



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VÄNNI PANULA
ANALOGISEN ÄÄNISYNTETISAATTORIN ANALYYSI JA TOTEU-
TUS

Kandidaatintyö

Tarkastajat: lehtori Jari Kangas, yli-
opistonlehtori Olli-Pekka Lundén

TIIVISTELMÄ

Vänni Panula: Analogisen äänisyntetisaattorin analyysi ja toteutus
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö
Toukokuu 2018
Sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Elektroniikka
Tarkastajat: lehtori Jari Kangas, yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundén

Avainsanat: analoginen syntetisaattori, oskillaattori, operaatiovahvistin, analogia-elektroniikka

Työssä tarkastellaan yksinkertaisten analogisten syntetisaattoreiden, erityisesti niin kutsutun Alien Screamer -syntetisaattorin toimintaa. Työ sisältää sekä teoreettisen että kokeellisen tarkastelun.

Yksinkertaisen analogisen syntetisaattorin rakentamiseen tarvittavat peruslohkot ovat jänniteohjattu oskillaattori, matalataajuusoskillaattori ja päätevahvistin. Työn pääsisältö koostuu operaatiovahvistimilla toteutettujen oskillaattoreiden ja transistorilla toteutetun jännite-virtamuuntimen analyysistä ja siitä, kuinka niitä voidaan hyödyntää analogisen syntetisaattorin toteuttamisessa.

Lisäksi rakennettiin Alien Screamer-syntetisaattori sille julkaistujen rakenteluohjeiden avulla. Alien Screamer -syntetisaattorin toimintaa tarkastellaan sekä lohkokotasolla että kokonaisuutena teorian ja mittausten kautta. Mittausten avulla pyritään todentamaan kytkennän toiminta sekä selittämään sen mahdollisia eroavaisuuksia teoriaan. Lopuksi esitellään kehitysehdotuksia käsitellyn kytkennän toiminnan parantamiseksi.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin kevätlukukauden 2018 aikana Tampereen Teknillisen Yliopiston elektroniikan laboratoriolle. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat lehtori Jari Kangas sekä yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundén. Haluaisin kiittää ohjaajiani tuesta ja neuvoista, joita työn tekemisen aikana sain, sekä Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaa hyvin organisoidusta kandidaatintyöseminaarista.

Tampereella, 5.5.2018

Vänni Panula

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ANALOGINEN SYNTETISAATTORI	2
2.1	Analogisen syntetisaattorin peruslohkot	3
2.2	Integraattori	4
2.3	Astabiili multivibraattori.....	8
2.4	Eksponentiaalinen jännite–virtamuunnin.....	12
3.	RAKENTELUOSUUS	17
3.1	Rakenteluosuuden kytkentä	17
3.2	Matalataajuusoskillaattori	19
3.3	Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin	20
3.4	Ramppioskillaattori ja vahvistinaste.....	22
3.5	Mittaukset.....	23
3.6	Mittaustulosten vertailu teoriaan	27
4.	YHTEENVETO JA KEHITYSIDEAT	29
	LÄHTEET	30

LIITE 1: ALIEN SCREAMER –KYTKENNÄN PIIRIKAAVIO

LIITE 2: KUVIA RAKENNETUSTA LAITTEESTA

1. JOHDANTO

Analogiset syntetisaattorit ovat olleet tärkeä osa elektronisen musiikin tuottamista ennen tietokoneita. Robert Moog kehitti 1950-luvulla yhden ensimmäisistä analogisista syntetisaattoreista, Moog-syntetisaattorin. Se mullisti elektronisen musiikin kentän, ja monet muusikot ottivat Moogin käyttöönsä. Rajoittavana tekijänä sen laajenemiselle oli kuitenkin sen monimutkaisuus ja suuri koko, ja myöhemmin markkinoille tuli syntetisaattoreita, jotka olivat huomattavasti ensimmäistä mallia pienempiä ja yksinkertaisempia. [1] IC-komponenttien kehittyminen alensi valmistuskustannuksia huomattavasti, ja ennen tietokoneen keksimistä analogisten syntetisaattoreiden suosio kasvoi huippuunsa. Tietokoneiden mahdollistama digitaalinen äänisynteesi on myöhemmin vallannut elektronisen musiikin tuotannon sen halvan toteutuksen ja monipuolisuuden takia. 2000-luvulla analoginen synteesi on kuitenkin kokenut jonkinasteisen renessanssin, ja useat yhtiöt ovat tuoneet markkinoille joko täysin analogisia tai digitaalisia ja analogisia osia yhdisteleviä syntetisaattoreita. [1]

IC-komponentit mahdollistavat kytkennät, joiden avulla voidaan toteuttaa analogisen syntetisaattorin perustoiminnallisuus. Perustoiminnallisuuteen vaadittavat kytkennät on mahdollista pitää melko yksinkertaisena. Useat yksinkertaiset operaatiovahvistinkytkennät ovat muokattavissa siten, että muokattuja kytkentöjä yhdistelemällä voidaan toteuttaa analoginen syntetisaattori.

Tässä työssä tarkastellaan erityyppisiä operaatiovahvistimilla toteutettuja oskillaattoreita ja erästä transistorikytkentää sekä niiden hyödyntämistä analogisissa syntetisaattoreissa. Tarkastelu aloitetaan yksinkertaisista piireistä, joista edetään monimutkaisempiin toteutuksiin. Tämän jälkeen tutustutaan tarkemmin rakenteluosuuden syntetisaattorin, eli niin kutsutun Alien Screamerin, lohkoihin ja pyritään ymmärtämään niiden toiminta piirikaa- viotasolla. Rakennetun piirin toimintaa mitataan, vertaillaan sitä teoriaan ja selvitetään toiminnan eroavaisuuksia teoriaan verrattuna. Lopuksi käydään läpi työn pääkohdat ja esitellään kehitysideoita, joilla rakennetun piirin toimintaa voidaan parantaa.

2. ANALOGINEN SYNTETISAATTORI

Analoginen-etuliite tarkoittaa syntetisaattoreiden yhteydessä sitä, että signaalit, joita synteessissä hyödynnetään, voidaan tuottaa analogisilla piireillä, kuten oskillaattoreilla, suodattimilla ja vahvistimilla, eikä esimerkiksi tietokoneen avulla digitaalisesti. Synteessi puolestaan tarkoittaa sitä, että useasta olemassa olevasta osasta muodostetaan yksi kokonaisuus. [2, s. 3-8] Analogiset syntetisaattorit ovat usein täysin modulaarisia, eli eri moduuleiden, kuten signaaligeneraattoreiden ja suotimien, toiminta on toisistaan riippumattonta. Ohjausjännitteet ovat yleensä amplitudiltaan vakioituja, joten eri moduuleita voidaan yhdistellä toisiinsa käyttäjän haluamalla tavalla. Alkuaikojen syntetisaattorit kasvoivat usein jopa pienen huoneen kokoisiksi, sillä ne sisälsivät paljon erilaisia moduuleita, joiden avulla oli mahdollista tuottaa laaja skaala erilaisia signaaleja. [1, s. 46-52] Kuitenkin yksinkertaisimmillaan analoginen syntetisaattori muodostaa useista eri signaaleista yhden ulostulosignaalin, joka voidaan havaita äänenä, mikäli sen taajuus on ihmisen kuuloalueella. Ulostulosignaalin taajuusalueen ollessa ihmisen kuuloalueella, joka on noin 20 Hz – 20 kHz, puhutaan usein äänisynteessistä. [2, s. 3-8]

Vaikka modulaarisuus nähtiin usein mahdollisuuksia laajentavana tekijänä, oli syntetisaattoreiden monimutkaisuus osaltaan niiden laajempaa leviämistä rajoittava tekijä. Mitä suuremmaksi ja monimutkaisemmaksi instrumentti kasvoi, sitä todennäköisemmäksi tuli, että juuri samanlaisen ulostulosignaalin toistaminen myöhemmin ei onnistuisi. Tämän vuoksi useat muusikot ilmaisivat haluavansa yksinkertaistetun version, jossa moduulit olisivat ainakin osin sisäisesti kytketty toisiinsa. Moog vastasi kysyntään luomalla Mini-moog-syntetisaattorin, jossa moduulit olivat kytketty sisäisesti. Minimoogin käyttö oli huomattavasti yksinkertaisempaa kuin modulaaristen syntetisaattoreiden, mutta se oli kuitenkin käyttäjien tarpeet huomioiden tarpeeksi monipuolinen ollakseen kiinnostava. [1, s. 16]

Modulaarisen syntetisaattorin tutkiminen kokonaisuutena on melko hankalaa juuri modulaarisen rakenteen takia, sillä jokainen moduuli toimii omana kokonaisuutenaan ja vaikuttaa kytkettäessä muiden toimintaan omalla tavallaan. Kytkentätapoja on moduulien määrästä riippuen jopa tuhansia erilaisia, eikä samanlaista kytkentää välttämättä saada aikaan kahdesti. Siksi sähköisen tarkastelun kannalta on yksinkertaisempaa valita sisäisesti kytketty analoginen syntetisaattori, joiden lohkojen vaikutus toisiinsa on ennalta määrättyä ja siten helppo todentaa.

2.1 Analogisen syntetisaattorin peruslohkot

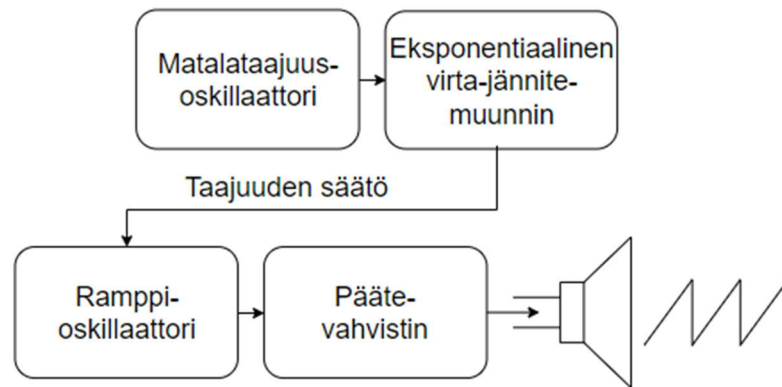
Analogisessa syntetisaattorissa on useita lohkoja, joiden vuorovaikutus keskenään tuottaa halutunlaisen toiminnallisuuden. Tärkeimmät analogisen syntetisaattorin osat ovat erilaiset oskillaattorit, joita ilman äänentuotto olisi mahdotonta. Oskillaattori on värähtelypiiri, joka tuottaa jaksollisen signaalin. Operaatiovahvistimilla toteutetun oskillaattorin ulostulosignaalin aaltomuoto, taajuus ja amplitudi riippuvat käytännössä ainoastaan kytkennän muista komponenteista, minkä vuoksi operaatiovahvistimilla on helppo toteuttaa oskillaattoreita, joiden ulostulosignaalit ovat helposti muokattavissa. [3, s. 350-356] Analogisissa syntetisaattoreissa hyödynnetään usein juuri operaatiovahvistimilla toteutettuja oskillaattoreita operaatiovahvistinten monipuolisuuden vuoksi.

Oskillaattoreita hyödynnetään sekä ohjausjännitteen että varsinaisen äänisignaalin tuottamisessa. Analogisten syntetisaattoreiden pääasiallinen äänilähde on jänniteohjattu oskillaattori. Sen taajuutta ja aaltomuotoja muuntelemalla saadaan aikaan signaali, jota voidaan suodattaa ja vahvistaa erilaisilla lohkoilla, kuten jänniteohjatuilla suotimilla ja vahvistimilla. Ohjausjännitteiden tuottamiseen käytetään usein niin kutsuttua matalataajuusoskillaattoria, jonka värähtelytaajuus on matalampi kuin äänen tuottamiseen käytetyn oskillaattorin. Matalataajuusoskillaattorin taajuus vaihtelee usein jopa alle yhdestä hertsistä muutamaan sataan hertsiin. [1, s. 16-18]

Oskillaattoreiden lisäksi on olemassa ääntä prosessoivia lohkoja. Suodattimet, kuten alija ylipäästösuodattimet poistavat signaalista tiettyjä taajuusalueita saaden äänen kuulostamaan ihmiskorvaan erilaiselta. Vahvistimet vahvistavat signaalia, ADSR- eli verhoikäyrägeneraattori muokkaa äänen kestoa, voimakkuutta, vaimenemista ja maksimiampitudin saavuttamisaikaa. Kohinalähteet tuottavat esimerkiksi transistorin avulla jännitekohinaa, jota vahvistetaan ja hyödynnetään sellaisenaan. Näitä lohkoja ei työssä käsitellä.

Edellä mainittujen lohkojen lisäksi erityisesti äänentuotto-oskillaattoreiden ohjauksessa käytetään usein eksponentiaalista jännite-virtamuunninta. Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin tuottaa ohjausjännitteestä riippuvaisen virran, joka yleensä kaksinkertaistuu, kun oskillaattorin ohjausjännite nousee 1 voltin. Kun oskillaattoreita ohjataan asteikolla 1 V/oktaavi, huomataan myöhemmin, että eksponentiaalimuuntimella saadaan toteutettua matalammilla ohjausjännitteillä isompi skaala eri taajuuksia, sillä virran suuruusluokka pystytään pitämään huomattavasti pienempänä kuin jännitteiden.

