

Max Viuho

KITARAEFEKTIN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Max Viuho: Kitaraefektin suunnittelu ja toteutus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Tässä työssä suunnitellaan ja toteutetaan efektipedaali käytettäväksi sekä kitaralle että bassolle. Kyseessä on ECF (*engl. envelope controlled filter*) eli verhoikäyraohjattu suodin, joka suodattaa soittimesta saatavaa signaalia sen amplitudiin perustuen. Laitteen toimintaan on mahdollista vaikuttaa ulkoisilla säätimillä, mikä antaa soittajalle instrumenttinsa tueksi laajasti erilaisia ääniefektejä pedaalin mahdollistamissa rajoissa.

Työ alkaa tutustumalla toteutettavan efektin toimintaan yleisesti sekä kytkennän lohkottamisella. Tämän jälkeen laitteessa käytettäviin aktiivikomponentteihin sekä näillä toteutettaviin kytkentöihin, joita hyödynnetään suunnitteluvaiheessa, tutustutaan hieman tarkemmin. Tästä siirrytään suunnittelun osuuteen, jossa käydään läpi laitteen kytkentöjä ja kuinka käytettyihin ratkaisuihin on päädytty. Tässä vaiheessa edetään lohko kerrallaan ja tarkastellaan lohkojen toimintaa teoriassa sekä simulaatioiden ja mittausten avulla.

Kytkenän lisäksi efektille suunniteltiin vielä piirilevy sekä kotelointi, ja lopuksi suunniteltu laite rakennettiin. Valmiin laitteen toimintaa testattiin sekä kitaralla että bassolla. Lopputuloksena syntyi toimiva ja käyttökelpoinen efektipedaali. Vaikka laite on kokonaisuudessaan onnistunut, on siinä kuitenkin vielä varaa jatkokehitykselle.

Avainsanat: envelope controlled filter, envelope filter, auto-wah, kitaraefekti, LM13700

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluan kiittää yliopistonlehtori Erja Sipilää työni ohjaamisesta.

Tampereella, 13.5.2021

Max Viuho

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. EFEKTIN TOIMINTA.....	2
3. KOMPONENTIT.....	4
3.1 Operaatiovahvistin	4
3.2 Operaatiotranskonduktanssivahvistin	5
4. KYTKENNÄN SUUNNITTELU	7
4.1 Puskuri ja päätevahvistin	7
4.2 Verhokäyräseurain	8
4.3 Suodin.....	11
5. RAKENTAMINEN JA TESTAUS	14
5.1 Piirilevy ja kotelointi.....	14
5.2 Testaus.....	15
6. YHTEENVETO.....	17
LÄHTEET	18

LIITE A: PIIRIKAAVIO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ECF engl. envelope controlled filter, verhoikäyraohjattu suodin
OTA engl. operational transconductance amplifier, operaatiotranskonduktanssivahvistin

A_V jännitevahvistus
 C kapasitanssi
 f_c suotimen rajataajuus
 g_m transkonduktanssi
 I virta
 I_B OTA:n biasointivirta
 Q hyvyysarvo
 R resistanssi
 V jännite

1. JOHDANTO

Ensimmäiset kaupalliset sähkökitarat julkaistiin 1930-luvulla. Äänen muuntaminen sähköiseksi signaaliksi mahdollisti äänen vahvistamisen ja muokkaamisen aivan uusilla tavoilla. Keksintö kasvattikin suosiotaan seuraavina vuosikymmeninä ja mullisti musiikki maailman luomalla kokonaisia uusia musiikkityylejä. [1]

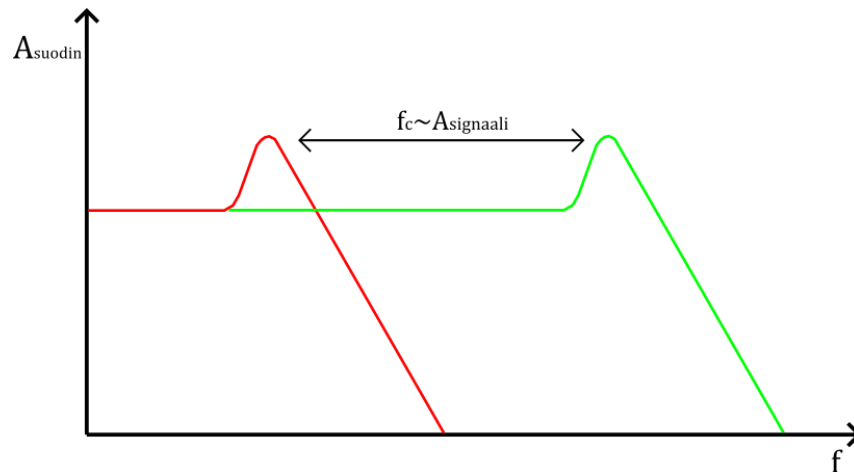
Kitaravahvistimet alkoivat 1950-luvulla sisältää erilaisia ääntä muokkaavia piirejä kuten kaiku- tai vibratoefektejä. Äänen muokkaamiseen oli saatavilla myös itsenäisiä yksiköitä, mutta ne olivat kalliita ja epäkäytännöllisiä. Muutoksen tähän toi transistorin keksiminen. Kompakti vaihtoehto elektroniputkille aloitti itsenäisten efektipedaalien yleistymisen 60-luvulta. Erilaisia efektityyppejä alettiin keksiä mitä erilaisimpia. Artistit alkoivat löytää näistä tavaramerkkisoundejaan, ja modulaarisuuden sekä helppokäyttöisyyden vuoksi efektipedaaleista tulikin suosittuja sekä ammattilaisten että harrastelijoiden keskuudessa. [1]

Tässä työssä suunnitellaan ja toteutetaan verhoikäyryohjattu suodin eli ECF-tyyppinen (*engl. envelope controlled filter*) efektipedaali käytettäväksi sekä kitaralle että bassolle. ECF on tullut tunnetuksi erityisesti funk- ja diskomusiikista, mutta se on löytänyt jalansijaa kuitenkin myös muun muassa rockmusiikista [2]. Idea työn aiheeseen on lähtenyt omalta pedaalilaudalta, josta löytyy samantyyppinen efekti. Tämän puutteista sekä heikosta toiminnasta syntyi ajatus oman pedaalin tekemiseen, joka huipentuu tähän kandidaatintyöhön.

Työssä esitellään aluksi laitteen toiminta yleisesti. Sen jälkeen tutustutaan laitteessa käytettäviin komponentteihin sekä kytkentöihin, josta siirrytään tarkastelemaan suunnitteluratkaisuja. Tätä seuraa rakentamisen osuus, jossa toteutetaan toimiva laite. Tämän jälkeen efektille tehdään vielä testauksia ja lopuksi kootaan yhteenveto työn onnistumisesta.

