



régulateur de tension linéaire $\pm 40\text{ V}$

une alimentation de qualité pour l'amplificateur de puissance
Fortissimo-100... et d'autres !

Ton Giesberts (Elektor Labs)

Pour ceux qui refusent toute forme d'alimentation à découpage (SMPS) pour l'amplificateur de puissance haut de gamme Fortissimo-100, voici un régulateur de tension linéaire et symétrique de plus de 500 VA, caractérisé par une faible tension de chute, un courant de sortie élevé et une excellente stabilité, le tout obtenu à partir de composants discrets et disponible sous forme d'un kit !

Sachant que presque tous les amplificateurs de puissance audio de haute performance bénéficient d'une tension d'alimentation stabilisée, cette alimentation linéaire est spécifiquement conçue pour une tension de sortie symétrique de $\pm 40\text{ V}$ et des courants de crête de 13 A (15 A de crête réalisable). À titre d'exemple, le courant moyen tiré par un ampli Fortissimo-100 pilotant une charge de $3\ \Omega$ est d'environ 4 A par régulateur.

Considérations relatives à la conception

L'amplificateur de puissance audio haut de gamme Elektor Fortissimo-100 [1] fonctionne mieux avec une alimentation régulée de $\pm 40\text{ V}$, ce qui exclut une alimentation simple composée d'un transformateur, d'un redresseur (à pont) et d'un ensemble de condensateurs à réservoir épais. Une alimentation à découpage peut ne pas convenir non plus, mais c'est

plus une question de goût personnel, car le SMPS800RE fait du bon travail. Cependant, il peut y avoir des raisons impérieuses de préférer un régulateur linéaire construit uniquement à partir de composants traversants, comme l'amplificateur lui-même.

Pour que le régulateur de tension puisse fonctionner correctement, la tension d'entrée du circuit doit dépasser la tension de sortie d'au moins 3 V, voire plus en cas de fluctuations de la tension du réseau. Par rapport à la plupart des SMPS (avec une large plage de tension d'entrée AC), un régulateur linéaire est moins efficace et un grand transformateur de puissance est nécessaire avec une puissance nominale plus élevée que sans le régulateur linéaire.

Aujourd'hui, la plupart des transformateurs de puissance (secteur) disponibles sur le marché sont marqués par des tensions secondaires normalisées. Pour créer directement $\pm 40\text{ VDC}$,

un transformateur de 2× 30 V est le choix le plus pratique. La tension continue à vide qui en résulte est généralement d'environ 42 VCC, ce qui dépend en grande partie de la régulation interne du transformateur et de la chute de tension dans les diodes de redressement. En pratique, la tension de sortie à vide d'un transformateur de puissance est toujours supérieure de quelques pourcents à la tension de charge. La tension secondaire standard immédiatement supérieure est de 35 V, ce qui donne environ 49 V à 50 VCC ou plus avec une faible charge. Près de 52 V ont été mesurés dans un dispositif d'essai Labs. Avec une charge de 8 Ω sur l'amplificateur de puissance, le régulateur ne nécessite qu'une petite capacité de lissage. L'avantage de la tension d'ondulation plus importante est une perte de puissance un peu plus faible dans le(s) régulateur(s) d'alimentation. Mais, à des

impédances plus faibles, l'ondulation ne doit pas dépasser la tension de chute (43 V à 10 A). Lors d'un test en laboratoire, un transformateur toroïdal de 2× 35 V, 300 VA avec 20 000 µF de capacité de lissage s'est avéré assez robuste pour alimenter le régulateur. La puissance sinusoïdale maximale (proche de l'écrêtage) à 20 Hz et 0,1% THD+N dans une charge de 3 Ω ne provoquait que 1,8 V_{crête} de chute à la sortie de l'alimentation. Attention, la puissance de sortie continue est alors de 227 W dans la charge de 3 Ω et le transformateur de 300 VA est légèrement surchargé. Ceci, cependant, n'était pas suffisant pour déclencher la protection du Fortissimo-100.

