

TS-2024: Buizengeluid zonder buizen.

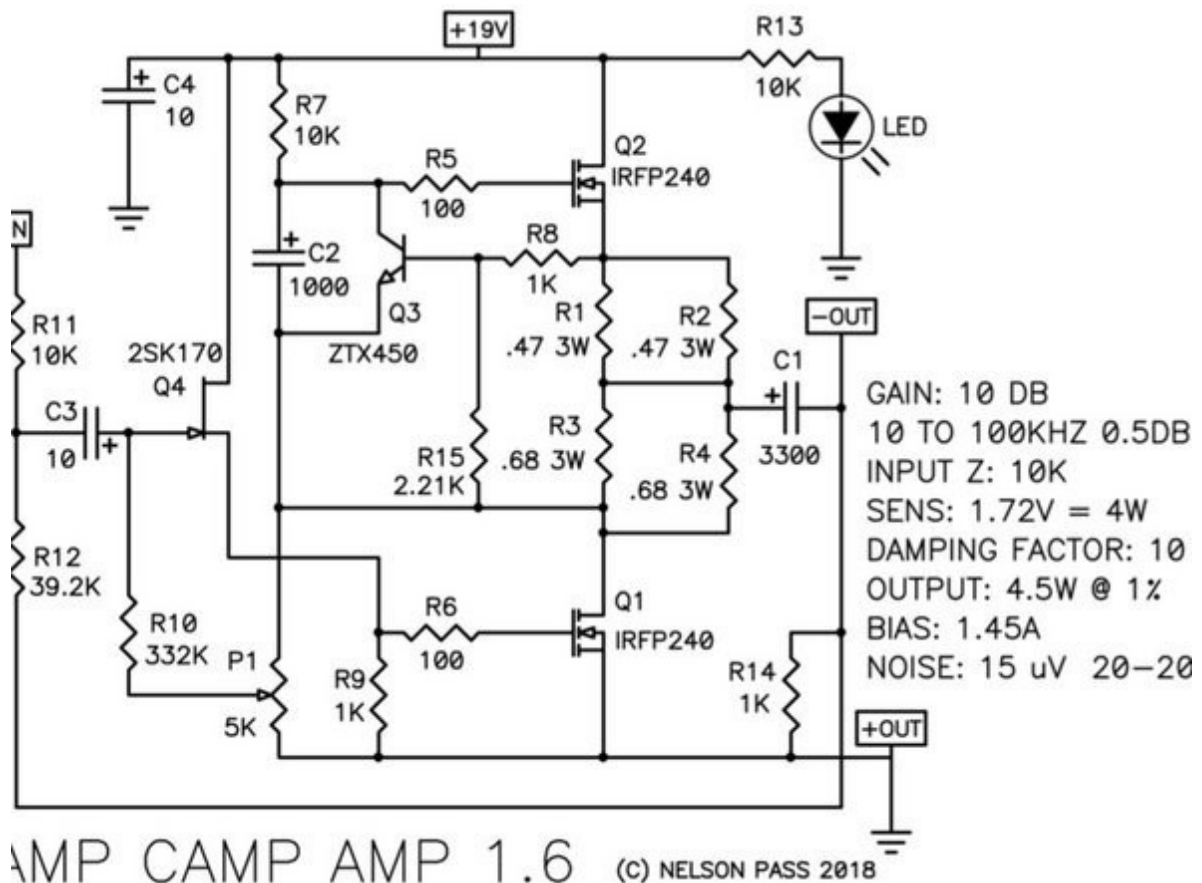
Een Overzicht van TubeSociety Doelen en Resultaten.
Menno van der Veen

Ongeveer vanaf 2018 hebben we bij TubeSociety stap voor stap verschillende stukken van buizenversterkers door halfgeleiders vervangen. We wilden onderzoeken of het typische 'buizengeluid' dan bleef bestaan. Zie onze TS-2018 en -2022 en -2023 projecten. In het afgelopen TS-2024 jaar hebben we een ontwerp van Nelson Pass gebruikt zonder buizen. Kun je dan nog spreken van 'buizengeluid'? Ja, maar dit korte antwoord is te summier. Daarom geef ik nu een kort overzicht van de acties en resultaten van het TS-2024 studiejaar.

