

Opinnäytetyö (AMK)

Tietoliikenne ja sähköinen kauppa

Elektroniikkasuunnittelu

2012

Janne Mäkynen

PUTKISÄRÖN MALLINTAMINEN PUOLIJOHDEKOMPONENTEILLA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkasuunnittelu

Joulukuu 2012 | 36 sivua

Ohjaaja: TkT Timo Tolmunen

Janne Mäkynen

PUTKISÄRÖN MALLINTAMINEN PUOLIJOHDEKOMPONENTEILLA

Työssä tutkittiin kitaran putki- ja puolijohdevahvistimien säröytymisen eroja. Työssä tutkittiin väitettä, jonka mukaan putkivahvistin tuottaa puolijohdevahvistimia voimakkaampaa 2. kertaluvun harmonista säröä. Suunnittelun lähtökohtana oli 2. kertaluvun harmonisen särön synnyttäminen epälineaarilla puolijohdevahvistimella.

Työssä käsiteltiin teoriaa elektroniputkista ja tutkittiin vahvistimen epälinearisuuden vaikutusta 2. ja 3. kertaluvun harmonisen särön syntymiseen. Työssä tutkittiin myös 2. ja 3. kertaluvun harmonisten säröjen vaikutusta aaltomuotoon. Putki- ja puolijohdevahvistimien eroja tutkittiin mittausten avulla. Työssä mitattiin Peavey 6505 -putkivahvistimen sekä 2N3904-transistorin säröytymistä.

Kitaraefekti suunniteltiin operaatiovahvistimella toteutetulla rajoitinpiirillä, joka täytti sille asetetut vaatimukset. Vaatimuksina olivat vahvistuksen ja säröjen voimakkuuden säädettävyys ja putkivahvistimen säröjen mallintaminen. Kitaraefektissä huomioitiin kitaran suuri ulostulopedaansi kytkemällä puskurivahvistin rajoitinpiiriin tulopuolelle. Kitaraefekti toteutettiin piirilevylle ja vaatimuksena oli piirilevyn pieni koko.

Tutkimuksen ja mittausten perusteella selvisi, että yliohtettu putkivahvistin ja epäsymmetrisesti yliohtettu puolijohdevahvistin synnyttävät 2. kertaluvun harmonista säröä. Työssä suunniteltu epälineaarinen puolijohdevahvistin tuotti lähes putkivahvistimen kaltaiset harmoniset särökomponentit, mutta se ei kuulostanut samalta kuin putkivahvistin. Tutkimus osoitti, että putkivahvistimen paremmuutta ei voida selittää pelkästään 2. ja 3. kertaluvun harmonisten eroilla.

ASIASANAT:

putkivahvistin, transistorivahvistin, mallintaminen, harmoninen särö, epälinearisuus, kitara-
vahvistin

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Design

December 2012 | 36 pages

Instructor: Timo Tolmunen, D.Sc. (Tech.)

Janne Mäkynen

MODELING VACUUM TUBES DISTORTION WITH SOLID STATE COMPONENTS

The purpose of thesis was to research differences between distortion of tube and solid state amplifiers of guitar. The research dealt with issue that tube amplifier creates more 2nd harmonic distortion than solid state amplifier. The purpose was to design nonlinear solid state amplifier to model tube amplifiers distortion and create 2nd harmonic distortion.

Thesis dealt with theory of vacuum tubes and research of how amplifier nonlinearity effects on existence of 2nd and 3rd harmonic distortion. 2nd and 3rd harmonic distortions effect to waveform was also researched. Measurements were done to research differences between tube and solid state amplifiers distortion. Peavey 6505 tube amplifier and 2N3904 transistor were measured.

Guitar effect was designed with limiter circuit, which filled all requirements. Adjust of gain and amount of distortion were required. Guitars great output impedance needed also to be considered by designing common-collector amplifier before input of limiter circuit. Guitar effect was made to printed circuit board as required.

In research appeared that overdriven tube amplifier and asymmetrically overdriven solid state amplifier created 2nd harmonic distortion. Harmonic distortion of designed nonlinear amplifier was almost the same as tube amplifiers, but it sounded worse. Research proves that tube amplifiers better sound can't be explained with differences of 2nd and 3rd harmonic distortion.

KEYWORDS:

tube amplifier, solid state amplifier, modeling, harmonic distortion, nonlinearity, guitar amplifier

Sisältö

SYMBOLIT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
2 VAATIMUKSET KITARAEFEKTILLE	2
3 VAHVISTIMET	3
3.1 Elektroniputki	3
3.1.1 Putkidiodi	3
3.1.2 Triodi	5
3.2 Transistori	6
3.3 Operaatiovahvistin	7
3.4 Lineaarisuus ja harmoniset säröt	7
3.5 Kitaravahvistimien erot	10
4 MITTAUKSET	12
4.1 Putkivahvistimen mittaaminen	12
4.2 Transistorivahvistimen mittaaminen	15
5 SUUNNITTELU	18
5.1 Rajoitinpiirin suunnittelu	18
5.2 Puskurivahvistimen mitoittaminen	21
5.3 Simulointi	23
5.3.1 Symmetrinen aaltomuoto	23
5.3.2 Epäsymmetrinen aaltomuoto	24
5.3.3 Rajoitinpiirin amplitudivaste	25
5.4 Piirilevyn tekeminen	26
5.5 Rajoitinpiirin mittaaminen	26
5.6 Kitaraefektille asetettujen vaatimuksien täytyminen	29
6 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	31
LIITTEET	
LIITE 1 Peavey 6505:n lohkokaavio	
LIITE 2 Kitaraefektin kytkentäkaavio	
LIITE 3 Piirilevyn layout mittakaavassa 1:1	
LIITE 4 Kitaraefektin layoutin komponenttitiedot	
LIITE 5 Kuva piirilevystä	

SYMBOLIT JA LYHENTEET

f	taajuus
f_1	1. kertaluvun harmoninen
I	virta
R	resistanssi
t	aika
U	jännite
u_i	sisääntuleva vaihtojännite
u_o	ulostuleva vaihtojännite
X_i	signaalin amplitudi
x_i	sisääntuleva signaali
x_o	ulostuleva signaali
β	vahvistus
Aplac	piirisimulointiohjelmisto
DC	tasavirta (Direct Current)
Eagle	piirilevynsuunnitteluohjelma
FET	kanavatransistori (Field Effect Transistor)
FFT	nopea Fourier'n muunnos (Fast Fourier Transform)
JFET	liitoskanavatransistori (Junction Field Effect Transistor)
p-p	jänniteen arvo huipusta huippuun (Peak to Peak)

1 JOHDANTO

Putkivahvistimet ovat edelleen suosittuja kitaravahvistimina, vaikka markkinoilla on myös paljon puolijohdevahvistimia. Työn tarkoituksena oli tutkia putki- ja transistorivahvistimen säröytymisen eroja. Tuloksien avulla tuli suunnitella kitaraefekti puolijohdekomponenteilla. Kitaraefektin tarkoitus on mallintaa yliohtatun putkivahvistimen säröytymistä.

Putkivahvistimen ja transistorivahvistimen säröytymisen eroihin tutustutaan mittausten ja tutkimusten avulla. Työssä on tarkoitus tutkia synnyttääkö putkivahvistin 2. kertaluvun harmonista säröä, kuten väitetään [1]. 2. kertaluvun harmoninen särö on paremmin musiikkin sopiva kuin 3. kertaluvun, sillä se on perustajuutta oktaavia ylempänä [2]. 2. kertaluvun harmonisen uskotaan olevan syynä putkivahvistimen synnyttämän särön suosioon.

Työhön liittyen on julkaistu useita artikkeleita ja putkisäröä mallintavia kitaraefektejä on markkinoilla useita. Kitaraefektit ovat kuitenkin tekijänoikeuksilla ja patenteilla suojattuja, joten työssä luodaan uusi efekti muiden joukkoon. Työhön liittyviä julkaisuja, joita on saatavilla ovat esimerkiksi "Imitating Tube Distortion With Stompboxes" [1], "The Cool Sound of Tubes" [3] ja "Tubes Versus Transistors - Is There an Audible Difference?" [2].

Tarkoituksena on tutustua elektroniputken rakenteeseen ja käydä läpi teoriaa vahvistimien lineaarisuudesta ja säröytymisestä. Työssä myös etsitään tukea väittämälle, jonka mukaan epäsymmetrisesti säröytynyt aaltomuoto tuottaa signaaliin 2. kertaluvun harmonisia säröjä [1]. Työssä mitataan Peavey 6505 -putkivahvistimen ja 2N3904-transistorin säröytymistä.

Taajuusalueen suunnittelu rajataan työstä pois. Se olisi mahdollinen jatkotutkimusaihe. Ihmisen kuuloaistin vaikutus säröjen kuulemisessa on monimutkainen psykoakustinen ongelma, minkä vuoksi se rajataan pois työstä [2]. Työssä ei ole tarkoitus vertailla markkinoilla olevia kitaraefektejä suunniteltavaan efektiin. Työstä rajataan pois myös kitaraefektin kotelon ja mahdollisten liittimien suunnittelu ja toteutus.

2 VAATIMUKSET KITARAEFEKTILLE

Vaikka kitaraefektiä ei työssä suunnitella koteloon, otetaan suunnittelussa kuitenkin huomioon mahdollinen koteloon sijoittaminen tulevaisuudessa. Tämän vuoksi piirilevyn tulisi olla ulkoisilta mitoiltaan pienikokoinen ja kytkennän tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen. Virtalähteenä kitaraefekteissä yleensä käytetään 9 V:n DC-jännitelähdettä, joten tämä työ suunnitellaan sitä käyttäen.

Lähtötietojen perusteella kitaraefektin tulisi olla epälineaarinen vahvistin, joka tuottaa 2. kertaluvun harmonista säröä. Kitaraefektin säröjen tulisi olla lähellä mitatun putkivahvistimen särökomponentteja. Vertailukohta tulee ottaa tilanteesta, missä jokin putkivahvistimen särökomponentti on vähintään -10 dB. Kitaraefektiin halutaan mahdollisuus voimakkaaseen säröytymiseen, säädettävän vahvistuksen avulla. Kitaraefektissä tulisi olla myös säädin signaalin voimakkuudelle. Kitaraefektin vastukset tulee valita RETMA-sarja E12:n mukaan.

Koska sovellusta tullaan käyttämään kitaran kanssa, täytyy sovelluksen sisääntuloimpedanssin olla suuri, sillä kitaran ulostuloimpedanssi on n. 1 M Ω . Kitaran taajuusalue on karkeasti sanottua 80 Hz:stä 5 kHz:iin, joten signaalin ei tulisi suodattua tällä alueella [4]. Kitarasta tulevan signaalin amplitudi on välillä 0,03 V - 0,5 V tehollista jännitettä [5].

Kitaristin kannalta säröjen voimakkuuden säädettävyys on oleellinen asia. Yliohjaavia kitaraefektejä käytetään vahvistamaan kitaravahvistimen omaa säröä.

3 VAHVISTIMET

Vahvistimen perusideana on pienen signaalin, virran tai jännitteen, vahvistaminen suuremmaksi antamalla pienemmän amplitudin signaalin ohjata isomman amplitudin signaalia. Ulostulosignaaliin syntyy säröjä, mikäli signaali muuttuu vahvistusprosessissa. Signaali muuttuu prosessissa, jos vahvistin on epälineaarinen. Tavallisesti vahvistinpiirin halutaan tuottavan mahdollisimman vähän säröjä, mutta tässä työssä halutaan tuottaa säröjä. Normaalisti signaalin pitäisi säilyä samanlaisena kuin alkuperäinen signaali, mutta vahvistua amplitudiltaan. [6]

Transistorivahvistimet syrjäyttivät putkivahvistimet, kun ne ilmestyivät markkinoille vuonna 1947 [7]. Kitaravahvistimissa käytetään kuitenkin edelleen myös putkivahvistimia sen tuottaman miellyttävän särön vuoksi, vaikka puolijohdevahvistimet ovat halvempia.

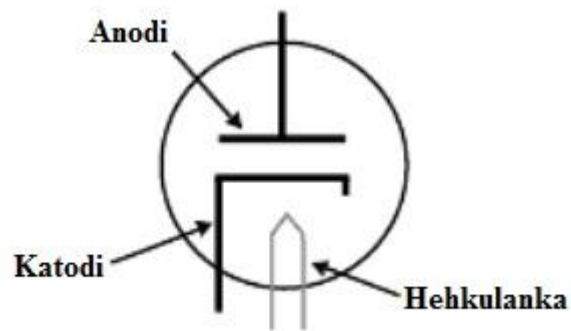
3.1 Elektroniputki

Elektroniputki on laite, jossa signaalia vahvistetaan tai muokataan ohjaamalla elektroneja tyhjiössä. Elektroniputki on isompi ja kalliimpi kuin transistorivahvistimet, mutta elektroniputki on silti korvaamaton tietyissä sovelluksissa, kuten äänentoistossa ja RF-lähettimissä. [8]

Ensimmäinen elektroniputki, joka keksittiin ja jota toiselta nimeltään kutsuttiin tassauntaajaksi, oli diodi [9].

