



±40 V lineaire spanningsregelaar

alternatieve voeding voor de Fortissimo-100 eindversterker... en andere!

Ton Giesberts (Elektor Labs)

Voor degenen die hun wenkbrauwen fronsen bij welke schakelende voeding (SMPS) dan ook voor de high-end Fortissimo-100 eindversterker, biedt dit project een lineaire, symmetrische 500+ VA spanningsregelaar die wordt gekenmerkt door een gering spanningsverlies, een hoge uitgangsstroom en een uitstekende stabiliteit – en dat allemaal met discrete componenten en verkrijgbaar als bouwpakket!

Bijna alle hoogwaardige audio-eindversterkers hebben baat bij een gestabiliseerde voedingsspanning. Met dat in gedachten is deze lineaire voeding specifiek ontworpen voor een symmetrische uitgangsspanning van ± 40 V en piekstroom van 13 A (15 A piek is ook nog haalbaar). Voorbeeld: een Fortissimo-100 versterker die een 3Ω -belas-

ting aanstuurt, trekt een gemiddelde stroom van ongeveer 4 A per regelaar.

Ontwerpoverwegingen

De Elektor Fortissimo-100 high-end audio-eindversterker [1] bleek het beste te werken met een geregelde ± 40 V-voeding, waardoor een 'rudimentaire' voeding met een trans-

formator, een (brug-)gelijkrichter en een set dikke buffercondensatoren is uitgesloten. Een schakelende voeding voldoet misschien ook niet helemaal, maar dat is meer een kwestie van persoonlijke smaak omdat de SMPS800RE zijn werk goed doet. Toch kunnen er dwingende redenen zijn om de voorkeur te geven aan een lineaire regelaar die uitsluitend met through-hole componenten is opgebouwd – net zoals de versterker zelf. Om de spanningsregelaar zonder dropouts (spanningsdips aan de uitgang) te laten werken, moet de ingangsspanning van de schakeling minstens 3 V hoger zijn dan de uitgangsspanning, of zelfs meer in het geval van schommelingen in de netspanning. Vergelijken met de meeste SMPS-voedingen (met een breed AC-ingangsbereik) is een lineaire regelaar minder efficiënt en is er een grote voedingstransformator nodig met een hoger vermogen dan zonder lineaire regelaar. Tegenwoordig hebben de meeste kant-en-klare voedingstransformatoren standaard

secundaire spanningen. Om direct ± 40 VDC te maken, is een transformator van 2×30 V de voor de hand liggende keuze. De resulterende onbelaste gelijkspanning is meestal ongeveer 42 VDC, grotendeels afhankelijk van de interne regeling van de transformator en de spanningsval over de gelijkrichtdiodes. In de praktijk is de onbelaste spanning van een voedingstransformator altijd een paar procent hoger dan in belaste toestand. De eerstvolgende hogere secundaire standaardspanning is 35 V, wat resulteert in ongeveer 49...50 VDC of meer bij een laag uitgangsvermogen – we hebben bijna 52 V gemeten in een testopstelling in ons lab.

Wanneer de eindversterker met 8Ω wordt belast, heeft de regelaar slechts een kleine afvlakcondensator nodig. Het voordeel van de grotere rimpelspanning is een iets lager vermogensverlies in de voedings-

