

Jukka-Pekka Janhunen

PA-vahvistin

Opinnäytetyö

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööritutkinto

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

27.9.2013

Tekijä Otsikko	Jukka-Pekka Janhunen PA-vahvistin
Sivumäärä Aika	61 sivua 27.9.2013
Tutkinto	insinööri
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Jukka Karppinen
<p>Tässä insinöörityössä suunniteltiin tehokas B-luokan PA-audiovahvistin ja toteutettiin vahvistimen alustava prototyyppi. Vahvistintyyppi soveltuu ammatilliseen audiokäyttöön eli esimerkiksi käytettäväksi julkisten tilaisuuksien äänentoistoon.</p> <p>Vahvistimesta pyrittiin suunnittelemaan kohtuullisen laadukas niin äänentoiston kuin vika-suojauksenkin alueilla. Komponenttien osalta kiinnitettiin huomiota edullisuuteen ja helppoon saatavuuteen. Vahvistimen suunnittelussa ja toiminnan simuloinnissa käytettiin LTSpice-ohjelmistoa. Lopulta simulaatioissa toimivaksi todetusta vahvistimesta rakennettiin alustava prototyyppi.</p> <p>Työssä selvitettiin erityyppisten tehotransistorien soveltuvuutta audiovahvistimiin ja etsittiin tietoa viime vuosien tehoelektroniikan komponenttien nopean kehityksen vaikutuksesta audiovahvistinteknologiaan. Työssä luotiin myös lyhyt katsaus sähkölaitteille vaatimuksia asettaviin direktiiveihin ja standardeihin.</p> <p>Työn tuloksena saatiin rakennettu vahvistin, jonka toimivuutta testattiin. Rakennetun vahvistimen toimintaa vertailtiin myös ohjelmistomallinnuksesta saatuihin tuloksiin. Kokemusten perusteella muodostettiin näkemys ohjelmistomallinnuksen käyttökelpoisuudesta projektin työtehtävissä.</p>	
Avainsanat	PA-vahvistin, audio, Mosfet, THD, pääteaste

Author Title	Jukka-Pekka Janhunen PA Amplifier
Number of Pages Date	61 pages 27 September 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The aim of this thesis was to design a powerful class B PA amplifier and build a preliminary prototype of it. This type of amplifier can be used in professional sound systems, for example in public occasions.</p> <p>The amplifier was designed to represent moderately good sound quality and failure protection. Attention was also paid to affordability and easy availability of components. LTSpice-software was used in designing and simulating the amplifier. The preliminary physical amplifier prototype was built on the designed virtual model of amplifier that seemed to be functioning well in the simulation.</p> <p>A slight survey of power transistors was made and some new trends in audio amplifier technology, made possible by the fast development of power semiconductor devices in recent years, were studied. A brief look at the directives and standards setting requirements to electrical devices was also made.</p> <p>As a result of the project, an amplifier was built and its functioning was tested. The functioning of the amplifier was also compared to the output data of software simulations. On the basis of the experience obtained, a statement concerning usability of software simulation in the tasks of the project was made.</p>	
Keywords	PA Amplifier, Audio, Mosfet, THD, Power Amplifier

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Yleistä tietoa audiovahvistimista	2
2.1	PA-vahvistimista	2
2.2	Tietoa eri audiovahvistintyypeistä	3
2.3	Vahvistintopologia	6
3	Tyypillisen audiovahvistimen rakenneosat	7
3.1	Vahvistimen etuaste	7
3.2	Jännitevahvistin	9
3.3	Vahvistimen pääaste	13
4	Tehotransistorit audiovahvistimissa	14
4.1	Eryttypisten transistorien käyttö pääasteessa	14
4.2	Tehotransistorien suojausmekanismeista	15
5	Vahvistimen suojausmekanismit	18
5.1	Sulakesuojaus	18
5.2	Etuasteen suojauspiiri	19
5.3	Kaiutinsuojapiiri	19
5.4	Kaiutinlähdön oikosulkusuojaus	20
5.5	Ylikuormitussuojaus	20
5.6	Pääasteen ylijännitesuojaus	20
6	Vahvistimen fyysinen rakenne	20
6.1	Vahvistimen rakenteen ja häiriöiden yhteys	20
6.2	Komponenttien sijoittelu	21
7	Tietoa sähköturvallisuusvaatimuksista	23
8	Vahvistimen prototyypin vaaditut ominaisuudet	24
8.1	Prototyypin suunnitteluperiaatteet	24
8.2	Prototyypin ominaisuuksien määrittely	24

9	Vahvistimen prototyypin suunnittelu	25
9.1	Vahvistimen suunnittelun kulku	25
9.2	Olennaisten komponenttien mitoitus	25
9.3	Prototyypin piirisuunnittelu	27
9.4	Prototyypin simulointi ohjelmistolla	35
10	Prototyypin rakentaminen ja testaus	44
10.1	Prototyypin rakentaminen	44
10.2	Prototyypin testaus	46
10.3	Vahvistimen hyötysuhteen määrittäminen	50
10.4	Vahvistimen särön määrittäminen	54
11	Vahvistimen suoritusarvot	58
12	Johtopäätökset	60
	Lähteet	61

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä esitellään rakennettu PA-vahvistin. Työssä selvitettiin saataisiinko rakennettua toimiva laite, ja kuinka hyvin laitteen ohjelmistomallinnus ja fyysinen prototyyppi vastaisivat toisiaan. Työssä haluttiin myös testata käytännössä, miten vahvistinsuunnittelu nykyaikaisen ohjelmistosimulaation avulla onnistuisi henkilöltä, jolla ei ole juurikaan aiempaa kokemusta asiasta.

Työssä esitellään suunnitelma teholtaan muutaman sadan watin PA-vahvistimesta (*Public Address Amplifier*) ja sen toteutettu alustava prototyyppi. Vahvistintyyppi on suunnattu ammatilliseen audiokäyttöön eli esimerkiksi käytettäväksi julkisissa tilaisuuksissa. Vahvistimesta pyrittiin tekemään kohtuullisen laadukas niin äänenlaadun kuin viिकासuojauksenkin osalta. Komponenttien osalta kiinnitettiin huomiota edullisuuteen ja helppoon saatavuuteen.

Vahvistimen ominaisuuksien määrittämiseksi kannattaa tutkia markkinointisegmenttiä pyrkien löytämään vahvistimelle sopiva teholuokka ja ominaisuudet. On kannattavaa luoda silmäys yleisimmin myytäviin PA-vahvistimiin ja suunnitella jotakin näitä ominaisuuksia vastaavaa. Työssä tuodaan esille selvitettyjä olennaisia vahvistimen ominaisuuksia, joihin suunnittelu pohjattiin.

Vahvistimen suunnitteluun voi käyttää ohjelmistoja, kuten ilmaista Linear Technologyn LTSpice-sovellusta. Perinteisissä B-luokan vahvistimissa kannattaa käyttää yleisesti hyväksi havaittuja rakenteita, kuten esimerkiksi Linnin kolmiasteista topologiaa. Vahvistimessa tulee myös olla useita sovellukselle tyypillisiä suojausmekanismeja. Työssä esitetään vahvistimen koostaminen hyväksi havaituista rakenteista ohjelmistoa apuna käyttäen ja tuodaan esille prosessin käyttökelpoisuudesta tehtyjä havaintoja.

Tehotransistorien soveltuvuudessa audiovahvistimiin on eroja. Erityyppisten tehotransistorien suojaukseen vaadittavat toimenpiteet ovat erilaisia. Myös tehoelektroniikan nopea kehitys on viime vuosina saanut aikaan muutoksia audiovahvistinteknologiassa. Työssä tuodaan esille tietoa tehotransistorien ominaisuuksista ja niiden soveltuvuudesta erilaisiin käyttöolosuhteisiin. Työssä luodaan myös lyhyt katsaus audiovahvistinten tulevaisuuden kehityssuuntaan.

2 Yleistä tietoa audiovahvistimista

2.1 PA-vahvistimista

Laajasti PA-laitteilla tarkoitetaan laitteistoja, jotka soveltuvat julkiseen äänentoistoon. Tämä laitteistoryhmä sisältää siis myös megafonin, juna-aseman kuulutuslaitteistot ja koulujen keskusradion kaltaiset äänentoistolaitteet. Usein PA-laitteistolla tarkoitetaan nykyisin kuitenkin julkisissa tilaisuuksissa musiikin toistamiseen soveltuvia varsin äänekkäitä laitteistoja, joiden äänen laadulle asetetut vaatimukset ylittävät megafonin tai kuuluttamiseen tarkoitettujen laitteistojen äänenlaatuvaatimukset.

PA-laitteistolta ei yleensä haeta HIFI-maailmalle tyypillisiä äänen laatuvaatimuksia, vaan pääpaino on äänenvoimakkuuden maksimoinnissa musiikin kuuntelulle soveltuvan äänenlaadun silti säilyessä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että äänentoiston taajuuskaista on paljon suurempi (esimerkiksi 20 Hz - 20 kHz) kuin vaikkapa puhetaajuuksia korostavassa megafonissa. Myös äänentoiston dynamiikan tulee suurellakin äänenvoimakkuudella soittaessa olla toistettavalle musiikille riittävä (esimerkiksi rock 6 db, klassinen 30 db). Arviot vaadittavasta dynamiikasta tosin vaihtelevat.

Käytettävän PA-laitteiston tuottaman äänenvoimakkuuden tulee yleensä olla vähintään kohtuullinen (taustamusiikki) tai äärimmäisissä tapauksissa nopeasti kuulovaurioita aiheuttava (yli 120 db). Tässä tulee huomioida, että äänenvoimakkuus, joka aiheuttaa lähes välittömästi kuulovaurion kaiuttimen vieressä, ei ole enää lähellekään yhtä suuri 10 metrin päässä. Näin ollen suurissa tilaisuuksissa vaadittava äänenpaine kaiuttimen vieressä saattaa olla huomattavan suuri. Suurissa tilaisuuksissa vaadittavat PA-laitteiston tehot ovat usein kymmeniä tuhansia watteja.

Käytännössä voidaan todeta, että musiikin soittaminen vaikkapa 200 hengen tilaisuudessa sisätiloissa onnistuu, mikäli käytössä on kohtuullisen herkät PA-kaiuttimet, 1 000 W:n stereovahvistin ja bassotaajuuksille erillinen *subwoofer*, joka koostuu erillisestä vahvistimesta ja kaiuttimesta. Musiikin toisto onnistuu ilman *subwooferiakin*, jos kohtuullinen äänenvoimakkuus riittää eikä musiikkityyli ole bassotaajuuksia korostava (esimerkiksi rap, hiphop tai muu vastaava).

Korkeiden äänien ja keskiäänten toisto siis onnistuu 200 hengen tilaisuuksissa hyvin noin 1000 W:n stereovahvistimella, jos oletetaan, että musiikkia ei tarvitse soittaa kovin

suurilla voimakkuuksilla eli kyseessä ei ole esimerkiksi äänekäs rock-konsertti, jossa yleisö laulaa tai ns. karjuu mukana. Joudutaan myös tekemään oletus, että kaiuttimet ovat kohtuullisen herkkät. Kaiuttimien herkkyydellä on erittäin suuri vaikutus äänenvoimakkuuteen ja esimerkiksi 400 W:n vahvistimella päästään helposti samaan äänenvoimakkuuteen kuin 1000 W:n vahvistimella, jos kaiuttimet vain ovat muutaman desibelin (db/W) herkemmät. Tyypillisesti herkkät kaiuttimet ovat tosin myös kalliimpia.

Näin ollen tämän työn kannalta noin 200 W - 500 W kokeellisen monovahvistimen (stereon toinen kanava) rakentaminen prototyyppinä vaikuttaa järkevältä, koska kahdella tällaisella (tai kahdentamalla tarvittavat rakenteet) saadaan haluttu 400 - 1 000 W:n stereotoisto. Tällainen vahvistin olisi käyttökelpoinen pienillä klubikeikoilla ja pienehköissä juhlissa. Suurehkoissa tilaisuuksissa vahvistinlaitteisto voitaisiin ainakin periaatteessa koota useista tällaisista vahvistimista. On myös suotavaa, että vahvistin on hie-
man liian suuri kuin liian pieni, koska liian pieni vahvistin säröytyessään rikkoo helposti kaiuttimet. Noin 1 000 W:n stereovahvistin on aivan sopiva myös vain parinkymmenenkin ihmisen tilaisuuteen.

Suurissa tilaisuuksissa, joissa sähkönkulutus on huomattavan suurta korostuu vahvistimen hyötysuhde sekä vahvistimen paino. Viime vuosina yleistyneet D-luokan vahvistimet toteuttavat usein nämä vaatimukset paljon paremmin kuin perinteiset B-luokan vahvistimet, mutta ovat vaikeampia suunnitella ja rakentaa (ks. vahvistimien luokittelusta 2.2).

PA-laitteistolta ei yleensä vaadita HIFI-maailmasta tyypillisiä särö (THD)- ja kohinasuhteita (S/N -ratio), koska ne lisäävät laitteiston hintaa eivätkä kuunteluolosuhteet useinkaan ole siinä määrin optimaaliset, että näillä olisi merkitystä. Taustamelu, tuuli ja huono akustiikka pilaavat joka tapauksessa äänenlaatua. [1, s. 6; 2, s. 3 - 30; 3, s. 4 - 15; 4, s. 2 - 20.]

2.2 Tietoa eri audiovahvistintyypeistä

Audiovahvistimet jaotellaan usein luokkiin A, B ja D. Luokittelu perustuu nimenomaan vahvistimen pääteasteen toimintaperiaatteeseen. On olemassa muitakin luokkia kuin edellä mainitut, mutta ne soveltuvat huonosti audiovahvistinkäyttöön tai ovat johdannaisia edellä mainituista luokista siten, että niiden asema omana luokkana on kyseenalainen ja kiistelty.

Eri luokkien vahvistimien toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia voidaan luonnehtia seuraavilla tavoilla:

- *A-luokan vahvistin* on vanhin ja edelleen joidenkin hifistien ja kitaristien suosima vahvistintyyppi. Vahvistimella on puhdas toisto, mutta erittäin huono hyötysuhde. Vahvistin painaa paljon, lämpenee huomattavasti ja on tehoon nähden kallias. Mainittujen syiden takia vahvistin soveltuu huonosti PA-käyttöön. Päätetransistorit johtavat koko ajan joten välttyään transistorien avautumisen ja sulkeutumisen aiheuttamalta epälineaarisuudelta, mutta toisaalta vahvistimen pääteaste kuluttaa koko ajan tehoa.
- *B-luokan vahvistin* on ollut perinteisesti suosituin tyyppi PA-käytössä (tosin viime vuosina D-luokka on alkanut vallata markkinoita). B-luokan vahvistimen hyötysuhde on maksimissaan yli 70 % ja sillä on mahdollista saavuttaa erittäin hyvä HIFI-laatuinen äänentoisto, jos asiaan panostetaan. Kyseessä on koeteltu teknologia, josta on paljon tietoa saatavilla. B-luokan vahvistimissa päätetransistorit avautuvat vuorotellen, toinen positiivisella ja toinen negatiivisella puolijaksolla. Avautumisen ja sulkeutumisen aiheuttama epälineaarisuus tuo säröä signaaliin. Hyvin suunnitellussa B-luokan päätteessä särön määrä voi kuitenkin olla niin pientä, että sen kuuleminen on mahdotonta. Tyhjäkäynnissä ideaalinen B-luokan pääteaste ei periaatteessa kuluta lainkaan tehoa. Päätetransistorit johtavat kuitenkin suuren osan ajasta vähemmällä kuin täydellä teholla rajoittaen siis virran kulkua ja aiheuttaen siten tehohäviöitä (toisin kuin ideaalinen D-luokan pääte).
- *AB-luokan vahvistin* toimii suurella teholla kuten B-luokan vahvistin ja pienellä teholla, kuten A-luokan vahvistin. AB-luokan vahvistimista ei ole käytännön hyötyä PA-sovelluksissa.
- *D-luokan vahvistimia* kutsutaan usein virheellisesti digitaalivahvistimiksi. D-luokan vahvistin käyttää pulssinleveysmodulaatiota eli toimii joko 0-teholla tai täydellä teholla. Näin hyötysuhde on ainakin teoriassa erinomainen, koska täydellä teholla vahvistimen sisäinen resistanssi on hyvin pieni ja 0-teholla hyvin suuri, jolloin myöskään virtaa ei kulje. Tehohäviöitä ei siis periaatteessa tapahdu vahvistimen sisällä, jos vahvistimen komponentit kykenevät suorittamaan kytkennät hyvin nopeasti.

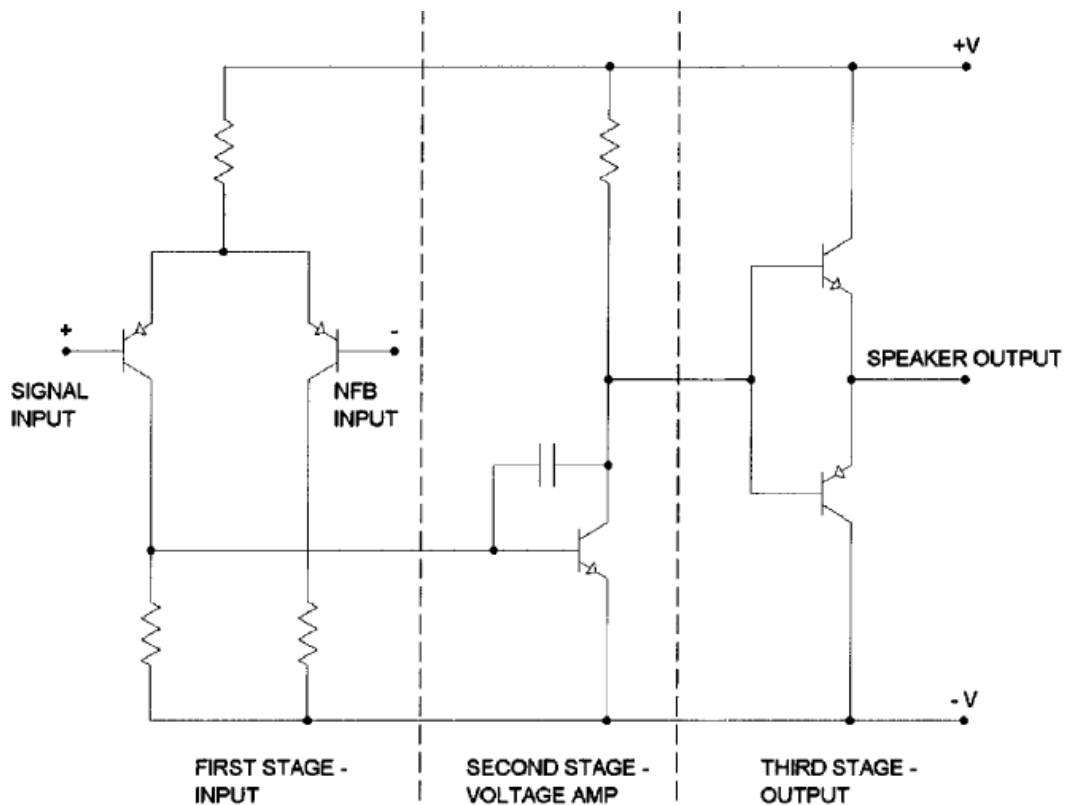
Viime vuosina nopea tehoelektroniikan kehitys onkin johtanut siihen, että markkinoilla on jo hyvän hyötysuhteen ja äänenlaadun omaavia D-luokan vahvistimia. Näihin verrattuna B-luokan vahvistin ei teoriassa ole läheskään yhtä tehokas: B-luokan vahvistimen sisäinen resistanssi rajoittaa virtaa ja aiheuttaa siten tehohäviötä vahvistimen sisällä. D-luokan vahvistinten äänenlaatu on pitkään ollut B-luokan vahvistimia heikompi (tai vaihtoehtoisesti hyötysuhde on ollut huono), mutta viime vuosina D-luokan vahvistimet ovat päässeet äänenlaadussa B-luokan tasolle.

D-luokan vahvistimet ovat ilmeisesti tulevaisuuden käytetyin vahvistintyyppi, sillä niillä voidaan saada aikaan hyvä äänenlaatu ja hyötysuhde. Paremmasta hyötysuhteesta seuraavat pienempi paino ja vähäisempi lämpeneminen. D-luokan vahvistimet ovat myös edullisia valmistaa massatuotantona, mutta niiden suunnittelu on haastavampaa. D-luokan vahvistimiin suhtaudutaan kuitenkin muusikoiden keskuudessa vielä hieman epäillen niiden uutuuden takia. D-luokan PA-vahvistimien luotettavuudesta ei ole vielä kovin pitkäaikaista laajaa käyttökokemusta. Tämän projektin kannalta D-luokan vahvistimen valmistaminen vaikuttaa liian haastavalta vähäisemmän lähdetietomateriaalin ja suurempien suunnittelu-, testaus- ja oheislaittekustannusten vuoksi.

- *T-luokka, G-luokka*, yms. sisältävät pieniä parannuksia edellä mainittuihin luokkiin tai lisäävät erityisominaisuuksia. Esimerkiksi T-luokan vahvistin on käytännössä paranneltu versio D-luokan vahvistimesta. G-luokka lisää B-luokkaan automaattisen teholähteen jännitteensäädön siten, että pienillä tehoilla teholähteen jännite putoaa ja päätetransistorien jännitehäviö voidaan siten pitää mahdollisimman pienenä. Näiden muiden luokkien aitouteen omina luokkina suhtaudutaan usein kyseenalaistaen. [1, s. 141 - 143; 5, s. 259 - 327; 6, s. 6 - 7.]

2.3 Vahvistintopologia

Audiovahvistimissa on vuosien saatossa käytetty useita topologioita. Käytännössä perinteisiin korkealuokkaisiin ja tehokkaisiin B-luokan audiovahvistimiin on käyttökelpoisimmaksi vakiintunut niin sanottu Linnin kolmiasteinen topologia (*Lin three stage topology*, v. 1956). Tästä topologiasta on vuosien kuluessa kertynyt paljon kokemuksia, ja topologia on käytännössä havaittu hyväksi. Muita nykyisin käytössä olevia topologioita ovat esimerkiksi 2-asteiset topologiat, mutta nämä soveltuvat lähinnä halpalaitteisiin, joissa kustannusten säästö on paljon äänenlaatua tärkeämpää. [1, s. 58 - 60.]



Kuva 1. Kolmiasteinen topologia [1, s. 59]

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu kaavio 3-asteisesta topologiasta. Topologiaan kuuluvat etuaste (*input stage*), jännitevahvistin (*voltage amp, VA-stage*) sekä pääteaste (*output stage, OPS*). Tyypillisesti etuaste muuntaa saamansa jännitesignaalin virtasignaaliksi, jonka taas jännitevahvistin muuntaa jännitesignaaliksi, jolla on huomattavan paljon suurempi amplitudi. Lopuksi pääteaste varmistaa vielä kuorman virran saannin, eli se on kykenevä antamaan tarvittavan määrän virtaa ulos vahvistamatta kuitenkaan jännitevahvistimen jännitteen amplitudia enempää.

Kuvassa 1 (s. 6) voitiin havaita myös negatiivisen takaisinkytkennän perusmekanismit: *NFB input* edustaa globaalia negatiivista takaisinkytkentää jonka syöttäjänä toimii kaiutinulostulo (*speaker output*). Jännitevahvistimessa (keskellä) nähdään yhdellä kondensaattorilla toteutettu yksinkertainen lokaali takaisinkytkentämekanismi, joka myös estää liian korkeiden taajuuksien vahvistamisen. Ellei liian korkeiden taajuuksien vahvistamista olisi rajoitettu, seuraisi globaalin takaisinkytkennän käytöstä vaihesiirtymästä johtuva oskillaatio, joka helposti tuhoaisi vahvistimen. [5, s. 34, 46 - 58.]

Tästä lähtien tässä työssä keskitytään vain 3-asteiseen arkkitehtuuriin ja B-luokan vahvistimien tarkasteluun. Ellei erikseen mainita muuta, kaikki jatkossa esille tuodut havainnot ja tiedot liittyvät 3-asteiseen arkkitehtuuriin ja B-luokan vahvistimiin.

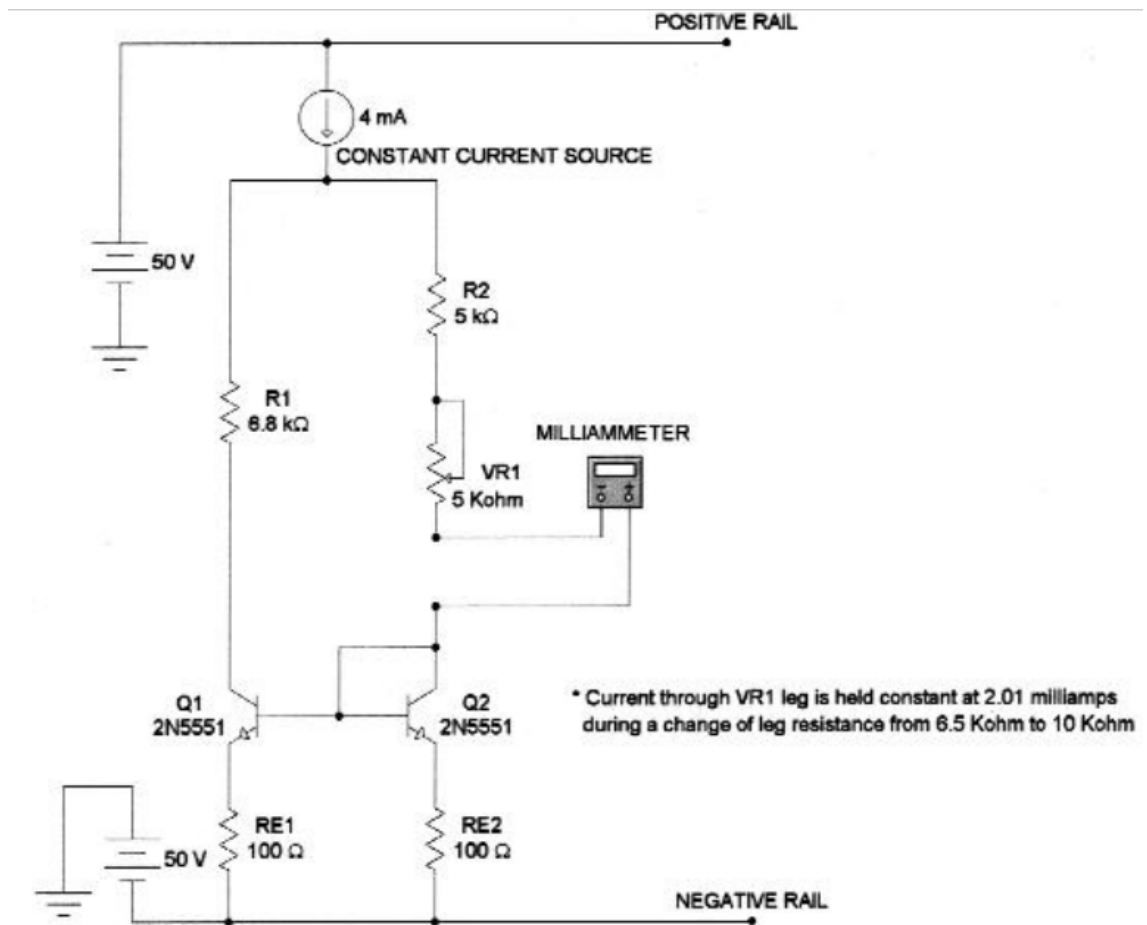
3 Tyypillisen audiovahvistimen rakenneosat

3.1 Vahvistimen etuaste

Etuaste (*input stage*) on yleensä differentiaalivahvistin ja muuntaa jännitesignaalin virtasignaaliksi (*transconductance, voltage to current amp*). Etuaste toimii puskurina sisääntulevalle signaalille (*input*) ja sen tulisi olla mahdollisimman immuuni vahvistimen jännitelähteen jännitteen vaihteluille. Etuasteen vahvistuksen tulee olla lineaarista. Etuasteen tulee kohista mahdollisimman vähän, sillä vahvistimen kohina on paljolti etuasteesta riippuvaa.