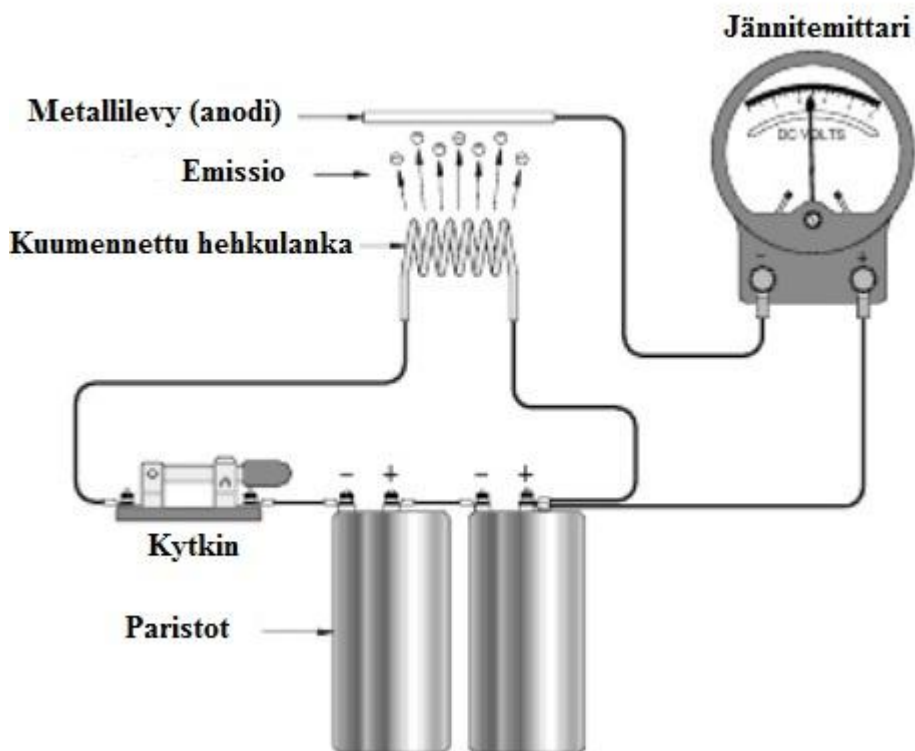
3.1.1 Putkidiodi

Seuraavan sivun kuvassa 1 on elektroniikassa käytetyn putkiodiodin symboli. Putkidiodi on yksinkertaisin elektroniputki. Putkiodiodin toimintaperiaate perustuu kuumennetun hehkulangan kykyyn emittoida elektroneja. Tätä ilmiötä kutsutaan Edisonin efektiksi, jota tarkastellaan kuvassa 2. [10]



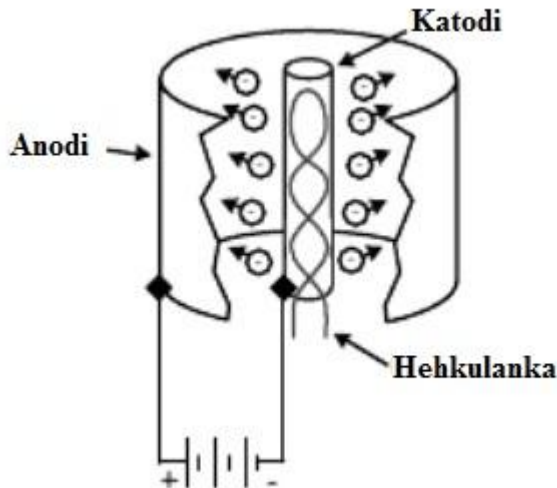
Kuva 1. Putkidiodin symboli. [11]

Kuvassa 2 on tilanne, jossa jännitemittariin syntyy jännitelukema emission avulla, kun hehkulanka kytketään jännitteeseen kytkimen avulla. Elektronit kulkevat ilmassa hehkulangasta metallilevylle. Ilmassa olevat kaasut kuitenkin häiritsevät elektronien kulkua hehkulangalta mittarille, sillä elektronit pyrkivät liittymään ilmassa oleviin kaasuihin. Tämän vuoksi elektroniputken sisään täytyy muodostaa tyhjiö lasikuvun avulla. [10]



Kuva 2. Esimerkki Edisonin efektistä. [10]

Putkiodiodissa on kaksi elektrodia, anodi ja katodi. Kuvassa 3 on poikkileikkaus putkiodiodista. Katodi on hyvin pieni lieriö, jonka sisällä on hehkulanka lämmittämässä lieriötä. Elektronien joukko kerääntyy katodin pintaan, kun se on lämmitetty. [11]

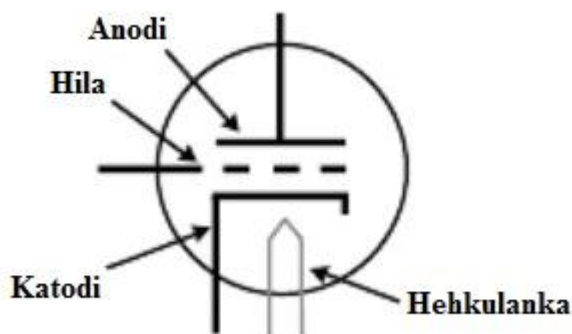


Kuva 3. Putkiodiodin poikkileikkaus. [11]

Kun anodiin kytketään positiivinen jännite suhteessa katodiin, elektronit virtaavat katodista anodiin. Jos anodiin kytketään negatiivinen jännite suhteessa katodiin, elektronit pysyvät katodissa. [11]

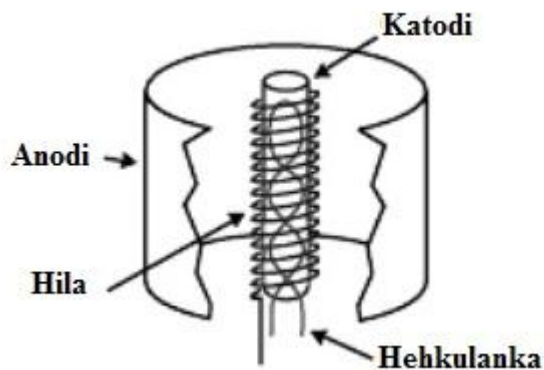
3.1.2 Triodi

Kuvassa 4 on triodin symboli. Triodi on putkiodiodi, johon on lisätty hila, jolla säädel-
lään elektronien kulkua. Hila mahdollistaa signaalin vahvistamisen elektroneja ohjaa-
malla. Tämä on hilan lisäämisen etu. [11]



Kuva 4. Triodin symboli. [11]

Nimi triodi johtuu sen kolmesta elementistä, anodista, katodista ja hilasta. Kuvassa 5 on poikkileikkaus triodista. Hehkulangan ympärillä on sylinterin muotoinen katodi. Hila on yleensä sylinterin muodossa oleva verkko tai kelattua lankaa, joka on sijoitettu mahdollisimman lähelle katodia, jotta sillä olisi mahdollisimman suuri vaikutus elektroneihin. Virta anodin ja katodin välillä kulkee emission avulla, kun anodiin on kytketty positiivinen jännite suhteessa katodiin. Elektronit kulkevat hilaverkon aukoista, eikä hilalla ole vaikutusta, jos siinä ei ole jännitettä. [11]



Kuva 5. Triodin poikkileikkaus. [11]

Mitä enemmän hilassa on negatiivista jännitettä, sitä enemmän elektronien kulku estyy. Jotta hila saadaan biasoitua niin, että elektronien kulku estyy vain jonkin verran, täytyy hilaan laittaa oikea negatiivinen tasajännite. Kun vahvistettava signaali lisätään hilaan, hilalla on mahdollisuus vaihdella signaalin mukaisesti enemmän tai vähemmän negatiiviseksi, jonka vuoksi virta anodin ja katodin välillä myös vaihtelee signaalin mukaisesti ylös ja alas. Näin pienikin sähkömotorinen voima hilassa saadaan vahvistettua suureksi virran vaihteluksi ulostulossa. Laitteen teho tulee tasajännitelähteestä hilalla ja anodi-katodi kytkennässä. [11]

3.2 Transistori

Transistorin tehtävänä on ohjata virtaa ja siten voidaan tuottaa, vahvistaa tai muokata signaaleja. Toimintaperiaate on samanlainen kuin putkella, mutta transistori on valmistettu puolijohteesta. Transistorit ovat syrjäyttäneet elektroniputket monissa sovelluksissa, kuten ohjuksissa, satelliiteissa ja digitaalielektronikassa. Transistorilla on paljon

etuja verrattuna elektroniputkeen, joista tärkeimpiä etuja ovat niiden halpuus ja pienuus. [12]

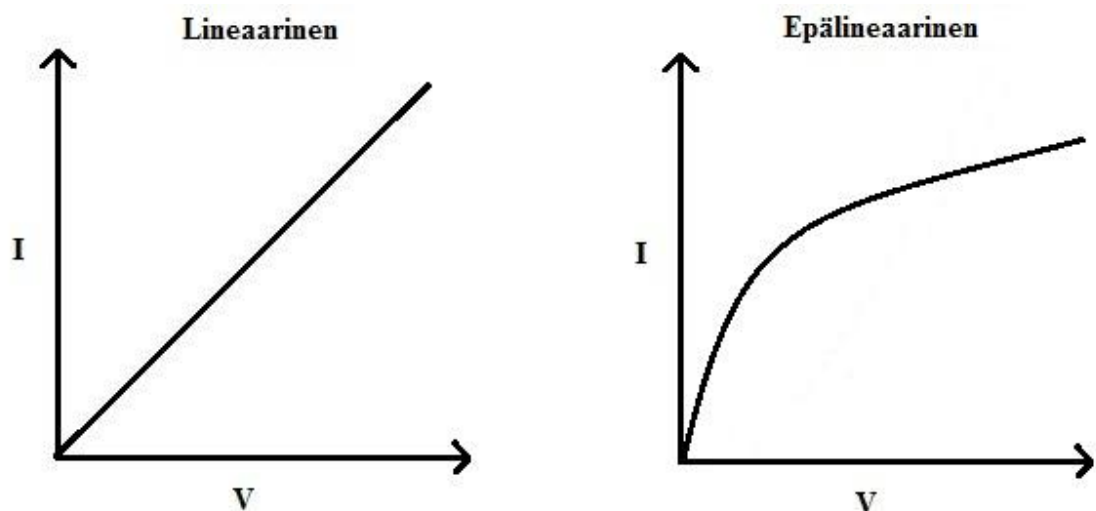
Säröytymisen kannalta transistorivahvistimelle pidetään ominaisena voimakasta yliohjautumista, jossa signaali leikkaantuu ja siitä muodostuu parittoman kertaluvun harmonisia säröjä [1].

3.3 Operaatiovahvistin

Operaatiovahvistin on puolijohdevahvistin, jolla on suuri vahvistus ja se voi vahvistaa signaaleja 0 Hz:stä 1 MHz:iin. Sillä on korkea sisääntuloimpedanssi ja pieni ulostuloimpedanssi. Operaatiovahvistimia käytetään usein analogiaelektronikassa. Operaatiovahvistin koostuu monista bipolaaritransistoreista ja FETeistä. [12]

3.4 Lineaarisuus ja harmoniset säröt

Vahvistin on lineaarinen, jos signaali ei vääristy vahvistuttuaan [6]. Täysin lineaarisessa vahvistimessa virran ja jännitteen suhde pysyisi vakiona koko vahvistusalueella, jolloin se vastaisi kuvan 6 ideaalista ominaiskäyrää. Kun ominaiskäyrä on suora, vahvistin pysyy vahvistamaan signaalin vääristymättä. Signaali vääristyy, jos vahvistinta käytetään ominaiskäyrän epälineaaraisella alueella. Kuvassa 6 esiintyvä epälineaarinen ominaiskäyrä on karkea esitys epälineaaraisesta ominaiskäyrästä.

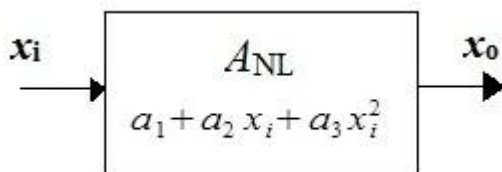


Kuva 6. Vasemmalla on täysin lineaarinen ominaiskäyrä ja oikealla epälineaarinen.

Täysin lineaarista vahvistinta ei ole olemassa, vaan niissä on aina epälineaarisuuksia [6]. Säröjä syntyy transistorivahvistimella epälineaarisuudesta, sekä yliohjauksesta. Yliohjauksessa transistori menee kyllästystilaan, eikä se pysty vahvistamaan enempää, aiheuttaen signaaliin leikkaantumista. Vahvistimet suunnitellaan vahvistamaan mahdollisimman lineaarisella alueella ominaiskäyrää. Mitä enemmän vahvistimella vahvistetaan, sitä enemmän epälineaarisuutta esiintyy.

