



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO NISKANEN
HIGH-GAIN-PUTKIETUVAHVISTIN SÄHKÖKITARALLE

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Katja Laine

TIIVISTELMÄ

MIKKO NISKANEN: High-Gain Tube Preamp for Electric Guitar

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 33 sivua, 1 liitesivu

Joulukuu 2017

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Elektroniikka

Tarkastajat: Katja Laine

Avainsanat: Elektroniputki, esivahvistin, kitaravahvistin, putkivahvistin, etuaste, 12AX7, ECC83, vacuum tube amplifier, guitar preamp, SPICE

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa putkietuvahvistimen prototyypiversio sähkökitaralle. Kyseinen etuvahvistin toimii ääntä muokkaavana audioefektilaitteena ja se rakennettiin 19":n räkkikoteloon, jotta sitä olisi mahdollista käyttää oikeassa laiteräkissä. Tuotekehitysprosessin lisäksi tavoitteena oli mahdollisuuksien mukaan verrata SPICE-simulaatiomallin ja oikean komponentin käyttäytymistä.

Laitteen prototyyppi suunniteltiin hyödyntäen simulaatioita ja teoriaa. Tämän jälkeen aloitettiin rakennusvaihe komponenttien hankkimisella ja mekaanisilla työstöillä. Koteloinnin työstämisen jälkeen rakennettiin erillinen, suhteellisen yksinkertainen virtalähdeyksikkö ja rakenne sekä kytkentäratkaisut itse audiopiirille. Audiopiirin rakentaminen suoritettiin vaihe kerrallaan, jotta mahdollisia rakennusvaiheessa tarvittavia muutoksia olisi helppo tehdä.

Kytkenän valmistuttua suoritettiin mittaukset audiopiirille. Mittauksissa haluttiin saada monipuolisesti tuloksia sekä erillisille vahvistinasteille että kokonaisuudelle. Tuloksia käsiteltiin lohko kerrallaan vertailun helpottamiseksi ja suunnitteluratkaisujen avaamiseksi. Simulaatio- ja mittaustuloksia vertailemalla sekä käytännön testejä hyödyntäen havaittiin, että simulaatiotulokset vastaavat odotettua paremmin todellisen piirin toimintaa ja että simulaatiot ovat hyödyllinen työkalu efektilaitteen kehityksessä. Myös työn alkuperäiseen tavoitteeseen päästiin, eli hyvin käyttökelpoinen ja jatkokehityskelpoinen prototyyppi saatiin valmiiksi aikataulun mukaisesti.

ALKUSANAT

Pitkäaikainen harrastus musiikin parissa johti sähköalan opintojen kanssa siihen, että aloin kiinnostua yhä enemmän musiikin elektroniikasta. Tämän työn aihe syntyi harrasteprojektina jo pari vuotta aikaisemmin, kun aloin perehtyä kitaravahvistimien tekniikkaan harrastuksena. Projektin pysyi pitkään suunnitelmatasolla, mutta nyt opinnäytetyön tullessa ajankohtaiseksi päätin toteuttaa suunnitelmani myös käytännössä.

Tampere, 17.12.2017

Mikko Niskanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
2. Elektroniputki	3
2.1 Historiaa ja sovelluksia	3
2.2 Rakenne ja toiminta	4
3. Vahvistimen suunnittelu	7
3.1 Katodibiasoitu yhteiskatodikytkentä	7
3.1.1 Toimintapisteen määrittäminen	8
3.1.2 Taajuusvaste	11
3.2 Virtalähde	12
3.3 Vastekorjaus	13
4. Prototyypin toteutus	15
4.1 Materiaalit ja ratkaisut	15
4.2 Simulaatiot ja mittaukset	16
4.2.1 Ensimmäinen lohko	16
4.2.2 Toinen lohko	19
4.2.3 Kolmas lohko	23
4.2.4 Neljäs lohko	26
4.2.5 Ulostulolohko	29
5. Yhteenveto	32
Lähteet	33
Liite A. Kytkentäkaavio	34

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ENIAC	Electronic Numerical Integrator And Computer, tietokone
High-gain	Suurivahvisteinen, musiikissa käytetään yleensä kuvaamaan voimakasta säröä
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto
SPICE	Piirianalysointiohjelma, jolla voi simuloida kytkentöjä sekä komponentteja
Tone Stack	Taajuuskorjainkytkentä kitaravahvistimissa

C	kapasitanssi
E	sähkökenttä
g_m	transkonduktanssi
I	tasavirta
I_A	anodivirta
R	resistanssi
r	dynaaminen resistanssi
V	tasajännite
V_A	anodijännite
V_G/V_g	hilajännite
μ	vahvistuskerroin

1. JOHDANTO

Vuonna 1880 Thomas A. Edison teki työryhmänsä kanssa kokeiluja hehkulampuilla ja havaitsi lapun lasipinnan tummuvan tietystä kohdasta. Hän luuli ensin syyksi hiilipohjaisesta filamentista irtoavia varautuneita partikkeleita, mutta todellisuudessa hehkulangasta irtosikin elektroneja. Tätä havaintoa kutsutaan nykyään Edisonin ilmiöksi ja voidaan joiltain osin pitää lähtölaukauksena nykyisen elektroniikan kehitykselle. Edison ei kuitenkaan tuolloin tajunnut löytönsä potentiaalia ja 24 vuotta myöhemmin, vuonna 1904, englantilainen fyysikko John Ambrose Fleming kehitti ensimmäisen elektroniputken, joka toimi diodin tavoin tasasuuntaajana. [1][2, s. 15–17]

Elektroniikka perustui käytännössä ainoastaan elektroniputkitekologiaan transistorin keksimiseen asti, jonka jälkeen putkien käyttö alkoi romahtaa. Nykyään elektroniputkia käytetään enää vain harvoissa sovelluksissa, eniten audioelektroniikassa varsinkin musiikkiteollisuudessa ja musiikin harrastajien keskuudessa. Monet saattavat ihmetellä miksi kukaan käyttäisi putkia enää missään, sillä niiden ominaisuudet ovat usein varsin kaukana ideaalisesta. Vastaus kuitenkin löytyy itse kysymyksestä, sillä juuri elektroniputkien epäideaalisuudet voivat olla syy niiden suosioon tietyissä sovelluksissa. Nykyään kuitenkin putkien vastetta voidaan simuloida täydellisesti esimerkiksi digitaalisella signaalinkäsittelyllä, joten syyt säilyneeseen suosioon ovat usein myös täysin subjektiivisia. [3]

Tämänkin kandidaatintyön aihe syntyi harrasteprojektina jo kaksi vuotta aikaisemmin putkitekniikkaan ja kitaravahvistimien historiaan tutustumalla. Tavoitteena työssä on suunnitella ja kehittää toimiva moniasteisen high-gain-putkietuvahvistimen prototyyppi. Termi high-gain viittaa kitaravahvistimissa säröytettyyn signaaliin, joka syntyi ja kehittyi 1950- ja 60-lukujen aikana, kun sen ajan sähkökitaristit huomasivat vahvistimen yliajamisen tuottavan miellyttävän ääniefektin [3]. Toteutettava etuvahvistin siis toimii ensisijaisesti signaalia muokkaavana efekttilaitteena, mikä tuo suunnitteluun omat haasteensa. Nykyään elektroniikkasuunnittelussa käytetään lähes poikkeuksetta apuna simulointia ja komponenttien SPICE-malleja (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) [4], mutta useinkaan malleja ei ole suunniteltu toimimaan ääritilanteissa. Siksi yksi tavoitteista on verrata oikean elektro-

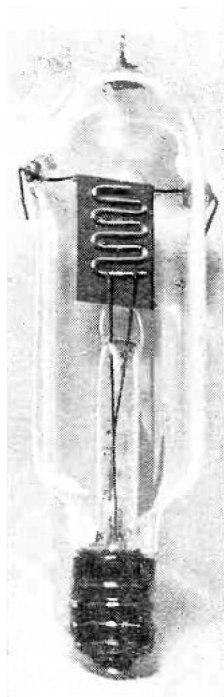
niputken toimintaa nykyään saatavilla olevien SPICE-mallien simulaatioihin nimenomaan signaalin säröytymisessä, pääpainon ollessa kuitenkin itse suunnittelu- ja kehitysprosessissa.

Toisessa luvussa käsitellään elektroniputken historiaa hieman tarkemmin sekä sen teoriaa ja sovelluksia. Kolmannessa luvussa perehdytään prototyypin rakenteeseen sekä eri osien suunnitteluun ja teoriaan. Neljäs luku käy läpi varsinaisen rakennusvaiheen ja simuloinnit sekä mittaukset vaihe kerrallaan. Viimeisessä luvussa koostetaan projektin lopputulos ja havainnot.

2. ELEKTRONIPUTKI

2.1 Historiaa ja sovelluksia

Flemingin diodin jälkeen seuraava kehitysaskel oli *triodi*, vahvistimena toimiva komponentti. Maailman ensimmäinen triodi on tietävästi yhdysvaltalaisen keksijän Lee De Forestin vuonna 1906 patentoima versio, jossa virtaa ohjetaan ulkopuolisella hillalla. Pian tämän jälkeen hän kuitenkin keksi sijoittaa hilan putken sisäpuolelle anodin ja katodin väliin ja haki kuvan 2.1 laitteelle patenttia vuonna 1907 nimikkeellä *Audion*. [2]



Kuva 2.1 Lee De Forestin Audion [5].

De Forestin Audion perustui Flemingin tutkimuksiin, mutta triodia kehitettiin samoihin aikoihin myös Euroopassa. Vuonna 1910 Lieben, Reiss ja Strauss keksivät version, jossa käytettiin elohopeakaasua, ja tämä versio sai nimekseen *Lieben-putki*. [2]

Pian tämän jälkeen yhdysvaltalainen Irving Langmuir päätyi tulokseen, jonka mukaan elektroniputki toimisi paremmin tyhjiön kuin kaasun avulla. Näin ollen hän kehitti tyhjiötekniikkaa ja vaikutti koko maailman elektroniputkien kehitykseen. Tekniikan kehittämiseen osallistui myös suomalainen tuolloin äänielokuvatekniikan parissa työskennellyt Eric Tigerstedt. [2, 6]

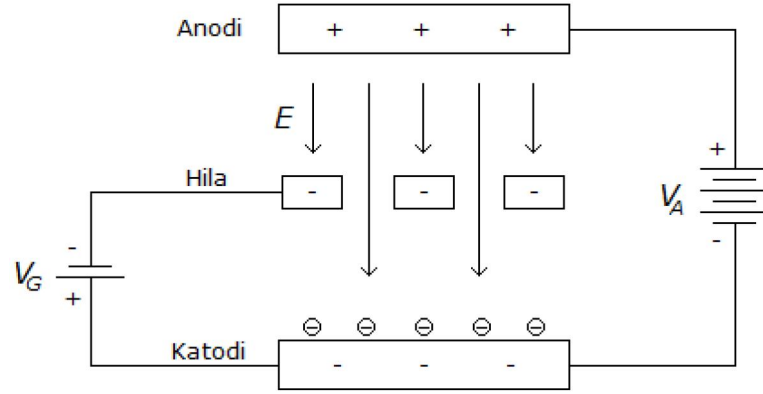
Triodeja käytettiin ensimmäisiä kertoja signaalin vahvistamiseen vuosina 1911–1912, ja heti tämän jälkeen useat tutkijat eri puolilla maailmaa kehittivät myös oskillaattoreita. Tämä johti langattoman tietoliikenteen kehittymiseen ja muihin innovaatioihin, kuten esimerkiksi uusiin putkityyppeihin. [2, 6] Uusien putkityyppien myötä löydettiin uusia käyttökohteita ja kehitettiin sovelluksia; aluksi putkia käytettiin paljon varsinkin sotatöissä viestintä- ja tutkajärjestelmissä, mutta myös televisioissa ja lääketieteellisissä laitteissa [6]. Käyttö ei kuitenkaan rajoittunut pelkään analogiatekniikkaan, sillä putkia alettiin käyttää myös varhaisissa tietokoneissa, joista tunnetuin lienee maailman ensimmäinen täysin elektroninen tietokone, vuonna 1946 käyttöön otettu ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) [7]. Tyhjiöputkitekniikan kehitys ei ole vielä täysin loppunut, sillä esimerkiksi NASA tutkii jopa 460 GHz:n taajuuksiin kykenevää tyhjiötransistoria [8] ja osa suurtehoradiolähettimistä käyttää edelleen elektroniputkia [7].

2.2 Rakenne ja toiminta

Elektroniputki koostuu kolmesta tyhjiöön sijoitetusta pääkomponentista,

- anodi (*anode*)
- katodi (*cathode*)
- yksi tai useampi hila (*grid*).

Seuraavassa kuvassa 2.2 on esitetty triodin periaatteellinen rakenne. [9, s. 26–27]



Kuva 2.2 Triodin periaattellinen rakenne.