Théorie du fonctionnement

La base de tout régulateur de tension consiste à mesurer la tension de sortie, à la comparer à un niveau de référence et à contrôler

l'étage de sortie en conséquence pour contrer tout changement. Bien que le présent circuit régulateur suive ce concept, sa particularité est sa tension de référence secondaire beaucoup plus élevée, qui, à un peu plus de 33 V, est relativement proche de la tension de sortie cible de 40 V. Plus la tension de référence est élevée, 33,6 V ici, plus il reste de gain à un circuit (simple) pour augmenter en même temps la réjection des ondulations de la tension d'entrée et la régulation de la tension de sortie.

En termes simples, le circuit se compose d'une tension de référence, d'un amplificateur différentiel et d'un tampon de sortie. En outre, une protection de la zone de fonctionnement sûr (SOA, *Safe Operating Area*) est ajoutée aux deux régulateurs. Examinons la **figure 1** pour explorer le fonctionnement du régulateur positif.

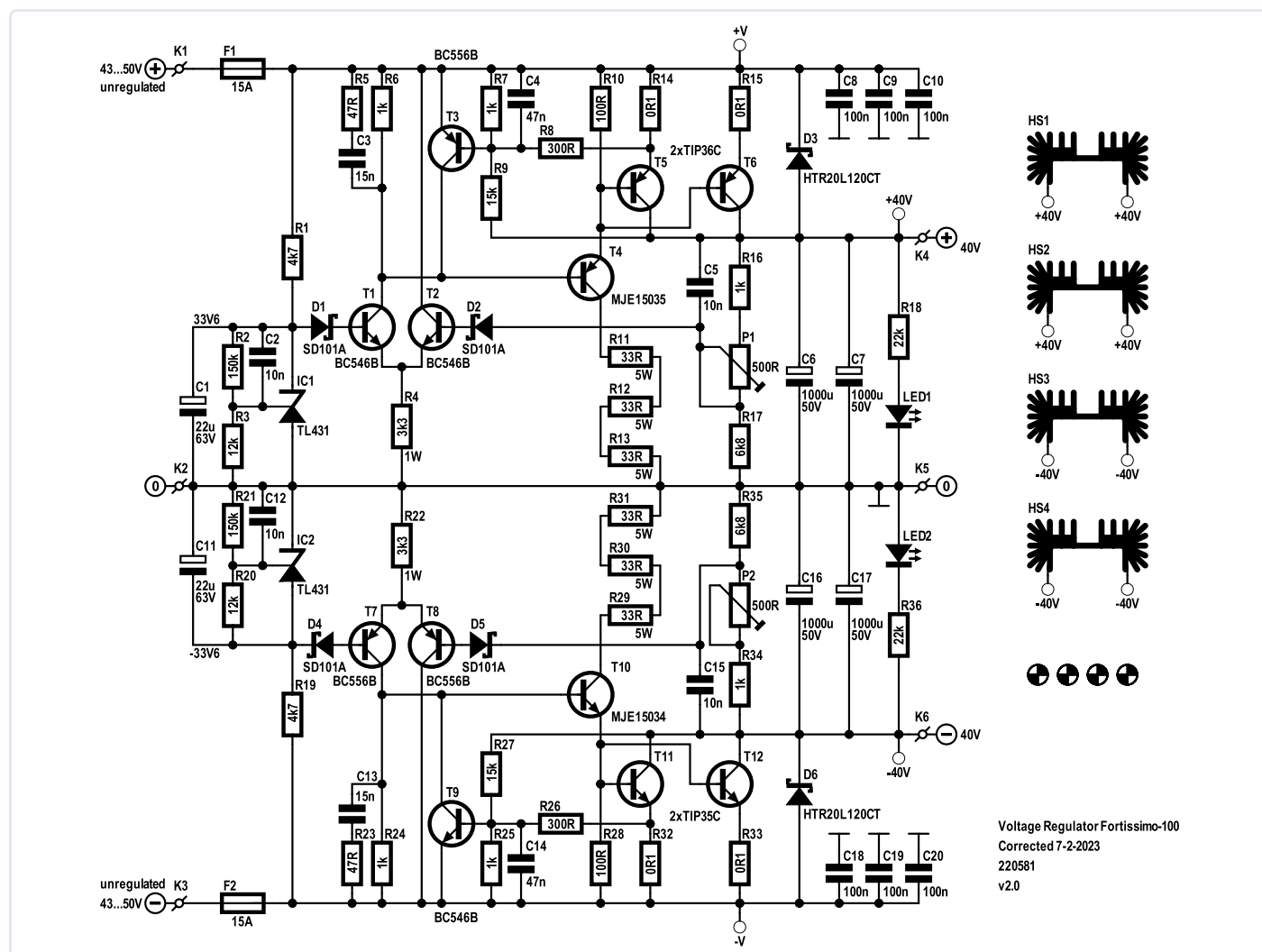


Figure 1. Schéma du régulateur de tension linéaire ±40 V, principalement, mais pas exclusivement, destiné à l'amplificateur de puissance audio Elektor Fortissimo-100.