2. EFEKTIN TOIMINTA

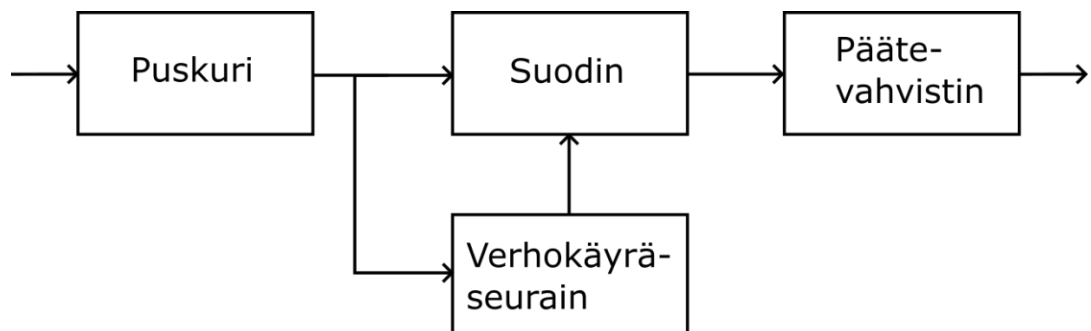
ECF suodattaa sisääntulosignaaliaan suotimella, jolla on resonanssi- ja rajoituspiikki rajataajuuden läheisyydessä. Rajoituspiikki riippuu signaalin amplitudista. Tätä on havainnollistettu kuvassa 1. Toisin sanoen resonoivaa suodinta pyyhkäistään sisääntulon yli. Tämä vahvistaa soitettavan instrumentin ylä-ääniä ajan funktiona ja tuottaa ”wau”- tai ”bwou”-äänien pyyhkäisy-suunnasta riippuen. [2][3, s.105–108]



Kuva 1. ECF:n toiminta. Suotimen rajoituspiikki on verrannollinen sisääntulon amplitudiin

Suodin voi olla ali-, yli- tai kaistanpäästötyyppinen. Varsinkin bassolla alipäästösuoitin on hyödyllinen sen säilyttäessä matalat taajuuksuudet. Olennaista suotimessa on resonanssi- ja rajoituspiikki, joka vaikuttaa efektin voimakkuuteen. [2]

Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen ECF:n ja tässä työssä toteutettavan efektin lohkokaavio. Ensiksi audiosignaali puskuroidaan ennen sen käsittelyä toiminnallisissa lohkoissa. Tämän jälkeen signaali suodatetaan ohjatulla suotimella. Lopuksi päätevahvistimella voidaan vielä tarvittaessa vahvistaa signaalia.



Kuva 2. ECF:n lohkokaavio, perustuu lähteeseen [2]

Puskurilta signaali jaetaan lisäksi verhoikäyräseuraimelle. Verhoikäyräseurain mukailee sisääntulon amplitudia ja tuottaa suotimelle ohjaussignaalin, jolla säädetään suotimen rajataajuutta. ECF on dynaaminen efekti, koska verhoikäyräseuraimen ulostulo riippuu sisääntulon amplitudista, eli soiton voimakkuus vaikuttaa efektin toimintaan. Tämä vaatii soittajalta sopeutumista laitteen käyttäytymiseen, mutta toisaalta taitava soittaja pystyy värittämään ääntään hyvinkin monipuolisesti. Lisäksi suotimen pyyhkäisyllä voi korostaa rytmiä, minkä takia efekti onkin tullut suosituksi muun muassa funk-musiikissa. [2]

Kuten edellä mainittiin, suotimen resonanssiipiikki vaikuttaa ECF:n tuottamaan ääniefektiin. Piikin ollessa laaja saadaan aikaan luonnollisempia efektejä, kun taas terävämällä piikillä saadaan efektistä synteettisemmän kuuloinen. Ääniefekti riippuu myös pyyhkäisyalueen sijainnista ja leveydestä sekä pyyhkäisyn nopeudesta. [2]

3. KOMPONENTIT

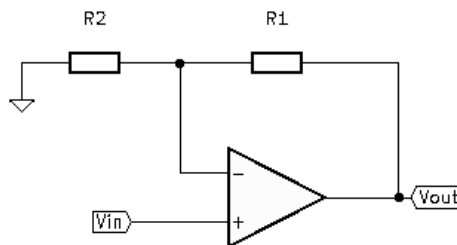
Tässä luvussa käsitellään laitteessa käytettävien aktiivikomponenttien, operaatiovahvistimen ja operaatiotranskonduktanssivahvistimen eli OTA:n (*engl. operational transconductance amplifier*) toimintaa ja kytkentöjä, joita sovelletaan suunnittelu- vaiheessa. Operaatiovahvistin on yksi elektroniikan laajimmin käytetyistä aktiivikomponenteista, jota käytetään tämänkin työn vahvistinkytkennöissä puskuri-, päätevahvistin- ja verhoikäyräseurainlohkoissa. OTA-vahvistimia hyödynnetään suodinlohkon suunnittelussa. OTA:t tarjoavat yhden mahdollisista toteutustavoista suotimen rajataajuuden ohjaukseen [2].

3.1 Operaatiovahvistin

Operaatiovahvistin antaa ulostulona jännitteen, joka on verrannollinen sen sisääntulojen jännitteiden erotukseen

$$V_{out} = A_v(V_+ - V_-), \quad (1)$$

missä V_+ ja V_- ovat sisääntulonapojen jännitteet ja A_v on jännitevahvistus. Ideaalisen operaatiovahvistimen vahvistuskerroin sekä sisääntuloresistanssit ovat äärettömiä ja ulostuloresistanssi on nolla. [4, s.278–280]



Kuva 3. Ei-invertoiva vahvistin

Kuvassa 3 on esitetty ei-invertoiva vahvistinkytkentä. Koska sisääntuloresistanssit ovat äärettömän suuria saadaan jännitteenjaolla yhtälö

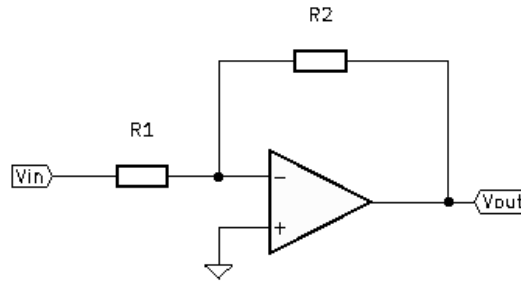
$$V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out}, \quad (2)$$

josta voidaan ratkaista kytkennän ulostulo

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_- = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{in}. \quad (3)$$

Koska ulostulo on äärellinen, täytyy sisääntulojen erotuksen olla nolla eli sisääntulot ovat samassa jännitteessä. Ei-invertoivan vahvistimen erityistapaus on jänniteseuraaja, jossa

ulostulo on kytketty suoraan invertoivaan sisääntuloon. Tällöin kytkennän vahvistus on 1. [4, s.281–282]



Kuva 4. Invertoiva vahvistin

Kuvassa 4 on esitetty toinen tyypillinen vahvistinkytkentä, invertoiva vahvistin. Ulostuloa voidaan lähteä ratkaisemaan Kirchoffin virtalailla. Invertoivan sisääntulon solmulle saadaan yhtälö

$$I_{R1} + I_{R2} = 0. \quad (4)$$

Invertoivan sisääntulon ollessa virtuaalisessa maassa, saadaan Ohmin lailla

$$\frac{V_{R1}}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2} = 0, \quad (5)$$

josta voidaan ratkaista ulostulo

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}. \quad (6)$$

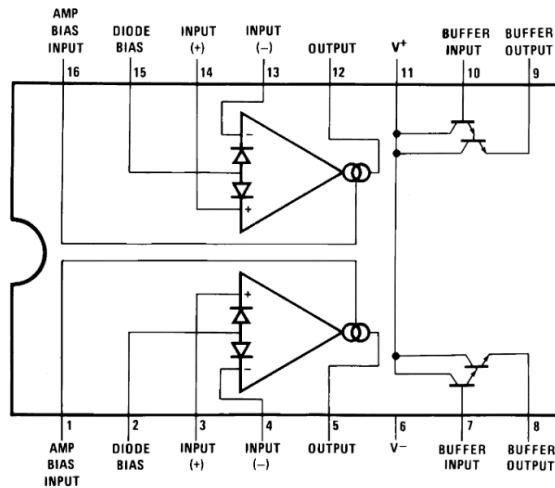
Ulostulo on siis vastakkaisessa vaiheessa sisääntuloon nähden.

