LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

MOBIILILAITTEIDEN KÄYTTÖ VÄRÄHTELYANALYYSISSÄ

MOBILE DEVICE USAGE IN A VIBRATION ANALYSIS

Lappeenrannassa
Arttu Lassila
Tarkastaja TkT Emil Kurvinen
Ohjaaja TkT Emil Kurvinen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Arttu Lassila

Mobiililaitteiden käyttö värähtelyanalyysissä

Kandidaatintyö

2020

33 sivua, 23 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Emil Kurvinen

Ohjaaja: TkT Emil Kurvinen

Hakusanat: moodianalyysi, värähtelymekaniikka

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan erilaisten mobiililaitteiden soveltuvuutta toimia mittalaitteistona värähtelyanalyysissä. Työn tavoitteena on saada tietoa mahdollisuuksista, joita mobiililaitteet voivat tarjota värähtelyanalyysikentällä. Tutkimusmenetelminä ovat kirjallisuuskatsaus, sekä käytännön mittaus. Käytännön kokeessa saatuja tuloksia vertailtiin keskenään ja pohdittiin erilaisia mittaukseen vaikuttavia tekijöitä. Mittaustilanne käydään työssä läpi, jotta se on mahdollista toistaa jatkotutkimuksia tehdessä.

Kaikki kappaleet värähtelevät tasapainoasemansa ympäri. Suunnitellessa koneita ja laitteita kappaleiden värähtelyt on otettava huomioon, jotta vältytään epätoivotuilta tilanteilta, joita vääränlainen värähtely voi aiheuttaa. Mobiililaitteiden sensorit kykenevät tunnistamaan ominaistaajuuksia erittäin hyvin, joka mahdollistaa värähtelyanalyysin tekemiseen nopeasti ja edullisesti. Helppokäyttöiset kannettavat laitteet, kuten puhelimet ja tabletit voisivat hoitaa tehtävän nopeasti ja helposti. Työn tulosten perusteella voidaan todeta, että mikrofonilla ja etenkin mobiililaitteen mikrofonilla pystytään mittaamaan luotettavia värähtelyn taajuuksia, sekä amplitudeja.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Arttu Lassila

Mobile device usage in a vibration analysis

Bachelor’s thesis

2020

33 pages, 23 figures and 2 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Emil Kurvinen

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Emil Kurvinen

Keywords: modal analysis, vibration mechanics

This bachelor's thesis investigates the suitability of various mobile devices to act as a measuring device in vibration analysis. The aim of this work is to obtain information about the possibilities that mobile devices can offer in the field of vibration analysis. The research methods are a literature review and a practical measurement. The results obtained in the practical experiment were compared with each other and various factors affecting the measurement were considered. The measurement situation is reviewed during the work so that it can be repeated in further studies.

All the pieces vibrate around their equilibrium position. When designing machinery and equipment, the vibrations of the parts must be considered to avoid undesirable situations which may be caused by incorrect vibrations. Mobile devices are excellent options for performing vibration analysis quickly and at low cost. Easy-to-use portable devices such as phones and tablets could do the job quickly and easily. Based on the results of the work, it can be stated that the microphone and especially the microphone of a mobile device can measure reliable oscillation frequencies, as well as amplitudes.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ **2**
ABSTRACT **3**
SISÄLLYSLUETTELO **4**
SYMBOLILUETTELO **5**
1 JOHDANTO **6**
1.1 Työn tausta 6
1.2 Työn rajaus 7
2 MENETELMÄT **8**
2.1 Värähtely 8
2.1.1 Ensimmäisen vapausasteen värähtelijä 8
2.1.2 Useamman vapausasteen värähtelijä 11
2.1.3 Taajuusvastefunktio 12
2.2 Moodianalyysi 14
2.2.1 Värähtelevän kappaleen ominaismuodot 15
2.2.2 Moodianalyysistä saatava data 17
2.3 Mobiililaitteet 19
2.3.1 MEMS-mikrofoni 19
3 VÄRÄHTELYN MITTAUSKOE MOBIILILAITTEELLA **21**
3.1.1 Käytetty laitteisto 22
3.1.2 Mittaustapahtuma 23
4 TULOKSET JA ANALYSOINTI **25**
4.1 Mittaustulokset 25
4.2 Tulosten analysointi 29
5 JOHTOPÄÄTÖKSET **31**
LÄHTEET **32**

SYMBOLILUETTELO

m värähtelijän massa

c vaimennuskerroin

k värähtelijän jousivakio

ẍ aseman toinen aikaderivaatta eli kiihtyvyys

ẋ aseman ensimmäinen aikaderivaatta eli nopeus

x asema ajan suhteen

$\boldsymbol{M}$ massamatriisi

$\boldsymbol{C}$ vaimennusmatriisi

$\boldsymbol{K}$ jäykkyysmatriisi

x paikkavektori ajan suhteen

ẋ nopeusvektori

ẍ kiihtyvyysvektori

$\boldsymbol{f}$ voimavektori

t aika

ω ominaiskulmataajuus

ξ vaimennuskerroin

j imaginääriyksikkö

A vakiotermi

F voima

X vakiotermi

H kompleksimuotoinen taajuusvastefunktio

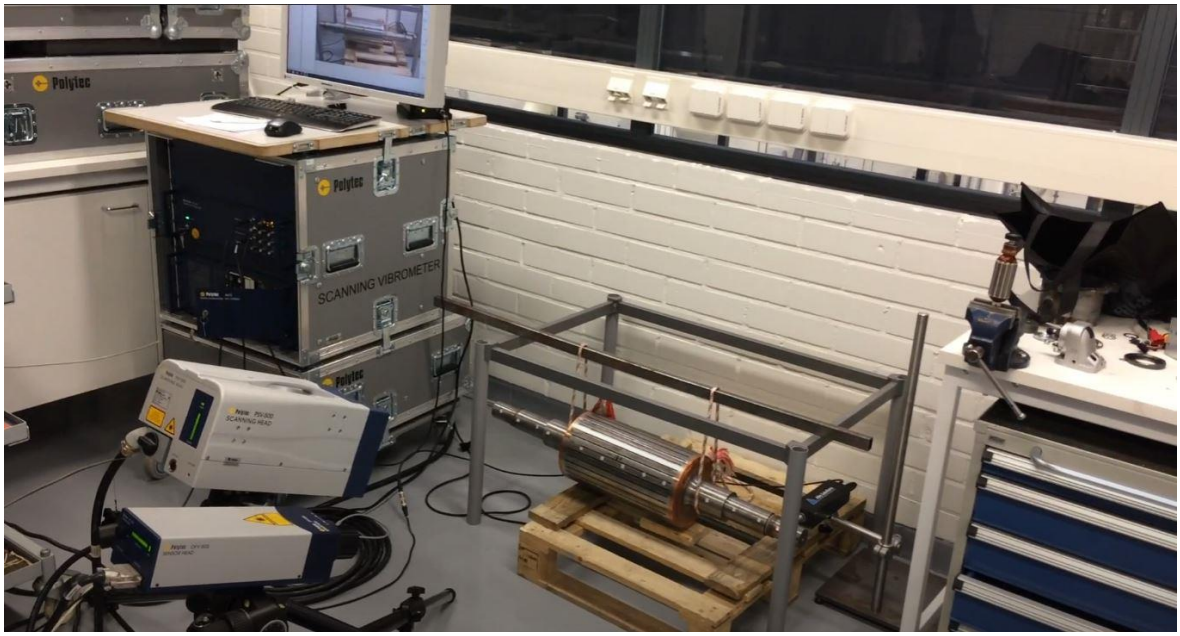
ζ_s vaimennussuhde

1 JOHDANTO

Sähkömoottorit koostuvat roottorista, staattorista ja rungosta, jossa ne ovat kiinni. Roottori pyörii yleensä staattorin sisällä sähkömagneettien avulla. Sähkömoottoreita käytetään monissa teollisuuden sovelluksissa, mutta myös monissa kaupallisissa, asuin-, maatalous-, ja kuljetusalan sovelluksissa. Tyypillisesti sähkömoottori on moottorijärjestelmän komponentti, joka muuttaa sähkövoiman mekaaniseksi voimaksi. Moottorijärjestelmän kulutus vastaa sähkönkulutusta sen moottoreista ja lisäksi pientä lisämäärää voimajärjestelmän ohjaimista. Sähkömoottoreiden sähkönkulutusta on yritetty arvioida globaalilla tasolla harvoin, mutta tehdyt arviot ovat yleensä arvioineen sen olevan yli 40 % kaikesta sähköstä maailmalla. Tämä tarkoittaa, että sähkömoottorijärjestelmät ovat suurin sähkönkuluttaja maailmanlaajuisesti. (IEA, 2011)

1.1 Työn tausta

Kaikki kappaleet värähtelevät tasapainoasemansa ympäri. Suunnitellessa koneita ja laitteita kappaleiden värähtelyt on otettava huomioon, jotta vältytään epätoivotuilta tilanteilta, joita vääränlainen värähtely voi aiheuttaa. Ymmärtämällä värähtelyn teoriaa voidaan analysoida värähtelyt siten, etteivät ne aiheuta harmia staattisissa rakenteissa tai mekaanisissa koneissa. Kappaleen tai rakenteen värähtelyä voi mitata kiihtyvyysanturilla, laserilla tai mikrofonilla. Näillä mittaustavoilla on hyvät ja huonot puolensa. Esimerkiksi kiihtyvyysanturilla mitattaessa anturin kiinnitys voi olla vaikeaa pieneen kappaleeseen tai monimutkaiseen paikkaan, mutta mittauksen onnistuessa tulokset ovat tarkkoja. Mikrofonilla mitatessa huonona puolena ovat ympäristön äänien vaikutus mittaustuloksiin, ja hyvänä puolena on helppo mittausprosessi ja helposti löytyvä mittauskalusto, esimerkiksi matkapuhelin tai tabletti. Mittaustavan valinta riippuu kappaleesta, tarkoituksesta ja saatavilla olevista resursseista.



Kuva 1. Laser-moodianalyysilaitteisto sekä analysoitava roottori

Mobiililaitteet ovat erinomaisia vaihtoehtoja värähtelyanalyysin tekemiseen nopeasti ja matalilla kustannuksilla. Helppokäyttöiset kannettavat laitteet, kuten puhelimet ja tabletit voisivat hoitaa tehtävän nopeasti ja helposti. Kyseisten laitteiden soveltuvuutta värähtelyanalyysin tekemiseen ei ole tutkittu tarkasti, eikä niiden kykyä luoda riittäviä tuloksia tunneta värähtelyanalyysi kentällä. Tutkimuksen suurin kysymys onkin näiden laitteiden soveltuvuus värähtelyanalyysin tekemiseen. Selvitettävää on niiden sensoreiden kyvyssä vastaanottaa eritaajuisia ääniaaltoja.