Tension de référence

La tension de référence n'est pas créée par une diode Zener, car les diodes Zener standard ont généralement des coefficients de température considérables. Les versions spéciales compensées en température sont difficiles à trouver de nos jours, en particulier les versions 33 V. Au lieu d'une diode Zener, une référence de tension shunt de précision réglable de type TL431 est utilisée avec une tension de travail maximale de 36 V. Sa tension de référence interne (c'est-à-dire la tension de référence primaire du régulateur de 40 V) est typiquement de 2,495 V. Le courant de cathode à travers le TL431 est réglé par la résistance R1. Si la tension d'entrée est comprise entre 43 V et 50 V, le courant est réglé entre 1,9 mA et 3,4 mA, ce qui s'est avéré suffisant pour créer une tension de référence stable de 33,9 V. Cette tension est définie par les résistances R2 et R3 :

$$V_{KA} = 2,495 \times (1 + R2 / R3) + I_{REF} \times R2$$

Le courant d'ajustement du TL431, I_{REF} , est typiquement de 1,8 μ A, donc la tension de référence est théoriquement de 33,95 V. Cependant, cette valeur est spécifiée pour un courant cathodique de 10 mA, alors que dans le prototype ce courant est plus faible, de même que la tension : 33,55 V a été mesuré. Le TL431 est découplé par C1 tandis que C2 améliore la stabilité globale.

Amplificateur différentiel

L'amplificateur différentiel est minimaliste, composé de T1 et T2 avec R4 comme source de courant. La tension à la base de T1 est relativement constante. Il en va de même pour la tension aux bornes de R3, même si la tension varie légèrement, en fonction de la température, aux bornes de la jonction base-émetteur de T1 et aux bornes de D1. Les diodes Schottky D1 et D2 limitent une inversion (tout juste concevable) des tensions base-émetteur de T1 et T2.

Pour réduire l'influence de la chute de tension à travers chaque diode, tout en affectant peu la tension de décalage d'entrée de la paire différentielle en raison des changements de température, la paire est positionnée l'une à côté de l'autre sur le circuit imprimé, de sorte que les deux jonctions de diodes sont à la même température. Quelques millivolts, ou même des dizaines de millivolts de décalage également causés par des différences entre T1 et T2 n'ont pas d'effet réel sur la tension de

Spécifications

Plage de tension d'entrée	52 VDC (utilisation à faible consommation) à 43 VDC
Plage de tension de sortie d'environ	38,9 VDC à 41,4 VDC (théoriquement) 38,6 VDC à 41,1 VDC (mesurée)
Tension de chute à 6 A	42 V
Tension de chute à 9,5 A	43 V
Tension de chute à 13,5 A	44 V
Courant max.	15 A crête (demi-sinusoïdale) 4,8 A en moyenne
Protection SOA	15 A à 45 VDC à l'entrée
Rejet de l'ondulation	>60 dB (à une charge de 5 ADC)
Courant d'entrée à vide	27 mA (@ 52 VDC entrée)
Assemblage	à partir du kit d'Elektor ; ajouter le transformateur de puissance, le redresseur (à pont) et les condensateurs.

sortie beaucoup plus élevée de 40 V. Même un changement de décalage de 30 mV signifie moins de 1% de variation dans la tension de sortie, ce qui est sans conséquence pour le fonctionnement de l'amplificateur de puissance.

La tension aux bornes de la résistance de collecteur R6 est utilisée pour piloter l'étage de sortie. R5 et C3, ainsi que C4 et C5, forment la compensation de fréquence pour maintenir le régulateur stable, même lorsque la protection SOA T3/R7/R8/R9 est active. Le diviseur de potentiel R16-P1-R17 mesure la tension de sortie et constitue le retour négatif pour l'amplificateur différentiel. Pour compenser toutes les tolérances, la plage de tension de sortie de P1 est approximativement de 38,6 V à 41,1 V. Avec le curseur du potentiomètre à mi-course, la tension de sortie sera assez proche de 40 V.

