

Kalibrointimittauslaitteiston suunnittelu ja valmistus värähtelyanturille

Tuukka Miettinen

Pro gradu – tutkielma

Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos

14.12.2009

Ohjaajat: Seppo Karjalainen ja

Markku Kataja

Esipuhe

Aloitin harjoittelun Hoxville Oy:ssä kesällä 2007 ja töiden ohessa pystyin tekemään myös opiskelujani Hoxvillessä. Värähtelyanturista tehdyn erikoistyön jälkeen oli luontevaa jatkaa tästä aiheesta myös Pro gradussani. Kiitokset näistä erittäin opettavaisista mahdollisuuksista Hoxvillen Seppo Karjalaiselle.

Kalibrintilaitteiston teko oli yksi iso projekti Hoxvillessä syksyllä 2008 ja projektissa oli myös muita Hoxvillen työntekijöitä. Hoxvillessä tämän projektin vastaavana toimi Kari Viitamäki ja hänen johdolla projekti eteni suunnitellusti. Kalibrintitelinettä suunnittelin yhdessä Karin ja Lasse Niskavaaran kanssa. Ohjelmisto - osan kalibrintilaitteistossa tein yhdessä Rauli Muurisen kanssa. Rauli teki tarvittavat ohjelmoinnit digitaalioloskillooskooppi varten ohjeideni mukaan ja itse vastasin siitä, että tämä sopii muuhun kokonaisuuteen.

Töiden ja muiden kiireiden takia varsinainen kirjoitustyö graduun oli aluksi hankalaa. Lopulta graduun alkoi löytyä lopullinen kokonaisuus Markku Katajan ohjaamana. Projekti oli kokonaisuudessaan itselleni erittäin opettava.

Tiivistelmä

Hoxvillelle tuli tarve parantaa värähtelyanturin kalibrointia ja tuotannonvalvontaa. Pää tavoitteena oli pystyä tarjoamaan asiakkaalle yksilölliset kalibrointitodistukset jokaisesta värähtelyanturista. Asiakkaan kanssa neuvottelujen jälkeen oli projektille selkeä tavoite. Projekti alkoi lohkokaaavion suunnittelulla ja sopivien laitteiden etsimisellä.

Laitteisto koostuu LDS:n tärstimestä ja vahvistimesta, MMF:n referenssikiikityvyysanturista, Picoscope-digitaali-osilloskoopista sekä itse tehdystä kalibrointilaitteesta. Tietokoneelle tehtiin lisäksi ohjelma, jolla käytetään kalibrointilaitteistoa. Näin ollen vielä tarkkojen kalibrointiohjeiden jälkeen laitteisto vaati vain vähän varsinaisen käyttäjän työtä.

Laitteistolla tehdään kalibrointimittaukset varsinaisen värähtelyanturin kalibroinnin jälkeen. Näillä mittauksilla referenssituloksiin nähden saadaan mittaustulokset kalibrointitodistusta varten. Tärstimellä täristetään 159,15 Hz:n taajuudella tehollisen kiihtyvyyden ollessa 5 m/s^2 . Värähtelyanturilta tallennetaan mittaustulokset kaikissa sen kolmessa eri mittaussunnassa. Tätä varten suunniteltiin yksilöllisesti kalibrointilaitteisto, jotta kalibrointitoimenpide sujuisi nopeasti tuotannossa.

Kalibrointimittauksen yhteydessä talletetaan kaikki värähtelyanturilta saadut mittaustulokset. Varsinaisen 159,15 Hz:n taajuudella olevan amplitudin arvon lisäksi seurataan RMS -arvoja väliltä 10 – 1 000 Hz:ä. Näiden lisäksi testataan vielä jokaisessa tuotantoerässä myös värähtelyanturin taajuusvastetta. Nämä kalibrointitulokset mahdollistavat yksilölliset kalibrointitodistukset ja parantavat värähtelyanturin tuotannonvalvontaa.

1 Johdanto.....	1
2 Värähtelyn teoreettiset lähtökohdat.....	3
2.1 Värähdysliike.....	3
2.1.1 Harmoninen värähtelijä.....	4
2.1.2 Yhden vapausasteen värähtelijä.....	5
2.1.3 Vaimennetut värähtelijät.....	6
2.1.4 Pakkovärähtelijä.....	9
2.1.5 Resonanssi.....	11
2.1.6 Useamman vapausasteen värähtely.....	15
2.2 Värähtelyn voimakkuus.....	15
2.2.1 Desibeliasteikko.....	15
2.2.2 Tehollisarvot.....	16
2.3 Värähtelyn eristäminen.....	17
2.3.1 Laitteiston eristys ja dissipaatio.....	21
2.4 Fourier'n muunnos signaalinkäsittelyssä.....	22
3 Värähtelymittaukset.....	23
3.1 Mitta-anturit.....	23
3.2 Kiihtyvyyssanturit.....	24
3.3 Pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit.....	25
3.3.1 Pietsosähköinen ilmiö.....	26
3.3.2 Pietsosähköisöisien kiihtyvyyssantureiden ominaisuuksia.....	29
3.4 Muut kiihtyvyyssanturit.....	29
3.5 Mittauksissa käytössä olevat kiihtyvyyssanturit.....	30
4 Kalibrointilaitteiston lähtökohdat.....	31
4.1 Värähtelyanturin kalibroinnin lähtökohdat.....	31
4.2 Laitteiston suunnittelun lähtökohdat.....	32
4.3 Referenssianturi.....	33
4.3.1 MMF:n KS775C – kiihtyvyyssanturi.....	36
4.4 Tärustin ja vahvistin.....	36
4.5 Mittakortti.....	37

4.6 Kalibrointiteline.....	38
4.7 Mittausasetelma.....	40
5 Kalibrointilaitteiston valmistus ja testaus.....	42
5.1 Laitteiston valmistus.....	42
5.2 Testaus lopullisella kalibrointilaitteiston kokoonpanolla.....	45
5.2.1 Kalibrointitelineen ja vaimennuksen testaus.....	47
5.3 Kalibrointitodistusta varten tehtävät mittaukset.....	49
5.3.1 Amplitudia koskevat mittaukset.....	50
5.3.2 Taajuusvastetestaus.....	51
5.4 Kalibrointilaitteiston tuotantoon siirtämiseen valmistautuminen.....	52
6 Päätelmät.....	54
6.1 Yksilöllinen kalibrointilaitteisto värähtelyanturille	54
6.2 Kalibrointilaitteiston testaus.....	55
6.3 Kalibrointimittaustuloksien analysointi.....	55

1 Johdanto

Pro gradu – tutkielmani tarkoitus oli rakentaa kalibrointilaitteisto värähtelyanturille. Värähtelyanturi on keskeinen osa Hoxville Oy:n kunnonvalvontajärjestelmää, jolla tarkkaillaan vaihteistojen kuntoa. Reilu vuosi sitten tein erikoistyöni värähtelymittauksista ja Hoxvillen värähtelyanturista, joten graduni on luontevaa jatkoa tälle. Värähtelyanturin kalibroinnin laatua ei aikaisemmin valvottu mitenkään ja näin ollen tälle järjestelmälle oli tarvetta.

Värähtelymittauksissa, kuten myös kaikissa muissakin mittauksissa, on oleellista mitattavan suureen oikeellisuus. Yleensä kalibrointi tehdään siten, että kalibrointi on aljitettävissä johonkin kansainväliseen standardiin. Tämä takaa sen, että tuotteelle voidaan antaa tarkka arvio sen mittaustarkkuudesta. Yleinen käytäntö onkin, että värähtelyä mittaavalle anturille tehdään aina yksilöllinen kalibrointitodistus.

Kiihtyvyyttä mittaavia antureita käytetään hyvin monissa sovelluksissa ja tämän takia löytyykin monia erilaisia valmiita kalibrointijärjestelmiä. On olemassa myös kalibrointilaboratorioita, jotka ovat erikoistuneet kalibrointimittauksiin. Nämä täydentävät valmistajien omia kalibrointeja ja ovat puolueettomia. Yleensä keskeisimmät asiat ovat kiihtyvyyksianturin herkkyuden selvittäminen ja anturin taajuusvaste. Tässä projektissa piti ottaa huomioon kalibroinnissa myös anturissa oleva älykkyys, mikä lisäsi mittauseräparametreja. Tämän takia oli luontevaa tehdä kalibrointijärjestelmä itse.

Työ sai alkunsa Hoxvillen ja asiakkaan yhdessä sovitusta kalibroinnin valvonnan tarkkailusta. Ensiksi oli selvitettävä yhdessä asiakkaan kanssa, mitä vaatimuksia kalibrointijärjestelmän oli täytettävä. Tämän mukaan oli alettava etsimään järjestelmään sopivia laitteita. Koska värähtelyantureita valmistetaan alihankkijalla, oli kalibrointijärjestelmän oltava yksinkertainen ja helppo käyttää. Kokonaisuudessa oli siis tehtävä järjestelmä, joka testaa sujuvasti värähtelyanturin mittaustuloksia kaikkiin kolmeen mittaussuuntaan.

Järjestelmän keskeiset osat ovat tärustin ja siihen suunniteltu kalibrointiteline sekä referenssikiikkyvyysanturi. Tämän laitteiston käyttämiseen tarvitaan oma käyttöliittymä tietokoneella, digitaali-oskilloskooppi ja vahvistin. Mekaniikanpuolella oli haasteena saada kaikille kerrallaan testattaville neljälle anturille tasapuolinen värähtelyolosuhde. Ohjelmistopuolella piti pystyä tuottamaan tasaisen hyvää signaalia ja valvomaan sen tasaisuutta. Tämän kaiken avulla oli tarkoitus saada järjestelmästä vähän itse mittaajan työtä vaativa ja samalla myös kohtuullisen nopea toimenpide.

Varsinainen värähtelyanturin kiihtyvyyden mittaamisen kalibrointi tehdään paikallaan mitaten maan vetovoimaa vasten. Tämän jälkeen tarkistetaan kalibrointijärjestelmällä antureiden mittauksen laatu ja tallennetaan samalla kalibrointimittaukset. Värähtelyjen kalibroinneissa käytetään taajuutena yleisesti 1 000 rad/s eli 159,15 Hz:ä, mikä on myös tämän kalibrointijärjestelmän käyttämä taajuus. Tärinän tehollinen kiihtyvyys on 5 m/s^2 . Antureiden mittauksien on täytettävä 5 %:n tarkkuus referenssituloksiin nähden sen kaikissa mittaustuloksissa. Tämän lisäksi järjestelmän vaatimuksiin kuului taajuusvasteen mittaus, mikä oli pystyttävä tekemään aina tarvittaessa. Tätä varten määritettiin yhdeksän mittaustaajuutta, millä saadaan jo hyvä kuva anturin taajuusvasteesta.

Järjestelmän ensisijainen tavoite oli siis parantaa värähtelyantureiden laadun valvontaa. Tämän järjestelmän avulla saadaan selville antureiden yksilölliset erot ja samalla pystytään tarkkailemaan mahdollisia muutoksia pitemmällä aikavälillä. Lisäksi nyt pystytään toimittamaan asiakkaalle kalibrointitodistukset, mikä parantaa huomattavasti värähtelyanturin kokonaiskuvaa.

2 Värähtelyn teoreettiset lähtökohdat

Mekaaninen värähtely on edestakaista liikettä tasapainoaseman ympärillä värähtelyn suunnassa. Ennen värähtelyn syntymistä värähtelevä kappale tarvitsee jonkin sysäyksen, mikä saa aikaan värähtelyliikkeen. Värähtely voidaan jakaa vapaaseen ja pakotettuun värähtelyyn. Vapaassa värähtelyssä värähtelevään kappaleeseen ei tule lisäenergiaa ulkoisesti, vaan se on yleensä vaimeneva värähtelijä johtuen vaimennusvoimista. Pakotettuun värähtelijään tulee taas jatkuvasti sysäyksiä, jotka pitävät värähtelyä yllä. Värähtelyssä puhutaan vapausasteista, jotka tarkoittavat kuinka monta toisistaan riippumatonta värähtelysuuntaa värähtelevällä kappaleella on.

Värähtelevää laitteistoa kutsutaan yleensä oskillaattoriksi. Värähtelyyn eri muodoissa törmäämme jatkuvasti normaalissa elämässä. Sitä käytetään hyväksi mm. ääniraidoissa ja kaiuttimissa, kun taas koneissa pääsääntöisesti värähtely tarkoittaa hukkaan menevää energiaa. Värähtelymittaukset ovatkin hyvin keskeinen tekijä, kun mitataan koneiden kuntoa kunnonvalvonnan yhteydessä. Kiihtyvyyksanturilta saatuja mittaustuloksia on käsiteltävä erilaisilla algoritmeilla ohjelmallisesti, jotta niistä saisi kaiken mahdollisen hyödyn irti.

Kalibrointilaitteiston eristäminen oli myös olennainen osa työtä, koska pienetkin häiriötekijät haittaavat kalibrointien värähtelyantureiden mittaustuloksia.

2.1 Värähdysliike

Yksinkertaisin värähtely käsittää vain yhden vapausasteen. Siitä hyviä esimerkkejä ovat heiluri, jousi-massa – systeemi ja vääntövärähtelijä. Näissä tapauksissa värähtely on yleensä jaksollista, jolloin värähtelyllä on tietty jaksonaika. Kappaleen tasapainokohdat voimakentässä

$$F(x) = - \frac{dU}{dx} \quad (2.1)$$

ovat potentiaalin $U(x)$ paikalliset minimiit. Jos kappale on pakotettu siirtymään tästä pisteestä vapausasteen suunnassa, se pyrkii palaamaan tasapainokohtaansa. Tämä voima riippuu kappaleen etäisyydestä tasapainokohdasta. Jos oletetaan, että tämä palauttava voima on jatkuvasti derivoituva, saadaan seuraava funktio Taylorin sarjalla:

$$F(x) = F_0 + x \left(\frac{dF}{dx} \right)_0 + x \left(\frac{d^2 F}{d^2 x} \right)_0 + \dots \quad (2.2)$$

Koska $x=0$ on tasapainokohta, F_0 on oltava 0. Pienillä siirtymillä toisen asteen termi ja sitä ylempät asteet voidaan jättää huomioimatta ja tällöin saadaan:

$$F(x) = - x \left(\frac{dF}{dx} \right)_0 = - kx. \quad (2.3)$$

Koska voima on aina tasapainokohtaan päin, yhtälön derivaatta on negatiivinen ja k on näin positiivinen jousivakio. Tällöin palauttava voima on lineaarinen ja värähtely on harmonista eli se on verrannollinen poikkeamaan ja suunta on kohti tasapainokohtaa.

2.1.1 Harmoninen värähtelijä

Yksinkertaisen harmonisen värähtelijän liikeyhtälöksi saadaan Newtonin toisen lain avulla:

$$F = - kx = m\ddot{x}. \quad (2.4)$$

Liikeyhtälö varten määritetään:

$$\omega_0^2 = k/m. \quad (2.5)$$

Näin saadaan kirjoitettua liikeyhtälö seuraavaan muotoon:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2.6)$$

Tälle yleinen ratkaisu on:

$$x = a \cdot \sin(\omega t) + b \cdot \cos(\omega t) = A \cdot \cos(\omega t + \delta). \quad (2.7)$$

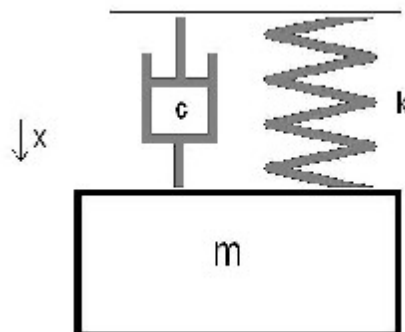
Tässä A kuvaa amplitudin suuruutta ja kosini – termi kuvaa taas värähtelyn vaihetta.

Värähtelijän ominaisvärähtelytaajuus f_n määräytyy jousivakion k ja massan m avulla seuraavasti:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (2.8)$$

2.1.2 Yhden vapausasteen värähtelijä

Yhden vapausasteen värähtelijällä on siis vain yksi värähtelysuunta. Tämä on yksinkertaisin tapaus ja todellisuudessa vapausasteita on aina enemmän, ainakin kuusi.



Kuva 1: Yksinkertainen m – massainen jousi-massa – värähtelijä, johon vaikuttavat jousivakio k ja vaimennuskerroin c .