Luvussa 4 tarkastellaan Music From Outer Space -sivuston luoja, Ray Wilsonin suunnittelemaa Alien Screamer -kytkentää. Se sisältää integraattorista muokatun ramppioskillaattorin, astabiiliin multivibraattoriin pohjautuvan matalataajuusoskillaattorin, eksponentiaalisen jännite-virtamuuntimen ja päätevahvistimen. [4] Kytkennän lohkoakaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Alien Screamer -kytkennän lohkoakaavio

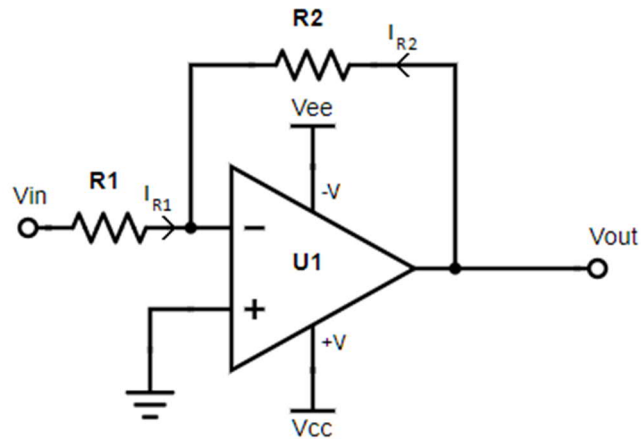
Käydään seuraavaksi perustasolla läpi, miten lohkot toimivat keskenään. Matalataajuusoskillaattori tuottaa ulostuloonsa nimensä mukaisesti matalataajuisen signaalin. Kytkennän tapauksessa sen aaltomuoto voidaan valita kolmesta vaihtoehdosta sekä aaltomuotojen taajuutta voidaan säätää. Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin luo ohjausjännitteestään riippuvan ohjausvirtasignaalin ulostuloonsa. Tämä ohjausvirtasignaali ohjaa kytkennän äänentuotto-oskillaattorin eli ramppioskillaattorin toimintaa siten, että mitä suurempi ohjausvirtasignaali on, sitä korkeampi ramppioskillaattorin taajuus on. Ramppioskillaattorin ulostulosignaali vahvistetaan päätevahvistinlohkossa 20-kertaiseksi. Vahvistimen kuormana on kaiutin, josta ääni kuullaan. [4]

Seuraavissa alaluvuissa tutkitaan kytkentöjä, joita muokkaamalla on mahdollista toteuttaa Alien Screamer -kytkentä. Jokaisen lohkon toiminta pyritään selvittämään komponenttitasolta alkaen, jotta muokattujen kytkentöjen toiminta olisi helposti sisäistettävissä.

2.2 Integraattori

Integraattoria käytetään laajasti elektroniikan sovelluksissa. Esimerkiksi funktiogeneraattorit, kuten kolmioaalto- ja sahalaita-aaltogeneraattorit, pohjautuvat usein integraattori-kytkentään. Muita käyttökohteita ovat muun muassa erilaiset aktiiviset suodattimet ja analogia-digitaalimuuntimet. [5, s. 21-22]

Integraattori on kytkentä, joka tuottaa ulostuloonsa sisäänmeno-jännitteen integraalin. Jotta integraattorin toiminta olisi yksinkertaista ymmärtää, tarkastellaan ensin lyhyesti invertoivaa vahvistinkytkentää. Kuvassa 2 on esitetty invertoiva vahvistin.



Kuva 2: Invertoiva vahvistin.

Koska kuvan 2 operaatiovahvistin on negatiivisesti takaisinkytketty, on negatiivinen sisäänmeno lähes samassa potentiaalissa kuin positiivinen sisäänmeno. Ideaalisen operaatiovahvistimen sisäänmenovirta on nolla, myös ulostuloimpedanssin voidaan olettaa olevan nolla. Näin ollen voidaan Kirchhoffin virtalain myötä ilmaista vastusten R_1 ja R_2 virtojen olevan samat mutta vastakkaismerkkiset, eli [3, s. 120-121]

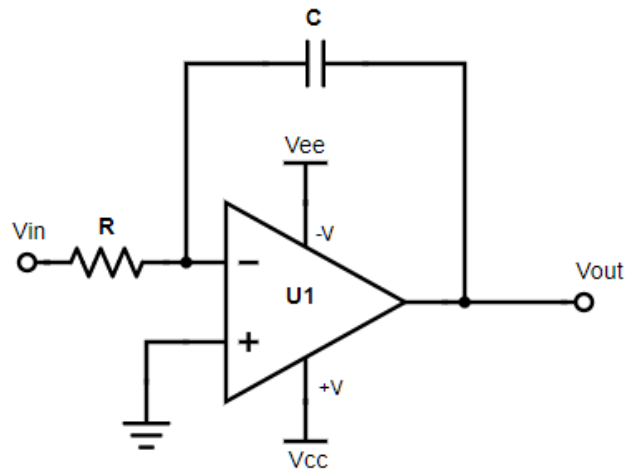
$$\frac{V_{IN} - V_-}{R_1} = -\frac{(V_{OUT} - V_-)}{R_2}, \quad (1)$$

missä V_{IN} on sisäänmenojännite, V_- negatiivisen sisäänmenon jännite ja V_{OUT} ulostulojännite. V_- on takaisinkytkennästä johtuen lähes 0 ja huomattavasti pienempi kuin V_{IN} ja V_{OUT} , joten se voidaan eliminoida kaavasta (1). Kun tämän jälkeen kaavasta (1) ratkaistaan ulostulojännite, saa se muodon

$$V_{OUT} = \frac{-R_2}{R_1} V_{IN}. \quad (2)$$

Ulostulojännite on siis sisäänmenojännite negatiivisena kerrottuna vastusten R_2 ja R_1 suhteella. [3, s. 121]

Integraattorin erona invertoivaan vahvistimeen on se, että takaisinkytkentävästus on korvattu kondensaattorilla. Kytkennän toimintaperiaate muuttuu kondensaattorin vaikutuksesta siten, että ulostulojännite ei seuraa sisäänmenojännitettä vaan riippuu kondensaattorin latautumisesta ja purkautumisesta. [3, s. 126] Integraattorikytkentä on esitetty kuvassa 3.

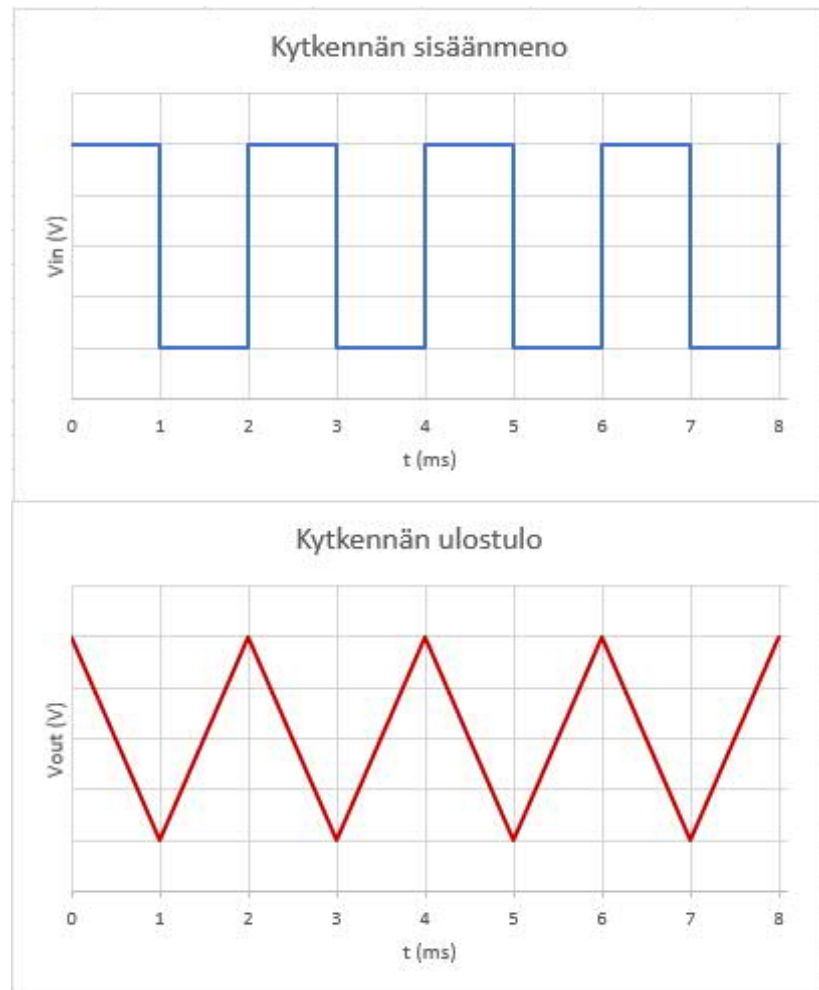


Kuva 3: Integraattori.

Kondensaattorin ominaisuuksista tiedetään, että sen latautumisnopeus riippuu sen läpi kulkevasta virrasta ja sen kapasitanssista. Kondensaattorin jännite voidaan ilmaista sen läpi kulkevan virran integraalina. Negatiivisen sisäänmenon virta on jälleen nolla, joten kondensaattorin läpi kulkeva virta on $I_C = -I_R = -V_{IN}/R$. Näin ollen kondensaattorin yli oleva jännite, joka on tässä tapauksessa ulostulojännite, tietyllä ajanhetkellä t voidaan ilmaista kaavalla

$$V_{OUT} = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{V_{IN}}{R} dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{IN} dt, \quad (3)$$

missä V_{IN} on kytkennän sisäänmenojännite, C kondensaattorin kapasitanssi ja R vastuksen resistanssin. Integraattori siis nimensä mukaisesti integroi sisäänmenojännitteen ja syöttää sen ulostuloonsa vakiolla $-1/RC$ kerrottuna. [3, s. 126] Esimerkiksi mikäli sisäänmenojännite on kantiaalto, tuottaa integraattori ulostuloonsa kolmioaallon, ja mikäli sisäänmeno on tasajännitettä, ulostulo on tasaisesti nouseva jännite. Kuvassa 4 on havainnollistettu kytkennän toiminta, kun sisäänmenona on kantiaalto. Kuva on periaatekuva, ja jännitteiden amplitudeja ei tarkastella.



Kuva 4: Integraattorikytkennän sisäänmeno- ja ulostulojännitteet.

Kanttiaalto toimii hyvin selventävänä esimerkkinä integraattorin toiminnan havainnollistamisessa. Käyrien suhteesta näkee selvästi, että edellä johdettu ulostulojännitteen lauseke pätee, sillä sisäänmenojännitteen ollessa positiivinen ulostulojännite laskee ja toisinpäin. Ulostulojännitteen nousu- tai laskunopeus riippuu kondensaattorin ja vastuksen suuruuksista. Kondensaattorin latautumisenopeuden määrittää siis aikavakio $\tau = RC$. [3, s. 126]

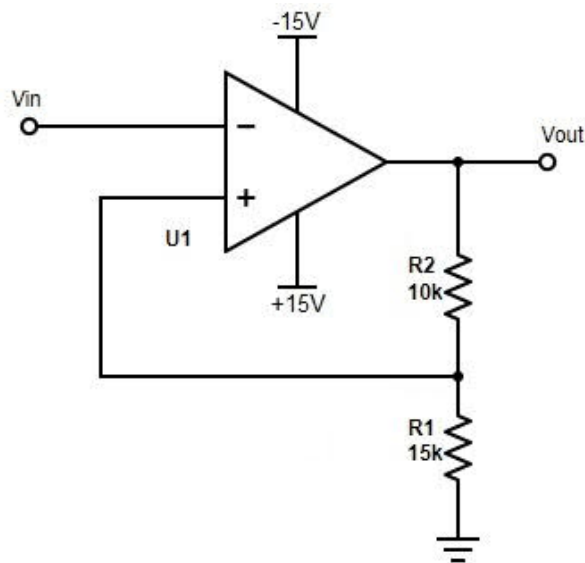
Edellä mainittiin, että mikäli operaatiovahvistimen sisäänmenojännite sisältää tasajännitekomponentin, satureituu ulostulo jompaankumpaan maksimiinsa, joka on esimerkiksi yleiskäyttöisellä operaatiovahvistimella LM741 noin 2 V matalampi kuin käyttöjännite. Esimerkiksi ± 15 V:n käyttöjännitteillä ulostulojännitteen vaihteluväli noin ± 13 V. [3, s. 130] Vaikka varsinainen sisäänmenojännite olisi puhtaasta vaihtojännitettä, reaalisen operaatiovahvistimen sisäänmenoterminaalien välillä on aina tietty jännite-ero, jota kutsutaan nimellä input offset voltage. [3, s. 127] Tämä tasajännitekomponentti aiheuttaa ulostulon satureutumisen usein myös puhtaalla vaihtojännitesisäänmenosignaaliilla. Eräs rat-

kaisu on kondensaattorin rinnalle kytketty sopivan kokoinen vastus. Vastuksen kytkeminen pienentää operaatiovahvistimen kaistanleveyttä [5, s. 22], mutta ihmisen kuuloalueen signaalit, joiden taajuus on alle 20 kHz, eivät yleensä vielä rajoitu. Kaistanleveys tarkoittaa taajuusalueetta, jolla operaatiovahvistin toimii lähes ideaalisesti eli esimerkiksi vahvistus pysyy tasaisena ja säröytymistä ei tapahdu. Ongelman vaikutusta voidaan myös vähentää pienentämällä kytkennän jännitevahvistusta eli ulostulo- ja sisäänmenojännitteen suhdetta V_{out}/V_{in} . [3, s. 127].

