

conception de filtres analogiques (3)

Filtres passifs

Alfred Rosenkränzer

Le troisième et dernier volet de cette série traite de quelques subtilités des filtres passifs. Comme seuls des composants purement passifs tels que des résistances, des bobines et des condensateurs sont utilisés ici, il n'est pas question d'amplification. Il est donc impossible d'obtenir une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible. Cependant, les hautes fréquences dans la gamme des MHz, à trois chiffres et au-delà, ne posent pas de problème.

Avec des filtres actifs, l'impédance d'entrée peut être très élevée grâce à un tampon, tandis qu'un tampon de sortie peut abaisser fortement l'impédance de sortie. On n'a donc pas à se préoccuper de

la terminaison correcte ni de l'adaptation adéquate des impédances à l'entrée et à la sortie. Cependant, à des fréquences très hautes, les filtres passifs sont encore courants. Ces filtres sont conçus pour

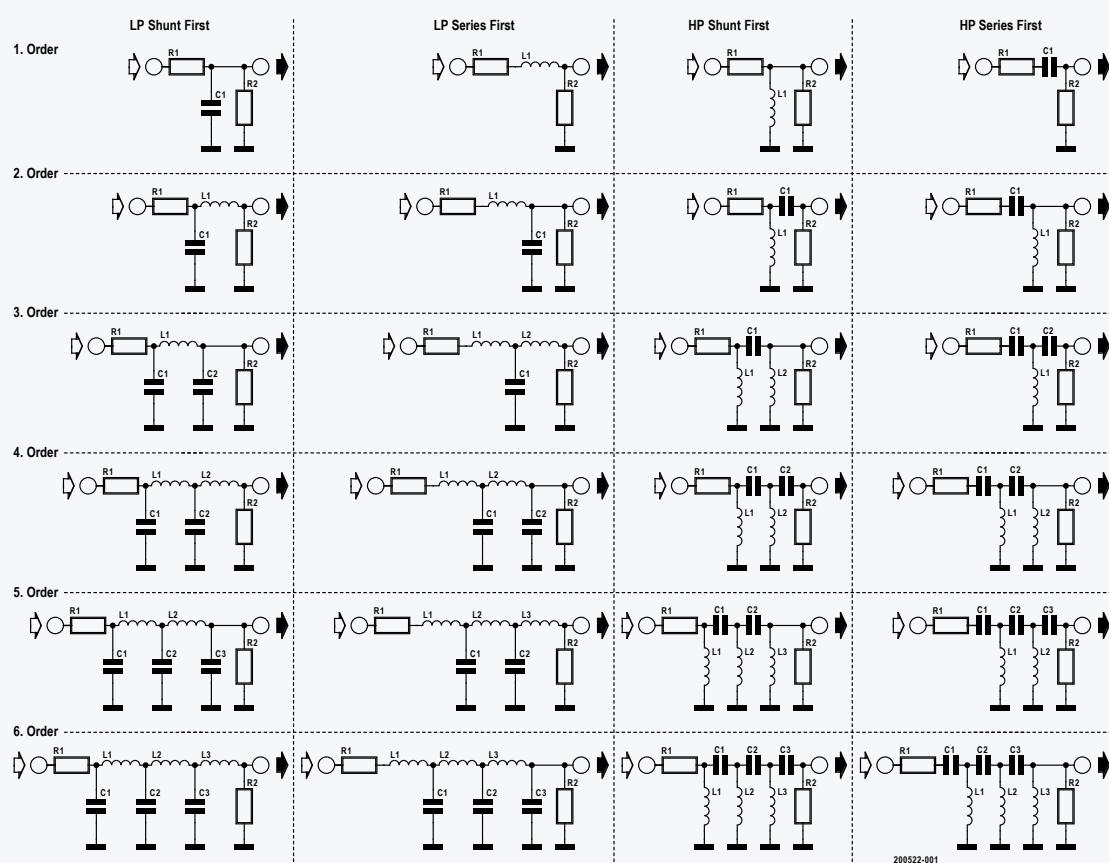


Figure 1. Circuits de base de filtres passe-bas et passe-haut passifs du 1^{er} au 6^e ordre en PI et T. La fréquence de coupure, mais aussi les caractéristiques du filtre dépendent des valeurs des composants. Ces modèles conviennent aux filtres de Bessel, Butterworth ou Tchebychev.

