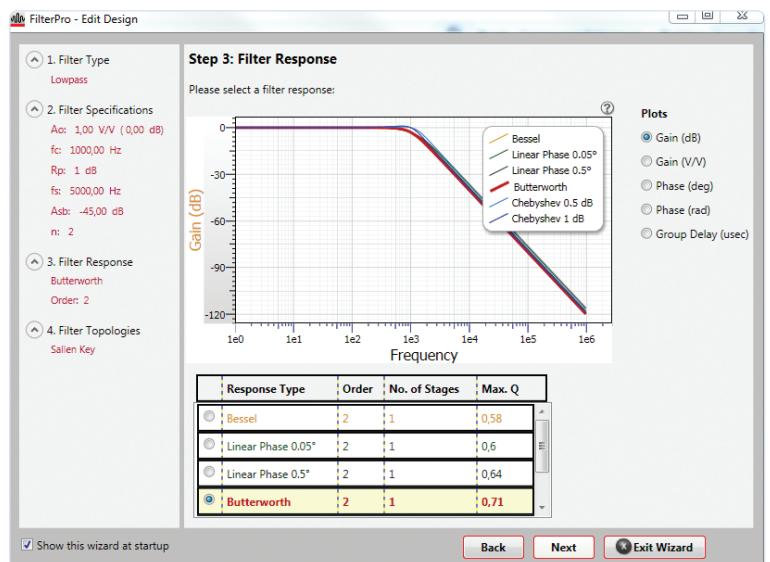


Figure 3. Réponse du filtre et ses approximations.

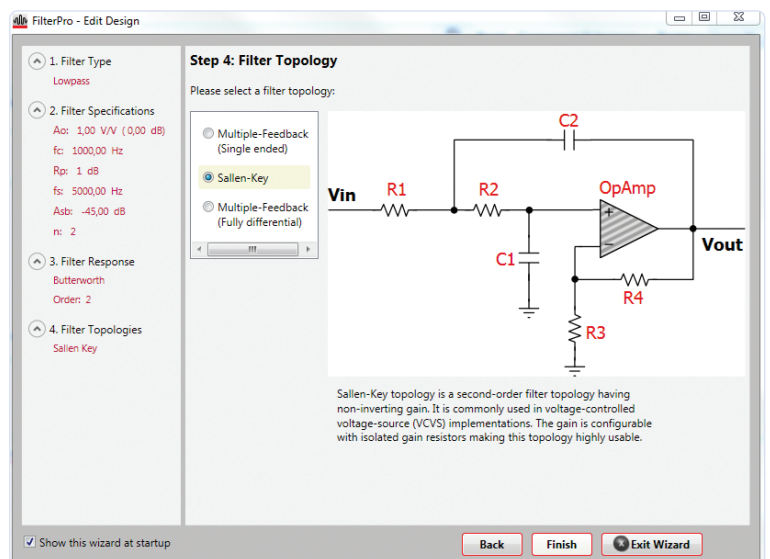


Figure 4. Choix d'une topologie de filtre.

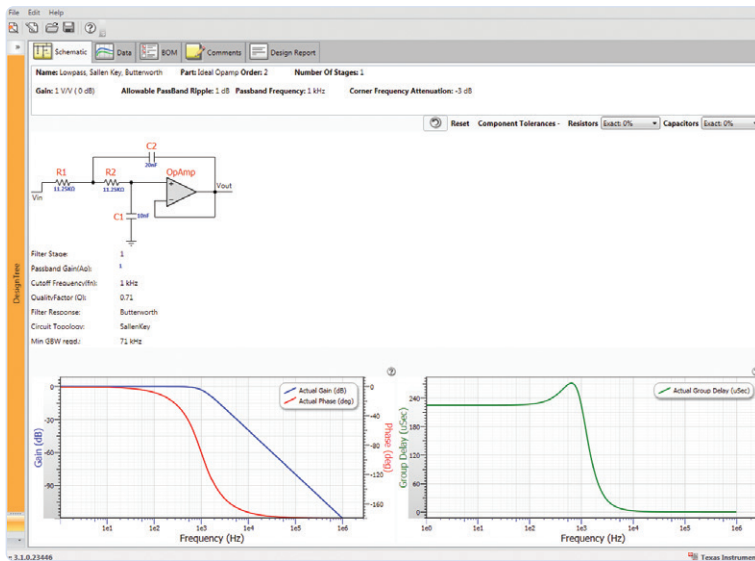


Figure 5. Le résultat : le schéma du circuit et les graphes du comportement du filtre.

les deux ensembles de valeurs, mais d'autres propriétés telles que le bruit et la distorsion peuvent être différentes.

