TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI OHTONEN
REGENERATIIVINEN TAAJUUSJAKAJA

Kandidaatintyö

Tarkastajat: Jari Kangas, Olli-Pekka Lundèn
Tampereen teknillinen yliopisto
06.10.2018

ANTTI OHTONEN: Regeneratiivinen taajuusjakaja
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 27 sivua, 0 liitesivua
syyskuu 2018
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Elektroniikka
Tarkastajat: Lehtori Jari Kangas ja yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundèn
Avainsanat: regeneratiivinen taajuusjakaja, taajuusjakaja

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä simuloitiin ja mitattiin regeneratiivinen kahdellajakaja. Simulaatioita käytettiin apuna koekytkentälevylle rakennettavan, ja mitattavan, regeneratiivisen taajuusjakajan komponenttien mitoitukseen ja valintaan.

Työssä käytettiin National Instrumentsin Multisim-ohjelmistoa ja National Instrumentsin VirtualBench-mittalaitetta. Simulaatiot ja mittaukset saatiin toteutettua onnistuneesti. Selville saatiin, että käytetyillä taajuusalueilla (noin 8–10 MHz) RC alipäästösuotimen -3 dB rajataajuuden suhde toimivan jakokaistan keskitaajuuteen kasvaa jakokaistan keskitaajuuden kasvaessa, mikäli sisäänsyötetun signaalin amplitudia ei muuteta.

Työ antaa pohjan matemaattisen mallin määritykselle, jonka avulla regeneratiivinen taajuusjakaja voisi olla mahdollista toteuttaa korkeillekin taajuuksille. Regeneratiivisen taajuusjakajan toteuttaminen koekytkentälevylle ei ole kuitenkaan käytännöllistä.

SISÄLTÖ

1. Johdanto 1

2. Teoria 2

2.1 Sekoitin 3

2.1.1 Sekoittimen toimintaperiaate 3

2.1.2 Sekoittimen rakenne 5

2.2 Alipäästösuodin 6

2.3 Vahvistin 9

3. Toteutus 11

4. Tulokset 14

4.1 Simulaatiot 15

4.2 Mittaukset 19

5. Päätelmät 25

6. Yhteenveto 27

Lähteet 28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FM	Frequency modulation eli taajuusmodulaatio.
RF	Radio frequency eli radiotaajuus.
RTJ	Regeneratiivinen taajuusjakaja.

C	kapasitanssi
f_0	-3 dB:n rajataajuus
$_{high}$	alaindeksi maksimiarvolle
L	induktanssi
$_{low}$	alaindeksi minimiarvolle
$_{mid}$	alaindeksi keskiarvolle
$_{pp}$	alaindeksi huipusta huippuun arvolle
R	resistanssi
U	jännite
U_{in}	tulojännite
U_{out}	lähtöjännite
ω	kulmataajuus
X	reaktanssi
Z	impedanssi

1. JOHDANTO

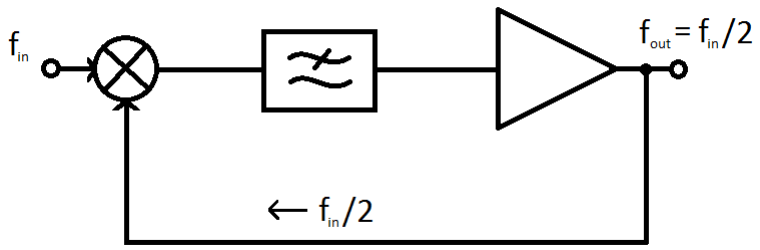
Elektroniikassa ja RF-tekniikassa käsitellään jaksollisia signaaleja, joita voidaan käyttää esimerkiksi kantoaaltoina informaation siirtämiseen [4]. Kantoaallot ovat kuitenkin usein korkeataajuisia, eikä niiden sisältämää informaatiota välttämättä voida käsitellä, mikäli taajuutta ei ensin lasketa. Siksi käytetään taajuusjakajia, jotka mahdollistavat informaation purkamisen matalammilla taajuusalueilla. Mainittu tapaus on vain yksi esimerkki taajuusjakajan tarpeesta, taajuutta voidaan joutua laskemaan muissakin tapauksissa. Kuitenkin tarve on periaatteellisella tasolla aina sama - taajuus on liian suuri, jotta signaalia voitaisiin käsitellä sellaisenaan.

Taajuusjakajina voidaan käyttää esimerkiksi digitaalisia kiikkuja tai niistä rakennettuja yhdistelmiä, ja ne soveltuvatkin käytettäväksi myös RF-tekniikassa. Tarpeeksi suurien taajuuksien kanssa kiikut eivät kuitenkaan enää toimi, sillä ne muuttavat tilaansa sisäisten transistorien avulla, joiden tilan muuttumiseen liittyy aina viive. Analogisissa jakajissa ei aina ole tätä ongelmaa ja siksi niitä voidaankin käyttää esijakajina ennen digitaalisia jakajia. Yksi toimiva jakaja näihin tilanteisiin on regeneratiivinen taajuusjakaja (RTJ). [10]

Tässä työssä simuloidaan ja rakennetaan regeneratiivinen taajuusjakaja. Työn jakaja koostuu sekoittimesta, alipäästösuotimesta ja vahvistimesta. Työssä pyritään ymmärtämään erityisesti alipäästösuotimen vaikutusta jakajan toimintaan.

2. TEORIA

Kahdellajakajan tapauksessa RTJ koostuu kolmesta pääkomponentista: sekoittimesta, alipäästösuotimesta ja vahvistimesta. [7] Alla nähdään kuva yksinkertaisesta RTJ-kokoonpanosta.



Kuva 2.1 *Regeneratiivinen taajuusjakaja.*

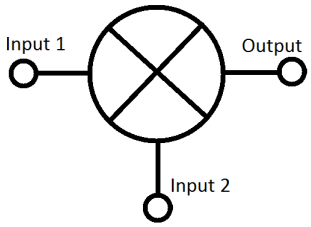
Kuvasta 2.1 nähdään, kuinka RTJ:n kolme pääkomponenttia on kytketty. Sekoitin ottaa vastaan tulosignaalin ja takaisinkytkentäsignaalin. Sekoittimen lähtösignaali menee alipäästösuotimelle, ja vahvistin vahvistaa suodatetun signaalin. Vahvistettu signaali syötetään jakajan lähtöön ja takaisinkytkentänä sekoittimelle. Signaalin taajuus puolittuu tulon ja lähdön välillä.

Sekoitin tuottaa sisääntulo- ja takaisinkytkentäsignaalista useita taajuuksia, joista selvimmin erottuvat summa- ja erotustaajuus ($\frac{3}{2}f$ ja $\frac{1}{2}f$). Alipäästösuodin suodattaa pois summataajuuden ja päästää läpi erotustaajuuden. Vahvistin pitää RTJ:n silmukkavahvistuksen suurempana kuin yksi. Mikäli takaisinkytketyn signaalin $f_{in}/2$ silmukkavahvistus on pienempi kuin yksi, tai jonkin toimivan jakokaistan ulkopuolella olevan signaalin silmukkavahvistus on suurempi kuin yksi, ei haluttua jakotulosta saada.

Luvuissa 2.1 - 2.3 tarkastellaan jokaisen pääkomponentin toimintaa ja niiden osuutta kokonaisuudessa.

2.1 Sekoitin

Sekoitin (symboli kuvassa 2.2) on komponentti, joka ottaa vastaan kaksi signaalia ja tuottaa näiden avuilla uuden signaalin. Kyseessä on kolminapainen epälineaarinen komponentti.

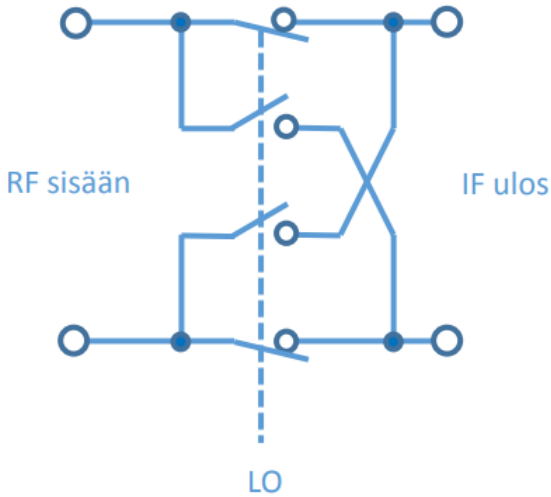


Kuva 2.2 *Sekoittimen symboli.*

Input 1 voidaan ajatella menevän suoraan Output:iin. Input 2:n voidaan taas ajatella kääntävän Outputin napaisuuttaa joka toisella puolijaksolla sinisignaalin tapauksessa.

