

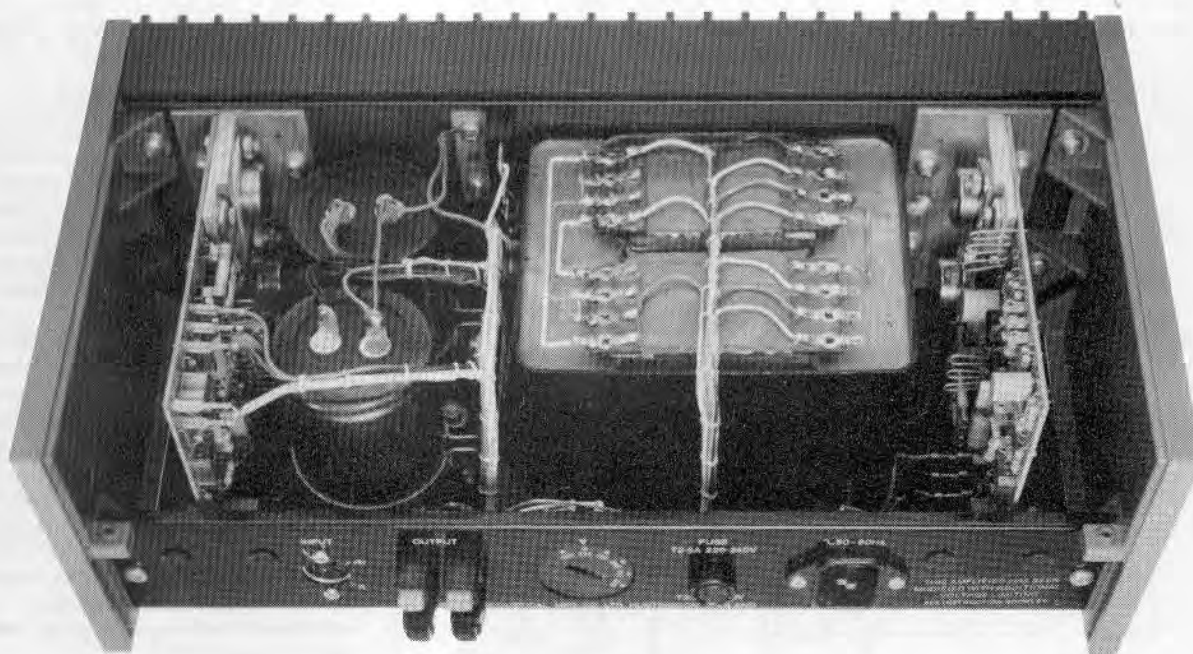
CURRENT DUMPING AUDIO AMPLIFIER

*een eindversterker
met stroomtoelevering aan de uitgang*

door P. J. WALKER

Nederlandse bewerking: H. A. van Hessen

zware eindtransistoren leveren het leeuwedeel van de stroom aan de belasting, echter zonder dat hun a-lineariteit tot uitdrukking komt in de overdrachtskarakteristiek van de versterker



CURRENT DUMPING AUDIO AMPLIFIER

Zo Harold Black de tegenkoppeling al niet heeft uitgevonden, hij was wel de eerste die een diepgaand inzicht in het mechanisme ervan tentoonspande, getuige zijn beroemde patent uit 1937. Reeds negen jaar daarvoor verkreeg hij al een patent op een foutstroomcorrectie door voorwaartsregeling (feed-forward correction), een vorm van meekoppeling derhalve.¹

Na bijna 50 jaar werd zijn werkwijze weer eens van stal gehaald en met betrekkelijk kleine wijzigingen toegepast bij de ontwikkeling van een nieuwe versterker voor muziekweergave. De aantrekkelijke aspecten van deze nieuwe schakeling werden door de beide ontwerpers, Peter Walker en Mike Albinson, toegelicht in een lezing voor de Audio Engineering Society in Engeland, begin 1975.