Yhden vapausasteen värähtelijälle on voimassa seuraava voimatasapaino:

$$F(t) = F_T(t) + F_D(t) + F_S(t). \quad (2.9)$$

Yhtälössä on huomioitu siis massan hitausvoima $F_I(t)$, vaimennusvoima $F_D(t)$ ja jousivoima $F_S(t)$. Tämä voidaan kirjoittaa liikeyhtälönä Newtonin toisen lain nojalla seuraavasti:

$$F(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx, \quad (2.10)$$

missä käytetyt vakiot ovat massa m , vaimennuskerroin c ja jousivakio k . Tämä liikeyhtälö kuvaa värähtelevän kohteen kiihtyvyyden, nopeuden ja sijainnin. Edellä läpikäydyssä vapaan värähtelijän esimerkissä liikeyhtälöön ei vaikuttanut siis vaimennusvoima eikä mikään ulkoinen heräte. Vaimeneva värähtelijä on taas sellainen, mihin ei vaikuta ulkoinen heräte, mutta vaimennusvoimia on kylläkin. Tässä tapauksessa liikeyhtälö saa seuraavan muodon:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (2.11)$$

mikä voidaan kirjoittaa ratkaisemista varten muodossa:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2.12)$$

Tässä yhtälössä on käytetty apuna seuraavaa määritelmää:

$$\beta = \frac{c}{2m}. \quad (2.13)$$

Differentiaaliyhtälö saadaan ratkaistua yritteellä $x=e^{rt}$, jossa r on karakteristinen juuri:

$$r = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}. \quad (2.14)$$

Tällöin saadaan yleiseksi ratkaisuksi:

$$x(t) = e^{-\beta t} \left[A_1 e^{\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} + A_2 e^{-\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} \right]. \quad (2.15)$$

Tästä saadaan kolme erilaista tapausta vaimennukselle: alivaimennettu, kriittisesti vaimennettu ja ylivaimennettu.

2.1.3 Vaimennetut värähtelijät

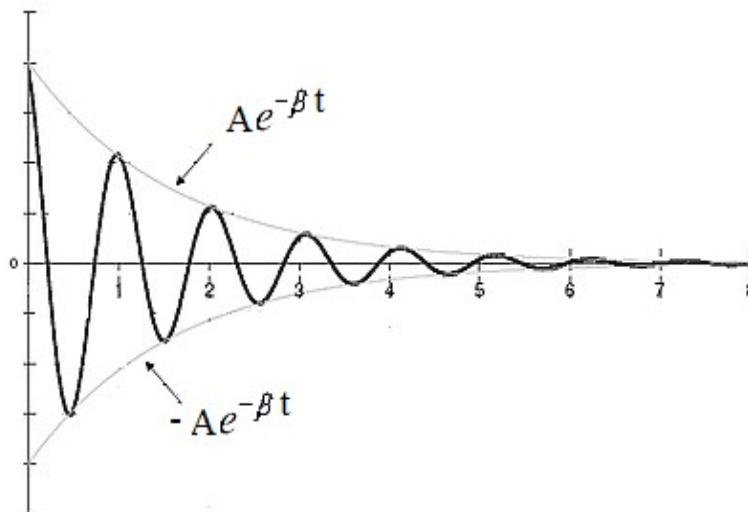
Vaimennettujen värähtelijöiden eri tapaukset selviävät seuraavasta yhtälöstä:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (2.16)$$

Nyt värähtelytaajuus on pienempi kuin vapaan värähtelyn tapauksessa 2.5 vaimennus kertoimesta johtuen. Alivaimennetun värähtelijän tapauksessa pätee $\omega_0^2 - \beta^2 > 0$. Tällöin yhtälössä 2.14 oleva neliöjuuri on imaginaarinen ja yleinen ratkaisu saadaan seuraavaan muotoon:

$$x(t) = e^{-\beta t} \left[A_1 e^{\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} + A_2 e^{-\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} \right] = e^{-\beta t} \cdot A \cos(\omega_1 t + \delta). \quad (2.17)$$

Nyt siis värähtely vaimenee kertoimen $e^{-\beta t}$ mukaisesti ja taajuus muuttuu muuttujan δ verran.



Kuva 2: Vaimeneva värähtelijän kuvaajasta nähdään selvästi vaimennustekijän vaikutus värähtelyyn.

Kappaleen mekaanisen energian muutosnopeus kuvaa dissipaatiota vaimenevassa värähtelijässä:

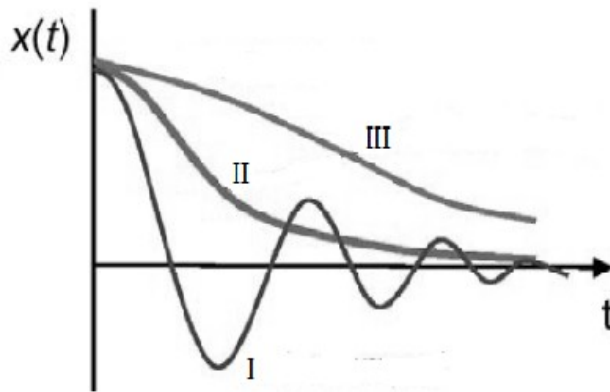
$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k x^2 \right) = m \dot{x} \ddot{x} + k x \dot{x} = (m \ddot{x} + k x) \dot{x} = -\beta \dot{x}^2 = F_v \dot{x} < 0. \quad (2.18)$$

Tämä vaimentavan voiman teho on siis negatiivinen ja sen suuruus riippuu nopeudesta.

Kriittisesti vaimennetun värähtelijän tapauksessa pätee $\omega_0^2 - \beta^2 = 0$. Tällöin yhtälössä 2.14 oleva neliöjuuri on nolla ja näin ollen tulee vain yksi karakteristinen juuri $e^{-\beta t}$. Yleinen ratkaisu saadaan tässä tapauksessa seuraavaan muotoon:

$$x(t) = (A + Bt)e^{-\beta t}. \quad (2.19)$$

Kriittisesti vaimennetussa tapauksessa vaimennettu värähtelijä lähestyy nopeimmin tasapainokohdan.



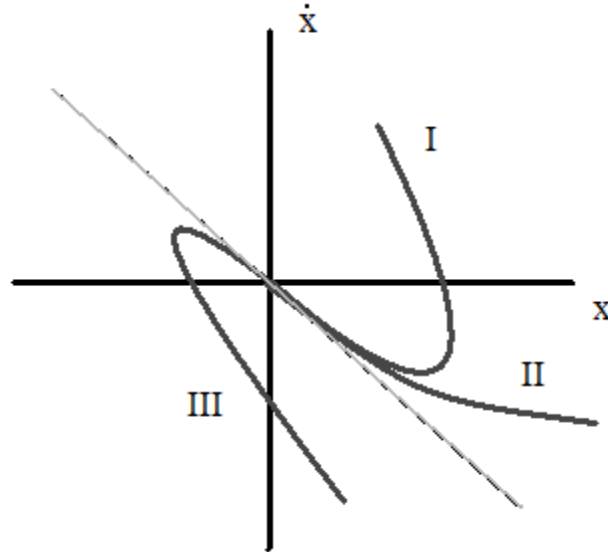
Kuva 3: Kuvassa on esitetty kolme erilaista vaimennus tapausta: alivaimennettu (I), kriittisesti vaimennettu (II) ja ylivaimennettu (III).

Ylivaimennetun värähtelijän tapauksessa pätee $\omega_0^2 - \beta^2 < 0$. Tällöin yhtälössä 2.14 oleva neliöjuuri on positiivinen ja tästä seuraa kaksi erillistä karakteristista juurta. Yleinen ratkaisu saadaan tässä tapauksessa seuraavaan muotoon:

$$x(t) = e^{-\beta t} [A_1 e^{\omega_2 t} + A_2 e^{-\omega_2 t}], \quad (2.20)$$

missä $\omega_2 = \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$.

Siirtymä lähenee asymptoottisesti kohti tasapainokohtaa vaimennuksesta johtuen ja A_1 - kertoimen termi vaimenee hitaammin ajan kasvaessa. Tässä tapauksessa voidaan tarkastella kolmea erilaista tapausta, kun oletetaan $x_0 > 0$. Eri tapaukset ovat kuvattu seuraavassa kuvassa, josta näkee myös asymptoottisen suoran $\dot{x} = -(\beta + \omega_2)$.



Kuva 4: Ylivaimennetun värähtelijän eri tapauksien paikka ja nopeus on kuvattuna faasidiagrammissa.

Kuvassa tapauksessa I on kiihtyvyys positiivinen, ja siirtymä kasvaa, aluksi. Lopulta siirtymä pienenee kohti tasapainokohtaa ja kiihtyvyys lähenee tätä kohtaa negatiiviselta puolelta. Tapauksessa II on kiihtyvyys negatiivinen. Tässä tapauksessa sekä siirtymä että kiihtyvyyden itseisarvo pienenevät koko ajan. Viimeisessä tapauksessa III kiihtyvyys on itseisarvoltaan suuri ja negatiivinen. Tästä johtuen siirtymä vaihtaa merkkiä ennen lähestymistä tasapainokohtaa. Tässä tapauksessa yhtälön 2.20 kertoimiin pätee $A_1 > |A_1|$ ja A_1 on negatiivinen.

2.1.4 Pakkovärähtelijä

Pakkovärähtelyyn tai pakotettuun värähtelyyn liittyy ulkoinen jaksollinen voima jollakin tietyllä taajuudella. Tämä jaksollinen pakkovoima korvaa ainakin osittain energian

dissipaatiota. Tällaiselle koneissa yleisesti esiintyvälle värähtelylle saadaan liikeyhtälö seuraavaan muotoon:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t), \quad (2.21)$$

jossa $F_s(t) = F_0 \cos(\omega t)$ kuvaa harmonista pakkovoimaa. Ratkaisemista varten merkitään:

$$A = \frac{F_0}{m}. \quad (2.22)$$

Ratkaisu sisältää sekä homogeenisen että epähomogeenisen osan. Homogeenisen tapauksen ratkaisu on jo aiemminkin esitetty:

$$x_c(t) = e^{-\beta t} \left[A_1 e^{\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} + A_2 e^{-\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} \right]. \quad (2.23)$$

Epähomogeenisen osan ratkaisun yrite on:

$$x_p(t) = D \cos(\omega t - \delta) = D [\sin \omega t \cdot \sin \delta + \cos \omega t \cdot \cos \delta]. \quad (2.24)$$

Kun tämä sijoitetaan yhtälöön 2.21 saadaan:

$$\begin{aligned} & \{A - D[(\omega_0^2 - \omega^2) \cdot \cos \delta + 2\omega\beta \cdot \sin \delta]\} \cos \omega t \\ & - \{D[(\omega_0^2 - \omega^2) \cdot \sin \delta - 2\omega\beta \cdot \cos \delta]\} \sin \omega t = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Yhtälön molempien $\sin \omega t$ – ja $\cos \omega t$ –osien kertoimien pitää olla 0, jotta yhtälö toteutuu. $\sin \omega t$ – termistä saadaan ratkaistua:

$$\tan \delta = \frac{2\omega\beta}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.26)$$

Tämän avulla saadaan selville sini ja kosini ratkaistua:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \frac{2\omega\beta}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}} \\ \cos \delta &= \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Nyt voidaan ratkaista amplitudi yhtälöstä 2.25 $\sin \omega t$ – termin avulla:

$$D = \frac{A}{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \delta + 2\omega \beta \sin \delta} \quad (2.28)$$

$$= \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \beta^2}}$$

Nyt saadaan epähomogeenisen osan erikoisratkaisu kirjoitettua seuraavaan muotoon:

$$x_p(t) = \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \beta^2}} \cos(\omega t - \delta) \quad (2.29)$$

Yhtälössä oleva vaihe-ero δ on ratkaistu jo yhtälössä 2.26. Tämä ero kuvaa pakotetun voiman taajuuden ja systeemin värähtelytaajuuden eroa. Yleinen ratkaisu on näin ollen:

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \quad (2.30)$$

Yhtälössä oleva homogeenisen osan ratkaisu on merkittävä vain tilapäisesti ja sen merkitys häviää nopeasti ajan kuluessa kertoimen $e^{-\beta t}$ takia. Ratkaisu voidaan kirjoittaa monille sovellutuksille hyödyllisemmässä muodossa seuraavasti:

$$x(t \gg 1/\beta) = x_p(t) \quad (2.31)$$

2.1.5 Resonanssi

Värähtely saavuttaa maksimi amplitudin ominaisvärähtelytaajuuden kohdalla. Tämä resonanssitaajuus voidaan etsiä yhtälön 2.28 derivaatan nollakohdasta:

$$\left. \frac{dD}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_R} = \frac{A}{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \delta + 2\omega \beta \sin \delta} = 0, \quad (2.32)$$

mikä antaa tuloksen:

$$\omega_R = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

Nyt ominaisvärähtelytaajuus on pienempi kuin vapaan värähtelijän vaimennetussa tapauksessa 2.16. Ominaisvärähtelytaajuuden ja vaimennuskertoimen avulla saadaan värähtelijän hyvyysluku esitettyä:

$$Q = \frac{\omega_R}{2\beta} \approx \frac{\omega_R}{\Delta\omega}. \quad (2.33)$$

Kun β on pieni, ja näin ollen D suuri, voidaan kirjoittaa yllä oleva yhtälö jälkimmäiseen muotoon, jossa $\Delta\omega$ on puoliarvoväleveys. Suuren Q -arvon omaava värähtelijä toteuttaa värähtelysovelluksien kaksi tavoitetta sekä taajuuden pysymisen vakiona että värähtelyn ylläpitämisen mahdollisimman pienellä energian kulutuksella.

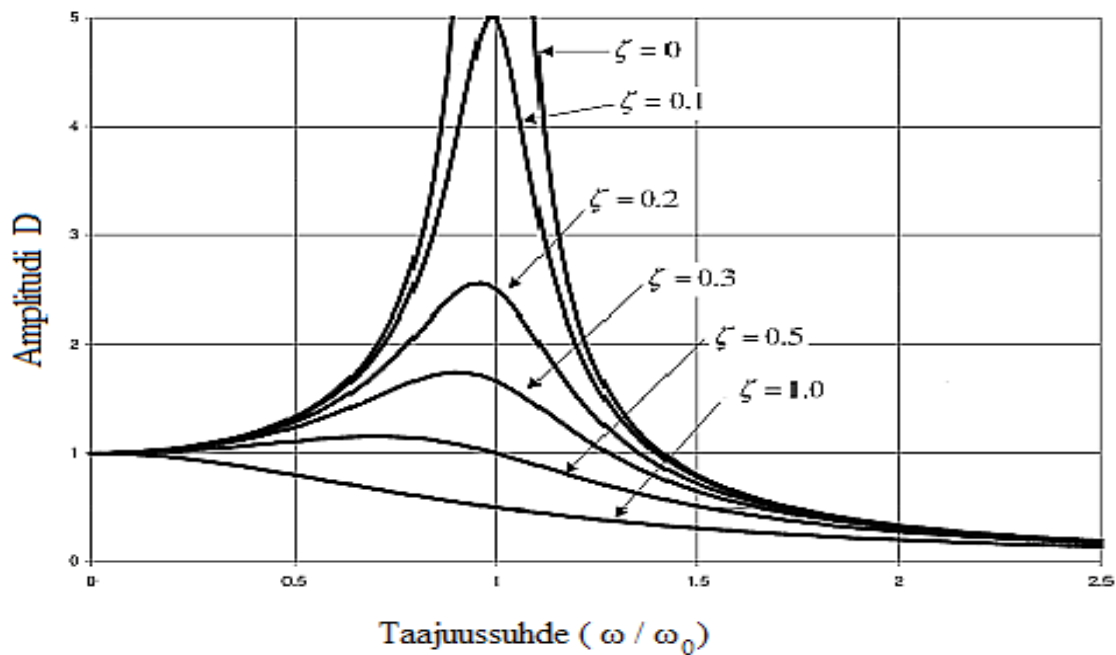
Otetaan käyttöön seuraava vaimennuksen suhdetta kuvaava muuttuja:

$$\xi = \frac{c}{\sqrt{km}}. \quad (2.34)$$

Nyt voidaan kirjoittaa värähtelyn amplitudi tämän avulla seuraavasti:

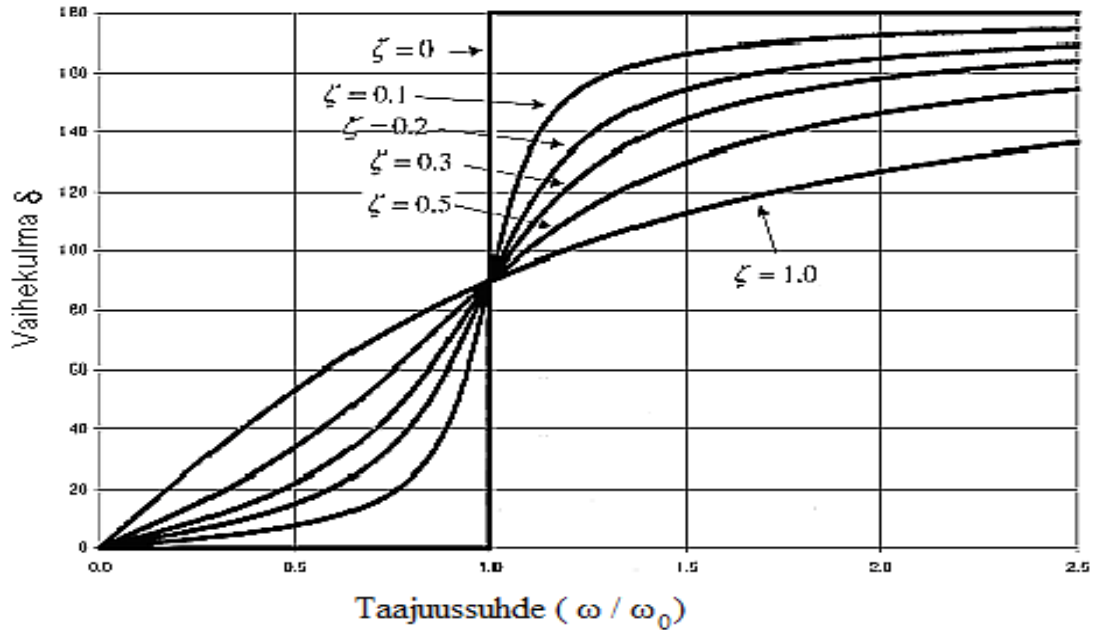
$$\begin{aligned} D &= \frac{F_0}{m\sqrt{\omega_0^4[(1 - (\omega^2/\omega_0^2))^2 + (2\beta\omega/\omega_0^2)^2]}} \\ &= \frac{F_0}{k\sqrt{[1 - (\omega^2/\omega_0^2)]^2 + [2\xi(\omega/\omega_0)]^2}}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Näin saadaan kuvattua värähtelyn amplitudi kulmataajuuksien suhteen funktiona:



Kuva 5: Värähtelyn amplitudi D taajuussuhteen (ω/ω_0) funktiona eri vaimennuskertoimilla.

