

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka, elektroniikan koulutusohjelma

2018

Janne Hanhisuanto

# POLYFONISEN ANALOGISYNTETISAATTORIN SUUNNITTELU JA RAKENNUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tieto- ja viestintäteknikka | Elektroniikan koulutusohjelma

2018 | 61

Ohjaaja: Juha Nikkanen

Janne Hanhisuanto

## POLYFONISEN ANALOGISYNTETISAATTORIN SUUNNITTELU JA RAKENNUS

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli opiskella elektroniikan suunnittelua ja elektroniikan valmistusta rakentamalla 13-äänen polyfonialla varustettu analogisyntetisaattori. Aihealue sisältää keskeisiä elektroniikan suunnittelun osa-alueita: vahvistimia, suotimia ja oskillaattoreita.

Opinnäytetyön tavoite oli rakentaa analogisyntetisaattorin prototyyppi. Syntetisaattorin voi ajatella koostuvan erillisistä moduuleista. Parhaan mahdollisen lopputuloksen aikaansaamiseksi jokainen kytkentä on huolellisesti testattu ja äänenlaadulle asetettiin tavoitearvot.

Aluksi tutkittiin oskillaattorien teoriaa. Sen jälkeen oskillaattorikytkentöjä testattiin. Oskillaattoritestien perusteella suunniteltiin oskillaattorikortti. Seuraavaksi tutkittiin suotimien teoriaa ja testattiin suodinkytkentöjä. Näiden testien perusteella suunniteltiin suodinosio. Jänniteohjattu vahvistin testattiin ja suunniteltiin samaan aikaan koskettimiston kanssa. Viimeisenä tutkittiin ja testattiin summausvahvistin. Syntetisaattorin runko suunniteltiin viimeisenä, kun tarvittavan elektroniikan suunnittelu oli tehty.

Oskillaattoripiirit ja suodinpiiri yhdistettiin ja valmistettiin samalle piirilevyille. Muut kytkennät valmistettiin kukin erillisille piirilevyille. Koskettimisto ja runko rakennettiin. Toimiva prototyyppi valmistettiin. Koskettimistosta saatiin kosketusherkkä, ominaisuus joka ei ole yleinen analogisyntetisaattoreissa. Jokaisella nuotilla on itsenäisesti säädettäviä parametreja.

Tavoitteisiin päästiin. Monet käytännön ratkaisut ovat toimivia. Kuitenkin useat ratkaisut tehtäisiin toisin jatkossa.

ASIASANAT:

Analoginen syntetisaattori, oskillaattori, modulaarinen syntetisaattori

BACHELOR'S / ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in Information and Communication Technology | Electronics

2018 | 61

Instructor: Juha Nikkanen

Janne Hanhisuanto

## DESIGNING AND BUILDING A POLYPHONIC ANALOG SYNTHESIZER

The purpose of this thesis is to study electronic design by building a 13-voice polyphonic analogue synthesizer. The design of the synthesizer covers a broad range of major topics in electronic designs, including amplifiers, filter and oscillators.

The objective of this thesis was to design and build an analogue synthesizer from first principles. A synthesizer may be thought of as the integration of a number of discrete separate subsystems, all of which had to be revised and modified to produce the best effect in the finished synthesizer from a viewpoint of user control and sound quality.

After a study of various voltage controlled oscillator designs, an oscillator was developed and tested. The oscillator design was perfected and a voltage controlled filter was designed. The voltage controlled amplifier was tested and designed same time with the keyboard. Last circuit that was tested and designed was a summing amplifier.

The design of the oscillators was perfected by incorporating them with a filter on the same common PCB. The design of the voltage controlled amplifier was perfected by incorporating it with a summing amplifier on the same common PCB. The keyboard associated circuits were added last. Keyboard and the case were built. A working prototype was built.

A finalized 13 voice synthesizer design was completed which used a novel touch sensitive keyboard, resulting in more dynamic playability. Each voice of the synthesizer was designed to have a user adjustable parameters, a feature which is not found in other contemporary analogue synthesizers.

### KEYWORDS:

Analog synthesizer, Modular synthesizer, subtractive synthesis

## ALKUSANAT

Opinnäytetyö sai alkunsa talvella 2015. Idea polyfonisesta analogisyntetisaattorista opinnäytetyönä alkoi kiehtoa siinä määrin, että ajatus laitettiin toteutukseen keväällä 2015. Aihepiiristä on runsaasti kirjallisuutta ja joistain kaupallisista syntetisaattoreista on olemassa internetissä valmiita kytkentäkaavioita. Mitä enemmän aihetta tutkin, sitä enemmän kysymyksiä heräsi. Aihe on laaja. Alue tulisi rajata jollain tavalla. Pitäisi määritellä, mitä ominaisuuksia prototyyppiin halutaan.

Alkoi lähes kolmen vuoden mittainen tutkimus, - kehitys, - ja rakennusprojekti, jossa osat alueet menivät useasti ristiin. Pääteemaksi muodostui elektroniikan kytkennät ja niiden testaaminen. Testauksen jälkeen alkoi piirilevyn suunnittelu ja rakentaminen. Sama prosessi toistui useasti opinnäytetyön aikana. Toimiva prototyyppi valmistui myöhään syksyllä 2017.

Kiitän isääni Ari Hanhisuantoa, jonka tieto ja osaaminen elektroniikan ja mekaniikan parissa on ollut suureksi avuksi lopputyötä tehdessä. Kiitän myös veljeäni Juha Hanhisuantoa, joka auttoi mekaniikan rakennuksessa.

Kiitos myös Turun AMK:n Joukahaisenkadun toimipisteen henkilökunnalle, jolta sain usein vastauksia kysymyksiini. Kiitän erityisesti opettaja Juha Heleniuksen matematiikan opetusta, joka avasi kyvyn lähestyä vaikeitakin ongelmia lohkoittain, pala palalta. Kiitän myös ystävääni Dave Francista. Hänen innokkuus modulaaristen syntetisaattorien parissa on mukaansa tempaavaa.

Lopuksi haluan kiittää vaimoani, Marika Hanhisuantoa. Hänen tuki ja rakkaus ovat olleet voimavara lopputyötä tehdessä.

Janne Hanhisuanto, Turussa 22.1.2018

# SISÄLTÖ

## ALKUSANAT

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 TEKNISET OMINAISUUDET</b>	<b>10</b>
<b>3 ANALOGISYNTETISAATTORIN YLEISIÄ KÄSITTEITÄ</b>	<b>11</b>
3.1 Modulaarisuus	11
3.1.1 Oskillaattorit	12
3.1.2 Suotimet	12
3.1.3 Jänniteohjattu vahvistin	12
3.1.4 Matalataajuusoskillaattori	13
<b>4 SUUNNITTELU</b>	<b>14</b>
4.1 SYNA:n mekaaninen rakenne	15
4.1.1 Runko	15
4.1.2 Koskettimet	15
4.1.3 Hallintapaneeli	16
4.2 Elektroniikka	17
4.2.1 Oskillaattorit	19
4.2.2 Siniaalto	20
4.2.3 Kolmioaalto	21
4.2.4 Kanttiaalto	23
4.2.5 Sahalaita-aalto	24
4.2.6 Pulssiaalto	26
4.2.7. PWM	28
4.2.8 Välivahvistin ennen suodinpiiriä	29
4.3 Suodinpiiri	30
4.3.1 Tilaa muuttava suodin	30
4.3.2 Suotimen estokaistan matalataajuusoskillaattori ohjaus	32
4.4 Matalataajuusoskillaattorit	32
4.5 Kiihtyvyyssanturin käyttö jänniteohjaimena	34
4.6 Jänniteohjattu vahvistin	35

4.7 Summauspiiri	37
4.8 Teholähde	37
4.9 Komponenteista	38
<b>5 RAKENNUS</b>	<b>39</b>
5.1 Elektroniikka	39
5.1.1 Oskillaattori- ja suodinpiirilevy	39
5.1.2 Vahvistin ja summauspiirilevy	40
5.1.3 Kiihtyvyyssanturipiirilevy	40
5.1.4 Teholähde	41
5.2 Kotelon rakennus	41
5.2.1 Runko	41
5.2.2 Koskettimet	42
5.2.3 Grafiikka	42
5.2.4 Hallintapaneeli	43
5.2.5 Johdotus	44
<b>6 VALMIIN ELEKTRONIIKAN TESTAUS</b>	<b>45</b>
6.1 Elektroniikka	45
6.1.1 Oskillaattorit	45
6.1.2 Suodin	51
6.1.3 Jänniteohjattu vahvistin	53
6.1.4 Summauspiiri	55
6.1.5 Jännitelähde	56
6.2 Koskettimet	56
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>57</b>
<b>LÄHTEET</b>	

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

ADSR	Attack, Decay, Sustain, Release. Ramp-pigeneraattorin vakiintunut nimitys syntetisaattoreissa.
AGC	Automatic Gain Control. Kompessori, signaalin automaattinen amplitudin ohjaus.
BW	Bandwidth. Kaistanleveys.
CV/gate	Control Voltage gate. Ohjaujänniteportti.
dBFS	Desibels relative to full scale. Amplitudin mittauksen yksikkö digitaalisessa ympäristössä.
FET	Field Effect Transistor. Kanavatransistori.
Forte	Musiikkitermi: soita voimakkaasti.
LFO	Low Frequency Oscillator. Matalataajuusoskillaattori.
Pianissimo	Musiikkitermi: soita hyvin hiljaa.
Polyfoninen	Moniääninen.
PWM	Pulse Width Modulation. Pulssisuhteen modulaatio.
Q	Hyvyysluku.
SYNA	Tässä opinnäytetyössä valmistetun syntetisaattorin nimi.
THD	Total Harmonic Distortion. Harmoninen kokonaissärö.
Tremolo	Signaalin amplitudin toistuva muutos.

Vibrato	Signaalin taajuuden toistuva muutos.
VCA	Voltage controlled amplifier. Jänniteohjattu vahvistin.
VCR	Voltage controlled resistor. Jänniteohjattu vastus.
VST	Virtuaalinen studio teknologia.



# 1 JOHDANTO

Analogisia syntetisaattoreita on kehitetty 1800-luvun loppupuolelta tähän päivään saakka. Analogisyntetisaattorin kulta-aikaa voitaneen pitää 1970-lukua, jolloin Robert Moogin kehittämä syntetisaattori nousi suosioon pop, - ja rockmuusikkojen parissa. [23]

Digitaalinen syntetisaattori nousi suosioon 1970-1980 luvun taitteessa, syrjäyttäen analogisyntetisaattorin musiikkialalla. Analogisia mallintavia digitaalisia syntetisaattoreita on ollut markkinoilla 1990-luvulta. Nykyisin VST-teknologialla toteutetut syntetisaattorit ovat suosiossa alan toimijoiden parissa. Analogisyntetisaattorit ovat kuitenkin säilyttäneet arvonsa muusikkojen parissa, usein niiden ominaisäänen ansiosta. Uusia, täysin analogielektroniikalla toteutettuja syntetisaattoreita on ollut saatavilla vähemmän kuin mallintavia versioita. Etenkin moniäänisiä analogisyntetisaattoreita on saatavilla vähän. 2000-luvulla trendi on ollut suosiollinen analogisyntetisaattoreille. Erityisesti modulaariset analogisyntetisaattorit ovat kasvattaneet suosiotaan. [23]

Opinnäytetyön tarkoituksena oli opiskella analogista elektroniikkaa hyödyntämällä tekijän yli 20-vuotista kokemusta digitaalisten syntetisaattorien parissa. Lisäksi katsottiin, että opiskelemalla analogista elektroniikkaa ja sen ilmiöitä on helpompi ymmärtää digitaalisen elektroniikan ilmiöitä. Tavoitteisiin kuului myös valmistaa toimiva, 13-ääninen analogisyntetisaattorin prototyyppi. Koska prosessi on kestänyt lähes 3 vuotta, on lopputyön aikana pidetty päiväkirjaa, johon on merkitty tärkeimmät havainnot.

Suurin osa opinnäytetyössä käsitellyistä piireistä ja ratkaisuista ovat yleisiä ja tunnettuja. Piirien luotettavan toiminnan toteamiseksi kaikki lopputyössä käytetyt piirit on testattu koekytkentäalustalla. Aiheesta tehtyjä opinnäytetöitä on internetissä saatavilla, esimerkiksi Andre Lundkvistin vuonna 2008 tekemä. [21]

Opinnäytetyössä käsitellään aluksi analogisen syntetisaattorin keskeisiä käsitteitä. Suunnitteluvuossa käsitellään tarkemmin käytettyjä kytkentöjä ja mekaanisia rakenteita. Rakennusluvussa käsitellään, kuinka suunnitelmat toteutettiin. Lopuksi esitellään testituloksia ja arvioidaan lopputulosta.

## 2 TEKNISET OMINAISUUDET

Elektroniikan oppimisen lisäksi tavoitteena oli valmistaa toimiva analogisyntetisaattori. Soittimeen haluttiin yhden oktaavin ääniala ja kolmentoista äänen polyfonia. Soittimen koskettimistosta haluttiin kosketusherkkä. Käyttöliittymästä suunniteltiin mahdollisimman yksinkertainen. Jokaiselle säädettävissä olevalle parametrille haluttiin oma potentiometri tai kytkin hallintapaneeliin.

Oskillaattorien aaltomuodoiksi valittiin.

- sini
- kolmio
- kantti
- saha
- pulssi, positiivisen jakson säätöalue 0 – 50 % ja negatiivisen jakson 50 % - 100 %
- pwm

Pulssisuhdetta haluttiin ohjattavan joko manuaalisesti potentiometrillä tai matalataajuusoskillaattorilla. Matalataajuusoskillaattoria käytettäessä haluttiin, että on mahdollista muokata pulssisuhteen nopeuden vaihtelunopeutta sekä pulssisuhteen säätymisen syvyyttä.

Suodintyypeiksi valittiin 2.asteen alipäästösuodin, ylipäästösuodin ja kaistanpäästösuodin. Suotimen säädettäviksi parametreiksi valittiin estokaistan ja hyvyysluvun säätö. Estokaistaa haluttiin ohjattavan joko manuaalisesti potentiometrin avulla tai matalataajuusoskillaattorin avulla. Hyvyysluvun säätämiseen käytettäisiin potentiometriä.

Soittimesta haluttiin mahdollisimman dynaaminen. Soittajalla pitää olla mahdollisuus soittaa suurella dynamiikalla, pianissimosta forteen.

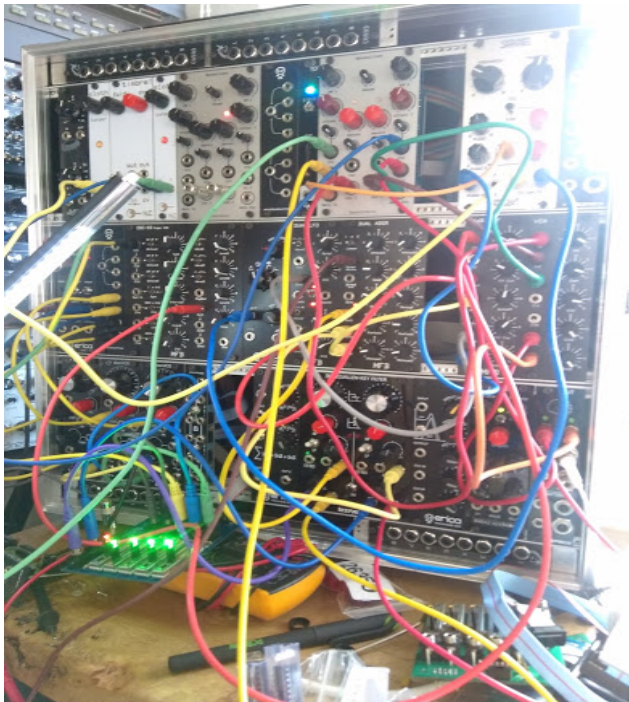
Prototyyppiin kehittämiseen käytettävä budjetti oli rajallinen, alle tuhat euroa. Kahdenktoista äänen polyfoniolla varustettuja analogisyntetisaattoreita on saatavilla markkinoilla 900 - 3000 euron hintaan.

## 3 ANALOGISYNTETISAATTORIN YLEISIÄ KÄSITTEITÄ

### 3.1 Modulaarisuus

Analogisten syntetisaattorien signaalia muokkaavat toiminnot ovat yleensä jaettu osioihin. Näitä osioita kutsutaan moduuleiksi. Käyttäjä voi valita, mitä moduuleja käytetään signaalitiellä. Erilaisia moduuleja on lukematon määrä. Moduulit voivat olla valmiiksi asennettuja, integroitua soittimeen. Tällaisissa syntetisaattorimalleissa yleiset moduulit ovat jänniteohjattu vahvistin, suotimet ja matalataajuusoskillaattorit parametrien ohjaukseen. [21]

Markkinoilla on myynnissä myös ns. modulaarisia syntetisaattoreita. Näissä malleissa tyypillistä on se, että käyttäjä voi lisätä moduuleita haluamansa määrän ja moduulit voidaan reitittää käyttäjän haluamalla tavalla. Kuvassa 1 on modulaarinen syntetisaattori, jossa käyttäjä on reitittänyt moduulit haluamallaan tavalla.



Kuva 1. Modulaarinen syntetisaattori. Kuva: Dave Francis.