1.2 Työn rajaus

Tutkimukseen kuuluu osio, jossa tutustutaan yleisesti kirjallisuuskatsausmaisesti värähtelyanalyysiin esitellen sen teoriaa, tarkoitusta ja toteuttamisympäristöä. Mobiililaitteiden sensorien mallit ja ominaisuudet selvitetään kirjallisuuskatsauksella, sekä tutustutaan taajuusanalysaattoreihin, joita mobiililaitteet hyödyntävät. Tutkimuksessa on kokeellinen osuus, jossa käytännössä kokeillaan kahta mobiililaitetta värähtelyanalyysin tekemiseen. Mobiililaitteella saatuja tuloksia verrataan erillisellä mikrofonilla mitattuihin tuloksiin, vibrometrin tuloksiin, sekä RoBeDyn-mallista saatuihin tuloksiin. Näiden vertailujen pohjalta tehdään johtopäätöksiä mobiililaitteiden käyttökelpoisuudesta värähtelyanalyysejä tehdessä.

2 MENETELMÄT

2.1 Värähtely

Värähtelyn teoria käsittää värähtelevän liikkeen fyysisessä systeemissä kolme värähtelytyyppiä, jotka ovat harmoninen värähtely, jaksottainen värähtely ja yleinen värähtely, jossa jaksonaika vaihtelee ajan mittaan. (Shabana 2019, s.2)

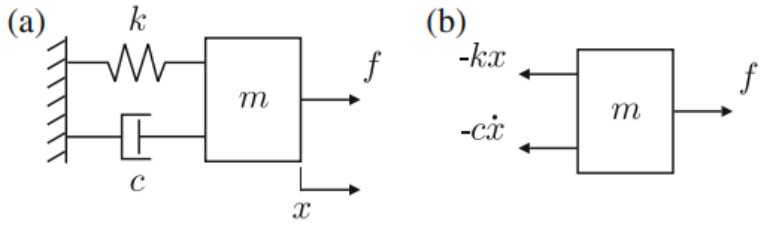
Värähtelyn voi jakaa vapaaseen ja pakotettuun värähtelyyn. Vapaassa värähtelyssä kappaleeseen ei vaikuta ulkoisia voimia, kun taas pakotettu värähtely aiheutuu ulkoisista voimista. Molemmissa tapauksissa systeemin on pystyttävä vaimentamaan värähtelyä. vaimennusta voidaan tuottaa esimerkiksi erilaisilla jousilla. Systeemeihin vaikuttava värähtely johtuu hitauden ja elastisten voimien yhteysvaikutuksesta. Kappaleen hitautta voidaan ilmaista massana, hitausmomenttina tai ajan derivaattana. Elastiset voimat voidaan ilmaista sen sijaan siirtymien ja jäykkyyden suureina. Vaikka vaimennuksella on huomattava vaikutus värähtelyanalyysiin ja se on värähtelyanalyysin peruselementti voi värähtelyä tapahtua vaimentamattakin. (Shabana 2019, s. 3-4)

2.1.1 Ensimmäisen vapausasteen värähtelijä

Tarkastellaan kuvassa 2a esitettyä ensimmäisen vapausasteen värähtelijää. Värähtelijään vaikuttaa sen massa m, jousivakio k ja vaimennuskerroin c. $\boldsymbol{f}$ on järjestelmään kohdistuva ulkoinen voima, joka on määritetty positiiviseksi suuntaan x. Värähtelijän vapaakappalekuva on esitetty kuvassa 2b. Vapaakappalekuvasta nähdään, että jousivoima kx ja vaimennusvoima $c\dot{x}$ ovat vastakkaiset voimalle f. Newtonin lakia käyttäen värähtelyn liikeyhtälöksi saadaan

$$m\ddot{x} = \boldsymbol{f} - c\dot{x} - kx$$
$$\boldsymbol{f} = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx$$

Kaikissa seuraavissa pohdinnoissa oletetaan, että vaimennus on vähäinen, joten vapaa vaste on värähtelevä ja sitä säätelee homogeeninen yhtälö (Preumont 2013, s.2)



Kuva 2. Ensimmäisen vapausasteen värähtelijän kuva(a) ja vapaakappalekuva(b)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{1.}$$

Epätriviaali ($\neq 0$) vastaus $x = Ae^{st}$ esiintyy vain ja ainoastaan jos

$$ms^2 + cs + k = 0 \tag{2.}$$

Tämä on ominaisyhtälö, jonka ratkaisut ovat systeemin ominaisarvoja:

$$s = -\frac{c}{2m} \pm j\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} \tag{3.}$$

Määritetään (vaimentamaton) ominaistaajuus ω_n ja vaimennuskerroin ξ seuraavasti:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \tag{4.}$$

$$\xi\omega_n = \frac{c}{2m} \tag{5.}$$

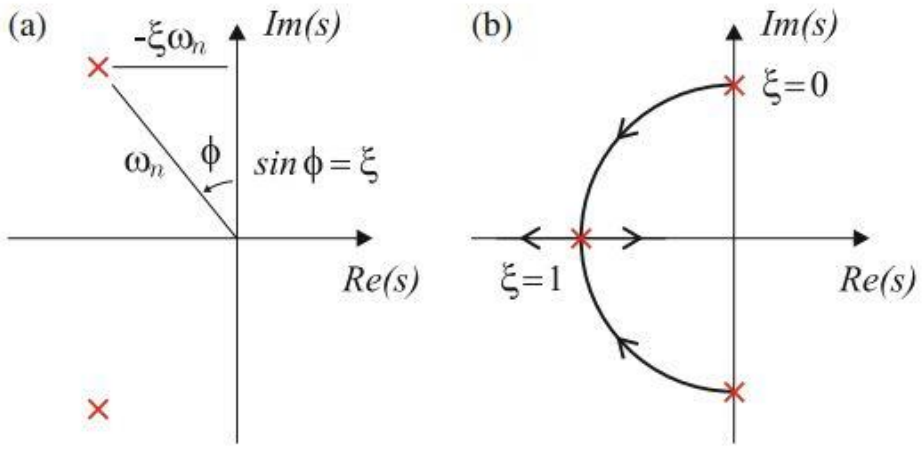
Tällöin yhtälö saa muodon:

$$s = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \tag{6.}$$

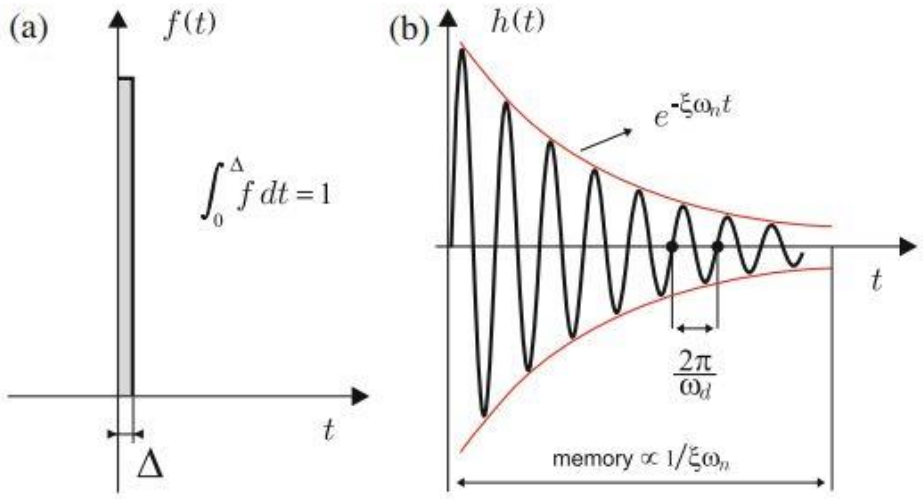
Yhtälössä oletetaan, että ξ < 1, joka on edellytys värähtelylle. Ominaisyhtälön ratkaisuja kutsutaan systeemin navoiksi lineaarisessa systeemiteoriassa. Ne sijoittuvat kuten kuvassa 3, jossa ominaistaajuuden ja vaimennuskerroin, sekä napojen sijainti on korostettu kompleksitasossa. Ominaisarvon imaginaariosaa $\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ kutsutaan vaimennetuksi ominaistaajuudeksi. Useimmissa käytännön sovelluksissa kuitenkin pätee $\omega_d \approx \omega_n$ .Yleisin ratkaisu yhtälöstä 1.3 on (Preumont 2013, s.2)

$$x = e^{-\xi\omega_n t}\left(Ae^{j\omega_d t} + Be^{-j\omega_d t}\right) = e^{-\xi\omega_n t}(A_1\cos(\omega_d t) + B_1\sin(\omega_d t)) \qquad (7.)$$

Jossa A, B, A_1, B_1 ovat vakioita, jotka riippuvat lähtötilanteesta.



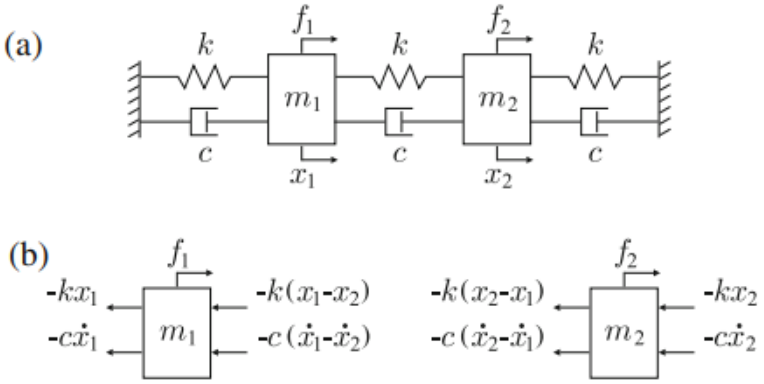
Kuva 3. (a) Lineaarisen värähtelijän napojen sijainti kompleksitasossa ja niiden suhde ominaistaajuuteen ja vaimennuskertoimeen. (b) Napojen sijainti suhteessa vaimennuskertoimeen. (Preumont 2013, s.3)



Kuva 4. (a) Herätteen voima. (b) Herätteen vaste lineaarisessa värähtelijässä. (Preumont 2013, s.3)

2.1.2 Useamman vapausasteen värähtelijä

Useamman vapausasteen tapauksissa pätee sama Newtonin laki, kuin ensimmäisen vapausasteen tapauksessa. Kuvassa 5a on esitetty toisen vapausasteen värähtelijä ja kuvassa 5b värähtelijän vapaakappalekuva.



