

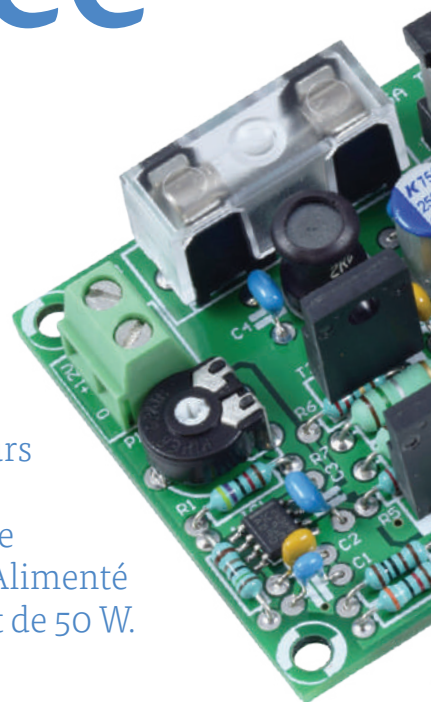
convertisseur CC/CC

12 à 200 V

pour amplificateurs à tubes

Ton Giesberts (Elektor)

Voici un convertisseur CC/CC assez facile à construire pour amplificateurs à tubes. Il utilise des composants traversants (un seul CI SO-8), sa sortie haute tension est isolée galvaniquement. De fabrication maison, le transformateur a un rapport adaptable pour régler la tension de sortie. Alimenté par un adaptateur secteur de 12 VDC/5 A, sa puissance de sortie max. est de 50 W.



La partie haute tension du circuit d'un amplificateur à tubes est importante, mais aussi dangereuse : à l'entrée nous avons la tension du secteur – potentiellement mortelle, et en sortie, il délivre une tension continue assez élevée pour vous électrocuter.

L'alimentation la plus simple offrant la sécurité requise se compose d'un transformateur bien isolé, d'un redresseur et d'un condensateur de filtrage. Sa tension de sortie dépend de la tension du secteur, du transformateur, de la chute de tension aux bornes du redresseur, de la charge et de l'ondulation résiduelle. Ce type de montage fournit souvent la haute tension d'amplificateurs à tubes. Malheureusement les transformateurs du commerce ont souvent un rapport fixe, et la tension de sortie est trop haute ou trop basse, même si de nombreux amplificateurs s'en accommodent.

Nous utiliserons un adaptateur secteur de 12 V et un convertisseur CC/CC sur mesure pour obtenir jusqu'à 200 V. Ainsi, il n'y a pas de liaison directe avec le secteur, et la basse tension CC d'entrée pourra être employée pour les chauffages.

Nous présentons ici un résumé des informations complètes – théoriques et pratiques – que le concepteur de ce projet a rassemblées sur une page *Elektor Labs*. Si vous êtes juste intéressé par des notions de base et la construction de ce convertisseur 12 VCC/200 VCC, cet article répon-

dra à votre attente. Si les considérations et calculs théoriques et pratiques à aborder pour construire un convertisseur CC/CC *push-pull* et son transformateur vous intéressent, suivez le lien [1].