Rakenteluosuuden kytkennän analysoimisen kannalta integraattori ei itsessään ole lainkaan hyödyllinen, sillä se ei toimi varsinaisena oskillaattorina. Myöhemmässä vaiheessa kuitenkin havaitaan, että jo tunnettuja kytkentöjä hyödyntämällä on mahdollista toteuttaa integraattoriin pohjautuva ramppioskillaattori.

2.3 Astabiili multivibraattori

Astabiili multivibraattori on kytkentä, joka oskilloi spontaanisti kahden eri tilan välillä. Operaatiovahvistimella toteutettu astabiili multivibraattori pohjautuu positiivista takaisinkytkentää hyödyntävään inverttoivaan Schmitt trigger -kytkentään [5, s. 416-417]. Tarkastellaan siis ensin inverttoivaa Schmitt trigger -kytkentää. Inverttoiva Schmitt trigger on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Inverttoiva Schmitt trigger.

Schmitt trigger on positiivisesti takaisinkytketty operaatiovahvistinkytkentä. Sisäänmenojännite syötetään inverttoivassa Schmitt triggerissä negatiiviseen sisäänmenoon. Schmitt triggerin ulostulojännitteellä on kaksi mahdollista tilaa: positiivinen käyttöjännite ja negatiivinen käyttöjännite. Tämä johtuu siitä, että operaatiovahvistin pyrkii asettamaan negatiivisen sisäänmenon samaan potentiaaliin positiivisen sisäänmenon kanssa. Ideaalitapauksessa kun kytkennän käyttöjännitteet kytketään päälle, on ulostulojännite 0

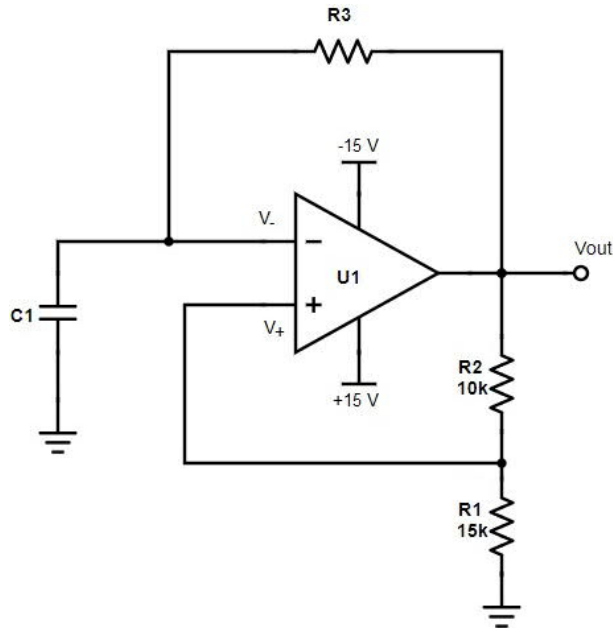
V , mikäli sisäänmenojännite V_{IN} on myös 0 V. Todellisuudessa pienikin kohina sisäänmenoterminaaleilla aiheuttaa jännite-eron sisäänmenojen välille, ja operaatiovahvistin vahvistaa kohinan. Positiivisen takaisinkytkennän myötä tämä vaikutus voimistuu, ja lopulta päädytään tilanteeseen, jossa ulostulojännite on saturoitunut jompaankumpaan maksimiinsa. [5, s. 416-417] Käytetään esimerkkinä edellä mainittua operaatiovahvistinta LM741, jolloin ulostulojännitteen arvot vaihtelevat 13 V:n ja -13 V:n välillä.

Kun ulostulojännite on saturoitunut maksimiinsa, näkyy positiivisessa sisäänmenossa vastuksen R_2 yli oleva jännite [5, s. 416-417]. Kuvan 5 kytkennän positiivisen sisäänmenon jännite V_+ saadaan molemmissa tapauksissa selville jännitteenjaon kautta kaavalla

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OUT} = \frac{15 \text{ k}\Omega}{15 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \cdot (\pm 13 \text{ V}) = \pm 7,8 \text{ V}. \quad (4)$$

Oletetaan, että ulostulojännite on saturoitunut maksimiarvoonsa. Tällöin mikäli sisäänmenojännite V_{IN} on pienempi kuin positiivisen sisäänmenon jännite eli 7,8 V, ulostulojännite ei vaihda tilaansa. Heti, kun sisäänmenojännite ylittää tuon kynnyksjännitteen, Schmitt trigger vaihtaa tilaansa ja ulostulo saturoituu minimiinsä. Tällöin, johtuen positiivisesta takaisinkytkennästä, positiivisen sisäänmenon jännite muuttuu arvoon -7,8 V. Kun positiivisen sisäänmenon jännite on -7,8 V, sisäänmenojännitteen lasku alkuperäisen kynnyksjännitteen, 7,8 V:n, alapuolelle ei vielä muuta ulostulojännitteen arvoa, vaan se pysyy samana. Sisäänmenojännitteen täytyy nyt laskea alle -7,8 V:n, jotta ulostulo muuttaa tilaansa. Tätä kynnyksjännitteiden eroa kutsutaan hystereesiksi. Vastusten R_1 ja R_2 arvoja muuttamalla on helppo saavuttaa halutut kynnyksjännitteet, esimerkiksi mikäli kynnyksjännitteiksi halutaan ± 15 V:n käyttöjännitteillä ± 5 V, valitaan $R_1 = 6,2 \text{ k}\Omega$ ja $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

Operaatiovahvistimella toteutettu astabiili multivibraattori eroaa inverttoivasta Schmitt triggeristä ainoastaan siten, että negatiiviseen sisäänmenon ja maan välille on kytketty kondensaattori ja negatiivisen sisäänmenon ja ulostulon välille vastus. Tällöin kondensaattori latautuu ja purkautuu negatiivisen takaisinkytkentävastuksen kautta, ja kondensaattorin jännite näkyy negatiivisen sisäänmenon jännitteenä. Varsinaista ulkoista sisäänmenojännitettä ei siis tarvita, vaan kondensaattorin jännite toimii piirin sisäänmenojännitteenä. Astabiili multivibraattorikytkentä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Astabiili multivibraattori.

Aloitetaan kytkennän analysointi positiivisesta takaisinkytkennästä. Kuten Schmitt triggerissä, vastusten R_1 ja R_2 jännitteenjaon kautta positiivinen takaisinkytkentä asettaa positiivisen sisäänmenon jännitteen tiettyyn arvoon, kytkennän tapauksessa noin $\pm 7,8$ V:iin. Käsitellään tapausta, jossa positiivisen sisäänmenon jännite on $+7,8$ V. Tällöin kondensaattori alkaa latautumaan negatiivisen takaisinkytkentävastuksen ja kondensaattorin määrittämällä RC-aikavakiolla ulostulojännitteellä $+13$ V. Kondensaattorin jännite näkyy negatiivisen sisäänmenon jännitteenä. Kun negatiivisen sisäänmenon jännite ylittää positiivisen sisäänmeno-jännitteen, vaihtaa operaatiovahvistin ulostulonsa tilaa maksimista minimiin, eli -13 V:iin. [5, s. 457-459]

Jos kondensaattoria ladattaisiin tasaisena pysyvällä virralla, olisi sen latautumiskäyrä suora. Nyt kun kondensaattoria ladataan vastuksen kautta, latautumiskäyrä ei ole suora, vaan eksponenttifunktio. Tämä johtuu siitä, että kun kondensaattori latautuu, sen läpi kulkeva virta pienenee. [5, s. 457-459] Tällöin kondensaattorin jännite ajanhetkellä t voidaan ilmaista muodossa

$$v(t) = V_{\infty} + (V_0 - V_{\infty})e^{\left[\frac{t-t_0}{\tau}\right]}, \quad (5)$$

missä V_{∞} on maksimijännite, johon kondensaattori latautuu teoriassa äärettömän ajan kulluttua, V_0 kondensaattorin jännite latautumisen alkuhetkellä, e Neperin luku, t ajanhetki, jossa jännite halutaan selvittää ja t_0 ajanhetki, jolloin lataaminen alkaa. Yhtälö pätee riippumatta siitä, ovatko jännitteet positiivisia vai negatiivisia. [5, s. 457-459] Mikäli ajanhetkellä t_0 kondensaattorissa on jännite V_0 , se voidaan ladata jännitteeseen V_1 , jolloin aika $t = t_1$. Merkitään myös $\Delta t = t_1 - t_0$. [5, s. 457-459] Ratkaistaan Δt kaavasta (5), jolloin saadaan

$$\Delta t = \tau \ln \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty - V_1}, \quad (6)$$

missä nyt $\tau = R_3 C_1$. Tarkastellaan hetkeä, jossa multivibraattori vaihtaa ulostulojännitteen tilan negatiivisesta positiiviseen ja sen jälkeistä aikaa, jona kondensaattori latautuu korkeampaan kynnysjännitteeseen. Merkitään negatiivista kynnysjännitettä, eli jännitettä, joka kondensaattorissa on ajanhetkellä t_0 , merkinnällä $-V_T$ ja positiivista kynnysjännitettä latautumisen jälkeen ajanhetkellä t_1 vastaavasti merkinnällä V_T . Lisäksi merkitään $V_\infty = V_{sat}$ eli kondensaattorin maksimijännite on operaatiovahvistimen maksimiulostulojännitteen itseisarvo. [5, s. 457-459] Kuvan 11 kytkennästä voidaan lisäksi päätellä, että

$$V_T = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}. \quad (7)$$

Koska kynnysjännitteiden itseisarvot ovat samat, on oskillaattorin pulssisuhde 50% eli se vaihtaa tilaansa aina samanpituisen ajanjakson kuluttua, sillä kondensaattori latautuu ja purkautuu yhtä nopeasti. Jaksonaika T on aika, joka oskillaattorilla kuluu sen vaihtaessa tilaansa kaksi kertaa ja palatessaan näin alkupisteeseen. Tarkastelun kohteeksi valittiin aikaväli, jonka aikana oskillaattori vaihtaa tilaansa kerran ja kondensaattori latautuu toiseen kynnysjännitteeseen. Tämä aika on siis puolet jaksonajasta, sillä koko jakson aikana operaatiovahvistin vaihtaisi tilaansa takaisin alkuperäiseen ja lataisi kondensaattorin negatiiviseen kynnysjännitteeseen. Täten voidaan merkitä edellisten lisäksi $\Delta t = T/2$. Täten kaava (6) saa muodon

$$\frac{T}{2} = \tau \ln \frac{V_{sat} + V_T}{V_{sat} - V_T}. \quad (8)$$

Sijoitetaan kaavan (7) jännitteenjako kaavaan (8) ja ratkaistaan jaksonaika T . Kuvan 10 astabiilin multivibraattorin jaksonajan lauseke on tällöin

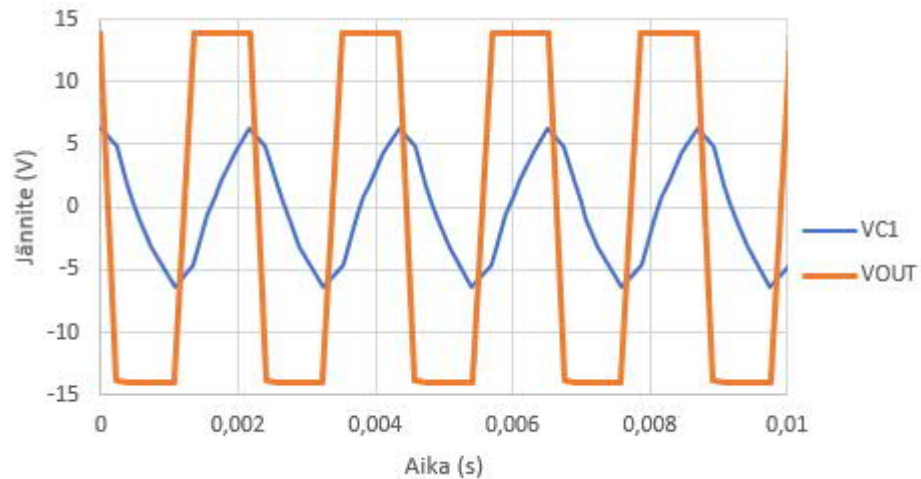
$$T = 2R_3 C_1 \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right), \quad (9)$$

sillä kytkennän tapauksessa $\tau = R_3 C_1$. Koska taajuus f on jaksonajan T käänteisluku, voidaan taajuus ratkaista kaavasta (9). [5, s.457-459] Astabiilin multivibraattorin taajuus on näin ollen

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_3 C_1 \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)}. \quad (10)$$

Kuten kaavasta (10) huomataan, taajuutta on helppo säätää valitsemalla vastusten ja komponenttien arvot sopiviksi. Mikäli tilanvaihdoksen kynnysjännitteet on määritelty vastusten R_1 ja R_2 arvojen avulla jo aikaisemmin, taajuutta säädetään muuttamalla vastuksen R_3 ja kondensaattorin C_1 arvoja. Kuvan 6 tapauksessa taajuuden säätäminen toteutuu helpoiten korvaamalla kiinteäarvoinen vastus R_3 säätövastuksella.

