

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

SELVITYS VÄRÄHTELYMITTA-ANTUREISTA

A Survey of Vibration Measuring Sensors

31.8.2018

Alex Rosu

Ohjaaja/Tarkastaja TkT Janne Heikkinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Alex Rosu

Selvitys värähtelymitta-antureista

Kandidaatintyö

Syksy 2018

38 sivua, 17 kuvaa, 1 liite

Ohjaaja/Tarkastaja: TkT Janne Heikkinen

Hakusanat: värähtely, mittaus, anturi, taajuusalue, mittausalue

Värähtely on haitallista eri koneenosille ja rakenteille. Koneenosan tai rakenteen värähtely ilmaisee yleensä koneenosan tai rakenteen viallisuudesta. Koneenosa tai rakenne on voitu valmistaa tai asentaa väärin, mikä yleensä havaitaan vasta käyttötilanteessa haitallisena värähtelynä. Jos värähtelyä ei huomata ajoissa, niin jatkuva rakenteen tai koneenosan värähtely voi vaurioittaa kyseisen rakenteen tai osan. Tästä voi seurata esimerkiksi valmistusyrityksille tappioita, kun tuotanto joudutaan seisauttamaan. Koneenosan tai rakenteen äkillinen vaurioituminen voi olla myös vaarallista esimerkiksi konetta käyttäville ihmisille. Näiden syiden vuoksi on kehitetty värähtelyä mittaavia antureita, joiden avulla voidaan muun muassa valvoa, että koneessa ei esiinny sen toimintaa häiritsevää värähtelyä.

Tässä kandidaatintyössä on selvitetty värähtelyä mittaavat eri anturityypit, niiden ominaisuudet ja niille sopivimmat sovelluskohteet. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena käyttäen erilaisia lähteitä. Yleisesti anturit jakautuvat kolmeen eri kategoriaan eli tyyppiin. Anturit voivat olla joko värähtelyn siirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä mittaavia antureita. Siirtymää yleensä mitataan, kun ollaan kiinnostuneita matalan taajuisista värähtelyistä. Vastaavasti nopeutta mitataan usein keskitaajuisista värähtelyistä ja kiihtyvyyttä korkeamman taajuisista värähtelyistä. Perinteiset nopeutta mittaavat anturit eivät ole enää tänä päivänä yleisiä ja ne on korvattu kiihdytysantureilla. Kiihdytysanturien tuloksista voidaan määrittää myös mitattavan kohteen nopeus integroimalla.

Koneteollisuudessa yleisin koneiden testauskäytössä ja kunnonvalvonnassa käytetty anturi on pietsosähköinen anturi. Pietsosähköinen anturi on kevyt, pieni ja edullinen anturi, jolla voidaan mitata laajalta mittausalueelta. Siirtymäantureista pyörrevirta-anturi ja kapasitiivinen siirtymäanturi ovat yleisimmät. Niitä käytetään muun muassa laakerien ja akseleiden mekaanisia välyksiä tarkasteltaessa. Nopeusantureista eniten käytetty on Laser-Doppler anturi. Sitä käytetään kuitenkin kalliin hinnan vuoksi vain tuotekehityksessä eri tutkimuslaitoksissa ja laboratorioissa.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
	1.1 Työn tavoitteet ja rajaukset.....	6
2	VÄRÄHTELYN PERIAATTEET.....	7
	2.1 Värähtely yleisesti.....	7
	2.2 Värähtelyn syyt.....	8
	2.3 Värähtelyn voimakkuuden suuret	10
	2.4 Värähtelymittauksessa mitattavat suureet.....	11
	2.4.1 Mittaussuureiden keskinäiset yhteydet.....	12
3	VÄRÄHTELYN MITTAUSPROSESSIN SUUNNITTELU.....	14
	3.1 Taajuus- ja mittausalue.....	14
	3.2 Testausympäristö ja anturin asennus.....	15
	3.3 Johdoissa esiintyvät häiriöt.....	17
4	VÄRÄHTELYMITTA-ANTURIT.....	20
	4.1 Anturien yleinen toimintaperiaate.....	20
	4.2 Anturien herkkyys ja resoluutio.....	21
	4.2.1 Kalibrointi.....	21
	4.3 Erilaiset anturityypit.....	22
	4.3.1 Siirtymää mittaavat anturit.....	22
	4.3.2 Nopeutta mittaavat anturit.....	26
	4.3.3 Kiihtyvyyttä mittaavat anturit.....	28
	4.3.4 Muut anturit.....	31
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	32
	5.1 Työn jatkoselvitys.....	34
	LÄHTEET.....	35
	LIITTEET	

Liite 1: Värähtelymittauksessa käytettävät anturit

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Amplitudi
a	Kiihtyvyys [m/s^2]
f	Taajuus [Hz]
F	Voima [N]
$G(s)$	Siirtofunktio
I	Sähkövirta [A]
k	Jousen jousivakio [N/m]
m	Massa [kg]
n	Pyörimisnopeus [r/s]
T	Jaksonaika [s]
U	Jännite [V]
$X(s)$	Heräte
$Y(s)$	Vaste
rms	Tehollisarvo/neliöllinen keskiarvo

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä on selvitetty markkinoilla olevia värähtelymitta-antureita, joita käytetään esimerkiksi teollisuudessa koneiden ja koneenosien kunnonvalvonnassa. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena käyttäen erilaisia lähteitä, kuten esimerkiksi julkaistuja tieteellisiä artikkeleita. Muita lähteitä ovat värähdysmittaukseen liittyvät www-sivut, esitteet, aiheeseen liittyvät opinnäytetyöt, opetusmonisteet sekä kirjat ja kirjaset.

Värähtely on jokapäiväinen ilmiö, jota ei voi olla huomaamatta. Värähtelyä voidaan esimerkiksi kuulla, kun huoneen kaiuttimet soittavat musiikkia tai auton moottorin käydessä. Kuulemisen lisäksi värähtelyä voidaan havaita näön avulla muun muassa keinun heilahduksina ja tuntoaistin avulla maanjäristyksen värähtelynä. Vaikka värähtely on yleinen ilmiö, niin se voi olla myös haitallista. Eri teollisuudenaloilla kuten esimerkiksi valmistusteollisuudessa, rakennusteollisuudessa ja energiateollisuudessa värähtelyä pyritään mittaamaan, koska teollisuuden alojen laitteistojen toimintakyvyille ja rakennusten turvallisuudelle on vaadittu tarkat kriteerit. Laitteistossa ja rakennusten rakenteissa värähtely osoittaa yleensä osan tai osien kulumisesta, vaurioitumisesta, valmistus- tai asennusvirheestä. Tämän vuoksi esimerkiksi laitteiston tapauksessa joudutaan työprosessi usein alas ajamaan. Prosessin keskeyttäminen on taloudellisesti kallista, koska työntekoa ei voida jatkaa ennen kuin laitteiston osa on saatu korjattua tai vaihdettua. Värähtelyn mittaamisen avulla voidaan ennakoida laitteiston ja rakenteiden osan tai osien vikaantumiset tai havaita mahdollinen suunnitteluvirhe, jolloin huolto- ja korjaussehädukset voidaan ajoittaa optimaaliseen ajankohtaan. Värähtelyn mittaaminen myös mahdollistaa osan eliniän pidentämisen, koska epätavallisen värähtelyn syy voidaan havaita ajoissa.

Värähtelymittaus on kehittynyt viime vuosien aikana, minkä aikana tutkijat ja insinöörit ovat jatkuvasti kehittäneet olemassa olevia värähtelyä aistivia mitta-antureita paremmiksi. Tämän vuoksi värähtelymittauksesta on tullut tärkeä menetelmä teollisuuden laitteistojen, rakenteiden ja tuotteiden suunnittelussa, tuotannossa ja ylläpidossa.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tässä kandidaatintyössä selvitetään ja kerätään tietoa erilaisista värähtelymitta-antureista. Anturien erilaisten ominaisuuksien ja toimintaperiaatteiden vuoksi antureilla on omat sovelluskohteensa, joihin anturi soveltuu parhaiten. Työn tavoitteena on selvittää anturien ominaisuuksien ja toimintaperiaatteen pohjalta niille suotuisimmat sovelluskohteet sekä laatia taulukko, johon on merkitty anturi ja sille sopiva sovelluskohde. Saatujen tuloksien tarkoituksena on auttaa värähdysmittaajia valitsemaan sopiva anturi mitattavaan kohteeseen.

Työn alussa käydään läpi myös värähdyksen periaatteita, jotta saadaan hyvä käsitys värähdyksen luonteesta ja, miksi värähtelyä on syytä mitata esimerkiksi koneen osissa. Työssä selvitetään myös, mihin asioihin mittauksen suorittajan on hyvä kiinnittää huomiota, kun mittausta lähdetään suorittamaan. Nämä taustatiedot ovat hyödyllisiä, jotta tiedetään, minkälaista ilmiötä ollaan mittaamassa ja, miten laadullinen mittausprosessi suoritetaan. Työstä on rajattu pois mittaustulosten analysointi eli miten tulkitaan anturista saatavaa dataa ja millä laitteistoilla sekä ohjelmistoilla analyysi voidaan suorittaa. Työn pääpaino tulee keskittymään värähtelyn mittausprosessiin värähtelymitta-anturin näkökulmasta.

2 VÄRÄHTELYN PERIAATTEET

Tässä pääkappaleessa käsitellään värähtelyä yleisesti ja selvitetään, mikä aiheuttaa värähtelyä. Tämän lisäksi käydään läpi värähtelyn voimakkuuden ja värähtelymittauksen suureita, joista ollaan yleisemmin kiinnostuneita. Eri alakappaleisiin on sisällytetty kuva havainnollistamaan lukijalle kyseisessä kappaleessa käsiteltyä asiaa.

2.1 Värähtely yleisesti

Värähtely on jaksollista liikettä tietyn referenssipisteen suhteen. Referenssipisteenä on yleensä se piste, jossa värähtelijä pysyy levossa ennen värähtelyn alkua. Värähtelyn suuretta, joka kuvastaa kuinka monta kertaa värähtelijä tekee liikesyklin sekunnin aikana, kutsutaan taajuudeksi f . Taajuuden yksikkö on hertsi Hz. (Bruel & Kjaer 1982, s. 4.) Jaksonaika T , jonka yksikkö on sekunti s, saadaan f :n käänteislukuna seuraavasti:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

jossa T on yhteen värähtely jaksoon kuuluva aika. Vastaavasti f voidaan myös määrittää seuraavasti:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

(Peltonen & Perkkiö & Vierinen. 2007, s. 12.)