3.2 Operaatiotranskonduktanssivahvistin

OTA on jänniteohjattu virtalähde, jonka ulostulovirta on verrannollinen transkonduktanssiin g_m

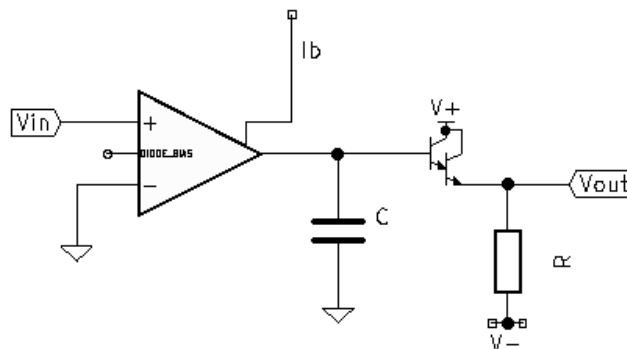
$$I_{out} = g_m(V_+ - V_-). \quad (7)$$

Ideaalisen OTA:n sisään- ja ulostuloresistanssit ovat äärettömän suuria. [5, s.27] Jännitesisääntulojen lisäksi OTA:lla on virtasisääntulo, jolla voidaan säätää transkonduktanssin arvoa. Biasointivirtaan I_B suoraan verrannollinen transkonduktanssi on huoneenlämmössä $g_m \approx 19,2 \times I_B$ [6, s.441–442]. Tämä ominaisuus tekee OTA:sta hyvin soveltuvan komponentin efektissä käytettävään suotimeen, joka vaatii ulkoista ohjausta.



Kuva 5. LM13700:n pinnitys [7]

Suotimen toteutuksessa käytetään kuvassa 5 esitettyä LM13700 OTA:a. LM13700 sisältää kaksi vahvistinta, joissa on biasointisisääntulon lisäksi vielä toinen virtasisääntulo vahvistimen lineaarisuuden parantamiseksi. Lisäksi samassa kotelossa on suuri-impedanssiset darlington-transistorit ulostulon puskuroimista varten. [7]



Kuva 6. OTA integraattorikytkentä, perustuu lähteeseen [8]

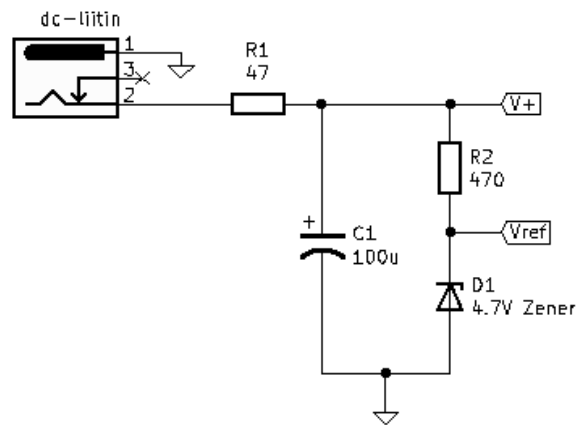
Kuvassa 6 on esitetty LM13700:lla toteutettu integraattorikytkentä, jota käytetään myöhemmin suotimen toteuttamiseen. Kaavasta 7 saadaan jännitteeksi kondensaattorin yli

$$V_C = \frac{g_m}{sC} V_{in}, \quad (8)$$

jos oletetaan darlington-transistorin sisääntuloimpedanssi suureksi. Darlington-parilla ja vastuksella R on muodostettu emitteriseuraaja puskuroimaan OTA:n ulostuloa. Emitteriseuraajan jännitevahvistus on lähes 1, joten vaihtosignaaliille $V_{out} \approx V_C$ [4, s.433].

4. KYTKENNÄN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käsitellään laitteen kytkentöjen suunnittelua. Kuvassa 2 esitetyt lohkot suunniteltiin aluksi yksitellen, jonka jälkeen niiden jokaisen toiminta simuloitiin. Simuloinnin jälkeen lohkot rakennettiin koekytkentälevylle niiden toiminnan todentamiseksi. Lopuksi lohkot yhdistettiin toisiinsa ja niiden toiminta testattiin kytkemällä kitara sisään-tuloon ja vahvistin ulostuloon. Tässä vaiheessa kytkentään tehtiin vielä suurehkojakin muutoksia ja piirustuspöydälle jouduttiin palaamaan vielä useaan kertaan, koska efektin toiminta ei kuulostanut hyvältä. Suunnittelu oli kuitenkin melko suoraviivaista lukuun ottamatta verhoikäyräseurainta, jolla olikin lohkoista selvästi suurin vaikutus laitteen tuottamaan ääniefektiin. Koko piirikaavio on esitetty liitteessä 1.



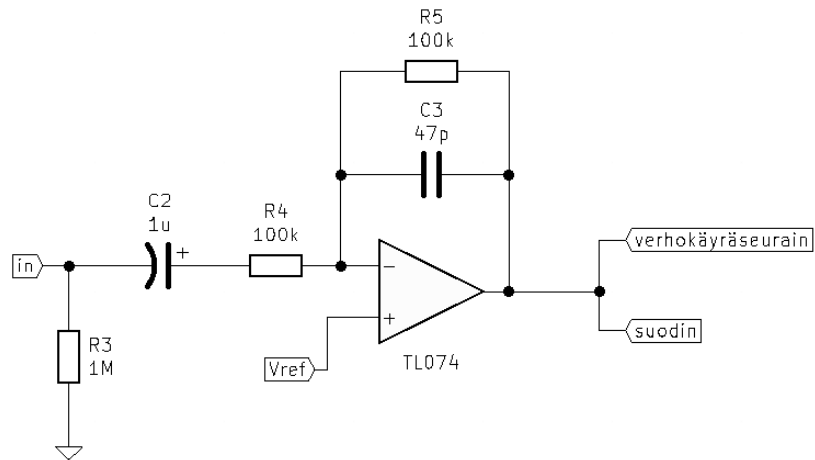
Kuva 7. Kytkennän käyttö- ja vertailujännitteet

Laite suunniteltiin käytettäväksi yksipuolisella 9 voltin tasajännitteellä mahdollistaen laitteen käytön useimmilla efektipedaaleille tarkoitetuilla jännitelähteillä. Kuvassa 7 on esitetty kytkentä laitteen käyttö- ja vertailujännitteiden tuottamiseen. Vastus R_1 ja kondensaattori C_1 suodattavat jännitelähteen kohinaa. Vastus R_2 ja zeneriodi puolestaan luovat vertailujännitteen vahvistinkytkennöille.