Kuvassa 7 on havainnollistettu kuvan 11 multivibraattorin toimintaa simuloimalla. Simulointi toteutettiin NI Multisim 14.0 -ohjelmalla. Vastuksen R_3 arvoksi valittiin 100 k Ω ja kondensaattorin C_1 arvoksi 10 nF. Operaatiovahvistimen simulointimallina käytettiin ohjelmiston kirjastosta löytyvää mallia LM741CN. Tällöin kaavan (10) mukaan teoreettinen taajuus on n. 455 Hz.



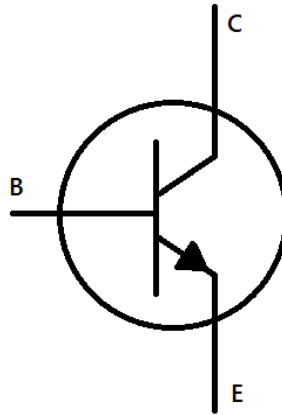
Kuva 7: Multivibraattorin sisäänmeno- ja ulostulojännitteet.

Kuvassa 7 piirin sisäänmenojännite eli kondensaattorin C_1 jännite on likimain kolmioaaltoa ja ulostulojännite likimain kanttaaltoa. Simuloinnin pohjalta piirin oskillointitaajuudeksi saatiin noin 465 Hz. Simuloitu oskillointitaajuus on lähellä teoriaa eron ollessa vain 10 Hz. Simuloinnin ja teorian eron selittää simuloinneissa huomioonotettavat komponenttien epäideaalisuudet, kuten komponenttien arvojen toleranssit sekä operaatiovahvistimen ulostulojännitteen äärellinen muutosnopeus eli slew rate. Slew rate on yleensä ilmoitettu yksikössä V/ μ s, eli voltia per mikrosekunti. [3, s. 132]

2.4 Eksponentiaalinen jännite–virtamuunnin

Syntetisaattoreiden tapauksessa oskillaattoreiden taajuuden säätäminen tapahtuu yleensä asteikolla 1 V / oktaavi, mikä tarkoittaa sitä, että mikäli sisäänmenojännite muuttuu 1 V:n aikaisemmasta arvostaan, oskillaattorin taajuus kaksinkertaistuu [6, s. 180]. Ihmiskorva kuulee taajuuden kaksinkertaistumisen esimerkiksi pianon koskettimissa 12 puolisävelaskeleen muutoksena. Oskillaattoreiden ohjaus suoraan sisäänmenojännitteellä voi osoittautua hankalaksi, sillä lineaaristen komponenttien avulla on käytännössä mahdotonta toteuttaa rakenne, joka käyttäytyisi edellä mainitulla tavalla. Transistoreiden ja diodien ominaiskäyrästöt ovat likimain eksponentiaalisia. Niiden avulla voidaan siis toteuttaa tasan nousevalla ohjausjännitteellä eksponentiaalisesti kasvava ulostulo. Lisäksi on järkevää muuntaa ohjausjännitesignaali ohjausvirtasignaaliksi, sillä mikäli ohjausjännite kaksinkertaistuisi joka oktaavilla, suurilla taajuuksilla käyttöjännitteiden täytyisi olla melko suuret, sillä syntetisaattoreiden äänentuotto-oskillaattoreiden taajuusalueet katta-

vat usein ihmisen koko kuuloalueen. Virtaohjauksen toteuttamiseksi tarvitaan eksponentiaalinen jännite–virtamuunnin. Jotta jännite–virtamuuntimen toiminta voidaan sisäistää, tarkastellaan ensin NPN-tyyppisen BJT-transistorin toimintaperiaatetta. NPN-tyyppisen BJT-transistorin piirikaaviosymboli on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: NPN-tyyppinen BJT-transistori.

Kuvassa 8 transistorin navat ovat seuraavat: kollektori C, kanta B ja emitteri E. NPN-tyyppinen transistori sisältää kolme eri tavoin seostettua puolijohdekerrosta, joista ylin on n-tyyppinen, keskimmäinen p-tyyppinen ja alin n-tyyppinen. Ylin n-kerros on kytketty kollektorille, p-kerros on kytketty kannalle ja alin n-kerros emitterille. [3, s. 223]

BJT-transistorin rakenteen takia kannan ja emitterin välinen liitos käyttäytyy kuten diodin pn-liitos. Shockley-yhtälön mukaan diodin läpi kulkeva virta on sen jännitteestä ja lämpötilasta riippuva eksponenttifunktio

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{v_D}{nkT/q}} - 1 \right), \quad (11)$$

missä I_S on diodin lämpötilasta riippuva saturaatiovirta, joka on huoneenlämpötilassa luokkaa 10^{-14} A, v_D diodin yli oleva jännite, n emissiokerroin, joka on tyypillisesti luokkaa 1-2, k Boltzmannin vakio, q alkeisvaraus ja T lämpötila kelvineinä [7, s. 157]. Shockley-yhtälö pätee myös BJT-transistoreilla. Kollektori- ja emitterivirran suhteen kautta voidaan määrittää kollektorivirran lauseke

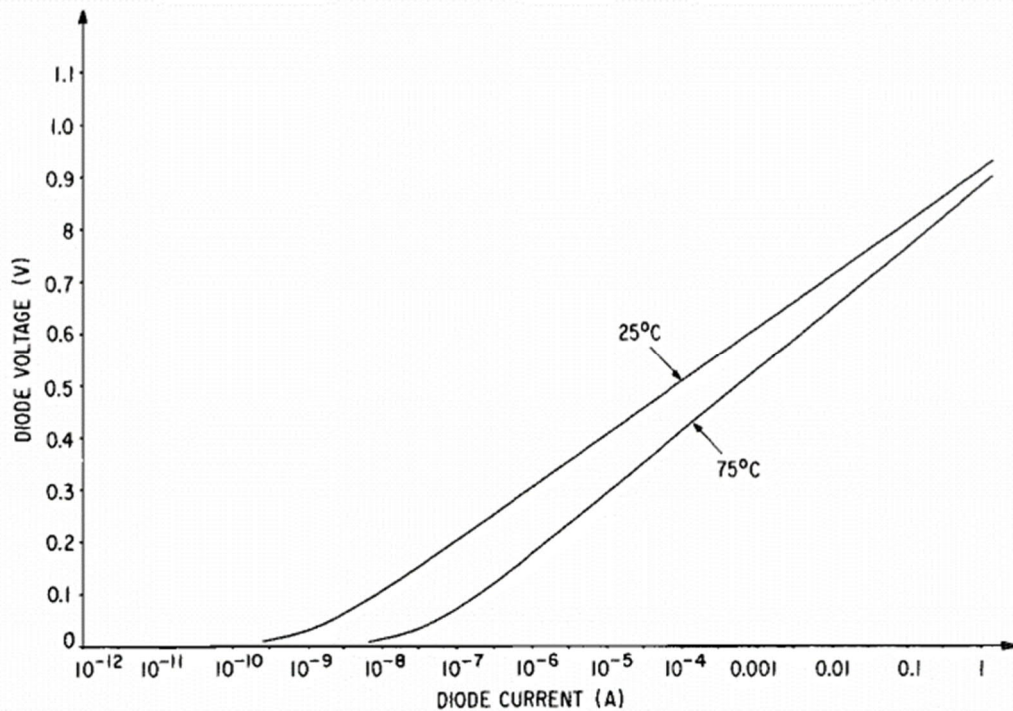
$$i_C = \alpha I_{ES} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right), \quad (12)$$

missä V_{BE} on transistorin kanta-emitterijännite, α kollektorivirran ja emitterivirran suhde i_C/i_E , ja I_{ES} saturaatiovirta, joka on tyypillisesti luokkaa 10^{-17} – 10^{-12} A. Emissiokerroin n on BJT-transistoreilla tyypillisesti 1, joten se voidaan jättää kollektorivirran yhtälössä huomiotta. [7, s. 213-217] Terminen jännite on huoneenlämpötilassa likimain 26 mV, jolloin kanta-emitterijännitteen ollessa 0,7 V:n luokkaa eksponenttitermi saa arvoja, jotka

ovat huomattavasti suurempia kuin 1. [7, s. 216] Tällöin kaava (12) voidaan yksinkertaistaa muotoon

$$i_C = \alpha I_{ES} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}. \quad (13)$$

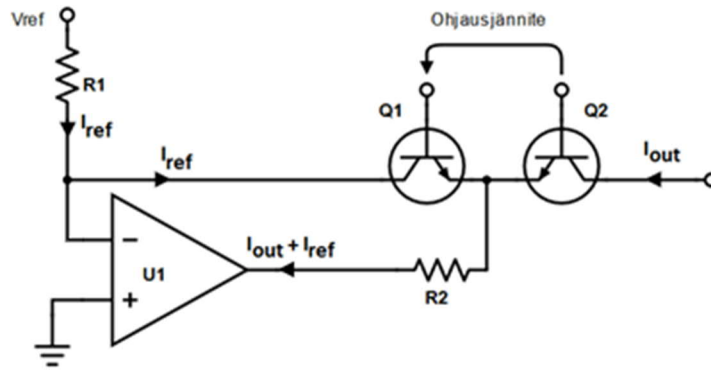
Havainnollistaaksemme virran ja jännitteen suhteen lämpötilariippuvuutta tarkastellaan Shockley-yhtälön pohjalta muodostettua diodin virta-jännitekuvaajaa kahdessa eri lämpötilassa. Virta-jännitekuvaajat on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Diodin virta-jännitekuvaajat eri lämpötiloissa [6, s. 177].

Kuvasta 9 huomataan, että sekä kuvaajan suoran osan kulmakertoimen että diodin virran suuruusluokka muuttuvat, kun lämpötila muuttuu ja diodin jännite pysyy vakiona. Kääntäen siis suuremmassa lämpötilassa pienempi jännite aiheuttaa samansuuruisen virran. Kulmakertoimen muutos on melko vähäinen, mutta x-suunnan muutos on merkittävä, sillä lämpötilan muuttuessa 50 astetta virran muutos on suurimmillaan noin 100-kertainen. Mikäli diodia tai transistoria käytettäisiin sellaisenaan tuottamaan ohjausvirta syntetisaattorin äänentuotto-oskillaattorille, lämpötilan vaikutus oskillaattorin taajuuteen olisi liian suuri, suurilla lämpötilan vaihteluilla jopa useita oktaaveja. [5, s. 177]

Lämpötilariippuvuuden, erityisesti virran suuruusluokan muuttumisen, kompensointiin on olemassa ratkaisu. Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin eliminoi transistorin tapauksessa lämpötilan aiheuttaman kanta-emitterijännitteen muutoksen vaikutuksen ulos-tulovirtaan. [6, s. 178-179] Kytkenä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Käytännön eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin, perustuu lähteeseen [6, s. 179].

Operaatiovahvistimen ulostulovirta on kytkennän ulostulovirran I_{out} ja referenssivirran I_{ref} summa negatiivisena. Referenssivirraksi I_{ref} valitaan usein suuruusluokkaa $10 \mu\text{A}$ oleva virta, sillä se on sopivan pieni, mutta kuitenkin suurempi kuin mahdolliset vuotovirrat. [6, s. 178-179] Transistorien kollektorivirtojen eli virtojen I_{out} ja I_{ref} suhde saadaan selville tarkastelemalla kanta-emitterijännitteiden erotusta. Kun kaavasta (13) ratkaistaan transistorin Q_1 tapauksessa kanta-emitterijännite [7, s. 423], päästään muotoon

$$V_{BE1} = V_T \ln \left(\frac{I_{ref}}{\alpha I_{ES}} \right). \quad (14)$$

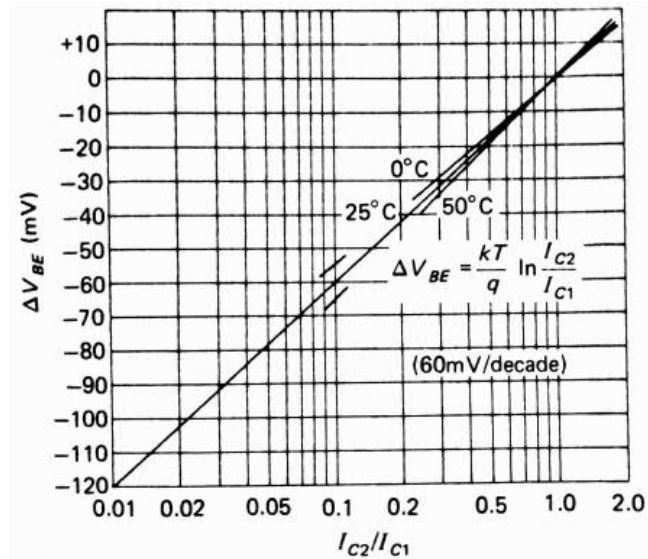
Ratkaistaan vastaavasti transistorin Q_2 kanta-emitterijännite [7, s. 423]. Se saa muodon

$$V_{BE2} = V_T \ln \left(\frac{I_{out}}{\alpha I_{ES}} \right). \quad (15)$$

Merkitään $\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1}$ ja ratkaistaan näin saadusta yhtälöstä I_{out} , joka saa muodon

$$I_{out} = I_{ref} e^{\frac{\Delta V_{BE}}{V_T}}. \quad (16)$$

Näin ollen kytkennän ulostulovirta riippuu käytännössä ainoastaan transistorien Q_1 ja Q_2 kanta-emitterijännitteiden erosta ΔV_{BE} . Kun oskillaattorin ohjauseännite näkyy transistorien kantojen välillä, eliminoituu lämpötilan vaikutus ulostulovirran suuruusluokkaan. [6, s. 179] Yksittäisen transistorin kanta-emitterijännitteen muutos ei enää vaikuta ulostulovirran suuruuteen, vaan se saadaan kuvan 10 kytkennällä suljettua pois. Kuvan 10 kaltaisen kytkennän tarkemmasta analyysistä huomataan, että mikäli huoneenlämpötilassa kanta-emitterijännitteiden erotus muuttuu 18 mV , kaksinkertaistuu kytkennän ulostulovirta I_{out} . [6, s. 181] Tämä voidaan havaita myös kuvasta 11, jossa on esitetty graafisesti transistorien kollektorivirtojen suhteen vaikutus kanta-emitterijännitteiden eroon. Kuvassa 11 I_{C2} vastaa nyt kuvan 10 ulostulovirtaa I_{out} ja I_{C1} referenssivirtaa I_{ref} .