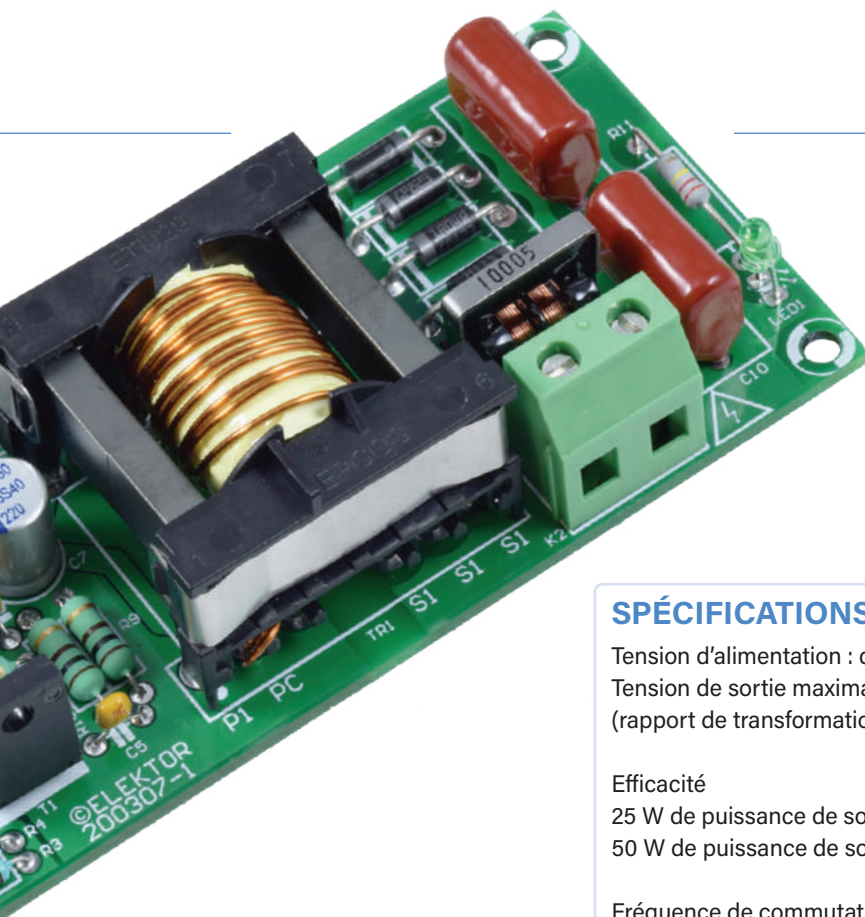
Fonctionnement du convertisseur CC/CC

Le schéma du convertisseur CC/CC est présenté à la **figure 1**. Pour faciliter la réalisation, nous utilisons des composants traversants, hormis un CI en boîtier CMS SO-8 : un UCC28089 (IC1), oscillateur *push-pull* avec contrôle du temps mort monté du côté primaire. Les étages de sortie peuvent absorber 1 A et fournir 0,5 A et sont idéaux pour piloter des MOSFET. L'absence de boucle d'asservissement dans le schéma implique l'absence d'instabilité et de bruit induits par la commande MLI. Le rapport cyclique est maximal, c.-à-d. que le temps mort entre deux mises en conduction de chacun des MOSFET est réglé au minimum absolu (voir ci-dessous). La tension de sortie redressée au secondaire est presque continue : la capacité de filtrage nécessaire est faible. L'UCC28089 est limité en intensité, mais le seuil de 0,725 V de limitation du courant est relativement élevé. La perte de puissance dans le *shunt* mesurant le courant à travers les MOSFET est trop élevée et influence notablement le rendement global.

À 5 A, (limite que nous avons fixée pour ce circuit), cela équivaudrait à $5 \text{ A} \times 0,725 \text{ V} = 3,625 \text{ W}$! Il faudrait une résistance *shunt* de forte valeur et de puissance nominale élevée, dans ce cas 5 W au moins. Avec 12 V, 50 W de puissance de sortie et un rendement de 86 %, cela équivaudrait à une perte de rendement de 7 %. Une façon de réduire cette perte dans le *shunt* est d'utiliser un diviseur de tension (R3 et R4) à partir de la tension d'alimentation pour décaler un peu l'entrée de détection de courant.

Le potentiomètre P1 règle la fréquence de l'oscillateur de l'UCC28089 (200 à 560 kHz env.). La fréquence de commutation est la moitié de celle-ci, soit 100 à 280 kHz. Selon la fiche technique, la résistance passante $R_{DS(on)}$ des MOSFET TK30A06N1 est de 15 mΩ max. ($V_{GS} 10 \text{ V}$), donc presque négligeable. Ils ont une très faible capacité de transfert inverse de 33 pF et de faibles temps de commutation ($t_{on}/t_{off} 21/28 \text{ ns}$). De plus, la capacité d'entrée de 1050 pF est inférieure à celle de la plupart des MOSFET de $R_{DS(on)}$ identique. À puissance maximale, aucun refroidissement auxiliaire des transistors n'est nécessaire, mais rester longtemps à la puissance maximale est déconseillé.

Dans un convertisseur *push-pull*, l'énergie est directement transférée vers le secondaire. Lorsqu'un MOSFET est conducteur, l'autre est coupé et l'énergie est directement trans-



INFOS SUR LE PROJET

Mots clés

alimentation, convertisseur CC/CC, amplificateur à tubes, haute tension, composants traversants, transformateur maison

Niveau

débutant – **connaisseur** – expert

Temps

8 h environ

Outils

outils de soudure, petite panne pour la soudure du SO-8

Cost

45 € environ

SPÉCIFICATIONS

Tension d'alimentation : de 9 à 14 VCC
Tension de sortie maximale : 350 V
(rapport de transformation max.)