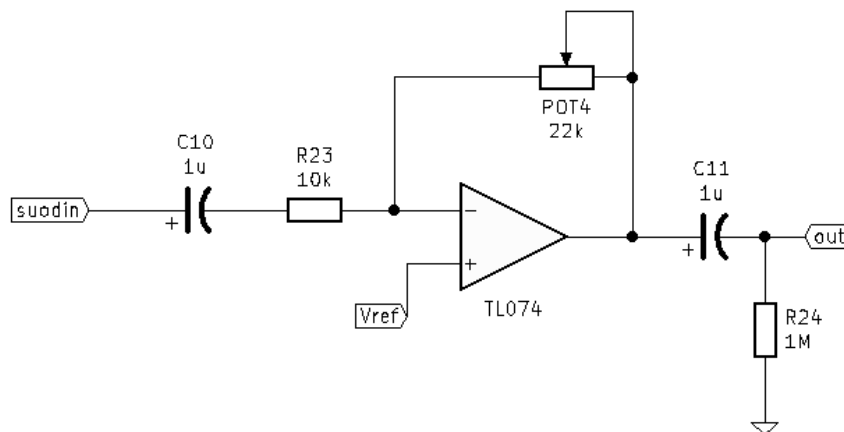
4.1 Puskuri ja päätevahvistin

Puskurin tehtävänä on puskuroida kitaramikrofonien heikkoa signaalia. Tämä on toteutettu kuvan 8 mukaisella invertoivalla operaatiovahvistinkytkennällä. Kytkennän päästökaistan vahvistus on kaavan 6 mukaisesti -1. Kondensaattori C_2 toimii erotuskondensaattorina samalla vaimentaen kaikkein matalimpia taajuuksia. Kondensaattori C_3 rajoittaa taajuuskaistaa kuuloalueen yläpuolella. Vastus R_3 asettaa sisääntulon tasa-

jännitetason maahan. Puskurissa sekä muissa operaatiovahvistinkytkennöissä on päädytty käyttämään TL074:ä, jolloin kaikki laitteen operaatiovahvistimet on saatu yhden komponentin sisään helpottaen piirilevysuunnittelua.



Kuva 8. Puskurikytkentä



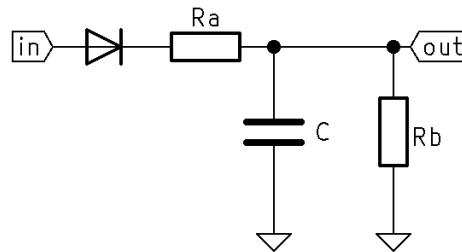
Kuva 9. Päätevahvistinkytkentä

Päätevahvistimen tarkoituksena on säätää suotimelta saatavan signaalin vahvistusta, jotta koko efektin ulostulon voimakkuus pystytään asettamaan sopivaksi. Kuvassa 9 esitetty päätevahvistin on puskurin tavoin toteutettu yksinkertaisella invertoivalla vahvistinkytkennällä, jonka vahvistusta voidaan säätää potentiometrillä POT_4 . Kuten puskurin sisääntulossa, on päätevahvistimen ulostulossa myös suuriresistanssinen vastus asettamassa tasajännitetason maahan. C_{10} ja C_{11} toimivat erotuskondensaattoreina.

4.2 Verhokäyräseurain

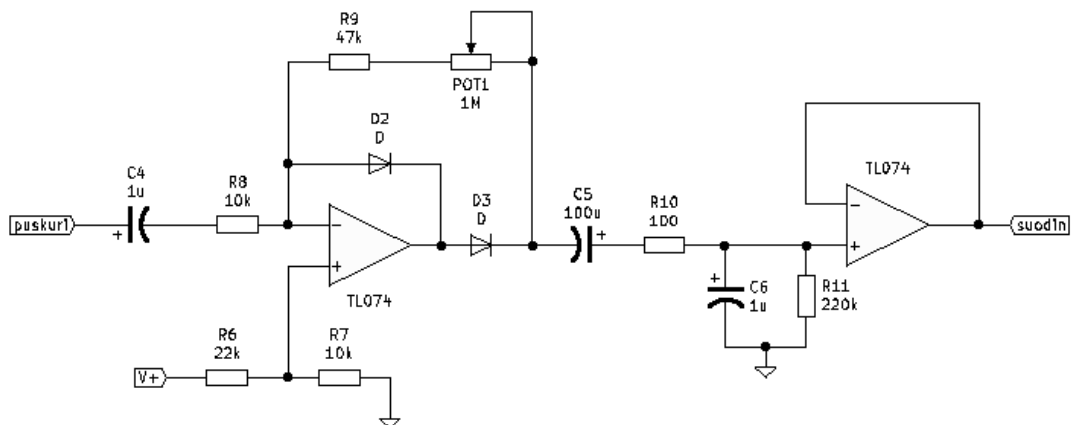
Verhokäyräseuraimen tehtävänä on mukaila sisääntulonsa amplitudia ja tuottaa tähän verrannollinen jänniteulostulo [3, s.146]. Kuvassa 10 on esitetty yksinkertainen verho-

käyräseurain. Sisääntulon ollessa positiivinen vastuksen R_a läpi kulkeva virta lataa kondensaattoria C . Sisääntulon ollessa puolestaan negatiivinen diodi on estosuunnassa ja kondensaattori purkautuu vastuksen R_b läpi. Ulostulon nousu- ja laskuajat ovat $\tau_{nousu} = R_a C$ ja $\tau_{lasku} = R_b C$ [3, s.149].



Kuva 10. Verhokäyräseurain, perustuu lähteeseen [3, s.148]

Kytkenän ongelmana on diodin epälineaarisuus, jonka vuoksi verhokäyräseurain alkaa toimimaan vasta, kun sisääntulosignaali on tarpeeksi suuri [9, s.176–177]. Tämä on korjattu kuvassa 11 esitettyssä toteutetussa kytkennässä, mikä on syntynyt koekytkentälevyllä suoritetujen testausten lopputuloksena.

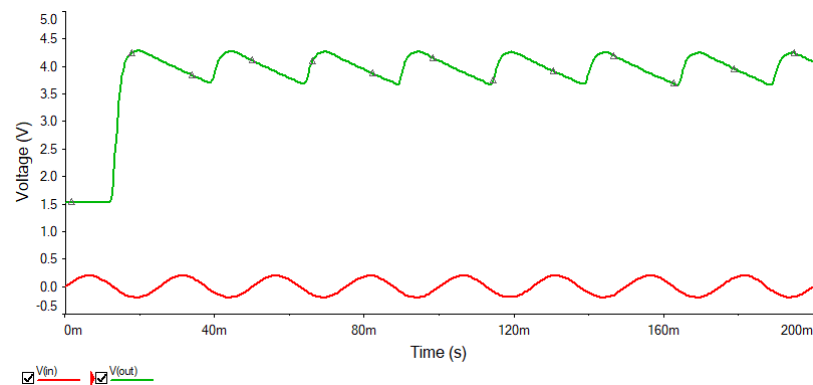


Kuva 11. Toteutettu verhokäyräseurain

Puskurilta tuleva sisääntulosignaali vahvistetaan ja tasasuunnataan invertoivalla operaatiovahvistinkytkennällä. Invertoivalla vahvistimella sekä diodeilla D_2 ja D_3 muodostettu kytkentä tasasuuntaa signaalin samalla kompensoiden diodien jännitehäviön [10]. Sisääntulon ollessa positiivinen diodi D_2 on myötäsuunnassa, jolloin operaatiovahvistimen vahvistus on suuri ja ulostulossa on sisääntuloa pienempi jännite. Tällöin diodi D_3 on estosuunnassa. Sisääntulon ollessa negatiivinen diodi D_2 on estosuunnassa, jolloin takaisinkytkennän vastus ja potentiometri asettavat vahvistuksen yhdessä vastuksen R_8 kanssa. Vastuksilla R_6 ja R_7 asetetaan operaatiovahvistimen ei-invertoivan sisääntulon jännitereferenssi matalaksi, jotta positiiviselle ulostulolle