Kuva 11: Transistoreiden kollektorivirtojen suhteen vaikutus kanta-emitterijännitteeseen [8, s. 91].

Kuvaajasta nähdään, että kuvassa 9 esiintynyt kulmakertoimen muutos lämpötilan vaikutuksesta ei poistu. Tämä nähdään myös kaavasta (16), sillä terminen jännite vaikuttaa edelleen ulostulovirran suuruuteen. On kuitenkin huomattava, että kulmakertoimen muutos on huomattavasti pienempi ongelma, kun ajatellaan oskillaattorin taajuuden muuttumista lämpötilan vaikutuksesta. Kriittisin ongelma eli virran suuruusluokan muuttuminen on kuitenkin saatu eliminoitua. Kuvan 10 kytkennällä saavutetaan käyttökohde huomioiden tarpeeksi hyvin lämpötilakompensoitu ohjausvirtasignaali. [6, s. 179] Mikäli $\Delta V_{BE} = 0$, kytkentä toimii kuten virtapeili, eli transistorien kollektorivirrat ovat samansuuruiset. Lisäksi huomataan, että kaavan (16) mukaan kytkennän ulostulovirta kasvaa, kun jännite transistorin Q_1 kannalla laskee suhteessa transistorin Q_2 kannan jännitteeseen.

3. RAKENTELUOSUUS

Luvussa 2 käsiteltiin kytkentöjä, joita yhdistelemällä voidaan toteuttaa analogisen syntetisaattorin perusrakenne. Tämän luvun tarkoituksena on havainnollistaa, miten luvun 2 kytkentöjä voidaan muokata siten, että saavutetaan pienillä muutoksilla monipuolisempi toiminnallisuus. Lisäksi tarkastellaan, kuinka lohkot voidaan kytkeä toisiinsa siten, että ne ohjaavat toistensa toimintaa. Rakennetun kytkennän mitataan, ja mittausten perusteella analysoidaan sitä, toimiiko kytkentä teorian mukaan.

3.1 Rakenteluosuuden kytkentä

Rakenteluosuuden kytkentänä toimii Ray Wilsonin suunnittelema Alien Screamer. Ohjeet Alien Screamerin rakentamiseen löytyvät Music From Outer Space -nettisivustolta. Sivustolta löytyy mm. piirikaavio, kaksipuoleinen layout, kotelon etupaneelin malli sekä komponenttisijoittelukuvat. [4] Kuvassa 12 on rakennettu syntetisaattori. Liitteessä 2 on lisää kuvia laitteesta ja sille 3D-tulostetusta kotelosta.



Kuva 12: Rakennettu Alien Screamer -syntetisaattori.

Kytkentä koostuu integraattoriin pohjautuvasta ramppioskillaattorista, astabiililla multi-vibraattorilla toteutetusta matalataajuusoskillaattorista, eksponentiaalisesta jännite-virta-

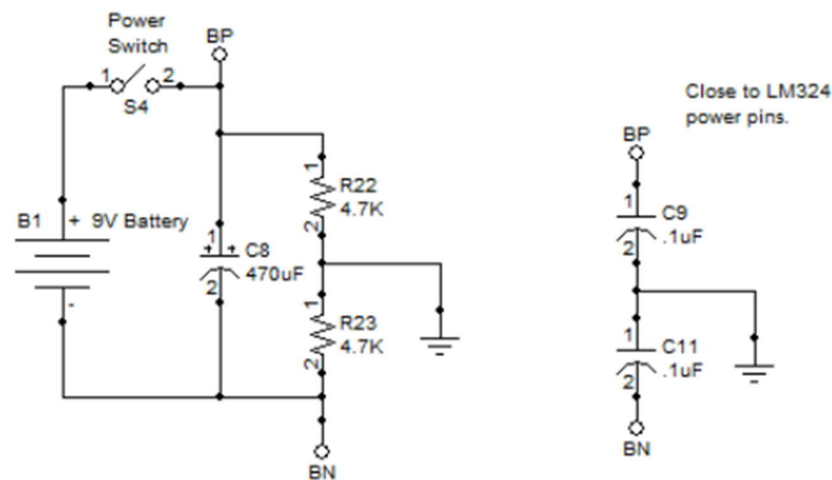
muuntimesta sekä päätevahvistimesta. [4] Poikkeuksina seuraaviin piirikaavioihin rakenteluosuuden kytkentään vaihdettiin taulukon 1 mukaiset komponentit, sillä kytkentäkaaviossa ilmoitettuja komponentteja ei ollut saatavilla tai niiden valmistus oli lopetettu. Korvaavien komponenttien valinnassa on pyritty löytämään ominaisuuksiltaan mahdollisimman vastaavat komponentit.

Taulukko 1: Rakenteluvaiheen komponenttien poikkeamat piirikaavioihin verrattuna

Komponentti Piirikaavion komponentti Rakentelussa käytetty komponentti

Komponentti	Piirikaavion komponentti	Rakentelussa käytetty komponentti
U2	LM386N-4	LM386N-3
Q3	2N5457	J108

Aiemmin käsiteltyjen esimerkkien pohjalta kytkennän toiminnan analysointi on melko suoraviivaista. Siitä huolimatta on kuitenkin tarpeen purkaa kytkentää lohkoihin, joiden toiminnan ymmärtäminen on suoraviivaisempaa kuin koko kytkennän tarkastelu kerralla. Kytkentä on toteutettu käyttäen jännitelähteenä yhtä 9 V:n paristoa. Kytkennän käyttöjännitteiden toteutus on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13: Kytkennän käyttöjännitteet, perustuu lähteeseen [4].

Kuten kuvasta 13 nähdään, piirin maatasona käytettävä piste on toteutettu symmetrisellä jännitteenjaolla. Vastukset R₂₂ ja R₂₃ jakavat jännitteen siten, että maatasoon nähden pisteessä BP näkyy +4,5 V:n jännite ja pisteessä BN vastaavasti –4,5 V:n jännite. Kondensaattori C₈ toimii energiavarastona ja tasaa käyttöjännitteitä, mikäli piirissä esiintyy virtapiikkejä, ja kondensaattorit C₉ ja C₁₁ toimivat suodatuskondensaattoreina operaatiovahvistimen käyttöjännitteille. [4] Taulukossa 2 on esitetty kytkennän käyttöjännitteet ja maataso.

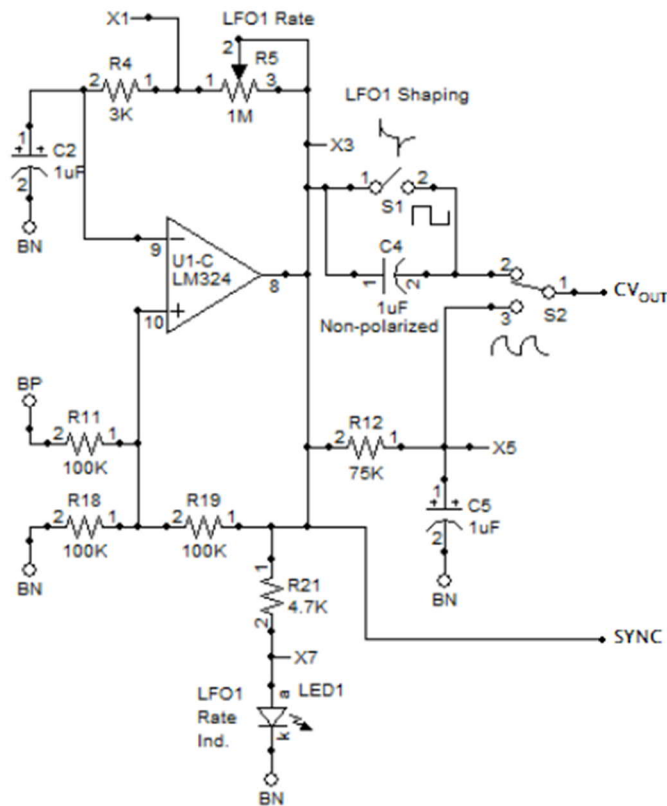
Taulukko 2: Kytkenän käyttöjännitteet ja maataso**Piste Jännite (V)**

BP	4,5
BN	-4,5
Maa	0

Jatkossa kytkennän muiden osien tarkastelussa hyödynnetään näitä käyttöjännitteitä, ja kuvissa esiintyvät pisteet BP ja BN sekä maa voidaan olettaa olevan suoraan kytkettyinä kuvan 13 vastaaviin pisteisiin.

3.2 Matalataajuusoskillaattori

Matalataajuusoskillaattorin tehtävä on tuottaa ohjausjännitesignaali, jota hyödynnetään ramppioskillaattorin taajuuden säätämisessä. Oskillaattorin taajuus on säädettävissä muutamasta hertsistä muutama sataan hertsiin. Matalataajuusoskillaattorin piirikaavio on esitetty kuvassa 14.



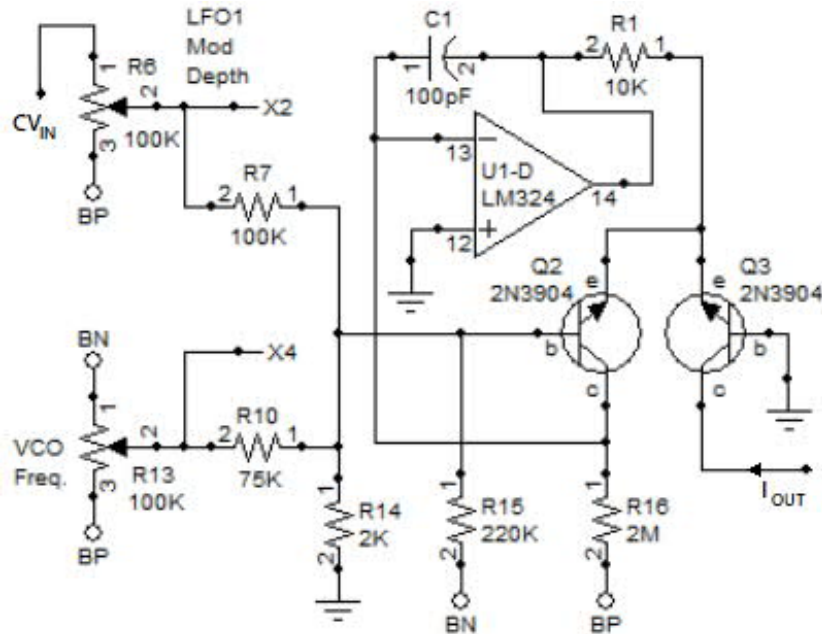
Kuva 14: Alien Screamer -kytkennän matalataajuusoskillaattori, perustuu lähteeseen [4].

Kuvasta 14 huomataan, että kytkentä on samankaltainen kuin alaluvussa 2.2 käsitelty as-tabiili multivibraattori. Nyt operaatiovahvistimen U1-C positiivinen sisäänmeno biasoi-tuu sen ulostulojännitteen tilasta riippuen $\pm 1,5$ V:iin maapotentiaaliin nähden, sillä ope-raatiovahvistimen ulostulon ollessa lähellä $+ 4,5$ V:a voidaan R11:n ja R19:n likimain olettaa olevan kytketty rinnan. Tällöin jännitteenjaon kaavalla vastusten R11 ja R19 rin-nankytken sekä vastuksen R18 välisen pisteen, eli positiivisen sisäänmenon, jännit-teeksi saadaan noin $1,5$ V. Vastaavasti operaatiovahvistimen ulostulon ollessa negatiivi-ssä maksimissaan eli melko lähellä $- 4,5$ V:a voidaan R18 ja R19 olettaa olevan rinnan-kytketty. Tällöin positiivisen sisäänmenon jännite on likimain $- 1,5$ V. Taajuuden säätä-minen tapahtuu säätövastuksella R₅. [4] Minimissään taajuus on silloin, kun vastusten R₄ ja R₅ resistanssien summa on maksimissaan, ja maksimissaan vastaavasti, kun resistans-sien summa on minimissään. Kaavan (10) mukaan oskillaattorin taajuusalue on säädettä-vissä likimain välillä 1 Hz- 240 Hz. Operaatiovahvistimen ulostulo on teoriassa kanttiaal-toa, jonka pulssisuhde on 50 %, kuten multivibraattorikytkennän analyysissä todettiin.