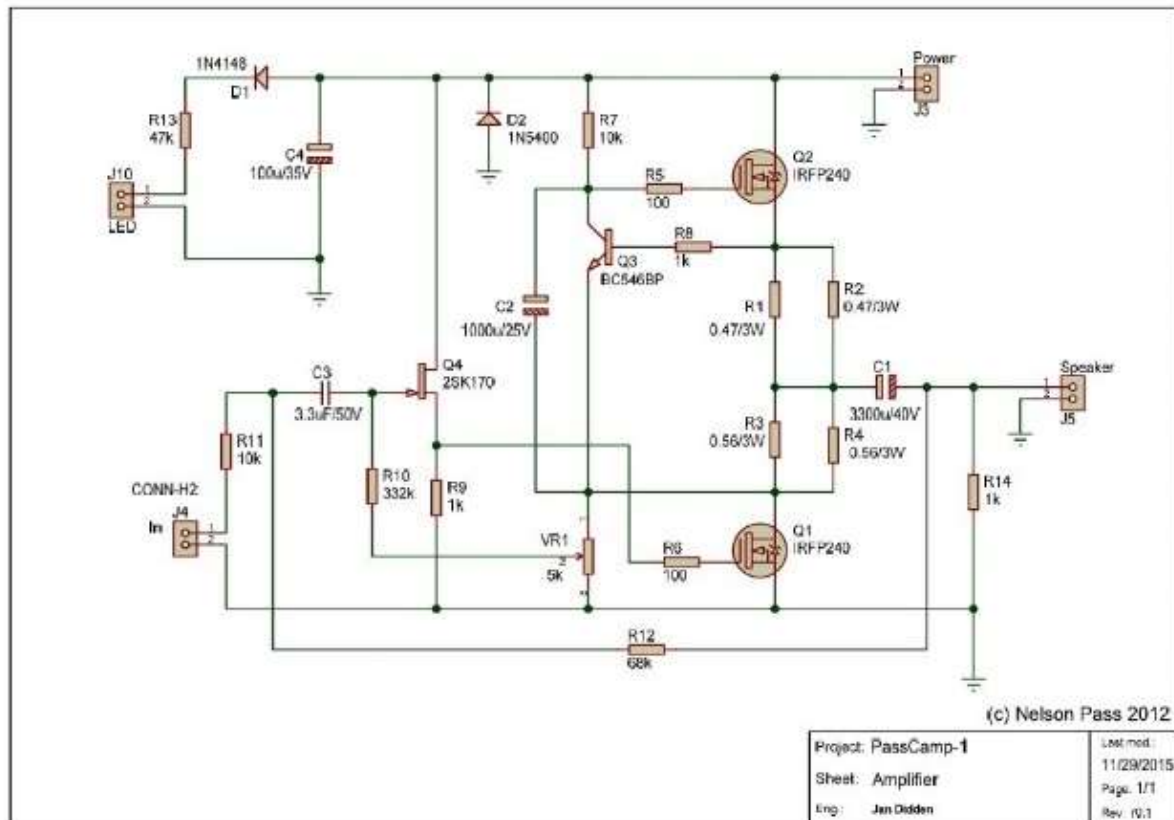
Wat hebben we in TS-2024 gedaan en waarom

We hebben het 2018-ACA-ontwerp van Nelson Pass bestudeerd (zie figuur 1-a) en de versie gebouwd die Jan Didden bij zijn Audio Camp Amplifier in 2012 toepaste (zie figuur 1-b). We hebben dat schema opnieuw getekend (zie figuur 1-c) om onze acties en wijzigingen daarin te kunnen verwerken.