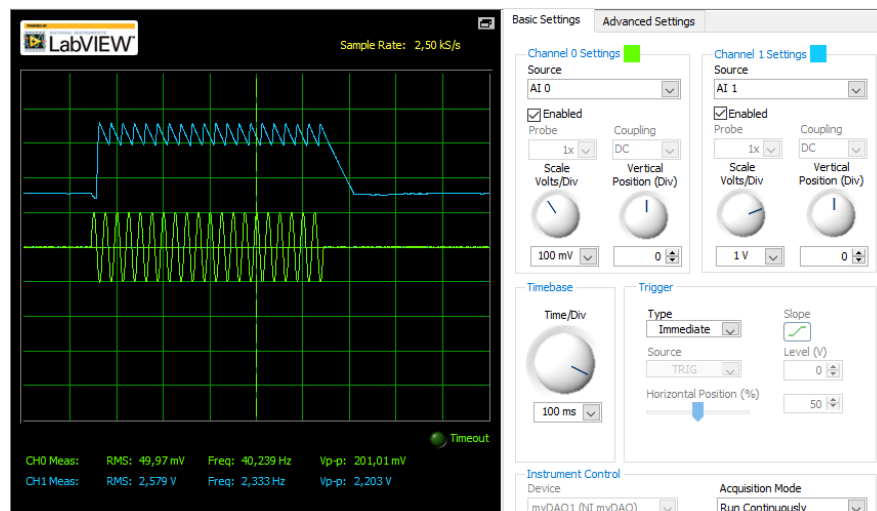
saadaan suurempi vaihteluväli. Kondensaattorit C_4 ja C_5 toimivat erotuskondensaattoreina. Lopuksi jänniteseuraaja puskuroi ulostulon.

Invertoivan operaatiovahvistinkytkennän vahvistusta ja verhoikäyräseuraimen ulostulon suuruutta on mahdollisuutta säätää potentiometrillä POT_1 . Käytännössä vahvistus vaikuttaa siihen, kuinka efekti vastaa käyttäjänsä soittamiseen: mitä suurempi vahvistus, sitä laajempi pyyhkäisyalue.



Kuva 12. Kytkennän simuloitu toiminta

Kytkenän toiminta simuloitiin sisääntulon taajuudella 40 Hz. Kuvassa 12 ulostulossa on näkyvissä rippeliä. Tämä on kuultavissa matalilla taajuuksilla amplitudin laskiessa. Vastusta R_{11} voisi suurentaa rippelin vähentämiseksi, mutta tällöin myös amplitudin laskun seuraaminen olisi hitaampaa. Kytkennän toimintaa tarkasteltiin myös oskilloskoopilla, mikä tuotti simuloinnin kaltaisia tuloksia. Kuvassa 13 on esitetty verhoikäyräseuraimen sisääntulo vihreällä ja ulostulo sinisellä käyrällä.



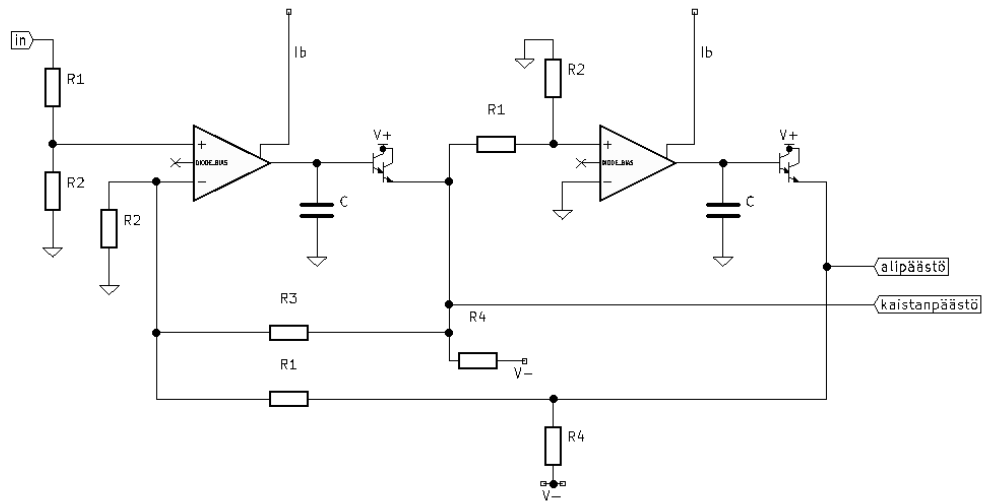
Kuva 13. Kytkennän mitattu toiminta

Verhoikäyräseuraimen toiminta vaikuttaa suuresti laitteen tuottamaan ääniefektiin. Tämän vuoksi komponenttien mitoitus tapahtui pitkälti kuuntelemalla kytkennän toimintaa

ja käyttämällä simulaattoria ja oskilloskooppia vain suuntaa antavina apuvälineinä. KytKentä vaati yllättävänkin tarkkaa hienosäätöä ennen kuin sen sai kuulostamaan hyvältä.

4.3 Suodin

Suotimen rajataajuuden tulee olla ohjattavissa verhoikäyräseuraimelta saatavalla jännitteellä. Lisäksi suotimen rajataajuuden lähetyvillä tulee olla resonanssiipiikki. Nämä ehdot täyttävä suodin on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. OTA-vahvistimilla toteutettu virtaohjattu suodin, perustuu lähteeseen [8]

KytKentä on toisen asteen suodin, joka koostuu kahdesta luvussa 3.2 esitellystä OTA-integraattorista. Kummankin OTA:n ulostulot on kytketty ensimmäisen invertoivaan sisääntuloon. KytKentä tuottaa kaksi eri suodatettua ulostuloa, kaistanpäästöulostulo ensimmäisen integraattorin ulostulosta ja alipäästöulostulo jälkimmäisen ulostulosta. Vasutukset R_1 ja R_2 toimivat jännitteenjakajina varmistaen, että sisääntulosignaalit ovat tarpeeksi pieniä taaten lineaarisen toiminnan. Jännitteenjakajien impedanssi on äärellinen, jonka vuoksi darlington-transistorit puskuroivat vahvistinten ulostuloja. Suotimen rajataajuus on

$$f_c = \frac{g_m}{2\pi C} \quad (9)$$

ja hyvyysarvo on

$$Q = \frac{R_3}{R_1} \cdot [8] \quad (10)$$

Kaavasta 9 huomataan, että rajataajuus on suoraan verrannollinen transkonduktanssiin. Kuten luvussa 3.2 todettiin, transkonduktanssi on verrannollinen biasointisisääntulon virtaan. Verhoikäyräseuraimen jänniteulostulo voidaan muuttaa virraksi yksinkertaisesti