Pisteen CV_{OUT} jännitettä hyödynnetään myöhemmin tarkasteltavan jännite-virtamuunti-men ulostulovirran, ja sitä kautta ramppioskillaattorin taajuuden, säätämisessä. Pisteen CV_{OUT} aaltomuoto voidaan valita kolmesta vaihtoehdosta kytkimillä S₁ ja S₂. Mikäli kyt-kin S₁ on kiinni ja kytkimen S₂ napa 1 on kytketty napaan 2, piste CV_{OUT} on kytketty suoraan operaatiovahvistimen ulostuloon, ja pisteessä näkyy kanttiaalto. Jos kytkin S₁ on auki, kondensaattori C₄ purkautuu ja latautuu operaatiovahvistimen ulostulojännitteellä. Pisteessä CV_{OUT} näkyy tällöin derivoitu kanttiaalto eli juuri operaatiovahvistimen ulos-tulojännitteen tilanvaihdoksen jälkeen pisteen jännite on korkea tai matala, jonka jälkeen se alkaa lähestyä nollaa kondensaattorin latautumisen tai purkautumisen vaikutuksesta. Jos taas kytkimen S₂ napa 1 on kytketty sen napaan 3, latautuu ja purkautuu kondensaat-tori C₅ operaatiovahvistimen ulostulojännitteellä, mikä tuottaa pisteeseen CV_{OUT} integ-roidun kanttiaallon. Ulostulon aaltomuodot näkyvät kuvassa 14 kytkinten asentojen mu-kaan. Pisteen SYNC kytkeytymistä muuhun piiriin tarkastellaan ramppioskillaattorin analyysin yhteydessä.

3.3 Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin

Eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin summaa piirin ohjausjännitteet ja muuntaa ne ramppioskillaattoria ohjaavaksi virtasignaaliksi. Kytkennän eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin ja sen ohjaukseen liittyvät komponentit on esitetty kuvassa 15.



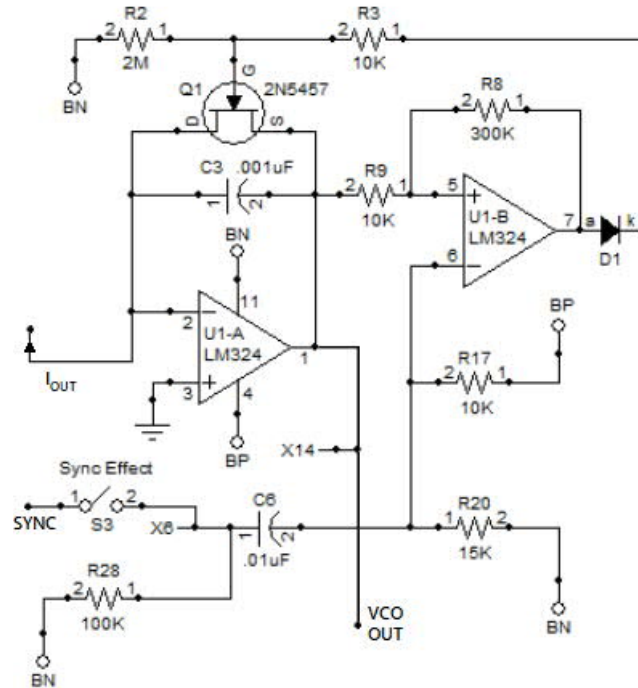
Kuva 15: Alien Screamer -kytkennän eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin, perustuu lähteeseen [4].

Kuvan 15 kytkentä toimii samalla periaatteella kuin luvussa 2.3 käsitelty eksponentiaalinen jännite-virtamuunnin. Nyt ulostulovirtaa I_{OUT} ohjaa kaksi eri jännitettä, jotka näkyvät transistorin Q_2 kannalla. Toinen näistä on matalataajuusoskillaattorin tuottama ohjauksen jännite, joka tuodaan pisteeseen CV_{IN} , ja toinen käyttöjännitteistä saatava tasajännitekomponentti. Käyttöjännitteistä saatu ohjauksen jännitekomponentti skaalataan vastuksilla R_{10} ja R_{14} siten, että kun R_3 :n arvo muuttuu aiheuttaa pisteessä X_4 1 V:n muutoksen, näkyy transistorin Q_2 kannalla ulostulovirran I_{OUT} kaksinkertaistumisen aiheuttava jännitteen muutos, eli noin 18 mV [4]. Pisteeseen CV_{IN} jännitteen vaikutuksen suuruutta ulostulovirtaan voidaan säätää muuttamalla vastuksen R_6 arvoa, ja myös se on skaalattu sopivan suuruisiksi vastuksilla R_7 ja R_{14} . [4] Vastuksen R_{16} läpi kulkeva virta toimii kytkennän referenssivirtana, ja operaatiovahvistin U_{1-D} ja siihen liittyvät komponentit toimivat virtanieluna referenssivirran ja ulostulovirran summavirralla.

Matalataajuusoskillaattori ohjaa yhdessä eksponentiaalisen jännite-virtamuuntimen ja käyttöjännitteistä saatavan tasajännitekomponentin kanssa seuraavaksi käsiteltävän ramppioskillaattorin toimintaa. Matalataajuusoskillaattorin ulostulojännitteen muutos saa aikaan ramppioskillaattorin taajuuden muutoksen ideaalisesti siten, että 1 V:n jännitetaso pisteessä CV_{OUT} aiheuttaa ramppioskillaattorin taajuuden kaksinkertaistumisen. Lohkojen toiminnan vaikutusta toisiinsa käsitellään alaluvussa 3.5.

3.4 Ramppioskillaattori ja vahvistinaste

Kytkenän varsinaisen ulostulosignaalin muodostaminen tapahtuu ramppioskillaattorilla. Se tuottaa ulostuloonsa siis tietyn taajuisen ramppiaallon, joka nousee integraattorin aaltomuodon tavoin lähes tasaisesti, ja laskee jyrkästi alkuarvoonsa tietyn jännitteen ylityttyä. Ramppioskillaattori on esitetty kuvassa 16.



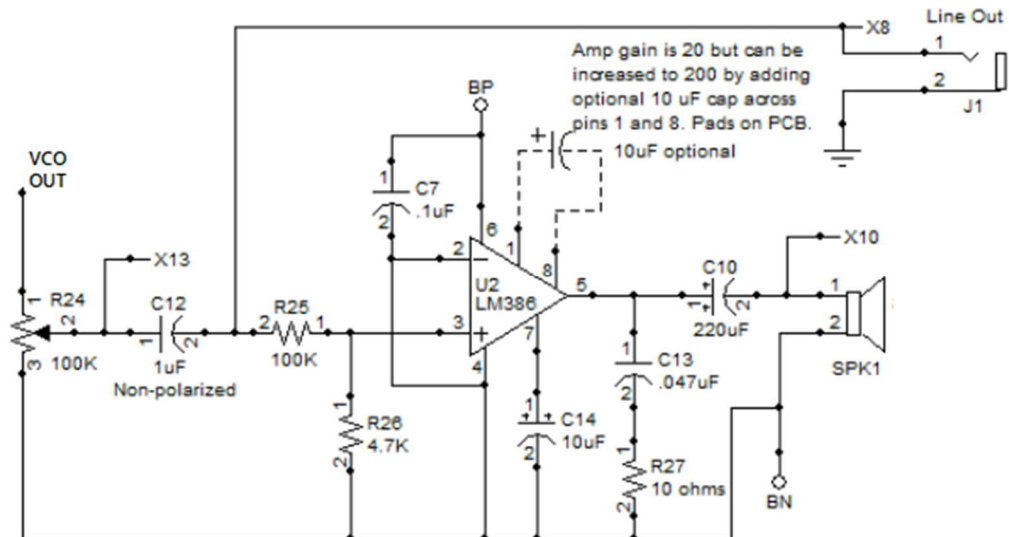
Kuva 16: Alien Screamer -kytkenän ramppioskillaattori, perustuu lähteeseen [4].

Kuvassa 16 operaatiovahvistin U_{1-A} toimii kuten integraattori. Nyt kondensaattori C_3 ladataan eksponentiaalisen jännite-virtamuuntimen virralla I_{OUT} operaatiovahvistimen ulostulojännitteeseen. Tämä jännite näkyy myös operaatiovahvistimen U_{1-B} positiivisessa sisäänmenossa vastuksen R_9 kautta. Komparaattorina toimiva U_{1-B} vertaa positiivisen ja negatiivisen navansa jännitettä. Negatiivisen navan jännite on 0,9 V suhteessa piirin maahan. [4] Kun kondensaattorin jännite ylittää 0,9 V, komparaattorin ulostulo muuttaa tilansa matalasta korkeaan. Diodi D_1 myötäbiasoituu ja vastusten R_2 ja R_3 läpi alkaa kulkea virta. Tämä virta aiheuttaa JFET-transistorin Q_1 hilalle jännitteen, joka on tarpeeksi suuri biasoidakseen transistorin johtavaksi. Kun transistori Q_1 alkaa johtaa, purkautuu kondensaattorin C_3 jännite, ja operaatiovahvistimen ulostulossa näkyy jälleen 0 V. Tämän jälkeen sykli alkaa uudestaan, eli piiri oskilloi ja tuottaa ulostuloonsa ramppiaallon. [4]

Piste SYNC on kytketty matalataajuuksoskillaattorin ulostuloon. Mikäli kytkin S_3 on kiinni, aiheuttaa matalataajuuksoskillaattorin ulostulosignaali kondensaattorista C_3 riippumattoman komparaattorin tilanmuutoksen, sillä matalataajuuksoskillaattorin ulostulojännite saa aikaan muuttuvan jännitteen U_{1-B} :n negatiivisella navalla. Näin integraattorin

ulostulo saadaan tippumaan nolleen jopa kesken normaalin syklin, mikä aiheuttaa ulostuloon erilaisia aaltomuotoja. [4]

Piste VCO OUT kytkeytyy kytkennän päätevahvistimeen.vahvistin on esitetty kuvassa 17.



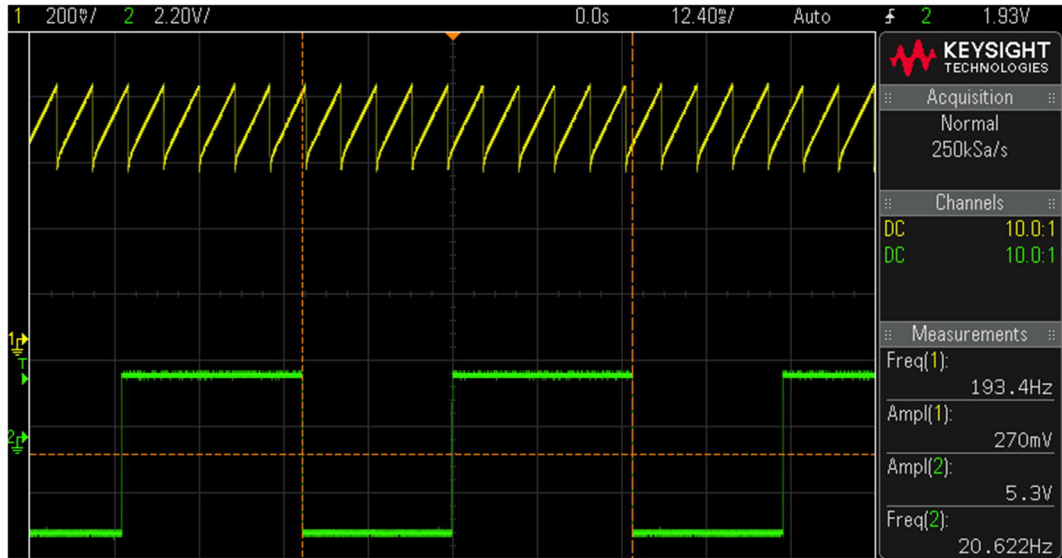
Kuva 17: Alien Screamer -kytkennän vahvistin, perustuu lähteeseen [4].