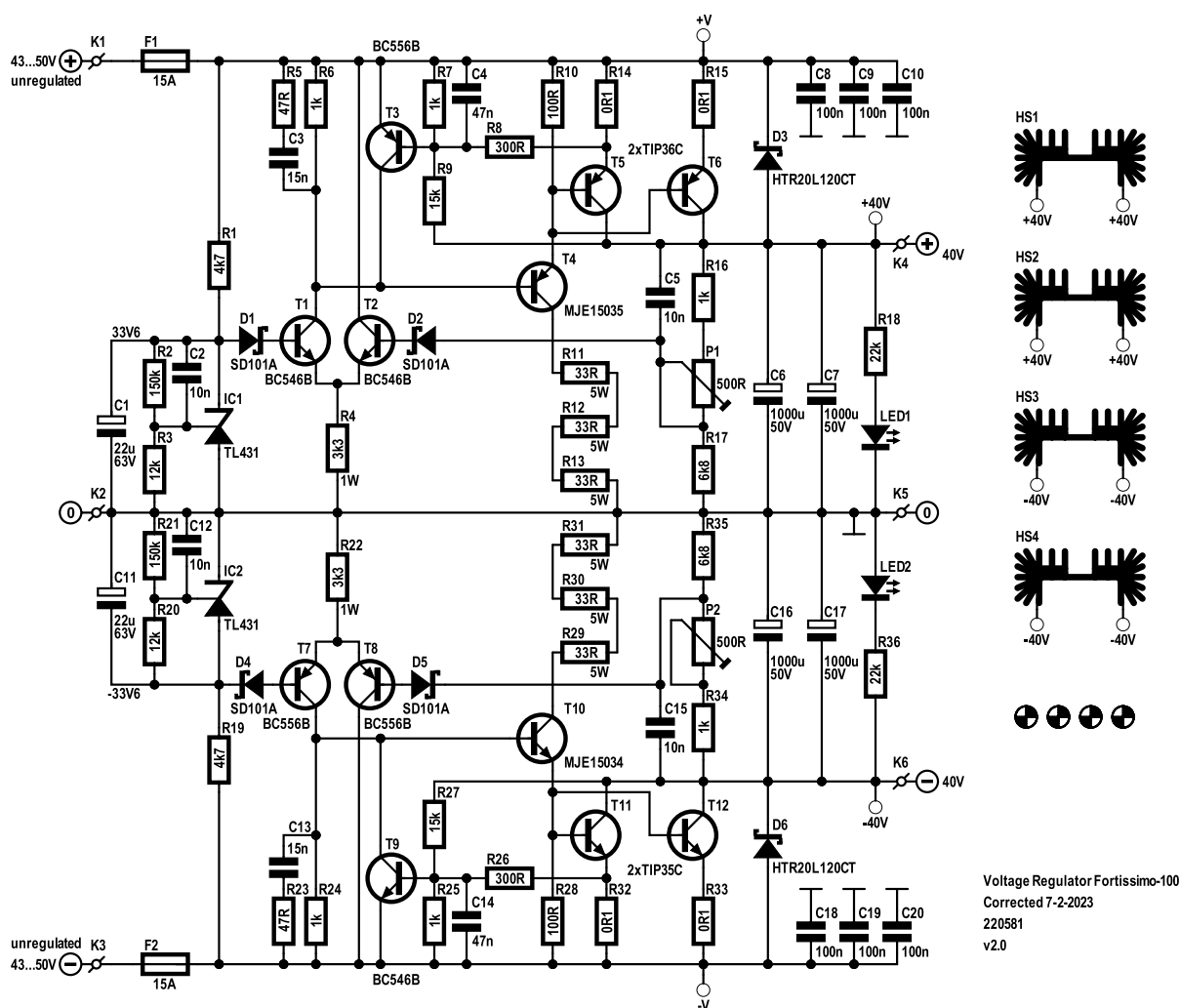
regelaar(s). Maar bij lagere impedanties mag de rimpel niet boven de dropout-spanning uitkomen (43 V bij 10 A). In een lab-test bleek een ringkerntransformator (toroïde) van 2×35 V/300 VA met een afvlakelco van $20.000 \mu\text{F}$ stevig genoeg om de regelaar te voeden. Het maximale (bijna clippende) sinusvermogen bij 20 Hz en 0,1% THD+N in een belasting van 3Ω veroorzaakte een dropout van slechts $1,8 V_{\text{piek}}$ aan de uitgang van de voeding. Let wel: het continue uitgangsvermogen is dan 227 W in de 3Ω -belasting en de 300VA-transformator is dan licht overbelast. Dit was echter niet genoeg om de beveiliging van de Fortissimo-100 te activeren.

De theorie achter de schakeling

De basis van elke spanningsregelaar is de meting van de uitgangsspanning, waarna deze wordt vergeleken met een referentieniveau en

de eindtrap overeenkomstig wordt bijgesteld om eventuele veranderingen tegen te gaan. Hoewel de hier behandelde regelschakeling dat concept volgt, is er één duidelijk verschil: de veel hogere secundaire referentiespanning, die met iets meer dan 33 V relatief dicht bij de beoogde uitgangsspanning van 40 V ligt. Hoe hoger de referentiespanning – 33,6 V in deze schakeling – hoe meer versterking er overblijft voor een (eenvoudige) schakeling om zowel de rimpelonderdrukking van de ingangsspanning als de regeling van de uitgangsspanning te verbeteren.