Efficacité

25 W de puissance de sortie 88 %

50 W de puissance de sortie 86 %

Fréquence de commutation

100/150/280 kHz P1 min/milieu/max

Courant à vide 12 VDC
300/190/120 mA P1 min/milieu/max

Une charge élevée empêchera le convertisseur de démarrer. Ce convertisseur a été conçu pour les amplificateurs à tubes où la charge sur la haute tension est très faible à la mise sous tension !

férée. Un temps mort est nécessaire entre les commutations pour éviter que l'enroulement primaire ne soit court-circuité. Si les deux MOSFET conduisaient en même temps, les champs magnétiques des deux primaires s'annihileraient mutuellement entraînant un courant extrêmement élevé, principalement limité par la résistance série des enroulements primaires, les MOSFET, le *shunt*, les pistes de cuivre et l'alimentation de 12 V CC. Les résistances *shunt* brûleraient et les MOSFET aussi

si le court-circuit durait ne serait-ce que le temps d'un léger chevauchement. Un fusible de 5 A protège donc l'alimentation de 12 V. Un avantage du convertisseur *push-pull* est que le courant de crête à travers les MOSFET n'est que légèrement supérieur au courant de charge moyen du côté primaire (courant que l'adaptateur CA doit fournir). Un courant de crête faible dans les MOSFET réduit les pertes par conduction et améliore le rendement du convertisseur.

Le transformateur

Le transformateur est la partie la plus délicate de ce convertisseur CC/CC ; pour un premier prototype, il doit être fabriqué à la main. À 150 kHz, la puissance de sortie peut théoriquement être supérieure à 170 W en utilisant un corps de bobine ETD29 [2] et du matériau N97, mais il y a aussi des pertes dans le cuivre. Ce transformateur n'a pas d'entrefer. Cela réduit le nombre de spires des enroulements (primaires et secondaire) et facilite sa

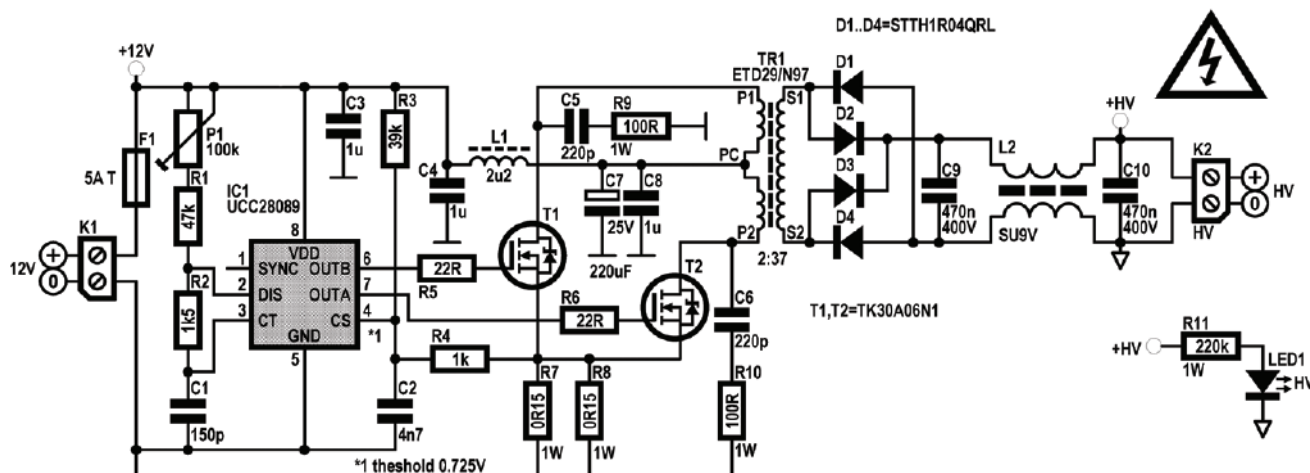


Figure 1. Schéma de principe du convertisseur CC/CC.

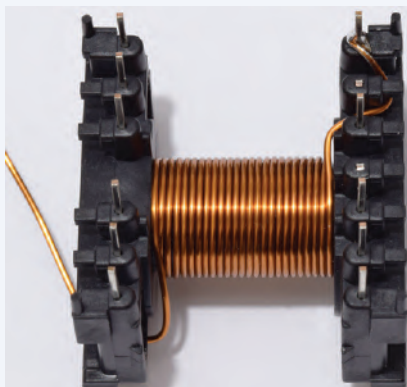


Figure 2a. Première couche secondaire.

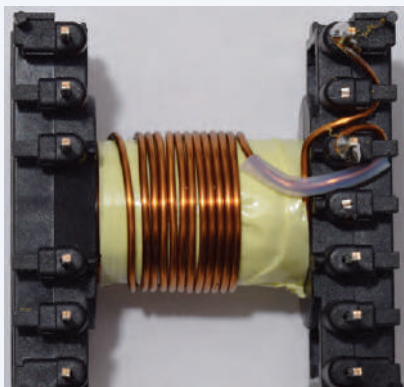


Figure 2b. Deuxième couche secondaire.

