

un générateur analogique 1 kHz

ondes sinusoïdales à faible distorsion

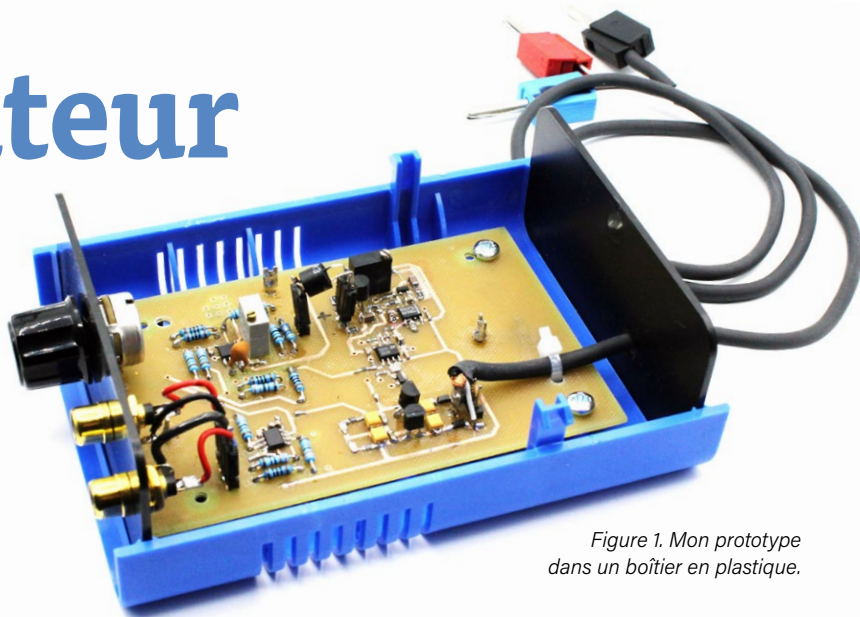


Figure 1. Mon prototype dans un boîtier en plastique.

Alfred Rosenkränzer (Allemagne)

Un signal sinusoïdal de haute qualité à 1 kHz est indispensable pour les mesures en électronique audio. Les générateurs numériques ne sont pas encore en mesure de pouvoir rivaliser avec leurs cousins analogiques. Comme toujours dans le domaine du haut de gamme, les appareils prêts à l'emploi ne sont pas vraiment bon marché. Avec le circuit proposé ici, construire soi-même un tel générateur revient à un prix raisonnable, sans avoir à trop sacrifier la qualité du signal.

Ma revue du QA403 de QuantAsylum [1] montre que les générateurs d'ondes sinusoïdales numériques sont tout à fait utilisables. Malheureusement, cette société a retiré son modèle analogique QA480 – un complément au QA403 (voir le blog sous [2]). Cet appareil combinait un générateur analogique de 1 kHz avec un filtre coupe-bande approprié et un amplificateur de 12 dB de haute qualité. L'amplitude et le filtre coupe-bande pouvaient être contrôlés via USB à partir d'un PC. Mais c'est de l'histoire ancienne. Selon le blog, l'abandon est en partie dû à l'effort excessif requis pour le réglage.

Le circuit était basé sur la conception d'une autre société [3] et a heureusement été publié dans ce blog. Comme il n'existe actuellement aucun appareil équivalent disponible à l'achat, j'ai légèrement révisé le schéma du circuit et développé un circuit imprimé approprié. Le prototype est présenté à la **figure 1**. L'alimentation est fournie par un bloc d'alimentation externe symétrique de ± 15 V. Par souci de simplicité, j'ai utilisé un potentiomètre pour le réglage de l'amplitude. Il n'y a donc ni USB ni logiciel et donc aucun parasite provenant d'une électronique numérique.