Étage de sortie

Bien qu'il existe des transistors capables de gérer le courant de sortie maximum requis lorsqu'une tension d'entrée constante de 50 V est appliquée au régulateur, deux transistors, T5/T6, sont choisis pour :

- limiter la puissance dissipée par transistor à des niveaux sûrs ;
- augmenter la plage de surcharge ;
- obtenir une tension de chute plus faible et une plus grande zone de fonctionnement sûre.

La mise en œuvre de ces critères réduit le risque d'endommagement de l'étage de sortie en cas de surcharge ou même de court-circuit. Les transistors de puissance PNP les plus grands sont de type TIP36C (NPN TIP35C dans le régulateur négatif) et sont facilement disponibles auprès de plusieurs fabricants. Les transistors PNP sont utilisés dans le régulateur positif pour maintenir la chute de tension minimale de l'étage de sortie aussi basse que

possible, les courants de base s'écoulant vers la masse.

La tension de chute est la somme de la tension de saturation des transistors et de la chute de tension dans les résistances d'émetteur. Une valeur plus faible pour les résistances d'émetteur réduirait un peu la tension de chute, mais les courants traversant les deux transistors peuvent dévier trop fortement. Lorsque les courants de collecteur sont élevés, le gain des transistors est très faible et un transistor supplémentaire (T4) est nécessaire pour tamponner la sortie de l'étage différentiel. Pour éviter que la tension de saturation de T4 n'augmente la tension de chute de l'étage de sortie, son collecteur est relié à la masse par une connexion de résistances en série. Cela limite la dissipation de puissance de T4 ainsi que son besoin en dissipateur thermique. Cependant, il y a un problème : si, pour une raison quelconque, la tension d'entrée tombe en dessous de la tension de chute, T4 conduira en permanence et la dissipation dans sa résistance de collecteur sera assez élevée (16 W) pour une résistance totale de 100 Ω et une tension d'entrée appliquée de 40 V. Cela ne devrait cependant jamais se produire, c'est pourquoi trois résistances de 5 W sont utilisées pour éviter un burnout de cette résistance de collecteur.

Un avantage supplémentaire de cette résistance de collecteur est qu'elle limite les courants de base de T5 et T6, et agit donc comme une simple limite de courant. La véritable protection, cependant, est formée par T3. La chute de tension à travers la résistance d'émetteur de T5 proportionnelle au courant de sortie est mesurée par le diviseur de tension R7/R8, ce qui alimente la base de T3. Lorsque, par exemple, le courant à travers R14 est d'environ 7 A, le courant de sortie total est de 14 A. Le courant de sortie le plus élevé attendu est un peu plus de 12 A_{crête} avec une charge de 3 Ω sur la sortie de l'amplificateur.

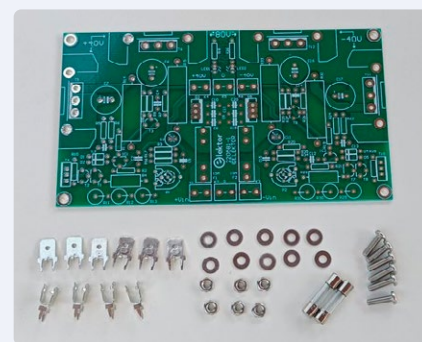
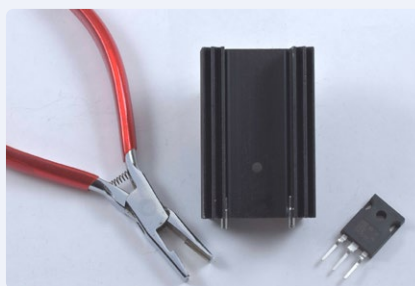
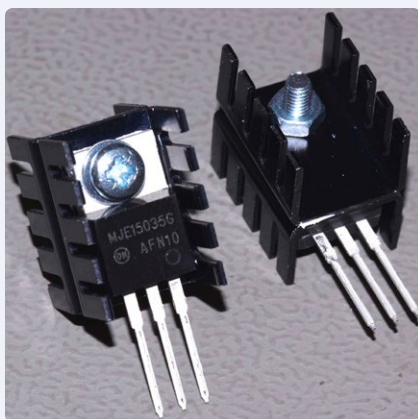


Figure 2. Quelques clichés du *manuel d'assemblage* rédigé pour le projet de régulateur de tension linéaire ± 40 V. Ce manuel complète cet article et peut être téléchargé gratuitement sur le site [2].