Elektroniputken toiminta perustuu *termiseen emissioon* ja sähkökenttiin. Terminen emissio tarkoittaa elektronien irtoamista metallin pinnasta lämpövarähtelyn vaikutuksesta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että katodi kuumennetaan lämpötilaan, jolla saadaan aikaiseksi riittävä elektronien emissio jatkuvan toiminnan ylläpitämiseksi. Pienemmissä putkissa käytetään pääasiassa oksidoituja katodeja, joiden tavallinen toimintalämpötila on 1000–1300 °K. [10, s. 21–31]

Anodin ja katodin välille luodaan sähkökenttä E korkealla jännitteellä V_A , minkä seurauksena katodista irronneet elektronit kulkeutuvat anodille eli virta alkaa kulkea. Ilman hilaa kyseessä on siis diodi. Kun anodin ja katodin väliin lisätään verkomainen hila, voidaan elektronien kulkeutumista rajoittaa pienellä negatiivisella ohjausjännitteellä V_G . Mitä negatiivisempi V_G on, sitä enemmän sähkökenttä valitsee anodin ja hilan välillä ja näin ollen vaikuttaa vähemmän katodista irtoaviin elektroneihin. [10, s. 48–53]

Elektroniputkien ominaisuuksille voidaan määrittää samankaltaisia parametreja kuin puolijohdekomponenteille. Putken sisäinen anodiresistanssi r_A voidaan määrittellä anodivirran I_A , anodijännitteen V_A ja hilajännitteen V_G avulla

$$r_A = \left[\frac{\partial I_A}{\partial V_A} \Big|_{V_G} \right]^{-1} \quad (2.1)$$

ja transkonduktanssi g_m

$$g_m = \frac{\partial I_A}{\partial V_G} \Big|_{V_A}. \quad (2.2)$$

Koska putken vahvistuskerroin μ määritellään

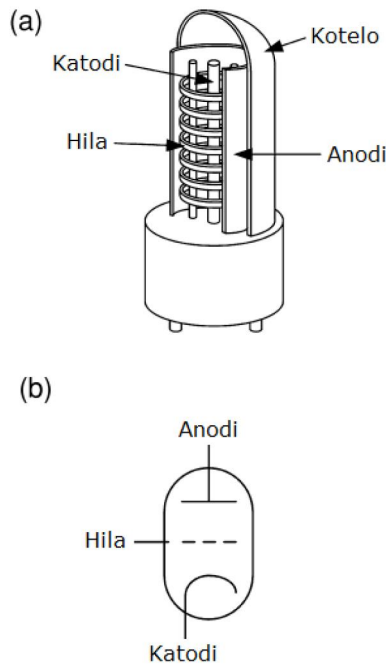
$$\mu = - \left(\frac{\partial V_A}{\partial V_G} \right) \Big|_{I_A}, \quad (2.3)$$

niin saadaan yhteys

$$\mu = g_m r_A. \quad (2.4)$$

Vahvistuskerron liittyy vahvasti putken sisäiseen rakenteeseen eli elektrodien välisiin etäisyyksiin ja kylmäkapasitansseihin, joiden avulla se voidaan myös määrittellä. [9, s. 64–69] Usein valmistaja antaa edellä määritellyille parametreille approksimoitua arvoja datalehdellä sekä muita keskeisiä tietoja, kuten eri elektrodien minimi- ja maksimi-arvot sekä ominaiskäyrästä.

Elektroniputkien fyysinen rakenne vaihtelee jonkin verran, mutta yleensä kotelo on joko lasia tai metallia ja elektrodit ovat sisäkkäin sylinterimäisinä tai litteinä osina. Kuvassa 2.3 on esitetty yksinkertaistettu rakenne sekä piirrosmerkintä.



Kuva 2.3 Elektroniputken rakenne (a) ja piirrosmerkintä (b) [11].

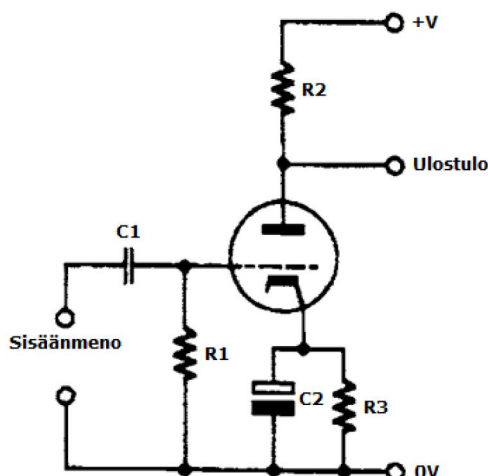
Pentodi- ja tetrodirakenteet voivat olla monimutkaisempia useampien elektrodien johdosta. Pienet putket, esimerkiksi ECC83-tyyppiset, ovat usein tuplatriodeja, eli samaan koteloon on sijoitettu kaksi triodia. [10, s. 42–71] Tässä työssä toteutettu putkivahvistin on toteutettu kokonaisuudessaan ECC83-tyypin 12AX7-tuplatriodeilla.

3. VAHVISTIMEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käsitellään prototyypin eri osia ja niiden suunnittelumenetelmiä kitaravahvistinsuunnittelun näkökulmasta. Suunnittelu perustuu teorian lisäksi myös referensseihin, sillä kitaravahvistimissa on ollut jo pitkään tapana käyttää hyvin samanlaisia ratkaisuja valmistajasta riippumatta. Hyvin perinteisenä lohkona kitaravahvistimissa on säilynyt yhteiskatodikytkentä, jota esimerkiksi Fender ja Marshall käyttivät varhaisissa vahvistinkytkennöissään. Tämänkin työn vahvistin perustuu pääosin samaan kytkentään, joten muuntyyppiset ratkaisut jätetään tällä kertaa käsittelemättä. [12] Eri valmistajien vahvistimien kytkentäkaavioita löytää referensseiksi melko helposti sillä useimmat vanhat patentit ovat rauenneet, mutta näiden kanssa täytyy olla hyvin lähdekriittinen.

3.1 Katodibiasoitu yhteiskatodikytkentä

Seuraavassa kuvassa 3.1 on esitetty tyypillinen kitaravahvistimen etuasteessa käytetty kytkentä, joka toimii invertoivana jännitevahvistimena.

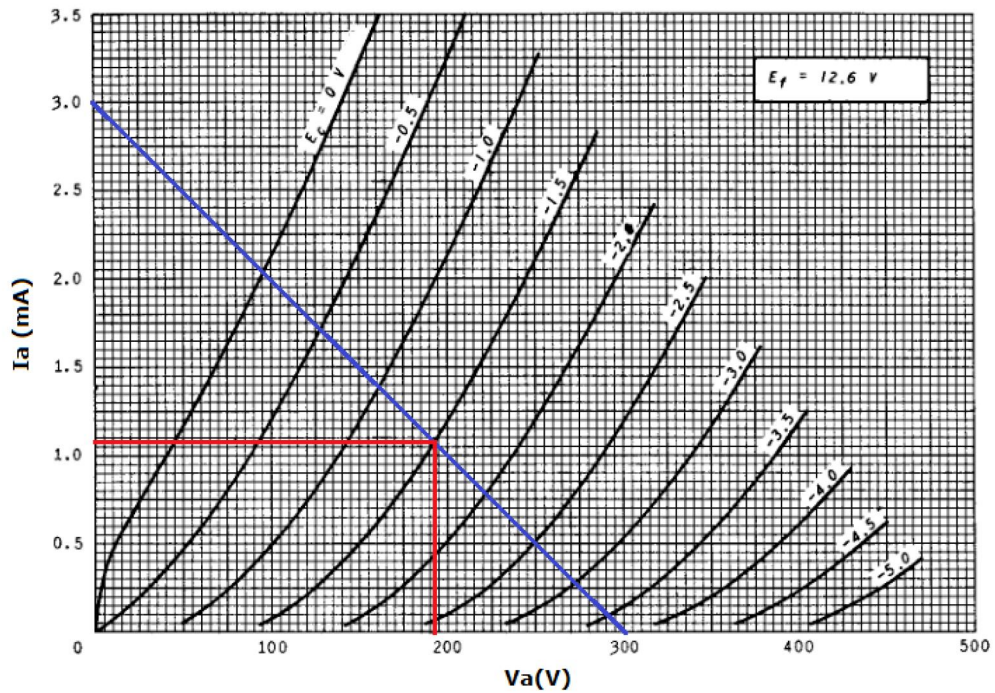


Kuva 3.1 Tyypillinen yhteiskatodikytkentä [13].

Toimintapiste asetetaan kuormavastuksella $R2$ ja katodivastuksella $R3$, eli kytkentä on siis katodibiasoitu. Tämä tarkoittaa sitä, että lepovirralla vastuksen $R3$ jännite muodostaa negatiivisen hila-katodijännitteen. Yleensä suuri vastus $R1$ toimii vuoto-vastuksena, jonka avulla hilalle saadaan referenssi ja pienelle hilavirralla paluureitti signaalimaahan. $C1$ on kytkentäkondensaattori ja $C2$ toimii ohituskondensaattorina, joka pienentää vahvistusta matalilla taajuuksilla. [13, luku 3] [9, s. 314–316]

3.1.1 Toimintapisteen määrittäminen

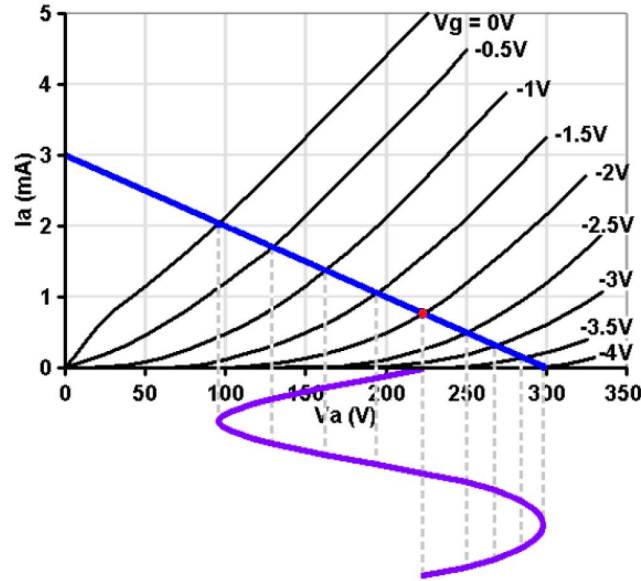
Katodibiasoidun yhteiskatodikytkennän toimintapisteen voi määrittää monilla tavoin, mutta yksi yleisimmistä sekä havainnollisimmista on graafinen metodi ominaiskäyrästön avulla. Tällöin käyrästöön piirretään kuormitussuora valitun anodijännitteen sekä kuorman perusteella, esimerkiksi kuvassa 3.2 arvoiksi on valittu 300 V ja 100 k Ω . Virran ääripää ideaalisessa täysin johtavassa tilassa lasketaan yksinkertaisesti Ohmin lailla $I = U/R$, jolloin virraksi saadaan esimerkin tapauksessa 300 V / 100 k Ω = 3 mA. Kuormitussuoran toinen pää saadaan kun kuvitellaan putken olevan täysin johtamattomassa tilassa, jolloin kuormavastuksen yli ei ole jännitettä ja jännite anodilla on sama kuin käyttöjännite. Toimintapiste eli tyhjäkäyntivirta voidaan asettaa haluttuun kohtaan valitsemalla sopiva V_g -käyrä kuvaajasta, esimerkiksi -1,5 V mikä on yleinen keskipiste 12AX7-tyyppisellä putkella. [14]



Kuva 3.2 Kuormitussuora sekä valittu toimintapiste $100\text{ k}\Omega$:n kuormalla ja 300 V :n käyttöjännitteellä [15].

Kuvaajasta voidaan lukea virraksi toimintapisteessä noin $1,055\text{ mA}$, jolloin katodivastuksen arvoksi saadaan $R = U / I = 1,5\text{ V} / 1,055\text{ mA} \approx 1,42\text{ k}\Omega$.

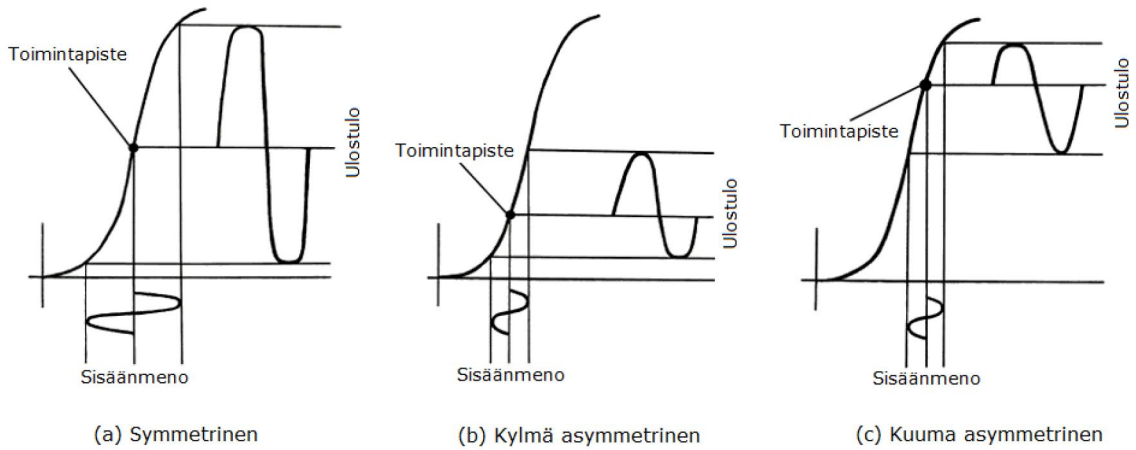
Biasoinnilla on mahdollista vaikuttaa paljon vahvistinasteen signaalia muokkaaviin ominaisuuksiin. Ensimmäinen ominaisuus on putken epälineaarinen vaste, joka venyttää symmetristä sisäänmenosignaalia epäsymmetriseksi. [14]



Kuva 3.3 Elektroniputken epälineaarisuus [14].