### 3.1.1 Oskillaattorit

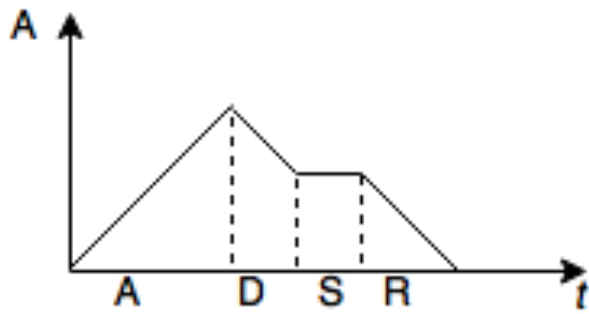
Analogisyntetisaattorien oskillaattorien tyypilliset aaltomuodot ovat siniaalto, kolmioaalto, kanttiaalto ja sahalaita-aalto. Myös pulssiaalto ja PWM-signaali ovat yleisiä. Usein oskillaattorien taajuutta on mahdollista ohjata joko ramppigeneraattorin tai matalataajuusoskillaattorin avulla. Esimerkiksi vibrato voidaan toteuttaa ohjaamalla taajuutta matalataajuusoskillaattorilla. [21]

### 3.1.2 Suotimet

Analogisyntetisaattoreissa yleisiä suodintyyppejä ovat alipäästösuodin, kaistanpäästösuodin ja ylipäästösuodin. Suotimien estokaistan jyrkkyydet ovat yleensä 6 dB / oktaavi, 12 dB / oktaavi tai 24 dB / oktaavi. Yleensä suotimen estokaistan ja hyvyysluvun arvoa on mahdollista kontrolloida joko manuaalisesti potentiometrien avulla tai matalataajuusoskillaattoreilla. Yleisiä käytettyjä suodintyyppejä ovat Chebyshev, Butterworth, Bessel. Usein suotimen avulla halutaan muokata oskillaattorin tuottaman signaalin taajuuskomponentteja, jolloin lopputuloksena äänensävy muuttuu. [21]

### 3.1.3 Jänniteohjattu vahvistin

Signaalin amplitudin ohjaamiseen voidaan käyttää jänniteohjattua vahvistinta. Sen kontrollisignaalina on yleensä ramppigeneraattorilla ohjattava jännitetaso. Ramppigeneraattorin avulla käyttäjä voi asettaa esimerkiksi oskillaattorin amplitudin käyttäytymään halutulla tavalla. Tyypillisiä ohjattavia parametreja ovat ramppigeneraattorin nousuaika, mihin tasoon ramppigeneraattorin signaali putoaa huippuarvosta ja kuinka nopeasti ramppigeneraattorin signaali vaimenee. Ramppigeneraattorilla on käytössä vakiintunut nimitys, ADSR-generaattori, kuten kuvassa 2. [24]



Kuva 2. ADSR-ramppigeneraattorin ohjattavat parametrit. [7, 24]

#### 3.1.4 Matalataajuusoskillaattori

Matalataajuusoskillaattoria (LFO) käytetään yleensä kontrollisignaalina halutuille parametreille. Tyypillisiä ohjauskohteita ovat suotimen estokaistan alue, suotimen hyvyysluvun arvo, oskillaattorin amplitudi (tremolo), oskillaattorin vire (vibrato) ja PWM-pulssisuhteen kontrolli. Matalataajuusoskillaattorin taajuus on tyypillisesti alle 10 Hz. [21]

## 4 SUUNNITTELU

Koska opinnäytetyö on luonteeltaan modulaarinen, katsottiin että myös suunnittelu on helpompi toteuttaa lohkoittain. Suunnittelu jakaantui kahteen pääosiotaan: mekaniikan suunnitteluun ja elektroniikan suunnitteluun. Molemmat pääosiot jakaantuivat useisiin alalohkoihin. Opinnäytetyönä valmistetun syntetisaattorin nimeksi valittiin SYNA ja jatkossa tekstissä esiintyvä SYNA viittaa aina opinnäytetyöhön kokonaisuutena.

Useimmat piirit on helpompi analysoida aikatasossa taajuustason sijaan. Oskillaattorien aaltomuodoista esitetään myös jaksollisen signaalin Fourier-sarjamuotoinen esitys. Testeissä nauhoitettujen signaalien  $a_n$  ja  $b_n$  arvoja verrataan referensseihin esitettyihin. PWM-signaalin sarjamuotoinen esitys jätettiin pois, koska aihepiiri on laaja ja toisaalta nauhoitetun signaalin analysointi olisi ollut haastavaa.

Jos  $f(t)$  on jaksollinen ajanjaksona  $0 < t < T$ , jossa jaksonaika on  $T$ . Nyt  $f(t)$  voidaan esittää kuten kaavassa (1); [25, s. 696]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T}) \quad (1)$$

Kaavan 1 kertoimet  $a_n$  ja  $b_n$  saadaan laskettua yhtälöistä kaavassa (2); [26, s. 696]

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \text{ ja } a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt, n \in \mathbb{Z}^+ \text{ ja } b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n t}{T} dt, n \in \mathbb{Z}^+ \quad (2)$$

Kaavassa 2  $a_0$  = signaalin DC-komponentti.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävät oskillaattorit perustuvat joko positiiviseen takaisinkytkentään tai RC-piireihin. Positiivisen takaisinkytkennän voi esittää siirtofunktiolla  $A_f(j\omega)$ , kuten kaavassa (3); [5, s. 1000]

$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} \quad (3)$$

Ideaalisessa kytkennässä, jotta oskillaatio olisi mahdollista tulisi  $|A(j\omega)B(j\omega)| = 1$  ja jossa  $\varphi = 2\pi n, n \in 0, 1, 2, \dots$ . Tästä käytetään myös nimitystä Barkhausenin kriteeri. [5, s. 1000]

## 4.1 SYNA:n mekaaninen rakenne

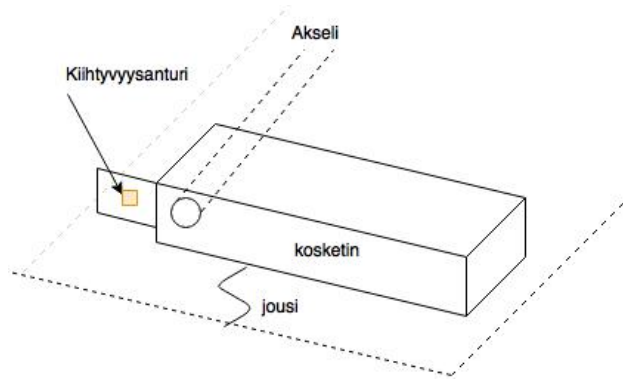
SYNA:n elektroniikan vaatimukset määrittivät soittimen mekaanisen rakenteen. Piirilevyt tarvitsivat suljetun kotelon ja niiden fyysinen koko määritteli kotelon mitoituksen. Kytke-  
ntöjen ohjaukseen tarkoitetut kytkimet ja potentiometrit tarvitsivat kiinnitysalustan ja niiden määrä ja sijoittelu määrittivät hallintapaneelin koon. Koskettimisto piti saada suojattua osittain ja sijoitettua runkoon.

### 4.1.1 Runko

Runko päätettiin tehdä 0,8mm:n teräslevystä. Teräslevyyn päädyttiin sen muokattavuuden ja vahvuuden perusteella. Lisäksi teräslevyn hyviin ominaisuuksiin kuuluu sen kyky vaimentaa sähkömagneettisia häiriöitä. Tämä vähentää SYNA:n häiriintymistä ulkopuolisilta signaaleilta ja toisaalta SYNA:n elektroniikan tuottamat häiriöt vaimentuvat. Rungon hyviin ominaisuuksiin kuuluu myös sen kyky sitoa lämpöä. Testien perusteella hukkalämpöä ei tarvitse tuulettaa kotelosta pois erillisillä tuulettimilla.

### 4.1.2 Koskettimet

Koskettimien mitoitus kopioitiin pianon koskettimistosta. Varsinaisen kosketinosan haluttiin lepäävän toisesta päästä pyörivän akselin päällä, kuten kuvissa 3 ja 4. Koskettimien kosketusvaste perustuu jousisysteemiin. Koskettimen alla oleva jousisysteemi asettaa koskettimelle painevasteen. Painevastetta hyödynnetään soittotuntuman muodostumisessa. Jos oletetaan kosketinta painavan voiman olevan vakio, silloin jousen jäykkyys ja jousen positio koskettimessa määrää kuinka nopeasti kosketin liikkuu. Koskettimen päähän asennettuun metallilevyyn on sijoitettu kiihtyvyyssanturi. Kiihtyvyyssanturin Y-position muutoksesta aiheutuvaa jännitemuutosta hyödynnetään jänniteohjatun vahvistimen ohjaamiseen. Koskettimien puumateriaaliksi valittiin mänty sen hinnan ja saatavuuden vuoksi.



Kuva 3. Havainne kuva koskettimesta. [7]



Kuva 4. Toteutettu koskettimisto, jossa näkyvissä jousisysteemi.

#### 4.1.3 Hallintapaneeli

Tavoitteena oli pitää SYNA:n käyttöliittymä sellaisena, jossa käyttäjä pääsee välittömästi käsiksi halutun parametrin ohjaukseen. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että jokainen ohjattava parametri olisi oman potentiometrin taikka kytkimen takana.

Vaihtoehtona pohdittiin myös digitaalista, mikrokontrollerin avulla toteutettua käyttöliittymää. Tähän vaihtoehtoon ei päädytty, koska halutut toiminnot olisivat todennäköisesti jääneet vähemmän intuitiivisiksi, valikkojen taakse. Jos käyttöliittymä olisi toteutettu digitaalisesti, olisi potentiometrien ja kytkimien määrä olisi ollut todennäköisesti pienempi. Myös hallintapaneeli tehtiin 0,8mm:n teräslevystä.



## 4.2 Elektroniikka

Tavoitteena oli rakentaa 13-ääninen soitin. Jokaiselle äänelle haluttiin samat ominaisuudet. Nämä ominaisuudet ovat:

- Aaltomuodon valinta kuudesta aaltomuodosta: sini, kolmio, kannti, saha, pulssi tai PWM.
- Pulssisuhteen positiivisen jakson säätö 0 - 50 % ja negatiivisen jakson säätö 50 % - 100 %. Pulssisuhteen muutokselle potentiometriohjaus tai matalataajuusoskillaattori ohjaus
- Pulssisuhteen ollessa matalataajuusoskillaattori ohjattu, pulssisuhteen muutoksen määrän ja muutoksen nopeuden säätö
- 12 dB / oktaavi suotimen valinta alipäästösuotimen, ylipäästösuotimen ja kaistanpäästösuotimen väliltä
- Suotimen hyvyysluvun manuaalinen ohjaus potentiometrin avulla
- Suotimen rajataajuuden manuaalinen ohjaus potentiometrin avulla tai estokaistan ohjaus matalataajuusoskillaattorin avulla
- Suotimen estokaistan ohjaukseen tarkoitetun matalataajuusoskillaattorin nopeuden ja amplitudin säätö potentiometriin avulla

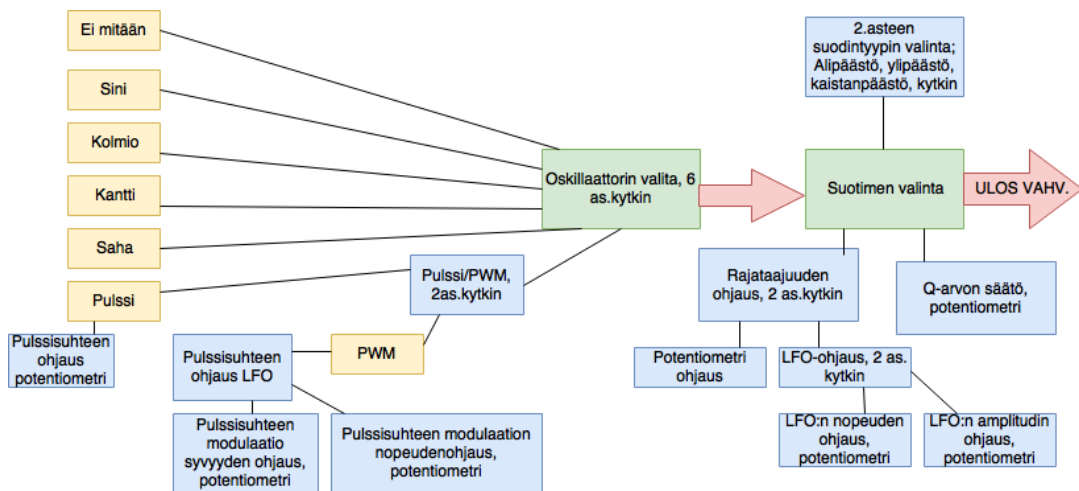
Kuvissa 5,6 ja 7 on käsitelty kytkentöjen toimintoja lohkokaavioina.

Koska kyseessä on syntetisaattorin prototyyppi, niin sen valmistuksessa ja suunnittelussa on monta muuttuvaa tekijää. Erityisesti oskillaattorien taajuus ja säröominaisuuksia ajatellen haluttiin kytkennöistä sellaisia, että taajuuksiin ja säröominaisuuksiin pystytään vielä vaikuttamaan piirilevyn valmistuksen jälkeen. Tästä syystä kytkentöjen kriittisten pisteiden kiinteät vastukset korvattiin monikierros trimmeripotentimetreillä. Niiden käyttäminen mahdollisti oskillaattoripiirin suunnittelun siten, että suunnitellaan vain yksi oskillaattoripiirilevy, jonka oskillaattorit viritetään halutulle taajuudelle potentiometriin avulla. Lisäksi jokaisen oskillaattorin lähdössä on potentiometri, jonka avulla voidaan oskillaattorin lähtötaso säätää. Jos syntetisaattoria valmistettaisiin useampi kuin yksi kappale, olisi järkevämpää käyttää kiinteitä vastuksia potentiometriin sijaan.

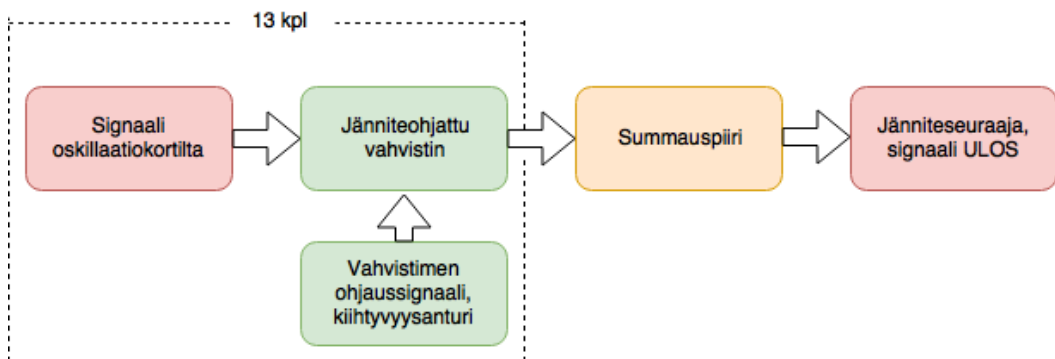
Jokainen kytkentä on testattu ennen piirilevyn suunnittelua. Kokonaisuutta ei voitu testata ennen kuin osa piirilevyistä olisi valmistettu. Suunnittelun tärkeimmäksi osa-alueeksi

muodostui huolellinen testaustyö. Testaustyö aloitettiin oskillaattori- ja suodinpiirien testauksilla keväällä 2015. Samanaikaisesti testattiin suodinosa. Näiden testauksien perusteella suunniteltiin oskillaattori / suodin piirilevy.

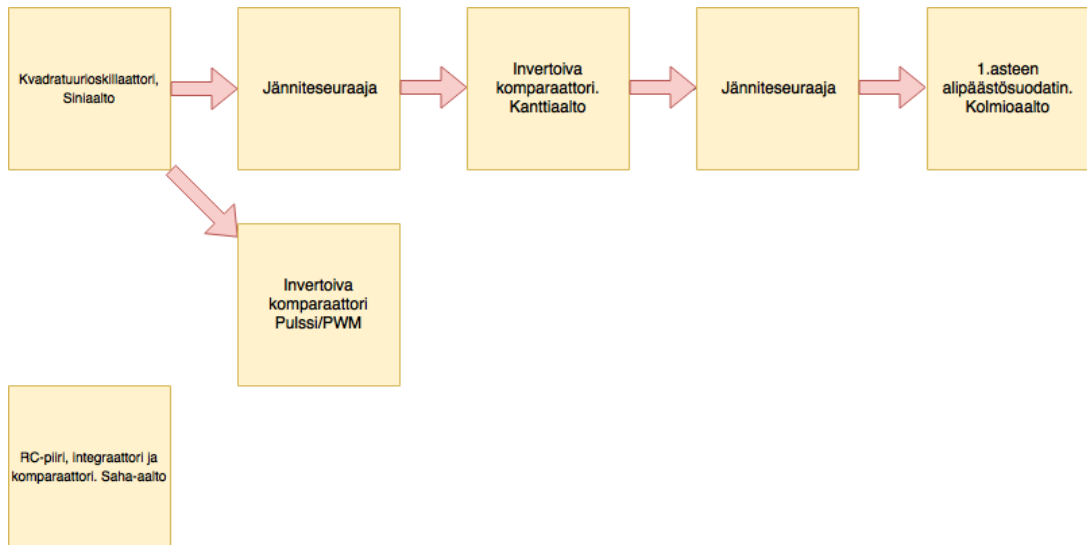
Tämän jälkeen testattiin jänniteohjattua vahvistinta ja koskettimista. Jänniteohjattuun vahvistimeen syötettiin valmiilta oskillaattorikortilta signaalia ja vahvistinta ohjattiin yksittäisellä koskettimella, jossa oli kytketty kiihtyvyyssanturi. Näiden testien perusteella suunniteltiin vahvistinpiirilevy. Kun kaikki oskillaattorikortit ja vahvistinkortit oli valmistettu, voitiin testata summauspiirin toimintaa. Tämän testin perusteella suunniteltiin summauspiiri. Viimeisenä suunniteltiin teholähde. Lopullista prototyyppiä päästiin testaamaan syksyllä 2017. Runsaalla testaustyöllä ajateltiin minimoitavan virheiden määrää lopullisessa prototyyppissä. Lisäksi budjetti oli rajallinen, joten piirilevyjen uudelleensuunnittelu virheiden vuoksi olisi ollut hankalaa.