Kuva 5. Toisen vapausasteen värähtelijän kuva (a) ja vapaakappalekuva (b)

Newtonin lakia hyödyntäen saadaan yhtälöt

$$m_1\ddot{x}_1 = \boldsymbol{f_1} + c * (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k * (x_2 - x_1) - kx_1 - c\dot{x}_1 \quad (8.)$$
$$m_2\ddot{x}_2 = \boldsymbol{f_2} + c * (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k * (x_1 - x_2) - kx_2 - c\dot{x}_2$$

Yhtälöt voidaan yhdistää matriisiksi ja merkitä yleisellä merkintätavalla

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathrm{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\mathrm{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{f} \tag{9.}$$

Jossa $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^{\mathrm{T}}$ on vektori.

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{10.}$$

on massamatriisi.

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 2k & -k \\ -k & 2k \end{bmatrix} \tag{11.}$$

on jäykkyys matriisi.

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 2c & -c \\ -c & 2c \end{bmatrix} \tag{12.}$$

on vaimennus matriisi. (Preumont 2013, s.16)

2.1.3 Taajuusvastefunktio

Eulerin trigonometristen funktioiden kaava yhdistää eksponentiaalisen funktion harmoniseen värähtelyyn kompleksin avulla.

$$Ae^{j\omega t} = A\cos(\omega t) + (A\sin(\omega t))j \tag{13.}$$

$Ae^{j\omega t}$ edustaa harmonista funktiota ja sitä voidaan käyttää kuvaamaan harmonista liikettä, joten yhtälö voidaan kirjoittaa kompleksimuotoon.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 e^{j\omega t} \tag{14.}$$

Kompleksiyhtälön reaaliosa vastaa fyysistä ratkaisua $x(t)$ ja se voidaan esittää.

$$x_p(t) = Xe^{j\omega t} \tag{15.}$$

Sijoittamalla tämä yhtälö saadaan

$$(-\omega^2 m + cj\omega + k)Xe^{j\omega t} = F_0 e^{j\omega t} \tag{16.}$$

Koska $e^{j\omega t}$ ei voi koskaan olla nolla, niin supistamalla lausekkeesta saadaan kompleksimuotoinen taajuusvastefunktio

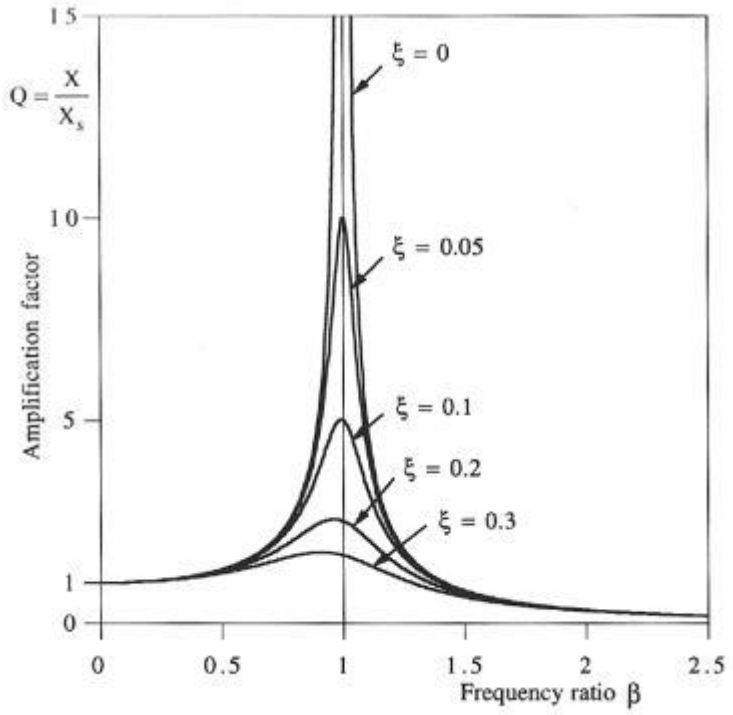
$$H(j\omega) = \frac{1}{(k - m\omega^2) + (c\omega j)} \tag{17.}$$

(Inman 2001, s. 109-110)

Taajuusvastefunktion huippukohtien arvoihin vaikuttaa vaimennus. Voimakkaampi vaimennus aiheuttaa matalammat huippukohtien arvot. Vaimennussuhde voidaan määrittää puolitehopisteiden avulla.

$$\xi_s = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \tag{18.}$$

ω_d on vaimennettu ominaistaajuus. ω_a ja ω_b ovat puolitehopisteitä. (Inman, s. 511) Vaimennuksen vaikutusta taajuusvastefunktion huippukohtiin on kuvattu kuvassa 6



Kuva 6. Taajuusvastefunktion huippukohtien arvojen muutos suhteessa vaimennuksen muutokseen. (Maia & Silva 1997, s. 11)

Yleensä värähtelyä mitataan kappaleen liikkeenä, joten vastaava taajuusvastefunktio voi olla esitetty siirtymän, nopeuden tai kiintyvyyden termeillä. Tämä yksinkertainen liikevoimasuhde on ollut tiedossa pitkään ja sitä on aikaisemmin kuvattu voiman suhteella liikkeeseen. Eri komponenteista rakennetuilla taajuusvastefunktioilla on erinimiä riippuen käytetystä vasteesta ja funktion käänteisyydestä. Funktioiden nimet esitetään englanniksi, koska niille ei ole yksiselitteistä suomenkielistä vastiketta. Jos vasteena käytetään siirtymää, yhtälöä kutsutaan niemellä *receptance*(jousto). Vasteen ollessa nopeus, yhtälö saa nimen *mobility* (liikkuvuus). Kiihtyvyyden ollessa vasteena, yhtälö saa nimen *accelerance* (kiihtymiskyky). Näiden yhtälöiden käänteisfunktiot ovat samassa järjestyksessä, *dynamic stiffness* (dynaaminen jäykkyys), *mechanical Impedance* (mekaaninen impedanssi) ja *apparent Mass* (näennäinen massa). (Maia & Silva 1997, s.38)

2.2 Moodianalyysi

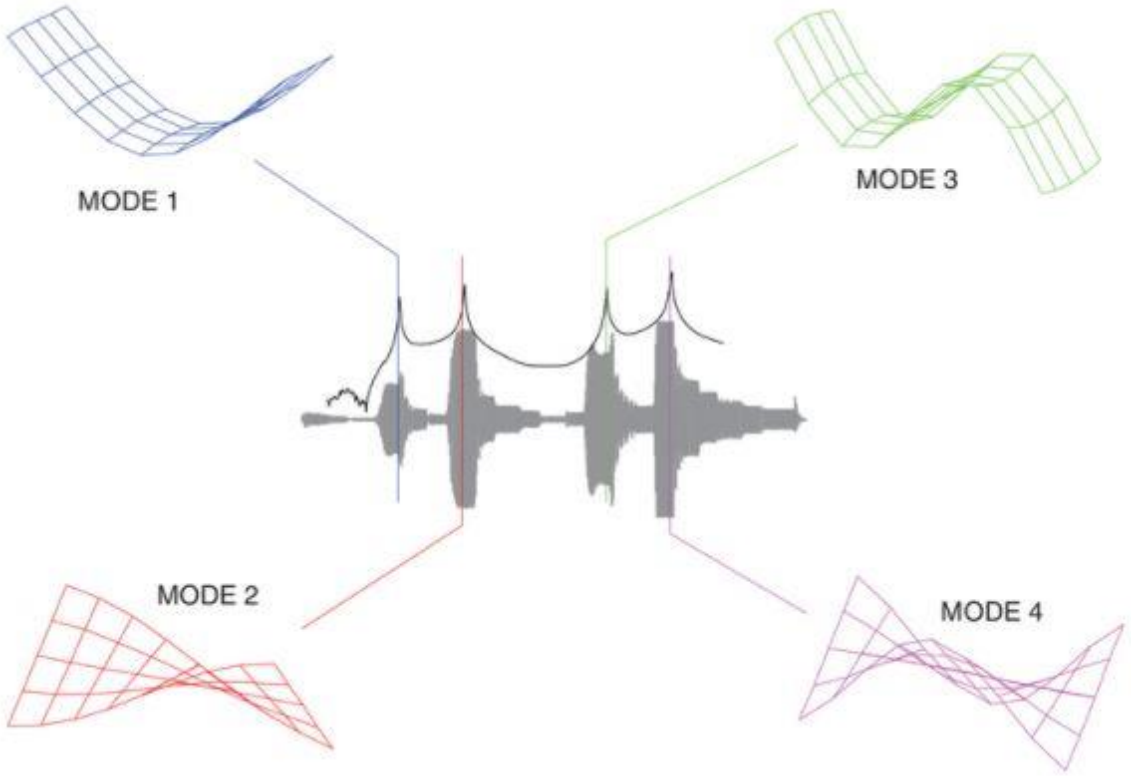
Moodianalyysi on prosessi, jossa määritellään systeemin dynaamisia ominaisuuksia ominaistaajuuksien, vaimennuskertoimien ja tilamuotojen perusteella luoden niistä matemaattinen malli kappaleen käyttäytymiselle. Luotua matemaattista mallia kutsutaan

systeemin moodimalliksi. Moodianalyysi perustuu siihen tosiasiaan, että dynaamisen lineaarisen aikainvarianttisysteemin värähtelyvaste voidaan ilmaista lineaarisena yhdistelmänä yksinkertaisia harmonisia liikkeitä, joita kutsutaan värähtelymoodeiksi. Tämä käsite muistuttaa Fourierin sini- ja kosiniaaltojen yhdistelmää, joka esittää monimutkaisia aallonmuotoja. Ominaistaajuuksien värähtelytilat ovat luontaisia dynaamiselle systeemille ja ne määräytyvät täysin systeemin fyysisten ominaisuuksien mukaan. (He 2001, s.2)