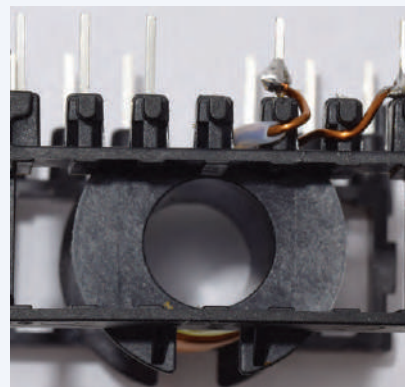


Figure 2c. Bobinage secondaire soudé.

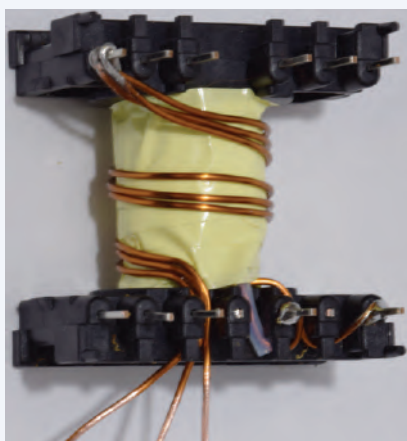


Figure 2d. Premier enroulement primaire, notez les trois fils en parallèle.

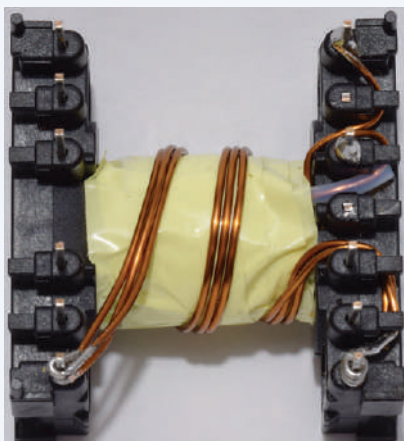


Figure 2e. Premier primaire, avant la soudure.

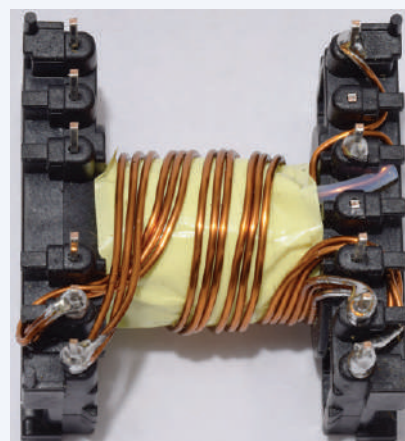


Figure 2f. Deuxième primaire ajouté, transformateur prêt.

Figure 2. Construction du transformateur.

construction. L'absence d'entrefer implique une inductance plus élevée et un meilleur couplage entre les enroulements. Le même fil convient pour tous les enroulements : du Ø 0,7 mm s'enroule facilement autour du corps de bobine et permet compter les tours. L'idée est que le rapport de transformation détermine la tension de sortie. Pour un convertisseur CC-CC *push-pull*, c'est le

rapport entre le nombre de spires du primaire et celui du secondaire. Ici, nous avons deux primaires de deux tours chacun et un seul secondaire (37 tours). Avec une tension primaire de 12 V, un rapport de transformation de 2/37 donnerait théoriquement une tension au secondaire de 222 V. Comme aucun transformateur n'est idéal, il fournira une tension de sortie plus faible pour une charge donnée.

La tension de sortie étant élevée, la chute de tension aux bornes du redresseur et du filtre est négligeable. Pour pouvoir modifier le transformateur fini, par ex. si l'écart de la tension de sortie est plus élevé que prévu, il est logique de commencer par les enroulements primaires et de les isoler avec un ruban spécial et des manchons isolants. L'enroulement secondaire sera bobiné par-dessus et

UN PEU DE THÉORIE DES TRANSFORMATEURS

La tension induite dans une bobine est conforme à la loi de Faraday (simplifiée) :

$$E = N \cdot B \cdot A / t$$

où

E tension [V].

