

3

Waarom is DC-koppeling nodig?

Een van de beste methoden om een nieuwe schakeling te testen is hem te gaan bouwen. Dan zie je vanzelf tegen welke problemen je aanloopt.

3-1 De proefversterker

In 2012 kocht ik een aantal versterkers uit China voor mijn TubeSociety studenten; zie foto 3-1. De bedoeling was om deze driftig op te waarderen tijdens de cursus. Een verslag hiervan kan gevonden worden op mijn website; zie (12). In 2013 gebruikte ik deze versterker om mijn eerste Trans experimenten te doen. Van het oorspronkelijke schema is niets meer overgebleven. Het kastje en de voedingstrafo plus buizen waren precies het startmateriaal dat ik nodig had. De schakeling van figuur 3-1 geeft mijn eerste try-out weer.



Foto 3-1: de oorspronkelijke versterker uit China.

Waarom is DC-koppeling nodig?

De twee EL84 eindbuizen staan in push-pull klasse A. Hun ruststromen (35 mA per buis) worden ingesteld door stroombronnen (BD139 en BC547) die voor wisselspanningen ont-koppeld zijn met 1000 μ F elco's. Deze schakeling garandeert dat beide eindbuizen exact dezelfde ruststroom hebben, wat voor ringkern uitgangstrafo's wezenlijk is.

De uitgangstrafo (Amplimo 17010) is een kleine ringkern voedingstrafo: primair 2×11 V en secundair 2×6 V parallel geschakeld. De primaire impedantie Z_{aa} is 8 k Ω bij 8 Ohm secundaire belasting. Zie figuur 3-2 voor de specificaties bij toepassing als audio uitgangstrafo.

Type and Application		Amplimo 17010 als OPT in Mable.	
Primary Impedance	:	$R_{aa} = 8.141$	[k Ω]
Secondary Impedance	:	$R_{ls} = 8$	[Ω]
Turns Ratio N_p/N_s	:	Ratio = 31.9	[]
UL-tap:		tap = 0	[%]
Cathode Feedback Ratio	:	cfb = 0	[%]
-.1 dB Frequency Range [Hz to kHz] (3)	:	f _{lf} = 7.313	f _{hf} = 3.578
-1 dB Frequency Range [Hz to kHz] (3)	:	f _{l1} = 3.119	f _{h1} = 8.088
-3 dB Frequency Range [Hz to kHz] (3)	:	f _{l3} = 1.587	f _{h3} = 15.558
Nominal Power (1)	:	$P_n = 6$	[W]
- 3 dB Power Bandwidth starting at	:	$f_u = 14$	[Hz]
Total primary Inductance (2)	:	$L_p = 410$	[H]
Primary Leakage Inductance	:	$l_{sp} = 19$	[mH]
Effective Primary Capacitance	:	c _{ip} = 2.7	[nF]
Total Primary DC Resistance	:	$R_{ip} = 86.3$	[Ω]
Total Secondary DC Resistance	:	$R_{is} = 0.13$	[Ω]
Tubes Plate Resistance per section	:	$r_i = 4$	[k Ω]
Insertion Loss	:	$I_{loss} = 0.115$	[dB]

Fig. 3-2: Audio gegevens van de 17010 ringkern transformator.

De hoogspanning B+ is 300 V en B1+ is 285 V.

De ingangsbuis is geschakeld als verschilversterker (fasedraaier) met in de kathode een gemeenschappelijke stroombron (BSP135 en BC547).

De anodes van de ECC88 staan op 50 V. Hieraan zijn BSP135 FET's gekoppeld, die als stroombron functioneren. Zodra namelijk de source-drain spanning groter is dan 5 V,