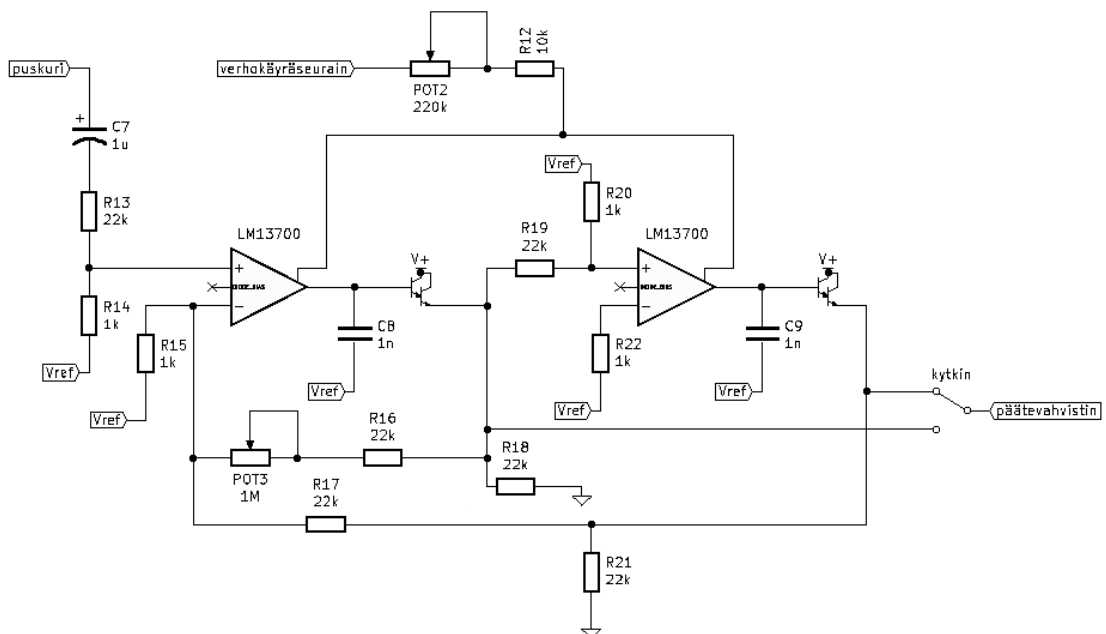
vastuksen avulla, jolloin suotimen rajataajuus riippuu koko efektiin sisääntulon amplitudista.

Hyvyyssarvo Q kuvaa resonanssiipiikin selektiivisyyttä ja on määritelty kaavalla

$$Q = \frac{f_c}{f_{ylempi} - f_{alempi}}, \quad (11)$$

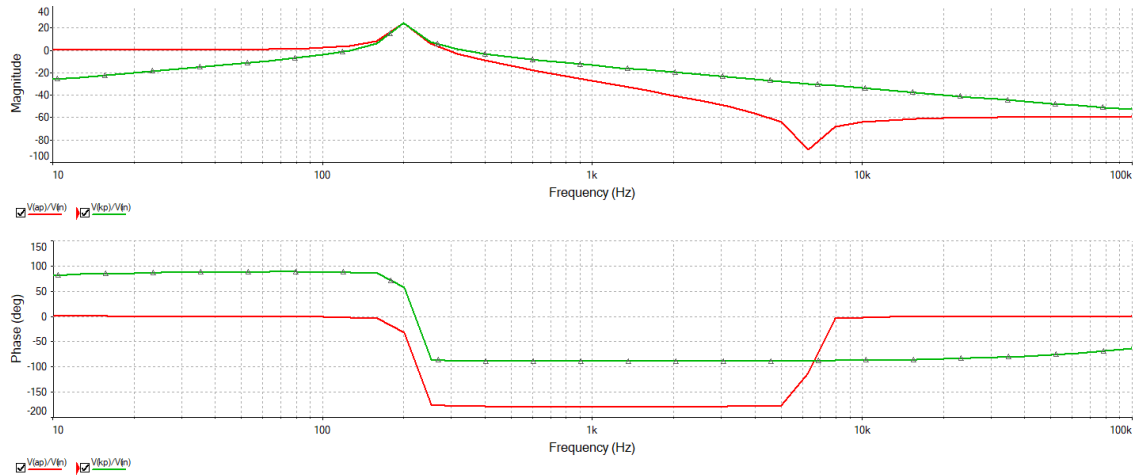
missä f_c on suotimen rajataajuus ja f_{ylempi} sekä f_{alempi} ovat taajuudet, joilla vahvistus on pudonnut -3dB maksimista [11, s.588–590]. Käytännössä hyvyyssarvon suuruus vaikuttaa efektiin voimakkuuteen ja tätä voidaan säätää kaavan 10 resistanssien arvoja muuttamalla vaikuttamatta rajataajuuteen. Matalalla hyvyyssarvolla efekti on luonnollisemman kuuloinen, kun taas korkealla hyvyyssarvolla efekti kuulostaa hyvin syntetisaattorimaiselta.

Kuvassa 15 on esitetty toteutettu suodinkytkeä, missä komponentit on mitoitettu sovelluskohteeseen sopiviksi. Kondenssaattori C_7 toimii erotuskondenssaattorina. Ulostuloon on lisätty kytkin, jolla voidaan valita joko ali- tai kaistanpäästöulostulo. Potentiometrin POT_2 läpi kulkeva virta muodostaa rajapinnan suotimen ja verhoikäyräseuraimen välille. Biasointivirtoja voidaan säätää kyseisellä potentiometrillä mahdollistaen suotimen pyyhkäisyalueen asettamisen halutulle taajuudelle. Potentiometrillä POT_3 voidaan puolestaan säätää suotimen hyvyyssarvoa. Nämä mahdollistavat yhdessä verhoikäyräseuraimen herkkyuden säätöön tarkoitetun potentiometrin avulla monipuoliset säätömahdollisuudet kytkennän tuottamaan efektiin.



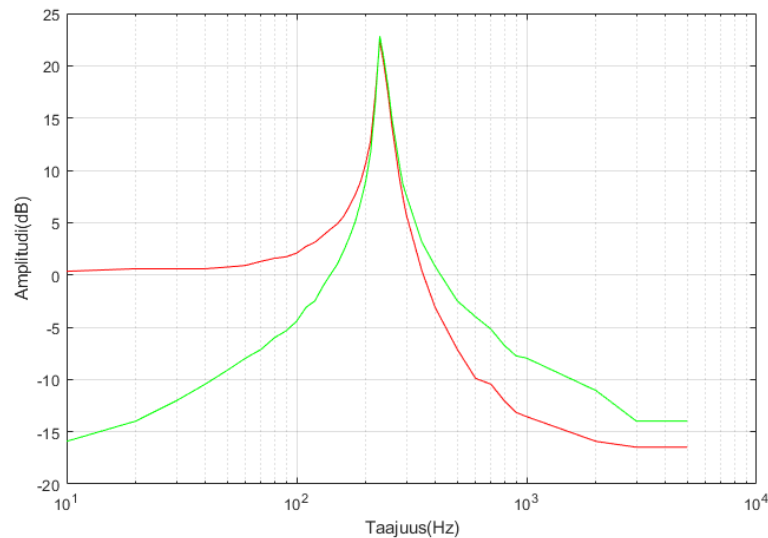
Kuva 15. Toteutettu suodinkytkeä

Kuvassa 16 on esitetty suotimen simuloitu taajuusvaste, kun $R_{POT3} = 1M\Omega$ ja $I_b = 3\mu A$. Rajataajuudella on noin 20 dB piikki. Hyvyyssarvoksi on mitattu noin $Q \approx 12$.