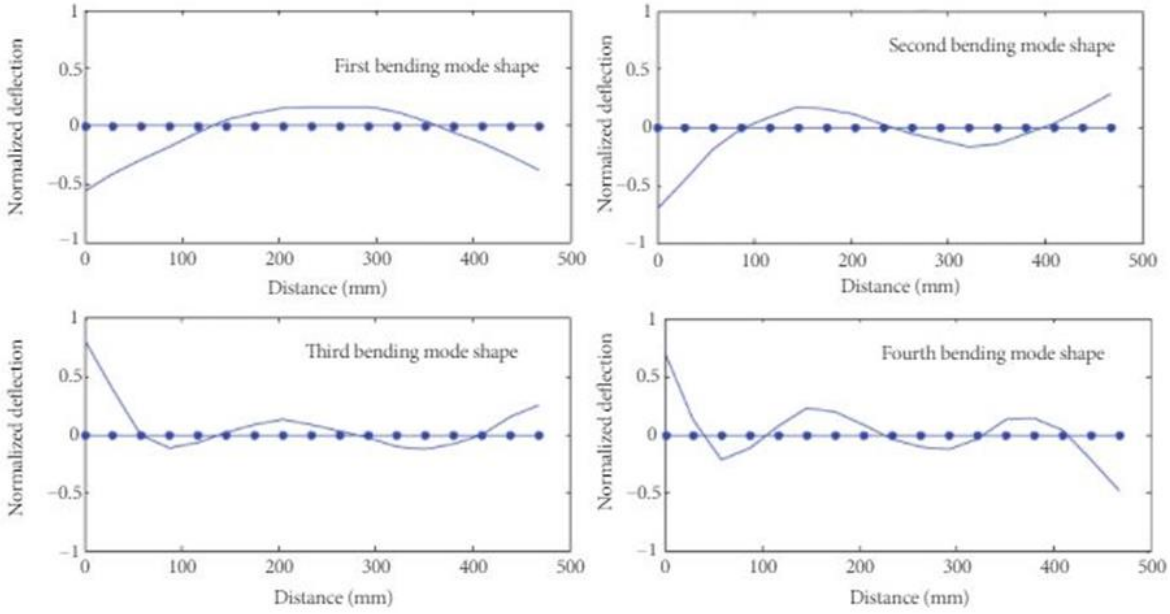
Moodianalyysi voi olla teoreettinen tai kokeellinen. Teoreettinen moodianalyysi perustuu fyysiseen malliin dynaamisesta systeemistä, jolla on massan, jäykkyyden ja vaimennuksen ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet saattavat saada osittaisen differentiaaliyhtälön muodon. Esimerkki on värähtelevän nauhan aaltoyhtälö, joka koostuu sen massajakaumasta ja elastisista ominaisuuksista. Tällaisen yhtälön ratkaisusta saadaan nauhan ominaistaajuuksia ja ominaismuotoja. Kuitenkin paljon realistisemmilla fyysisillä malleilla on yleensä alueellisesti jakautuneita massan, jäykkyyden ja vaimennuksen ominaisuuksia, eli toisin sanoen massa-, jäykkyys-. ja vaimennusmatriiseja. Nämä matriisit sisältyvät osaksi normaaleja liikeyhtälöitä. Dynaamisen systeemin superpositioperiaate mahdollistaa näiden yhtälöiden muuttamisen tyypilliseksi itseisarvo-ongelmaksi. Sen ratkaisu on kappaleen mooditiedot. Moderni äärellisen elementin analysointi kannustaa diskretisoimaan lähes kaikki dynaamiset rakenteet ja siten on huomattavasti parantanut teoreettisen moodianalyysin kapasiteettia ja laajuutta. Toisaalta viimeisen parin vuosikymmenen aikana kokeelliset analyysitekniikat ovat kehittyneet vauhdilla ja se on antanut valtavan edun niin sanotulle kokeelliselle moodianalyysille. (He 2001, s.2)

2.2.1 Värähtelevän kappaleen ominaismuodot

Kappaleiden ominaistaajuuksissa olevat muodonmuutosmallit saavat erilaisia muotoja riippuen millä taajuudella kappaleen viritysvoima kulloinkin on. Näiden niin sanottujen moodimallien ymmärtäminen on tärkeää suunnitellessa tai ratkoessa dynaamiseen vasteeseen liittyviä ongelmia. Jos kappaleemme jäisi värähtelemään yhdellä ominaistaajuudella näkisimme moodimallin mukaisen muodonmuutoksen kappaleen rakenteessa, kuten kuvassa 7 on yksinkertaisen levyn neljä ominaistaajuutta, sekä niihin liittyvät moodimallit. (Avitable 2017, s. 7-8). Roottorin värähtelymuodot muodostuvat samalla periaatteella ja erään roottorin neljä värähtelymuotoa ovat esitetty kuvassa 8.



Kuva 7. Yksinkertaisen levyn neljä ominaistaajuutta ja niihin liittyvät moodimallit. (Avitable 2017, s. 8)



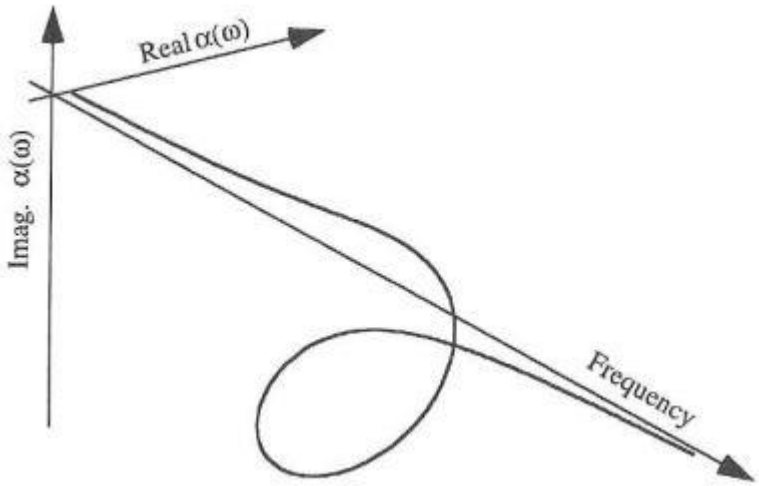
Kuva 8. Erään roottorin neljä värähtelymuotoa (Xu 2015)

2.2.2 Moodianalyysistä saatava data

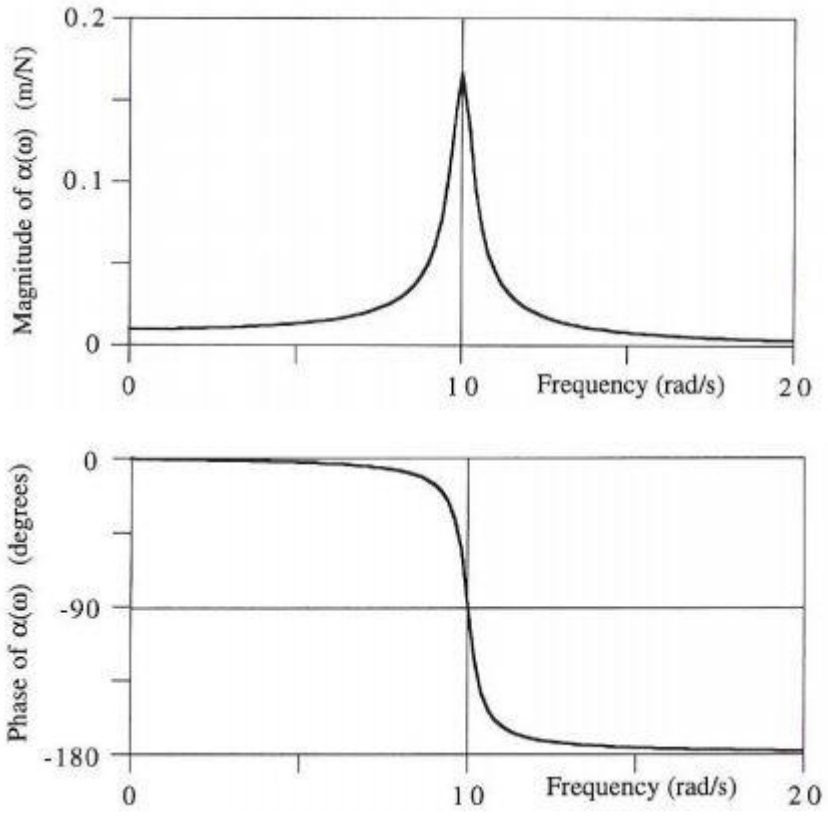
Kokeellinen moodianalyysi sisältää taajuusvasteen tai impulssivasteen mittaamista rakenteesta. Taajuusvasteen mittaus tapahtuu simppelisti asettamalla heräte tiettyyn kohtaan kappaletta ja mittaamalla värähtelyvasteet yhdestä tai useammasta pisteestä. Kokeelliseen moodianalyysiin kuuluu kolme vaihetta: testin valmistelut, taajuusvastemittaukset ja tulosten käsittely. Valmisteluihin kuuluvat kappaleen tukien valinta, herätteen valinta ja säätäminen, mittalaitteiston valinta, sekä mittauspisteiden valinta. Testissä taajuusvaste mitataan ja tallennetaan, jonka jälkeen sitä analysoidaan ominaistaajuuksien ja ominaismuotojen löytämiseksi. (He 2001, s.3)

Yksi harmaa alue mooditestauksessa on selvittää vapausasteiden määrä testattavassa kappaleessa. Monissa tapauksissa vapausasteiden määrä voidaan päätellä laskemalla värähtelypiikit kappaleessa. Kyseinen menetelmä ei kuitenkaan ole luotettava, jos kappaleella on ominaistaajuuksia, jotka ovat lähekkäin toisiaan. Tämän takia helpoin tapa kohdella kappaletta on esittää se yhden vapausasteen systeeminä. Kappaleesta voidaan täten katsoa vain yhtä ominaistaajuutta ja kasvattamalla taajuuskaistoja saadaan kappaleen kaikki ominaistaajuudet näkyviin, jolloin ne voidaan piirtää samaan kuvaajaan. (Inman 2001, s. 510)

Taajuusvastefunktion kompleksimuodolla on kolme osaa: reaaliosa, imaginääriosa ja taajuus. Nämä osat tulee ottaa huomioon piirtäessä kuvaajaa kompleksimuotoisesta funktiosta. Jotta taajuusvastefunktio voidaan esittää yhtenä viivana, se tulee tehdä kolmiulotteisessa muodossa, joka on esitetty Kuvassa 9. Kuten kuvasta nähdään kyseessä ei ole käytännöllinen tapa ilmaista taajuusvastefunktiota. Yleisin tapa piirtää taajuusvastefunktiosta kuvaaja on käyttää Boden-diagrammia, kuten kuvassa 10, jossa värähtelyn suuruus ja vaihe on piirretty eri kuvaajiin. Kyseinen tapa antaa helposti luettavan visuaalisen esityksen saadusta datasta. (Maia & Silva 1997. s. 32-34)