Säröjä on monen tyyppisiä, joista yleensä mainituin on harmoninen särö. Muita säröjä ei tässä työssä huomioida. Harmoniset säröt ilmoitetaan perustaajuuden monikertoina. Parittoman kertaluvun harmoniset säröt ovat perustaajuus kerrottuna parittomilla luvuilla, kuten $3f_1$, $5f_1$ ja $7f_1$. Parittoman kertaluvun harmonisia ovat esimerkiksi $2f_1$, $4f_1$ ja $6f_1$. [13]

Epälineaarisen vahvistimen ominaiskäyrästä voidaan tehdä karkea malli, käyttäen kolmea ensimmäistä termiä. Kuvassa 7 on epälineaarisen vahvistimen ominaiskäyrän yhtälö, jossa käytetään kolmea ensimmäistä termiä a_1 , a_2 ja a_3 . Kuvassa A_{NL} tarkoittaa epälineaarisen vahvistimen vahvistusta, joka ilmoitetaan ominaiskäyrän yhtälöllä. Kuvassa 7, x_i :llä tarkoitetaan sisäänmenevää signaalia ja x_o :lla ulostulevaa signaalia. [13]



Kuva 7. Epälineaarisen vahvistimen ominaiskäyrän yhtälö. [13]

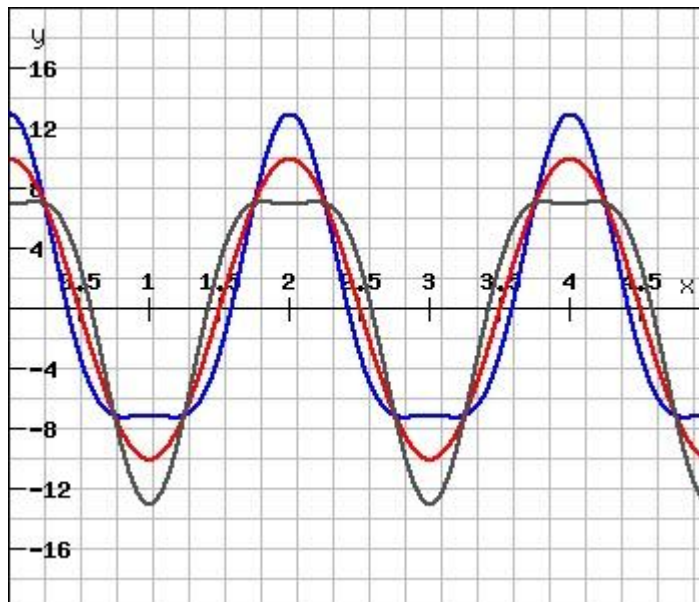
Jos x_i on muotoa $X_i \cos(\omega t)$, eli kosinimuotoinen signaali, ulostulo noudattaa kaavaa (1) [13].

$$x_o = b_0 + b_1 \cos(\omega_1 t) + b_2 \cos(2\omega_1 t) + b_3 \cos(3\omega_1 t) \quad (1)$$

Sisäänmenevä signaali kerrotaan vahvistimen ominaiskäyrän yhtälön kanssa ja siitä saadaan x_o , josta saadaan kaava 1 [13]. Kaavassa 1, b_0 tarkoittaa DC-termiä ja b_1 , b_2 ja b_3 ovat amplitudeja [13]. Kaavassa 1 on mukana harmoniset säröt 3:nteen kertalukuun asti. Epäpuhdas jaksollinen aaltomuoto voidaan kuvata puhtaiden kosinikäyrien summana, kun aaltomuoto on identtistä jaksosta toiseen. [14]

Jos laitteeseen syötetään puhdas siniaalto, ulostulon pitäisi olla myös puhdas siniaalto, mikäli laitteeseen ei haluta säröjä. Täysin särötöntä laitetta on kuitenkin vaikea toteuttaa käytännössä. [7]

Kuvassa 8 on kaava 1:sen mukaan kuvattu 3 eri signaalia. Kaavasta on jätetty pois DC-termi ja 3. kertaluvun harmoninen, jotta nähdään 2. kertaluvun vaikutus signaaliin. Punainen signaali kuvastaa vahvistimen sisääntuloa. Siniseen signaaliin on lisätty 2. kertaluvun harmoninen. Harmaassa signaalissa on myös mukana 2. kertaluvun harmoninen, mutta 180° eri vaiheessa kuin sinisessä signaalissa. Kuvassa 8 havainnollistetaan myös harmonisen särön vaiheen vaikutusta säröytymiseen.

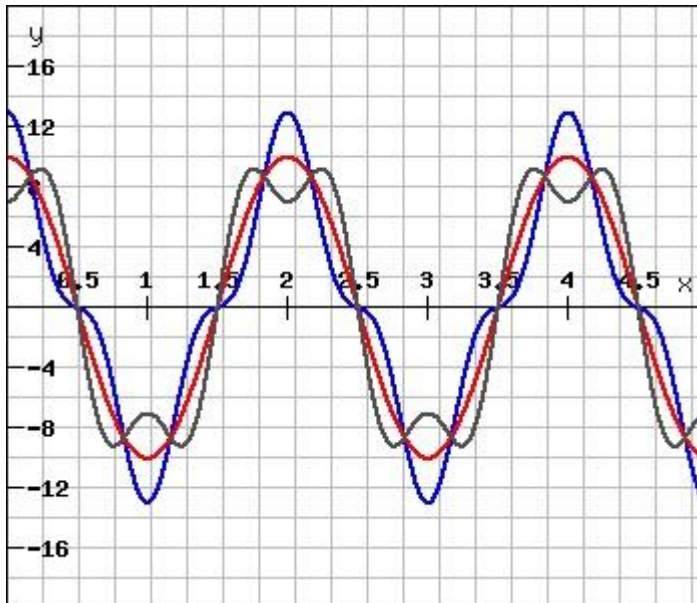


Kuva 8. 2. kertaluvun harmonisen särön vaikutus puhtaaseen kosinisignaaliin. Punainen signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x)$ funktiosta. Sininen signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x) + 3 \cos(2\pi x)$ funktiosta ja harmaa signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x) - 3 \cos(2\pi x)$ funktiosta. [15]

Kuvasta 8 nähdään, että 2. kertaluvun harmoninen aiheuttaa signaaliin leikkaantumista. 2. kertaluvun termi $3 \cos(2\pi x)$, joka on vaiheessa 0° , aiheuttaa leikkaantumista negatiiviselle puolelle. 2. kertaluvun harmoninen vaikuttaa signaalin muotoon, riippuen sen vaiheesta. Kuvan 8 signaalit, sininen ja harmaa, ova molemmat epäsymmetrisesti leikkaantuneita. Jos sinisen ja harmaan signaalin 2. kertaluvun harmoniset yhdistettäisiin samaan lauseeseen, ne kumoaisivat toisensa, eli jäljelle jäisi punainen signaali.

Kuvan 8 mukaan 2. kertaluvun harmonisen yhteys signaalin epäsymmetrisyyteen on mahdollista, mutta signaalissa on yleensä muitakin säröjä, joten asiaa ei ole yksinkertaista todeta.

Kuvassa 9 on samanlainen vertailu kuin kuvassa 8, mutta siinä vertaillaan 3. kertaluvun harmonista eri vaiheessa. Punainen signaali kuvastaa vahvistimen sisääntuloa. Siniseen signaaliin on lisätty 3. kertaluvun harmoninen. Harmaassa signaalissa on myös mukana 3. kertaluvun harmoninen, mutta 180° eri vaiheessa kuin sinisessä signaalissa.



Kuva 9. 3. kertaluvun harmonisen särön vaikutus puhtaaseen kosinisignaaliin. Punainen signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x)$ funktiosta. Sininen signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x) + 3 \cos(3\pi x)$ funktiosta ja harmaa signaali muodostuu $10 \cos(1\pi x) - 3 \cos(3\pi x)$ funktiosta. [15]

Kuva 9 osoittaa 180° :n vaiheessa olevan 3. kertaluvun harmonisen särön vaikuttavan signaaliin lähes symmetrisen leikkaantumisen, mikä näkyy harmaassa signaalissa. Symmetrinen leikkaantuminen voisi selittää transistorin symmetrisen leikkaantumisen aiheuttaman 3. kertaluvun harmonisen.

3.5 Kitaravahvistimien erot

Puhuttaessa kitaravahvistimista, transistori- ja putkivahvistimilla on tiettyjä eroavaisuuksia. Vahvistimiin on yleensä suunniteltu kaksi kanavaa. Toisessa kanavassa säröjä

on enemmän ja toisessa vähemmän. Putkivahvistimien vähän säröytyvässä kanavassa säröt lisääntyvät vahvistuksen kasvaessa. Transistorivahvistimen vähän säröytyvässä kanavassa säröt eivät yleensä lisäänty merkittävästi.

Transistorisäröksi on muodostunut käsite yliohjatusta signaalista, jossa transistorin signaali leikkaantuu, kun se menee kyllästystilaan, muodostaen teräviä reunoja aaltomuotoon [1]. Putkivahvistinta ei yleensä käytetä kyllästystilassa, mikä on tietysti myös maakuasia, vaan sitä säröytetään vain vähän ja sen kanssa käytetään kitaraefektejä, joilla luodaan yliohjaukselle ominainen säröytyminen. Kitaraefektit ovat yleensä puolijohteilla toteutettuja.

Russel O. Hamm väittää tutkimuksessaan, että kuka tahansa, joka kuuntelee LP-levyä tarkasti, pystyy huomaamaan putkien ja transistorien soundieron. Eron määrittelemisen on kuitenkin monimutkainen psykoakustinen ongelma. [2]

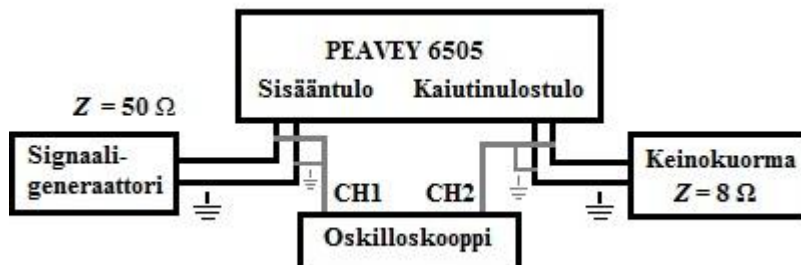
Russel O. Hammin tutkimus vahvistaa käsitystä putkivahvistimen tuottamasta 2. kertaluvun harmonisesta säröstä. Jotta asiaan saadaan varmuutta, täytyy putkivahvistinta mitata.

4 MITTAUKSET

Mitataan Peavey 6505 -putkivahvistinta ja 2N3904-transistoria ja tutkitaan, synnyttääkö putkivahvistin 2. kertaluvun harmonista säröä. Tutkitaan myös, että eroaako putkivahvistimen säröt transistorivahvistimesta.

4.1 Putkivahvistimen mittaaminen

Putkivahvistinta mitataan kuvan 10 kytkennällä. Putkivahvistimena on Peavey 6505 – putkivahvistin, ja se tarvitsee keinokuorman, sillä siinä ei ole kaiutinta kytkettynä. Signaalia syötetään Centrad GF266 -signaaligeneraattorilla ja ulostuloa mitataan Tektronix TDS 1012B -oskilloskoopilla. Mittauksessa vahvistimen vahvistusta säädetään Pre Gain- ja Post Gain-säätimillä. Pre Gainin säätäminen vaikuttaa signaaliin vahvistusprosessin aikaisemmassa vaiheessa kuin Post Gain. Vahvistimessa on kaksi eri kanavaa Lead ja Rhythm. Mittauksessa käytetään Rhythm kanavaa, sillä se on vähemmän säröytyvä kanava ja siinä signaali vielä muistuttaa sinikäyrää. Putkivahvistimessa on 6L6GC-putket. Peavey 6505:n lohkokaavio on liite 1:ssä.



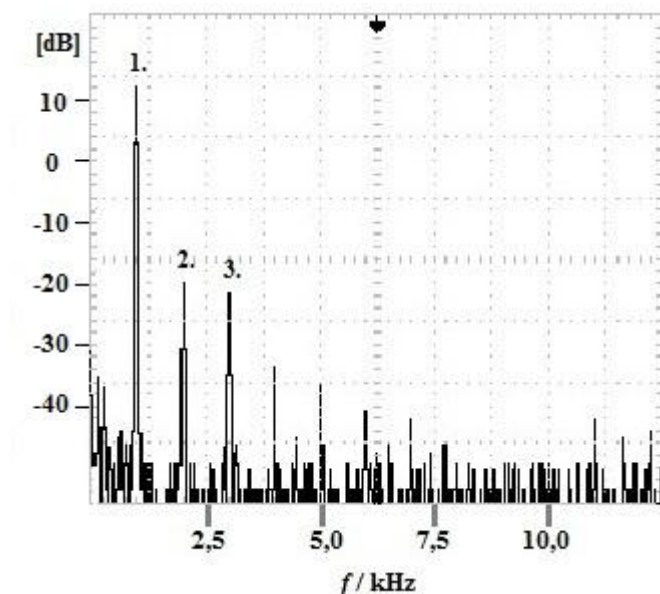
Kuva 10. Putkivahvistinmittauksen kytkentä.