Kuva 16. Suotimen simuloitu taajuusvaste

Kytkenän amplitudivaste mitattiin samoilla virta- ja resistanssiarvoilla. Kuvassa 17 esitetty vaste vastaa hyvin lähelle simuloitua tulosta. Hyvyyssarvoksi on mitattu noin $Q \approx 14$.



Kuva 17. Suotimen mitattu amplitudivaste

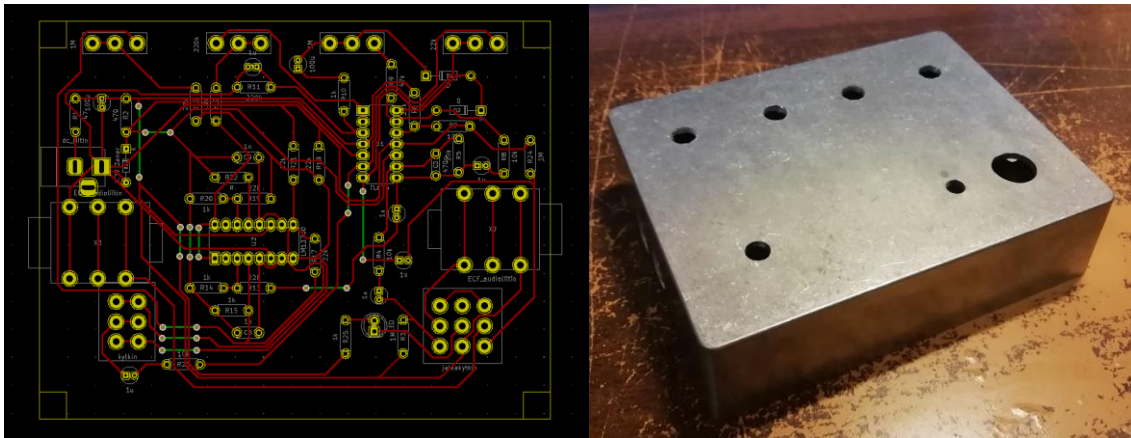
Kytkenä on myös esitetty LM13700:n datalehdellä, jota onkin hyödynnetty komponenttien mitoituksessa [7]. Suotimen suunnittelu oli kokonaisuudessaan melko suoraviivaista eikä hienosäädölle ollut tarvetta. Kytkenässä voisi hyödyntää myös LM13700:n lineaarisuutta parantavia virtasisäätuloja, mutta tätä ei nähty tarpeelliseksi.

5. RAKENTAMINEN JA TESTAUS

Tässä luvussa käsitellään työn rakentamisosuutta. Kytkennän suunnittelun ja koe-kytkentälevytestauksen jälkeen laitteelle suunniteltiin piirilevy sekä kotelointi. Lopuksi laitteelle tehtiin vielä aikaisempaa monipuolisempi testaus käytössä.

5.1 Piirilevy ja kotelointi

Laite suunniteltiin 120x95x30mm kokoiseen valualumiinikoteloon. Suunnittelun lähtökohdiksi otettiin ulkoisten rajapintojen käytännöllinen asettelu sekä johtimien vähyys. Koteloon tarvitsi saada neljä potentiometriä, audioliittimet sisään- ja ulostuloille, dc-liitin, vipukytkin eri suodintyyppien valintaan sekä jalkakytkin laitteen kytkemiseen ja led indikoimaan laitteen päälläoloa. Jalkakytkimen tuli sijaita etäällä potentiometreistä sekä vipukytkimestä, ettei näitä vahingossa kosketeta laitetta kytkettäessä. Käytännössä ulkoisten komponenttien sijoitteluun ei jäänyt näillä lähtökohdilla kovin montaa järkevää ratkaisua ja suunnittelu eteni suoraviivaisesti.



Kuva 18. Piirilevyn suunnittelua sekä kotelo

Seuraavaksi siirryttiin piirilevyn suunnitteluun. Kytkentä suunniteltiin yksipuoliselle piirilevyille, mikä tuotti haasteita johdinvetojen määrän vuoksi. Kaikki komponentit on liitetty suoraan piirilevyille lukuun ottamatta vipukytkintä, joka täytyi liittää johtimilla mataluutensa vuoksi. Kotelointi on tehty vaakasuuntaisesti sijoittaen potentiometrit ylälaitaan ja audioliittimet kotelon vastakkaisiin päätyihin. Vipu- ja jalkakytkin sijaitsevat alalaidassa. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty piirilevyn sekä kotelon suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheita.



Kuva 19. Piirilevy komponentteineen sekä valmis efektipedaali

Piirilevyn suunnittelun ja valmistamisen jälkeen komponentit juotettiin piirilevylle ja testattiin, että laite toimii suurin piirtein oikealla tavalla. Kotelolle annettiin hieman väriä pintaan ja piirilevy asennettiin koteloon. Loppusalaus tehtiin asentamalla potentiometreille kokonaisuuteen sopivat nupit.

5.2 Testaus

Koteloinnin jälkeen efektin toiminta varmistettiin ja laitetta testattiin tarkemmin sekä kitaralla että bassolla. Laite toimi aiemmin todetulla tavalla. Tässä vaiheessa kuitenkin ilmeni, että koekytkentälevyllä tehdyt testaukset jäivät hieman rajallisiksi eivätkä tuoneet esiin efektin kaikkia puolia. Pedaalista saa yllättävänkin monipuolisesti erilaisia ääniefektejä.

Efektissä on säätömahdollisuus kolmelle eri parametrille ulostulon voimakkuuden lisäksi. Säättämällä suotimen hyvyysarvoa saadaan joko hyvin synteettisen kuuloisia efektejä, tai vain pientä korostusta soittamisessa. Verhokäyräseuraimen herkkyyttä säättämällä voidaan hallita pyyhkäisyalueen leveyttä. Suotimen biasointivirtaa säättämällä voidaan puolestaan asettaa pyyhkäisyalue haluttuun kohtaan taajuusalueella. Lisäksi vipukytkimellä on vielä mahdollisuus valita suotimesta joko ali- tai kaistanpäästöulostulo.

Kokonaisuudessaan efekti toimii hyvin, mutta laitteessa on kuitenkin vielä kehityskohteita. Potentiometriensäätöalueet ovat turhan laajoja, jolloin väärin asetettuna laite ei anna ulostulona mitään. Tämän lisäksi efektin käyttäminen on melko hankalaa. Hyvän ääniefektin aikaansaamiseksi täytyy pyyhkäisyä säättäviä potentiometrejä säätää yhdessä ja melko tarkasti. Laite tuottaa omintakeisia ääniefektejä erityisesti signaaleille, jotka sisältävät useita vahvoja taajuuskomponentteja. Kun pedaaliin syötetään hieman

säröytynyttä signaalia, on ulostulo erityisen värikkään kuuloinen ja efekti korostunut suotimen pyyhkäistessä runsaiden ylä-äänien yli. Toisaalta säröefektin käyttäminen edellä kompressoitua soittimesta saatavaa signaalia rajoittaen suotimen pyyhkäisystä. Efektistä voitaisiin saada vielä mielenkiintoisemman säröttämällä signaalia juuri ennen suodinta. Tämä lisäisi suotimen sisääntuloon korkeampia taajuuksia kuitenkin mahdollistaen laajan pyyhkäisyn.