Uitgangspunt

Een eindversterker voor muziekweergave hoeft alleen maar een signaal te produceren dat in niets verschilt van het ingangssignaal, behalve dan in orde van grootte. Bij vrijwel elke ontwerper zal daarom wel eens het idee zijn opgekomen dat het niet moeilijk moest zijn een gedeelte van het uitgangssignaal te vergelijken met het ingangssignaal om zo een verschilsignaal te verkrijgen dat de door de versterker geïntroduceerde vervorming representeert. Daarna is het dan geen heksenwerk om dit verschil tot de juiste grootte te versterken en voor fase te corrigeren, om de zo verkregen correctie zodanig aan het uitgangssignaal toe te voegen dat de vervorming precies gecompenseerd wordt. Wat dan nog overblijft aan vervorming is de eigen vervorming van de correctieversterker, maar die is van geheel andere orde dan die van een zware eindversterker, omdat de correctieversterker slechts in een minimale belasting hoeft te werken.

Bij eindversterkers die met transistoren zijn uitgerust, is foutcorrectie door voorwaartsregeling extra aantrekkelijk:

in de overgrote meerderheid van versterkers werken deze transistoren in klasse B, uit thermische overwegingen. In dit soort schakeling worden de positieve en negatieve bestanddelen van het signaal afwisselend ieder door een der transistoren verwerkt. Deze eindtransistoren staan zorgvuldig ingesteld op het zo glad mogelijk overnemen van het signaal waar het de nullijn moet passeren. Als deze stroominstelling te krap is, ontstaat er een kleine discontinuïteit op de nullijn, bekend als crossover. Als de instelling te ruim wordt genomen, is er daarentegen een kort oogenblik waarop beide transistoren geleiden, zodat nu de steilheid kortstondig wordt verdubbeld. Omdat de karakteristieken van de transistoren wegbuigen bij het naderen van de nullijn is een exacte aansluiting niet te bereiken. We behelpen ons

door op een minimum af te regelen, maar dit minimum is afhankelijk van de werkt temperatuur. Hierdoor krijgt de instelling een zwevend karakter en wordt afhankelijk van de aard van het programma over langere tijd gezien, alsook van momentele pieken optredend in dat programma.

Compromis

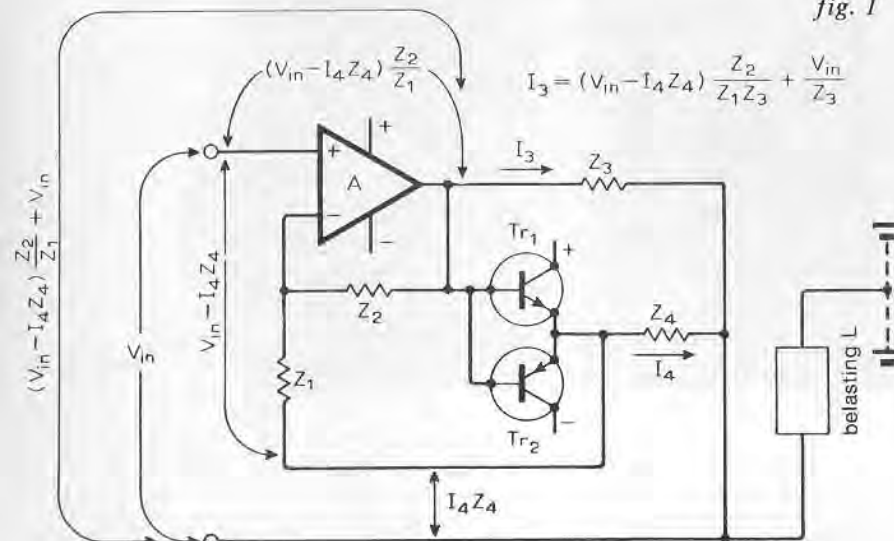
Het gekozen compromis wordt zo goed mogelijk gladgestreken met behulp van tegenkoppeling. Volgens deze methode kan men uitstekende versterkers construeren. En toch, hoewel door tegenkoppeling de vervorming tot vrijwel elke gewenste waarde verkleind kan worden, tot verwaarlozens toe, het feit blijft knagen dat voorwaartscorrectie de mogelijkheid biedt de vervorming volledig te onderdrukken, althans voor het gedeelte van de versterker waarover deze correctie wordt aangelegd.