Sekä yhtälöstä että kuvasta voidaan nähdä, että taajuussuhteen ollessa 1 ainoaksi vaikuttavaksi tekijäksi jää vaimennustekijä. Mikäli vaimennus on rakenteessa heikko, voi tällöin värähtelyn amplitudi kasvaa huomattavan suureksi. Samoin voidaan kuvata myös vaihe-eroa:



Kuva 6: Vaihekulma taajuussuhteen (ω/ω_0) funktiona eri vaimennuskertoimilla.

Myös vaiheessa tapahtuu 180 asteen muutos vaikuttavan voiman ja värähtelyn välisessä vaihe-erossa. Taajuussuhteen ollessa yksi vaihe-ero on täsmälleen 90 astetta. Tätä ilmiötä kutsutaan resonanssiksi tai kriittiseksi nopeudeksi, jos kyseessä on pyörivä liike.

Resonanssissa huomattavia tarkasteltavia arvoja ovat sekä suurin amplitudi että resonanssiipiikin leveys. Kun värähtelevä systeemi on resonanssissa, voidaan amplitudi ilmaista myös seuraavasti:

$$x_{res} = \frac{F_0 / k}{2\zeta}. \quad (2.36)$$

2.1.6 Useamman vapausasteen värähtely

Edellä on käsitelty yhden vapausasteen värähtelyä, mutta todellisuudessa värähtelyä pystytään harvoin kuvaamaan vain yhdellä vapausasteella. Värähtelyä voi olla kolmen eri akselin suunnassa sekä lisäksi niiden akseleiden ympäri voi olla vääntövärähtelyä. Tässä kalibrointilaitteiston kohdalla on kuitenkin selvästi vain yksi kiinnostava vapausaste.

Jos tutkitaan tarkasti pehmeää kappaletta, niin värähtelyä on kappaleen jokaisessa pisteessä kolmen akselin suuntaan. Tällöin saadaan ääretön määrä vapausasteita. Vapausasteita voidaan sanoa olevan kuitenkin n kappaletta, kun ajatellaan diskreettiä ja pistemassaista systeemiä. Tällöin kappaleella on myös n kappaletta eri ominaisvärähtelytaajuuksia. Yksinkertaisimmillaan usean vapausasteen värähtelijää voidaan kuvata heilurilla, jossa on kaksi punnusta heilahtelemassa vapaasti yhdessä.

2.2 Värähtelyn voimakkuus

Värähtelymittauksissa voidaan värähtelyn voimakkuutta mitata usealla eri suureella. Resonanssi on ilmiö, jota yleensä yritetään välttää. Tämä aiheuttaa ominaisvärähtelytaajuudella suurta värähtelyä. Varsinaista värähtelyn suuruutta voidaan kuvata yleisesti käytössä olevalla desibeliasteikolla. Kunnonvalvonnassa värähtelymittauksilla halutaan yleensä mitata tehollisarvoja, jotka kertovat hyvän yleiskuvan laitteen kunnosta.

2.2.1 Desibeliasteikko

Värähtelyn voimakkuutta voidaan esittää hyvin monella eri tavalla. Yleensä aikatasoa kuvaavampi esitystapa on esittää amplitudit taajuuden funktiona taajuustasossa. Tässä on taas vielä useampi tapa ilmaista amplitudia, mutta yleisesti käytetään desibeliasteikkoa. Desibeliasteikkoa käytetään paljon äänien ja värähtelyiden mittauksissa, koska silloin tuloksia voidaan esittää selkeästi laajalla skaalalla. Desibeliasteikko perustuu alun perin tehojen suhteen ilmaisemiseen:

$$I[dB] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right), \quad (2.37)$$

jossa P_1 on referenssiteho. Koska teho on suoraan verrannollinen jännitteen neliöön, saadaan yhtälö seuraavanlaiseksi:

$$I[dB] = 10 \cdot \log\left(\frac{X_2}{X_1}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{X_2}{X_1}\right) \quad (2.38)$$

Tässä X_2 on mitattu arvo ja X_1 referenssiarvo. Jännitteiden lisäksi tätä yhtälöä voidaan käyttää hyväksi värähtelymittauksissa kiihtyvyyksien, nopeuksien sekä siirtymien esittämiseen. Yleensä esimerkiksi kiihtyvyyksiantureiden taajuusvaste ilmoitetaan desibeleinä johonkin referenssitasoon nähden. Taajuusvasteesta erityisen kiintoisia ovat -3 dB:n taajuudet, joiden väliin jää lineaarinen alue. Tämä -3 dB:tä tarkoittaa, että amplitudi on pudonnut noin kolmanneksen ja silloin teho on taas puolittunut yllä olevien yhtälöiden mukaisesti.

2.2.2 Tehollisarvot

Mittaustuloksien esittämisen yhteydessä olisi aina syytä mainita, mitä arvoja on mitattu. Mitata voidaan huippu- ja ”huipusta huippuun” – arvoja sekä näiden tehollisarvoja. Yleisimmin käytettyjä ovat huippuarvoista lasketut tehollisarvot. Tehollisarvojen eli RMS -arvojen lasku selviää hyvin jo englanninkielisestä nimestä eli ”Root-Mean-Square Value”:stä. RMS –arvo koostuu siis amplitudien neliöiden keskiarvon neliöjuuresta jollakin aikavälillä:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt}. \quad (2.39)$$

Jos kyseessä on sinimuotoinen aalto, saadaan tehollis- ja huippuarvon välille seuraava yhteys:

$$x_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0.707A. \quad (2.40)$$

Tämä pätee, koska pitkällä aikavälillä käy seuraavasti:

$$\overline{x^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n\tau/2} \int_0^{\tau/2} A^2 \sin^2 \frac{2\pi t}{\tau} dt = \frac{2A^2}{\tau} \int_0^{\tau/2} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{4\pi t}{\tau} \right) dt = \frac{A^2}{2}, \quad (2.41)$$

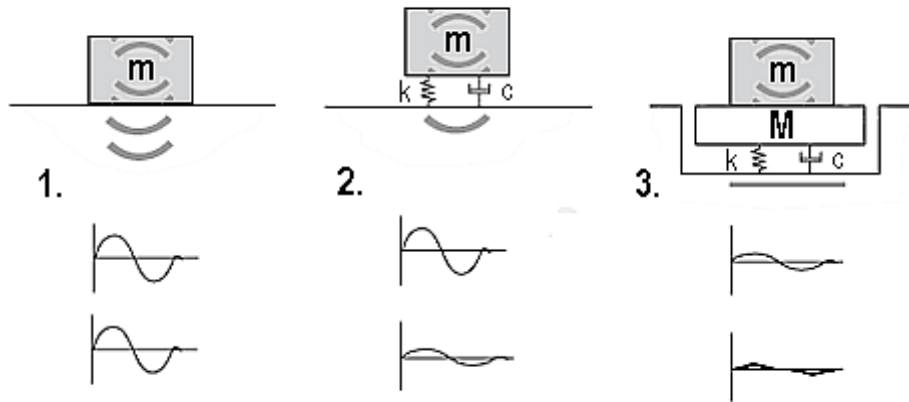
jossa n kuvaa puolikkaiden siniaaltojen määrää. Siitä saadaan taas riippuvuus aikavälille

$$T = n\tau/2. \quad (2.42)$$

2.3 Värähtelyn eristäminen

Värähtelyt ja varsinkin resonanssit ovat usein haitallisia koneissa. Näitä ilmiöitä pystytään välttämään kuitenkin huolellisella eristyksen suunnittelulla. Eristyksellä pyritään sekä suojelemaan laitetta ulkopuoliselta värähtelyltä että estämään mahdollista laitteen aiheuttamaa värähtelyä ympäristöön. Jos kyse on koneesta, mikä tärisee, pyritään eristyksellä vaimentamaan tärinän johtumista ympäristöön. Toisaalta herkkiä mittalaitteita suojellaan ulkopuoliselta tärinältä myös tekemällä hyvä eristys sen ja ympäristön väliin. Eristyksellä pyritään vaimentamaan joko voimaa tai liikettä. Eristysmateriaaleina voi olla käytössä mm. korkkia, kumia, neopreeniä tai joskus metallia.

Seuraavassa kuvassa on eri tavoin eristetty värähtelevä massa ympäristöstä.



Kuva 7: Värähtelijän eristäminen ympäristöstä on kuvattu kolmella eri vaihtoehdoisella tavalla. Ylemmässä osassa kuvan alla on kuvattu värähtelevän kappaleen värähtelyä ja alemmassa osassa kuinka paljon siitä siirtyy värähtelyä alustaan.

Kuvassa ensimmäisenä on tapaus, jossa ei ole mitään eristystä välissä. Silloin värähtely siirtyy suoraan ympäristöön ilman vaimenemista. Seuraavassa kuvassa väliin on lisätty eriste, jolla on tietty jäykköys eli jousivakio k ja vaimennuskerroin c . Viimeiseen kuvaan on lisätty vielä suurempi massa M värähtelijän yhteyteen, mikä vähentää kappaleen värähdysliikettä. Kahdessa viimeisessä eristyksen aiheuttama vaimennus on huomattava verrattuna ensimmäiseen tapaukseen.

Vakaassa tilassa liikkeen amplitudia ja vaihetta kuvaa yhtälö:

$$\left| \frac{X}{Y} \right| = \sqrt{\frac{k^2 + (\omega c)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2}}, \quad (2.43)$$

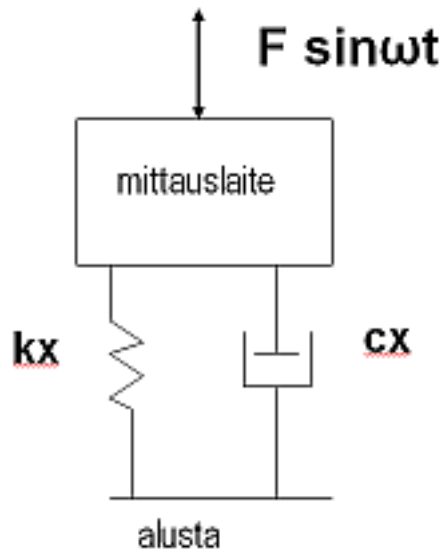
missä X kuvaa värähtelevän kappaleen liikettä ja Y on kappaleesta alustaan aiheutuva värähdysliike. Hyvällä yksilöllisellä eristyksen suunnittelulla pystytään vähentämään värähtelyn siirtymistä kappaleesta alustaan. Tällöin on valittava yhtälöön 2.43 muuttujat k , c ja m oikein suhteessa värähtelutaajuuteen nähden.

Eristyksistä huolimatta voimaa siirtyy värähtelyn lähteen ja vaimennuksen kohteen välille. Tätä voimaa voidaan kuvata yksinkertaisesti olettaen, ettei alusta liiku ollenkaan:

$$F_T = kx + c\dot{x} = \sqrt{(kX)^2 + (c\omega X)^2} = k|X| \sqrt{1 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_0}\right)^2}. \quad (2.44)$$

Kun otetaan huomioon ulkoinen voima muodossa $F_0 \sin \omega t$, saadaan taas jo aiemmin ratkaistu amplitudi D seuraavasti:

$$D = \frac{F_0 / k}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + [2\zeta \omega / \omega_0]^2}}. \quad (2.45)$$



Kuva 8: Ulkoisen voiman vaikutus mittauslaitteeseen ja erityis alustasta.

Edellä kuvatuista yhtälöistä voidaan selvittää alustaan siirtyvän voiman F_T :n ja ulkoisen herätteen F_0 :n suhde. Tätä suhdetta kutsutaan läpäisykertoimeksi eli TR :ksi. Yhtälö siirtyvän ja ulkoisen voiman välillä on:

$$TR = \left| \frac{F_T}{F_0} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega / \omega_0)^2}{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + [2\zeta\omega / \omega_0]^2}}. \quad (2.46)$$

Värähtelyn voidaan sanoa olevan eristetty, kun $\omega/\omega_0 > \sqrt{2}$. Tällöin kaava antaa TR:ksi alle yksi. Tämä pätee, kun ominaisvärähtelytaajuus ω_0 on pienempi kuin $\omega/\sqrt{2}$. Tämä edellä oleva yhtälö on vastaava kuin yhtälö 2.43, mutta kirjoitettu vain vähän eri muuttujilla. Hyvä eristys siis vähentää sekä häiritsevän voiman että värähtelyn siirtymistä värähtelevän kappaleen ja alustan välillä.

Vaimennuskertoimen ollessa pieni, sillä ei ole merkittävää vaikutusta yhtälöön. Jos pätee $\zeta < 0.2$, saadaan yhtälö sievempään muotoon:

$$TR = \frac{1}{(\omega / \omega_0)^2 - 1}. \quad (2.47)$$

Tässä nimittäjä on muokattu siten, että tulos on aina positiivinen kaavan oletusehdoilla. TR kertoo suhteen ja joskus voi olla parempi ilmaista eristyksen tehokkuus vaimennuskertoimen R avulla:

$$R = 1 - TR. \quad (2.48)$$

Nämä kaksi kaavaa yhdistettäessä saadaan:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sqrt{\frac{2 - R}{1 - R}}. \quad (2.49)$$

Aiemmin on kuvattu värähtelijän eristämistä ympäristöstä kolmella eri tavalla kuvassa 7. Siinä esitetty kolmas vaihtoehto tulee varteenotettavaksi vaihtoehdoksi, kun halutaan suuri R pienillä taajuuksilla oltaessa. Tällöin liitettäessä värähtelijään suurimassainen kappale saadaan aikaan ominaisvärähtelytaajuuden aleneminen:

$$f_n = \frac{\sqrt{k/(m + M)}}{2\pi}. \quad (2.50)$$

Jotta värähtelyn amplitudia saataisiin pienennettyä, pitäisi massaa kasvattaa. Tämä onnistuisi lisäämällä isompimassainen kappale lähteeseen. Tällöin pitää taas käyttää eristyksessä suuremman jousivakion k omaavaa ainetta, mikä taas lisää amplitudia. Tämän lisäksi ongelmia suunnittelussa lisäävät vielä eri vapausasteet. Kun suunnittelu on

tehty teoriassa, on kokeiltava käytännössä vielä vähän erilaisia ratkaisuja, jotta paras eristysvaihtoehto löytyisi.