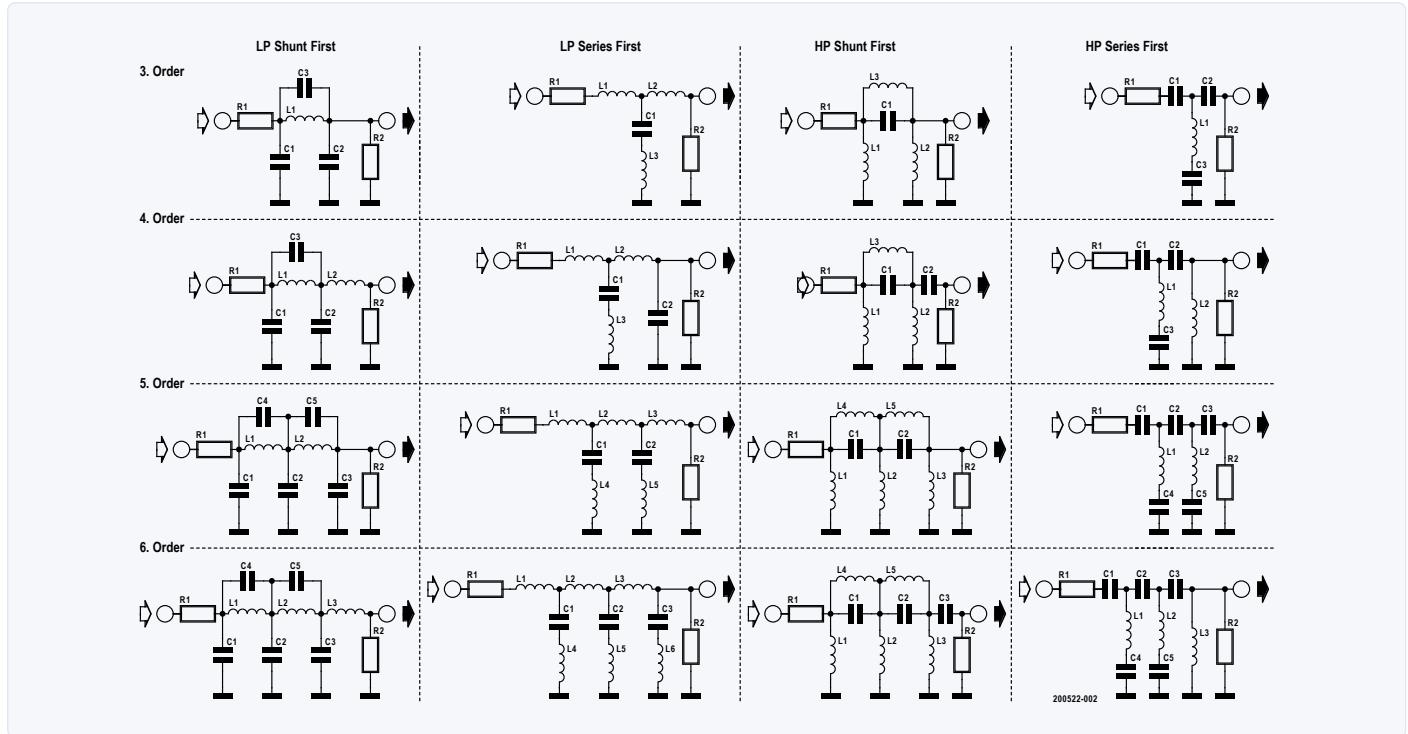


Figure 2. Circuits de base de filtres passe-bas et passe-haut du 3^e au 6^e ordre en PI et T avec caractéristiques de Cauer ou de Tchebychev inverse.

une impédance d'entrée et de sortie spécifique (pas nécessairement la même). Un écart par rapport à l'impédance de source et de terminaison supposée peut donc affecter de manière significative les caractéristiques du filtre. La section suivante décrit les types de filtres passifs couramment utilisés et ce qu'il faut en retenir.

Structurons

La **figure 1** montre les structures de base des passe-bas et haut du 1^{er} au 6^e ordre. Si les composants sont bien dimensionnés, ces structures permettent de réaliser des filtres qui présentent les caractéristiques de Bessel, Butterworth ou Tchebychev. Vous pouvez choisir si un filtre commence par un composant en série (structure en T) ou par un composant relié à la masse (structure en PI).

La colonne de gauche de la figure 1 montre les filtres passe-bas PI, qui commencent tous par un condensateur à la masse. À droite, on trouve des filtres passe-bas en T, qui commencent donc par une bobine «en série».

Pour les passe-haut, c'est l'inverse : dans la troisième colonne se trouvent les passe-haut PI avec une bobine à la terre et dans la colonne de droite, les passe-haut T avec un condensateur en série. Pour obtenir les ordres supérieurs, on ajoute à tour de rôle les composants longitudinaux (en série) ou transversaux (reliés à la masse). Cependant, les valeurs des autres composants changent. Le choix de la structure T ou PI n'a aucune importance pour la fonction. Comme les bobines ne sont pas très populaires auprès de nombreux électroniciens, on essaie souvent de s'en sortir avec le moins de selfs possible.

La **figure 2** montre les structures de base des filtres de Cauer (elliptique) et de Tchebychev inverse (dit de type 2). Les bobines ou les condensateurs sont remplacés par des circuits résonnantes paral-

lèles ou en série. On y voit des passe-bas et passe-haut en PI et en T du 3^e au 6^e ordre.

La **figure 3** montre les structures de base des passe-bande et des coupe-bande avec des caractéristiques de Bessel, Butterworth ou Tchebychev (du 3^e au 7^e ordre), et la **figure 4** montre des structures plus complexes correspondantes avec des caractéristiques de Cauer et de Tchebychev inverse (5^e et 7^e ordre). Ici aussi, il existe des variantes PI et T.

Dimensionnons

Un filtre de Bessel ou de Butterworth est entièrement défini par l'approximation du filtre, la fréquence de coupure de -3 dB, la structure choisie, l'ordre et l'impédance d'entrée et de sortie. Contrairement aux filtres actifs, il n'y a sur les filtres passifs aucune liberté pour modifier les valeurs des composants. Par exemple, si vous voulez utiliser une self d'une valeur standard de la série E, vous devez légèrement modifier la fréquence de coupure du filtre à une impédance donnée. Bien entendu, cela ne peut se faire que si l'application le permet.

La première partie de cette série [1] a montré comment les propriétés d'un filtre de Butterworth changent en choisissant des ordres différents. Il est intéressant d'observer à présent comment les valeurs des composants changent si on fait varier la fréquence de coupure. La **figure 5** montre le circuit entièrement dimensionné d'un filtre passe-bas Butterworth de 5^e ordre en structure PI avec une fréquence de coupure de 1 MHz. Si vous voulez doubler la fréquence de coupure à 2 MHz, il vous suffit de réduire de moitié les valeurs des selfs et des condensateurs. Ce n'est pas étonnant, car la fréquence de coupure est proportionnelle $1 / \sqrt(L * C)$. Par conséquent, même avant de disposer de calculatrices ou de PC,