Typ. output characteristics $I_D = f(V_{DS})$
 parameter: $t_p = 80 \mu s$

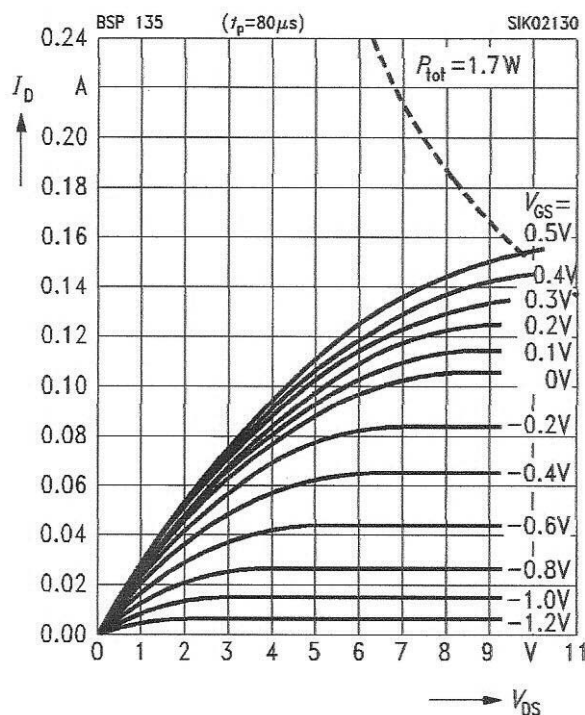


Fig. 3-3: Karakteristieken BSP135.

loopt de I_D - V_{DS} karakteristiek volledig horizontaal; wat weergeeft dat de inwendige R_{DS} "weerstand" oneindig Ohm is. Dit is de wezenlijke eigenschap van een "ideale" stroombron. Zie figuur 3-3.

Aan de source hangt een weerstand van $100 \text{ k}\Omega$ naar aarde. De ruststroom door deze eerste FET bedraagt daarom $0,5 \text{ mA}$. De drain is aangesloten op de tegenkoppelweerstand R_2 (hier aangeduid met **) van $220 \text{ k}\Omega$. De rustspanning op de drain wordt dan ongeveer de hoogspanning $B+$ minus $0,5 \text{ mA}$ maal $220 \text{ k}\Omega$ en dat levert 190 V op. Deze berekening geldt zowel voor de bovenste als onderste FET's die direct volgen op de ECC88.

Als er audiosignaal wordt aangeboden aan de ingang, verschijnt dat versterkt op de anodes van de ECC88 en dit levert stroomvariatie op in de FET stroombronnen. De steilheid "g" kan vergroot worden door de bovenste en onderste FET onderling te koppelen via $47 \text{ k}\Omega$, zie schema. Deze schakelwijze zorgt voor volledig gelijke wisselstromen in de bovenste en onderste FET's. Dit voorkomt 2-e harmonische vervorming. Een uiterst noodzakelijke voorwaarde is dat de twee ** gemerkte $220 \text{ k}\Omega$ weerstanden exact aan elkaar

Waarom is DC-koppeling nodig?

gelijk zijn. Daar kom je overigens bij nabouwen heel snel achter als je het vervormingsgedrag analyseert.

De FET's kunnen bij inschakelen van de versterker gemakkelijk overlijden. Twee kleine zener diodes van 12 V, anti serie geschakeld, voorkomen dit.

De volgende FET functioneert als source volger. Zijn gate-ingang is extreem hoogohmig, dus de aansturende stroombron en de $220\text{ k}\Omega$ ** weerstanden worden niet belast; er treedt geen lekstroom naar aarde op. Hiermee wordt het eerder genoemde probleem opgelost dat de eindbuis de stroombron en R^{**} weerstand niet mag belasten. Tevens levert de source volger een laagohmige uitgangsimpedantie aan het stuurrooster van de EL84. Daardoor kan de Miller Capaciteit van die eindbuizen het hoogfrequente bereik niet meer beperken (anders had je die parallel aan de $220\text{ k}\Omega$ ** weerstanden moeten denken).

Het signaal van de source-volgers gaat vervolgens via koppel condensatoren van slechts 1 nF naar de stuurroosters van de eindbuizen. Waarom deze condensatoren zo'n geringe capaciteit moeten hebben, wordt verderop uitgelegd.

3-2 Algemene eigenschappen van de proefversterker

De technische eigenschappen van deze versterker zijn:

1. -3dB frequentiebereik van 12 Hz tot 30 kHz
2. $P_{\max} = 4\text{ Watt}$ per kanaal bij 1 kHz in 8Ω belasting
3. Uitgangsimpedantie = $0,5\Omega$ bij 1 kHz
4. THD en IMD vervormingen zijn kleiner dan 0,1 % bij 1 Watt in 8Ω
5. Laagfrequent neigt de versterker tot instabiliteit (motorboten)
6. De lineariteit van de versterking is laagfrequent vreemd
7. De uitgangsimpedantie vertoont geen constant gedrag en wordt maximaal in de omgeving van 3 Hz (resonantie?). Bij 20 kHz loopt de uitgangsimpedantie ook op ten gevolge van de lekinductie van de uitgangstrafo. Dat laat ik op dit moment buiten beschouwing.