Kuva 5. Oskillaattori- ja suodinpiirin toimintalohko. [7]



Kuva 6. Vahvistimien ja summauspiirin toimintalohko. [7]



Kuva 7. Oskillaattorien tarkempi toimintalohko. [7]

#### 4.2.1 Oskillaattorit

Oskillaattorin tärkeimmäksi ominaisuudeksi katsottiin sen värähtelytaajuuden stabiilius. Toiseksi tärkeimmäksi tavoitteeksi asetettiin se, että aaltomuotojen harmonisten taajuuskomponenttien koostumus olisi mahdollisimman lähellä aaltomuodon Fourier-sarjamuotoista esitystä. Oskillaattori- ja suodinpiirilevy suunniteltiin siten, että sen taajuusalue kattaa oktaavin alan yhdellä piirilevysuunnitelmalla. Taajuusalueeksi valittiin amerikkalaisen viritysstandardin mukaisesti 130.81 Hertsin ja 261.63 Hertsin välinen alue. Nuotteina ilmaistuna  $C_3 - C_4$  nuottien välinen alue, kuten taulukossa 1 on esitetty. [17]

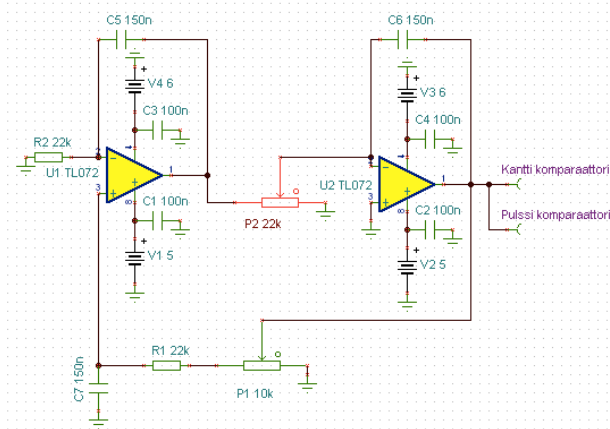
Taulukko 1. Amerikkalainen viritysstandardi. [17]

Nuotti	$C_3$	$C\#_3/Db_3$	$D_3$	$D\#_3/Eb_3$	$E_3$	$F_3$	$F\#_3/Gb_3$	$G_3$	$G\#_3/Ab_3$	$A_3$	$A\#_3/Bb_3$	$B_3$	$C_4$
Taajuus (Hz)	130,81	138,59	146,83	155,56	164,81	174,61	185,00	196,00	207,65	220,00	233,08	246,94	261,63

#### 4.2.2 Siniaalto

Ideaalisessa siniaallossa on vain fundamentaalinen taajuus ja ei kerrannaistaajuuksia, kuten kaavassa (4). [25, s. 685]

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta), \text{ jossa } A = \text{amplitudi, } \omega = \text{kulmanopeus ja } \theta = \text{vaihekulma.} \quad (4)$$



Kuva 8. Kvadratuurioskillaattorin variaatio. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [19, s. 871]

Sinioskillaattori toteutettiin kvadratuurioskillaattorin variaatiolla. [19, s. 871]

Kyseessä on takaisinkytkentäpiiri, jossa hyödynnetään kahta integraattoria. Kytkennästä on nähtävissä Barkhausen-kriteerin vaatimus. Liian pieni positiivinen takaisinkytkentä ei mahdollista oskillaatiota. Asettamalla  $(R_1 + P_1) > R_2$ , Barkhausen-kriteeri täyttyy, jolloin oskillaatio on mahdollista. Kytkennän  $P_2$ :den avulla säädetään oskillaation taajuutta.  $P_1$ :den avulla säädetään positiivisen takaisinkytkennän amplitudia. Molemmat  $P_1$  ja  $P_2$  vaikuttavat sekä amplitudiin että taajuuteen. Molempia potentiometrejä säätämällä on mahdollista saavuttaa haluttu taajuus ja harmonisen särön määrää on mahdollista kontrolloida. [19, s. 871]

Kytkenän taajuuden analysoimiseksi on helpompaa asettaa  $P_2 = (P_1 + R_1) = R_2$  ja  $C_5 = C_6 = C_7$ . Kytkennän positiivinen takaisinkytkentä on  $\frac{1}{1+sRC}$ .  $U_1$ :den vahvistus on  $\frac{1+sRC}{sRC}$  ja  $U_2$ :den vahvistus on  $-\frac{1}{sRC}$ . Kytkennän kokonaisvahvistus on  $-\frac{1+sRC}{(sRC)^2}$ . Barkhausen-kriteerin mukaisesti  $|A(j\omega)B(j\omega)| = \frac{1}{1+sRC} * \left(-\frac{1+sRC}{(sRC)^2}\right) = -\frac{1}{(sRC)^2} = 1$ . Nyt  $-1 = (sRC)^2$ . Kytkennän taajuudeksi muodostuu  $f = \frac{1}{2\pi RC}$ . [19, s. 871 - 872]

Käytännössä  $P_1 \neq P_2$  ja edellä mainittu kaava on suuntaa antava. Testien perusteella kytkentä on viritettävissä 130,81 - 261,63 Hz:n alueelle siten, että taajuus pysyy stabiilina  $\pm 1$  Hz sisällä ja harmonisten kerrannaistaajuuksien taso pysyy vähintään -70dBFS tasolla, kun fundamentaalitaajuus on -10 dBFS tasolla.

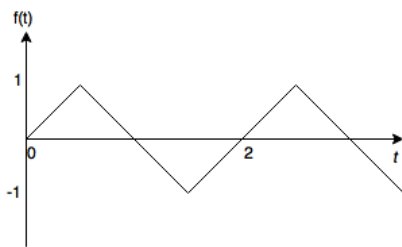
### 4.2.3 Kolmioaalto

Kolmioaalto, jonka vaihe on 0,  $A = 1$  ja  $T = 2$  voidaan esittää Fourier-sarjamuotoisena, kuten kaavassa (5); [26]

$$f(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) \quad (5)$$

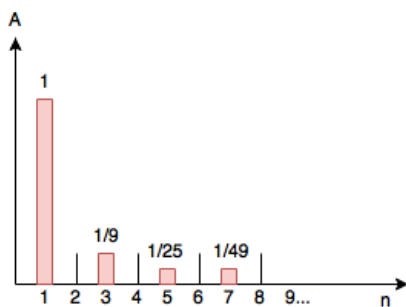
Kuvassa 9 olevan funktion vaihe on 0 ja funktio on pariton. Nyt  $a_n = a_0 = 0$ . [28]. Kuvan 9 kolmioaallon  $b_n$ -kerroin lasketaan kaavan (6) avulla; [26]

$$b_n = \frac{8}{\pi^2 n^2} \begin{cases} (-1)^{\frac{n-1}{2}}, & \text{kun } n \text{ on pariton} \\ 0, & \text{kun } n \text{ on parillinen} \end{cases} \quad (6)$$



Kuva 9. Kolmioaalto.  $A = 1$ ,  $T = 2$ , vaihe = 0. [7, 26]

Kuvassa 10 on esitetty approksimoidut kerrannaistaajuuksien tasot.

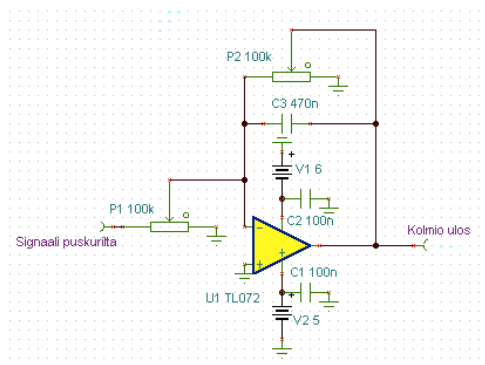


Kuva 10. Kolmioaallon approksimoidut referenssitasot fundamentaalitaajuudelle ja kerrannaistaajuuksille. [2, 7]

Kolmiosignaali generoidaan alipäästösuodattamalla kantiaalto. Se toteutettiin 1.asteen alipäästösuodattimen avulla. Kyt kentään lisättiin potentiometrit, jotta alipäästön rajataa-

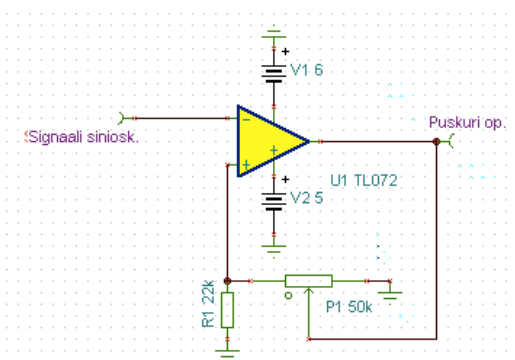
juutta, kolmioaallon lineaarisuutta ja AC:n vahvistusta olisi mahdollista säätää oskillaation taajuuteen sopivaksi. Operaatiovahvistimen sisääntulonastoissa on yleensä nanoampeerien luokkaa oleva biasointivirta. Ajan myötä tämä biasointivirta lataisi kondensaattori  $C_3$ :n täyteen. Tällöin kytkennässä olisi AC-katkos ja virtaa ei liikkuisi. Kytkennässä oleva potentiometri  $P_2$  toimii säädettävänä takaisinkytkentä vastuksena. Nyt operaatiovahvistimen napojen biasointivirralla on kulkureitti. Kytkentä on alipäästösuodatin, tai integraattori jonka  $f_c = \frac{1}{2\pi P_2 C_n}$  ja AC:n vahvistus  $= \frac{P_2}{P_1} \frac{1}{(1+\omega C_3 P_2)}$ . [5, s. 1037 - 1038]

Huomioitavaa on se, että käytetty TL072-operaatiovahvistin ei ole ns. rail-to-rail operaatiovahvistin, vaan sen käyttöjänniterajat tulevat vastaan aikaisemmin. Testien perusteella todellinen käyttöjännite poikkeaa TL072:lla noin  $\pm 1V$  käyttöjännitteistä.

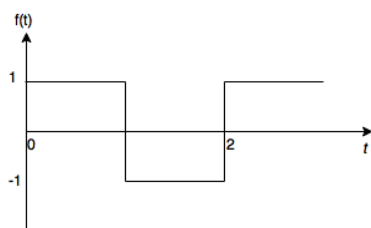


Kuva 11. Alipäästösuodatuspiiri, kolmioaalto. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5, s. 1037 – 1038]

#### 4.2.4 Kanttiaalto



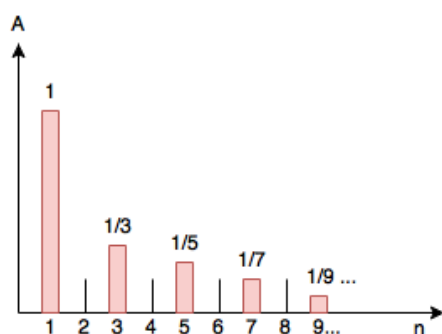
Kuva 12. Käytetty invertoiva komparaattorikytkentä kanttiaallolle. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5, s. 1028 – 1032]



Kuva 13. Kanttiaalto.  $A = 1$ ,  $T = 2$ , vaihe = 0. [7, 27]

Kuvan 13 funktion vaihe on 0 ja funktio on pariton.  $a_n = a_0 = 0$ . Kuvan 13  $b_n$ -kerroin voidaan laskea kaavan (7) avulla; [27]

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{\pi n t}{T}\right) dt \quad (7)$$



Kuva 14. Kanttiaallon approksimoidut referenssitaset fundamentaalitaajuudelle ja kerrannaistaajuuksille. [2, 7]

Kanttiaalto generoidaan operaatiovahvistimella toteutetun invertoivan komparaattorikytkennän avulla. Kuvan 12 kytkennässä hyödynnetään positiivista takaisinkytkentää.  $R_1$  ja  $P_1$  toimivat jännitejakajina. Ei-invertoiva napa on kytketty jännitejakajaan, jolloin osa lähtöjännitteestä kytketty takaisin ei-invertoivaan napaan. Kaksi referenssi toimintapistettä,  $U_{\text{ylempi}}$  ja  $U_{\text{alempi}}$  määritellään  $R_1$  ja  $P_1$  avulla. [5, s. 1028 – 1032]

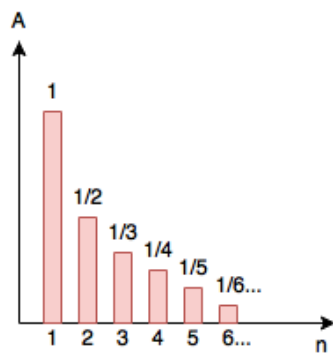
$U_{\text{ylempi}} = \frac{R_2}{P_1 + R_2} (+U_{\text{lähtö(max)}})$  ja  $U_{\text{alempi}} = \frac{R_2}{P_1 + R_2} (-U_{\text{lähtö(max)}})$ , jossa  $U_{\text{lähtö}}$  määräytyy käyttöjännitteistä. Kun tulosignaali, joka on kytketty invertoivaan napaan, saavuttaa asetetun  $U_{\text{ylempi}}$  toimintapisteen, vaihtaa lähtöjännite tilaansa negatiiviseen maksimiin. Kun tulosignaali saavuttaa  $U_{\text{alempi}}$  toimintapisteen, vaihtaa lähtöjännite tilaansa positiiviseen maksimiin. Tällöin  $U_2$ :den lähtösignaalista muodostuu kanttiaaltoa. [5, s. 1028 – 1032]

$P_1$  asetettiin, jotta kanttiaallon pulssisuhdetta voidaan säätää. Pulssisuhteen säätämisellä haluttiin saada mahdollisuus vaikuttaa siihen, että komparaattorin luoma pulssisuhde olisi mahdollisimman lähellä 50 % / 50 % suhdetta. Toisin sanoen potentiometri  $P_1$ :llä säädetään  $U_{y\text{lempi}}$  ja  $U_{a\text{lempi}}$  toimintapisteet. Tällöin taajuus on riippuvainen tulosignaalin taajuudesta ja osittain komparaattorin toimintapisteistä. [5, s. 1028 – 1032]

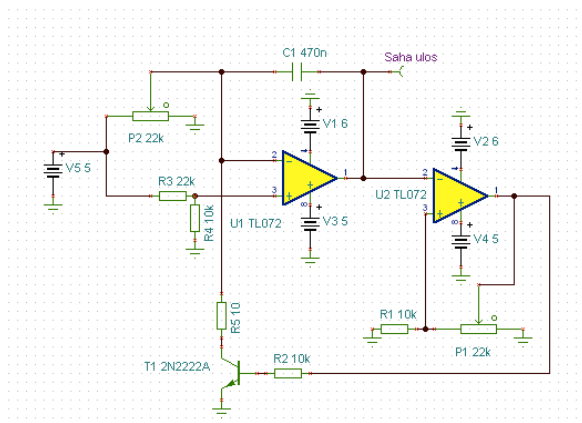
#### 4.2.5 Sahalaita-aalto

Sahalaita-aalto, jonka vaihe on 0,  $A = 1$  ja  $T = 2$ , voidaan esittää Fourier-sarjamuotoisena, kuten kaavassa 8: [28]

$$f(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) \quad (8)$$



Kuva 15. Sahalaita-aallon approksimoidut referenssitasot fundamentaalitaajuudelle ja kerrannaistaajuuksille. [2, 7]



Kuva 16. Sahalaita-aalto oskillaattori. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5]

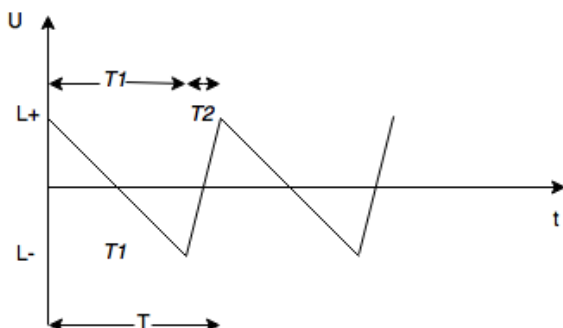


Sahalaita-oskillaattorin toteuttamiseksi kuvan 16 kytkennässä ladataan  $C_1$  kondensaattoria ja jonka latausnopeuteen vaikuttaa  $P_2$  trimmeripotentiometri.  $U_1$  toimii integraattorina ja  $U_2$  toimii komparaattorina. Kuten kanttiaalto-oskillaattorin tapauksessa,  $U_2$ :lle määritellään kaksi toimintapistettä,  $U_{ylempi}$  ja  $U_{alempi}$ . Transistori toimii kytkimenä ja joka liipaistaa  $U_2$ :den avulla.  $U_1$ :den ei-invertoivassa navassa on jännitejakopiiri, jonka  $U_{ref} = \frac{R_4}{R_3+R_4} (+5V) = +1,56 V$ .  $U_1$ :den invertoivassa navassa on sama jännite. Kun transistori  $T_1$  on liipaistu auki, virta kulkee  $P_2$ :den kautta ja transistorin kautta maapotentiaaliin. Samalla kondensaattori  $C_3$  latautuu ja  $U_1$ :den lähdössä muodostuu lineaarisesti nouseva jännite koska  $U_1$  yrittää ylläpitää navoissaan samoja jännitteitä. Invertoivassa navassa jännite laskee kondensaattorin latausvirran ja  $P_2$ :den funktiona. [5, s. 1028 – 1032]

Kun transistori liipaistaa kiinni, purkautuu kondensaattori, jolloin  $U_1$ :den navoissa jännite kasvaa ja  $U_1$ :den lähdössä jännite laskee nopeasti.  $U_2$ :den toimintapisteiksi muodostuu  $U_{ylempi} = \frac{R_1}{P_1+R_1} (+U_{lähtö(max)})$  ja  $U_{alempi} = \frac{R_1}{P_1+R_1} (-U_{lähtö(max)})$ , jolloin  $U_{ylempi} = \frac{10k\Omega * (+5V)}{10k\Omega + 22k\Omega} = 1,56V$  ja  $U_{alempi} = \frac{10k\Omega * (-6V)}{10k\Omega + 22k\Omega} = 1,88V$ . Käytännössä  $\pm U_{lähtö}$  poikkeaa esitetystä johtuen TL072 käyttöjännite ominaisuuksista ja siitä, että  $P_1$ :tä käytetään taajuuden hienosäätämiseen, jolloin myös  $U_{ylempi}$  ja  $U_{alempi}$  muuttuu. [5, s. 1028 – 1032]

Testien perusteella karkea arvio taajuudesta  $C_3 - C_4$  nuottien taajuusalueella on:  $f = \frac{1}{C_n C_1}$ .