N nombre de tours

B densité de flux [T]

A surface de la bobine [m²]

$$t = T/2 = 1 / 2f$$

Dans un convertisseur *push-pull*, les tensions appliquées aux enroulements primaires sont des ondes presque carrées. En une demi-période, l'induction du noyau varie de +B_{max} à -B_{max} par enroulement, et vice versa. Les

enroulements sont en opposition de phase. Donc l'amplitude de l'induction vaut 2 * B_{max} et la tension induite est :
E = N * 2 * B_{max} * A * 2f

Pour l'un des enroulements primaires, on obtient alors l'équation suivante :
NP = EP * 10⁴ / (4 * f * B_{max} * A)
avec la surface A en cm² (d'où le 10⁴)

TAILLE DU NOYAU ET PUISSANCE MAXIMALE DE SORTIE

Ce sujet reste la partie la plus difficile de la conception d'un convertisseur CC/CC utilisant un transformateur.

Sur l'internet, on trouve tout sur le calcul des transformateurs, même des calculateurs complets. La conception d'un transformateur devient très facile.

Mais la plupart des sites passent sous silence le calcul de la taille du noyau et se réfèrent à des tableaux similaires pour toutes sortes de noyaux et corps de bobines tels que Exx, EExx, EFxx, EFDxx, Elxx, ETDxx et EERxx.

En général, les tableaux sont triés par puissance max., mais la fréquence de travail est souvent absente. Pour connaître la taille du noyau, il y a une formule qui utilise le produit $WaAc$ (multiplication de la surface de la section du noyau Ac et de la surface de la fenêtre disponible pour les enroulements Wa). Dans les formules, il faut entrer

des facteurs tels que la constante de topologie (liée au type de convertisseur), la densité de courant (liée à l'élévation max. de température permise) et le facteur d'utilisation de la fenêtre. Mais ce n'est pas un calcul exact, il y a trop de dépendances.

Autrefois, on trouvait chez Block des kits de construction de transformateurs. Un kit contenait un petit rouleau de film isolant, des manchons isolants, deux petits cartons pour définir l'entrefer, un corps de bobine, deux demi-noyaux et deux clips. Bien sûr, il fallait se procurer du fil de cuivre ailleurs. La boîte contenait également un dépliant intitulé « Berechnungsbogen für Schaltnetzteil-Übertrager EB » (fiche de calcul pour transfos d'alimentation à découpage). Elle donnait des formules pour calculer la taille minimale du noyau, les tours et le diamètre du fil pour le primaire et

le secondaire. À l'époque, le matériau du noyau était N27. Le gros avantage du N97 est la diminution des pertes du noyau : 300 kW/m³ au lieu de 920 kW/m³ (à 100 kHz/200 mT/100 °C). Voici la formule de calcul de la taille min. du noyau :

$$\text{taille min. du noyau [mm]} = 4,7 * 106 * \frac{\text{puissance de sortie totale max.}}{\text{fréquence [W/Hz]}}$$

Selon cette formule, la puissance max. à 150 kHz pour un noyau de 5350 mm³ est de 170 W, c'est pourquoi j'ai dit que le noyau ETD29 était plus grand que le strict nécessaire.

Si quelqu'un sait adapter la formule, en connaît une similaire (meilleure) ou une qui donne un aperçu du calcul de la taille du noyau plus précis, je le remercie de partager ses connaissances.

le nombre de tours pourra être modifié lors d'un essai préliminaire. Nous avons procédé ainsi pour fabriquer le premier prototype de transformateur. Le second prototype, avec l'enroulement secondaire à l'intérieur et les deux primaires à l'extérieur présentait de meilleures caractéristiques que le premier (voir [1]), de sorte que seul le second transformateur est décrit ici.

Construction du transformateur

Pour que le transformateur soit facile à reproduire, nous avons pris le plus petit modèle ETD de corps de bobine (son noyau est plus gros que nécessaire pour sortir 60 W environ au rendement théorique de 100 %).

Pour assurer l'orientation correcte du transformateur sur le circuit imprimé, il faut couper les broches 8 et 10 telles que numérotées sur le corps de bobine TDK/Epcos. Examinez la sérigraphie du circuit imprimé pour être sûr de couper les bonnes broches. Sur le circuit imprimé, les plots du primaire et du secondaire sont bien séparés, tout comme les sorties du secondaire. À l'origine, il y a 13 broches sur un corps de bobine ETD29, il y a déjà un espace entre les broches 3 et 4. Une borne de l'enroulement secondaire a deux connexions possibles. Selon le nombre de tours et l'épaisseur du fil de cuivre utilisé, il faudra peut-être plus d'une couche et l'extrémité de l'enroulement sera soit plus proche du côté opposé, soit du même côté que le départ.

C'est pourquoi les broches 4, 5, 6 et 9 sont connectées sur le circuit imprimé. La broche 7 est l'autre borne du secondaire. Toujours commencer le secondaire par celle-ci.