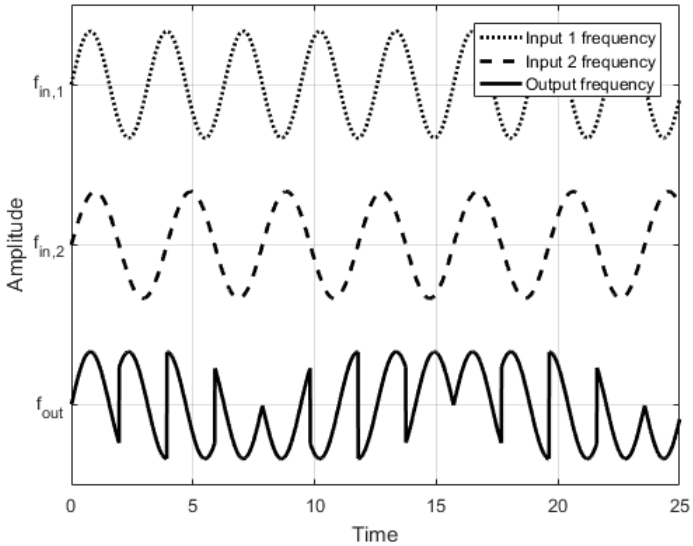
2.1.1 Sekoittimen toimintaperiaate

Sekoitinta voisi verrata kytkinverkkoon (kuva 2.3), joka kääntää sisäänsyötetyn signaalin napaisuuden toisinpäin aina, kun toiseen porttiin (LO) syötetyn signaalin teho vaihtuu positiivisesta negatiiviseksi, tai toisinpäin. [8].



Kuva 2.3 *Kytkinverkko kuvaamaan kaksoisbalansoitua sekoitinta.*

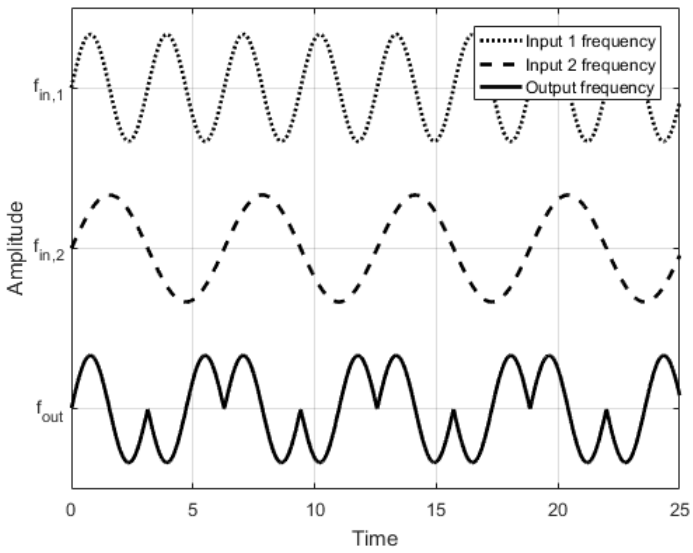
Alla olevat kuvat 2.4 ja 2.5 on tuotettu Matlab-ohjelmistolla esittämään sekoittimen lähdön riippuvuutta sekoittimen tuloihin. Todellisessa tapauksessa tässä työssä käytetty kaksoisbalansoitu sekoitin ottaa vastaan häiriöitä, varsinkin tällä kokoonpanolla, ja siksi kuvat ovatkin vain viitteellisiä.



Kuva 2.4 *Sekoittimen toimintaa havainnollistavia signaaleita.*

Kuvassa 2.4 signaalit $f_{in,1}$ ja $f_{in,2}$ ovat sekoittimelle syötetyt tulosignaalit. Lähtösignaali f_{out} muodostuu signaalista $f_{in,1}$, mutta signaalin osat, jotka ovat signaalin $f_{in,2}$ negatiivisten puolijaksojen kohdalla, on käännetty napaisuudeltaan toisinpäin. Signaalissa f_{out} voidaan havaita silmämääräisesti useita erisuuruisia, hetkellisiä, taajuuksia, mutta kaksi taajuutta näkyy selvästi helpommin kuin muut.

Ensimmäisen havaittavan taajuuden jakso alkaa ajanhetkellä 0 ja päättyy hiukan ajanhetken 15 jälkeen. Tämä taajuus on kahden sisään syötetyn taajuuden erotustaajuus $f_{in,1} - f_{in,2}$. Summataajuuden $f_{in,1} + f_{in,2}$ ensimmäiset vajaat 2 jaksoa nähdään suunnilleen välillä 0–4.

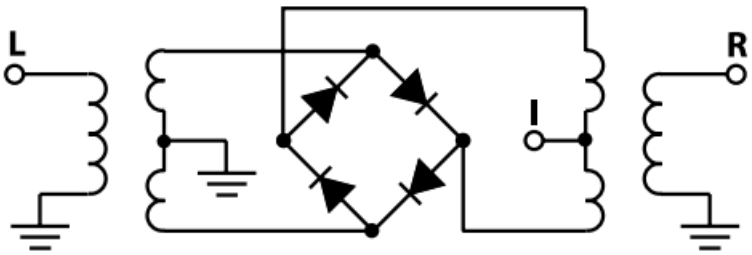


Kuva 2.5 *Sekoittimen signaalit tässä työssä.*

Kuvassa 2.5 nähdään tilanne sekoittimen signaaleista regeneratiivisen kahdellajakajan tapauksessa. Signaali $f_{in,1}$ on jakajalle sisäänsyötetty signaali ja $f_{in,2}$ on jakajan lähdöstä takaisinkytketty signaali, jonka taajuus on puolet signaalin $f_{in,1}$ taajuudesta. Sekoittimen lähdössä signaali f_{out} sisältää useita taajuuksia, mutta kaksi jakajan kannalta merkittävintä ovat summataajuus $f_{in,1} + f_{in,2} = f_{in,1} + \frac{1}{2}f_{in,1} = \frac{3}{2}f_{in,1}$ ja erotustaajuus $f_{in,1} - f_{in,2} = \frac{1}{2}f_{in,1}$.

2.1.2 Sekoittimen rakenne

Tässä työssä käytetään kaksoisbalansoitua sekoitinta, jonka rakenne on nähtävissä kuvasta 2.6. Sekoittimena yritettiin käyttää myös XOR-porttipiiriä, mutta jakajaa ei kyseisellä piirillä saatu toimimaan.



Kuva 2.6 *Kaksoisbalansoidun sekoittimen rakenne [9].*

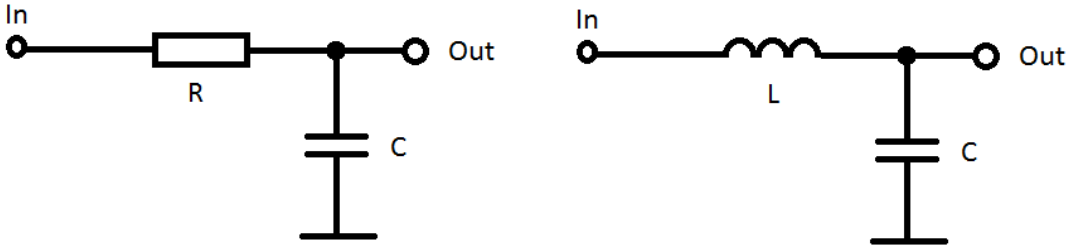
Kaksoisbalansoidun sekoittimen etu XOR-porttiin nähden on kynnysjännitteen mataluus. Kynnysjännite aiheutuu kaksoisbalansoidussa sekoittimessa diodeista, kun taas XOR-piirin kohdalla kyseessä on transistoreiden aiheuttama kynnysjännite. Matalammalla kynnysjännitteellä sekoittimen lähdön arvo reagoi myös pienempiin syötteisiin. Testimittaukset XOR-portin osalta osoittivat, että signaalien tulisi olla kaksoisbalansoituun sekoittimeen nähden vahvempia. Tämä herätti epäilyksen, että XOR-portin kanssa systeemin silmukkavahvistus ei välttämättä riitä käynnistämään jakoilmiötä. Toisaalta XOR-portin tuloimpedanssi voisi matalilla taajuuksilla olla kuitenkin kaksoisbalansodun sekoittimen tuloimpedanssia suurempi ja voisi vähentää näin vahvistimen lähdön kuormitusta.

2.2 Alipäästösuodin

Alipäästösuodin on komponentti, joka suodattaa signaalista kaikki rajataajuuden yläpuolella olevat taajuudet, mutta päästää läpi taajuudet, jotka ovat rajataajuuden alapuolella. Kuvassa 2.7 on yksi alipäästösuotimen symboleista.

Kuva 2.7 *Alipäästösuotimen symboli.*

Ideaalinen alipäästösuodin ei aiheuttaisi ollenkaan vaimennusta rajataajuuden alapuolella oleville signaaleille eikä muuttaisi vaihetta, mutta vaimentaisi yläpuolella olevat signaalit kokonaan. Tällaista suodinta ei kuitenkaan käytännössä ole, joten suotimia käytettäessä tulee ottaa huomioon, kuinka paljon vaimennusta kullekin taajuusalueelle aiheutuu.