Tarkempi taajuusanalyysi sisältää  $T_1$ :den lisäksi  $T_2$  termin.  $T_2 \approx \frac{1}{C_1 R_5}$ . Lisäksi  $U_2$ :den liipaisupisteet vaikuttavat taajuuteen kuin myös  $R_3$ :n ja  $R_4$ :n avulla toteutettu jännitejako. Korkeammilla taajuuksilla karkea arvio ei pidä paikkaansa.  $R_5$ :ttä kasvattamalla vaikutetaan kondensaattorin purkunopeuteen, jolloin  $U_1$ :den laskeva reuna loivenee, toisin sanoen kondensaattorin  $C_1$ :den purkuaika hidastuu. [5, s. 1028 – 1032]

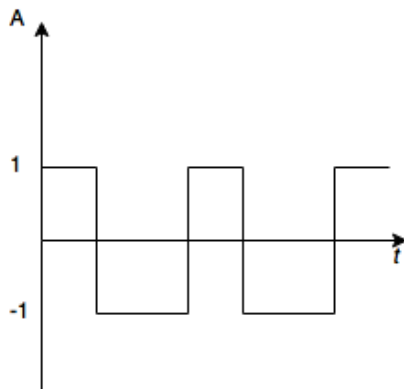


Kuva 17. Saha-aalto ajan funktiona.  $f \sim \frac{1}{T_1+T_2}$  [5, 28]

Kuvassa 17 on esitetty sahalaita-aalto. Ideaalisessa sahalaita-aallossa  $T_1$  olisi lineaarinen ja  $T_2$  olisi äärettömän lyhytkestoinen. Käytännössä kytkennän  $T_1$  on lähes lineaarinen ja  $T_2$  ei ole äärettömän nopea. [28]

#### 4.2.6 Pulssiaalto

Käyttäjällä on mahdollisuus ohjata pulssisuhdetta manuaalisesti tai matalataajuusoskillaattorin avulla. Manuaalisesti potentiometrillä säätämällä on mahdollista vaihtaa positiivisen jakson pulssisuhdetta 0 – 50 % välillä ja saman aikaisesti negatiivisen jakson 50 % - 100 %. Koska käytetyllä operaatiovahvistimella on kaksipuoliset käyttöjännitteet, on yhden pulssin jaksoa tarkasteltava huomioiden myös negatiivinen jakso. Esimerkiksi jos pulssille säädetään 40 %<sub>pos.</sub> / 60 %<sub>neg.</sub> suhde, vaikuttaa lähtösignaalissa molempien, positiivisen ja negatiivisen jakson aiheuttamat taajuuskomponentit. [5, s. 1028 – 1032]



Kuva 18. Signaali, jonka pulssisuhde on 40 %<sub>pos.</sub> / 60 %<sub>neg.</sub>,  $T = 2$  ja  $A = 1$ . [7]

Kuvan 18 signaali voidaan analysoida hyödyntämällä kaavaa 2. [25, s. 695 – 707]

$$\text{Nyt kuvan 18 } f(t) = \begin{cases} 1, & \text{kun } 0 < t < 0,8 \\ -1, & \text{kun } 0,8 < t < 2 \end{cases}$$

$$\text{Nyt } a_0 = \int_0^{0,8} 1 dt + \int_{0,8}^2 -1 dt = -0,4$$

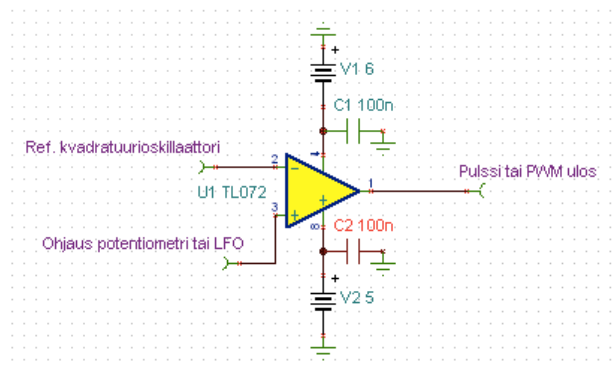
$$a_n = \int_0^{0,8} 1 \cos(nt) dt + \int_{0,8}^2 -1 \cos(nt) dt$$

$$b_n = \int_0^{0,8} 1 \sin(nt) dt + \int_{0,8}^2 -1 \sin(nt) dt$$

Taulukko 2. 40 % / 60 % pulssin taulukoituja  $a_n$  ja  $b_n$ -arvoja.

n	$a_n$	$b_n$
1	0,525	-0,810
2	1,378	0,202
3	0,543	1,145
4	-0,277	0,713
5	-0,194	0,294

Pulssiaallon taajuus määräytyy sinioskillaattorin taajuudesta. Kuvassa 19 sinioskillaattorin signaali kytketään komparaattorin invertoivaan napaan. Manuaalisessa ohjauksessa ei-invertoivaan napaan syötetään potentiometrillä säädettävää DC-jännitettä. DC-jännitteen manuaalinen ohjaus tapahtuu vastuksilla toteutetulla jännitejako piirillä, jonka toisena vastuksena toimii potentiometri. Kytkennässä ei ole takaisinkytkentää. Nyt  $U_{\text{ylempi}} = U_{\text{alempi}} = U_{\text{ref.}} = 0 - 1V$ . Positiivisen jakson pulssisuhde on muutettavissa 0 – 50 % väliltä ja samanaikaisesti negatiivisen jakson 50 – 100 % väliltä. Käytännössä kun kytkennän pulssisuhdetta säädetään, säätyy myös lähdön biasointi. Tästä syystä muuttuu myös A pulssisuhteen muutoksen mukana ja taulukoidut  $a_n$  ja  $b_n$  termit eivät vastaa totuutta.  $a_n$  ja  $b_n$  termien väliset suhteet kuitenkin säilyvät. [5, s. 1028 – 1032]



Kuva 19. Pulssi ja PWM komparaattorikytkentä. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5]

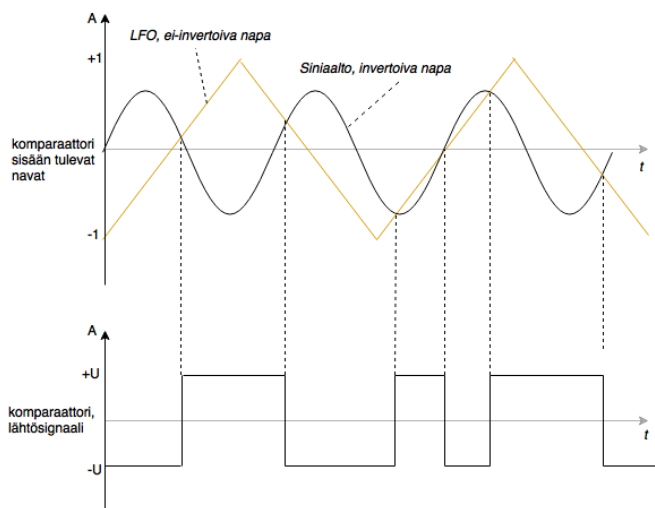
#### 4.2.7. PWM

Matalataajuusoskillaattori ohjauksessa kuvan 19 kytkennän lähtösignaalin pulssisuhde muuttuu matalataajuusoskillaattorin taajuuden funktiona, kuten kuvassa 18. [5, s. 1028 – 1032, 32]

Matalataajuusoskillaattorin aaltomuoto on kolmio, sen lineaarisuuden vuoksi. Nyt komparaattorin  $U_{ylempi} = U_{alempi} = U_{ref.}$  muuttuu kolmioaallon funktiona ja invertoivaan napaan tuleva sinisignaali liipaisee komparaattoria aina kun toimintapiste ylitetään/alitetaan, kuten kuvassa 20. [5, s. 1028 – 1032, 32]

Koska käyttäjällä on mahdollisuus ohjata kolmio-aallon amplitudia ja taajuutta, on PWM-signaalin pulssisuhteiden muutossyvyys ja kuinka nopeasti pulssisuhteet muuttuvat käyttäjän päätettävissä. Maksimi syvyys on 0 - 50 %<sub>pos.</sub> / 50 - 100 %<sub>neg.</sub>. Pulssisuhteen muutosnopeudeksi voidaan laskea teoriassa 0,12...83,3 Hz. [5, s. 1028 – 1032]

PWM-signaalin Fourier-sarjamuotoista esitystä ei tässä lopputyössä käsitellä, koska sitä ei lopputulosta arvioidessa käytetä. Lisäksi aihepiiri on laaja.



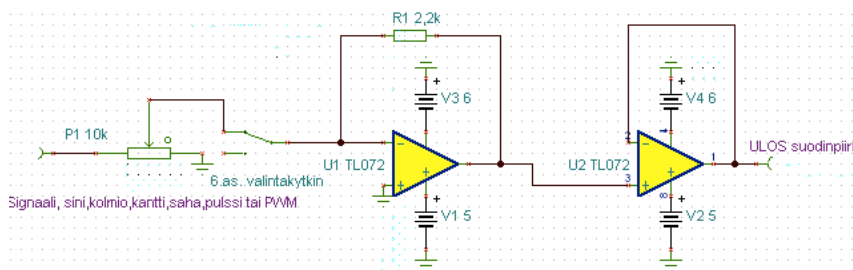
Kuva 20. Komparaattorin lähtösignaali PWM-tapauksessa. Käytännössä sisään tulevan sini-aallon taajuus ja amplitudi ovat korkeammat, jolloin lähtösignaalin pulssisuhteen muutos on tasaisempi. [5, s. 1028 – 1032, 7, 32]

#### 4.2.8 Välivahvistin ennen suodinpiiriä

Oskillaattorin ja suodinpiirin väliin haluttiin välivahvistin sekä impedanssisovituspiiri. Kuvassa 21 on käytetty välivahvistin piiri. Oskillaatiokortin signaalit tulevat omien 10kΩ:n potentiometrin kautta kuusiasentoiselle kytkimelle. Tämä mahdollistaa sen, että jokaisen oskillaattorin amplitudin taso on säädettävissä ennen sen etenemistä suodinosioon. Kytkimestä signaali menee invertoivan operaatiovahvistimen kautta ei-invertoivalle jännite-seuraaja operaatiovahvistimelle. Kaikkien oskillaattorien referenssitasona pidettiin sinioskillaattorin -30dBFS kokonaistasoa.  $U_1$ :den vahvistus on  $-\frac{R_1}{P_1}$ . [5, s. 478 - 480]

Riippuen  $P_1$ :den arvosta on ensimmäisen asteen jännitevahvistus  $0,22 \dots 2200$ , jos  $P_1$ :den alarajana pidetään yhtä ohmia. Tämä mahdollistaa sen, että liian suuri amplitudinen signaali on mahdollista vaimentaa kertoimella  $0,22 \dots 0,99$ . Liian pieni amplitudinen signaali on mahdollista vahvistaa maksimissaan kertoimella  $2200$ . Tämä säätömahdollisuus haluttiin siksi, että kaikkien oskillaatioiden amplitudi saadaan samalle tasolle. [5, s. 478 – 480]

$U_2$ :den vahvistus on  $U_{sis.} = U_{ulos.}$ . Sen sisääntulo impedanssi on suuri ja lähtöimpedanssi pieni. TL072 operaatiovahvistimen lähtöimpedanssi datalehden mukaan on  $n.200\Omega$  ja tuloimpedanssi  $1T\Omega$ . Toisin sanoen, kytkentä on jänniteseuraja. [5, s. 489 - 490, 29]

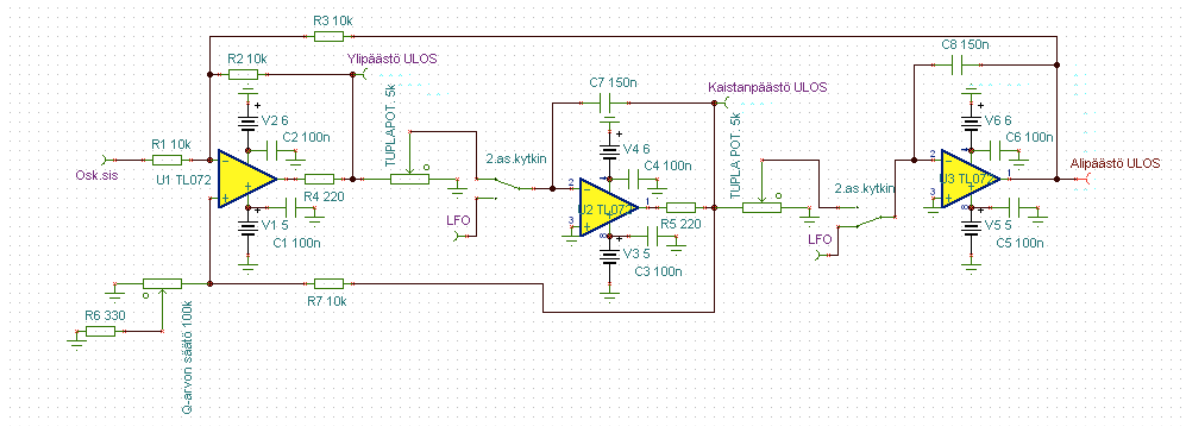


Kuva 21. Väli vahvistin ja impedanssisovituspiiri. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina- ohjelmasta. [7]

### 4.3 Suodinpiiri

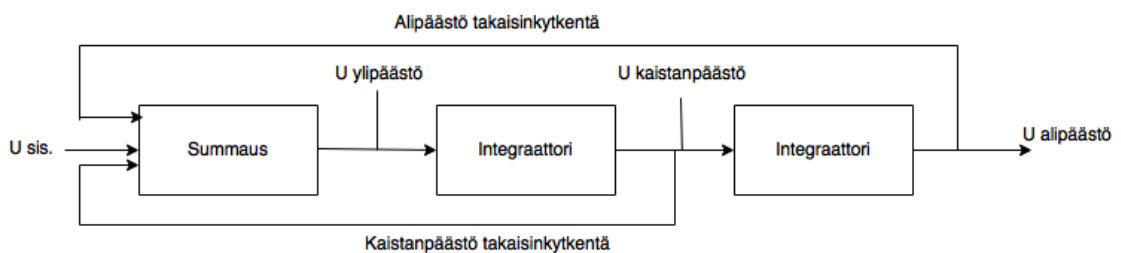
Käyttäjän haluttiin voivan valita kolmesta suodintyypistä. Alipäästösuotimen, ylipäästösuotimen tai kaistanpäästösuotimen väliltä. Käyttäjän potentiometreillä säädettäviksi parametreiksi haluttiin suotimen estokaistan ja hyvyysluvun säätö. Lisäksi estokaistan haluttiin olevan matalataajuusoskillaattorilla säädettävä. Suotimien jyrkkyydeksi haluttiin  $12 \text{ dB/oktaavi}$ .

#### 4.3.1 Tilaa muuttava suodin



Kuva 22. Tilaa muuttava suodin. Kuva kaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [11]

Tilaa muuttava suodin kytkentä saadaan toteutettua suhteellisen vähäisellä komponenttimäärällä. Kuvan 22 kytkennässä  $U_1$  toimii summauspiirinä ja  $U_{1\&2}$  toimivat integraattoreina. Rajataajuuden ja hyvyysluvun säätöalue määräytyi kuulopohjaiseen testiin sen sijaan, että säätöalue olisi ollut maksimi. Testien perusteella määräytyi potentiometriarvot: *mikä kuulostaa hyvältä*. Tästä syystä raja-arvon säätämiseen käytetään 10kΩ:n kaksoispotentiometriä ja hyvyysluvun arvon säätämiseen 100kΩ:n potentiometriä. Kytkennän eri suodinvaihtoehdot otetaan ulos väliulosottoina.  $U_1$ :den lähdössä on ylipäästö väliulosotto,  $U_2$ :den lähdössä on kaistanpäästö väliulosotto ja  $U_3$ :n lähdössä alipäästö väliulosotto. Kaikki väliulosotot syötetään 4.asentoisen kytkimen kautta jänniteseuraaja operaatiovahvistin kytkennälle, josta signaali ohjataan eteenpäin vahvistinosioon. [11]



Kuva 23. Tilaa muuttavan suotimen lohkoakaavio. [7, 11]

Tilaa muuttavan suotimen laskentaan voidaan käyttää kaavaa 10. [11]

$$f_{-3\text{dB}}(\text{ylipäästö}) = f_{-3\text{dB}}(\text{kaistanpäästö}) = f_{-3\text{dB}}(\text{alipäästö}) = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ jossa } R = R_4 = R_5 \text{ ja } C = C_7 = C_8 \quad (10)$$

Kun käytössä on kaksoispotentiometri, jolla korvataan R, on kytkennän estokaistaa mahdollista säätää. Kun käytössä on matalataajuusoskillaattori, muuttuu kytkennän R H11F1-vastusarvon mukaisesti. Jos käytössä on 10kΩ:n kaksoispotentiometri, on  $f_{-3dB}$  säädettävissä alueella 103...3316 Hertsin alueella. Jos käytössä on H11F1, jonka arvioitu säätymisvara on 1kΩ - 300MΩ, on  $f_{-3dB} = 0.004...803$  Hz [11]

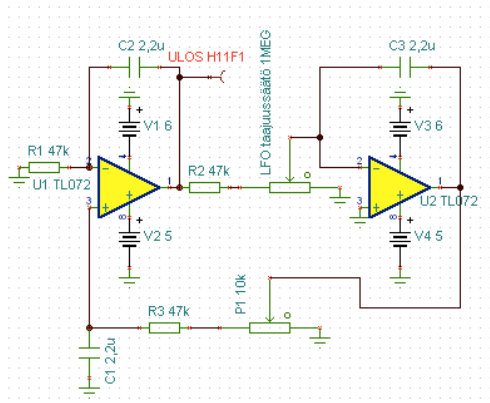
Käyttäjällä on mahdollisuus säätää hyvyyslukua 100kΩ:n potentiometrillä. Tällöin ylipäästön ja alipäästön hyvyysluvun arvoksi muodostuu:  $Q = 3\left(\frac{R_7}{R_7 + (100k\Omega + R_6)}\right)$ . [12]

Tällöin ylipäästösuotimen ja alipäästösuotimen hyvyysluku on säädettävissä 0,27...2,9 väliltä. Kaistanpäästösuotimen osalta:  $Q_{kp} = \frac{1}{\alpha}$  ja hyvyysluku on säädettävissä 0,3...3,7 väliltä. Kaistanpäästösuotimen kaistanleveys =  $\frac{f_{-3dB}}{Q_{kp}}$ . [12]

#### 4.3.2 Suotimen estokaistan matalataajuusoskillaattori ohjaus

Suotimen parametreista haluttiin matalataajuusoskillaattori ohjattavaksi sen estokaista. Jos käyttäjä valitsee matalataajuusoskillaattori ohjauksen, hän valitsee kaksoispotentiometrin tilalle jänniteohjatut vastukset. Jänniteohjatut vastukset on toteutettu H11F1M komponenteilla. H11F1M on optoerotin, jonka lähtöpuolella on FET. H11F1M-komponenttia ohjataan matalataajuusoskillaattorilla, jolloin optoerottimesta tulee jänniteohjattu vastus. Optoerotin ohjaukseen päädyttiin, koska haluttiin galvaaninen erotus suotimelle ja matalataajuusoskillaattorille. Tämä mahdollistaa sen, että matalataajuusoskillaattorin signaali ei aiheuta vuotovirtoja suotimen toimintaan.