Les broches 1 et 13 sont les connexions du 1er enroulement primaire, les broches 2 et 12 celles du 2^e. Sur le circuit imprimé, les noms sont placés à côté du transformateur. P1/PC pour le 1^{er} enroulement primaire, P2/PC pour le 2^e. PC signifie connexion commune des deux primaires. S1 et S2 sont les connexions du secondaire.

Pour réaliser le secondaire, à partir de la broche 7, enrouler 24 spires autour du corps de bobine (fig. 2a) et isoler avec du ruban adhésif. Ensuite, enrouler la deuxième couche de 13 spires pour atteindre 37 tours, le total de l'enroulement secondaire (fig. 2b). Isoler la 2^e connexion avec un morceau de manchon en PTFE, voir la fig. 2c. Il aurait été préférable d'isoler également la 1^{ère} connexion du secondaire (isolant absent sur les photos de TR2). Isoler ensuite la 2^e couche secondaire avec du ruban adhésif. Ne pas chauffer trop longtemps les fils lors du raccordement aux broches du corps de bobine. Cela ferait fondre le plastique du corps. C'est pourquoi il faut bien étamer les extrémités des fils avant de les enrouler autour des broches !

Ensuite, le premier tour du premier primaire commence à la broche 1. Utiliser un couteau aiguisé pour retirer l'isolant de chaque fil et étamer déjà cette extrémité avant de l'enrouler

sur une broche. Avec une pince, serrer l'extrémité du fil autour de la broche avant de faire deux tours sur le corps de bobine. Ajuster le fil, le faire un peu trop long pour atteindre la broche opposée, ne pas le connecter tout de suite. Faire de même avec deux fils de plus (trois fils sont connectés en parallèle pour le primaire, voir fig. 2d). Ensuite, retirer l'isolant des trois extrémités, les étamer et les serrer autour de la broche pour obtenir un aspect optimal de l'enroulement (bien plat et réparti uniformément, fig. 2e). Répéter cette procédure pour le deuxième primaire, en commençant par la broche 2, voir fig. 2f. La fig. 3 montre le transformateur avec tous les enroulements terminés. N'oubliez pas de mettre le noyau !

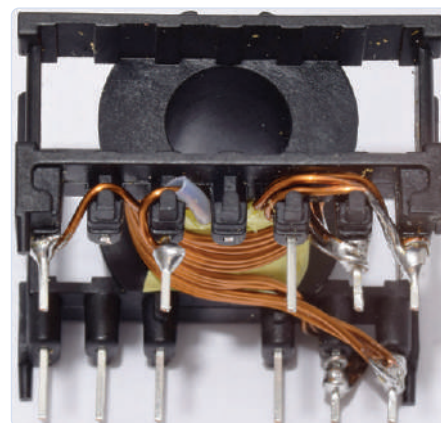


Figure 3. Vue sur les broches du transformateur fini.



LISTE DES COMPOSANTS

Résistances

R1 = 47 k Ω
 R2 = 1,5 k Ω
 R3 = 39 k Ω
 R4 = 1 k Ω
 R5, R6 = 22 Ω
 R7, R8 = 0,15 Ω , 1 W
 (Multicomp Pro MCKNP01SJ015KA10)
 R9, R10 = 100 Ω , 1 W
 (Multicomp Pro MCKNP01SJ0101A10)
 R11 = 220 k Ω , 1 W, 350 V
 P1 = 100 k Ω pot., réglage par le haut

Condensateurs

C1 = 150 pF, 50 V, pas de 5 mm
 C2 = 4,7 nF, 50 V, pas de 5 mm
 C3, C4, C8 = 1 μ F, 50 V, pas de 5 mm
 C5, C6 = 220 pF, 100 V, pas de 5 mm
 C7 = 220 μ F, 25 V, 20 %, aluminium-polymère,
 pas de 3,5 mm, D 8 mm, ESR 15 m Ω
 A750KS227M1EAAE015 Kemet
 C9, C10 = 470 nF, 400 V, 5 %, polypropylène,
 pas de 15 mm (19x9 mm max.)