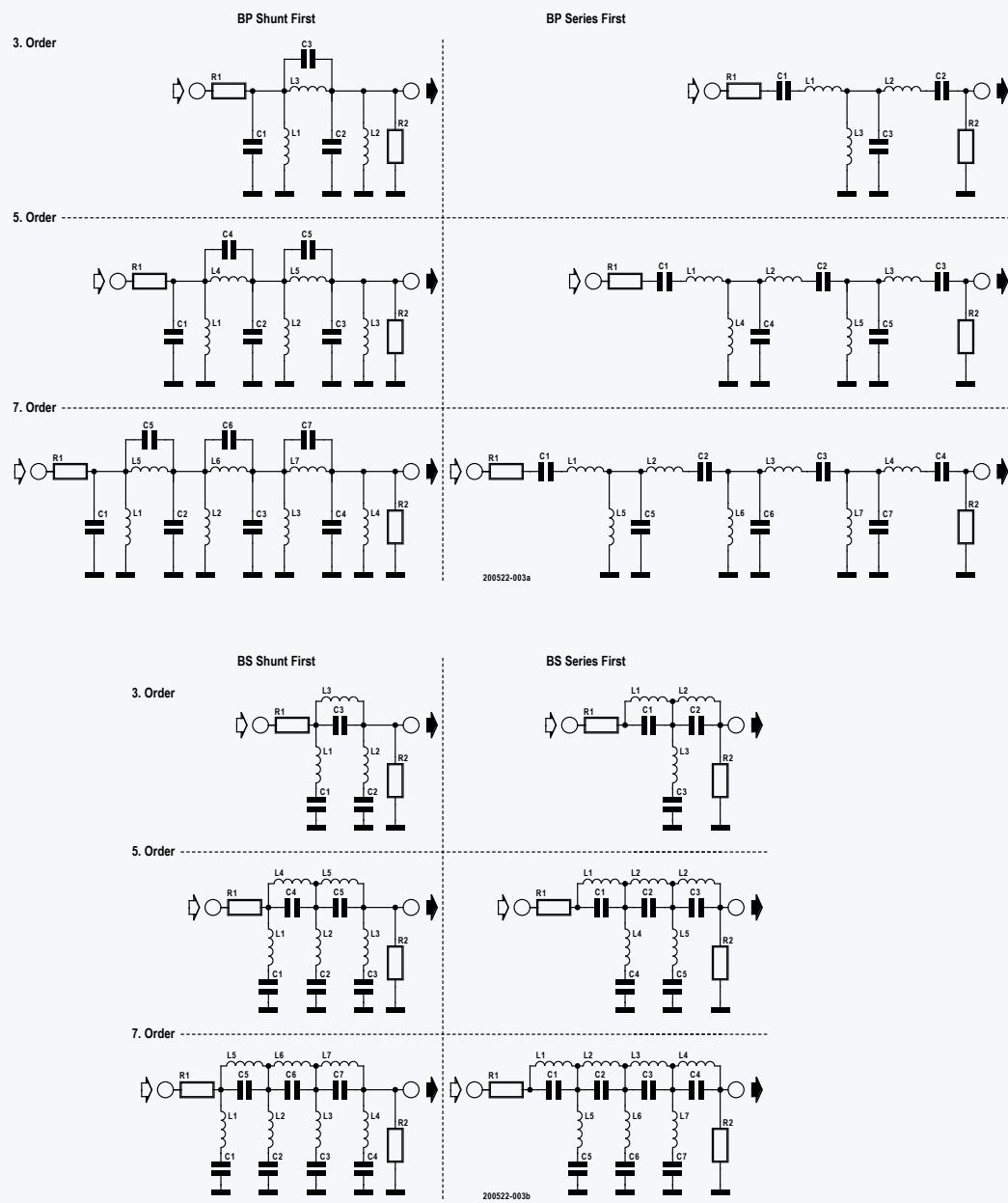


Figure 3. Circuits de base de filtres passe-bande et coupe-bande du 3^e, 5^e et 7^e ordre en PI et T avec caractéristiques de Bessel, Butterworth ou Tchebychev

il était facile de convertir un circuit de base avec une fréquence de coupure donnée à la fréquence cible souhaitée. Bien sûr, avec l'impédance standard de 50 Ω, les valeurs de résistance restent les mêmes.

Il est également intéressant de voir comment les valeurs des composants se comportent lorsqu'un filtre est calculé pour d'autres impédances. Même sans ordinateurs : si vous voulez doubler les 50 Ω d'impédance du filtre passe-bas de 1 MHz de la fig. 5, logiquement seule la valeur des bobines double, tandis que la valeur des condensateurs diminue de moitié. Pas étonnant, puisque Z est proportionnel à $\sqrt{L/C}$. C'est le bon moment pour montrer ici l'effet d'une mauvaise source

et une résistance terminale. Le filtre calculé pour une impédance de 100 Ω a été délibérément «mal» piloté avec une source de 50 Ω. Sa terminaison est aussi de 50 Ω. La **figure 6** montre sa réponse en fréquence dans la bande passante.

Retour au dimensionnement : dans un filtre de Tchebychev, l'ondulation résiduelle de la bande passante est un paramètre supplémentaire. L'effet sur la réponse en fréquence est illustré à la **figure 7**, qui montre la réponse en amplitude des filtres passe-bas Tchebychev du 7^e ordre de 1 MHz avec une ondulation résiduelle dans la bande passante de 0,1 dB, 0,5 dB, 1 dB et 3 dB. Plus on tolère d'ondulation résiduelle, plus la pente sera forte dans la bande de coupure. C'est vous et l'application du filtre qui fixez l'ondulation résiduelle

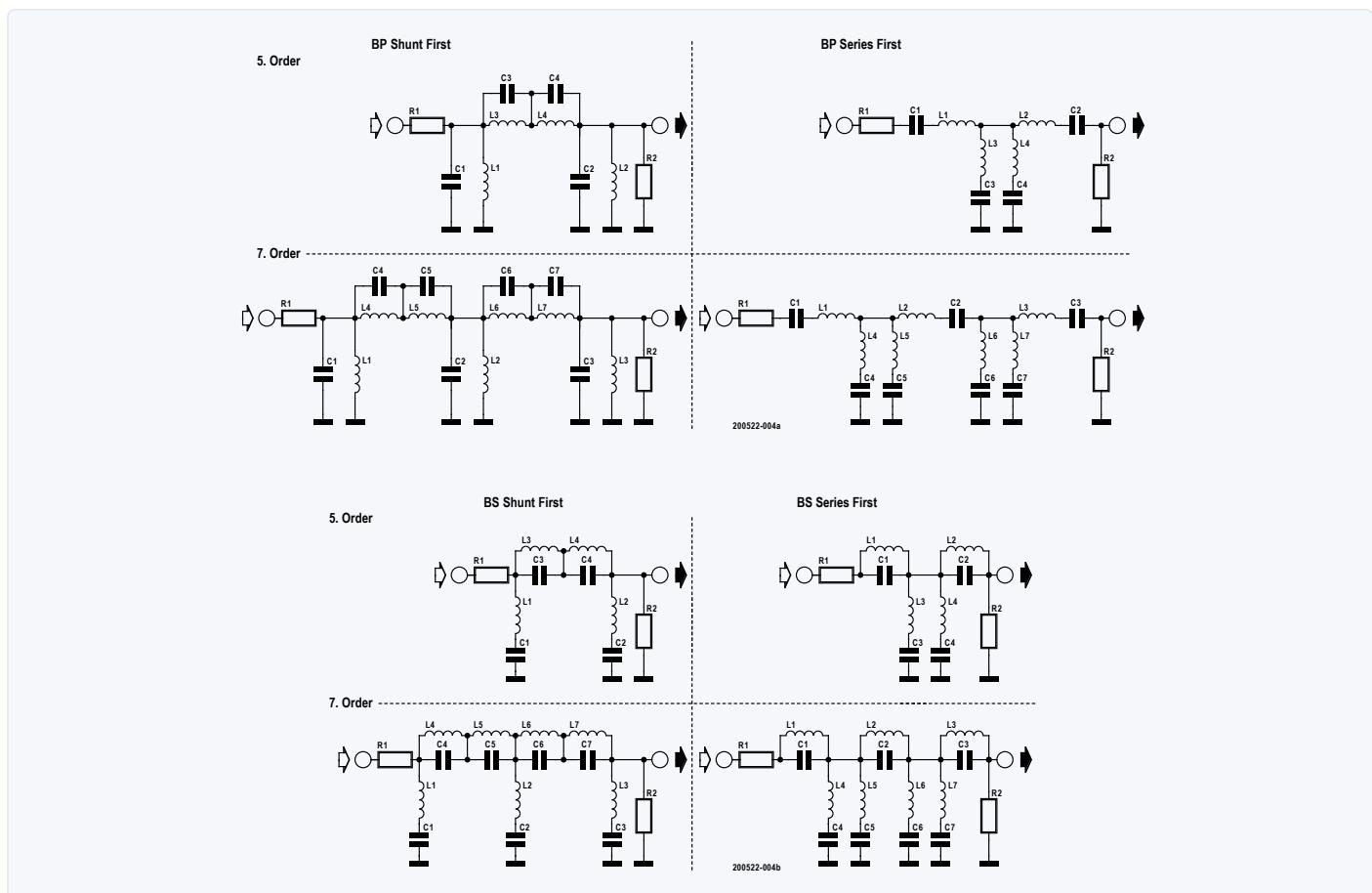


Figure 4. Circuits de base de filtres passe-bande et coupe-bande du 5^e et du 7^e ordre en PI et T avec caractéristiques de Cauer ou de Tchebychev inverse.

maximale acceptable.