De waarnemingen 5, 6 en 7 bespreek ik verderop, want die waren de aanleiding om te twijfelen aan dit ontwerp. De eerste 4 eigenschappen zijn uitmuntend, waarbij vooral 3 en 4 precies de voorspellingen van hoofdstuk 2 volgen.

De subjectieve eigenschappen van dit ontwerp zijn ontegenwoordig positief. Ik liet dit prototype onder andere horen op een avond van "Audio Vereniging Midden Nederland". De aanwezigen gingen rechteop zitten en maakten opmerkingen als: "zo moet het klinken, wat een details en ruimte en schoonheid en zuiverheid en goede klankbalans; dit is beter als SE...". Tja, had ik in de inleiding al niet verteld dat ik "goud" in de vingers heb?

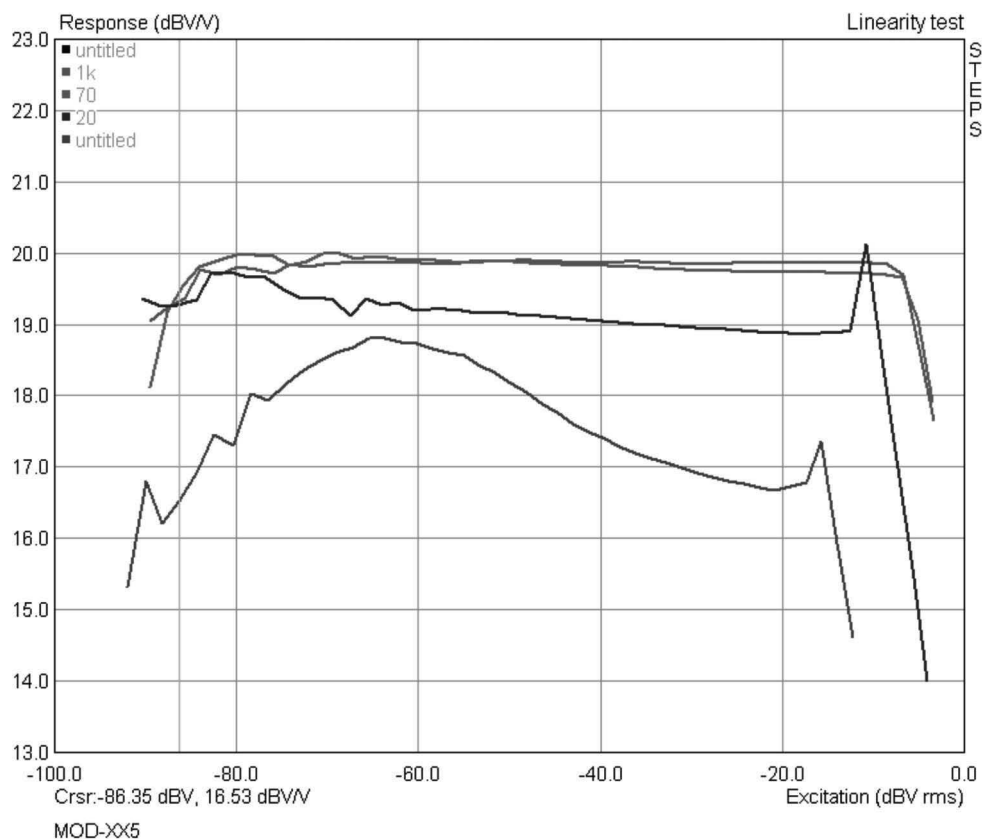


Fig. 3-4: Lineariteit van versterking bij 1 kHz, 70 Hz, 20 Hz en 10 Hz (van boven naar beneden) als functie van de ingangsspanning.

Voor alle duidelijkheid: dit test-ontwerp is echt niet het best haalbare. Er zitten fouten in, bijvoorbeeld de instelling van spanningen kan veel beter om meer vermogen te krijgen. Voor mij was bepalend dat het werkt! Nu op weg naar een sterk verbeterde versie. Daarin zouden de fouten 5 en 6 en 7 niet meer mogen zitten. Maar ... waar komen die fouten vandaan? Dat ga ik nu behandelen.

3-3 Lokale tegenkoppeling rondom filters

Ik begin met twee metingen. De eerste bepaalt de lineariteit (de constantheid) van de versterking van in- naar uitgang als functie van toenemende ingangsspanning. Er wordt gemeten bij vier testfrequenties: 1 kHz, 70 Hz, 20 Hz en 10 Hz. De achtergrond van deze meting is uitgebreid behandeld in mijn twee AES-papers, zie (13) en (14). Deze zijn beschikbaar op mijn website, sectie "publicaties". Uitleg daarover laat ik nu achterwege. De tweede meting bepaalt de uitgangsimpedantie (de ingang is kortgesloten) als functie van de frequentie.