Monesti ongelmia lisäävät myös käytössä olevat eri taajuudet. Samanlainen eristys ei toimi pienille ja suurille taajuuksille, vaan on tehtävä jonkinlainen kompromissi näiden väliltä. Esimerkiksi värähtelyantureiden taajuusvastetta mitattaessa tämä ongelma tulee esiin. Valittu eristystapa ei mahdollistanut mittauksia 20 Hz:llä, vaan siitä oli luovuttava. Tällöin eristys toimii suurimmalla osalla taajuuksista hyvin ja tärkeimmät taajuudet saadaan luotettavasti mitattua. Tässä on huomioitavaa se, että $|X|/|Y|$ -suhde pienenee, kun toimintataajuuden ja ominaisvärähtelytaajuuden suhde kasvaa.

2.3.1 Laitteiston eristys ja dissipaatio

Kaikissa värähtelysteemeissä esiintyy vaimennusta. Se poistaa värähtelevää energiaa systeemistä. Esimerkiksi koneissa energiaa muuttuu tällöin lämmöksi. Koneiden lämpeneminen tarkoittaa yleisesti hukkaan menevää energiaa. Toisaalta vedessä oleva poiju, joka kelluu aaltojen mukaan, lähettää myös itse aaltoja poistaen näin samalla myös energiaa.

Vaimennusta on hankala kuvata tarkkaan teoreettisesti, mutta energian dissipaatiolle yhdessä syklissä vaimennusvoimalla F_D on johdettu yleisesti seuraava yhtälö:

$$W_D = \oint F_D dx. \quad (2.51)$$

Tähän kuitenkin todellisuudessa vaikuttaa niin moni eri tekijä, kuten lämpötila, taajuus ja amplitudi, että yhtälö on yleisesti enemmänkin vain suuntaa antava. Jo aikaisemmin esimerkkinä ollut yksinkertainen jousi-massa – systeemi toimii tässäkin hyvänä esimerkkinä. Silloin energian häviöksi tulee:

$$\begin{aligned} W_D &= \oint F_D dx = \oint c\dot{x} dx = \oint c\dot{x}^2 dt = c\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \phi) dt \\ &= \pi c\omega X^2 = 2\zeta \pi k X^2 \end{aligned} \quad (2.52)$$

kun $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ja $c = 2\zeta \sqrt{km}$.

2.4 Fourier'n muunnos signaalinkäsittelyssä

Signaalinkäsittelyssä käytetään yleisesti Fourier'n muunnoksen diskreetistä muotoa eli DFT:ä (*Discrete Fourier Transform*). Sitä käytetään muuttamaan aikataason data taajuustason esitykseksi. Kun signaalia ajatellaan jaksolliseksi sarjaksi, jolloin se voidaan ajatella äärelliseksi Fourier'n sarjaksi, korvautuu integraali summalausekkeeksi:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (2.53)$$

DFT:stä on kehitetty tehokkaampi FFT-algoritmi eli *Fast Fourier Transform*. DFT:n aikavaativuus on $O(N^2)$ ja FFT on paljon nopeampi suurilla N :n arvoilla aikavaativuudellaan $O(N/2 * \log_2 N)$. Myös värähtelyanturi laskee taajuustason esityksen FFT:tä hyväksi käyttäen.

3 Värähtelymittaukset

Mitta-anturit perustuvat yksinkertaisimmillaan jousi-massa – systeemiin. Kiihtyvyyssanturin rakenne ja mittausperiaate vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. Kiihtyvyyttä voidaan mitata monin eri tavoin ja nykyisin käytetään paljon pietsosähköiseen ilmiöön perustuvia antureita, kuten esimerkiksi kalibrointijärjestelmän referenssikihtyvyyssanturissa.

3.1 Mitta-anturit

Yksinkertaisen jousi-massa – systeemiin perustuvan anturin mittaustulos perustuu kaavaan (2.35). Siitä huomaa selvästi, että anturi on erittäin riippuvainen värähtelyn taajuudesta ja ominaisvärähtelytaajuudesta. Resonanssitaajuus rajoittaa siis mittauksia, koska amplitudi on suuri resonanssin kohdalla. Tällöin anturin tasaiseksi mittausalueeksi rajoittuvat pienemmät taajuudet kuin $0.2 \omega_0$. Monesti mittauksissa on vielä useampia taajuuskomponentteja, mistä jokaisen mitattavan taajuuden on täytettävä edellinen ehto. Anturin ominaisvärähtelytaajuus on siis saatava isoksi verrattuna tavoiteltuun mittausalueeseen.

Useimmissa kiihtyvyyssantureissa mittaus perustuu liikkuvaan massaan. Massan liikettä voidaan mitata magneetin ja massaan sijoitetun kelan avulla. Tällöin ulostuleva jännite on verrannollinen magneettikentän vuon muutokseen.

$$V = -N \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (2.54)$$

missä N on kelassa olevien silmukoiden määrä. Tämä taas tarkoittaa, että ulostuleva jännite on suoraan verrannollinen suhteelliseen liikkeeseen liikkuvan massan ja värähtelevän rungon välillä.

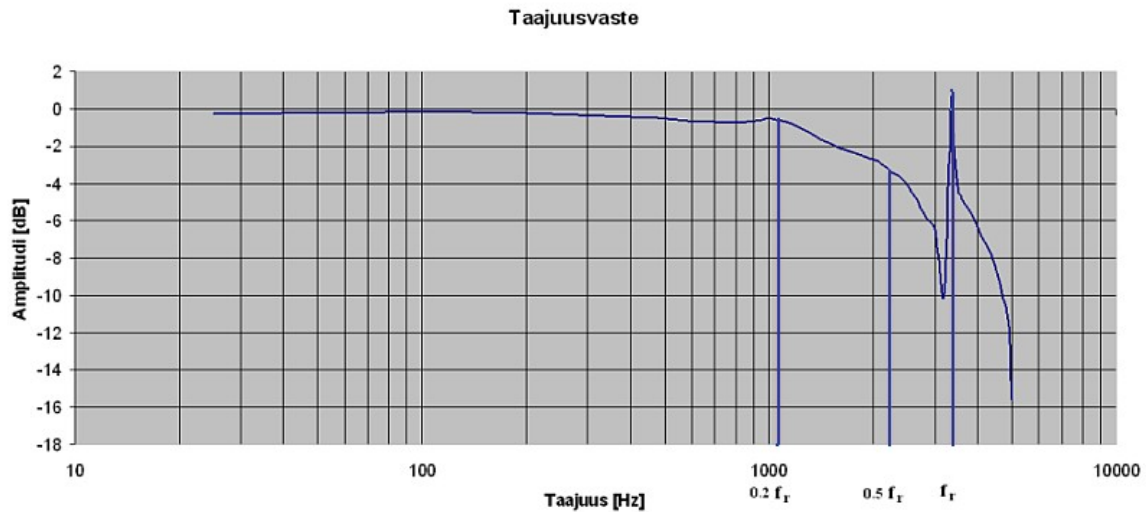
Venymäliuskojen avulla pystytään myös mittaamaan suoraan massan liikettä. Kapasitiivisiin mittauksiin perustuvat kiihtyvyyssanturit ovat myös yleisiä. Yksi eniten nykyään käytössä oleva mittaustapa mitata kiihtyvyyttä on pietsosähköiseen ilmiöön perustuvat anturit.

3.2 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturi mittaa nimensä mukaan kiihtyvyyttä, jota voidaan mitata sekä dynaamisesti että staattisesti. Kiihtyvyyssantureita on markkinoilla valtava määrä, koska niitä voidaan käyttää niin monissa erilaisissa sovelluksissa. Kiihtyvyyttä voidaan mitata yhdestä kolmeen suuntaan. Lisäksi kiihtyvyyssantureilla voidaan mitata kiihtyvyyden avulla anturin kaltevuuskulmaa tai tärähdyksiä. Kiihtyvyyssanturia valittaessa onkin tiedettävä millaiseen sovellukseen anturi tulee.

Kiihtyvyyssantureiden yleisperiaate on, että ne mittaavat seismisen massan ja värähtelevän rungon suhteellista liikettä. Kaikille kappaleilla on jokin tietty ominaisvärähtelytaajuus, mikä rajoittaa mittausaluetta. Esimerkiksi seismometrissä on erittäin alhainen ominaisvärähtelytaajuus ja sen mittausalue alkaa vasta tämän taajuuden jälkeen. Yleensä taas kiihtyvyyssantureissa pyritään mahdollisimman korkeaan ominaisvärähtelytaajuuteen. Tällöin mittaukset tapahtuvat tätä taajuutta alemmilla taajuuksilla. Tällaisilla antureilla ominaisvärähtelytaajuus voi olla kymmeniä kHz:ä.

Kiihtyvyyssantureiden mittausominaisuudet selviävät hyvin taajuusvasteesta. Siitä selviää helposti millä taajuuksilla anturia voidaan käyttää luotettavasti. Seuraavassa kuvassa on esitetty erään testattavan värähtelyanturin taajuusvaste:



Kuva 9: Kuvassa on esitetty erään värähtelyanturin taajuusvaste desibeliasteikolla.

Kuvasta selviää värähtelyanturin resonanssitaajuus f_r , joka on 3.35 kHz. Viidesosa tästä resonanssitaajuudesta antaa ylärajan 5 %:n virhemarginaalille. Eli värähtelyanturin lineaarinen alue yltää 1005 hertsiin asti siten, että vaimenemista on tapahtunut korkeintaan 5 %:a lineaariselta alueelta. Kolmasosa resonanssitaajuudesta antaa taas yläraja-arvon 10 %:n virhemarginaalille. Puolikas resonanssitaajuus kertoo taas -3 dB:n taajuuden. Tällöin siis amplitudi on vaimentunut 3 dB:ä lineaariselta alueelta.

Yleensä kiihtyvyyssantureiden taajuusvasteen alapäässä on vastaavanlaisia pisteitä. Hoxvillen värähtelyanturi mittaa kuitenkin myös staattista kiihtyvyyttä, joten se antaa paikallaan ollessa maan vetovoimaa vastaavan kiihtyvyyden. Tällöin ei voi määrittää mitään alarajapisteitä mittauksille.

3.3 Pietosähköiset kiihtyvyyssanturit

Pietosähköiset kiihtyvyyssanturit ovat hyvin suosittuja ominaisuuksiensa vuoksi, vaikka anturit ovat keskimäärin hivenen kalliimpia kuin muut vastaavat kiihtyvyyssanturit. Ilmiön avulla päästään tarkkoihin kiihtyvyyssmittauksiin laajalla taajuusalueella, mikä on monissa mittauksissa tärkeää.

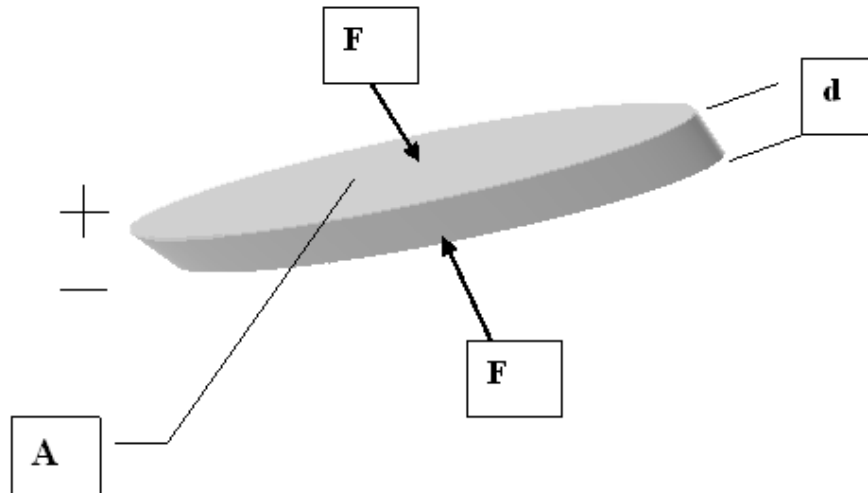
3.3.1 Pietsosähköinen ilmiö

Pietsosähköistä ilmiötä käytetään hyväksi monissa kiihtyvyyssantureissa. Ilmiö tulee esiin pietsosähköisissä materiaaleissa, kuten kvartsissa. Tällaisiin aineisiin muodostuu jännite pintojen välille eli syntyy sähköinen polarisaatio, kun sen pintoihin kohdistuu mekaaninen voima. Pietsosähköinen ilmiö ei riipu ainoastaan materiaalista, vaan myös kideakselien suunnista. Ilmiö on siis anisotrooppinen, koska sen sähköiset, mekaaniset ja sähkömekaaniset ominaisuudet vaihtelevat kideakselien suunnan mukaan.

Pietsosähköinen ilmiö havaittiin jo 1880, jolloin veljekset Pierre ja Jacques Curie demonstroivat ilmiön. Ferrosähköisistä materiaaleista tuli kiinnostavia, koska niistä pystyttiin tekemään käsittelyllä pietsosähköisiä materiaaleja. Käsittelyn aikana lämmitetään materiaalia ja saatetaan se voimakkaaseen magneettikenttään. Tämän aikana materiaali polarisoituu ja jäähtytyksen jälkeen materiaalin on pietsosähköinen. Tällaisten materiaalien lämmittäminen yli Curien pisteen tuhoaa materiaalin pietsosähköisyyden.

Pietsosähköistä materiaalia puristettaessa polarisaatioakselin suunnassa antaa se positiivisen jännitteen pintojen väliltä. Taas jos voima venyttää materiaalia polarisaation suunnassa, niin jännite on päinvastainen. Pietsosähköistä elementtiä voidaan ohjata myös ulkoa tulevalle jännitteelle. Jos ulkoinen jännite vahvistaa sähköistä polarisaatiota, materiaali supistuu. Päinvastainen jännite saa aikaan materiaalin venymisen.

Kiihtyvyyssantureissa pietsosähköisen materiaalin lisäksi toinen keskeinen tekijä on seisminen massa, joka tuottaa voiman pietsosähköiseen elementtiin kiihtyvyyden muuttuessa.



Kuva 10: Pietzosähköinen elementti, jonka ala on A ja paksuus d . Pintoihin vaikuttava voima F saa aikaan varauksen pintojen välillä.

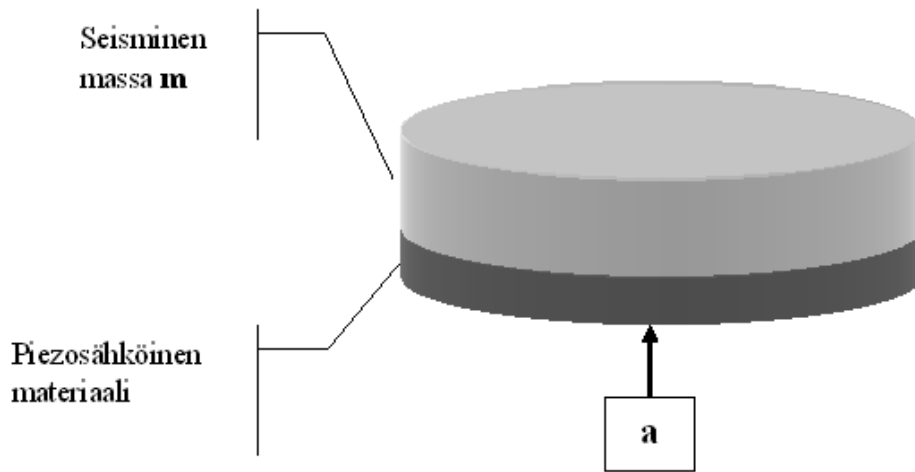
Kuvassa pinnalle syntyvän varauksen suuruus voiman F vaikutuksesta on:

$$q = d_{33}F . \quad (2.55)$$

Varauksien $+$ ja $-$ välille syntyy jännite, joka voidaan määrittää seuraavasti:

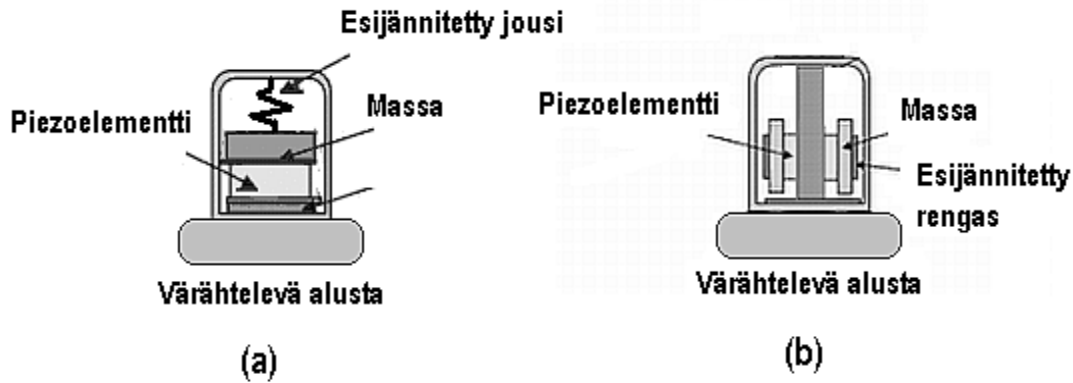
$$u = \frac{d_{33}d}{e_{33}A} F , \quad (2.56)$$

jossa d_{33} ja e_{33} ovat pietsovakioita. Alaindeksi 33 tarkoittaa, että voima on samaan suuntaan kuin polarisaatio materiaalissa ja voima vaikuttaa samaan pintaan, missä on varaus. Jotta pietzosähköiseen elementtiin saadaan kohdistumaan voima kiihtyvyyden avulla, niin toinen pinta on kiinnitettävä anturin tukevaan runkoon ja toinen taas seismiseen massaan, joka reagoi kiihtyvyyteen.