Le circuit

Le schéma de principe de la **figure 2** montre cinq unités fonctionnelles. L'oscillateur proprement dit se compose d'un filtre passe-bande mis en oscillation par une rétroaction positive. L'amplitude est stabilisée par un régulateur dont la valeur de mesure est obtenue à partir du signal de sortie par redressement et filtrage, et la valeur de consigne à partir

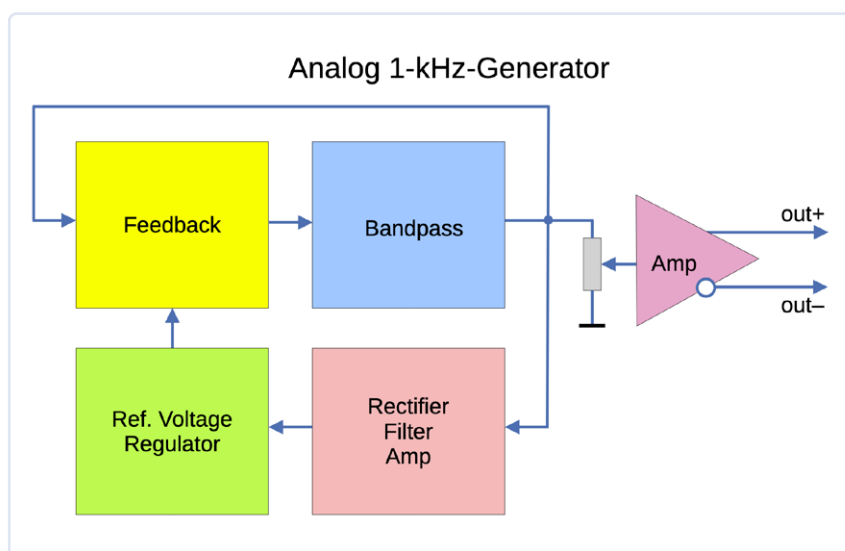


Figure 2. Schéma fonctionnel du générateur de 1 kHz.