Eenvoudig gezegd bestaat de schakeling uit een referentiespanning, een verschilversterker en een uitgangsbuffer. Bovendien is aan beide regelaars een SOA-beveiliging (*safe operating area*) toegevoegd. We werpen een blik op **figuur 1** om de werking van de **positieve** regelaar te onderzoeken.



Figuur 1. Schema van de ± 40 V lineaire spanningsregelaar, voornamelijk maar niet uitsluitend bedoeld voor de Elektor Fortissimo-100 audio-eindversterker.

Referentiespanning

De referentiespanning wordt niet geleverd door een zenerdiode, omdat standaardzeners meestal een aanzienlijke temperatuurcoëfficiënt hebben. Speciale temperatuurgecompenseerde versies zijn tegenwoordig moeilijk verkrijgbaar, vooral 33V-exemplaren. In plaats van een zenerdiode wordt een instelbare precisie-shunt spanningsreferentie van het type TL431 gebruikt met een maximale werkspanning van 36 V. Zijn interne referentiespanning (dat wil zeggen de primaire referentiespanning van de 40V-regelaar) bedraagt typisch 2,495 V. De kathodestroom door de TL431 wordt ingesteld met weerstand R1. Als deingangsspanning tussen 43 V en 50 V ligt, wordt de stroom ingesteld tussen 1,9 mA en 3,4 mA, wat voldoende bleek om een stabiele 33,9 V referentiespanning te creëren. Die 33,9 V wordt als volgt ingesteld met de weerstanden R2 en R3:

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

De instelstroom van de TL431, I_{REF} , bedraagt typisch 1,8 μ A, dus de referentiespanning is theoretisch 33,95 V. Dit is echter gespecificeerd bij een kathodestroom van 10 mA, terwijl in het prototype deze stroom lager is en de spanning dus ook: in de praktijk werd 33,55 V gemeten. De TL431 wordt ontkoppeld door C1, terwijl C2 de algehele stabiliteit verbetert.

Verschilversterker

De verschilversterker is minimalistisch en bestaat uit T1 en T2 met R4 als stroombron. De spanning op de basis van T1 is vrij constant. Hetzelfde geldt voor de spanning over R3, zelfs met de licht (met de temperatuur) variërende spanning over de basis/emitterjunctie van T1 en over D1. Schottky-diodes D1 en D2 beperken een (net voorstelbare) sperspanning over de basis/emitter-juncties van T1 en T2. Om de invloed van de spanningsval over elke diode te beperken en toch de ingangs-offsetspanning van het differentiële paar niet te veel te beïnvloeden door temperatuursveranderingen, worden ze tegen elkaar op de print gemonteerd zodat beide diode-overgangen dezelfde temperatuur hebben. Een paar millivolt – of zelfs enkele tientallen millivolt – offset die ook wordt veroorzaakt door verschillen tussen T1 en T2 heeft geen werkelijke invloed op de veel hogere 40V-uitgangsspanning. Zelfs een offsetverandering van 30 mV betekent minder dan 1% variatie in de

Specificaties in het kort

Ingangsspanningsbereik	52 VDC (low power) tot 43 VDC
Uitgangsspanningsbereik	ca. 38,9 VDC tot 41,4 VDC (theoretisch) 38,6 VDC tot 41,1 VDC (gemeten)
Dropout-spanning bij 6 A	42 V
Dropout-spanning bij 9,5 A	43 V
Dropout-spanning bij 13,5 A	44 V
Max. stroom	15 A piek (halve sinus) 4,8 A gemiddeld
SOAR-bescherming	15 A bij 45 VDC in
Rimpelonderdrukking	>60 dB (@ 5 ADC belasting)
Onbelaste ingangsstroom	27 mA (@ 52 VDC ingang)
Bouw	Elektor-kit; zelf toevoegen voedings- transformator, (brug)gelijkrichter, bufferelco's

uitgangsspanning, wat irrelevant is voor de werking van de eindversterker.