Waarom is DC-koppeling nodig?

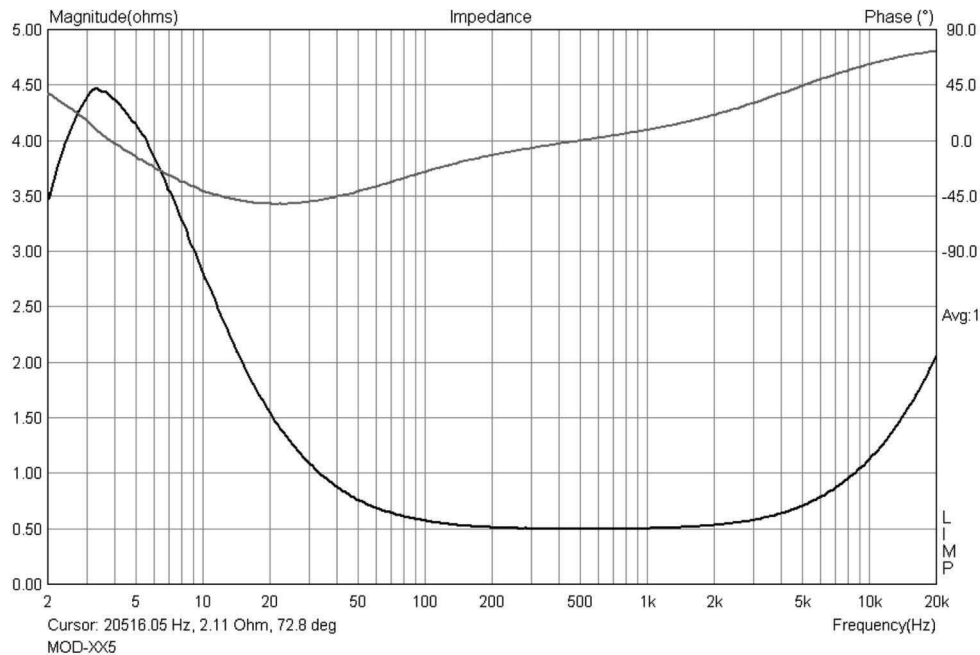


Fig. 3-5: Uitgangsimpedantie (dikke lijn) van de proefversterker. De fase (is deze ohms of ook inductief of capacitief) wordt door de dunne bovenste lijn aangegeven.

Beide metingen geven aan dat er laagfrequent wat mis gaat. De versterking (lineariteit in figuur 3-4) bij 20 en 10 Hz is zeker niet constant, maar afhankelijk van het ingangssignaal. De uitgangsimpedantie vertoont een fikse resonantie bij 3 Hz (de oploep richting 20 kHz behandel ik nu niet).

Nu zijn deze resultaten echt geen toeval. Ik ben ze bij meerdere versterkers tegen gekomen, onder andere in mijn oude VDV100 versterker uit 1987, waarin rondom de eindbuizen ook lokaal wordt tegen gekoppeld. Alleen had ik vroeger niet de goede meetapparatuur van tegenwoordig, dus was het verschijnsel me nooit opgevallen. Ook Jeff (9) schrijft er niet over; hij heeft blijkbaar evenmin in dit domein gemeten. Het enige dat hij meldt is dat hij "laagfrequent de luidsprekerconus mooi ziet wapperen".

De oorzaak van genoemde "onrust" is als volgt. Er is honderd procent lokale tegenkoppeling rondom de eindbuizen. In dit tegenkoppel circuit zijn twee filters aanwezig; de ontkoppel condensator naar het rooster en de primaire zelfinductie van de uitgangstrafo. Elk levert een hoog doorlaat (high-pass) filter van de eerste orde op. Effectief is er dus sprake van een tweede orde filter. Dat veroorzaakt maximaal 180 graden fasedraaiing waardoor bij bepaalde frequenties tegenkoppeling over gaat in meekoppeling en zo ontstaat resonantie. Figuur 3-6 laat dit schematisch zien, waarbij de eindbuis om reden van eenvoud weer door een opamp is vervangen. De stroombron is uit de tekening gelaten, want die maakt door zijn hoge impedantie geen deel uit van de tegenkoppeling.