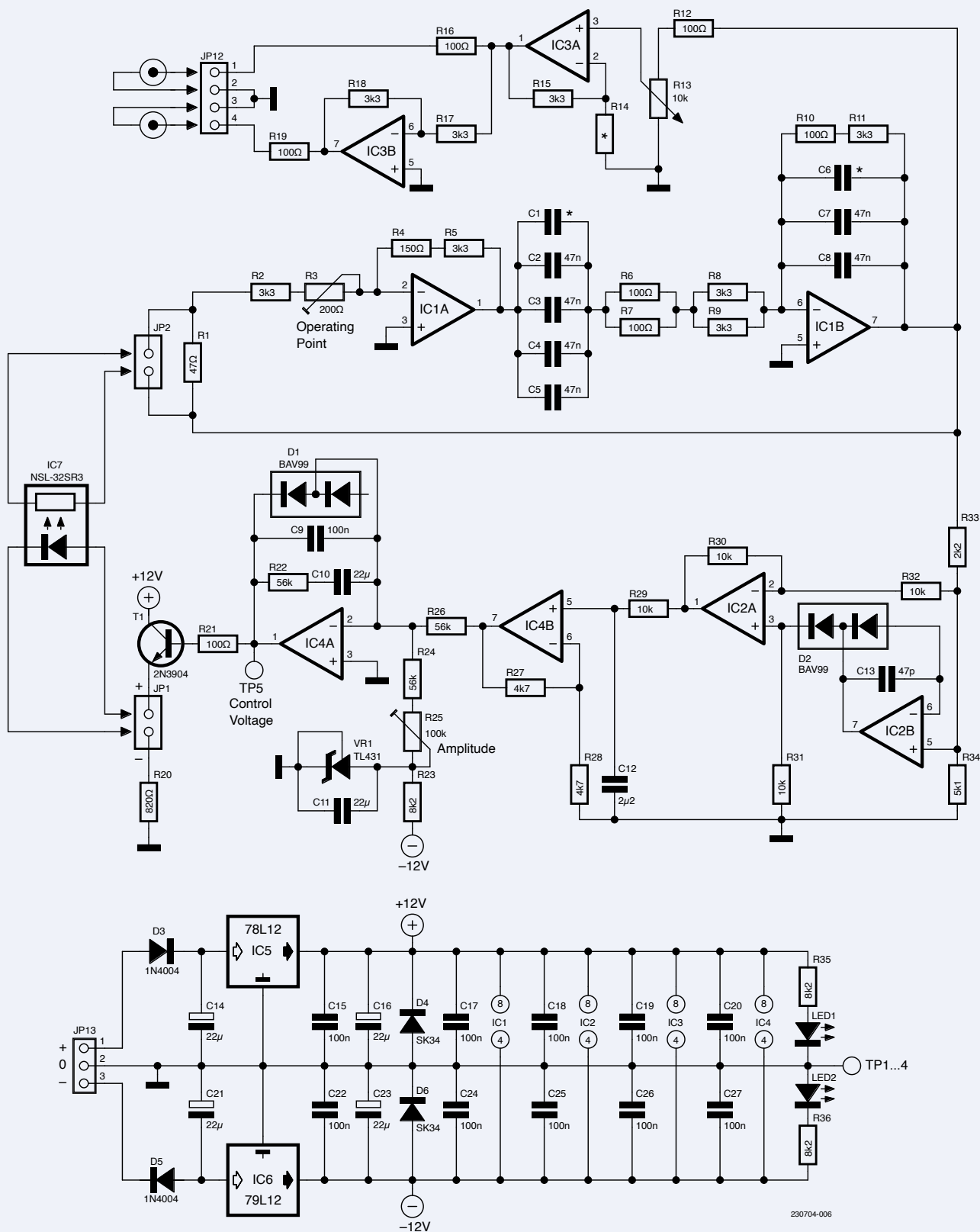


Figure 3. Le circuit ne nécessite que quatre amplificateurs opérationnels doubles, deux régulateurs de tension et un optocoupleur.

d'une tension de référence qui est nécessaire pour obtenir un signal stable. Un amplificateur de sortie fournit un signal différentiel d'amplitude réglable.

Le circuit de la **figure 3** montre comment les blocs fonctionnels sont traduits en électronique réelle.

Filtre passe-bande

Le filtre passe-bande est réalisé par la combinaison de IC1B avec R6...R11 et C1...C8. Sa fréquence centrale détermine la fréquence d'oscillation. La qualité des composants utilisés influence la distorsion du signal sinusoïdal obtenu. On peut utiliser des condensateurs

C0G (à coefficient de température nul) en céramique dans des boîtiers CMS ou des condensateurs à film traversants. Le circuit présente donc deux fois plus de condensateurs, dont seulement la moitié, c'est-à-dire des condensateurs CMS ou des condensateurs traversants, doivent être installés.



Liste des composants

Résistances

Sauf indication contraire :

MELF 0204 ou couche mince CMS 1206, 1%.
 R1 = 47 Ω
 R2, R5, R8, R9, R11, R15, R17, R18 = 3k3
 R3 = 200 Ω , potentiomètre multitours,
 vertical, RM 1/10"
 R4 = 150 Ω
 R6, R7, R10, R12, R16, R19 = 100 Ω *
 R12, R16, R19 = 100 Ω
 R13 = 10 k, potentiomètre linéaire
 R14 = optionnel*
 R20 = 820 Ω , CMS 0603
 R21 = 100 Ω , CMS 0603
 R22, R24, R26 = 56 k Ω , CMS 0603
 R23, R35, R36 = 8k2, CMS 0603
 R25 = 100 k Ω , potentiomètre multitours,
 vertical, RM 1/10"
 R27, R28 = 4k7, CMS 0603
 R29, R30, R31, R32 = 10 k Ω , CMS 0603
 R33 = 2k2, CMS 0603
 R34 = 5k1, CMS 0603