De spanning over collectorweerstand R6 wordt gebruikt om de eindtrap aan te sturen. R5 en C3 vormen samen met C4 en C5 de frequentiecompensatie om de regelaar stabiel te houden, zelfs met actieve SOA-beveiliging T3/R7/R8/R9. Spanningsdeler R16/P1/R17 meet de uitgangsspanning en vormt de negatieve terugkoppeling voor de verschilversterker. Om alle toleranties te compenseren, is het uitgangsbereik van P1 ongeveer 38,6 V tot 41,1 V. Met de loper van de trimpot in de middenstand zal de uitgangsspanning dicht bij 40 V liggen.

Uitgangstrap

Hoewel er transistoren zijn die de maximale uitgangsstroom aankunnen die loopt wanneer er een constante ingangsspanning van 50 V op de regelaar wordt gezet, zijn de twee transistoren T5 en T6 gekozen om:

- de vermogensdissipatie per transistor te beperken tot een veilig niveau;
- het overbelastingsbereik te vergroten;
- een lagere dropout-spanning en een groter veilig werkgebied te bereiken.

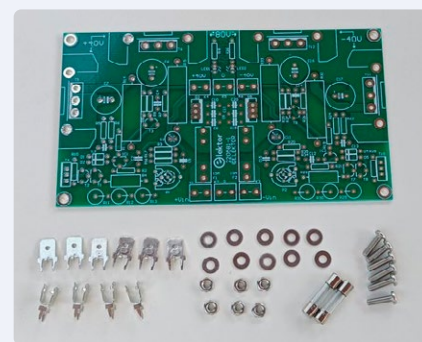
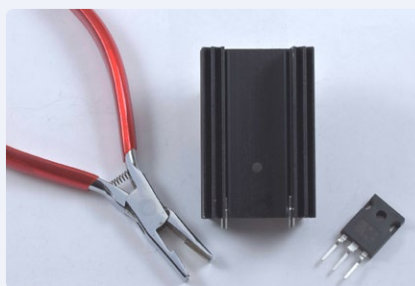
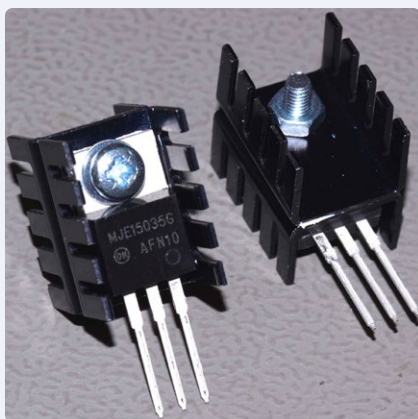
Het toepassen van deze criteria vermindert het risico op schade aan de eindtrap in geval van overbelasting of zelfs kortsluiting. De grotere PNP-eindtransistoren zijn van het type TIP36C (vergelijk de NPN-TIP35C in de negatieve regelaar) en zijn gemakkelijk verkrijgbaar bij diverse fabrikanten. PNP-transistoren worden gebruikt in de positieve regelaar om de minimale spanningsval van de eindtrap zo laag mogelijk te houden, waarbij de basisstromen naar massa lopen.

De dropout-spanning is de som van de verzadigingsspanning van de transistoren en de spanningsval over de emitterweerstand. Een lagere waarde voor de emitterweerstand

zou de dropout-spanning iets verlagen, maar de stromen door de twee transistoren kunnen te veel afwijken. Bij grote collectorstromen is de versterking van de transistoren erg laag en is een extra transistor (T4) nodig om de uitgang van de verschiltrap te bufferen. Om te voorkomen dat de verzadigingsspanning van T4 de dropout-spanning van de eindtrap verhoogt, is zijn collector via een serieschakeling van weerstanden verbonden met massa. Dit beperkt de vermogensdissipatie van T4 en het benodigde koellichaam. Er zit echter een addertje onder het gras: mocht – door welke oorzaak dan ook – de ingangsspanning onder de dropout-spanning komen, zal T4 permanent geleiden en zal de dissipatie in zijn collectorweerstand vrij hoog zijn (16 W bij 100 Ω totale weerstand en 40 V ingangsspanning). Dit zou echter nooit mogen gebeuren, vandaar dat er drie weerstanden van 5 W worden gebruikt om doorbranden van deze collectorweerstand te voorkomen.