Kuvan 3.3 mukainen epälineaarisuus tuottaa signaaliin harmonista säröä, joka on kenties tärkein vaikuttava tekijä tuomaan putkivahvistimien ääneen niin kutsuttua lämpöä ja musikaalisuutta [12]. Vahvistusasteen lineaarisuuteen on mahdollista vaikuttaa kuormavastuksen suuruudella, sillä suuremmalla kuormalla V_g -käyrien välit ovat kuormitussuoralla tasaisemmat. [14]

Koska kitaravahvistimissa signaalia usein tarkoituksella säröytetään yliajamalla vahvistinasteita, vaikuttaa biasointi myös sitä kautta ääneen. Signaalin leikkaantuminen voi olla joko symmetristä tai epäsymmetristä (kuva 3.4) ja ne tuottavat erilaisia harmonisia komponentteja signaaliin. Signaali leikkaantuu kun sisäänmeno ylittää normaalit toimintarajat joko menemällä negatiivisemmaksi (*cut-off*) tai positiivisemmaksi (*grid current limiting*) kuin valmistajan määrittämä raja-arvo. Kun putki biasoidaan lähemmäs *cut-off*-aluetta, sitä kutsutaan kylmäksi biasoinniksi sillä anodivirta ja siten putken anoditehoviö on tällöin pienempi. Toinen ääripää taas edustaa kuumaa biasointia ja anoditehoviö on suurempi. Molemmissa tapauksissa leikkaantuminen on muodoltaan samankaltaista, mutta johtuen mekanismin erilaisuudesta kylmä biasointi tuottaa yleensä kompressoidumman signaalin ja hieman erilaisella vasteella. Näin ollen kuumalla biasoinnilla säröytetystä äänestä tulee paksumpi ja pehmeämpi kuin kylmällä, jolla vaikutus on yleensä päinvastainen. Biasoinnissa täytyy huomioida myös putkelle määritelty maksimianoditehoviö jotta putki ei hajoaisi eikä sen käyttöikä laskisi, mutta tämä koskee yleensä tehokkaampia putkia. [14]



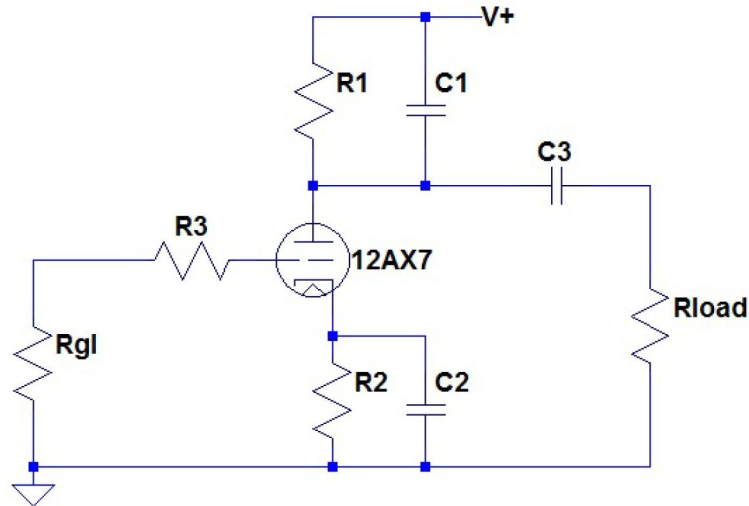
Kuva 3.4 Signaalin leikkaantuminen yliajettaessa riippuen toimintapisteestä [12].

High-gain-kitaravahvistimen särörakenne muodostuu pitkälti käyttämällä eri tavoin biasoituja vahvistinasteita peräkkäin, jolloin koko vahvistimen ulostulo saa omanlaisensa luonteen. Eri valmistajilla on yleensä jokin tietty rakenne, jota käytetään useimmissa malleissa luomaan valmistajan vahvistimille tyypillinen luonne. [12]

3.1.2 Taajuusvaste

Kitaravahvistimissa eri vahvistinlohkojen taajuusvasteilla ja lohkojen välisillä suoti- millä sekä vaimennuksilla on suuri merkitys lopputulokseen. Täysin puhtaalla, yliajamattomalla äänellä tasainen vaste toimii hyvin, mutta varsinkin yliajettaessa tiettyt taajuudet tulevat suhteessa kuuluvammiksi. Hallitsemalla taajuusvasteita voidaan kokonaisuuden tuottama vaste säätää halutunlaiseksi, esimerkiksi tässä työssä toteutettava vahvistin on eräänlainen kokeilu matalien taajuuksien vasteen osalta.

Yksittäisen putkivahvistinasteen vasteeseen on mahdollista vaikuttaa monin tavoin, mutta yleisimmät tavat ovat katodi- tai anodivastuksen ohittava kondensaattori, kytkentäkondensaattorit sekä Millerin kapasitanssia hyödyntävät hilavastukset. Suunnittelussa on mahdollista pienentää kokonaiskustannuksia hyödyntämällä mahdollisimman paljon joka tapauksessa tarvittavia komponentteja sekä parasiittisia ominaisuuksia.

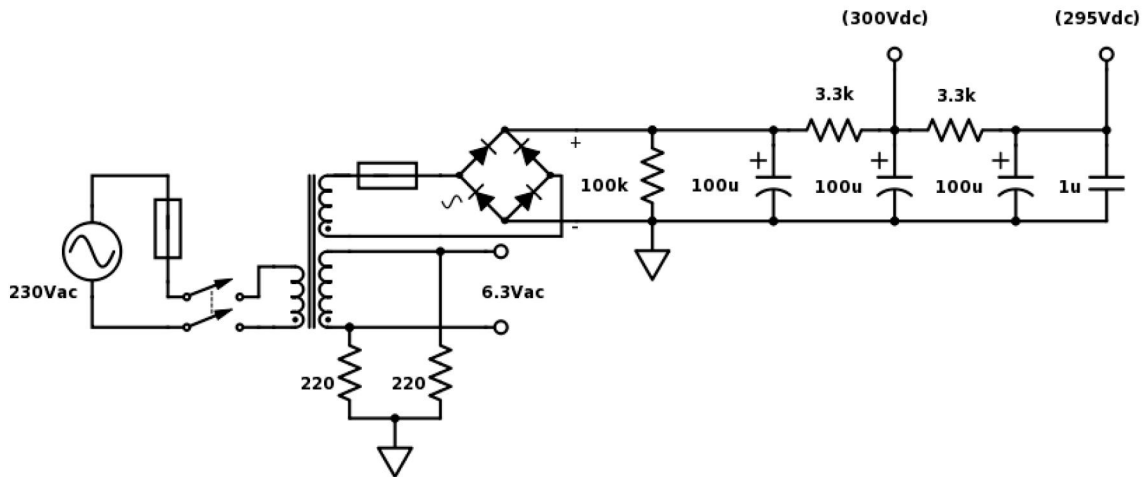


Kuva 3.5 Taajuusvasteeseen vaikuttavia komponentteja mallikytkennässä.

Kuvassa 3.5 on esitetty yleisimmät vasteeseen vaikuttavat komponentit. Matalia taajuuksia voi rajoittaa ohituskondensaattorilla C2 sekä kuorman resistanssin ja kondensaattorin C3 muodostamalla RC-suotimella. Korkeita taajuuksia voi rajoittaa ohituskondensaattorilla C1 sekä hilavastuksen R3 ja putken hilalla näkyvän Millerin kapasitanssin muodostamalla RC-suotimella. [9, s. 308–341] Tämän työn vahvistimen taajuusvasteet on suunniteltu pitkälti simulointia hyödyntäen, sillä siten on mahdollista saada tarkemmat arviot reaali maailman vasteista kokonaisuudessa.

3.2 Virtalähde

Projektin prototyypiluonteen vuoksi virtalähteeksi päädyttiin rakentamaan yksinkertainen lineaarinen lähde. Myöskin etuvahvistimen pienen tehontarpeen ansiosta kalleimman osan eli muuntajan hinta pysyy kohtuullisissa rajoissa. Muuntajan tyyppiä valittiin toroidi, sillä se on helppo sovittaa valittuun koteloon ja ulospäin aiheutuvat häiriöt ovat pienet. Virtalähde on kokonaisuudessaan samankaltainen kuin useimmissa kaupallisissa etuvahvistimissa, sillä vielä nykypäivänäkin kitaraputkivahvistimissa käytetään pääosin lineaarisia lähteitä hakkureiden sijaan.

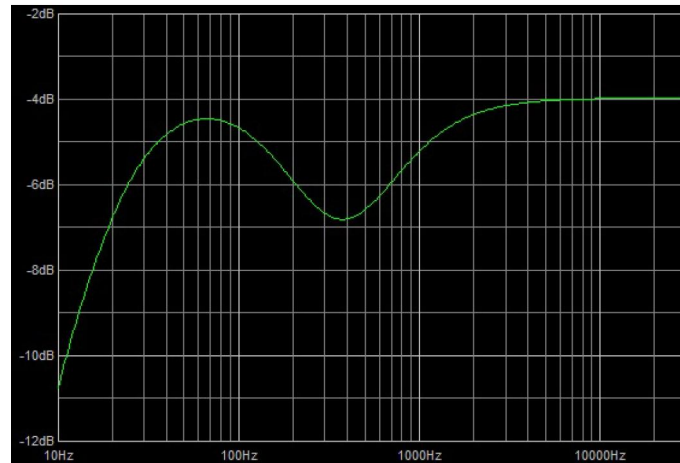
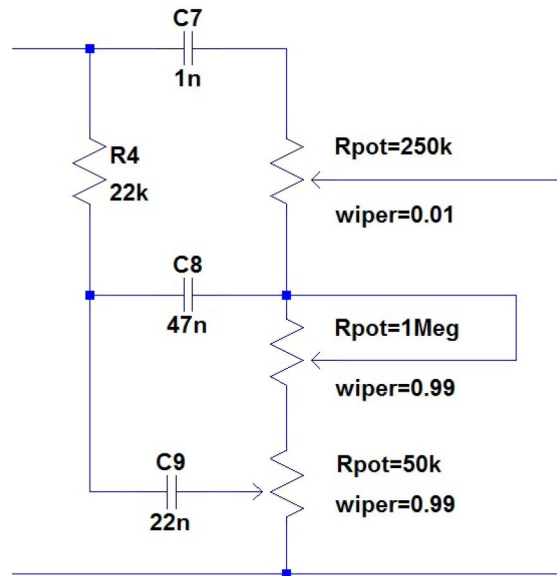


Kuva 3.6 Virtalähde kytentäkaavio. Suluissa olevat jännitearvot ovat ulostulojännitteitä kun kuormana on suunniteltu vahvistinkytkentä.

Kuvan 3.6 mukainen virtalähde suunniteltiin myös saatavilla olleiden komponenttien perusteella, sillä korkeajännitemuuntajat sekä -elektrolyyttikondensaattorit ovat kalliita ja joskus huonosti saatavilla. Myöskin prototyypissä käytetty moduulirakenne täytyi ottaa huomioon, jotta virtalähteestä saataisiin riittävän kompakti. Virtalähde toteutettiin juovakuparoidulle verolevyille, sillä se oli prototyypin tapauksessa nopein ja helpoin ratkaisu yksinkertaisen rakenteen ja suurien komponenttien vuoksi.

3.3 Vastekorjaus

Prototyyppiin toteutettiin myös hyvin tavallinen kitaravahvistimissa käytetty taajuuskorjain (*Tone Stack*). Kyseessä on niin kutsuttu Marshall-tyyppinen passiivinen korjain, joka on kolmialueinen.



Kuva 3.7 Taajuuskorjaimen kytkentä sekä vaste säätöjen ollessa puolivälissä.

Kuvan 3.7 mukaisesti taajuuskorjain leikkaa aivan alimpia sekä keskitaajuuksia, mikä yleensä koetaan miellyttäväksi. Jotkut valmistajat ovat kokeilleet myös muuntymppisiä korjaimia, mutta ne ovat harvoin pysyneet tuotteissa. Syy tähän voi olla täysin asiakas- tai kustannuslähtöinen.

Tässäkin prototyypissä kokeiltiin Baxandall-tyyppistä taajuuskorjainta, jossa on säädöt vain basso- ja trebletaajuuksille sekä keskialueen taajuudelle. Kyseinen korjain kuitenkin todettiin käytettävyydeltään liian epämääräiseksi, eikä sen vaikutus ääneen ollut riittävän selkeä.

4. PROTOTYYPIN TOTEUTUS

Tämä luku käsittelee prototyypin toteutukseen valittuja ratkaisuja, rakennus- ja mitausvaiheita sekä lopputuloksen simulaatioita ja mittauksia. Alunperin mittaukset oli tarkoitus suorittaa rakennusvaiheessa yhdessä subjektiivisen tarkastelun kanssa, mutta prototyypin moduulirakenne osoittautui niin käteväksi, että mittaukset oli mahdollista tehdä lähes valmiista versiosta. Kokemukset aikaisempien audiolaitteiden kehityksen kanssa ovat osoittaneet, että valmista tuotetta ei kannata rakentaa kerralla pelkästään simulaatioiden perusteella. Näin ollen vahvistin rakennettiin yksi aste kerrallaan, ja joka välissä vahvistimen ääntä arvioitiin käytännön kokeiluilla.

