



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

ÄÄNEN ETENEMINEN PIIRILEVYSSÄ
Sound propagation in a circuit board
Ville Kauranen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Ville Kauranen
Äänen eteneminen piirilevyssä

2018

Kandidaatintyö.
24 sivua, 10, kuvaa ja 3 taulukkoa.

Tarkastaja: TkT Tommi Kärkkäinen

Akustisen emission hyödyntämismahdollisuuksia on tutkittu elektroniikan komponenttien vikaantumisen havainnoinnissa. Akustisen emission on osoitettu rajatuissa olosuhteissa antavan luotettavia tuloksia monikerroksisten keraamisten kondensaattoreiden vikaantumisen määrittämisessä. Hiljan on tehty myös alustavaa tutkimusta keskittyen eristehilabipolaaritansistoreihin. Akustista emissiota ei toistaiseksi kuitenkaan hyödynnetä yleisesti elektroniikan toiminnan varmuuden valvonnassa. Aiheeseen liittyvien menetelmien kehittämistä ajatellen, piirilevyn akustisten ominaisuuksien tuntemus on hyödyksi, sillä piirilevy on välttämättä aina osana elektronisia laitteita. Tämän työn tarkoituksena on saada alustava käsitys siitä, millainen mekaanisen aallon välittäjä tyypillinen piirilevymateriaali on. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin akustiset kokeet neljälle piirilevykappaleelle. Piirilevyihin välitettiin mekaanista värähtelyä eri taajuuksilla pietsosähköisellä kontaktisensorilla määrättyyn pisteeseen ja tämä värähtely mitattiin toisella vastaavanlaisella kontaktisensorilla toisesta pisteestä eri etäisyyksillä. Testattavat kappaleet olivat komponentittomia FR-4 piirilevyjä, joiden oleellisiksi eroiksi toisiinsa asetettiin paksuus ja kuparipinnoitteen olemassaolo. Tehtyjen kokeiden perusteella todettiin, että piirilevyiltä on mahdollista havaita värähtelyä ainakin kuuloalueen taajuudella siten, että tarkastelussa olleiden muuttujien vaikutukset pystyttiin määrittämään. Huomattavasti kuuloalueen taajuuden yläpuolella värähtelevät aallot osoittautuivat vaimenevan taustakohinan tasolle eikä niistä siten ainakaan tämän työn menetelmin pysty erottamaan mitään erityispiirteitä. Mikäli kuitenkin jossakin käyttökohteessa matalammat taajuudet ovat kiinnostavia, olisi syytä tutkia muidenkin muuttujien vaikutusta aaltojen etenemiseen piirilevyssä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Ville Kauranen

Sound propagation in a circuit board

2018

Bachelor's Thesis.

24 pages, 10 pictures and 3 tables.

Examiner: D.Sc. Tommi Kärkkäinen

Research have been done on acoustic emission utilization for detection of malfunctioning electronic components. In specific circumstances, acoustic emission has been shown to provide reliable results, when it comes to determining whether multilayer ceramic chip capacitors have failed. Some precursory research concerning insulated gate bipolar transistors have also been conducted recently. However, currently acoustic emission is not widely used for condition monitoring in the field of electronics. Further development of methods concerning this subject could potentially benefit from understanding of acoustic features of a printed circuit board, since it is unavoidably part of most electronic devices. The goal of this thesis is to establish basic knowledge of printed circuit board as a medium for mechanical wave propagation. Acoustic experiments for four test circuit board pieces were designed and executed. Test pieces were subjected to vibration using piezoelectric contact sensor with various frequencies. Vibrations produced were then measured with another similar sensor from a different point of object being tested with varying distance to the source of vibration. The test pieces were plain FR-4 boards and their distinct difference from each other was their thickness and presence of copper plating. Based on experiments presented in this study, it was found that at least vibrations which take place within hearing frequencies can be observed in a way that effect of variables being inspected could be determined. It was demonstrated that waves descent to background noise level at frequencies that go considerably above the highest audible frequency; thus, no characteristics can be derived from them at least with the methods used in this study. If there is an instance that operates within these lower frequencies around the audible band, it would be wise to do further research on the matter, adding new variables for determining their effect on the wave propagation characteristics in a circuit board.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Mekaaninen aalto.....	7
2.1	Mittaaminen ja havaitseminen piirilevyltä	8
3.	Mittaukset.....	9
3.1	Mittausjärjestely ja mittalaitteisto	10
3.2	Taajuuspyyhkäisytestit	11
3.3	Yhteneväisyys ja toistettavuustestit.....	12
4.	Tulokset	14
4.1	Taajuuspyyhkäisytestit	14
4.2	Yhteneväisyys ja toistettavuustestit.....	18
4.3	Tulosten epävarmuustekijät.....	20
5.	Johtopäätökset	20
6.	Yhteenveto.....	21
	Lähteet	23

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

LUT Lappeenranta University of Technology
NEMA National Electrical Manufacturers Association

U jännite

f taajuus

t aika

1. JOHDANTO

Jotkin elektroniikan komponentit värähtelevät ollessaan vaihtojännitteisiä, mikä on tyypillisesti seurausta pietsosähköisestä ilmiöstä (Moheimani & Fleming, 2006). Värähtely säteilee mekaanisia aaltoja, mitä kutsutaan yleisesti akustiseksi emissioksi. Elektroniikassa voidaan erottaa akustinen emissio käsittämään vain kuuloalueen eli alle 20kHz:n taajuudella eteneviä aaltoja ja käyttää termiä ultraääninen emissio sitä korkeammilla taajuuksilla (Grosse & Ohtsu, 2008). Tämän määritelmän mukaan akustinen emissio olisi siis ääntä, mutta tässä työssä äänellä ja akustisella emissiolla tarkoitetaan kaikilla taajuuksilla eteneviä aaltoja. Akustista emissiota hyödynnetään erilaisissa epätuhoisissa kunnontarkistus ja laadunvarmistusprosesseissa mm. betonirakenteissa ja hitsauksessa (Nichols, 1976). Akustista emissiota voitaisiin mahdollisesti hyödyntää samoilla periaatteilla myös elektronisissa komponenteissa, mutta toistaiseksi sitä ei kuitenkaan käytetä yleisesti (Shannon et al. 2018). Joidenkin monikerroksisten keraamisten kondensaattoreiden kärsiessä mekaanisia vaurioita niiden akustinen vaste muuttuu riittävästi, jotta ne voidaan erottaa ehjistä komponenteista (Levikari, 2016). Yksi merkittävä ongelma toimivan yleispätevän seulontaprosessin aikaansaamisessa on komponentista saadun akustisen vasteen muuttuminen myös muista syistä kuin vaurioitumisesta. Pelkästään komponentin sijainti piirilevyllä voi olla riittävä muuttuja vaikuttamaan mitattuun akustiseen vasteeseen (Tarula, 2017).

Jotkut pintaliitoskomponentit kuten esimerkiksi keraamiset kondensaattorit sisältävät ferrosähköisiä eristemateriaaleja, mikä tekee niistä alttiita pietsosähköiselle ilmiölle. Sähkökenttä tällaisessa kondensaattorissa aiheuttaa siinä fyysisen muodon muutoksen, joka ilmenee akustisena emissiona (Prymak, 2006). Tällaisen kondensaattorin aiheuttamaa värinää voidaan mitata suoraan komponentin pinnalta käyttämällä pietsosähköistä kontaktisensoria. Ajamalla kondensaattoriin jännitesignaalia laajalla taajuuskaistalla samalla mitaten sen akustista emissiota, voidaan muodostaa kyseiselle komponentille luonteenomainen emissiomalli (Levikari et al. 2018). Pintaliitoskomponenttien ollessa fyysisessä yhteydessä piirilevyyn, mahdollistaa se ulkoisten mekaanisten aaltojen kulkeutumista piirilevyiltä tutkittavaan komponenttiin. Vastaavasti myös komponentin itse tuottama akustinen emissio pystyy välittymään liitoksestaan piirilevyille ja etenemään siinä mahdollisesti vielä jossakin muodossa. Oletettavasti piirilevyllä olevien muiden

komponenttien lisäksi havaittavaan akustiseen vasteeseen on muitakin vaikuttavia tekijöitä kuten esimerkiksi piirilevyn muoto, kiinnitys ja mittasuhteet.