Vahvistimen keskeisin osa on audiovahvistin LM386N-4. Kytkentä on rakennettu sen datalehdeltä löytyvän esimerkkikytkennän mukaan [4,9], ja sen jännitevahvistus on 20 V/V. Sääto vastus R_{24} säättää vahvistimen äänenvoimakkuutta jännitteensaolla, ja vastukset R_{25} ja R_{26} vaimentavat jännitettä siten, ettei U_2 :n maksimisisäänmenojännite ylitä ja signaali säröydy. Kondensaattori C_{12} toimii blokkina tasajännitteelle. Mikäli nastojen 1 ja 8 välille kytketään 10 μ F kondensaattori, nousee kytkennän jännitevahvistus 20 V/V:n sijasta 200 V/V:iin. Tämä johtuu siitä, että LM386N-sarjan vahvistimissa on nastojen 1 ja 8 välissä 1,35 k Ω vastus, joka asettaa vahvistimen vahvistuksen arvoon 20 V/V ilman kondensaattoria. [9] Ulostulo on mahdollista kytkeä myös ulkoiseen kaiuttimeen liittimellä J1 ja myös tällöin äänenvoimakkuuden säätö toimii R_{24} :n avulla. [4] Rakentelussa käytetty LM386N-3 on muuten samanlainen kuin LM386N-4, mutta sen maksimiteho on matalampi.

3.5 Mittaukset

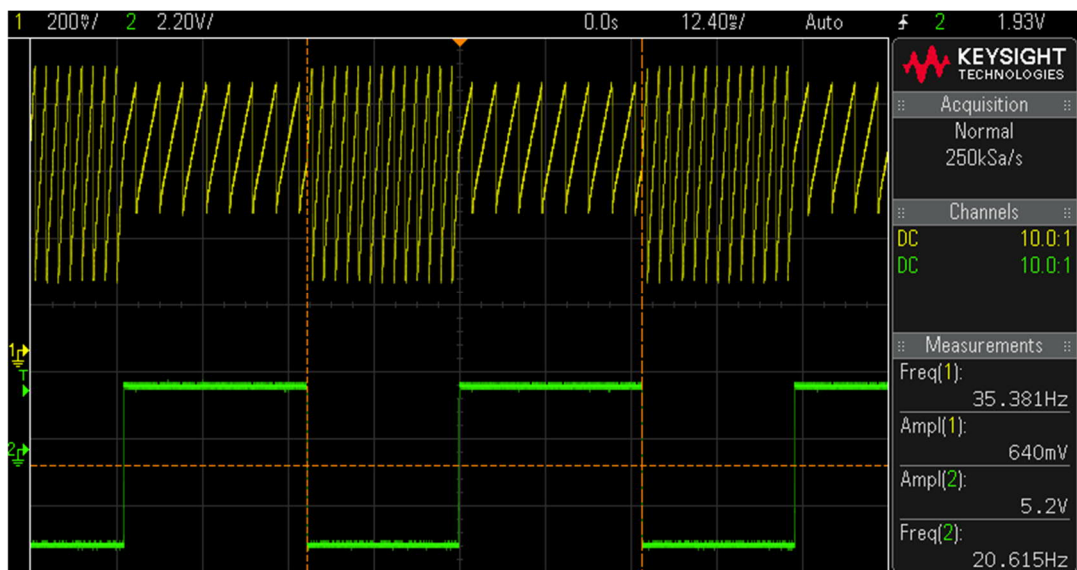
Yksittäisten lohkojen toiminnan tarkastelu on melko suoraviivaista, joten on mielekästä tarkastella sitä, miten lohkojen toiminta vaikuttaa toisiinsa, kun ne kytketään yhteen liitteen 1 osoittamalla tavalla. Mittauksissa keskitytään siihen, kuinka matalataajuusoskillaattorin aaltomuoto vaikuttaa eksponentiaalisen jännite-virtamuuntimen toimintaan ja lopulta ramppioskillaattorin aaltomuotoon eli kuultavaan äänisignaaliin. Tarkastelu toteutetaan matalataajuusoskillaattorin jokaisella aaltomuodolla.

Tarkastellaan ensin kanttiaallon vaikutusta ramppioskillaattorin taajuuteen. Teoriassa kahden tasajännitetason välillä vaihteleva kanttiaalto aiheuttaa ramppioskillaattorin ulostulosignaaliin kaksi selvästi erottuvaa taajuutta, jotka vaihtelevat kanttiaallon pulssisuhteen mukaan. Kuvassa 18 on esitetty ylempänä ramppioskillaattorin aaltomuoto ilman kanttiaallon vaikutusta sekä alempana matalataajuusoskillaattorin ulostulon kanttiaalto.



Kuva 18: Ramppioskillaattorin perustaajuus (kanava 1) ja kanttiaalto (kanava 2)

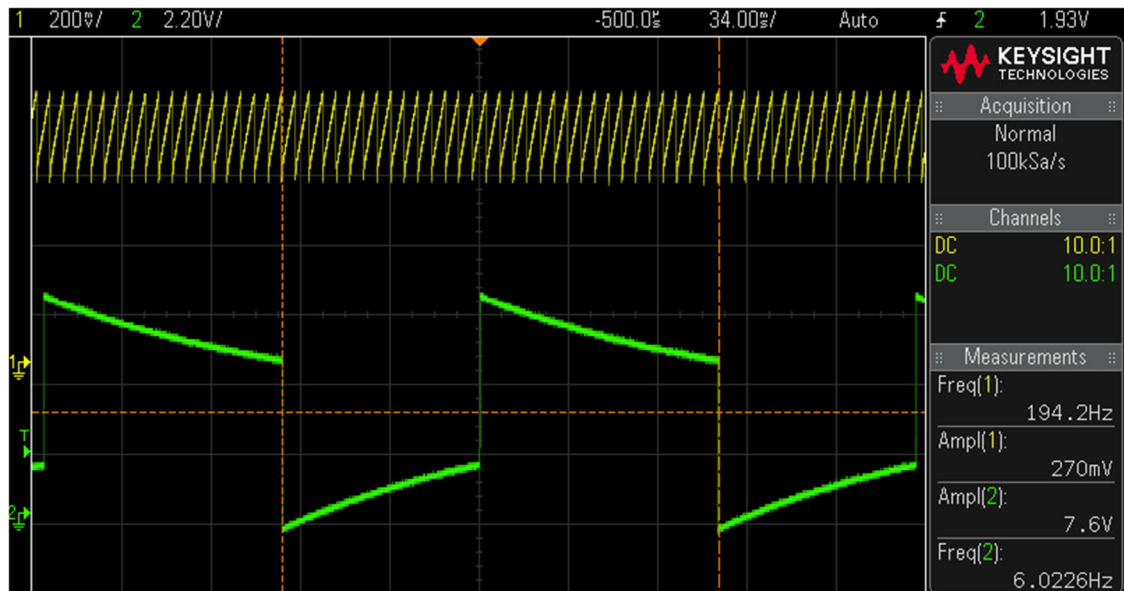
Kuvasta 18 huomataan, että ramppioskillaattorin taajuus pysyy tasaisena, kun sen ohjausvirtaan vaikuttaa ainoastaan tasajännitekomponentti eli kanavan 2 signaali ei vielä vaikuta kanavalla 1 mitattuun ramppioskillaattorin ulostuloon. Perustaajuus on kuvan 18 tapauksessa 193,4 Hz. Tarkastellaan seuraavaksi, miten ramppioskillaattorin taajuus muuttuu, kun sen ohjausvirtaan lisätään kanttiaallon tuottama komponentti. Kanttiaallolla taajuusmoduloitu ramppioskillaattorin ulostulo on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19: Ramppioskillaattorin ulostulo, kun ohjausvirtaa muutetaan kanttiaallolla

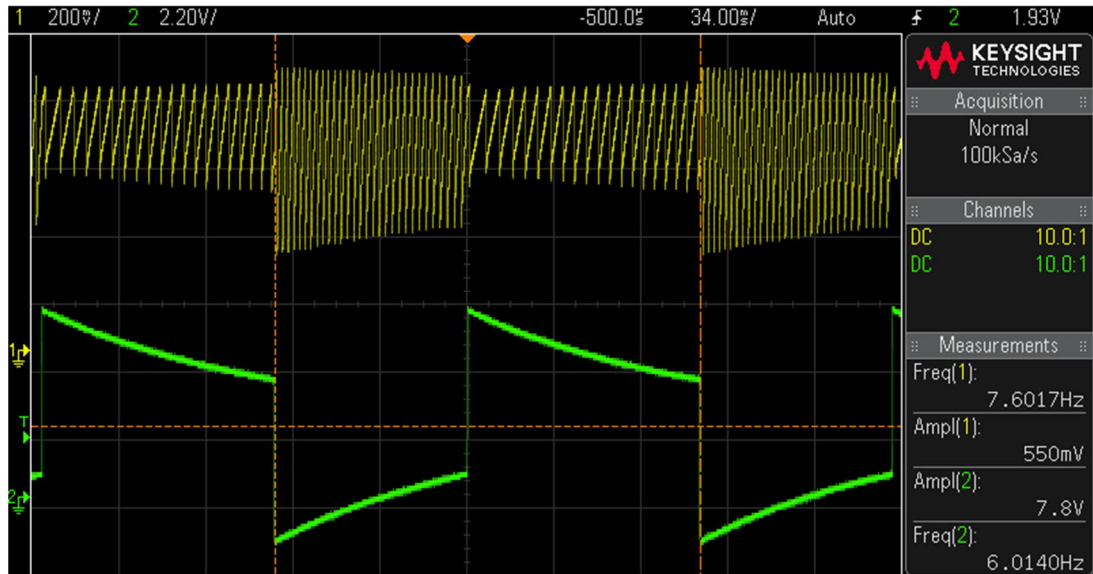
Kuvasta 19 huomataan, että kaava (16) pätee, eli kanttiaallon ollessa korkeassa tilassa ramppioskillaattorin taajuus on matalampi, ja vastaavasti matalassa tilassa taajuus kasvaa. Tulokset vastaavat hypoteesia, ja taajuus pysyy puolijaksoilla käytännössä vakiona. Ramppioskillaattorin taajuus voidaan laskea kuvasta 19 molemmilla kanttiaallon puolijaksoilla arvioimalla. Yksi ruutu vaaka-akselilla on 12,40 ms. Korkeammalla taajuudella yhteen ruutuun mahtuu noin 8 jaksoa, joten taajuudeksi saadaan $f_H = 1/\Delta t = 1 / (12,4 \text{ ms}/8) \cong 645 \text{ Hz}$. Vastaavasti matalammalla taajuudella yhteen ruutuun mahtuu noin 4 jaksoa, jolloin taajuus on $f_L \cong 323 \text{ Hz}$. Tämä vastaa teoriassa siis noin 18 mV:n muutosta jännitteessä ΔV_{BE} .

Tarkastellaan seuraavaksi derivoidun kanttiaallon vaikutusta ramppioskillaattorin taajuuteen. Kuvassa 20 on esitetty ramppioskillaattorin perustaajuus ja matalataajuusoskillaattorin ulostulo.



Kuva 20: Ramppioskillaattorin perustaajuus (kanava 1) ja derivoitu kanttiaalto (kanava 2)

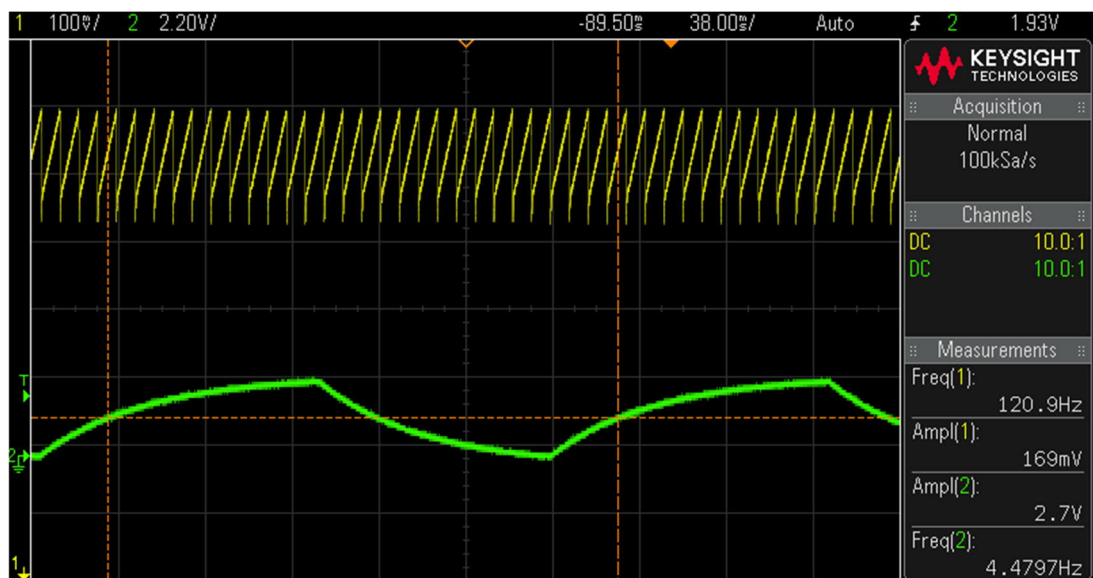
Kuten kuvan 18 tapauksessa, myös kuvasta 20 huomataan, ettei ramppioskillaattorin taajuus muutu, kun ohjausvirtasignaali pysyy vakiona, eli kanavan 2 signaali ei kuvan 20 tapauksessa vielä vaikuta kanavalla 1 mitattuun ramppioskillaattorin ulostulosignaaliin. Ramppioskillaattorin taajuus on nyt 194,2 Hz. Matalataajuusoskillaattorin aaltomuoto on derivoitu kanttiaalto, eli tilanvaihdoksen jälkeen aluksi korkea jännite alkaa laskea tai matala jännite nousee kondensaattorin latautuessa tai purkautuessa. Tarkastellaan seuraavaksi, miten derivoitu kanttiaalto muuttaa ramppioskillaattorin taajuutta kuvassa 21.