Kuva 2.8 *RC- ja LC-alipäästösuotimet.*

Kuvassa 2.8 näkyy kaksi yksinkertaista alipäästösuodinta. Ensimmäinen vasemmalta oikealle on RC-alipäästösuodin ja toinen LC-alipäästösuodin. RC-alipäästösuotimen siirtofunktion 2.1 avulla voidaan määrittää, kuinka paljon kunkin taajuusalueen signaali vaimenee alipäästösuotimessa. [11] Siirtofunktio

$$H(\omega) = \frac{1}{j\omega RC + 1} \tag{2.1}$$

määrittää RC-alipäästösuotimen lähdön suhteen alipäästösuotimen tuloon kulmataajuuden funktiona. LC-alipäästösuotimelle vastaava siirtofunktio on

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}\,. \tag{2.2}$$

LC-alipäästösuotimen siirtofunktion kaava täytyy käytännön kannalta johtaa erikseen, sillä ideaalitapauksessa funktion arvo lähestyy ääretöntä kulmataajuuden lähestyessä resonanssitaajuutta. Käytännössä kondensaattorin rinnalle voidaan olettaa vastus, joka vastaa suotimen lähtöön kytkettävää kuormaa. Kondensaattorin ja vastuksen aiheuttama yhteinen impedanssi on

$$Z_{CR} = \frac{RX_c}{R + X_c}\,,$$

missä

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

ja siitä seuraa, että

$$Z_{CR} = \frac{R}{j\omega CR + 1}\,.$$

Kelan aiheuttama reaktanssi on

$$X_L = j\omega L\,,$$

joten

$$Z_{CRL} = \frac{R}{j\omega CR + 1} + j\omega L\,.$$

Siirtofunktion kaava on

$$H(\omega) = \frac{Uout}{Uin}\,.$$

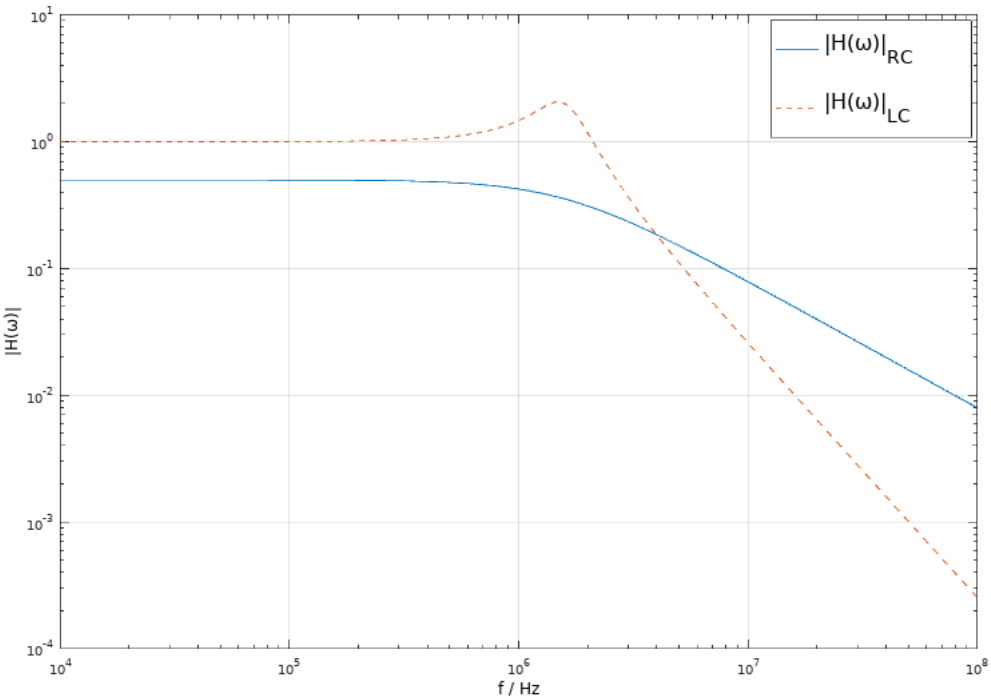
Jos kaava

$$U_{out} = \frac{Z_{CR}}{Z_{CRL}} U_{in} = \frac{\frac{R}{j\omega CR+1}}{\frac{R}{j\omega CR+1} + j\omega L} U_{in} = \frac{1}{1 + \frac{j\omega L - \omega^2 RCL}{R}} U_{in}$$

sijoitetaan siirtofunktion kaavaan, siirtofunktioksi saadaan

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega L - \omega^2 RCL}{R}}\,. \tag{2.3}$$

Kuten kaavasta 2.1 nähdään, suurempi kulmataajuus johtaa pienempään arvoon, ja koska $H(\omega)U_{in} = U_{out}$, voidaan päätellä, että taajuuden kasvaessa jännitteen itseisarvo laskee. LC-alipäästäsuotimen ostalta siirtofunktion kuvaaja on hiukan monimutkaisempi. Kuvassa 2.9 nähdään havainnekuvat RC- ja LC-alipäästösuotimien siirtofunktioista. Kuva on toteutettu käyttäen GNU Octave ohjelmistoa.



Kuva 2.9 *Alipäästösuotimien siirtofunktioiden havainnekuva.*

Alipäästösuotimen tehtävä RTJ:ssä on suodattaa sekoittimen tuottamista taajuuksista mahdollisimman hyvin kaikki taajuudet, jotka ovat korkeampia kuin puolet jakajalle syötetysta taajuudesta, ja mahdollisimman huonosti tätä matalammat taajuudet. RTJ:n tapauksessa siis sekoittimen tuottamista kahdesta, osiossa 2.1 mainitusta taajuudesta, jäljelle jäisi $\frac{1}{2}f_{in}$.

Työssä myöhemmin nähtävät RC-alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuudet on laskettu kaavalla 2.4.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2.4}$$

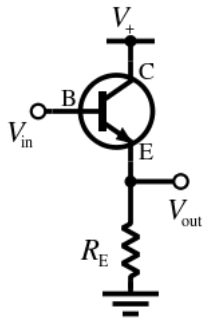
Rajataajuutta käytetään tässä työssä vertailuarvona eri suotimille.

2.3 Vahvistin

Regeneratiivisen taajuusjakajan tapauksessa vahvistin vahvistaa alipäästösuotimen suodattamaa signaalia ja syöttää sen jakajan lähdölle sekä takaisinkytkentänä sekoittimelle. Vahvistimeksi regeneratiiviseen taajuusjakajaan kelpaa mikä vain vahvistin, joka vahvistaa halutun taajuusalueen signaalia riittävästi säröyttämättä sitä.

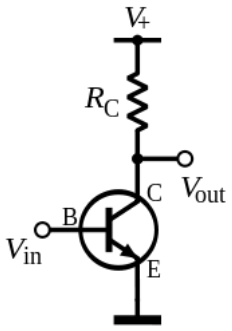
Vahvistinta valittaessa on hyvä ottaa myös huomioon alipäästösuodin sekä sekoitin, sillä vahvistimen sisäänmenoimpedanssi voi kuormittaa alipäästösuodinta ja sekoitinta, jolloin alipäästösuodin saattaa vaimentaa haluttuja taajuuksia liikaa.

Yhteiskollektorivahvistimella 2.10 voidaan ratkaista kuormitusongelma, sillä sen sisäänmenoimpedanssi on suuri. Yhteiskollektorivahvistin ei kuitenkaan vahvista jännitettä ollenkaan, joten se ei yksinään riitä vahvistamaan signaalia. [6]



Kuva 2.10 *Yhteiskollektorivahvistin [2].*

Kuvassa 2.11 nähdään yhteisemitterivahvistin, jonka jännitevahvistus on suuri. Sisäänmenoimpedanssilla ei ole suuri, mutta se ei aiheuta ongelmia, mikäli ennen kyseistä vahvistinta on edellä mainittu yhteiskollektorivahvistin puskurina. Yhteisemitterivahvistimella saadaan aikaan riittävän suuri jännitevahvistus regeneratiivisen jakajan tarpeisiin. [5]



Kuva 2.11 *Yhteisemitterivahvistin [3].*

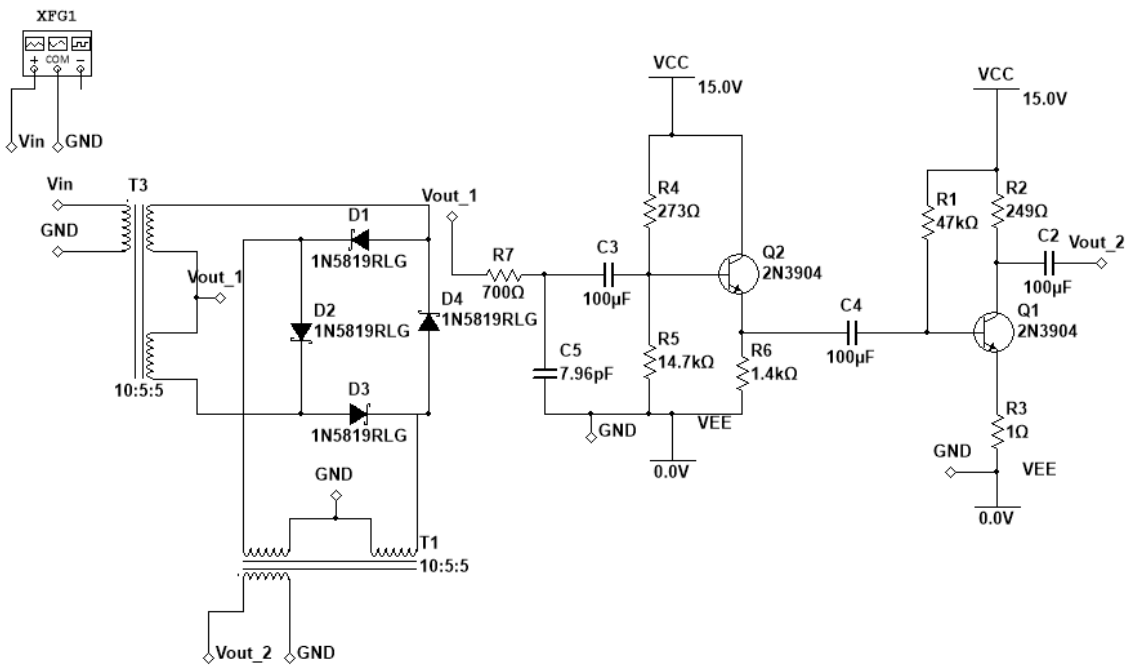
Yhteisemitterivahvistimen lähtöimpedanssilla voi olla merkitystä, mikäli sekoittimen sisäänmenoimpedanssi on pieni käytetyillä taajuuksilla. Siksi ylimääräisestä yhteiskollektorivahvistimesta ei välttämättä olisi haittaa, mutta tässä työssä se on kuitenkin jätetty pois.