Useissa audiovahvistimissa ja niiden etuasteessa on löydettävissä tasaista virtaa tuottava lähde (*constant current source*) eli puolijohteista rakennettu mekanismi, joka pyrkii pitämään tietyn virtapiirin haaran virran vakiona. Tällaisen käyttäminen parantaa stabiiliutta, nopeutta ja vahvistusta. Tällaisen käyttö on ehdottomasti kannattavaa.

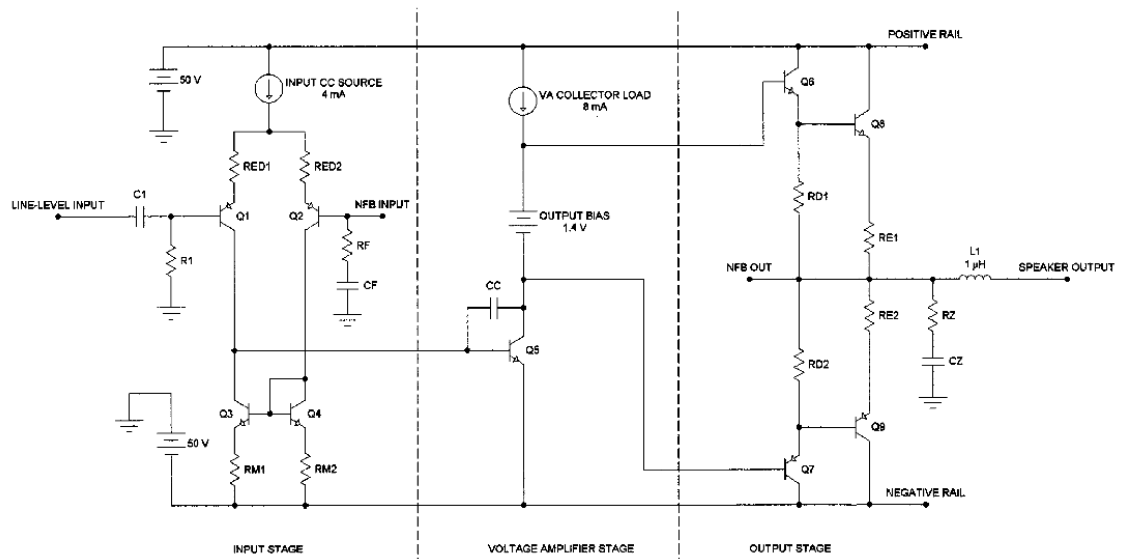
Virran peilaustekniikalla (*current mirror*, balansoi virran kulun tasaisesti kahden reitin välillä) yhdessä tasaista virtaa tuottavan lähteen kanssa, voidaan parantaa etuasteen differentiaalivahvistimen lineaarisuutta (sillä virran epäbalanssi differentiaalivahvistimessa aiheuttaa epälineaarisuutta ja säröä), virranantokapasiteettia sekä nopeutta. Tämä tekniikka voi myös helpottaa etuasteen suunnittelua ja eristää etuastetta virtalähteen epästabiileista ominaisuuksista. Virran peilaustekniikan käyttö on usein kannattavaa.



Kuva 2. Tasaista virtaa tuottava lähde ja virran peilaustekniikka [1, s. 70]

Kuvassa 2 on näytetty periaatteellinen esitys virran peilauksesta. Kuvassa on esitetty myös tasaista virtaa tuottava lähde.

Kuvassa 3 (s. 9) on esitetään yksinkertaistettu vahvistin, jonka etuaste hyödyntää virran peilausta (Q3 ja Q4) ja vakiovirtalähdettä (*input cc source*, 4 mA). Näiden mainittujen mekanismien käyttö on yleistä ja parantaa etuasteen suorituskykyä. Myös rakenteiden kahdentamisella eli peilikuvarakenteilla (*mirror image topology*) voidaan parantaa suorituskykyä ja symmetriaa.



Kuva 3. Yksinkertaistettu vahvistin [1, s. 74]

Kun etuasteen rakenne on laadukas, ainoat käytännön optimoimismahdollisuudet ovat kokonaisvirran (*tail current*) asetukset ja degenerointi (*degeneration*, vastusten käyttö tasoittamaan ja linearisoimaan transistorien ominaisuuksien vaihtelun aikaansaamaa epäbalanssia virran kulussa etuasteessa differentiaalivahvistimen haaroissa). Kuitenkin liiallinen degenerointi vähentää kokonaisvahvistusta ja siten myös linearisoivaa negatiivista takaisinkytkentää pääteasteelta. Myös liiallinen kokonaisvirran (*tail current*) käyttö voi aiheuttaa kohinaa ja lämpöhäviöitä, joten näiden optioiden järkevä vaihtelualue ei ole kovin suuri.

Laadukkaassa etuasteessa voidaan aivan hyvin käyttää edullisia bipolaaritransistoreita. Millekään JFET-transistoreille tai muulle eksoottisemmalle ei ole mitään todellista tarvetta, eikä hyvä äänenlaatu vaadi näiden käyttöä. [1, s. 63 - 64, 68 - 72, 74, 95, 110.]

3.2 Jännitevahvistin

Yleensä jännitevahvistin (*voltage amp stage*) vastaa kaikesta jännitevahvistuksesta. Jännitevahvistin saa puskuroidun ja virtavahvistetun signaalin etuasteelta ja muuntaa sen suurempijännitteiseksi signaaliksi, joka viedään pääteasteelle. Jännitevahvistimen sisäänmenoimpedanssin tulisi olla alhainen.

Jännitevahvistus vaihtelee eri taajuusalueilla. Alue, jossa vahvistus pysyy melko samanlaisena, on matalataajuusalue (*low frequency region*). Tämän taajuusalueen yläpuolella on alue, jossa vahvistus laskee melko tasaisesti (noin 6 db per oktaavi). Tätä aluetta kutsutaan korkeataajuusalueeksi (*high frequency region*). Matala- ja korkeataajuusalueiden rajaa (*dominant pole frequency*) merkitään usein tunnuksella P1.

Jos kondensaattoria CC ei kytketä (aiemmassa yksinkertaistetun vahvistimen kaaviossa kuvassa 1, s. 6), niin Millerin kapasitanssi transistoreissa aikaansaa rajan P1 asettumisen johonkin tiettyyn kohtaan. Kompensointikondensaattorilla CC voidaan vaikuttaa tämän rajan asettumiseen sopivaan kohtaan. Yksinkertaistetun vahvistimen kaaviossa (kuva 1) näkyvä kondensaattori CC saa aikaan jännitevahvistimessa lokaalin takaisinkytkennän ja oikein mitoitettuna pienentää vahvistuksen korkeilla taajuuksilla siten, että vaiheviipymästä johtuva globaalin takaisinkytkennän aiheuttama oskillaatio estyy. Tällä kompensointimenetelmällä on englanninkielinen nimi *Miller dominant pole compensation*. Tästä menetelmästä on myös olemassa paranneltu versio (*two pole compensation*), jossa kondensaattori CC on jaettu kahteen kondensaattoriin joiden kapasitanssin suhde on yleensä välillä 1:5 - 1:10. Tämä kompensointimenetelmä tosin saattaa hie- man lisätä oskillaatiovaaraa.

Lokaali takaisinkytkentä jännitevahvistimessa ei ole altis oskillaatioille, koska mitään mainittavaa vaihesiirtymää ei tapahdu jännitevahvistimen sisällä. Kuitenkin yritys rakentaa lokaali negatiivinen takaisinkytkentämekanismi jokaiseen asteeseen erikseen (jokaisen asteen erillinen linearisointi) on käytännössä osoittautunut huonosti toimivaksi. Monen kaupallisen vahvistimen huono korkeiden taajuuksien toistokyky johtuu siitä, että suunnittelussa ei ole syvällisesti ymmärretty jännitevahvistimen toimintaa ja sen suhdetta muihin asteisiin (etuaste ja pääaste). Suunnittelussa kannattaa käyttää lokaalia negatiivista takaisinkytkentää vain jännitevahvistimessa ja tämän lisäksi globaalia negatiivista takaisinkytkentää pääasteen ja etuasteen välillä.

Jännitevahvistimessa on kaksi tapaa vaikuttaa optimikompensatioon ja lineaarisuuteen: Jännitevahvistus (*voltage gain*) ja kompensointikondensaattorin (CC) arvo. Jännitevahvistus kannattaa asettaa niin suureksi kuin mahdollista ilman liiallisen kompleksisuuden lisäämistä tai ylimääräisen stabilointipiirin käytön tarvetta. CC:n optimiarvo tulee valita siten, että saavutetaan hyvä stabiilius ja maksimoidaan globaalin negatiivisen takaisinkytkennän hyötykäyttö.

Vahvistuksen tulisi siis olla suuri ja tasainen kuulotaajuusalueella ja tämän yläpuolella-kin, mutta pienentyä riittävästi (vahvistuskertoimen tulee pienentyä alle yhden), ennen kuin ollaan lähellä taajuuksia, jotka aiheuttavat oskillaatiota.

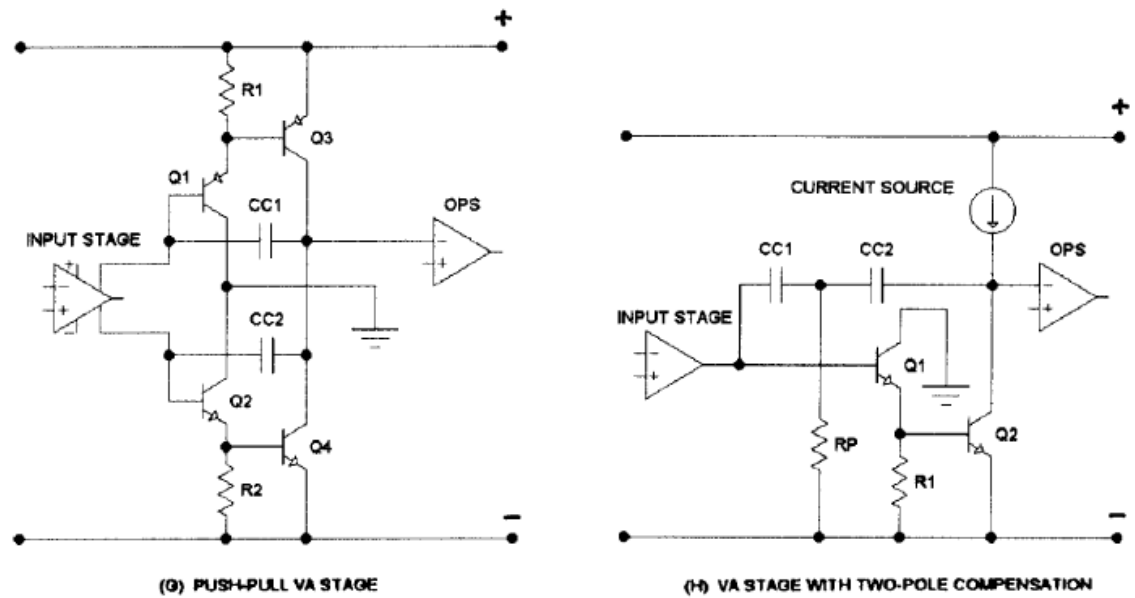
Jännitevahvistimen kompensointikondensaattorin (CC) arvo vaikuttaa etuasteelta vaadittavaan kokonaisvirtaan (*tail current*), koska taajuuden kasvaessa jännitevahvistimen impedanssin lasku riippuu CC:n arvosta (CC:n reaktanssi putoaa taajuuden kasvaessa).

Matalilla taajuuksilla etuaste ja pääaste linearisoidaan lähes pelkästään globaalilla negatiivisella takaisinkytkennällä. Korkeilla taajuuksilla ($\gg P1$) jännitevahvistin tarjoaa pääasteelle lokaalin negatiivisen takaisinkytkennän (CC) avulla linearisoidun signaalin. Etuasteelle mikään ei kuitenkaan tarjoa juurikaan negatiivista takaisinkytkentää korkeilla taajuuksilla (kun taajuus $\gg P1$). Etuaste tulee suunnitella siten, että se pysyy lineaarisena myös korkeilla taajuuksilla tästä huolimatta.

Darlington-kytkentä on jännitevahvistimessa hyvin käyttökelpoinen. Kuva 4 (s. 12) esittää jännitevahvistimien kaaviot, joissa toisessa *push-pull darlington* -topologia sekä toinen jossa CC on jaettu kahteen kondensaattoriin (*two pole compensation* -menetelmä). Muista hyvistä jännitevahvistintopologioista mainitaan vielä *cascode-stage*-kytkentä.

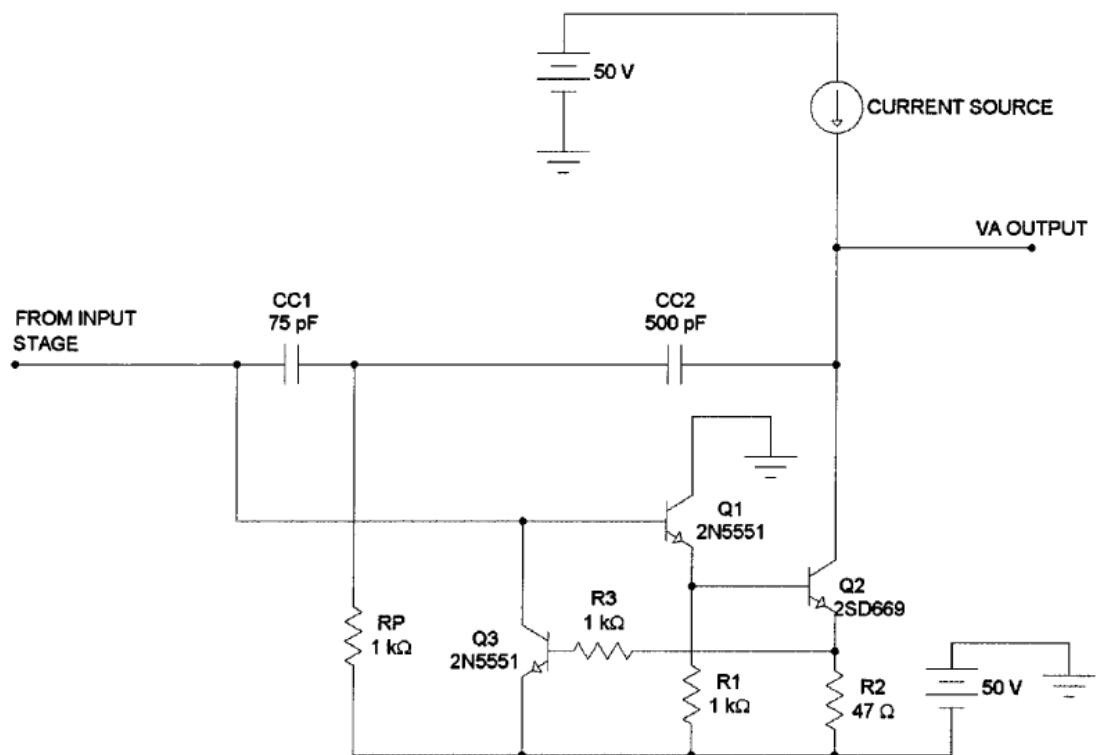
Jännitevahvistimen yliohtautumissärön (*clipping*) tulisi yleensä olla symmetristä, jos säröltä suojaavia mekanismeja käytetään (*anti-clipping*). Myös nopeuden (*slew rate*) olisi hyvä olla symmetrinen positiivisen ja negatiivisen jakson välillä.

Usein laadukas jännitevahvistin voi olla jonkinlainen *push-pull*-rakenne, joka koostuu kahdesta symmetrisestä osasta, jotka ovat toistensa peilikuvia. Vaikuttaa siltä, että useat korkeatasoiset jännitevahvistimet edustavat tätä rakennetta. [1, s. 73, 75, 109 - 111, 113 - 115, 133; 5, s. 192.]



Kuva 4. Tyypillisiä jännitevahvistimia [1, s. 113]

Jännitevahvistimessa tulisi myös olla myös ylivirtasuojaus, joka toimii pääteasteen oikosulkusuojauksen yhteydessä [1, s. 122]. Kuvassa 5 Q3, R3 ja R2 toimivat ylivirtasuojana.



Kuva 5. Periaatteellinen jännitevahvistin jossa ylivirtasuojaus [1, s. 121]

siten, että signaalin puolijakson vaihtumisen yhteydessä ilmenevä särö (*crossover distortion*) minimoituu. Liiallista biasointia tulee varoa, koska se voi aiheuttaa transistorien johtamisen myös väärällä puolijaksolla ja siten kuumentaa komponentteja.

Pääteasteella on suuri vaikutus äänenlaatuun. Pääteasteen aiheuttama särö on usein suurempi kuin laadukkaasti toteutettujen muiden asteiden. Pääteasteen särön määrään tulee kiinnittää huomiota suunnittelussa ja varmistaa, ettei muuten laadukkaasti vahvistimen äänenlaatua pilata pääteasteessa. Jos pyritään todelliseen HIFI-äänentoistoon, päätevahvistin on suunniteltava erittäin huolellisesti. Haluttaessa B-luokan vahvistimesta voidaan rakentaa hyvin vähäsäröinen. Tuolloin käytännössä ainoaksi säröksi jää korkeiden harmonisten kerrannaisten puolijakson vaihtumisen yhteydessä ilmenevä särö (*high-order crossover distortion*), jota globaali negatiivinen takaisinkytkentä ei pysty rajoittamaan (johtuen siitä, että globaali negatiivinen takaisinkytkentä vähenee taajuuden kasvaessa). [1, s. 141, 181; 5, s. 339.]

Edellä esiintuotujen syiden perusteella B-luokan pääteaste (jossa päätetransistorit johtavat vuorotellen) on tässä työssä ainoa järkevä vaihtoehto (ks. eri vahvistintyypeistä 2.2).

4 Tehotransistorit audiovahvistimissa

4.1 Erityyppisten transistorien käyttö pääteasteessa

B-luokan vahvistimen pääteaste voidaan hyvin rakentaa bipolaaritransistoreita tai Mosfet-transistoreita käyttäen. IGBT-transistorit eivät kuitenkaan sovellu tehtävään kovin hyvin. Bipolaaritransistoreilla ja mosfeteilla on molemmilla tämän sovelluksen kannalta sekä etuja että haittoja. Bipolaaritransistorien sekä mosfetien eduja ja haittoja sovelluksen kannalta ovat seuraavat:

- *Mosfetit* reagoivat lämpötilaan nousuun rajoittamalla virtaa (negative temperature coefficient). Bipolaaritransistorit toimivat päinvastoin. Lämpötilan nousu on siksi bipolaaritransistorien kohdalla paljon vaarallisempaa ja hallitsemattomampaa. Tämä ominaisuus helpottaa pääteasteen suojausmekanismien toteuttamista mosfeteilla ja auttaa tehonjaon balansoitumista mosfetien välillä.
- *Mosfeteja* ohjataan jännitteellä virran sijaan, joten ne eivät kuormita jännitevahvistinta samaan tapaan kuin bipolaaritransistorit.

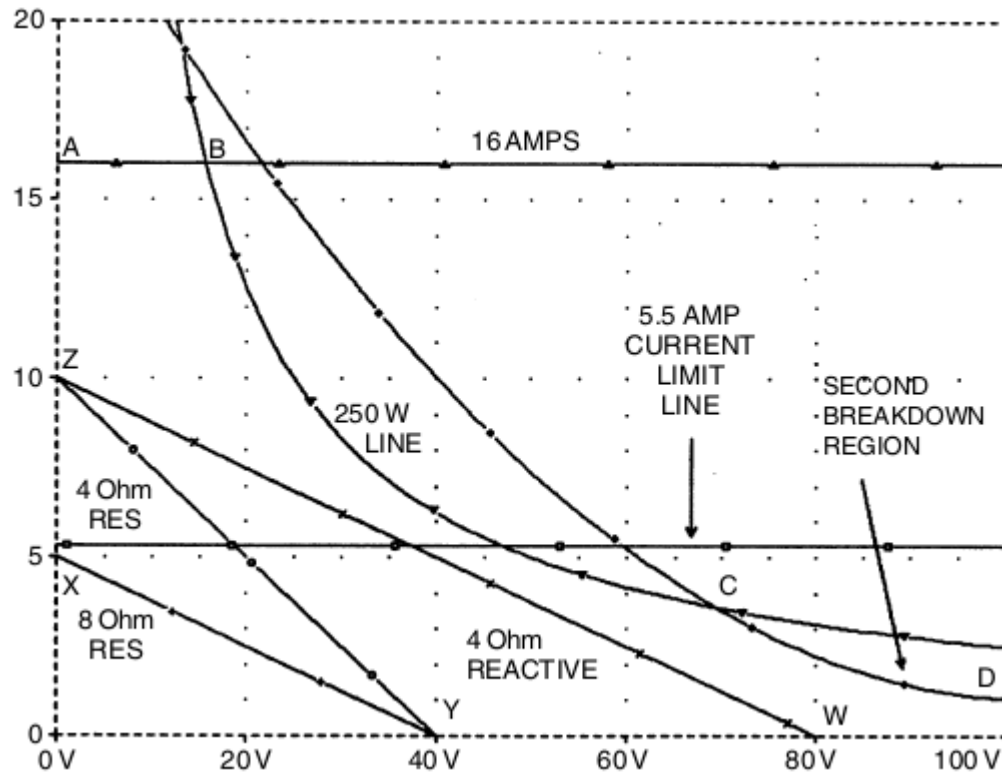
- *Mosfetit* ovat monella tapaa bipolaaritransistoreita kestävämpiä ja anteeksiantavampia ja niiden käyttö parantaa siten huomattavasti vahvistimen luotettavuutta.
- *Mosfetit* kestävät paremmin lämpenemistä.
- *Mosfeteilla* ei käytännössä ole *second breakdown* -ominaisuutta.
- *Päätemosfetien* aiheuttama särö ei juuri lisäännä, jos kuorman impedanssi pienenee.
- *Bipolaaritransistorit* ovat edullisempia.
- *Bipolaaritransistorit* aiheuttavat vähemmän säröä ja niillä on helppo saada aikaan lineaarinen vahvistus.
- *Bipolaaritransistorien* hyötysuhde on parempi.

Usein ajatellaan, että bipolaaritransistorit soveltuvat paremmin tarkkaa äänentoistoa vaativiin HIFI-laitteistoihin, kun taas mosfetit paremmin kovaa räsitusta sietäviin ammattilaisäänentoiston laitteistoihin. [1, s. 182 - 187; 5, s. 328 - 331, 398.]

4.2 Tehotransistorien suojausmekanismeista

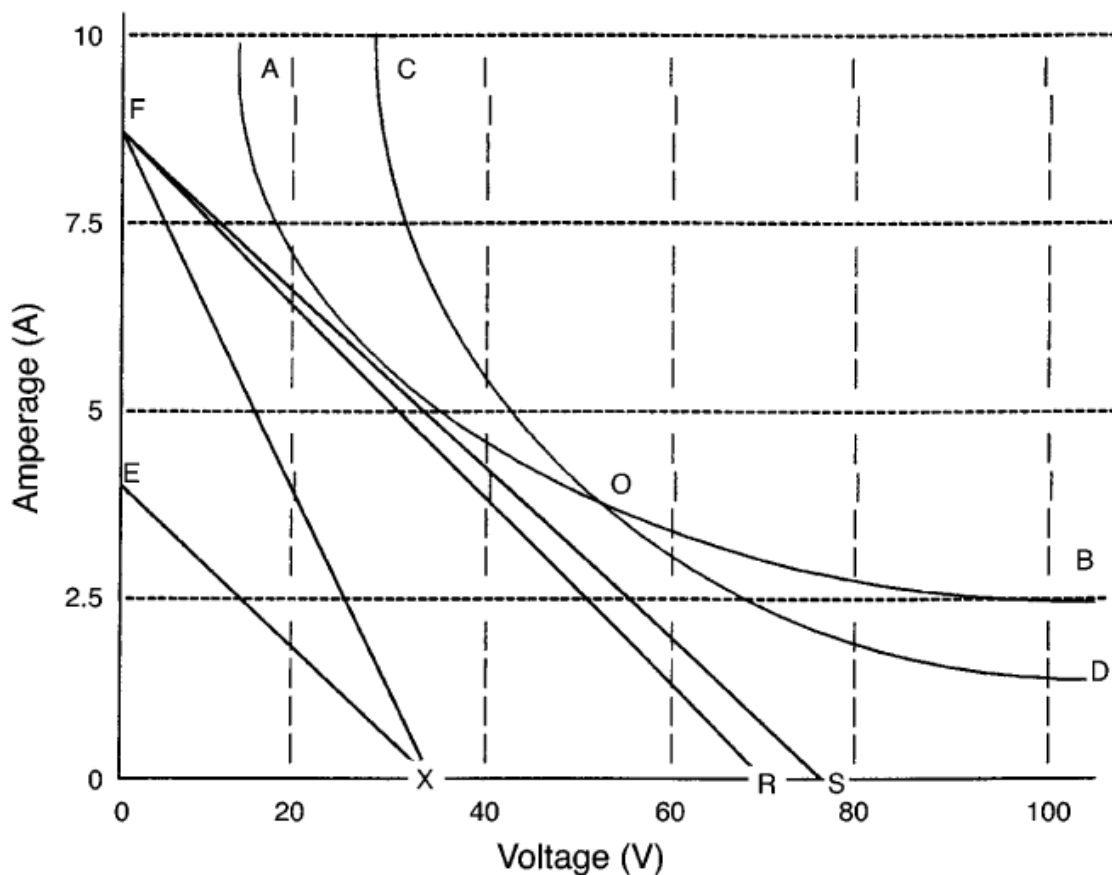
Suuritehoisen vahvistimen päätetransistorit on suojattava ylikuormitukselta. Mosfeteja saattaisi pystyä periaatteessa suojaamaan jopa nopealla sulakkeella, mutta tämä olisi epäkäytännöllistä. Aivan käytännöllistä voi kuitenkin olla mosfetien suojaaminen hila-jännitettä rajoittavalla zenerdiodilla. Bipolaaritransistorit sensijaan rikkoutuvat nopeammin kuin nopea sulake palaa (tai sulaketta ei ainakaan voida mitoittaa järkevästi) ja niiden suojaaminen on muutenkin hankalampaa. Seuraavaksi luodaan lyhyt katsaus päätetransistorien suojaamiseen audiovahvistimessa.