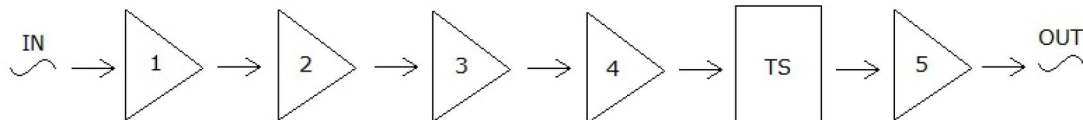
4.1 Materiaalit ja ratkaisut

Vahvistimesta haluttiin mahdollisimman helposti muokattava, joten virtalähde ja vahvistinpiiri suunniteltiin erillisinä moduuleina. Lisäksi putkenkannoille tehtiin teeline, jolla ne saatiin vaakatasoon audiopiirin rinnalle. Muuntaja sijoitettiin yhdessä virtalähteen kanssa mahdollisimman kauas audiopiiristä häiriöiden vähentämiseksi. Audiopiirin muokattavuus oli materiaalivalinnassa tärkein tekijä, sillä komponenttien vaihtamisen, lisäämisen ja poistamisen täytyi olla helppoa. Myös korkeiden jännitteiden ja tulevan käytön vuoksi rakenteen täytyi olla turvallinen ja kestävä, joten piirilevyksi valikoitui juovakuparoitu verolevy. Levy pultattiin kiinni koteloon jatkomuttereilla kuparipuoli ylöspäin, jolloin läpiladottavien komponenttien vaihtaminen on mahdollisimman helppoa.

Koska vahvistin suunniteltiin käytettäväksi myös valmiina tuotteena, valittiin sen koteloratkaisuksi audiolaitteissa yleisesti käytetty 19 tuuman räkkikotelo. Putkietuvahvistimen tapauksessa tekniikka oli mahdollista saada sovitettua kompakteimpaan, yhden räkkiyksikön eli 45 mm:n paksuiseen koteloon, joita on saatavilla valmiina aihioina. Tämän prototyypin koteloksi valikoitui Adam Hall 87407V -mallin teräskotelo alumiinisella etupaneelilla, johon koneistettiin tarvittavat reiät ja aukot.

4.2 Simulaatiot ja mittaukset

Kytkeä tarkastellaan yksittäisen vahvistinlohkon ja kokonaisuuden kannalta. Yksittäisessä näkökulmassa vahvistinlohko on erotettu edellisestä ja seuraavasta, mutta mukana ovat lohkon liittyvät mahdolliset vaimennus- ja suodinratkaisut. Liitteessä A esitetyssä kokonaisuudessa kaikki lohkot ovat kytkettyinä, mutta tarkastelu tapahtuu mittauspisteistä eri vahvistinlohkojen välillä.

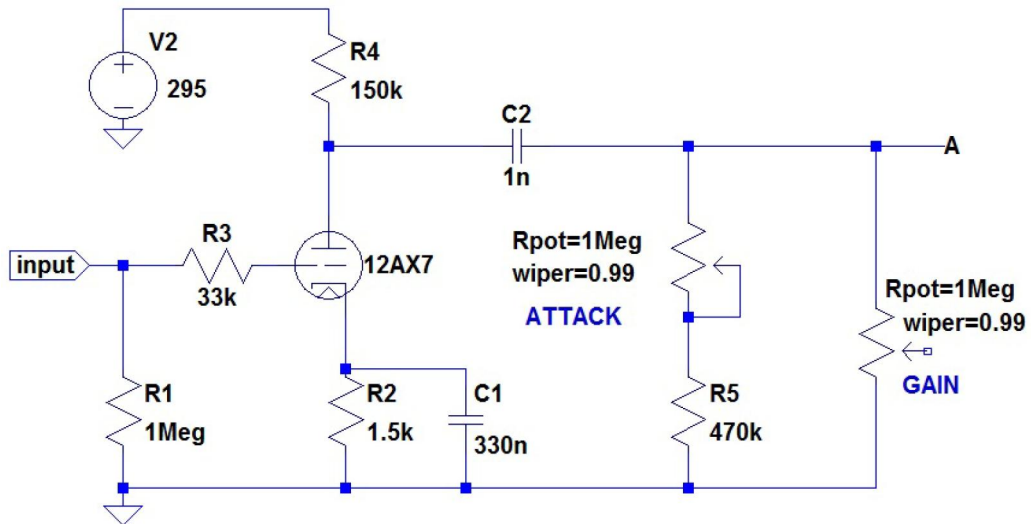


Kuva 4.1 Vahvistimen karkka lohkoakaavio.

Kuvassa 4.1 on esitetty vahvistimen yksinkertainen pää rakenne. Lohkoja on yhteensä viisi ja ennen viimeistä lohkoa välissä on taajuuskorjain (Tone Stack). Simulaatio- ja mittaustulokset käsitellään lohko kerrallaan, jotta tuloksia on helpompi verrata keskenään. Vasteet esitetään samassa kuvassa vertailun helpottamiseksi simulaatio ensimmäisenä ja mitattu vaste heti alapuolella. Vastemittaukset on tehty amplitudeilla, joilla signaali ei säröydy.

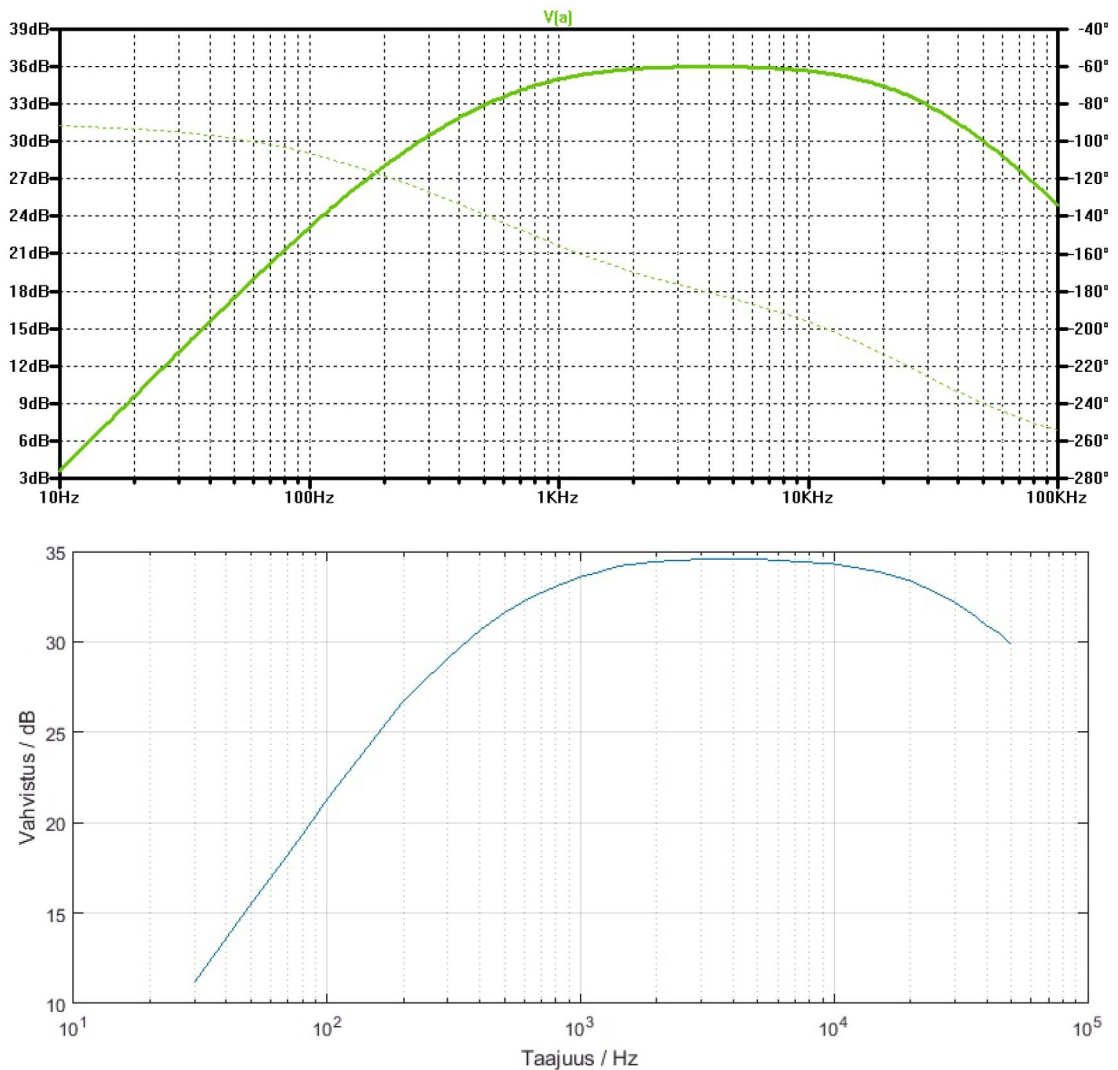
4.2.1 Ensimmäinen lohko

Vahvistinkytkennän ensimmäinen lohko, kuvan 4.2 mukainen sisäänmenoaste, on toteutettu keskelle biasoidulla yhteiskatodikytkennällä. Biasoimalla sisäänmenoaste keskelle saadaan suurin mahdollinen dynaaminen alue olettaessa sisäänmenosignaalin olevan symmetrinen. Yleensä ensimmäistä astetta seuraavat yliajetut asteet tai pelkkä ulostuloaste monikanavaisissa vahvistimissa, jolloin signaali täytyy saada pidettyä mahdollisimman puhtaana alkuvaiheessa. Asteen simuloitu toimintapiste oli 1,31 V ja mitattu 1,28 V, sekä suurin vahvistus simulaatiossa 59,3 ja mitattu 53,5.



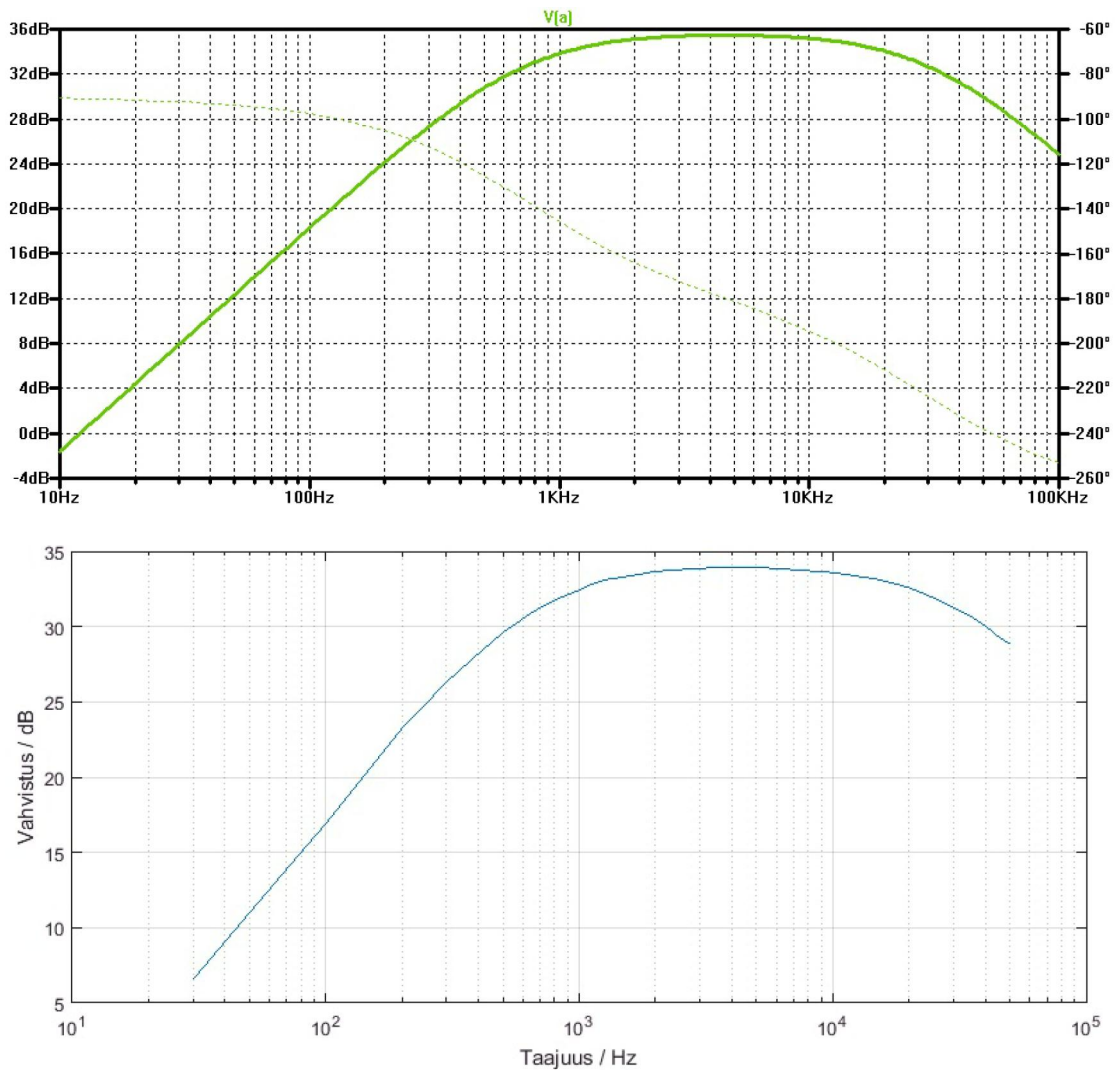
Kuva 4.2 Vahvistimen sisäänmenolohko.