T3 commencera à conduire, et, à cause de R9, même plus tôt, en fonction de la tension aux bornes de T5. Le niveau exact auquel T3 est polarisé dépend de la température et sera plus faible à mesure que la température augmente, une protection supplémentaire, et, avec de la musique, ce ne sera pas un problème. D3 protège l'étage de sortie en cas de coupure soudaine de la tension d'entrée ou de court-circuit. T5 et T6 sont découplés avec une paire de condensateurs de 1 000 μ F, à faible ESR. La LED1 indique la présence de la tension de sortie de +40 V.

Bien que sur les photos il semble que D6 soit monté à l'envers sur le circuit imprimé, en fait, D6 et D3 peuvent être montés dans les deux sens et fonctionner correctement. Cela est possible, car la diode HTR20L120CT dans son boîtier TO220 à trois pattes contient deux diodes avec une cathode commune connectée à la patte du milieu.

L'entrée du régulateur est protégée par un fusible de 15 A. Le courant RMS (moyenne quadratique) maximum doit être pris en compte, et au courant sinusoïdal demi-onde maximum, la valeur RMS est $I_{\text{crête}}/\sqrt{2}$, c'est-à-dire 6,5 A. Cependant, à des fréquences très basses comme 16,4 Hz (si vous aimez la musique d'orgue), le courant de crête peut durer plusieurs millisecondes. Pour s'assurer que le fusible ne saute pas dans de telles conditions, on utilise ici un type 15 A qui, en prime, réduit également la chute de tension. Si beaucoup plus de puissance est absorbée par l'amplificateur et/ou le régulateur, le fusible primaire lié au transformateur de puissance saute. Le fusible de 15 A sautera de façon fiable s'il y a un court-circuit soudain en aval.

Kit, manuel de construction et nomenclature

La boutique Elektor propose un kit complet pour le projet de régulateur de tension linéaire [2], contenant le circuit imprimé (PCB) et

toutes les pièces listées dans la liste des composants. Ce superbe kit évite, nous l'espérons, les efforts des lecteurs pour acheter des pièces (électroniques et mécaniques) et faire fabriquer des PCB sur commande.

Le kit est accompagné d'un *manuel d'assemblage* de douze pages donnant des instructions pas à pas pour assembler le projet et obtenir un résultat parfait. Le manuel est riche en dessins et en photographies, dont

quelques-uns sont présentés dans la **figure 2**.

Il contient également de nombreux conseils et détails sur la précision des soudures, le positionnement des composants, la manipulation des outils et les travaux mécaniques simples nécessaires pour réussir la construction du projet.

Comme le régulateur proposé n'est pas une alimentation complète sans les circuits habituels d'un transformateur de puissance,