Kuvassa 7 (s. 16) on nähtävillä bipolaaritransistorin turvallinen käyttöalue (*SOA, safe operating area*). Käyrän BC vasen alapuoli edustaa tätä käyttöaluetta. Hieman käyrän CD yläpuolella on tietty kuormitusalue (*second breakdown region*), jota voidaan käyttää vain hetken kerrallaan ja jonka käyttäminen saattaa lyhentää komponentin elinkaarta (mosfeteilla ei audiovahvistinsovelluksissa käytännössä ole tätä aluetta). Poikkeaminen näiltä kuormitusalueilta saattaa hetkessä vaurioittaa transistoria.



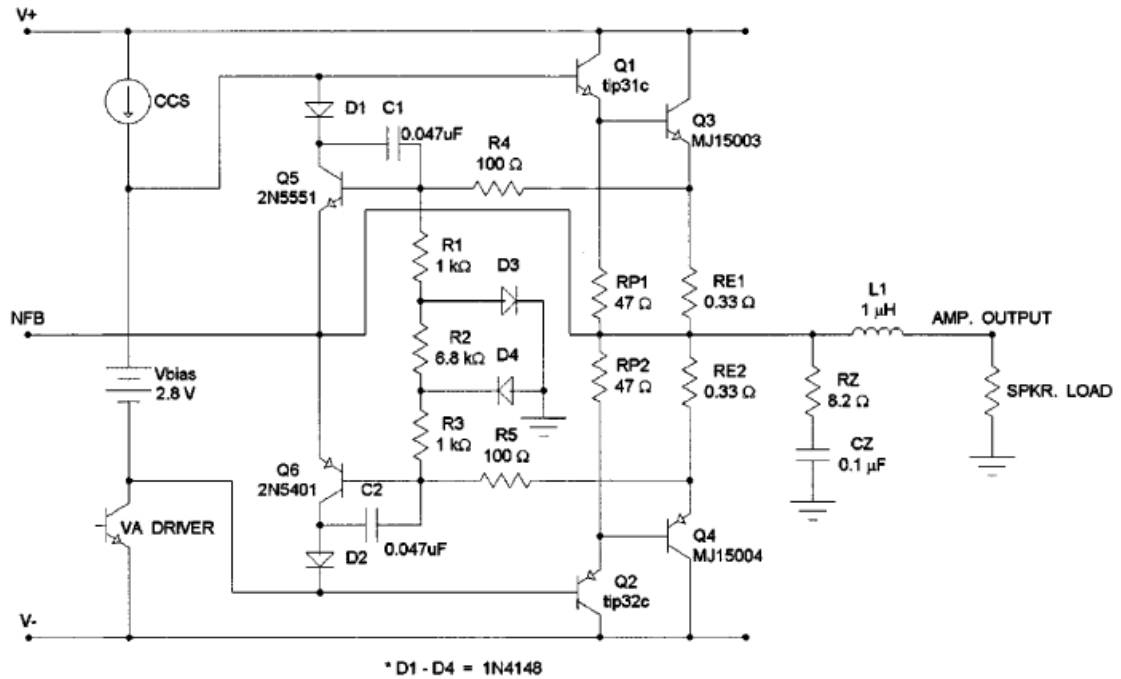
Kuva 7. Transistorin kuormitus ja yksinkertainen virran rajoitus [5, s. 405]

Suora XY kuvaa transistorin kuormitusta 8 ohmin resistiivisellä kuormalla: Transistorin maksimijännitteellä (tässä tapauksessa 40 V) transistorin läpi ei kulje virtaa ja kun transistorin jännitehäviö on nolla, läpi kulkee maksimivirta 5 A ($40 \text{ V} / 8 \text{ Ohm} = 5 \text{ A}$). Suora ZY kuvaa vastaavasti transistorin kuormitusta 4 Ohmin kuormalla ja suora ZW transistorin kuormitusta reaktiivisella 4 Ohmin kuormalla. Jos nyt vahvistimen lähtö vaikkapa oikosuljettaisiin (tai kuorman impedanssi olisi hyvin pieni), voitaisiin ylittää transistorin turvallisen käyttöalueen raja ja komponentti rikkoutuisi. Toisaalta jos transistorin yhteyteen lisättäisiin yksinkertainen suojapiiri, joka estäisi virran kasvun tietyn rajan yli (kuvassa 7 esitetty *5.5 amp current limit line*), haittaisi tämä transistorin normaalia toimintaa esimerkiksi 4 Ohmin kuorman tapauksessa, kuten kuvasta on nähtävissä. Jos virtarajaa kuitenkin nostettaisiin korkeammaksi, se ei enää suojaisi komponenttia kaiutinlähdön oikosululta. Tällä tavoin toteutetulla suojauksella transistorin koko kapasiteettia ei siis voitaisi hyödyntää vaan jouduttaisiin joko käyttämään tehokkaampaa transistoria tai vaihtoehtoisesti ottamaan käyttöön toisentyyppinen suojausmekanismi.



Kuva 8. Transistorin kuormitus ja kehittyneempi virran rajoitus [1, s. 253]

Kuvassa 8 on esitetty kehittyneempi virran rajoitusmenetelmä (*single-slope limiting*), jossa virtaa ei rajata vakiotasolle vaan suurin sallittu virta riippuu komponentin jännitteestä (kuvassa suora FS esittää virtarajaa). Vielä optimaalisempaa olisi toki, jos virtaraja myötäilisi vielä tarkemmin komponentin turvallisen käyttöalueen rajaa. Tällaisia menetelmiä (*multi-slope limiting*) onkin käytetty audiovahvistimissa jo kauan. Kuvassa 9 (s. 18) on nähtävillä tällaista menetelmää käyttävä verrattain yksinkertainen ja pitkällä aikavälillä hyväksi havaittu pääteasteen suojauspiiri, joka soveltuu hyvin käytettäväksi sekä bipolaaritransistorien että mosfetien suojaamiseen.



Kuva 9. Käyttökelpoinen pääteasteen suojauspiiri (*multi-slope limiting*) [1, s. 259]

Kuvassa 9 on esitetty varsin käyttökelpoinen suojauspiiri, joka soveltuu sekä bipolaari-transistoreilla että mosfeteilla toteutettuun pääteasteeseen. Esitetyn perusteella vaikuttaa siltä, että kuvassa 9 esitetty paljon käytetty ja yleisesti hyväksi todettu suojauspiiri kannattaa integroida suunniteltavaan vahvistimeen. Kyseinen piiri on vähintään eräs vakavasti otettavista suojauksen toteutusvaihtoehdoista. [1, s. 245 - 259; 5, s. 398 - 410.]

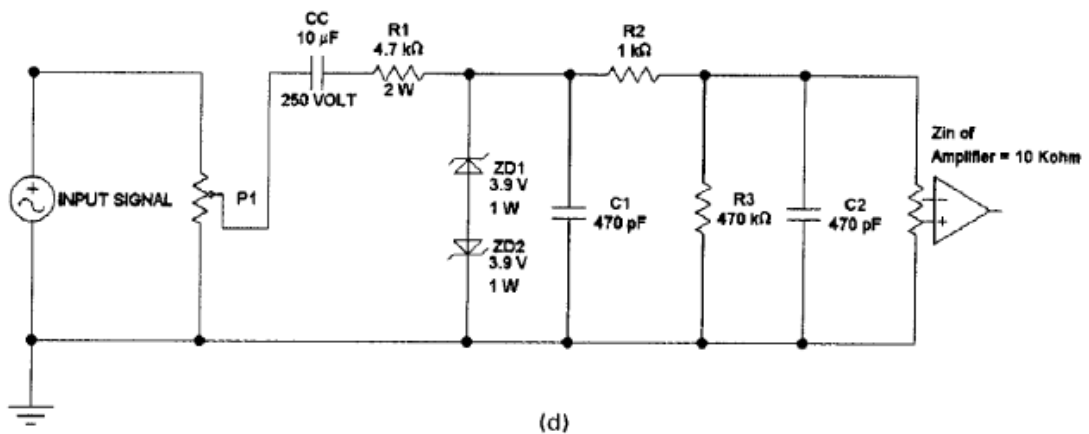
5 Vahvistimen suojausmekanismit

5.1 Sulakesuojaus

B-luokan vahvistin tulee luonnollisesti suojata sulakkeilla (tai muilla vastaavan toiminnon suorittavilla laitteilla). Vahvistimen muuntajan ensiöön ja toisioon (ennen tasasuuntaajaa) tulee molempiin asentaa sulakkeet. Samalla tavoin sulake tulee asentaa tasasuuntaajan jälkeen molempiin johtimiin (joista toisessa positiivinen tasajännite, toisessa negatiivinen), joista varsinainen vahvistinosa saa jännitteen. Etenkin ennen suotokondensaattoreita asennettujen sulakkeiden tulisi olla hitaasti palavaa tyyppiä suotokondensaattoreiden suuren latausvirran takia. Vahvistimessa tulee sulakkeiden lisäksi kuitenkin olla muitakin suojamekanismeja. [1, s. 245.]

5.2 Etuasteen suojauspiiri

Ennen etuastetta tulisi asentaa sopiva vahvistinta suojaava rakenne (ja mahdollisesti äänen voimakkuuden säädin). Rakenne voi suodattaa pois korkeita taajuuksia ja siten parantaa vahvistimen stabiiliutta. Rakenteen tulisi suojata myös ylijännitteiltä, sillä on varsin tavallista että vahvistimen sisääntuloon kytketään monimutkaisen konfiguraation yhteydessä vahingossa esimerkiksi toisen vahvistimen kaiutinlähtö. [1, s. 98 - 100.]



Kuva 10. Etuasteen suojauspiiri [1, s. 100]

Kuvassa 10 on esitetty eräs vahvistinta suojaava rakenne, joka vaimentaa korkeita taajuuksia, suodattaa tasajännitteen pois ja rajoittaa vahvistimen saaman signaalin amplitudia. Lisäksi rakenteessa on äänenvoimakkuuden säädin.

5.3 Kaiutinsuojapiiri

Vikaantuneen vahvistimen kaiutinlähdeissä saattaa esiintyä tasajännitettä. Tasajännite tuhoaa helposti kaiuttimet ja saattaa aiheuttaa muitakin vaaroja, kuten tulipalon. Vahvistimen kaiutinlähde tasajännitteen esiintyminen on estettävä suojamekanismilla. Rele, joka on virrattomana auki-asennossa, soveltuu luotettavuutensa takia hyvin kaiutinlähtöjen kytkemiseen ja irrottamiseen. Releen tulisi laukea vikatilanteessa nopeasti. Normaalisti vahvistimen kaiutinlähtöjen tasajännite tulisi olla alle 100 mV ja jo noin 1 - 2 voltin tasajännitekomponentin tulisi laukaista rele. [1, s. 274 - 280; 5, s. 411.]

5.4 Kaiutinlähdön oikosulkusuojaus

On varsin tavallista, että kaiutinlähtö oikosuljetaan vahingossa esimerkiksi kaiuttimen kytkennän yhteydessä. Vahvistimen ei tulisi tällaisessa tapauksessa rikkoutua tai polttaa sulaketta ainakaan kovin nopeasti (ks. 4.2, pääteasteen suojauspiiri, joka rajoittaa virtaa kaiutinlähdön oikosulkutapauksessa). [1, s. 264 - 270.]

5.5 Ylikuormitussuojaus

Vahvistimen ylikuumentuminen voi johtua vaikkapa huonosta ilmankierrosta. On varsin tavallista, että käyttäjä tukkii vahingossa vahvistimen kotelon tuuletusaukot. Tässä tapauksessa vahvistimen toimintaa on rajoitettava siten, että ylikuumentuminen estyy. Sopiviin paikkoihin vahvistimessa voidaan kytkeä termostaattikatkaisija, joka on yhteydessä vaikkapa kaiutinsuojapiiriin ja aikaansaa ylikuumentumistilanteessa kaiutinlähdön virtapiirin avaamisen tai sammuttaa vahvistimen kokonaan. [1, s. 264 - 274.]

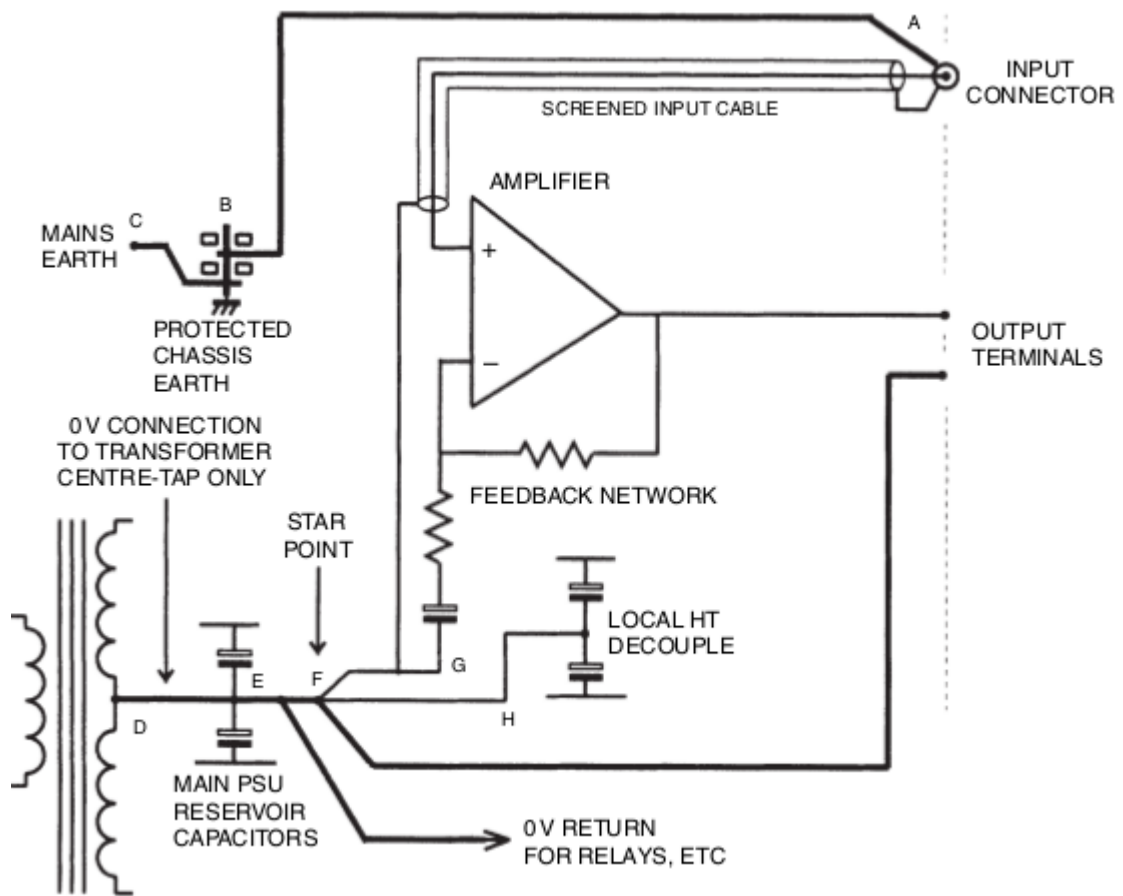
5.6 Pääteasteen ylijännitesuojaus

Kaiutinlähdön kuorman reaktiivisuus voi joissakin tilanteissa aiheuttaa ylijännitteitä pääteasteeseen siten, että päätetransistorien maksimijännite ylittyy, vaikka nämä olisivatkin reilusti mitoitettut. Pääteasteen yhteyteen kannattaa kytkeä suojadiodit (*catching diodes*). [5, s. 399, 405, 411.]

6 Vahvistimen fyysinen rakenne

6.1 Vahvistimen rakenteen ja häiriöiden yhteys

Monissa audiopiireissä läpikuuluminen (*crosstalk*) aiheutuu piirilevyn rakenteen aiheuttamista kapasitiivisista kytkeytymisistä. Koska B-luokan vahvistimissa fyysiset etäisyydet ovat kuitenkin melko suuria ja impedanssit pieniä on induktiivinen kytkeytyminen yleensä kapasitiivista kytkeytymistä suurempi ongelma. Tasajännitejohdinten (*supply rail*) suuret virrat aiheuttavat helposti ongelmia kytkeytymällä induktiivisesti signaalipiireihin. Myös nollapisteen johdintien (kuva 11, s. 21) nolasta poikkeava resistanssi aiheuttaa resistiivistä läpikuulumista. Komponenttien sijoittelu ja vahvistimen fyysinen rakenne vaikuttavat siis vahvistimen äänenlaatuun ja siksi näihin seikkoihin tulee kiinnittää huomiota vahvistinta suunniteltaessa. [5, s. 433.]



Kuva 11. Vahvistimen kytkennät [5, s. 438]

6.2 Komponenttien sijoittelu

Komponenttien sijoittelussa kannattaa huomioida seuraavat asiat ja noudattaa seuraavia periaatteita:

- *V+ ja V- johtimet* (tasajännitejohtimet) tulisi pitää lähellä toisiaan erillään etuasteesta ja pääasteen lähdöistä. Johtimet voidaan ensin tuoda pääasteelle yhdeltä laidalta muun vahvistimen ollessa toisella laidalla. Johtimet voidaan tämän jälkeen vetää pääasteelta muihin vahvistimen osiin. Pääaste vaatii eniten virtaa, eivätkä johtimet enää tämän jälkeen kuljeta suuria virtoja.
- *Etuasteen ja takaisinkytkentäpiirien* pinta-ala kannattaa pitää mahdollisimman pienenä.
- *Maayhteyden* on hyvä kulkea keskellä piirilevyä ja etuasteen sekä takaisinkytkentäpiirien tämän varrella, jotta maasilmut jäävät mahdollisimman pieniksi.

- *Suuria virtoja kuljettavien johdinten* tulee olla paksua kuparia. Muun muassa kondensaattorien latausvirrat voivat olla hyvin suuria.
- *Virtalähteen kondensaattorit* tulee kytkeä mahdollisimman suoraan tasasuuntaajaan ilman haaroituksia (muuten hurina saattaa lisääntyä).
- *Positiivinen ja negatiivinen virtalähteen kondensaattori* tulee kytkeä yhteen ja 0 V -liittymään (*center-tap*) paksulla johtimella eikä tästä johtimesta tule ottaa tähtipistettä audiokäyttöön kondensaattorien ja 0 V -liittymän väliltä, koska tätä reittiä pitkin kulkee suuria latauspulsseja, jotka aiheuttavat häiriöitä (kuva 11, s.21).
- *Pääteasteen pieniresistanssiset vastukset* kuumenevat paljon. Ne kannattaa pitää erillään muista komponenteista, etenkin kondensaattoreista.
- *Globaali negatiivinen takaisinkytkentä* kannattaa ottaa kaiuttimenlähtöön päätyvästä johtimesta eikä jostakin satunnaisesta kohdasta johdinta, joka yhdistää rinnakkain kytketyt päätetransistoriparit.
- *V+ ja V- johtimet* (tasajännitejohtimet) maahan yhdistävillä kondensaattoreilla (*rail decoupler capacitors*) tulee olla pelkästään niille käytetty yhteysjohdin maahan (kuva 11).
- *Etuasteen* tulisi olla mahdollisimman kaukana pääteasteesta.
- *Etuasteen maajohdin ja takaisinkytkentäpiirin maajohdin* tulisi olla sama ja päätyä tähtipisteeseen (kuva 11).
- *Etuasteen transistorit* tulisi kytkeä lähemmäksi, jotta niiden lämpötilat olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan.
- *Etuasteen transistorit* voidaan piilottaa esimerkiksi kondensaattorien taakse näkemästä jäähtytyssiilien emittoimaa infrapunasäteilyä.
- *Releitä* yms. ei tule kytkeä tähtipisteeseen/audiomaahan (kuva 11).
- *Tasasuuntaussillat* ja muut suuria virtoja johtavat osat tulee pitää erillään etuasteesta.
- *Kytke suojamaa (chassis earth)* sisääntulon maahan (*input ground*), älä 0 V -liittymään (*center tap*) äläkä tähtipisteeseen tai muuten seurauksena tulee hurinaa (kuva 11). [5, s. 434 - 438.]

7 Tietoa sähköturvallisuusvaatimuksista

Muun muassa seuraavat standardit ja säädökset asettavat vaatimuksia ja suosituksia vahvistimen rakenteelle, suojaukselle, sähkömagneettisten häiriöiden siedolle ja tuottamiselle:

- 2006/95/EY, Pienjännitedirektiivi.
- SFS-EN 60335-1, Kotitaloussähkölaitteiden ja vastaavien turvallisuus.
- EN-60065, Audio-, video- ja vastaavat elektroniset laitteet. Turvallisuusvaatimukset.
- 2004/108/EY, EMC-direktiivi.
- SFS-EN 61000 Standardit, Sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC) liittyvät standardit. [7; 8; 9; 10.]

Käytännössä myytäväksi valmistettavaan laitteeseen tulee liittää CE-merkintä, joka taas asettaa laitteelle erinäisiä rakenteeseen, testaukseen, laitteen dokumentointiin ja valmistusprosessiin liittyviä vaatimuksia. CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa, että laite täyttää sitä koskevien direktiivien vaatimukset euroopassa. CE-merkinnän yhteydessä valmistajan tulee myös toimittaa vastaavat vaatimustenmukaisuusvakuutukset.

Tässä työssä ei ehditty paneutua näihin säädöksiin tarkemmin. Luonnollisesti myytäväksi valmistettavan tuotteen kohdalla tilanne olisi toinen. Tällaisessa tapauksessa säädökset olisi huomioitava jo haluttujen ominaisuuksien määrittelystä lähtien. Lisäksi olisi huomioitava, että säädösten huomioonottaminen kaikkine testeineen ja sertifiointeineen lisää huomattavasti työmäärää sekä kustannuksia ja edustaa siten laitteen valmistuksen kannattavuuden näkökulmasta merkittävää tekijää.

8 Vahvistimen prototyypin vaaditut ominaisuudet

8.1 Prototyypin suunnitteluperiaatteet

Vahvistinta suunniteltaessa ei yleensä ole järkevää kehittää täysin omia ratkaisuja. Yleensä kannattaa soveltaa vuosien saatossa hyväksi havaittuja mekanismeja ja pyrkiä toteuttamaan prototyyppi niitä käyttäen. Järkevä lähestymistapa B-luokan PA-vahvistimen suunnitteluun lienee siis seuraavanlainen:

- *Päätetään ominaisuudet*, jotka halutaan (teho, äänenlaatu, kestävyysvaatimukset, suojausmekanismit).
- *Pitäydytään prototyypin rakenteen osalta* hyväksi havaitussa kolmiasteisessa topologiassa. Otetaan käsittelyyn jokin soveltuva kolmiasteiseen topologiaan pohjautuva geneerinen ratkaisu, jota muokataan ja johon tehdään tarvittavat lisäykset. Tällä tavoin pyritään tuottamaan etukäteen päätetyt ominaisuudet toteuttava ratkaisu.
- *Kustannukset ja työmäärä* on otettava huomioon ominaisuuksista päätettäessä.
- *Sopivien komponenttien saatavuudesta* on varmistuttava.

8.2 Prototyypin ominaisuuksien määrittely

Työssä haluttiin rakentaa kolmiasteisella topologialla toteutettu B-luokan PA-vahvistin jonka teholuokan haluttiin olevan välillä 200 W - 500 W. Prototyyppiksi on riittävää rakentaa monoblokki stereovahvistimen sijaan. Vahvistimen prototyypin haluttiin olevan kohtuullinen äänenlaadultaan.

Seuraavia ominaisuuksia voidaan pitää HIFI-tasoisina: signaali-kohinasuhde (*S/N Ratio*) > 90, kokonaissärö (THD) luokkaa < 0.05 % kaikilla kuulotaajuusalueilla ja kaikilla tehoilla, nopeus (*slew-rate*) riittävä (40 V/μs), taajuuskaista 3 - 40 000 Hz +-3db. Mitään tällaisia HIFI-vaatimuksia ei vahvistimelle kuitenkaan asetettu mutta perusrakenne pyrittiin kuitenkin suunnittelemaan sellaiseksi, ettei HIFI-ominaisuuksien saavuttamiselle asettuisi mitään varsinaisia esteitäkään. [1, s. 15 - 25.]

Koska vahvistin on suunnattu PA-käyttöön, sen tulisi olla kestävä. Aiemmin (ks. pääte-transistorien vertailusta 4.1.) käsiteltyjen tietojen pohjalta on ilmeistä, että päätetransistoreina kannattaa käyttää mosfeteja. Myös kaikki mainitut suojausmekanismit (ks. suojausmekanismit 5.) tulee ottaa käyttöön: lähdön oikosulkusuojaus ja ylivirtasuojauus, tulojen ylijännitesuojaus, lähtöjen suojaus tasajännitteeltä (kaiutinsuojaus), oikosulkusuojaus ja ylikuormitussuojaus (sulakkeet, termostaattikytkin).