Inductances / Transformateurs

TR1 = 2x noyau ETD29, N97, sans entrefer,
 B66358G0000X197 TDK/Epcos
 TR1 = corps de bobine, ETD29,
 B66359W1013T001, TDK/Epcos

TR1 = 2x clips,
 B66359S2000X000, TDK/Epcos
 L1 = 2,2 μ H, 10 %, 5,6 ARMS, 21 m Ω ,
 pas de 5 mm, D 8,5 mm max,
 RLB0913-2R2K Bourrelets
 L2 = self d'arrêt mode commun 500 μ H, 1 A,
 0,3 Ω , SU9V-10005 Kemet

Semi-conducteurs

D1, D2, D3, D4 = STTH1R04QRL
 LED = 3 mm, verte
 T1, T2 = TK30A06N1, TO-220SIS
 IC1 = UCC28089D, SOIC-8

Autres

K1 = bornier à 2 voies, pas de 5,08 mm
 K2 = bornier à 2 voies, pas de 7,68 mm
 F1 = fusible à cartouche, 5x20 mm, 5 A
 temporisé, avec porte-fusible idoine,
 500 V/10 A et couvercle
 TR1 = ruban isolant électrique, film polyester,
 3M 1350 12 MM
 TR1 = fil de cuivre, 0,71 mm pour tous les
 enroulements, 49 tours au total, 3 m
 TR1 = gaine de protection en PTFE, diam.
 intérieur 1,02 mm min.
 Pro Power STFE 18 CLR, 10 cm
 Circuit imprimé 200307-1 v1.1

Fabrication du convertisseur CC/CC

Les fichiers Gerber et de perçage pour la fabrication du circuit imprimé (**fig. 4**) sont disponibles à l'adresse [3]. Commandez le circuit imprimé auprès de votre fournisseur préféré. Les photos du prototype montrent sa version 1.0, la version 1.1 apporte une petite correction en sérigraphiant « +HV » et « 0 » à côté de la borne à vis K2.

Commencer par souder le petit CMS IC1 (SO-8) sur le circuit imprimé. Pour gagner de la place, les résistances d'1 W (R7-R10) côté primaire sont miniaturisées (corps 10 mm x 3,5 mm). Les modèles de stocks anciens ou achetés au petit bonheur pourraient ne pas convenir. Utilisez la référence donnée dans la liste des composants. C7 doit être du type aluminium polymère, n'utilisez pas une version électrolytique ordinaire, il risque fort de brûler ! Le modèle de la liste des composants supporte un courant d'ondulation de 4,42 A à 100 kHz et a une très faible résistance série de 15 m Ω (100 kHz/20 °C). Le montage des autres composants est assez simple. La résistance 1 W de la LED (R11) indiquant la présence de la haute tension (HV) doit supporter au moins 350 V. Sa taille peut être plus grande. Notez que le circuit imprimé ne répond pas à la classe II d'isolation secteur, mais l'espace-ment des composants et pistes est accru, en particulier pour les pistes côté HT/sortie. Le transformateur (s'il est correctement construit) fournit la haute tension avec une très bonne isolation galvanique. Pour une commutation à 150 kHz, régler P1 à mi-course.

Pour utiliser ce convertisseur CC/CC, assurez-vous qu'il n'y a pas d'objets électriquement conducteurs à proximité des composants sous haute tension. Plus la distance est élevée, mieux c'est !

La tension de sortie peut être modifiée en ajustant le nombre de tours du secondaire, mais aussi en changeant le nombre de tours des primaires, si la fréquence de commutation correcte est respectée. Changer C1 (et R2) pour une fréquence d'oscillation différente modifie le temps mort. Avant de changer les valeurs, regardez bien les formules de la fiche technique de l'UCC28089.

Concevoir un convertisseur CC/CC *push-pull* est assez compliqué, le calcul et la construction du transformateur « sur mesure » nécessaires le sont plus encore. Comme indiqué plus haut, pour en savoir plus, voir [1] ; vous

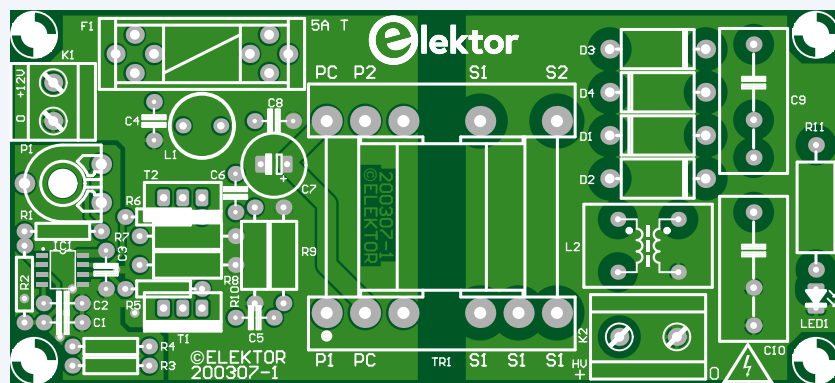
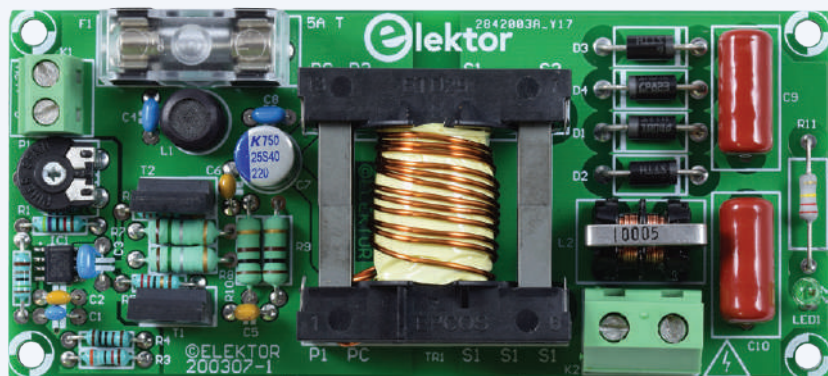