Tässä prototyypissä kokeiltiin rakennetta, jossa matalia taajuuksia leikataan voimakkaasti ensimmäisissä asteissa ja vähän viimeisissä. Tällä pyritään aggressiiviseen bassovasteeseen, joka tuo lopulliseen ulostuloon musikaalisin termein selkeyttä ja tiukkuutta. Liian tiukka vaste ei tosin aina ole haluttu, joten kytkentään toteutettiin säädettävä high-pass-suodin, joka säätää kyseistä ominaisuutta (attack). Taajuuskaistan yläpäättä rajoitetaan tässä lohkossa ainoastaan hilavastuksella vähentämään häiriöitä ja riskiä oskillointiin. Seuraavassa kuvassa 4.3 on esitetty lohkon vaste simuloituna ja mitattuna, attack-säätö asennossa 0%.



Kuva 4.3 Vahvistimen sisäänmenolohkon simuloitu ja mitattu vaste.

Tuloksista havaitaan, että simulaatio vastaa hyvin oikeaa kytkentää. Vain aivan matalilla kymmenien hertsien taajuuksilla eroa syntyy hieman ja vahvistus jää keski-taajuusalueella pienemmäksi, mikä todennäköisimmin johtuu komponenttien epä-deaalaisuuksista. Esimerkiksi useiden 1 M Ω :n potentiometriä mitattu resistanssi oli 800–900 k Ω . Tarkastellaan vielä attack-säädön vaikutusta kuvassa 4.4.

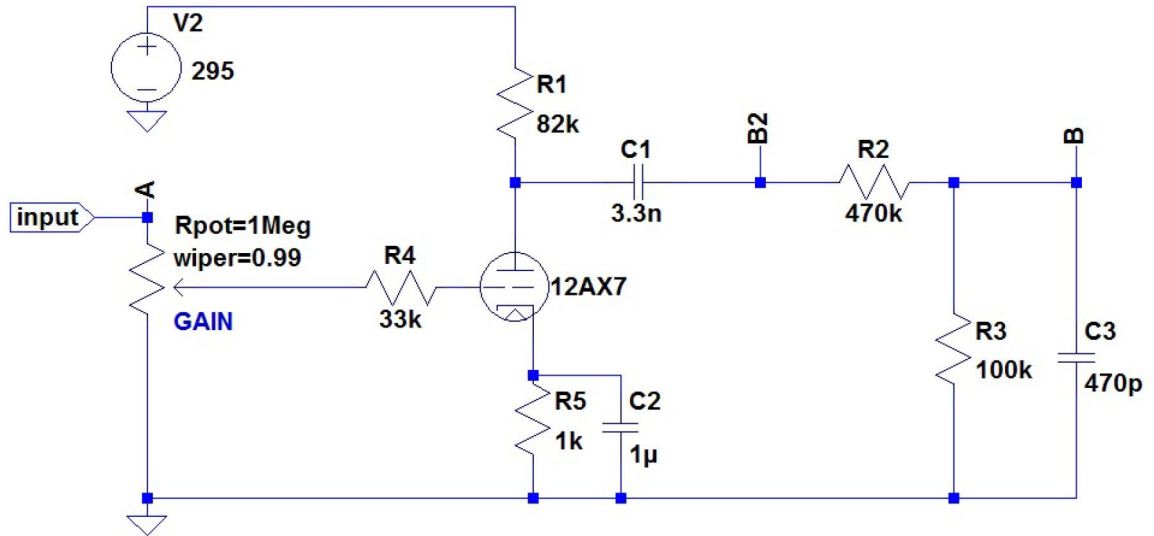


Kuva 4.4 Vahvistimen sisäänmenolohkon simuloitu ja mitattu vaste (attack 100%).

Tuloksista nähdään, että attack-säädön vaikutus on ilmeinen ja laajuus noin 20 Hz. Säädön toimivuus ja hyödyllisyys on varmistettu myös käytännön testeissä. Seuraavissa mittauksissa attack-säädön asetus on aina 100% ellei toisin mainita. Ensimmäisen asteen säröytymistä ei nyt tarkastella, sillä normaalisti sitä ei yliajeta.

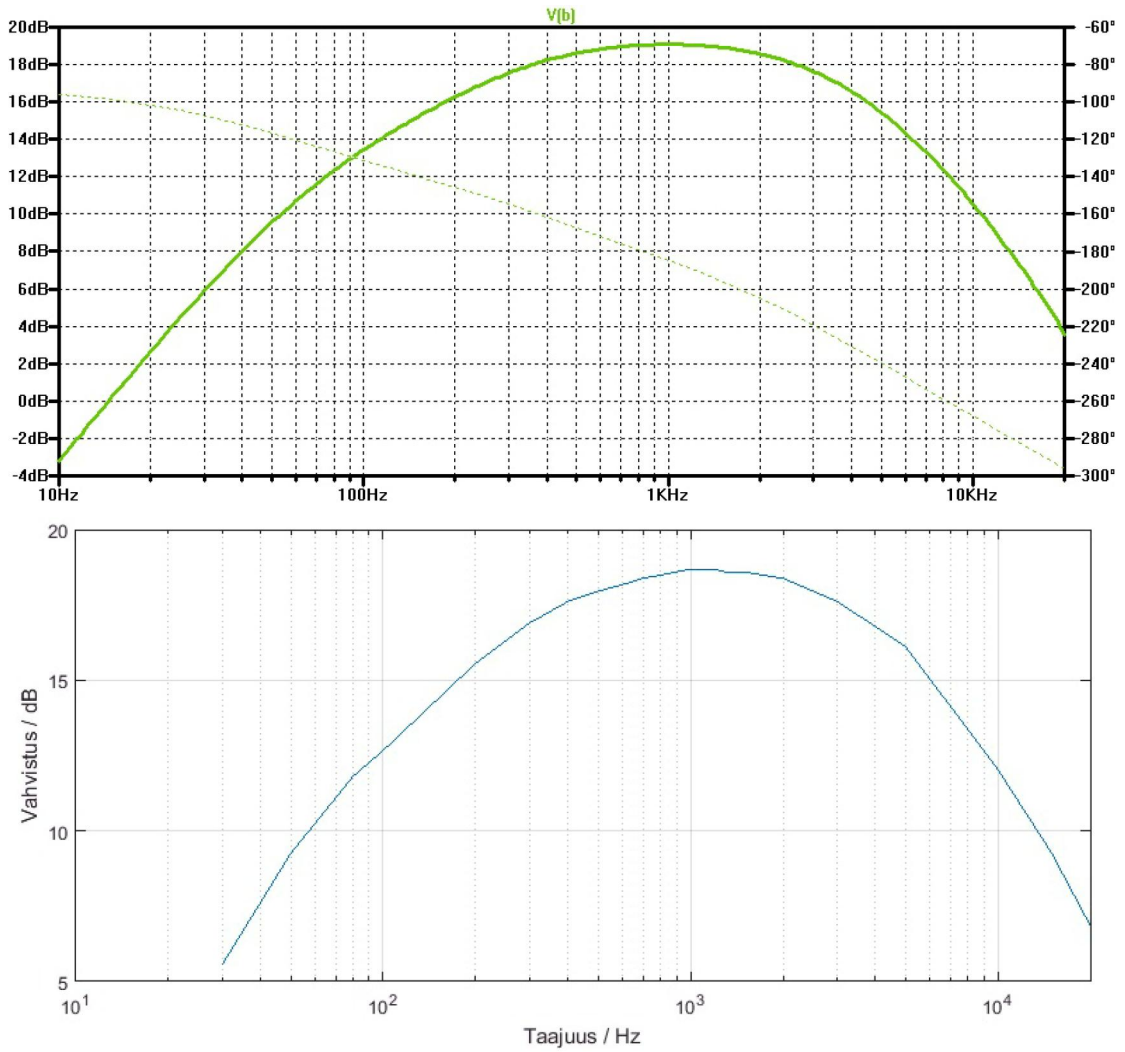
4.2.2 Toinen lohko

Toinen, kuvan 4.5 mukainen lohko on biasoitu lämpimäksi toimintapisteen ollessa 1,30 V simulaatiossa ja 1,23 V oikeassa kytkennässä. Lohkossa on mukana vaimennus seuraavaa astetta varten, joka on toteutettu jännitteenjaolla vastuksilla R2 ja R3 sekä vastuksen R2 ja kondensaattorin C3 muodostama low-pass-suodin. Lohkon simuloitu suurin vahvistus pisteessä B2 on 53,7 ja mitattu 51,9.



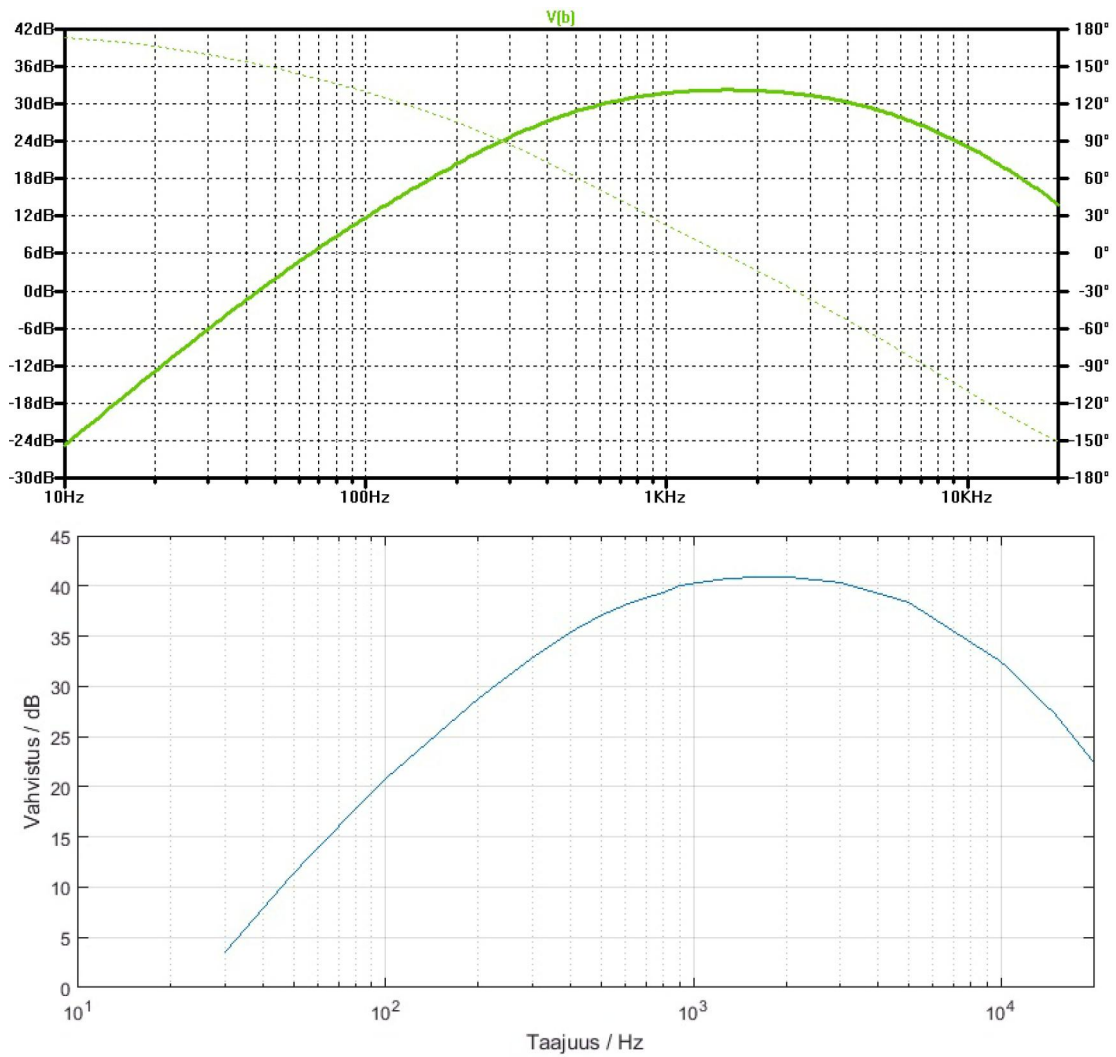
Kuva 4.5 Vahvistimen toinen lohko.

Vasteet erillään muusta kytkennästä on esitetty kuvassa 4.6. Vasteet on mitattu pisteestä B, jolloin saadaan kuva koko lohkon toiminnasta.



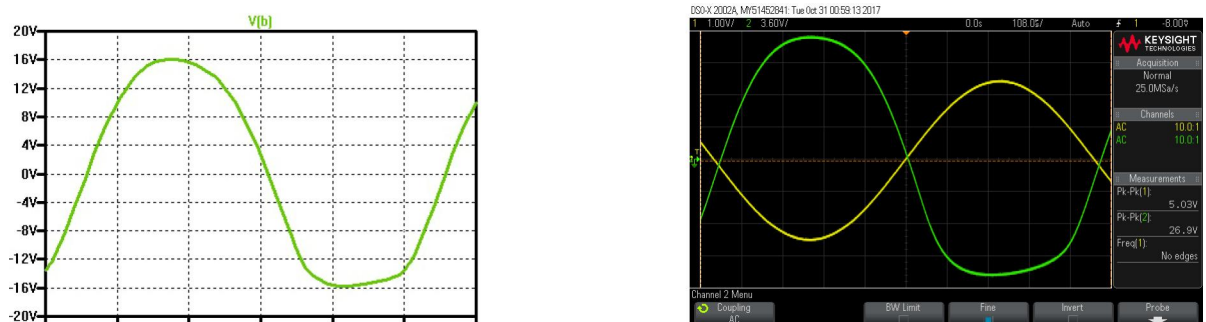
Kuva 4.6 Toisen lohkon simuloitu ja mitattu vaste.