La **figure 8** montre une version agrandie de la figure 7 dans la bande passante. Ici, vous voyez que la fréquence de coupure n'est pas le point -3 dB comme pour les autres filtres, mais le point de la

courbe où l'ondulation passe sous un seuil défini. Si l'on normalise les courbes au point -3 dB pour pouvoir mieux comparer, il faut ajuster la fréquence de coupure en conséquence.

Avec le filtre de Cauer, l'atténuation minimale dans la bande de

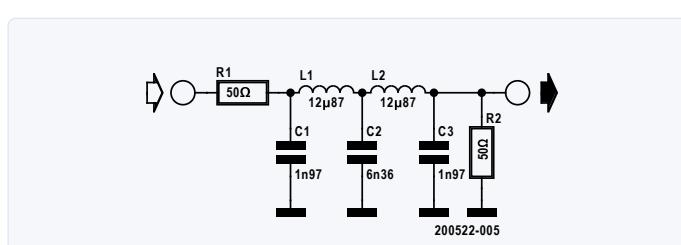


Figure 5. Passe-bas Butterworth du 5^e ordre en PI avec fréquence de coupure de 1 MHz.

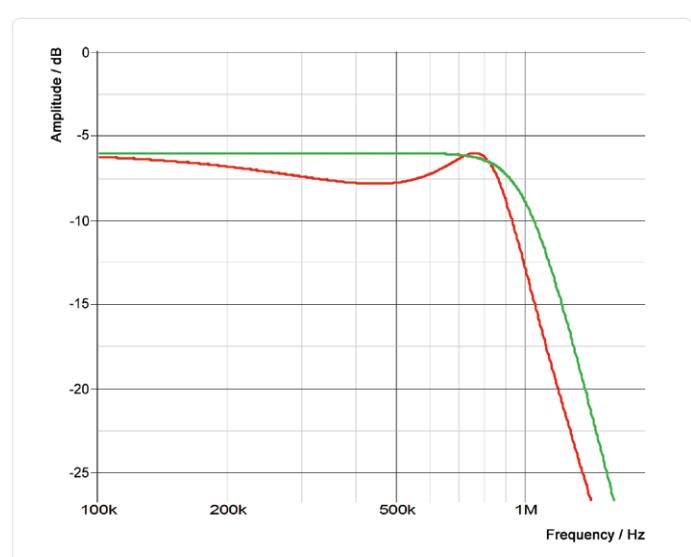


Figure 6. Réponse en fréquence d'un filtre passe-bas Butterworth du 5^e ordre dans la bande passante. La courbe verte correspond à la bonne réponse et la rouge résulte de l'inadaptation d'un filtre 100 Ω et de terminaisons 50 Ω.

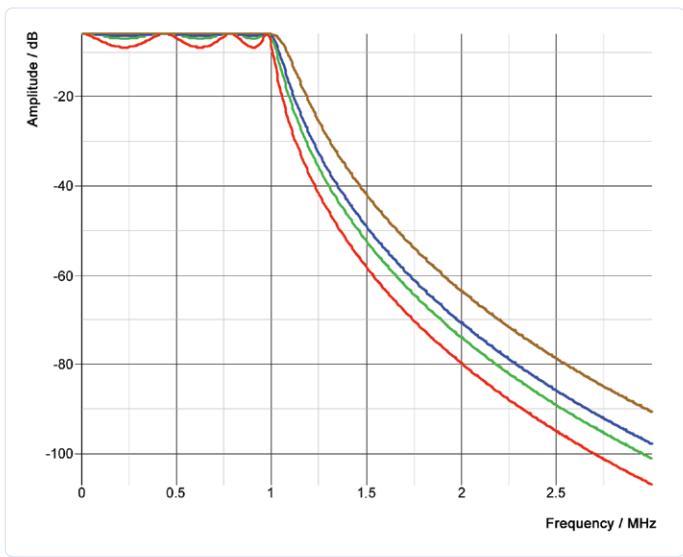


Figure 7. Réponses en fréquence de filtres passe-bas Tchebychev du 7^e ordre de 1 MHz avec une ondulation dans la bande passante de 0,1 dB (brun), 0,5 dB (bleu), 1 dB (vert) et 3 dB (rouge).

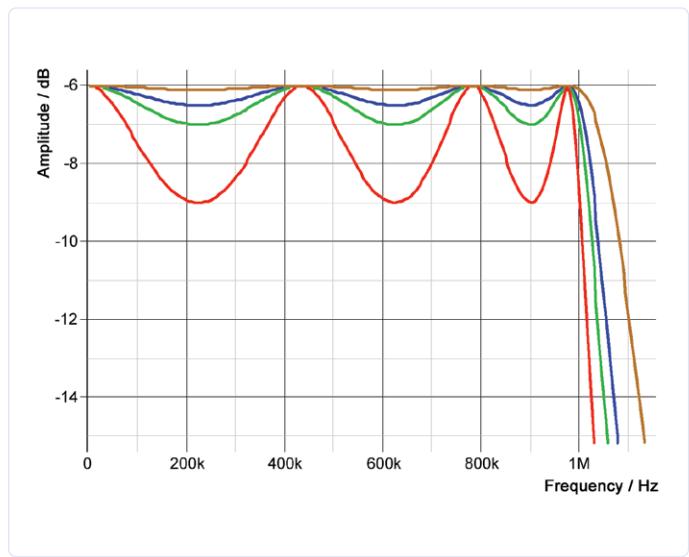


Figure 8. Agrandissement de la figure 7 dans la bande passante. La fréquence de coupure correspond au point de la courbe où l'ondulation passe sous un seuil défini : ondulation = 0,1 dB (brun), 0,5 dB (bleu), 1 dB (vert) et 3 dB (rouge).