Een bijkomend voordeel van deze collectorweerstand is dat hij de basisstromen van T5 en T6 beperkt en zo als een eenvoudige stroombegrenzing fungeert. De echte beveiliging wordt echter gevormd door T3. De uitgangsstroom wordt via spanningsdeler R7/R8 gemeten als de spanningsval over de emitterweerstand van T5, en deze stuurt de basis van T3 aan. Als bijvoorbeeld de stroom door R14 ongeveer 7 A is, is de totale uitgangsstroom 14 A. De grootste te verwachten uitgangsstroom bedraagt iets meer dan 12 A_{piek} met een 3 Ω -belasting aan de versterkeruitgang. T3 zal gaan geleiden, en – door R9 – zelfs eerder, afhankelijk van de spanning over T5. Het precieze niveau waarop T3 is ingesteld is temperatuurafhankelijk en zal lager zijn naarmate de temperatuur stijgt – een extra beveiliging, en met muziek zal dit geen probleem zijn.

D3 beschermt de eindtrap voor het geval de ingangsspanning plotseling wegvalt of wordt



Figuur 2. Enkele afbeeldingen uit de handleiding die is geschreven voor de kit van de ± 40 V lineaire spanningsregelaar. De handleiding is een aanvulling op dit artikel en kan gratis worden gedownload van [2].

kortgesloten. T5 en T6 zijn ontkoppeld met een paar lage-ESR-condensatoren van 1000 μ F. LED1 geeft de aanwezigheid van de +40V-uitgangsspanning aan.

Hoewel het op de foto's lijkt dat D6 verkeerd om op de print is gemonteerd, kunnen zowel D6 als D3 in beide richtingen worden gemonteerd en nog steeds correct functioneren. De HTR20L120CT-diode in zijn 3-benige TO220-behuizing heeft twee interne diodes met een gemeenschappelijke kathode die is verbonden met het middelste pootje van de component.

De ingang van de regelaar wordt beschermd door een zekering van 15 A. Er moet rekening worden gehouden met de maximale RMS-stroom (root mean square), en bij maximale halve sinusstroom is de RMS-waarde gelijk aan $I_{\text{piek}}/2$, dus 6,5 A. Bij zeer lage frequenties (zoals 16,4 Hz als je van orgelmuziek houdt) kan de piekstroom echter enkele milliseconden aanhouden. Om er zeker van te zijn dat de zekering onder zulke omstandigheden niet doorbrandt, is hier een 15A-type gebruikt, dat als bonus ook de spanningsval vermindert. Als er veel meer vermogen wordt afgenomen door de versterker en/of de regelaar, brandt de primaire zekering die is gekoppeld aan de voedingstransformator door. De 15A-zekering zal betrouwbaar doorbranden als er plotseling kortsluiting 'achter' de zekering ontstaat.