Tämä kandidaatintyö ottaa tarkasteluun piirilevyn mekaanisen aallon väliaineena. Työn tavoitteena on selvittää, miten mekaaninen aalto etenee tyypillisessä piirilevymateriaalissa. Piirilevyn akustisten ominaisuuksien tuntemus voi auttaa sellaisten kokeiden tulosten tulkinnassa, missä piirilevy on yhteydessä testissä olevaan kohteeseen. Työ rajataan käsittelemään pelkästään FR-4 tyyppistä piirilevymateriaalia ja äänen etenemiseen vaikuttaviksi muuttujiksi valitaan piirilevyn kuparipinnoite, paksuus ja äänilähteen ja mittauspisteen välinen etäisyys. Piirilevyn muoto, reiät, kiinnitykset, juotetut komponentit ja äänilähteen sijainti jäävät avoimiksi muuttujiksi mahdollisia jatkotutkimuksia varten.

Työn alussa käsitellään mekaanisen aallon teoriaa pintapuolisesti työn rajallisessa viitekehyksessä. Seuraavassa osuudessa esitellään testattavat piirilevyt ja niille tehtävät akustiset mittaukset, mittaustaitteisto ja mittaustjärjestely. Työssä esitetyt mittaukset toteutettiin LUT:n (Lappeenranta University of Technology) sovelletun elektroniikan laboratoriossa keväällä 2016. Mittausten esittelyn jälkeen, läpikäydään ja analysoidaan niistä saadut tulokset. Toiseksi viimeisessä osuudessa tehdään tulosten pohjalta johtopäätökset. Lopuksi tiivis yhteenveto koko työstä ja esitetään ehdotuksia työssä tehtyjen mittausten kehittämiseen ja jatkotutkimuksiin.

Työssä etsitään vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Miten mekaaninen aalto etenee piirilevymateriaalissa?
- Mitkä taajuudet välittyvät parhaiten? Onko havaittavissa erityisiä taajuuksia?
- Miten piirilevyn paksuus ja kuparipinnoite vaikuttaa akustiseen emissioon?
- Miten mittauspisteen ja äänilähteen välinen etäisyys vaikuttaa signaalin vaimenemiseen?

2. MEKAANINEN AALTO

Mekaanisen aallon eteneminen väliaineessa on yksinkertaisesti esitettynä aineen muodostavien hiukkasten värähtelyä ja tämän värähtelyn aikaansaavan energian siirtymistä värähtelevästä hiukkasesta seuraavaan sen rakenteessa aallon etenemissuunnan mukaisesti. Mekaaninen aalto voi edetä pitkittäisesti ja poikittaisesti. Aallon pitkittäisyys ja poikittaisuus

selittyy aaltoliikkeen etenemissuunnan suhteesta värähtelyyn; pitkittäisessä aaltoliikkeessä värähtely ja aallon etenemissuunta ovat samat, kun taas poikittaisessa ne ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa. Ilmassa tai kaasussa etenevä aalto on pitkittäistä, kuten esimerkiksi ääni. Kiinteässä aineessa aallon liike on tyypillisesti poikittaista. Riippuen kiinteän aineen materiaalista ja siitä, millä tavalla värähtely siirtyy siihen, on aallon liike jossain määrin yhdistelmä pitkittäistä ja poikittaista (Tipler & Mosca, 2004). Vaikka piirilevy on kiinteää ainetta, se ei ole yksi kiinteä homogeeninen kappale vaan se koostuu kerroksista eri materiaaleja. Mekaanisen aallon kohdatessa kerrosten välisen reunan, se siroaa ja osa siitä heijastuu takaisin tästä rajapinnasta. Aaltojen heijastuminen on voimakkainta kappaleen ulkoreunoilla, koska niissä väliaineen olomuoto muuttuu huomattavasti; tyypillisesti kiinteästä aineesta kaasuksi. Ulkoreunoilta heijastuvat aallot aiheuttavat interferenssiä vastakkaiseen suuntaan etenevissä aalloissa. Jos levyäinen kappale altistetaan jatkuvalla värähtelyllä, tulisi siihen edellä mainitusta syystä muodostua seisovia aaltoja. Seisovien aaltojen sijaintiin tasolla vaikuttaa muunmuassa kappaleen muoto ja jatkuvan värähtelyn taajuus (Peltonen & Perkkiö, 2000).

Piirilevyjä voidaan tehdä monista eri materiaaleista, mutta valtaosa nykyään valmistetuista piirilevyistä on FR-4 tyyppin lasivahvisteisia epoksilaminaatteja. Piirilevy muodostuu sen paksuudesta riippuen erimäärästä yhteen liimatuista lomittaisista komposiittikuitukudoksista. Piirilevy voi olla päällystetty kuparikerroksella, jonka paksuudelle on olemassa eri mittoja. FR-4 ei ole myöskään tarkka määritelmä sähköeristeenä toimivalle komposiittimateriaalille vaan se on laatuluokka, jonka on täytettävä tietyt vaatimukset. FR-4 laatuluokituksen on osoittanut NEMA (National Electrical Manufacturers Association) (NEMA LI 1-1998). FR-4:sta on myös olemassa useita alaluokkia, jotka edelleen tekevät siitä vaikeammin määriteltävän. Lisäksi eri piirilevyvalmistajilla on omille tuotteilleen toisistaan vähän eroavat spesifikaatiot. Komposiittimateriaalit ovat mikroskooppisella tasolla epähomogeenisia ja laminaateissa yksittäisten kerrosten pystysuuntaisen ja niiden yhdessä muodostaman pitkittäissuuntaisen ominaisuuksien yhdistyminen tekevät siitä monimutkaisen analysoitavan (Gopalakrishnan et al. 2008).

2.1 Mittaaminen ja havaitseminen piirilevyltä

Värähtelyä piirilevyltä ja mistä tahansa muustakin kiinteästä kappaleesta voidaan mitata monella eri tavalla, mutta tämän työn mittausosuudessa käytetään vain pietsosähköistä

kontaktisensoria. Tällaiset kontaktisensorit perustuvat nimensä mukaisesti pietsosähköiseen ilmiöön. Kontaktisensoriin välittyvä mekaaninen aalto aiheuttaa siinä fyysisen muodonmuutoksen, minkä seurauksena sen pintojen välille muodostuu sähköinen jännite (Moheimani & Fleming, 2006). Kontaktisensorin hyödyt tulevat suorasta yhteydestä mitattavaan kappaleeseen eli mittauksissa ei ole ilmapäliä mittalaitteen ja mitattavan kappaleen välillä. Ilmapäli olisi olemassa, mikäli mittauksissa käytettäisiin mikrofonia. Jotkin mikrofonit perustuvat myös pietsosähköiseen ilmiöön, mutta valtaosa on nk. dynaamisia mikrofoneja, joiden toimintaperiaate on erilainen. Mikrofonit toimivat yleensä muutekin rajatulla taajuusalueella, joten niitä ei sen ja ilmapälin takia päädytty käyttämään tässä työssä. Laseriin perustuvia värähtelymittareita on myös olemassa, mutta niissä ilmapälin sijasta ongelmaksi muodostuisi mahdollinen lasersäteen heijastuminen, mikä olisi oletettavissa kuparipinnoitetulla piirilevyllä. Työssä päädyttiin käyttämään kontaktisensoria, koska se ei teoriassa rajoita tarkasteltavaa taajuusaluetta ja ilmapälin eliminointuminen mahdollistaa mittauksen sijoittamisen tarkasti tiettyyn pisteeseen testikappaleessa.