Toisaalta f voi tilanteesta riippuen kuvata myös pyörimistaajuutta, jolla tarkoitetaan kierrosten lukumäärää aikayksikössä. Täten f voidaan laskea myös seuraavalla tavalla:

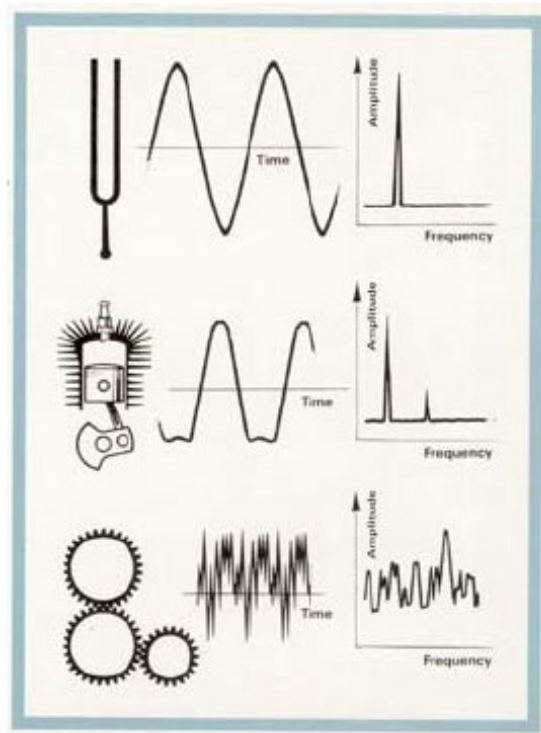
$$f = \frac{n}{t} \quad (3)$$

jossa n on kierrosten lukumäärä ja t on sekunti. (ABB TTT-käsikirja 2000-7, s. 9.)

Värähtelyn amplitudi A on värähtelyn muodostaman siniaallon huippusuure. Jos mitataan tietyllä hetkellä värähtelyn huippuarvoa, niin on mahdollista, että mitattu huippuarvo ei ole sama kuin siniaallon huippusuure. Amplitudilla ei ole sovittua yksikköä. Yleisesti on

kuitenkin sovittu, että amplitudin yksikkönä pidetään mitattavan suureen yksikköä. (PSK 5701 2017, s. 1-3.)

Värähdysliike voi koostua joko yhdestä komponentista, joka värähtelee ainoastaan yhdellä taajuudella, tai useammasta komponentista, jolloin värähtely koostuu yhtäaikaisesti useammasta taajuudesta. Esimerkiksi äänirauta on yksittäinen värähtelijä, jonka liike koostuu vain yhdestä taajuudesta. Värähdysliikettä, josta voidaan havaita useampia taajuuksia, esiintyy vastaavasti esimerkiksi polttomoottorin männän liikkeessä tai hammaspyörien liikkeessä toisiinsa suhteen. (Bruel & Kjaer 1982, s. 4.) Alla on havainnollistava kuva 1 värähdysliikkeestä ja erilaisista värähtelyistä.



Kuva 1. Erilaisia värähtelijöitä (Bruel & Kjaer 1982, s. 4).

2.2 Värähtelyn syyt

Värähtely voi olla joko luonnollista värähtelyä tai pakkovärähtelyä. Luonnollinen värähtelijä on värähtelijä, jonka värähdysliike vaimenee ajan myötä, kunnes sen liike kokonaan pysähtyy. Tällainen värähtelijä on esimerkiksi keinu, jonka liike hidastuu ajan myötä keinujan poistuttua keinusta. Pakkovärähtelijäksi kutsutaan taas värähtelijää, johon vaikuttaa värähtelyä ylläpitävä voima. (Nohynek & Lumme 2004, s. 40-44.) Esimerkki tyypillisestä

pakkovärähtelystä on männästä kiertokangen kautta välittyvä voima kampiakseliin, mikä ylläpitää kampiakselin pyörimistä.

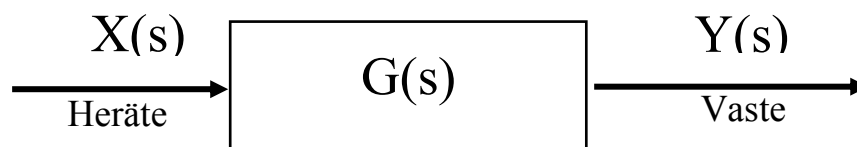
Näitä voimia, jotka saavat aikaan värähtelyä esimerkiksi rakenteissa ja koneen osissa, kutsutaan herätevoimiksi. Herätevoimat eivät ole haitallisia silloin, kun värähdysliike on haluttua ja ohjattua. Herätevoimat, jotka aiheuttavat ei toivottua värähtelyä, ovat kuitenkin merkki siitä, että rakenteessa tai koneenosassa on mahdollisesti jokin vialla. Tyypillisiä tällaisia herätevoimia aiheuttavia tekijöitä ovat pyörivän koneenosan epätasapaino esimerkiksi massan epäkeskeisyydestä johtuen ja valmistukseen sekä asennukseen liittyvät virheet. Vaurioituneet osat voivat myös toimia herätteinä muille osille. (Mikkonen et al. 2009, s. 224.)

Yksi värähdyksen syistä voi olla resonanssi. Resonanssi aiheutuu, kun herätevoiman taajuus on erittäin lähellä rakenteen ominaistajuutta eli sillä taajuudella, jolla rakenne luontaisesti värähtelee. Pyörivässä koneessa tämä herätevoima voi olla esimerkiksi akseli, joka pyörii tietyllä nopeudella, ja jonka taajuus vastaa rakenteen ominaistajuutta. Resonanssi voi vahvistaa värähtelyn 5-50 kertaa voimakkaammaksi. Tämän vuoksi määritellään koneelle kierrosalueita, joilla koneen käyttö on kielletty. (Mikkonen et al. 2009, s. 302.)

Kuten yllä on mainittu, tietynsuuruinen herätevoima esimerkiksi pumpussa aikaansaa tietynsuuruisen vasteen. Tätä ilmiötä voidaan kuvata matemaattisen funktion avulla

$$Y(s) = X(s) \cdot G(s) \quad (4)$$

jossa $Y(s)$ on herätteen aikaansaama vaste, $X(s)$ on itse herätevoima ja $G(s)$ on siirtofunktio (Aalto-yliopisto 2012; Lahti et al. 2002, s. 8). Alla on kuva 2, joka havainnollistaa matemaattista funktiota.



Kuva 2. Heräte, vaste ja siirtofunktio (Aalto-yliopisto 2012).

Värähtelyn tasoa pyritään yleensä alentamaan pienentämällä herätevoiman aiheuttamaa vastetta. Vastetta voidaan pienentää systeemin eri rakeenteellisten muutosten avulla kuten esimerkiksi tasapainottamalla akselin massan epäkeskeisyyttä, linjaamalla akselit oikein tai parantamalla koneen rakenteen tukemista. (Mikkonen et al. 2009, s. 297-303.)

2.3 Värähtelyn voimakkuuden suuret

Värähtelyn voimakkuudesta yleensä tutkitaan seuraavia suureita:

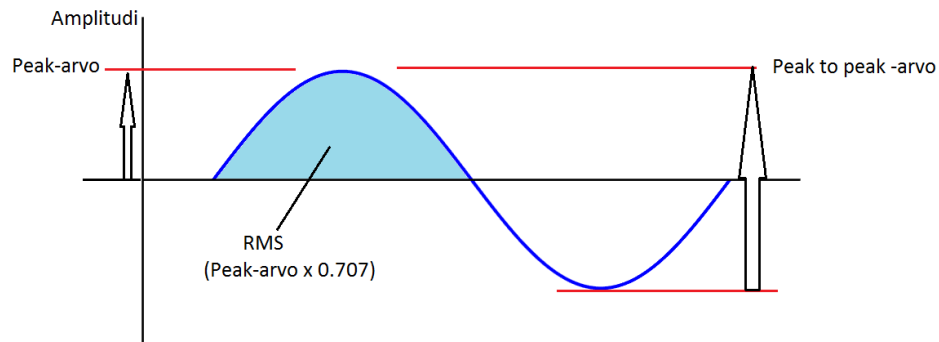
- Huipusta huippuun (*peak to peak*) -arvo: suure, joka mitataan värähtelyn siniaallon ylähuipusta alahuippuun. Hyödyllinen suure, kun halutaan tutkia esimerkiksi koneenosien siirtymää, jonka värähtely aiheuttaa. Siirtymän suuruus on tärkeä tieto, kun koneenosien väläyksille on annettu tarkat kriteerit. (Bjuer & Kjaer 1982, s. 5.)

- Huippuarvo (*peak*): sama suure kuin työssä aiemmin mainittu A , jonka suuruus on puolet huipusta huippuun -arvosta. Hyödyllinen suure, kun halutaan tutkia esimerkiksi lyhytkestoisten shokkien suuruutta. Huippuarvo ilmaisee kuitenkin vain yksittäisiä aallon huippuja eikä huomioi värähtelyliikkeen käyttäytymistä koko sen olemassaolon aikana. (Bjuer & Kjaer 1982, s. 5.) Huippuarvoa käytetään yleensä värähtelyn yhtälöiden laskennassa.

- Tehollisarvo: olennaisin värähtelyn voimakkuudesta tutkittava suure. Tehollisarvo kuvaa värähtelyn keskimääräisen energian suuruutta paremmin kuin huippuarvo, koska se huomioi värähtelyliikkeen käyttäytymisen sen koko olemassaolon ajalta. Tehollisarvoa merkitään usein lyhenteellä *rms*, joka tarkoittaa ”*root mean square*” eli neliöllistä keskiarvoa. Sen yksikkö on mitattavan suureen yksikkö ja se lasketaan A :sta yhtälön

$$rms = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

avulla. (Nohynek & Lumme 2004, s. 51-52; PSK 5701 2017, s. 1-3.) Alla on havainnollistava kuva 3 värähtelyn voimakkuuden eri suureista.



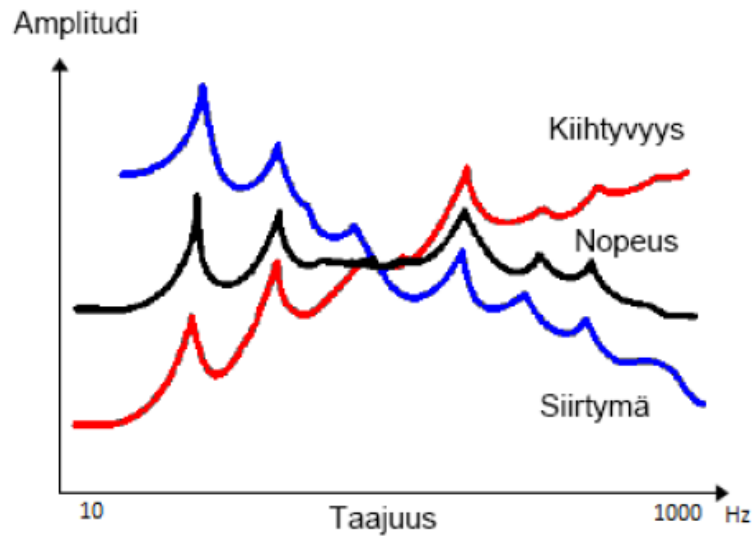
Kuva 3. Huipusta huippuun -arvo, huippuarvo ja tehollisarvo.