Kaupallisten vahvistimien muuntajat ovat usein mitoitettuja noin 70 %:n kapasiteettiin vahvistimen RMS-tehosta koska maksimaalisen säröytymättömän musiikkisignaalin teho on yleensä vain tämä osa maksimaalisen vahvistimessa säröytymättömän sinisignaalin tehosta, ellei musiikki ole voimakkaasti kompressoitua. Muuntajan mitoituksessa pyrittiin vähintään tälle tasolle. Pyrittiin myös siihen, että vahvistin tuottaisi täyden tehon noin 1 V:n RMS syötteellä. Lisäksi pyrittiin siihen, että vahvistimen sisäänmenon impedanssi olisi noin 5 - 100 kOhm [1, s. 38 - 40, 299, 316.]

Komponenttien sijoittelulle ja vahvistimen fyysiselle rakenteelle ei tässä vaiheessa asetettu vaatimuksia, koska prototyyppiä ei välttämättä ollut tarkoitus koteloida. CE- ja EMI-sertifioinnin asettamat vaatimukset (ks. sähköturvallisuusvaatimuksista 7.) sekä muut yleistietoina esille tuodut seikat eivät myöskään kuuluneet vielä tässä varhaisessa prototyyppissä huomioon otettaviin vaatimuksiin.

9 Vahvistimen prototyypin suunnittelu

9.1 Vahvistimen suunnittelun kulku

Vahvistin suunniteltiin LTSpice:lla käsiteltyjä periaatteita (ks. vaaditut ominaisuudet, 8.) noudattaen ottaen huomioon tehontarve ja komponenttien hinnat. Pääteaste suunniteltiin käyttäen preferoituja komponentteja (Mosfet-päätetransistorit). Ennen piirisuunnittelun aloittamista komponenttien ominaisuudet mitoitettiin karkeasti.

9.2 Olennaisten komponenttien mitoitus

Ennen piirisuunnittelun aloittamista tehtiin karkeasti olennaisimmat mitoitukset, jotta saatiin tarkempi kuva komponenteille asetuista vaatimuksista. Muuntaja, käytetyt jännitteet ja olennaisimmat komponenteille asetetut vaatimukset selvitettiin karkealla tasolla.

Kaupallisissa vahvistimissa muuntaja on usein mitoitettu noin 70 %:n osuuteen vahvistimen RMS-tehosta [1, s. 299, 316]. Jos vahvistin tehtäisiin täysin laadusta tinkimättä, voitaisiin muuntaja mitoittaa 100 %:n RMS-teholle. Jos tuolloin vahvistimeen, joka antaisi 500 W tehoa 4 Ohmin kaiutinkuormaan, asennettaisiin tyypillinen toroidimuuntaja kahdella identtisellä toisiolla, niin muuntajan yhden toision toisiojännitteen tulisi olla tehollisarvoltaan kutakuinkin seuraava [1, s. 314]:

$$\text{Toisiojännite} = (\sqrt{4\Omega * 500W} + 4V) * 1,07 \approx 52V$$

Koko muuntajan näennäistehon tulisi olla kutakuinkin seuraava [1, s. 315]:

$$\text{Näennäisteho} = \sqrt{500W / 4\Omega} * 1,2 * 52V \approx 698VA$$

Koska työn tavoitteisiin ei oltu asetettu tarkalleen 500 W vahvistimen rakentamista, sopisi tarkoitukseen mikä tahansa tyypillinen toroidimuuntaja, jossa on kaksi identtistä toisiota 0 V lähdön (*center tap*) aikaansaamiseksi ja lasketun suuntaiset arvot.

Tasasuuntaajan yhteyteen asennettavien suotokondensaattorien jännitekestoisuuden karkea likiarvo voidaan nyt helposti määrittää toroidin toisiojännitteen perusteella [1, s. 306]:

$$\text{Jännitekestoisuus} \geq \sqrt{2} * 52V * 1,10 \geq 81V$$

Laadukkaan vahvistimen virtalähteen suotokondensaattorien varauskapasiteetin tulisi olla yhteensä noin $2 * 100 \mu F/W$ [1, s. 32]. Toisaalta jotkut kaupalliset valmistajat suosittelevat arvoa $2 * 43 \mu F/W$ [1, s. 305]. Kaupallisissa toteutuksissa löytyy myös pienempiä varauskapasiteetteja (muun muassa T.Amp E800, 1 000 W:n vahvistin, jolla on varauskapasiteettia vain $2 * 20 \mu F/W$). Nämä huomioon ottaen arvioitiin että 500 W:n vahvistimen kondensaattorien varauskapasiteetti voisi olla väliltä 20 000 - 100 000 μF riippuen siitä kuinka paljon äänenlaatuun halutaan panostaa. Tätä arvoa ei toisaalta kannata ainakaan ylittää, koska se on hyödytöntä. Kondensaattorit ovat kalliita ja kondensaattorien suuri latausvirta käynnistyksen yhteydessä saattaa aiheuttaa ongelmia. Tämän projektin kannalta 20 000 μF :n kapasiteetti vaikutti aivan riittävältä.

Transistorien ja muiden puolijohteiden jännitekestoisuuden tulisi tiettyjä poikkeuksia lukuunottamatta olla kaksinkertainen vahvistimen virtalähteen tuottamaan suurimpaan tasajännite-eroon nähden (teoksen [1] esimerkeissä kyseisen teoksen tekijä tosin ei itsensä aina noudata tätä periaatetta) [1, s. 247; 5, s. 399]. Tässä tapauksessa jännitekestoisuuden tulisi siis olla kutakuinkin seuraava:

$$(\sqrt{2} * 52V * 2) * 2 \approx 294V$$

Signaalin samaa puolijaksoa vahvistavien tehotransistorien hetkellisen virrankeston tulisi yhdessä (virta jakautuu transistorien kesken) ylittää seuraava reilulla marginaalilla, kun oletetaan että 4 Ohmia on pienin sallittu kaiutinimpedanssi:

$$(\sqrt{2} * 52V) / 4 \Omega \approx 18,4 A$$

Vastaavasti samaa puolijaksoa vahvistavien tehotransistorien jatkuvan virrankeston tulisi yhdessä ylittää seuraava:

$$52V / 4 \Omega * 1/2 \approx 6,5 A$$

9.3 Prototyypin piirisuunnittelu

Vahvistin suunniteltiin esitettyjä yleisesti hyväksi havaittuja rakenteita ja menetelmiä (ks. audiovahvistimen rakenneosat, 3.) käyttäen: 3-asteinen rakenne, peilikuvatopologia, darlingtonkytkentä, kaskadiaste (*cascade stage*), globaali negatiivinen takaisinkytkentä, kaksinapainen kompensointi (*two-pole compensation*), B-luokan Mosfet-pääteaste ym.

Suunnittelussa käytettiin LTSpicen versiota 4.11q, koska uusin versio havaittiin tämän projektin yhteydessä epävakaaammaksi. Ohjelmisto on ilmaiseksi saatavilla *Linear Technologyn* sivustolta.

Ennen suunnittelua tutkittiin helposti saatavilla olevia työhön soveltuvia komponentteja. Havaittiin, että 300 VA:n toroidimuuntajia 2 x 24 V:n toisiolähdöillä (voitaisiin käyttää kahta tällaista), IRF640- ja IRF9640-mosfet-transistoreita, sekä MJE340- ja MJE350-transistoreita oli helposti ja melko edullisesti saatavilla. Näiden Spice-mallinnustietoja

oli myös helposti saatavilla internetissä. Tehotransistoreiksi valittiin IRF640 sekä IRF9640, koska näiden soveltuvuus audiovahvistimiin näytti lukuisten internetkeskustelujen perusteella varmalta. Transistorien virrankesto ylitti myös reilusti asetetut vaatimukset, koska edullisina komponentteina näitä voitiin ongelmitta asentaa monta rinnakkain. Näiden transistorien jännitteenkesto tosin oli vain 200 V (eikä vaadittu 300 V), mutta vahvistimen prototyyppi päätettiin kuitenkin rakentaa näitä transistoreita käyttäen.

Aiempaa kokemusta vahvistimen suunnittelusta ja rakentamisesta ei ollut, joten oltiin melko epätietoisia siitä, saataisiinko ylipäättään aikaan mitään kunnollisesti toimivaa, ja vastaisiko rakennetun prototyypin toiminta ollenkaan sitä, mitä ohjelmistosimulaation pohjalta voitaisiin olettaa. Näin ollen helposti saatavia ja edullisia IRF640 ja IRF9640 transistoreita päätettiin kokeilla ja vaihtaa nämä tarvittaessa toisiin tyyppeihin, jos ylipäättään saataisiin aikaan mitään toimivaa. 300 V jännitteenkestovaatimuksista luovutettiin prototyypin rakentamisen yhteydessä monen muunkin komponentin kohdalla. Esimerkiksi etuasteessa ja jännitevahvistimessa käytettiin yleisiä ja erittäin edullisia 2n5551- ja 2n5401-bipolaaritransistoreita.

Etuaste koostettiin käyttäen peilikuvatopologiaa ja vakiovirtalähdettä (*constant current source*). Koko etuasteen topologia on yleisesti todettu hyvin toimivaksi. Jännitevahvistin koostettiin käyttäen darlingtonkytkentää, kaskadiastetta (*cascode stage*), kaksinaista kompensatiota (*two-pole compensation*), virtaa rajoittavaa mekanismia (Q16 ja vastaava peilikuvatransistori, ks. kuva 14, s. 32) sekä peilikuvatopologiaa. Pääteaste koostettiin yksinkertaisesti rinnakkaisista mosfetpareista ja pääteasteeseen asennettiin tässä dokumentissa (ks. suojausmekanismeista 4.2.) esille tuotu oikosulkusuojausmekanismi.

Pääteasteen ja kaiuttimen väliin asennettiin vielä zobel-piiri (*zobel-network*) suojamaan vahvistinta kuorman reaktiiviselta komponentilta ja pääteasteen yhteyteen asennettiin suojadiodit (*catching diodes*). Virtalähde koostettiin suoraviivaisesti tasasuuntaajasta, kahdesta 50 000 μF kondensaattorista sekä muutamasta muusta komponentista. Etuasteen suojapiiri koostettiin muokkaamalla aiemmin (kuva 10, s. 19) esille tuotua etuasteen suojapiiriesimerkkiä ja kaiutinsuojapiiri muokattiin omiin tarpeisiin sopivaksi tiettyä standardiratkaisua hyväksikäyttäen (ks. kuva 18 s. 35 sekä kaiutinsuojapiiri 5.3, s. 19). LTSpice-simulaatioissa ei käytetty tai mitoitettu sulakkeita, vaan mitoitus jätettiin myöhemmin tehtäväksi.

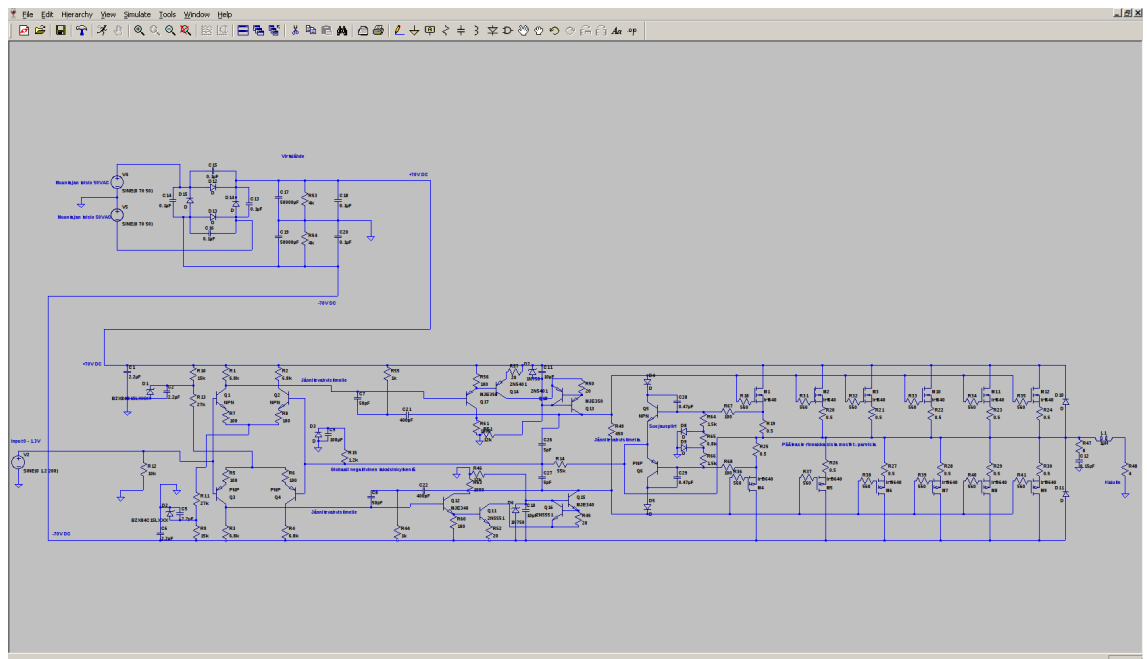
LTSpice tuntui toimivan yllättävän hyvin ja ulkopuolisten komponenttimallienkin lisääminen onnistui melko helposti. Vahvistimesta tuli kuitenkin niin monimutkainen, että kulloinenkin simulaatio vei paljon aikaa, usein jopa tunteja. Tästä johtuen komponenttien mitoitus kului hyvinkin paljon aikaa.

Mitoitus oli iteroivaa ja toimivan yhdistelmän löytäminen oli erittäin työlästä, koska yhdistelmän tuli toimia niin monessa eri tilanteessa: Vahvistus tuli olla mahdollisimman särötöntä ja tasaista koko kuulotaajuusalueella mutta vahvistuskertoimen tuli pienentyä alle yhden muutaman MHz:n taajuudella, vahvistimen tuli toimia oikein kaiutinlähdon oikosulkutilanteessa mutta suojausmekanismi ei muuten saanut häiritä vahvistusta, virta ei saanut missään vahvistimen osassa kohota liian suureksi missään vikatilanteessa mutta toisaalta virran rajoitusmekanismi ei saaneet häiritä vahvistimen normaalia toimintaa jne. Usein pienen muutoksen tekeminen aiheutti ongelmia jossakin tilanteessa ja kaikkien tilanteiden selvittäminen vei paljon aikaa jokaisen muutoksen kohdalla. Vaikka simulointi ohjelmistolla oli paljon käteväämpää kuin fyysinen testaaminen olisi ollut, oli testaaminen silti työlästä ja hidasta. Simulointiin kului paljon aikaa.

Etuasteena yritettiin aiemmin vielä käyttää tiettyä hienostuneempaa ratkaisua, mutta tätä etuastetta ei yrityksistä huolimatta saatu toimimaan kovin hyvin muun kokonaisuuden kanssa ja sen käytöstä luovuttiin.

Lopulta saatiin aikaan kohtuullisen toimivalta vaikuttava mitoitus, jossa kaikki näytti toimivan ja siniaalto näytti eheältä kaikilla kuulotaajuuksilla. Koska työssä pyrittiin vain kohtuulliseen äänentoistoon eikä mitään HIFI-vaatimuksia asetettu, vahvistuksen säröprosentteja ei ruvettu tässä vaiheessa mittaamaan, vaan tyydyttiin arvioimaan pääasiassa siniaallon puhtautta silmämääräisesti. Tähän vaikutti myös epäily siitä, ettei vahvistimen prototyyppi kuitenkaan toimisi täsmälleen mallinnuksen mukaisesti muun muassa komponenttien toleransseista ja osien sekä johdinten sijoittelusta johtuen. Muutenkin tässä vaiheessa heräsi epäily vahvistimen fyysisen prototyypin toimivuudesta. Koska mitään vastaavaa ei ollut aiemmin rakennettu tai mallinnettu, mallinnuksessa ei haluttu mennä suunnattoman tarkalle tasolle.

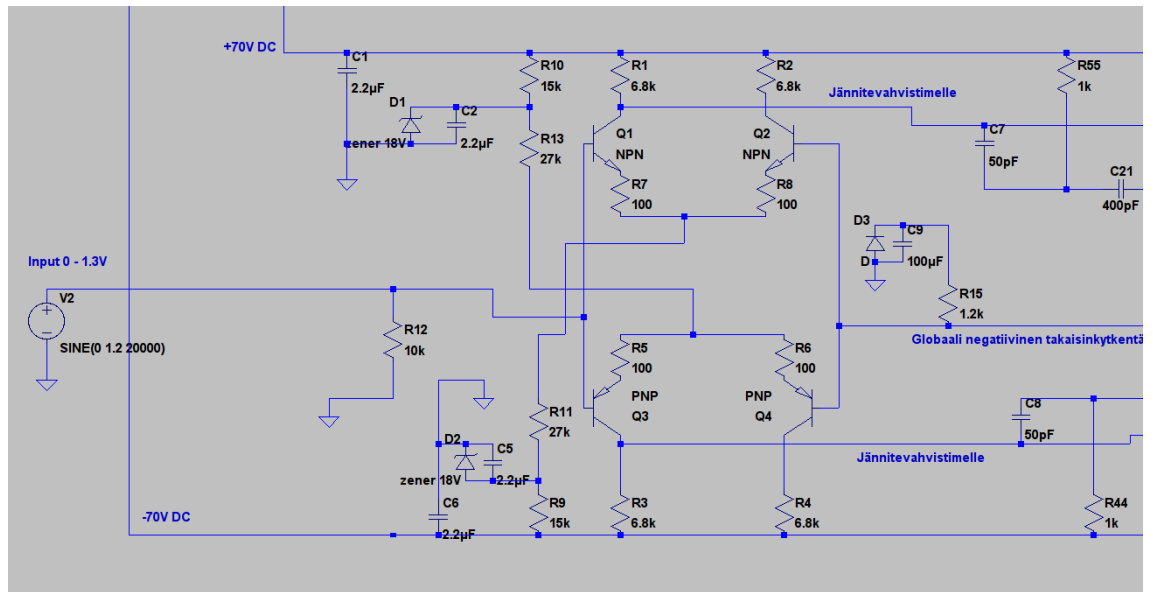
IRF640- ja IRF9640-transistorit näyttivät simulaatiossa soveltuvan audiokäyttöön toisin kuin joidenkin muiden mosfetien mallit, joita testattaessa ei saatu mitään kunnollista tulosta aikaan (paitsi voimakas särö).



Kuva 12. Virtalähde ja vahvistin

Kuvassa 12 on esitetty LTSpicella suunniteltu kokonaisuus, jossa mukana virtalähde, etuaste, jännitevahvistin, pääteaste ja pääteastetta suojaava zobel-piiri. Pääteasteeseen on liitetty oikosulkusuojaus, joka rajoittaa virtaa mikäli kaiutintulostulo oikosuljetaan. Kuvasta puuttuvat kaiutinsuojauspiiri sekä sisääntuloa suojaava piiri. Nämä esitetään myöhemmin. Kuva 12 esitetään myöhemmin vielä selvyiden vuoksi pienempinä paloina.

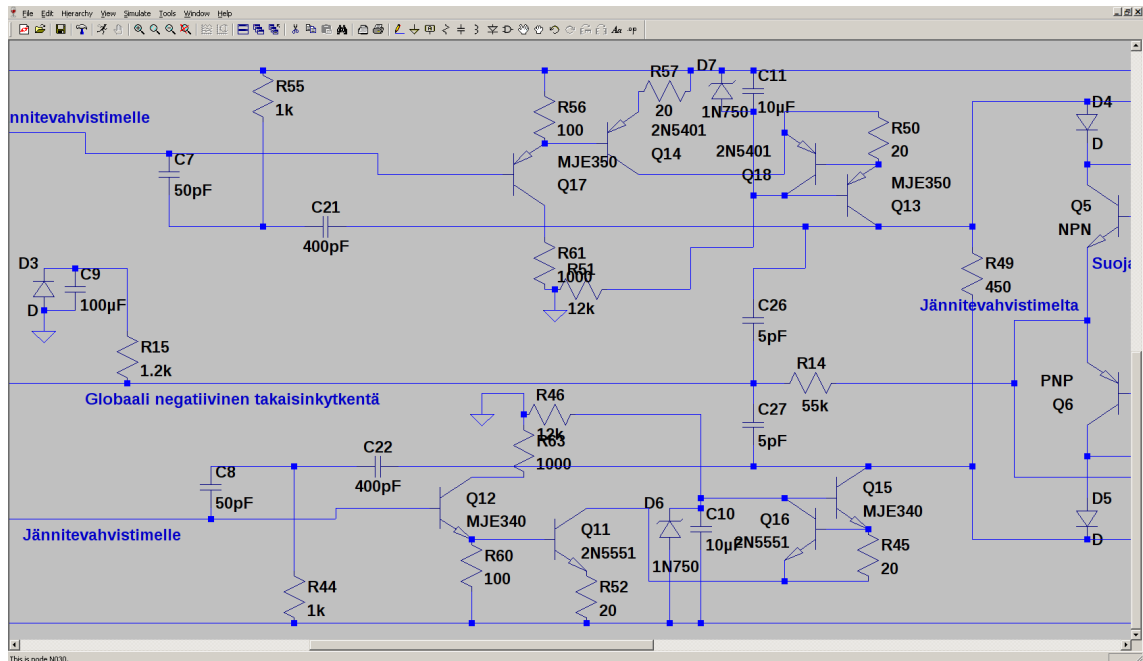
Suunniteltu vahvistin sisältää aiemmin esille tuotuja yleisesti hyväksi havaittuja elementtejä. Näiden rakenteiden pitäisi edustaa tasokkuutta, jolla on mahdollista saada aikaan tarvittava teho ja hyvä äänenlaatu, mikäli käytetyt komponentit ovat soveltuvia, oikein mitoitettuja ja biasointi jännitevahvistimen ja pääteasteen välillä (R49, tässä tapauksessa 460 Ohmia) tehdään oikein.



Kuva 13. Vahvistimen etuaste

Kuvassa 13 on esitetty etuaste suurennettuna. Etuaste on peilikuvamainen ja siten sen pitäisi tuottaa symmetristä aaltomuotoa. Etuaste saa syötteenään sisääntulosignaalin (*Input*, jonka amplitudi on mitoitettu kuvassa välille 0 - 1,3 V, tosin mitoituksessa oltiin huolimattomia, ja arvo vaihteli suunnittelun aikana päättyen lopulta arvoon 1,2 V vahvistimen suoritusarvoja määriteltäessä, s. 58) sekä globaalin negatiivisen takaisinkytkennän pääteasteelta. Etuasteessa on kaksi ulostuloa, jotka syötetään jännitevahvistimelle (kuva 14, s. 32).

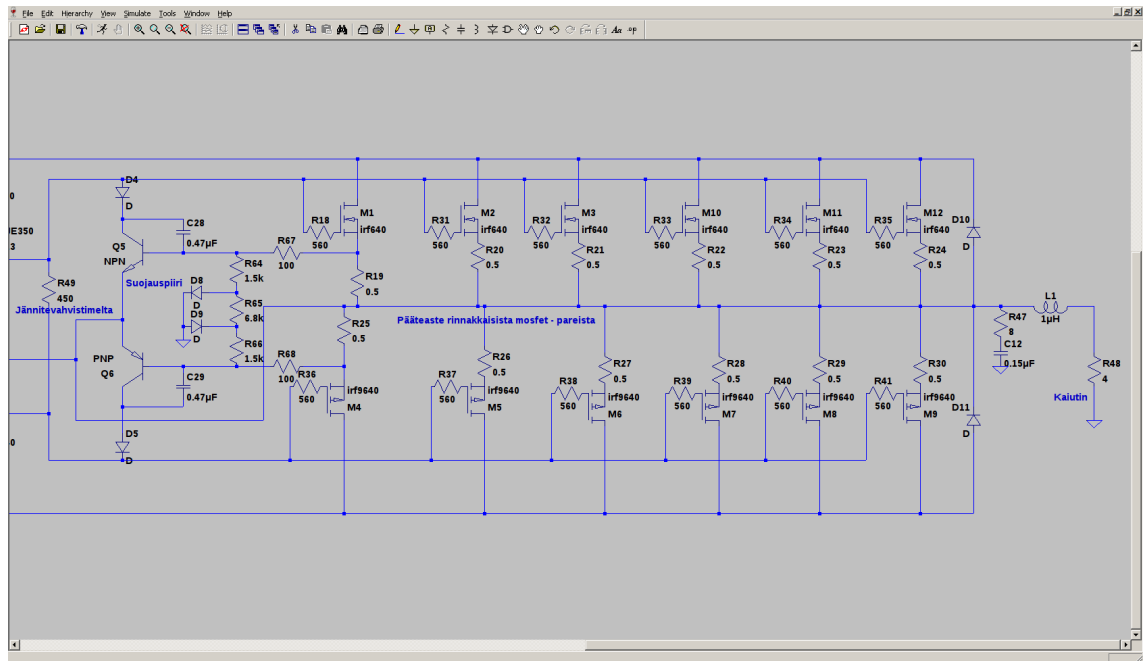
Suunnittelussa kokeiltiin joitakin muitakin vielä laadukkaampia etuastetopologioita, mutta niiden kanssa päädyttiin ongelmiin (muun muassa vikatilanteiden ylivirtoihin jännitevahvistimessa), joita ei ehditty ratkaisemaan työhön resursoidun ajan puitteissa. Lopulta päädyttiin kuvan 13 etuasteratkaisuun, sillä se näytti toimivan hyvin kaikissa tilanteissa.



Kuva 14. Jännitevahvistin

Kuvassa 14 on esitetty jännitevahvistin. Jännitevahvistin on rakenteeltaan peilikuvamainen. Käytössä on sekä darlingtonkytkentä (Q17 ja Q14) sekä kaskadiaste (*cascode stage*, Q13). Transistori Q18 suojaa komponentteja rajoittamalla kytkennän läpi kulkevaa virtaa vikatapauksissa (esim. kaiutinlähden oikosulku).