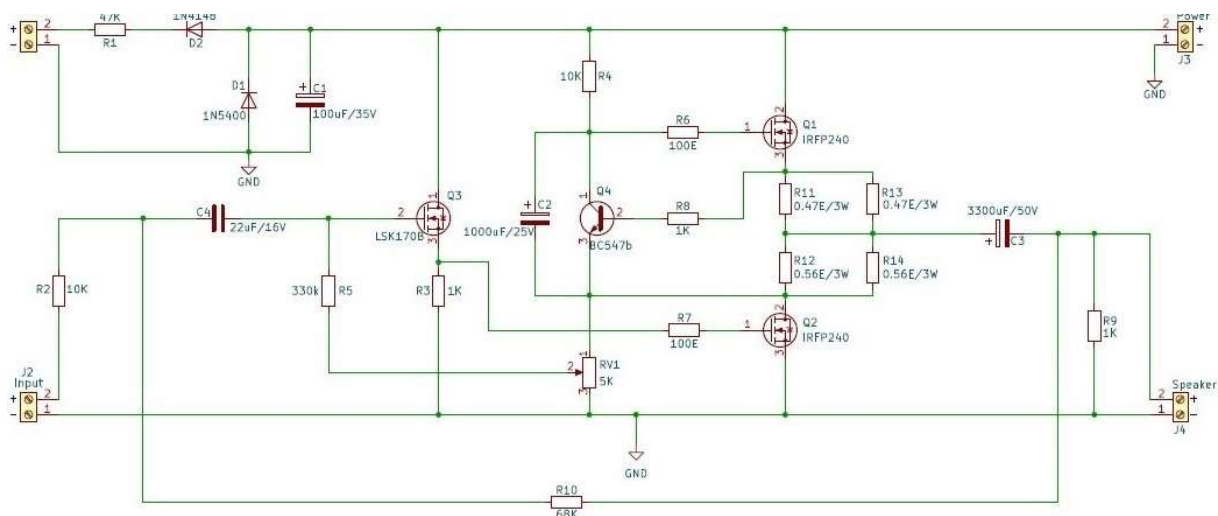
In dit verslag gebruik ik de componentnummers van figuur 1-c.



Figuur 1-a: het 2018 ACA versie-1.6 ontwerp van Nelson Pass



Figuur 1-b: De 2012 ACA-versie van Jan Didden

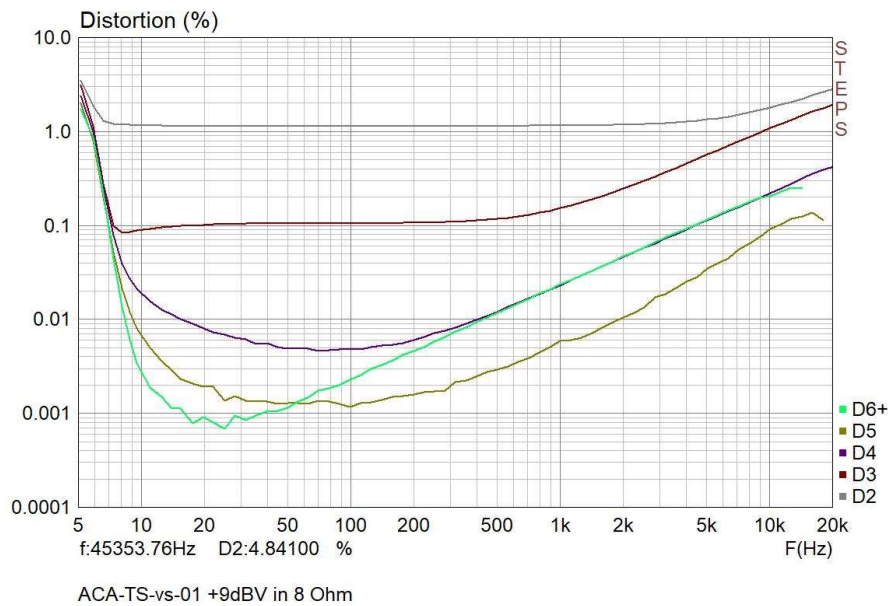


Figuur 1-c: Het start-schema van de ACA TS-2024 versie

Subjectief (luisteren) zijn we het helemaal eens met de doelen van Nelson Pass (fijn buizengeluid). Het klinkt warm en vriendelijk en ontspannen. De versterker heeft genoeg vermogen (ongeveer 5 Watt) om het geluid in mijn lab met mijn 100 dB/W,m luidsprekers luid te laten weergalmen.