Condensateurs

C1, C6 = optionnel*, C0G, CMS 0603
 C2, C3, C8 = 47 nF, film, RM 2/10" (à la
 place de C4, C5, C7)*
 C4, C5, C7 = 47 n, C0G, CMS0805 (à la
 place de C2, C3, C8)*
 C9, C15, C17...C20, C22, C24...C27 = 100 nF,
 X7R, CMS 0603
 C10, C11 = 22 μ F / 16 V, CMS 1206
 C12 = 2 μ 2 / 16 V, CMS 1206
 C13 = 47 pF, COG, CMS 0603
 C14, C16, C21, C23 = 22 μ F / 25 V,
 électrolytique au tantale, SMC-B

Semi-conducteurs

LED1, LED2 = LED, CMS 0805
 D1, D2 = BAV199, SOT23
 D3, D5 = 1N4004
 D4, D6 = SK34, DO214AC
 T1 = 2N3904, SOT23
 IC1, IC3 = OPA2211*, SOIC8
 IC2, IC4 = TL072, SOIC8
 IC5 = 78L12, TO92
 IC6 = 79L12, TO92
 IC7 = NSL-32SR3*
 VR1 = TL431, TO92

Divers

JP1, JP2 = barrette à 2 broches, LP 1/10"
 JP12 = barrette à 4 broches, LP 1/10"
 JP13 = barrette à 3 broches, LP 1/10"
 Carte de circuit imprimé 230704-01
 Bouton pour le potentiomètre R13
 Bornes de sortie audio*

* Voir le texte

Sur le circuit imprimé, on voit clairement que seuls deux condensateurs connectés en parallèle sont raccordés à l'entrée de IC1B (plus C1 si l'on veut ajuster la fréquence). Dans la boucle de retour, il n'y a même qu'un seul condensateur (plus éventuellement C6 pour l'ajustement de la fréquence). Les pastilles de soudage des résistances sont adaptées au format CMS1206, facile à souder à la main, ainsi qu'au format des résistances cylindriques MELF204, de qualité comparable à celle des versions traversantes à film métallique. À la place des MELF, on peut aussi utiliser des résistances à couche mince.

La capacité dans la branche d'entrée est le double de celle dans la boucle de retour, alors que c'est l'inverse pour les résistances. Cette configuration devrait permettre de réduire le bruit, du moins mathématiquement. Il est conseillé de mesurer les condensateurs avec précision et que les condensateurs mis en parallèle soient aussi identiques que possible, ce qui facilitera le réglage fin ultérieur de la fréquence par C1 et C6 ou R6/R7 et R10. Le filtre passe-bande a un gain d'environ -1 à la fréquence centrale.

Rétroaction positive

Comme pour obtenir des oscillations stables le gain global doit être égal à +1, le gain (réglable) du circuit composé de IC1A et R1... R5 doit aussi être d'environ -1. Si le gain est trop faible, le circuit n'oscillera pas, et s'il est trop élevé, les signaux seront si grands qu'ils pousseront les ampli-op à la saturation. Une amplitude constante avec un signal sinusoïdal non écrêté ne peut être obtenue qu'en contrôlant la rétroaction globale positive. L'optocoupleur NSL-32SR3 d'Advanced Photonix [4], facilement disponible, sert d'élément de contrôle. Le courant traversant la LED du côté de l'entrée agit sur la résistance de la LDR intégrée du côté de la sortie. Cet optocoupleur assure l'isolation électrique entre l'entrée et la sortie.

Mesure de l'amplitude

Environ 70% du signal de sortie de IC1B atteint l'entrée de IC2A via le diviseur de tension R33/R34. Cette atténuation permet d'éviter un comportement transitoire bizarre lors de la mise sous tension, lorsque l'oscillateur est brièvement poussé à la limite d'amplitude. Le circuit du redresseur de précision construit autour d'IC2 est décrit dans une note d'application de Texas Instruments [5]. Le signal redressé est lissé par le filtre passe-bas

composé de R29 et C12, puis doublé par IC4B. Si vous le souhaitez, un calculateur en ligne adéquat [6] vous permettra de calculer les valeurs numériques. Avec ses composants, IC4A fonctionne comme un régulateur.