3. MITTAUKSET

Akustisin kokein selvitettiin, minkälainen akustinen vaste saadaan mitattua piirilevyiltä, kun se altistetaan värähtelylle. Testikappaleisiin vietiin mekaanista aaltoa yhdellä pietsosähköisellä kontaktianturilla tietyssä pisteessä ja mitattiin toisella anturilla värähtelyä toisesta pisteestä. Viety värähtely tehtiin taajuuspyyhkäisynä laajalla taajuusalueella ja tulokset taltioitiin eri anturien välisillä etäisyyksillä. Testikappaleiksi valittiin neljä saman pituista ja levyistä FR-4 piirilevyliuskaa kahdella eri paksuudella (Taulukko 3.1). Puolet levyistä oli pinnoitettu molemmin puolin 1 tai 1.6 mm paksuisella kuparipinnoitteella. Lisäksi testattavana oli myös ohut kuparipelti sellaisenaan ilman piirilevymateriaalia.

Taulukko 3.1 Taulukossa on esitetty testattujen kappaleiden mittasuhteet. Testikappaleet A, B, C ja D ovat FR-4 piirilevyjä ja testikappale E on pelkkä kuparipelti ilman piirilevymateriaalia.

Testikappale	Pituus (mm)	Leveys (mm)	Paksuus (mm)	Kuparipinnoite
A	295	50	1	0.1 tai 0.16 mm
B	295	50	1	ei ole
C	295	50	2	0.1 tai 0.16 mm
D	295	50	2	ei ole
E	295	50	0.1 tai 0.16	-

3.1 Mittausjärjestely ja mittalaitteisto

Työn mittausjärjestelyn kokoonpano on suhteellisen yksinkertainen. Käytettävä mittalaitteisto koostui kahdesta pietsosähköisestä kontaktisensorista, vahvistimesta, signaaligeneraattorista ja oskilloskoopista. Taulukossa 3.2 on listattu tämän työn mittauksissa käytettyjen laitteiden mallit. Kontaktisensoriksi mittauksiin valittiin juuri tämä sensori sen ollessa välittömästi saatavilla olevista sensoreista laadultaan paras ja siksi, että sitä oli käytetty myös työn taustoihin liittyvissä tutkimuksissa LUT:ssa muun muassa keraamisten kondensaattoreiden (Levikari et al. 2018) ja eristehilabipolaaritransistorien akustisten emissioiden mittauksissa (Kärkkäinen, 2015).

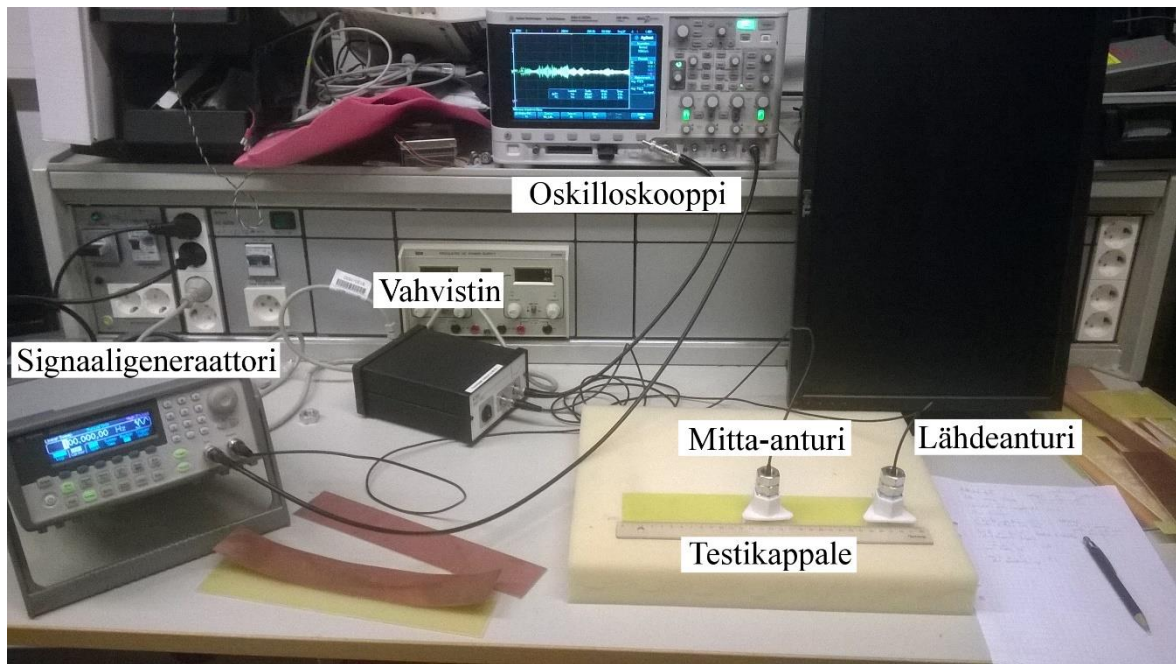
Taulukko 3.2 Luettelo mittauksissa käytetyistä laitteista.

Laite	Malli
Kontaktisensori(t)	KRNBB-PC
Vahvistin	KRN AMP-1BB-J
Signaaligeneraattori	Agilent 33250A
Oskilloskooppi	Agilent DSO-X 2024A

Työn mittauksissa hyödynnettiin toista kontaktisensoria äänilähteenä ja sitä ajettiin signaaligeneraattorilla. Testikappaleiden värähtelyä mittaavan sensorin ulostulo vietiin vahvistimen kautta oskilloskooppiin. Käytetyllä kontaktisensorilla on suuri taajuusalue 100Hz – 2.5MHz, vaikkakin sen ilmoitettu herkin taajuusalue 20kHz – 1MHz on ihmisen kuuloalueen ulkopuolella, tulisi sen silti pystyä hyvin havaitsemaan myös 20kHz matalampia taajuuksia (KRN Services, 2015). Oskilloskoopin enimmäisnäyteistystaajuus on 2GHz, mikä on enemmän kuin riittävä tämän työn mittauksissa (Keysight Technologies, 2018).

Kuvassa 3.1 on näkyvissä kokeita varten rakennettu mittauskokoonpano. Testissä oleva kappale pyrittiin eristämään akustisesti mittauskokoonpanon alustana olevasta pöydästä vaahtomuovilla. Käytetyt kontaktisensorit ovat suhteellisen kevyitä vain 17 grammaisia instrumentteja. Tästä johtuen kaapelin massa, jolla sensori on kiinnitetty muuhun laitteistoon aiheuttaa tasapaino-ongelman sen asettelussa. Mahdollisimman hyvän tasapainon ja kontaktin saavuttamiseksi, sensorit oli ruuvattu niiden kierteisiin sopiviin toisiinsa kiinnitettyihin muttereihin, jotka oli asetettu erityisesti niitä varten tehtyihin 3d-

tulostettuihin kolmejalkaisiin jalustoihin. Mutterien tarkoitus oli tuoda muutoin kevyen sensorin ympärille enemmän painoa.

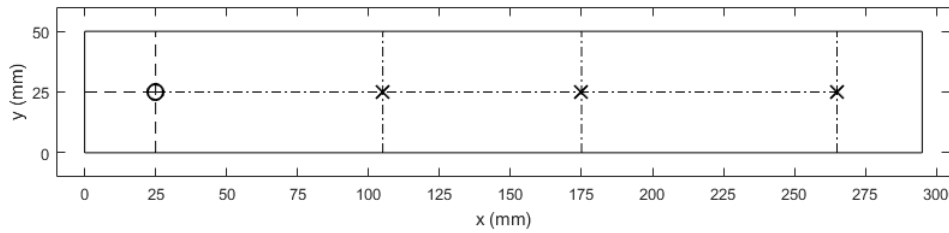


Kuva 3.1 Kokeita varten rakennettu mittauskokoontulo; näkyvissä laitteet ja testattavat kappaleet.

