ANALOGISEN JA DIGITAALISEN ÄÄNITYKSEN MITATTAVAT EROT

The measurable differences of analogue and digital audio recording

Vertti Eronen

Kandidaatintyö
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

15.7.2021

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Vertti Eronen
Analogisen ja digitaalisen äänityksen mitattavat erot

2021

Kandidaatintyö.
37 s.

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Mikko Kuisma, nuorempi tutkija Janne Jäppinen, professori Tuure Tuuva

asia-/hakusanat: A/D -muunnos, kelanauhuri, äänitys, taajuusvaste, dynaaminen alue, särö

Ääntä tallennetaan pääasiassa kahdella tavalla: analogisesti kelanauhurilla tai digitaalisesti A/D -muuntimella. Kelanauhuri tallentaa äänisignaalin liikuttamalla magneettinauhaa vakionopeudella nauhurin nauhoituspään ohi, joka magnetoi nauhan rautaoksidipinnoitteen muuttuvan magneettikentän avulla. A/D -muunnin ottaa tallennettavasta signaalista näytteitä mittaamalla sen jännitettä tietyllä näytteistystaajuudella. Näytteet pyöristetään, eli kvantisoidaan, digitaalisiksi kokonaisluvuiksi ja tallennetaan tietokoneelle.

Tämän kandidaatintyön tavoite oli selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin digitaalisen tallentimen ja analogisen kelanauhurin toimintaperiaatteet ja miten äänitteen taajuusvaste ja dynaaminen alue määrittyvät kummankin äänitysmenetelmän tapauksessa. Lisäksi analogisen ja digitaalisen äänityksen epäideaalisuuksia tutkittiin kokeellisesti mittaamalla, työssä mitattavat laitteet olivat analoginen Studer A812 -stereonauhuri ja digitaalinen Motu 1296 -tallennin. Mittauksilla pyrittiin etsimään jotain perustavanlaatuisia mitattavia eroja analogisen ja digitaalisen äänityksen välillä. Edellä mainituilta laitteilta mitattiin SNR, THD+N ja IMD. Lisäksi näille tehtiin taajuus-, amplitudi-, ja transienttivastekokeet.

Kelanauhurin taajuusvasteen määrittää nauhoituspään ilmaraon leveys ja dynaaminen alue määräytyy magneettinauhan ominaisuuksien perusteella. A/D -muuntimen taajuusvaste on puolet näytteistystaajuudesta ja dynaaminen alue riippuu kvantisointiin käytettyjen bittien lukumäärästä. Mittausten perusteella havaittiin Studer A812:n harmonisen kokonaissärön (THD+n) olevan n. satakertainen Motu 1296:een verrattuna (0,89 % vs. 0,00883 %). Motu 1296:den signaali-kohinasuhde (SNR) oli suurempi (87 dB vs. 54 dB) ja taajuusvaste tasaisempi (±0,3 dBV vs. ±2,3 dBV) Studer A812:een verrattuna. Kelanauhurin äänitteeseen aiheuttamalla voimakas särö todennäköisesti vaikuttaa kuuntelukokemukseen, esimerkiksi kelanauhureille ominaisen huojunnan aiheuttamaa säröä mallinnetaan joskus keinotekoisesti myös digitaalisissa äänitteissä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Vertti Eronen
The measurable differences of analogue and digital audio recording

2021

Bachelor's Thesis.
37 p.

Examiner: Associate professor Mikko Kuisma, junior researcher Janne Jäppinen, professor Tuure Tuuva

Keywords: A/D -conversion, tape recorder, audio recording, frequency response, dynamic range, distortion

There are two main ways of recording sound: analogue recording with a tape recorder and digital with an A/D -converter (ADC). A tape recorder uses an alternating magnetic field around the recorder's record head to magnetize the passing magnetic tape according to the recorded signal. An ADC measures the voltage of a given signal with a specific sampling frequency, the samples are then quantized to digital integers and saved onto a computer.

The objective of this bachelor's thesis was, by means of literature study, to explain the operational principles of digital ADCs and analogue tape recorders and find out which factors determine the frequency response and dynamic range of both recording methods. A series of measurements was also performed with the objective of finding out whether there existed some sort of fundamental differences in the performances of tape recorders and ADCs, the measured devices were the analogue Studer A812 -tape recorder and Motu 1296 digital recorder. The chosen series of measurements was SNR, THD+N, IMD and frequency-, amplitude-, and transient response tests.

The frequency response of a tape recorder is determined by the air gap of the record head and dynamic range by the properties of the tape used. The frequency response of an ADC is half of the sampling frequency and the dynamic range is dependent on the amount of bits used in the quantization process. Studer A812 was measured to introduce roughly a hundred times more harmonic distortion and noise than the Motu 1296 (0,89 % vs. 0,00883 %). The SNR of the Motu 1296 was greater than Studer A812's (87 dB vs. 54 dB) and the frequency reponse was flatter (±0,3 dBV vs. ±2,3 dBV). The distortion levels introduced by a tape recorder most likely influence the listening experience and distortions specific to tape recorders, flutter for example, are sometimes artificially emulated even in digital recordings.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto ... 6
   1.1 Työn taustaa ... 6
   1.2 Työn tavoite, menetelmät ja tutkimuskysymykset ... 6
   1.3 Rajaus ... 7
2. Digitaalinen äänitys ... 8
   2.1 A/D -muunnos ... 8
      2.1.1 Näytteistys ... 8
      2.1.2 Kvantisointi ... 10
      2.1.3 Koodaus ... 12
3. Analoginen äänitys ... 13
   3.1 Kelanauhuri ... 13
      3.1.1 Biasointi ... 14
      3.1.2 Nauhoituspää ... 15
      3.1.3 Mekaaniset ongelmat ... 16
   3.2 Magneettinauha ... 17
4. Mittaukset ... 19
   4.1 Mittausjärjestelyt ... 19
   4.2 Taajuusvaste ... 19
   4.3 Vahvistuksen lineaarisuus ... 22
   4.4 Signaali-kohinasuhde ... 23
   4.5 Harmoninen kokonaissärö + kohina ... 23
   4.6 Intermodulaatiosärö ... 26
   4.7 Kanttiaalto ... 27
5. Yhteenveto ... 31
   5.1 Analoginen ja digitaalinen äänitys tiivistettynä ... 31
   5.2 Mittaustulokset ... 33
   5.3 Mahdollinen jatkotutkimus ... 34

Lähteet ... 36

Liitteet ... 38

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ADC	Analogue-to-Digital -Converter, Analogia-digitaali -muunnin
AES/EBU	Audio Engineering Society:n ja European Broadcasting Union:in kehittämä ammattilaistason digitaalinen audioliitäntä
DSD	Direct Stream Digital, delta-sigmamodulaation kaupallinen nimi
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier -muunnos
IMD	Intermodulation Distortion, intermodulaatiosärö
LSB	Least Significant Bit, A/D -muunnoksen vähiten merkitsevä bitti
SNR	Signal-to-Noise Ratio, signaali-kohinasuhde
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
THD+N	Total Harmonic Distortion + Noise, harmoninen kokonaissärö + kohina
CCIR	European Comité Consultatif International pour la Radio, Kansainvälisen televiestintäliiton radioviestintäsektorin aiempi nimi

1. JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Musiikki ja sen tuottaminen on kehittynyt siinä missä muukin teknologia, digitaalisella aikakaudella perinteiset kelanauhurit ja vinyylisoittimet ovat saaneet väistyä nykyään musiikkialaa dominoivien digitaalisten tallentimien tieltä. Tämä muutos ei tosin ole ollut kaikkien kuluttajien ja tuottajien mielestä suinkaan tervetullut. Analoginen ja digitaalinen musiikki on jakanut harrastajien ja ammattilaisten mielipiteitä ensimmäisten digitaalisten tallentimien ajoilta asti.

Analogisen signaalitien musiikista kuulee usein puhuttavan muun muassa aidompana ja eloisampana kuin digitaalisesti äänitetty musiikki. Digitaalisen prosessin koetaan vievän musiikilta jotain, minkä vain analoginen signaalitie pystyy säilyttämään, olkoon se sitten aitous, alkuperäisyys tai jokin muu hifiharrastajien käyttämä sana jonka määritelmä riippuu siitä keneltä kysyy. Moni on hylännyt digitaalisen musiikin kokonaan ja alkanut keräilemään esimerkiksi vinyylilevyjä tai C-kasetteja. Vinyylilevyjen myynti onkin lähtenyt viime vuosina jyrkkään kasvuun ja niiden suosio näyttää vain kasvavan entisestään [17]. Työ tehdään yhteistyössä Astia-studion kanssa, joka on yksi harvoista jäljellä olevista täysanalogisista äänitysstudioista. Työssä hyödynnetään Astia -studion laitteistoa kokeellisten mittausten suorittamisessa.

Kuva 1.1 Tutkimuksen kokeelliset mittaukset tehtiin Astia -studiolla. Kuvassa näkyy muun muassa mittauksissa käytetyt Studer A812 -stereonauhuri ja Motu 1296 -tallennin sekä studion analoginen Trident Vector 432 -miksauspöytä.

1.2 Työn tavoite, menetelmät ja tutkimuskysymykset

Tämän kandidaatintyön tavoite on selvittää miten analoginen ja digitaalinen äänitysprosessi eroavat toisistaan. Työssä tutustutaan perinteisen analogisen kelanauhurin sekä digitaalisen tallentimen toimintaperiaatteisiin ja selvitetään kirjallisuuden avulla mitä rajoitteita nämä prosessit asettavat äänitteelle. Lisäksi edellä mainittujen nauhureiden eroja tutkitaan kokeellisesti mittaamalla, työssä mittavat laitteet ovat analoginen Studer A812 ¼” -

stereonauhuri ja digitaalinen Motu 1296 -tallennin. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

Mitkä ovat analogisen ja digitaalisen äänityksen toimintaperiaatteet?

Mitkä tekijät analogisessa ja digitaalisessa äänityksessä määrittävät äänitteen taajuusvasteen ja dynamiikan laajuuden?

Mitkä ovat analogisen ja digitaalisen äänityksen keskeisimmät epäideaalisuudet?

1.3 Rajaus

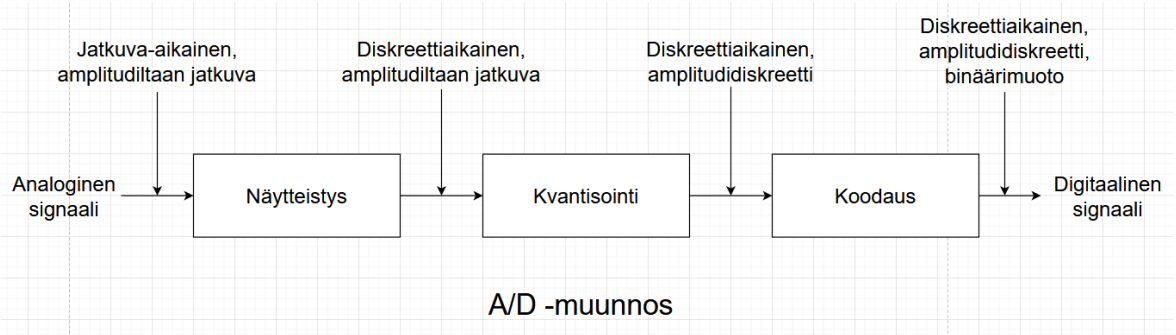
Kaikki signaaliketjun osana olevat laitteet vaikuttavat äänitteeseen jollain tasolla, tässä työssä käsitellään eri tallentimia vain sellaisenaan eikä ympäröivän laitekokoonpanon vaikutusta näin ollen oteta huomioon. Työssä suoritetaan mittauksia vain yhden valitun kelanauhurin ja A/D -muuntimen osalta. Työssä ei myöskään huomioida mahdollisia aistinvaraisia kokemuksia vaan aihetta lähestytään yksinomaan teknisestä näkökulmasta.

2. DIGITAALINEN ÄÄNITYS

Ensimmäiset digitaaliset tallentimet alkoivat ilmestyä markkinoille 1970 -luvun alussa ja vuosikymmenen loppuun mennessä teknologia oli kehittynyt huimasti syrjäyttäen lopulta analogisen vastineensa päätoimisena äänitysmenetelmänä 80 -luvun aikana [6]. Analoginen äänitys on kuitenkin edelleen suosiossa ja viime vuosina kiihtyneen vinyylilevyjen myynnin myötä analogisen signaalitien musiikki tulee luultavasti vain yleistymään.

2.1 A/D -muunnos

Analoginen signaali on luonteeltaan jatkuva-aikainen ja amplitudiltaan jatkuva. Digitaalisessa muodossa signaalin esittämiseen on käytössä äärellinen määrä lukuarvoja, analoginen signaali on siis muunnettava diskreettiaikaiseksi ja amplitudidiskreetiksi [8]. Analogia-digitaalimuunnin (*eng. Analogue-to-Digital Converter, ADC*) ottaa äänitettävästä signaalista näytteitä tietyllä näytteistystaajuudella ja tämän tuloksena saatu diskreettiaikainen signaali kvantisoidaan. Näytteistetty ja kvantisoitu signaali tallennetaan tietokoneella käsiteltävään digitaaliseen muotoon, tämän jälkeen äänite on turvassa ns. ulkoisilta haittatekijöiltä ellei sitä tietoisesti muokata. A/D -muunnoksen lohkokaavio on esitetty kuvassa 2.1, seuraavaksi käsitellään A/D -muunnoksen vaiheita tarkemmin ja selvitetään miten nämä vaikuttavat äänitteen ominaisuuksiin.



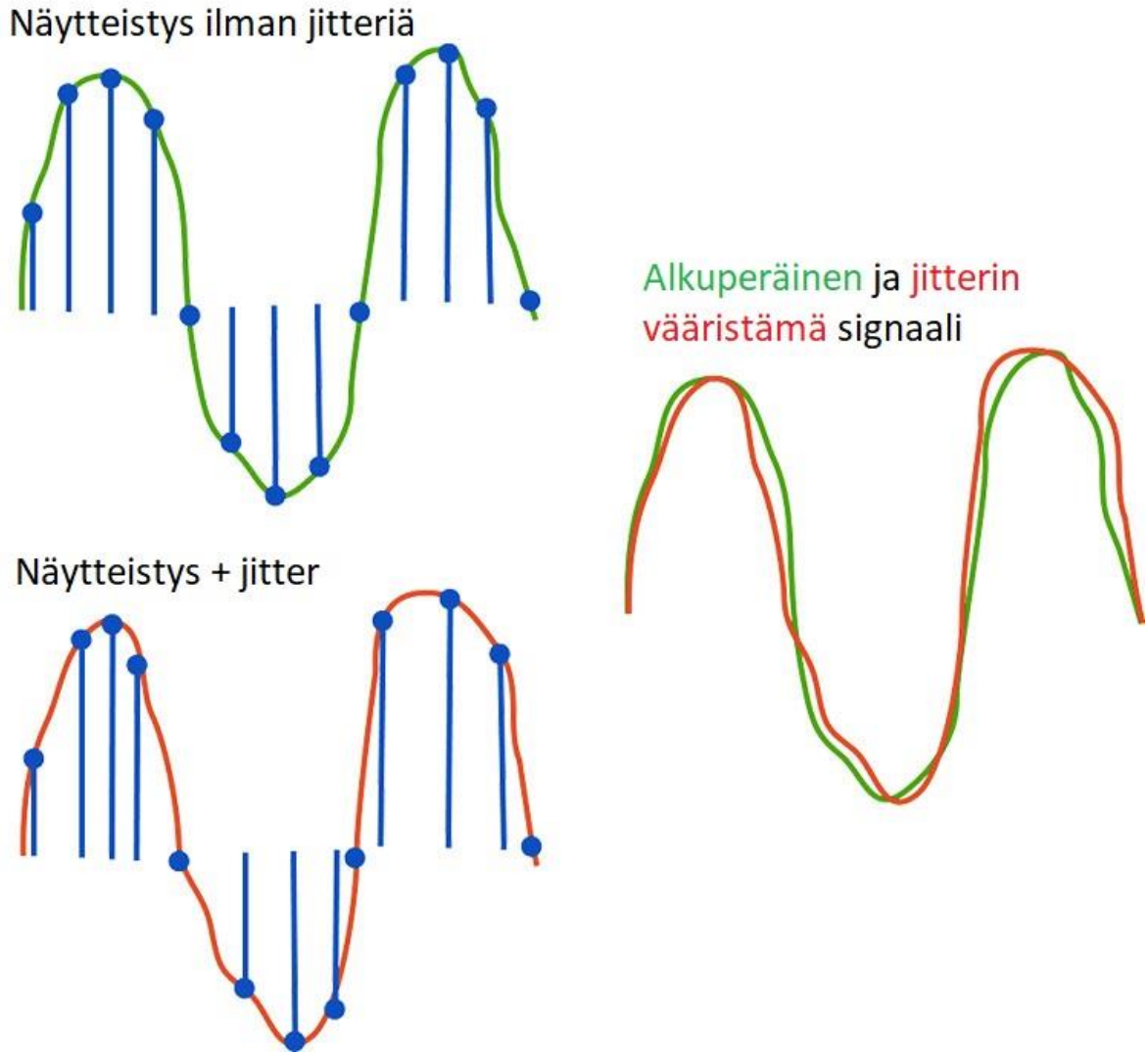
Kuva 2.1 A/D -muunnoksen lohkokaavio. Jatkuva-aikaisesta äänisignaalista otetaan tiheällä aikavälillä näytteitä ja näytteet pyöristetään digitaalisiksi arvoiksi, lopputuloksena diskreettiaikainen ja amplitudidiskreetti digitaalinen äänite.

2.1.1 Näytteistys

A/D -muunnoksessa analogisesta signaalista otetaan näytteitä jollain näytteenottotaajuudella. Näytteenottotaajuus määrittää äänitteen taajuusvasteen ylärajan. Nyquistin teoreeman mukaan, jotta jokin taajuus voidaan esittää digitaalisesti muuttumattomana, sen aaltomuoto tulee näytteistää vähintään kaksi kertaa [8]. Toisin sanoen näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksinkertainen näytteistettävään taajuuteen nähden. Suurinta mahdollista näytteistettävää taajuutta kutsutaan järjestelmän Nyquist -taajuudeksi, tämän taajuuden ylittävät taajuudet on syytä suodattaa pois signaalista laskostumisen estämiseksi [8]. A/D -muuntimissa on sisäiset laskostumisenestosuotimet, lisäksi vastaavia alipäästösuotimia on usein myös esimerkiksi mikrofoneissa [1].