2.4 Värähtelymittauksessa mitattavat suureet

Värähtelymittauksessa mitataan värähtelystä siirtymää, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Siirtymä ilmaisee mitattavan kohteen esimerkiksi akselin etäisyydenmuutosta vertailupisteeseen nähden. Värähtelyn näkökulmasta siirtymä on sama asia kuin värähdyksen amplitudi. Siirtymää yleensä mitataan, kun tutkittavan mitta-alueen taajuus on alle 100 Hz tai koneen pyörimisnopeus on alle 300 rpm. (Nohynek & Lumme 2004, s. 50.) Rpm on pyörimisnopeuden yksikkö ja sen tunnus on n (Lehto et al. 2010, s. 11).

Värähtelyn nopeutta käytetään eniten värähtelymittauksessa, koska useimpien tarkasteltavien kohteiden taajuudet ovat sopivia nopeusmittaussuureen vasteen kanssa. Nopeutta mitattaessa taajuusalue osuu 10-1000 Hz alueelle. Nopeus ilmaisee tarkasteltavan kohteen siirtymän tietyllä ajanhetkellä. Kiihtyvyys mittaussuureena soveltuu parhaiten korkeiden taajuuksien mittaamiseen, joissa ei voida käyttää siirtymää tai nopeutta mittasuureina. Värähtelyn kiihtyvyys tarkoittaa sen nopeuden muutosta tietyllä ajanhetkellä. (Mikkonen et al. 2009, s. 228-229.)

Alla on kuva 4, joka havainnollistaa eri mittaussuureiden taajuusvasteita. Kuvasta voidaan todeta, että siirtymä on sopiva suure, kun mitataan matalaa taajuista värähtelyä. Nopeus taas soveltuu keskisuuruisten taajuuksien mittaamiseen ja kiihtyvyys korkeampien taajuuksien mittaamiseen.

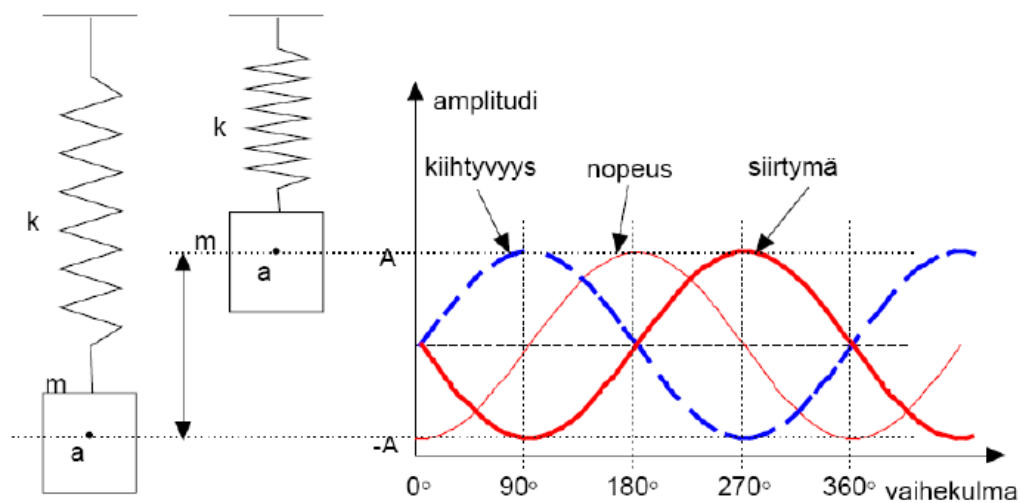


Kuva 4. Siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden taajuusvasteet (ABB TTT-käsikirja 2000-7, s. 10).

2.4.1 Mittaussuureiden keskinäiset yhteydet

Mittaussuureilla siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys on sellainen keskinäinen yhteys, että jokainen haluttu suure voidaan ratkaista toisesta suureesta. Esimerkiksi värähtelyn nopeus voidaan määrittää derivoimalla siirtymää tai integroimalla kiihtyvyyttä. Vastaavasti siirtymä voidaan määrittää joko nopeudesta tai kiihtyvyydestä, koska nopeus on siirtymän ensimmäinen derivaatta ja kiihtyvyys on toinen derivaatta. Nämä laskutoimitukset voidaan suorittaa joko itse mittalaitteessa tai erillisessä tulosten analysointiohjelmassa. (Crawford 1992, s. 50-56; Mikkonen et al. 2009, s. 229; Nohynek & Lumme 2004, s. 50.)

Alla on kuva 5, joka havainnollistaa yleisimmin käytettyjen suureiden keskinäistä yhteyttä. Samassa kuvaajassa on vaaka-akselilla vaihekulma asteina ja pystyakselilla värähtelyn amplitudi. Kuvaajasta voidaan havaita, että kiihtyvyyden vaihe on 180 astetta edellä siirtymän ja nopeuden vaihetta. Keskinäiset yhteydet on havainnollistettu jousen ja siihen yhdistetyn punnuksen avulla. Tunnus k viittaa jousen jousivakioon, jonka yksikkö on N/m. Jousivakiolla tarkoitetaan, kuinka jäykkä jousi on. (Lehto et al. 2009, s. 14.) Tunnus m viittaa punnuksen massaan, jonka yksikkö on kg, ja tunnus a vastaavasti punnuksen kiihtyvyyteen, jonka yksikkö on m/s^2 .



Kuva 5. Siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden keskinäinen yhteys (ABB TTT-käsikirja 2000-7, s. 8).

3 VÄRÄHTELYN MITTAUSPROSESSIN SUUNNITTELU

Tässä pääkappaleessa käsitellään värähtelymittauksen suunnittelussa yleisimpiä huomioon ottavia tekijöitä, joihin mittaajan olisi syytä tutustua. Näitä tekijöitä ovat muun muassa tarkasteltava taajuus- ja mittausalue, ympäristötekijät ja anturin asennukseen sekä johdottamiseen liittyvät tekijät. Nämä tekijät vaikuttavat sopivan anturin valintaan mitattavaan kohteeseen.

Värähtelyn mittaaminen on toimiva menetelmä selvittää, toimiiko kone halutulla tavalla. Värähtelymittauksen toimintaperiaate perustuu siihen, että yksi tai useampi sopiva anturi sijoitetaan johonkin koneen rakenteeseen esimerkiksi laakeripesään tai muualle runkoon mittaamaan aiemmin mainittuja mittaussuureita. Suureita tarkastelemalla ja vertailemalla näitä aiempiin mittauksiin ja standardeihin voidaan määrittää haitalliset värähtelyt koneen osissa ja rakenteissa. Värähtelymittaus mahdollistaa muun muassa jatkuvan seurannan koneen kunnosta, koneen vaurioiden ennakoinnin ja ehkäisemisen sekä viankorjauksen ajoittamisen yritykselle sille sopivaan aikaan. Värähtelymittauksella voidaan myös määrittää koneenosien ja rakenteiden resonanssitaajuuksia. (Värähtelymittaus 2018.)

Ennen kuin mittausta voidaan kuitenkaan suorittaa, mittaajan täytyy ottaa huomioon useita mittaamiseen liittyviä tekijöitä. Mittaamiseen liittyviä tärkeitä tekijöitä ovat muun muassa itse mitattava kohde ja sen värähtelyominaisuudet, kohteen toimintaympäristö, anturin oikea asennustapa sekä johdoissa esiintyvät häiriöt. Näiden tekijöiden lisäksi on muitakin asioita, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin. Näitä ovat esimerkiksi anturin oman massan vaikutus ja anturin mahdollinen resonoiminen mitattavan kohteen kanssa mutta näitä syitä ei lähdetä selvittämään sen enempää tässä työssä. Alla on lueteltu tärkeimmät asiat, joihin mittaajan olisi hyvä tutustua ja, jotka mittaajan on hyvä tiedostaa ennen kuin aloittaa värähtelyn mittaamisen.

3.1 Taajuus- ja mittausalue

Mittaajan on hyvä tietää, mitä taajuusaluetta hän on tutkimassa, sillä tarkasteltava taajuusalue määrää, mitä anturia aiotaan käyttää mittauksessa (Hanly 2016, s. 5). Tarkasteltavan taajuusalueen määrää usein mitattava kohde ja itse anturin kyvyn mitata

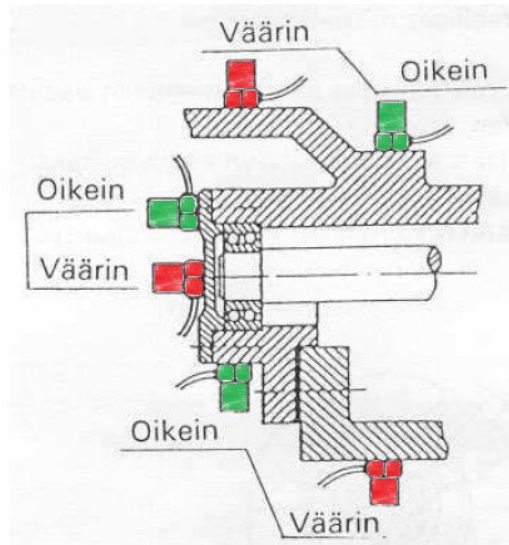
taajuusaluetta määrää anturin ominaisuudet sekä ympäristötekijät ja kiinnitystavat. Kuten on aiemmin mainittu, eri mittaussuureilla on erilaiset taajuusvasteet. Anturit on suunniteltu mittaamaan eri suureita, minkä vuoksi on tärkeää tietää tarkasteltava taajuusalue, jotta anturi voidaan valita oikein.

Anturin mittausalueen olisi hyvä sisällyttää amplitudit, jotka ovat kiinnostuksen kohteena. Korkean taajuuden omaavan värähtelyn mittaamiseen voidaan käyttää anturia, jonka herkkyys on pieni. Matalan taajuuden omaavan värähtelyn kuten esimerkiksi seismisten kohteiden mittaamiseen taas käytetään anturia, jonka herkkyys on korkea. (Hanly 2016, s. 5.)

3.2 Testausympäristö ja anturin asennus

Testausympäristössä suurin anturin toimintakykyä rajoittava ympäristötekijä on lämpötila. Herkkyys lämpötilakuormituksille vaihtelee anturien kesken. Anturin antama lukema voi vaihdella vähän tai paljon riippuen anturin herkkyydestä. Jotkut antureista tarvitsee erillisen laitteiston, joka kompensoi lämpötilakuormituksesta aiheutuvan lukemavirheen. Muita ympäristötekijöitä, joita on hyvä ottaa huomioon lämpötilan lisäksi, ovat muun muassa lika, syövyttävät aineet, sähkömagneettiset häiriöt ja ympäristön kosteus. (Hanly 2016, s. 27.) Ympäristötekijöihin palataan, kun työssä käydään läpi erilaisia antureita, jolloin samalla selvitetään anturien ympäristörajoitteita.