Kuvasta 3.1 ilmenee myös eräs mittauksiin liittyvä epätarkkuus liittyen kontaktisensoreiden asetteluun. Sensoreita liikutettiin käsivaralla ja niiden sijaintien määrittämiseen käytettiin tavallista 30 senttimetrin pituista viivainta. Tästä johtuen mittauspisteet saattoivat mahdollisesti poiketa tarkoituksenmukaisista pisteistä tapauskohtaisesti jopa millimetrejä.

3.2 Taajuuspyyhkäisytestit

Kaikille taulukossa 3.1 esitetyille testikappaleille toteutettiin tässä kappaleessa esitetyt mittaukset, joilla pyrittiin saamaan selvyyttä työn tutkimuskysymyksiin. Mittaukset suoritettiin kullekin testikappaleelle kuvan 3.2 mukaisissa mittauspisteissä. Signaalilähteenä toimiva sensori asetettiin mittauksissa käsiteltävissä olevan testikappaleen toiseen laitaan noin 25mm etäisyydelle sen lähimmäisistä ulkoreunoista. Mittaavaa sensoria käytettiin kolmessa eri pisteessä noin 80, 150 ja 240mm etäisyyksillä signaalilähteestä. Jokaisessa pisteessä suoritettiin kuusi erillistä mittausta. Syötteenä käytettiin sinimuotoista lineaarista signaalia taajuuspyyhkäisyä taajuudesta f_0 taajuuteen f_1 (Taulukko 3.3) jännitteen U huippuarvot olivat +5V ja -5V.



Kuva 3.2 Havainnekuva eri mittauspisteistä testikappaleissa. Signaalilähde on merkitty kuvaan ympyrällä ja mittauspisteet on merkitty x:llä. Mittauspisteet ovat 80, 150 ja 240mm etäisyydellä signaalilähteestä.

Taulukko 3.3 Eri mittausten taajuuspyyhkäisyiden aloitus-, lopetus- ja näytteistystaajuudet.

Mittaus	f_0	f_1	f_s
1	100Hz	20kHz	100kHz
2	20kHz	40kHz	100kHz
3	40kHz	60kHz	100kHz
4	60kHz	80kHz	100kHz
5	80kHz	100kHz	100kHz
6	100Hz	100kHz	100kHz

Mittaukset taltioitiin oskilloskoopilla siten, että mittaus aloitettiin mittaavan anturin ulostulon ylittäessä taustakohinan jännitetason. Kaikki yksittäiset mittaukset käyttivät 100kHz näytteistystaajuutta f_s mittaussajan t ollessa 500ms, eli jokainen tulos sisälsi 50000 näytettä. Mittaukset 1 – 5 ja 6 käsittivät saman taajuusvälin 100Hz – 100kHz. Yhdistämällä mittausten 1 – 5 tulokset tulisi havaita samankaltainen akustinen vaste kuin mittauksessa 6. Mikäli kontakti mittaasanturin ja testattavan kappaleen välillä jossain näistä mittauksista oli huono, pitäisi sen näkyä tässä vertailussa. Testikappaleelle E eli pelkälle kuparipinnoitteelle tehtiin vielä erillinen suuritaajuusvälinen mittaus lyhimällä mittausetäisyydellä 80mm, missä $f_0 = 100\text{Hz}$ ja $f_1 = 1200\text{kHz}$. Tällä haluttiin selvittää, miten pelkkä kuparipinnoite itsessään välittää korkeilla taajuuksilla olevia mekaanisia aaltoja.

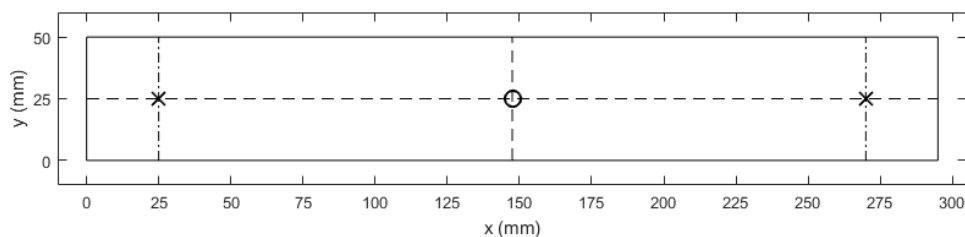
3.3 Yhteneväisyys ja toistettavuustestit

Varsinaisten mittausten lisäksi, millä haetaan vastauksia työn varsinaisiin tutkimuskysymyksiin, haluttiin saada viitettä esitetyn mittausjärjestelyn luomista epävarmuustekijöistä. Yksi suuri huolenaihe oli mittausten toistettavuus ja yhteneväisyys. Sensorien paikkoja vaihdettaessa on tärkeää, että kontakti testikappaleisiin säilyy riittävän

hyvänä, jotta sillä ei olisi mittaustuloksiin haitallisesti vaikuttavaa tekijää. Taulukossa 3.1 esitetyt testikappaleet A, B, C ja D otettiin tarkasteluun näihin kokeisiin, joissa yksinkertaisesti toistettiin samoja mittauksia samoilla alkuasetelmilla. Testien tavoitteena oli selvittää, ovatko saadut vasteet riittävän yhteneväisiä, jotta mitään mittaustulosta voidaan pitää kelvollisena tämän työn esittämässä mittausjärjestelyssä.

Ensimmäisessä testissä poikkeuksellisesti käytettiin vain yhtä kontaktisensoria. Värähtely testikappaleisiin aiheutettiin lyijykynän terän rikkomisella piirilevyn reunaa vasten tietyssä kulmassa. Kyseistä värähtelylähdettä kutsutaan Hsu-Nielsen lähteeksi, joka on suhteellisen helposti toistettavissa oleva heräte. Menetelmä on luotu yksinkertaiseksi tavaksi kalibroida ja testata akustista emissiota mittaavaa laitteistoa. Menetelmää voidaan pitää luotettavana, kunhan muuttujat pysyvät vakioina (Boczar & Lorenc, 2005). Tämän testin kohdalla kuitenkin olennaista oli, että heräte aiheuttaa aina samankaltaisen ja vahvuisen akustisen vasteen. Näissä mittauksissa sensorin absoluuttisella sijainnilla ei ole juurikaan merkitystä, kunhan se on vakio kaikissa verrattavissa mittauksissa. Jokaiselle testikappaleelle suoritettiin kynänteränrikkomistesti kymmenen kertaa siten, että mitta-anturi asetettiin uudelleen mittauskertojen välissä.

Toisessa testissä otettiin värähtelylähteeksi käyttöön toinen kontaktisensori. Signaalia välittävä sensori asetettiin testikappaleen keskelle ja mittaavaa sensoria käytettiin kappaleen molemmissa päissä noin 25mm etäisyydellä reunoista kuvan 3.3 mukaisesti.



Kuva 3.3 Havainnekuva toisesta yhteneväisyystestistä. Signaalilähde on merkitty kuvaan ympyrällä ja mittauspisteet on merkitty x:llä. Mittauspisteet ovat samalla etäisyydellä signaalilähteestä symmetrisesti kappaleen eri reunoilla.