A/D -muuntimen sisäinen kello ohjaa sen toimintaa, kaikki muunnosprosessin vaiheet on ajastettu muuntimen sisäisen kellosignaalin mukaan. A/D -muuntimen kellosignaali

vaikuttaa olennaisesti näytteistykseen, ideaalitilanteessa kellosignaalin taajuus pysyy täysin muuttumattomana, huonolaatuinen kello voi kuitenkin aiheuttaa tallenteeseen suuriakin määriä säröä. Kun analogisesta signaalista otetaan näytteitä, tiedossa on vain signaalin amplitudi tietyillä ajanhetkillä, yksinkertaistettuna näytteiden perusteella voi ikään kuin yhdistää pisteet ja saada alkuperäisen signaalin aaltomuodon. Epäideaalisen kellosignaalin seurauksena näytteiden aikaväli ei ole vakio, jolloin näytteistetty aaltomuoto ei enää vastaakaan alkuperäistä signaalia. Kellosignaalin epävakauden aiheuttamaa säröä kutsutaan jitteriksi, lievä jitter aiheuttaa esimerkiksi pistemäisen taajuuden vuotamista ympäröiviin taajuuksiin (ks. kuvat 4.4 & 4.6) [14]. Jitter voi samaan tapaan aiheuttaa säröä myös D/A -muunnoksessa, vaikka muuntimelle saapuvien näytteiden datasisältö olisi täydellinen niiden ajoitus saattaa olla pielessä huonon kellotuksen takia.



Kuva 2.2 Havainnekuva jitterin aiheuttamasta signaalin aaltomuodon vääristymisestä. Kun näytteiden ajastus on pielessä muuttuu myös näytteistetty aaltomuoto. [13]

Yleisin kuluttajakäytössä esiintyvä näytteistystaajuus on CD-levyissä käytettävä 44,1 kHz, mikä tarkoittaa 22,05 kHz:n taajuusvastetta. Kuluttajalevityksessä musiikin näytteistystaajuus yltää usein enintään 192 kHz:iin. Suurempiinkin taajuuksiin voi törmätä, varsinkin DSD -formaatissa (*Direct Stream Digital*), mutta harvemmin ylitetään 192 kHz. Moni hifiharrastaja suosii mahdollisimman suuria näytteistystaajuuksia, kokien niiden

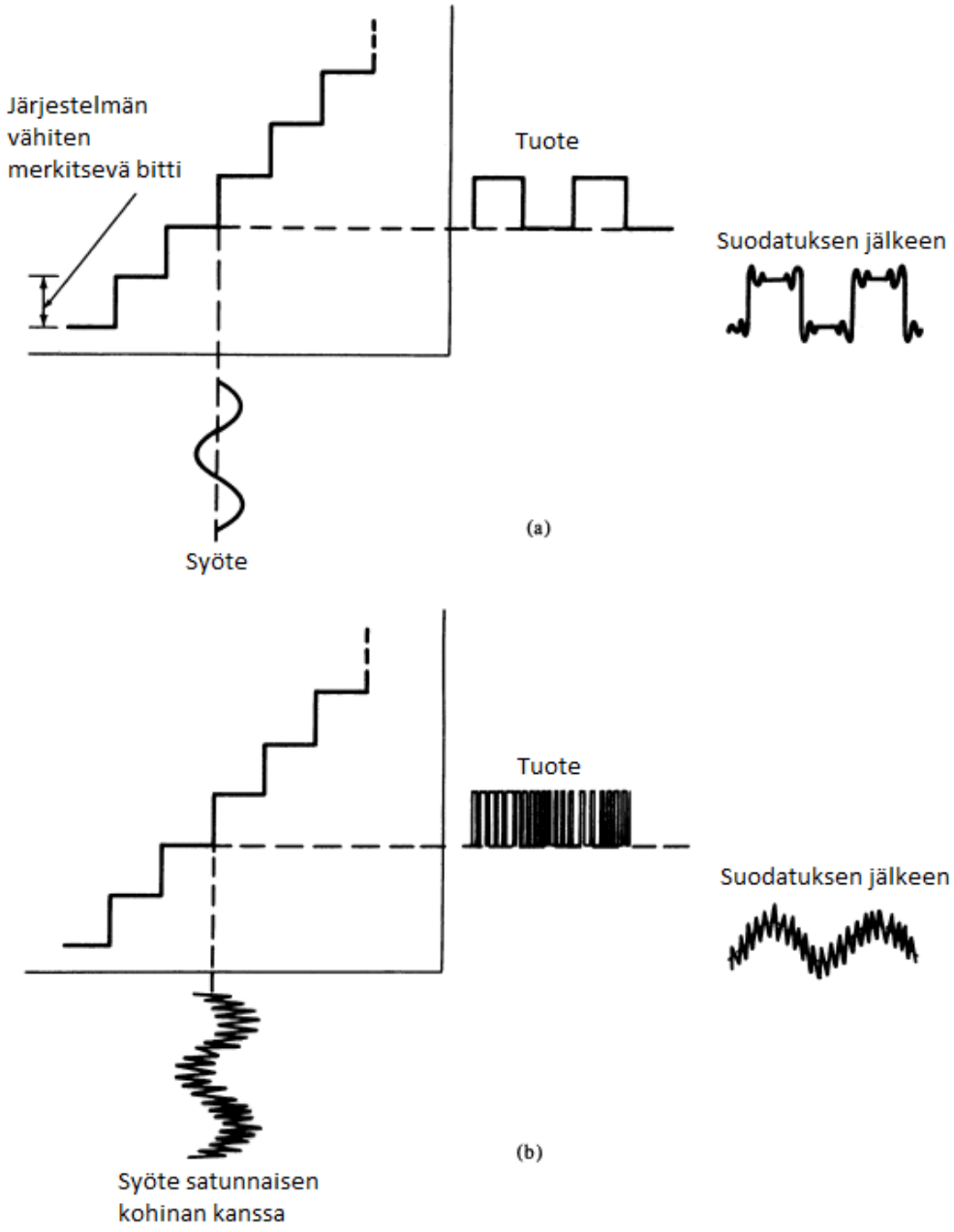
parantavan äänenlaatua. Vaikka ihminen pystyisi kuulemaan suuria taajuuksia käytössä oleva laitteisto harvemmin edes yrittää toistaa niitä. Audiolaitteisto toistaa ääntä tasaisesti tietyllä taajuuskaistalla, tämän kaistan ulkopuolelle jäävät taajuudet suodatetaan useimmiten pois, jotta ne eivät häiritsisi laitteen toimintaa [1]. Käytännössä äänentoiston taajuusvaste rajataan lähes aina jossain signaaliketjun vaiheessa suunnilleen ihmisen kuuloalueen rajoille tai hieman sen yläpuolelle. Esimerkiksi kaiuttimien ja kuulokkeiden taajuusvaste yltää tavallisesti 20 – 25 kHz:in paikkeille.

Ääntä tallennettaessa käytetään usein CD -standardia suurempia näytteistystaajuuksia, sillä A/D- muuntimen laskostumisenestosuodin voi vääristää kuuloalueen taajuuksia. Suurella näytteistystaajuudella, esim. 192 kHz, äänitettäessä A/D -muuntimen alipäästösuodin on sijoitettu reilusti kuuloaistin rajojen yläpuolelle jolloin myös sen mahdollisesti aiheuttamat vääristymät jäävät myös kuuloalueen ulkopuolelle. Lisäksi tallennuksen näytteistystaajuuden valintaan vaikuttaa äänitteen käyttötarkoitus, esimerkiksi elokuvat ja televisio käyttävät usein 48 kHz:n näytteistystaajuutta jolloin pääasiassa näihin tarkoituksiin äänittävän studion on käytännöllisempää käyttää tätä taajuutta [11].

2.1.2 Kvantisointi

Kvantisointivaiheessa äänisignaalista otettujen näytteiden arvot pyöristetään sarjaksi digitaalisia kokonaislukuja. Kvantisointitasojen eli näytteen ilmaisuun käytössä olevien lukuarvojen määrä ilmaistaan bitteinä, käytössä olevien bittien määrää kutsutaan äänitteen bittisyvyydeksi. Bittisyvyys määrittää digitaalisesti tallennetun äänitteen dynaamisen alueen, eli suurimman ja pienimmän mahdollisen järjestelmän tallentaman amplitudin eron. Tavallisesti kuluttajakäytössä esiintyvä musiikki on syvyydeltään 16-bittistä, mikä vastaa 96 dB:n dynaamista aluetta [16]. Musiikkia on myös saatavilla 24-bittisenä, mikä tuottaa äänitteelle 144 dB:n dynaamisen alueen, tämä on tosin vain teoreettinen maksimi, jota nykyiset ADC:t eivät pysty saavuttamaan vaan dynaaminen alue jää usein noin 120 dB:n paikkeille [16].

Aina kun yksittäinen näyte kvantisoidaan syntyy signaaliin näytteen todellisen arvon ja kvantisoidun arvon eron verran virhettä, näiden virheiden yhteisvaikutusta kutsutaan kvantisointikohinaksi. Korkean resoluution omaavilla A/D -muuntimilla kvantisointikohina jää useimmiten laitteen sähköisen taustakohinan alapuolelle eikä näin ollen aiheuta merkittävää säröytymistä [3]. Kvantisointikohinan vaikutus on suurimmillaan kun yritetään tallentaa erittäin vaimeita signaaleja, signaalin voimakkuuden ollessa alle kvantisoinnin vähiten merkitsevän bitin (*Eng. Least Significant Bit, LSB*) eli ns. kahden kvantisointitason välissä signaalin digitaalinen arvo vaihtelee jaksollisesti kahden kvantisointitason välillä tuottaen äänitteeseen säröä kanttiaallon muodossa [9]. Kvantisointikohinaa voidaan vaimentaa huomattavasti lisäämällä signaaliin erittäin vaimeaa kohinaa (amplitudi ±0,5LSB) [9]. Kohinan johdosta vaimean signaalin vaihtelu kvantisointitasojen välillä on satunnaista, jolloin lopputuloksena tallennettu signaali vastaa kanttiaallon sijasta alkuperäistä signaalia johon on lisätty hieman kohinaa [9]. Äänityskäyttöön tarkoitetuissa A/D -muuntimissa kvantisointikohina on lähes aina kuuloaistin rajojen ulkopuolella. Kuvalla 2.3 havainnollistetaan satunnaiskohinan vaikutusta (*eng. dithering)*.



Kuva 2.3 Satunnaiskohinan vaikutus vaimean signaalin tallennukseen. Kuvassa (a) A/D -muunnettu signaali vaihtelee kahden digitaalisen arvon välillä jaksollisesti tuottaen kanttiaaltoa. Kuvassa (b) syötteeseen on lisätty satunnaista kohinaa, jolloin digitaalisen arvon vaihtelu on satunnaista, lopputuloksena syötettä vastaava signaali johon on lisätty kohinaa. [8]

2.1.3 Koodaus

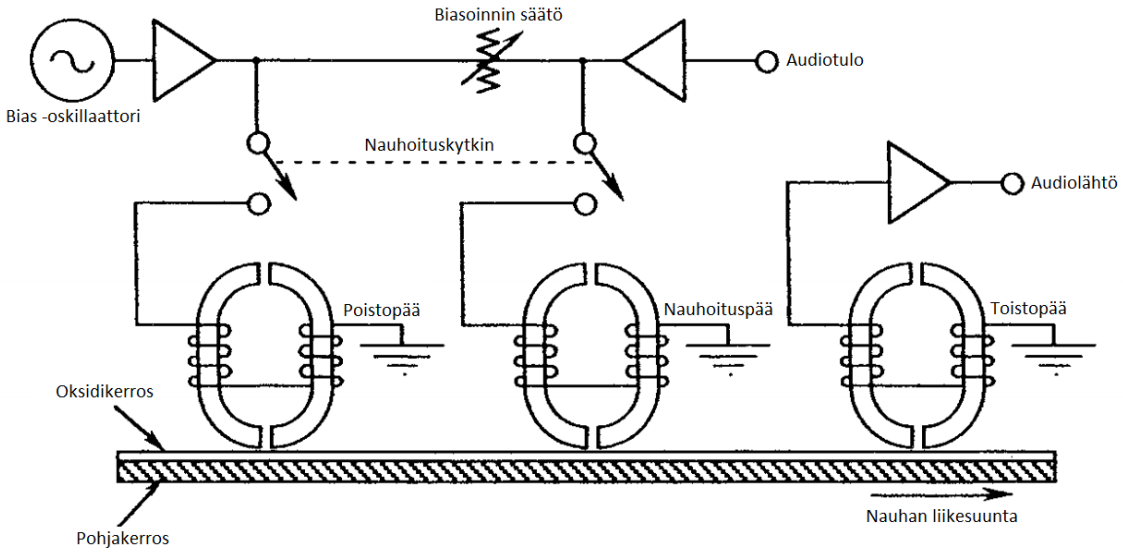
Kvantisoinnin jälkeen äänitteeseen lisätään synkronointiin ja virheenkorjaukseen tarkoitettua dataa ja se koodataan haluttuun digitaaliseen muotoon [9]. Lopputuloksena saatu digitaalinen äänite tallennetaan jatkokäsittelyä varten. Tässä vaiheessa äänitysprosessin epäideaalisuudet eivät enää kosketa äänitettä ja sen voi kopioida loputtomiin ilman häviöitä, häviöllinen pakkaus tosin aiheuttaa äänitteeseen laatuhäviöitä. Digitaalisella aikakaudella äänitteitä pakataan lähes aina häviöllisesti jossain vaiheessa ellei käyttäjä tietoisesti etsi häviöttömästi pakattua sisältöä. Esimerkiksi YouTube:n häviöllisesti pakatun ääniraidan bittinopeus, eli kuinka paljon dataa ääniraita sisältää sekuntia kohden, on korkeimmillaan 256 kbps, musiikin suoratoistoon erikoistuvan Spotify:n bittinopeus on taas maksimissaan hieman parempi 320 kbps [20][19]. Häviöttömästi pakatun CD -laatuisen musiikin (44,1 kHz / 16-bit) bittinopeus on sen sijaan yleensä 1000 – 1400 kbps, suuremmalla näytteistystaajuudella ja bittisyvyydellä tämä luku vain kasvaa [5]. Edellä mainittujen palveluiden käsittelyn jälkeen CD -laatuisen musiikin tiedostokoko putoaa siis jopa alle viidennekseen alkuperäisestä, mikä tarkoittaa myös välittömästi huomattavia laatuhäviöitä. Toisaalta analogiset formaatit menettävät parhaissakin käsissä alkuperäistä sisältöään fyysisen kulumisen vuoksi, toisin kuin digitaaliset äänitteet, mitkä vaativat tarkoituksellisia toimenpiteitä laatuhäviöiden aiheuttamiseksi. Analogisten äänitteiden säilytykseen perehdytään tarkemmin kohdassa 3.2.

3. ANALOGINEN ÄÄNITYS

Ennen digitaalisten nauhureiden aikakautta ääntä tallennettiin pääasiassa magneettinauhalle kelanauhurin avulla. Kun keksittiin kuinka nauhoitusprosessi voidaan linearisoida magneettinauhan biasoinnin avulla, magneettinen nauhoitus alkoi yleistyä nopeasti ja toisen maailmansodan jälkeen teknologia oli syrjäyttänyt sitä edeltäneen 16 -tuumaisen asetaattilevyn päätoimisena äänen nauhoitustapana [9]. Digitaaliset nauhurit eivät ole vielä täysin syrjäyttäneet kelanauhureita, magneettista nauhoitusta kehitetään edelleen ja se on vielä monien äänitysstudioiden suosiossa. Seuraavaksi tarkastellaan magneettisen nauhoituksen toimintaperiaatetta sekä nauhurin keskeisimpien komponenttien vaikutusta nauhoituksen ominaisuuksiin.

3.1 Kelanauhuri

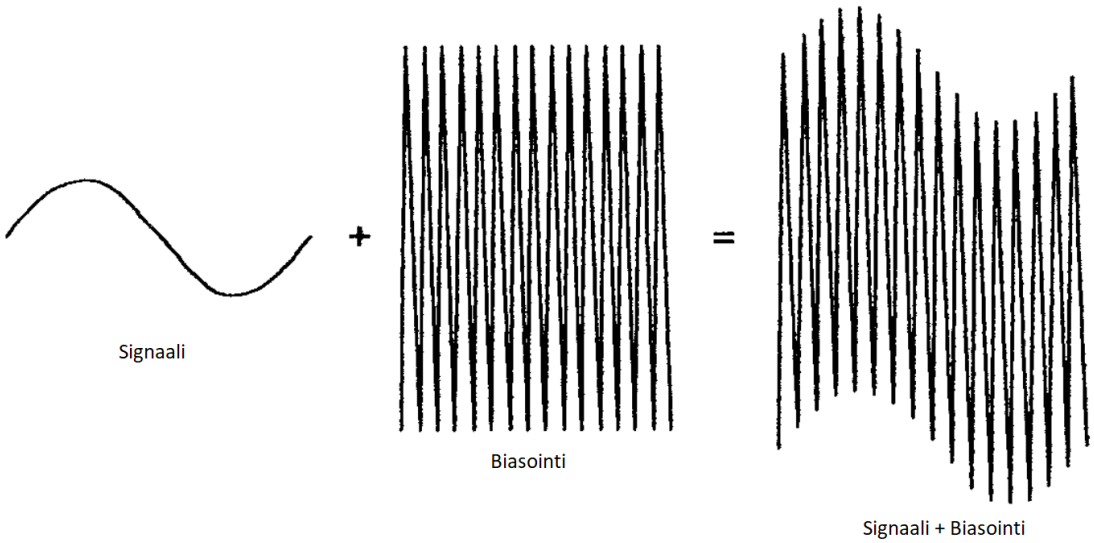
Kelanauhuri on laite, jolla äänisignaali on mahdollista tallentaa analogisesti magneettiseen muotoon nauhalle. Kelanauhuri magnetoi nauhan muuttuvan magneettikentän avulla äänittettävän signaalin mukaisesti, nauhalle tallennettu äänite on tämän jälkeen luettavissa päinvastaisella prosessilla. Magneettinauhan ominaisuuksia käsitelty tarkemmin kohdassa 3.2, tyypillisen kelanauhurin rakenne on esitetty kuvassa 3.1. Kun ääntä halutaan tallentaa magneettinauhalle, nauha pyyhitään ensin puhtaaksi, poistopää syöttää nauhalle korkeataajuisen biasointisignaalin joka pyyhkii nauhalla jo olevan datan pois ja demagnetoi nauhan. Pyyhinnän jälkeen nauhoituspää magnetoi nauhan tallennettavan signaalin mukaisesti. Toistopäällä on mahdollista kuunnella tallennettavaa signaalia tai nauhalle valmiiksi tallennettua signaalia riippuen nauhoituskytkimen asennosta. Nauhan liikkuessa toistopään ohi sen magneettikenttä aiheuttaa toistopäähän nauhalle tallennetun signaalin mukaisen sähkövirran, joka voidaan syöttää esimerkiksi kaiuttimille.