Als we dat zouden kunnen toepassen op de klasse B-eindtrap zelf, verdwijnt niet alleen de aan deze trap eigen vervorming, maar tegelijk zijn we dan verlost van de traditionele afregelingen, zoals de instelling van de ruststroom en de instelling op het midden van de voedingsspanning. Voorwaartsregeling wordt als regel eigenlijk alleen maar te hulp geroepen als er stabiliteitsproblemen ontstaan bij toepassing van tegenkoppeling². Op het terrein van huiskamerversterkers voor muziekweergave is het principe zelden toegepast³. We mogen dit wel toeschrijven aan 1) de bijkomende complicaties en 2) de praktische moeilijkheden om de correctie-output op aanvaardbare wijze toe te voegen aan de massieve vermogensafgifte met zeer lage impedantie.

Voorwaartsregeling plus tegenkoppeling

Zodra we meekoppelen binnen de lus van een tegengekoppelde versterker, verdwijnt één voordeel van de mee-

fig. 1



$$\text{Signaalstroom in de belasting } L = I_3 + I_4 = \frac{V_{in}}{Z_3} + (V_{in} - I_4 Z_4) \frac{Z_2}{Z_1 Z_3} + I_4'$$

koppeling, namelijk dat deze de stabiliteit niet aantast. Daartegenover echter vervalt de noodzaak om de correctieversterker extern op te stellen, en daarmee ook de bijbehorende wederzijdse belasting. Langs deze weg kan een schakeling worden opgezet die een correctiesignaal aan de uitgang toevoert buiten de uitgangstransistoren om, die zodoende ontlast worden van eisen aan de overdrachtslineariteit. We hebben deze werkwijze aangeduid als stroomtoelevering om aan te geven dat het grove werk aan dommekrachten kan worden overgelaten.

Stroomtoelevering

De grondslag van deze aanpak is afgebeeld in fig. 1. Versterker A is daarin een kleine klasse A-versterker die de volle vereiste signaalzwaai kan leveren, maar met beperkte stroomafgifte. Tr_1 en Tr_2 zijn de stroomtoeleverende zware transistoren die het leeuwedeel van de luidsprekerstroom voor hun rekening nemen. De werking van het circuit kan het beste worden gevolgd als we de impedanties Z_1 - Z_4 in gedachten waarden geven van resp. 1 k, 100 k, 100 Ohm en 1 Ohm.

Z_4 is dan verwaarloosbaar klein ten opzichte van Z_1 en we zullen voorlopig aannemen dat de spanningsafgifte van versterker A volledig wordt bepaald door de uitwendige impedanties.

Zolang Tr_1 en Tr_2 niet meedoen levert A de stroom aan de belasting via Z_3 . Met de hierboven vermelde waarden zal deze stroom 1,01 A per V bedragen omdat de tweede term, die I_4 bevat, nul is. Wanneer de spanning over Z_3 oploopt tot ongeveer 0,5 V zal of Tr_1 of Tr_2 in geleiding komen en een stroom I_4 door de belasting sturen. We hebben de impedanties gekozen dat $\frac{Z_4 Z_2}{Z_1 Z_3} = 1$, waardoor de

tweede term in de uitdrukking voor de stroom I_3 , de component van voorwaartscorrectie, gelijk en tegengesteld wordt aan I_4 .

I_3 en I_4 bij elkaar geteld vormen samen de aandrijving van de belasting, zodat de steilheid van de versterker constant blijft, ongeacht de grootte van de stroom I_4 . Eventuele in Tr_1 en Tr_2 optredende vervorming zal zich uiten als fluctuaties in I_4 en aangezien deze exact dezelfde maar tegengestelde fluctuaties in I_3 zullen veroorzaken, verschijnt er geen vervorming in de belasting. Tr_1 en Tr_2 hebben zodoende alleen tot taak stroom in de belasting te pompen, en dat voldoende snel en accuraat om overbelasting van A te voorkomen. Wordt aan die eis voldaan, dan moet versterker A misschien wel eens acrobatische toeren verrichten, maar houdt de volledige zeggenschap over de stroom die op enig moment aan de belasting wordt geleverd.