Samoin kuten varsinaisissa mittauksissa, tässä testissä käytettiin syötteenä sinimuotoista lineaarista signaalia taajuuspyyhkäisyinä taajuudesta f_0 taajuuteen f_1 ajassa t jännitteen huippuarvojen ollessa +5V ja -5V. Molemmissa mittauspisteissä $f_0 = 100\text{Hz}$, $f_1 = 40\text{kHz}$,

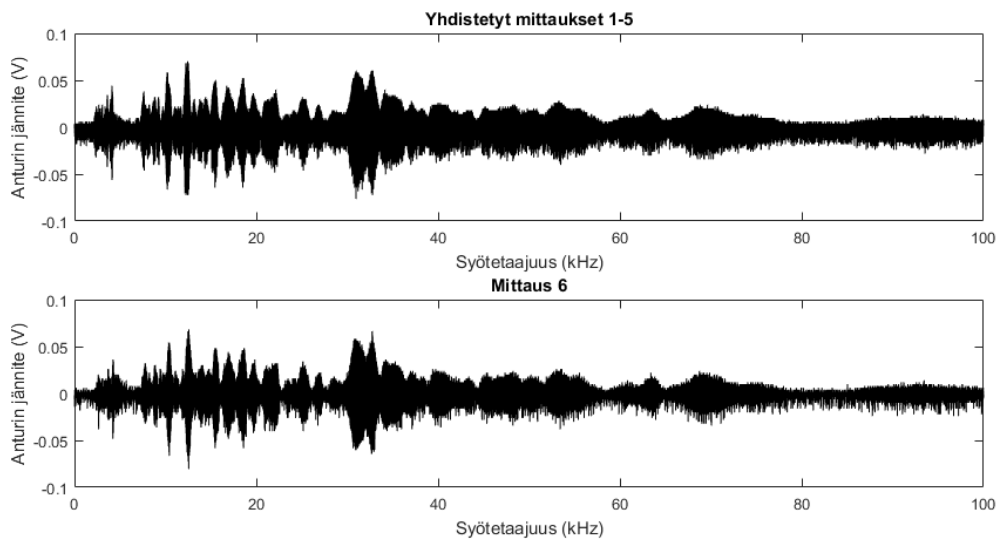
$f_s = 100\text{kHz}$ ja $t = 500\text{ms}$. Ideaalitapauksessa testikappalekohtaisesti mittauksista saatavat vasteet tulisi olla yhteneväisiä.

4. TULOKSET

Tässä kappaleessa käydään läpi edellisessä kappaleessa esitettyjen mittausten tulokset. Arvioidaan niiden luotettavuutta ottaen huomioon myös testit, jotka tehtiin erityisesti luotettavuuden määrittämistä varten. Seuraavissa kappaleissa tehdään päätelmiä siitä, saatiinko tuloksista vastauksia tutkimuskysymyksiin ja pohditaan miten tästä kannattaisi jatkaa.

4.1 Taajuuspyyhkäisytestit

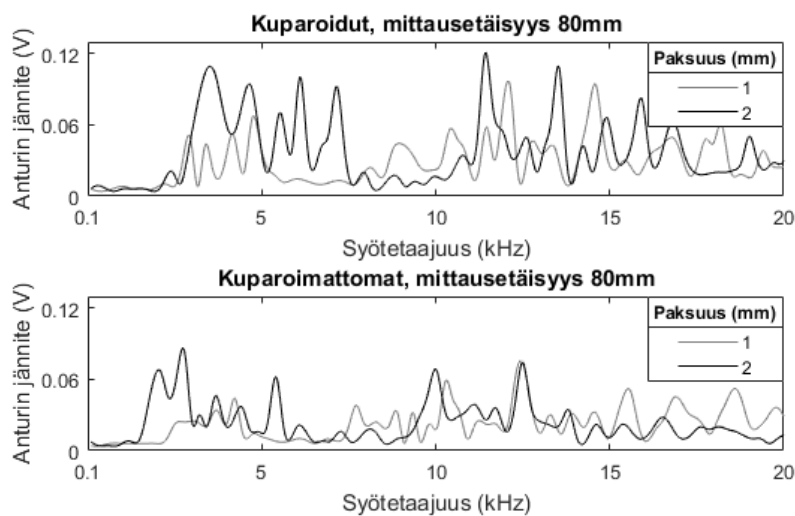
Testikappaleille suoritettiin kappaleessa 3.2 esitetyt mittaukset. Tapauskohtaisesti ensimmäisten viiden taajuuspyyhkäisymittauksen tulokset yhdistettiin ja niitä verrattiin samalla taajuusvälillä tehtyyn erilliseen mittaukseen. Kaikkien testikappaleiden tapauksissa todettiin näiden vertailumittausten sisältävän yhteneväisen signaalimuodon yhdistettyjen mittausten kanssa. Kuvassa 4.1 on esitetty testikappaleesta B havaittu signaali mittausanturin ollessa 80 mm:n etäisyydellä värähtelylähteestä.



Kuva 4.1 Havaittu signaali käsittelemättömänä taajuuspyyhkäisymittauksista testikappaleelle B 80mm:n mittausetäisyydellä. Yllä olevassa kuvaajassa on yhdistetty mittauksista 1 – 5 saatu data ja alla oleva kuvaaja on näiden mittausten vertailumittaus samalta taajuusväliltä.

Kaikissa tehdyissä mittauksissa havaittiin sama kuin testikappaleen B tapauksessa (kuva 4.1), että signaali-kohinasuhde on kohtalaisen pieni signaalin huippujen ollessa vain hivenen taustakohinaa voimakkaampia. Testikappaleesta ja mittausetäisyydestä riippumatta mittausdatasta päätellen signaali on taustakohinan tasolla taajuuden kasvaessa käytännössä kaikissa tapauksissa 50kHz:ä korkeammilla taajuuksilla. Testikappaleelle E tehdyssä erillisessä testissä, mikä vietiin 1200kHz:n asti, saadusta mittaustuloksesta oli myöskin vaikea nähdä mitään erityisesti vahvistuneita taajuuksia 50kHz:n jälkeen. Kyseisessä mittauksessa käytännössä kaikki taajuudet olivat taustakohinan tasolla.

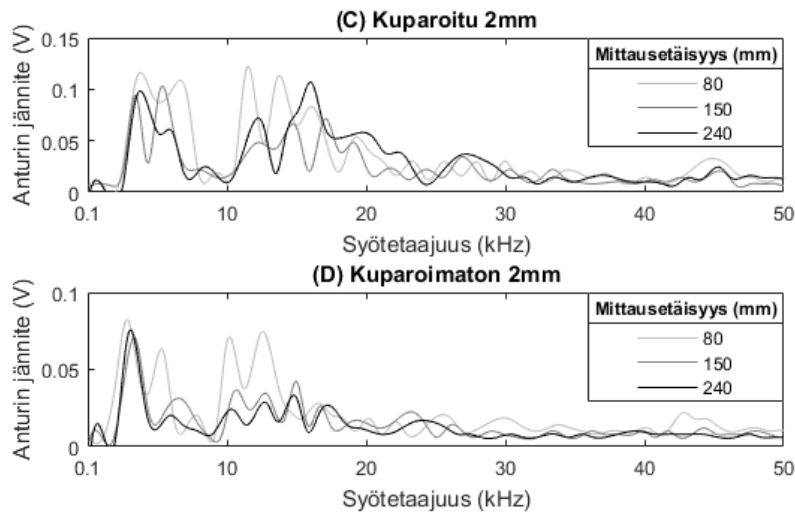
Mittaustuloksien tarkastelun helpottamiseksi mittausdatasta muodostettiin verhoikäyräkuvaajat, missä yhteisiksi tekijöiksi otettiin 80mm mittausetäisyys kuvan 4.2 kuvaajissa ja 2 mm levyn paksuus kuvan 4.3 kuvaajissa. Verhoikäyräkuvaajissa mittausdataa on käsitelty jakamalla näytteet lohkoihin ja interpoloimalla niiden paikalliset maksimit. Näin saatiin pyörästetty käyrä, joka korostaa signaalin huippuja ja siten näyttää signaalimuodon selvemmin kuin käsittelemätön data.



Kuva 4.2 Verhoikäyräkuvaajat kuparipinnoitetuille ja pinnoittamattomille testikappaleille 80mm etäisyydellä mitattuna rajattuna alle 20kHz taajuudelle.