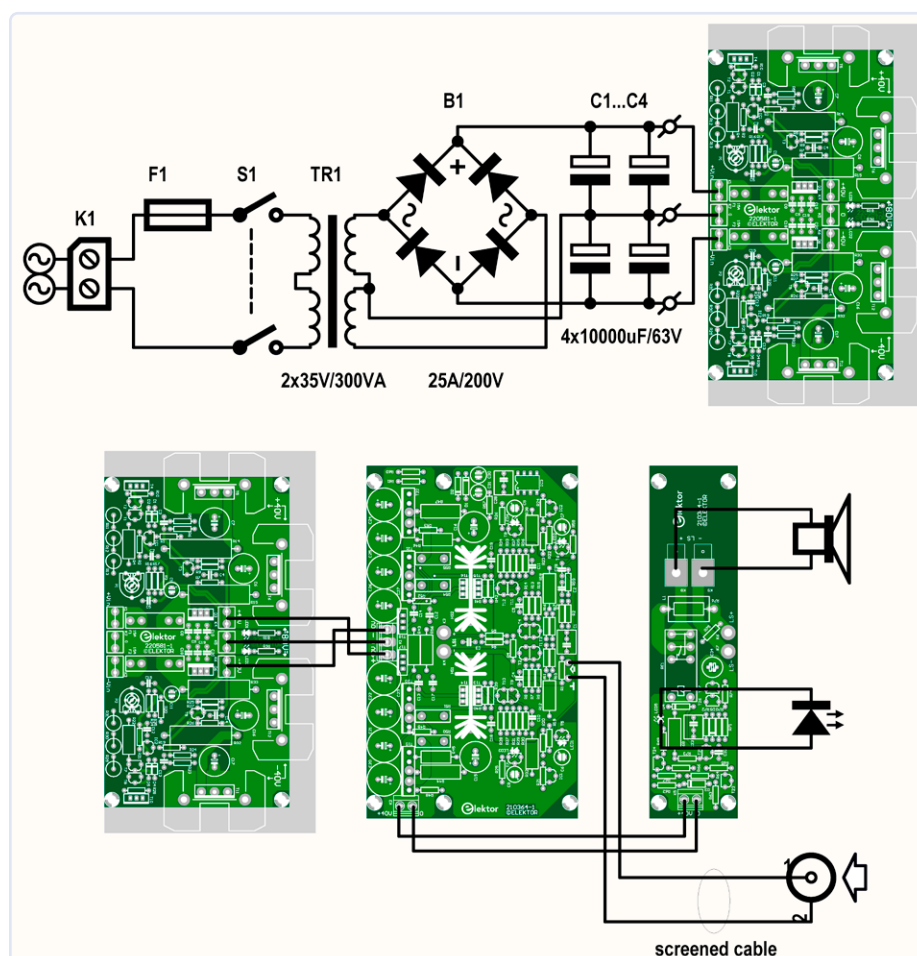
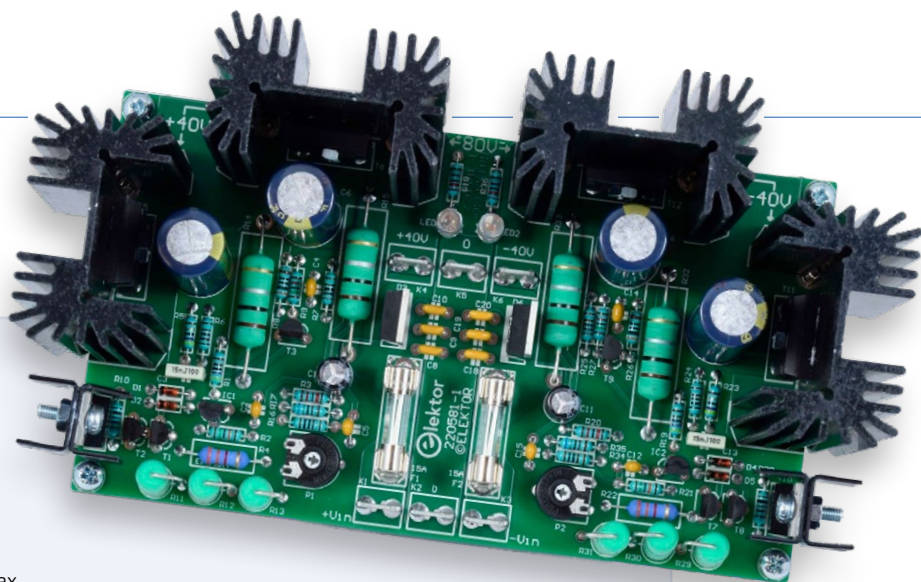


Figure 3. Proposition de schéma pour le circuit d'alimentation non régulé (en haut) et schéma de câblage du combo régulateur de tension linéaire ± 40 V / Fortissimo-100 (en bas).