Anturin asennuksessa on syytä huomioida, että mittausanturi sijaitsisi erittäin lähellä värähtelylähdettä ja näiden välillä olisi erittäin vähän esteitä kuten fyysisiä rajapintoja. Esimerkiksi pyörivien koneiden tapauksessa anturi sijoitetaan laakerin kohdalle, koska värähtely siirtyy laakerien kautta koneen runkoon. On mahdollista, että anturia ei voida sijoittaa optimaaliseen mittauskohtaan koneen rakeenteellisten syiden vuoksi, minkä vuoksi joudutaan etsimään paras mahdollinen vaihtoehtoinen kohta. Jos kohtaa ei löydetä, koko mittaus jätetään suorittamatta. (Nohynek & Lumme 2004, s. 53; PSK 5702 2007, s. 1-2.) Alla on kuva 6, joka havainnollistaa, miten anturit on hyvä sijoittaa tarkasteltavassa kohteessa.



Kuva 6. Anturien sijoittaminen mittauskohteessa (PSK 5702 2007, s. 2).

Anturit voidaan kiinnittää erilaisilla tavoilla. Yksi tapa on anturin pitäminen mittauskohdassa käsin mittaajan toimesta. Vaikka tämä on kätevä ja nopea tapa, niin se on mittauksen kannalta rajoitteellinen. Mittaamisen toistettavuus on huono ja lukemavirheet ovat yleisiä. Suurin mittaustaajuus, jota voidaan mitata tällä tavalla ilman tulosten muuttumista virheellisiksi, on vain 500 Hz. (Hoikkanen 2007, s. 6; Nohynek & Lumme 2004, s. 59.)

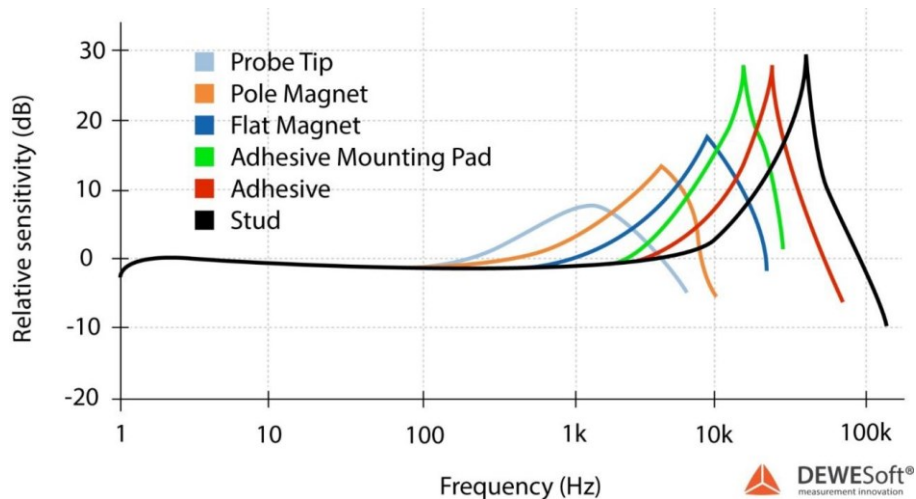
Jos anturi kiinnitetään kohteeseen magneetin avulla, voidaan mitata korkeampia taajuuksia kuin käsin mittaamalla. Magneetin ja anturin asettamisessa täytyy olla kuitenkin huolellinen. Anturin ja mitattavan kohteen pinta pitää olla magneettisia, jotta magneettikiinnitystä voidaan käyttää. Muita kiinnitystä vaikeuttavia tekijöitä ovat kohteen tai anturin pinnassa oleva lika ja muut epäpuhtaudet. Pitää olla myös varovainen magneettia asetettaessa, koska vaarana on, että anturi voi iskeytyä mittakohtaan. (Hoikkanen 2007, s. 7; Nohynek & Lumme 2004, s. 59.)

Anturi voidaan kiinnittää mittakohtaan myös eri sideaineiden avulla. Yleisimpiä sideaineita, joita käytetään ovat epoksiliima, anturiin kiinnittämiseen soveltuva vaha ja kaksipuolinen teippi. Sideaineiden avulla anturi voi mitata vielä korkeampia taajuuksia kuin

magneettikiinnityksessä. Anturin taajuusvasteen toimintakyvyn kannalta sideaineen tyyppillä ei ole yhtä paljon merkitystä kuin sideaineen paksuudella. (Hanly 2016, s. 21-24.)

Paras tapa, jolla anturi kiinnitetään, on anturin asentaminen mittauskohtaan sen omalla tai erillisellä kierreruuvilla. Tällä tavalla saadaan anturin tuloksista kaikista luotettavimpia ja saavutetaan paras taajuusvaste. Verrattuna muihin tapoihin tämä tapa on hitain, minkä vuoksi tätä käytetään vain kiinteässä asennuksessa. Tämän lisäksi kohteeseen täytyy koneistaa tasainen pinta, jonka keskelle on porattu standardin PSK 5703 mukainen kierrereikä. (Hoikkanen 2007, s. 8; Nohynek & Lumme 2004, s. 57.)

Alla on kuva 7, joka havainnollistaa eri kiinnitystavoilla saavutettavia taajuusvasteita. Vaaka-akselille on merkitty taajuus ja pystyakselille herkkyys desibeleinä. Kuvasta pystyy toteamaan samat asiat eri kiinnitystavoista kuin yllä.



Kuva 7. Eri kiinnitystapojen mahdollistamat taajuusvasteet (Hanly 2016, s. 21).

3.3 Johdoissa esiintyvät häiriöt

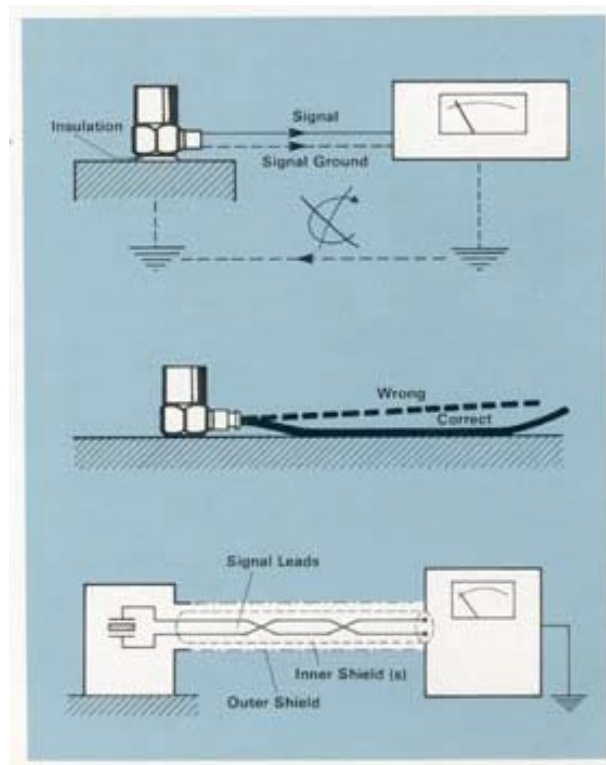
Anturin, mittaus- ja analysointilaitteistojen kytkennöissä saattaa esiintyä häiriöitä, jotka luovat kohinaa ja täten vääristää mittauksia. Tämän vuoksi on tärkeää kiinnittää huomiota myös johdoissa esiintyviin häiriöihin ja tehdä parhaansa vähentääkseen näiden vaikutusta tuloksiin. Nämä häiriöt voivat olla luonteeltaan mekaanisia, sähköisiä ja sähkömagneettisia. Paras tapa välttää näitä häiriöitä on lyhyiden johtojen käyttäminen. (Hanly 2016, s. 25.)

Mekaaninen kohina syntyy anturiin kiinnitetyn johdon taipuessa ja venyessä. Anturi, joka on herkkä mekaaniselle kohinalle, mittaa rakenteessa esiintyvän värähtelyn lisäksi johdossa esiintyvän liikkeen. Tämä vääristää mittaustuloksia. Mekaanista kohinaa voidaan vähentää kiinnittämällä johto tukevasti lähelle anturia esimerkiksi o-renkailla ja johdon kiinnityspidikkeillä. (Hanly 2016, s. 26.)

Jos sekä anturi ja myös mittalaitteisto on maadoitettu, niin anturista saatu mittasignaali saattaa tehdä silmukan ja kulkea mittalaitteiston kautta takaisin anturiin. Tämän tyylistä silmukkaa kutsutaan maadoitetuksi silmukaksi, joka aiheuttaa usein mittasignaalin jännitteen heikentymisen, jolloin mittalaitteiston on hankalampi havaita signaalia. Häiriön on mahdollista estää maadoittamalla vain yksi piste koko mittausprosessin ketjussa. Häiriö voidaan myös poistaa sähköeristämällä anturin runko asennuskohdasta. (Bruel & Kjaer 1982, s. 19.)

Sähkömagneettinen kohina muodostuu anturin johtoon, kun se sijaitsee lähellä laitetta, joka lähettää ympärilleen sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettista häiriötä voidaan vähentää käyttämällä kaksoissuojattua johtoa. Hankalimmissa ympäristöissä käytetään esivahvistinta, joka vahvistaa anturista tulevaa signaalia. (Bruel & Kjaer 1982, s. 19.)

Alla on kuva 8, joka havainnollistaa erilaisia johdoissa esiintyviä häiriöitä. Kuvan yläosassa havainnollistetaan maadoitussilmukoita sekä sähköeristeen käyttämistä anturin rungon ja asennuskohdan välissä häiriön estämiseksi. Kuvan keskellä havainnollistetaan mekaanista kohinaa, ja miten johto olisi syytä asettaa anturiin kiinni. Lopuksi kuvan alapuolella havainnollistetaan kaksoissuojatun johdon käyttämistä sähkömagneettista häiriötä vastaan.