Kuva 11: Piezosähköisen kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate, jossa piezosähköisen materiaalin pinnat ovat siis kiinnittyneet runkoon ja seismiseen massaan.

Systemin joutuessa kiihtyvään liikkeeseen, seisminen massa kohdistaa voiman F piezosähköiseen materiaaliin Newtonin toisen lain mukaisesti. Koska seisminen massa on vakio, niin voima on suoraan verrannollinen kiihtyvyyteen. Piezosähköinen anturi antaa kiihtyvyyden arvon sähköisenä varauksena, mutta se muutetaan jo anturin sisäisellä tai ulkoisella varausvahvistimella jännitteeksi. Pietsoantureita valmistetaan suurelta osin kahdella eri perusrakenteella, jotka on kuvattu seuraavassa kuvassa. Molemmissa rakenteissa pietsoelementtiin kohdistuu puristusta tai vääntöä, mikä saa aikaan kiihtyvyyden nähden suoraan verrannollisen varauksen muutoksen.



Kuva 12: Kuvassa on esitelty puristus (a)- ja kierto (b)- tyyppisten pietsosähköisten kiihtyvyyssantureiden rakenteet.

Pietsoantureiden herkkyys ja mittausalue ovat hyviä verrattuna muihin kiihtyvyyssantureihin. Anturin herkkyys voidaan ilmoittaa varauksen [pC / g] tai jännitteen [mV / g] avulla suhteessa maan vetovoimaan. Tyypillisesti pietsoantureiden herkkyys on 100 mV/g, mutta herkkyys vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan paljonkin.

3.3.2 Pietsosähköisöisien kiihtyvyyssantureiden ominaisuuksia

Pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit ovat kestäviä erilaisissa olosuhteissa. Ne kestävät hyvin likaa, värähtelyä ja erilaisia lämpötiloja verrattaessa muihin kiihtyvyyssantureihin. Ilmiöön perustuvia kiihtyvyyssantureita kutsutaan mm. IEPE (Integrated Electronics PiezoElectric) - antureiksi. Tämä lyhenne on käytössä referenssianturin valmistajalla, mutta vastaavanlaisista pietsoantureista on myös monia muita lyhenteitä, kuten esimerkiksi ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric*) ja CCLD (*Constant Current Line Drive*).

3.4 Muut kiihtyvyyssanturit

Pietsosähköisten kiihtyvyyssantureiden lisäksi kiihtyvyyttä voidaan mitata usealla muulla tavalla. Kapasitanssin muutoksiin perustuvat kiihtyvyyssanturit ovat myös yleisiä. Näissä antureissa kiihtyvyys saa aikaan muutoksen kapasitanssissa joko etäisyyden tai pinta-alan

muuttumisen seurauksena. Nämä anturit valmistetaan yleensä piistä erilaisin mikrotyöstömenetelmien avulla. Tätä piistä valmistettua mikromekaanista järjestelmää kutsutaan lyhenteellä MEMS (*Micro Electro Mechanical System*). Hoxvillen värähtelyanturin kiihtyvyydsmittaus perustuu juuri tähän menetelmään. Näissä kiihtyvyyksianturin kapasitanssi muutos on suoraan verrannollinen kiihtyvyyden arvoon. Etuna pietsosähköisiin antureihin verrattuna on edullisuus, mutta tarkkuus ja herkkyys ovat yleensä ottaen heikompia kuin pietsosähköisissä antureissa.

3.5 Mittauksissa käytössä olevat kiihtyvyyksianturit

Mittauksissa on käytössä sekä pietsosähköiseen ilmiöön perustuva että MEMS – kiihtyvyyksiantureita. Referenssianturi on pietsosähköisyyteen perustuva IEPE – kiihtyvyyksianturi. Siinä on sisäänrakennettu vahvistin, minkä ansiosta se voidaan kytkeä pitkälläkin johdolla suoraan mittaustuloksia lukevaan laitteeseen. Kalibroituissa Hoxvillen värähtelyantureissa kiihtyvyyden mittaus perustuu taas MEMS - tekniikkaan. MEMS - kiihtyvyyksianturit pystyvät mittaamaan sekä staattista että dynaamista kiihtyvyyttä.

4 Kalibrointilaitteiston lähtökohdat

Tarkoitus oli siis suunnitella sellainen kalibrointilaitteisto, jolla pystytään kätevästi saamaan antureiden yksilöllisiä mittauseroja referenssianturiin nähden. Olennaisimmat osat laitteistossa ovat referenssikiikkyvyysanturi, signaalin lähde, tärustin ja vahvistin. Kalibroinnin jäljitettävyyden riippuu referenssianturista, mutta myös laitteiston muut osat ovat merkittävässä roolissa, jotta mittaustuloksien luotettavuus olisi taattu.

4.1 Värähtelyanturin kalibroinnin lähtökohdat

Kiihtyvyyksianturit on kalibroitava, jotta päästään tarkkoihin mittauksiin. Kiihtyvyyksiantureissa on pieniä yksilöllisiä eroja, joten anturit pitää kalibroida ennen asiakkaalle toimittamista. Kalibroinnin pitää taas perustua yleisesti tunnettuihin standardeihin. Tämän takia jäljitettävyyden on hyvin keskeinen asia, kun puhutaan luotettavasta kalibroinnista.

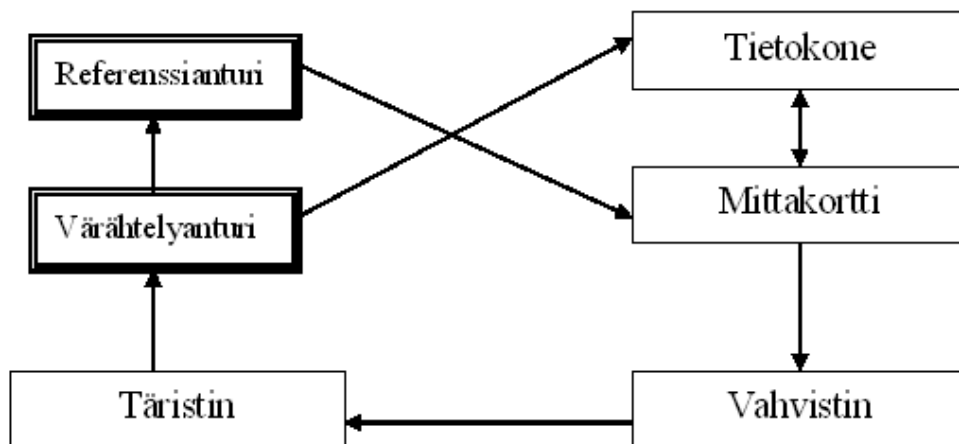
Jäljitettävyyden määrittää mittaustuloksen yhteyden ilmoitettuihin referensseihin, jotka ovat yleensä kansainvälisiä mittanormaaleja. Yhteys pitää olla tällöin aukoton siten, että kaikille vertailuille on ilmoitettu epävarmuudet. Jäljitettävyyden avulla pystytään sanomaan tarkasti, missä rajoissa kyseinen anturi toimii luotettavasti.

Tässä tapauksessa kalibroitajaksi alkaa SI-järjestelmän määritelmästä, missä on määritetty kiihtyvyys $[m/s^2]$. Tätä taas käytetään jossakin akkreditoidussa kalibrointilaboratoriossa mittanormaalina. Käytössä oleva referenssianturi on siis kalibroitu tällaisessa laboratoriossa. Tämän avulla jäljitettävyyden säilyy aina värähtelyantureiden kalibrointiin asti.

Tässä tapauksessa itse tehty kalibrointijärjestelmä toimii hyvin, koska tiedossa on tarkasti miten anturia pitää testata. Värähtelyanturi laskee mittauksista automaattisesti taajuusvasteen, mikä tekee anturista poikkeuksellisen verrattuna muihin kiihtyvyyssantureihin. Maailmalla on monia kalibrointeihin erikoistuneita laboratoriota, joissa kalibroinnin hinnaksi tulee satoja euroja. Ne ovatkin enemmän keskittyneet testaamaan tarkkaan käyttöön tulevia antureita, kuten referenssiantureita. Oman järjestelmän etu on myös se, että kalibrointi voidaan suorittaa samassa paikassa itse valmistuksen kanssa. Tämä nopeuttaa tuotantoa eikä ylimääräisiä kuluja tule anturin kalibroinnista.

4.2 Laitteiston suunnittelun lähtökohdat

Kalibrointilaitteiston suunnittelu alkoi laitteiston lohkokaaavion laatimisella.



Kuva 13: Kalibrointilaitteiston suunnittelun lohkokaaviokuva.

Tässä on yksinkertaisesti kuvattu, miten laitteen eri osat ovat kytköksissä toisiinsa. Tämän jälkeen oli alettava suunnittelemaan tarkemmin kunkin osan toimintaa. Tietokone toimii käyttöliittymänä kalibrointilaitteistolle. Ohjelman avulla generoidaan oikeanlainen

signaali mittakortista ulos ja luetaan samalla referenssianturin mittaustuloksia mittakortista. Vahvistimen ja tärhistimen avulla saadaan haluttu värähtely kalibroitalle anturille. Takaisinkytkennän avulla voidaan pitää tärinä vakiona. Kalibroitalta värähtelyanturilta luetaan mittaustietoja MODBUS – verkon kautta.

Varsinainen täristävä osa koostui siis tärhistimestä ja siihen tulevasta kalibroitelineestä. Tähän telineeseen kiinnitetään sekä kalibroitalvat anturit että referenssianturi. Neljälle anturille saatiin tehtyä mittaustaikka siten, että kalibroitelineestä tuli täysin symmetrinen. Kalibroitelineen piti olla luotettava mittauksien kannalta, mutta samalla sen piti olla helppo ja nopea käyttää mittauksissa.

4.3 Referenssianturi

Yksi keskeisimmistä osista kalibroitilaitteistossa on referenssikiihtyvyysanturi. Kalibroitilaitteiston laatu on riippuvainen referenssianturin luotettavuudesta. Tämä tarkoittaa sitä, että anturista pitää olla tarkat kalibroititiedot ja sen on hyvä olla jäljitettävä. Samalla tätä kautta saadaan jäljitettävyys myös kalibroitilaitteiston tuloksiin. Tämän lisäksi referenssianturin piti olla sopiva mittauksiin muodon ja mittaustaluiden suhteen.

Erilaisia kiihtyvyysantureita on markkinoilla valtava määrä ja tähän kalibroitilaitteistoon sopi parhaiten tietysti juuri kalibroititarkoitukseen tehtyt anturit. Näissä kiihtyvyysantureissa ovat mittaustaluidet suunniteltu kalibroititarkoitukseen. Seuraavana on listattu vartenotettavia kiihtyvyysantureita suurilta tunnetuilta valmistajilta, joilla oli maahantuojia Suomessa.

				Bruel & Kjaer
Valmistaja	PCB Piezotronics	PCB Piezotronics	Endevco	
Malli	301A11	320C15	2270	4371
tyyppi	back-to-back	side-connector	back-to-back	side-connector
herkkyys	100 mV/g	100 mV/g	2.2 pC/g	10 pC/g
mittausalue	50 g	50 g	1000 g	6000g peak
taajuusalue	0.5 Hz - 10 kHz	0.5 Hz - 10 kHz	2-5000 Hz	0.1-12600
saatavuus	Novotek Finland Oy	Novotek Finland Oy	Straintech Finland Oy	ei Suomesta
hintaa	paketissa 2132	613	2190	?
toimitusaika	4-5 viikkoa	4-5 viikkoa	3-6 viikkoa	?
				AP Technology
Valmistaja	Kistler	Wilcoxon	MMF	
Malli	K-Shear 8702B100	775A	KS77C	AP35-100
tyyppi	side-connector	side-connect	side-connector	side-connector
herkkyys	50 mV/g	100 mV/g	100 mV/g	100 mV/g
mittausalue	100 g	80 g	60 g	50 g (rms)
taajuusalue	0.5-10000	0.4-12000	0.4-18000	0.5-11000
saatavuus	Kistler Nordic AB	Controlway Oy	MIP Oy	MIP Oy
hintaa	488/eristetty v. 580	390	526/420	505
toimitusaika	pari viikkoa	6 viikkoa	pari viikkoa	pari viikkoa

Taulukko 1: Kahdeksan eri kiihtyvyyssanturin vertailu käytettäväksi referenssianturiksi.

Taulukossa heti valmistajan ja mallin jälkeen on anturin tyyppi. Back-to-back – tyyppinen anturi on sellainen, jossa on kiinnitysmahdollisuus sekä anturin pohjassa että päällä. Tällainen tyyppi on yleisesti parhaiten soveltuva kalibrointikäyttöön, koska se voidaan lisätä tärhistimen ja kalibroitavan anturin väliin. Side-connector – tyyppinen tarkoittaa taas sitä, että kiinnitysmahdollisuus on vain pohjassa. Näissä molemmissa

tyypeissä anturista lähtevä johto on anturin sivulla. Kolmantena tyyppinä kiihtyvyyssantureissa on top-connector – tyyppi, jossa on kiinnitys pohjassa ja lähtevä johto taas anturin päällä.

Kalibrointilaitteistomme erikoisvaatimuksien takia back-to-back – tyyppi ei ole aivan välttämätön. Koska värähtelyanturimme mittaa kolmeen eri suuntaan värähtelyä, pitää kalibroidessakin kääntää kalibroitavia antureita eri suuntiin. Tämän takia referenssianturia ei voi suoraan kiinnittää kalibroitaviin antureihin. Tätä varten on suunniteltava joka tapauksessa kalibrointiteline ja sen suunnittelussa voi hyvin ottaa huomioon referenssianturin mallin. Ainoastaan top-connector – tyyppi oli poissuljettu vaihtoehtoista, koska se hankaloittaisi entistä enemmän anturin asentamista eri asentoihin.

Herkkyudessa anturien välillä ei ole juurikaan eroja. Kaikki anturit ovat tarkoitettu kalibrointikäyttöön ja silloin yleensä mitataan vain tietyillä voimakkuuksilla. Suurin osa antureista antaa mittaustuloksen volteissa. Näillä anturin herkkyys on yleisimmin 100 mV/g, mikä on sopivan suuruinen tähänkin kalibrointilaitteistoon. Kaksi antureista antaa sen sijaan herkkyuden varauksina suhteessa yhteen g:hen. Sovellukseemme jänniteulostulo sopii paremmin.

Mittausalue ei ollut kovinkaan merkittävässä roolissa valintaa tehdessä, koska kaikki anturit täyttivät hyvin mittausaluetta koskevat vaatimukset. Kalibroitava värähtelyanturi mittaa teoriassa 2 g:tä sekä positiiviseen että negatiiviseen suuntaan ja näin ollen kalibrointikin tapahtuu tällä alueella. Käytännössä mittausalue on vielä pienempi johtuen värähtelyanturin mittaamasta staattisesta kiihtyvyydestä, mikä rajoittaa mittauksia maan vetovoiman suunnassa.

Taajuusalueissa on sen sijaan eroja. Värähtelyanturimme pystyy mittaamaan värähtelyä teoriassa väliltä 0 – 5 000 Hz. Mittauksissa -3 dB – raja tulee kuitenkin noin 2 500 Hz:ssä, mutta referenssianturin on hyvä kyetä mittaamaan selkeästi tämän alueen yli. Referenssianturin ei tarvitse mitata alle 5 Hz:n taajuuksia, koska DC-tasossa voidaan värähtelyanturimme tulosta verrata maan vetovoiman aiheuttamaan kiihtyvyyteen. Ylärajataajuudessa 5 000 Hz on referenssianturille jo riittävästi.

Yhtä anturia lukuun ottamatta kaikille löytyi maahantuoja Suomesta. Tämä helpotti vertailua ja toimitusta. Hinnoissa oli myös suuria eroja. Erot johtuivat lähinnä mitä kaikkea anturipaketti sisälsi. Hinnan ohella myös toimitusaika oli merkittävä tekijä, koska projektilla oli kohtalaisen tiukka aikataulu.