Toisen lohkon simulaatiot ja mittaustulokset vastaavat toisiaan. Tarkastellaan vielä koko vahvistinkytkenän vastetta pisteessä B, mikä on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7 Vahvistimen simuloitu ja mitattu vaste toisen asteen jälkeen.

Tuloksista huomataan, että taajuuskäyttäytymiset vastaavat toisiaan, mutta vahvistus ei. Syy tähän voi olla epäideaalisuus, mutta myös virhe mittauksissa. Tarkastellaan vielä asteen transientti erillään muista yliajettuissa $5 V_{pp}$ sisäänmenolla.

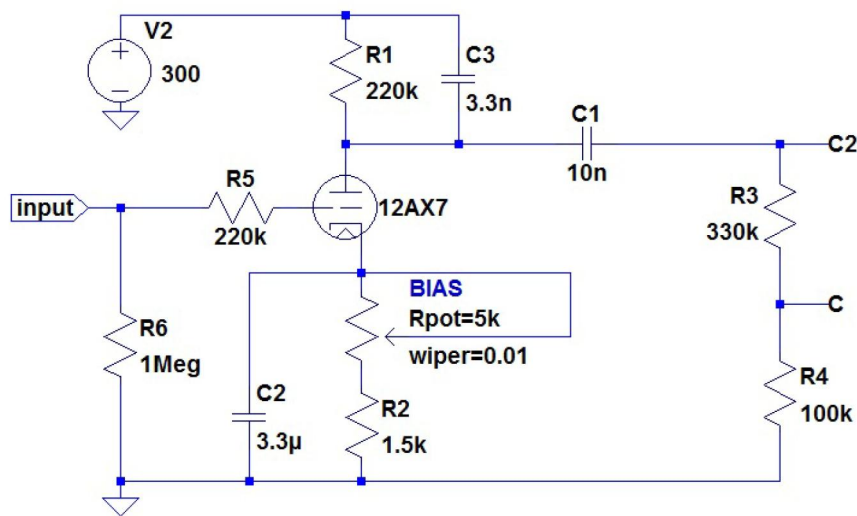


Kuva 4.8 Toisen lohkon ulostulo yliajettuna.

Kuvasta 4.8 nähdään, että aaltomuodot vastaavat lähes täysin toisiaan, suurimpana erona oikean kytkennän amplitudin jääminen hieman pienemmäksi. Aiemmin mainittu kondensaattori C3 lisättiin kytkentään vasta testausvaiheessa, sillä vahvistin kuulosti liian kirkkaalta.

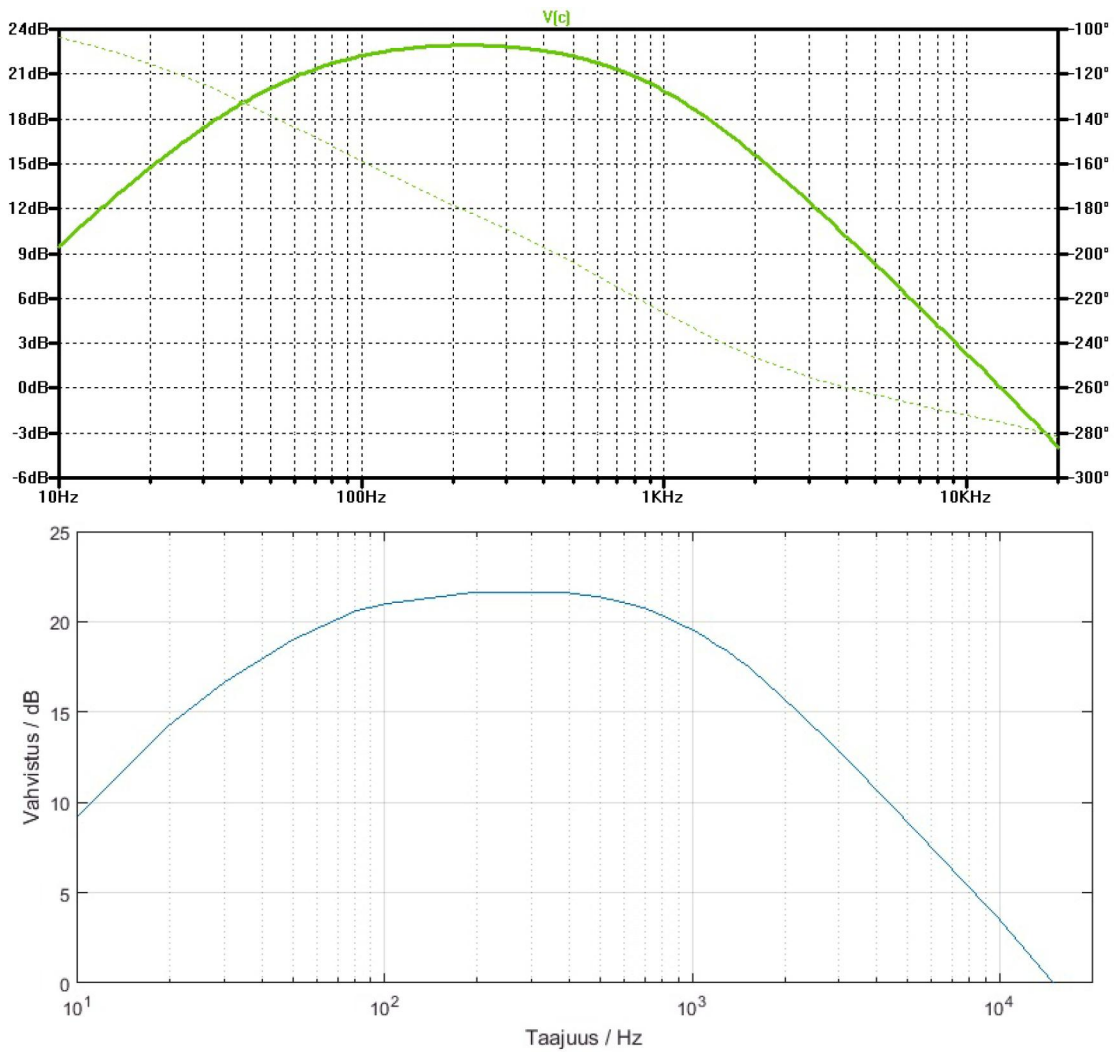
4.2.3 Kolmas lohko

Kuvan 4.9 mukaisen kolmanteen lohkon on sisällytetty hieman kokkilullinen ominaisuus, säädettävä toimintapiste. Toimintapistettä on mahdollista muuttaa välillä 1,11–2,29 V (simuloitu 1,14–2,32 V).



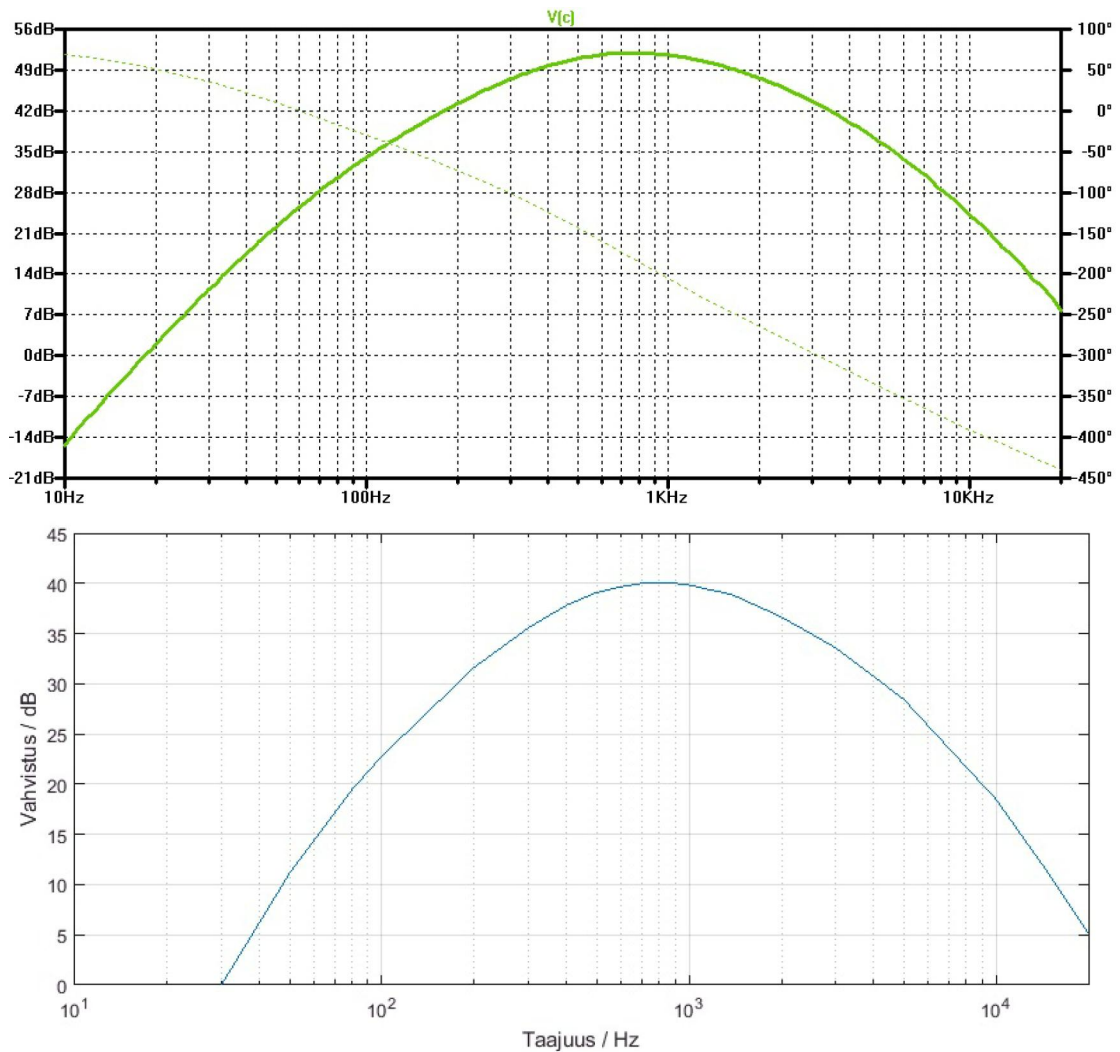
Kuva 4.9 Vahvistimen kolmas lohko.

Kolmas aste on biasoitu kylmemmäksi kuin muut ja matalia taajuuksia suodetaan vähemmän. Sen sijaan korkeita taajuuksia rajoitetaan huomattavasti suurella hilavastuksella ja ohituskondensaattorilla C3. Vaimennus ulostulossa on toteutettu vastuksilla R3 ja R4, ja vastus R6 on lisätty ylimääräisenä mittausta varten.



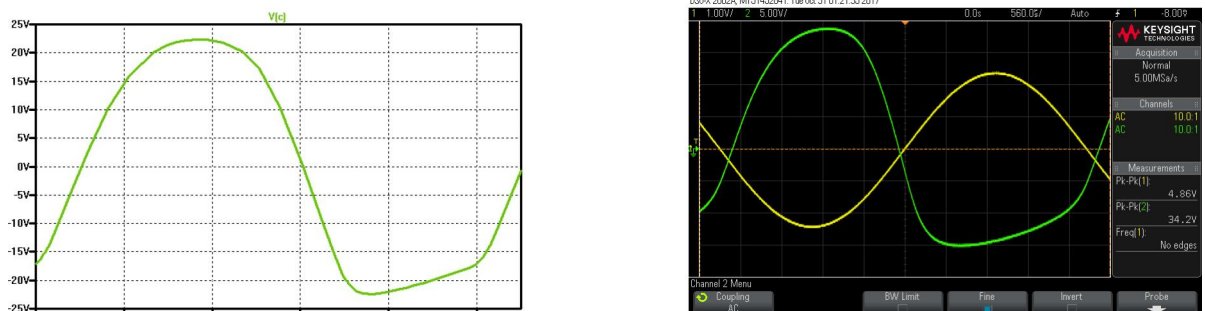
Kuva 4.10 Kolmannen lohkon simuloitu ja mitattu vaste bias-säädön ollessa asennossa 0 % (toimintapiste 1,11 V).

Kuvasta 4.10 nähdään, että saadut mittaustulokset vastaavat simuloituja täysin. Suurin vahvistus pisteessä C2 oli simulaatiossa 60,3 ja oikeassa kytkennässä 52,5. Mittausten perusteella bias-säädöllä ei myöskään ole suurta vaikutusta taajuusvasteeseen, mutta asteen korkein vahvistus pienenee arvoon 47,6.