3. TOTEUTUS

RTJ:n tutkimiseen kirjallisen materiaalin lisäksi päätettiin ottaa avuksi simulaatiot ja mittaukset. Simulaatiot toteutettiin National Instrumentsin Multisim-ohjelmistolla, ja mittaukset toteutettiin rakentamalla koekytkentälevylle regeneratiivinen taajuusjakaja ja mittaamalla se käyttäen apuna National Instrumentsin VirtualBench-mittalaitetta.

Simulaatioissa rakennettiin kuvan 3.1 mukainen kytkentä. Vahvistimia ja alipäästösuotimia jouduttiin mitoittamaan kokeellisesti, sillä esimerkiksi alipäästösuotimen mitoittaminen -3 dB:n rajataajuuden alueelle sisäänsyötetyllä taajuudella ei tuottanut toimivaa jakajaa simulaatioissa. Alipäästösuodin testattiin sekä RC- että LC-versiona eri komponenttiarvoilla. Vahvistimet mitoitettiin 15 V:n käyttöjännitteille ja 10 mA:n kollektorivirralle. Yhteisemitterivahvistimen jännitevahvistus pyrittiin saamaan mahdollisimman suureksi. Simulaatioissa käytettiin 10 MHz:n sisäänmenosignaalia, jonka amplitudi huipusta huippuun oli 2 V. Diodeiksi valittiin tavanomaiset zenerdiodit sattumanvaraisesti. Kytkentäkondensaattoreina käytettiin ylimitoitettuja kondensaattoreita, sillä käytännössä esiintyvän parasiittisen induktanssin mallintamista ei nähty tarkoituksenmukaiseksi.

Simulaatiot aloitettiin aina ajanhetkestä nolla, jolloin sisään ei oltu vielä syötetty signaalia. Tällöin päästiin näkemään, kuinka jakaminen alkaa ja mitä jakajan ulostulossa näkyy ennen, kuin jaettava signaali syötetään jakajalle.



Kuva 3.1 *Regeneratiivisen taajuusjakajan piirikaavio Multisimissä.*

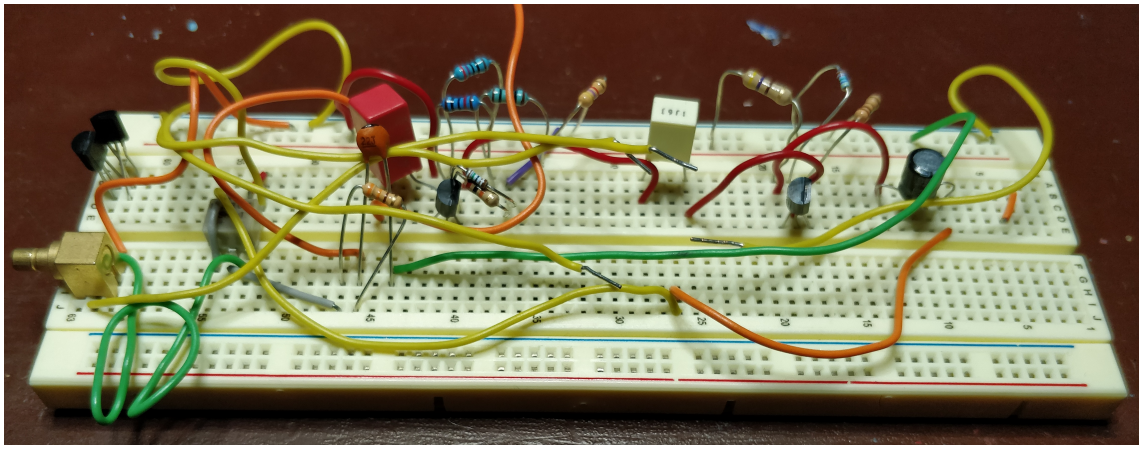
Mittaukset toteutettiin samanlaisella kokoonpanolla, mutta sekoittimena käytettiin ASK-1 sekoitinta [1]. Mittaukset suoritettiin käyttämällä tietoa RC-alipäästösuotimen arvoista simulaatiossa. Alipäästösuotimia toteutettiin 16 erilaista. Eri yhdistelmät muodostettiin taulukossa 3.1 näkyvistä vastus- ja kondensaattoriarvoista.

Taulukko 3.1 *Alipäästösuodinyhdistelmät ja niiden -3 dB:n rajataajuudet.*

R/C	22 pF	27 pF	33 pF
75 Ω	96,5 MHz	78,6 MHz	64,3 MHz
127 Ω	57,0 MHz	46,4 MHz	38,0 MHz
270 Ω	26,8 MHz	21,8 MHz	17,9 MHz
330 Ω	21,9 MHz	17,9 MHz	14,6 MHz

Simulaation alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuutta käytettiin apuna sopivien komponenttien valintaan, jotta koekytkentälevylle tehty RTJ toimisi suunnilleen samalla taajuusalueella kuin simulaatiokin. Todellisuudessa alipäästösuotimen säätömahdollisuudet ovat saatavilla olevien komponenttien kannalta rajalliset – siksi valittiin 16 suodinyhdistelmää ja päätettiin etsiä jokaiselle yhdistelmälle toimiva taajuus.

Kuvassa 3.2 nähdään koekytkentälevylle toteutettu RTJ. RTJ:n toteutus koekytkentälevylle vaati sen verran asettelua, että eri osioita siitä on hankala erottaa pelkästään kuvaa katsomalla.



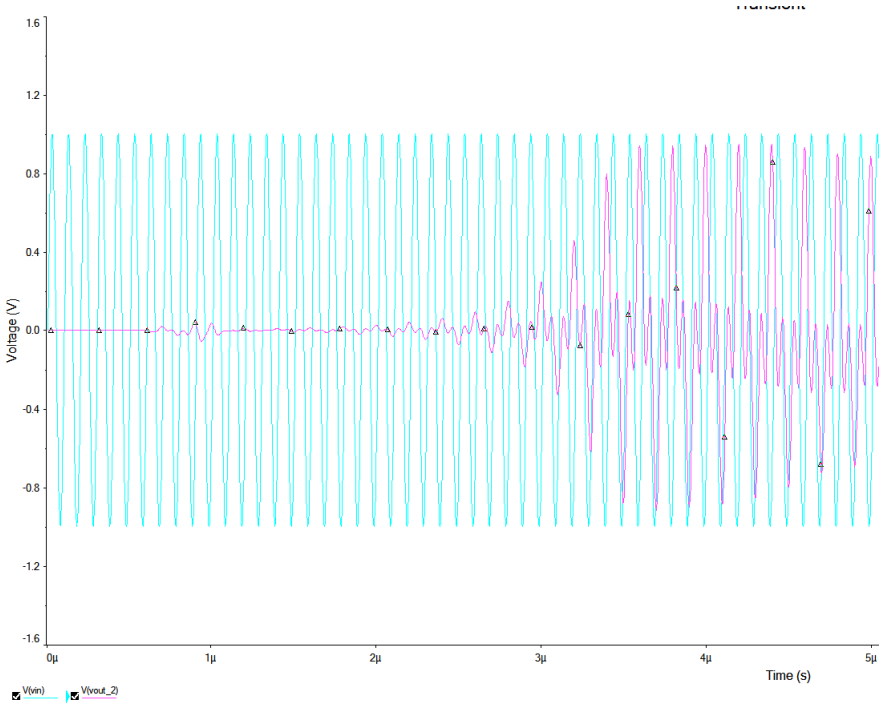
Kuva 3.2 *Regeneratiivinen taajuusjakaja koekytkentälevyllä.*

Jokainen osio on kuitenkin pääpiirteittäin havaittavissa. RTJ on kasattu samassa järjestyksessä vasemmalta oikealle kuin kytkentäkaaviokin. Alipäästösuodin on vain poikkeuksellisesti aseteltu kuvassa näkyvän levyn etualalle.

4. TULOKSET

Tässä kappaleessa käsitellään simulaatioista ja mittauksista saadut tulokset. Kappale sisältää myös kaksi alaosiota, simulaatiot ja mittaukset, joissa tulokset esitetään pääkappaletta yksityiskohtaisemmin.

Kuvassa 4.1 nähdään simulaatiosignaalit toimivasta, kuvassa 3.1 olevasta, regeneratiivisesta kahdellajakajasta. Kuvan tapauksessa näkyy lähtötilanne, jolloin jakajaan aletaan syöttää 10 MHz:n taajuista 2 V_{pp}:n suuruista signaalia.