6. YHTEENVETO

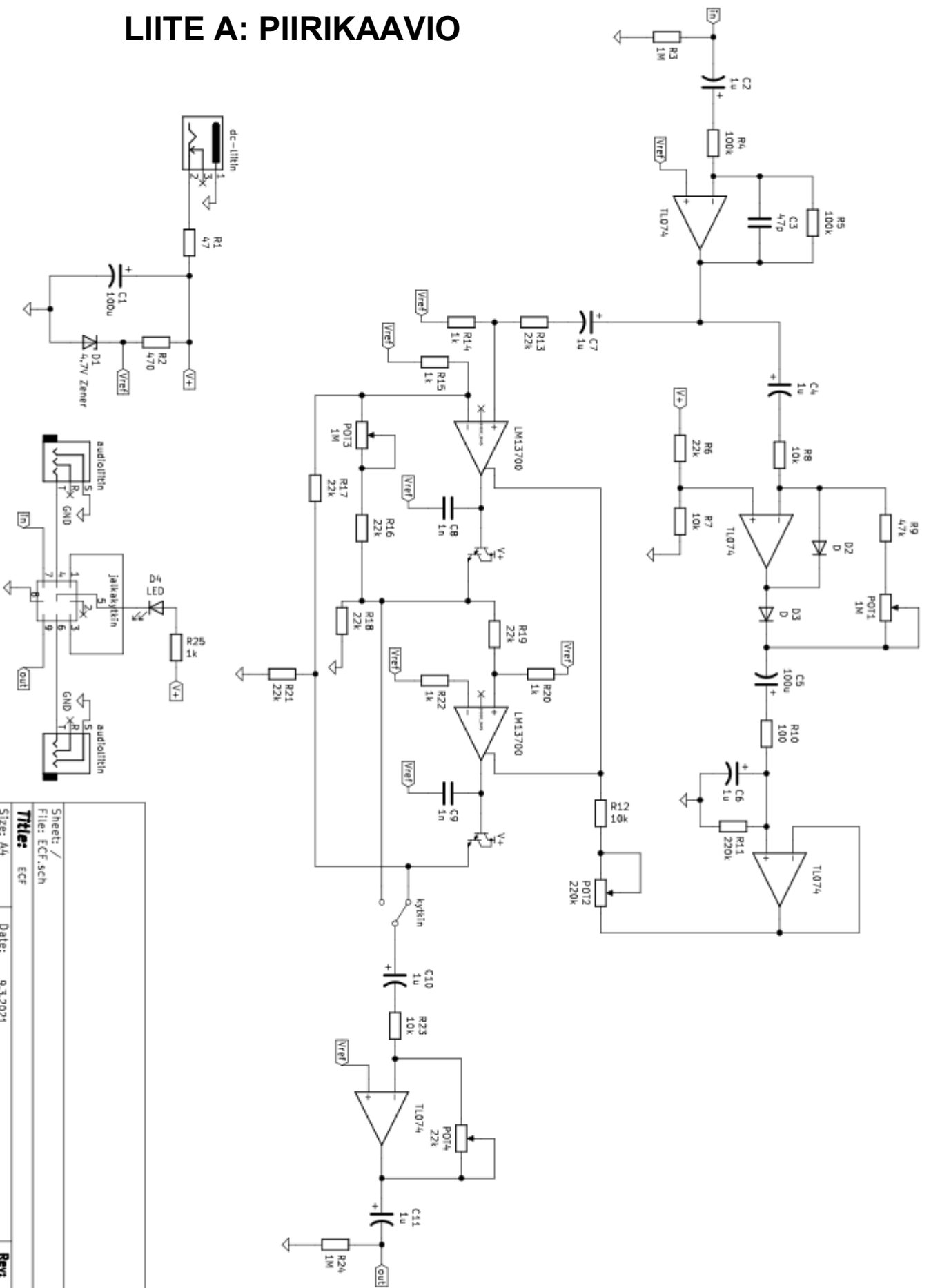
Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa ECF tyyppinen efektipedaali. Liikkeelle lähdettiin laitteen toiminnan teoriasta, josta siirryttiin yleisten kytkentöjen kautta efekti-piiriin suunnitteluun. Lopuksi suoritettiin vielä käytännöllisempi osuus laitteen rakentami-sen ja testaamisen parissa.

Efektia testattiin sekä kitaralla että bassolla. Laitte toimi odotetulla tavalla tuottaen halut-tua ääniefektia soittamiseen. Säätömahdollisuudet potentiometreillä antoivat käyttäjälle mahdollisuuden efektin tuottaman ulostulon muokkaamiseen tehden laitteesta moni-puolisemman. Lopputuloksena syntyi hyvinkin käyttökelpoinen laite, joka on toiminut hy-vin käytössä. Vaikka lopputulos on onnistunut, laitteessa on kuitenkin vielä varaa jatko-kehitykseen.

LÄHTEET

- [1] Grimes G., *How Guitar Pedals Work*, Saatavissa: <https://electronics.howstuffworks.com/gadgets/audio-music/guitar-pedal>, (Luettu 16.4.2021).
- [2] Hammer M., *The Technology of Auto-Wahs / Envelope-Controlled Filters*, Saatavissa: http://www.geofex.com/article_folders/ecfttech/ecfttech.htm, (Luettu 16.4.2021).
- [3] Reiss J.D., McPherson A.P., *Audio Effects: Theory, Implementation, and Application*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton Florida, 2015.
- [4] Storey N., *Electronics: A Systems Approach*, Harlow, 6th ed., United Kingdom, Pearson Education, Limited, 2017.
- [5] Uhrmann H., Kolm R., Zimmermann H., *Analog Filters in Nanometer CMOS*, 1st ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [6] Jung W.G., *IC op-amp Cookbook*, Howard W. Sams & Co., Inc, Indianapolis, 1975.
- [7] Texas Instruments Incorporated, *LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers With Linearizing Diodes and Buffers*, 2015, Saatavissa: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>, (Luettu 16.4.2021).
- [8] Malvar H., *Electronically tunable active filters with operational transconductance amplifiers*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.29(5), 05/1982, s.333–336
- [9] Carr J.J., *The Technician's Radio Receiver Handbook: Wireless and Telecommunication Technology*, Elsevier Science & Technology, Oxford, 2001.
- [10] Analog Devices, Inc., *Half Wave Rectifier*, 2012, Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-212.pdf>, (Luettu 16.4.2021).
- [11] Analog Devices, Inc., Zumbahlen H, *Linear Circuit Design Handbook*, 1st ed., Elsevier Science & Technology, Oxford, 2008.

LIITE A: PIIRIKAAVIO



Sneheeti /	
File: ECF.sch	
Title: ECF	
Size: A4	Date: 9.3.2021
KiCad E.O.A. KiCad (5.1.9)-1	
Rev:	
Id: 1/1	