Kuva 3.1 Tyypillisen kelanauhurin rakenne. Nauhoitustilanteessa poistopäälle syötetään korkeataajuinen biasointisignaali, joka demagnetoi nauhan. Nauhoituspäälle syötetään itse nauhoitettava signaali ja osa biasointisignaalista matalalla virralla. Nauhoituspää magnetoi nauhan äänisignaalin mukaisesti, biasoinnilla saavutetaan mahdollisimman lineaarinen hyödyllinen taajuuskaista. [9]

3.1.1 Biasointi

Magneettinauhan magnetoituminen on sellaisenaan hyvin epälineaarinen prosessi, 1920 - luvun loppupuolella havaittiin, että korkeataajuisen biasointisignaalin syöttäminen magneettinauhalle linearisoi nauhoitusprosessin mahdollistaen näin äänen tallentamisen magneettinauhalle [9]. Kuten edellä mainittiin, nauha demagnetoidaan syöttämällä biasointisignaali nauhalle poistopään kautta. Lineaarinen nauhoitusprosessi saadaan aikaiseksi syöttämällä biasointisignaalia matalalla virralla myös nauhoituspäälle, tällöin korkeataajuinen, tyypillisesti 70 - 100 kHz, biasointisignaali toimii ikäänkuin varsinaisen hyötysignaalin kantoaaltona [9].

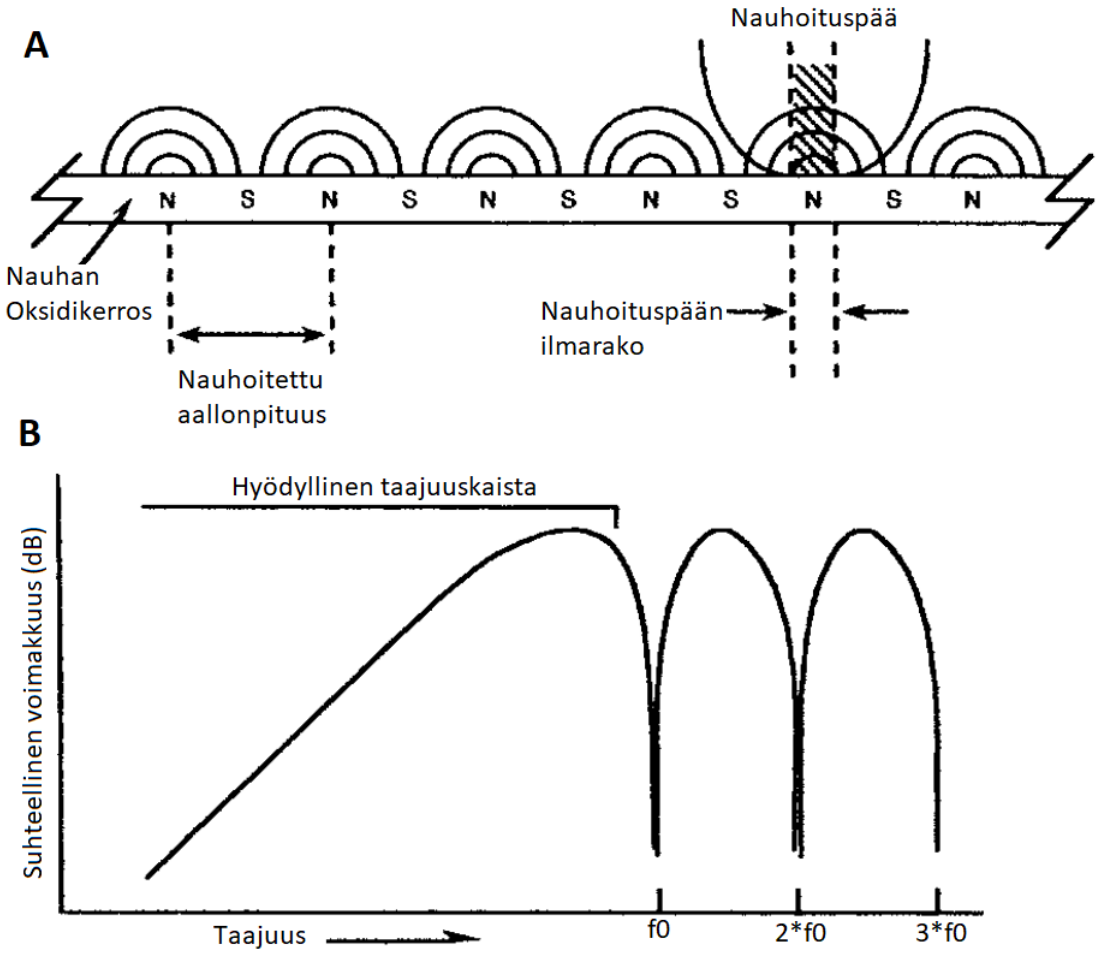


Kuva 3.2 Havainnollistava kuva hyötysignaalin ja biasoinnin yhteisvaikutuksesta, biasointitaajuus jää reilusti kuuloalueen ulkopuolelle. [9]

Biasointia on usein mahdollista ja tarpeellista säätää kelanauhurista. Biasointisignaali on säädettävä tilanteen mukaan oikein säröytymisen välttämiseksi: jos biasointisignaalin amplitudi on liian matala, nauhoitus ei ole lineaarinen ja äänite säröytyy, liian korkea amplitudi saattaa sen sijaan pyyhkiä osan kuuloalueen yläpään taajuuksista [9]. Biasointisignaalin on myös oltava mahdollisimman symmetrinen, epäsymmetrinen aaltomuoto lisää nauhoitukseen tasavirtakomponentin, mikä aiheuttaa ylimääräistä kohinaa. [9].

3.1.2 Nauhoituspää

Nauhoituspää muistuttaa sisäiseltä rakenteeltaan muuntajaa: kaksi kelaa rautasydämen molemmin puolin kuten kuvassa 3.1. Nauhoituspään sydämessä on magneettinauhaa koskettavassa reunassa kapea ilmarako, jonka leveys määrittää nauhoituksen hyödyllisen taajuuskaistan leveyden. Hyödyllisellä taajuuskaistalla nauhoitusprosessi on lineaarinen, kun nauhoituspään ilmaraon leveys vastaa nauhoitettavaa aallonpituutta nauhoitettu signaali kumoutuu [9]. Ensimmäinen nauhoituspään ilmaraon johdosta kumoutuva taajuus katkaisee nauhurin hyödyllisen taajuuskaistan, myös tämän taajuuden monikerrat kumoutuvat tuottaen näin kampasuodatinta muistuttavan taajuusvasteen [9]. Tyypillisessä kelanauhurissa nauhoituspään ilmarako on valittu siten että, ensimmäinen kumoutuminen tapahtuu kaukana kuuloalueen ulkopuolella. Kuvan 3.3 kohdassa A on nauhoituspään ilmaraon asema suhteessa nauhoitettuun signaaliin, kohdassa B on esitetty ilmaraon vaikutus taajuusvasteeseen. Nauhoituspään on oltava kohtisuorassa magneettinauhan liikesuuntaan nähden, vinoon asennettu nauhoituspää eli ns. asimuuttivirhe voi kumota kuuloalueen taajuuksia. Kun nauhoituspään poikkeama kohtisuorasta asennosta on puolet nauhoitetusta aallonpituudesta, nauhoitettu signaali kumoutuu [9].

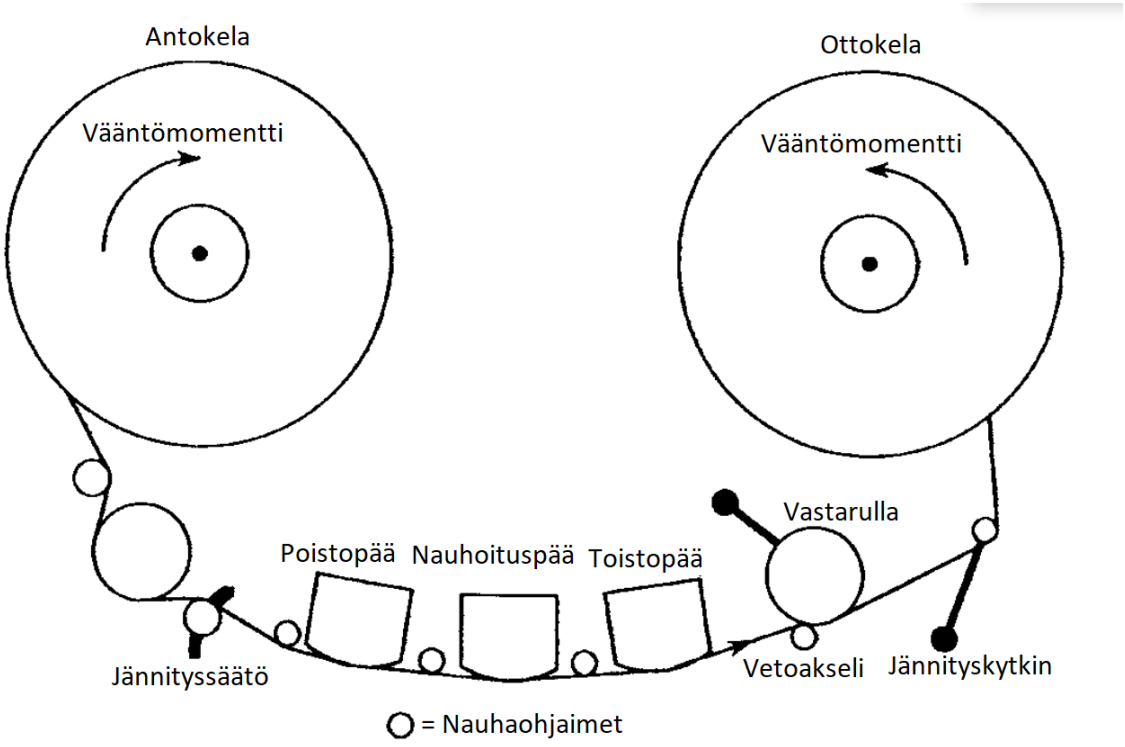


Kuva 3.3 Nauhoituspään ilmaraon vaikutus hyötysignaalin taajuuskaistaan. Hyödyllisen taajuuskaistan leveys riippuu nauhoituspään ilmaraon leveydestä, kun nauhoitettu aallon pituus on yhtä suuri kuin ilmarako nauhoitettu taajuus kumoutuu. [9]

3.1.3 Mekaaniset ongelmat

Äänitystilanteessa magneettinauhan tasainen liikenopeus ja jännitys ovat erityisen tärkeitä hyvän nauhoitustuloksen saavuttamiseksi sekä nauhan vaurioitumisen estämiseksi. Nauhalle tallennetun signaalin aaltomuoto on suoraan riippuvainen nauhan liikenopeudesta, jonka mahdolliset muutokset venyttävät tai puristavat nauhoitettua signaalia kasaan, jolloin nauhalle tallentuva taajuus ei vastaa nauhoituspään sille syöttämää taajuutta. Kuvassa 3.4 on esitetty tyypillisen kelanauhurin mekaaninen osuus, modernien kelanauhureiden nauhaohjaimet ja jännityssäädöt ovat tarpeeksi hienostuneita, jotta epävakaudet nauhan liikkeessä jäävät hyvin pieniksi [9].

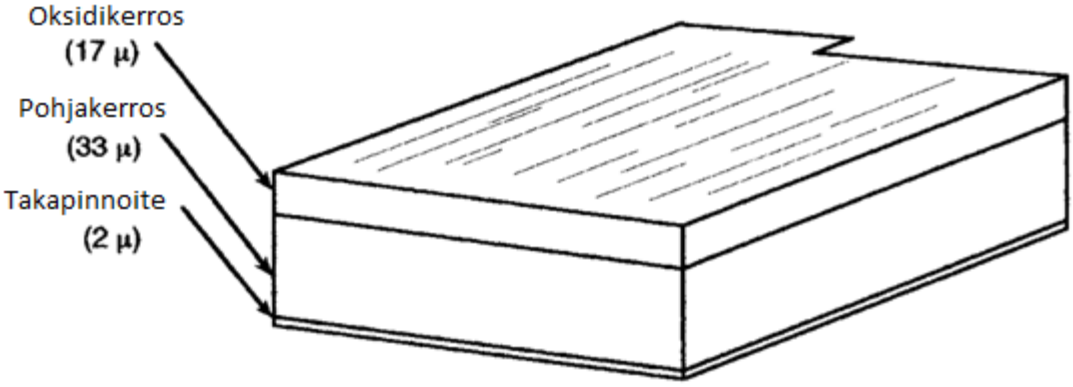
Joskus nauhuri ei kuitenkaan pysty kompensoimaan kaikkia häiriöitä. Nauha voi muun muassa huojua (*eng. flutter*), tällä tarkoitetaan nopeita muutoksia nauhan liikenopeudessa, huojuntaa voi aiheuttaa esimerkiksi jonkin nauhaohjaimen huonokuntoisen laakerin tuottama vastus [9]. Hitaita liikenopeuden muutoksia voi tapahtua jos nauha tarttuu antokelaan, jolloin äänitteen korkeus muuttuu hitaasti edes takaisin, tästä tulee ilmiöstä yleisesti käytetty nimitys: *wow* [9]. Nauha voi myös soida kun se hankaa päiden kiillotettua pintaa vasten, tämän äänitteeseen aiheuttama särön taajuus on kuuloalueen ulkopuolella. Nauhan soimiselta (*eng. scrape flutter*) on vaikeaa välttyä kokonaan mutta sen vaikutus saadaan minimoitua päiden väleihin asetetuilla nauhaohjaimilla [9].



Kuva 3.4 Tyypillisen kelanauhurin mekaaninen osuus. Nauhoitettaessa magneettinauha kulkee antokelalta ottokelalle poisto-, nauhoitus- ja toistopään ohi. Vetoakselin ja ottokelan sähkömoottori kuljettavat nauhaa eteenpäin, antokelan moottorin päinvastainen vääntömomentti takaa nauhalle tasaisen jännityksen ja liikenopeuden yhdessä erilaisten nauhaohjaimien ja jännityssäätimen kanssa. Vetoakseli tarttuu nauhaan vastarullan avulla, joka puristaa nauhan itsensä ja vetoakselin väliin. [9]

3.2 Magneettinauha

Kelanauhurilla nauhoitettu signaali tallennetaan magneettinauhalle. Useimmiten magneettinauha on valmistettu pinnoittamalla ohut muovifilmi hyvin pieniä ferromagneettisia partikkeleita sisältävällä pinnoitteella, yleensä rautaoksidilla Fe_3O_4 [7]. Muovifilmi ei itsessään sisällä dataa vaan se toimii runkona, joka pitää herkän magneettisen pinnoitteen kasassa ja antaa nauhalle sen mekaaniset ominaisuudet. Itse äänite tallennetaan nauhalle magnetoimalla sen pinnoite kelanauhurin nauhoituspäällä. Studioissa käytettyjen nauhojen kääntöpuoli on usein käsitelty ohuella mattapinnoitteella, mikä parantaa nauhan mekaanista käyttäytymistä [9]. Kuvassa 3.5 on esitetty tyypillisen studiokäyttöön tarkoitetun magneettinauhan rakenne, nauhan eri kerroksien paksuus vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan.



Kuva 3.5 Tyypillinen magneettinauhan rakenne. Äänisignaali tallennetaan oksidikerrokseen, pohjakerros on nauhan runkona toimiva muovifilmi, takapinnoite on nauhan kääntöpuolen mattapinnoite. [9]

Nauhoitukseen käytetty magneettinauha määrittää äänitteen dynaamisen alueen leveyden. Ensimmäisten magneettinauhojen dynaaminen alue oli noin 60 - 70 dB, modernit magneettinauhat yltävät hieman alle 80 dB:n dynamiikkaan, lisäksi uudempien magneettinauhojen taajuusvaste on aikaisempaa tasaisempi [8]. Magneettinauhan kapeahko dynamiikka johtaa siihen että taustakohina on usein kuultavissa hiljaisissa äänitteissä, vastaavasti digitaalisesta äänitysprosessista aiheutuva kohina jää lähes aina kuulemattomiin sen laajemman dynamiikan ansiosta.

Magneettinauhan dynaamisen alueen laajentuminen on kasvattanut ns. kiepiltä toiselle vuodon (*eng. print-through*) aiheuttamia ongelmia, moderneissa magneettinauhoissa vuoto on tosin vähentymään päin. Kelalla nauhan oksidikerrokset ovat tiiviisti päällekkäin, tämä johtaa siihen että voimakkaat signaalit voivat vuotaa läheisiin oksidikerroksiin ja aiheuttaa vääristymiä niille tallennettuun signaaliin [9]. Ensimmäisillä magneettinauhoilla oli lisäksi ongelmia epäsäännöllisen oksidikerroksen ja nauhan paksuuden kanssa, ongelmat johtuivat pääasiassa nauhojen pohjana käytetystä epävakaasta asetaattimateriaalista, nykyisissä nauhoissa käytetty muovifilmi on pitkälti korjannut nämä epäsäännöllisyydet [9].

Magneettinauha ja muutkin fyysiseen muotoon tallennetut äänitteet ovat alttiita fyysiselle kulumiselle. Vinyylilevyt kuluvat vähitellen kun levysoittimen neula hankaa levyä vasten tai levy voi vaurioitua huonon käsittelyn seurauksena, tosin näin voi käydä myös digitaaliselle CD -levylle mutta itse levyn digitaalinen data ei kulu käytössä. Etenkin magneettinauhan oikeaoppiseen säilytykseen on kiinnitettävä huomiota äänitteen pitkäikäisyyden takaamiseksi, vaikkakin parhaissakaan olosuhteissa ei voida välttyä magneettinauhan ja sille tallennetun äänitteen kulumiselta. Keloja ei muun muassa tule säilyttää liian kosteassa tai pölyisessä ympäristössä, lisäksi pitkäaikaissäilytyksessä äänite kannattaa siirtää muutaman vuoden välein uudelle kelalle, sillä magneettinauhat rappeutuvat ajan myötä [8]. Oikeaoppisesta säilytyksestä huolimatta jokainen kopiointikerta vaurioittaa alkuperäistä äänitettä jossain määrin [8].