4.3.1 MMF:n KS775C – kiihtyvyyssanturi

Vertailujen jälkeen valitsimme referenssianturiksi MMF:n KS775C-100 – kiihtyvyyssanturin. Siinä kaikki ominaisuudet olivat tarkoitukseemme riittäviä. Hinta ja toimitusaika olivat hyviä, mikä erotti tämän muista vaihtoehtoista. Herkkyys oli samaa luokkaa kuin useimmissa vertailtavissa antureissakin ja anturissa oli jänniteulostulo.

Jänniteulostuloa varten anturissa on sisäinen esivahvistin, jolla on korkea tuloimpedanssi ja matala lähtöimpedanssi. Anturissa on käytetty yleisesti käytössä olevaa ICP®-standardia. Tämä sisäänrakennettu piiri tarvitsee vakiovirtalähteen. Sekä virta että ulostuleva jännite kulkevat samaa koaksiaalikaapelia pitkin. Kondensaattori muuttaa anturin biasjännitteen AC - signaaliksi. ICP® - standardianturit mahdollistavat pitkät signaalijohdot.

4.4 Tärustin ja vahvistin

Mittauslaitteiston ehkä keskeisin osa on tärustin, jolla täristetään kalibroitavia antureita. Näin ollen täristimen laatu on suuressa roolissa, kun tehdään kalibrointia. Kuitenkin hyvä tärustin tarvitsee ympärilleen myös hyvän muun laitteiston, jotta kokonaistulos olisi paras mahdollinen. Ensinnäkin jollain laitteella on tuotettava sinimuotoinen signaali. Tähän löytyy useampikin eri vaihtoehto, miten signaali tehdään. Signaalin lähteen ja täristimen väliin tarvitaan vielä vahvistin.

Täristimen valinnan lähtökohtana oli se, että tärustin pystyy täristämään värähtelyanturiamme luotettavasti ainakin 5 000 Hz:iin asti. Valitun LDS:n V406/8 - täristimen taajuusalue alkaa viidestä hertsistä ja päättyy sen rungon resonanssitaajuuteen 9 000 Hz:iin. Täristimen oli oltava tarpeeksi jyrkää, jotta se jaksaisi täristää koko

värähtelevän massan. Värähtelyanturiemme lisäksi massaa lisää referenssianturi sekä varsinkin kalibrointiteline. Muilta ominaisuuksilta tärustin sopii myös hyvin tähän kalibrointitarkoitukseen.

Valittu vahvistin PA100E on saman valmistajan samaa sarjaa kuin täristinkin. PA100E oli siis luonnollinen ja paras vaihtoehto vahvistimeksi. Vahvistin on näin ominaisuuksiltaan juuri sellainen kuin mitä tärustin vaatii. Valintaa helpotti myös se, että Hoxvillillä oli jo aiempaa kokemusta LDS:n täristimistä ja vahvistimista.

4.5 Mittakortti

Mittakortiksi kalibrointijärjestelmään oli useampi eri vaihtoehto. Markkinoilla olisi saatavilla valmiita paketteja mittakortiksi. Tämä olisi varmin vaihtoehto, mutta tällaisen paketin hinta kaikkine ohjelmineen on sen verran kallis, että oli mietittävä muita vaihtoehtoja. Mittakortin voi tehdä myös tavallista äänikorttia tai digitaali-oskilloskooppia hyväksi käyttäen. Näistä kahdesta digitaali-oskilloskooppi oli helpommin soveltuva tähän käyttöön.

Valittua Picoscope – digitaali-oskilloskooppia piti ohjelmoida käyttöömmä soveltuvaksi. Sen avulla oli saatava tasalaatuista sinisignaalia vahvistimelle. Toinen vaativampi tehtävä oli referenssianturin mittaustulosten lukeminen. Aikatason datasta oli saatava FFT – muunnoksen avulla taajuustason spektri. Tämä toimii takaisinkytkentänä ohjauspaneeliin, josta testaaja pystyy säätämään oikean kokoisen amplitudin.

Referenssianturilta tuleva jännite luetaan mittakortissa ja tämän jälkeen tietokoneessa oleva ohjelmisto muuttaa tämän kiihtyvyydeksi. Tähän tarvitsee referenssianturin kalibrointitodistuksesta anturin todellisen herkkyuden. Tämän avulla saadaan muutettua jännite kiihtyvyydeksi seuraavasti:

$$a[m/s^2] = \frac{x_{mitattu} [mV]}{y_{anturin\ herkkyys} [mV/g]} * 9,81[m/s^2] \quad (3.57.)$$

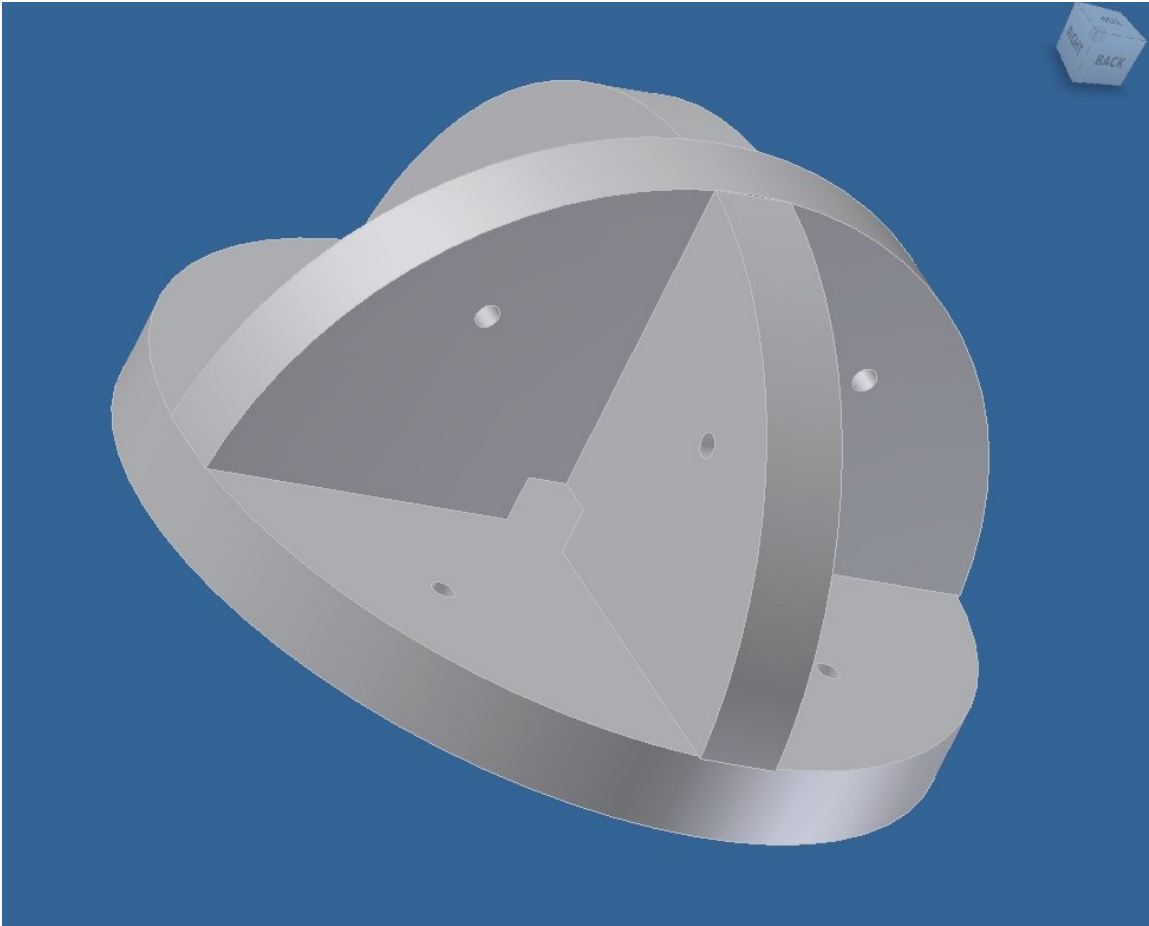
,

missä x_{mitattu} on referenssianturin mittaustulos ja $y_{\text{anturin herkkyys}}$ on kerrottava vielä 9,81, jotta yhtälö antaa kiihtyvyyden. Tämän yhtälön avulla saadaan selville, että haluttu 5 m/s^2 värinä vastaa 51.6 mV:a.

4.6 Kalibrointiteline

Täristin oli painava ja jyrkevä verrattuna värähtelyanturiin, mikä mahdollisti useamman anturin täristämisen yhtä aikaa erillisen kalibrointitelineen avulla. Tämä oli suunniteltava täysin yksilöllisesti tähän tarkoitukseen. Parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui neljän anturin kerrallaan testaamisen mahdollistava teline. Tällöin oli helpoin tehdä telineestä symmetrinen, mikä oli lähtökohta kalibrointilaitteelle.

Kalibrointitelineen suunnittelussa oli otettava huomioon, että turhaa ylimääräistä painoa ei telineestä tulisi täristettävään massaan. Toinen vielä tärkeämpi asia oli, ettei kalibrointitelineen ominaisvärähtelytaajuus häiritsisi kalibrointimittauksia. Materiaaliksi valitsimme ns. lentokonealumiinin, jonka ominaisuudet sopivat hyvin tähän tarkoitukseen. Käytimme suunnittelussa mahdollisimman pyöreitä muotoja, ettei resonansseja olisi täristettävillä taajuuksilla.



Kuva 14: Täristimeen kiinnitettävän kalibrointitelineen luonnos.

Kuvassa on piirretty luonnos kalibrointitelineestä 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla. Kalibrointiteline koostuu kaikkiaan neljästä eri osasta. Kaksi osaa muodostavat pystyseinät ja toiset kaksi pohjan. Pohjassa olevaa toista osaa ei kuvasta näe ja se on vain liitoskappale täristimen ja kalibrointitelineen välissä. Liitoskappale on kiinnitetty täristimeen kahdeksalla M4-kuusioruuvilla. Itse kalibrointitelineen eri kappaleet kiinnitettiin toisiinsa sekä kuusioruuvien että liiman avulla.

Kalibrointitelineen keskellä on pieni kolo pystyseinissä, mikä on referenssianturia varten. Kun referenssikiihtyvyyssanturi on kalibrointitelineen keskellä, niin mitään ylimääräisiä epätarkkuuksia ei tule mittauksiin. Anturi on ruuvikiinnityksellä kalibrointitelineessä, koska sitä ei tarvitse siirtää sieltä mihinkään.

Värähtelyanturit tulevat kalibrointitelineeseen kiinni samanlaisilla ruuveilla, mitä käytetään antureiden kiinnityksessä yleensäkin. Pohjalevyssä neljä reikää on mitoitettu juuri siten, että värähtelyanturit mahtuvat sopivasti olemaan siinä Z-suunnan mittauksissa. Pystyseinissä on pohjaan nähden hivenen enemmän tilaa, jotta värähtelyantureiden kääntäminen X- ja Y- suunnassa olisi helpompaa.

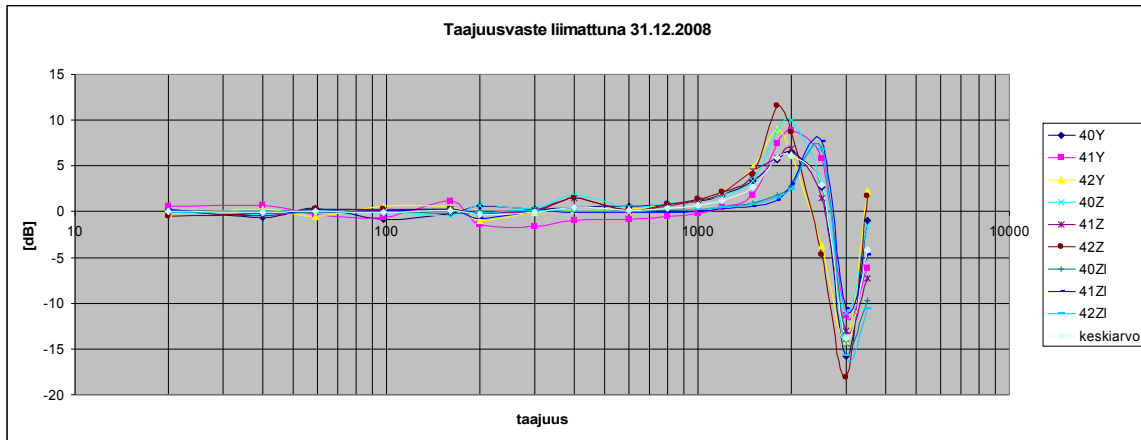
4.7 Mittausasetelma

Koska kalibrointilaitteisto menee tuotantoon, niin keskeisin asia suunnittelussa oli se, että varsinainen testaaminen olisi mahdollisimman sujuvaa ja yksinkertaista. Tämän takia kalibrointitelineen suunnittelu oli haastavaa, koska samalla piti saada helppo ja yksikertainen ratkaisu sekä mittaustarkkuus pitäisi säilyä hyvänä. Kalibrointiteline suunniteltiin sellaiseksi, että siihen saa kerralla neljä testattavaa värähtelyanturia kiinni. Tämä mahdollistaa symmetrisen asettelun ja samalla nopeuttaa testausta.



Kuva 15: Kalibrointilaitteiston tärustin, kalibrointiteline ja 4 kalibroitavaa anturia.

Kalibrointiteline suunniteltiin pyöreäksi, jottei telineen resonanssi häiritsisi mitattavalla taajuusalueella. Kalibrointitelineeseen kiinnitetyt värähtelyanturit mittasivat luotettavasti vain 1 kHz:iin ja sen jälkeen mittauksia alkaa häiritä resonanssi.



Kuva 16: Taajuusvastemittaus tehtynä aina 3,5 kHz:iin asti usealla eri värähtelyanturilla.

5 Kalibrointilaitteiston valmistus ja testaus

Kalibrointilaitteistoa rakennettiin valmiiksi samalla koko ajan jo testatessa sitä mahdollisuuksien mukaan. Tämän avulla saatiin arvokasta uuttakin tietoa värähtelyanturin mittauksista ja pystyttiin tekemään vielä pieniä muutoksia kalibrointilaitteistoon. Testausta tehtiin aluksi yhdellä testianturilla ja loppupuolella testattiin laitteistoa useammalla asiakkaalle menevällä anturilla kerrallaan.

Valmistuksessa pyrittiin toteuttamaan suunnitelma siten, että myös käytännössä testaaminen olisi lopulta luotettavaa ja sujuvaa. Kun värähtelyssä on kyseessä hyvin pienet liikkeet, niin pientäkin epätasapainoa aiheuttavat tekijät näkyvät heti mittaustuloksissa. Tämän takia kaikki kiinnitykset oli tehtävä huolellisesti ja samoin myös eristyksen suunnitteluun piti kiinnittää paljon huomiota. Kun eristys oli suunniteltu teoriassa, niin oli kokeiltava vielä käytännössä vähän eri vaihtoehtoja eristykseksi teorian pohjalta.

5.1 Laitteiston valmistus

Laitteiston suunnittelun jälkeen ensimmäinen toimenpide oli etsiä sopivat laitteet kalibrointilaitteistoa varten. Varsinainen laitteiston valmistus alkoi, kun tärkeimmät osat eli tärustin ja referenssianturi olivat saapuneet. Ensimmäisenä oli tutkittava näiden laitteiden ominaisuuksia. Samalla tuli tietoa myös värähtelyanturin mittausominaisuuksista. Näin pystyttiin suunnittelemaan kalibrointilaitteisto siten, että se tukee värähtelyanturin kalibrointitestejä parhaalla tavalla.