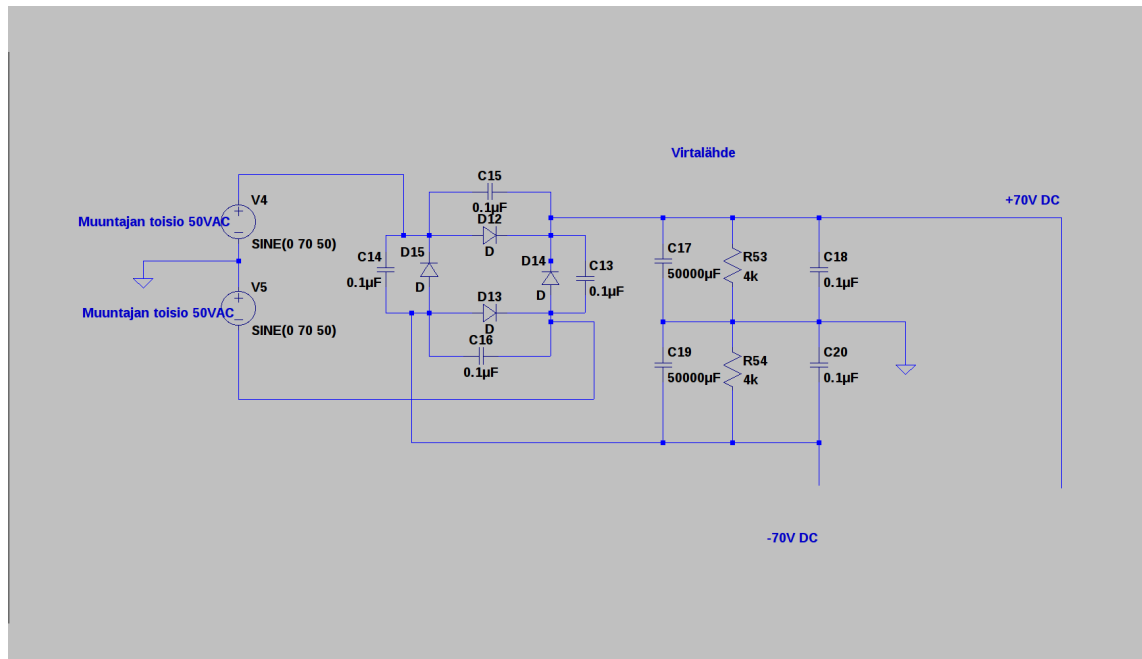
Jännitevahvistimen ulostuloon on kytketty vastus R49, jolla biasoidaan pääteasteen saama jännite eli haetaan kompromissi päätteen transistorien avautumisen ja sulkeutumisen yhteydessä esiintyvän särön ja transistorien vuotovirran välillä. Jännitevahvistimen ulostulojännite vastaa kaiuttimelle annettua jännitettä.



Kuva 15. Vahvistimen pääteaste

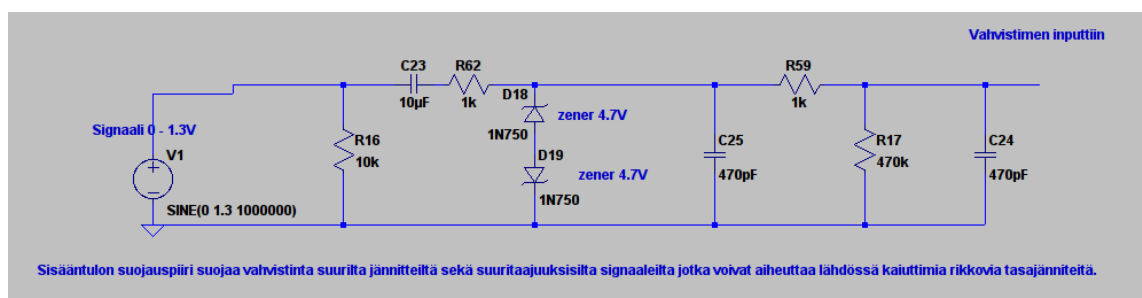
Kuvassa 15 on esitetty pääteaste. Pääteaste on koottu rinnakkaisista Mosfet-pareista (IRF640 ja IRF9640), joiden tehon- ja virrankesto vaikuttaisi riittävän hyvin vahvistimen tarpeisiin kyseisellä konfiguraatiolla. Kuvassa 19 (s. 36) on näkyvissä kaiutinvirta 1,2 V amplitudin sisääntulosyötteellä ja kuvassa 20 (s. 37) näkyvissä pääteasteen Mosfet-parin virrat samassa tilanteessa.

Pääteasteessa on myös suojauspiiri (kuva 15), joka pudottaa mosfetien saaman ohjausjännitteen, jos vastuksien R19 ja R25 läpi kulkee ylivirtaa. Tämä estää tuhoisan suuren virran kulun mosfetien ja kaiutinlähdon kautta, jos kaiutinlähde oikosuljetaan (ks. kuvat 25, 26, 27 ja 28, s. 40 - 42, joissa nähtävillä kaiutinlähdon, suojauspiirin ja mosfetparin virrat sekä R50:n ja Q18:n virrat vikatilanteessa jossa kaiutinlähde on oikosuljettu).



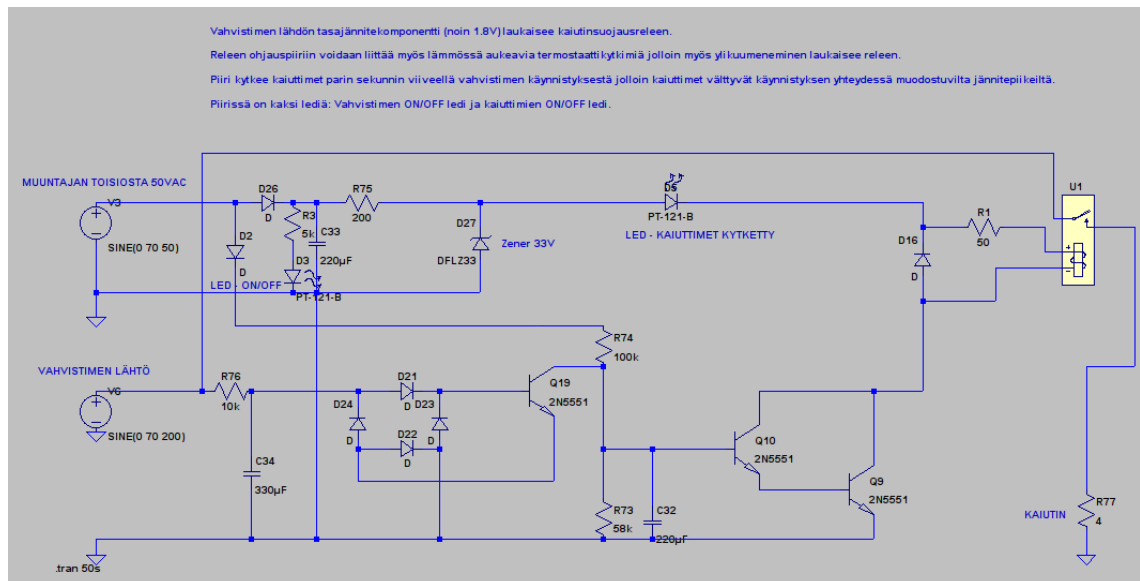
Kuva 16. Virtalähde

Kuvassa 16 on esitetty virtalähde. Virtalähteessä on näkyvillä ikään kuin kaksi muuntajan toisiokäämiä, tasasuuntaussilta sekä suuret suotokondensaattorit. Virtalähde tuottaa +70 V ja -70 V tasajännitteet (*rail voltage*), ja maa on näiden välissä (0 V, *center tap*). Muuntajan toisiokäämien jännite tulisi olla noin 50 VAC, jotta päästään noin 70 V tasajännitelukemiin ja vahvistimen teho olisi 400 W:n - 500 W:n luokkaa. C13 ja muut tasasuuntaussillan kondensaattorit on kytketty rajoittamaan tasasuuntauksen yhteydessä esiintyviä piikkejä.



Kuva 17. Sisääntulon suojauspiiri

Kuvassa 17 on esitetty sisääntulon suojauspiiri. Tämä on kytkettävä vahvistimen sisääntuloon ja vahvistinta on syötettävä tämän piirin kautta. Piiri suojaa vahvistinta ylijännitteiltä (esim. vahingossa kytketty toisen vahvistimen ulostulo) ja korkeilta taajuuksilta (esim. 8MHz), jotka riittävän suuriamplitudisina voivat aiheuttaa vahvistimen ulostuloon tasajännitteen, joka voi rikkoa kaiuttimet (tai laukaista kaiutinsuojauspiirin).

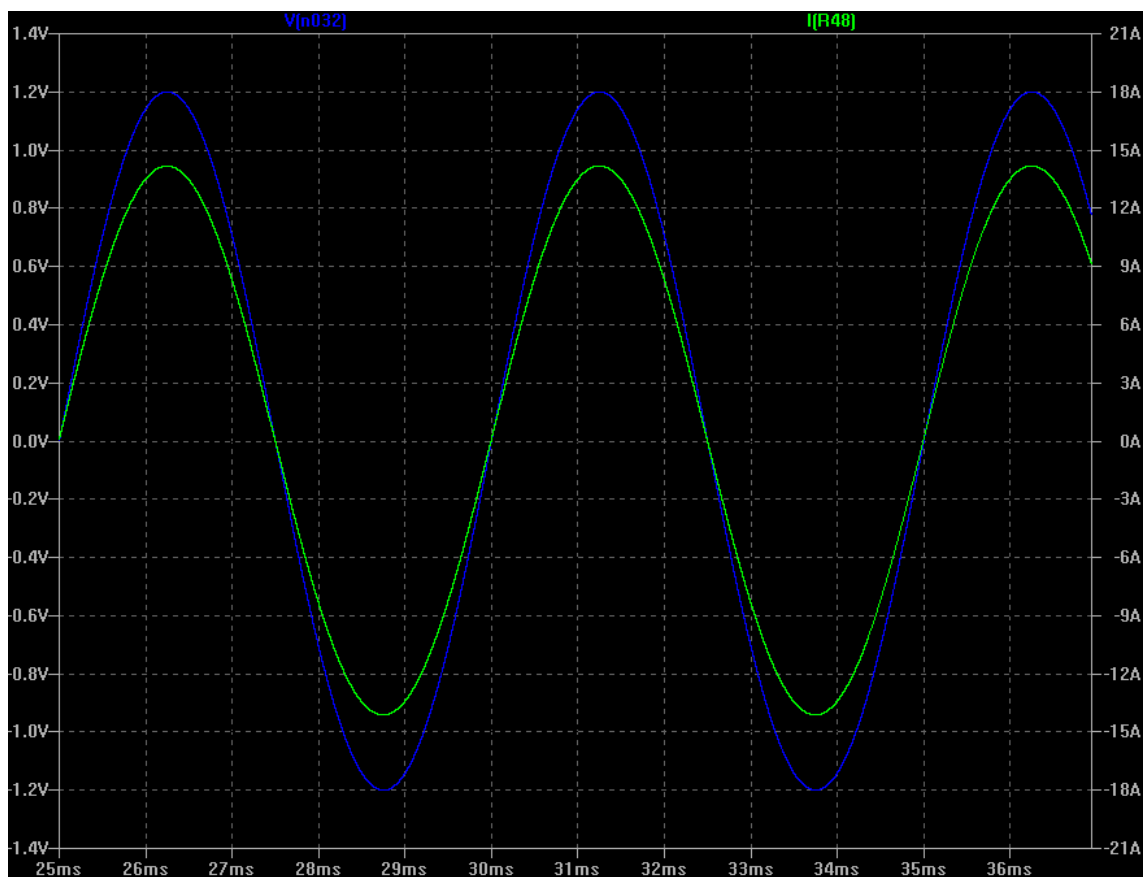


Kuva 18. Kaiutinsuojapiiri

Kuvassa 18 on esitetty kaiutinsuojauspiiri, joka suojaa kaiuttimia käynnistyksen yhteydessä esiintyviltä piikeiltä sekä vahvistimen lähdössä esiintyviltä tasajännitekomponenteilta. Piiri on kytkettävä vahvistimen ulostulon ja kaiuttimen väliin. Rele kytkee kaiuttimet parin sekunnin viiveen kuluttua käynnistyksestä (ks. kuva 29, s. 43) ja kytkee kaiuttimet irti, jos vahvistimen lähdössä esiintyy 1.8 V:n suuruinen tai suurempi tasajännitekomponentti. Releen ohjauspiiriä voidaan käyttää hyödyksi muutenkin: Ohjauspiiriin voidaan liittää lämpökatkaisija, joka irrottaa kaiuttimet ja siten estää kuormituksen, jos pääteaste ylikuumenee. Myös vahvistimen ON-merkkivalo voidaan kytkeä tähän piiriin (ks. ON/OFF-ledi kuvassa 18). Piirissä on myös merkkivalo (kaiuttimet kytketty -ledi) ilmaisemassa vahvistimen käyttövalmiutta (valo palaa, jos lähdössä ei ole tasajännitekomponenttia ja jos vahvistin ei ole ylikuumentunut).

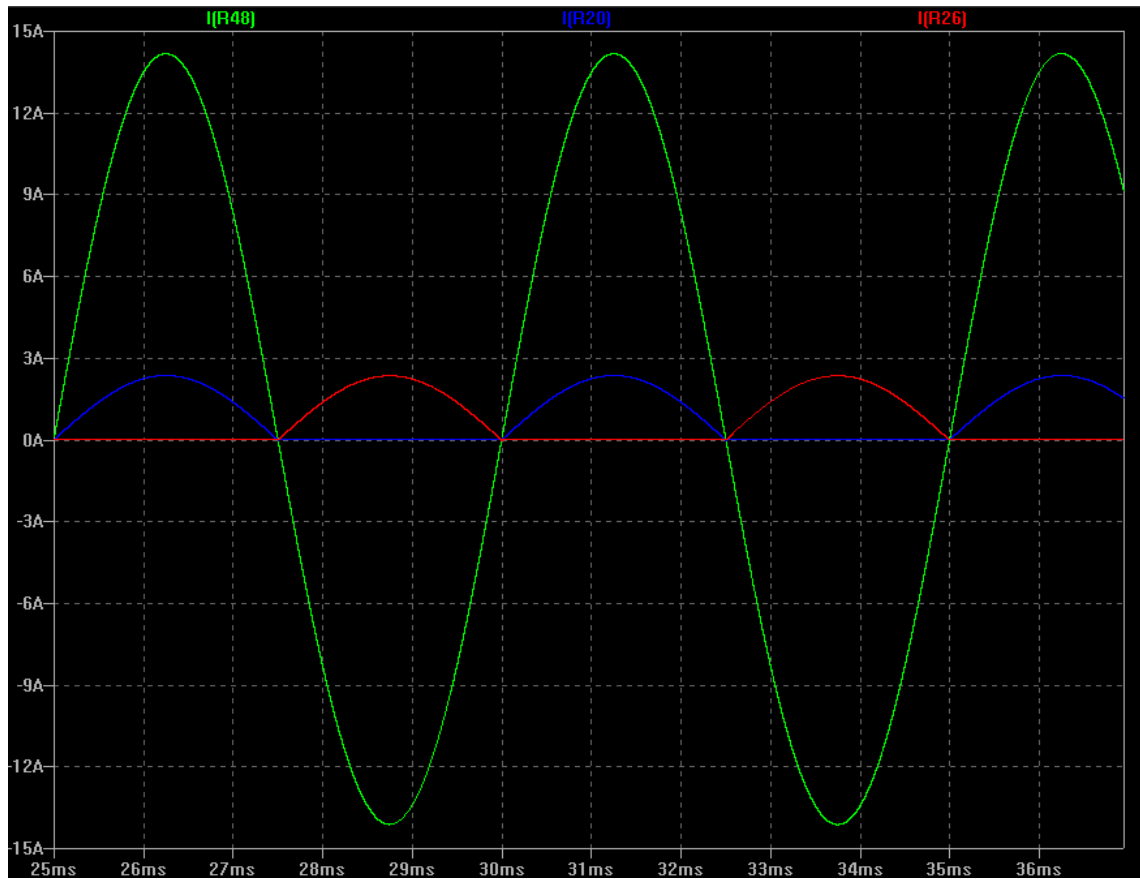
9.4 Prototyypin simulointi ohjelmistolla

Ohjelmistosimulaatiolla pyrittiin varmistamaan laitteen oikeellinen toiminta. Seuraavaksi tuodaan esille joitakin simuloituja perustilanteita, jotka havainnollistavat hyvin mallinnetun vahvistimen toimintaa ja tuovat esille ohjelmistosimulaation käyttökelpoisuutta vahvistimen toiminnan tutkimisessa.



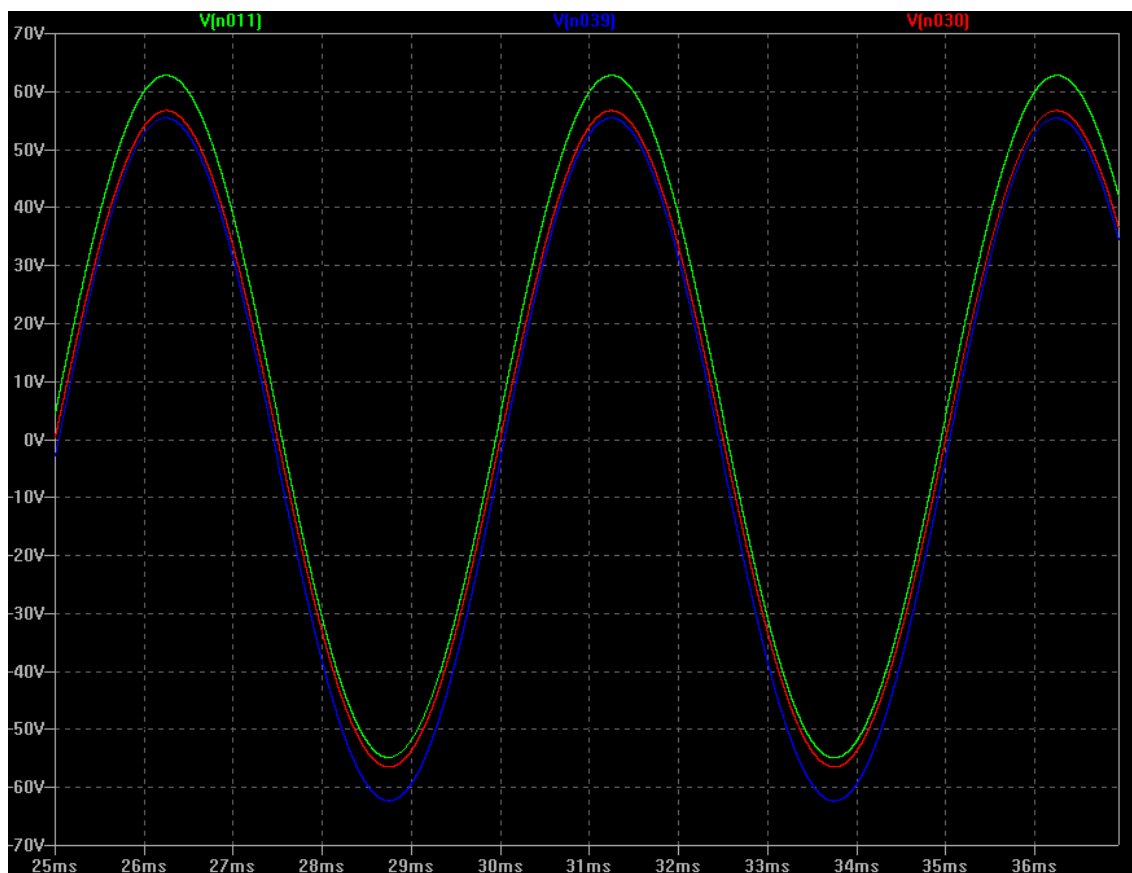
Kuva 19. Sisääntulon jännite (sininen) ja 4 ohmin kaiuttimen virta (vihreä)

Kuvassa 19 on esitetty sisääntulosignaali sekä kaiutinulostulon virta 4 Ohmin kuormal-
la. Vahvistimen simulaation tuottama siniaalto vaikuttaa kuvassa varsin eheältä. Tilan-
ne oli melkolailla sama kaikilla kuulotaajuusalueella tehdyillä simulaatioilla. Tätä kor-
keammilla taajuuksilla alkoi silminnähden esiintyä hieman säröä silloin, kun kaiuttimen
virta oli lähellä nollaa eli mosfetien sulkeutumisen ja avautumisen yhteydessä (*crosso-
ver distortion*).



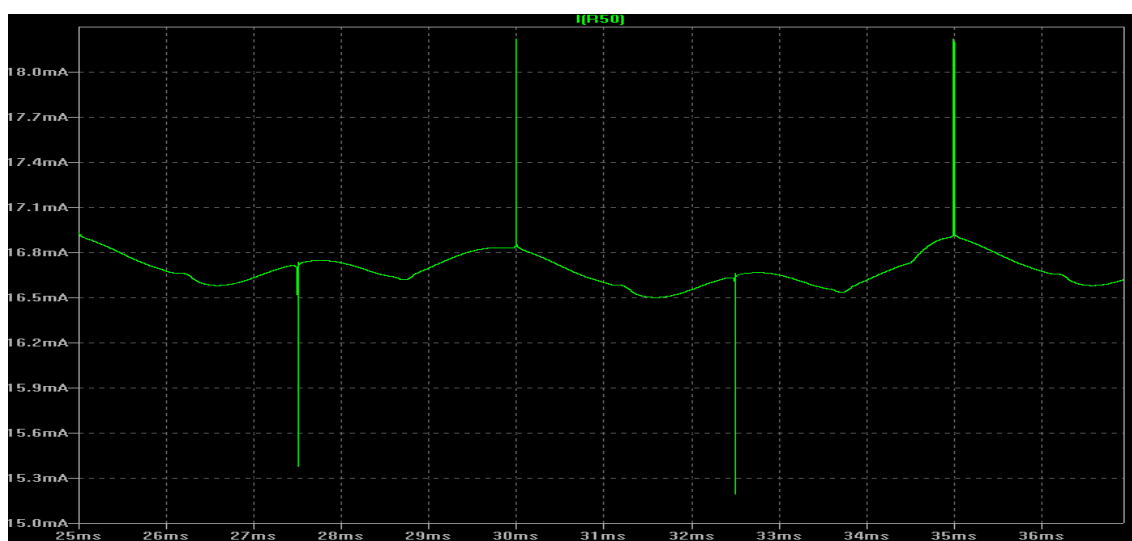
Kuva 20. Yhden päätemosfetparin virta (sininen ja punainen) ja kaiuttimen virta

Kuvassa 20 on esitetty yhden päätemosfetparin virrat sekä kaiuttimen virta. Kuva havainnollistaa sitä, miten mosfetparin eri transistorit johtavat vuorotellen (tapa jolla B-luokan pääteaste toimii). Toiminta näyttää kuvassa varsin eheältä ja näytti koko kuulotajuusalueella varsin siistiltä. Korkeammilla taajuuksilla alkoi ilmaantua hieman silminnähtävää säröä.



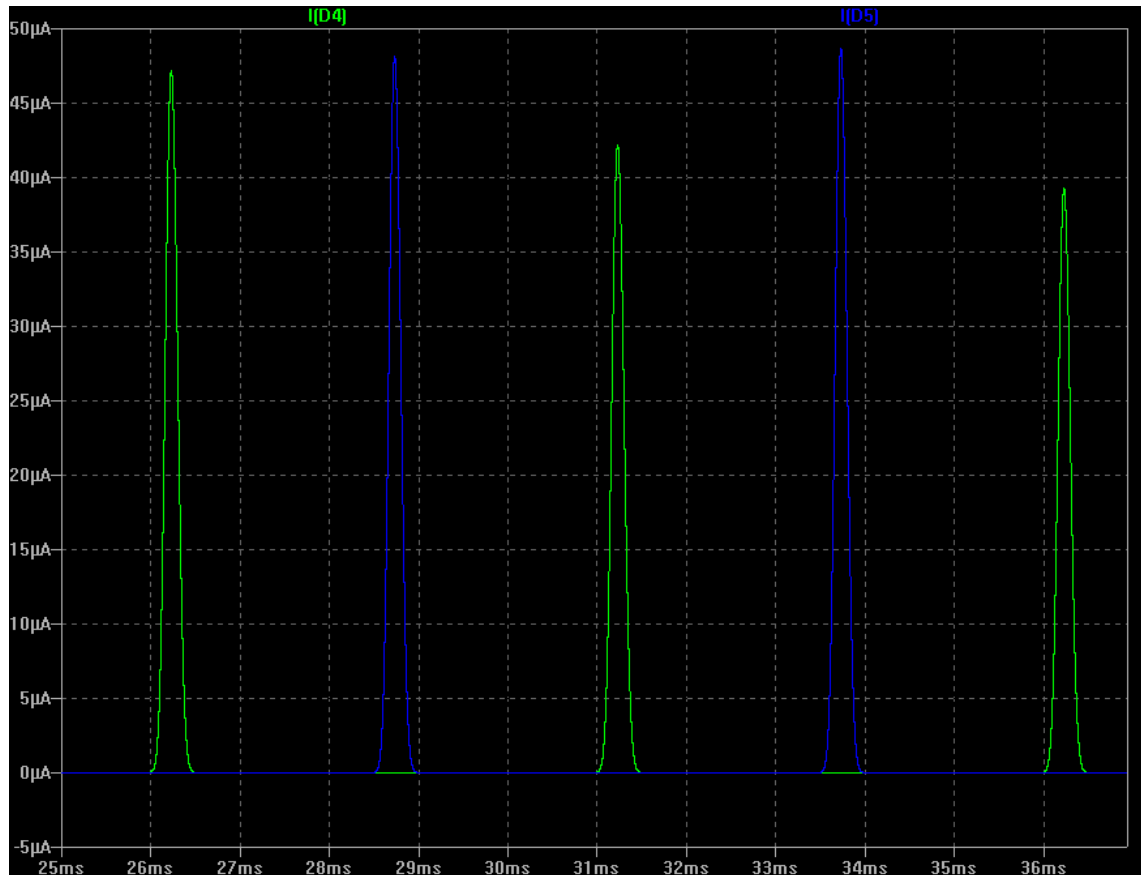
Kuva 21. R49:n päiden jännitteet (vihreä ja sininen) sekä kaiuttimen jännite (punainen)

Kuvassa 21 on esitetty vastuksen R49 päiden jännitteet sekä kaiuttimen jännite. Kuvasta on selkeästi havaittavissa, että kaikki jännitevahvistus tapahtuu jännitevahvistimessa. Pääteaste varmistaa ainoastaan kuorman riittävän virran saannin.