Kuvasta 4.2 on nähtävillä, että riippumatta levyn paksuudesta tai kuparipinnoitteesta, lyhyellä etäisyydellä mitattuna on havaittavissa yhteneväisiä piikkejä havaitussa signaalissa 10 – 15kHz:n taajuusvälillä. Kuparoiduissa kappaleissa nämä piikit ovat vähän selkeämmin esillä ja esiintyvät hivenen korkeammilla taajuuksilla kuin kuparoidottomissa kappaleissa. Ylipäänsä mitatut signaalit kuparoiduista kappaleista olivat jonkin verran vahvempia kuin

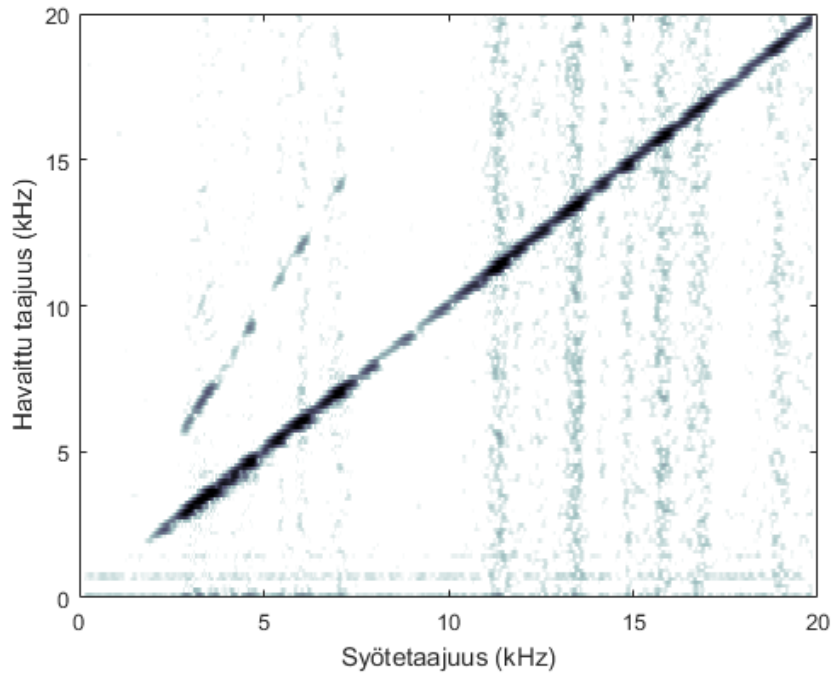
vastaavissa kuparoimattomien kappaleiden tapauksissa, mikä kielisi siitä, että kuparipinnoitteen puuttumisella olisi aallon etenemistä heikentävä vaikutus.



Kuva 4.3 Verhokäyräkuvaajat testikappaleille C ja D tehdyistä mittauksista eri mittausetäisyyksillä rajattuna alle 50kHz taajuudelle.

Yhteneväisiä aaltomuotoja saadusta mittausdatasta oli hankala löytää 1mm paksuisten testikappaleiden osalta, mutta sen sijaan 2mm kappaleista saadusta mittausdatasta pystytään näkemään joitakin yhteneväisyyksiä. Kuvasta 4.3 nähdään, että 2mm paksuisilla levyillä on matalilla alle 25kHz taajuuksilla mittausetäisyydestä riippumatta tunnistettavissa oleva signaalimuoto. Samalla tavoin kuten aikaisemmassa kuvaajassa, tässäkin on nähtävillä kuparoidun kappaleen tapauksessa tunnistettavien huippujen olevan vahvistuneita ja sijoittuneita vähän korkeammille taajuuksille. Lisäksi noin 45kHz taajuuden tuntumassa on havaittavissa yhteneväinen vaikkakin hyvin vaimea huippu. Huomattavaa on myös, että alle 10kHz:n taajuuksilla ei näissä tuloksissa ole havaittavissa mitausetäisyydestä riippuvaa vaimenemista.

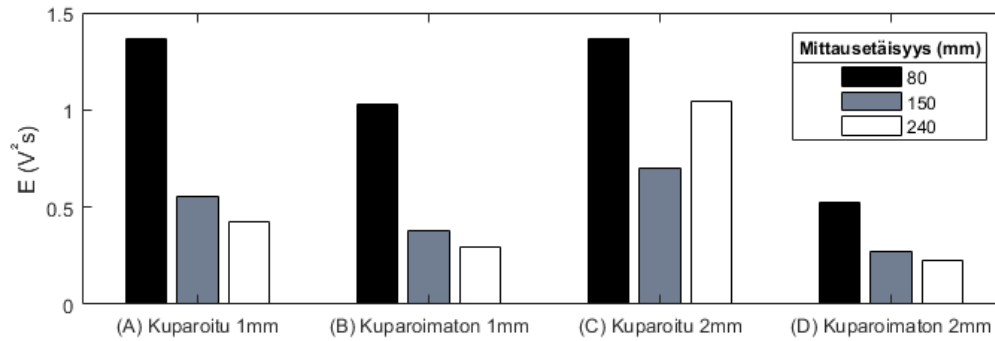
Mahdollisten vahvistuneiden harmonisien havaitsemista varten mittausdatasta muodostettiin spektrogrammeja, jotka näyttävät signaalin vahvuuden eri taajuuksilla ajan funktiona. Mittausten ollessa lineaarisia taajuuspyyhkäyksiä, saadaan tässäkin tapauksessa aika-akseli muutettua suoraan vastaamaan mitattua taajuutta. Monia harmonisia taajuuksia ei kuitenkaan löytynyt, mutta yksi sellainen näkyy esiintyvän taajuuspyyhkäisyn alkupäässä. Kuvassa 4.4 on spektrogrammi, jossa on näkyvissä tämä vahvistunut harmoninen.



Kuva 4.4 Spektrogrammikuvaaja testikappaleelle C tehdyistä mittauksista 80mm etäisyydellä rajattuna alle 20kHz taajuudelle.

Kuvan 4.4 kaltainen ilmiö oli havaittavissa molemmissa 2mm paksuisten testikappaleiden tapauksissa, mutta parhaiten se oli näkyvillä kuparipinnoitteisella ja 80mm etäisyydellä mitattuna. 1mm paksuisissa levyissä sama havaittiin vain kuparipinnoitteisella ja vain 80mm etäisyydellä mitattuna, kuitenkin vaimeampana kuin kuvassa 4.4 näkyvässä C testikappaleen tapauksessa.

Saadusta mittausdatasta pystytään määrittämään signaalienergia kullekin signaalille melko vaivattomasti. Mittausdatan yksittäiset näytteet Fourier muunnetaan ja saadut kertoimet jaetaan näyteistystaajuudella ja sitten neliöidään. Lopuksi neliöidyt kertoimet summataan yhteen, mistä saadaan käytännössä signaalin integraali. Näin muodostettu signaalienergia ei kuitenkaan vastaa energiaa fyysisessä mielessä eli sen yksikkö ei ole joulea (V^2s/Ω) vaan V^2s . Silti näin laskettua signaalienergiaa voidaan pitää esittävän mitatun signaalin vahvuutta sen koko taajuusvälillä. Testattavien kappaleiden mittauksista muodostetut signaalienergiat on koottu kuvaan 4.5 eriteltyinä mittausetäisyyksien perusteella.



Kuva 4.5 Testikappaleille A, B, C ja D tehdyistä mittauksista saadut signaalienergiat mitta-anturin lähtöjännitteestä laskettuna eroteltuina eri mittausetäisyyksille.