Mittauksessa täytyy ottaa huomioon se, että mittattavana ei ole yksiasteinen putkivahvistin. Putkivahvistimen säröytymistä on saatettu muuttaa erillisillä kytkennöillä paremman äänen saamiseksi. Vahvistus on myös paljon isompi verrattuna yksiasteiseen transistorivahvistimeen. Kitaran putkivahvistimen mittaaminen on kuitenkin työn kannalta hyödyllinen, jotta saadaan selville sen säröytyminen.

Ensimmäisessä mittauksessa putkivahvistimeen syötetään sinimuotoista signaalia 1 kHz:n taajuudella 40 mV:n amplitudilla (p-p). Vahvistimen Pre Gain säädettiin koh-

taan 9, asteikolla 1 - 10 ja Post Gain säädettiin kohtaan 2. Näin putkivahvistin säröytyy pienemmällä vahvistuksella.

Kuvassa 11 näkyy putkivahvistimen ulostulosta tehty FFT. Kuvassa on putkivahvistimesta tulevat särökomponentit. Kuva todistaa putkivahvistimen synnyttävän 3. kertaluvun harmonisen lisäksi 2. kertaluvun harmonista säröä. Kuvan 11 mittauksessa aaltomuoto oli lähes sinimuotoista. Kuvissa 11 ja 13, 0 dB:n referenssinä on 1 V:a tehollista jännitettä.

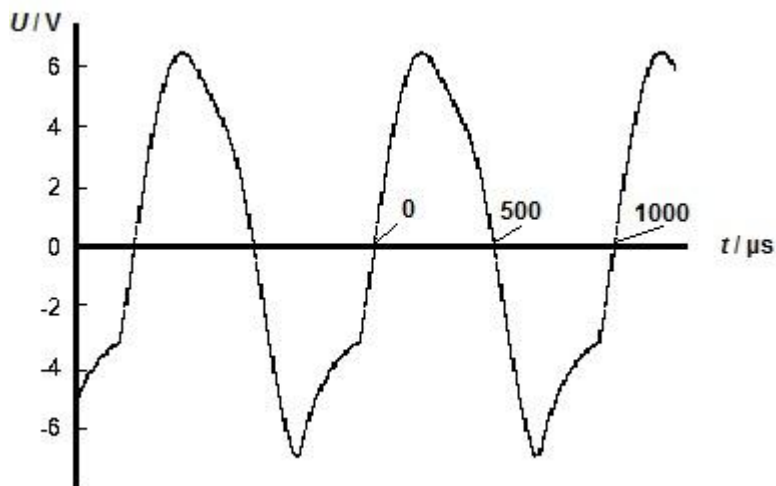


Kuva 11. Ensimmäisessä putkivahvistinmittauksessa ulostulevan signaalin FFT.

Putkivahvistimen kokonaissärön sanotaan olevan pienempi ja painottuneempi pienemmän kertaluvun säröihin, kuin transistoreilla [3]. Kuva 11 näyttää samaa kuin kyseinen väittämä. Ensimmäisessä mittauksessa ei saatu vielä riittävän voimakkaita säröjä, joten sisääntulosignaalia kasvatetaan ja nähdään miten säröt muuttuvat.

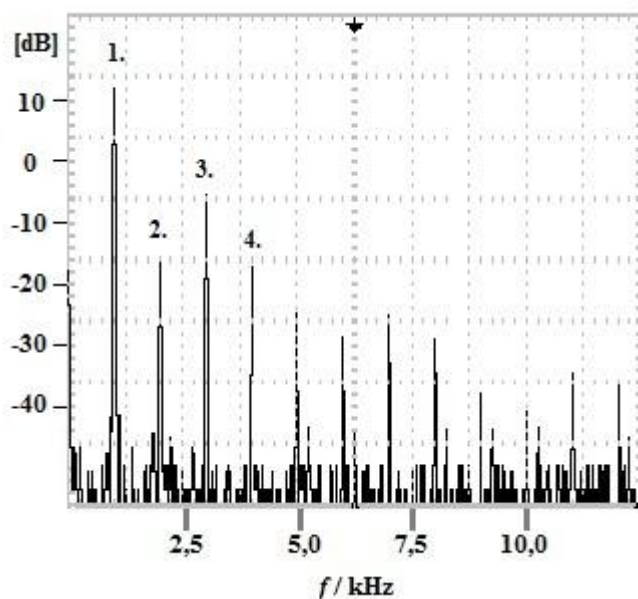
Toisessa mittauksessa putkivahvistimeen syötetään sinimuotoista signaalia 1 kHz:n taajuudella 100 mV:n amplitudilla (p-p). Pre Gain säädin asetetaan 8:aan ja Post Gain 2:een.

Kuvassa 12 on putkivahvistimen aaltomuoto toisessa mittauksessa. Tässä tilanteessa signaalin aaltomuoto on vääristynyt, eikä ole enää sinikäyrän muotoista. Putkivahvistimen vääristynyt aaltomuoto ei leikkaannu terävästi positiiviselta ja negatiiviselta puolelta.



Kuva 12. Toisen putkivahvistinmittauksen aaltomuoto.

Kuvassa 13 on toisen mittauksen särökomponentit. Kuvasta 13 nähdään putkivahvistimen parittomien harmonisten korostuvan säröjen kasvaessa, etenkin 3. kertaluvun särön. Kuvassa 13 3. kertaluvun särö on korkeampi kuin -10 dB, joten tätä kuvaa voidaan käyttää vertailukohtana suunniteltavalle efektille.



Kuva 13. Toisessa mittauksessa ulostulevan signaalin FFT.

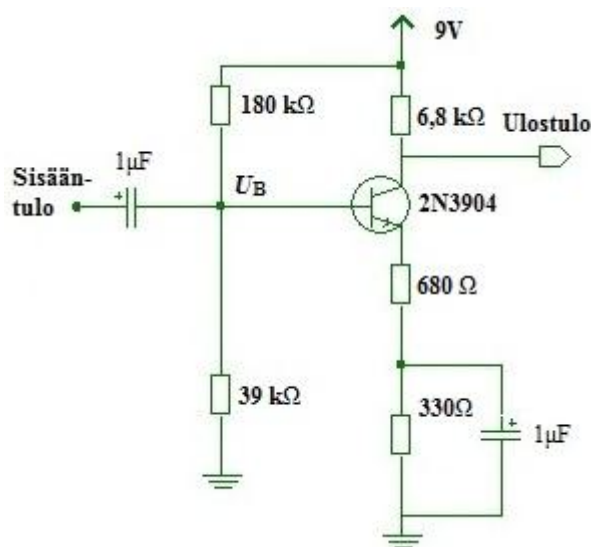
Kuvan 13 mittauksessa vahvistimen säädöt pidettiin suunnilleen samassa kuin aiemmassa mittauksessa, joten sisääntulevan signaalin kasvattaminen kasvatti myös säröjä. Mittauksien tulokset vastasivat hyvin väittämiä putkivahvistimen osalta. 2. kertaluvun har-

monista säröä löytyi ja säröt painoutuivat pienempiin kertalukuihin, kun vahvistinta särytettiin vähän.

4.2 Transistorivahvistimen mittaaminen

Mitataan 2N3904-transistoria tavallisella CE-asteen kytkennällä. Mittaukseen valitaan transistorivahvistin, jotta putkivahvistimen säröjä voidaan verrata yliohjatun transistorin säröihin. Signaalia syötetään Centrad GF266 -signaaligeneraattorista ja ulostuloa mitataan Tektronix TDS 1012B -oskilloskoopilla.

Kuvassa 14 on CE-asteen kytkentä, jota käytetään mittauksessa.



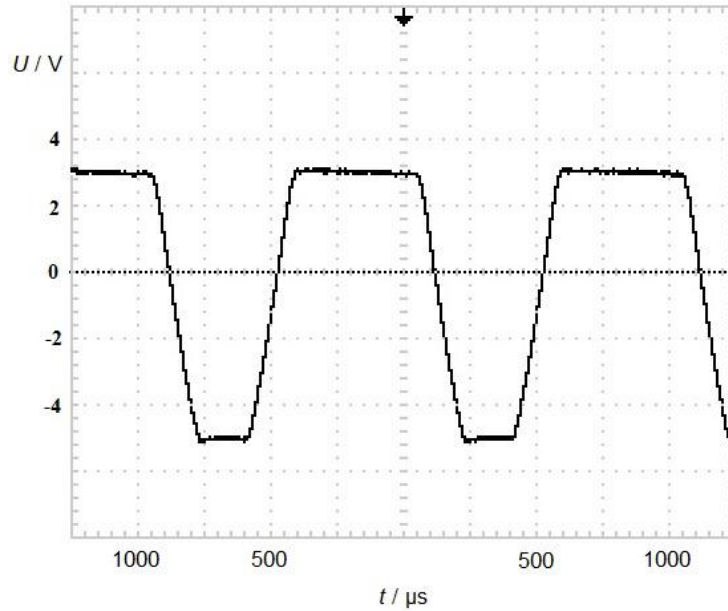
Kuva 14. CE-asteen kytkentä.

CE-asteen aaltomuoto suunniteltiin leikkaantumaan epäsymmetrisesti.

Ensimmäisessä mittauksessa vahvistimeen syötetään sinimuotoista signaalia 1 kHz:n taajuudella ja 100 mV:n amplitudilla (p-p). Ulostulosignaaliin ei kuitenkaan syntynyt säröjä, sillä sisääntulossa oli liian pieni jännite. Sisääntulosignaalin amplitudia kasvatetaan 2 V:iin (p-p), jotta nähdään miten transistori säröytyy. Jos signaalia syötettäisiin kitarasta, täytyisi signaali ensin vahvistaa.

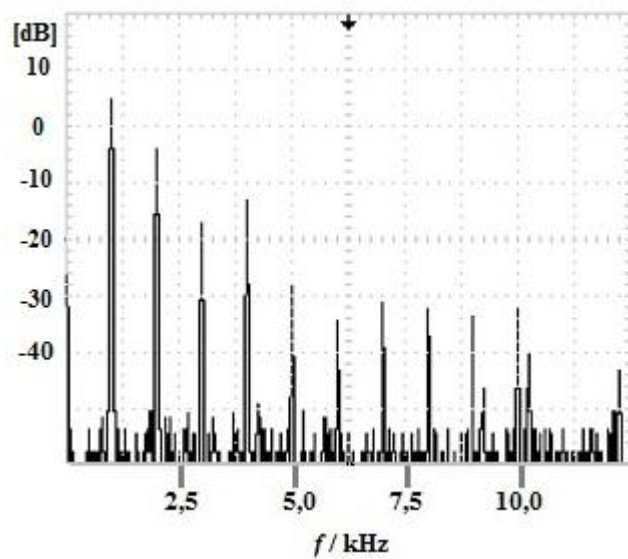
Sisääntulosignaalin amplitudin kasvattamisen jälkeen signaalin huippuun on syntynyt transistorin yliohjaukselle tyypillisiä teräviä reunoja, jotka näkyvät kuvassa 15. Kuvassa

15 näkyy myös signaalin epäsymmetrisyys. Terävät reunat eivät ole haluttuja suunnittelutavassa kitaraefektissä.



Kuva 15. Transistorin leikkaantunut aaltomuoto.

Kuvassa 16 näkyy mitatun vahvistimen särökomponentit. Transistorivahvistin tuottaa parillisia sekä parittomia harmonisia ja parilliset ovat voimakkaampia kuin parittomat, sillä signaali on epäsymmetrinen.



Kuva 16. Ulostulosignaalin FFT.

Mittaukset vahvistivat käsitystä, jonka mukaan putkivahvistin tuottaa 2. kertaluvun säröjä. 2N3904:llä toteutettu CE-aste osoittautui tuottavan myös 2. kertaluvun säröä, joten puolijohteilla pystytään myös tuottamaan 2. kertaluvun säröjä. Kuvassa 16 0 dB:n referenssinä on 1 V:a tehollista jännitettä.