Liste des composants

(Liste du contenu du kit Elektor)



Résistances

R1, R19 = 4,7 k Ω , 1%, 0,6 W
R2, R21 = 150 k Ω , 1%, 0,6 W
R3, R20 = 12 k Ω , 1%, 0,6 W
R4, R22 = 3,3 k Ω , 5%, 1 W, 5x12 mm max.
R5, R23 = 47 Ω , 1%, 0,6 W
R6, R7, R16, R24, R25, R34 = 1 k Ω , 1%, 0,6 W
R8, R26 = 300 Ω , 1%, 0,6 W
R9, R27 = 15 k Ω , 1%, 0,6 W
R10, R28 = 100 Ω , 1%, 0,6 W
R11, R12, R13, R29, R30, R31 = 33 Ω , 5%, 5 W, diam. 6,4 mm max. (axial, monté verticalement)
R14, R15, R32, R33 = 0,1 Ω , 10%, 5 W (7,8x25 mm max.)
R17, R35 = 6,8 k Ω , 1%, 0,6 W
R18, R36 = 22 k Ω , 1%, 0,6 W
P1, P2 = 500 Ω , 0,15 W, trimmer, réglage supérieur (Piher PT10LV10-501A2020-S)

Condensateurs

C1, C11 = 22 μ F, 20%, 63 V, pas 2,5 mm, diam. 6,3 mm max.
C2, C5, C12, C15 = 10 nF, 10%, 100 V, céramique X7R, pas 5 mm
C3, C13 = 15 nF, 5%, 100 V, PET, pas de 5 mm
C4, C14 = 47 nF, 10%, 50 V, céramique X7R, pas de 5 mm
C6, C7, C16, C17 = 1000 μ F, 20%, 50 V, pas de 5 mm, D 12,5 mm, 5000 h @ 105 °C (EEUFC1H102L, Panasonic)
C8, C9, C10, C18, C19, C20 = 100 nF, 10%, 100 V, pas de 5 mm, céramique X7R

Semi-conducteurs

D1, D2, D4, D5 = SD101A SB00018/D8, DO-35
D3, D6 = HTR20L120CT, TO-220
LED1, LED2 = LED, verte, 5 mm (T-1 $\frac{3}{4}$)
T1, T2, T9 = BC546B, TO-92
T3, T7, T8 = BC556B, TO-92
T4 = MJE15035, TO-220
T5, T6 = TIP36C, TO-247
T10 = MJE15034, TO-220
T11, T12 = TIP35C, TO-247
IC1, IC2 = TL431BCLPG, TO-92

Divers

K1, K2, K3, K4, K5, K6 = languette Faston PCB, deux broches, trou diam. 1,4 mm, 6,35x0,83 mm
F1, F2 = Clips de fusible, 20 A, Littelfuse 01000020Z, pour fusible de 5x20 mm
F1, F2 = Fusible, cartouche, à action rapide, 15 A, 5x20 mm
HS1, HS2, HS2, HS4 = dissipateur thermique MC33271 (pour T5/T6/T11/T12), 2,7 °C/W
4x dissipateur thermique type FK231SA220, 24 K/W (pour T4/T10, deux chacun)
10x rondelle M3, lisse, acier
6x vis M3, 10 mm, tête cylindrique
6x écrou M3

d'un redresseur et de condensateurs de lissage ajoutés, un schéma suggéré, accordé à l'ampli Fortissimo-100, est donné dans la **figure 3**. Les pièces pour cette section ne sont pas incluses dans le kit du régulateur de tension linéaire ± 40 V et doivent être achetées localement.

Mesures de sécurité

Bien que la construction du projet et son utilisation pratique soient détaillées dans le manuel de construction, nous nous sentons obligés d'imprimer l'avis de sécurité suivant dans cet article également :

Les grands dissipateurs sont connectés à la tension de sortie de ± 40 V, et **non** à GND. Toujours retirer la tension d'entrée avant de toucher ou de travailler sur le régulateur !

Résultats obtenus

Chez Elektor Labs, une configuration de test a été construite pour vérifier le fonctionnement de l'amplificateur Fortissimo-100 en

combinaison avec le régulateur de tension linéaire ± 40 V décrit ici. Les deux unités ont été construites à partir de leurs kits Elektor respectifs. Les ingrédients clés suivants ont été utilisés dans la section d'alimentation non régulée :

- > 1x Transformateur de puissance TX-146-300-235 (300 VA, 2x 35 VAC secondaire).
- > 2x Condensateurs électrolytiques de 10 000 μ F par rail de tension d'alimentation (c'est-à-dire 20 mF sur chaque rail).
- > 1x Pont redresseur de type SB352SBPC, 35 A/200 V (25 A/100 V suffit).