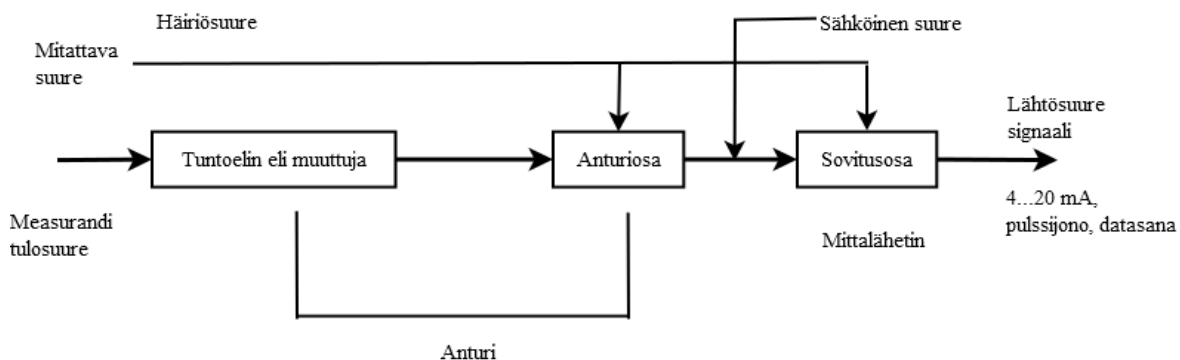
Kuva 8. Johdoissa esiintyvät häiriöt ja niiden torjuntakeinot (Briel & Kjaer 1982, s. 19).

4 VÄRÄHTELYMITTA-ANTURIT

Anturiksi kutsutaan laitetta, joka havaitsee värähtelevästä koneenosasta tai rakenteesta jonkin värähdykseen liittyvän mittaussuureen, kuten siirtymän, nopeuden tai kiihtyvyyden. Anturi muuttaa havaitun suureen sitten suoraan verrannollisesti sähköiseksi signaaliksi. Tässä pääkappaleessa käsitellään yleisimpiä värähtelymitta-antureita. Aluksi selvitetään anturien yleinen toimintaperiaate ja, mitä tarkoitetaan anturin herkkyydellä sekä resoluutiolla. Kun nämä on saatu selvitettyä, siirrytään selvittämään anturien eri tyyppejä ja näiden toimintaperiaatteita sekä hyviä ja huonoja puolia. Tavoitteena on kerätä kattava kattaus eri anturityypeistä teorian ja havainnollistavien kuvien avulla. Työn lopussa on liitteenä taulukko, johon listataan tässä työssä selvitettyt anturit, niiden hyvät ja huonot puolet sekä sopivimmat sovelluskohteet.

4.1 Anturien yleinen toimintaperiaate

Anturissa on tuntoelin, joka on vastuussa mittaussuureen havaitsemisesta. Tuntoelin määrää, mitä suureta se voi havaita. Suureen havaitsemisen jälkeen anturissa oleva lähetin muuntaa suureen suoraan verrannollisesti sähköiseksi signaaliksi. Signaalin virta on yleensä luokkaa 4...20 mA (milliampeeria). Sähkövirran tunnus on I , jonka yksikkö on A. Anturi on suunniteltu ja valmistettu yleensä siten, että tuntoelin ja lähetin ovat yhteisenä rakenteena anturissa. Analoginen signaali muutetaan lopuksi vielä A/D muuntimella digitaalseksi signaaliksi, jotta analysointiohjelma voi käsitellä anturista saatuja mittaustuloksia. (Keinänen et al. 2007, s. 187.) Alla on kuva 9, joka havainnollistaa anturin perusrakennetta ja yleistä toimintaperiaatetta.



Kuva 9. Anturin periaate (Liljaniemi 2008, s. 1).

4.2 Anturien herkkyys ja resoluutio

Lähtösuureen ja tulosuureen välistä suhdetta kutsutaan anturin herkkyydeksi. Lähtösuureena voi olla esimerkiksi mitattu värähtelyn kiihtyvyys ja tulosuurena sähköinen signaali. Mitä suurempi tulosuure on lähtösuureeseen verrattuna, sitä herkempi anturi on. On suotavaa, että anturin herkkyys on koko tarkasteltavalla mittausalueella lineaarinen ja se sopisi vallitsevaan värähdysvoimakkuuteen. (PSK 5701 2017, s. 3; PSK 5703 2006, s. 2.)

Antureiden herkkyys on usein ilmoitettu pelkästään anturin akselin suuntaiselle värähtelylle. Toisinaan valmistajat ilmoittavat myös poikittaisen suuntaisen herkkyyden. Poikittainen värähtely saattaa olla haitallista mittaukselle, jos mitattava värähtely osuu anturin poikittaisresonanssialueelle. Herkkyys voidaan anturityypistä riippuen ilmoittaa esimerkiksi merkintänä mV/g. (Mikkonen et al. 2009, s. 240.) Merkintä tarkoittaa millivoltin muutosta per yhden putoamiskiihtyvyyden g suuruudesta vaikutuksesta. Yhden g:n suuruus on $9,81 \text{ m/s}^2$ ja jännitteen yksikkö on V sekä sen tunnus on *U*. Esimerkiksi, jos anturin herkkyydeksi on ilmoitettu 150 mV/g, niin kahden g:n vaikutus havaitaan 300mV:n muutoksena.

Anturin resoluutiolla tarkoitetaan, kuinka pieniä askelvälejä anturi voi mitata. Mitä suurempi resoluutio eli erotustarkkuus anturilla on, sitä pienempiä muutoksia voidaan kyseisellä anturilla mitata. Vastaavasti pienemmän resoluution omaavalla anturilla ei voida mitata yhtä tarkkoja muutoksia, jolloin anturi on epätarkempi. Korkean resoluution anturi on kuitenkin usein kalliimpi kuin pienemmän resoluution anturi. (PSK 5701 2017, s. 3.)

4.2.1 Kalibrointi

Anturin kalibroinnilla varmistetaan, että anturi toimii oikeanmukaisesti. Jokaisen anturihankinnan yhteydessä saadaan valmistajalta kalibrointitodistus, joka todistaa anturille tehdyn kalibroinnin. Anturit on kuitenkin hyvä kalibroida tietyn ajoin joko itse tai yrityksillä, jotka ovat erikoistuneet laitteiston kalibrointeihin. Yleensä anturilla on kalibrointisuunnitelma, joka on laadittu mittalaitteen tyyppin, valvottavan kohteen, tarkkuusvaatimusten, mittalaitteiden toimittajien suosituksen sekä eri mahdollisten häiriöiden mukaan. (PSK 5713 2013, s. 1.)

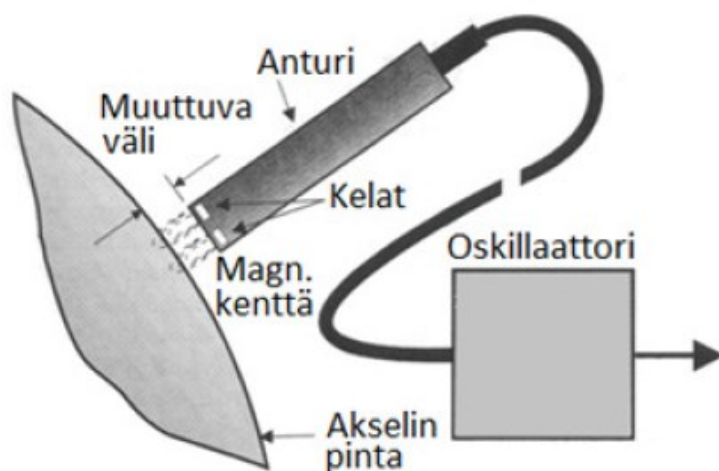
4.3 Erilaiset anturityypit

Värähtelymittaamiseen käytetään yleensä kolmea erilaista anturityyppiä. Anturi on joko värähtelyn amplitudia mittaava siirtymäanturi, värähtelyn nopeutta mittaava nopeusanturi tai värähtelyn kiihtyvyyttä mittaava kiihtyvyyksianturi. Eri anturityypeistä on olemassa erilaisia variaatioita.

4.3.1 Siirtymää mittaavat anturit

Siirtymää mittaavat anturit ovat yleensä joko pyörrevirta-antureita tai kapasitiivisia siirtymäantureita. Kummatkin anturit voidaan asentaa siten, että anturien ei tarvitse olla kosketuksissa mitattavan kohteen kanssa. Mittauspisteisiin täytyy kuitenkin kiinnittää huomiota.

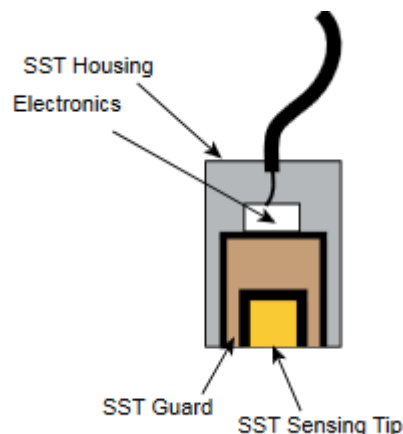
Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate perustuu anturissa olevaan oskillaattoriin, jonka kela toimii tuntopintana. Kela muodostaa magneettikentän, joka indusoi mitattavaan kohteeseen pyörrevirtoja. Mitattavan kohteen pinnan täytyy olla tehty ferromagnetisoituvasta materiaalista, jotta sitä voidaan mitata pyörrevirta-anturilla. Kun anturin ja mitattavan kohteen välinen välimatka muuttuu, anturin tuntoelin eli kela havaitsee jännitteen muutoksen. Jännitteen muutos johtuu kohteeseen indusoituneesta pyörrevirrasta, jonka magneettikenttä heikentää kelan magneettikenttää. Jännitteen muutos on suoraan verrannollinen anturin ja kohteen väliseen välimatkaan. (Mikkonen et al. 2009, s. 235; Nohynek & Lumme 2004, s. 49.) Alla on kuva 10, joka havainnollistaa pyörrevirta-anturin toimintaperiaatetta.



Kuva 10. Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate (Mikkonen et al. 2009, s. 235).

Perinteisen pyörrevirta-anturin heikkous on anturin herkkyyden, lineaarisuuden ja mittausalueen riippuminen toisistaan, minkä vuoksi tavanomainen nopeusanturi ei sovellu korkeampien taajuuksien mittaamiseen (Huang 2008, s. 12). Uudempien pyörrevirta-antureiden korkein taajuusvaste voi kuitenkin olla jopa 100 kHz ja mittausalue on usein 0,05-80 mm (Eddy Current displacement, distance and position sensors 2018). Anturin toinen heikkous on kalibroinnin tarve, kun mitataan matalimpia taajuuksia ja erilaisia materiaaleja. Anturi tarvitsee myös erillisen esivahvistimen sen toimintaa varten (Mikkonen et al. 2009, s. 235). Pyörrevirta-anturin etuja kapasitiiviseen anturiin nähden ovat kuitenkin muun muassa sen parempi sietokyky ympäristön likaisuutta vastaan ja laajempi mittausalue. (Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors 2009).

Kapasitiivisen siirtymäanturin toimintaperiaate perustuu anturin ja mitattavan kohteen välillä olevan sähkökentän muutoksiin näiden etäisyyden muuttuessa toisiinsa nähden. Kapasitiivisella siirtymäanturilla on tuntoelin, joka muodostaa sähkökentän. Anturissa on myös suojusrenkas, joka ympäröi tuntoelintä ja keskittää sähkökentän mittauspisteeseen. Näiden lisäksi anturiin on sijoitettu anturin toimintaan tarvittavaa elektroniikkaa. Anturin runko, tuntoelin ja suojusrenkas on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Alla on kuva 11, joka havainnollistaa anturin rakennetta. (Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors 2009.)