#### 4.4 Matalataajuusoskillaattorit



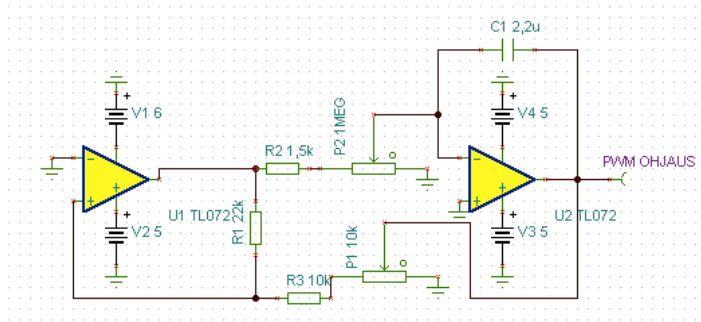
Kuva 24. Suotimen ohjaukseen tarkoitettu matalataajuusoskillaattori. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina ohjelmasta. [19, s. 871 – 872]

Suotimen estokaistan ohjauksen matalataajuusoskillaattori on sama kytkentä kuin sinioskillaattorissa. Kuvan 24 kytkennässä käyttäjällä on mahdollisuus vaikuttaa taajuuteen potentiometrillä. Tällöin oskillaattorin amplitudi ei pysy vakiona. Kompensaatioksi kytkennän kosini lähdön ja H11F1M ledin välillä on 10k $\Omega$ :n potentiometri, jolloin käyttäjä voi vaikuttaa H11F1M ledin virtaan.

Tämä puolestaan vaikuttaa siihen, kuinka laajalla alueella jänniteohjattu vastus vaihtaa vastusarvoaan. Vaikka matalataajuusoskillaattorin amplitudi vaihtelee, on käyttäjällä kuitenkin mahdollisuus säätää oskillaation amplitudin vaikutusta rajataajuuden ohjaukseen säätämällä ledin ohjausvirtaa. Vaihtoehtona pohdittiin myös AGC-piirin lisäämistä matalataajuusoskillaattorille, jolloin sen amplitudi säätäisi automaattisesti riippumatta käyttäjän toimista. Tästä kuitenkin luovuttiin, koska AGC-piiri olisi lisännyt kokonaiskytkennän komponenttien määrää huomattavasti ja toisaalta ohjaussignaali olisi saattanut säröytyä helposti.

Kytkenästä otetaan kontrollisignaaliaksi kosini sinin sijaan. Sen amplitudi kasvaa, kun käyttäjä laskee kytkennän taajuutta, päinvastoin kuin sinilähtö. Oskillaattorin säädettäväksi taajuusalueeksi muodostuu:  $f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 47k\Omega * 1,047M\Omega * 2,2\mu F} = 0,06 - 1,54 \text{ Hz}$ . [19, s. 871 – 872]



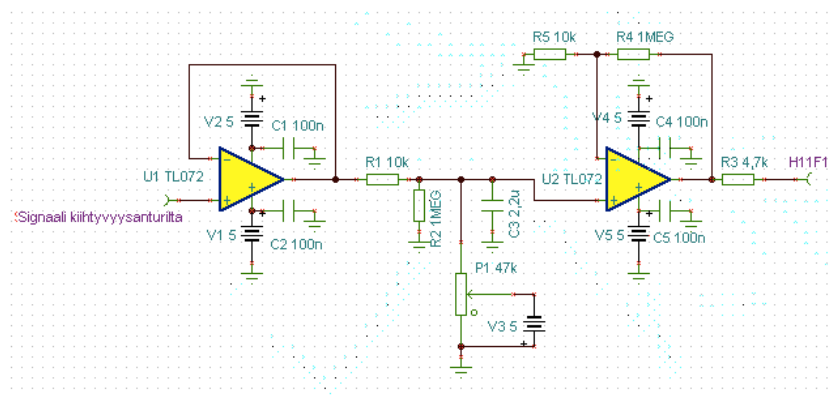


Kuva 25. Matalataajuusoskillaattori pulssisuhteen ohjausta varten. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [19]

PWM-signaalia varten pulssisuhdetta ohjataan matalataajuusoskillaattorilla. Matalataajuusoskillaattorin aaltomuoto on kolmio. Kolmioaalto haluttiin siksi, jotta pulssisuhteen muutos olisi mahdollisimman lineaarista. Kytkennässä hyödynnetään komparaattoria ja integraattoria. Kytkennässä oleva  $P_2$  on hallintapaneelissa oleva potentiometri, jolla käyttäjä voi ohjata matalataajuusoskillaattorin taajuutta, joka määrää PWM-signaalin pulssisuhteen muutosnopeuden. Lähdön ja pulssi/PWM piirin komparaattorin välillä on  $100k\Omega$ :n vastus, jolloin käyttäjällä on mahdollisuus säätää lähtösignaalin amplitudia, joka vaikuttaa PWM-signaalin pulssisuhteen muutosnopeuteen. Kuvan 25 kytkennän taajuuden voi esittää muodossa:  $f = \frac{1}{4(R_1+P_2)C_1} \left( \frac{R_2}{R_3+P_1} \right)$ . [22,32]

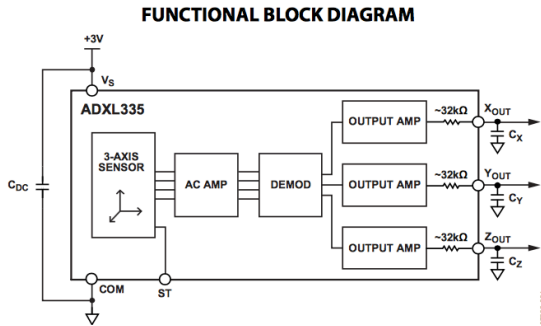
Jos  $P_1 = 10k\Omega$ , tällöin taajuusalueeksi muodostuu  $0,12 \dots 83,3$  Hz. Testien perusteella lähtösignaali ei ole täydellinen kolmioaalto.

#### 4.5 Kiihtyvyyssanturin käyttö jänniteohjaimena



Kuva 26. Puskurointi, - ja vahvistinpiiri kiihtyvyyssanturin signaalille. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5, s. 489 - 490]

Kiihtyvyyssanturiksi valittiin analoginen Analog Devices ADXL335 kiihtyvyyssanturi. Sen Y-lähtöä käytetään kontrollisignaalinä jänniteohjatuille vahvistimille. Kiihtyvyyssanturi on sijoitettu koskettimen päähän.



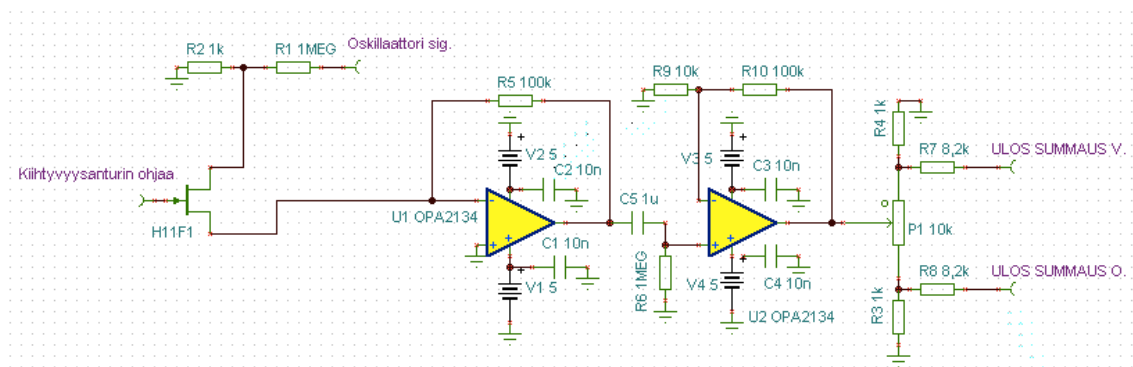
Kuva 27. Kiihtyvyyssanturi ADXL335 sisäinen kytkentä. [8]

Kuvassa 27 kiihtyvyyssanturin Y-lähdössä oleva 32kΩ:n vastus ja  $C_y$ , muodostavat alipäästösuotimen. Alarajataajuus määritellään  $\frac{1}{(2\pi(32k\Omega))} (C_y)$  avulla. Kytkentään valittiin 100nF  $C_y$ -kondensaattori, jolloin alarajataajuudeksi muodostui 50 Hz. [8]

Tämä osoittautui kosketintestien perusteella sopivaksi herkkyudeksi. Korkeammalla alarajataajuudella kytkentä oli liian herkkä ja myös häiriöt lisääntyivät kontrollisignaalisissa. Kuvassa 26 anturin jännitemuutos puskuroidaan ei-invertoivalla jänniteseuraajalla, jolloin kiihtyvyyssanturia ei kuormiteta. [5, s. 478 – 480, 8]

Seuraavaksi signaali biasoidaan jännitejako piirissä  $P_1$ :den avulla n. 0V:n tasolle. Kytkennän  $C_3$  auttaa suodattamaan nopeita muutoksia. Toisaalta se toimii myös energiavaraustona jännitemuutoksille. Biasointi on tarpeellinen, sillä kiihtyvyyssanturien fyysinen sijainti koskettimien päällä ei ole vakio. Ilman biasointia kiihtyvyyssanturien signaalien perustaso vaihtelisi, aiheuttaen sen, että jokainen kosketin toimisi omalla toiminta-alueellaan. Lopuksi kiihtyvyyssanturin maksimissaan noin 20mV:n signaali vahvistetaan ei-invertoivan vahvistimen avulla ja jonka jännitevahvistus on  $-\frac{1M\Omega}{10k\Omega} = -100$ . Tällöin lähtöjännite vaihtelee välillä 0-2V, ja  $U_2$  lähtövirta vaihtelee välillä 0...426μA. [5, s. 478 – 480, 8]

#### 4.6 Jänniteohjattu vahvistin



Kuva 28. Jänniteohjattu vahvistin, jossa stereolähtö. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5, s. 480 - 490]

Tavoitteisiin kuului se, että soittimesta tulisi dynaaminen. Koskettimistosta haluttiin kosketusherkkä, joka mahdollistaa dynaamisen soittotuntuman. Jokaisesta nuotista haluttiin dynamiikaltaan itsenäisesti käyttäytyvä. Kuvassa 28 on jänniteohjattu vahvistin. Tästä syystä jänniteohjattuja vahvistimia on jokaiselle koskettimelle erikseen. Yhteensä vahvistimia on 13. Näiden vahvistimien signaalit viedään summauspiirille. Katsottiin, että normaalitilanteessa, jolloin koskettimia ei paineta, tulee summauspiirin lähdön tason olla noin -90dBFS tasolla. Tulosignaali asetettiin -30dBFS tasolle. Signaali vaimennetaan  $R_1$ :den ja  $R_2$ :den avulla -90dBFS tasolle. Optoerotin toimii kytkennässä jänniteohjattuna vastuksena. Kun ohjausjännitettä ei ole, optoerotin vastusarvo on n.300M $\Omega$ . [8]

Ohjausjännitteen kasvaessa optoerotin vastusarvo putoaa. Optoerotin käyttäytyminen ohjaa ensimmäisen invertoivan vahvistimen käytöstä. [5, s. 480 – 490]

Kiihtyvyyssanturin vahvistettu signaali vaihtelee 0...2V:n välillä. Kytkennästä poiketen, kiihtyvyyssanturin ledin ohjaukseen ei käytetty kiinteää 4,7k $\Omega$  vastusta vaan 10k $\Omega$  trimmeripotentimetriä. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska koskettimiin kiinnitettyjen kiihtyvyyssanturien liikerata ei ollut vakio. Tällöin kiinteällä vastusarvolla vahvistus jäi liian pieneksi osalla koskettimista. [5, s. 478 – 480]

Vaihtamalla trimmeripotentimetriin, liikeradan vaikutus pystyttiin minimoimaan ja kaikkien koskettimien vahvistuksesta tuli samankaltainen. Koska tarvittava maksimi vahvistus on 60dB, ei kaikkea vahvistusta haluttu jättää ensimmäiselle asteelle. Testeissä osoittautui, että kahdella vahvistimella toteutettuna kokonaisvahvistus on särö vapaampi

ja myös kohinataso jäi alhaisemmalle tasolle. Ensimmäisen asteen vahvistukseksi haluttiin 40dB ja 2.asteen 20dB.  $U_1$ :n vahvistus on  $-\frac{R_5}{R_{tulo}}$ , jossa  $R_{tulo} = (R_2 + H11F1[\Omega])$ . [5, s. 478 – 480]

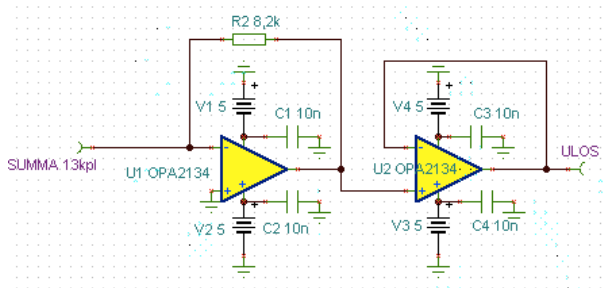
Seuraavan vahvistinasteen välissä on DC-suodatus ja samalla kytkentä toimii myös yli- päästösuotimena, jonka  $f_c = \frac{1}{2\pi R_6 C_5} = 0,16\text{Hz}$ . [20, s. 987 – 988]

$U_2$  on ei-invertoiva vahvistin ja jonka vahvistus noudattaa  $1 + \frac{R_{10}}{R_9} = 10 = 20\text{dB}$ .  $U_2$ :den lähdössä oleva potentiometri on hallintapaneelissa oleva potentiometri, jolla käyttäjä voi ohjata vahvistimen signaalin vasempaan tai oikeaan summauspiiriin. Stereoerottelu kyvyksi haluttiin vähintään 20dBFS. [5, s. 487 – 489]

Esimerkiksi jos potentiometri  $P_1$  on ääriasennossa, jolloin sen vastusarvo on 10k $\Omega$ . Oletetaan että tulosignaali on 1V<sub>pp</sub> siniaalto ja analysoidaan vasen kanava. Nyt  $Z_{theveninVAS} = R_7 + \frac{P_1 R_4}{P_1 + R_4} = 9109\Omega$ . Vasemman summauspiirin tulossa on signaali  $U_{thVAS} = \frac{1V * 1000\Omega}{10000\Omega + 1000\Omega} = 0,09V$  ja vasemman summauspiirin lähdössä on signaali  $-\frac{8,2k\Omega}{9109\Omega} * 0,09V = -81\text{mV}$ . Samaan aikaan oikeassa kanavassa  $Z_{theveninOIK} = R_8 + \frac{P_1 R_3}{P_1 + R_3} = 8201\Omega$ . Nyt  $U_{thOIK} = \frac{1V * 1000\Omega}{0 + 1000\Omega} = 1V$  ja oikean summauspiirin lähdössä on  $-\frac{8,2k\Omega}{8201\Omega} * 1V = -0,998... = -1V$ .

Tällöin vasemman kanavan signaali on  $20\log(81\text{mV}) = -21,8\text{dB}$  matalammalla tasolla verrattuna oikeaan kanavaan. Kun potentiometri  $P_1$  on keskiasennossa, jakaantuu signaali molempiin kanaviin tasan. Tällöin molemmissa kanavissa:  $Z_b = R_7 + \frac{P_1 R_4}{P_1 + R_4} = 9033\Omega$ . Nyt  $U_b = \frac{1V * 1000\Omega}{5000\Omega + 1000\Omega} = 0,17V$  ja summainpiirien lähdössä  $-\frac{8,2k\Omega}{9033\Omega} * 0,17V = -0,15V$ . [20, s. 843 – 855]

## 4.7 Summauspiiri



Kuva 29. Summauspiiri, vasen tai oikea kanava. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin Tina-ohjelmasta. [5, s. 480 - 490]

Haluttu polyfonia on 13 ääntä. Tämä asetti haasteen: mikä olisi sopiva taso yksittäiselle signaalille ja mikä olisi sopiva taso silloin, kun käyttäjä ylioittaa kaikkia 13:a signaalia. Referenssiksi asetettiin yksittäisen sinisignaalin -30 dBFS taso. SYNA:an haluttiin stereolähtö. Tästä syystä päädyttiin ratkaisuun, että summauspiirejä on kaksi, vasen kanava ja oikea kanava. Kuvassa 29 on käytetty kytkentä summauspiirille.

Jos kaikki aaltomuodot ovat siniaaltoja ja niiden amplitudi on  $1U_{pp}$ . Jos sinien taajuudet ovat  $C_3 - C_4$  nuottien välinen alue ja niiden vaihe olisi sama. Ja jos kaikki signaalit on summattu vasempaan kanavaan, on summasignaali tällöin:  $-\frac{R_f}{R_x}(U_1 + U_2 + \dots + U_{13})$ , jossa  $R_x = Z_{theveninVAS}$ , kuten aikaisemmin esitetty. [20, s. 148 -149]

Käytännössä summattavien signaalien amplitudi ja vaihe eivät ole samoja. Myös jokaisen edellisen asteen  $Z_{thevenin}$  vaihtelee. Tällöin parempi approksimaatio lähtösignaalista olisi skaalavan summaimen mukainen:  $U_{ulosV} = -\left(\frac{R_f}{Z_{thevenin1}}U_1 + \frac{R_f}{Z_{thevenin2}}U_2 + \dots + \frac{R_f}{Z_{thevenin2}}U_{13}\right)$  [20, s. 148 - 149]

## 4.8 Teholähde

Kytkeäntöjen toiminta on herkkä käyttöjännitteen muutoksille. Käytettyjen kytkentöjen suunniteltiin olevan sellaiset, että ne kuormittavat teholähdettä vakiokuormalla. Toisin sanoen, kaikki kytkennät ovat aina päällä. Suunnittelussa päädyttiin ratkaisuun, jossa piirilevyjen käyttöjännitteet tulevat lineaaristen regulaattorien kautta. Oskillaattorikortit käyttävät omia +5 ja -6V linjoja, vahvistimet omia  $\pm 5V$  linjoja ja kiihtyvyyssanturi omaa

+3V linjaa. Tällä ratkaisulla pyrittiin maksimoimaan käyttöjännitteiden stabiilius erityisesti oskillaatiokorteille. Testien perusteella oskillaatiokorttien virran tarve +5V linjalla on noin 430 mA ja -6V linjalla 540 mA. Jänniteohjattujen vahvistimien ja summauspiirin +5V linjan virran tarve on noin 120 mA ja -5V linjan noin 120mA. Kiihtyvyyssanturin +3V linjan virran tarve on pieni, alle 5 mA.