Figure 4. Circuit imprimé.





PRODUITS

> M. van der Veen, *Vanderveen Trans Tube Amplifiers*, Elektor (e-book)

www.elektor.fr/vanderveen-trans-tube-amplifiers-e-book

> M. van der Veen, *Designing Tube Amplifiers*, Elektor (e-book)

www.elektor.fr/designing-tube-amplifiers-ebook



pourrez y partager avec d'autres lecteurs vos questions, commentaires, suggestions et expériences concernant ces convertisseurs ou la conception de transformateurs. 

(200583-04)

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur
(ton.giesberts@elektor.com).

Contributeurs

Idee, conception, auteur : **Ton Giesberts**

Rédaction : **Luc Lemmens**

Illustrations : **Ton Giesberts, Patrick Wielders**

Mise en page : **Giel Dols**

Traduction : **Yves Georges**

LIENS

- [1] La page Elektor Labs de ce projet : www.elektormagazine.fr/labs/12v-200v-dc-dc-converter-for-valve-amplifiers
- [2] Fiche technique du corps de bobine TDK : https://product.tdk.com/info/en/documents/data_sheet/80/db/fer/etd_29_16_10.pdf
- [3] Téléchargements de ce projet : www.elektormagazine.fr/200583-04

Publicité

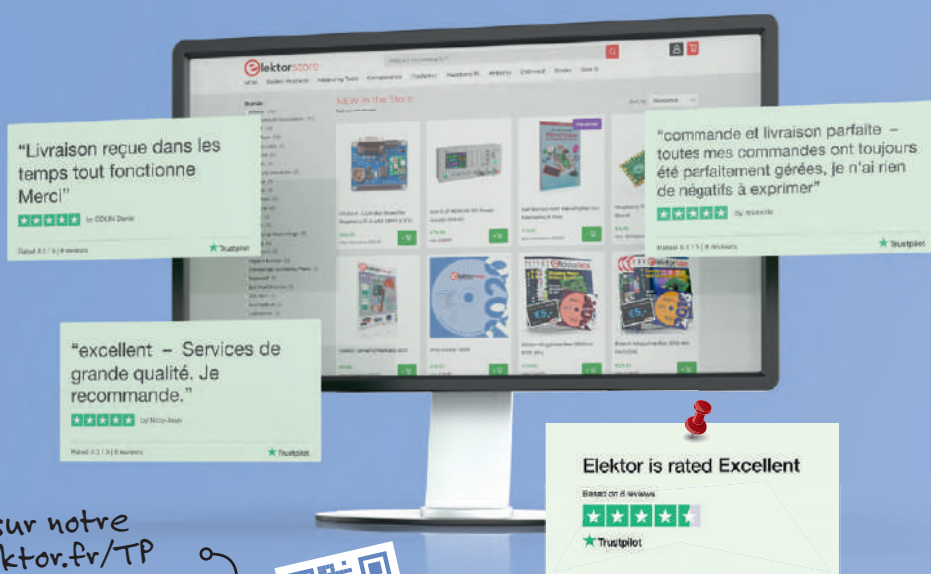
Ils nous font confiance, n'est-ce pas ?

Nous aimons l'électronique et les projets, et nous faisons tout notre possible pour répondre aux besoins de nos clients.

Le magasin Elektor :
Jamais cher,
toujours surprenant

Consultez d'autres avis sur notre page Trustpilot : www.elektor.fr/TP

Vous pouvez également vous faire votre propre opinion en visitant notre Elektor Store, www.elektor.fr



elektor
design > share > sell