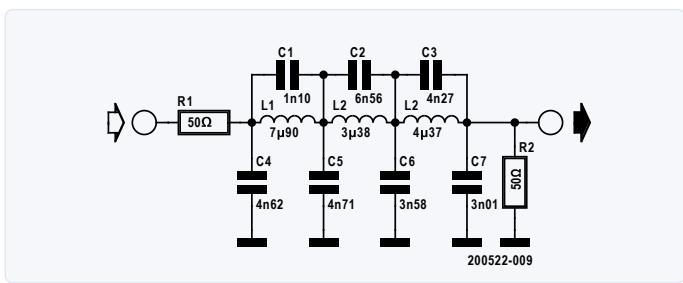


Figure 9. Filtre passe-bas Cauer du 7^e ordre avec une ondulation de 0,5 dB dans la bande passante et une atténuation minimale de 40 dB. Le tableau 1 donne les valeurs des composants pour obtenir une plus forte atténuation.

coupure est un paramètre supplémentaire. Les encoches assurent une transition encore plus raide vers la bande de coupure, mais la courbe revient ensuite à une atténuation moindre. Le nombre d'encoches correspond au nombre de circuits résonnantes dans le schéma (s'ils ont des fréquences différentes). La **figure 9** montre un filtre passe-bas Cauer du 7^e ordre avec une atténuation minimale de 40 dB. Le **tableau 1 Valeurs des composantes de la fig. 9** contient les valeurs d'atténuation minimale de 40, 50, 60 et 70 dB. La hauteur des bosses correspond à l'atténuation minimale.

La **figure 10** montre la réponse en fréquence des quatre filtres passe-bas de Cauer. La hauteur des bosses correspond à l'atténuation minimale. Vous pouvez voir les différentes pentes des courbes

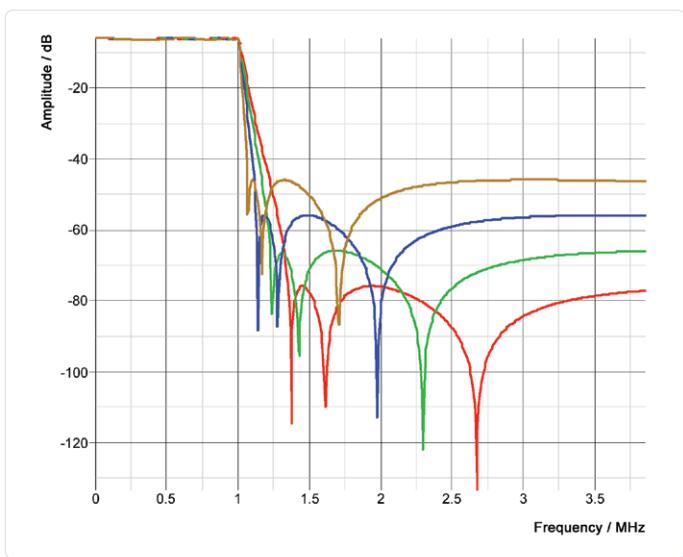


Figure 10. Réponse en fréquence des filtres passe-bas Cauer du 7^e ordre de 1 MHz avec atténuation minimale de 40, 50, 60 et 70 dB.

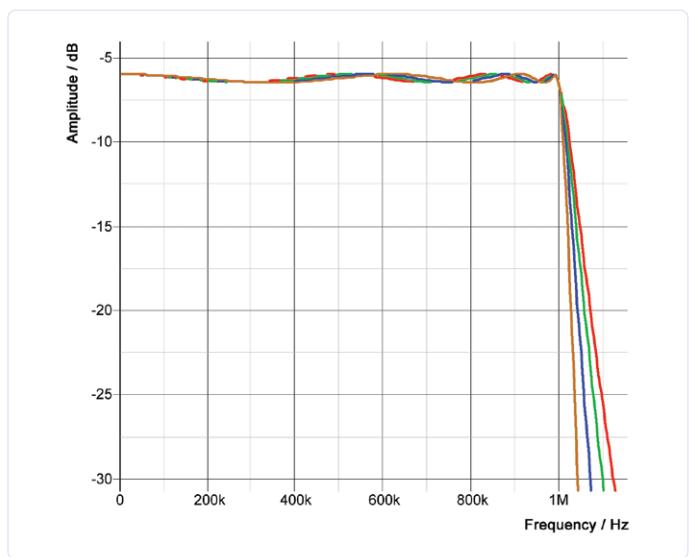


Figure 11. Agrandissement de la figure 10 dans la bande passante avec les atténuations minimales de 40 dB (marron), 50 dB (bleu), 60 dB (vert) et 70 dB (rouge).

Tableau 1. Valeurs des composants de la figure 9.

atténuation	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	L1	L2	L3
40 dB	1n10	6n56	4n27	4n62	4n71	3n58	3n01	7μ90	3μ38	4μ37
50 dB	766p	4n10	2n77	4n90	5n48	4n52	3n61	8μ50	4μ78	5μ61
60 dB	541p	2n74	1n88	5n07	6n14	5n36	4n09	8μ92	6μ04	6μ65
70 dB	385p	1n90	1n31	5n20	6n68	6n07	4n45	9μ22	7μ11	7μ49

dans la zone de transition et l'atténuation minimale associée. Mais cela modifie également les fréquences des encoches. Si vous avez une fréquence d'interférence fixe à filtrer, vous pouvez déplacer une encoche en ajustant soit la fréquence de coupure, soit l'atténuation minimale. Dans ce cas, gardez un œil sur les tolérances des composants et donc sur la position réelle des encoches. La section agrandie des réponses en fréquence de la **figure 11** montre que l'ondulation est de 0,5 dB pour tous les filtres.

La dernière approximation du filtre est la caractéristique inverse de Tchebychev (IT). Elle ressemble à un Butterworth dans la bande passante et n'a donc pas d'ondulation, ce paramètre est donc omis. Dans la bande de coupure, cependant, la caractéristique IT correspond davantage à un filtre de Cauer avec des encoches et une atténuation minimale correspondante. Le circuit de base est identique à celui du filtre de Cauer (fig. 9), seul le dimensionnement est différent. La **fig. 12** montre la réponse en fréquence des filtres de Tchebychev inversés avec une atténuation minimale de 50, 60 et 70 dB. La **fig. 13** est la version agrandie de la fig. 12 dans la bande passante.

Laissons tout passer

En télévision analogique, il fallait (autrefois) des filtres raides, dont les fortes résonances en régime impulsionnel étaient gênantes. Défaut du retard de groupe que l'on compensait avec force passe-

tout. Ce n'était pas du gâteau, car ces filtres devaient être accordés manuellement à l'aide d'un analyseur de réseau. Il n'existe que peu de programmes de filtrage capables de calculer le filtre dans son ensemble. Avec la numérisation croissante de la technologie vidéo, à des fréquences d'horloge plus élevées et grâce au suréchantillonnage dans les CA/N et CN/A, les exigences en matière de filtres analogiques ont diminué au point qu'aujourd'hui on peut se passer de la compensation du retard de groupe. La **fig. 14** montre le circuit d'un filtre passif passe-tout de 2^e ordre et la **fig. 15** montre le retard de groupe correspondant.