Stabilisation de l'amplitude

La puce TL431 fournit une tension de référence stabilisée de -2,5 V, dont le bruit est réduit par C11. Le courant provenant de IC4B et de R26 est compensé par R24 et R25, cette dernière servant à régler l'amplitude. D1 empêche la tension de commande en sortie de IC4A de devenir négative. Commandé via R21, le transistor T1 pilote la LED de l'optocoupleur dont la résistance de sortie agit sur la rétroaction globale positive. La boucle de régulation est ainsi fermée. Sa constante de temps est déterminée par R26, R22, C9 et C10.

Étage de sortie

Via R12, le signal sinusoïdal atteint le potentiomètre R13, qui est utilisé pour régler l'amplitude du signal de sortie entre 0 et la valeur maximale fixée par R25. IC3A sert d'amplificateur de sortie. R14 permet d'augmenter légèrement l'amplification si nécessaire. Avec son gain de -1, IC3B fournit le signal de sortie négatif. Les bornes de sortie peuvent être de type RCA, BNC, jack audio TS ou XLR, selon les besoins.

Alimentation électrique

Le circuit est alimenté par du ± 15 V. Deux régulateurs de tension en font du ± 12 V stabilisé. D3/D5 empêchent les dommages causés par l'inversion de polarité, et D4/D6 protègent IC5 et IC6 d'un blocage lors de la mise sous tension. Les deux LED s'allument lorsque l'alimentation est active.

Choix des composants

La qualité des ampli-op IC1 et IC3 a une influence majeure sur la qualité du signal. C'est pourquoi j'ai utilisé ici les types OPA2211, légèrement plus chers. Bien entendu, le circuit fonctionne également avec d'autres ampli-op doubles à broches compatibles. Pour IC2 et IC4, pratiquement n'importe quel op-amp double convient. Mon prototype utilise le TL072. Les condensateurs C1 à C8 influencent également la distorsion. Comme déjà mentionné, il convient d'utiliser ici des condensateurs de type C0G dans des boîtiers CMS ou des condensateurs à film traversants. Attention : un seul «mauvais» condensateur selon les critères audiophiles, avec un diélectrique XR7

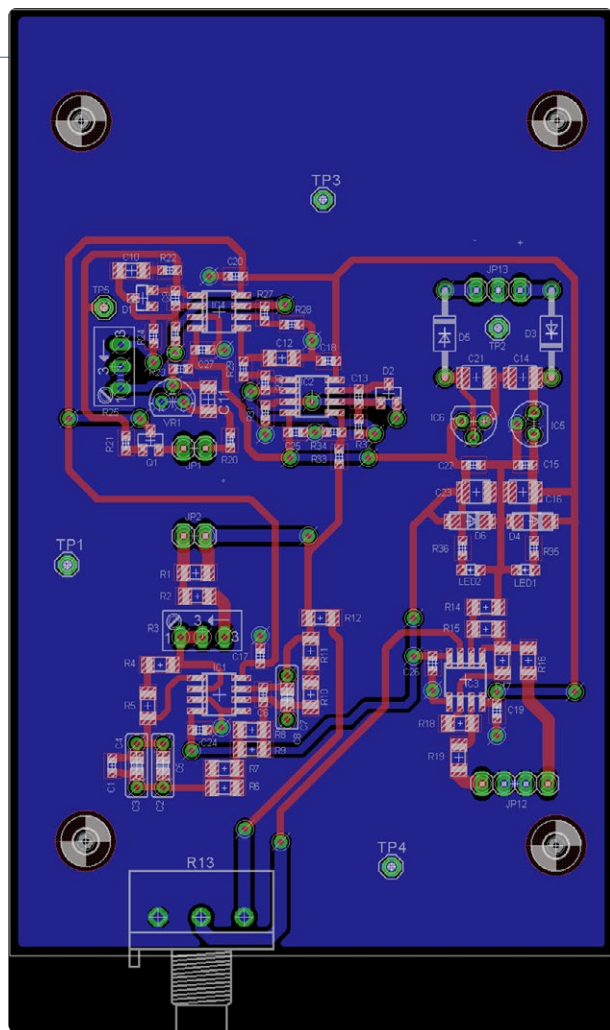


Figure 4. Disposition de la carte. Les fichiers correspondants peuvent être téléchargés au format Eagle sous [7].