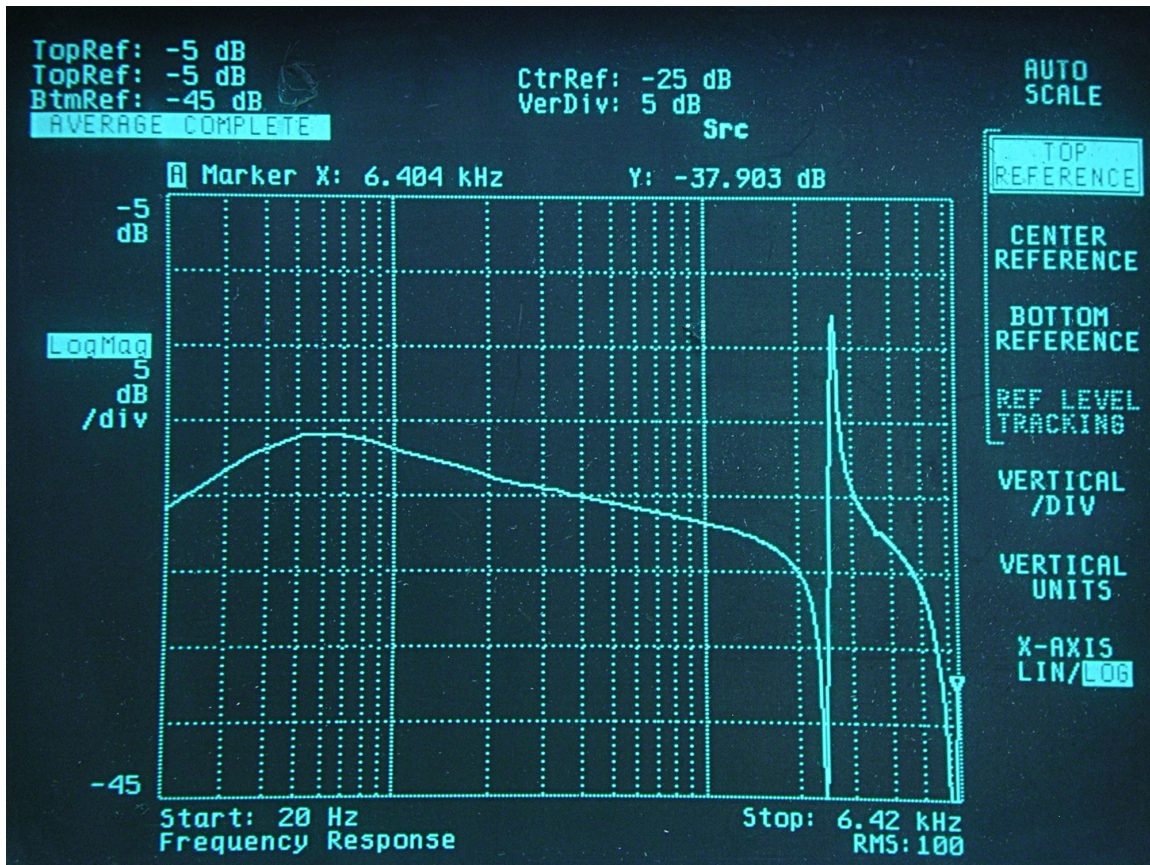
Ensimmäiset mittaukset tehtiin vain yhdellä värähtelyanturilla, jolloin mahdollisia virhelähteitä oli mahdollisimman vähän. Tärkeimpänä tavoitteena oli tutkia värähtelyanturin mittausaluetta. Mittausalueelle oli selvitettävä yläraja-arvot värähtelyn voimakkuudessa ja taajuudessa. Mittauksia oli toistettava useasti ja välillä oli hyvä tehdä

pieniä muutoksia mittausrutiineihin. Esimerkiksi anturin kääntäminen ylösalaisin oli hyvä keino saada pieniä muutoksia mittauksiin. Vaikka värähtelyanturi mittaa kolmeen eri suuntaan, olivat mittaukset tehtävä aluksi lähinnä Z-akselin suunnassa virhelähteiden minimoimisen vuoksi. Näissä mittauksissa anturin sai kiinnitettyä suoraan täristimeen ilman minkäänlaisia välikappaleita, mitä on käytettävä X – ja Y – mittaussunnissa.

Seuraava askel oli ottaa käyttöön täristimen ja antureiden väliin tuleva kalibrointiteline. Kappale koostui neljästä eri osasta ja suunnittelussa oli siis käytetty pyöreitä muotoja. Kappale tehtiin kevyestä, mutta lujasta, ns. lentokonealumiinista. Kappaleen toteutus onnistui ilmeisen hyvin, koska sen resonanssitaajuus oli noin 10 kHz:ä. Tämä ei siis sotke varsinaisia mittauksia mitenkään, kun värähtelyanturin oma resonanssitaajuus on alle 3 kHz:ä.



Kuva 17: Kuvassa on kalibrointilaitteiston taajuusvaste ilman siihen kiinnitettäviä testattavia värähtelyantureita. Taajuusvaste on kohtuullisen tasainen mittausalueella, joten se ei rajoita mittauksia.



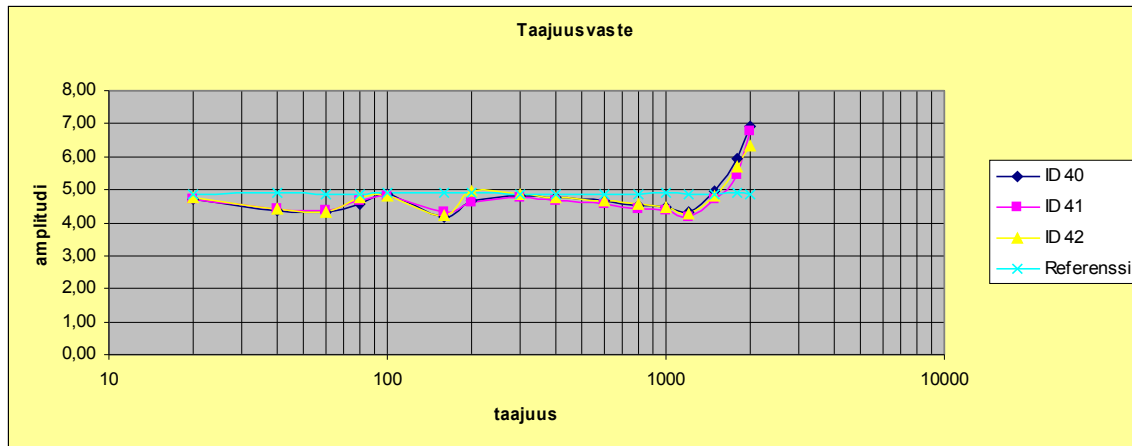
Kuva 18: Kuvassa kalibrointitelineeseen on lisätty neljä testattavaa värähtelyanturia. Resonanssitaajuus on tällöin noin 2,5 kHz:ssä, joka on sama kuin värähtelyantureiden resonanssitaajuus.

Kuvassa on huomioitava kuitenkin se, että mittaava kiihtyvyysanturi on kiinnitetty tärhistimen keskikohdalle. Kalibrointitelineen aluslevyn lujuus ei vaikuta tähän paikkaan samalla tavalla kuin paikkoihin, joihin testattavat värähtelyanturit kiinnittyvät.

5.2 Testaus lopullisella kalibrointilaitteiston kokoonpanolla

Lopullisessa kokoonpanossa kalibrointitelineeseen tulee kiinnitettynä kolme tai neljä värähtelyanturia kerrallaan, mikä tekee värähtelevästä elementistä paljon monimutkaisemman. Tällä kokoonpanolla ensimmäinen resonanssitaajuus on jo noin 1,5 kHz:n kohdalla, kun mitataan kalibroituilla värähtelyantureilla. Toinen ongelmakohta oli neljän värähtelyanturin mittauksien eroavaisuudet keskenään. Mitään suuria muutoksia ei

enää ollut värähtelevään elementtiin tehtävissä, joten oli tarkkaan selvitettävä elementin ongelmakohdat.



Kuva 19: Taajuusvaste mitattuna varsinaisella kalibrointikokoonpanolla.

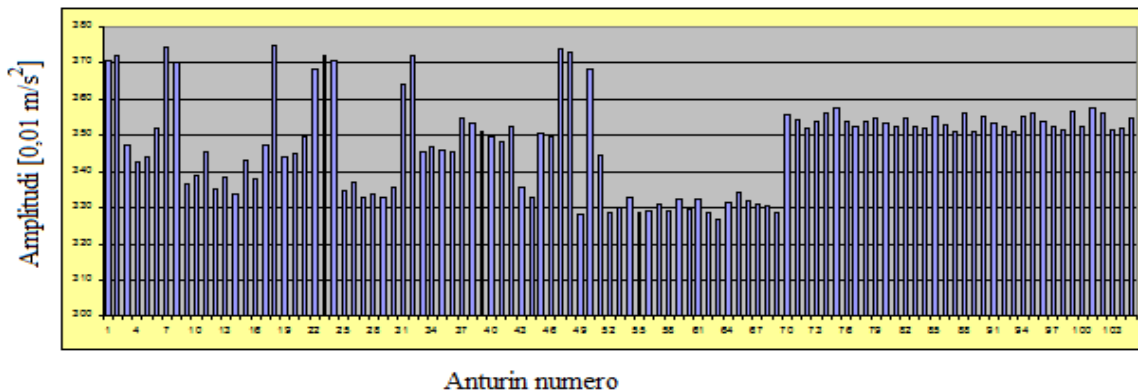
Yllä olevasta kuvaajasta nähdään, että resonanssitaajuus alkaa häiritä mittauksia jo heti yhden kHz:n jälkeen. Mittausasetuksissa on kolme testattavaa värähtelyanturia, yksi tasapainottava värähtelyanturi ja referenssikihtyvyyssanturi. Testauksen edetessä päädyimme kalibroimaan aina kolme anturia kerrallaan, koska referenssianturin johto vaikeuttaa neljännen paikan käyttämistä. Tämän tilalla käytimme kuitenkin tasapainottavaa värähtelyanturia, jotta kalibrointitelineessä säilyisi tasapaino. Toinen syy vain kolmen anturin testaamiseen kerrallaan on se, että yleensä värähtelyanturit toimitetaan kolmen paketeissa asiakkaalle. Näin ollen saadaan kätevästi testattua yksi paketti kerrallaan.

Resonanssitaajuuteen ei voinut enää vaikuttaa. Resonanssiongelmiin vähentämiseksi voitiin lisätä vaimentavaa silikonimassaa kaikkiin teräviin kulmiin kalibrointitelineessä. Tämä toimenpide ei saanut mitään merkittävää muutosta aikaan mittaustuloksien laadun suhteen. Toinen pieni toimenpide oli kalibroitavien värähtelyantureiden asettaminen siten, että niiden kiihtyvyyttä mittaava sensori olisi mahdollisimman lähellä kalibrointitelineen keskikohtaa.

Vaikka kalibrointilaitteistolla jää jotain taajuuksia mittaamatta luotettavasti mittaasetelman takia, niin laitteistolla pystytään mittaamaan kuitenkin tärkeimmät mitattavat taajuudet. Näiden mittauksien avulla voidaan tehdä hyvin tarvittavat kalibrointimittaukset. Kun testaustietoa on sekä kalibrointitelineellä että ilman sitä tehdyillä mittauksilla, niin kalibrointitelineen vaikutus korkeimmilla taajuuksilla tehdyillä mittauksilla on selvillä. Tämän puolesta siis kalibrointilaitteisto täytti vaadittavat edellytykset.

5.2.1 Kalibrointitelineen ja vaimennuksen testaus

Aluksi mittaustuloksissa oli anturi kohtaisia eroja. Tärhistintä siirrettiin ja pyöritettiin sekä pöydällä että lattialla, mutta antureiden välisiin eroihin ei löytynyt heti selitystä tämän avulla.



Kuva 20: Kuvassa on sadan ensimmäisen testattavan värähtelyanturin mittaustuloksia [0,01 m/s²] taulukoituna. Siitä nähdään hyvin suuret erot värähtelyantureiden mittaustuloksissa testauksen alkuvaiheessa.

Kuvasta 20 nähdään suuret erot testauksen alkuvaiheessa. Tiesimme värähtelyanturin mittaavan paljon luotettavammin eli mittaasetelmaan oli tehtävä muutoksia. Symmetrisyyden maksimointi, värähtelyantureiden oikeaan asentoon kiinnittäminen ja värähtelyantureista lähtevien johtojen hyvä asettelu olivat ensimmäiset toimenpiteet mittauksien parantamiseksi. Nämä eivät kuitenkaan selittäneet varsinaista perimmäistä ongelmaa, vaan mittaasetelmaan oli tehtävä vielä muutoksia.

Kuva 20 kertoo sen, että viimeinen viidenkymmenen kappaleen testaus antoi selvästi luotettavampi mittaustuloksia kuin edelliset. Tämä parannus saatiin siis aikaiseksi huolellisemmalla ja paremmin suunnitellulla mittaussasetuksilla. Kalibrointitelineen eri kappaleet liimattiin vielä toisiinsa kiinni, kun kiinnitys oli aiemmin vain kuusioruuvien varassa. Muita pienempiä parannuksia olivat silikonin lisääminen kalibrointitelineen teräviin kulmiin ja ylipäättään huolellisempi kokonaisuuden asettelu paremmin symmetriseksi.

Huomioitavaa mittaustuloksissa oli se, että viimeisistä viidestäkymmenestä anturista ensimmäinen kolmasosa antoi selvästi pienempiä arvoja kuin loput. Yhteinen tekijä näille oli, että kaikki olivat ID - numeron 40 antureita, jotka ovat aina samassa paikassa kalibrointitelineessä. Kun siirtelimme täristimen paikkaa, muuttui nämä värähtelyantureiden paikkojen amplitudien suhteet. Seuraavaksi oli tutkittava siis täristimen eristystä alustasta.

Täristimen alustan oli oltava tukeva, mutta sen oli myös vaimennettava ylimääräinen täristimen värähtely. Täristin siirrettiin raskaan teräslevyn päälle, mutta se ei tuntunut muuttavan mittaustuloksia. Seuraavaksi se siirrettiin vielä raskaamman teräsjalustan päälle. Tämäkään ei tuntunut aluksi auttavan, kun teimme ensimmäisiä mittauksia siinä. Lopulta löytyi kuitenkin perimmäinen syy ongelmaan, kun siirsimme täristimen paikkaa teräsjalustan laidasta laitaaan. Huomasimme, että täristimen paikalla teräsjalustan keskipisteeseen nähden oli huomattava merkitys värähtelyanturien mittaustuloksiin. Siirtäessä vähänkin täristintä teräsjalustan keskipisteestä syntyi värähtelyantureiden mittaustuloksien kiihtyvyyssarvojen välille eroja. Kauimpana teräsjalustan keskipisteestä oleva värähtelyanturi antoi selvästi suurempia arvoja, kun taas kalibrointitelineessä vastakkaisella puolella olevan värähtelyanturin arvot pienentyivät vastaavasti.

Koska referenssikiihtyvyyssanturi on kalibrointitelineen keskellä, se ei ole niin altis täristimen paikalle. Sen mittaustuloksissa ei ollut siis niin suurta vaihtelua kuin värähtelyantureiden mittaustuloksissa. Täristimen paikalla oli siis suuri merkitys mittaustuloksiin. Nyt piti parantaa eristystä siten, ettei täristimen paikalla olisi niin suurta merkitystä värähtelyantureiden mittaustuloksiin.

Tätä paikkariippuvuutta pystyi vähentämään selvästi laittamalla täristimen pohjaan neljä kumitassua. Näiden asettaminen täristimen pohjaan on suunniteltava huolella, jotta täristin olisi vakaasti tasapainossa edelleen. Pienikin kaltevuus saa aikaan eroja värähtelyantureiden mittaustuloksissa. Kokeilimme myös laittaa esimerkiksi teräväkärkisiä ruuveja täristimen pohjaan, mutta tämä vaihtoehto osoittautui huonommaksi kuin kumitassut.

Parhaaksi yhdistelmäksi osoittautui, että täristin oli paljaalla teräsjalustan pinnalla kumitassujen varassa. Teräsjalustan ja lattian välissä vaimentavana elementtinä toiminut korkki paransi vielä hivenen mittaasetelmaa. Paremmasta eristyksestä huolimatta oli täristin asetettava paikalleen huolella, mikä oli syytä ottaa huomioon myös laitteen siirrossa varsinaiseen tuotantopaikkaan.

5.3 Kalibrointitodistusta varten tehtävät mittaukset

Tarkoitus oli siis verrata anturin antamaa mittaustulosta referenssitulokseen. Värähtelymittauksien kalibroinnissa yleisimmin käytetty taajuus on 1 000 rad/s eli 159,15 Hz:ä. Kun värähtelymittauksissa käytetään useimmiten mittaussyksikköinä: kiihtyvyytenä m/s^2 , nopeutena mm/s ja siirtymänä μm , sopii kyseinen taajuus hyvin käytettäväksi. Tällöin kaikissa mittaussyksiköissä ovat amplitudien suuruudet yhtäsuuria. Toinen merkittävä suure on värähtelyn amplitudi, jossa ehkä yleisin arvo tähän käyttöön on puoli g:tä eli $4,91 m/s^2$. Päädyimme käyttämään kuitenkin kalibroinnissa paremmin Eurooppalaiseen ja SI-järjestelmään sopivaa arvoa eli tasan $5 m/s^2$:a.