Kuva 21: Derivoidun kanttiaallon vaikutus ramppioskillaattorin taajuuteen

Kuvasta 21 voidaan havaita, että ramppioskillaattorin taajuus muuttuu samalla tavalla kuin kuvan 19 tapauksessa, eli matalampi jännite aiheuttaa korkeamman taajuuden ja päinvastoin. Kuitenkin nyt kun matalataajuusoskillaattorin ulostulo ei ole kahden tilan välillä vaihteleva jännitetaso, ramppioskillaattorin ulostulossa näkyy erilainen taajuuden muutos kuin kanttiaallon tapauksessa. Ramppiaallon taajuus nousee, kun derivoidun kanttiaallon jännite laskee, ja kun derivoidun kanttiaallon jännite nousee, ramppioskillaattorin taajuus laskee.

Tarkastellaan viimeisenä integroidun kanttiaallon vaikutusta ramppioskillaattorin taajuuteen. Ramppioskillaattorin aaltomuoto pelkällä tasajänniteohjauksella ja integroitu kanttiaalto on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22: Ramppioskillaattorin perustaajuus (kanava 1) ja integroitu kanttiaalto (kanava 2)

Nyt ramppioskillaattorin perustaajuus on 120,9 Hz, eikä kanavan 2 signaali vielä vaikuta ramppioskillaattorin taajuuteen. Matalataajuusoskillaattorin ulostulossa on nyt integroitu kanttiaalto, jonka aaltomuoto on periaatteessa kondensaattorin latautumis- tai purkautumiskäyrän mukainen riippuen kanttiaallon tilasta. Se muuttaa edellisten tapausten kaltaisesti ramppioskillaattorin taajuutta. Kuvassa 23 on esitetty integroidun kanttiaallon vaikutus ramppioskillaattorin taajuuteen.



Kuva 23: Integroidun kanttiaallon vaikutus ramppioskillaattorin taajuuteen

Kuvasta 23 nähdään jälleen, että matalammalla jännitteellä ramppioskillaattorin taajuus on korkeampi. Nyt taajuus nousee ja laskee aluksi nopeammin, ja muutosnopeus on sitä hitaampi, mitä lähempänä kondensaattorin jännite on maksimia tai minimiä. Erona derivoituun kanttiaaltoon on se, että integroitu kanttiaalto jatkuu tilanvaihdon jälkeen samasta pisteestä, kun taas derivoidun kanttiaallon polariteetti vaihtuu puolijaksojen välillä päinvastaiseksi. Ramppioskillaattorin taajuuden muutokset eivät näin ollen ole niin suuria ja nopeita kuin derivoidulla kanttiaallolla.

Kuvista 19, 21 ja 23 voidaan huomata lisäksi se, että ramppioskillaattorin ulostulosignaalin taajuuden kasvaessa myös sen amplitudi kasvaa. Lisäksi suoritettiin mittaus pelkästään ohjausjännitteen tasajännitekomponentin vaihtelun vaikutuksesta taajuuteen, ja havaittiin, että noin 35 mV:n muutos jännitteessä ΔV_{BE} sai aikaan ramppioskillaattorin taajuuden kaksinkertaistumisen.

3.6 Mittaustulosten vertailu teoriaan

Sekä ramppi- että matalataajuusoskillaattoreiden aaltomuodot vastasivat teoriaa melko hyvin. Kuitenkin ramppioskillaattorin tapauksessa nousevan rampin alkupäässä on kohta, jolloin nouseva ramppi ei ole suora. Tämä poikkeava kohta voi johtua siitä, ettei konden-

saattori C_3 ehdi purkautua kokonaan aikana, jona transistori Q_1 johtaa. Matalataajuusoskillaattorin aaltomuodot eivät myöskään täysin vastaa teoriaa. Voi olla, että mittauksissa käytetyillä taajuuksilla aika kanttiaallon tilanvaihdosten välillä saattaa olla niin pieni, etteivät kondensaattorit ehdi latautua tai purkautua niin paljon, että aaltomuodot olisivat lähellä teoriaa.

Kuitenkin ramppioskillaattorin taajuus muuttuu matalataajuusoskillaattorin vaikutuksesta teorian kaltaisesti. Mitä suurempi ramppioskillaattorin ohjausvirta oli eli mitä matalampi jännite transistorin Q_2 kannalla näkyi, sitä korkeammalla taajuudella ramppioskillaattori värähteli. Kytkenän rakenteesta johtuen teoriassa ulostulosignaalin amplitudin ei pitäisi muuttua, sillä komparaattorin U_{1-B} referenssijännite pysyy vakiona. On kuitenkin mahdollista, että komparaattori U_{1-B} :n nopeus (slew rate) ei riitä korkeammilla taajuuksilla transistorin Q_1 liipaisuun tarpeeksi nopeasti. LM324:n datalehdellä slew raten arvoksi on yksikkövahvistuksella ilmoitettu $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$. Mitä hitaammin U_{1-B} pystyy reagoimaan sen sisääntulojen jännite-eron polariteetin muuttumiseen, sitä suurempi jännite kondensaattoriin C_3 ehtii latautua, mikä näkyy ulostulosignaalin amplitudin kasvamisena. Jos ajatellaan transistorin Q_1 liipaisuun vaativan sen hilajännitteeksi 0 V , vie muutos $-4,5 \text{ V}$:stä 0 V :iin $9 \mu\text{s}$. Tänä aikana kondensaattori C_3 ehtii latautua, ja mitä suurempi latausvirta on, sitä suurempi jännite kondensaattoriin ehtii latautua.

Mittauksissa taajuuden kaksinkertaistumiseen vaadittiin noin 35 mV :n muutos jännitteessä ΔV_{BE} . Teoriassa tämä jännite on noin 18 mV . Ero teoriaan on lähes kaksinkertainen, ja saattaa johtua transistorien Q_1 ja Q_2 teoriaa matalammasta virtavahvistuksesta. Operaatiovahvistimen U_{1-A} biasvirta on datalehden mukaan tyypillisesti noin 20 nA . Biasvirta on mikroampeeriluokkaa oleviin kytkenän muihin virtoihin [4] verrattuna niin pieni, että sen vaikutus ramppioskillaattorin taajuuteen voidaan jättää huomiotta.

4. YHTEENVETO JA KEHITYSIDEAT

Käsittelyn teorian pohjalta on mahdollista luoda perustason ymmärrys Alien Screamerin toiminnasta ja siitä, kuinka oskillaattoriipiirejä siinä hyödynnetään äänen tuottamiseen. Operaatiovahvistimilla toteutetut oskillaattorit ovat monipuolisia ja melko yksinkertaisia, minkä vuoksi niiden käyttö musiikkisovelluksissa on yleistä. Mikäli tavoitteena olisi rakentaa musikaalisesti tarkka ja soiva analoginen syntetisaattori, olisi kytkentöjä muokattava muun muassa paremmin lämpötilakompensoiduiksi ja ideaalisemmin toimiviksi, mikä huomataan mittaustulosten ja teorian eroavaisuuksista. Työssä käsitellyt lohkoja hyödyntäen on kuitenkin mahdollista toteuttaa useita erilaisia ulostulosignaaleja tuottava äänigeneraattori, jonka toiminnan tarkastelu sähköisellä tasolla pysyy ymmärrettävänä.

Rakennetun kytkennän toimintaa voitaisiin parantaa selvittämällä, vaikuttaako komparaattorina toimivan U_{1-B} :n nopeus ramppioskillaattorin ulostulon aaltomuotojen epäjatkuvuuskohtiin ja amplitudin vaihteluun. Lisäksi eksponentiaalisen jännite-virtamuuntimen transistorit kannattaisi valita siten, että niiden virtavahvistukset olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan ja tarpeeksi korkeat. Matalataajuusoskillaattorin kondensaattoreiden C_4 ja C_5 kapasitanssiarvojen pienentäminen voisi parantaa sen aaltomuotoja, sillä kondensaattorit ehtisivät purkautua ja latautua nopeammin tuottaen ulostuloon suuremman jännitteen vaihtelun.

LÄHTEET

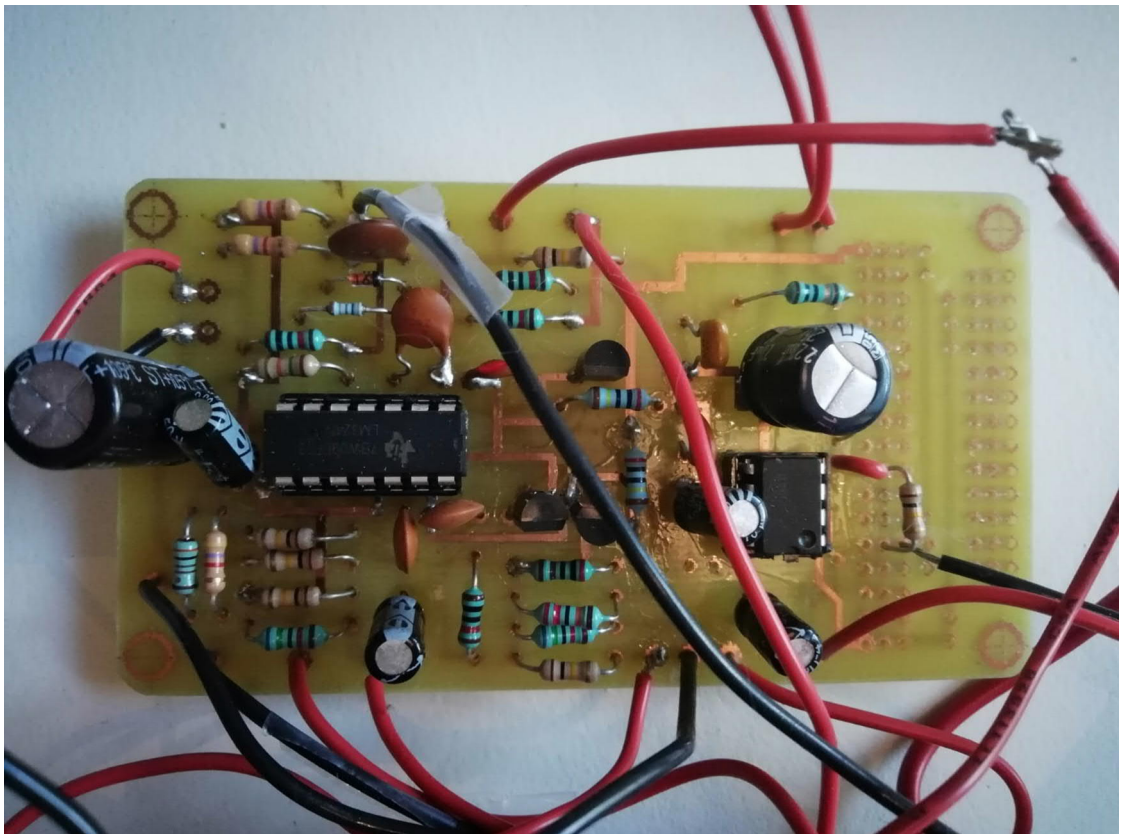
- [1] M. Jenkins, Analog Synthesizers: Understanding, Performing, Buying - from the legacy of Moog to software synthesis, Taylor & Francis Ltd, Oxford 2009.
- [2] M. Russ, Sound synthesis and Sampling, 3rd. ed, Elsevier Ltd, Oxford 2009. Saatavissa (viitattu 24.3.2018): http://imw.curriculum-manager.co.uk/resources/hnd/hnd_assignments/resources/Sound_Synthesis_Sampling.pdf
- [3] N. Storey, Electronics: A systems approach, 3rd ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2006.
- [4] R. Wilson, MFOS Alien Screamer Noise Box, Music From Outer Space, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.4.2018) http://musicfromouterspace.com/analogsynth_new/ALIENSCREAMER/ALIENSCREAMER.php
- [5] S. Franco, Design with operational amplifiers and analog integrated circuits, 3rd, international ed. McGraw-Hill, Boston (MA) 1998.
- [6] H. Chamberlin, Musical applications of microprocessors, 1st ed. Hayden Book Company, inc. New Jersey 1980.
- [7] A. R. Hambley, Electronics, 2nd ed. Prentice Hall inc. New Jersey 2000.
- [8] W. Hill, P. Horowitz, The Art of Electronics, 2nd ed. Cambridge University Press 1989.
- [9] LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier datasheet, Texas Instruments, Literature Number: SNAS545C, May 2017. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf>
- [10] LM124, LM224, LM324, LM2902 Quadruple Operational Amplifiers datasheet, Texas Instruments, Literature Number: SLOS066W, March 2015. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm324.pdf>

LIITE 2: KUVIA RAKENNETUSTA LAITTEESTA

Laitteen etupaneeli



Piirilevy, jossa komponentit juotettu paikoilleen.



Kotelo