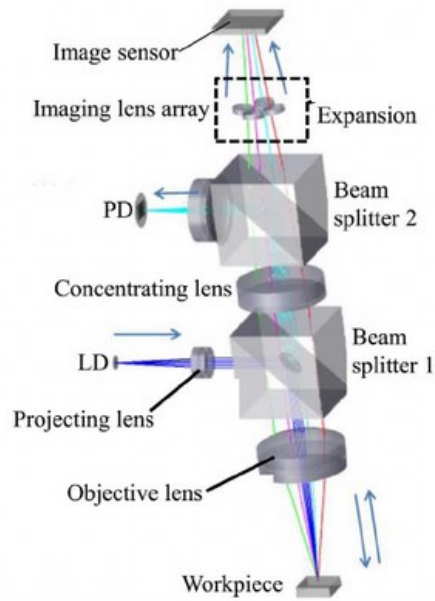


Kuva 11. Kapasitiivisen siirtymäanturin rakenne (Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors 2009).

Anturin ja mittauspisteen välissä olevassa sähkökentässä kulkee sähkövirta, jonka suuruus riippuu anturin ja mitattavan kohteen välisestä kapasitanssista. Kapasitanssilla tarkoitetaan sähkökenttään varastoituneen sähköenergian suuruutta. Koska anturi perustuu kapasitanssi-ilmiöön, mittauskohdan materiaali pitää olla sähköä johtavaa materiaalia. Kapasitanssin suuruus muuttuu anturin ja mittauskohdan etäisyyden muuttuessa, jolloin anturin tuntoelin havaitsee tämän muutoksen muutossignaalinä. Tämä muutossignaali sitten siirretään anturista mittalaitteistolle. (Chaurasiya 2012, s. 3.)

Kapasitiivisen anturin hyviä puolia suhteessa pyörrevirta-anturiin ovat muun muassa sen parempi resoluutio ja mahdollisuus mitata pienempiä kohteita, mikä johtuu anturissa olevasta suojustenkaasta, joka keskittää tuntoelimen sähkökentän mittauspisteeseen. Pyörrevirta-anturissa ei ole kelan magneettikenttää keskittävää osaa, minkä vuoksi magneettikentän vaikutusalue on laaja. Kapasitiivisen anturin huonoja puolia taas ovat muun muassa sen pieni mittausalue, epätoiminnallisuus muiden materiaalien kuin sähköä johtavien materiaalien kanssa ja huono sietokyky ympäristön häiriöitä vastaan kuten likaa ja kosteutta vastaan. (Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors 2009.) Kapasitiivisen anturin tyypillinen taajuusalue on 10-15 kHz ja mittausalue on 0,25-2 mm (Overview of Capacitive Displacement Sensors for Displacement Measurement 2016).

Vähän uudempi siirtymäanturi on optinen sensori, joka käyttää laseria ja optiikkaa hyväksi siirtymän mittaamiseksi. Laseri lähettää koherenttia valoa, joka kohdistetaan linssien avulla mittauspisteeseen. Valo heijastuu mittauspisteestä takaisin ja vastaanottavat linssit kohdistavat valon anturille, jonka tuntoelin havaitsee valon. Mitattavan kohteen liikkeessä värähdyksen vaikutuksesta edestakaisin, heijastuneen valon tulokulma muuttuu samalla. Tarkastelemalla eri tulokulmia voidaan kolmiomittauksen avulla määrittää tarkasteltavan kohteen siirtymää. (Kawano et al. 2017, s. 437.) Alla on kuva 12, joka havainnollistaa optisen sensorin toimintaa.



Kuva 12. Optisen sensorin toimintaperiaate (Kawano et al. 2017, s. 439).

Laserin toimintaan perustuvaan optisen sensorin hyviin puoliin muihin siirtymäantureihin verrattuna kuuluu erityisesti mittauksen nopeus ja toimintakäytön edullisuus. Huonoja puolia taas ovat laitteiston suhteellinen suuri koko ja metallipinnan mittaamisen epätarkkuus. Epätarkkuuden syyksi on kerrottu olevan esimerkiksi leikkaustyöstöstä jääneet jäljet työstetyn osan pinnassa. (Kawano et al. s. 437.) Optisen sensorin tyypillinen taajuusalue on 0-1 kHz ja mittausalue on 2 μm – 10 mm (Kawade & Rawat 2016, s.18).

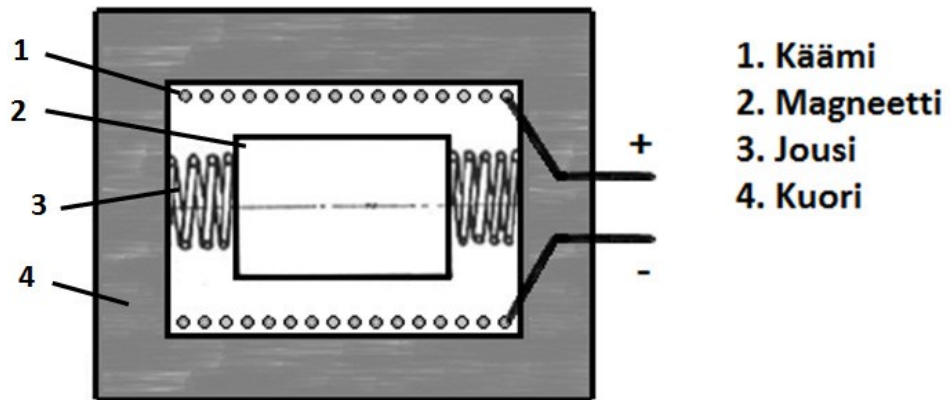
Yleisesti ottaen siirtymäanturien etuna on, että ne mittaavat siirtymää suoraan ja kosketuksettomasti ilman, että tarvitaan integroida nopeutta tai kiihtyvyyttä mittaavien anturien tuloksia. Eli ne soveltuvat hyvin matalien taajuuksien mittaamiseen. Iskuja ne eivät kuitenkaan kestä, minkä vuoksi kaikista matalimpia taajuuksia ei voida siirtymäantureilla mitata. Siirtymäanturien huonoin puoli on se, että ne mittaavat suhteellista siirtymää. Tämän vuoksi siirtymäanturit vaativat kiinteän kiinnityksen. Kiinnittämistapa saattaa aiheuttaa hankaluuksia, koska toimiakseen siirtymäanturit tarvitsevat välimatkan mitattavan kohteeseen. Näiden lisäksi useimmat siirtymäanturit tarvitsevat kalibroinnin ennen käyttöä, erillisen teholähteen ja ovat hieman kalliimpia kuin kiihtyvyyttä mittaavat anturit. (Hanly 2016, s. 11.)

Siirtymäantureita kuitenkin käytetään, kun halutaan mitata pyöriviä koneita tai esimerkiksi liukulaakereiden värähtelyä. Liukulaakereita mitataan siirtymäantureilla, koska akseli ei ole kosketuksessa laakerin pidikkeen kanssa vaan pyörii öljykalvon päällä. Jaksollisia kosketuksia ei synny, joita voitaisiin nopeutta tai kiihtyvyyttä mittaavien anturien kanssa mitata. (Hanly 2016, s. 11; Hoikkanen 2007, s. 3.)

4.3.2 Nopeutta mittaavat anturit

Perinteiset nopeutta mittaavat anturit eivät ole kovin yleisiä enää tänä päivänä, koska nopeussuure voidaan integroida kiihtyvyyttä mittaavan anturin tuloksesta. Tämän vuoksi nopeutta mittaavien anturien tutkiminen ja kehittäminen on loppunut lähes kokonaan. Perinteiset nopeusanturit ovat myös usein kookkaampia kuin kiihtyvyyksianturit ja ne eivät ole myöskään hyviä sietokyvyltään lämpötilan vaihteluille ja sähkömagneettisille häiriöille. Perinteisten nopeusantureiden mittausalue on myös kapea. Tästä huolimatta nopeusantureilla on hyviäkin ominaisuuksia. Nopeusanturit eivät tarvitse erillistä teholähdettä ja kestävät ulkoisia iskuja. (Crawford 1992, s. 51-52; Nohynek & Lumme 2004, s. 48.)

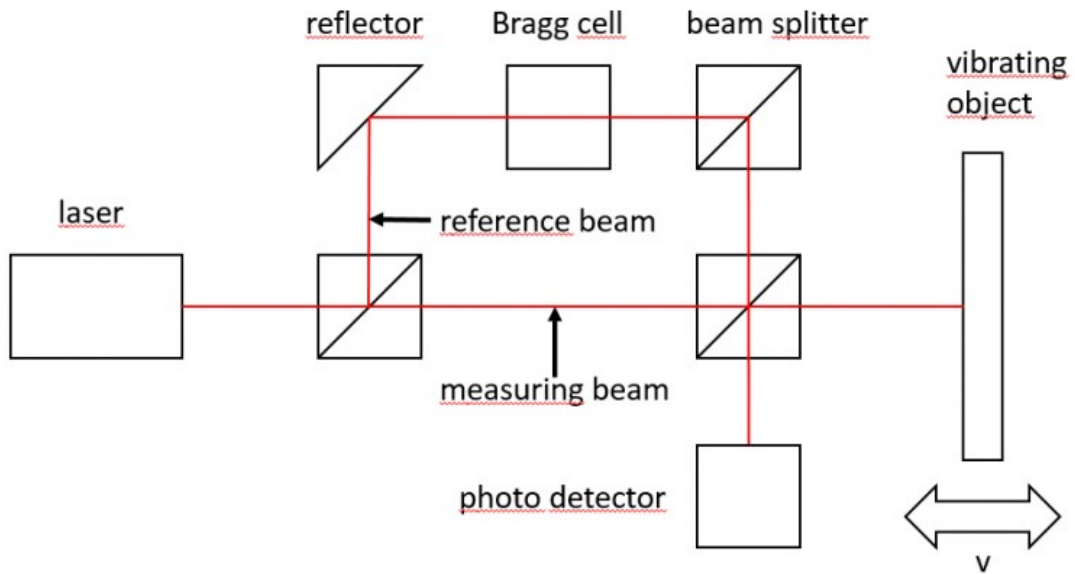
Yleisin nopeusanturi on magneettinen nopeusanturi. Magneettisen nopeusanturin toimintaperiaate perustuu anturin rungon sisällä olevaan käämiin, jonka sisällä on jousella kiinnitetty massa, joka liikkuu värähtelyn vaikutuksesta. Kiinnitetty massa on materiaaliltaan magneettinen. Magneettisen massan liikuessa edestakaisin värähtelyn vaikutuksesta se indusoi anturiin magneettivuon muutosta vastustavan jännitteen, joka on suoraan verrannollinen nopeuden suuruuden kanssa. Magneettisen nopeusanturin tyypillinen taajuusalue on vain 5-2000 Hz. (Nohynek & Lumme 2004, s. 47-48.) Alla on kuva 13, joka havainnollistaa magneettisen nopeusanturin toimintaperiaatetta.