4. MITTAUKSET

Työssä tutkittiin analogisen ja digitaalisen äänityksen epäideaalisuuksia kokeellisesti mittaamalla. Mittausten tavoitteena oli saada konkreettista dataa eri äänitysmenetelmille ominaisista säröistä kuten magneettinauhan huojunta tai ADC:n jitter. Lisäksi mittausten perusteella voidaan arvioida suoriutuvatko laitteet äänityksestä niille tyypillisellä tavalla. Mittaustulosten tulkinnassa hyödynnetään audioanalysaattorin FFT -algoritmin tuottamaa dataa, kuvaajat on luotu tämän datan pohjalta MATLAB -ohjelmistolla.

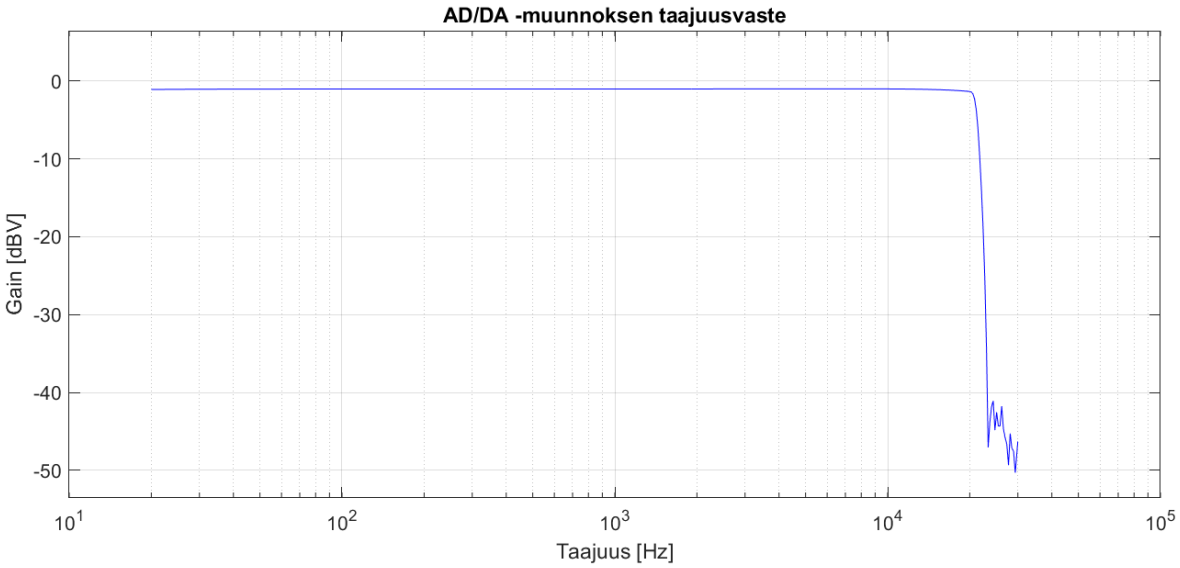
4.1 Mittausjärjestelyt

Työssä mitattaviksi laitteiksi valikoituivat analogisen nauhoituksen osalta Astia-studion Studer A812 ¼” -stereonauhuri sekä digitaaliselta puolelta Motu 1296 -tallennin, mittalaitteena käytettiin Keysight U8903B -audioanalysaattoria. Kaikki kytkennät tehtiin käyttäen samoja Vovox Sonorus 2m balansoituja XLR-kaapeleita. Studer A812 käyttää mittauksissa 15 ips nauhanopeutta ja CCIR -taajuuskorjausta. Kelanauhurilla tallennettiin Recording The Masters RTM SM900 1/4" trident -keskiölliselle magneettinauhalle. Motu 1296 äänittää 16 bitillä 44,1 kHz:n näytteistystaajuudella. Tarkempi mittaussuunnitelma liitteessä 1.

Kelanauhurin osalta mittaukset suoritettiin kaksi kertaa, ensin suoraan nauhurin sähköpuolen läpi sekä magneettinauhalle tallennettuna, tällä tavoin voidaan arvioida erikseen magneettinauhan vaikutusta nauhoitettuun signaaliin. Mittauksia tarkastellessa on syytä muistaa, että kummankin laitteen tapauksessa mittaustuloksiin vaikuttaa omalta osaltaan laitteen monitoripiiri, ADC:n tapauksessa monitoriliitäntää edeltävä D/A -muunnin ja kelanauhurissa monitoripiirin vahvistin. Motu 1296:n D/A -muunnin olisi mahdollista kiertää jos voitaisiin mitata suoraan sen digitaaliselta AES/EBU -lähdöltä, tähän ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta, sillä audioanalysaattorista puuttui digitaalisten signaalien mittaamiseen tarvittava lisävaruste.

4.2 Taajuusvaste

Taajuusvastekoe on yleisesti ottaen tärkein audiolaitteelle suoritettava mittaus. Taajuusvastekokeella saadaan selville miten mitattava järjestelmä toistaa eri taajuuksia, mittaus suoritetaan tavallisesti syöttämällä laitteeseen testisignaali vakioamplitudilla ja askelmaisesti kasvavalla taajuudella. Laitteen lähdöstä mitataan signaalin amplitudi taajuuden funktiona ja tulokset esitetään graafisesti. Audiolaitteiston taajuusvaste pyritään useimmiten pitämään mahdollisimman tasaisena signaaliketjun loppuun asti. Kaiuttimien ja kuulokkeiden suunnittelu helpottuu kun tiedetään, että niitä syöttävä laitteisto yleensä toistaa koko kuuloalueen taajuuskaistan tasaisesti. Laadukkailta kelanauhureilta on odotettavissa enintään ±2 dB:n vaihtelua taajuusvasteessa ja 35 Hz – 20 kHz kaistanleveys, vastaavasti A/D -muuntimilla vaihtelun tulisi olla enintään ±1 dB ja kaistanleveys 20 Hz – 20 kHz [14]. Taajuusvastekokeella saadaan myös selville laitteen toistaman taajuuskaistan leveys.



Kuva 4.1 Motu 1296:n mitattu taajuusvaste. Mittauksessa käytettiin näytteistystaajuutena 44,1 kHz ja bittisyvyytenä 16 bittiä. Taajuusvaste on erittäin tasainen 20 kHz:iin asti, jolloin ADC:n laskostumisenestosuodin alkaa jyrkästi vaimentamaan yläpään taajuuksia.

Kuvassa 4.1 on esitetty Motu 1296 A/D -muuntimen taajuusvastekokeen tulokset. ADC:n toimintaa mitattiin tavanomaista äänitystilannetta vastaavilla asetuksilla, eli äänitettiin 16 -bittistä signaalia 44,1 kHz:n näytteistystaajuudella. Taajuusvastekoe suoritettiin 30 kHz:iin asti, jotta saadaan koko hyötysignaalin taajuuskaista näkyviin, näin mitattuna ei tosin saada paljoakaan tietoa laskostumisenestosuotimen yläpuolelta. Motu 1296:lla voidaan äänittää myös 24 -bitillä, näytteistystaajuus yltää maksimissaan 96 kHz:iin. Tallentimen sisäisen kellon sijasta Astia -studiolla samassa räkissä olevat Motu 1296:et käyttävät samaa Apogee Big Ben -kellogeneraattorin tuottamaa ulkoista kellosignaalia.

Motu 1296:n mitattu taajuusvaste vastaa tyypillisen A/D -muuntimen taajuusvastetta. Taajuusvaste on erittäin tasainen, vaihtelua esiintyy hyödyllisellä taajuuskaistalla vain noin 0,3 dBV. Laskostumisenestosuotimen rajataajuus on n. 21 kHz:n kohdalla eli tallentimen mitattu taajuusvaste on 20 – 21 kHz. Vaimennus on kuitenkin Nyquist -taajuuden 22,05 kHz kohdalla vain hieman alle -14 dBV. Vaimennus näyttää asettuvan -40 ja -50 dBV:n välille, esimerkiksi Motu 1296:n THD+N -mittauksesta voidaan havaita sen sähköisen taustakohinan olevan noin -130 dBV:n tasolla. Laitteessa on todennäköisesti käytetyn näytteistystaajuuden mukaan vaihtuva alipäästösuodin, joka vaimentaa signaalia noin -45 dBV Nyquist -taajuudesta ylöspäin. Muuttuvan alipäästösuotimen jälkeen Motu 1296:sa on luultavasti vielä ns. lopullinen alipäästösuodin sen suurimman näytteistystaajuuden Nyquist -taajuuden kohdalla, mikä vaimentaa signaalin lähemmäksi sähköisen taustakohinan tasoa. Edellä mainitun varmistamiseksi pitäisi suorittaa lisää taajuusvastekokeita ADC:n kaikilla näytteistystaajuuksilla pitkälle kuuloalueen ulkopuolelle asti.

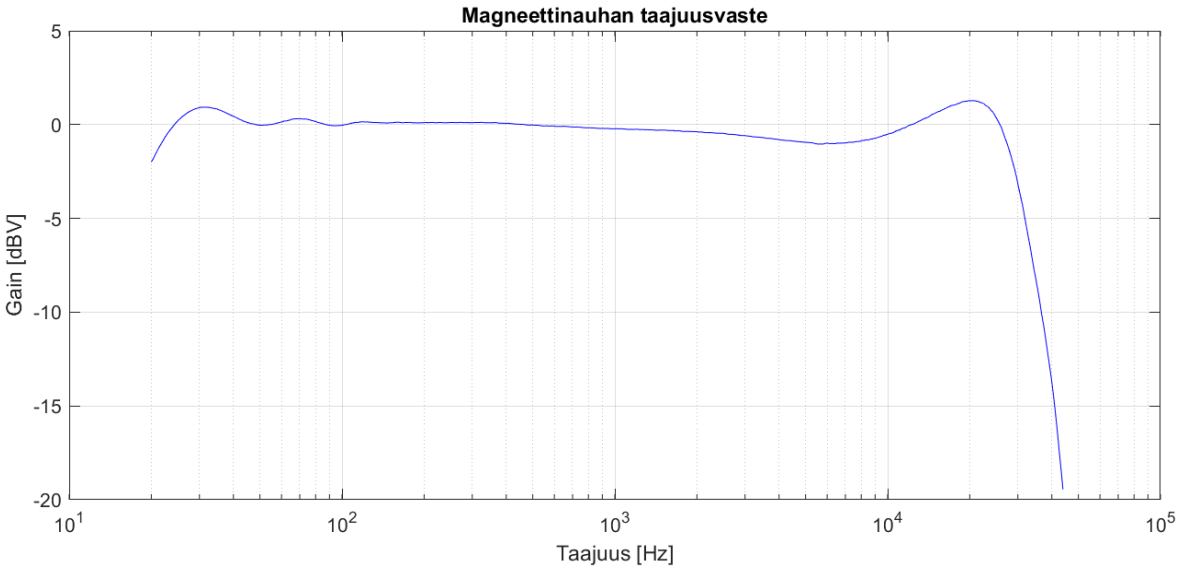
Laskostumisenestosuotimen estokaistan pienehkö vaimennus saattaa aiheuttaa ongelmia kuuntelukokemuksessa. Mikäli äänitettävä signaali sisältää sellaisia taajuuksia, jotka 44,1 kHz:llä näytteistettäessä laskostuvat kuuloalueelle saattavat niiden aiheuttamat säröt olla kuultavissa hiljaisessa äänitteessä, jos laskostuvat taajuudet ovat tarpeeksi voimakkaita. A/D -muunnoksen rajat ylittävät taajuudet laskostuvat muunnoksen Nyquist -taajuuden alapuolelle seuraavan kaavan mukaan [8]:

$$F_{alias} = F_s - F_1 \tag{4.1}$$

missä F_{alias} on laskostunut taajuus, F_s on näytteistystaajuus ja F_1 on jokin Nyqist -taajuutta suurempi taajuus. Esimerkiksi kaavalla 4.1 laskettuna 44,1 kHz:n näytteistyksellä 30 kHz aalto laskostuisi seuraavasti:

$$F_{alias} = 44{,}1\ kHz - 30\ kHz = 14{,}1\ kHz$$

Laskostuneet taajuudet vaimentuvat mittausten perusteella noin 45 dBV. Ihmiskorva voi havaita keskitaajuisia 500-2000 Hz:n ääniä jopa -12 dB laajakaistaisen signaalin alapuolella, ADC:n normaalissa käyttötilanteessa laskostuneet taajuudet ovat tuskin kuultavissa niiden jäädessä 45 dBV hyötysignaalin alapuolelle mutta ne voivat vääristää kuultavissa olevaa hyötysignaalia [8].



Kuva 4.2 Studer A812:lla magneettinauhalle tallennetun signaalin mitattu taajuusvaste. Magneettinauha korostaa hieman korkeita ja matalia taajuuksia. Korkeiden taajuuksien huippu on noin 20 kHz:n kohdalla vahvistuksen ollessa +1,27 dBV, matalien taajuuksien huippu on +0,92 dBV 30 Hz:n kohdalla, matalimmillaan vahvistus on -1,02 dBV 6 kHz:n kohdalla.

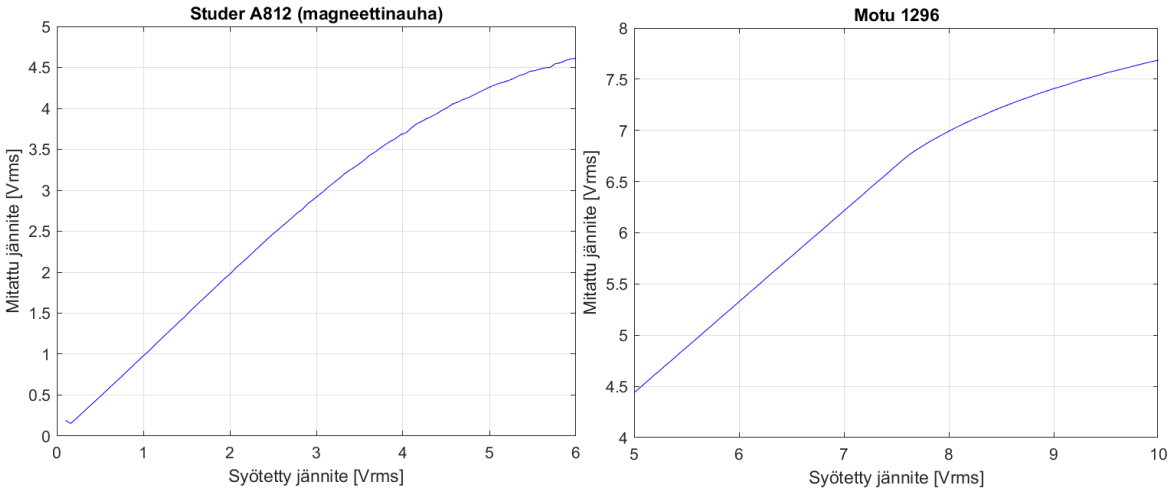
Kuvassa 4.2 on esitetty magneettinauhan taajuusvastekokeen tulos, vaihtelua taajuusvasteessa on noin 2,3 dBV, mikä on lähes 8 -kertainen Motu 1296:n taajuusvasteeseen verrattuna. Taajuusvaste riippuu siitä, miten kuvaajaa tulkitsee, -3 dBV:n kohdalta katsottuna taajuuskaistan leveydeksi saadaan 20 – 30000 Hz. Nauhurin nimellinen taajuusvaste on 30 – 20000 Hz, mikä jää tarkalleen kuvaajassa näkyvän kahden huipun väliin [21]. Mittaus suoritettiin nauhoittamalla testisignaali magneettinauhalle Studer A812 -stereonauhurilla ja mittaamalla tulos nauhurin toistopään audiolähdöstä, kelanauhurin sähköinen rakenne on esitetty kuvassa 3.1. Taajuusvastekokeen kuvaajasta voidaan havaita, että magneettinauha hieman korostaa matalia ja korkeita taajuuksia. Kelanauhurin sähköpuolen taajuusvastekokeen tulokset liitteessä 2.

Magneettinauhalle tallennetut signaalit alkavat vaimentua voimakkaasti noin 20 kHz:n jälkeen, minimiarvonsa kuvaaja saavuttaa noin 44 kHz:n kohdalla jolloin vaimennukseksi mitattiin -19,3 dBV. Hieman tästä eteenpäin on joko ensimmäinen nauhoituspään ilmaraon aiheuttama nolla kuten kuvassa 3.3 tai tässä kohtaa on alipäästösuodin, joka leikkaa kuuloalueen ylittävät taajuudet pois ja nollat alkavat korkeammalla. Mittauksessa ilmeni kuitenkin teknisiä ongelmia joiden takia mittausta ei voitu jatkaa 44 kHz:stä ylöspäin. Audioanalysaattorin taajuusvastekoe jäi pitkäksi aikaa jumiin, vasta nauhan loppuessa 34 minuutin kohdalla analysaattori suoritti mittauksen loppuun asti kun signaalitie vaihdettiin kulkemaan nauhurin sähköpuolen läpi. Sama ongelma toistui kun mittaus suoritettiin uudestaan.

4.3 Vahvistuksen lineaarisuus

Testattavan laitteen vahvistuksen lineaarisuus on mahdollista selvittää mittaamalla laitteelle tulevan ja siitä lähtevän signaalin amplitudin suhdetta. Tyypillisesti mittaus suoritetaan kasvattamalla testisignaalin amplitudia askelmaisesti ja esittämällä tulos graafisesti, tällöin voidaan kuvaajasta katsomalla nähdä millä amplitudilla laitteen rajat tulevat vastaan ja signaali alkaa säröytyä [14]. Vahvistuksen lineaarisuuden mittaamisesta on hyötyä etenkin jos halutaan mitata laitteen signaali-kohinasuhdetta ja tieto laitteen nimellisestä referenssiamplitudista puuttuu.