Un peu de pratique maintenant : la **fig. 16** montre un filtre vidéo fait maison avec des bobines Neosid (les cubes couleur cuivre à noyau accordable). Les deux bobines de gauche font partie d'un filtre passe-bas Cauer du 5^e ordre. Le bloc des six bobines restantes appartient à un passe-tout. Pour obtenir les valeurs «tordues» requises, il y a toujours plusieurs condensateurs connectés en parallèle. Les condos ronds bleus sont des KP dans la gamme des nF avec une tolérance de 2 %.

Filtres spéciaux

Les filtres considérés jusqu'à présent étaient des filtres asymétriques dont les signaux étaient tous référencés à la masse. Nous verrons que des composants passifs peuvent également filtrer les signaux différentiels.

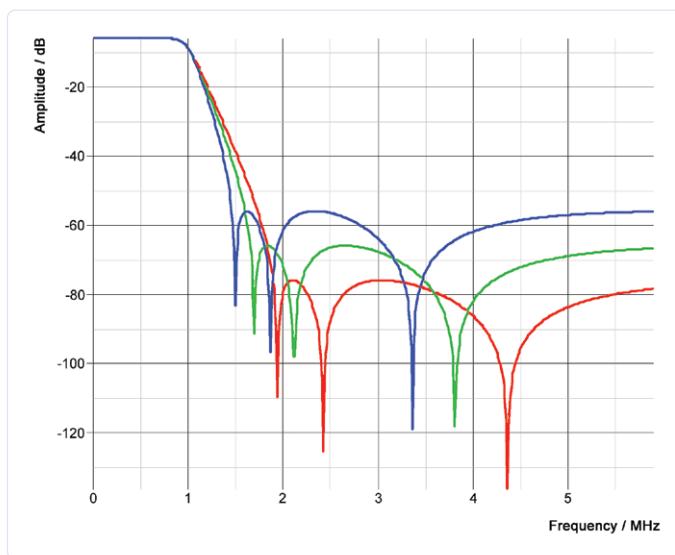


Figure 12. Réponses en fréquence des filtres de Tchebychev inversés avec 50, 60 et 70 dB.

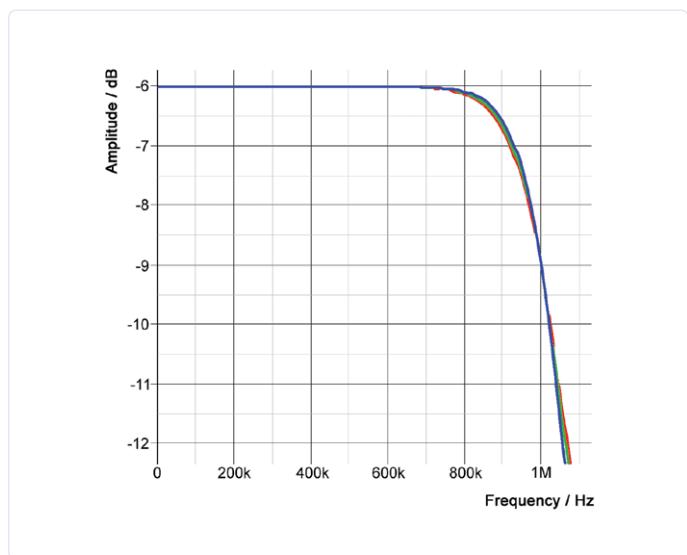


Figure 13. Agrandissement de la figure 12 dans la bande passante avec atténuation minimale de 50 dB (bleu), 60 dB (vert) et 70 dB (rouge)

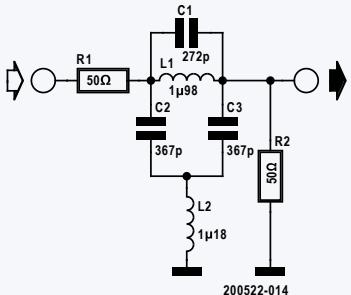


Figure 14. Circuit d'un filtre passif passe-tout du 2^e ordre.

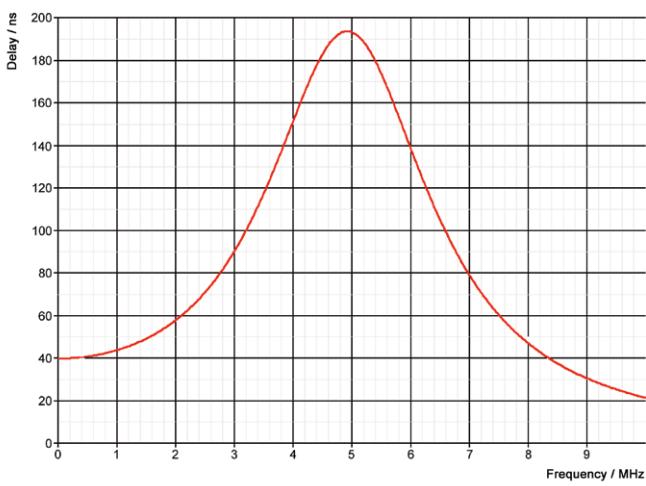


Figure 15. Parcours du retard de groupe du filtre passif passe-tout du 2^e ordre de la figure 14.

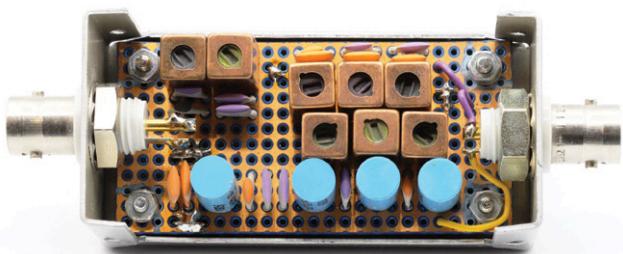


Figure 16. Filtre vidéo fait maison avec huit bobines Neosid.

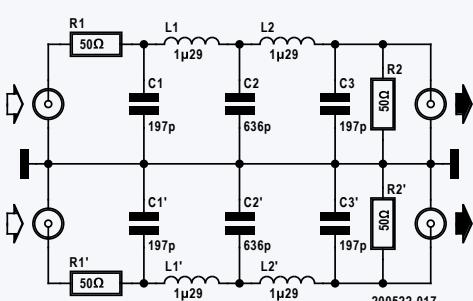


Figure 17. Deux filtres passe-bas Butterworth «normaux» pour un signal différentiel.

Filtres différentiels

Les CA/N et les CN/A modernes pour signaux de fréquence plus élevée sont dotés d'entrées et de sorties différentielles. Il est donc logique d'avoir recours à un filtrage différentiel pour les filtres passe-bas directement à la sortie du CN/A et même pour le filtre anti-repliement avant l'entrée du CN/A. Le circuit de la **fig. 17** est simplement constitué de deux filtres passe-bas Butterworth de 5^e ordre identiques pour 10 MHz dans une conception classique à une seule extrémité. Hormis la masse, ils n'ont aucun composant commun, c'est pourquoi les tolérances des composants peuvent entraîner des différences de comportement entre les deux «canaux».