Objectief (meten) zijn we het eens met de meetresultaten die Nelson Pass publiceert. Zie <https://www.diyaudio.com/community/threads/amp-camp-amp-1.214808/>

Nieuw is een meting die niet in de publicatie van Nelson Pass stond, namelijk de vervorming bij 1 Watt in 8 Ohm als functie van de frequentie die varieert van 20 Hz tot 20 kHz, waarin de harmonische componenten D2,3,4,5,6+ afzonderlijk worden weergegeven. Zie figuur 1-d.



Figuur 1-d: Vervorming per harmonische als functie van de frequentie bij 1 Watt in 8 Ohm

Wat opvalt is dat de vervorming toeneemt bij hogere frequenties. Bij de hogere harmonischen start deze toename zelfs eerder. Waar komt deze vervorming vandaan en kunnen we die ook horen (omdat hij immers onder de tweede harmonische ligt, wat dieper luisteren zou kunnen maskeren)? Ons horen is veel beter dan we ooit kunnen bedenken; daarom gaan we er op voorhand al van uit dat deze slew-rate-vervorming zeker waarneembaar zal zijn.

Vervorming filosofieën en onderzoeksdoelen van TS-2024

Zowel Jean Hiraga als Nelson Pass ontdekten dat versterkers met afnemende hogere harmonischen (declining higher harmonics) prettig in het gehoor liggen. Single Ended buizenversterkers zonder tegenkoppeling voldoen aan deze voorwaarde en worden daarom ook zo hoog gewaardeerd.

Menno ontdekte dat als de tweede harmonische zo klein mogelijk wordt gemaakt je steeds meer details kunt horen, terwijl het buisachtige geluid niet wordt aangetast. Gecombineerd met mijn ontwerpregels noem ik dit: “verwijder het H2-gordijn” en heb dit bijvoorbeeld breeduit toegepast in mijn Trans ontwerpen.

Gebaseerd op de waargenomen slew-rate-vervorming en de verschillende opvattingen over acceptabele vervorming, besloten we om ons TS-2024 onderzoek te richten op: minimale slew-rate en minimale H2 vervorming. In de eindfase onderzochten we ook optimale jFets en Mosfets en schone netvoedingen.

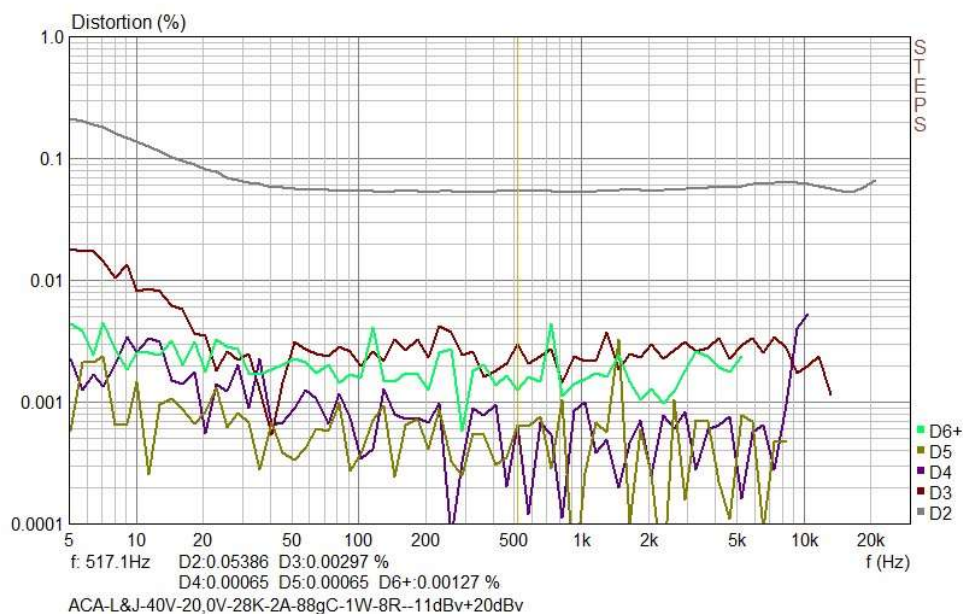
We hebben dit jaar nauwelijks gelet op negatieve tegenkoppeling. Tegenkoppeling is geen probleem zolang het maar lokaal wordt toegepast (per versterkende-sectie, dus over één overdrachts-functie). Deze Menno-ontwerpregel zit al in de ACA versterker omdat uitsluitend Mosfet Q2 versterkt en Q1 en Q3 opereren als volgers (met 1 x versterking) en Q4 met VR1 regelt alleen de ruststroom en de bias-instelling (meestal op ½.B+).