Vahvistuksen lineaarisuusmittauksen perusteella kummallakin laitteella vaikuttaisi olevan riittävä yliohjausvara (*eng. headroom*) tyypillisiin äänitystilanteisiin. Mittauksissa käytettiin sinimuotoista testisignaalia eivätkä ne ota kantaa musiikissa esintyviin transientteihin, jotka voivat olla hetkelliseltä jännitteeltään hyvinkin suuria ja leikkautua, esim. lyömäsoittimet aiheuttavat voimakkaita transientteja. Motu 1296 alkoi säröytymään testisignaalin jännitteen tehollisarvon ylittäessä 6,75 volttia ja Studer A812 alkoi magneettinauhalle nauhoitettaessa säröytymään 3,5 voltin kohdalla. Kummankin nauhurin VU -mittarit olivat maksimissaan jo ennen kuin niille syötettiin tämän tasoisia jännitteitä. Mittausten perusteella voidaan todeta, että ainakin Studer A812:n ja Motu 1296:n tapauksessa liian voimakkaiden signaalien aiheuttamaa säröytymistä tuskin esiintyy suurissa määrin nauhoitustilanteessa. Vahvistuksen lineaarisuuden mittaustulokset esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Motu 1296 ja Studer A812 (magneettinauha) mitattu vahvistuksen lineaarisuus. Vaaka-akselilla laitteelle syötetyn signaalin tehollisarvo ja pystyakselilla mitatun signaalin tehollisarvo. Motu 1296 säröytyy noin 6,75 V_{rms} kohdalla ja Studer A812 3,5 V_{rms} kohdalla. Huomioi, että kuvilla on eri asteikot.

4.4 Signaali-kohinasuhde

Laitteen signaali-kohinasuhteella (*eng. Signal-to-Noise Ratio, SNR*) tarkoitetaan laitteen suurimman säröytymättömän signaalin ja sen sähköisen taustakohinan suhdetta [2]. Useimmiten SNR ja dynaaminen alue ovat hyvin lähellä toisiaan tai samat, dynaamista kompressiota tai kohinanvähennystä käyttävät järjestelmät sekä kohdassa 2.1.2 kuvailtua satunnaiskohinaa hyödyntävät ADC:t voivat äänittää signaali-kohinasuhdetta laajemmalla dynamiikalla [2]. Testisignaalina SNR -mittauksissa käytetään yleensä 1 kHz:n siniaaltoa. Tyypillisen kelanahurin SNR on 60-70 dB, tyypillisen 16-bittisen A/D -muuntimen SNR on 90-95 dB [14].

Studer A812:n ja Motu 1296:n referenssijännitteet olivat ennalta tiedossa, kummankin laitteen tapauksessa käytettiin ammattilaistason äänitykselle yleistä +4 dB:n signaalia, mikä vastaa 1,228 voltin tehollisarvoa. Magneettinauhan signaali-kohinasuhteeksi mitattiin noin 54 dB, itse kelanauhurin sähköpuolelta taas mitattiin 84 dB. Studer A812:n alhaisemman signaalikohina-suhteen vuoksi nauhurin sähköinen taustakohina on luultavasti kuultavissa hiljaisissa äänitteissä. Motu 1296:n signaali-kohinasuhteeksi mitattiin 87 dB. Kaikki tulokset ovat hieman odotettua alhaisempia, mutta kuitenkin hyvin lähellä vastaaville laitteille tyypillisiä tuloksia.

4.5 Harmoninen kokonaissärö + kohina

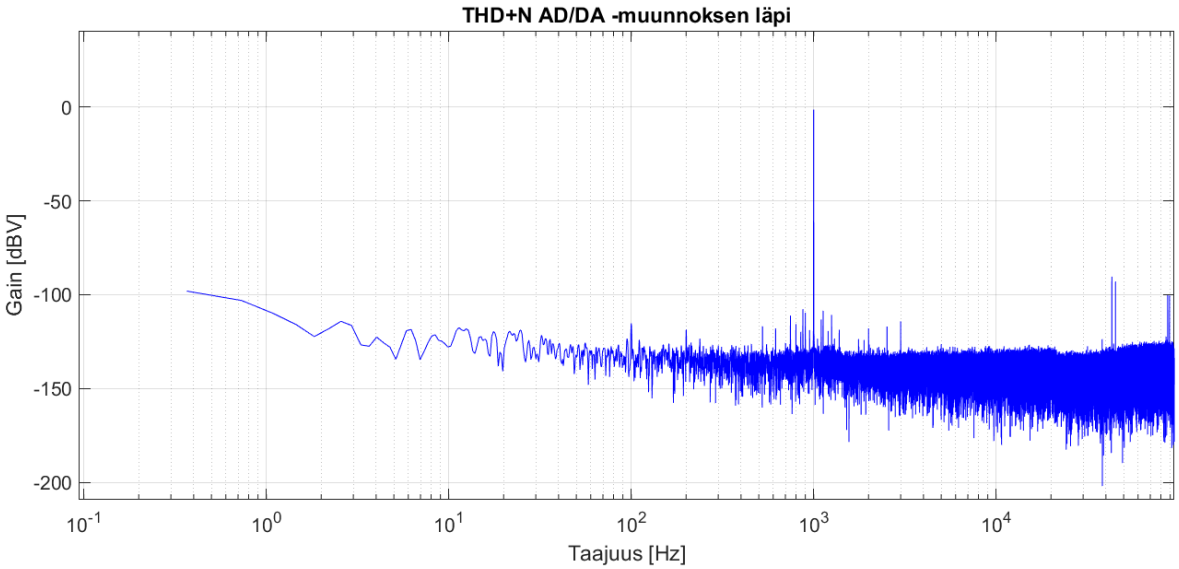
Harmonisella kokonaissäröllä tarkoitetaan testattavaan laitteeseen syötetyn hyötysignaalin ja sen harmonisten särökomponenttien suhdetta [14]. Useimmiten mittaukseen otetaan mukaan myös laitteen taustakohina (*eng. Total Harmonic Distortion + Noise, THD+N*) jolloin mittausprosessi yksinkertaistuu ja mittauksesta saadaan harmonisen särön lisäksi tietoa laitteen taustakohinan voimakkuudesta. Matala mitattu THD+N -arvo tarkoittaa siis matalaa harmonista kokonaissäröä sekä taustakohinaa, tästä syystä THD+N on yleisin laitteen särön mittaamiseen käytetty työkalu. Tavallisesti THD+N -mittauksessa

testisignaalina käytetään 1 kHz:n siniaaltoa, jonka amplitudi on 1 V_{rms} [8]. Tyypilliseltä ¼” stereonauhurilta on odotettavissa 1 – 3 % THD+N ja A/D -muuntimelta 0,003 – 0,01 % THD+N [14].

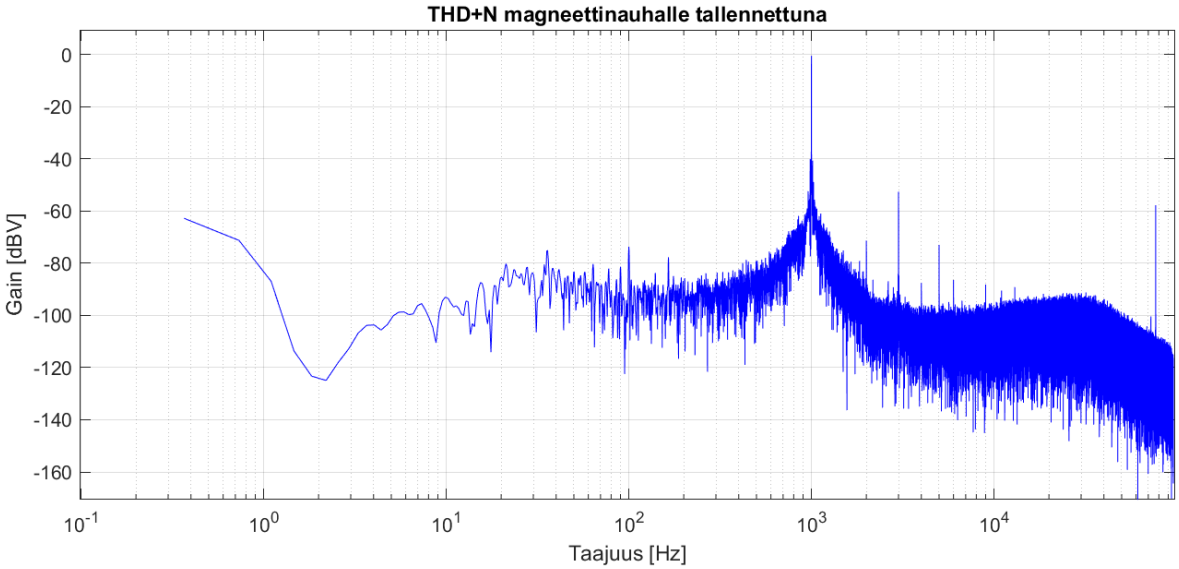
Studer A812:lle mitattiin -43 dBV:n tai noin 0,89 % THD+N magneettinauhalle tallennettaessa, nauhurin sähköpuolen THD+N oli -82 dBV tai 0.01 %. Kelanauhurin sähköinen taustakohina oli noin -90 dBV:n tasolla. Motu 1296:n mitattu THD+N oli -83,3 dBV tai 0.0883 %, sähköinen taustakohina oli n. -130 dBV:n tasolla. Studer A812 tuottaa siis noin satakertaisen määrän harmonista kokonaissäröä ja kohinaa Motu 1296:een verrattuna. Lisäksi Studer A812:n THD+N -mittauksen graafinen esitys on eri muotoinen: pistemäinen testisignaali on levinnyt ympäröiviin taajuuksiin muodostaen testisignaalille kartiomaisen kannan. Motu 1269:n mittauksessa testisignaali levisi myös hieman ympäristöön, mutta ilmiö on erittäin vaimea ja leviäminen ilmenee satunnaisina piikkeinä yhtenäisen kannan sijaan. Motu 1296:n THD+N -mittauksen kuvaaja on esitetty kuvassa 4.4 ja Studer A812:n mittaus kuvassa 4.5, nauhurin sähköpuolen mittaus liitteessä 3.

Motu 1296:n THD+N -mittauksen graafista esitystä tarkastelemalla voidaan nähdä perustaajuuden kahden ensimmäisen harmonisen lisäksi useita satunnaisia huippuja perustaajuuden molemmin puolin. Perustaajuuden leviäminen viereisiin taajuuksiin viittaa matalatasoiseen vaihekohinaan/jitteriin, [15][4]. Jitterillä tarkoitetaan virheitä signaalin aaltomuodossa aikatasossa ja vaihekohina on jonkin tietyn taajuuden, tässä tapauksessa 1 kHz:n testisignaalin, epävakautta taajuustasossa [18]. Motu 1296:n mittauksissa on tosin vaikea arvioida johtuvatko mitatut ilmiöt A/D- vai D/A -muunnoksesta. Varsinainen A/D-muuntimen jitter -mittaus olisi mahdollista suorittaa Keysight U8903B:n digitaalisen lisäosan avulla.

Magneettinauhalle tallentaminen aiheuttaa äänitteeseen useita harmonisia särökomponentteja. Kelanauhurin sähköpuolen THD+N mittaukseen verrattaessa näyttää siltä, että magneettinauhalle tallentaminen lisää äänitteeseen uusia harmonisia, harmoniset ovat myös huomattavasti voimakkaampia magneettinauhalle äänitettäessä. Perustaajuuden harmonisia on mittauksesta havaittavissa yhteensä kuusi kappaletta, joista 2. ja 5. harmoninen ovat selvästi dominoivia. Toinen harmoninen on 45 dBV ja viides 23 dBV sähköisen taustakohinan yläpuolella, kelanauhurin sähköpuolen vastaavassa mittauksessa voimakkain harmoninen oli 21 dBV kohinan yläpuolella. Magneettinauhalle tallentaminen levittää testisignaalina käytetyn pistetaajuuden voimakkaasti ympäröiviin taajuuksiin. Perustaajuuden leviäminen muistuttaa digitaalisella puolella jitterin aiheuttamaa pistetaajuuden epävakautta, mutta ilmiö on paljon voimakkaampi. Ilmiö johtuu todennäköisesti magneettinauhan huojunnasta. Kohdassa 3.1.3 todettiin magneettinauhan liikenopeudella olevan suora vaikutus sille tallennetun signaalin aaltomuotoon. Huojunnassa tapahtuvat muutokset nauhan liikenopeudessa puristavat ja venyttävät tallennettua signaalia, jolloin testisignaalina käytetty 1 kHz:n pistetaajuus leviää ympäröiviin taajuuksiin. Ilmiön syyn varmistaminen vaatisi lisää mittauksia, esimerkiksi kelan liikenopeutta voisi häiritä keinotekoisesti ja verrata testisignaalin leviämisen määrää alkuperäiseen mittaukseen. Huojunta todennäköisesti vaikuttaa kuuntelukokemukseen, sillä se on yksi kelanauhureille ominaisista säröistä, joita mallinnetaan usein myös digitaalisissa äänitteissä [22].



Kuva 4.4 Motu 1296:n analogiselta audiolähdöltä mitattu harmoninen kokonaissärö + kohina. 1 kHz:n perustaajuus leviää ympäröiviin taajuuksiin satunnaisten pistetaajuuksien muodossa. Havaittavissa ovat myös perustaajuuden 2. ja 3. harmoninen (2 kHz & 3 kHz), verkkovirran 2. ja 3. harmoninen (100 Hz & 200 Hz) sekä voimakkaampia satunnaisia piikkejä (43 kHz, 45 kHz & 89 kHz).



Kuva 4.5 Studer A812:n mitattu harmoninen kokonaissärö + kohina magneettinauhalle tallennettuna. 1 kHz:n perustaajuuden harmonisia on havaittavissa 6 kpl, joista 2. ja 5. (2 kHz & 5 kHz) ovat selvästi muita voimakkaampia. Verkkovirran 2. harmoninen sekä nauhurin biasointisignaali (77 kHz) ovat myös nähtävissä. Perustaajuus leviää voimakkaasti ympäröiviin taajuuksiin muodostaen perustaajuudelle kartiomaisen kannan. Sähköinen taustakohina on noin -90 dBV:n tasolla.

4.6 Intermodulaatiosärö

Intermodulaatiosäröä (*eng. Intermodulation Distortion, IMD*) mitataan syöttämällä laitteeseen jokin yksittäistä siniaaltoa monimutkaisempi testiaalto ja mittaamalla näiden aiheuttama harmoninen särö. Tyypillisesti intermodulaatiosärön mittaamiseen käytetään testisignaalina SMPTE:n standardin RP120-1983 mukaan kahden siniaallon lineaarikombinaatiota taajuuksilla F_1 = 60 Hz ja F_2 = 7 kHz, joista F_2:n amplitudi on ¼ F_1:n amplitudista [14]. Intermodulaatiosärömittauksella saadaan tietoa laitteen toiminnasta sen normaalissa käyttötarkoituksessa, sillä mittauksessa käytetty monimutkainen signaali simuloi musiikissa esiintyviä monimutkaisempia signaaleja.

Intermodulaatiosärön aiheuttamat särökomponentit ovat kahden laitteelle syötetyn taajuuden yhdistelmiä, tämä sisältää kaikki mahdolliset perustaajuuksien ja niiden monikertojen summat ja erotukset. Intermodulaatiosärökomponenttien erottamiseen harmonisista ja satunnaisista säröistä voi hyödyntää seuraavaa laskukaavaa [14]:

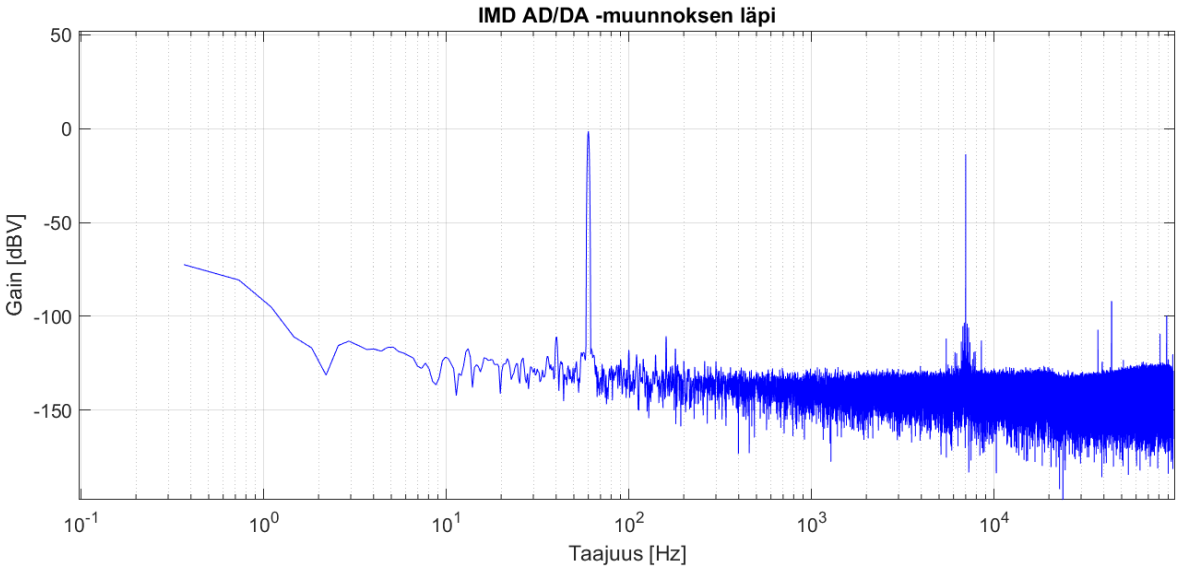
$$m * F_1 \mp n * F_2 \tag{4.2}$$

missä *m* ja *n* ovat kokonaislukuja, F_1 ja F_2 ovat testisignaalin taajuudet ja särökomponentin kertaluku on *m*:n ja *n*:n summa [14]. Esimerkiksi magneettinauhan intermodulaatiosärökokeesta (kuva 4.7) voidaan laskea:

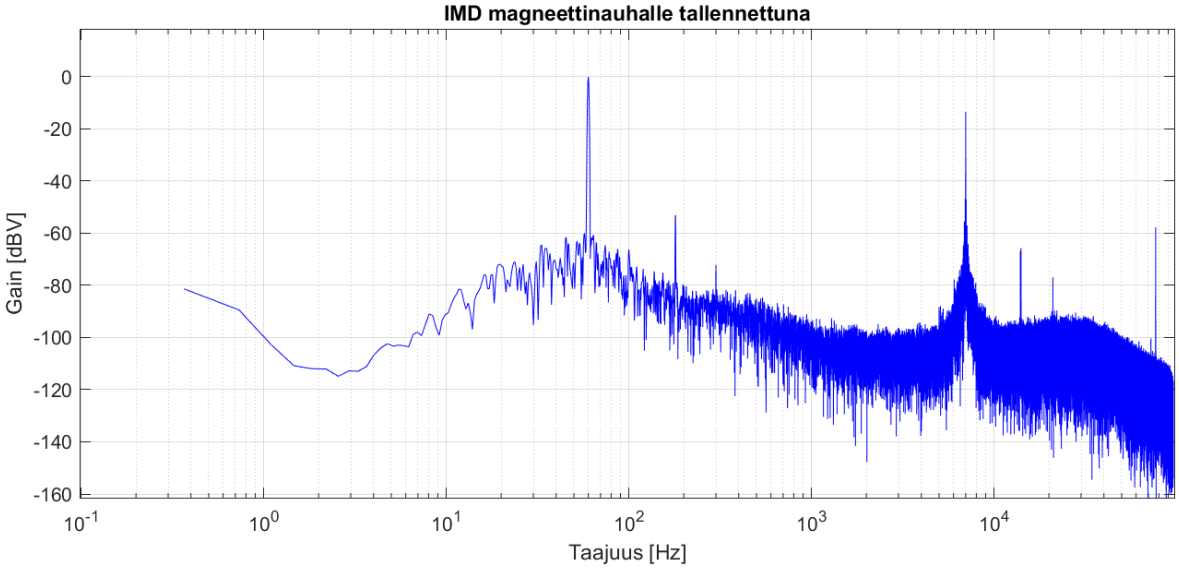
$$m * F_1 + n * F_2$$
$$= 1 * 60\ Hz + 2 * 7\ kHz = 14060\ Hz$$

Tämä on mittauksen kuvaajan ensimmäinen huippu 7 kHz:n testisignaalista ylöspäin, särökomponentin kertaluku on 3.