Kuva 13. Magneettisen nopeusanturin toimintaperiaate (Nohynek & Lumme 2004, s. 47).

Toinen variaatio nopeusanturista on vähän uudempi Doplerin-ilmiöön perustuva laseria käyttävä nopeusanturi. Laser-Dopler nopeusanturi toimii siten, että monokromaattista eli yksiväristä laservaloa lähetetään kohti mitattavaa kohdetta ja anturi havaitsee sitä kohti heijastuneen valon määrää. Laserin valo pakotetaan myös kulkemaan jonkin erillisen väliaineen kautta, jossa laserin valo kokee taajuussiirron. Dopplerin-ilmiön mukaan heijastuneen valon taajuussiirto kuvaa tarkasteltavan kohteen suhteellista nopeutta. Tätä ilmiötä soveltamalla voidaan suunnitella nopeusanturi, joka havaitsee nämä värähtelyn taajuussiirrokset. Koska taajuussiirto on verrannollinen tarkasteltavan kohteen suhteelliseen nopeuteen, voidaan täten saada värähtelystä kerättyä tietoa. (Elghraoui & Hung Lo 2010, s. 2.)

Koneiden värähtelyn mittausjärjestely on suunniteltu siten, että laserin valo jaetaan referenssisäteeksi ja mittaussäteeksi. Mittaussäde kohdistetaan tarkasteltavaan kohteeseen ja referenssisäde viedään erityisen Bragg-kennon nimisen kennon läpi, joka aiheuttaa säteessä taajuussiirroksen. Lopulta kummatkin säteet interferoivat eli vuoro vaikuttavat keskenään anturissa, josta voidaan kerätä tieto siitä, miten säteen taajuus on siirtynyt ja täten, mikä on tarkasteltavan kohteen suhteellinen nopeus. Alla on kuva 14, joka havainnollistaa Laser-Dopplerin mittausjärjestelyä.



Kuva 14. Laser-Dopplerin ilmiöön pohjautuva mittausjärjestely (Sensors for vibration measurement: Principles of operation and measuring ranges 2016).

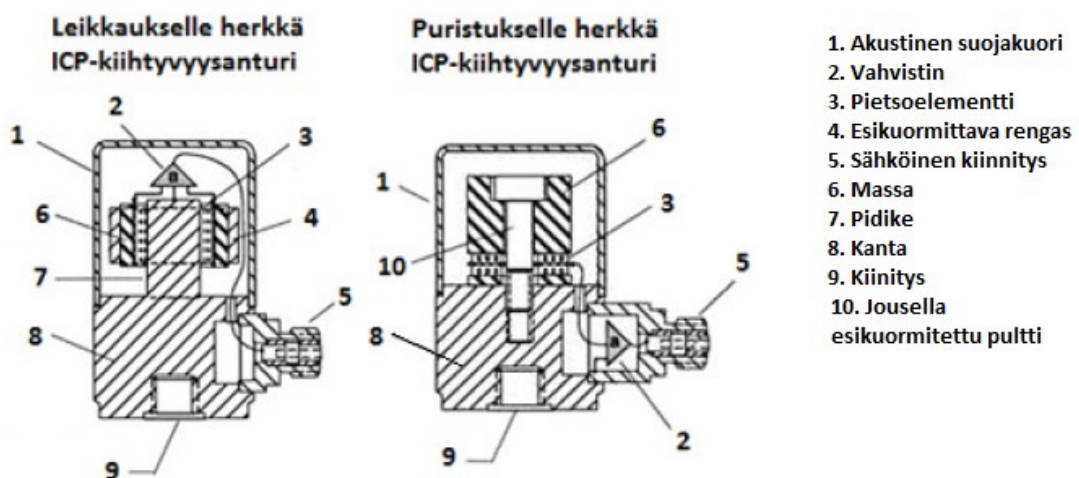
Dopplerin-ilmiöön pohjautuvan laseria käyttävän nopeusmittauksen etuja ovat muun muassa sen tarkkuus, hyvä resoluutio ja ympäristökestävyys. Laser-Doppler anturin taajuusvaste voi olla niin korkea kuin 1,2 GHz ja anturin tyypillinen mittausalue on 0,02 pm/s – 30 m/s (Lawrence 2018, s. 8). Huonoin puoli on kuitenkin mittaamiseen tarvittavan laitteiston kalleus, minkä vuoksi tätä ei yleisemmin käytetä muualla kuin tutkimuslaitosten laboratorioissa. Tämän lisäksi tiedon kerääminen seinien lähellä saattaa olla hankalaa. (Kiger 2010, s. 5.)

4.3.3 Kiihtyvyyttä mittaavat anturit

Tänä päivänä kiihtyvyyttä mittaavia antureja käytetään yleisemmin värähtelyn mittaamiseen (Hanly 2016, s. 7). Kiihtyvyydäntureista yleisin on pietsosähköinen anturi. Pietsosähköisen anturin toiminta perustuu anturin sisällä olevaan pietsosähköiseen elementtiin, johon on kiinnitetty massa. Kun massa kokee värähtelyä, se kiihtyy ja kohdistaa elementtiin voiman, joka on Newtonin toisen lain mukaan suoraan verrannollinen kiihtyvyyden kanssa. Newtonin toinen laki on

$$F = ma \quad (6)$$

jossa F on elementtiin kohdistuva voima, m on kiinnitetty massa ja a on kiinnitetyn massan kiihtyvyys. Voiman F :n yksikkö on N. Pietsosähköinen elementti saa varauksen, kun massa kohdistaa siihen voiman, ja se on suoraan verrannollinen massan kokeman kiihtyvyyden kanssa. Varaus vahvistetaan vielä anturin sisäisellä tai erillisellä vahvistimella, minkä jälkeen voidaan mittaustulos analysoida. (Mikkonen et al. 2009, s. 238.) Alla on kuva 15, joka kuvaa pietsosähköisen anturin toimintaperiaatetta. Pietsosähköisen anturin rakenteesta on olemassa kaksi eri tyyppiä: leikkaukselle herkkä oleva anturi ja puristukselle herkkä oleva anturi.



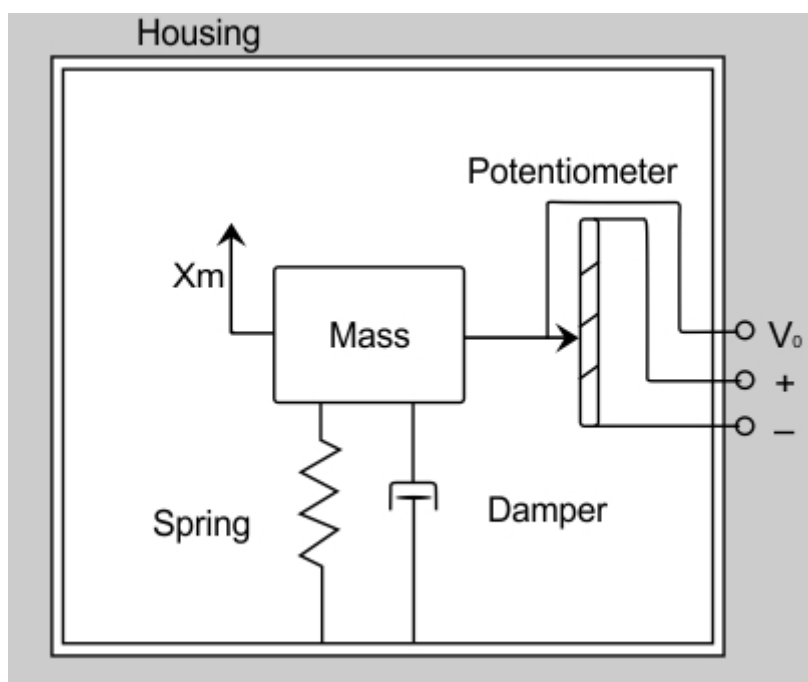
Kuva 15. Pietsosähköisen anturin eri rakenteet (Introduction to Piezoelectric Accelerometers 2018).

Pietsosähköisen anturin etuja ovat muun muassa sen keveys, pieni koko ja laaja mittausalue. Anturi on myös suhteellisen edullinen. Pietsosähköisellä anturilla voidaan mitata 2-14000 Hz:n taajuusalueelta. Ruuvikiinnityksellä päästään jopa 20000 Hz:n taajuusalueelle. Laajan mittausalueen vuoksi pietsosähköinen anturi soveltuu moniin eri tyyppisiin sovelluskohteisiin. Pietsosähköinen anturi ei ole myöskään häiriöherkkä ympäristötekijöille. Koska pietsosähköinen anturi on erittäin yleinen, niin sitä tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti paremmaksi. (Crawford 1992, s. 54-55; Nohynek & Lumme 2004, s. 46-47.) Pietsosähköisen kiihdytysanturin tyypillinen mittausalue on 0,03–1000 g (Button 2015, s. 216).

Pietsosähköisen anturin huonoja puolia ovat rikkoutumiselle altis rakenne, herkkyys kohinalle ja korkea asettumisaika. Anturin asettumisajalla tarkoitetaan aikaa, jonka pitää

kulua ennen kuin anturi on valmis suorittamaan mittauksen. Pietsosähköisen anturin asettumisaika on 1-600 s. (Crawford 1992, s. 55-56; Nohynek & Lumme 2004, s. 47-48.)