Jännitelinjoille sopiviksi regulaattori- ja piireiksi valittiin LM317 ja LM337 lineaariset regulaattorit. Niiden maksimivirran anto on 1,5 A per regulaattori. Regulaattorikortti kytketään 230V sähköverkkoon ulkoisten 9V hakkuri teholähteiden avulla. Niiden antovirta on 1,9A ja antoteho 17W. Rippelijännite on < 200mV. Hakkurilähteet tuottavat häiriöitä käyttöjännitteeseen. Lineaarisen piirin suodatinkondensaattorien katsottiin olevan riittävä suoja hakkurilähteiden tuottamia häiriöitä vastaan. [30, 31]

#### 4.9 Komponenteista

Suunnittelussa pyrittiin välttämään elektrolyyttikondensaattoreita. Niiden huonoihin ominaisuuksiin kuuluu se, että ne kuivuvat ajan myötä. Sen sijaan pyrittiin käyttämään ke-raamisia kondensaattoreita, joiden elinikä odote on elektrolyyttikondensaattoria pidempi. Vastuksina pyrittiin käyttämään metallikalvovastuksia. Vastusarvot pyrittiin pitämään välillä 1k $\Omega$  – 100k $\Omega$ . Vahvistimessa testattiin myös tehonkestoltaan suurempia vastuksia, mutta niiden vaikutus kohinasossa jäi mittaustulosten ulkopuolelle.

## 5 RAKENNUS

### 5.1 Elektroniikka

Piirilevyt tehtiin kaksipuolisesti kuparoiduille lasikuitu/epoksi levyille. Käyttöjännite, - ja maavedot on sijoitettu eri puolille levyä ja yritetty pitää samassa linjassa keskenään. Kaikki piirilevyjen komponentit on juotettu käsin ja kaikki johdotukset on tehty käsin.

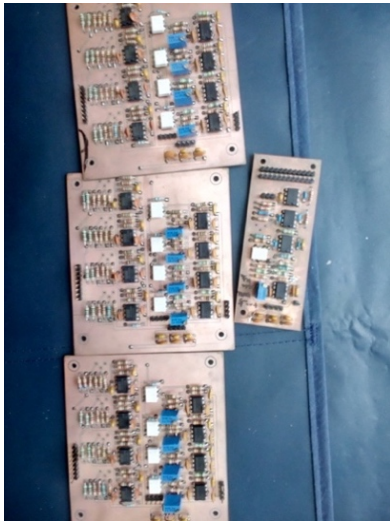
#### 5.1.1 Oskillaattori- ja suodinpiirilevy

Oskillaattori- ja suodinpiirilevyjä valmistettiin 13. Hallintapaneelin potentiometrit ja kytkimet yhdistettiin piirilevyyn kahden 19-paikkaisen D-liittimen avulla.



Kuva 30. Valmis oskillaattori- ja suodinkortti.

### 5.1.2 Vahvistin ja summauspiirilevy



Kuva 31. Jänniteohjattuja vahvistimia sekä summauspiirilevy.

Vahvistinkortteja valmistettiin 4. Pienimmässä vahvistinkortissa on yksi jänniteohjattu vahvistin ja summauspiiri. Muissa korteissa on neljä jänniteohjattuja vahvistimia. Vahvistinkortteihin liitetään signaalit oskillaatiokorteilta. Vahvistimien ohjauksiin tarkoitetut signaalit tulevat kiihtyvyyssantureilta. Jokaisessa isommassa vahvistinkortissa on stereolähdöt. Stereolähdöt yhdistetään pienimpään vahvistinkorttilevyyn summausta varten. Korttien väliset liitokset on toteutettu riviliittimien ja  $0,2\text{mm}^2$ :n johtojen avulla. Summauskortilta signaali otetaan ulos kahteen  $6,3\text{mm}$  monoliittimeen  $0,2\text{mm}^2$ :n johtojen avulla.

### 5.1.3 Kiihtyvyyssanturipiirilevy

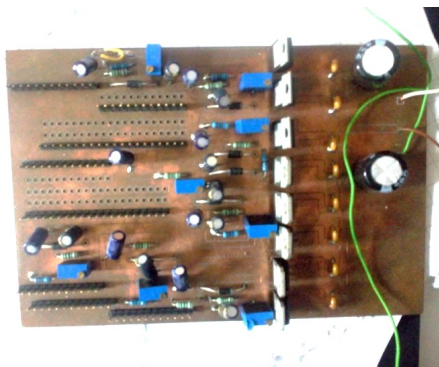
Kiihtyvyyssanturipiirin valmistuksessa suurimmaksi esteeksi osoittautui anturin matala juotoslämpökestoisuus. Sallittu maksimi juotoslämpötila on  $150\text{ °C}$  3:n sekunnin ajan. Myös anturin pieni fyysinen koko asetti haasteita. Myös piirin juotostäplien pienuus ja niiden sijoittelu piirin alapuolelle asettivat haasteita. Tavallisella juottimella ja tinalla anturia ei voinut liittää piirilevyyn.

Ratkaisuksi ongelmaan löytyi matalan lämpötilan juotospasta, jonka avulla piirin liittäminen piirilevyyn onnistui. Juotospasta levitettiin piirilevyille hammastikun avulla ja pasta lämmitettiin lämpöpuhaltimen avulla. Tällöin juotospastan lämmitessä pastan kapillaari-



ilmiö veti anturin oikealle paikalleen. Työvaihe oli haastava. Kiihtyvyyssanturit kiinnitettiin koskettimien päässä oleville metallialustoille polyuretaanimassan avulla.

#### 5.1.4 Teholähde



Kuva 32. Käytetty teholähde.

Testeissä käytössä ollut teholähde muokattiin siten, että kuvassa olevalta teholähteeltä ylimääräisiä regulaattoreita poistettiin. Jäljelle jäivät +3V linja kiihtyvyyssantureita varten,  $\pm 5V$  vahvistimia varten ja +5V ja -6V linjat oskillaattorikortteja varten. Kaikki regulaattorit ovat LM317 tai LM337 tyyppisiä. Piirilevyn pääjännite tulonastat on liitetty rungossa oleviin liitimiin, joihin kytketään ulkoiset hakkurijännitelähteet.

#### 5.2 Kotelon rakennus

Kotelon rakennus jakaantui valmistuksessa kolmeen osioon. Hallintapaneeli, koskettimet ja runko. Kaikki rakenteet on valmistettu käsityönä.

##### 5.2.1 Runko

Rungon valmistuksessa käytettiin 0,8mm:n teräslevyä. Se leikattiin mitoitetuiksi paloiksi ja rakenteessa tarvittavat kulmat valssattiin. Palat liitettiin yhteen pistehitsaamalla. Rungon takaseinään kiinnitettiin puulistat oskillaattoripiirilevyjen kiinnitystä varten. Lisäksi jälkiasennuksena porattiin runkoon reiät tarvittavia johdotuksia varten. Koristelua varten runkoon lisättiin puulistat jälkiasennuksena.



Kuva 33. Rungon valmistusta ja koskettimien sovitusta.

### 5.2.2 Koskettimet

Koskettimet rakennettiin mäntypuusta sen hinnan ja saatavuuden vuoksi. Koskettimien sahaus suoritettiin vannesahalla. Maalaus tehtiin mattamaalilla ja maalin päälle laitettiin lakkaa. Koskettimet on kiinnitetty samaan akseliin toisesta päästään. Koskettimiin on myös lisätty metalliliuskat kiihtyvyyssantureita varten.



Kuva 34. Valmis koskettimisto.

### 5.2.3 Grafiikka

Grafiikka tehtiin Front Panel Designer-ohjelman ja GIMP-ohjelman avulla. Grafiikan käyttötarkoitus on antaa käyttäjälle informaatiota siitä, että mihin parametreihin kytkimet ja

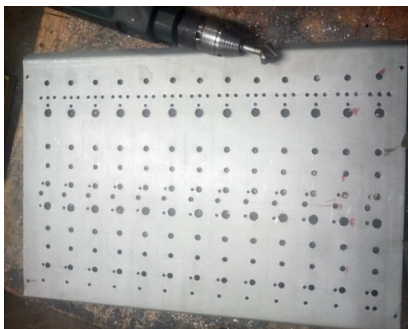
potentiometrit on linkitetty. Aluksi ajatuksena oli tehdä grafiikka siten, että ensin tehtäisiin sapluuna ja grafiikka maalattaisiin sapluunan avulla. Grafiikan tulostaminen A4-paperille ja paperin laminoiminen osoittautui kuitenkin käytännöllisemmäksi ratkaisuksi. Lisäksi grafiikan uusiminen on helpompaa laminoitun paperin avulla. Grafiikka liitettäisiin hallintapaneeliin. Front Panel Designer ohjelman avulla mitoitettiin kytkimien ja potentiometrien reikien sijainnit tarkasti ja reikien koot määriteltiin käytettyjen kytkimien ja potentiometrien datalehtien perusteella. GIMP-ohjelman avulla tehtiin tekstit ja grafiikka.



Kuva 35. Hallintapaneelin grafiikkaa laminoituilla papereilla.

#### 5.2.4 Hallintapaneeli

Hallintapaneeli tehtiin 0,8mm:n paksuisesta teräslevystä. Kytkimiä ja potentiometrejä varten porattiin 234 reikää. Poraus tehtiin käsiporalla ja porauksesta syntyneet jäysteet poistettiin käsiporalla.

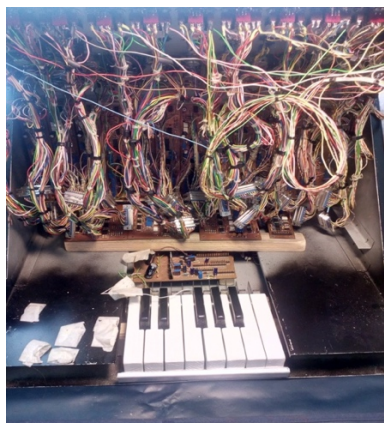


Kuva 36. Hallintapaneelin reikien poraus.

Yhden äänen parametrien ohjaamiseen käytetään neljää kytkintä ja yhdeksää potentiometriä. Ääniä on 13 kappaletta. Yhteensä kytkimiä ja potentiometrejä kertyi 169 kappaletta. Osa potentiometreistä ja kytkimistä kiinnitettiin levyyn mutterien avulla. Osa potentiometreistä liimattiin kiinni levyyn polyuretaanimassalla. Levyn reikien poraamisessa ilmeni mielenkiintoinen ilmiö metallilevyssä. Riittävä määrä reikiä levyssä aiheutti levyn pintajännitteen purkaantumista. Tästä ilmiöstä johtuen levy alkoi taipua reikien poraamisen yhteydessä. Ratkaisuksi riitti se, että levy kiinnitettiin tukevasti kiinni porausalustaan ja lisäksi reunojen päälle asetettiin painoja levyn taipumisen ehkäisemiseksi.

### 5.2.5 Johdotus

Yksittäisen oskillaatio/suodin kortin johtojen määrä on 81 kpl. Oskillaatiokortteja on 13. Keskimääräinen johdon pituus on n.15 cm. Johdotustyöhön käytetty työaika oli n. 80 tuntia. Johdotusratkaisu ei ole millään tavalla käytännöllinen, eikä häiriöiden minimoinnin kannalta ideaalinen.



Kuva 37. Johdotustyö lähes valmis.

## 6 VALMIIN ELEKTRONIIKAN TESTAUS

### 6.1 Elektroniikka

Elektroniikka testattiin kahdessa eri vaiheessa. Yksittäiset kytkennät testattiin koekytken-taalustalla ennen piirilevyn valmistusta. Piirilevyn valmistuksen jälkeen testattiin piirilevyn toiminta. Laajempaa kokonaisuutta ei voitu testata ennen piirilevyjen valmistumista, joten testaustyö jakaantui pitkälle ajalle ja useisiin eri osa-alueisiin.

Testaukseen käytettiin Steinberg CI1-äänikorttia. Äänikortin sisääntulo impedanssitaso on  $500\Omega$ , ja SYNA:n lähdössä oleva OPA2134-lähtöimpedanssi on noin  $600\Omega$ . Signaali näytteistettiin 44,1 kHz:n taajuudella ja 24 bitin syvyydellä.

Kun oskillaattorikortteja viritettiin, käytettiin Voxengo SPAN nimistä VST-ohjelmaa, jolla onnistui lähes reaaliaikainen spektrianalyysi. Lisäksi toisena referenssinä taajuusanalyysille käytettiin Audacity nimisen ohjelman spektrianalyysiaattoria. Audacity-ohjelman analyysi ei ole reaaliaikaista. Lisäksi käytössä oli AudioXplorer-ohjelma aikataason analyysiä varten. Lisäksi testeissä käytettiin oskilloskooppia.

#### 6.1.1 Oskillaattorit

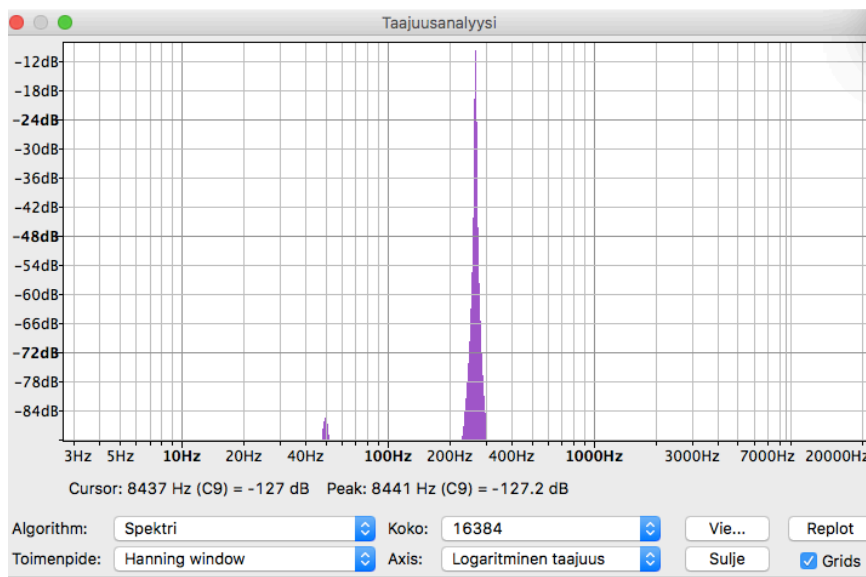
Oskillaattoreista testattiin niiden stabiilius ja nauhoitetusta datasta analysoitiin kerrannaistaajuuksien amplitudit. Stabiiliustestissä SYNA:n annettiin olla käynnissä n. 30 minuuttia ja oskillaattorien taajuutta verrattiin alkutilanteeseen ja nuotin ideaaliseen referenssitaajuuteen. Oskillaattoritestit tehty siten, että käytössä ollut ainoastaan oskillaattorikortti, erillinen jännitelähde ja testiolosuhteet olivat täysin ideaaliset. Valmiissa SYNA:ssa esimerkiksi käyttöjännitteiden säätäminen on hankalaa, jolloin testitulokset poikkeavat lopullisesta.

Sinioskillaattorin suurin ongelma testatessa oli löytää sopiva suhde vahvistuksen ja taajuuden välille. Liian suuri vahvistus kasvattaa säröjen määrää mutta oskillaatio on vireeltään stabiilimpi. Liian pieni vahvistus on säröjen kannalta parempi mutta vireen stabiilius on huonompi. Lisäksi havaittiin se, että väärillä sinioskillaattorin potentiometri arvoilla seuraavan asteen kanttiaallon komparaattori lakkasi toimimasta. Sinioskillaattorin taa-

juus pysyi mittaussession aikana, n. 30 minuuttia,  $\pm 1$  Hertsin sisällä 261,63 Hertsin alueella. Testaustuloksia tehtiin jokaisen äänen kohdalla erikseen. Havaittu se, että suurin eroavaisuus eri sinioskillaattorien välillä on harmonisten kerrannaisten amplitudeissa. Kuvassa 38 ja taulukossa 3 esitetty C<sub>3</sub>-nuotin testaustuloksia.

Taulukko 3. Sinioskillaattorin harmonisten kerrannaistaajuuksien mittaaminen.