La deuxième variante de la **fig. 18**, en revanche, va plutôt dans le sens d'un véritable filtre différentiel, car ici deux des condensateurs reliés à la terre de la **fig. 17** ont été combinés en un seul. Ils influencent désormais les deux voies de la même manière. Seules les selfs pourraient encore causer des différences ici.

Pour les signaux différentiels ou push-pull, l'effet de filtre est le même pour les deux circuits. Pour les signaux en mode commun, il y a cependant un comportement de filtre différent. La **fig. 19** montre qu'avec le filtre combiné de la **fig. 18**, seules les bobines influencent la réponse en fréquence et donc que seul un faible effet de filtre en résulte pour les signaux en mode commun. Bien que les signaux en mode commun soient réduits par les CN/A de l'amplificateur différentiel suivant, ce n'est pas satisfaisant, car la réjection en mode commun des amplificateurs RF se détériore avec l'augmentation de la fréquence. Chaque solution a ses avantages et ses inconvénients. Afin d'obtenir des branches de filtres aussi identiques que possible, on peut par exemple utiliser des modules de filtres finis provenant du même lot de production, puisque les dispersions entre ces filtres seront moindres.

Filtre de Tchebychev double inverse du 4^e ordre

J'ai remarqué ce filtre en analysant un filtre acheté, construit à partir de deux filtres composés du 4^e ordre (**fig. 20**). Il est facile à réaliser avec des composants de la série E classique et demande moins de valeurs tordues. Pour modifier sa fréquence de coupure, décalez les valeurs dans la série E. Le prix de cet avantage est une petite bosse dans la bande passante. La **fig. 21** donne la réponse en fréquence de ce filtre, qui atteint une atténuation minimale impressionnante de 70 dB dans la bande de coupure. Les deux

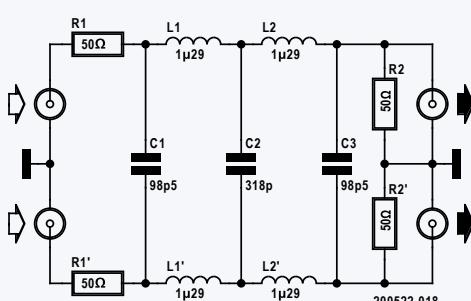


Figure 18. Cette variante combine C_x et C_x' de la figure 17, connectés chacun à la masse, en un seul condensateur dont la capacité est donc égale à la moitié de celle des deux condensateurs.

encoches ont la même fréquence et renforcent l'effet. La **fig. 22** montre la réponse en fréquence agrandie dans la bande passante ainsi que la petite bosse caractéristique à 75 MHz.

Choisissons

Nous l'avons déjà dit au début de cet article, il n'y a pas de marge de liberté pour dimensionner des filtres passifs. Pour le calcul de ces filtres assez sophistiqués, un logiciel spécialisé est indispensable. Sous [2, 3 et 4], vous trouverez une sélection de programmes de filtrage adaptés. Les valeurs des bobines et des condensateurs calculées de cette manière ne seront pas disponibles dans la plupart des cas. Avec les condensateurs, le problème est vite résolu : Il suffit de connecter deux ou trois condensateurs en parallèle pour se rapprocher le plus possible de la valeur requise. Les condensateurs sont petits et aussi moins chers, mais il ne faut jamais perdre de vue leurs tolérances.

Une simulation [5] vous permet de vérifier si avec les valeurs réelles trouvées la réponse en fréquence du filtre reste suffisamment proche de l'idéal. Lorsque vous construisez un prototype, donnez-vous la peine de mesurer les condensateurs avant de les monter. Il en va des filtres passifs comme des filtres actifs. Tout filtre est aussi bon que ses condensateurs. Renoncez aux condensateurs CMS de type X7R etc. à des fins de filtrage. Les bons condensateurs sont (malheureusement) souvent volumineux et moins bon marché. Ne commencez pas l'étude du circuit imprimé avant que le filtre soit au point et que vous savez exactement quels composants seront utilisés.

Les bobines sont moins commodes. Ce n'est pas la peine d'essayer de les connecter en parallèle. Même la connexion en série ne fonctionne que s'il n'y a aucun couplage magnétique des bobines. Pour éviter toute induction mutuelle entre bobines, vous devez les décaler de 90° les unes par rapport aux autres et les disposer en zigzag sur la carte. Admirez le décalage des bobines du filtre fini de la **fig. 23**, même si la troisième avec son angle de 45° est légèrement décalée. Dans le filtre fini de la **fig. 24**, ni les petites bobines bleues ne sont connectées en série ni les condensateurs en parallèle. On peut donc supposer que le fabricant a fait fabriquer ces composants pour qu'ils s'adaptent exactement.

Une solution partielle du problème des bobines est l'utilisation de composants accordables dont vous modifiez l'inductance (dans certaines limites) en réglant une coque en ferrite ou un noyau. C'est le cas des bobines Neosid de la **fig. 23**.

Il ne faut pas négliger la résistance des bobines, mais la mesurer ou la lire sur la fiche technique du composant, afin de l'inclure dans la simulation et la prendre en compte lors du calcul des filtres. Du fait de leur résistance, on s'éloigne du comportement idéal des bobines au point d'affecter la réponse en fréquence dans la bande passante, un dommage collatéral qu'il faudra corriger ou du moins prendre en compte dans l'étage suivant.

Les bobines à force inductance font appel à un noyau de ferrite pour « amplifier » en quelque sorte l'inductance propre du composant. Selon la taille de ce noyau, le nombre de spires et l'intensité des courants qui y circulent, il se peut que le noyau entre en saturation magnétique, ce qui se traduit par des distorsions massives. Si l'on relève plus d'harmoniques à la sortie d'un filtre qu'à son entrée, il faut soit réduire le niveau du signal, soit utiliser des bobines avec un noyau de ferrite plus gros.

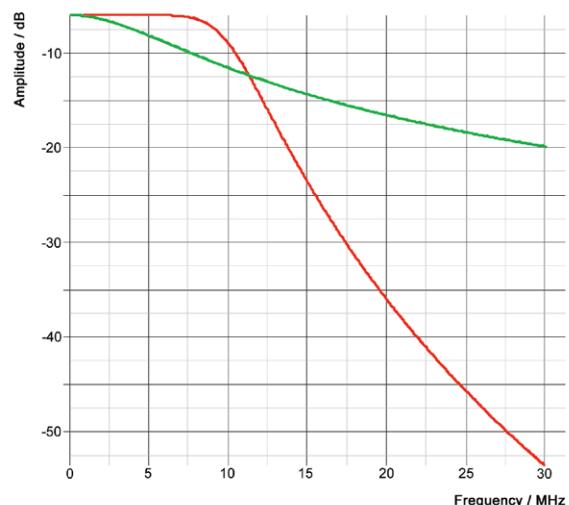


Figure 19. Réponse en fréquence en mode commun du filtre double SE de la figure 17 (rouge) et du filtre combiné de la figure 18 (vert).