5 SUUNNITTELU

Kitaraefektin suunnittelussa ei ole yhtä oikeaa toteutusta. Eri vaihtoehdot tuottavat omanlaisensa säröytymisen ja kuulostavat erilaiselta. Sovelluksen toteutusta harkittiin JFET-vahvistimen, CE-asteen ja rajoitinpiirin välillä. Vaihtoehtoja on monia, mutta toteutettavaksi valitaan rajoitinpiiri, joka täyttää kitaraefektille annetut vaatimukset, koska sillä on säädettävä vahvistus ja riittävän pieni kytkentä. 2. kertaluvun harmoninen särö synnytetään epäsymmetrisyyden avulla. Aiemmin mitattuun CE-asteeseen saisi säädettävän säröytymisen säätämällä 180 k Ω :n vastusta, mutta signaali täytyisi vahvistaa erillisellä kytkennällä.

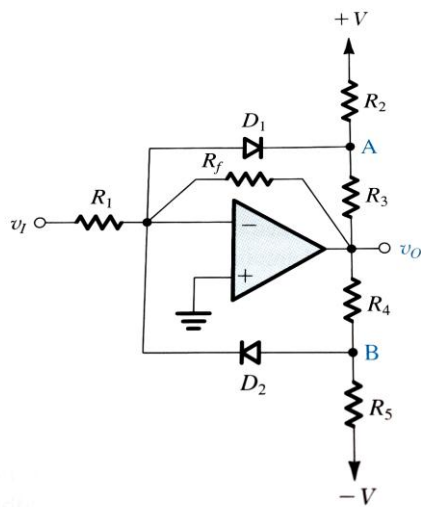
Valittua kytkentää kutsutaan rajoitinpiiriksi, koska sillä voidaan vastuksien avulla säätää signaalin leikkaantumisen tasoa erikseen positiiviselta ja negatiiviselta puolelta. Tämän avulla aaltomuoto pystytään luomaan epäsymmetriseksi. Rajoitinpiirin etuja ovat säädettävissä oleva vahvistus, jota kasvattaessa myös säröt voimistuvat signaalin leikkaantuessa yhä enemmän. Rajoitinpiirissä on myös takaisinkytkennät diodeilla, jotka luovat osaltaan kytkentään epälineaarisuutta.

Rajoitinpiirin kytkentä muistuttaa suositun kitaraefektin Tube Screamerin kytkentää, mutta on eri lailla suunniteltu [16]. Tube Screamerin säröyttämisosio on myös toteutettu operaatiovahvistimella ja diodeilla, joten operaatiovahvistimen valitseminen on hyvä valinta [16]. Operaatiovahvistimen valinnalle olennaisin syy on rajoitinpiirikytkentä, joka on toteutettu sillä. Säädettävä vahvistus ja rajoitinpiirin sopivuus kitaraefektin vaatimuksiin on myös olennaista. Operaatiovahvistin ei ole kuitenkaan välttämättä paras valinta, sillä Russel O. Hammin tutkimuksen mukaan operaatiovahvistin ei tuota 2. kertaluvun harmonisia tavallisella ylioheuksella [2]. Rajoitinpiirillä kuitenkin kokeillaan tuottaa 2. kertaluvun harmonisia.

5.1 Rajoitinpiirin suunnittelu

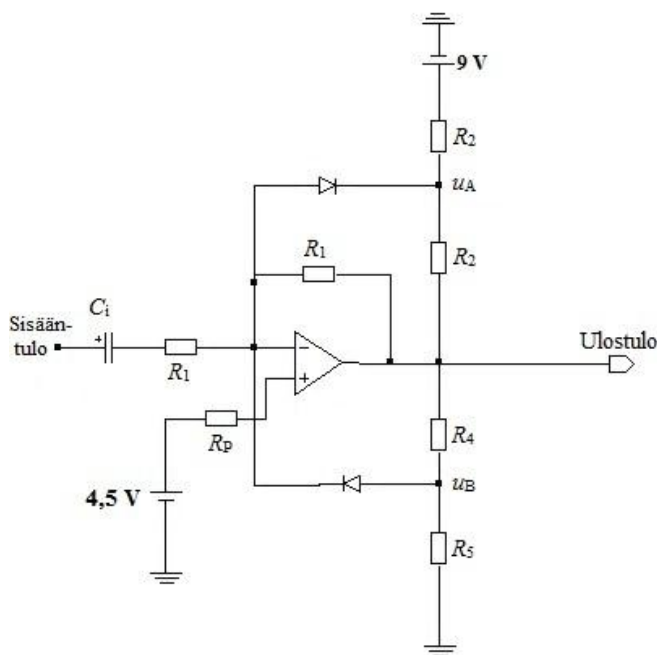
Rajoitinpiirin kytkentä on yksinkertainen, mikä oli kitaraefektiltä toivottu ominaisuus. Vastuksilla R_3 ja R_4 säädetään signaalin leikkaantumista positiiviselta ja negatiiviselta puolelta, kun ne valitaan erisuuruiseksi. Vastuksien R_F ja R_1 suhde vaikuttaa vahvistuk-

seen, joten R_F :n paikalle voidaan asettaa säätövastus. Kuvassa 17 on rajoitinpiirin kytkentäkaavio.



Kuva 17. Rajoitinpiiri. [17]

Kuvassa 18 on rajoitinpiirin muutettu versio.



Kuva 18. Rajoitinpiirin muutettu versio.

Rajoitinpiirissä on myös huonoja puolia. Kitarafektin vaatimuksena oli 9 V:n käyttöjännite, mutta rajoitinpiiri tarvitsisi sekä positiivisen että negatiivisen käyttöjännitteen. Se ei ole kuitenkaan mahdollista tavallisella paristolla, joten kytkentää täytyy muuttaa käyttämään pelkästään 9 V:a. Rajoitinpiirillä on myös pieni sisääntuloimpedanssi, joten

kytkentä tarvitsee puskurivahvistimen. Toiselle puolelle piiriä syötetään normaalisti 9 V, mutta -9 V:n lähdejännite oikosuljetaan. Lisäksi operaatiovahvistimen ei-invertoivalle puolelle syötetään 4,5 V, jotta signaalin ulostulopiste saadaan puoleenväliin 9 V:a. Ei-invertoivalle puolelle lisätään myös 100 kΩ:n vastus virran minimoimiseksi.

Jännitteet u_A ja u_B johdetaan superpositiomenetelmällä kaavoissa (2) ja (3).

$$u_A = (9 - 4,5) \frac{R_3}{R_2 + R_3} + u_o \frac{R_2}{R_2 + R_3} + 4,5 \quad (2)$$

$$u_B = 4,5 \frac{R_5}{R_4 + R_5} + u_o \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (3)$$

Oletetaan diodien kynnsjännitteeksi 0,7 V. Pisteessä u_A oleva diodi alkaa johtaa, kun u_A on diodin kynnsjännitteen verran 4,5 V:n alapuolella eli alle 3,8 V. Pisteessä u_B oleva diodi puolestaan alkaa johtaa, kun u_B on diodin kynnsjännitteen verran 4,5 V:n yläpuolella eli yli 5,2 V. Kun u_A asetetaan 3,8 V:ksi ja u_B 5,2 V:ksi, saadaan seuraavat kaavat (4) ja (5). Jännite u_{O1} tarkoittaa ulostulevaa jännitettä kaavan (2) mukaan ja jännite u_{O2} tarkoittaa ulostulevaa jännitettä kaavan (3) mukaan.

$$u_{O1} = -4,5 \frac{R_3}{R_2} - 0,7 \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \quad (4)$$

$$u_{O2} = 5,2 \frac{R_4 + R_5}{R_5} - 4,5 \quad (5)$$

Kaavoissa (4) ja (5) u_{O1} ja u_{O2} tarkoittavat ulostulojännitettä verrattuna 4,5 V:iin. Kaavoihin (4) ja (5) täytyy lisätä 4,5 V, jotta myös DC-jännite saadaan mukaan kaavaan. L_- ja L_+ ovat tasoja, joissa ulostulo alkaa leikkaantua. Kaava (6) ja (7) saadaan, kun kaavoihin (4) ja (5) lisätään 4,5 V.

$$L_- = -4,5 \frac{R_3}{R_2} - 0,7 \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) + 4,5 \quad (6)$$

$$L_+ = 5,2 \frac{R_4 + R_5}{R_5} \quad (7)$$

Tämä kytkentä eroaa putkivahvistimesta siten, että signaaliin alkaa syntyä säröjä vasta jännitteen lähestyessä L_- :n ja L_+ :n tasoja. Seuraavaksi lähdetään suunnittelemaan rajoitinpiiriä epäsymmetriseksi 2. kertaluvun harmonisten synnyttämiseksi. Valitaan tasot L_-

ja L_+ eri suuruisiksi. Koska ulostulon DC-jännite on 4,5 V, valitaan L_+ :ksi 6 V ja L_- :ksi 2 V. L_+ valittiin lähemmäs 4,5 V:a.

Valitaan R_2 :ksi ja R_5 :ksi 10 k Ω , jonka jälkeen lasketaan R_3 kaavasta (6) ja R_4 kaavasta (7). Laskut näkyvissä kaavoissa (8) - (11)

$$2 = -4,5 \frac{R_3}{10 \text{ k}\Omega} - 0,7 \left(1 + \frac{R_3}{10 \text{ k}\Omega}\right) + 4,5 \quad (8)$$

$$\Rightarrow R_3 = \frac{-1,8 \text{ V}}{-5,2 \text{ V}} 10 \text{ k}\Omega = 3,46 \text{ k}\Omega \approx 3,3 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

$$6 = 5,2 \frac{R_4 + 10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \quad (10)$$

$$\Rightarrow R_4 = \frac{0,8 \text{ V}}{5,2 \text{ V}} 10 \text{ k}\Omega = 1,54 \text{ k}\Omega \approx 1,5 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

R_F :llä pystytään säätämään vahvistusta, mutta sen paikalle laitetaan kiinteä 500 k Ω :n vastus simulointia varten. Aplacin simuloinnin mukaan 500 k Ω :n vastus on riittävän iso signaalin säröyttämiseen. Vahvistukseksi A valitaan 130 ja lasketaan R_1 kaavasta (12) [17].

$$R_1 = \frac{R_F}{A} = \frac{500 \text{ k}\Omega}{130} = 3,9 \text{ k}\Omega \quad (12)$$

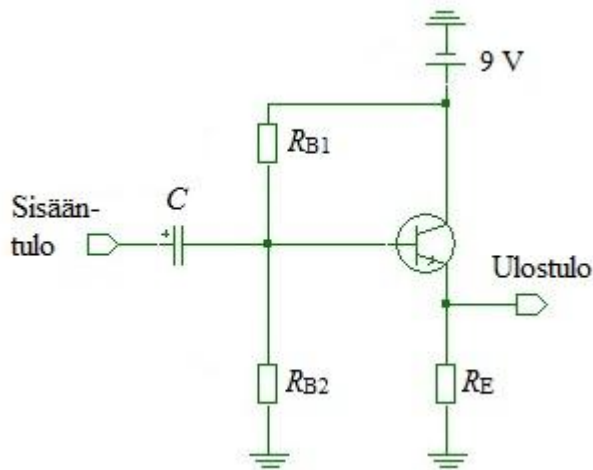
5.2 Puskurivahvistimen mitoittaminen

Vaatimuksena kitarafektille oli suuri sisääntuloimpedanssi, sillä kitaralla on suuri ulostuloimpedanssi.

Mitoitetaan puskurivahvistimelle mahdollisimman suuri sisääntuloimpedanssi. Puskurivahvistin tarkoittaa CC-astetta, jolla ei ole käytännössä vahvistusta ollenkaan. Kaava (13) on pelkistetty kaava sisääntuloimpedanssin laskemiseen [18]:

$$R_{IN} = \beta R_E \quad (13)$$

Kuvassa 19 on puskurivahvistimen kytkentä.



Kuva 19. Puskurivahvistimen kytkentä.

Valitaan R_E :ksi $27\text{ k}\Omega$, jotta saadaan riittävän pieni virta kulkemaan transistorin läpi. Valmistajan ilmoittama vahvistus β on BC847B-transistorille välillä 200 - 450 [19]. Sisääntuloimpedanssille lasketaan ylä- ja alarajat kaavoista (14) ja (15) [18].

$$R_{\text{ala}} = 200 * 27\text{ k}\Omega = 5,4\text{ M}\Omega \quad (14)$$

$$R_{\text{ylä}} = 450 * 27\text{ k}\Omega = 12,15\text{ M}\Omega \quad (15)$$

Ulostuloimpedanssi on pienimmilläänkin jo riittävän suuri, sillä se on kitaran ulostuloimpedanssia isompi. Ulostulopiste on diodin kynnyksjännitteen verran $4,5\text{ V}$:n alapuolella, eli n. $3,8\text{ V}$. Lasketaan vastuksen R_E yli menevä virta I_E kaavalla (16) [18].

$$I_E = \frac{3,8\text{ V}}{27\text{ k}\Omega} = 0,14\text{ mA} \quad (16)$$

Virta I_C on sopivan kokoinen, sillä sitä ei haluta liian suureksi. R_{B1} ja R_{B2} lasketaan R_{ala} :n mukaan kaavasta (17) [18].

$$R_{B1} \parallel R_{B2} = \frac{R_{\text{IN}}}{10} = \frac{5,4\text{ M}\Omega}{10} = 540\text{ k}\Omega \quad (17)$$

Kun sekä R_{B1} :n että R_{B2} :n paikalle valitaan $1\text{ M}\Omega$, on niiden rinnankytkennän tulos $500\text{ k}\Omega$, joka on hyvin lähellä laskettua $540\text{ k}\Omega$:a.