En audio, il est typique de choisir des résistances comprises entre 1 kΩ et 10 kΩ : cela donne un bon compromis entre le bruit (qui diminue avec la valeur des résistances) et la distorsion (qui augmente avec le courant, donc quand les résistances diminuent). En pratique, mieux vaut d'abord expérimenter avec les condensateurs, car ceux-ci ne sont disponibles que dans une gamme de valeurs relativement limitée (séries E3 à E12) par rapport aux résistances (séries E12 à E96). Pour comprendre le 2^e degré de liberté, que cela nous plaise ou non, il va falloir mettre les mains dans le cambouis, c.-à-d. s'attaquer aux formules. La valeur de C1 peut être choisie librement, mais il existe un rapport C2/C1 minimal qui dépend du type d'approximation, de l'ordre et du gain choisis. Pour ce minimum et un gain unitaire, les deux résistances seront égales. Le programme *FilterPro Desktop* affiche ce rapport minimal, pour des valeurs exactes de condensateurs.

Si les condensateurs sont choisis dans une série E particulière, le programme choisit les valeurs les plus proches de l'optimum, et le rapport entre C2 et C1 augmente. Cela entraîne alors une modification des valeurs des résistances : elles ne seront plus égales. Dans l'exemple ci-dessus, les valeurs

respectives choisies pour C1 et C2 sont exactement de 10 et 20 nF : un rapport de 1/2. Les deux résistances ont la même valeur, à savoir 11,25 kΩ. S'il faut utiliser des condensateurs de la série E12, nous pouvons laisser C1 à 10 nF mais C2 doit être augmenté à 22 nF ; en conséquence, R1 vaut maintenant 7,68 kΩ et R2 14,65 kΩ.

L'outil en ligne actuellement disponible (nous y reviendrons plus loin) se comporte de la même manière. Malheureusement, le rapport ne peut être spécifié directement ; en revanche, en haut à droite de la fenêtre illustrée à la figure 5, on peut indiquer séparément pour les résistances et les condensateurs si on préfère utiliser des valeurs exactes ou des valeurs d'une série E particulière. Lorsque le choix est limité à une valeur de la série E, les graphes montrent les courbes de réponse à la fois pour les valeurs spécifiées de la série E et pour les valeurs idéales. Cela éclaire votre décision quant à l'écart acceptable par rapport aux performances idéales.

Dans l'exemple ci-dessus, une astuce permet toutefois de simplifier les choses. Si les deux résistances ont la même valeur, alors C2 doit être exactement le double de C1 : d'ailleurs, cette variante spécifique est décrite dans Tietze/Schenk. Pour avoir une bonne précision, choisissez pour C1 un condensateur facilement disponible avec boîtier et tolérance appropriés, et pour C2, mettez-en

deux (identiques à C1) en parallèle. Si les trois condensateurs sortent du même lot, leurs valeurs devraient être très proches. Tout écart par rapport aux valeurs nominales peut être corrigé en ajustant les valeurs des résistances : entrez la capacité mesurée de C1 dans la fenêtre illustrée à la figure 5 et les valeurs des résistances ajustées (ou les valeurs disponibles les plus proches dans la série E spécifiée) s'afficheront.

Pour construire un circuit de *crossover* précis, il est également judicieux d'utiliser les mêmes condensateurs dans les réseaux passe-haut et passe-bas. Cela permet d'assurer une transition optimale entre les caractéristiques passe-bas et passe-haut. Il reste toujours possible de synthétiser des valeurs de capacité et de résistance plus précises en combinant deux ou plusieurs composants individuels.

Caractéristiques spéciales

Avant de modifier la configuration du filtre, vous pouvez en enregistrer les résultats. Cliquez sur l'onglet *Data* en haut de la fenêtre, vous verrez la réponse en fréquence présentée sous forme de tableau ; l'option *Export to Excel* permet un post-traitement des données – par ex. pour comparer les résultats avec un prototype ou à des fins de documentation. L'onglet *BOM* produit la liste de composants. L'onglet *Comments* permet d'ajouter vos notes et l'onglet *Design Report* crée pour



PRODUITS

- **SDS1104 - oscilloscope à quatre canaux de OWON (100 MHz)**
www.elektor.fr/19514
- **XDM1041 - multimètre numérique (55 000 points) de OWON**
www.elektor.fr/19715
- **AG051 - générateur de formes d'onde arbitraires (5 MHz) de OWON**
www.elektor.fr/18874

vous la documentation (le tableau de réponse en fréquence n'y figure pas).

Avant de le construire pour de bon, il est intéressant de simuler le filtre. La simulation de Monte Carlo s'avère très utile pour analyser les effets des tolérances des composants. Vous pouvez simuler de nombreuses variations d'un filtre donné et comparer aussitôt leurs performances respectives.