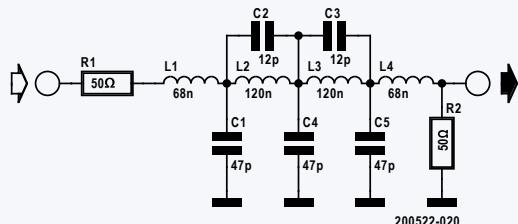


Figure 20. Filtre de Tchebychev double inverse du 4^e ordre.

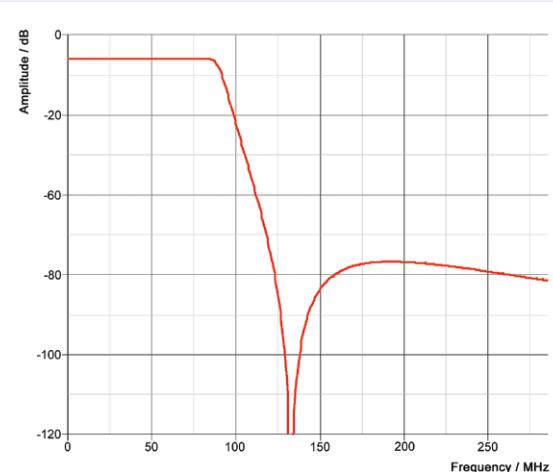


Figure 21. Réponse en fréquence d'un filtre de Tchebychev double inverse du 4^e ordre.

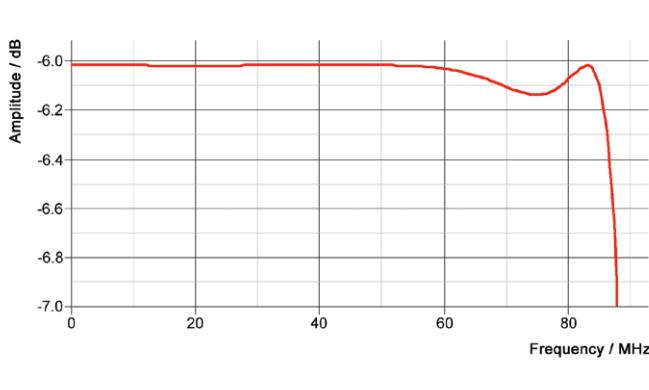


Figure 22. Réponse en fréquence agrandie du filtre de la fig. 20 dans la bande passante. La petite bosse à 75 MHz est caractéristique.

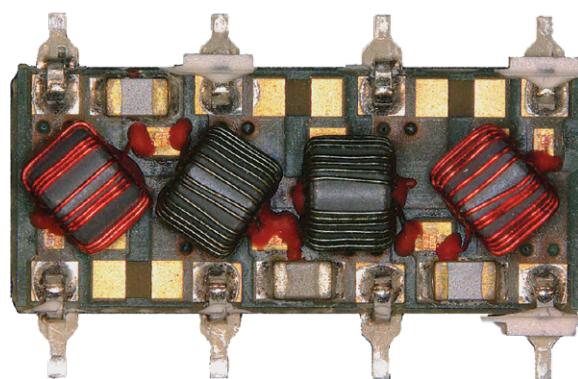


Figure 23. Le fonctionnement interne d'un filtre préfabriqué. Remarquez la disposition décalée des bobines.

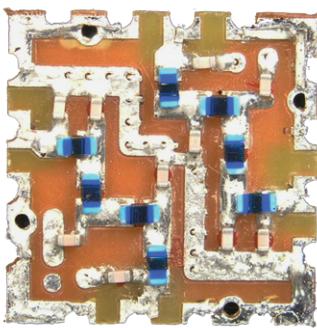


Figure 24. Un filtre fini composé de CMS avec des bobines à 90°. Remarquable : ni les bobines bleues ne sont connectées en série, ni les condensateurs en parallèle.

Disposons

Outre la disposition des bobines en zigzag déjà mentionnée, il faut une connexion courte et directe à la masse. L'emploi de cartes double face avec une couche pour les signaux et une couche sur la face opposée pour la masse facilitera la tâche. Pour un circuit à hautes fréquences, avec par conséquent des condensateurs à faible capacité, il faut se souvenir que les pistes elles-mêmes agissent comme de minuscules condensateurs reliés à la masse. Le cas échéant, cette capacité parasite doit être prise en compte lors du choix de la valeur du condensateur réel. 

200522-02

Votre avis, s'il vous plaît ?

N'hésitez pas à poser vos questions ou envoyer vos commentaires (en allemand ou en anglais) à l'auteur alfred_rosenkraenzer@gmx.de ou (en français) à redaction@elektor.fr

Ont contribué à cet article

Auteur : **Alfred Rosenkranzer**

Rédaction : **Thomas Scherer**

Maquette : **Giel Dols**

Traduction : **Frédéric Handle**



PRODUITS

➤ **OWON SDS1102 2-Kanal-Digital-Oszilloskop (100 MHz)**
www.elektor.fr/owon-sds1102-2-ch-digital-oscilloscope-100-mhz

➤ **Siglent SDG2042X Arbitrary Waveform Generator (40 MHz)**
www.elektor.fr/siglent-sdg2042x-arbitrary-waveform-generator-40-mhz

➤ **OWON XSA1015-TG Spectrum Analyser (9 kHz – 1.5 GHz)**
www.elektor.fr/owon-xsa1015-tg-spectrum-analyser-9-khz-1-5-ghz

➤ **livre : Les oscilloscopes anciens & modernes (Rémmy Mallard)**
www.elektor.fr/19124

LIENS

- [1] [conception de filtres analogiques \(1\)](http://www.elektormagazine.fr/magazine/200318-03) : www.elektormagazine.fr/magazine/200318-03
- [2] [LC Filter Design Tool](http://https://rf-tools.com/lc-filter/) : https://rf-tools.com/lc-filter/
- [3] [AADE](http://https://getwinpcsoft.com/Filter-Design-179557/download/) : https://getwinpcsoft.com/Filter-Design-179557/download/
- [4] [Quickfil 5.1 \(sous DOS\)](http://www.omicron-lab.com/products/vector-network-analysis/quickfil/) : www.omicron-lab.com/products/vector-network-analysis/quickfil/
- [5] [Simetrix](http://www.simetrix.co.uk) : www.simetrix.co.uk