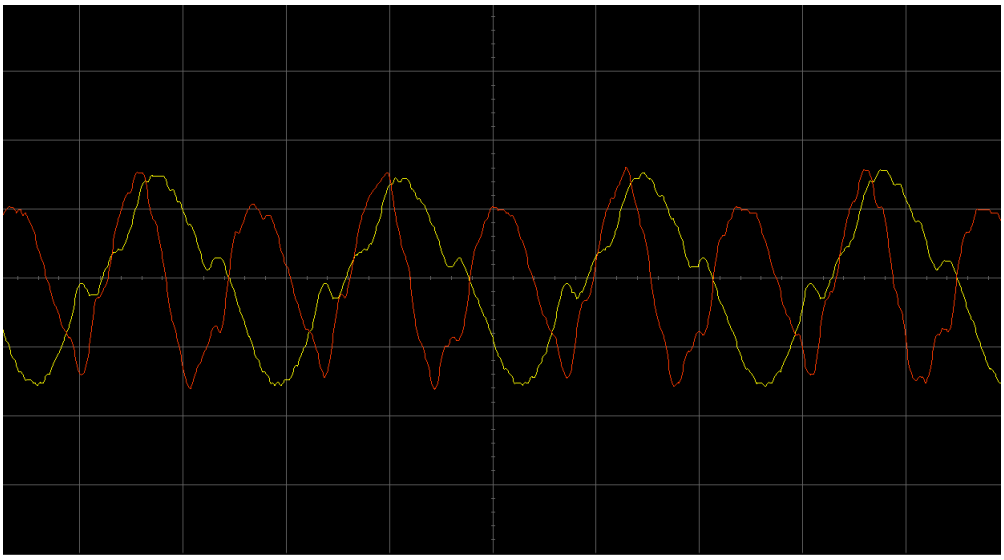


Kuva 4.1 *Regeneratiivisen taajuusjakajan sisäänmeno- ja ulostulosignaalit.*

Lähtösignaalin aaltomuoto ei ole täysin siniaaltoa, mutta aallosta on havaittavissa selkeästi, voimakkaimmaksi taajuuskomponentiksi juuri puolet sisään syötetyn signaalin taajuudesta. Alipäästösuotimen lisääminen jakajan perään voisi auttaa poistamaan korkeamman taajuuskomponentin pois.

Kuvassa 4.2 nähdään mitaustulos toimivasta jakotuloksesta. Sisäänmenosignaali

näkyy punaisella ja erikseen lähdön jälkeen alipäästösuodatettu signaali keltaisella. Mitatussa tuloksessa on nähtävissä myös jonkin verran suotimen läpäissyttä summataajuutta – signaali ei siksi ole kovin lähellä siniaaltoa.

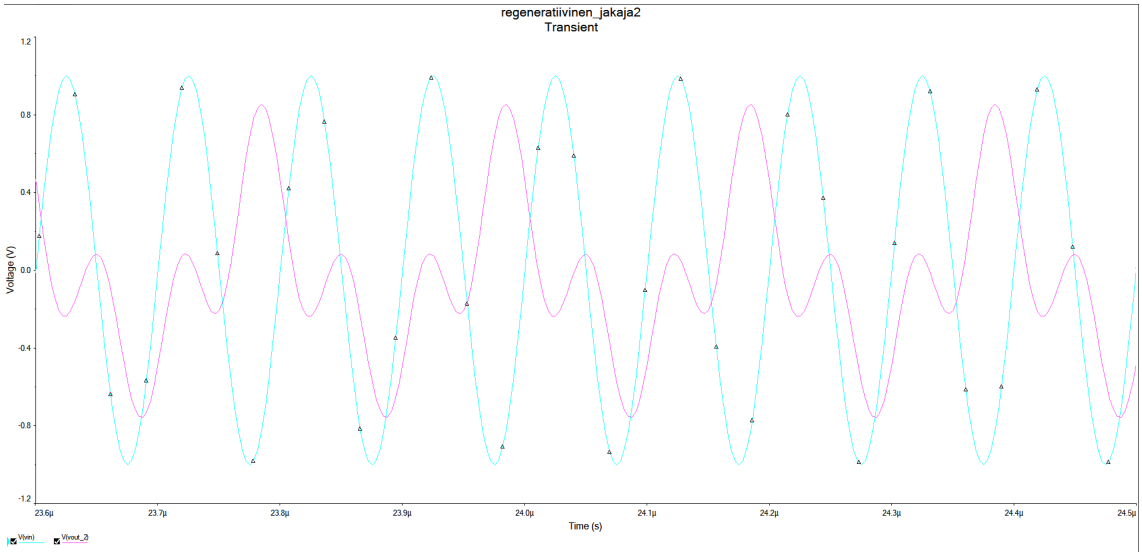


Kuva 4.2 *RTJ:n mitatut sisäänmeno- ja ulostulosignaalit.*

Sisäänmenosignaalin taajuus toteutetussa mittauksessa oli 8,5 MHz ja V_{pp} oli 0,60 V, alipäästösuotimen arvoina vastukselle käytettiin 330 Ω:a ja kondensaattorille 22 pF:a. Lähtö suodatettiin pelkällä 1 kΩ:n sarjavastuksella – täyttä varmuutta lähdön alipäästösuodon toiminnasta pelkällä vastuksella ei ole, mutta se voisi johtua oskilloskoopin mittapään sisäisestä kapasitanssista, jolloin vastuksen ja mittapään kapasitanssin yhdistelmä muodostaisi alipäästösuotimen sellaisenaan.

4.1 Simulaatiot

Simulaatioissa jakotulos saatiin näkyville kokeilemalla eri alipäästösuotimen arvoja samana pidetylle, 10 MHz suuruiselle, taajuudelle. Kuvassa 4.3 nähdään kuvan 4.1 simulaatiossa käytetyn RC-alipäästösuotimen avulla tuotettu signaali lähempää jakoilmiön käynnistymisen jälkeen.



Kuva 4.3 *Regeneratiivisen taajuusjakajan sisäänmeno- ja ulostulosignaalit jakotuloksen käynnistymisen jälkeen.*

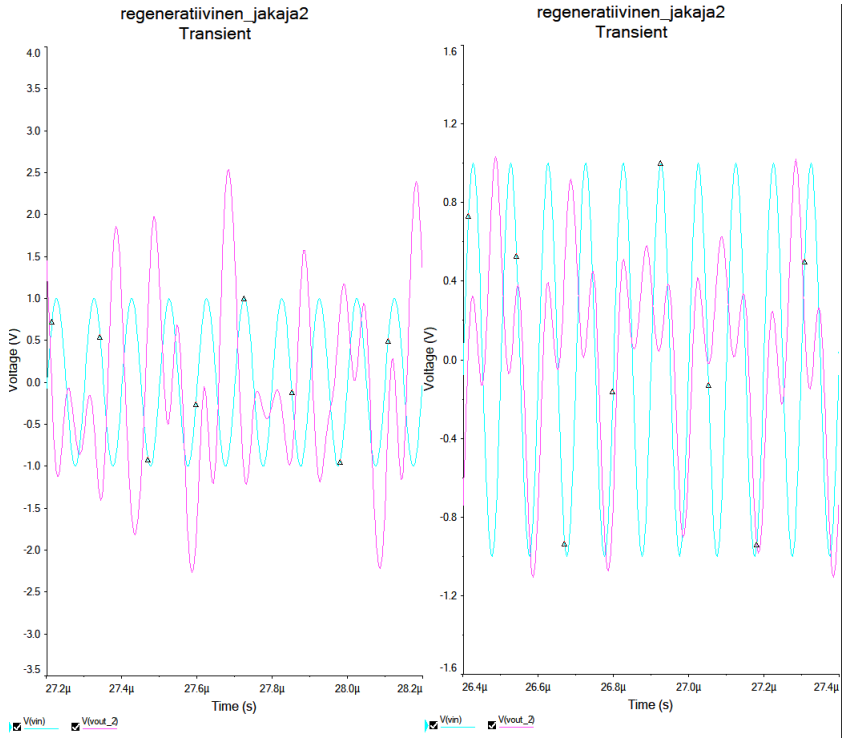
Taulukko 4.1 kertoo RC-alipäästösuotimen eri arvoilla kokeiltuja tuloksia jakajan toiminnan osalta. Epäsäännönmukaista tarkoittaa, että aallosta ei ollut nähtävillä haluttua taajuutta. Lähes säännönmukaista tarkoittaa, että aallosta on havaittavissa haluttu taajuus, mutta se ei ole vielä välttämättä voimakkaimmin erottuva taajuuskomponentti. Säännönmukaista tarkoittaa, että jakaja toimii oikein ja ulostulossa on selkeästi esillä taajuus (nähtävillä kuvassa 4.3), joka on puolet syötetyn signaalin taajuudesta. Tyhjää tarkoittaa, että jakamisoperaatio ei käynnisty, ja RTJ ei tuota ulostulosignaalia - ulostulo suoraa viivaa (simulaation tapauksessa).

Taulukko 4.1 *Rajataajuuden vaikutus ulostuloon vastuksen osalta.*

R	C	3 dB rajataajuus/MHz	Ulostulo
100	7,96E-12	199,9433958	epäsäännönmukaista
200	7,96E-12	99,97169792	epäsäännönmukaista
400	7,96E-12	49,98584896	epäsäännönmukaista
600	7,96E-12	33,32389931	lähes säännönmukaista
650	7,96E-12	30,76052244	lähes säännönmukaista
700	7,96E-12	28,56334226	säännönmukaista
750	7,96E-12	26,65911945	säännönmukaista
800	7,96E-12	24,99292448	tyhjää
900	7,96E-12	22,21593287	tyhjää
1000	7,96E-12	19,99433958	tyhjää

Esimerkki epäsäännönmukaisesta ja lähes säännönmukaisesta jakotuloksesta nähtävillä kuvassa 4.4. Vasemmalla epäsäännönmukainen ja oikealla lähes säännönmu-

kainen.