5.3 Simulointi

Suunnittelussa käytetään apuna Aplacia, jolla voidaan simuloida vahvistinpiiri ennen toteutusta piirilevyllä. Aplacin avulla pystytään myös optimoimaan piirille sopivat vastusarvot. Sisääntulosignaalina käytettiin 100 mV:a (p-p). Simuloinnin kuvissa 0 dB:n referenssinä on 1 V:a tehollista jännitettä.

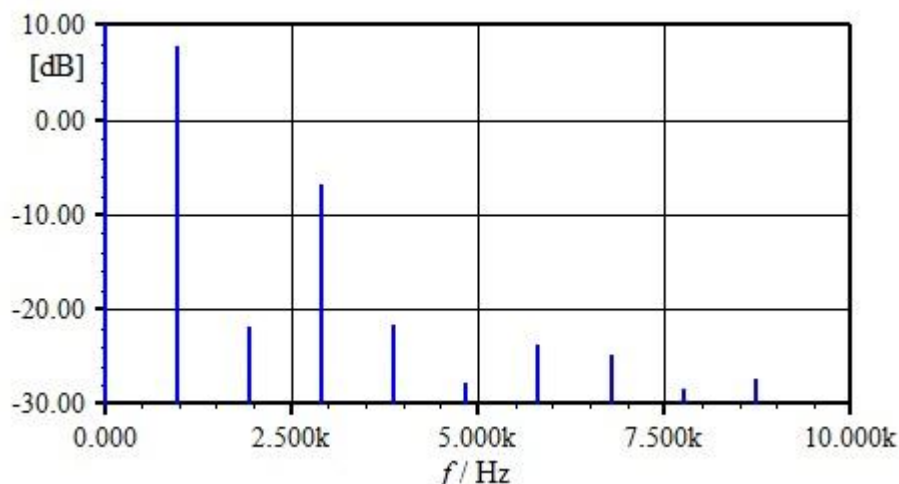
5.3.1 Symmetrinen aaltomuoto

Simuloidaan ensin piiriä siten, että R_3 ja R_4 ovat yhtä suuria. Tällöin signaalin aaltomuoto on symmetrinen ja sen avulla nähdään miten säröytyminen muuttuu, kun aaltomuodosta tehdään epäsymmetrinen. Muutetaan R_3 ja R_4 4,7 k Ω :ksi. Lasketaan arvot L_- :lle ja L_+ :lle kaavoilla (6) ja (7), joista saadaan kaavat (18) ja (19).

$$L_+ = 5,2 \text{ V} \frac{4,7 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 7,64 \text{ V} \quad (18)$$

$$L_- = -4,5 \text{ V} \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} - 0,7 \text{ V} \left(1 + \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega}\right) + 4,5 \text{ V} = 1,36 \text{ V} \quad (19)$$

Kuvassa 20 on spektri symmetrisen aaltomuodon mitoitukselle. 3. kertaluvun harmoninen särö on voimakas verrattuna 2. kertaluvun säröön.

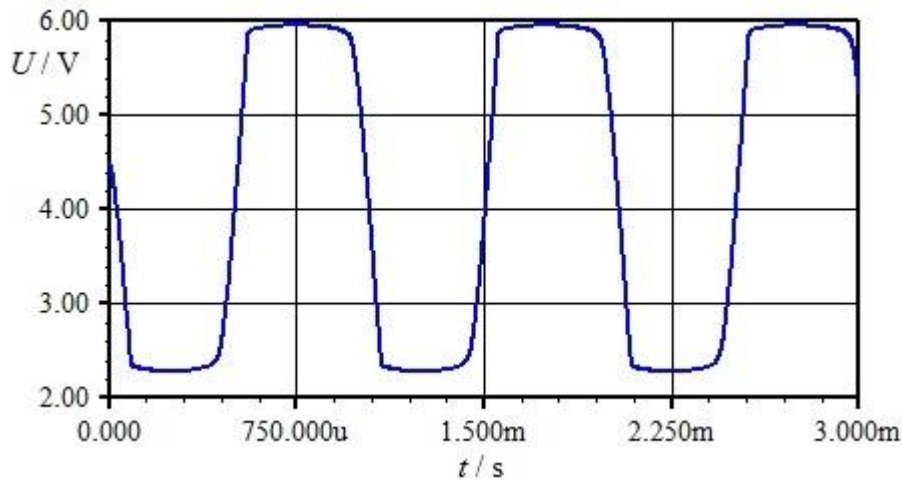


Kuva 20. Symmetrisen aaltomuodon FFT.

Symmetrinen ylioheisuus korostaa 3. kertaluvun säröä. Toisessa putkivahvistinmittauksessa 2. ja 3. kertaluvun säröjen ero oli n. 10 dB ja kuvan 20 simuloinnissa ero on n. 15 dB. Säröt ovat melko lähellä putkivahvistimen säröjä.

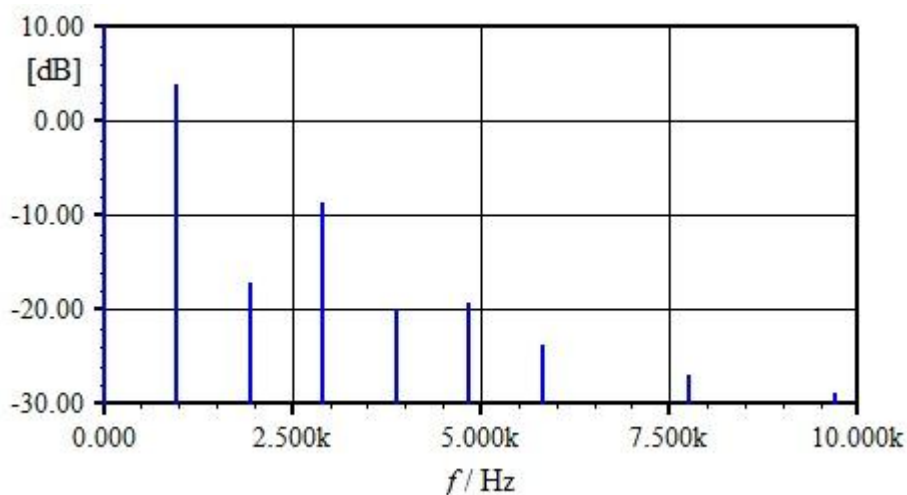
5.3.2 Epäsymmetrinen aaltomuoto

Simuloidaan kytkentää epäsymmetrisen mitoituksen komponenttiarvoilla ja katsotaan mikä vaikutus sillä on 2. harmonisen särökomponentin syntymiseen. Kuvassa 21 on epäsymmetrisen mitoituksen aaltomuoto.



Kuva 21. Epäsymmetrisen mitoituksen aaltomuoto.

Kuvassa 21 on tilanne, jossa signaalia on särötetty todella paljon. Kitaraepektissä käytetään kuitenkin R_F :nä potentiometriä, jotta signaalin säröytymisen määrää voi säätää, jos halutaan vähemmän säröjä. Kuvassa 22 on epäsymmetrisen mitoituksen synnyttämät säröt.



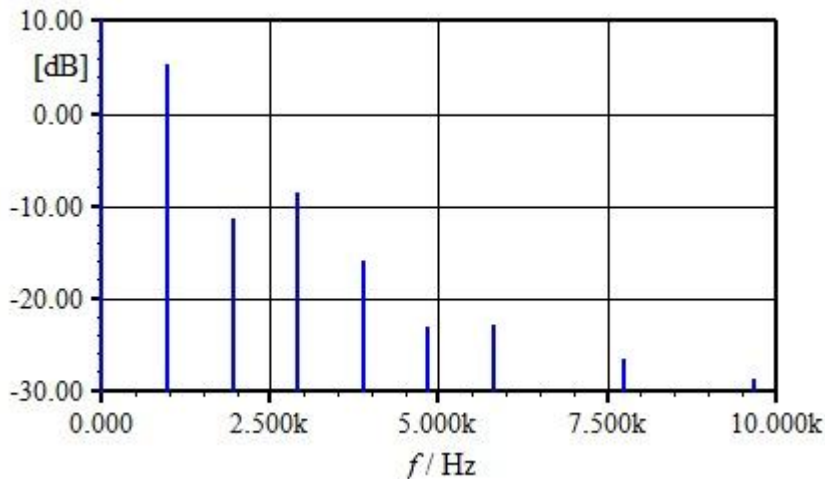
Kuva 22. Ulostulon epäsymmetrisen aaltomuodon FFT

Kuvassa 22 näkyvien 2. ja 3. kertaluvun säröjen ero on n. 8 dB, eli 2. kertaluvun särö kasvoi verrattuna symmetrisen aaltomuodon säröihin. Kuvassa 22 oleva 3. kertaluvun särö on yli -10 dB, mutta 2. kertaluvun harmonista halutaan voimakkaammaksi.

Kasvatetaan epäsymmetrisyyttä vielä hiukan, jotta 2. kertaluvun säröä saataisiin vielä enemmän. Valitaan R_3 :ksi 4,7 k Ω ja R_4 :ksi 1,8 k Ω . Rajoitetaan signaalia enemmän positiiviselta puolelta asettamalla R_4 :n pienemmäksi. Lasketaan L_+ :lle uusi arvo kaavasta (7).

$$L_+ = 5,2 \text{ V} \frac{1,8 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 6,14 \text{ V} \quad (20)$$

Kuvassa 23 on särökomponentit uusilla vastusarvoilla.

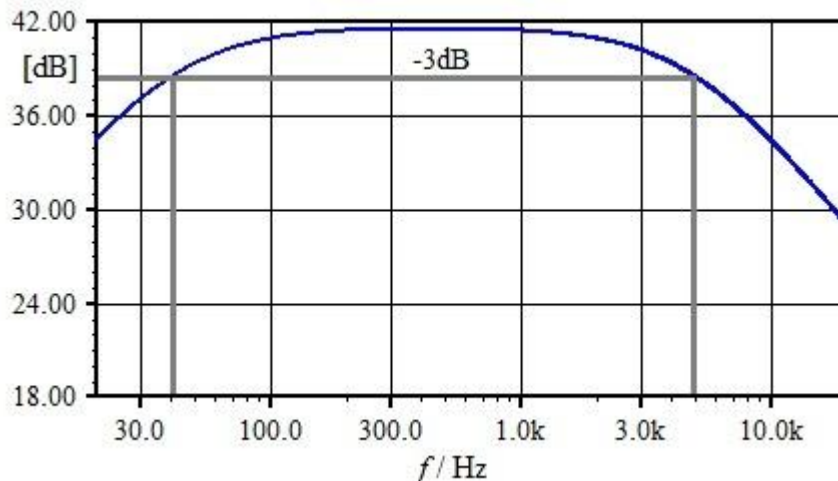


Kuva 23. Ulostulosignaalin FFT

Kuvasta 23 voidaan nähdä, että 2. kertaluvun harmonisen ero 3. kertaluvun harmoniseen on enää n. 4 dB. 2. kertaluvun säröt alkavat olla sitä luokkaa, että näillä vastus arvoilla rajoitinpiiri tullaan toteuttamaan.

5.3.3 Rajoitinpiirin amplitudivaste

Kuvassa 24 nähdään alarajataajuuden olevan 40 Hz ja ylärajataajuuden n. 5 kHz. Piiri suodattaa korkeita taajuuksia pois, mikä on hyvä asia, sillä korkeat taajuudet eivät ole haluttuja.



Kuva 24. Rajoitinpiirin simuloitu taajuusvaste

5.4 Piirilevyn tekeminen

Piirilevy suunniteltiin Eagle-piirilevynsuunnitteluohjelmalla. Ensin ohjelmaan luotiin piirikaavio, josta ohjelma muuttaa komponentit layout-muotoon ja komponentit järjestellään omille paikoilleen ja piirilevyn layout viimeistellään kuparivedoilla.

Liitteessä 2 on kitaraeffektin kytkentäkaavio, jossa näkyy mainitut komponentit. Liitteessä 3 on piirilevyn layout, jonka monistamalla pystytään luomaan piirilevy uudelleen. Liitteessä 4 näkyy piirilevyn komponenttien paikat. Liitteessä 5 on kuva valmiista piirilevystä. Piirilevystä tuli riittävän pieni. Piirilevyyn suunniteltiin suodattimia, volmesäädin ja vahvistussäädin. Piirilevy toteutettiin pintaliitoskomponenteilla.