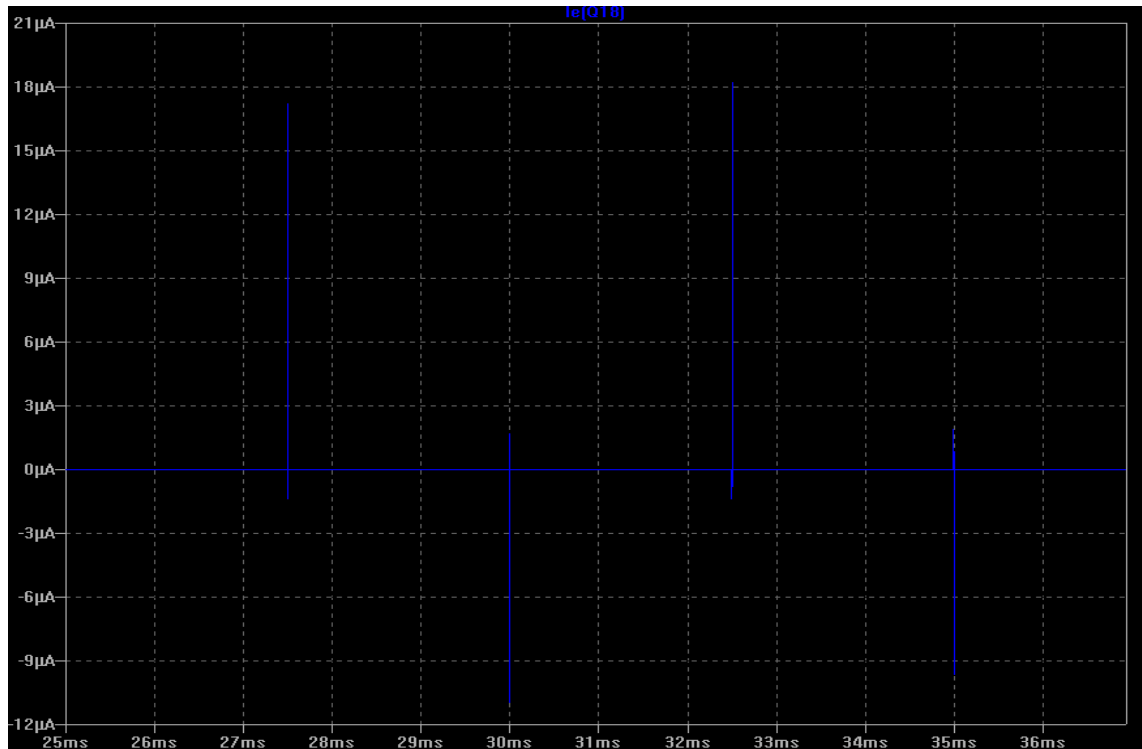
Kuva 22. R50:n virta

Kuvassa 22 (s. 38) on esitetty vastuksen R50 virta normaalitilanteessa. Kuvassa 28 (s. 42) on vertailun vuoksi nähtävillä vastuksen R50 virta, kun kaiutinulostulo on oikosuljettu ja pääteasteen suojauspiiri on toiminnassa.



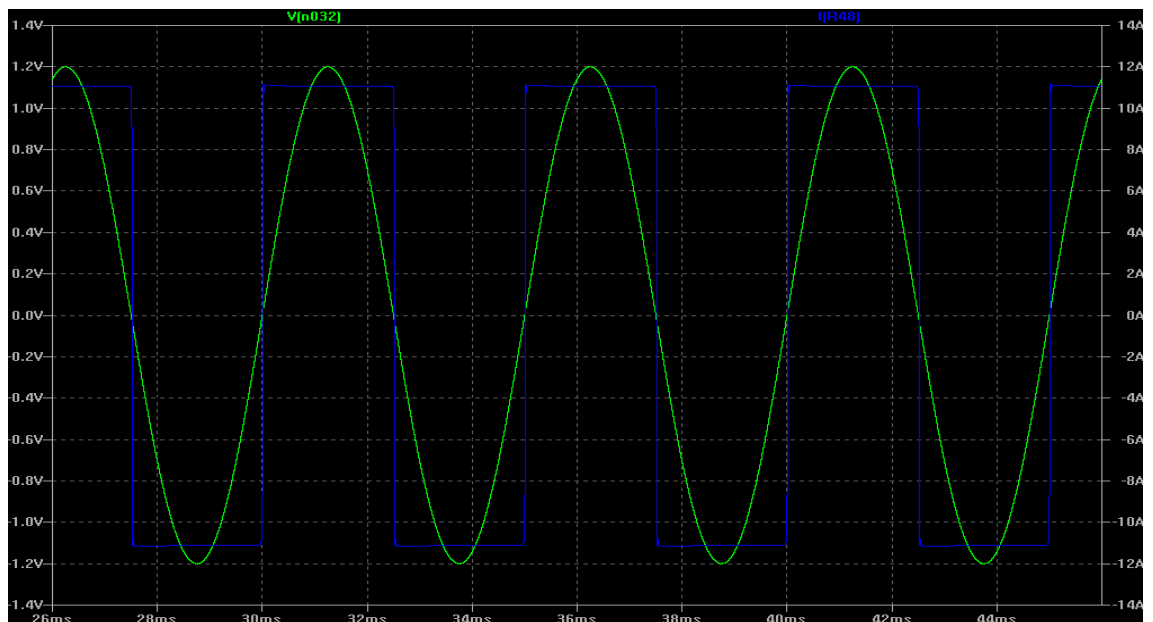
Kuva 23. Suojauspiirin diodien D4 ja D5 virrat

Kuvassa 23 ovat esitetty pääteasteen suojauspiirin diodien D4 ja D5 virrat normaalitilanteessa. Kuvassa 27 (s. 42) on vertailun vuoksi nähtävillä diodien D4 ja D5 virrat, kun kaiutinlähtö on oikosuljettu.



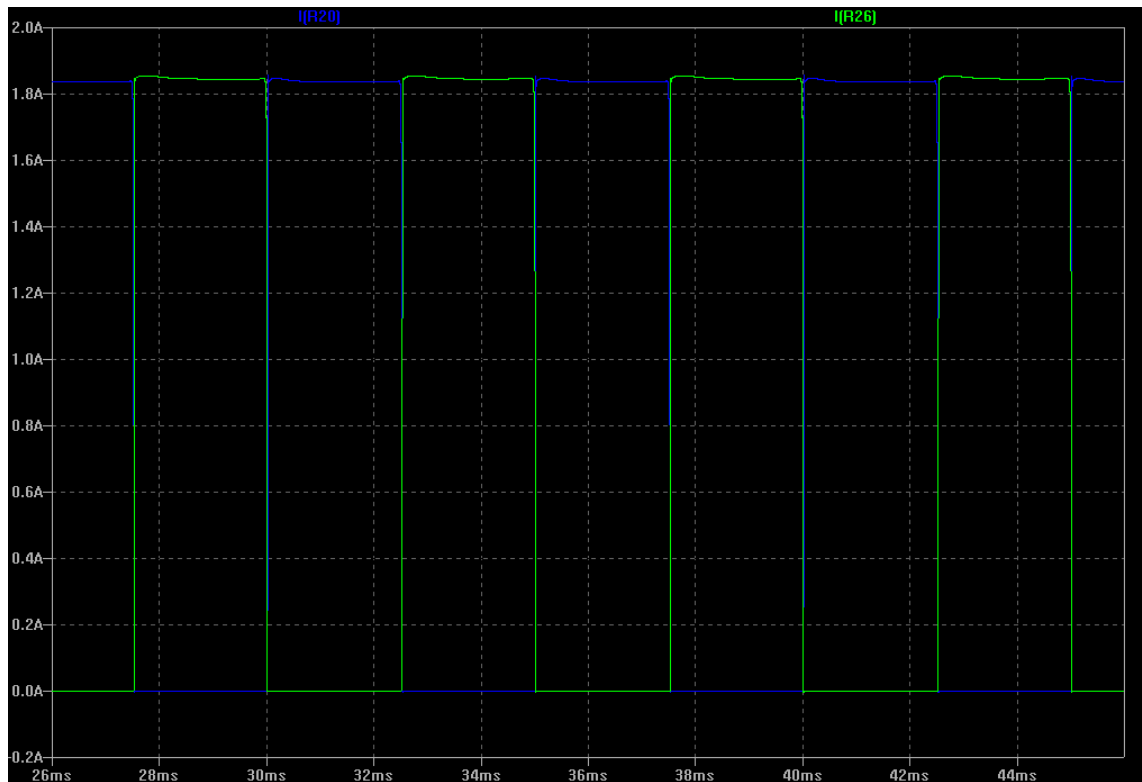
Kuva 24. Jännitevahvistimen virtaa rajoittavan transistorin Q18 virta normaalitilanteessa

Kuvassa 24 on esitetty jännitevahvistimen (ks. kuva 14, s. 32) virtaa rajoittavan transistorin Q18 virta normaalitilanteessa. Kuvassa 28 (s. 42) on vertailun vuoksi nähtävillä transistorin Q18 virta, kun kaiutinlähtö on oikosuljettu.



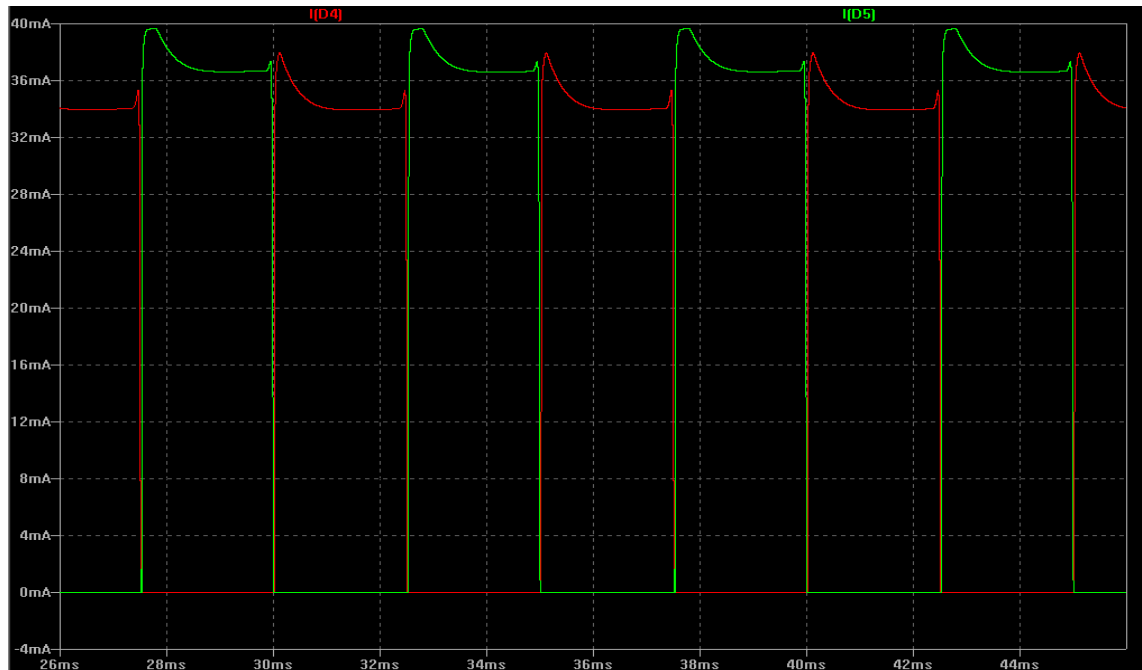
Kuva 25. Sisääntulon jännite (vihreä) ja kaiutinlähdon virta (sininen) vikatilanteessa, jossa kaiutinlähtö on oikosuljettu; suojauspiiri rajoittaa virran siedettävälle tasolle

Kuvassa 25 (s. 40) on esitetty sisääntuleva signaali ja kaiutinlähdön virta tilanteessa, jossa kaiutinlähtö on oikosuljettu. Suojauspiiri rajoittaa kaiutinlähdön virran varsin siedettävälle tasolle, eikä minkään komponentin pitäisi rikkoutua.



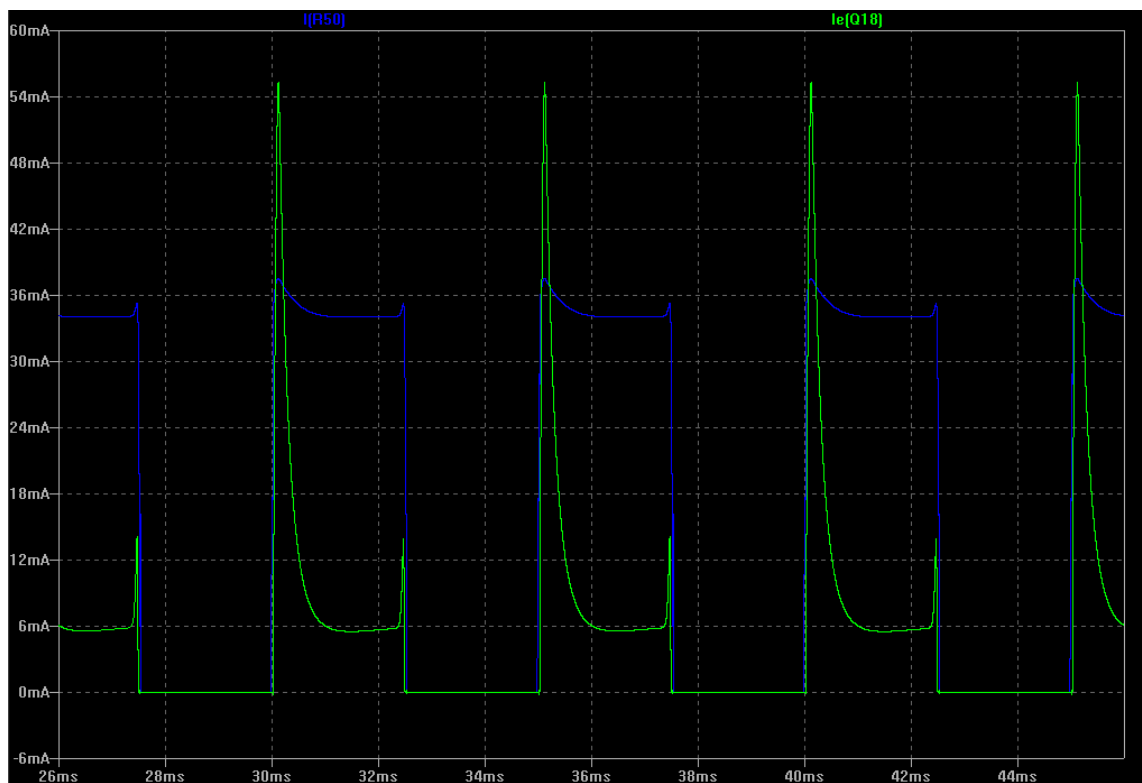
Kuva 26. Mosfetparin virrat kaiutinlähdön ollessa oikosuljettu

Kuvassa 26 on esitetty mosfetparin virrat kaiutinlähdön oikosulun ollessa päällä. Mosfetien virrat ovat aivan kohtuullisella tasolla, eikä minkään komponentin pitäisi rikkoutua.



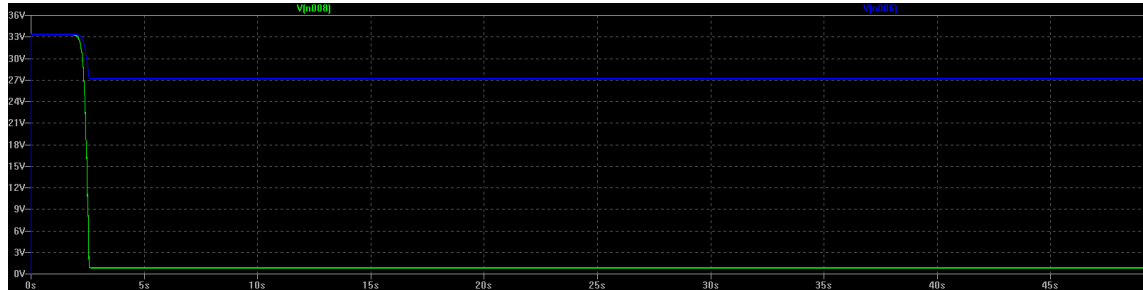
Kuva 27. Suojauspiirin diodien D4 ja D5 virrat kaiutinlähdön oikosulkutilanteessa

Kuvassa 27 on esitetty suojauspiirin diodien D4 ja D5 virrat kaiutinlähdön ollessa oikosuljettu. Vertailun vuoksi kannattaa myös katsoa kuvaa 23 (s. 39), jossa ovat nähtävillä samojen diodien virrat normaalitilanteessa.



Kuva 28. Komponenttien R50 ja Q18 virta kaiutinlähdön ollessa oikosuljettu

Kuvassa 28 (s. 42) on esitetty vastuksen R50 ja transistorin Q18 virrat kaiutinlähdön ollessa oikosuljettu. Kuvassa 24 (s. 40) on vertailun vuoksi nähtävillä transistorin Q18 virta normaalitilanteessa. Kuvassa 28 virrat ovat melko alhaisia eikä minkään komponentin pitäisi rikkoutua vikatilanteesta huolimatta.



Kuva 29. Kaiutinsuojauspiirin releen pitojännite

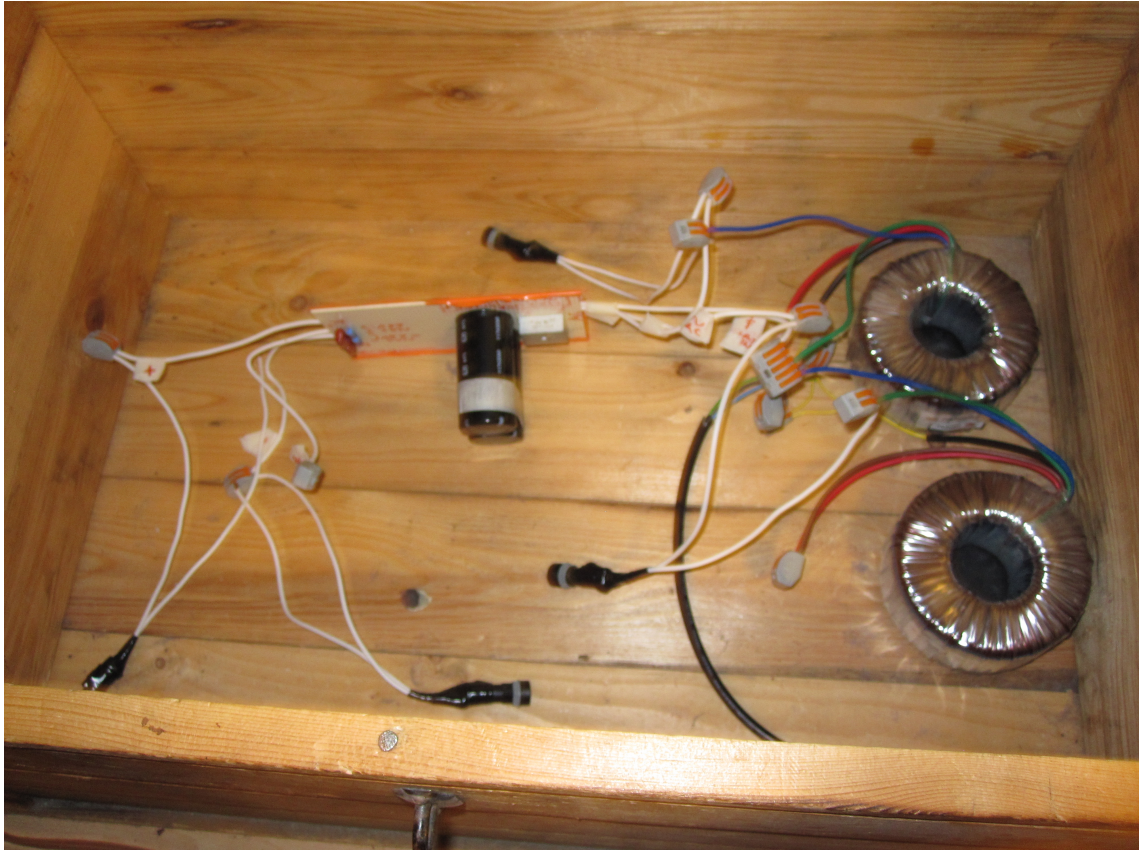
Kuvassa 29 on esitetty kaiutinsuojauspiirin releen pitojännite (sinisen ja vihreän käyrän erotus). Kun vahvistin käynnistetään, rele on avoin ja sulkee kaiutinvirtapiiriin pienen viiveen jälkeen. Näin estetään vahvistimen käynnistymisen yhteydessä esiintyvien piikkien pääsy kaiuttimiin.

Näiden lisäksi simuloitiin useita muita tilanteita. Simuloitujen tilanteiden joukossa olivat mukana muun muassa alhaiset taajuudet, kuuloalueen yläraja (20 000 Hz) ja tämän kerrannainen (40 000 Hz), suuret taajuudet (2 MHz, 4 MHz, 5 MHz, 10 MHz), tasajännitekomponentin syöttö sisääntuloon, tasajännitekomponentin syöttö kaiutinsuojauspiiriin, suurten jännitteiden syöttö sisääntuloa suojaavaan piiriin ym. Vahvistin näytti kaikilta osin toimivan riittävän hyvin suunnitellun mukaisesti, joten vahvistimen prototyyppi päätettiin rakentaa käyttäen tätä esitettyä komponenttien mitoitus.

10 Prototyypin rakentaminen ja testaus

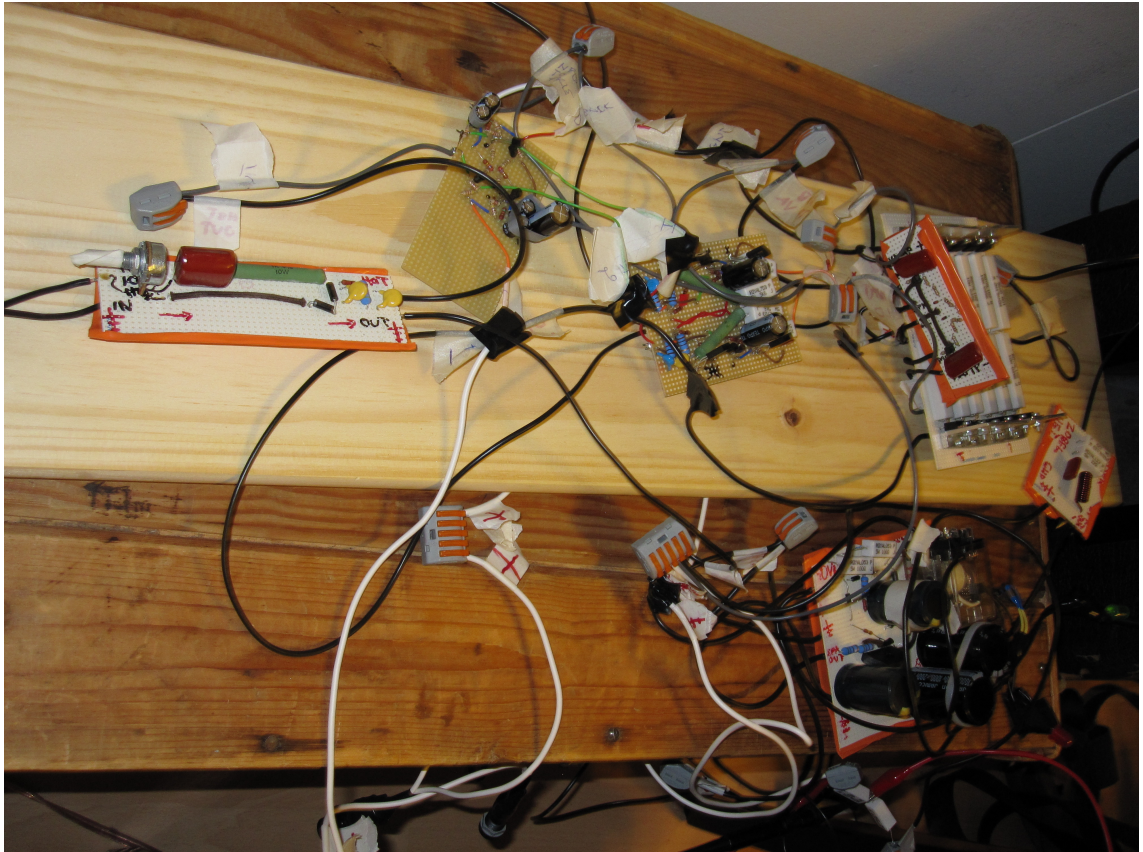
10.1 Prototyypin rakentaminen

Vahvistin näytti mallinnuksen perusteella toimivan suunnitellun mukaisesti, joten vahvistimen prototyyppi päätettiin rakentaa aiemmin esitetyllä komponenttien mitoituksella.



Kuva 30. Prototyypin virtalähde johon kuuluvat kaksi 300 VA:n toroidia sekä tasasuuntaaja

Prototyyppi virtalähteineen on esitetty kuvissa 30 ja 31 (s. 45). Prototyypin virtalähteen kuuluvat kaksi 300 VA:n toroidimuuntajaa sekä tasasuuntaaja jossa on kaksi 10 000 μF :n kondensaattoria (kustannusten ja vaivan säästämiseksi prototyyppi rakennettiin pienemmillä kondensaattoreilla, kuin mitä simulaatioissa käytettiin). Toroideissa on 2 x 24 V toisiot. Toroidien ensiöt kytkettiin rinnakkain ja toisiot sarjaan jolloin saatiin -48 VAC:n, 0 V:n ja 48 VAC:n lähdejännitteet. Tasasuuntaajasta saatiin vastaavasti ulos noin 67 V:n, 0 V:n ja -67 V:n tasajännitteet.



Kuva 31. Laitteen varhainen prototyyppi

Prototyypin vahvistinosa on esitetty kuvassa 31. Kuvassa vasemmalla on sisääntulon suojapiiri, tämän jälkeen etuaste, jännitevahvistin sekä pääaste johon pystyasennossa kiinnitettynä kaiutinlähdön oikosulkusuojapiiri. Oikeanpuolimmaisena zob-el-piiri ja kuvan alalaidassa kaiutinsuojapiiri releineen ja ledeineen. Kaiutinsuojapiirin yhteydessä näkyy myös lämpökatkaisija, joka laukaisee kaiutinsuojapiirin jos lämpötila kohoaa liikaa. Tämä komponentti tulisi kiinnittää tehomoisfetien yhteyteen. Tässä prototyypissä komponentti jätettiin kuitenkin kytkemättä. Vahvistimen osia jouduttiin ensin testaamaan erikseen ja korjailemaan rakennettaessa tehtyjä virheitä, jotka olivat usein varsin työläisiä löytää.

Tekijän kokemattomuus hidasti etenemistä. Muun muassa transistoreita kytkettiin vahingossa väärin ja eri osien toiminnan toteaminen tuotti päänvaivaa, koska tekijä ei ollut harjaantunut tulkitsemaan vahvistimen osien toimintaan liittyviä mittaustuloksia. Lopulta kaikki osat näyttivät kuitenkin toimivan itsenäisinä ja vahvistinta kokeiltiin aluksi pienillä virtalähteen jännitteillä ilman negatiivista takaisinkytkentää (oskillaatiovaaran vuoksi). Kun vahvistin näytti toimivan (suurella särön määrällä tosin), uskaltauduttiin kytkemään myös negatiivinen takaisinkytkentä, joka poisti käytännössä lähes kaiken

helposti havaittavan särön. Ilmeisesti kohtuullisen huolellinen osien testaus erillisinä oli syynä siihen että vahvistimen osat saatiin lopulta melko helposti toimimaan yhtenä kokonaisuutena.