Het hifi-iseren

Fig. 1 lijkt nog niet erg op een praktisch uitvoerbare hifi-versterker, gezien de constante stroombron aan de uitgang, en met een ingang die zweeft ten opzichte van de voeding. Toch blijven alle in fig. 1 vermelde betrekkingen gelden als het ingangssignaal aangelegd wordt tussen de versterkeringang en de onderzijde van de belasting, al is dat moeilijker in te zien dan op de geschetste wijze.

We komen zo tot een versterker met Z_4 parallel aan Z_3 als uitgangsimpedantie. Dan zijn er nog twee dingen te regelen. Voor een audio-versterker is nodig dat de bronimpedantie verwaarloosbaar klein is t.o.v. de belasting (de luidspreker). En voor de stabiliteit is vereist dat de versterking op een bepaalde wijze afneemt bij toenemende frequentie. Aan beide eisen is te voldoen door Z_4 uit te voeren als kleine zelfinductie, Z_2 als kleine capaciteit en Z_1 en Z_2 als weerstanden.

De voorwaarde voor vervorming = nul voor de stroomtoeleveranciers wordt nu dat $\frac{Z_4 Z_2}{Z_1 Z_3} = 1$ voor alle in aanmerking komende frequenties. Dit gebeurt door L gelijk te maken aan RRC. De schakeling die nu ontstaat is te zien in fig. 2. Hierin zijn de verder nog ter aanvulling van de reactieve componenten benodigde serie- en parallelweerstand weggelaten uit redenen van overzichtelijkheid.

Afwerking

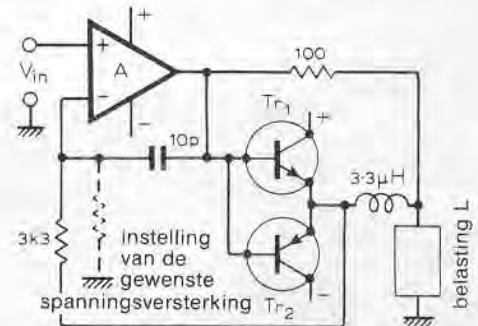
Fig. 2 ziet er al vertrouwder uit en begint sprekend te lijken op een gewone versterker, maar zonder instelmogelijkheden, terwijl een spoeltje aan de uitgang is toegevoegd. Is dat nu alles wat er komt kijken om een betere versterker te maken? Het antwoord moet natuurlijk luiden dat er nog wel iets meer aan te pas komt. Het schema is immers tot zijn eenvoudigste gedaante teruggebracht, en de vereenvoudigingen bestonden daaruit dat we alle moeilijkheden in de schoot van de A-versterker hebben geworpen. En hoewel de vervorming inderdaad nul zou zijn als de vervorming van de A-versterker nul was, weten we allemaal dat op dit punt praktische grenzen worden gesteld.

De klasse A-versterker

In onze analyse hebben we gesteld dat versterker A uitsluitend afhankelijk was van de uitwendige impedanties, dat de ingang volledig virtueel aan aarde lag, zodat de uitgang volledig gereguleerd werd. In hoeverre deze ideale toestand benaderd kan worden is te berekenen door de brugschakeling in gedachten uit balans te brengen door toleranties in de brugcomponenten te introduceren, of door „toegevendheid” in de uitgang van versterker A te veronderstellen.