Kuva 4.4 *Epäsäännönmukainen ja lähes säännönmukainen jakotulos.*

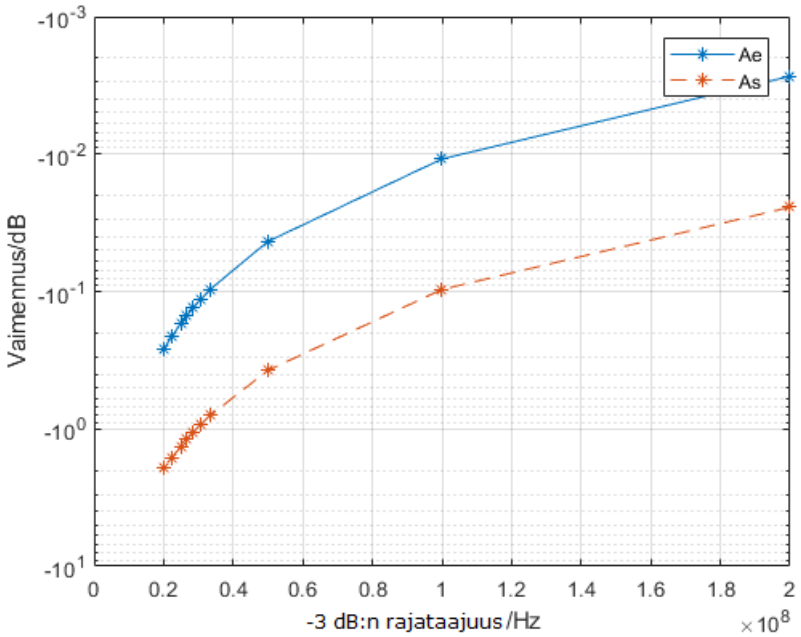
Simulaatioita suoritettiin myös erikokoisilla LC-alipäästösuotimilla, mutta jakotulosta simulaatioissa ei saatu näkymään. Tämän vuoksi myöskään mittauksia ei kokeiltu LC-alipäästösuotimilla, vaikka simulaatioiden epäonnistuminen ei suoraan johdakaan mittausten epäonnistumiseen. Simulaatioiden yksi oleellisista tarkoituksista on joka tapauksessa auttaa käytännön toteutuksen lähtöarvojen valinnassa.

Taulukossa 4.2 nähdään eri alipäästösuotimien -3 dB:n rajataajuudet F_0 ja vaimennukset sekä summa- että erotustaajuuksilla, kun RTJ:lle syötetään 10 MHz:n signaalia.

Taulukko 4.2 *Simulaatioiden alipäästösuotimien -3 dB:n rajataajuudet sekä vaimennukset summa- ja erotustaajuuksilla.*

R	C	F_0	Vaimennus, erotustaajuus	Vaimennus, summataajuus	Jakaa
100 Ω	7,96 pF	200 MHz	-0,0027 dB	-0,0244 dB	
200 Ω	7,96 pF	100 MHz	-0,0108 dB	-0,0967 dB	
400 Ω	7,96 pF	50 MHz	-0,0432 dB	-0,3745 dB	
600 Ω	7,96 pF	33 MHz	-0,0967 dB	-0,8013 dB	
650 Ω	7,96 pF	31 MHz	-0,1133 dB	-0,9265 dB	
700 Ω	7,96 pF	29 MHz	-0,1311 dB	-1,0578 dB	X
750 Ω	7,96 pF	27 MHz	-0,1501 dB	-1,1945 dB	X
800 Ω	7,96 pF	25 MHz	-0,1704 dB	-1,3360 dB	
900 Ω	7,96 pF	22 MHz	-0,2146 dB	-1,6313 dB	
1000 Ω	7,96 pF	20 MHz	-0,2634 dB	-1,9391 dB	

Taulukon 4.2 vaimennukset erotus- ja summataajuuksilla nähdään alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuuden funktiona kuvasta 4.5.



Kuva 4.5 *Erotus- ja summataajuudet alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuuden funktiona.*

Summa- ja erotustaajuuden välinen vaimennus desibeleinä on kuvan 4.5 mukaan noin dekadin verran koko mittausalueelta.

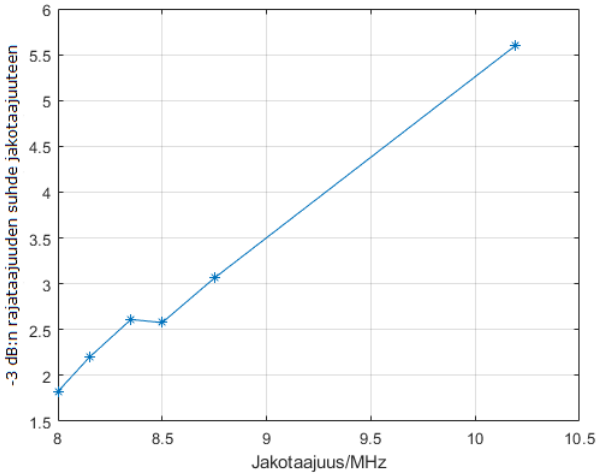
4.2 Mittaukset

Mittauksiin alipäästösuotimia otettiin 16 erilaista yhdistelmää. Näille etsittiin taajuuskaistat, joilla jako tapahtuu ilman ongelmia. Taajuuskaistat eri alipäästösuotimilla, kun sisäänsyötetyn signaalin $U_{pp} = 0,60$ V, nähdään taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 *RTJ:n mitatut taajuuskaistat eri alipäästösuotimilla.*

R	C	F_0	F_{mid}	F_{low}	F_{high}	Jakokaistanleveys
75 Ω	22 pF	96,5 MHz	-	-	-	-
75 Ω	33 pF	64,3 MHz	-	-	-	-
75 Ω	27 pF	78,6 MHz	-	-	-	-
127 Ω	22 pF	57,0 MHz	10,190 MHz	10,185 MHz	10,195 MHz	10 kHz
127 Ω	27 pF	46,4 MHz	-	-	-	-
127 Ω	33 pF	38,0 MHz	-	-	-	-
270 Ω	22 pF	26,8 MHz	8,75 MHz	8,0 MHz	9,5 MHz	1,5 MHz
330 Ω	22 pF	21,9 MHz	8,5 MHz	7,8 MHz	9,2 MHz	1,4 MHz
270 Ω	27 pF	21,8 MHz	8,35 MHz	7,7 MHz	9,0 MHz	1,3 MHz
270 Ω	33 pF	17,9 MHz	-	-	-	-
330 Ω	27 pF	17,9 MHz	8,15 MHz	7,5 MHz	8,8 MHz	1,3 MHz
330 Ω	33 pF	14,6 MHz	8,0 MHz	7,4 MHz	8,6 MHz	1,2 MHz

Taulukosta 4.3 nähdään, että RTJ ei tuottanut jakotulosta osalla alipäästösuotimista; alipäästösuodin, jonka -3 dB:n rajataajuus on 46,4 MHz, saatiin kuitenkin toimimaan RTJ:ssä, kun sen U_{pp} laskettiin arvoon 0,53 V. Taulukon 4.3 mukaisten -3 dB:n rajataajuuksien suhteet keskitaajuuksiin keskitaajuuden funktiona nähdään kuvassa 4.6.



Kuva 4.6 *Alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuuden suhde jakokaistan keskitaajuuteen keskitaajuuden funktiona.*

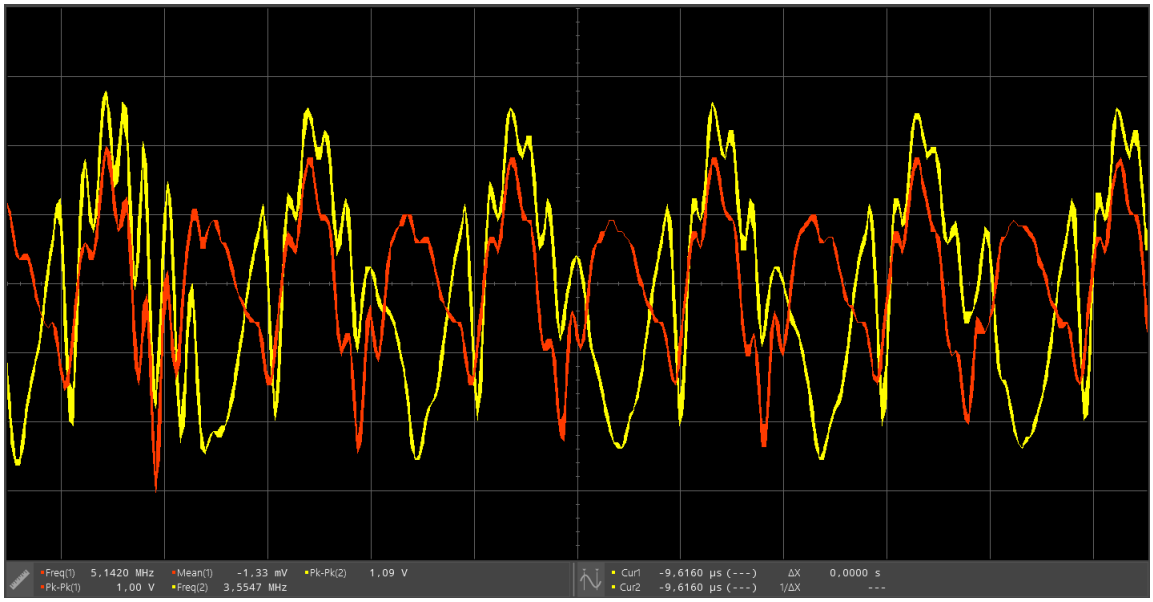
Kuvassa 4.6 nähdään, että -3 dB:n rajataajuuden suhde jakotaajuuteen on reilun 2 MHz:n keskitaajuusalueella karkeasti lineaarinen. Toimiva jakotulos vaatii kyseisellä RTJ:n kokoonpanolla myös sopivan sisäänmenojännitteen. Taulukossa 4.4 nähdään jännitekaistat keskitaajuusalueilla.