In al onze acties brachten we een duidelijke beperking aan: “gebruik het originele ACA-ontwerp met gelijk of minder componenten om zo dicht mogelijk bij de oorspronkelijke prachtige (complexe) eenvoud te blijven”.

Slew-Rate-ervorming minimaal maken

De slew-rate-ervormingen worden veroorzaakt in de power Mosfet Q2 (nauwelijks in Q1 want die functioneert als volger). De interne capaciteiten in Q2 tussen en gate en source en drain zijn niet constant maar afhankelijk van de momentane spanningen. Pas bij grotere Vds-spanning (zie verderop bij punt 1.) worden deze capaciteiten constanter. Q2 wordt aangestuurd door jFet Q3 en die heeft een beperkte stroomcapaciteit. Bij het aansturen van de Mosfet Q2 wijzigen de genoemde capaciteiten, daardoor wijzigt de stroomvraag, en bij hogere frequenties komt daardoor de aansturing van Q2 in de problemen. We ontdekten 3 methodes om de slew-rate-ervormingen te verkleinen:

1. Gebruik het schema van figuur 1-c. Verhoog de B+ voedingsspanning van standaard 19 V naar 40 V. Dan werkt Q2 in een gebied waar de interne Mosfet-capaciteiten meer constant zijn. Zorg er voor dat je grotere koellichamen (heatsink) gebuikt om de Mosfets voldoende koel te houden (beneden 90 graad Celsius). De jFet LSK170 (Q3) kan 40 V voedingsspanning niet aan. Beperk daarom met een serieweerstand en zenerdiode de drainspanning van Q3 tot 20 V. Figuur 3-a toont het resultaat.

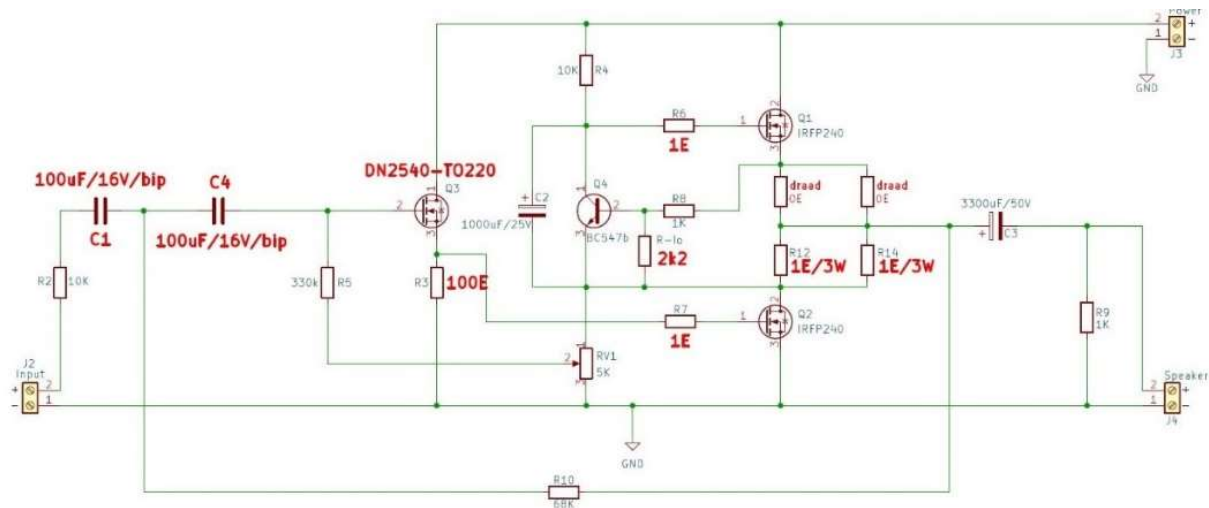


Figuur 3-a: Versie-1 met B+=40 Vdc en Bias=20 Vdc @ 1W in 8Ω (metingen aan versterker-13)