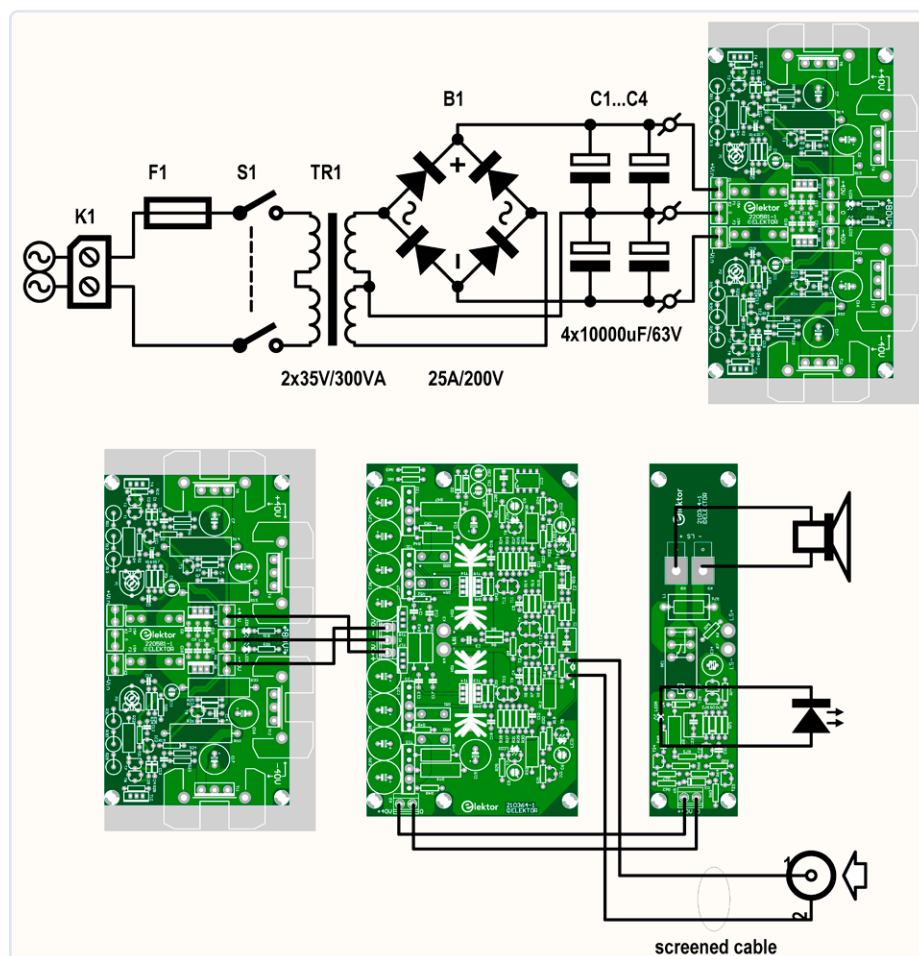
Kit, bouwbeschrijving en onderdelenlijst

De Elektor Store biedt een uitgebreide kit voor het project 'Lineaire spanningsregelaar' [2], met daarin de print en alle onderdelen die in de componentenlijst worden genoemd. Deze uitstekende kit bespaart lezers hopelijk moeite om onderdelen (elektronisch en mechanisch) te kopen en de print zelf te moeten (laten) maken.

Bij de kit zit een handleiding van 12 pagina's met stapsgewijze instructies om de voeding te bouwen en hopelijk tot een perfect resultaat te komen. De handleiding is rijk aan tekeningen en foto's, waarvan je er enkele kunt zien in **figuur 2**. Hij bevat ook veel tips en details over nauwkeurig solderen, het plaatsen van onderdelen, het gebruik van gereedschap en

eenvoudig mechanisch werk dat nodig is om het project te bouwen.

Aangezien de voorgestelde regelaar geen complete voeding is zonder de gebruikelijke voedingstransformator, gelijkrichter en afvlakcondensatoren, stellen we die – afgestemd op de Fortissimo-100 versterker – voor in **figuur 3**. De betreffende onderdelen zijn niet



Figuur 3. Voorgesteld schema voor de ongeregelde voeding (boven) en aansluiting van de ± 40 V lineaire spanningsregelaar op de Fortissimo-100 (onder).



Onderdelenlijst

(Inhoud van de Elektor-kit)

Weerstanden:

R1,R19 = 4k7, 1%, 0,6 W
R2,R21 = 150 k, 1%, 0,6 W
R3,R20 = 12 k, 1%, 0,6 W
R4,R22 = 3k3, 5%, 1 W, 5×12 mm max.
R5,R23 = 47 Ω, 1%, 0,6 W
R6,R7,R16,R24,R25,R34 = 1 k, 1%, 0,6 W
R8,R26 = 300 Ω, 1%, 0,6 W
R9,R27 = 15 k, 1%, 0,6 W
R10,R28 = 100 Ω, 1%, 0,6 W
R11,R12,R13,R29,R30,R31 = 33 Ω, 5%, 5 W, Ø 6,4 mm max. (axiaal, staand gemonteerd)
R14,R15,R32,R33 = 0,1 Ω, 10%, 5 W, 7,8×25 mm max.
R17,R35 = 6k8, 1%, 0,6 W
R18,R36 = 22 k, 1%, 0,6 W
P1,P2 = 500 Ω, 0,15 W, instelpotmeter liggend (Piher PT10LV10-501A2020-S)

Condensatoren:

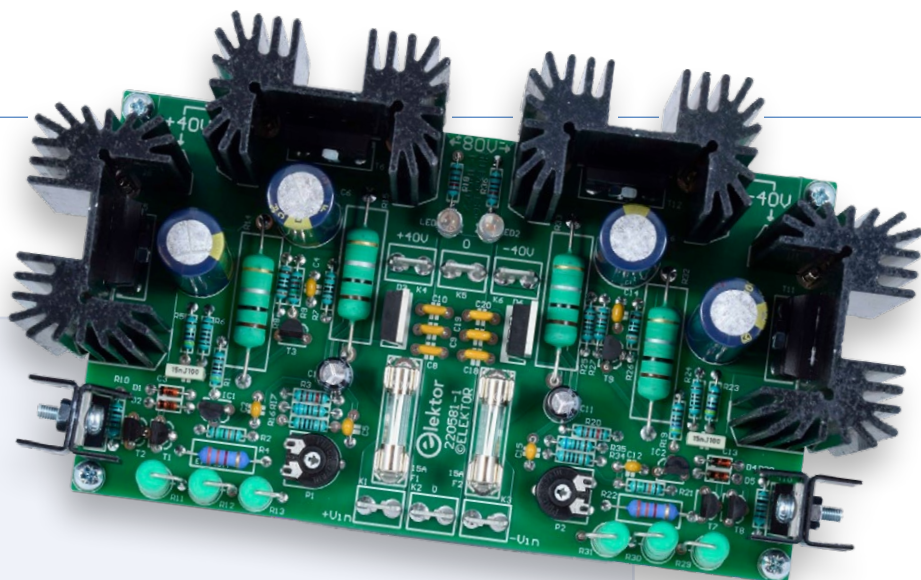
C1,C11 = 22 μ, 20%, 63 V, steek 2,5 mm, Ø 6,3 mm max.
C2,C5,C12,C15 = 10 n, 10%, 100 V, keramisch X7R, steek 5 mm
C3,C13 = 15 n, 5%, 100 V, PET, steek 5 mm
C4,C14 = 47 n, 10%, 50 V, keramisch X7R, steek 5 mm
C6,C7,C16,C17 = 1000 μ, 20%, 50 V, steek 5 mm, Ø 12,5 mm, 5000 h @ 105 °C (EEUFC1H102L, Panasonic)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

Halfgeleiders:

D1,D2,D4,D5 = SD101A SB00018/D8, DO-35
D3,D6 = HTR20L120CT, TO-220
LED1,LED2 = LED groen, 5 mm (T-1¾)
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

Diversen:

K1,K2,K3,K4,K5,K6 = Faston printconnector, 2-pin, gat, Ø 1,4 mm, 6,35×0,83 mm
F1,F2 = zekeringhouders, 20 A, Littelfuse 01000020Z, voor 5×20mm-zekering
F1,F2 = glaszekering snel 15 A, 5×20 mm
HS1,HS2,HS4 = koelprofiel MC33271 (voor T5/T6/T11/T12), 2,7 °C/W
4× koelprofiel type FK231SA220, 24 K/W (voor T4/T10, elk twee)
10× M3 sluitring, glad, staal
6× M3-schroef, 10 mm, platkop
6× M3 moer



inbegrepen in de kit van de ± 40 V lineaire spanningsregelaar; die zul je dus zelf moeten kopen.

Veiligheidsoverwegingen

Hoewel de constructie van het project en het praktische gebruik ervan gedetailleerd worden beschreven in de handleiding, voelen we ons verplicht om de volgende veiligheidsinformatie ook in dit artikel af te drukken:

De grote koellichamen zijn verbonden met de ± 40 V-uitgangsspanning, **niet** met GND. Verwijder altijd de ingangsspanning voordat je de regelaar aanraakt of eraan werkt!

In de praktijk

Bij Elektor Labs is een testopstelling gebouwd om de werking van de Fortissimo-100 versterker in combinatie met de hier beschreven ± 40 V lineaire spanningsregelaar uit te proberen. Beide apparaten werden opgebouwd met hun respectievelijke Elektor-kits. De volgende

onderdelen werden gebruikt voor de ongeregelde voeding:

- > 1 voedingstransformator TX-146-300-235 (300 VA, 2x35 VAC secundair)
- > 2x 10.000 μ F elco per voedingsrail (dat wil zeggen 20 mF voor elke rail)
- > 1 SB352SBPC-type bruggelijkrichter, 35 A/200 V (25 A/100 V is acceptabel)