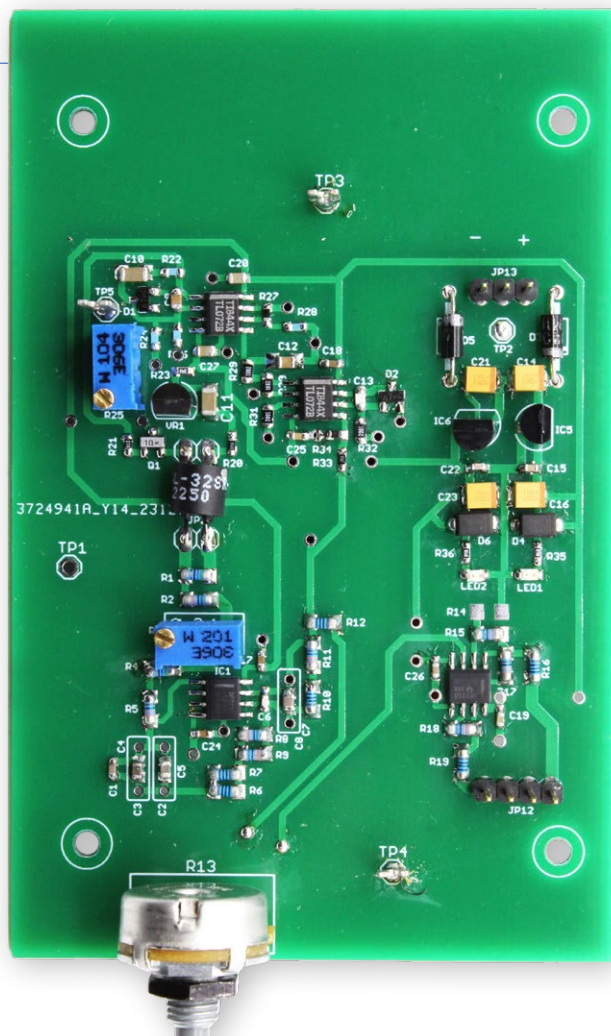


Figure 5. Le circuit imprimé entièrement assemblé de mon prototype.

ou similaire, peut tout gâcher ! Les résistances sur le chemin du signal doivent être du type à couche mince CMS 1206 ou MiniMELF204.

Assemblage et mise en service

L'optocoupleur IC7 ne doit pas être installé tout de suite. La figure 1 montre que je l'ai rendu enfichable à l'aide de deux barrettes à 2 broches. Cela facilite le test du circuit : si vous court-circuituez les broches JP2 et tournez le potentiomètre R3, le circuit doit se mettre à osciller pour un certain réglage et produire un signal limité à $20 V_{cc}$.

Cela permet de vérifier le fonctionnement de l'étage de sortie, du redresseur et du filtre, y compris l'amplificateur. La fréquence devrait être proche de 1 kHz. Le réglage fin est effectué ultérieurement à une amplitude contrôlée et stable. La fréquence change légèrement lorsque les ampli-op atteignent la saturation. Lorsque le signal atteint ses limites, la sortie de IC4A doit être à 0 V. Si l'oscillateur est arrêté, elle augmente lentement jusqu'à environ +10 V. Les caractéristiques de transfert de l'optocoupleur peuvent varier considérablement.

J'en ai acheté quatre et chacun a eu un comportement différent. En alimentant la LED d'entrée avec une alimentation de laboratoire et une résistance en série, vous obtenez la résistance de sortie en la mesurant à l'aide d'un multimètre. Un courant de LED de 3 à 5 mA s'est avéré être un bon point de fonctionnement.