5.5 Rajoitinpiirin mittaaminen

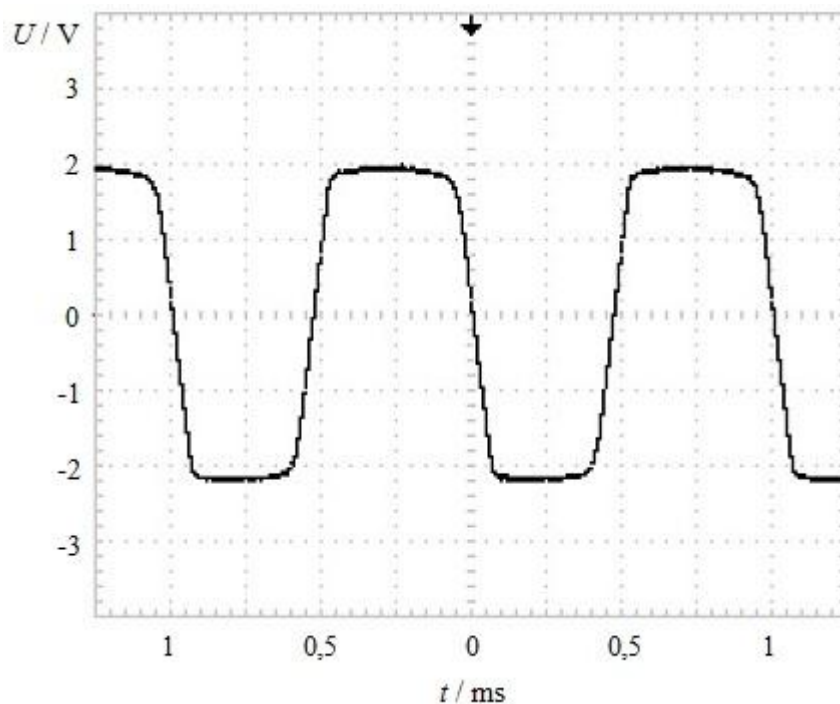
Mitataan piirilevylle toteutettua rajoitinpiiriä. Operaatiovahvistimeksi sovellukseen valitaan TL071C. Tämä malli on riittävän pienikokoinen, joten se sopii kytkentään.

Kaikki kondensaattorit valitaan mahdollisimman suuriksi. Tässä tapauksessa valittiin 1 μF , jotta taajuusalueet eivät vaikuttaisi mittaukseen. Signaalia syötetään Centrad GF266 -signaaligeneraattorista ja ulostuloa mitataan Tektronix TDS 1012B -oskilloskoopilla.

Mittauksen kuvissa 0 dB:n referenssinä on 1 V:a tehollista jännitettä.

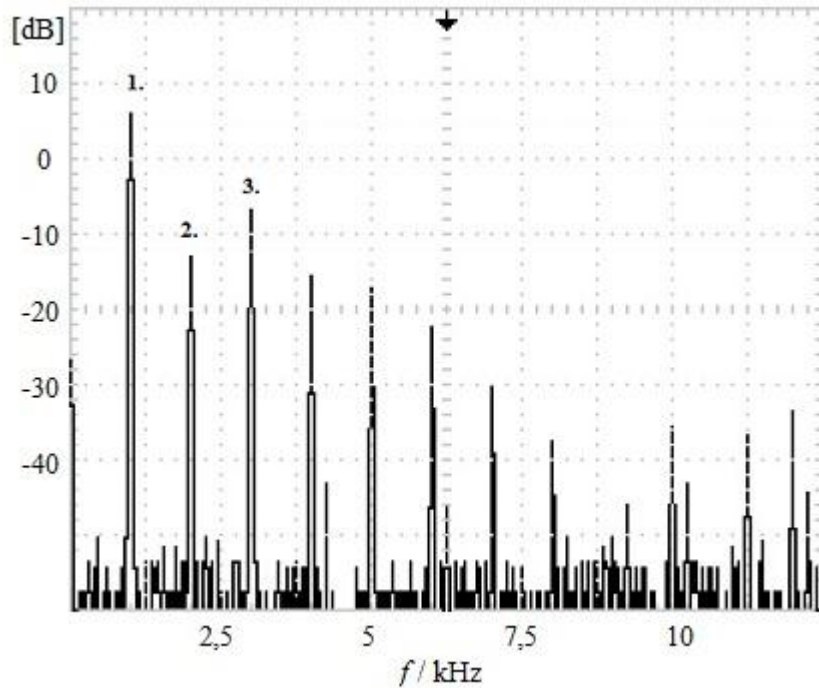
Mittaus suoritettiin muuttamalla liitteen 2 kytkentää. Signaali syötetään input-pisteeseen normaalisti, mutta R_S poistetaan ja ulostulo otetaan R_3 :n ja R_4 :n välistä. Piirilevystä jätettiin käyttämättä R_F :n paikalle suunniteltu säätövastus. $Drive_1$:n ja $Drive_2$:n pisteet oikosuljettiin. Muuten mittauksessa käytetään liitteen 2 komponenttiarvoja.

Kuvassa 25 on rajoitinpiirin aaltomuoto, jossa ei ole DC-jännitettä laskettu mukaan. Mitattu aaltomuoto muistuttaa simuloitua aaltomuotoa. Aaltomuodolla ei ole kuitenkaan niin paljon väliä lopputuloksen kannalta kuin särökomponenteilla. Koska vahvistus on säädettävissä, on kytkennässä paljon säätövaraa.



Kuva 25. Rajoitinpiirin ulostulosignaalin aaltomuoto ilman DC-jännitettä.

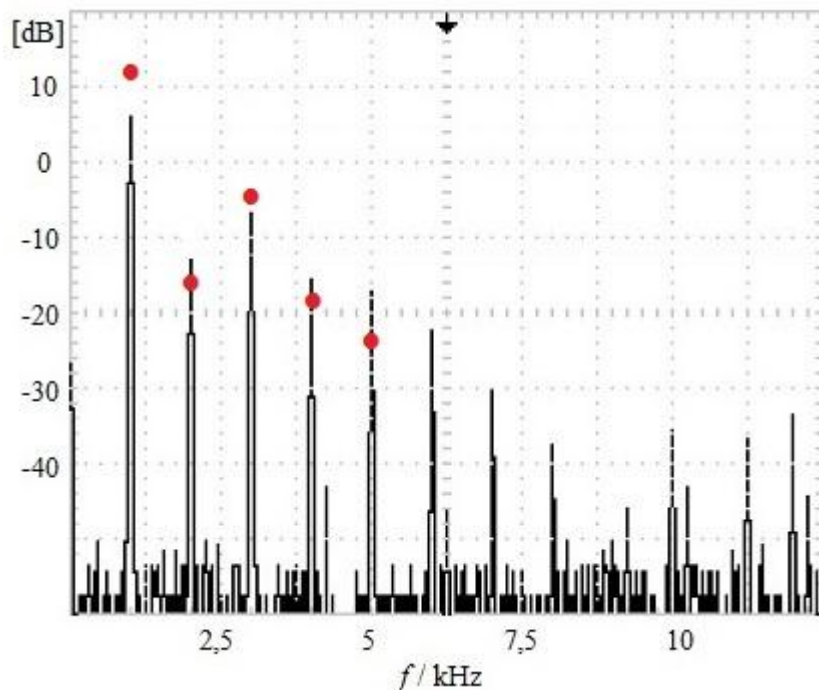
Kuvassa 26 on piirilevyltä mitatut särökomponentit. Kytkennällä saatiin tuotettua 2. kertaluvun hamonista säröä, kuten haluttiin.



Kuva 26. Ulostulosignaalin FFT.

Jotta tulokset nähdään verrattuna putkivahvistimen säröihin, ne on yhdistetty kuvaan 27.

Kuvan 27 mukaan rajoitinpiirin säröt ovat hyvin lähellä putkivahvistimen säröjä.



Kuva 27. Rajoitinpiirin ulostulosignaalin FFT ja putkivahvistimen säröt punaisilla pisteillä. Kuvassa on putkivahvistimen 5 voimakkainta säröä.

Suunnitellussa kitaraefektissä ei ole 3. kertaluvun säröä enempää kuin putkivahvistimessa. Kuvassa on vertailtu vain merkittävimpiä säröjä. Jos rajoitinpiirin kytkentä ei suodattaisi pois 5 kHz:ä isompia taajuuksia, spektrissä olisi varmasti enemmän korkean kertaluvun säröjä.

5.6 Kitaraefektille asetettujen vaatimuksien täytyminen

Kaikki kitaraefektille asetetut vaatimukset täyttyivät. Putkivahvistimen kaltainen säröytyminen oli ainoa, joka poikkesi vaatimuksista, mutta kitaraefektillä päästiin hyvin lähelle sitä.

Suunniteltua kitaraefektiiä testattiin kitaran ja vahvistimen välissä. Vahvistimina kokeiltiin putki- ja transistorivahvistinta. Putkivahvistimen kanssa särö kuulosti hyvältä, mutta asiasta täytyisi tehdä mielipidetutkimus. Kitaraefektiiä voisi käyttää transistorivahvistimen vähän säröytyvässä kanavassa, jolloin transistorivahvistimeen saadaan erilainen säröytyminen. Kitaraefekti ei kuitenkaan tee transistorivahvistimesta putkivahvistimen veroista.

Kitaraefektiiä pitäisi kehittää ulostulevaa ääntä kuunneltaessa. Kitaraefektillä ei pystyisi korvaamaan putkivahvistinta, mutta kitaraefektillä on varmasti oma paikkansa muiden kitaraefektien joukossa. Kitaristit käyttävät erilaisia soundeja erottuakseen muista kitaristeista.

6 YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin kitaran putki- ja transistorivahvistimen säröytymisen eroihin ja suunniteltiin kitaraefekti operaatiovahvistinkytkennällä, joka mallintaa putkivahvistimen säröytymistä. Työssä tutkittiin, että tuottaako putkivahvistin voimakkaampia 2. kertaluvun harmonisia säröjä kuin transistorivahvistin, jonka väitetään korostavan parittoman kertaluvun säröjä. Työssä tutkittiin myös epälineaarisuuden vaikutusta 2. ja 3. kertaluvun säröjen syntymiseen.

Työssä mitattiin Peavey 6505 –putkivahvistinta ja mittaukset osoittivat sen tuottavan 2. kertaluvun harmonista säröä. Transistorivahvistinmittauksessa mitattiin 2N3904-transistorilla toteutettua CE-astetta, jonka aaltomuoto suunniteltiin säröytymään epäsymmetrisesti. Mittaus osoitti vahvistimen tuottavan voimakkaita säröjä, joissa oli parillisia ja parittomia harmonisia säröjä.

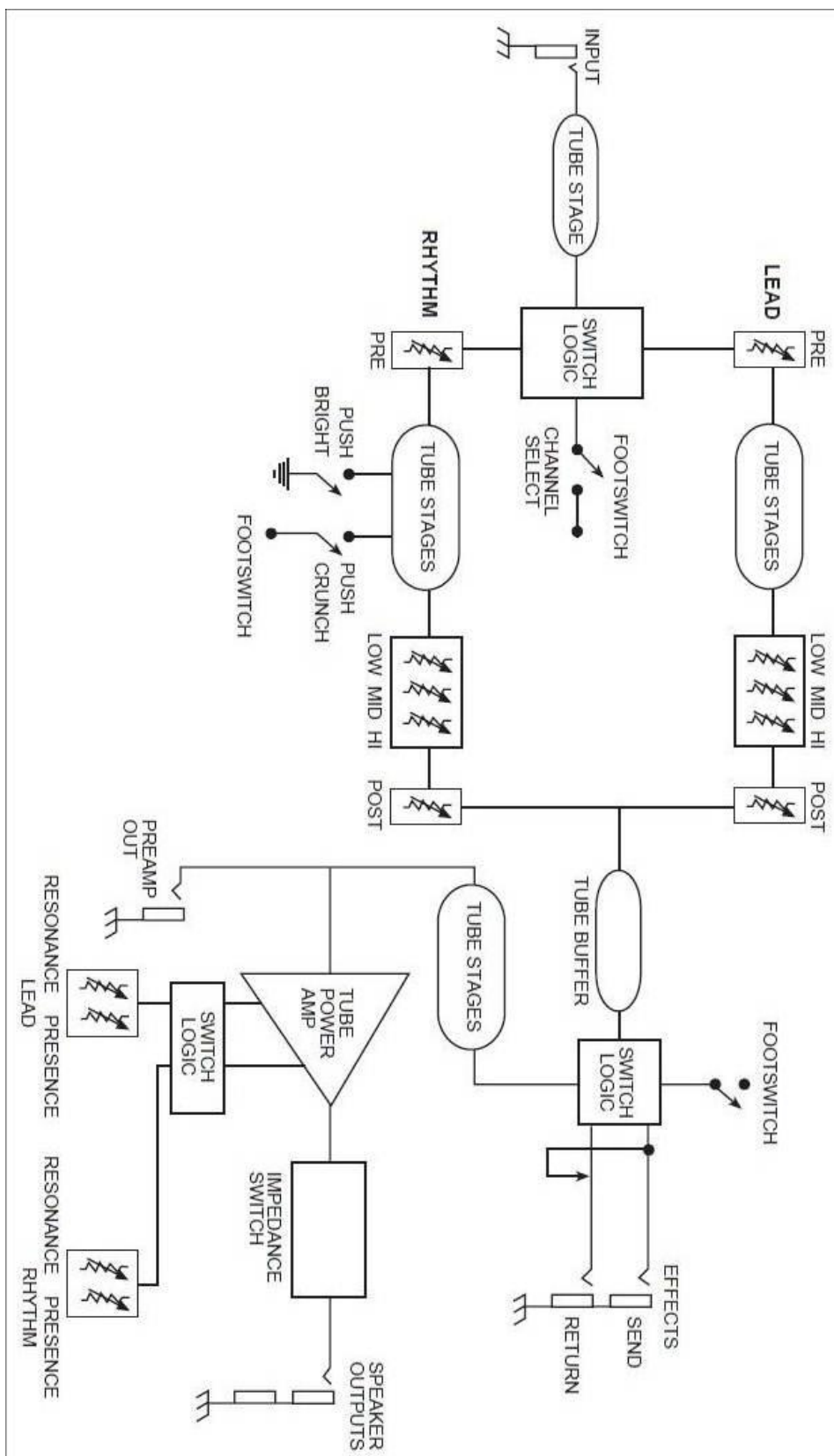
Tutkimus osoitti, että vahvistimien eroja ei voida selittää pelkästään 2. ja 3. kertaluvun harmonisten säröjen eroilla. Suunnitellulla kitaraefektillä pystyttiin tuottamaan hyvin samanlaiset särökomponentit kuin putkivahvistimella, mutta kitaraefekti ei kuulosta samalta kuin putkivahvistin. Kitaraefektiin suunniteltiin säätimet vahvistukselle ja signaalin voimakkuudelle. Vahvistusta kasvattaessa myös säröt lisääntyvät.