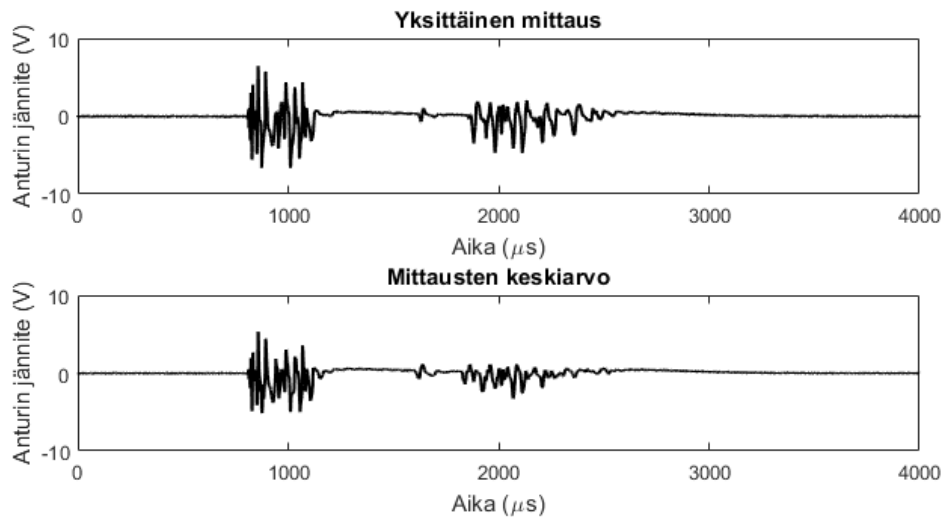
Kuvasta 4.5 päätellen kuparipinnoitteen puuttuminen näyttäisi vaikuttavan signaalin nopeampaan vaimenemiseen etäisyyden funktiona ja siten kuparipinnoitettujen testikappaleiden signaalienergiat ovat suurempia, joskin tämä on parhaiten näkyvissä 80mm etäisyydellä mitattuna. Kaikkien mittausten signaalienergiat myös oletetulla tavalla vähenevät mittauspisteen etäisyyden kasvaessa signaalilähteestä, paitsi kuparoidun 2mm paksuisen kappaleen tapauksessa.

4.2 Yhteneväisyys ja toistettavuustestit

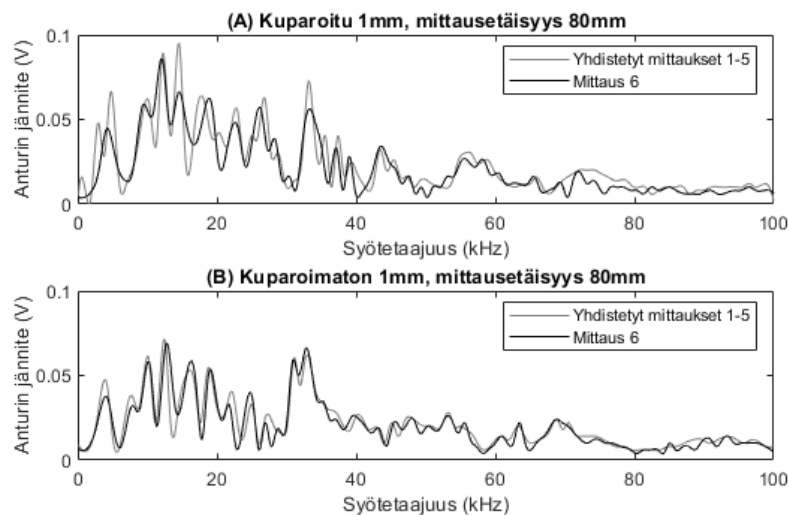
Mittausjärjestelyn toteutuksen mahdollisesti tulosten luotettavuutta heikentävistä tekijöistä haluttiin saada tietoa ja siksi suoritettiin kappaleessa 3.3 esitetyt testit. Ensimmäisenä testinä tehtiin Hsu-Nielsen lähdettä hyödyntävät mittaukset. Jokaiselle testikappaleen kohdalla toistettiin sama mittaus kymmenen kertaa. Kuvassa 4.6 on näkyvillä testikappaleelle B tehtyjen mittausten tuloksia. Hsu-Nielsen lähteen testit osoittavat, että anturin siirtäminen ei vaikuttanut havaittuun signaaliin näissä mittauksissa. Havaittu aaltomuoto oli kussakin testikappaleen tapauksessa tunnistettavissa samaksi poikkeuksetta. Muutama yksittäinen mittaustulos kuitenkin oli toisia huomattavasti vaimeampi.

Toisessa testissä käytettiin kontaktisensoria signaalilähteenä samalla tavalla kuin varsinaisissa mittauksissa. Yhteneväisyyttä tarkasteltiin suorittamalla testikappaleille symmetriset mittaukset, missä mitta-anturia siirrettiin kerran mittauskertojen välissä (Kuva 3.3). Näistä mittaustuloksista saatiin toistensa kanssa yhteneväisiä signaalimuotoja. Tulos on vastaavanlainen pääasiallisissa taajuuspyyhkäisymittauksissa tehdyistä yhdistetyistä mittauksista ja niiden vertailumittauksesta (Taulukko 3.3). Kuvassa 4.7 on näkyvillä

yhteneväiset aaltomuodot samoista mittauksista eri mittauskerroilla. Testikappaleen A tapaus on esimerkki huonosta vastaavuudesta ja testikappaleen B hyvästä vastaavuudesta. Yleisesti ottaen toistettavuus vaikuttaa olevan hyvä.



Kuva 4.6 Havaittu aalto testikappaleesta B käyttäen Hsu-Nielsen lähdetä herätteenä. Ylemmässä kuvassa eräs yksittäinen mittaus ja alla keskiarvo kymmenestä samalle kappaleelle tehdystä mittauksesta.



Kuva 4.7 Verhokäyräkuvaajat kappaleille A ja B tehdyistä mittauksista lyhimmillä mittausetäisyydellä verraten yhdistettyjen mittausten 1-5 ja mittauksen 6 tuloksia koko taajuusvälillä.

4.3 Tulosten epävarmuustekijät

Mittauksien sisältäessä epäideaalisuuksia, kuten käsivaralla määritetyt mittauspisteet ja anturien väliset etäisyydet sekä anturien uudelleen asettelusta mahdollisesti johtuvat erilaatuiset kontaktit sensorin ja testikappaleen välillä, tehtiin edellä esitetyt testit. Niiden perusteella varsinaisia mittauksia voisi pitää osin kelvollisina, että mittausjärjestely itsessään ei ole tehnyt saatuja tuloksia hyödyntämiskelvottomiksi. Kuitenkin Hsu-Nielsen lähteen testeissä saatiin muutamia selkeitä poikkeuksia, joissa signaalin vahvuus oli huomattavasti vaimeampi kuin muissa mittauksissa. Tämä selittää mahdollisesti sen, miksi signaalienergia (Kuva 4.5) testikappaleen C tapauksessa vaikuttaa omituiselta. Anturin kontakti on ilmeisesti ollut näissä mittauksissa keskivertoa heikompi 150mm etäisyyden kohdalla ja parempi 240mm etäisyydellä.

Lisäksi mittausten suorittamisen jälkeen huomattiin perustavalaatuinen systemaattinen virhe, jolla voi olla suoranainen vaikutus saatuihin tuloksiin. Kaikissa mittauksissa käytetystä syötetaajuudesta huolimatta näytteistystaajuus f_s pidettiin 100kHz:ssä. Nyquist-Shannon näytteenottoteoreeman mukaan näytteistettävät taajuudet, mitkä ylittävät tai lähestyvät taajuutta $f_s/2$ laskostuvat alempien taajuuksien päälle ja siten mittaustulokset eivät suoranaisesti vastaa täysin totuutta (Peltonen & Perkkiö, 2000). Tuloksien luotettavuuden varmistamisen parantamiseksi olisi kannattanut tehdä mittauksia vähintään yhdellä toisen mallisella kontaktisensorilla myös siksi, että käytetyn kontaktisensorin herkin taajuusalue on mittaustulosten kannalta kiinnostavan alueen yläpuolella.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Piirilevyn epähomogeeninen rakenne ja kerroksittaisuus tekevät siitä hankalan mallinnettavan mekaanisen aallon etenemisen kannalta. Työn teoriaosuus käsitti hyvin pintapuolisesti aiheeseen liittyvää aaltofysiikkaa, joten piirilevyn akustisia ominaispiirteitä selvitettiin pääasiallisesti kokeellisesti. Tehtyjen kokeiden perusteella havaittiin, että testissä olleet piirilevyt välittivät parhaiten kuuloalueen taajuudella ja vähän sen yläpuolella olleita aaltoja, joista tietyt taajuudet muodostivat vahvistuneita piikkejä signaalimuodossa. Samat piikit olivat havaittavissa sekä kuparipinnoitteisissa että pinnoittamattomissa kappaleissa.