Vahvistimen prototyypin paino oli noin 6 kiloa. Paino muodostui pääosin kahdesta 300 VA:n toroidimuuntajasta jotka painoivat 2,7 kg kappaleelta ja siten yhdessä 5,4 kg. Loput osat olivat melko keveitä. Tulee kuitenkin huomioda että suuremmat jäähdytyselementit ja kotelointi lisäisivät painoa selkeästi. Vaikuttaisi kuitenkin siltä, ettei paino lisääntyisi mitenkään suunnattomasti vaan vahvistimesta tulisi koteloitunakin niin sanotusti ”yhdellä kädellä kannettava”.

10.2 Prototyypin testaus

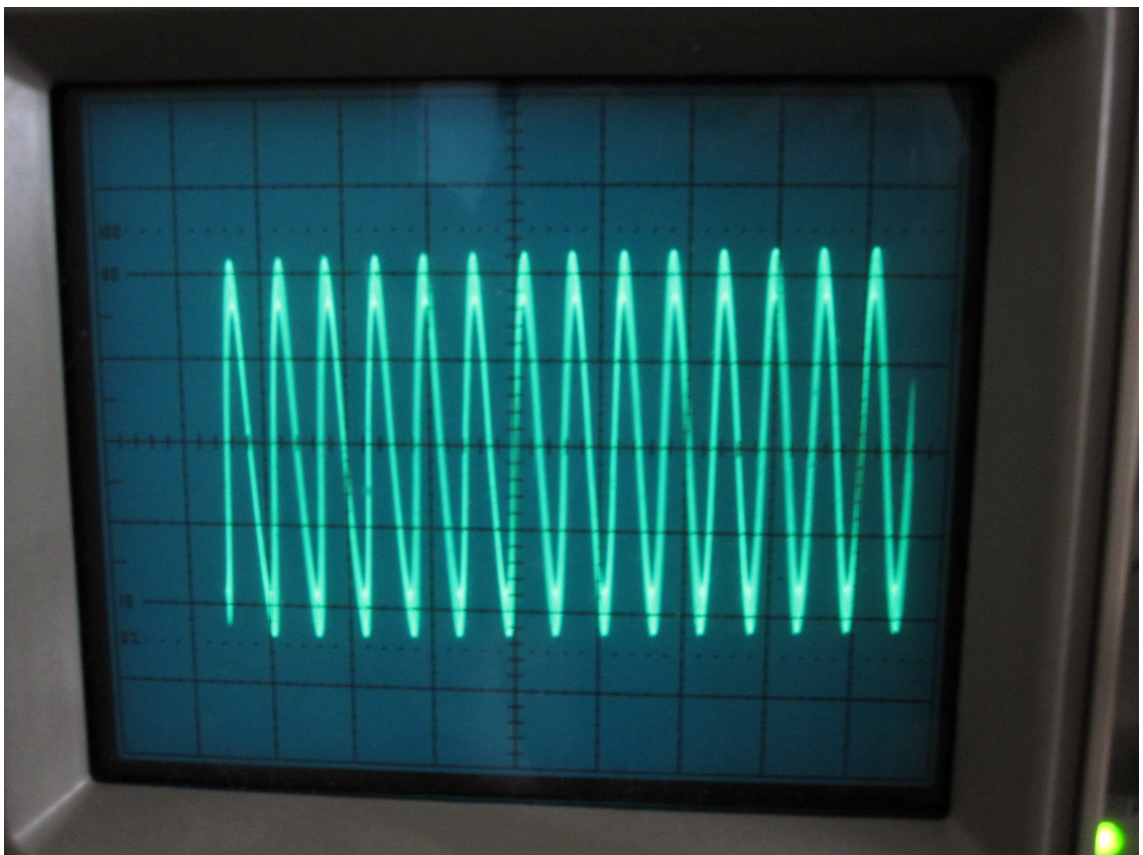
Vahvistin tuntui toimivan hämmästyttävän hyvin. Korvakuulolta arvioituna äänentoiston laatu oli yllättävän hyvä, ja vahvistin kykeni soittamaan musiikkia todella kovaa. Kun vahvistin kytkettiin 8 Ohmin PA-kaiuttimeen, jolla oli 200 W:n RMS tehonkesto ja 94 db/W herkkyys, oltiin äänentoiston suhteen konserttivolyymeissa. Meteli oli kova ja bassotaajuudet hakkasivat rintakehässä. Vertailun vuoksi kokeiltiin myös soittaa täydellä teholla 100 W kitaravahvistinta ja havaittiin, että rakennettu vahvistin soi selvästi suuremmalla äänenvoimakkuudella.

Valitettavasti riittävän suuria, koko tehokapasiteettia vastaavia kaiuttimia ei ollut käytettävissä, joten vahvistinta ei voitu soittaa täydellä teholla. Täyden tehon saamiseksi vahvistimeen olisi pitänyt kytkeä riittävän järeä 4 Ohmin kaiutin. Toisaalta meteli oli kokeiluissa niin suuri, ettei tätä ehkä oltaisi muutenkaan haluttu tehdä. Sopivia kaiutinlähtöön kytkettäviä tehovastuksia ei myöskään ollut projektin puitteissa tarjolla eikä niitä haluttu myöskään ostaa niiden kalliin hinnan vuoksi. Projektiin oli jo tässä vaiheessa käytetty melko runsaasti omaehtoista rahoitusta.

Päätemosfetit kuumenivat kokeiluissa nopeasti, jos vahvistimella soitettiin kovalla äänenvoimakkuudella. Jäähdytyslementtien pieni koko ja tuuletuksen puute rajoittivat kulloisenkin vahvistimen kokeilun lyhytaikaiseksi.

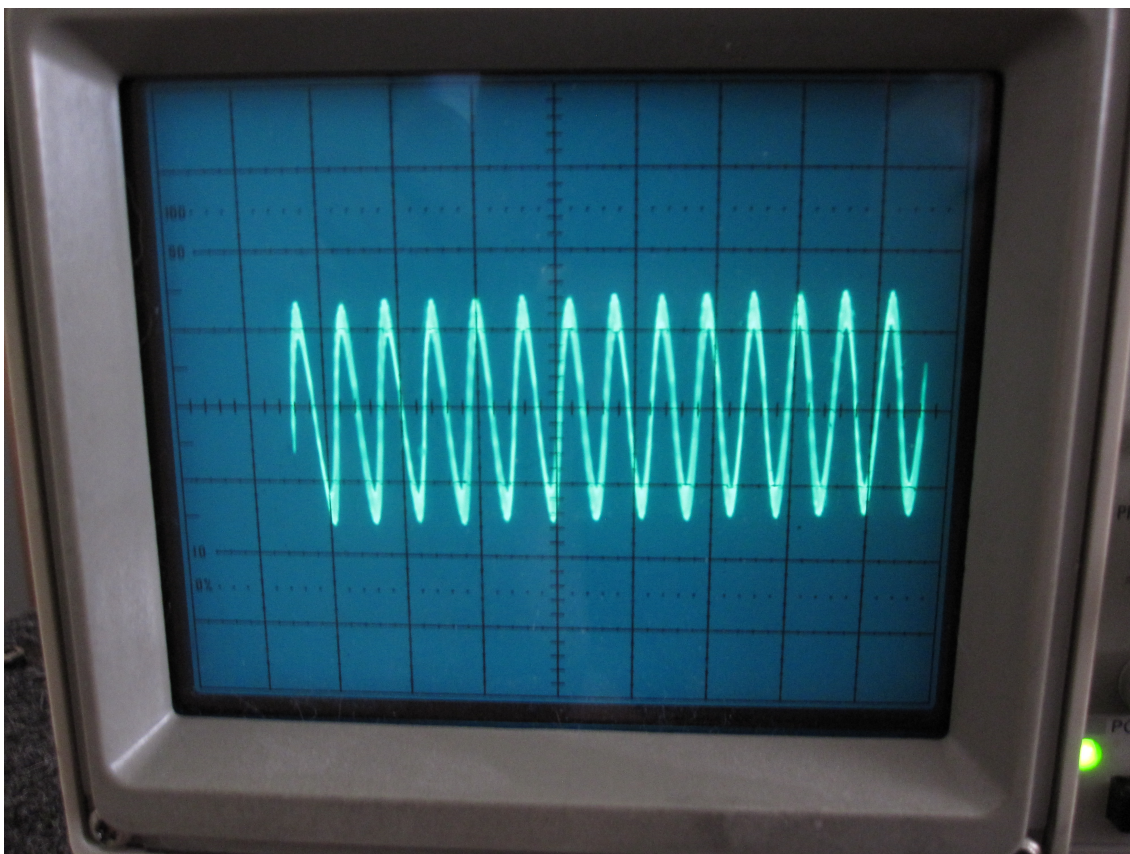
Oskilloskoopilla tarkasteltuna vahvistin toisti sinikäyrät sekä kanttiaallon melko hyvin. Koska työ tehtiin omaehtoisena, käytössä ei kuitenkaan ollut laadukasta oskilloskooppia eikä signaaligeneraattoria, joten tuloksista saatiin vain suuntaa-antavia. Myöskään muita sopivia mittalaitteita (esimerkiksi tehomittaria tai tehoanalysaattoria) ei ollut tarjolla. Oskilloskoopin lisäksi käytössä oli vain halpa yleismittari. Signaaligeneraattorina käytettiin äänikorttia, jonka generoimat signaalit kanttiaaltoineen olivat melko huonolaatuisia. Korkeita taajuuksia ei äänikortilla voitu tuottaa. Koska työ tehtiin omaehtoisesti kotona, ei monia testejä muutenkaan suoritettu niiden vaarallisuuden vuoksi. Eräs tällainen vaarallinen testi olisi ollut kaiutinlähdön oikosulkeminen.

Kaiutinsuojapiirin toimivuus testattiin erikseen paristolla (tasajännite) ja havaittiin, että piiri toimi kutakuinkin odotetulla tavalla. Piiri ei tosin irrottanut kaiuttimia molemmilla kaiutinlähdön tasajännitekomponentin napaisuuksilla yhtä suurilla tasajännitteen arvoilla. Kun havainnon pohjalta kokeiltiin vastaavaa simulointia LTSpicella, havaittiin, että sama ongelma esiintyi myös simuloinnissa. Simuloinnin yhteydessä oli aiemmin unohdettu testata toinen napaisuus. Ongelma olisi helposti korjattavissa vaihtamalla kaiutinsuojapiirin vastuksen R74 arvo (ks. kuva 18, s. 35) hieman suuremmaksi.



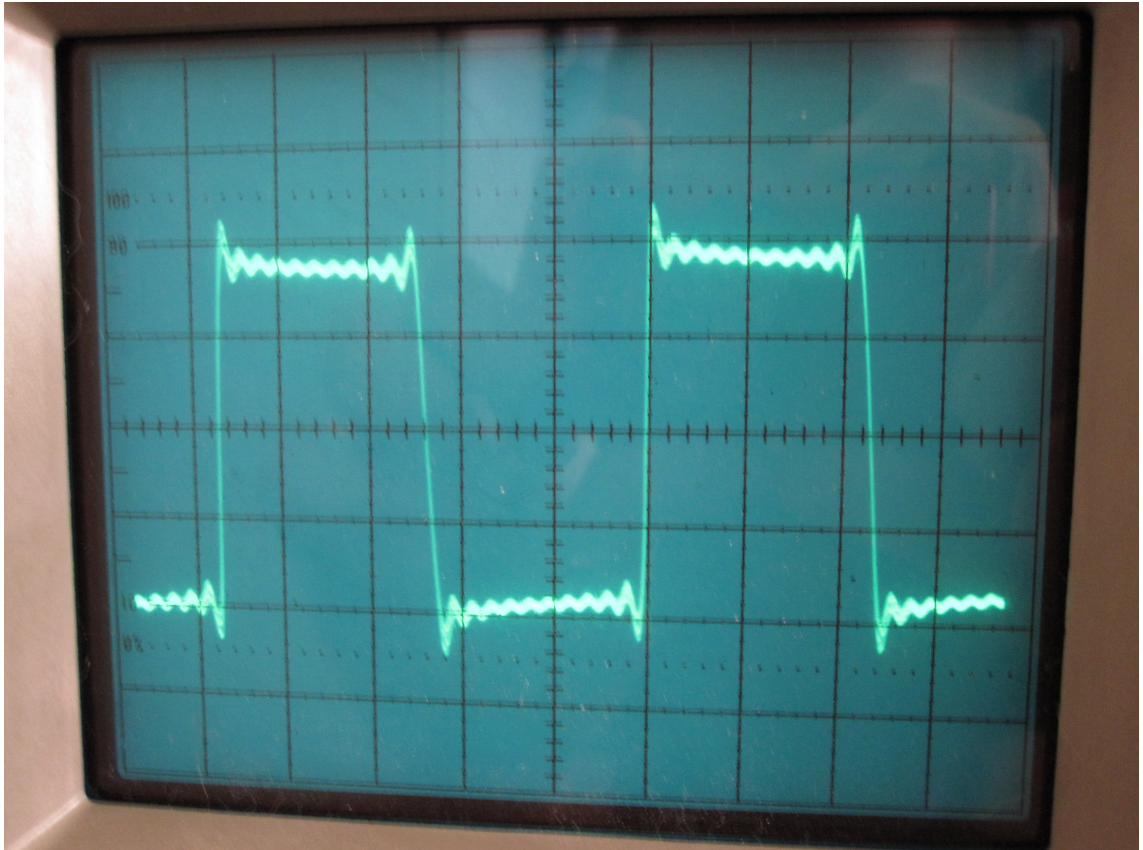
Kuva 32. Äänikortilta syötetty 17 000 Hz:n siniaalto

Kuvissa 32, 33, 34 ja 35 (s. 47 - 50) on nähtävillä muutamia oskilloskooppikuvia testeistä. Kuvassa 32 on nähtävillä äänikortin tuottama 17 kHz:n siniaalto. Vahvistin toisti siniaallon melkolailla samanoloisena (ks. kuva 33, s. 48), vaikkakin toki huomattavasti vahvistettuna.



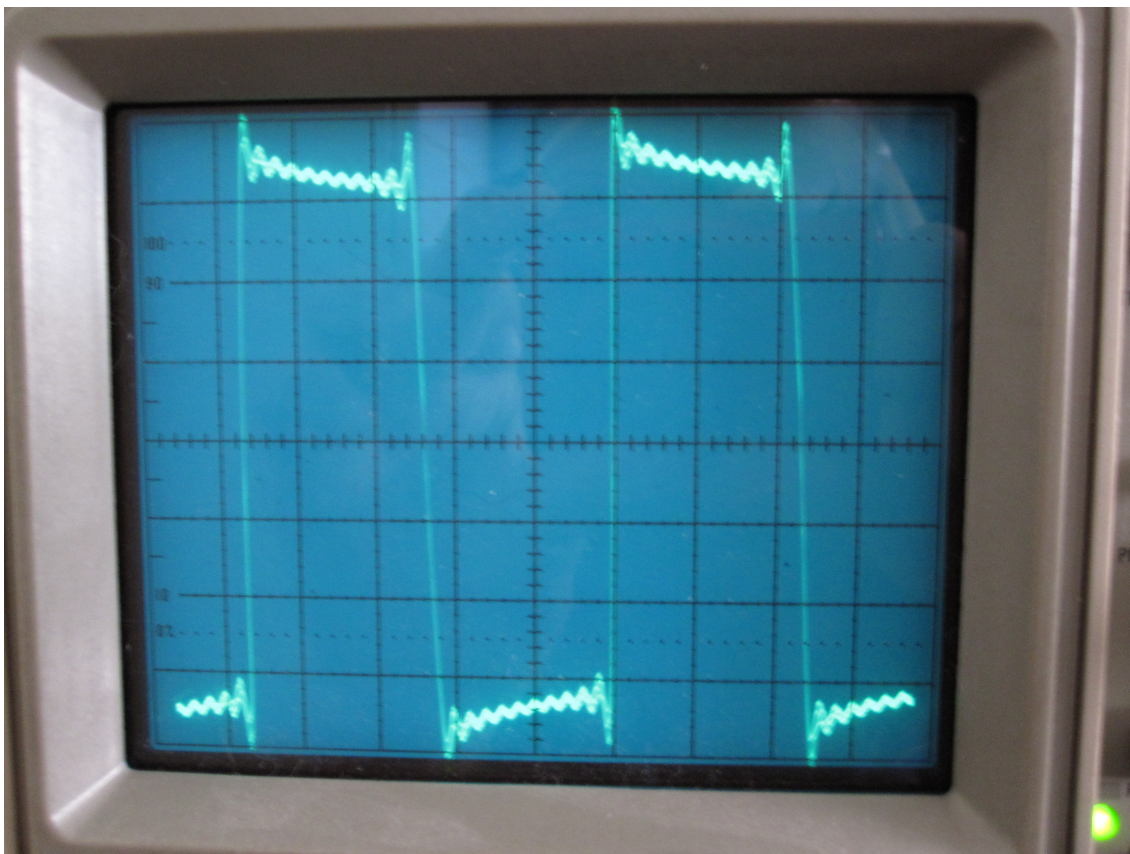
Kuva 33. Vahvistimen toistama 17 000 Hz:n siniaalto

Kuvassa 33 on esitetty vahvistimen toistama siniaalto, joka tuotettiin äänikortilla (katso äänikortin tuottama signaali kuvasta 32, s. 47). Tarkkaa analyysiä säröstä tai vahvistuskertoimesta (joka oli korvin kuultuna todella suuri) eri taajuusalueilla ei ollut mahdollista tehdä työkalujen puutteen ja tilojen puutteiden takia. Testikonfiguraatiota ei voitu jättää paikalleen pitkäksi aikaa, mikä rajoitti testien määrän minimaaliseksi.



Kuva 34. Äänikortin tuottama huonolaatuinen kanttiaalto

Siniaallot matalammilla taajuuksilla tuntuivat myös toistuvan hyvin. Korkeita taajuuksia ei voitu testata, koska kunnollista signaaligeneraattoria ei ollut saatavilla. Vahvistinta testattiin myös huonolaatuisella äänikortin generoimalla kanttiaallolla (kuva 34). Jälleen vahvistin tuntui toistavan signaalin melko hyvin ja symmetrisesti (kuva 35, s. 50).



Kuva 35. Vahvistimen toistama kanttiaalto

Kuvan 35 kanttiaalto on vahvistimen toistama. Vaikutti siltä että vahvistin toisti äänikortin tuottaman melko huonolaatuisen kanttiaallon (kuva 34) varsin uskollisesti.

10.3 Vahvistimen hyötysuhteen määrittäminen

Vahvistimen prototyypin tehoa, hyötysuhdetta, tehokerrointa, kohinan määrää ja dynamiikkaa ei pystytty mittaamaan, koska sopivia työkaluja ja työhön soveltuvia tiloja ei ollut tarjolla. On myös huomattava, että kotelointi ja komponenttien sijoittelu kotelossa voi vaikuttaa kohinaan ja säröön suuresti, joten näiden ominaisuuksien tarkka mittaaminen alustavasta fyysisestä prototyypistä ei olisi välttämättä ollut mielekästä. Mittausarvot olisivat liittyneet vain tiettyyn komponenttien sijoitteluun ja olisivat voineet olla toisenlaisen komponenttien sijoittelun yhteydessä jotakin aivan muuta.

Jotta vahvistimen hyötysuhteesta ja säröstä saataisiin kuitenkin jonkinlainen kuva, määritettiin nämä karkeasti ohjelmistomallinnuksella. Kovin hyviä mittaukseen soveltuvia ohjelmistoja ei ollut kuitenkaan tarjolla. LTSpicen hyötysuhteen määritysfunktio oli tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan yrityksen (Linear Technology) tiettyjen komponenttien yhteydessä toimivien piirien hyötysuhteen määrittämiseen, eikä ominaisuudesta ollut hyötyä tämän vahvistimen hyötysuhteen määrittämisessä. Näinollen hyötysuhteen määrittäminen LTSpicella oli melko kankeaa ja perustui kuvaajien tulkintaan. Ohjelmistolla oli myös vaikea määrittää tasasuuntaajan verkosta ottamaa tehoa tai hyötysuhdetta, koska tasasuuntaajan verkosta ottama virta ei ollut sinimuotoista eikä teho pelkkää pätötehoa. Ohjelmistolla päädyttiin siten määrittämään ainoastaan varsinaisen vahvistinosan hyötysuhde.

Arvion määrittämisessä oletettiin kaiutinkuorman olevan resistiivinen. Hyötysuhteen määrittämisessä käytettiin seuraavaa kaavaa:

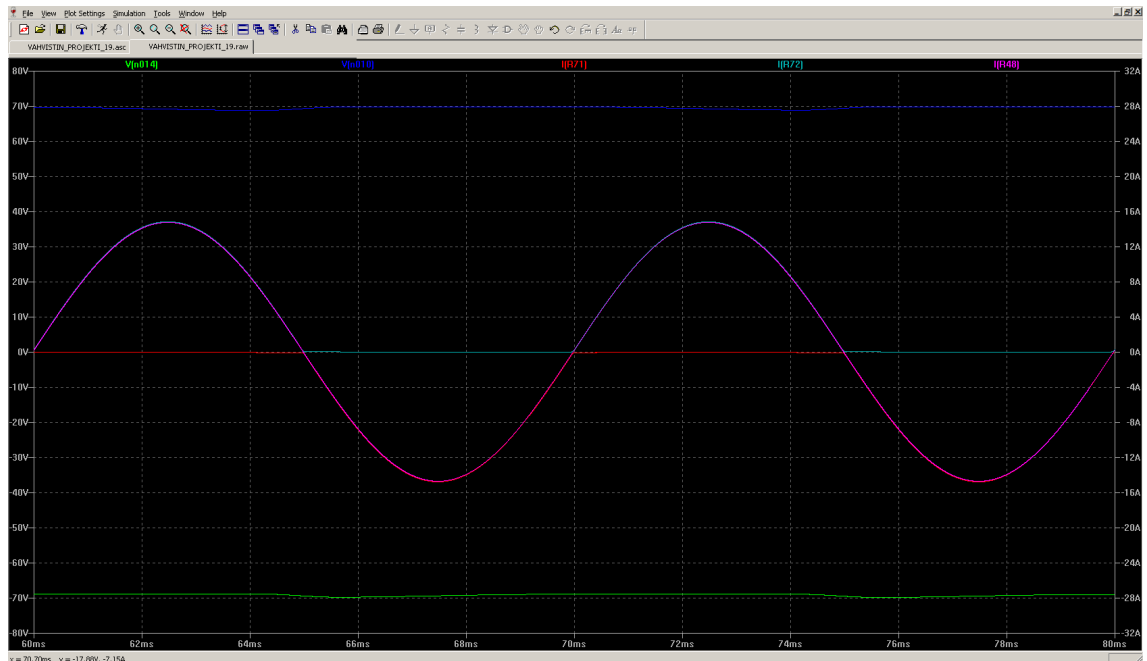
$$\text{Hyötysuhde} \approx \frac{R_{kuorma} * (i_{huippu} / \sqrt{2})^2}{U * i_{huippu} / \sqrt{2}}$$

missä

R_{kuorma} on kaiuttimen resistanssi,

i_{huippu} on kaiuttimen virran huippuarvo sekä vahvistinosan ottaman virran huippuarvo,

U on vahvistimen jännitelähteen tasajännite.



Kuva 36. Vahvistimen tasajännite (sininen ja vihreä), vahvistimen kuluttama virta (punainen ja vaaleansininen) sekä kaiuttimen virta (violetti)

Kuvan 36 perusteella voitiin havaita, että kaavaa voidaan käyttää, sillä virrat ovat sini-muotoisia, ja kaiuttimen virta ja vahvistinosan ottama virta ovat tämän laskelman kannalta mittaustarkkuuden rajoissa samat. Kuvassa 36 vahvistin saa jännitelähteestä noin 69 V tasajännitteen ja sitä syötetään sinisignaali, jonka amplitudi on noin 1,25 V. Tämä sinisignaali on suurin jolla vahvistinta voidaan tällä jännitelähteen tasajännitteen arvolla syöttää vahvistimen ulostulon (kaiutinlähden) signaalin selkeästi säröytymättä. Jos signaalia haluttaisiin kasvattaa, tulisi vastaavasti lisätä myös vahvistimen jännitelähteen jännitettä. Kuvan 36 perusteella saadaan siis seuraava hyötysuhde:

$$\text{Hyötysuhde} \approx \frac{4\Omega * (15\text{A}/\sqrt{2})^2}{69\text{V} * 15\text{A}/\sqrt{2}} = 0.615 \approx 0.6$$

Vahvistinosan hyötysuhde on siis suurimmalla mahdollisella sisääntulosignaali (siniaalto, jonka amplitudi on 1,25 V) noin 0,6. Tätä voimakkaampi signaali säröytyy (lähdössä huippu leikkautuu), ellei vahvistimen jännitelähteen jännitteitä nosteta. Vahvistimen jännitelähteen jännitteen nostaminen tai laskeminen, eikä myöskään signaalin taajuuden muuttaminen vaikuta mitenkään merkittävästi hyötysuhteeseen, kunhan sisääntulosignaalin amplitudille etsitään käytettävän jännitelähteen jännitettä vastaava maksimi-arvo, joka ei aiheuta huipun leikkautumista lähdössä. Tämä pätee, jos virtalähteen

varsinaiselle vahvistinosalle antamaa tasajännitettä muutetaan kohtuullisesti, vaikkapa noin 10 V suuntaan tai toiseen.

Näinollen varsinaisen vahvistinosan hyötysuhde on maksimissaan noin 60 %. Muut vahvistimen osat virtalähdettä lukuunottamatta eivät merkittävästi muuta tätä lukemaa koska niiden yhteinen tehonkulutus on korkeintaan noin 10 W luokkaa (kaiutinlähdön teho on 450 W jos virtalähteen tasajännite on 69 V ja käytössä on 4 Ω kaiutinkuorma). Virtalähteen hyötysuhteen vaikutus laitekokonaisuuden hyötysuhteeseen on luonnollisesti merkittävä. Työssä ei kuitenkaan mitattu käytetyn virtalähteen hyötysuhdetta eikä virtalähteen hyötysuhteen arvioimista muilla keinoin nähty työn kannalta niin kiinnostavaksi että siihen olisi haluttu käyttää lisää aikaa.