Kuva 9. Yhden vapausasteen systeemin taajuusvastefunktion kolmiulotteinen kuvaaja. (Maia & Silva 1997, s. 32)



Kuva 10. Boden-diagrammi yhden vapausasteen systeemille. (Maia & Silva 1997, s. 34-35)

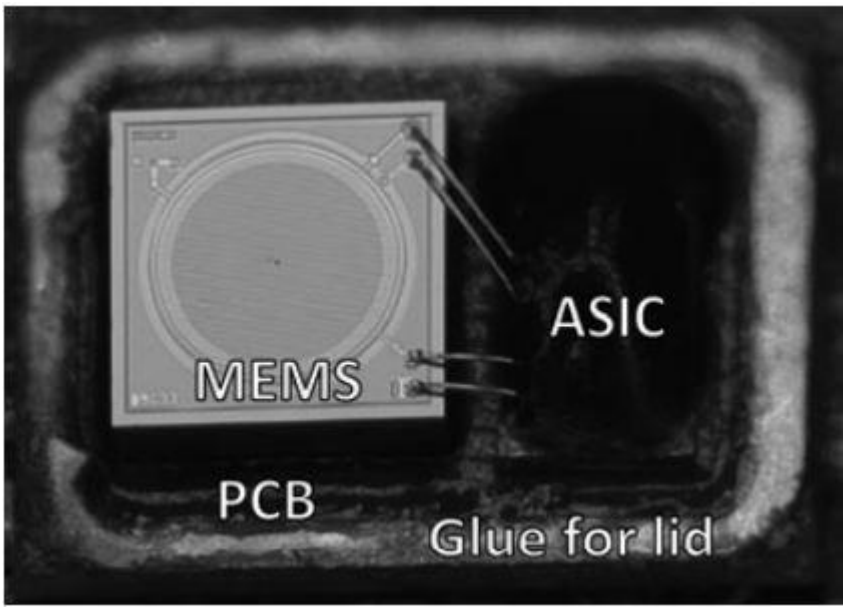
2.3 Mobiililaitteet

Mobiililaite on yleinen termi kaikille kädessä pidettäville tietokoneille tai puhelimille. Mobiililaite on tehty siirrettävyyttä varten, joten se on yleensä kompakti ja kevyt. Uudet tietojen tallennus-, käsittely- ja näyttötekniikat ovat antaneet näiden pienten laitteiden tehdä melkein kaikkea mitä aikaisemmin tehtiin perinteisesti suuremmilla pöytätietokoneilla. Mobiililaitteisiin lukeutuu älypuhelimet, tabletit, älykellot sekä muut ominaisuuksiltaan vastaavat kevyet tietokoneet.

Testeissä käytettiin kahta mobiililaitetta ja yhtä mikrofonilla varustettua tietokonetta. Mobiililaitteita käytettiin kahta erilaista, jotta saadaan parempi kuva mobiililaitteiden suorituskyvystä mitata värähtelyä. Tietokonealusta on valittu luomaa lisävertailua erilaisesta mikrofonilla varustetusta järjestelmästä. Ensimmäinen testissä käytetty mobiililaite on toukokuussa 2018 julkaistu Huawei Honor 10. Honor 10 hintaluokka on alempaan keskiluokkaa, mutta suorituskyky on silti hyvä. Puhelin on varustettu HiSilicon Kirin 970-prosessorilla, sekä neljällä gigatavulla RAM-muistia. Honor 10 toimii androidiin pohjautuvalla Emotion UI-käyttöliittymällä. Puhelimen mikrofoni on MEMS-arkkitehtuurin pohjalle rakennettu tuntemattoman kolmannen osapuolen mikrofoni. Toinen testissä käytetty mobiililaite on myös toukokuussa 2018 julkaistu Oneplus 6. Keskihintainen Oneplus 6 on selkeästi toista testilaitetta arvokkaampi ja omaa hyvän suorituskyvyn. Oneplus 6 on varustettu Qualcomm Snapdragon 845 prosessorilla, sekä kuudella gigatavulla ram-muistia. Oneplus 6 toimii androidiin pohjautuvalla OxygenOS-käyttöliittymällä. Puhelimen mikrofoni on myös MEMS-arkkitehtuurin pohjalle rakennettu tuntemattoman kolmannen osapuolen mikrofoni.

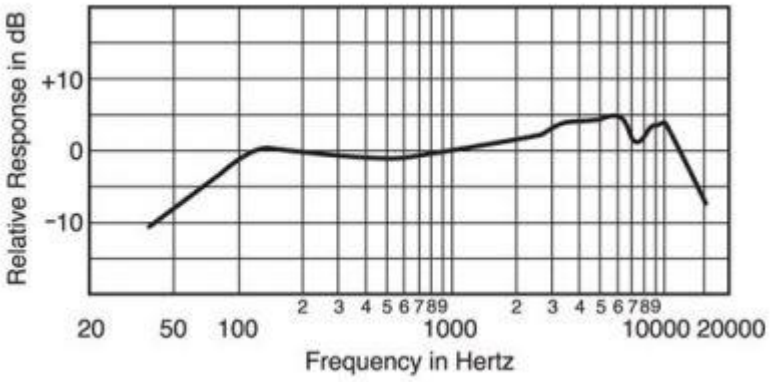
2.3.1 MEMS-mikrofoni

Kuvassa 11 on esitetty MEMS-mikrofoni systeemi, josta on poistettu kansi. Sovelluskohtainen integroitu piiri (ASIC) ja MEMS-sensori ovat liimattuna piirilevyyn (PCB), joka tarjoaa mekaanista tukea ja sähköiset liitännät. ASIC peitetään epoksikuplalla ympäristövaikutusten estämiseksi. Piirilevyyn liimataan metallinen kansi varmistamaan, että järjestelmä on suljettu ja ääni pääsee anturiin vain sille tarkoitettua ääniporttia pitkin. Järjestelmän akustista vastetta voidaan säätää valitsemalla erikokoisia piirilevy- ja kansiyhdistelmiä tai muuttamalla ääniportin kokoa ja sijaintia. (Sant 2019 s.156)



Kuva 11. MEMS-mikrofoni systeemi

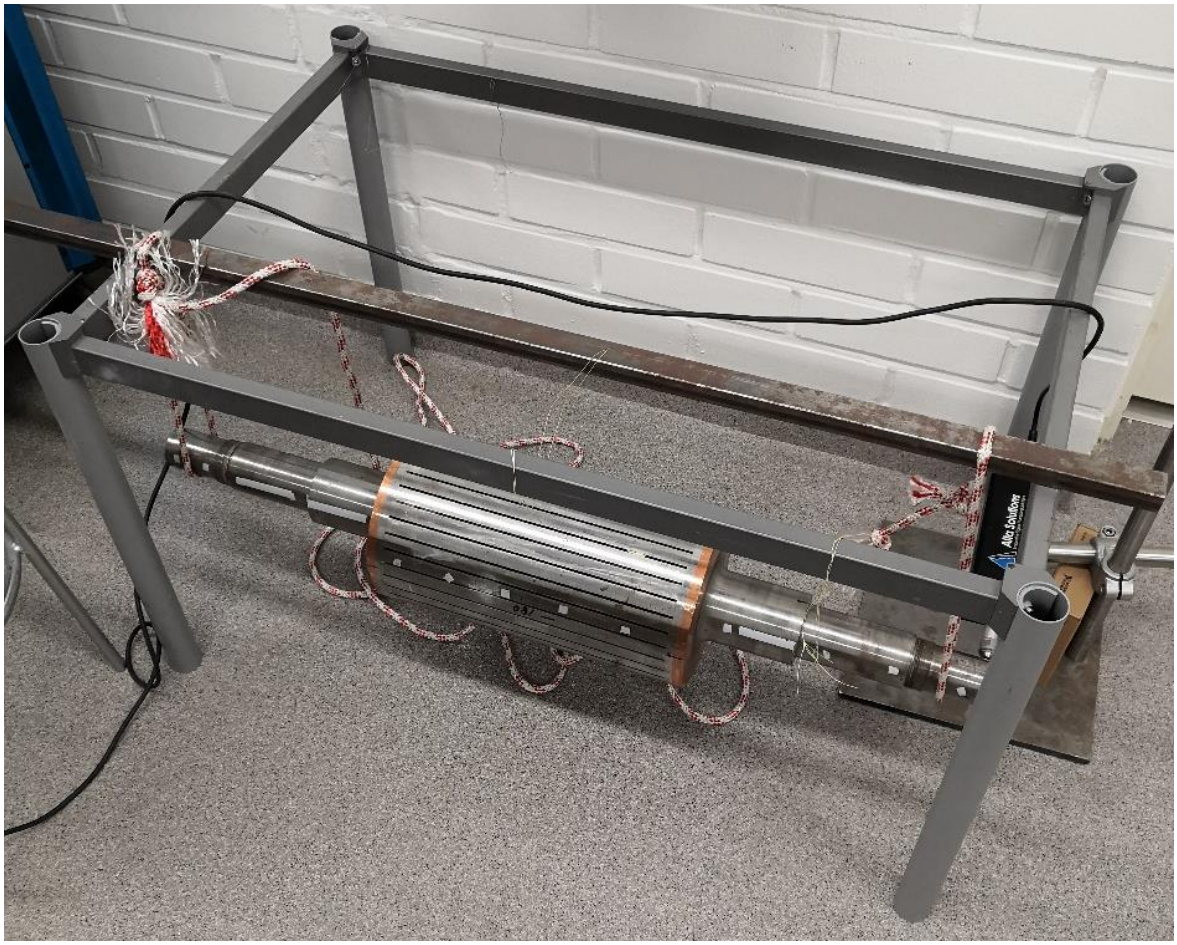
Tietyn mikrofonin voi määritellä taajuusvastekaaviota katsomalla. Ideaalisesti taajuusvasteen kuuluisi olla sama jokaisella taajuudella, jotka kuuluvat mikrofonin taajuusalueeseen. Kuitenkin normaalisti mikrofonilla on taajuusvastekaavio, jossa taajuusvasteet vaihtelevat eri taajuuksilla. Nämä vaihtelut ovat riippuvaisia mikrofonin suunnittelusta. Kuvassa 12 on tyypillinen taajuusvastekäyrä mikrofonille. Kuvassa x-akselilla on taajuuksia ja y-akselilla on mikrofonin vaste. Valmistuksessa tapahtuvien poikkeamien takia taajuusvaste ei ole identtinen jokaisessa saman mallin mikrofonissa. Laitteen vasteelle kunkin taajuuden kohdalla on kuitenkin asetettu toleranssi, jonka valmistaja on määrännyt. Tyypillinen toleranssi mikrofoneilla on ±2dB. (Bojinov 2014)



Kuva 12. Tyypillinen taajuusvastekäyrä mikrofonille. Yli 0dB menevät vasteet ovat korostuneita ja alle 0dB ovat vaimennettuja.