Taajuus (Hz)	Taso (dBFS)	Ideaalinen (dBFS)
261,63	-8,1	-8,1
523,26	-86,2	-
784,89	-87,4	-
1046,52	-107,8	-

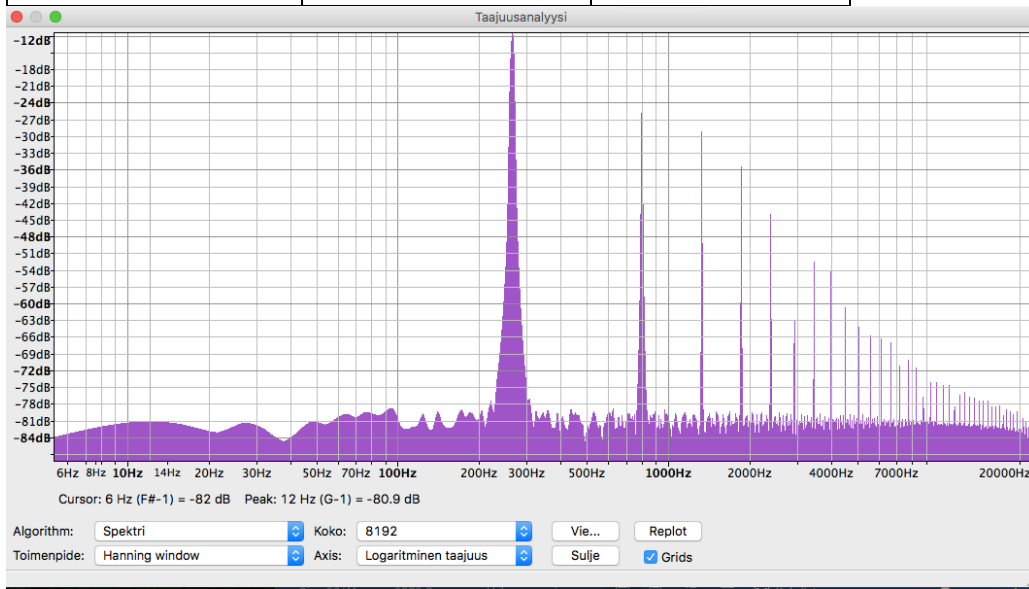


Kuva 38. Sini, 261,63 Hz taajuusanalyysi. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

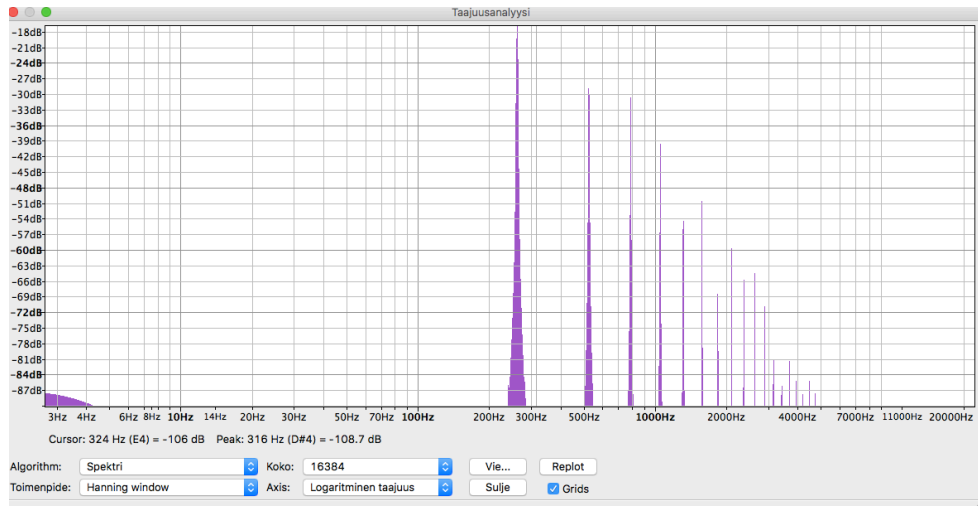
Kanttiaallon suurin ongelma oli TL072-operaatiovahvistimen käyttöjännitteet. Kanttiaallon parillisten harmonisten kannalta sopivaksi suhteeksi muodostui -5V:n ja +6V:n käyttöjännitteet. Havaittiin se, että parillisten kerrannaistaajuuksien amplitudi kasvaa taajuuden kasvaessa. Myös käyttöjännitteen ja komparaattorin toimintapisteiden säädöllä havaittiin merkittävä vaikutus parillisten kerrannaistaajuuksien amplitudiin. Testaustulokset taulukossa 4 ja kuvassa 39.

Taulukko 4. Kantiaalto, 261,63, harmonisten kerrannaisten mittaus.

Taajuus (Hz) (C4-nuotti)	Taso (dBFS)	Ideaalinen (dBFS)
261,63	-11,5	-11,5
523,26	-80,6	-
784,89	-21,0	-21.04
1046,52	-81,6	-
1308,15	-25,9	-25.48



Kuva 39. Kantiaallon 261,63 Hz taajuusanalyysi. Signaali nauhoitettu muita oskillaatioita korkeammalla tasolla, joka näkyy myös kohinatason korkeampana tasona. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]



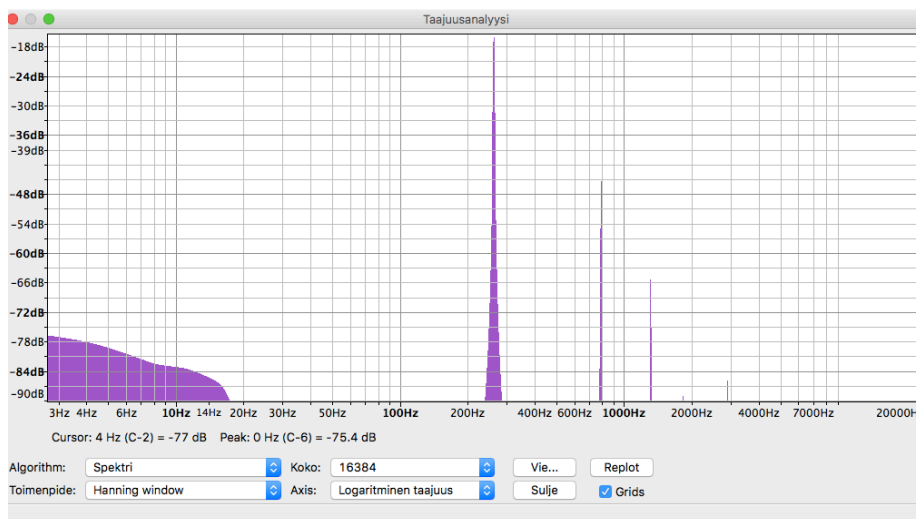
Kuva 40. Saha-aallon 261,63 Hz taajuusanalyysi. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

Taulukko 5. Sahalaita-aalto, 261,63 Hz, harmonisten kerrannaisten mittaus.

Taajuus (Hz) (C4-nuotti)	Taso (dBFS)	Ideaalinen (dBFS)
261,63	-17,0	-17,0
523,26	-23,1	-23.02
784,89	-26,7	-26.54
1046,52	-29,0	-29.04
1308,15	-31,7	-30.98

Sahalaita-aalto oskillaattorin kytkentää testattiin ilman  $R_5$  vastusta, mutta ilman sitä kondensaattorin purkaantuminen aiheutti melko korkeataajuisia häiriöitä.  $100\Omega$ :n  $R_5$  vastuksen kanssa kondensaattorin purkaantuminen alkoi olla liian hidasta, jolloin korkeammat kerrannaistaajuudet vaimentuivat liikaa. Kompromissiksi asettui 10 ohmin vastus. Ideaalisiin kerrannaistaajuuksien amplitudeihin verrattuna, korkeammat kerrannaistaajuudet poikkeavat ideaalisista enemmän kuin matalammat kerrannaistaajuudet. Kuvassa 40 ja taulukossa 5 sahalaita oskillaattorin testaustuloksia.



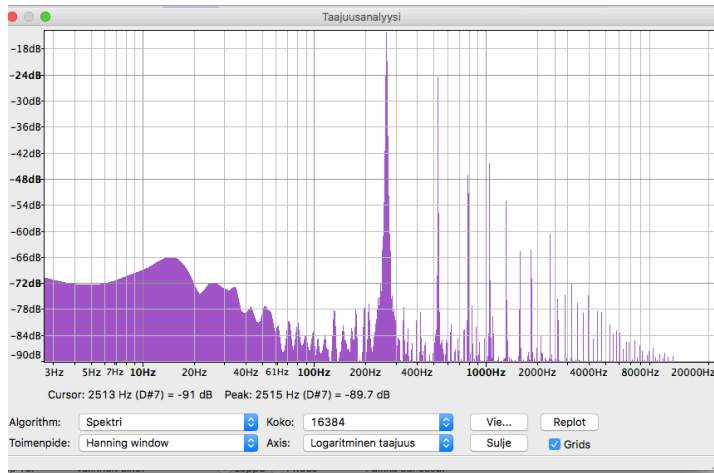


Kuva 41. Kolmioaallon 261,63 Hz taajuusanalyysi. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

Taulukko 6. Kolmioaalto, 261,63 Hz, harmonisten kerrannaisten mittaus.

Taajuus (Hertsi)	Taso (dBFS)	Ideaalinen (dBFS)
261,63	-15,6	-15,6
523,26	-96,7	$-\infty$
784,89	-34,6	-38.04
1046,52	-97,3	$-\infty$

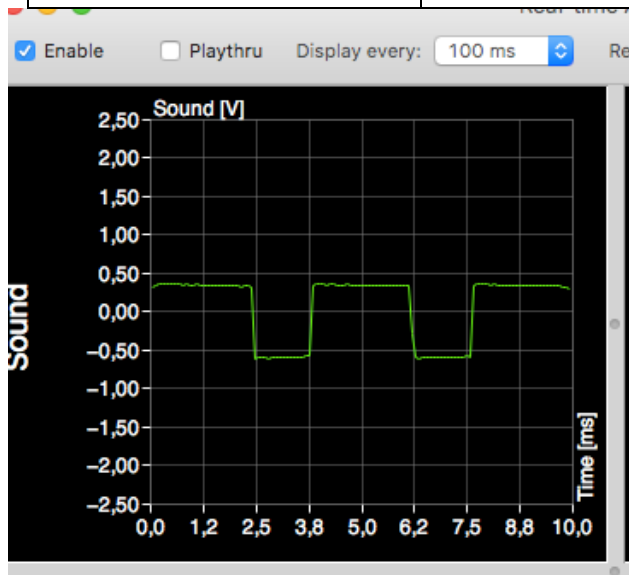
Huomioitavaa mittauksessa se, että kolmioaallon tapauksessa 3. harmoninen n.3,5dB korkeammalla tasolla verrattuna ideaaliseen. Kuvassa 41 ja taulukossa 6 on kolmioaallon testaustuloksia.



Kuva 42. Pulssi, jonka suhde 33% pos. / 67% neg. taajuusanalyysi. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

Taulukko 7. Pulssi, jonka pulssisuhde 33/67 taajuusanalyysi.

n	A (dBFS)
1	-12,7
2	-21,0
3	-30,2
4	-24,3
5	-33,8



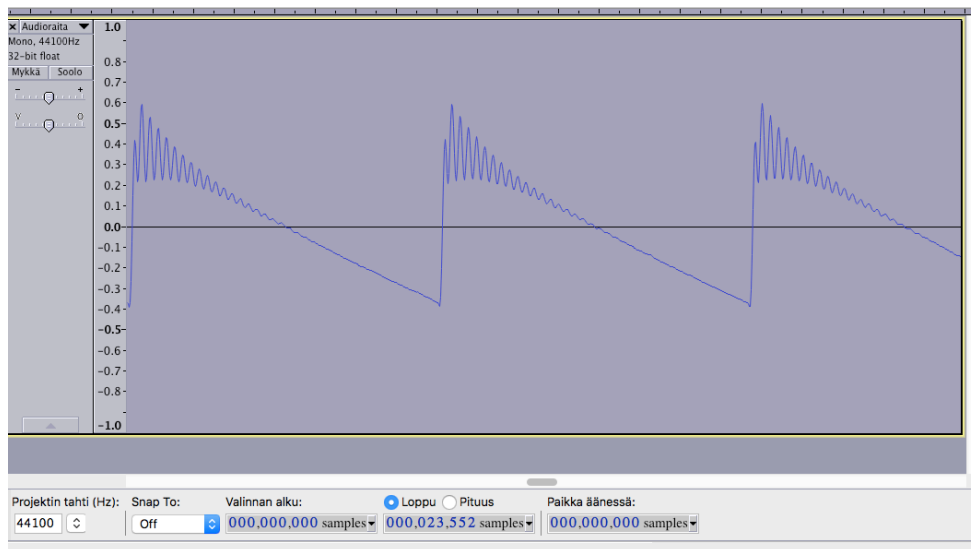
Kuva 43. Pulssi 33 % / 67 %, kuvakaappaus AudioXplorer-ohjelmasta. Huomioitavaa signaalin offset. [13]

Pulssiaallon 33 % / 67 % testaustuloksia kuvassa 43 ja taulukossa 7.

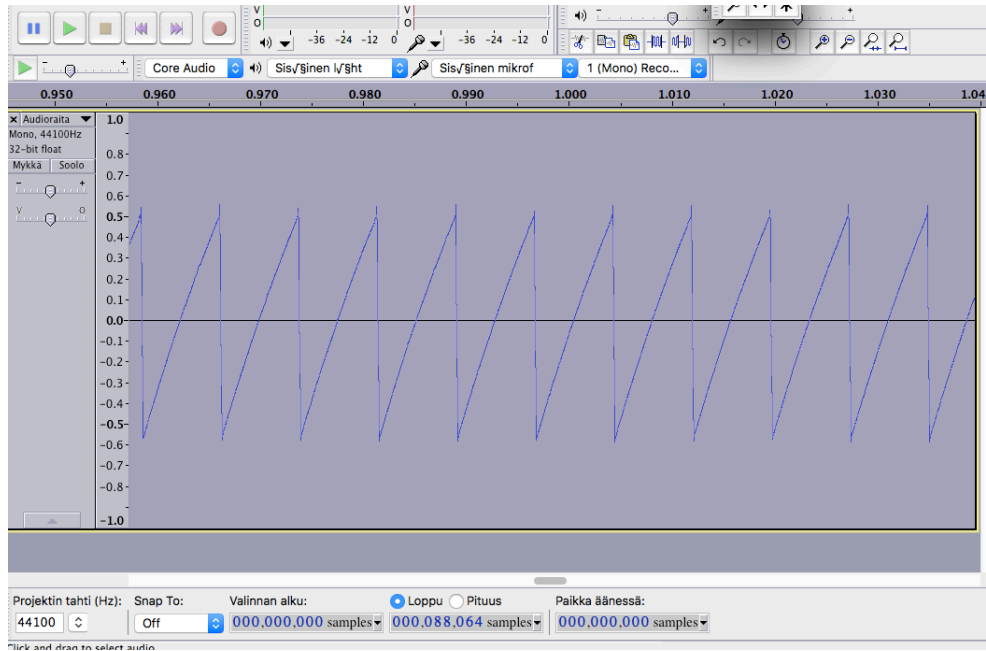
Matalataajuusoskillaattorien osalta suotimen ohjaukseen tarkoitetun oskillaattorin taajuuden säätöalueeksi tuli noin 0,6...2,08 Hz. PWM-signaalin ohjaukseen tarkoitetun matalataajuusoskillaattorin taajuuden säätöalueeksi muodostui noin 0,4 - 41,7 Hz. PWM-signaalin pulssisuhteet ohjautuvat suunnitellusti.

### 6.1.2 Suodin

Tilaa muuttavan suotimen testauksessa hyödynnettiin Audacity-ohjelman aikaikkunaa. Suotimesta testattiin sen estokaistan ohjaus potentiometrillä, hyvyyksluvun säätö potentiometrillä ja suotimen estokaistan matalataajuusoskillaattori ohjaus. Kuvissa 44 ja 45 esitetään alipäästösuotimen testaustuloksia. Kuvassa 46 esitetään ylipäästösuotimen testaustulosta ja kuvassa 47 kaistanpäästösuotimen testaustulosta. Taulukossa 8 esitetään sahalaita-aalto testin tuloksia.



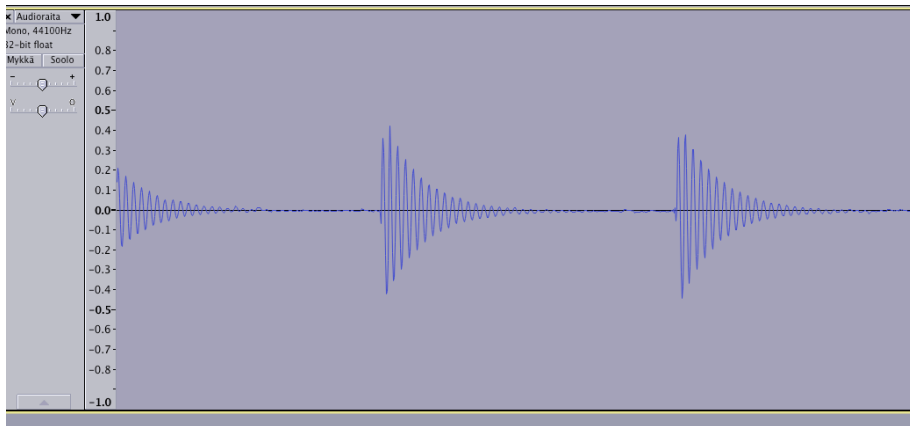
Kuva 44. Kuvassa sahalaita-aalto. C3-nuotti ja alipäästösuodin osittain auki. Suotimen Q-arvo maksimissaan. Huomattavaa signaalin vaiheen kääntymisen. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]



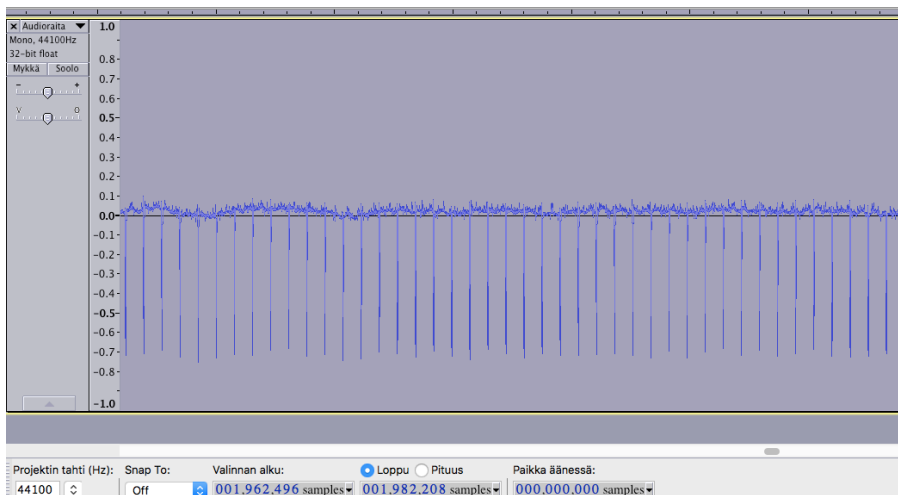
Kuva 45. Sama sahalaita-aalto, kun Q-arvo minimissään. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