Kalibroinnin yhteydessä pyritään käyttämään kaikkia värähtelyanturin mittaamia suureita. Tämän mahdollistaa vain yksilöllisesti suunniteltu kalibrointilaitteisto. Värähtelyanturilta voidaan kalibrointimittauksien aikana tallettaa taajuustason - ja aikataason amplitudit sekä tehollisarvot väliltä 10 -1 000 Hz:ä.

Monimutkaisemmaksi mittauksia tekee se, että anturi mittaa kiihtyvyyttä kolmeen eri suuntaan. Tämän takia kalibrointilaine oli suunniteltava siten, että kalibroittavat värähtelyanturit voidaan kääntää kätevästi eri mittaussuuntiin. Z-suuntaa mitataan anturin

ollessa kalibrointitelineen pohjaosassa kiinni ja näiden mittausten jälkeen anturia on aina siirrettävä kalibrointitelineen pystyseiniin. Tällöin pystytään mittaamaan sekä X- että Y-suunta kätevästi kääntämällä 90 astetta anturia mittausten välissä.

5.3.1 Amplitudia koskevat mittaukset

Taajuustason antamia mittaustuloksia on helppo verrata suoraan referenssiarvoon. Värähtelyanturi itsessään laskee aikatason datasta FFT:n avulla taajuustason datan, mistä saadaan luettua suoraan värähtelevän taajuuden amplitudi. Koska anturi käyttää sekä FFT:tä että ikkunointia amplitudien laskemiseen, on valittava juuri sopivat mittaasetukset. Tämä takaa sen, ettei tule ylimääräisiä laskennallisia virheitä mittaasetuksista johtuen.

Värähtelyanturi mittaa aikatasossa kiihtyvyyden arvoja 0.1 - 2 ms:n välein riippuen näytteistystaajuudesta. Kiihtyvyyden arvot sisältävät myös maan vetovoiman aiheuttaman kiihtyvyyden. Normaalisti täristettäessä anturi antaa siis aikatasossa sinimuotoista signaalia, mikä vaihtelee $9,81 \text{ m/s}^2$ - arvon molemmilla puolilla. Näin ollen anturi pystyy mittaamaan vain yhden g:n suuruista täristystä, koska silloin mennään positiivisella puolella jo anturin maksimi arvoon eli kahteen g:hen.

Aikatason dataa käytetään suoraan yhtenä osana kalibrointituloksia. Näitä arvoja on muokattava ennen kuin niistä pystyy selvittämään tarvittavia arvoja. Aikatason kiihtyvyyden arvoista on ensin selvittävä huippuarvot, josta saadaan selville huipusta huippuun amplitudi. Tämä on hivenen epätarkka tapa selvittää tarkkaa amplitudia, koska huippuarvoissa tapahtuu pieniä muutoksia. Koska kaikki muut arvot, kuten myös täristettävä amplitudi, ovat tehollisarvoja, on luontevaa jakaa tämäkin huipusta huippuun arvo neliojuuri kahdella. Näin saadaan myös aikatason mittauksista suoraan mittaustulos, jota voidaan verrata referenssitulokseen.

Värähtelyanturi laskee siis automaattisesti taajuustason spektrin. Tämä on kalibrointimittausten keskeisin tulos. Tätä varten oli huolella suunniteltava mittaasetukset, jotta näistä ei tulisi ylimääräisiä laskennallisia virheitä. Taajuustason mittauksissa otetaan suoraan täristettävän taajuuden eli 159,15 Hz:n amplitudi

kiihtyvyytenä. Anturi pystyy antamaan tarvittaessa mittaustuloksen myös nopeutena tai siirtymänä.

Kolmas suure, mitä kalibrointimittauksissa mitataan, on kiihtyvyyksien RMS –arvot eri taajuusalueilla. Kunnanvalvonnassa RMS –arvoilla selvitetään laitteen kunnan yleiskuvaa. Tärkeimmät ja yleisimmin käytetyt alueet RMS –arvoille ovat 0 - 10, 10 – 1 000 ja yli 1 000 Hz. Tämän lisäksi voidaan mitata myös koko mittausalueen yli tehollisarvo. Kalibrointimittauksien yhteydessä värinärasitusta mitataan väliltä 10 -1 000 Hz:ä johtuen tärjistettävästä taajuudesta.

Tämänkin suureen värähtelyanturi laskee automaattisesti. Anturille on annettava aina mittauskäsky MODBUS–verkossa ja tämän jälkeen saadaan anturilta haettua verkon kautta haluttuja mittaustietoja. Kalibrointijärjestelmän tietokoneella oleva ohjelma kokoaa kaikki mittaustulokset yhteen automaattisesti. Käyttäjän vastuulla on vain asettaa anturit oikeaan mittaussuuntaan ja painaa nappia mittausten aloittamiseksi.

5.3.2 Taajuusvastetestaus

Taajuusvaste on myös oleellinen osa värähtelyanturin kalibrointimittauksia. Se ei kuitenkaan ole niin yksilöllinen kuin varsinaiset kalibrointitodistusmittaukset, vaan se on samaa luokkaa kaikilla värähtelyantureilla. Tätä on kuitenkin hyvä tarkkailla ja taajuusvastetestä on tarkoitus tehdä kerran toimituserässä.

Amplitudi on sama kuin kalibroinnin tarkastuksessa, mutta varsinkin suurilla taajuuksilla amplitudeissa tapahtuu suurempaa heilahtelua. Tämä ei kuitenkaan ole niin haitallista, koska tuloksissa tarkkaillaan suoraan värähtelyanturin ja referenssianturin mittausten antamaa suhdetta. Koska värähtelyanturin mittausprosessi on aikaa vievä, niin taajuustasonmittaus on hidas toimenpide johtuen monesta eri mittauspisteestä.

Mittauspisteiden valinta rajoittui kohtuullisen pienelle alueelle. Alle 40 Hz:n taajuudet oli jätettävä pois, koska tärjistimen eristys oli suunniteltu korkeammille taajuuksille. Toisesta päästä mittausaluetta rajoitti taas mittausjärjestelyssä vastaan tuleva resonanssitaajuus. Suurimmaksi taajuudeksi valittiin 1200 Hz:ä, josta näkee jo hieman käyttäytymistä

resonanssin lähestyessä. Taajuudet valittiin 40 Hz:stä lähtien pääsääntöisesti oktaavin välein.

Valittavia taajuuksia ei voinut valita kuitenkaan suoraan tasaluvuista. Koska värähtelyanturi käyttää Hanning–ikkunointia, niin taajuuden valitseminen on suoritettava huolella. Tällä ikkunoinnilla maksimoidaan amplitudin suuruuden tarkkuus ja tällöin anturi näyttää tämän hyvin kapealla alueella. Jokaiselle valitulle mittauspisteelle oli siis laskettava ikkunointiin ja erottelukykyyn sopiva taajuus erikseen. Tämä muutti joitakin tarkasteltavia taajuuksia yhden Hertzin suuntaan tai toiseen.

5.4 Kalibrointilaitteiston tuotantoon siirtämiseen valmistautuminen

Projektin yksi keskeisimmistä tavoitteista oli kalibrointijärjestelmän sopiminen värähtelyanturin tuotantoon. Tämä oli otettava huomioon kaikessa suunnittelussa. Kun varsinainen kalibrointilaitteisto oli saatu valmiiksi, oli edessä vielä selkeiden ohjeiden laatiminen varsinaisille käyttäjille. Kaikessa suunnittelussa pyrittiin siihen, että järjestelmä olisi mahdollisimman helppo ja nopea käyttää.

Vaikka laitteiston käyttäminen tuntui itselle varsin yksinkertaiselta, oli siitä kirjoitettava tarkat ja yksiselitteiset ohjeet varsinaiselle tuotannonaikaiselle käyttäjälle. Kalibrointilaitteisto vaati kohtuullisen huolellista käyttämistä, jotta mittaukset onnistuvat parhaalla mahdollisella tavalla. Toisaalta jotain vaatimuksia kalibrointimittauksiin tuli myös suoraan asiakkaalta. Lähinnä ohjeissa tuli korostaa oikeaa järjestystä mittauksille, mikä oli katsottu testatessa kaikista sujuvimmaxi. Samoin joihinkin yksityiskohtiin, kuten esimerkiksi värähtelyanturin kiinnitykseen, oli syytä kiinnittää erityistä huomiota. Tätä kautta mittauksien luotettavuus säilyy parhaalla mahdollisella tasolla.

Varsinaiset mittaustulokset kalibrointijärjestelmä tallettaa testattava järjestelmä kerrallaan sopivaan muotoon, jotta ne voidaan suoraan siirtää laskentataulukkoon. Taulukko on tehty juuri tähän tarkoitukseen sopivaksi ja siitä näkee kaikkien antureiden kalibrointitiedot listattuna kalibrointijärjestykseen. Toisella välilehdellä on taas valmis tulostettava sivu, josta saa yksilöllisen kalibrointitodistuksen kullekin anturille. Tähän

taulukkaan on vain laitettava haluttu sarjanumero, niin taulukkaan tulee juuri sen anturin kalibrointitiedot tulostusta varten.

6 Päätelmät

Hoxvillen värähtelyanturin laadunvalvontaa oli parannettava yksilöllisesti suunnitellulla kalibrointilaitteistolla. Yksilöllisesti suunniteltu laitteisto takasi juuri oikeanlaiset kalibrointimittaukset tälle värähtelyanturille. Tämä toteutui lopulta kalibrointilaitteistolla ja värähtelyanturin kalibrointi onnistuu sillä suunnitellusti.

6.1 Yksilöllinen kalibrointilaitteisto värähtelyanturille

Asiakkaan kanssa neuvottelujen pohjalta suunnittelu alkoi lohkokaaavion laatimisella ja sopivien laitteiden hankinnalla kalibrointilaitteistoon. Laitteisto koostui LDS:n V406 -tärästimestä ja PA100 – vahvistimesta, MMF:n KS775 - kiihtyvyyssanturista sekä itse valmistetusta kalibrointitelineestä. Tämän lisäksi laitteistoon kuului oma ohjelma tietokoneella laitteiston ja Picoscope-digitaalioskilloskoopin ohjaamiseksi.

Kalibrointilaitteiston valmistuttua oli vielä mahdollista tehdä pieniä parannuksia testauksen avulla. Laitteisto itsessään toimi tärästettäessä hyvin. Kalibrointilaitteiston taajuusvaste on mitattu kuvissa 17 ja 18, joista selviää muutokset pelkän kalibrointilaitteiston ja varsinaisen kalibrointikokoonpanon välillä. Kuvan 18 resonanssiipikki on samassa kohdassa kuin pelkän värähtelyanturin resonanssi. Kalibrointilaitteisto siis ei rajoita testausta, vaan rajoittava tekijä on testattavien värähtelyanturien oma resonanssi.

Tuloksena oli siis yksilöllinen kalibrointilaitteisto värähtelyanturille. Suunnitellusti laitteistolla pystyi tekemään juuri tämän värähtelyanturin vaatimat kalibrointimittaukset. Tämän lisäksi laitteistosta tuli lopulta hyvin tuotantoon sopiva, koska laitteisto vaatii vain vähän työtä käyttäjältä. Näin ollen myös laitteistolla tehtävä kalibrointi onnistuu tuotannossa sujuvasti.

6.2 Kalibrointilaitteiston testaus

Kalibrointilaitteiston testauksen yhteydessä selvisi nopeasti parannusta vaativat kohdat laitteistossa. Kalibrointitelineen osien ja värähtelyantureiden kiinnityksiin tuli kiinnittää enemmän huomiota. Tämä osoittautui lopulta vähemmän merkittäväksi asiaksi kuin täristemen ja alustan välinen eristys.

Täristimen kalibrointiteline oli erittäin herkkä alustasta johtuville häiriöille. Täristimen oli oltava tarkasti suorassa, sillä pienetkin kaltevuudet korostuivat kalibrointitelineen takia. Testattavat värähtelyanturit ovat kalibrointitelineen laidoilla siten, että ne ovat kalibrointitelineen aluslevyn varassa. Aluslevy on kiinnitetty keskeltä täristimeen. Täristimen pohjan ja alustan välille oli tehtävä sellainen eristys, mikä poistaisi mahdollisimman hyvin alustasta johtuvat häiriöt.

Eristys oli haastava tehdä, koska täristintä ja värähtelyantureita käytetään hyvin matalista taajuuksista aina useampaan kilohertsiin asti. Eristyksen piti parhaiten toimia eniten käytetyillä taajuuksilla, jotka ovat muutamasta kymmenestä hertsistä aina noin kilohertsiin asti. Lopulta kovat muovitassut osoittautuivat parhaaksi eristykseksi täristimen ja alustan välille. Itse alustan oli hyvä olla mahdollisimman tukeva ja etenkin sen oli oltava täysin vaakatasossa.

6.3 Kalibrointimittaustuloksien analysointi

Asiakkaalta tullut 5 %:n vaatimus mittaustuloksiin oli lähtökohta koko kalibrointilaitteiston mittauksille. Tämän mukaan antureiden kalibrointituloksien oli oltava 5 %:n sisällä verrattuna referenssitulokseen. Tämän mukaan tietokoneella oleva ohjelma ilmoittaa automaattisesti, jos jokin värähtelyanturi ei täytä tätä ehtoa sen kaikissa mittaussparametreissa. Näin ollen laitteiston käyttäjän ei tarvitse itse tutkia erikseen jokaisen anturin kalibrointituloksia.

Kalibrointimittauksia tuli tehtyä heti laitteiston valmistuttua, joten nopeasti sai hyvän keskimääräisen kuvan värähtelyanturin mittaustuloksista. Tämä poisti pienet yksilölliset

erot, kun pystyi laskemaan keskiarvoja kaikista mittausparametreista. Tällöin tuloksista selvisi heti parannusta vaativat kohdat laitteistossa. Nämä parannukset tulivat pääosin eristyksen parantamisen kautta.

Kun värähtelyanturit asetettiin ID-numeron mukaiselle paikalle kalibrointitelineeseen, saatiin hyvin tietoa myös sen ominaisuuksista. Symmetrisyydestä huolimatta neljän värähtelyanturin paikan välille jäi pieniä eroja. Kun lopulta testaus suoritettiin pääasiassa vain kolmella kalibroitavalla värähtelyanturilla, niin kaikista epätasaisempia tuloksia antaneen paikan pystyi jättämään tasapainottavalle värähtelyanturille.

Kalibroinnin ansiosta saadaan talteen paljon hyödyllistä tietoa. Kalibrointitodistus on keskeisin tulos, mutta kalibroinnista saatua tietoa voidaan käyttää hyväksi myös värähtelyanturin jatkokehityksessä. Kalibrointimittaustuloksista selviää parannusta vaativat kohdat värähtelyanturissa ja niiden mukaan voidaan suunnitella mahdollisesti joitain pieniä muutoksia värähtelyanturiin. Isoimmat parannukset vaativat jo kokonaan uuden värähtelyanturin ja nämä kalibroinnista saadut tulokset antavat osaltaan hyvän lähtökohdan uuden värähtelyanturin kehittämiseksi.

Kirjallisuus:

- [1] Nohynek Petri ja Lumme Veli Erkki, *Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset*, 2. täydennetty painos (KP-media Oy, Hamina, 2004)
- [2] James M.L., Smith G.M., Wolford J.C. and Whaley P.W., *Vibration of Mechanical and Structural Systems with microcomputer applications*, Second edition (Harpercollins College Div, New York, 1993)
- [3] Jerry B. Marion, *Classical dynamics of particles and systems*, Second edition (Academic Press Inc., 1970)
- [4] Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 129–82, *Värähtelymittausten hyväksikäyttö konekonstruktiossa* (Helsinki, 1982)
- [5] Wagner J. and Burgemeister J., *Piezoelectric accelerometers, Theory and application* (MMF, <http://www.mmf.de/theory.htm>, 2006)
- [6] APC International Ltd., *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*, (http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html, 2002)
- [7] Vierinen Kari, *Mekaaniset värähtelyt* (EVTEK/Automaatiotekniikka, <http://users.evtek.fi/~karisv/mekv2004/>, 2004)
- [8] Ihalainen Heimo, *Mittaustekniikan uudet tuulet: Mittausinformaatio* (http://www.mit.tut.fi/staff/Ihalainen/web/Mittausinformaatio_TTYMIT_HI.pdf, 2006)
- [9] Romanchik Dan, *Seven tips for making better accelerometer measurements*, (<http://www.tmworld.com/article/CA318870.html>, 2003)
- [10] Farrat Isolevel Ltd., *Vibration Theory*, (http://www.farrat.com/vibration_theory.html, 2007)

[11]Young & Freeman, *University Physics with modern physics*, tenth edition
(Addison Wesley, 2000)