Kummankin laitteen IMD -mittauksissa on havaittavissa samat ilmiöt kuin THD+N -mittauksissa, poikkeuksena yksi havaittu intermodulaatiosärökomponentti Studer A812:n IMD -mittauksessa. Motu 1296:n IMD -mittaus on esitetty kuvassa 4.6 ja Studer A812:n magneettinauhan mittaus kuvassa 4.7, nauhurin sähköpuolen mittaus liitteessä 4. Magneettinauhan intermodulaatiosäröksi mitattiin -35 dBV ja Motu 1296:n intermodulaatiosäröksi mitattiin -98 dB. Intermodulaation suhteen Motu 1296 on hyvin puhdas laite, suurimmat näkyvät säröt ovat THD+N -mittauksen tapaan jitterin aiheuttama testisignaalien leviäminen sekä yläpään taajuuksien satunnaiset piikit, joista kaikki ovat kuuloalueen ulkopuolella. Suoraan testisignaaleista johtuvan särön osalta ainut suoraan tunnistettava särökomponentti on 60 Hz:n testisignaalin 3. harmoninen 13 dBV taustakohinan yläpuolella. Magneettinauhan IMD -kokeessa toistuu myös nauhan THD+N -mittauksessa havaittu testisignaalien leviäminen ympäristöön. Intermodulaatiosäröä on ainakin 14060 Hz:n kohdalla oleva huippu, joka on 27 dBV taustakohinan yläpuolella.



Kuva 4.6 Motu 1296:n mitattu IMD. Testisignaalit leviävät hieman ympäröiviin taajuuksiin kuten THD+N -kokeessa. Mittauksessa ei juurikaan näy selkeitä harmonisia tai intermodulaatiosäröä. Mittauksessa on edelleen muutama satunnainen piikki yläpään taajuuksissa kuten THD+N -mittauksessa.

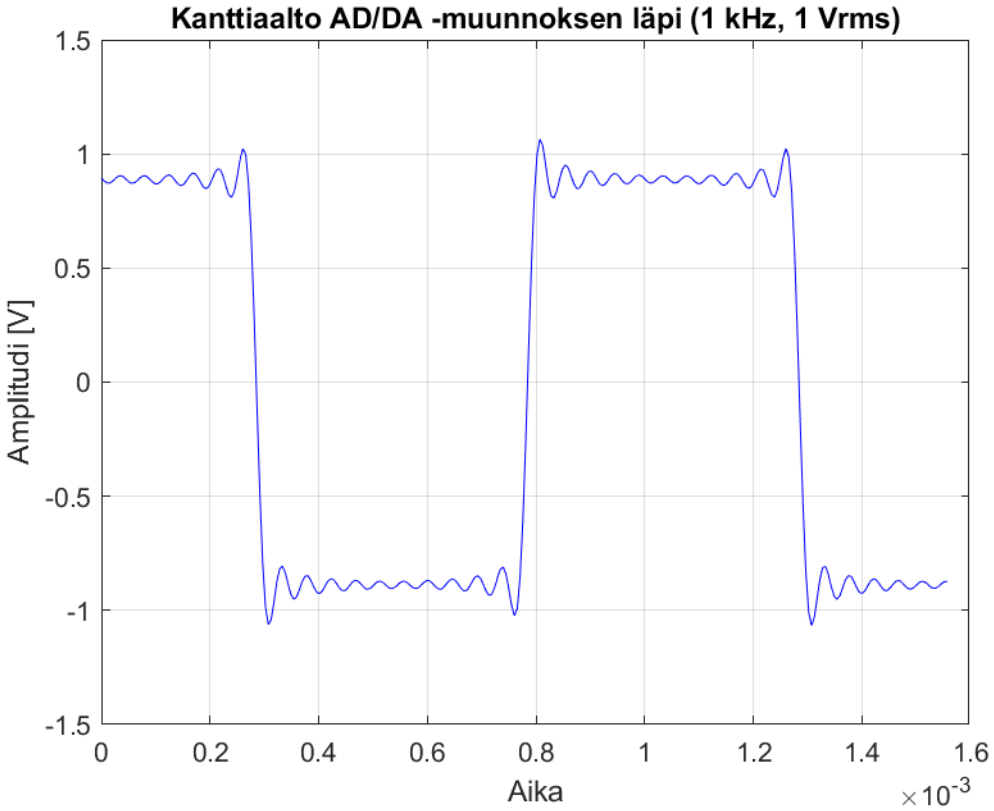


Kuva 4.7 Magneettinauhalle tallennetun äänitteen IMD -mittaus. Testisignaalit leviävät voimakkaasti ympäröiviin taajuuksiin kuten THD+N -kokeessa. Suoraan havaittavissa on yksi intermodulaatiosärökomponentti: 14060 Hz, lisäksi nähtävissä on 60 Hz:n 3. ja 5. harmoninen sekä 7 kHz:n 3. harmoninen.

4.7 Kanttiaalto

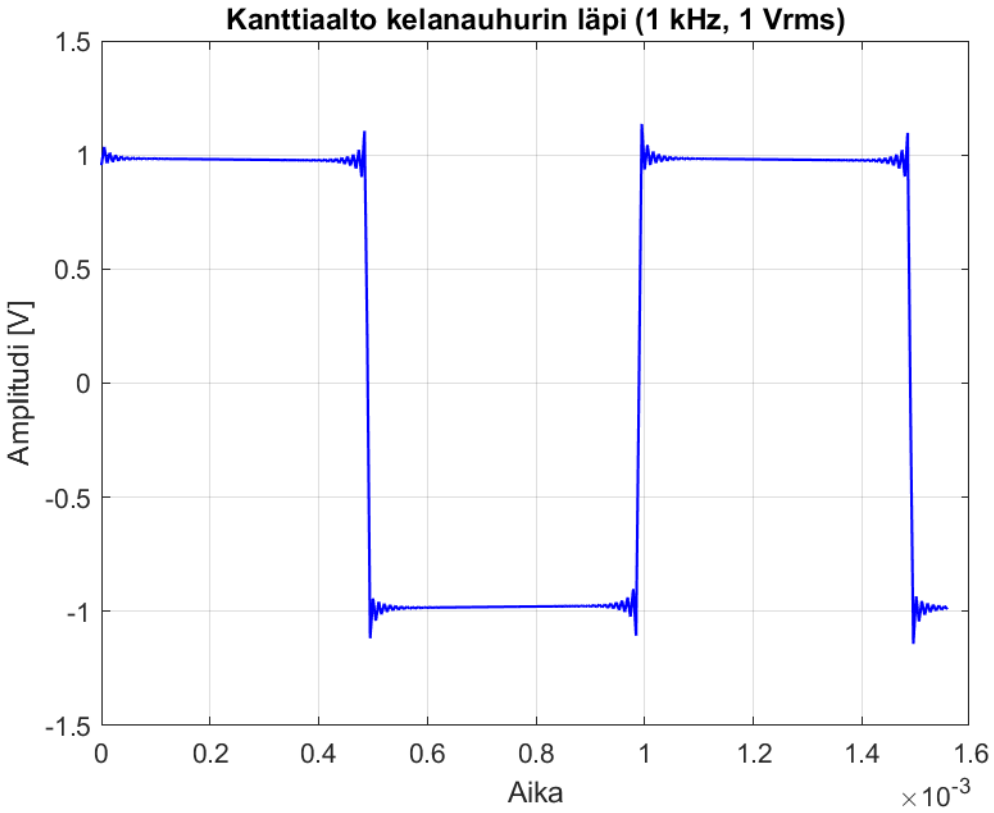
Alkuperäisen mittaussuunnitelman lisäksi testattiin Motu 1296:n ja Studer A812:n transienttikäyttäytymistä kanttiaallon avulla. Molemmille laitteille syötettiin 1 kHz, 1 V_{rms} kanttiaaltoa ja mitattiin tulos laitteen audiolähdöstä, analysaattori vaihdettiin taajuustasosta aikatasoon, jotta signaalin aaltomuoto saataisiin näkyviin. Ideaalinen kanttiaalto on äärettömän pitkä parittomien harmonisten Fourier -sarja, tällainen signaali sisältäisi

äärettömän monta taajuutta ja äärettömän määrän energiaa [12]. Ideaalisen kanttiaallon tuottaminen ei siis ole mahdollista, mutta laadukkaat signaaligeneraattorit pystyvät tuottamaan tarpeeksi harmonisia melko puhtaan kanttiaallon saavuttamiseksi.



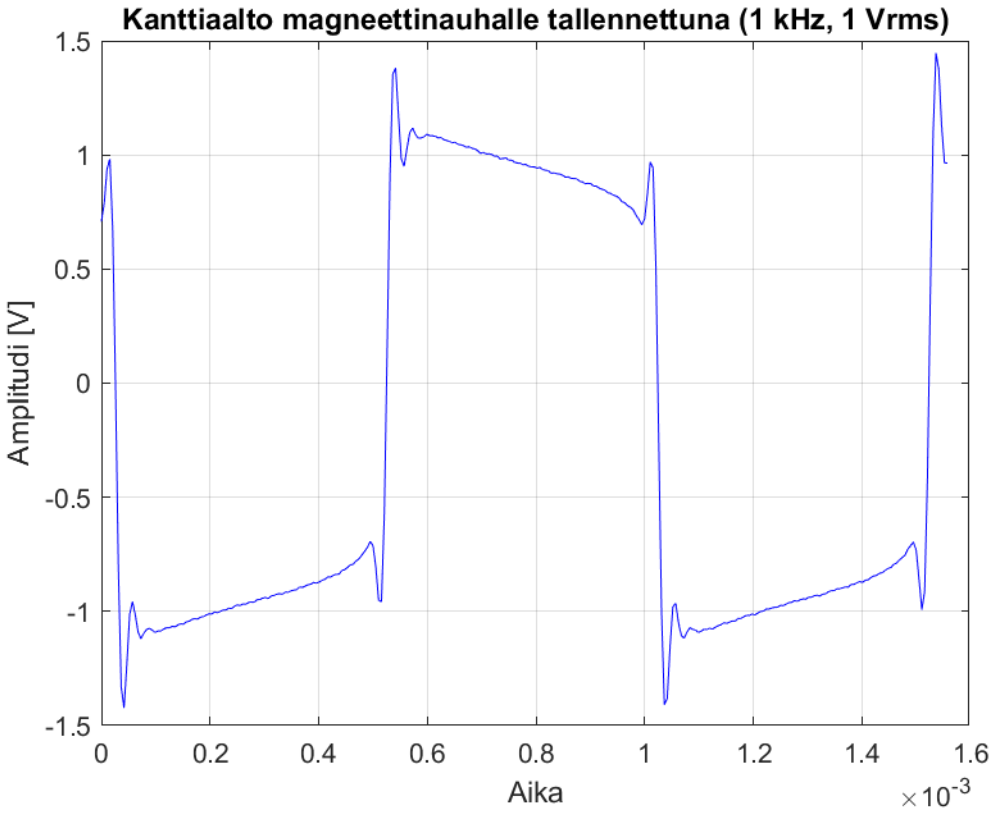
Kuva 4.8 Motu 1296:n audiolähdöstä mitattu kanttiaalto. Rajatun taajuuskaistan vuoksi Gibbs -ilmiönä tunnettu signaalin oskillointi on voimakasta kanttiaallon huipuilla, signaaliin ei mahdu tarpeeksi montaa harmonista tuottamaan puhtaampaa kanttiaaltoa.

Mitä enemmän kanttiaallossa on harmonisia sitä enemmän se muistuttaa ideaalista kanttiaaltoa, kuvassa 4.8 on esitetty Motu 1296:n analogiselta audiolähdöltä mitattu kanttiaalto. Kun signaalia näytteistetään 44,1 kHz:n taajuudella ei äänityksen taajuuskaistalle mahdu tarpeeksi harmonisia muodostamaan puhdasta kanttiaaltoa ja signaali jää näkyvästi oskilloimaan kanttiaallon huipulla. Kanttiaallon muodostavien taajuuksien määrä voidaan katsoa kuvaajasta laskemalla kanttiaallon oskillaation huiput tai mikäli nämä eivät ole selvästi näkyvissä voidaan signaalia tarkastella taajuustasossa, jolloin eri taajuudet erottuvat selkeästi pistetaajuuksina. Kuvassa 4.8 on 11 huippua eli tallennettu kanttiaalto sisältää 1 kHz:n perutaajuuden lisäksi 10 paritonta harmonista 21 kHz:iin asti. Rajallisen taajuuskaistan aiheuttamaa kanttiaallon oskillointia kutsutaan Gibbs -ilmiöksi, joka tapahtuu kun paloittain määriteltyä Fourier -sarjaa approksimoidessa otetaan mukaan vain sarjan ensimmäiset *n* termiä ja loput hylätään [12]. Mitä vähemmän termejä otetaan mukaan, sitä voimakkaampi Gibbs -ilmiö on. Kuvassa 4.9 kelanauhurin sähköpuolen läpi syötetty kanttiaalto säilyy puhtaampana, sillä signaalin taajuuskaistaa rajoittava tekijä on tällöin Motu 1296:n A/D -muuntimen sijasta itse audioanalysaattorin A/D -muunnin, jonka näytteistystaajuus on reilusti suurempi 192 kHz.



Kuva 4.9 Kanttiaalto kelanauhurin sähköpuolen läpi mitattuna. Gibbs -ilmiö on huomattavasti Motu 1296:n mittausta vaimeampi, sillä kanttiaallon taajuuskaistaa rajoittaa Motu:n A/D -muuntimen sijasta analysaattorin oma A/D -muunnin, jolla on suurempi näytteistystaajuus.

Kuvassa 4.10 on kanttiaalto magneettinauhalle tallennettuna, havaittavissa on audioanalysaattorin A/D -muunnoksen aiheuttama Gibbs -ilmiölle ominainen ylilyönti ja hieman oskillointia aallon huipun vasemmalla reunalla. Voimakkaampi ylilyönti ja oskillointi aallon nousuvaiheessa viittaa korostettuihin yläpään taajuuksiin, kuten taajuusvastekokeessakin mitattiin, ja yläpään taajuuksien resonointiin [10]. Vaimennetut matalat taajuudet saavat kanttiaallon kallistumaan eteenpäin kuten kuvassa 4.10, vaimennetut korkeat taajuudet aiheuttavat päinvastaisen ilmiön [10]. Kanttiaallon kallistuminen on merkki vaihesiirrosta, vaihesiirtoa tapahtuu tosin harvemmin yksinään vaan siihen liittyy lähes aina myös muutoksia taajuusvasteessa [10]. Magneettinauhan taajuusvastekokeessa matalat taajuudet alkoivat vaimentumaan nopeasti 30 Hz:stä alaspäin.



Kuva 4.10 Magneettinauhalle tallennettu kanttiaalto. Havaittavissa Gibbs -ilmiöön liittyvää ylilyöntiä ja yläpään taajuuksien korostukseen viittaava nousuvaiheen voimakkaampi ylilyönti. Matalien taajuuksien vaimennus kääntää kanttiaallon kallelleen eteenpäin.

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin analogisen ja digitaalisen äänityksen eroja kirjallisuuden avulla sekä käytännössä mittaamalla. Työssä selvitetään analogisen ja digitaalisen äänityksen toimintaperiaatteet ja miten nämä omalta osaltaan vaikuttavat tallennettavan äänitteen ominaisuuksiin. Jos tavoitellaan ideaalista äänitystä: laitteelle syötetty signaali tallentuu muuttumattomana ilman säröytymistä, on selvää kumpi teknologia suoriutuu tehtävästä paremmin. Magneettinauhalle tallentaminen lisää äänitteeseen suuria määriä harmonista säröä sekä huojunnan aiheuttamia vääristymiä, analogisen äänityksen dynamiikka on digitaaliseen verrattuna kapea eikä nauhoituksen taajuusvastettakaan voi tasaiseksi sanoa. Tästä näkökulmasta digitaalinen äänitys on analogiseen verrattuna lähes täydellinen prosessi, jopa vanhempaa ADC -sukupolvea edustavasta Motu 1296:sta ei juurikaan merkittäviä määriä mitattavaa säröytymistä löytynyt ja uudemmat laitteet ovat mitä luultavimmin vielä puhtaampia.