Aux faibles niveaux de sortie du Fortissimo-100, le spectre de fréquence montre que de très petites améliorations peuvent être obtenues par rapport à l'alimentation à découpage SMPS800RE (**figure 4**). Le graphique montre le spectre de fréquence à 1 W dans 8 Ω . Les effets de commutation du SMPS800RE ont disparu, mais le reste

du spectre est essentiellement le même. La performance globale du combo est impressionnante, avec une distorsion harmonique plus bruit aussi faible que :

- > 0,0007% (1 kHz, 1 W, 8 Ω , B = 22 kHz)
- > 0,0013% (1 kHz, 1 W, 8 Ω , B = 80 kHz)

Le régulateur de tension linéaire ± 40 V décrit ici et disponible en kit chez Elektor est une bonne alternative aux meilleures, mais abordables, alimentations à découpage sur le marché aujourd'hui, et devrait satisfaire ceux d'entre vous qui s'opposent, même légèrement, au concept ou à la performance de « ces @#!%^ de commutateurs ». N'hésitez pas à rejoindre les discussions techniques sur le régulateur de tension linéaire ± 40 V sur la page Elektor Labs créée pour le projet [3].

VF : Maxime Valens — 220581-04

Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

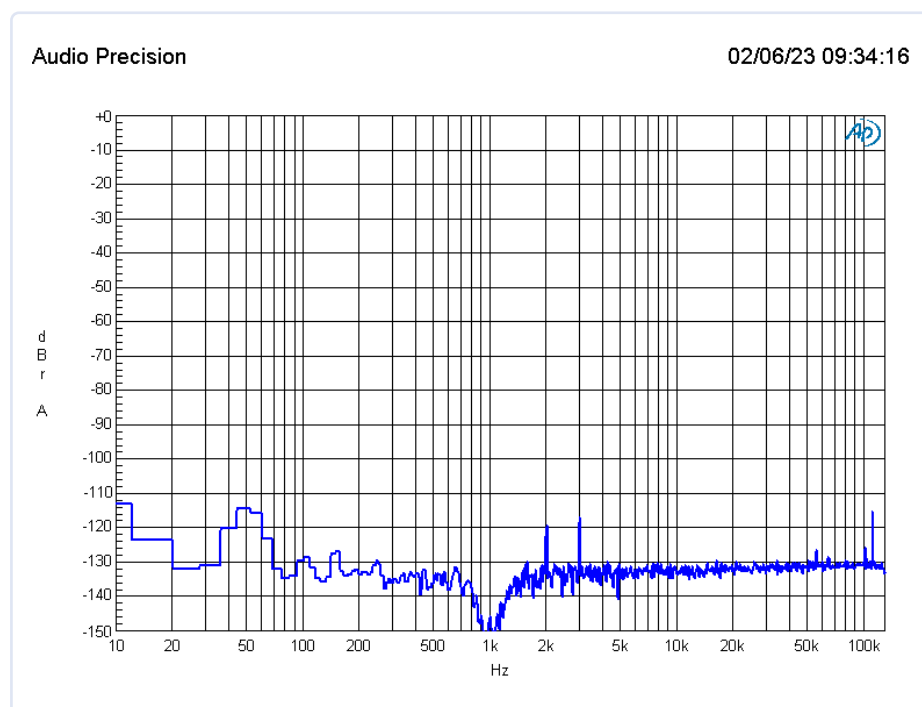


Figure 4. Voici les résultats ! Spectre de sortie du Fortissimo-100 fournissant 1 W dans 8 Ω et alimenté par le régulateur de tension linéaire ± 40 V (carte n° 220581-1).



Produits connexes

- > **Kit de régulateur de tension linéaire ± 40 V d'Elektor**
<https://www.elektor.fr/elektor-40-v-linear-voltage-regulator-kit>



LIENS

- [1] Amplificateur haut de gamme Fortissimo-100 : <https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-283/61180>
- [2] Elektor Kit de régulateur de tension linéaire ± 40 V : <https://www.elektor.fr/elektor-40-v-linear-voltage-regulator-kit>
- [3] Le projet de régulateur de tension linéaire ± 40 sur Elektor : <https://www.elektormagazine.fr/labs/linear-voltage-regulator-for-fortissimo-100>