3 VÄRÄHTELYN MITTAUSKOE MOBIILILAITTEELLA

Värähtelymittaukset suoritettiin Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston tarjoamissa laboratorio-olosuhteissa. Tutkittavana kappaleena toimi teräksinen roottori, jolle oli jo aikaisemmin tehty vastaavat mittaukset vibrometrillä. Roottori oli asetettu roikkumaan telineestä kahdella köydellä, jotka oli asemoitu roottorin molempiin päihin. Mittauksessa annetaan roottorille heräte, joka saa roottorin värähtelemään. Näitä värähtelytaajuuksia mitataan mikrofonilla eri kohdista roottoria, jolloin saadaan näkyviin eri värähtelymuotoja. Lopputuloksena tulisi saada näkyviin kappaleelle ominaisvärähtelytaajuudet.



Kuva 13. Roottori roikkumassa telineestä kahden köyden varassa

3.1.1 Käytetty laitteisto

Roottorin värähtelyn herätteenä käytettiin Alta Solutionsin AS-1220-impulssivasaraa, jota ohjattiin AS-1220c-vahvistimella. Testi kokonaisuus koostui iskurista, säätimestä, sekä laukaisimesta. Impulssivasaran vahvistin ja laukaisin on esitetty kuvassa 14. Vahvistimeen oli säädettynä vahvistuskerroin 9.06, jolloin vasara tuottaa noin 400N voiman. Voiman tuli olla riittävän suuri, jotta roottori saadaan värähtelemään voimakkuudella, jonka mikrofonit voivat havaita helposti.

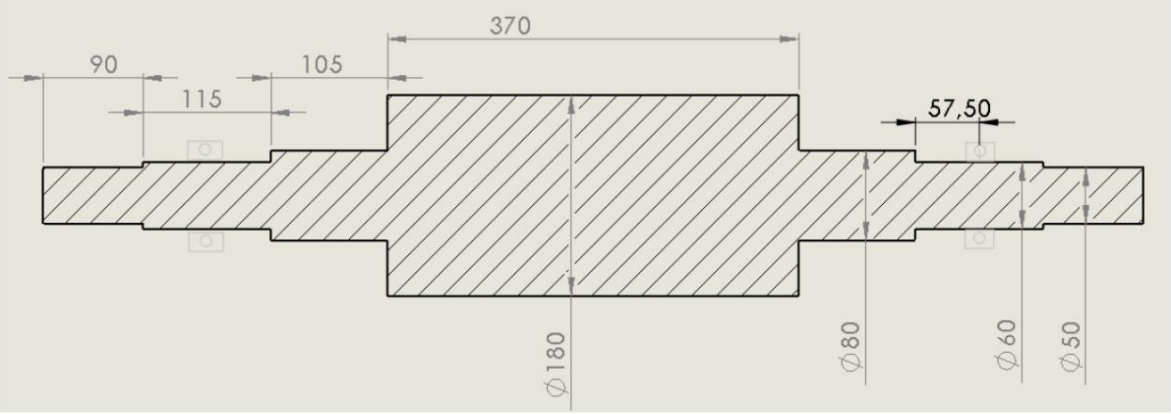
Mittauksia tehtiin kahdella eri matkapuhelimella, sekä tietokoneella. Tietokoneella mittaus suoritettiin Monoprice 10010-kuulokkeiden kuulokejohtomikrofonilla, jonka ääntä luettiin ja tallennettiin MATLAB-ohjelmaan tehdyllä analysaattorilla. Nämä kolme mikrofonia valittiin, koska ne olivat helposti saatavissa, eivätkä tuottaneet lisäkustannuksia tai järjestelyjä mittausta valmistellessa.

Molemmissa matkapuhelimissa käytettiin samaa sovellusta tallentamaan värähtelytaajuuksia. Erilaisten Googlen Play-kaupasta löytyvien värähtelyanalysaattorien testailulla päädyttiin käyttämään Advanced Spectrum Analyzer PRO-sovellusta. Perusteluina valinnalle on sovelluksen ominaisuuksien laajuus, selkeys ja mahdollisuus taltioida tuloksia tarkasti, joka oli ylivertainen ominaisuus muihin ohjelmiin nähden. Advanced Spectrum Analyzer PRO eli ASAP on Vuche Labsin sovellus, joka on julkaistu vuonna 2014 ja se on saanut viimeisimmän päivityksen tammikuussa 2017. Sovellusta on ladattu play-kaupasta yli 500 000 kertaa ja se on saanut keskimäärin 4.55 tähden arvostelut. Kyseinen sovellus on ilmainen ja saatavissa kaikille mobiilialustoille. ASAP:n ongelmana on kuitenkin se, ettei värähtelyn voimakkuutta voida mitata tarkasti, vaan sillä voidaan mitata ainoastaan taajuudet.

Kuva 14. AS-1220c-Impulssivasaran säädin ja laukaisin.

3.1.2 Mittaustapahtuma

Värähtelymittaukset otettiin viidestä mittapisteestä pitkin roottoria. Mittauspisteet valittiin jakamalla roottorin koko pituus neljään osaan. Kuvassa 15 on esitetty roottorin geometria, jonka perusteella jaottelu tehtiin. Roottorin toiseen päähän puoleen väliin roottorin halkaisijaa asetettiin iskuri kuvassa 16. Iskuri ja mittauspisteet ovat eri puolilla roottoria. Mikrofoni asetetaan mahdollisimman lähelle roottoria hyödyntäen tasoa, joka pitää mittavälineen paikoillaan. Mobiililaitteilla jokaisesta mittapisteestä otettiin kaksi mittausta tulosten varmistamiseksi. Tietokoneella jokainen mittaus toistettiin kuusi kertaa. Mittaustilanne on havainnollistettu kuvassa 17.



Kuva 15. Roottorin geometria esitettynä 2D-piirroksena. Mittojen yksikköinä millimetri.

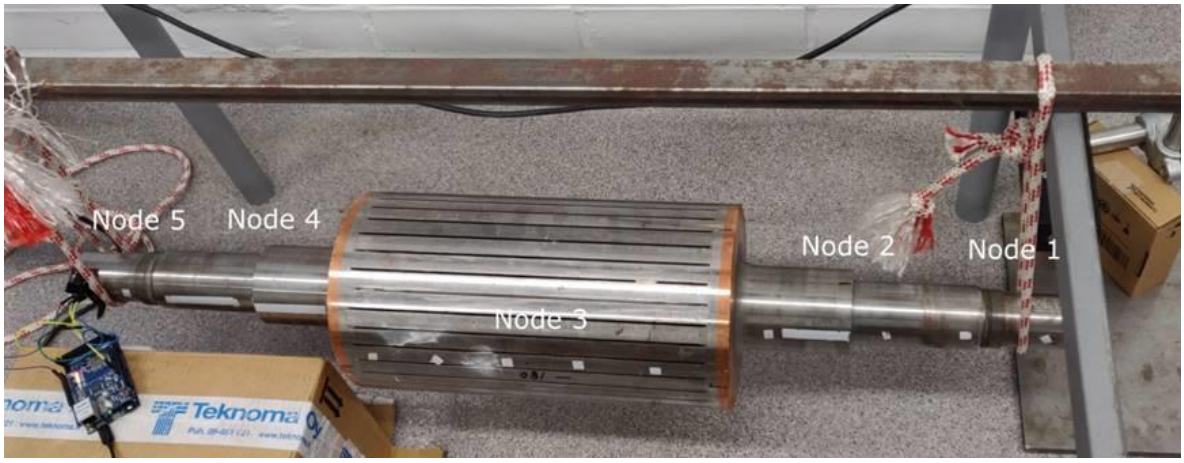
Kuva 16. Iskurin sijainti suhteessa roottoriin.

Kuva 17. Kolmannen eli keskimmäisen mittauspisteen mittaus

4 TULOKSET JA ANALYSOINTI

4.1 Mittaustulokset

Roottorin pituutta pitkin oli viisi mittauspistettä, jotka nimettiin nodeiksi 1-5. Mittauspisteiden sijainnit on havainnollistettu kuvassa 18. Matkapuhelimilla mitatessa tehtiin kaksi mittausta yhdestä nodesta, joista vertailuun valittiin paremmin onnistunut. PC:llä mittauksia tehtiin kuusi yhdestä nodesta. PC:llä saaduissa tuloksissa oli muihin mittauksiin nähden huomattavan paljon heittoa eri mittauksen välillä, joten laskin jokaisesta nodesta kolmen samankaltaisimman tuloksen keskiarvon, jotta päästään mahdollisimman lähelle realistisinta tulosta. Mittauksissa kerättiin ominaistaajuuksien sekä amplitudien arvoja. Vertailun vuoksi mukaan on liitetty taulukko 2, jossa on roottorista tehdystä RoBeDyn-mallista lasketut ominaistaajuudet. Lisäksi amplitudien perusteella on piirretty ensimmäiset ja toiset värähtelymuodot.



Kuva 18. Nodejen sijainnit roottorin pinnalla.