Ensuite, connectez une résistance avec la valeur mesurée en parallèle à R1 et réglez R3 de manière à ce que l'oscillateur commence tout juste à osciller. Si nécessaire, vous pouvez ajuster R4. Si vous retirez la résistance et insérez l'optocoupleur, le circuit doit fournir un signal sinusoïdal avec une amplitude constante et stable. R25 peut être utilisé pour ajuster l'amplitude souhaitée à des valeurs de 1 à $3 V_{cc}$. Des amplitudes plus grandes entraînent une distorsion plus élevée.

La constante de temps du circuit de régulation a été délibérément choisie assez grande, ce qui rend le temps de stabilisation assez long, mais garantit un niveau très constant. Le point de fonctionnement du régulateur est réglé avec R3.

Assemblage et mise en service

L'optocoupleur IC7 ne doit pas être installé tout de suite. La figure 1 montre que je l'ai rendu enfichable à l'aide de deux barrettes à 2 broches. Cela facilite le test du circuit : si vous court-circuituez les broches JP2 et tournez le potentiomètre R3, le circuit doit se mettre à osciller pour un certain réglage et produire un signal limité à $20 V_{cc}$.

Cela permet de vérifier le fonctionnement de l'étage de sortie, du redresseur et du filtre, y compris l'amplificateur. La fréquence devrait être proche de 1 kHz. Le réglage fin est effectué ultérieurement à une amplitude contrôlée et stable. La fréquence change légèrement lorsque les ampli-op atteignent la saturation. Lorsque le signal atteint ses limites, la sortie de IC4A doit être à 0 V. Si l'oscillateur est arrêté, elle augmente lentement jusqu'à environ +10 V.

Les caractéristiques de transfert de l'optocoupleur peuvent varier considérablement. J'en ai acheté quatre et chacun a eu un comportement différent. En alimentant la LED d'entrée avec une alimentation de laboratoire

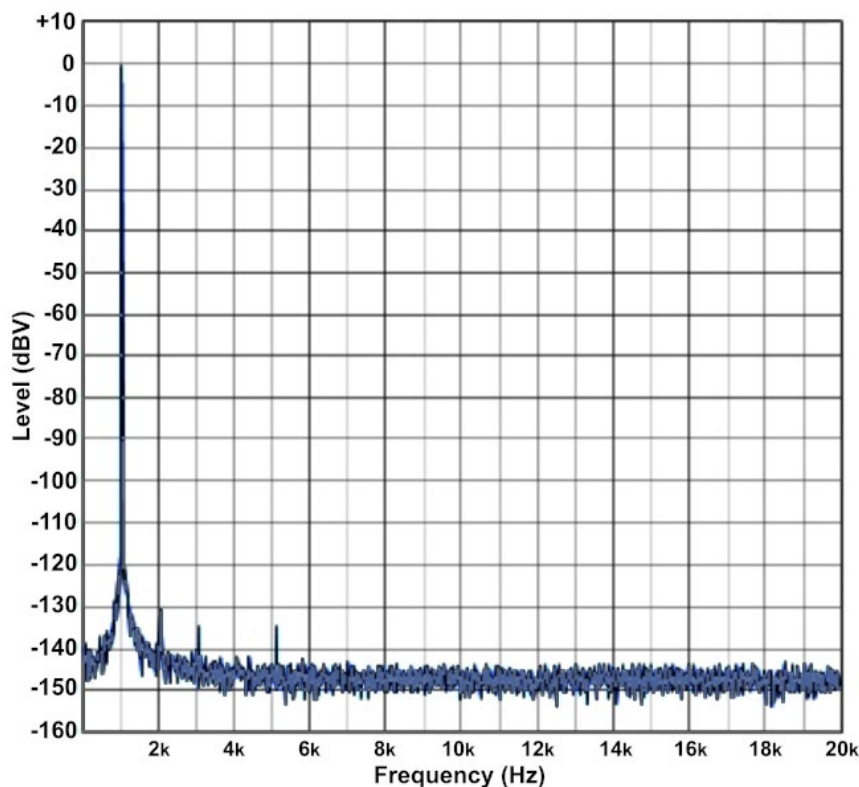


Figure 6. Spectre du signal de sortie à un niveau de 0 dBV.

et une résistance en série, vous obtiendrez la résistance de sortie en la mesurant à l'aide d'un multimètre. Un courant de LED de 3 à 5 mA s'est avéré être un bon point de fonctionnement.