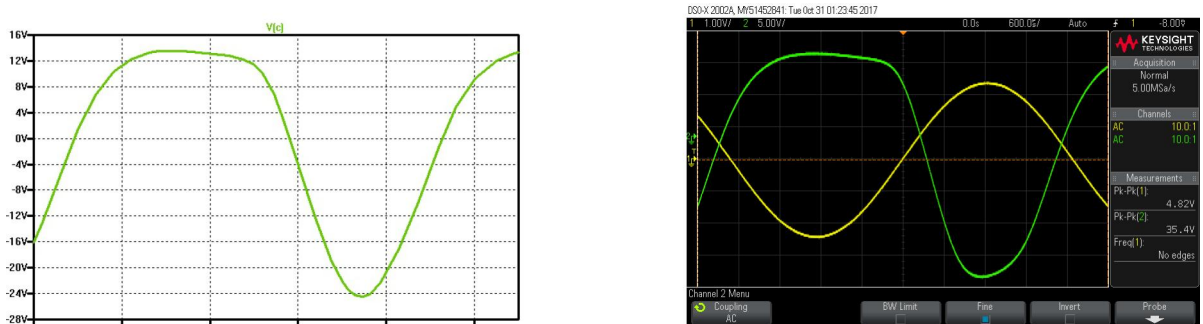
Kuva 4.11 Vahvistimen simuloitu ja mitattu vaste pisteessä C kolmannen lohkon jälkeen.

Kuvasta 4.11 nähdään kolmen ensimmäisen lohkon yhteisvaste. Tulokset eivät ole vertailukelpoisia vahvistuksen osalta johtuen mittauksen monimutkaisuudesta, mutta taajuuskäyttäytyminen on samanlaista sekä simulaatiossa että oikeassa kytkennässä. Tarkastellaan vielä signaalin transienttia astetta yliajettaessa.



Kuva 4.12 Kolmannen lohkon ulostulo yliajettuna bias-säädön ollessa asennossa 0 %.

Kuvan 4.12 aaltomuodoista nähdään, että simulaatio on hyvin lähellä oikean kytken käyttäytymistä. Suurin ero näkyy leikkaantumisen jyrkkyydessä; oikean kytken leikkaantuminen on hieman pehmeämpää kuin simulaatiossa.

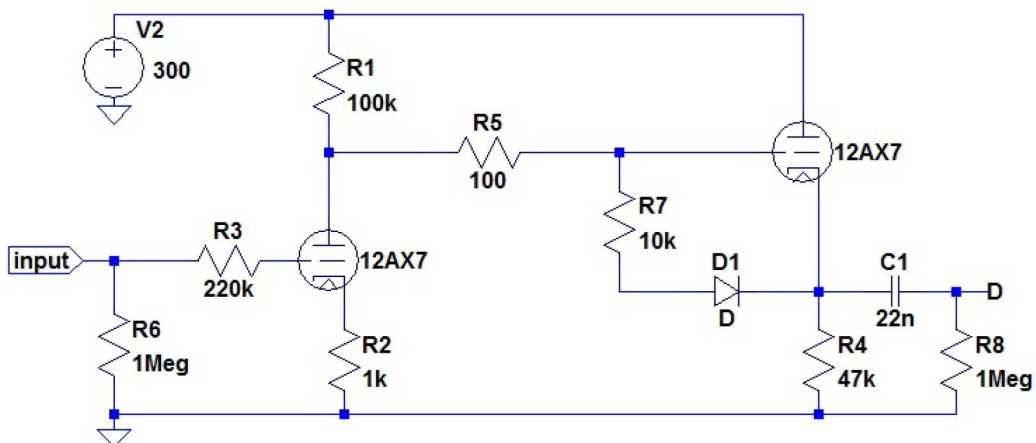


Kuva 4.13 Kolmannen lohkon ulostulo yliajettuna bias-säädön ollessa asennossa 100 %.

Bias-säätö toimii hyvin samankaltaisesti myös toisessa ääripäässä (kuva 4.13). Simulaatio vastaa lähes täysin mitattua ja erot ovat pieniä. Suurimmat syyt ovat todennäköisesti spice-mallissa käytetyn ja oikean komponentin eroavaisuudet, epäideaalisuudet ja virtalähteen suodatusratkaisun vaikutus anodijännitteeseen.

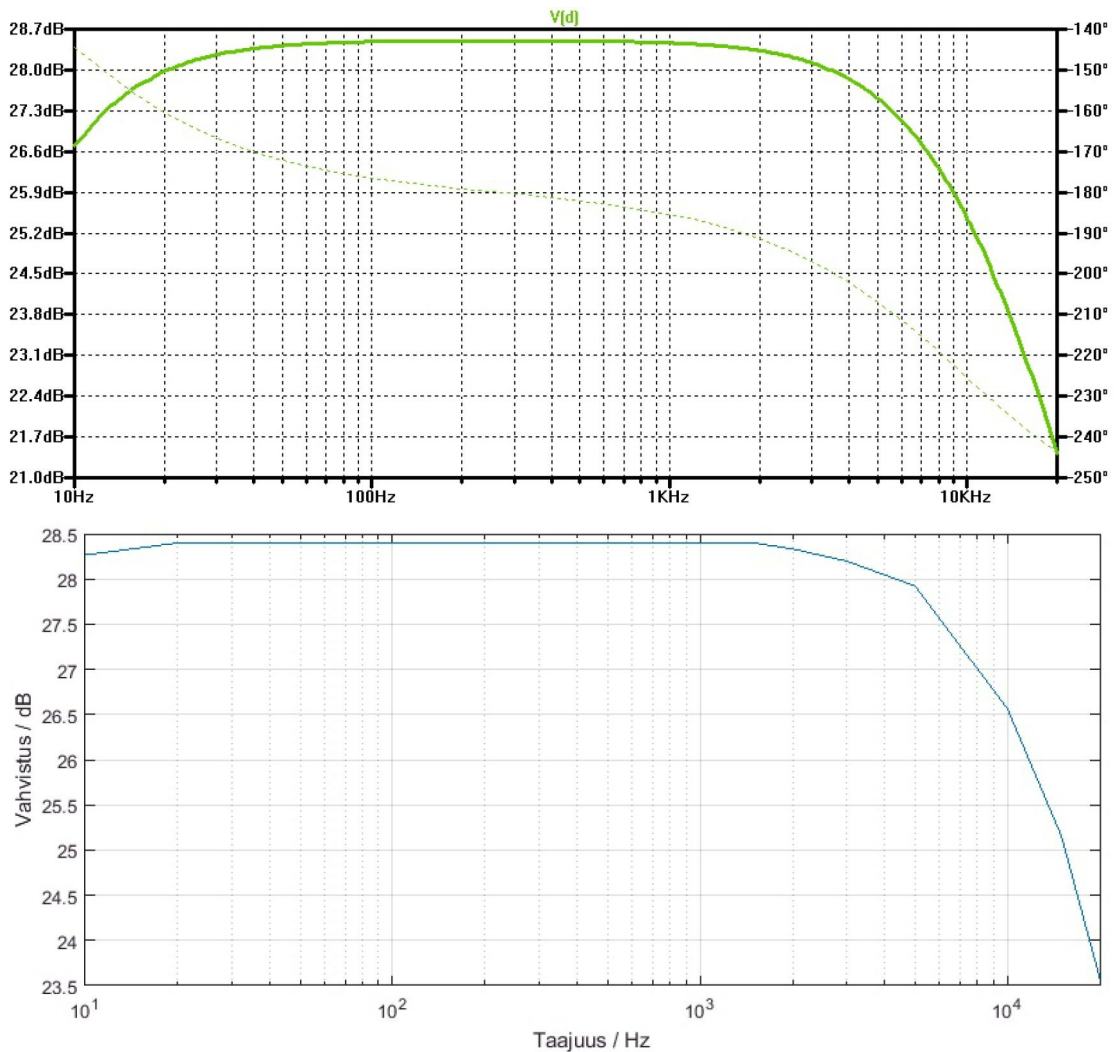
4.2.4 Neljäs lohko

Neljäs lohko koostuu kahdesta triodista ja eroaa aiemmista suuresti, sillä se on toteutettu katodiseuraajana. Ratkaisua käytetään monissa vahvistimissa, yleensä suurinpana syynä lohkoa seuraava passiivinen taajuuskorjain. Jotkut myös pitävät katodiseuraajan vaikutusta ääneen hyvänä.



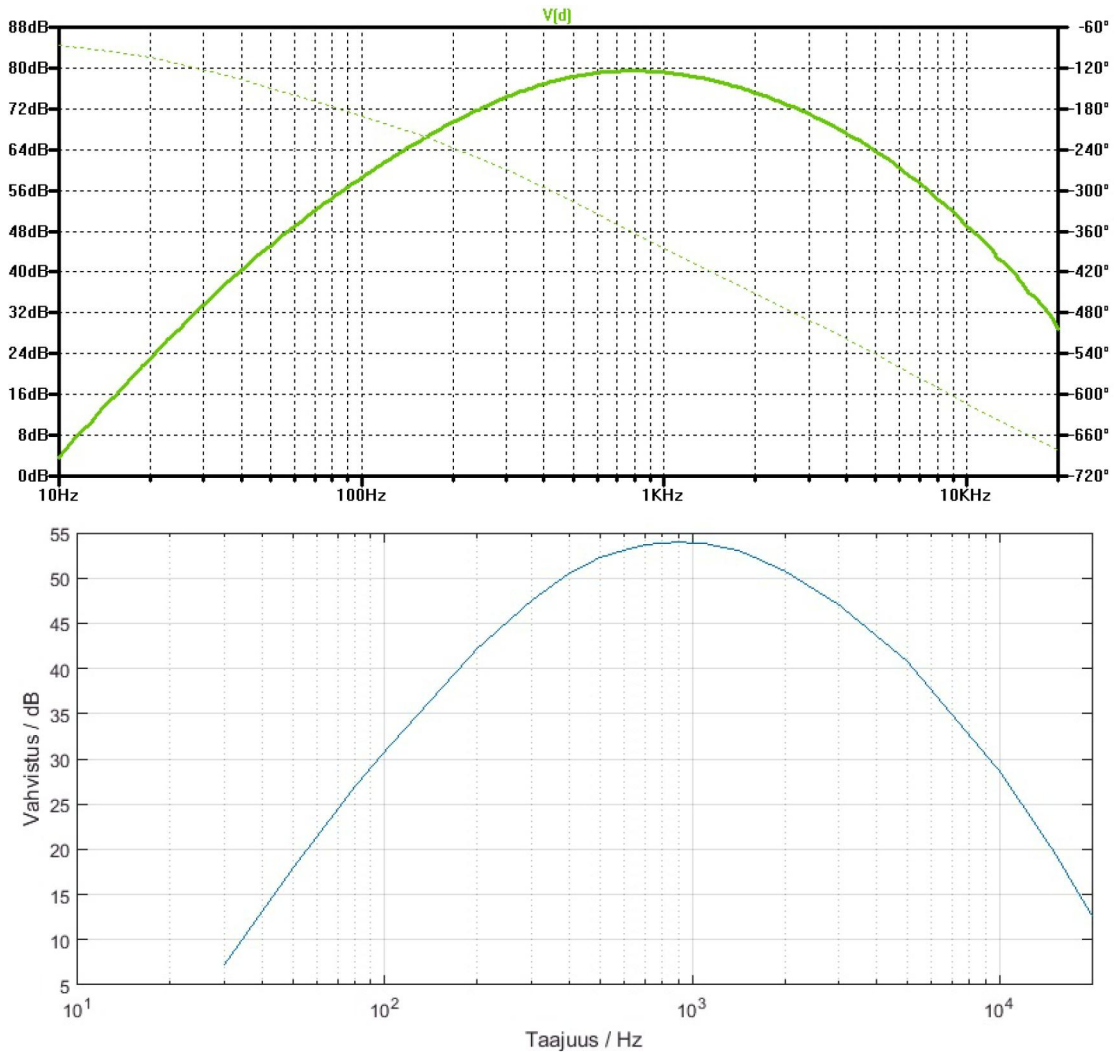
Kuva 4.14 Vahvistimen neljäs lohko.

Kuvassa 4.14 esitettyssä kytkennässä ensimmäinen triodi on lämpimäksi biasoitu, eikä sillä ole ohituskondensaattoreita. Vastus R7 toimii yhdessä diodin D1 kanssa suojaamaan toista triodia käynnistysvaiheessa, jolloin hila nousee välittömästi anodijännitteen tasolle katodin ollessa vielä maapotentiaalissa. Vastukset R6 ja R8 ovat ylimääräisiä apuvastuksia mittausta varten.



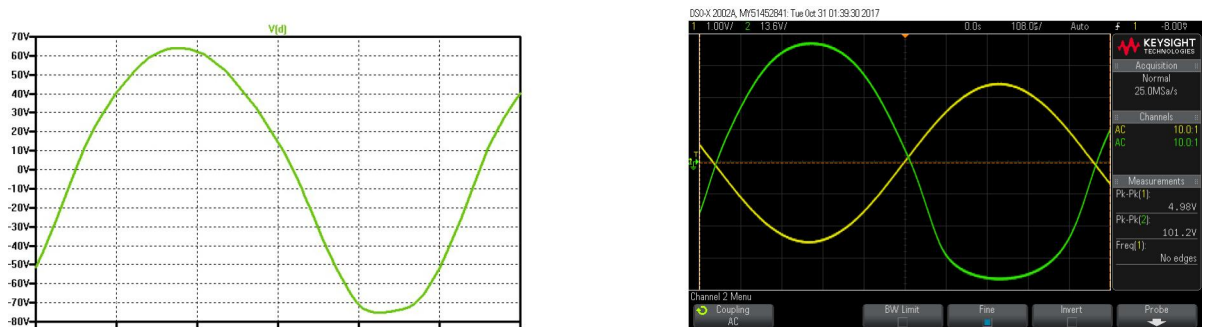
Kuva 4.15 Neljännen lohkon simuloitu ja mitattu vaste.