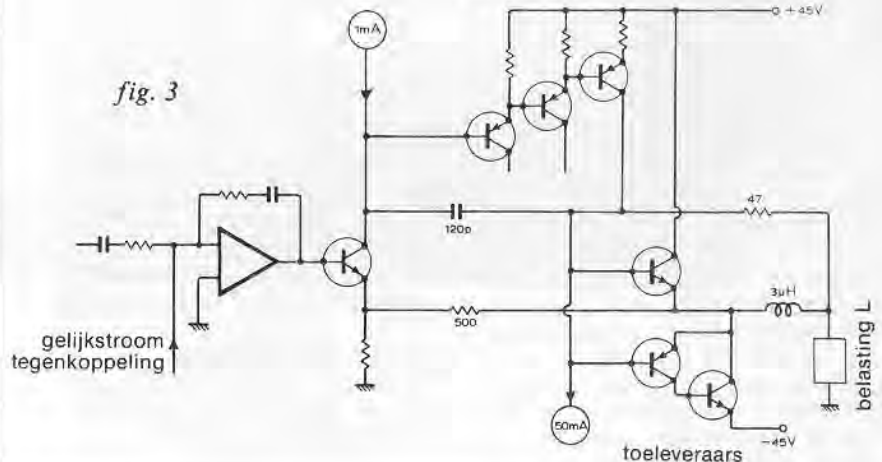
Met de waarden als aangenomen in fig. 2 zal een afwijking van 5% in