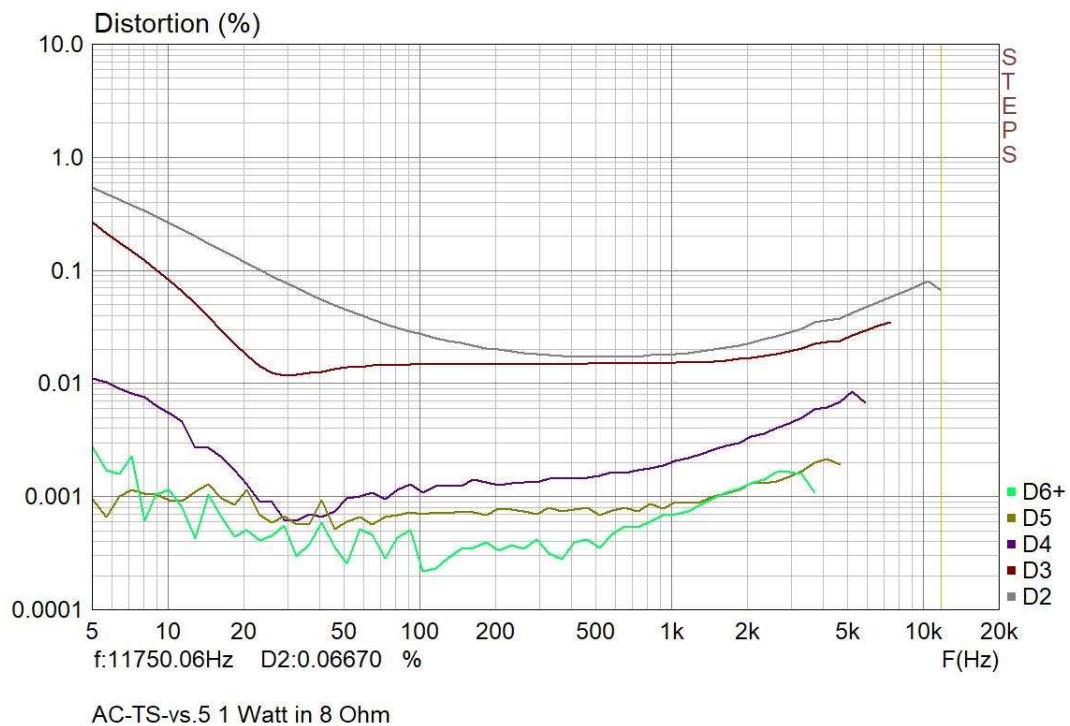
2. Bij B+ = 19 Vdc neemt de slew-rate vervorming ook af als de gate-weerstanden R6,7 verkleind worden tot 10 Ohm of nog kleiner (voor zover hoog frequente stabiliteit dit toestaat). Zie de figuren 3-b en 3-c.
3. Bij B+ = 19 Vdc neemt de slew-rate-ervorming ook af als de ruststroom door Q3 vergroot wordt door R3 van 1 kOhm te verkleinen tot 100 of 47 Ohm. Daarmee daalt de inwendige weerstand van Q3 waardoor deze de capaciteiten van Q2 gemakkelijker kan aansturen. Vervang in dit geval Q3 door de DN2540-TO220 met koelvin om de grotere warmte in Q3 voldoende af te kunnen voeren. Zie opnieuw de figuren 3-b en 3-c voor het resultaat.

H2-vervorming minimaal maken

4. Bij $B+ = 19\text{ Vdc}$ kan H2 verkleind worden door R11 en R13 beide 0 Ohm te maken (= draadjes) en R12 en R14 beide 1 Ohm te maken (3 Watt versies). Rondom 1 kHz wordt H2 dan gelijk of kleiner dan H3. Als je dit doet verlaat je de Nelson Pass keuze. Zie de figuren 3-b en 3-c.
5. Bij $B+ = 19\text{ Vdc}$ kun je H2 nog verder verkleinen door een extra weerstand van 2,2 kOhm te plaatsen tussen de basis en emitter van Q4. Daardoor wordt de ruststroom door de power Mosfets Q1 en Q2 vergroot van 1,2 A tot 1,7 A. Deze extra weerstand is al standaard aanwezig in ACA-1.6 en latere versies (zie R15 = 2k21 in figuur 1-a).