Käyttäjäystävällisyyden puolesta digitaaliset laitteet vievät voiton. Nykyaikaiset A/D -muuntimet ja äänikortit vaativat hyvin vähän oheislaitteita, harvemmin tarvitsevat edes erillisiä ajureita toimiakseen tietokoneen kanssa ja ovat käytännössä huoltovapaita. Kelanauhurin käyttö ja ylläpito vaativat sen sijaan paljon ammattitaitoa. Kelanauhurissa on paljon liikkuvia osia, joita on huollettava säännöllisesti tasalaatuisen nauhoituksen ylläpitämiseksi, lisäksi magneettinauhojen käsittelyssä ja säilytyksessä on omat sääntönsä.

Miksi sitten käyttää analogista nauhoitusta ollenkaan jos reilusti paremmin suoriutuva teknologia on saatavilla? Mikä on muuttunut jos tosiaan oletetaan musiikin kuulostaneen ennen paremmalta? Analogisen äänityksen reilusti digitaalista voimakkaampi säröytyminen voi olla avainasemassa sen kokemaan suosioon. Varsinkin analogisen signaalitien musiikin kanssa kasvaneet vanhemmat sukupolvet voivat pitää säröytynyttä ääntä miellyttävämpänä. Tästä näkökulmasta digitaalinen äänitysprosessi saattaa olla ns. liian täydellinen tai steriili. Jotkin analogiselle nauhoitukselle ominaiset säröt ovat myös tunnettuja ääniefektejä, joita mallinnetaan usein myös digitaalisissa äänitteissä, näitä ovat esimerkiksi nauhasaturaatio ja mittausosiossakin käsitelty huojunta [22]. Särö on siis joskus jopa toivottu lisäys äänitteeseen. Ehkäpä analogisen äänityksen epäideaalisuudet ovat juuri se pieni ripaus luonnetta, mitä digitaalinen äänitys ei pysty tallentamaan. Loppujen lopuksi analogisen tai digitaalisen signaalitien suosiminen toisen yli on kuitenkin vain kuuntelijan subjektiivinen mieltymys, eikä se ole audioanalysaattorilla mitattavissa.

5.1 Analoginen ja digitaalinen äänitys tiivistettynä

Sekä kelanauhurin että A/D -muuntimen tavoite on äänen tallentaminen levitystä varten siten, että artistin alkuperäinen näkemys välittyy studiosta kuuntelijalle. Kelanauhuri ja ADC pyrkivät samaan lopputulokseen, mutta itse prosessin toteutustavat poikkeavat perustavanlaatuisesti toisistaan. Kelanauhurilla äänitettävä signaali kirjoitetaan nauhurin nauhoituspään tuottaman muuttuvan magneettikentän avulla magneettinauhalle. Nauha magnetoituu nauhoitettavan signaalin mukaisesti, mikä on sitten luettavissa käänteisellä prosessilla. Kaikessa yksinkertaisuudessaan A/D -muunnin mittaa jännitettä tietyllä aikavälillä ja näytteet pyöristetään digitaalisesti esitettäviksi kokonaisluvuiksi ja tallennetaan. A/D -muuntimelle syötetty signaali voidaan rekonstruoida näytteiden perusteella.

Äänitteellä on kaksi perusominaisuutta, jotka määräytyvät valitun äänitysmenetelmän ominaisuuksien mukaan: taajuusvaste, eli tässä yhteydessä äänityksen taajuuskaistan leveys sekä dynaaminen alue eli ero voimakkaimman ja vaimeimman tallennettavan amplitudin välillä. Taulukossa 5.1 on avattu mitkä tekijät määrittävät äänityksen taajuusvasteen ja dynaamisen alueen rajat sekä kummankin äänitystavan keskeisimmät heikkoudet.

Taulukko 5.1 Analogisen ja digitaalisen äänityksen taajuusvasteen ja dynamiikan määrittävät tekijät sekä suurimmat ongelmat.

	Analoginen äänitys	**Digitaalinen äänitys**
Taajuusvaste	Kelanauhurin nauhoituspään ilmarako määrittää hyödyllisen taajuuskaistan leveyden. Kun nauhoituspään ilmarako vastaa nauhoitettua aallonpituutta nauhoitettu signaali kumoutuu, yleensä vasta reilusti kuuloalueen ulkopuolella.	Näytteistystaajuus määrittää digitaalisen äänityksen taajuusvasteen. Tyypillisesti käytetään 44,1 kHz näytteistystaajuutta, jolloin taajuusvasteen yläraja on puolet tästä eli 22,05 kHz.
Dynaaminen alue	Magneettinauhan ominaisuudet määrittävät äänitteen dynaamisen alueen, parhaimmillaan magneettinauhalle voidaan tallentaa hieman alle 80 dB:n dynamiikalla.	ADC:n bittisyvyys määrittää dynaamisen alueen leveyden. 16 bitin kvantisoinnilla saavutetaan 96 dB:n dynamiikka, 24 bitillä teoreettinen maksimi on 144 dB. Yleensä äänityksessä käytetään 16 bittiä.
Suurimmat ongelmat	Mekaaniset ongelmat nauhankuljetuksessa aiheuttavat äänitteeseen säröä, ideaalisesti nauha liikkuisi vakionopeudella nauhoituspään ohi mutta tämä harvemmin toteutuu. Lisäksi magneettinauhoilla on tapana rappeutua ajan myötä.	Näytteistyksen luonteen vuoksi ADC:t ovat alttiita laskostumisen aiheuttamalle särölle, laadukkaalla laskostumisenestosuotimella voidaan minimoida laskostumisen aiheuttama särö. Lisäksi huonolaatuiset kellot voivat aiheuttaa äänitteeseen suuriakin määriä säröä jitterin muodossa.

5.2 Mittaustulokset

Analogisen ja digitaalisen äänityksen epäideaalisuuksia tutkittiin mittaamalla. Mittausten kohdelaitteiksi valittiin Astia -studion analoginen Studer A812 ¼” -stereonauhuri ja digitaalinen Motu 1296 -tallennin. Kummallekin laitteelle suoritettiin taajuus- ja amplitudivastekokeet. Laitteilta mitattiin myös SNR, THD+N, IMD sekä tutkittiin transienttivastetta kanttiaallon avulla. Kelanauhurin mittaukset suoritettiin magneettinauhalle tallennettuna sekä suoraan kelanauhurin sähköpuolen läpi, jotta nämä voidaan erottaa toisistaan. Motu 1296:n A/D- ja D/A -muuntimia ei taas voitu erottaa toisistaan, sillä tähän vaadittu lisävaruste puuttui audioanalysaattorista. Osa mittaustuloksista ja niiden nimelliset/tyypilliset arvot on esitetty taulukossa 5.2, analogisen äänityksen mittaustulokset ovat tässä magneettinauhalle tallennettuna, nauhurin sähköpuolen mittaukset liitteissä.

Taulukko 5.2 Studer A812:n ja Motu 1296:n mittaustuloksia. Studer A812:n tulokset verrattuna laitteen manuaalissa ilmoitettuihin nimellisarvoihin 15 ips nauhanopeudella [21]. Motu 1296:n käyttöohjetta/teknisiä tietoja ei löytynyt, joten käytetään vastaaville laitteille tyypillisiä arvoja [14]. Studer A812:n taajuusvaste vastaa kuvan 4.2 huipuista katsottuna nimellistä taajuusvastetta, mitattu tulos ilmoitettu kuvaajasta -3 dBV:n kohdalta katsottuna. Nauhurin SNR riippuu CCIR 468-II:n mukaisesta painotuksesta.

	Studer A812 (15 ips, CCIR, stereo)		**Motu 1296 (16-bit/44.1 kHz)**	
	Nimellinen	**Mitattu**	**Tyypillinen**	**Mitattu**
Taajuusvaste	30 Hz - 20 kHz	20 Hz - 30 kHz (-3dBV)	20 Hz – 20 kHz	20 Hz – 21 kHz
T.vasteen tasaisuus	±2 dB	±2,3 dBV	± 0,02 - 1 dB	±0,3 dBV
SNR	63dB / 54 dB (painottamaton/painotettu)	54 dB	90 – 95 dB	87 dB
THD+N	≤ 1%	-43 dBV (~0,89 %)	0,003 – 0,01 %	-83,3 dBV (~0,00883 %)
IMD	-	-35 dBV	-	-98 dBV
Säröytymispiste	2,82 V_{rms}	3,5 V_{rms}	-	6,75 V_{rms}

Suurimmat mitattavat erot havaittiin taajuusvastekokeessa sekä THD+N- ja kanttiaaltomittauksissa. Motu 1296:n taajuusvasteessa vaihtelua mitattiin n. 0,3 dBV oli kun taas magneettinauhalle tallennettaessa Studer A812:n taajuusvaste vaihteli 2,3 dBV, nauhurin taajuusvasteen vaihtelut olivat jakautuneet siten että ne korostivat hieman matalia ja korkeita taajuuksia.

Vahvistuksen lineaarisuuskokeessa havaittiin kummankin laitteen olevan normaaleissa käyttöolosuhteissa melko lailla särövapaita. Kummankin laitteen osalta jouduttiin syöttämään reilusti laitteiden omat jännitemittarit ylittäviä jännitteitä, ennen kuin

huomattavaa säröytymistä alkoi tapahtua. Mittausten perusteella voidaan todeta, että jos äänityksessä pidetään laitteille syötettävät jännitteet kohtuullisissa rajoissa ei yliohjauksen aiheuttamaa säröytymistä tapahdu. Mittauksessa käytettiin testisignaalina siniaaltoa eivätkä tulokset näin ollen ota kantaa mahdollisiin musiikissa esiintyviin voimakkaisiin transientteihin, jotka voivat hetkelliseltä jännitteeltään olla tarpeeksi voimakkaita leikkautuakseen. Studer A812 alkoi säröytyä noin 3,5 V_{rms} jälkeen ja Motu 1296 noin 6,75 V_{rms} jälkeen.

Mittausten perusteella havaittiin Studer A812:n tuottavan Motu 1296:een verrattuna noin satakertaisen määrän harmonista kokonaissäröä ja kohinaa (0,89 % vs. 0,00883 %). Studer A812:n THD+N -mittauksessa havaittiin testisignaalina käytetyn 1 kHz:n siniaallon leviävän voimakkaasti ympäröiviin taajuuksiin magneettinauhalle tallennettaessa tuottaen pistemäiselle taajuudelle selkeän kartiomaisen jalan, ilmiö johtuu mahdollisesti muutoksista nauhan liikenopeudessa. Nauhoitetun signaalin aaltomuoto on suoraan yhteydessä nauhan liikenopeuteen, joten tämän muuttuessa myös nauhoitettu taajuus muuttuu. Vaimeaa leviämistä oli havaittavissa myös Motu 1296:n mittauksissa, pienet muutokset ADC:n toimintaa ohjaavan sisäisen kellosignaalin taajuudessa vääristävät näytteistettyä signaalia, jolloin tallennettu taajuus ei aina vastaa laitteelle syötettyä taajuutta. Kellosignaalin häiriöiden aiheuttamaa säröä kutsutaan jitteriksi.

Intermodulaatiosärökokeiden tuloksissa havaittiin pitkälti samat ilmiöt kuin THD+N -mittauksissa. Studer A812:n magneettinauhan IMD -mittauksessa sekä 60 Hz että 7 kHz signaalit levisivät ympäröiviin taajuuksiin kuten THD+N -kokeessa ja kummallakin signaalilla oli voimakkaita harmonisia särökomponentteja. Intermodulaatiosäröksi tunnistettiin vain yksi huippu 14060 Hz:n kohdalla. Motu 1296:n IMD -kokeessa jitterin aiheuttamat vaimeat säröt olivat myös nähtävissä testisignaalien ympäristössä, muuta säröä ei Motu 1296:n mittauksessa kuuloalueella juurikaan ollut. Motu 1296:n intermodulaatiosäröksi mitattiin -98 dBV ja Studer A812:n IMD:ksi -35 dBV (magneettinauha).

Kanttiaaltoa tarkastellessa havaittiin A/D -muunnokselle ominainen Gibbs -ilmiö. Kanttiaalto muodostuu sarjasta parittomia harmonisia. Näytteistystaajuuden rajaamalla taajuuskaistalla äänitettäessä harmonisia ei tallennu tarpeeksi muodostamaan puhdasta kanttiaaltoa vaan kanttiaalto jää oskilloimaan aallon huipuilla. Mitä suuremmalla näytteistystaajuudella äänitetään, sitä vaimeampi Gibbs -ilmiö on. Näytteistystaajuuden vaikutus Gibbs -ilmiöön on havaittavissa vertaamalla Motu 1296:n ja kelanauhurin sähköpuolen mittauksia. Motu 1296:n näytteistystaajuus oli 44,1 kHz, jolla oskillointi oli voimakasta. Kelanauhurin mittauksissa taajuuskaistaa rajoitti audioanalysaattorin ADC, jonka näytteistystaajuus oli 192 kHz, jolloin kanttiaalto alkoi jo muistuttaa puhdasta kanttiaaltoa ja oskillointi oli vaimeampaa.

5.3 Mahdollinen jatkotutkimus

Suoritetut mittaukset ovat tässä vaiheessa vielä tapauskohtaisia, jotta saataisiin yleispätevän luonteista mittausdataa analogisen ja digitaalisen äänityksen eroista pitäisi suorittaa enemmän mittauksia suurelle määrälle laitteita. Suuremmalla määrällä testattavia laitteita voitaisiin eliminoida mahdolliset laitekohtaiset erot. Nyt ei tiedetä varmasti, onko esim. kelanauhurilta mitattu pistetaajuuksien leviäminen ominaista kaikille kelanauhureille vai ainoastaan malli tai laitekohtainen ilmiö. Lisäksi mittausten sarjaa voitaisiin laajentaa

lisäämällä esim. impulssivastekoe tai tehdä kelanauhurille erillinen flutter -mittaus, jotta saataisiin mitattua tietoa nauhurin mekaniikan vakaudesta. Kelanauhurilla äänitteen kopioimisen aiheuttamia häviöitä voitaisiin tutkia mittaamalla laajakaistaisen testisignaalin spektogrammi useamman kopiointikierroksen ajalta ja vertaamalla näitä alkuperäiseen.

LÄHTEET

1. Ashbourn, J. 2020. Audio Technology, Music, and Media. [Viitattu 6.1.2021].

2. Audio Precision. Ei päivämäärää. Signal-to-noise Ratio (SNR), Dynamic Range, and Noise. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.4.2021]. Saatavissa: https://www.ap.com/technical-library/signal-to-noise-ratio-snr-dynamic-range-and-noise/

3. Audio Precision. 2008. Dither. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.4.2021]. Saatavissa: https://www.ap.com/technical-library/dither/

4. Archimago. 2018. DEMO / MUSINGS: Let's listen to some jitter simulations with sideband distortions.... [Blogikirjoitus]. [Viitattu 25.5.2021]. Saatavissa: http://archimago.blogspot.com/2018/08/demo-musings-lets-listen-to-some-jitter.html

5. Berry, G. Ei päivämäärää. Understanding audio bitrate. Adobe. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: https://www.adobe.com/creativecloud/video/discover/audio-bitrate.html

6. Begin, J. 2019. THD and THD+N – Similar, but not the same. Audio Precision. [Blogikirjoitus]. [Viitattu 31.3.2021]. Saatavissa: https://www.ap.com/blog/thd-and-thdn-similar-but-not-the-same/

7. Camras, M., 1998. Magnetic Recording Handbook. Springer Netherlands.

8. Eargle, J. 1992. Handbook of Recording Engineering (Second Edition). Springer, Boston, MA. [Viitattu 6.1.2021]

9. Eargle, J. 2003. Handbook of Recording Engineering (Fourth Edition). Springer, Boston, MA. [Viitattu 6.1.2021]

10. Elliott, R. 2015. Squarewave testing of Amplifiers & Filters. Elliott Sound Products. [Verkkosivu]. [Viitattu 9.6.2021]. Saatavissa: https://sound-au.com/articles/squarewave.htm

11. Gallagher, M. 2015. 7 Questions About Sample Rate. Sweetwater inSync. [Artikkeli]. [Viitattu 4.4.2021]. Saatavissa: https://www.sweetwater.com/insync/7-things-about-sample-rate/

12. Jerri, A.J. 1998. The Gibbs Phenomenon in Fourier Analysis, Splines and Wavelet Approximations. Springer US. [Viitattu 26.5.2021]

13. Korzunov, Y. 2017. What is jitter in audio?. Headfonics. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.6.2021]. Saatavissa: https://headfonics.com/what-is-jitter-in-audio/

14. Metzler, B. 2005. Audio Measurement Handbook. Audio Precision, Beaverton, Oregon. [Viitattu 31.3.2021]

15. Neu, T. 2017. Jitter vs SNR for ADCs. Texas Instruments. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 25.5.2021]. Saatavissa: https://training.ti.com/sites/default/files/docs/TIPL%204704%20-%20Jitter%20vs%20SNR.pdf

16. PreSonus. Ei päivämäärää. Digital Audio Basics: Sample Rate and Bit Depth. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.1.2021]. Saatavissa https://www.presonus.com/learn/technical-articles/sample-rate-and-bit-depth

17. Richards, W. 2020. Vinyl sales in the US just had their biggest week in history. [Artikkeli]. [Viitattu 21.1.2021]. Saatavissa https://www.nme.com/news/music/vinyl-sales-in-the-us-just-had-their-biggest-week-in-history-2846303

18. Seiko Epson Corporation. Ei päivämäärää. Jitter and Phase Noise. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 25.5.2021]. Saatavissa: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdf/techl_notes_jitter0416.pdf

19. Spotify. Ei päivämäärää. Audio Quality. Spotify. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: https://support.spotify.com/us/article/audio-quality/

20. YouTube. Ei päivämäärää. Select or Change your Audio Quality. Google. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: https://support.google.com/youtubemusic/answer/9076559?hl=en

21. Studer Professional Audio AG. Ei päivämäärää. Studer A812 MKII. [Käyttöohje]. [Viitattu 27.6.2021]. Saatavissa: http://thehistoryofrecording.com/Manuals/Studer/A812_MkII_Op.pdf

22. Robjohns, H. 2010. Analogue Warmth. Sound on Sound. [Artikkeli]. [Viitattu 28.6.2021]. Saatavissa: https://www.soundonsound.com/techniques/analogue-warmth

LIITTEET

Liite 1. Mittaussuunnitelma

MITTAUSSUUNNITELMA

1. TYÖSSÄ SUORITETTAVAT MITTAUKSET

1.1 Harmoninen särö + kohina

THD+N [*Total Harmonic Distortion + Noise*] mittaa laitteeseen vakiotaajuudella syötetyn sinimuotoisen testisignaalin ja tämän aiheuttamien harmonisten yliaaltojen sekä laitteen taustakohinan suhdetta.