Bij lage uitgangsniveaus van de Fortissimo-100 laat het frequentiespectrum zien dat er marginale verbeteringen haalbaar zijn in vergelijking met de SMPS800RE schakelende voeding (**figuur 4**). De grafiek toont het frequentiespectrum bij 1 W in 8 Ω . De schakelartefacten van de SMPS800RE zijn verdwenen, maar de rest van het spectrum is in wezen hetzelfde. De algehele prestaties van de combinatie zijn indrukwekkend, met harmonische vervorming plus ruis van slechts:

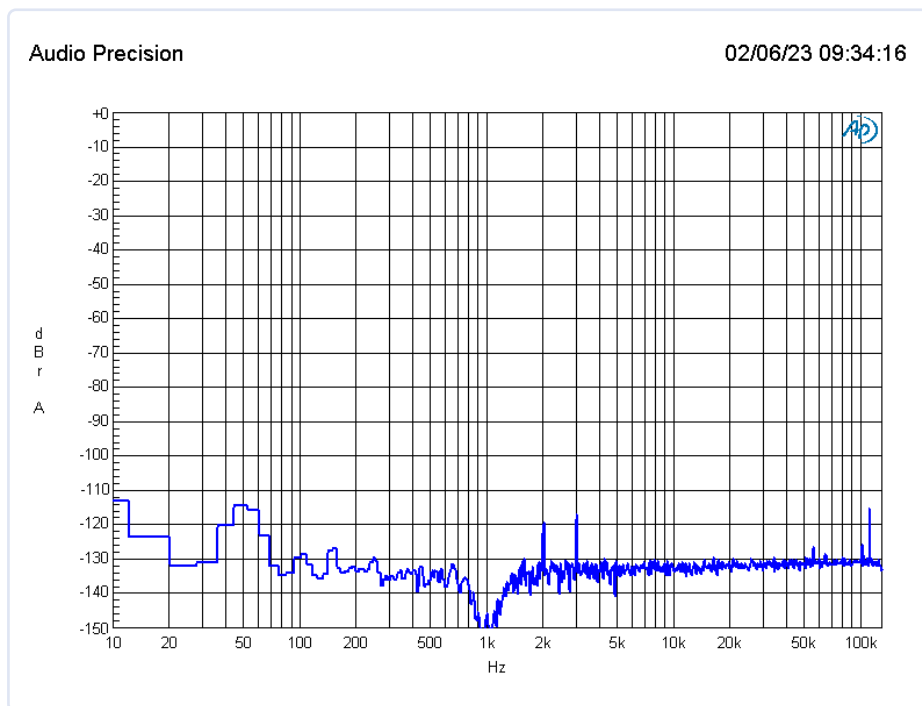
- > 0,0007% (1 kHz, 1 W, 8 Ω , B = 22 kHz)
- > 0,0013% (1 kHz, 1 W, 8 Ω , B = 802 kHz)

De ± 40 V lineaire spanningsregelaar die hier beschreven wordt en die verkrijgbaar is als bouwpakket bij Elektor, is een goed alternatief voor de beste betaalbare schakelende voedingen die momenteel op de markt zijn, en zou diegenen tevreden moeten stellen die (zelfs maar een klein beetje) bezwaar hebben tegen het concept of de prestaties van "die @#!%^ schakelingen". Voel je vrij om deel te nemen aan de technische discussies over de ± 40 V lineaire spanningsregelaar op de Elektor Labs-pagina bij dit project [3]. 

220581-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Figuur 4. Dit zijn de resultaten! Fortissimo-100 uitgangsspectrum bij 1 W in 8 Ω en bij voeding door ± 40 V lineaire spanningsregelaar (print 220581-1).



Gerelateerde producten

- > **± 40 V Linear Voltage Regulator Kit**
www.elektor.nl/20439



WEBLINKS

- [1] Fortissimo-100 high-end versterker: <http://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-282/61137>
- [2] Bouwpakket ± 40 V lineaire spanningsregelaar: <http://www.elektor.nl/elektor-40-v-linear-voltage-regulator-kit>
- [3] ± 40 V lineaire spanningsregelaar op Elektor Labs:
<http://www.elektormagazine.com/labs/linear-voltage-regulator-for-fortissimo-100>