Figuur 3-b: Versie-5 met de wijzigingen 2 tot en met 5



Figuur 3-c Versie-5: Dn(f) metingen bij 1 Watt in 8 Ohm.

Het resultaat van de wijzigingen 1 tot en met 5: zowel met metingen als met luisteren hebben we aangetoond dat de vervormingen drastisch zijn afgenomen en dat we daardoor meer details en een dieper geluidsveld kunnen horen zonder dat het “buisachtige” klankspectrum wordt aangetast.

Wij zijn ons er van bewust dat iets “beter” vinden klinken met persoonlijke voorkeuren heeft te maken. Maar gelukkig hebben we onze herhaalde waarnemingen met de metingen kunnen onderbouwen.

Als je de resultaten van de figuren 1-d en 3-a en 3-c vergelijkt, dan vallen nog de nodige zaken op:

- a. Onze TS activiteiten hebben de vervorming totaal anders en kleiner gemaakt dan de oorspronkelijke vervorming volgens Nelson Pass. Dat dit haalbaar is in het super eenvoudige schema van Nelson, is op zich een mirakel. Zo simpel, en toch nog zoveel ruimte voor verandering toont overduidelijk aan hoe robuust zijn ontwerp is.
- b. De verhoging van de voedingsspanning B+ tot 40 Vdc heeft het krachtigste effect, maar overmatige warmteproductie is toch wel een nadelig effect. Vandaar dat we wat bleven hangen bij B+ = 19 Vdc. Later onderzoek toonde aan dat B+ = 24 Vdc tot zo ongeveer 30 Vdc ook al aanzienlijke verbetering oplevert. Aan ieder dus de vrijheid om zelf zijn eigen voorkeur B+ voedingsspanning te kiezen. Hier is speelruimte die we nog niet helemaal hebben verkend.

Netvoedingen en optimale jFets en Mosfets

Over voedingen kunnen we heel kort zijn. SMPS computervoedingen (Switch Mode Power Supplies) zijn ongeschikt voor het voeden van hoogwaardige audioversterkers. Zodra we de computervoedingen vervangen door nettrafo's met gelijkrichting en buffer-elco's en stabilisatie met de LM1084 knalde de geluidskwaliteit omhoog. Niet voor niets bestaat al heel lang de volgende wijsheid in audioversterker technologie: “goede voeding is net zo belangrijk als goede versterking; de voeding maakt immers 100 % deel uit van het audio-circuit”.

Optimale jFets en Mosfets: we hebben hier breed onderzoek naar gedaan waarbij eerst vastgesteld moest worden wat de belangrijkste criteria zijn. Toen dat duidelijk werd leverden zoekmachines vele geschikte types die we inkochten en testen. Wat bleek? De oorspronkelijke types LSK170 (of de DN2540 bij hogere stromen en voedingspanningen) en de IFRP240 zijn behoorlijk optimaal en robuust en goed verkrijgbaar. Daarom hebben we dit spoor maar losgelaten.

Samenvatting van het TS-2024 onderzoek

- a) De Pass-Hiraga route is uitstekend als je focust op een niet irritante vervormingsbalans.
- b) De Menno-route met laagste H2 vervorming levert de meeste details op. Waar jij die balans neerlegt staat buiten iedere discussie. Voorkeuren zijn altijd toegestaan.
- c) De waargenomen slew-rate-vervorming was voor ons een verrassing. We hebben die kunnen verwijderen en concluderen opnieuw dat ons oor “vervorming onder vervorming” kan horen.
- d) Andere fets? Waarom niet; voor ons waren de standaardkeuzes goed genoeg.
- e) Gebruik geen SMPS computervoedingen; dat zijn ondingen. Voedt ouderwets met trafo's en gelijkrichters en smoorspoelen of MEC's en elco's en stabilisator-circuits.
- f) De Nelson Pass ACA versterker is intrigerend briljant. Als je denkt dat je de schakeling goed doorhebt, is er altijd nog een dieper level waarover je eventjes moet nadenken.