Kuvan 4.15 taajuusvasteista nähdään, että oikean kytkennän kaista on hieman leveämpi. Tämä johtuu todennäköisesti mittauksen epätarkkuuksista ja vasteita matalilla taajuuksilla on hankala verrata keskenään. Vasteista kuitenkin nähdään, että kytkentä suodattaa korkeita taajuuksia voimakkaasti ilman ylimääräisiä komponentteja, mikä tekee siitä hyvän valinnan edellisen kylmän asteen jatkoksi. Lohkon suurin vahvistus oli 26,6 simulaatiossa ja 26,3 oikeassa kytkennässä.



Kuva 4.16 Vahvistimen simuloitu ja mitattu vaste pisteessä D neljännen lohkon jälkeen.

Jälleen kerran kuvan 4.16 vahvistukset eivät ole vertailukelpoisia, mutta taajuuskäyttäytymiset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tarkastellaan vielä lohkon transienttia yliajettuissa.

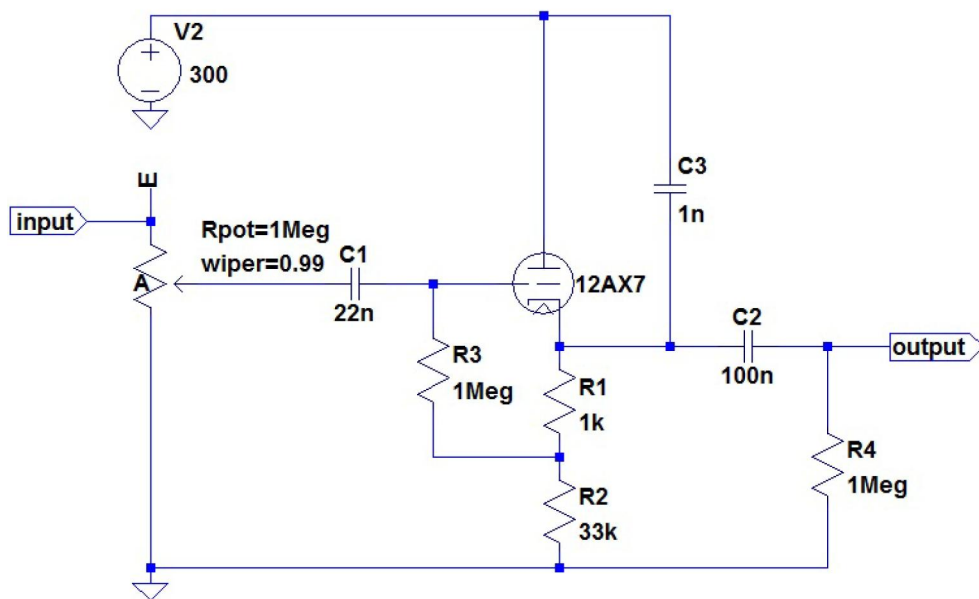


Kuva 4.17 Neljännen lohkon ulostulo yliajettuna.

Kuvan 4.17 aaltomuodot eroavat melko suuresti aikaisempiin lohkoihin verrattuna. Simulaatiossa signaalin leikkaantuminen on huomattavasti vähäisempää varsinkin negatiivisella puolijaksolla. Ero on niin suuri, että se johtuu todennäköisesti äärimilleen viedyn putken käyttäytymisestä verrattuna mallin ideaaliseen toimintaan.

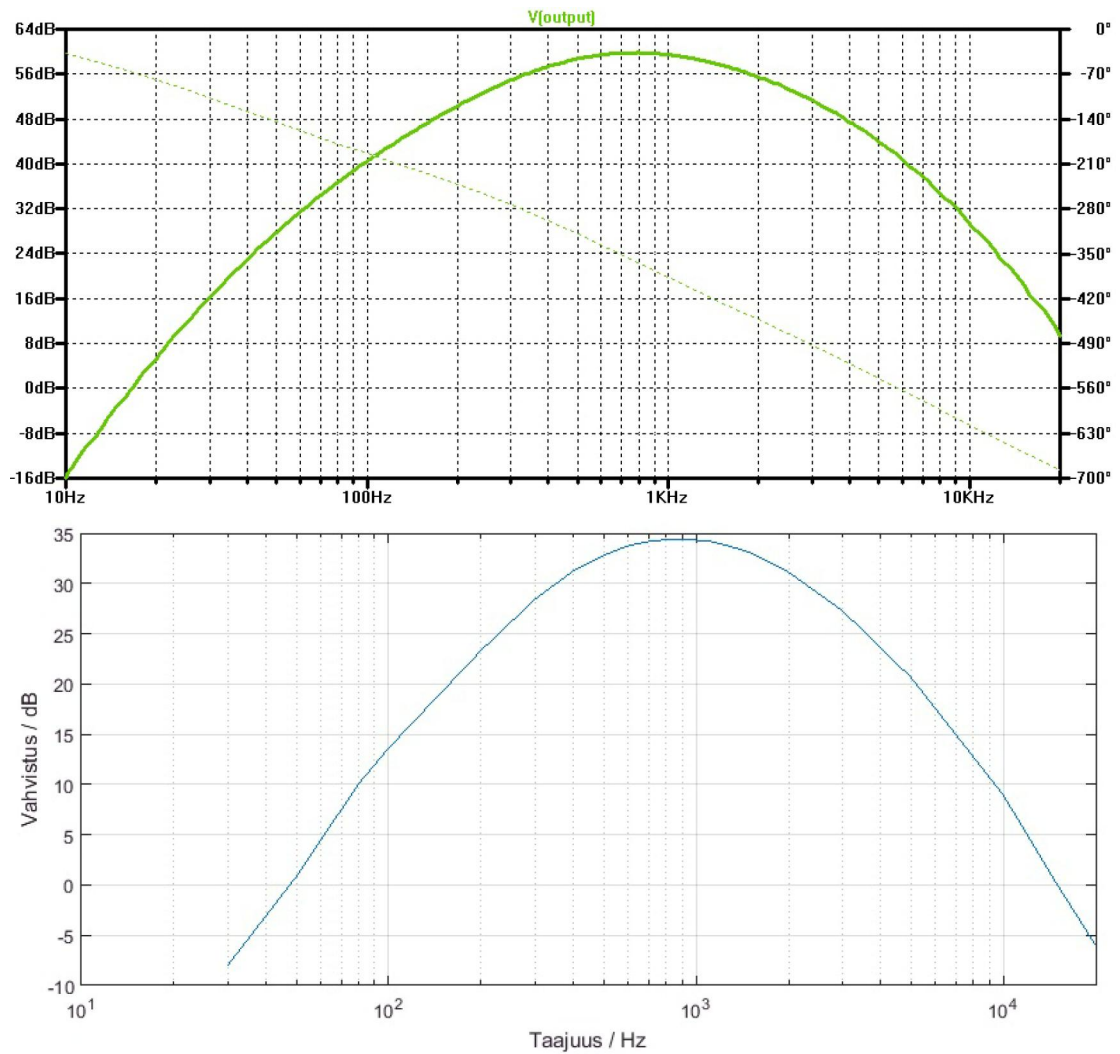
4.2.5 Ulostulolohko

Viimeinen lohko on kuvan 4.18 mukainen puskurina toimiva katodiscuraaaja. Lohkon kaista on laaja ja sen vahvistus on simulaatiossa 0,93 ja mitattuna 0,975.



Kuva 4.18 Vahvistimen ulostulopuskuri.

Taajuusvaste pysyi mittauksissa tasaisena 100 kHz:iin saakka, jonka jälkeen se alkoi tasaisesti pienentyä. Koska ulostulolohko toimii ainoastaan virtavahvistimena, ei sen kaistan rajoittaminen ole välttämätöntä. Kyseistä astetta ei myöskään yliajeta. Tarkastellaan koko kytkennän lopullista ulostuloa.



Kuva 4.19 Vahvistimen simuloitu ja mitattu vaste ulostulossa.

Kuva 4.19 osoittaa, että simuloitu vaste on hyvin lähellä oikean kytkennän vastetta. Keskitaaajuus ja jyrkkyydet ovat lähes samat, mutta vahvistus eroaa mittausteknisistä syistä. Verrataan kokonaisuuden ulostulon transientteja.



Kuva 4.20 Koko vahvistinkytkennän ulostulo sisäänmenon ollessa 500 mV_{pp}.

Kuvan 4.20 aaltomuodot ovat samankaltaisia, mutta eroavat suuresti negatiivisella puolijaksolla leikkautumisen osalta. Simuloidun aaltomuodon etureuna on täysin terävä, kun oikean kytkennän leikkaantuminen kyseisellä reunalla on pehmeää. Tämä ei sinällään ole yllättävää, sillä kyseessä on melko suuri kokonaisuus ja tekijöitä on monia. Erot saattavat johtua virheestä simulaation ja mittauksen välillä sekä mallissa käytetyn ja oikean komponentin erilaisuudesta.

5. YHTEENVETO

Projektin lopputuloksena syntyi audiolaitteen prototyyppi (kuva 5.1), joka on erittäin käyttökelpoinen ja toimii erinomaisena pohjana myös jatkokehitykselle modulaarisuutensa ansiosta. Kandidaatintyössä päästiin tavoitteeseen ja tulokset ovat hyödyllisiä ainakin työn tekijälle siksi, että työssä saatiin tietoa mallien toimivuudesta todellisessa suunnittelussa.



Kuva 5.1 Valmis prototyyppi.

Työssä käytetyt elektroniputkien SPICE-mallit olivat Norman Korenin alunperin 90-luvulla kehittämiä ja ne ovat myös lähes ainoat saatavilla olevat putkimallit. Malleista on eri versioita, mutta kaikkein tarkimmat mallit ovat käytännön kehitystyössä hankalia hitautensa vuoksi. Tuloksista kuitenkin nähdään, että mallit vastaavat riittävän tarkasti todellista käyttäytymistä jopa optimaaliselta alueelta poistuttaessa. Suunnittelutyössä hyödynnettiin myös mahdollisuutta ajaa äänitysdemoja suunnitteluohjelmassa, jolloin saadaan kuva oikean kytkennän ulostulosta.

Prototyypin rakennusvaihe oli myös tärkeä kehitystyön kannalta. Hyvä suunnittelu tekee rakentamisen helpommaksi, mutta kaikkia ratkaisuja ei voi täysin suunnitella ennen tiettyjen aikaisempien vaiheiden valmistumista. Muutoksia kytkentään tuli kuitenkin vähän ja mekaanisetkin ratkaisut olivat pääosin suunnitelman mukaiset. Tässä kandidaatintyössä yksi tärkeimmistä saavutetuista tavoitteista oli saada laaja-alainen tuotekehitysprojekti vietyä onnistuneesti loppuun.

LÄHTEET

- [1] M. Guarnieri. The age of vacuum tubes: Early devices and the rise of radio communications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(1):41–43, Apr. 2012.
- [2] S. Okamura. *History of Electron Tubes*. Omsha Ltd., Japan, 1994.
- [3] E. Barbour. The cool sound of tubes [vacuum tube musical applications]. *IEEE Spectrum*, 35(8):24–35, Aug. 1998.
- [4] Engineering and Technology History Wiki. Milestones: List of ieee milestones. Verkkosivu saatavissa: http://ethw.org/Milestones:List_of_IEEE_Milestones, 2016 (viitattu 9.10.2017).
- [5] L. D. Forest. Evolution of the vacuum tube. *Radio News*, 9(11):990, Aug. 1930.
- [6] M. Guarnieri. The age of vacuum tubes: The conquest of analog communications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(2):52–54, Jun. 2012.
- [7] M. Guarnieri. The age of vacuum tubes: Merging with digital computing. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(3):52–55, Sept. 2012.
- [8] J. Han and M. Meyyappan. Introducing the vacuum transistor: A device made of nothing. *IEEE Spectrum*, Jun. 2014.
- [9] E. M. Cherry and D. E. Hooper. *Amplifying Devices and Low-Pass Amplifier Design*. John Wiley & Sons, Inc., Yhdysvallat, 1968.
- [10] H. J. Reich. *Principles of Electron Tubes*. McGraw-Hill Book Company, Inc., Yhdysvallat, 1941.
- [11] J. Pakarinen and D. T. Yeh. A review of digital techniques for modeling vacuum-tube guitar amplifiers. *Computer music journal*, 33(2):85–100, 2009.
- [12] P. Taylor. Guitar preamp tone explained. *Tone Quest Report*, Mar. 2014.
- [13] J. L. Hood. *Valve and Transistor Audio Amplifiers*. Newnes, Yhdysvallat, 1997.
- [14] M. Blencowe. *Designing Valve Preamps for Guitar and Bass, Chapter 1: Fundamentals of Amplification*. Wcm Publishing, Britannia, 2016.
- [15] General Electric. 12ax7 twin triode - description and rating, julkaisuvuosi tuntematon.

LIITE A. KYTKENTÄKAAVIO