Tavallisesti THD+N mittauksessa käytetään testisignaalina **1 kHz, 1 Vrms siniaaltoa.**

1.2 Signaali-kohinasuhde

SNR [*Signal-to-Noise Ratio*] mittaa laitteen lähdöstä saatavan signaalin amplitudin suurimman säröytymättömän arvon (Särö oltava alle 1%) ja laitteelle ominaisen taustakohinan suhdetta.

Laitekohtainen referenssijännite täytyy määrittää ennen mittausta, referenssijännite voidaan selvittää mittaamalla vahvistuksen lineaarisuuden mutta yleensä se löytyy suoraan laitteen tiedoista. Tavallisesti referenssi on **0-16 dB**, useimmiten joko **0 tai +4 dBV**. [14]

1.3 Intermodulaatiosärö

SMPTE IMD [*Society of Motion Picture and Television Engineers, Intermodulation Distortion*] mittaa kahden eri taajuisen sinimuotoisen testisignaalin vuorovaikutusta. SMPTE:n RP120-1983 -standardin mukaan testisignaalin **amplitudien suhde on 4:1 (tavallisesti 1 Vrms ja 0.25 Vrms)** ja taajuudet f_1 **= 60 Hz ja** f_2 **= 7 kHz.** [14]

1.4 Taajuusvaste

Taajuusvastekoe mittaa testattavan laitteen amplitudin taajuuden funktiona. Mittaus suoritetaan useimmiten ”pyyhkäisemällä” haluttu taajuuskaista laitteen läpi vakioamplitudilla. Yleensä taajuusvaste mitataan välillä 20 – 20000 Hz, tässä työssä mitattava kaista on **20 – 80000 Hz.** [14]

1.5 Vahvistuksen lineaarisuus

Vahvistuksen lineaarisuuskokeessa mitataan laitteeseen syötetyn ja siitä lähtevän signaalin amplitudin suhdetta. Laitteeseen syötetyn signaalin amplitudia kasvatetaan askelmaisesti ja mittaustulokset esitetään graafisesti. [14]

2. LAITTEISTO

Mitattaviksi laitteiksi valittiin analoginen Studer A812 ¼” -stereonauhuri ja Motu 1296 A/D -muunnin. Mittalaitteena käytettiin Keysight U8903B audioanalysaattoria, signaaliketjun kytkennät tehtiin kaikissa mittauksissa balansoiduilla Vovox Sonorus 2m -kaapeleilla.

3. MITTAUSTEN TOTEUTUS & OHJEET

Mittauksissa hyödynnetään U8903B:n valmiita mittausfunktioita, käytetään oletusasetuksia ellei toisin mainita. Analysaattorin ja signaaligeneraattorin asetukset taulukossa 1. Ajan säästämiseksi mitataan alustavasti vain toisen stereokanavan käyttäytymistä.

Taulukko 1. Audio-analysaattorin asetukset

OUTPUT CONFIG	
Connector	Bal
Impedance	600 Ω
Ground	Float
INPUT CONFIG	
LPF	None
HPF	None
Weighting	None
DeEm	None
Range	10 V
Samples	524288
Average	1
Ext. Gain	0 dB
Connector	Bal
Impedance	100 kohm
Coupling	AC
Bandwidth	96 kHz

Mittauksen kulku on on taajuusvastetta ja vahvistuksen lineaarisuutta lukuunottamatta seuraavanlainen:

1. Analysaattorin ja generaattorin asetukseen pääsee ”Analyzer/generator” -painikkeella, näiden välillä liikutaan nuolinäppäimillä.

2. Valitse analysaattorille haluttu mittaus (Valitse analysaattori > Functions > Meas Func > ”funktio”)

3. Valitse generaattorille mittausta vastaava testisignaali (Valitse generaattori > Waveform > ”signaali”)

a. Tarvittaessa määritä signaalin parametrit (amplitudi, taajuus jne)

4. Määritä mittaustilanteeseen sopiva triggeri (Analysaattori > Meas Config > Trigger)

5. **VARMISTA ASETUKSET ENNEN MITTAAMISTA (onko esim. oikeat yksiköt käytössä)**

6. Kytke analysaattori ja generaattori päälle
    a. Odota että mittaustulos päivittyy, tässä voi kestää suurella näytekoolla yllättävän kauan, ei kannata käyttää suurempaa kuin 524288.
    b. Ota puhelimella kuva mittaustuloksesta ja siirry kuvaajaan ”Graph” -painikkeella (kuva helpompi, sillä analysaattorilla ei ilmeisesti voi ottaa kuvankaappausta)
    c. Tallenna mittausdata painamalla ”Utility” -painiketta ja valitse ”save trace data”, kannattaa ottaa tästäkin kuva varmuuden vuoksi.

3. A/D -MUUNNIN

A/D -muuntimen mittaus on huomattavasti kelanauhuria suoraviivaisempi prosessi. Kytketään signaaligeneraattori diginauhurin input -liitäntään XLR -kaapelilla ja analysaattori samalla tavalla monitoriliitäntään.

1. THD+N
    a. Aseta generaattorille **1 kHz, 1 Vrms siniaalto** (generaattori > waveform)
    b. Aseta analysaattori **THD+N Ratio** -tilaan
    c. **Varmista asetukset**
    d. Suorita mittaus
        i. Mikäli tulokset heittelevät paljon kannattaa testisignaalin taajuus lukita manuaalisesti (Meas func > more x2 > frequency lock > custom)
    e. Tallenna data

2. SNR
    a. Generaattorille **1 kHz siniaalto, amplitudi laitteen mukaan**
        i. **Digilaitteelle oma**
    b. Analysaattori **SNR** -tilaan.
        i. Saattaa pyytää määrittämään filterin tai taajuuskaistan?
        ii. **Varmista asetukset**
    c. Suorita mittaus ja tallenna data.

3. SMPTE IMD
    a. Generaattorille **SMPTE IMD 4:1 1 Vrms**
    b. Analysaattori **SMPTE IMD** -tilaan.
    c. **Varmista asetukset**
    d. Suorita mittaus ja tallenna data.

4. Taajuusvaste
    a. Valitse ”Sweep” -toiminto
    b. Määritä sweepin parametrit
        i. Kaista: 20 – 80000 Hz
        ii. Spacing: Log

iii. **Point count: 1024 tai 512 tai pienempi**
iv. **Sweep mode: continuous**

c. **Varmista asetukset**
d. Suorita mittaus ja tallenna data.

5. Lineaarisuus
    a. Käytetään ”sweep” -toiminnon amplitudiversiota
    b. Selvitettävä mikä on laitteen referenssijännite ennen mittausta
    c. Varmista asetukset
    d. Mittaa ja tallenna data.

4. KELANAUHURI

Mitataan Astia -studion Studer A812 1/4″ -stereonauhurin toimintaa. Mittaukset suoritetaan sekä suoraan nauhurin läpi että magneettinauhan kautta, tällöin voidaan vertailla itse nauhurin ja magneettinauhan vaikutusta signaaliin. Signaaligeneraattori kytketään balansoidulla XLR kaapelilla nauhurin input -liitäntään ja analysaattori monitoriliitäntään. Mittaukset, parametrit ja niiden järjestys:

6. THD+N
    a. Aseta generaattorille **1 kHz, 1 Vrms siniaalto** (generaattori > waveform)
    b. Aseta analysaattori **THD+N Ratio** -tilaan
    c. Varmista asetukset
    d. Suorita mittaus
        i. Mikäli tulokset heittelevät paljon kannattaa testisignaalin taajuus lukita manuaalisesti (Meas func > more x2 > frequency lock > custom)
    e. Tallenna data

7. SNR
    a. Generaattorille **1 kHz siniaalto, amplitudi laitteen mukaan**
    b. Analysaattori **SNR** -tilaan.
    c. Suorita mittaus ja tallenna data.

8. SMPTE IMD
    a. Generaattorille **SMPTE IMD 4:1**
    b. Analysaattori **SMPTE IMD** -tilaan.
    c. Varmista asetukset
    d. Suorita mittaus ja tallenna data.

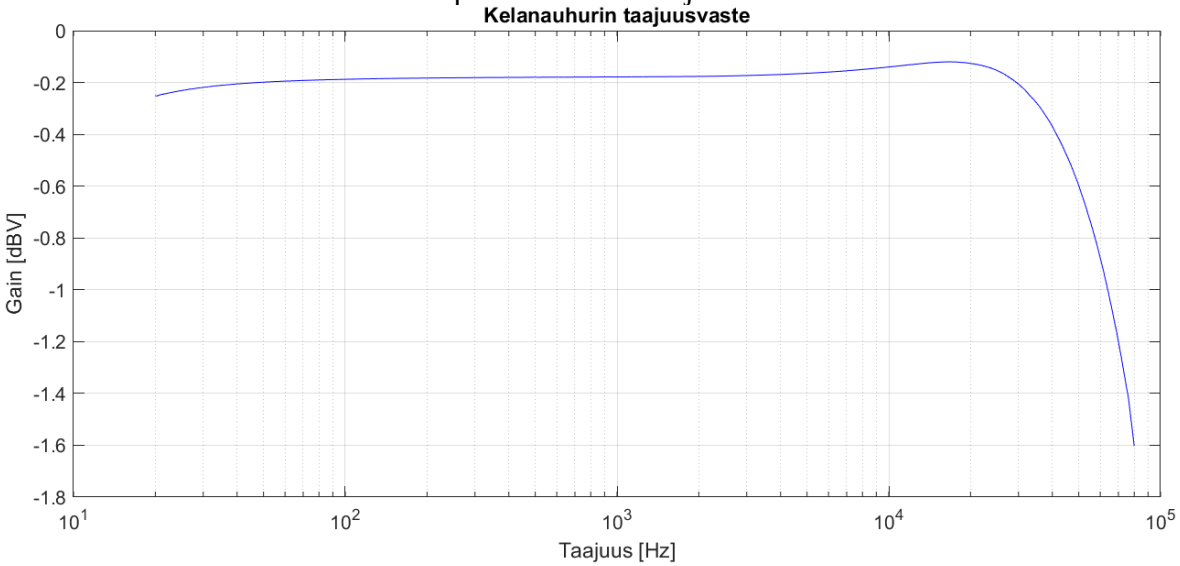
Yllä mainitut suoritetaan sekä nauhurin että kelan läpi ennen taajuusvaste- ja lineaarisuuskoetta, nämä vievät eniten aikaa.

9. Taajuusvaste
    a. Valitse ”Sweep” -toiminto
    b. Määritä sweepin parametrit
        i. **Kaista: 20 – 80000 Hz**
        ii. **Spacing: Log**
        iii. **Point count: 1024 tai 512**
        iv. **Sweep mode: continuous**

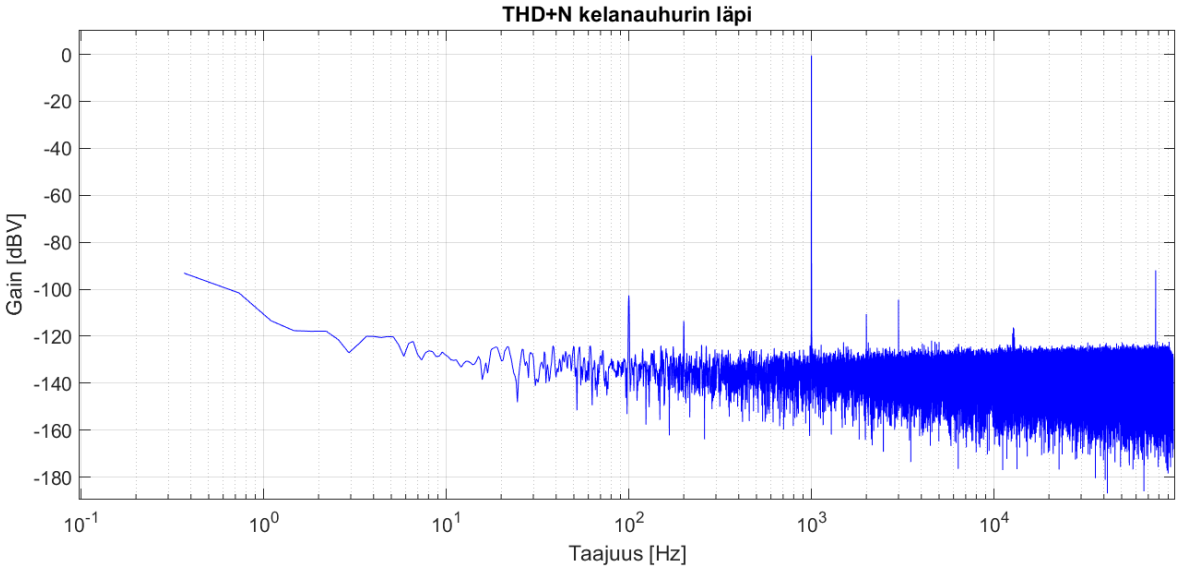
   c. **Varmista asetukset**
   d. Suorita mittaus ja tallenna data.

10. Lineaarisuus
    a. Käytetään ”sweep” -toiminnon amplitudiversiota
    b. Selvitettävä mikä on laitteen referenssijännite ennen mittausta
    c. Varmista asetukset
    d. Mittaa ja tallenna data.

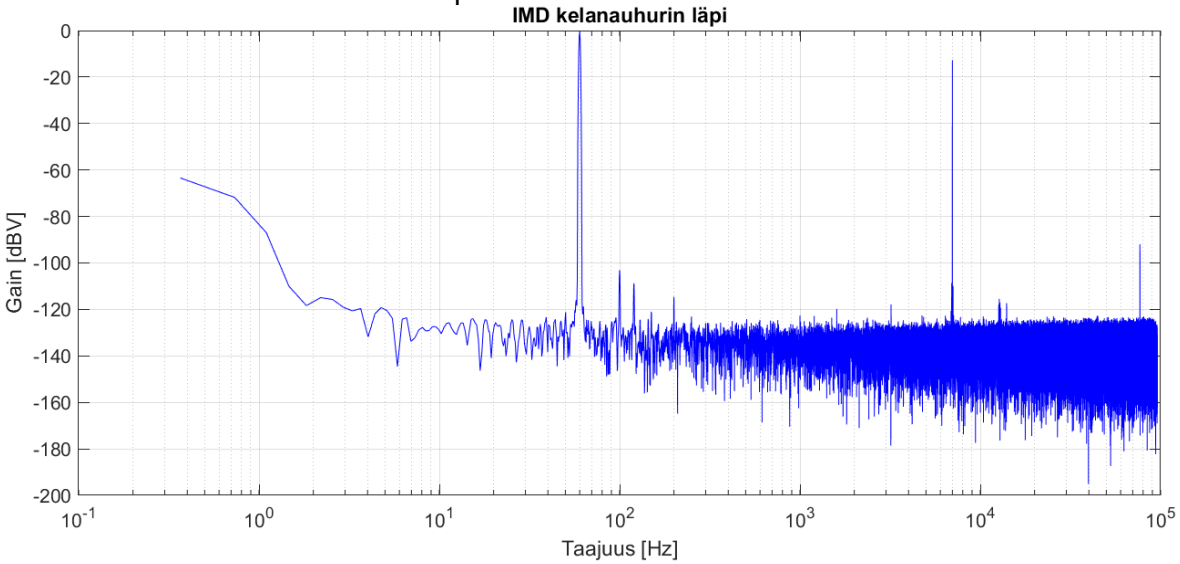
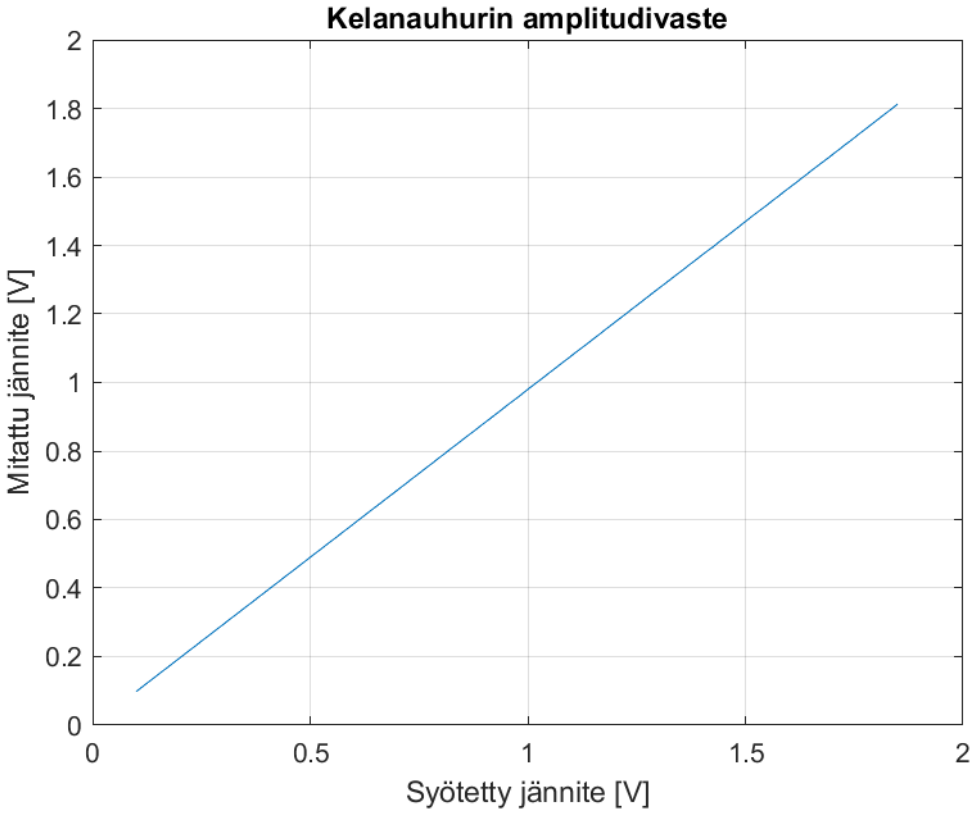
Liite 2. Kelanauhurin sähköpuolen mitattu taajuusvaste.



Liite 3. Kelanauhurin sähköpuolen mitattu THD+N.



Liite 4. Kelanauhurin sähköpuolen mitattu intermodulaatiosärö.



Liite 6. Kelanauhurin sähköpuolen vahvistuksen lineaarisuusmittaus.