Ensuite, connectez une résistance avec la valeur mesurée en parallèle à R1 et réglez R3 de manière à ce que l'oscillateur commence tout juste à osciller. Si nécessaire, vous pouvez ajuster R4. Si vous retirez la résistance et insérez l'optocoupleur, le circuit doit fournir un signal sinusoïdal avec une amplitude constante et stable. R25 peut être utilisé pour ajuster l'amplitude souhaitée à des valeurs de 1 à 3 V_{cc}. Des amplitudes plus grandes entraînent une distorsion plus élevée.

La constante de temps du circuit de régulation a été délibérément choisie assez grande, ce qui rend le temps de stabilisation assez long, mais garantit un niveau très constant. Le point de fonctionnement du régulateur est réglé avec R3.

Fréquence et autres

La fréquence peut maintenant être réglée avec précision. Vous pouvez modifier la capacité en ajustant C1 et C6 ($C1 = 2 \times C6$) ou ajuster les valeurs de R6/R7 et R10. La fréquence est calculée à l'aide de la formule habituelle $f = 1/(2\pi RC)$. Après le réglage de la fréquence, il peut être nécessaire de retoucher le point de fonctionnement. Si vous disposez d'un filtre coupe-bande, les fréquences du générateur et du filtre doivent être identiques.

J'ai réalisé un circuit imprimé approprié au circuit. La **figure 4** montre sa disposition et la **figure 5** la carte assemblée. La **figure 6** montre le spectre au niveau nominal de 0 dBV. Toutes les harmoniques ont un niveau inférieur à -130 dBV : le signal de sortie présente donc une distorsion extrêmement faible. Ce spectre a été mesuré à l'aide de l'analyseur audio APx555 d'Audio Precision. La qualité de ce générateur de signaux maison est donc tout à fait respectable !

Les valeurs des composants mentionnées dans le circuit fonctionnent assez bien avec mon prototype, mais il y a encore de l'espace pour une optimisation. Il me reste également quelques cartes nues. Si vous êtes intéressé, veuillez me contacter directement. 

VF : Helmut Müller — 230704-04



À propos de l'auteur

Alfred Rosenkränzer a travaillé pendant de nombreuses années comme ingénieur en développement, d'abord dans le domaine de la technologie de la télévision professionnelle. Depuis la fin des années 1990, il développe des circuits numériques à grande vitesse et des circuits analogiques pour les testeurs de circuits intégrés. L'audio est son passe-temps favori.

Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (alfred_rosenkraenzer@gmx.de) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



Produits

> **QuantAsylum QA403 Analyseur audio 24 bits**
www.elektor.fr/20530

> **FNIRSI 2C23T (3-en-1) Oscilloscope 2 voies (10 MHz) + Multimètre + Générateur de signaux**
www.elektor.fr/20717

LIENS

- [1] A. Rosenkränzer, "Comparing the QuantAsylum QA403 to the Gold Standard," 2023: <https://tinyurl.com/yudmy5sk>
- [2] Blog QA480 : <https://tinyurl.com/yckdwe8e>
- [3] Site web de JanasCard : <http://www.janascard.cz/aHome.html>
- [4] Optocoupleur NSL-32SR3 (Mouser) : <https://tinyurl.com/4c5c8nss>
- [5] Redresseur de précision (TI) : <http://www.ti.com/lit/ug/tidu030/tidu030.pdf>
- [6] Calcul des paramètres de la tension alternative : <https://tinyurl.com/vsrpbzbf>
- [7] Page web de l'article : <https://www.elektormagazine.fr/230704-04>