Jos sisääntulon amplitudi on pienempi kuin suurin mahdollinen amplitudi, huononee vahvistimen hyötysuhde. Samaa analysointitapaa käyttäen havaittiin että jos sisääntulon amplitudi on 0,5 V, on sekä kaiuttimen virta että vahvistimen kuluttama virta noin 6 A. Näillä arvoilla pelkän vahvistinosan hyötysuhde on noin 25 %. Vahvistimen muut osat virtalähdettä lukuunottamatta (lähinnä kaiutinsuojauspiirin staattinen virrankulutus) laskevat hyötysuhdetta vielä prosentilla tai parilla.

Jos sisääntulon amplitudi on 0,1 V on kaiuttimen virran amplitudi noin 1,3 A. Vahvistimen kuluttama virta on hieman enemmän, arviolta noin 1,6 A. Pelkkä vahvistinosan hyötysuhde on noin 4 % luokkaa. Vahvistimen muut osat virtalähdettä lukuunottamatta (lähinnä kaiutinsuojauspiirin staattinen virrankulutus) laskevat hyötysuhdetta hieman, noin prosentilla.

Koska havaittiin että vahvistimen kokonaissärö (THD) lisääntyy (katso vahvistimen särrön määrittäminen, 10.4.) selvästi jos sisääntulevan signaalin amplitudi on yli 1,2 V päätettiin määrittellä suurimmaksi sisääntulevaksi signaaliksi 0,849 V RMS (amplitudi 1,2 V). Tätä tilannetta vastaa kaiutinvirran amplitudi 14,25 A (kuten kuvassa 36, s. 52, mutta hieman pienempi virran amplitudi). Kun tämän sisääntulosignaalin pohjalta määritettiin hyötysuhde edellä esitettyyn tapaan saatiin hyötysuhdelukemaksi noin 0,57 (57 %). Tätä amplitudia vastaavaksi tehoksi saatiin hieman yli 400 W (laskettu kaiutinvirran perusteella kun kaiutinkuorma on 4 Ohmia).

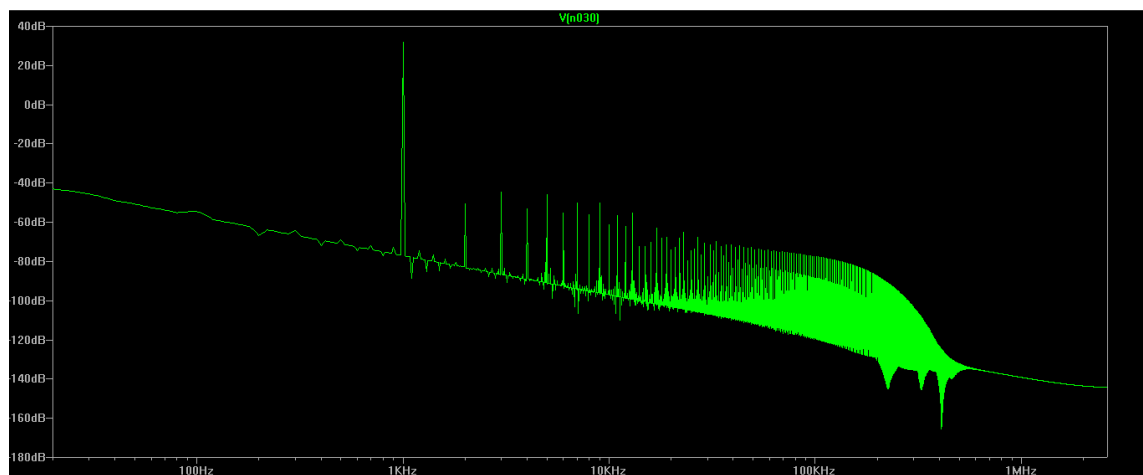
Tuloksiin ei suuresti vaikuta taajuus. Tuloksiin ei tehoa lukuunottamatta myöskään suuresti vaikuta käytetty virtalähteen tasajännite (jos sama suuruusluokka), eikä kuorman

impedanssi. Hyötysuhde käyttäytyy B-luokan vahvistimille tyypilliseen tapaan ollen paras maksimikuormituksessa ja huonoin pienellä kuormalla. Vahvistin vaikuttaa hyötysuhteen osalta aivan käyttökelpoiselta, vaikkakaan mihinkään erityisen hyviin lukemiin ei päästy.

10.4 Vahvistimen särön määrittäminen

Työssä ei voitu mitata fyysisen vahvistimen säröä, koska mittareita ei ollut tarjolla. Toisaalta, särön mittaaminen koteloimattomasta vahvistimen prototyyppistä saattaisi olla harhaanjohtavaa jos vahvistimen osien paikat olisivat sattumanvaraiset. Vahvistimen osien paikat ja johdotukset vaikuttavat vahvistimen äänenlaatuun.

Työssä päädyttiin kuitenkin tekemään ohjelmistopohjainen säröanalyysi ideaalitapauksesta jossa kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen eivät aiheuta häiriöitä. Ongelmaksi muodostui kuitenkin se, ettei LTSpice tarjonnut mitään kovin helppoa tapaa särön analysoimiseen. Tämän johdosta päädyttiin varsin suurpiirteiseen analyysiin käyttäen ohjelmiston tarjoamaa FFT-toiminnallisuutta.



Kuva 37. Kuvassa näkyvät kaiutinjännitteen 1 kHz:n perusaalto ja harmoniset kerrannaiset kun sisääntulojännitteen amplitudi on 1,2 V

Kun kuvan 37 spektriä tarkasteltiin, voitiin havaita että 1 kHz perussignaali (sinisignaali) on lähes 80 db suurempi kuin yksikään harmonisista kerrannaisista.

Sovelletaan kuvan 37 (s. 54) kaiutinjännitteen harmonisten kerrannaisten amplitudeille seuraavaa helposti THD:n ja desibelin ominaisuuksista johdettavaa kaavaa:

$$THD = 100 * \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}} = 100 * \sqrt{\frac{\left[\frac{1}{10^{\left(\frac{x_2}{20}\right)}}\right]^2 + \left[\frac{1}{10^{\left(\frac{x_3}{20}\right)}}\right]^2 + \dots + \left[\frac{1}{10^{\left(\frac{x_k}{20}\right)}}\right]^2 + n * \left[\frac{1}{10^{\left(\frac{x}{20}\right)}}\right]^2}{1^2}}$$

missä

U_1 on perusaallon amplitudi,

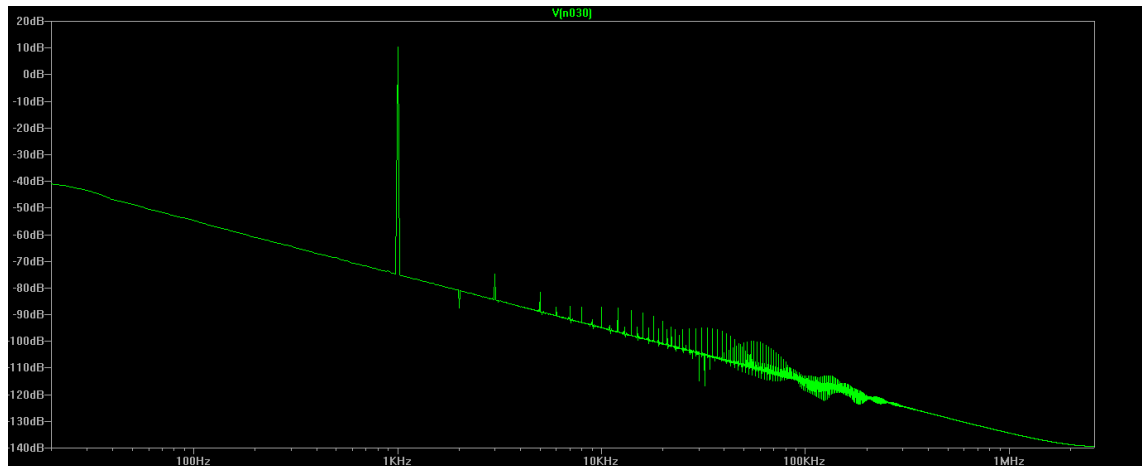
U_2, U_3, \dots, U_n ovat yliaaltojen amplitudit,

x_2, x_3, \dots, x_k ovat kunkin yliaallon ja perusaallon amplitudieron itseisarvo desibeleinä,

n on muiden amplitudeiltaan samansuuruisten yliaaltojen lukumäärä.

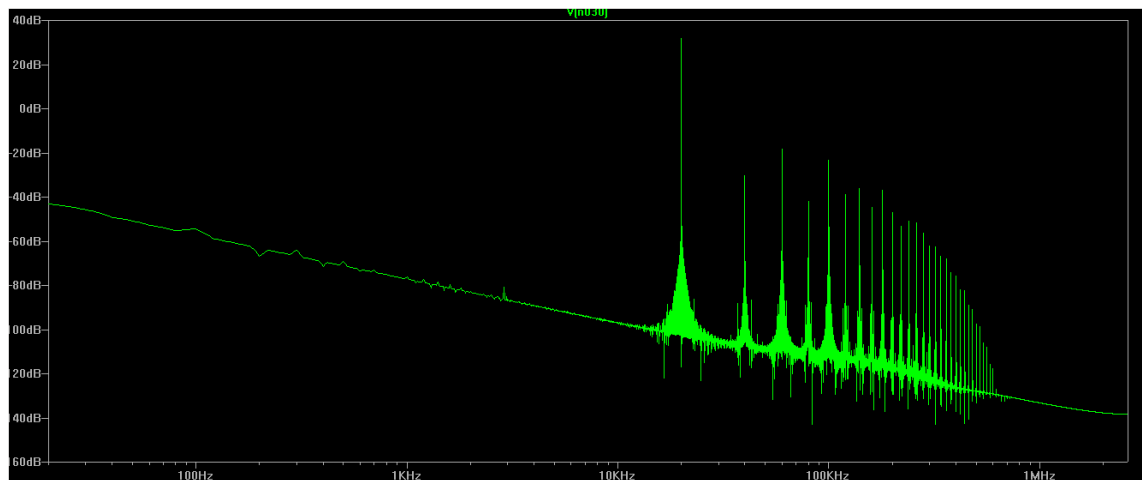
Kaavasta voitiin havaita, että yliaaltoja, jotka ovat vähemmän kuin 100 db pienempiä kuin perusaalto on alle 30 kappaletta. Yliaaltoja jotka ovat yli 100 db pienempiä kuin perusaalto on sensijaan paljon enemmän. Jos nämä pienet yliaallot jätetään huomiotta saadaan THD-arvoksi alle 0,03 %. Jos nämä pienet yliaallot huomioidaan, niiden kaikkien oletetaan olevat täsmälleen 100 db pienempiä kuin perusaalto (tosiasiassa suuri on niistä on vielä paljon pienempiä) ja niiden lukumääräksi arvioidaan 1 000 kappaletta, THD-lukemaksi saadaan alle 0,04 %. Vastaavasti, jos määräksi arvioidaan 100 000 kpl, on THD alle 0,3 %. Jos määräksi arvioidaan miljoona kappaletta, on THD alle 0,8 %. Koska suurin osa yliaalloista on huomattavan paljon kuuloaluetta korkeammalla taajuudella ja suuri osa yliaalloista on paljon pienempiä kuin ainoastaan 100 db perusaaltoa pienempiä, *arvioidaan karkeasti, että kaiuttimista kuultava kokonaissärö olisi todennäköisesti ainakin alle 0,3 %, eikä särö siten olisi korvin kuultavissa.*

Kun kyseessä on PA-vahvistin, tällainen kokonaissärölukema ei ole mitenkään huono tulos. On toki huomattava, että mittaus koskee ideaalitapausta jossa fyysisen vahvistimen häiriömekanismit on jätetty huomiotta. Fyysisen vahvistimen särölukema on todennäköisesti ainakin jonkin verran huonompi ja riippuu myös komponenttien sijoittelusta ja koteloinnista.



Kuva 38. Kaiutinjännitteen 1 kHz:n perusaalto ja harmoniset kerrannaiset kun sisääntulojännitteen amplitudi on 0,1 V

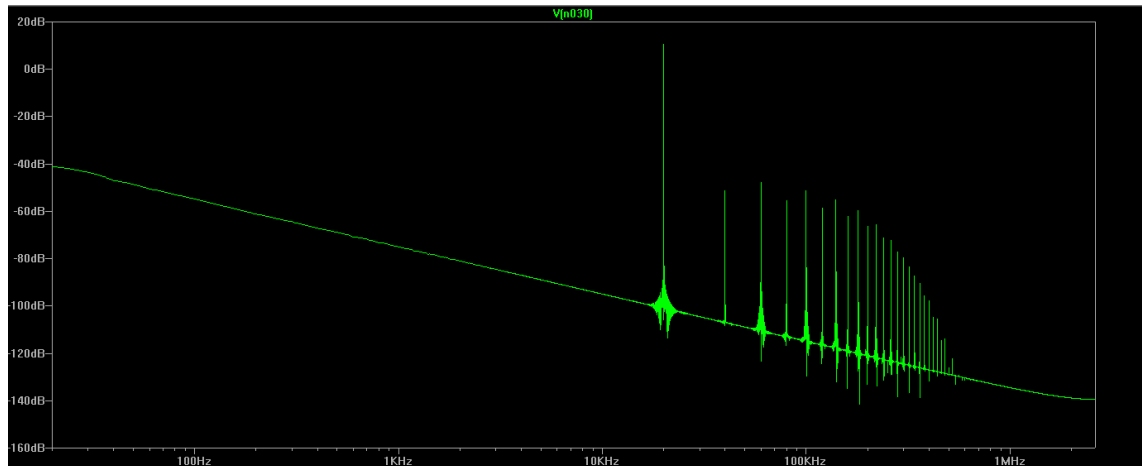
Jos vahvistinta syöttävän tulosignaalin amplitudi pienennettiin aiemmasta 1,2 V lukemasta 0,1 V lukemaan, havaittiin särö kuvan 38 perusteella silminnähden vähäisemmäksi kuin kuvan 37 (s. 54) tapauksessa. Tässä tapauksessa särö ei varmasti ole korvilla kuultavissa (särö on huomattavasti alle 0,3 %).



Kuva 39. Kaiutinjännitteen 20 kHz:n perusaalto ja harmoniset kerrannaiset kun sisääntulojännitteen amplitudi on 1,2 V

Kun vielä tutkittiin säröä 20 kHz:n taajuudella (vahvistinta syöttävällä sinisignaalilla 1,2 V amplitudi) voitiin kuvasta 39 havaita että kaikki harmoniset kerrannaiset ovat vähintään 50 db heikompia kuin pääsignaali. Ottamalla huomioon 10 suurinta harmonista kerrannaista ja pyöristämällä tätä pienemmät kerrannaiset niiden joukossa olevan suurimman kerrannaisen arvoon ja arvioiden näiden lukumääräksi 50 (niiden todellinen lukumäärä on pienempi) saadaan *kokonaissäröksi alle 0,5 %*. Pelkkien kymmenen amplitudiltaan suurimman harmonisen kerrannaisen aiheuttama kokonaissärö on hieman yli

0,4 %. Tämäkään lukema ei ole PA-vahvistimelle mitenkään huono. Useimmiten vahvistinten särö lisääntyy taajuuden kasvaessa. Kaupallisille PA-vahvistimille 0,1 % särö 1 kHz taajuudella on varsin tavanomainen arvo ja yleensä tämä säröarvo ainakin kolminkertaistuu 20 kHz:n taajuudella ollen siten tyypillisesti 0,3 % tai paljonkin enemmän.



Kuva 40. Kaiutinjännitteen 20 kHz:n perusaalto ja harmoniset kerrannaiset, kun sisääntulojännitteen amplitudi on 0,1 V

Kun vielä tutkittiin säröä 20 kHz:n taajuudella, tällä kertaa vahvistinta syöttävällä sini-signaalilla jolla 0,1 V:n amplitudi (kuva 40), havaittiin, että kaikki harmoniset kerrannaiset ovat noin 60 db heikompia kuin pääsignaali. Kun tehdään vastaava laskelma, havaitaan, että särö on hieman alle 0,2 %. Särö ei siis ole korvin kuultavissa. Kuten 1 kHz signaalillakin, tässäkin tapauksessa voidaan havaita, että särö selvästi lisääntyy jos sisääntulevan signaalin amplitudi on lähellä maksimaalista arvoa. Lisäksi havaittiin, että jos sisääntulevan signaalin amplitudi oli 0,5 V särö oli kutakuinkin samaa luokkaa kuin 0,1 V amplitudin tapauksessa. Särö siis vaikutti kasvavan nimenomaan silloin, kun sisääntulevan signaalin amplitudi kasvoi lähelle maksimiarvoa.

Koska särön analysointi oli hidasta ohjelmiston hitaudesta johtuen, FFT-analyysijä ei tehty kovin monta. Analyysien perusteella vaikutti kuitenkin siltä, että vahvistimen ohjelmistomallin särö oli aivan kohtuullisella tasolla. Tässä tapauksessa tarkempi särön määrittäminen ohjelmistosimulaation perusteella ei liene kovin mielekäästä, koska vahvistimen fyysinen rakenne osien sijoitteluihin vaikuttaa fyysisen vahvistimen säröominaisuuksiin. Haluttaessa särön määrää voitaisiin rajoittaa tutkimalla ja eliminoimalla erikseen jokainen säröä tuottava mekanismi. Tässä tapauksessa on todennäköistä että B-luokan vahvistimelle tyypillinen signaalin puolijakson vaihtumisen yhteydessä esiintyvä särö

(*crossover distortion*) on ainakin yksi merkittävistä särön tuottajista. Tätä särötyyppiä voitaisiin vähentää muun muassa aktiivisella pääteasteen biasointimekanismilla.

11 Vahvistimen suoritusarvot

Taulukossa 1. esitetään kootut vahvistimen suoritusarvot tarkentavine selostuksineen ja viitteineen. Mittauslaitteiden ja sopivien tilojen puuttumisen takia suoritusarvot jouduttiin arvioimaan ohjelmistomallinnuksen pohjalta. *Arvoja voidaan siis pitää lähinnä suuntaa-antavina.*

Taulukko 1. Vahvistimen suoritusarvot

Vahvistimen ominaisuus	Arvo	Lisätietoja
Teho	noin 400 W kuorma 4 Ohmia	Tulos perustuu ohjelmistomallinnukseen. Syötteenä amplitudiltaan 1,2 V siniaalto (0,849 V RMS). Kuorma oletetaan resistiiviseksi. Jännitelähteen tasajännite on noin 69 V. ks. hyötysuhteen määrittäminen 10.3. Tuloksessa oletetaan, että jännitelähde kykenee syöttämään vahvistinta. Tulee huomioida että musiikkiteho on vain noin 70 % siniaallon tehosta, ja siksi muuntaja voidaan alimitoitaa ja silti ilmoittaa tehoksi maksimaalisen siniaallon teho (kaupalliset valmistajat toimivat näin) [1, s. 299, 316].
Särö (THD)	1 kHz alle 0,3% 20 kHz alle 0,5 % kuorma 4 Ohmia	Tulos perustuu ohjelmistomallinnukseen. Syötteenä amplitudiltaan 1,2 V:n siniaalto (0,849 V RMS). Amplitudiltaan pienempi syöte saa aikaan vähemmän säröä. ks. särön määrittäminen 10.4.
Hyötysuhde	noin 0,57	Syötteenä amplitudiltaan 1,2 V:n siniaalto (0,849 V RMS). Jännitelähteen häviöitä ei ole huomioitu. Laskelma perustuu ohjelmistomallinnukseen. 1,25 V syöttösignaalin amplitudilla päästään hieman parempaan arvoon mutta silloin ilmoitettu kokonaissärön määrä ylittyy. Katso hyötysuhteen määrittäminen, 10.3.
Syötettävä signaali	amplitudi 0 V - 1,2 V	1,25 V amplitudi ei silminnähden säröytä signaalia mutta aiheuttaa ilmoitetun THD-arvon ylityksen. Tätä suurempi amplitudi säröyttää kaiutinlähdön signaalin silminnähden. ks. hyötysuhteen määrittäminen 10.3.
Sisääntulon impedanssi	yli 5 kOhm	Tarkka impedanssi riippuu taajuudesta.
Paino	noin 6 kg	Suuremmat jäähdytysalueet ja kotelo lisäävät painoa. ks. prototyypin rakentaminen 10.1.

Ohjelmistomallinnuksessa vahvistimen jännitelähteenä käytettiin noin 69 V:n tasajännitettä (ks. hyötysuhteen määrittäminen 10.3, s. 50), kun taas fyysisen prototyypin jännitelähteen tasajännite oli noin 67 V (ks. prototyypin rakentaminen 10.1, s. 44). Tällä ei ole kuitenkaan suurta merkitystä tulosten kannalta.

Saadut arvot vaikuttavat varsin realistisilta. Vahvistimen fyysisen prototyypin testien perusteella voitiin myös havaita, ettei särö ollut ainakaan suunnattoman suurta ja tehoaakin tuntui riittävän. Myös käytetyt kaksi 300 VA muuntajaa vaikuttaisivat lähestulkoon riittävästi tuottamaan musiikkitehon (70 % siniaallon tehosta), joka vastaa kaupallisten valmistajien harhaanjohtavaan tapaan ilmoitettua 400 W tehoa (siniaallolla), vaikka otetaankin huomioon, ettei vahvistimen hyötysuhde ole loistava. Vahvistimen heikohko hyötysuhde ja muuntajien toisiojännitteiden taipumus pudota rasituksessa oletettavasti saavat aikaan sen, ettei aivan mainitun suuruiseen jatkuvaan musiikkitehoon ($0.7 \cdot 400 \text{ W}$) käytännössä päästä. Todennäköisesti käytännössä ei kuitenkaan jäätäisi kovin kauas tästä tehosta. Valitettavasti vahvistimen fyysisen prototyypin tehoa ei työtilojen ja työkalujen puutteiden vuoksi mitattu, joten viime kädessä tulos jää arvioiden varaan.

Vahvistimen sisääntulevan signaalin maksimiarvoksi määriteltiin 1 V RMS (ks. ominaisuuksien määrittely, 8.2). Tähän arvoon ei kuitenkaan päästy, vaan ajoittain huolimattomasta työskentelytavasta johtuen päädyttiin arvoon 0,849 V RMS (1,2 V amplitudi). Signaalin maksimiarvon määrittely ei ollut kuitenkaan alkujaankaan optimaalinen, sillä yleisimmin käytetty sisääntulon herkkyys on 0.7746 V RMS (0 dBu, amplitudi noin 1,1 V). Huolimattomuudesta saattoi tässä tapauksessa olla lopulta jotain hyötyäkin, sillä 0,849 V RMS ei jää kovin kauas tästä arvosta.

12 Johtopäätökset

Vahvistimesta rakennettiin alustava prototyyppi, jota testattiin varsin suoraviivaisesti. Työn aikana ei ollut käytettävissä läpikotaiseen ja turvalliseen testaukseen vaadittavia laitteita, tiloja ja muita resursseja, eikä myöskään rahoitusta näiden hankkimiseen. Tästä syystä vahvistimen toimintaa ei voitu testata kovin järjestelmällisesti. Suoraviivaisen testauksen perusteella vahvistimen prototyyppi vaikutti kuitenkin toimivalta, kuulosti miellyttävältä ja soi haluttaessa todella suurella äänenvoimakkuudella. Tekijällä on hie-
man kokemusta kaupallisten PA-vahvistinten käytöstä ja niihin verrattuna prototyypin suoritus ei ollut tekijän mielestä missään nimessä huono.

Työn tulosten perusteella saatu havainto ohjelmistosimuloinnin tarkkuudesta oli hyvin positiivinen. Se, että rakennettu prototyyppi lopulta toimi näinkin pitkälle simuloitua lai-
tetta vastaavasti, oli yllättävää.

Kävi ilmeiseksi, että paljon lisää aikaa ja resursseja käyttämällä olisi ilmeisesti lopulta saatu valmistetuksi hyvä ja käyttökelpoinen vahvistin. Luonnollisesti tuolloin olisi jou-
duttu myös ottamaan hyvin perusteellisesti huomioon aiemmin esille tuodut eri standar-
dien ja säädösten asettamat vaatimukset sähkölaitteille. Samaten olisi jouduttu kiinnit-
tämään tarkempaa huomiota moniin parametreihin (taajuusvaste, kohinasuhde, sisään-
tulon herkkyys, särö, vahvistuksen nopeus, hyötysuhde jne.).

Työn päätavoitteina pidetyissä vahvistimen suunnittelussa ja rakentamisessa onnistut-
tiin. Työssä havaittiin käytännössä myös että vahvistimen suunnittelu nykyaikaisella oh-
jelmistotyökalulla onnistui kohtuujassa henkilöltä, joka ei aiemmin ollut paljoa perehty-
nyt asiaan. Voidaan siis todeta, että työn tavoitteet saavutettiin ja esitettyihin kysymyk-
siin saatiin selkeät vastaukset.

D-luokan vahvistimet alkavat olla nykypäivää mutta oppimismielessä perinteisen B-luo-
kan vahvistimen suunnittelu ja rakentaminen oli antoisa kokemus. Vahvistimen suunnit-
telu ja rakentaminen toi tekijälle käytännön kokemusta tehoelektroniikan komponenttien
parissa työskentelystä.

Lähteet

- 1 Slone, G. Randy. 1999. High Power Audio Amplifier Construction Manual. New York: McGraw-Hill.
- 2 White, Paul. 2000. Basic Live Sound. London: Sanctuary publishing.
- 3 Buick, Peter. 1996. Live Sound PA for Performing Musicians. Thetford: PC publishing.
- 4 James, Paul. 2002. The Live Sound Manual. San Francisco: Backbeat Books.
- 5 Self, Douglas. 2006. Audio Power Amplifier Design Handbook. 4th ed. Amsterdam: Newnes.
- 6 Morey, Vasudevan, Woloschin. 2008. Class D Audio Amplifier. Worcester Polytechnic Institute.
- 7 2006/95/EY. Pienjännitedirektiivi. 2006. Euroopan parlamentti, Neuvosto.
- 8 SFS-EN 60335-1. Kotitaloussähkölaitteiden ja vastaavien turvallisuus. 2003. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 9 SFS-EN-60065. Audio-, video- ja vastaavat elektroniset laitteet. Turvallisuusvaatimukset. 2003. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 10 SFS-EN 61000. Sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC) liittyvät standardit. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.