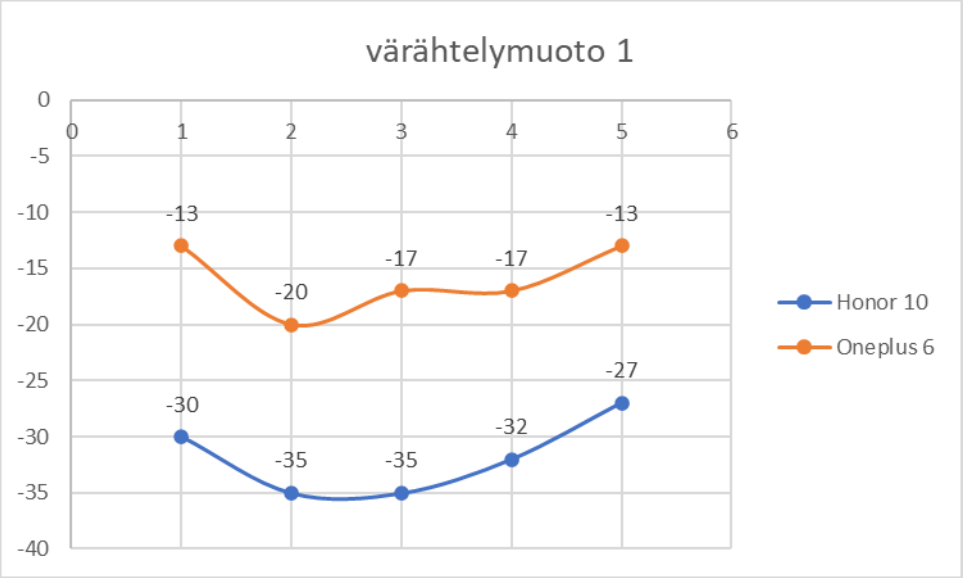
*Taulukko 1. Mittaustulokset, jossa näkyy kolme ensimmäistä taajuutta ja niiden amplitudit joka mittauspisteessä. Tulokset kaikista kolmesta testi laitteesta. * = ei yksikköä.*

	Honor 10			Oneplus 6			Pc		
Hz	taajuus 1	taajuus 2	taajuus3	taajuus 1	taajuus 2	taajuus 3	taajuus 1	taajuus 2	taajuus 3
node1	714	922	2507	714	922	2510	714	922,6	2508
node2	714	922	2507	714	925	2510	714	921,9	2507
node3	714	922	2510	714	922	2510	714	922,6	2507
node4	714	922	2510	714	922	2510	714	921,9	2508
node5	714	922	2510	714	922	2513	714	922,6	2508
dbfs	amplitudi 1	amplitudi 2	amplitudi 3	amplitudi 1	amplitudi 2	amplitudi 3	amplitudi 1	amplitudi 2	amplitudi 3
node1	-30	-28	-32	-13	-14	-15	0,0067*	0,0398*	0,0280*
node2	-35	-42	-20	-20	-22	-10	0,0048*	0,0016*	0,0176*
node3	-35	-48	-25	-17	-28	-10	0,0086*	0,0063*	0,0133*
node4	-32	-45	-20	-17	-28	-12	0,0058*	0,0021*	0,0360*
node5	-27	-27	-27	-13	-12	-18	0,0088*	0,0130*	0,0224*

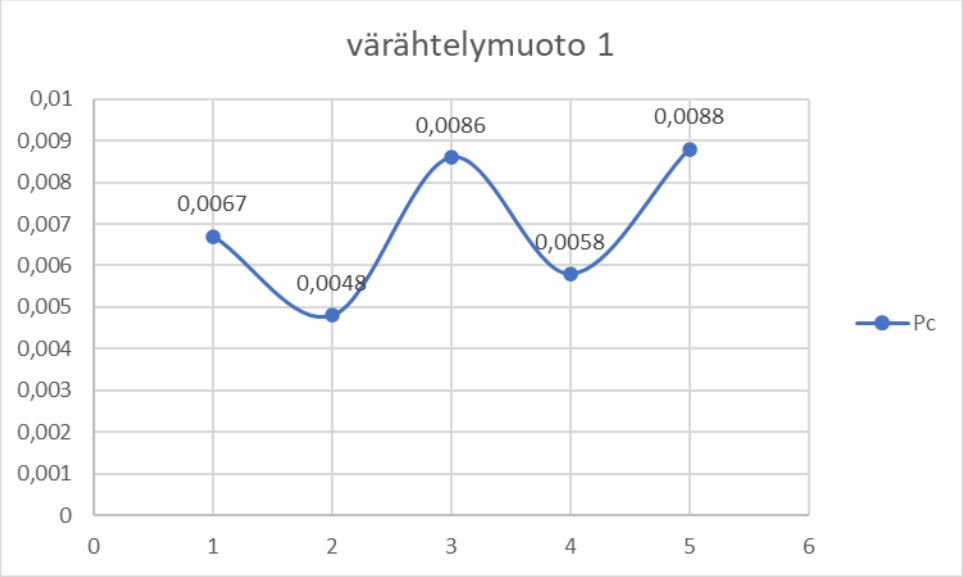
Taulukko 2. RoBeDy mallista lasketut ominaistaajuudet

taajuus 1	720 Hz
taajuus 2	954 Hz
taajuus 3	2421 Hz

Seuraavissa kuvissa olen tutkinut miltä mobiililaitteilla ja pc:lla mitattujen amplitudien luomat värähtelymuodot näyttävät. Olen piirtänyt mittausten voimakkuuden nodejen funktiona, jolloin tavoitteena on saada värähtelymuotoja näkyviin

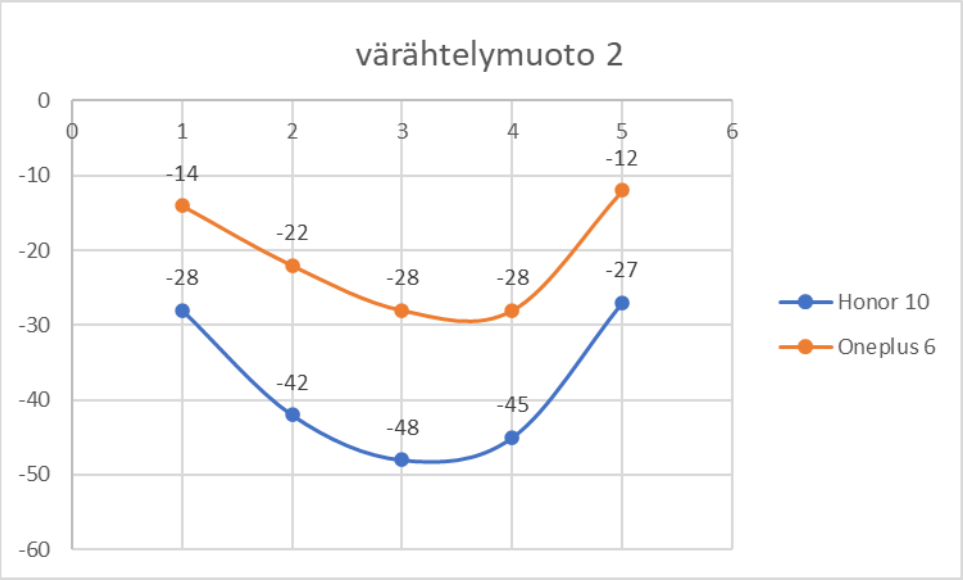


Kuva 19. Mobiililaitteista Honor 10 ja Oneplus 6 saatujen mittaustulosten avulla piirretty ensimmäinen värähtelymuoto.

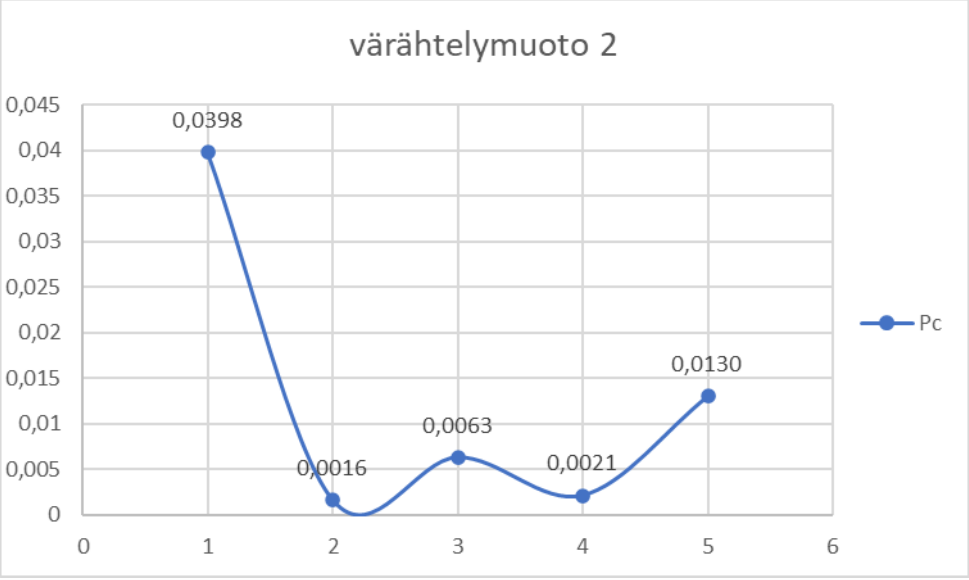


Kuva 20. Tietokoneella saatujen mittaustulosten avulla piirretty ensimmäinen värähtelymuoto

Ensimmäiset värähtelymuodot, jotka ovat esitetty kuvissa 19 ja 20, ovat piirrettävissä ilman vaihetietoja, joten ovat tässä tapauksessa väärinpäin. Honor 10 tiedoista piirretty kuvaaja näyttää oikeanlaiselta ensimmäiseksi värähtelymuodoksi. Oneplus 6 saadut tulokset sen sijaan ei luo yhtä pätevää kuvaajaa, mutta on otettava huomioon, onko mittausetäisyydellä tai mikrofonin sijainnilla ollut osuutta asiassa. Tietokoneesta saaduilla tuloksilla piirretty kuvaaja on käytännössä käyttökelvoton.



Kuva 21. Mobiililaitteista Honor 10 ja Oneplus 6 saatujen mittaustulosten avulla piirretty toinen värähtelymuoto.



Kuva 22. Tietokoneella saatujen mittaustulosten avulla piirretty toinen värähtelymuoto.

Toisen värähtelymuodon piirtäminen ei onnistu ilman vaihetietoja. Ilman vaihetietoja piirretyt soiset värähtelymuodot on esitetty kuvissa 21 ja 22. Honor 10:n ja Oneplus 6:n tuloksista piirretyistä kuvaajista voidaan kuitenkin havaita, että päätyjen vasteet ovat suurin piirtein samat, joka on hyvä merkki siitä, että oikeilla vaihetiedoilla kuvaajat näyttäisivät oikean muotoiselta. Kuvaajista nähdään myös, että keskimittaussolmu on todella lähellä solmupistettä, koska se on todella vaimea. Solmupisteissä ei pitäisi kuulua mitään, mutta se on mikrofonilla mitattaessa käytännössä mahdotonta, koska mikrofoni on todella haastava keskittää niin ettei se ottaisi ympäriltään herätteitä. Mittauspisteet 2 ja 4 ovat myös vaimeita, joten ne todennäköisesti ovat myös ainakin lähellä solmupisteitä.