Taulukko 4.4 *RTJ:n sisääntulosignaalin jännitekaistat eri alipäästösuotimilla taajuuden ollessa keskitaajuusalueella.*

R	C	F_0	$U_{pp,mid}$	$U_{pp,low}$	$U_{pp,high}$	Jännitekaistanleveys
75 Ω	22 pF	96,5 MHz	-	-	-	-
75 Ω	33 pF	64,3 MHz	-	-	-	-
75 Ω	27 pF	78,6 MHz	-	-	-	-
127 Ω	22 pF	57,0 MHz	0,60 V	0,59 V	0,61 V	0,02 V
127 Ω	27 pF	46,4 MHz	-	-	-	-
127 Ω	33 pF	38,0 MHz	-	-	-	-
270 Ω	22 pF	26,8 MHz	0,61 V	0,46 V	0,76 V	0,30 V
330 Ω	22 pF	21,9 MHz	0,64 V	0,45 V	0,83 V	0,38 V
270 Ω	27 pF	21,8 MHz	0,655 V	0,48 V	0,83 V	0,35 V
270 Ω	33 pF	17,9 MHz	-	-	-	-
330 Ω	27 pF	17,9 MHz	0,66 V	0,47 V	0,85 V	0,38 V
330 Ω	33 pF	14,6 MHz	0,62 V	0,44 V	0,80 V	0,36 V

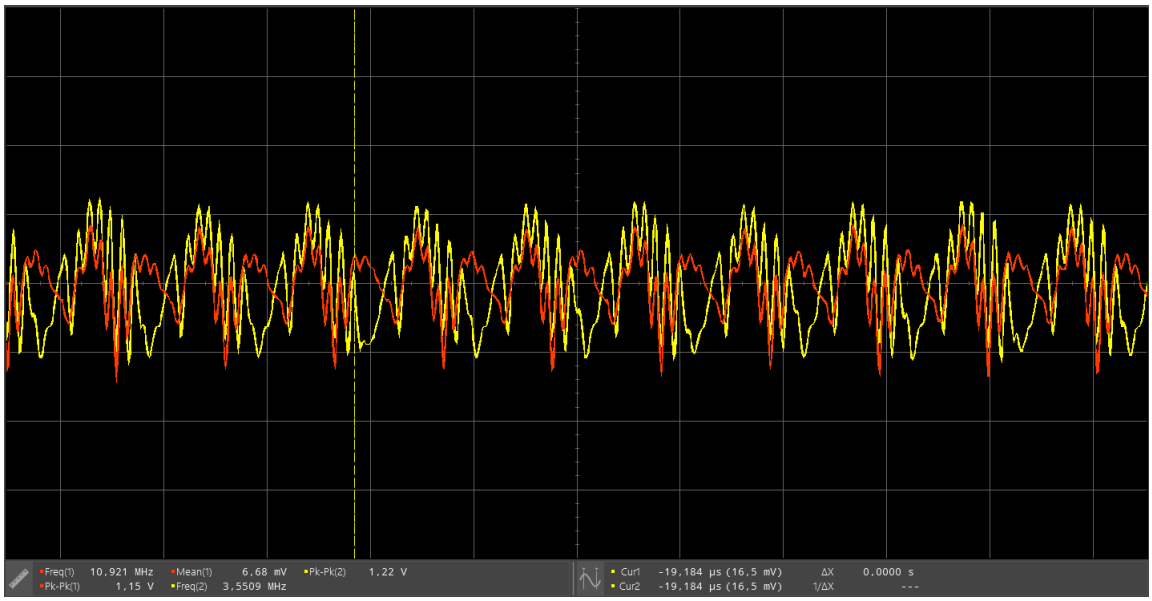
Kuten taulukosta 4.4 voidaan havaita, 0,6 V toimii jokaisella toimivalla jakajalla. Kuitenkaan jännitekaistat ja niiden leveydet eivät ole samat eri jakajilla.

Mittauksissa saatiin useita onnistuneita ja epäonnistuneita jakotuloksia, joita ei alipäästösuodatettu mitattaessa. Kuvassa 4.7 nähdään onnistunut jakotulos alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuudella 57,0 MHz.



Kuva 4.7 *Onnistunut suodattamaton jakotulos.*

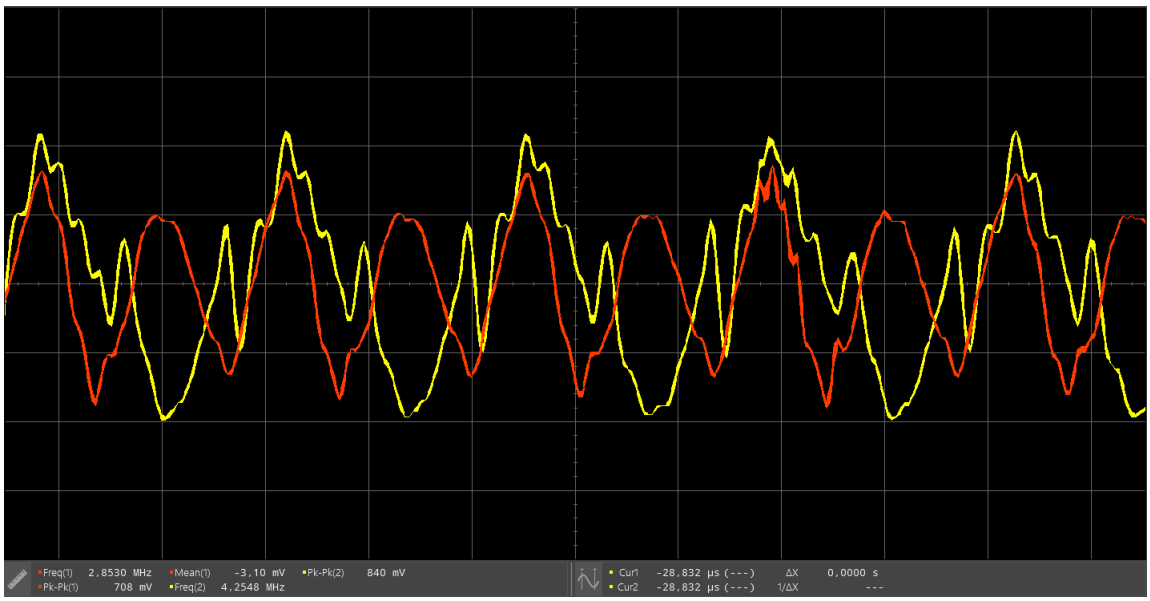
Kuvasta nähdään, että sisään syötetty signaali (oranssi) on myös aika kaukana perinteisestä siniaallosta. Tämä saattaa johtua systeemin kokoonpanoratkaisusta tai sekoittimen riittämättömästä eristyksestä. Toisaalta sekoitin myös kuormittaa vahvistinta aika paljon, minkä vuoksi lopputulos ei näytä täydelliseltä. Alipäästösuodolla signaali kuitenkin näyttää jo paremmalta. Kuvassa 4.8 nähdään jossain määrin onnistunut, mutta huono jakotulos.



Kuva 4.8 *Huono suodattamaton jakotulos.*

Kyseinen jakotulos on saatu alipäästösuotimen 46,4 MHz:n -3 dB:n rajataajuudella.

Paras jakotulos saatiin -3 dB:n rajataajuudella 21,9 MHz ja se nähdään kuvassa 4.9.



Kuva 4.9 *Paras suodattamaton jakotulos.*

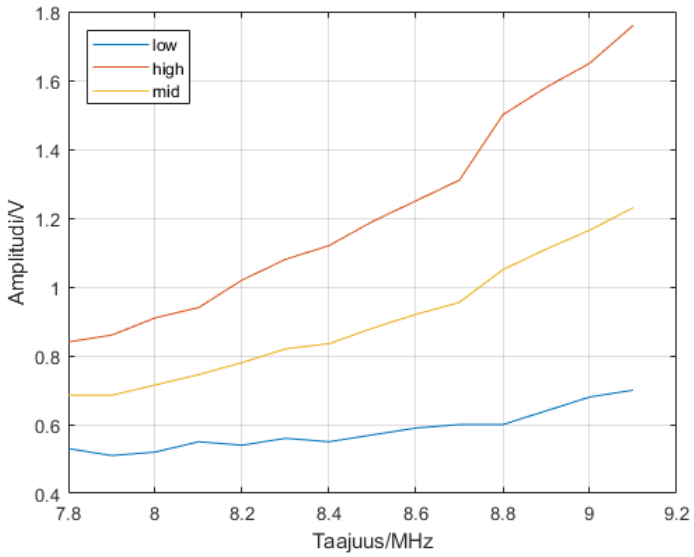
Aikaisemmin kuvassa 4.2 nähty tulos on alipäästösuodatettu versio kuvan 4.9 tuloksesta. Havaitaan, että RTJ ei ainakaan tällä kokoonpanolla tuota tasaista siniaaltoa ilman alipäästösuodatusta, mutta tulos saadaan kuitenkin pienellä jälkiprosessoinnilla (alipäästösuodatuksella) käyttökelvolliseksi.