Kuparoitujen kappaleiden tapauksissa kaikki vahvistuneet piikit olivat korkeammalla taajuudella kuin kuparoimattomissa kappaleissa. Siirtymää näillä vahvistuneilla piikeillä oli

noin 1 – 1.5kHz:n verran. Havainnon syy ei ole selvillä. Kuparipinnoitteella näyttäisi olevan myös havaitun signaalin yleistä voimakkuutta parantava vaikutus, mikä oli eritoten nähtävillä lähimmiltä 80mm etäisyydeltä tehdyissä mittauksissa lasketun signaalienergian perusteella. Puhtaat metallit tunnetusti välittävät ääntä erityisen hyvin, mistä tämä todennäköisesti johtuukin. Viimeisimmät vahvistuneet signaalit, mitkä ylittivät taustakohinan tason, olivat korkeammilla taajuuksilla noin 45kHz tuntumassa kuparipinnoitteisilla testikappaleilla.

Kuparipinnoitteesta huolimatta paksummat 2mm testikappaleet välittävät matalampi taajuuksista 10kHz – 25kHz värähtelyä paremmin kuin 1mm paksuiset kappaleet. Kapeampien kappaleiden tapauksissa havaittu signaali vaimeni huomattavasti nopeammin kuin paksuilla mittausetäisyyden kasvaessa. Ohuelle kuparipinnoille tehdyissä testeissä havaittu signaali vaimeni käytännössä kauttaaltaan taustakohinan tasolle. Tämä saattaa olla seurausta mittajärjestelystä, missä testikappaleet oli asetettu vaahtomuovin päälle. Vaahtomuovi on todennäköisesti vaimentanut värähtelyä jonkin verran ja mahdollisesti tämä vaimeneminen on merkittävämpää ohuemmillä kappaleilla.

Edellä mainittujen tulosten valossa, kun palataan työn taustoihin liittyviin yksittäisten komponenttien akustisiin emissioihin, ei niiden tapauksissa välttämättä tarvitse huomioida piirilevyä. Jos pintaliitoskomponentti värähtelee huomattavasti korkeammalla taajuudella kuin 50kHz, piirilevyn ei pitäisi kyetä välittämään värähtelyä komponentista toiseen. Piirilevyn voidaan katsoa tällaisessa tapauksessa toimivan akustisena eristeenä. Mikäli kuitenkin 50kHz:ä matalammat taajuudet ja varsinkin kuuloalueen taajuudet ovat tarkastelussa, piirilevy tulee ehdottomasti huomioida näiden aaltojen välittäjänä.

6. YHTEENVETO

Monet elektroniikan komponentit aiheuttavat akustista emissiota ollessaan vaihtojännitteisiä ja tätä ilmiötä voidaan mahdollisesti käyttää niiden epätuhoisassa laaduntarkkailussa. Toistaiseksi näin ei kuitenkaan elektroniikan sovellutuksissa yleisesti tehdä, mutta joidenkin komponenttien tapauksissa on pystytty osoittamaan, että vikaantuneet komponentit on mahdollista havaita luotettavasti hyödyntäen akustista emissiota. Piirilevy on osallisena käytännössä kaikissa elektroniikan laitteissa, koska se toimii pohjana, jolle elektroninen

logiikka rakennetaan. Näin ollen piirilevyn akustisten ominaisuuksien tuntemus voi olla hyödyllistä sellaisissa tutkimuksissa, jotka vievät aiheeseen liittyvää teknologiaa eteenpäin. Työssä mainittiin muutamia erilaisia tapoja mitata värähtelyä piirilevyltä, mutta päädyttiin käyttämään pietsosähköistä kontaktisensoria työn esittämässä mittausjärjestelyssä, koska sillä todettiin olevan vaihtoehtoista parhaimmat edellytykset oikeellisten tuloksien saavuttamiseksi esitetyissä mittauksissa. Mittausten tulokset erinäisistä epävarmuustekijöistä kuten esimerkiksi liian alhaisesta näytteistystaajuudesta ja antureiden käsivara asetelusta huolimatta vaikuttivat riittävän luotettavilta, jotta niiden pohjalta pystyttiin tekemään seuraavanlaisia päätelmiä. Piirilevyn paksuudella ja kuparipinnoitteella on vaikutusta mitatun värähtelyn vahvuuteen ja siihen, kuinka nopeasti se vaimenee mittausetäisyyden kasvaessa värähtelylähteestä. Näyttäisi myös siltä, että piirilevy ylipäänsä toimii parhaiten kuuloalueen taajuudella värähtelevien aaltojen välittäjänä ja sitä huomattavasti korkeammilla taajuuksilla oleva värähtely vaimenee käytännössä erottamattomaksi taustakohinasta. Joitakin erityispiirteisiä vahvistuneita taajuuksia löytyi kuuloalueelta.

Jatkoa ajatellen olisi hyvä toistaa työssä esitetyt mittaukset uudelleen siten, että mitatun signaalin näytteistystaajuus on riittävän korkea, ettei se aiheuta tulosten laskostumista. Tulosten luotettavuutta voisi parantaa toistamalla taajuuspyyhkäisymittaukset useamman kerran sekä suorittamalla ne yhdellä tai useammalla eri kontaktisensorilla. Anturien sijoittamistarkkuutta voisi parantaa rakentamalla mittauksia varten jonkinlainen säädettävä taso, jossa olisi antureiden liikuttamista varten portaaton säätömahdollisuus ja kiinteä mittaasteikko. Suoranaisia jatkotutkimuksia ajatellen seuraavaksi voisi tutkia esimerkiksi erilaisten kiinnitysten vaikutusta piirilevyn värähtelyyn.

LÄHTEET

Boczar, T. & Lorenc, M. 2005. *The repeatability and reproducibility of calibrating signals generated by Hsu-Nielsen method*. Journal de Physique IV, vol. 129, pp. 97-103

Gopalakrishnan, S., Chakraborty, A. & Mahapatra, D. R. 2008. *Spectral Finite Element Method – Wave Propagation, Diagnostics and Control in Anisotropic and Inhomogeneous Structures*. Springer Berlin Heidelberg.

Grosse, C. & Ohtsu, M. 2008. *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg.

Tarula, J. 2017. *An acoustic screening system for multilayer ceramic capacitors – a prototype*. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology

NEMA LI 1-1998. *Industrial Laminated Thermosetting Products*. Standard. National Electrical Manufacturers Association.

Keysight Technologies 2018. *InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes*. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2018] saatavilla <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-6618EN.pdf>

KRN Services 2015. *KRNBB-PC Point Contact Sensor*. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2018] saatavilla http://www.krnservices.com/documents/bbpc_flyer_4-13-15.pdf

Kärkkäinen, T. 2015. *Observations of Acoustic Emission in Power Semiconductors*. Väitöskirja. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology

Levikari, S. 2016. *Detection of Cracks – Acoustic Experiments on Multilayer Ceramic Capacitors*. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology

Levikari, S., Kärkkäinen, J. T., Andersson, C., Tamminen, J. & Silventoinen, P. 2018. *Acoustic Phenomena in Damaged Ceramic Capacitors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, pp. 570-577

Moheimani, S.O. R. & Fleming, J. A. 2006. *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer Berlin Heidelberg.

Nichols, R. W. 1976. *Acoustic Emissions*. Applied Science Publishers LTD, London.

Tipler, P. A. & Mosca G. 2004. *Physics for Scientists and Engineers*. W. H. Freeman and Company, New York.

Peltonen, H. & Perkkiö, J. 2000. *Insinöörin (AMK) Fysiikka osa II*. GUMMERUS Kirjapaino OY, Jyväskylä.

Prymak, J. 2006. *Piezoelectric Effects Ceramic Chip Capacitors (Singing Capacitors)*, Arrow Asian Times, Elokuu 2006

Shannon, R., Zucaro, G., Tallent, J., Collins, V. & Carswell, J. 2018. *A System for Detecting Failed Electronics Using Acoustics*. IEEE AUTOTESTCON September 17 – 20, National Harbor, Oxon Hill, Maryland, United States of America.