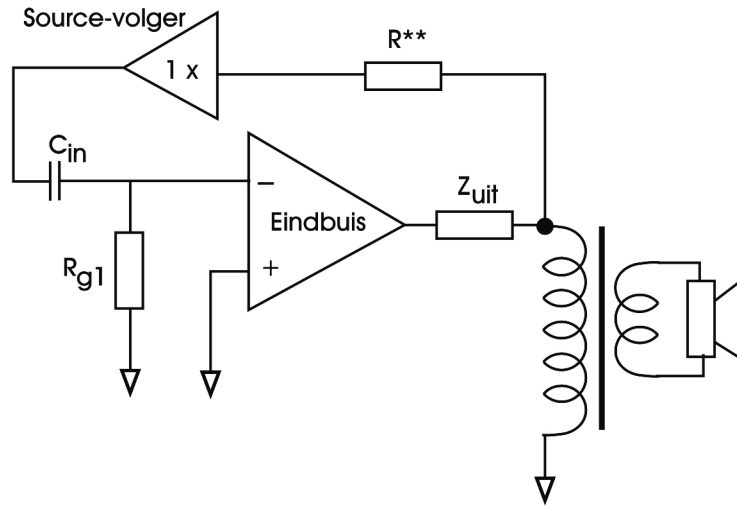


Fig. 3-6: Schematische voorstelling van de lokale tegenkoppeling.

Het eerste filter staat herkenbaar aan de ingang en wordt gevormd door C_{in} en R_{g1} . De source volger schakelt de invloed van de R^{**} -weerstand van $220\text{ k}\Omega$ uit. Gebruiken we de waardes uit het schema (1 nF en $1\text{ M}\Omega$) dan ligt alhier de -3dB high-pass frequentie bij 160 Hz .

Het tweede filter wordt gevormd door de uitgangsimpedantie van de eindbuis (zijn inwendige weerstand) en de zelfinductie L_p van de primaire wikkeling met daaraan parallel gedacht de getransformeerde luidspreker impedantie (niet getekend) $Z_{aa} = 8\text{ k}\Omega$.

Als rekenvoorbeeld gebruik ik nu: $L_p = 410\text{ H}$, $Z_{uit} = 2 \times 40\text{ k}\Omega$ (twee eindbuizen in pentode), $Z_{aa} = 8\text{ k}\Omega$. Denk voor de berekening Z_{aa} parallel aan Z_{uit} . De -3dB high-pass frequentie van dit filter ligt dan bij 3 Hz . Let op dat L_p zeker niet constant is, maar wijzigt met de fluxdichtheid in de kern, die evenredig is met de wisselspanning over de primaire. Dus deze lage 3 Hz frequentie wisselt met de grootte van het signaal. Eerdere metingen hebben aangetoond dat de zelfinductie wel een factor 60 kan wijzigen, dus f_{3L} kan ook bij 180 Hz liggen. Dit treedt vooral op bij geringe signaalsterkte en bij lage frequenties, omdat aldaar de relatieve magnetische permeabiliteit van de kern in elkaar stort (13).

Als je een lokaal tegengekoppeld systeem hebt met redelijk grote open lus versterking (A_0 ergens tussen 10 en 200) en als de twee besproken filter frequenties vlak bij elkaar liggen, dan ontstaat resonantie. Dat uit zich in opslingering en motorboating, wat de metingen ook aantonen. Vooral meting 3-4 laat dit signaalsterkte afhankelijke verschijnsel bij 10 en 20 Hz duidelijk zien.

Waarom is DC-koppeling nodig?

Dit alles verklaart ook waarom ik zulke kleine koppelcondensatoren moest gebruiken om beide filter frequenties genoeg verschillend te laten zijn.

3-4 Waarom is DC-koppeling vereist?

Ik heb aangetoond dat laagfrequent de lokale tegenkoppeling de versterker op de rand van instabiliteit brengt. Dit wens ik niet. Ik wil, vooral laagfrequent, dat de versterker zich uiterst stabiel gedraagt en zijn lage uitgangsimpedantie behoudt. Pas dan wordt de uitgangstransformator optimaal aangestuurd. Dan kan ik optimale luidspreker demping bereiken en geringe laagfrequente vervorming.

De oplossing is: laat C_{in} weg. Ga DC-koppelen. Dan is er slechts één eerste orde filter in de tegenkoppellus aanwezig (gevormd door Z_{uit} en Z_{aa} en L_p) en dit filter kan nooit aanleiding geven tot instabiliteit, omdat het een eerste orde systeem is. In het volgende hoofdstuk laat ik inleidend zien hoe dit doel kan worden bereikt.



Vanderveen Trans Buizenversterkers