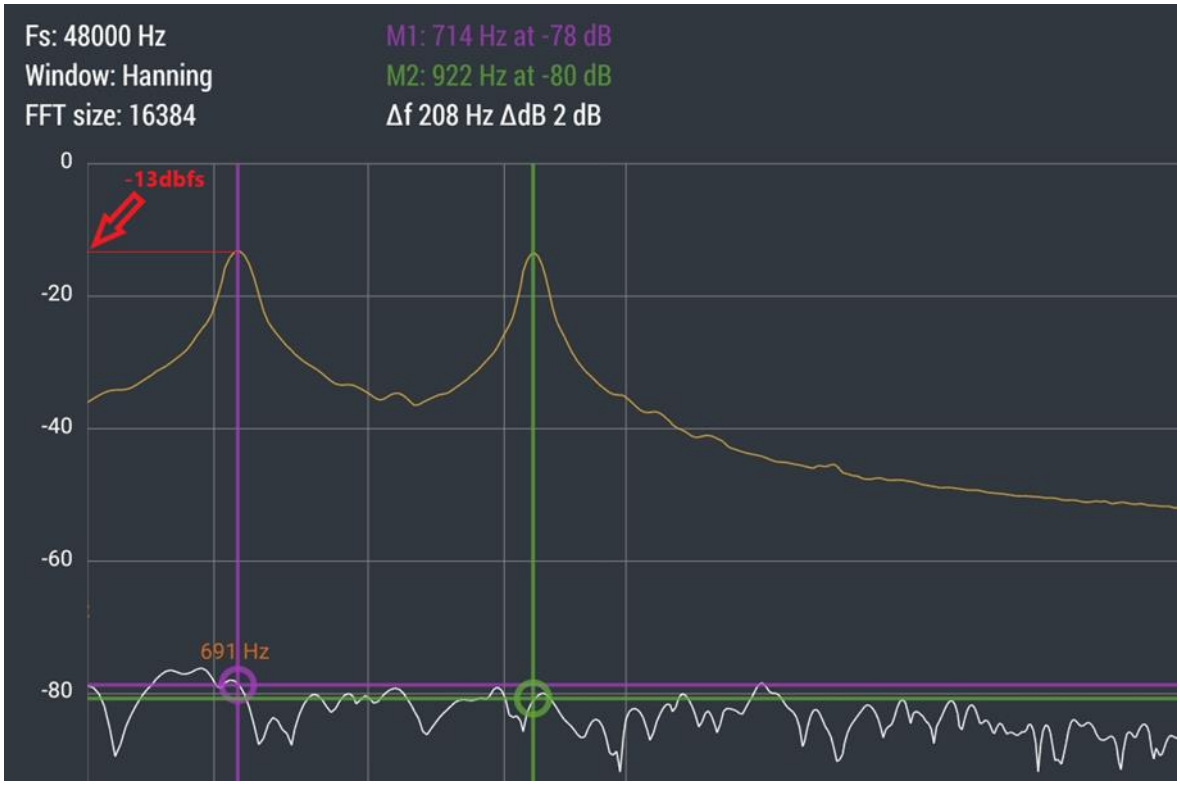
Kolmatta värähtelymuotoa ei voida piirtää viidellä mittauspisteellä tai se on ainakin hyvin vaikeaa ja todennäköisesti harhaanjohtavaa. Tarvitaan selkeästi useampi mittauspiste, jotta kolmas muoto on mahdollista piirtää.

4.2 Tulosten analysointi

Kaikilla testilaitteilla mitatut ominaistaajuudet ovat todella lähellä toisiaan ja muutaman hertsin vaihtelut ovat selitettävissä laitteiden mittausresoluutioilla, eikä niinkään niiden kyvyttömyydellä mitata oikeita taajuuksia. RoBeDyn-arvoihin vertaillen taajuudet näyttävät olevan oikealla alueella, vaikka on huomattavissa, että mitä korkeampaa taajuutta mitataan niin ero kasvaa RoBeDynistä saatuihin arvoihin. Kyseessä on todennäköisesti RoBeDynissä käytettyjen mallinnusmenetelmien aiheuttamaa poikkeamaa todellisista arvoista.

Amplitudien mittaaminen osoittautui haasteelliseksi kaikilla menetelmillä. Älypuhelimilla ainoa tapa saada amplitudin arvo oli arvioida se kuvakaappauksesta, koska mitään varsinaista lukua sovellus ei tallentanut, esimerkki näytetty kuvassa 23. Tietokoneella tuloksia mitannut Monoprice 10010 kuulokkeiden kuulokejohtomikrofoni ei omannut samanlaista keskitettyä kuuntelu ominaisuutta kuin älypuhelimien mikrofonit, joten amplitudien arvot vaihtelivat rajusti mittauksien välillä. Lisäksi kummallakaan menetelmällä ei ollut mahdollista tallentaa amplitudin vaihetietoja, joten värähtelymuotojen piirtäminen ei onnistu koko mitalta: voidaan vain katsoa tiettyjä osia piirustuksista, jotta saadaan käsitys onko mitatut arvot edes jollain tavalla järkeviä. Amplitudeja katsoessa tuli huomioida, että amplitudiin vaikuttaa mittalaitteen ja roottorin välinen etäisyys sekä

impulssin voimakkuus. Huomioitavaa oli myös impulssivasaran positio noin node 1 kohdalla, joten luonnollisesti siinä kohtaa amplitudeissa saattaa esiintyä pientä nousua. Näyttää siltä, että älypuhelimilla on pieniä vaikeuksia tarkasti erotella pieniä amplitudin muutoksia, vaikka syy voi olla huonosti arvioitu kuvankaappauksen näyttämä amplitudin arvo



Kuva 23. Kuvakaappaus noden 1 mittauksesta Oneplus 6-älypuhelimella, jossa osoitettu ensimmäisen ominaistaajuuden amplitudin arvo

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä johdettiin alkuun värähtelyn teoriaa sekä kerrottiin moodianalyysistä, kerrottiin mobiililaitteista ja niiden mikrofoneihin liittyvistä seikoista. Tutkimusosuudessa tehtiin mittauksia kahdella eri matkapuhelimella ja tietokoneeseen liitetyllä mikrofonilla. Mittaukset voidaan todeta onnistuneiksi ja tulokset luotettaviksi. Lopuksi analysoitiin tuloksia sekä pohdittiin sitä kautta mahdollisia vaikuttavia tekijöitä ja tulosten merkitystä.

Työn tulosten perusteella voidaan todeta, että mikrofonilla ja etenkin mobiililaitteen mikrofonilla pystytään mittaamaan luotettavia värähtelytaajuuksia, sekä amplitudeja. Mobiililaitteet soveltuvat hyvin värähtelyanalyysien tekemiseen nopeasti ja suhteellisen hyvällä tarkkuudella. Ainoa rajoittava tekijä on ympäristön äänet, joten värähtelyanalyysi tulisi tehdä mahdollisimman hiljaisessa ympäristössä, jotta voidaan varmistua mittauksien paikkansapitävyydestä. Normaali mikrofoni, joka ei ole yhtä kohdistettu, kuin mobiililaitteen mikrofoni pystyy todennäköisesti tuottamaan hyviä mittaustuloksi, mutta vaatii todella hyvin äänieristetyn tilan ja on todella herkkä herätteen voimakkuuden suhteen. Mittausten perusteella normaalia mikrofonia ei voi suositella käytettäväksi värähtelymittauksia tehdessä, mutta mobiililaitteen mikrofoni tai vastaava hyvin kohdistettu ja taustamelua suodattava mikrofoni on värähtelymittauksissa täysin kilpailukykyinen kiihtyvyysanturiin tai laseriin verrattuna.

Työssä ei käytetty kuin yhdenlaisia mobiililaitteita eli älypuhelimia. Jatkotutkimuksiin olisi hyvä sisällyttää muitakin mobiililaitteita, kuten älykello ja tabletti. Jotta jatkossa saataisiin värähtelymuotoja paremmin näkyviin mittaustuloksissa, tulisi selvittää, onko jollain sovelluksella mahdollista tallentaa värähtelyn vaihetietoja. Värähtelymuotojen esiin tuomiseksi myös mittauspisteiden määrää tulisi kasvattaa. Jatkotutkimuksissa voisi paremmin paneutua normaalin mikrofonin kykyihin ja panostaa mittaustilanteeseen tavalla, joka vähentäisi ympäristön melua ja keskittäisi normaalin mikrofonin kuulemaan vain tiettyä pistettä kappaleen pinnalta.

LÄHTEET

Shabana, A. A. k. (2019). *Theory of Vibration: An Introduction*. 3rd ed. 2019. Cham: Springer International Publishing. [Viitattu 10.04.2020]
Saatavissa:
https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-94271-1.pdf

Preumont, A. (2013). *Twelve Lectures on Structural Dynamics*. Dordrecht: Springer Netherlands : Imprint: Springer. [Viitattu 28.10.2020]
Saatavissa:
https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2F978-94-007-6383-8.pdf

Bojinov, Hristo & Michalevsky, Yan & Nakibly, Gabi & Boneh, Dan. (2014). Mobile Device Identification via Sensor Fingerprinting. [Viitattu 20.10.2020]
Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/264558809_Mobile_Device_Identification_via_Sensor_Fingerprinting

Sant L. et al. (2019) MEMS Microphones: Concept and Design for Mobile Applications. In: Makinwa K., Baschirotto A., Harpe P. (eds) Low-Power Analog Techniques, Sensors for Mobile Devices, and Energy Efficient Amplifiers. [Viitattu 15.10.2020]
Saatavissa: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-97870-3_8

He, J. & Fu, Z.-F. (2001) Modal analysis. Oxford ;: Butterworth-Heinemann. [Viitattu 1.11.2020]
Saatavissa:
http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.cc.lut.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMTA0ODgzX19BTg2?sid=23309ace-b127-49a7-93b0-1eaccb42e133@pdc-v-sessmgr04&vid=0&format=EB&rid=1

Xu, Yuanping & Zhou, Jin & Di, Long & Zhao, Chen & Guo, Qintao. (2015). Active Magnetic Bearing Rotor Model Updating Using Resonance and MAC Error. Shock and Vibration. 2015. 1-9. [Viitattu 11.11.2020]
Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/273312154_Active_Magnetic_Bearing_Rotor_Model_Updating_Using_Resonance_and_MAC_Error

IEA (2011), Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, IEA, Paris [Viitattu 8.11.2020]
Saatavissa:
https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems

Inman D. 2001. Engineering Vibration. Prentice Hall. 621 s

Maia N. & Silva J. 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis. John Wiley & Sons. 468 s.

Avitabile Peter, 2017, Experimental Modal Analysis, A Simple Non-Mathematical Presentation, University of Massachusetts Lowell [Viitattu 11.11.2020]
Saatavissa:
https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/toc.v/cid:kpMTAPG00H/viewerType:toc//root_slug:modal-testing-practitioners/url_slug:introduction-experimental?issue_id=kpMTAPG00H