Les filtres multiétages sont construits à partir d'étages individuels de 1^{er} et 2^e ordre. La mise en cascade de deux filtres Butterworth de 2^e ordre identiques ne produit pas un filtre Butterworth de 4^e ordre, mais un filtre dit de *Linkwitz-Riley* (ou *Butterworth au carré*) de 4^e ordre.

On peut expérimenter pour déterminer le *facteur de qualité* (Q) que l'on peut attendre du filtre ainsi que le produit *gain × bande passante* requis pour l'AOP.

Il est possible d'inclure dans les spécifications un gain de filtre supérieur à l'unité. Si c'est un filtre multiétage, le gain est réparti de manière égale entre les étages. Il est possible d'observer le changement de valeur des composants quand le gain souhaité augmente et d'éviter de trop grands écarts de valeur des composants. Au besoin, il est possible de réaliser un gain supplémentaire dans un étage séparé ; c'est avantageux, car s'il faut ensuite modifier le gain, les valeurs des autres composants restent les mêmes.

Autre remarque : Texas Instruments ne maintient plus la version *desktop* du logiciel, et en effet, elle n'est plus disponible sur les serveurs de la société. Cependant, une recherche rapide de « FilterPro desktop » conduit rapidement à des téléchargements, par ex. [3]. Le programme fonctionne sous Windows 7 et 10, et, de manière

assez étonnante, il est même stable sous Windows 11. Au démarrage, le programme semble parfois faire une pause d'une minute environ ; mais ensuite, tout fonctionne sans problème. Le manuel complet est disponible à l'adresse [4].

Outils en ligne

La dernière version du logiciel de filtre de Texas Instruments s'appelle *Filter Design Tool* [5]. Une fois enregistré, vous pouvez commencer à concevoir un filtre. Il n'y a pas de version « Pro » et donc pas de restrictions artificielles d'utilisation. L'interface est un peu plus moderne que celle du programme PC, mais le fonctionnement est globalement le même.

Par rapport à la version précédente, on peut, par ex., afficher la réponse du filtre à un échelon. Et si, au lieu des valeurs idéales, vous cochez les valeurs en série E, vous pouvez aussi spécifier séparément les tolérances pour les résistances et les condensateurs.

Ensuite, le tracé des courbes d'amplitude, phase et délai de groupe en fonction de la fréquence ainsi que de la courbe de réponse, fait apparaître une bande de tolérance autour de la courbe idéale. Cela évite de faire une simulation de Monte Carlo ultérieure (bien que je recommande de le faire quand même pour être sûr).

La version PC peut calculer des filtres à réjection de bande basés sur la topologie Sallen-Key (qui n'est pas idéale : voir l'article [1]) et sur des topologies à rétroaction multiple, mais la version en ligne ne propose que la topologie Bainter [6]. Des outils de CAO plus spécialisés existent sur l'internet pour aider à concevoir des filtres à topologie de Fliege [7] et des filtres à réjection de bande à état variable.

La manipulation des valeurs des composants est le point faible de l'outil en ligne. C'est plus facile avec la version PC. *Filter Design Tool* semble au moins prendre en charge le calcul du ratio de condensateurs minimal réalisable. Enfin, une remarque sur l'outil de CAO de filtres en ligne d'Analog Devices [8] : il semble insister sur un ratio de condensateurs fixe de 1/1 ou de 1/10. Le plus grand de ces rapports tend à conduire à une grande dispersion des valeurs, ce qui ne me paraît pas idéal. ◀

210041-04

Contributeurs

Auteur : Alfred Rosenkränzer

Rédaction : Thomas Scherer

Traduction : Yves Georges

Mise en page : Giel Dols

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur

(alfred_rosenkraenzer@gmx.de) ou

contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

LIENS

[1] « Conception de filtres analogiques (2) », A. Rosenkränzer, Elektor, 11-12/2020 : www.elektormagazine.fr/200452-03

[2] « Electronic Circuits: Handbook for Design and Application », U. Tietze, C. Schenk et E. Gamm, Springer : <http://tietze-schenk.com/tsbook.htm>

[3] Télécharger FilterPro Desktop V.3.1.0.23446 : www.softpedia.com/get/Science-CAD/FilterPro-Desktop.shtml

[4] Guide de l'utilisateur de FilterPro (en anglais) : www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf

[5] Outil de conception de filtres en ligne : <https://webench.ti.com/filter-design-tool/topology>

[6] « Bandstop Filters and the Bainter Topology », B. C. Baker, Analog Applications Journal : www.ti.com/lit/an/slyt613/slyt613.pdf

[7] Filtre à topologie de Fliege : <http://earmark.net/gesr/opamp/notch.htm>

[8] Assistant de filtre analogique (en ligne) : <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>