fig. 2



klasse A versterker

fig. 3



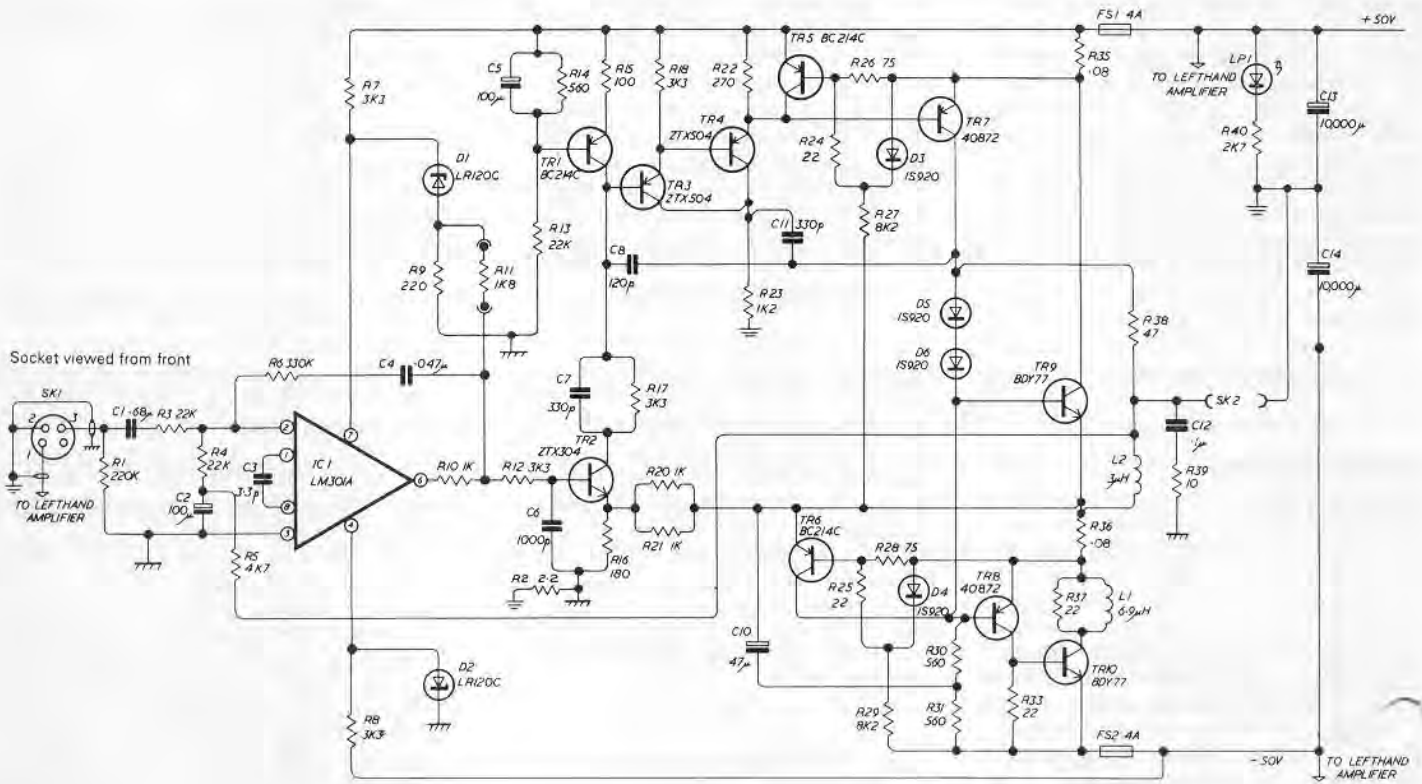


fig. 4

enige brugcomponent een maximum aan intermodulatieproducten teweeg kunnen brengen van $5 \mu\text{V}$ rond de 1000 Hz, dat is een maximum IM van 0,01%.

Dit maximum ligt niet minder dan 140 dB onder vol uitgangsvermogen. Hoewel frequentie-afhankelijk, maakt dit soort resultaat wel duidelijk dat de brugbalans allerminst kritisch is, en dat gebruik gemaakt kan worden van standaard componenten met vrij ruime toleranties, zonder nadere afregeling.

De klasse B-versterker

We hebben er al op gewezen dat de B-versterker voldoende snel moet reageren om de A-versterker niet in moeilijkheden te brengen. Over het weer te geven (muziek-)frequentiebereik geldt deze eis in volle zwaarte. Maar buiten dit bereik kan de A-versterker een oudedagsvoorziening krijgen door er voor te zorgen dat geen frequenties worden aangeboden die last kunnen veroorzaken. Als we ongewenste elementen uit het signaal weren, kunnen we namelijk gebruik maken van betrekkelijk langzame transistoren, die aanmerkelijk grofstoffelijker in elkaar zitten dan snelle. De nu toegepaste eindtransistoren zijn voldoende snel, zowel in theorie als praktijk, om te voorkomen dat de A-versterker op enig muziekprogramma aan de grens van zijn mogelijkheden zou moeten werken. Zou men daarentegen andere dan muzikale criteria aanleggen, zoals weergave van naaldpulsen, vierkants-

golven en soortgelijke a-muzikale functies, dan moet de versterker worden uitgerust met andere eindtransistoren die aan de dan geldende specificaties voldoen.

Compleet ontwerp

Fig. 3 toont in blokschema de onderlinge samenhang van de geschetste schakelelementen, als uittreksel van fig. 4, waarin tenslotte het volledige schema gegeven wordt van een volgens de ontwikkelde richtlijnen opgezette versterker van 100 W per kanaal.

De klasse A-versterker heeft mede tot taak de bovenste stroomtoeleveraar aan te drijven. Als toerusting tot deze taak is de A-versterker uitgevoerd als triplet, zodat een stevige virtuele aarde ter beschikking staat.

De vervorming van deze versterker, in het midden van het bereik, levert meetwaarden op omstreeks de 0,005%, m.a.w. beweegt zich in het gebied waar de kleinste toleranties in componenten, loop der bedrading, parasitaire koppelingen en de grenzen van de beste meetapparatuur samenspannen om de meetwaarden van zinvolle herhaalbaarheid en mededeelbaarheid te ontbloten.

Bijkomende voordelen

Bijzonder aantrekkelijke facetten van de geschetste techniek zijn wel: de volledige afwezigheid van instellen afregelprocedures, en de thermische ongevoeligheid. Bij de fabri-

cage valt niets af te regelen, in het gebruik kan evenmin iets ontregeld raken, zelfs niet bij reparatie met vervanging van onderdelen. Te verwachten valt dan ook dat na jarenlang gebruik minder onderling verschil tussen exemplaren van dit ontwerp zal worden aangetroffen dan bij meer conventioneel opgezette versterkers.

¹ BLACK, U.S. Patent 1.686.792, 9-10-29.

² Wireless World, mei 1972 pagina 232.

³ SANDMAN, Reducing amplifier distortion, Wireless World, oktober 1974.

Literatuur

Klein en Zaalberg van Zelst
Instrumentele Electronica, hfdst. 27, uitg. Centrex.

Het origineel van dit artikel werd voor Nederland bewerkt met toestemming van Wireless World waarvoor het geschreven werd.