Koska harmonisia säröjä syntyy laitteen epälineaarisuudesta, täytyy putkien epälineaarisuuden tuottaa paremmalta kuulostavia säröjä, kuin transistorien. Putkivahvistimella on varmasti myös muita ominaisuuksia, jotka vaikuttavat ääneen. Tutkimusta voisi jatkaa tutkimalla taajuusalue-suunnittelun vaikutusta aaltomuotoon, sekä ihmisen kuuloaistin ja psykologian vaikutusta vahvistimien paremmuuden tulkitsemisessä. Tutkimukseen voisi lisätä myös yksiasteisen putkivahvistimen mittaamisen ja kitaran putkivahvistinta mallintavan transistorivahvistimen mittaamisen. Näin tutkimukseen saataisiin lisää vertailukohtia.

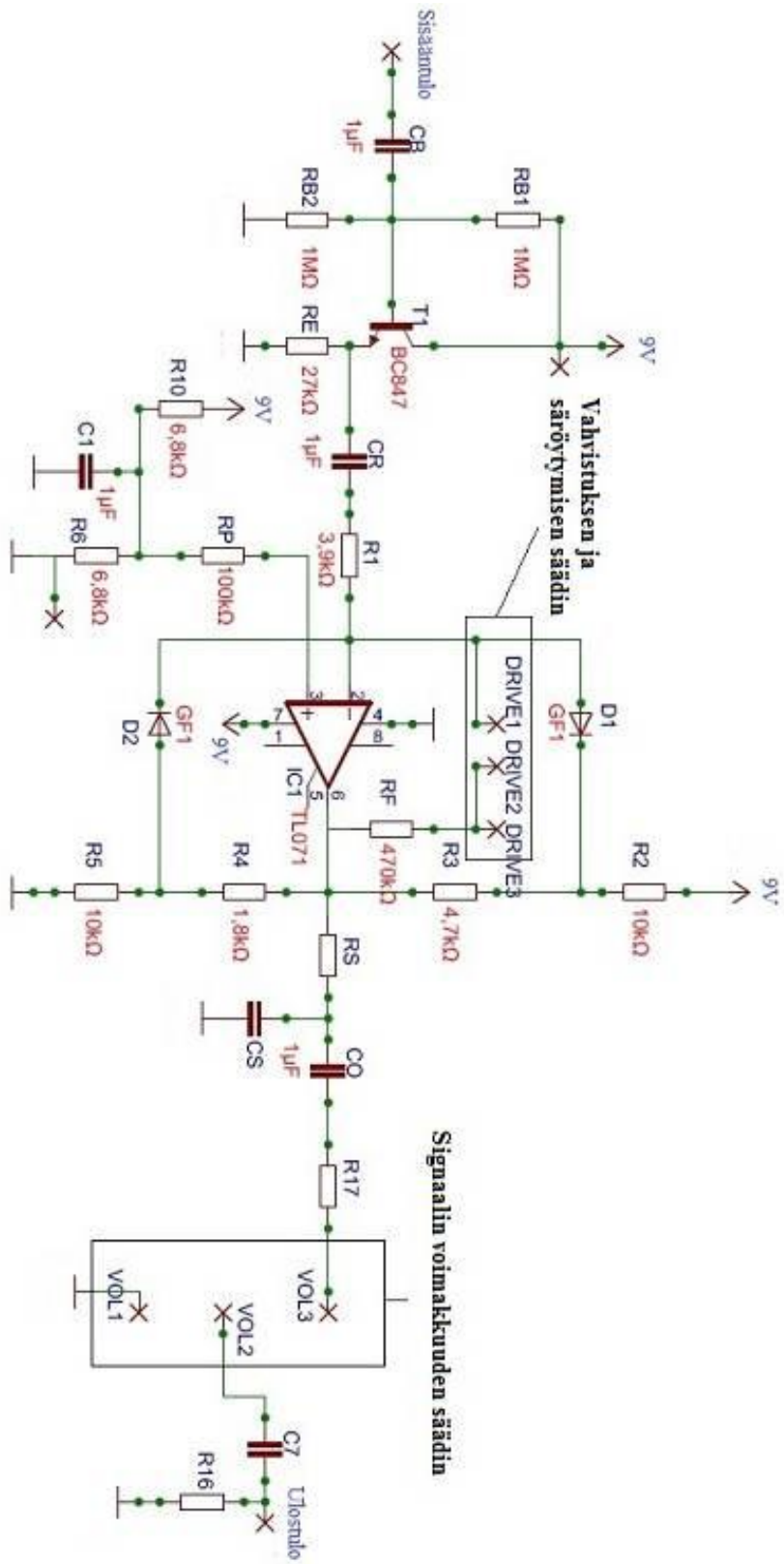
LÄHTEET

- [1] Kalev Tiits, 'Imitating Tube Distortion With Stompboxes' [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.inner-magazines.com/news/49/69/Imitating-Tube-Distortion-With-Stompboxes/> (Luettu 7.11.2012)
- [2] Russel O. Hamm, 'Tubes Versus Transistors - Is There an Audible Difference?' [pdf-dokumentti]. Saatavilla: <http://milbert.com/Files/articles/TvsT/tstxt.pdf> (Luettu 10.6.2012).
- [3] Eric Barbour 'The Cool Sound of Tubes' [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.geocities.ws/fg_audio/Archivos/the_cool_sound_of_tubes.pdf (Luettu 27.11.2012)
- [4] 'Filtering Instruments from Songs & Mixed Music' [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://renegademinds.com/Portals/0/GDT/Remove-Instruments/Interactive-Frequency-Chart.png> (Luettu 30.11.2012)
- [5] Jack Orman. 'Pickup Signals' [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.muzique.com/lab/pick.htm> (Luettu 2.12.2012)
- [6] Kularatna, Nihal. *Electric Circuits*. Jaipur, Intia: Global Media, 2010
- [7] Kishore, K. Lal. *Electronic Circuit Analysis*. Hyderabad, Intia: Global Media, 2008
- [8] Taylor, Charles. *Basic Electronics*. Delhi, Intia: Global Media, 2007
- [9] Kybett, Harry, Boysen, Earl. *All New Electronics Self Teaching Guide*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008
- [10] Elliott, Brian. *Electromechanical Devices and Components Illustrated Sourcebook*. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007
- [11] Noll, A. Michael. *Principles of Modern Communications Technology*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2001
- [12] Tayal, D.C. *Basic Electronics*. Mumbai, Intia: Global Media, 2010
- [13] Palumbo, Gaetano ja Pennisi, Salvatore. 'Feedback Amplifiers. Theory and Design'. Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [14] Dugan, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. New York, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2002
- [15] 'Draw Function Graphs' Saatavilla: <http://rechneronline.de/function-graphs/> (Luettu 1.12.2012)
- [16] R. G. Keen. 'The Technology of the Tube Screamer' [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.geofex.com/article_folders/tstech/tsxtech.htm (Luettu 2.12.2012)
- [17] Sedra, A.S. ja Smith, K.C., *Microelectronic Circuits*. New York: Oxford University Press, 2004
- [18] Wikipedia, 'Common Collector' [www-dokumentti]. Saatavilla: http://en.wikipedia.org/wiki/Common_collector (Luettu 8.11.2012)
- [19] BC847B Datasheet, [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/BC847B.pdf> (Luettu 7.11.2012)
- [20] 'Peavey 6505 + Operation Manual' [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://assets.peavey.com/literature/manuals/00575680.pdf> (Luettu 30.11.2012)

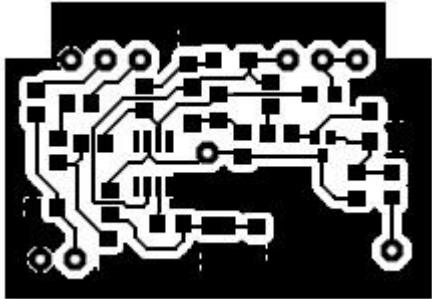
Peavey 6505:n lohkokaavio [20]



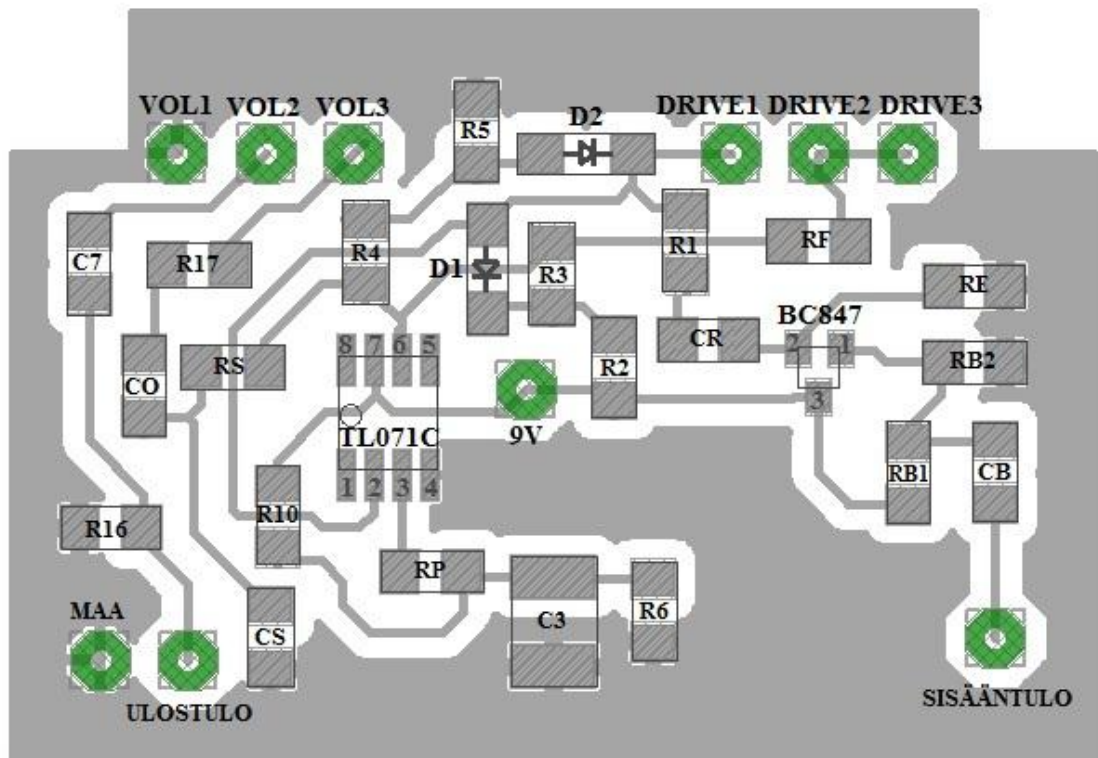
Kitarafektin kytkentäkaavio



Piirilevyn layout mittakaavassa 1:1



Kitaraefektin layoutin komponenttitiedot



Kuva piirilevystä