Taulukko 8. Sahalaita-aalto, C3-nuotti, alipäästösuodin. Data normalisoitu -9,6dBFS tasoon.

n	Q minimi (dBFS)	Q maksimi (dBFS)
1	-9,6	-9,6
2	-15,6	-15,7
3	-18,8	-18,0
4	-21,8	-21,8
5	-23,8	-23,8



Kuva 46. Sahalaita-aalto,  $C_3$ -nuotti ajettu ylipäästösuotimen lävitse. Q-arvo maksimi. Signaali normalisoitu -15dBFS tasoon. Estokaista tuntematon. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]



Kuva 47. Sahalaita-aalto,  $C_3$ -nuotti ajettu kaistanpäästösuotimen lävitse. Q-arvo maksimi. Signaali normalisoitu -15dBFS tasoon. Päästökaista tuntematon. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

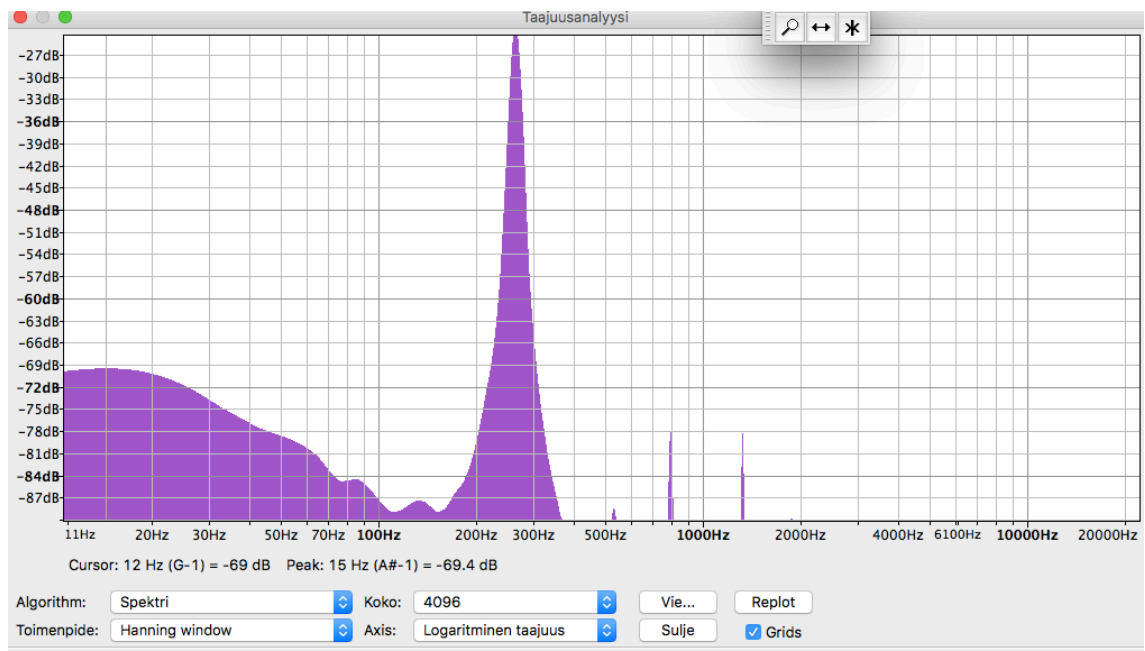
### 6.1.3 Jänniteohjattu vahvistin

Jänniteohjattu vahvistin toimii odotetusti. Pienellä, noin 10-asteen muutoksella kiihtyvyyssanturin Y-tasossa saadaan aikaan riittävä vahvistuksen muutos, noin 65 dBFS.

Taulukko 9. Vahvistimen THD-mittaus 4 ensimmäisen harmonisen osalta.

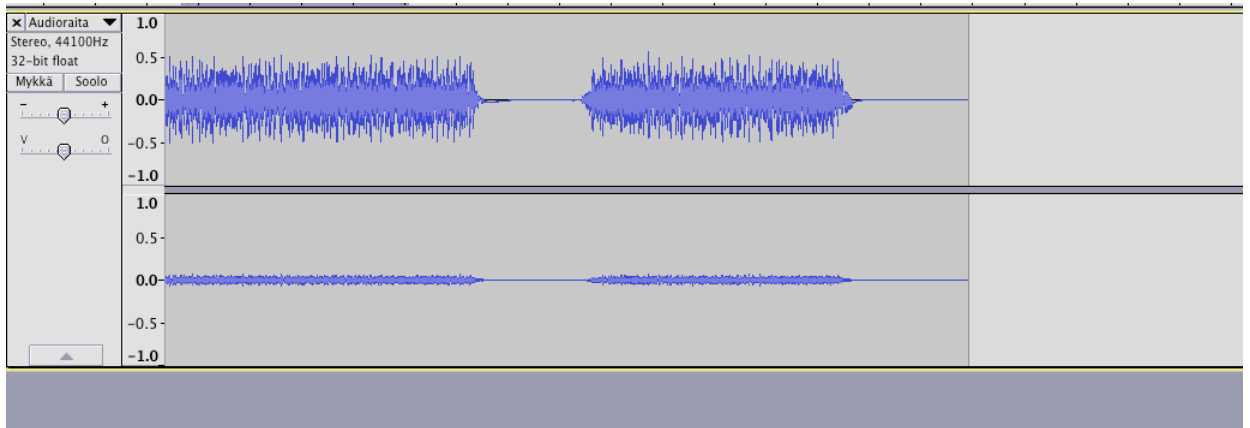
Sinioskillaattori (Hz) $C_4$ -nuotti	Mitattu (dBFS)	Ideaali (dBFS)
261,63	-23,1	-23,1
523,26	-88,2	-
784,89	-77,3	-
1046,52	-77,6	-

Vahvistimen testissä ajettiin  $C_4$ -nuotin sinioskillaattorin signaali siten, että vahvistus oli maksimi.

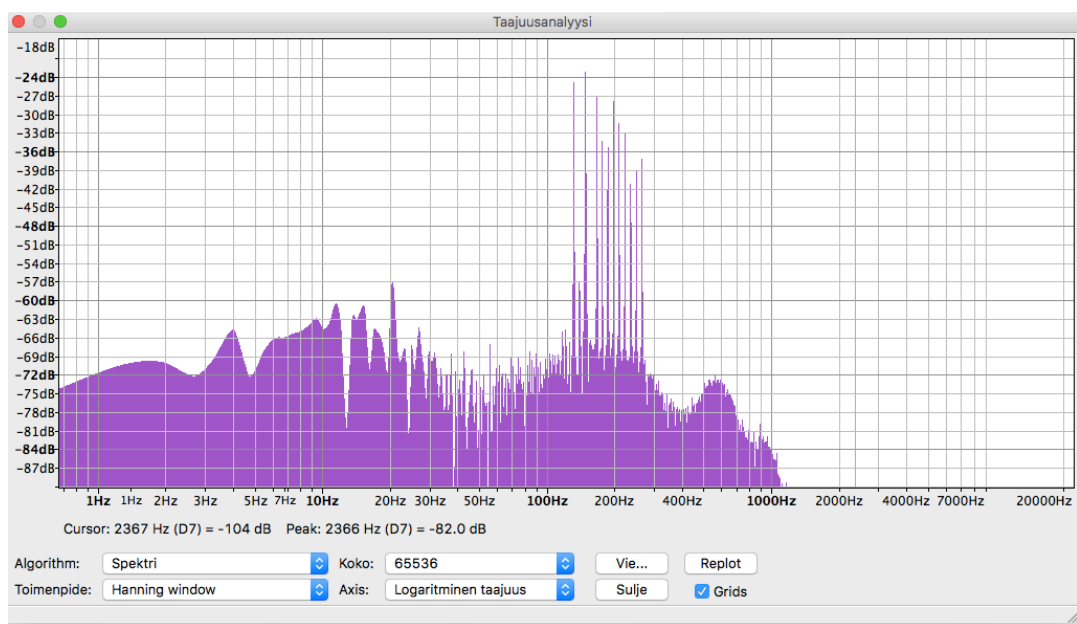


Kuva 48. Sinioskillaattorin ( $C_4$ ) spektri, kun oskillaattorisignaali ajettu vahvistimen läpi. Vahvistus maksimi. Huomioitavaa on matalataajuusoskillaattorin vuotaminen, joka -68dB tasolla. Myös 3. ja 4. kerrannaistaajuus korkeammalla tasolla. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

## 6.1.4 Summauspiiri



Kuva 49. Kahdentoista sinisignaalin summasignaali. Stereonauhoitus, jossa signaalit summattu kokonaan vasempaan kanavaan. [14]



Kuva 50. 12:sta sinisignaalin summaspektri. Kaikki signaalit summattu vasempaan kanavaan. Kuvakaappaus Audacity-ohjelmasta. [14]

12 sinisignaalin summaspektrissä on nähtävissä 130,81 – 261,63 Hertsin alueella hyötysignaalit. Nuottisignaalit ovat satunnaisesti summautuneet, jonka korkein amplitudi-  
piikki -17 dB tasolla ja matalin -23,5 dB tasolla. Kaikkien koskettimien asennot eivät ole vakiot, joten kaikkien oskillaatioiden vahvistus ei samalla tasolla.

400–1000 Hz:n taajuusalueella näkyvissä sinioskillaattorien kerrannaistaajuuksien aiheuttamaa taustamelua. Tämä taso jää -57...-80dB tasolle. Matalataajuus sinioskillaattorien signaalit vuotavat summasignaaliin, joka näkyy 1 Hz ...30 Hz alueella. Varsinainen kohinataso jää alle -90dB tason. Verrattaessa voimakkaimman signaalin, 17dBFS tasoa kohinatasoon, on signaalin S/N vähintään 73 dB. Kuitenkin, kun kaikkia 12 signaalia ajetaan yhtä aikaa, muodostuu kerrannaistaajuuksien aiheuttama taustamelu merkittäväksi. Tällöin S/N on 48 dB.

Summaustesti tehty kahdellatoista äänellä, koska testien aikaan yksi oskillaatiokortti toimi osittain.

### 6.1.5 Jännitelähde

Jännitelähde toimii odotetusti. Käyttöjännitteet pysyvät melko stabiileina. Kun SYNA on ollut 30 minuuttia käynnissä, oskillaattorikorttien regulaattorien käyttöjännitteet ovat laskeneet n. 20 mV, joka kyllä vaikuttaa oskillaattorien vireeseen. mutta muutos tapahtuu riittävän hitaasti, jolloin sitä on vaikea huomata. SYNA:n kokonaisvirrankulutus on 1,3 A. Muuntajien käyttöjännitteet ovat 9V. Tehoa SYNA käyttää noin 12 - 13W.

### 6.2 Koskettimet

Koskettimien liikerata asettui n. 10 asteen suuruiseksi Y-suuntaan. Tällä liikemäärällä saavutettiin vahvistuksen dynamiikaksi n. 60 – 70 dB. Koskettimet toimivat odotetusti.



Kuva 51. Valmis prototyyppi.



## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoite oli valmistaa toimiva 13-ääninen polyfoniolla varustettu analogisyntetisaattorin prototyyppi. Lisäksi tavoitteena oli oppia elektroniikkaa kokonaisvaltaisesti projektia tehdessä. Molempiin tavoitteisiin päästiin.

Aiheeseen päädyttiin siksi, että haluttiin hyödyntää kirjoittajan yli 20-vuotista kokemusta digitaalisen audion ja digitaalisten syntetisaattorien parissa. Tätä kokemuspohjaa ja koulussa opetettua teoriaa hyödyntämällä koettiin uuden oppiminen helpommaksi. Analogisella elektroniikalla on vielä käyttökohteita, esimerkiksi anturipiirit. Vaikka digitaalinen elektroniikka on usein analogista elektroniikkaa käytännöllisempää, katsottiin että analogisen elektroniikan ymmärrys antaa paremman pohjan ymmärtää digitaalisen maailman ilmiöitä. Lisäksi, koska kirjoittajalla ei ollut ennen koulutusta kokemusta elektroniikasta, katsottiin että tarvitaan paljon käytännön kokemusta, jotta kirjoittajalla olisi mahdollisuutta pärjätä tulevilla työtehtävissä.

Elektroniikan valmistuksesta tuli käytännön kokemusta piirilevyn valmistuksen, komponenttien ladonnan, juotostyön ja johdotuksen parissa. Kokemusta kertyi myös elektroniikan piirilevyjen suunnittelusta, kytkentöjen testauksesta ja tulosten analysoinnista. Myös mekaniikan suunnittelutyöstä ja käytännön työstä kertyi kokemusta: metallin leikkaus, metallin muotoilu, metallin valssaus ja pistehitsaus sisältyivät käytännön työhön.

Prototyypin kaikki ratkaisut eivät ole ideaalisia. Käyttöliittymän johdotus oli hankala ja työläs. Suotimen estokaistan matalataajuusoskillaattori ohjaus toimii, muttei riittävän tehokkaasti. Sahalaita-aallon olisi voinut generoida ketjuttamalla sen samaan sarjaan muiden oskillaattorien kanssa. Nyt saha-aallon taajuuskäyttäytyminen on hyvin herkkä jännitemuutoksille ja on yleensä hieman eri vireessä kuin muut oskillaattorit. Oppimisprosessina projekti on ollut haastava sekä palkitseva. Jälkikäteen katsottuna monet ratkaisut ovat itsestäänselvyksiä ja monet asiat tekisin toisin. Rungas käytännön testaaminen on opettanut monia käytännön ongelmia, jotka yleensä eivät ilmene alan kirjallisuudessa.

Tulevaisuudessa opinnäytetyön prototyypistä voi lähteä kehittämään uutta, kaupallisempaa syntetisaattoria. Opinnäytetyön aikana kerrytettyä kokemusta ja oppia voi hyödyntää tulevilla työtehtävissä. Lisäksi prototyyppiä käytetään jatkossa instrumenttina musiikkiprojekteissa.

# LÄHTEET

- [1] Niemi, A. 1997. Fourier-analyysi ja Laplace-muunnos. Opetushallitus.
- [2] HyperPhysics. 2000. Fourier. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Audio/geowv.html> [Viitattu 28.12.2017].
- [3] Wolfram Mathworld. Fourier-sarjat. [www-dokumentti] Saatavilla <http://mathworld.wolfram.com> [Viitattu 30.12.2017].
- [4] Paynter, Robert T. Electronic Devices and Circuits. McGraw-Hill 1997.
- [5] Sedra, Adel S. Smith, Kenneth C. Microelectronic Circuits. Oxford University Press. 5.painos.
- [6] Floyd, Thomas L. Buchla, D. Fundamentals of analog circuits. Prentice Hall. 1999.
- [7] Draw.io. Kuvioiden piirto. [www-ohjelma] Saatavilla <https://www.draw.io> [Viitattu 4.1.2018].
- [8] ADXL335. Google kuvahaku. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf> [Viitattu 9.1.2018].
- [9] GIMP. Grafiikka [Ohjelma]. Saatavilla <https://www.gimp.org> [Viitattu 9.1.2018].
- [10] Front Panel Designer. CAD. [Ohjelma]. Saatavilla <https://www.frontpanelexpress.com> [Viitattu 9.1.2018].
- [11] Tilaa muuttava suodin. Google haku. [www-sivusto]. Saatavilla <http://www.electronics-tutorials.ws/filter/state-variable-filter.html> [Viitattu 11.1.2018].
- [12] Tilaa muuttava suodin. Google haku. [www-sivusto]. Saatavilla <http://www.circuitstoday.com/state-variable-filters> [Viitattu 11.1.2018].
- [13] AudioXplorer. Analysointi. [Ohjelma]. Saatavilla <http://www.arizona-software.ch/audioplayer/> [Viitattu 11.1.2018].
- [14] Audacity. Analysointi. [Ohjelma]. Saatavilla <https://www.audacityteam.org> [Viitattu 11.1.2018].

- [15] Suodintyyppi. [www-sivusto]. Saatavilla <http://www.dspguide.com/ch3/4.htm> [Viitattu 21.1.2018].
- [16] Voxengo SPAN. Analysointi. [www-ohjelma]. Saatavilla <http://www.voxengo.com/product/span/> [Viitattu 11.1.2018].
- [17] Nuottien taajuus. [www-sivusto]. Saatavilla <http://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html> [Viitattu 21.1.2018].
- [18] Texas Tina. Piirien simulointi. [www-ohjelma]. Saatavilla <http://www.ti.com/tool/TINA-TI> [Viitattu 21.1.2018].
- [19] Rashid M. Microelectronic Circuits, Analysis and Design. Cengage Learning. 2011.
- [20] Boylestad R. Introductory Circuit Analysis. Pearson. 2016.
- [21] Lundkvist A. How to design and build an analog synthesizer from scratch. [www-dokumentti]. <https://pdfs.semanticscholar.org/0727/218882b17241abc2380694577862859763a2.pdf> [Viitattu 22.1.2018].
- [22] Texas Instruments. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.ti.com/lit/an/snoa621c/snoa621c.pdf> [Viitattu 22.1.2018].
- [23] Syntetisaattori. Wikipedia. [www-dokumentti]. Saatavilla <https://fi.wikipedia.org/wiki/Syntetisaattori>. [Viitattu 20.1.2018]
- [24] ADSR. Wikipedia. [www-dokumentti]. Saatavilla <https://fi.wikipedia.org/wiki/ADSR> [Viitattu 21.1.2018]
- [25] Croft, A. Davison, R. Hargreaves, M. Flint, J. Engineering mathematics. Pearson, 4. painos. 2013.
- [26] Kolmioaalto. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://mathworld.wolfram.com/TriangleWave.html> [Viitattu 21.1.2018].
- [27] Kanttiaalto. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html> [Viitattu 21.1.2018].

[28] Sahalaita-aalto. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://mathworld.wolfram.com/SawtoothWave.html> [Viitattu 21.1.2018].

[29] TL072. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf> Viitattu 21.1.2018 [Viitattu 21.1.2018].

[30] LM317 [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf> [Viitattu 21.1.2018].

[31] LM337 [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm337.pdf> [Viitattu 22.1.2018].

[32] PWM. [www-dokumentti]. Saatavilla <http://www.ti.com/lit/ug/slau508/slau508.pdf> [Viitattu 22.1.2018]