Mittauksissa testattiin myös jakajan sisäänsyötetyn signaalin amplitudin minimi- ja maksimiarvot sen taajuuden funktiona, eli dynaaminen alue. Mittaus tehtiin vain parhaiten toimivalla RTJ-versiolla, eli kokoonpanolla, jonka alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuus oli mitoitettu 21,8 MHz:n tuntumaan. Mittaukset on nähtävissä taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5 *Sisäänsyötetyn signaalin amplitudin dynaaminen alue taajuuden funktiona.*

Taajuus	$U_{pp,low}$	$U_{pp,high}$	$U_{pp,mid}$
7,8 MHz	0,53 V	0,84 V	0,69 V
7,9 MHz	0,51 V	0,86 V	0,69 V
8,0 MHz	0,52 V	0,91 V	0,72 V
8,1 MHz	0,55 V	0,94 V	0,75 V
8,2 MHz	0,54 V	1,02 V	0,78 V
8,3 MHz	0,56 V	1,08 V	0,82 V
8,4 MHz	0,55 V	1,12 V	0,84 V
8,5 MHz	0,57 V	1,19 V	0,88 V
8,6 MHz	0,59 V	1,25 V	0,92 V
8,7 MHz	0,60 V	1,31 V	0,96 V
8,8 MHz	0,60 V	1,50 V	1,05 V
8,9 MHz	0,64 V	1,58 V	1,11 V
9,0 MHz	0,68 V	1,65 V	1,17 V
9,1 MHz	0,70 V	1,76 V	1,23 V

Taulukosta nähdään, että dynaamisen alueen laajuus vaihtelee noin 0,3 V:n ja reilun 1 V:n välillä. Dynaamisen alueen ja eri alipäästösuodinyhdistelmien mittaukset toteutettiin eri päivinä samalla koekytkentälevyllä kytkentää muuttamatta, mutta 8,5 MHz:n taajuudella tehty mittaus dynaamisen alueen osalta poikkeaa alipäästösuodinmittauksesta merkittävästi, ja syytä tähän ei tiedetä. Taulukon tuloksista muodostettiin myös kuvaaja, joka nähdään kuvassa 4.10, missä low on amplitudin alaraja, high on yläraja ja mid on näiden keskiarvo.



Kuva 4.10 *Dynaaminen alue (punaisen ja sinisen käyrän välinen alue) taajuuden funktiona.*

Kuvaajasta nähdään, että dynaamisen alueen yläraja kasvaa taajuuden kasvaessa nopeammpin, kuin alaraja, mikä johtaa alueen suurenemiseen taajuuden kasvaessa. Suuremmalla amplitudilla päästään siis korkeammille taajuuksille.

5. PÄÄTELMÄT

Tuloksista huomataan, että alipäästösuotimen mitoitus jakajan kannalta on oleellinen asia. Alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuuden suhde jakokaistan keskitaajuuteen ei ole vakio vaan se kasvaa taajuuden kasvaessa. Suuremmilla mittausmäärillä voitaisiin mahdollisesti tuottaa malli, jolla voitaisiin karkeasti arvioida halutun alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuus, mikäli haluttaisiin rakentaa RTJ ennalta määritellylle taajuudelle. Tämä malli tosin pätisi vain kyseiseen kokoonpanoon, eikä mittaustulosten määrää kasvattamalla saada yleispätevää mallia. Epäselväksi jäi, miksi alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuus jäi niin paljon korkeammaksi, kuin sekoittimelta lähtevät summa- ja erotustaajuus. Oletus työtä aloitettaessa oli, että -3 dB:n rajataajuus olisi asettunut summa- ja erotustaajuuden välimaastoon. Dynaamisen alueen mittaukset kuitenkin viittaavat, että voisi olla mahdollista päästä edellä mainittuun tilanteeseen sisäänsyötetyn signaalin amplitudia sovittamalla.

Sisäänsyötetyn signaalin amplitudin dynaamisesta alueesta voidaan päätellä, että mitä suurempi taajuus on kyseessä, sitä suurempi on dynaaminen alue. Taajuuden kasvaessa kuitenkin myös amplitudin alaraja nousee, mutta selvästi ylärajaa hitaammin.

Vahvistimen vaikutusta ei tässä työssä mitattu, mutta on selvää, että eri vahvistinyhdistelmien ja vahvistusten tuloksia mittaamalla voitaisiin saada lisää tietoa RTJ:n mitoitusta varten käytännön kannalta. Eri syöttöjännitteitä kuitenkin mitattiin ja tälle vahvistinyhdistelmälle ja kokonaisuudelle noin 0,6 V näytti olevan sopiva arvo. Yleispätevä malli tässä työssä käytetyn systeemin mitoittamiseen saataisiin ainoastaan mittaamalla jokaisen komponentin, mukaan lukien sekoittimen, vaikutusta systeemiin.

Työssä kuitenkin saatiin aikaiseksi toimivat simulaatiot, joita apuna käyttäen tehtiin myös toimiva käytännön toteutus. Koekytkentälevylle on siis mahdollista toteuttaa RTJ ainakin vajaan 10 MHz:n taajuuksille, mutta sen käytännön hyödyt eivät välttämättä ole kovinkaan suuret. Näillä tiedoilla voitaisiin siis rakentaa RTJ lähinnä kokeilemalla ja iteroimalla eri komponenttivaihtoehtoja. Koska RTJ ei vaadi tilan vaihtoa, kuten kiikut, on se potentiaalinen vaihtoehto korkeille taajuuksille, mutta

kiikut itsessään olisivat työssä käytetyille taajuuksille vielä varsin hyvät ja huomattavasti yksinkertaisemmat kuin RTJ.

6. YHTEENVETO

Työssä toteutettiin simulaatiot ja mittaukset regeneratiiviselle kahdellajakajalle. Simulaatioista saatiin selville suuntaa antava toteutus käytännön jakajaa varten ja mittauksista saatiin selville, että alipäästösuotimen -3 dB:n rajataajuuden suhde haluttuun jakotaajuuteen nähden kasvaa jakotaajuuden kasvaessa käytetyillä taajuuksilla.

RTJ voidaan toteuttaa koekytkentälevylle, mutta koekytkentälevytoteutuksessa eri tekijöiden määrä on niin suuri, että korkeilla taajuuksilla RTJ:tä ei todennäköisesti saada toimimaan. Kiikuilla toteutettu jakaja olisi siis parempi vaihtoehto matalille taajuuksille. RTJ ei myöskään tuota tasaista siniaaltoa (ainakaan tässä tapauksessa) ja vaatii jälkisuodatuksen.

RTJ:n toteutus osoittautui oletettua haastavammaksi, mutta vaikeuksista huolimatta se saatiin toimimaan ja saatuja tietoja apuna käyttäen sellainen voitaisiin mahdollisesti jopa mitoittaa ennalta määritellylle taajuudelle.

Parannuksia mahdolliseen seuraavaan versioon voisi olla esimerksiksi toteutus PCB:lle, ylimääräinen puskurivahvistin työssä käytetyn vahvistinyhdistelmän perässä ja mahdollisesti korkeamman asteen alipäästösuodin. Lisämittauksia dynaamisella alueella voisi myös tehdä ja katsoa, kuinka korkeille taajuuksille alipäästösuodinta muuttamatta voi päästä nostamalla amplitudia.

LÄHTEET

[1] "Ask-1 double balanced mixer datasheet." Saatavissa (viitattu 06.10.2018): https://www.electrokit.com/uploads/productfile/41002/ASK-1.pdf.

[2] "Basic npn common collector circuit," Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Common_collector#/media/File:NPN_emitter_follower.svg.

[3] "Basic npn common-emitter circuit," Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Common_emitter#/media/File:NPN_common_emitter.svg.

[4] "Carrier wave with no modulation transports no information." Saatavissa (viitattu 23.4.2017): https://web.archive.org/web/20080414012934/http://www.utexas.edu:80/research/cemd/nim/Agif/CarrWave.html.

[5] J. Heikkinen, *ELT-21050 vko37 2016, Transistorivahvistimet luentomateriaali*, 2016, Saatavissa (viitattu 23.4.2017): moodle2.tut.fi.

[6] ——, *ELT-21050 vko38 2016, Transistorivahvistimet luentomateriaali*, 2016, Saatavissa (viitattu 23.4.2017): moodle2.tut.fi.

[7] A. Lehto and A. Raisanen, *RF- ja mikroaaltotekniikka*, 2006.

[8] O.-P. Lunden, *ELT-41710 K2016 Luento 6 Sekoittaminen ja demodulaatio*, 2016, Saatavissa (viitattu 23.4.2017): moodle2.tut.fi.

[9] *Surface Mount Frequency Mixer - ASK-1 datasheet*, Mini-Circuits, Saatavissa (viitattu 23.4.2017): https://www.minicircuits.com/pdfs/ASK-1.pdf.

[10] B. Razavi, *RF Microelectronics (second edition)*, 2011.

[11] N. Storey, *Electronics a Systems Approach (4th edition)*, 2009.