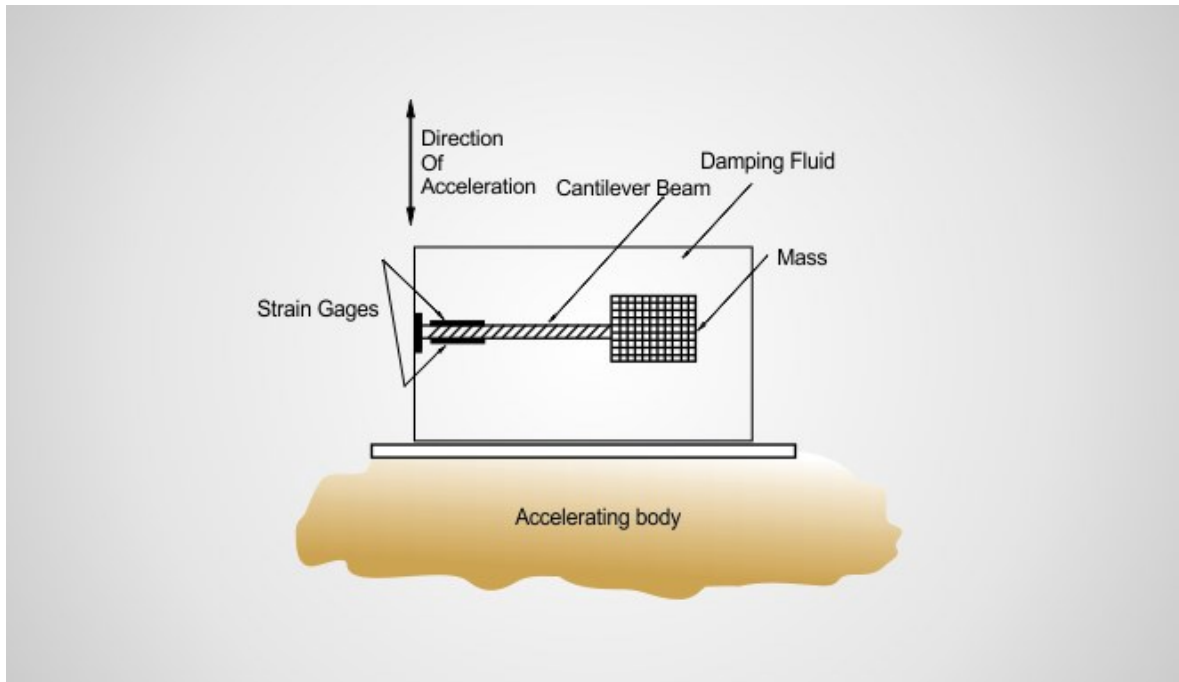
Potentiometriin perustuva kiihdytysanturi toimii siten, että anturin sisällä on massa, joka on kiinnitetty jouseen. Värähtelyn vaikutuksesta massa kiihtyy, jolloin massaan kiinnitetyn potentiometrin varsi myös liikkuu. Potentiometrin varren liikkuaessa anturin resistanssi eli virtaa vastustava suure muuttuu. Täten kiihdytyksen suuruus on verrannollinen resistanssin muutokseen. Anturin luontainen resonanssitaajuus on alle 30 Hz, minkä vuoksi anturi soveltuu ainoastaan matalimpien taajuuksien mittaamiseen. Tämän lisäksi anturin resoluutio on huono. (Jain 2018.) Anturin tyypillinen mitta-alue on 0-50 g (Button 2015, s. 207). Alla on kuva 16, joka havainnollistaa potentiometriin perustuvan kiihdytysanturin toimintaa.



Kuva 16. Potentiometriin perustuva kiihdytysanturi (Jain 2018).

Yksi kiihdytysanturityyppi on pietso-resistiivinen anturi, jonka toiminta perustuu venymäliuskoihin. Värähtelyn aiheuttaman kiihtyvyyden vaikutuksesta venymäliuskat kuormittuvat anturissa liikkuvan massan takia. Venymäliuskan kuormittuessa sen resistiivisyys muuttuu, minkä anturi sitten havaitsee. (Jain 2018.) Pietso-resistiivisten antureiden hyvä puoli on, että niitä voidaan käyttää matalimpien taajuuksien mittaamiseen. Pietso-resistiivisten anturien huonoja puolia ovat kuitenkin niiden herkkyyden

lämpötilavaihteluille ja erillisen teholähteen tarve (Hanly 2016, s. 8.) Pietso-resistiivisen anturin tyypillinen mitta-alue on 0-200 g ja taajuuskaista 7 kHz (Button 2015, s. 205-213). Alla on kuva 17, joka havainnollistaa pietso-resistiivisen anturin rakennetta ja toimintaperiaatetta.



Kuva 17. Pietso-resistiivinen anturi (Jain 2018).

4.3.4 Muut anturit

Värähtelymittauksen anturit perustuvat yleensä siirtymän, nopeuden tai kiihtyvyyden mittaamiseen. Voidaan kuitenkin käyttää eräitä muitakin antureita pääantureiden lisäksi keräämään muuta kiinnostavaa tietoa värähtelystä. Näitä ovat esimerkiksi värähtelyn aiheuttamaa melua havaitsevat mikrofonit, venymäliuskat ja gyroskoopit. Värähtelyn aiheuttamaa melua voidaan äänittää esimerkiksi mikrofonin avulla, minkä jälkeen melusta kerättyä dataa voidaan analysoida erillisellä analysointiohjelmistolla. Venymäliuskoja käytetään, kun halutaan rakenteessa olevan värähtelyn lisäksi saada tietoa rakenteessa olevista kuormituksista. Gyroskooppeja käytetään vastaavasti esimerkiksi kiihdytysanturien kanssa, kun halutaan tietää kiihdytysuureen lisäksi värähtelyn suuntautumisesta. (Hanly 2016, s. 12-13.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Värähtelymittauksen avulla voidaan helposti havaita ja kerätä tietoa eri koneen osiin tai rakenteisiin vaikuttavasta haitallisesta värähtelystä. Tämän vuoksi on suunniteltu erilaisia värähtelyn mittaamiseen soveltuvia antureita, joiden ominaisuudet määräävät, mihin sovelluskohteisiin niitä voidaan käyttää. Anturien ominaisuuksien lisäksi anturin valintaan vaikuttaa usein myös, minkälaisessa testausympäristössä anturia aiotaan käyttää. Anturin asennustapoihin ja johdottamiseen on myös syytä kiinnittää huomiota, jotta saadaan kerättyä luotettavia mittaustuloksia ja voidaan mitata halutulta taajuusalueelta. Värähtelymitta-anturit ovat yleisesti ottaen joko kiihdytysantureita tai siirtymäantureita, joista kiihdytysanturi on kaikista yleisin testauskäytössä oleva anturi. Joitakin nopeusantureita käytetään myös mutta perinteisimmät nopeusanturit on korvattu kiihdytysantureilla niiden laajemman mittausalueen, keveyden ja pienen koon vuoksi.

Siirtymäanturin tyypillisimmät variaatiot ovat pyörrevirta-anturi ja kapasitiivinen siirtymäanturi. Koska kummatkin anturit mittaavat siirtymää suoraan, ne soveltuvat tosi hyvin esimerkiksi laakereiden ja akseleiden mekaanisten välyksien ja niihin kohdistuvien kuormitusten mittaamiseen sekä yleiseen kunnonvalvontaan. Kummatkin anturit ovat myös kosketuksettomia, minkä vuoksi ne eivät ole kulumiselle yhtä herkkiä kuin esimerkiksi kiihdytysanturit, jotka pitää kiinnittää mitattavaan kohteeseen. Koska kapasitiivinen siirtymäanturi on tarkempi kuin pyörrevirta-anturi, se soveltuu todella hyvin sellaisiin mittauksiin, joissa halutaan saada värähtelystä erittäin tarkkaa tietoa. Toisaalta kapasitiivinen siirtymäanturi on erittäin herkkä eri ympäristötekijöille, minkä vuoksi sitä voidaan käyttää vain puhtaassa toimintaympäristössä. Epäpuhtaammassa toimintaympäristössä olisi suositellumpaa käyttää pyörrevirta-anturia. Pyörrevirta-anturin käyttöä on myös hyvä harkita, kun halutaan kerätä tietoa esimerkiksi koneenosien välyksistä laajemmalla mittausalueella.

Pyörrevirta-anturin ja kapasitiivisen siirtymäanturin sijasta voidaan käyttää optista sensoria, kun halutaan suorittaa mittauksia nopeasti. Optinen sensori on muiden siirtymäanturien tavoin myös kosketukseton, minkä vuoksi sen kuluminen on vähäistä. Sen toimintakäyttö voi olla myös edullisempaa pitemmällä aikavälillä tarkasteltuna kuin muiden

siirtymäanturien käyttäminen, mikä on positiivista yrityksen talouden kannalta. Toisaalta optinen sensori ja siihen liittyvä laitteisto vaativat paljon tilaa, minkä vuoksi tämän tyylistä mittaustapaa ei voida suositella yrityksille, joiden tilan määrä on vähäinen. Optisen sensorin käyttämistä ei voida suositella myöskään koneistettujen (erityisesti leikkaustyöstöllä valmistettujen) osien mittaamiseen, koska sensorilla on vaikeaa erottaa koneistetussa osassa olevat työstöjäljet ja osan oma pinta toisistaan. On todennäköistä kuitenkin, että koneistetun osan pintakäsittelyllä voitaisiin parantaa optisen sensorin erotuskykyä.

Koska sekä nopeusanturit ja kiihtyvyyssanturit mittaavat korkeampia taajuuksia, niitä voidaan käyttää värähtelymittauksessa esimerkiksi koneen runkojen, hammaspyörien ja turbiinien kunnonvalvonnassa. Tämän tyyppisissä sovelluskohteissa korkeamman taajuiset värähtelyt ovat usein yleisiä. Nopeusantureiden perinteisimmistä tyypeistä on vähitellen luovuttu mutta Laser-Doppler anturia sovelletaan värähtelyn nopeuden mittaamisessa. Laser-Doppler anturilla on korkein taajuusvaste muihin värähtelymitta-antureiden taajuusvasteisiin verrattuna ja sillä on myös erittäin laaja mitta-alue, minkä vuoksi se soveltuu hyvin eri teollisuuden alojen tuotteiden tutkimiseen ja kehittämiseen. Esimerkiksi autoteollisuudessa ja ilmailuteollisuudessa voidaan käyttää Laser-Doppler anturia tuotekehityksen (*R&D*) osaston puolella. Laser-Doppler anturi on myös erittäin tarkka ja kestää eri ympäristötekijöitä, minkä vuoksi sitä voidaan käyttää tarkkoihin mittauksiin ja vaikeimmissakin toimintaympäristöissä. Laser-Doppler anturi ei kuitenkaan sovellu tutkimuslaitosten ja laboratorioiden lisäksi muiden osastojen käyttöön sen suuren markkinahinnan vuoksi. Tämän vuoksi on yleisempää käyttää testauskäytössä ja yleisessä kunnonvalvonnassa kiihdytysantureita korkeiden taajuuksien mittaamiseen.

Kiihdytysantureista yleisin on pietsosähköinen kiihdytysanturi. Sen yleisyys todennäköisesti johtuu siitä, että se on kevyt, pieni kokoinen ja suhteellisen edullinen. Tämän lisäksi pietsosähköisellä kiihdytysanturilla on laaja mitta-alue ja se ei ole myöskään herkkä ympäristötekijöille, mikä parantaa anturin käytön houkuttelevuutta. Toisaalta kyseinen anturi on kuitenkin herkkä kohinalle, minkä vuoksi esimerkiksi anturin johdottamiseen on syytä kiinnittää enemmän huomiota verrattuna muihin värähtelyn mittauksessa käytettäviin antureihin. Pietsosähköisen kiihdytysanturin täytyy myös kiinnittää mitattavaan kohteeseen mittausta varten, mikä saattaa aiheuttaa anturin kulumista riippuen mitta-alueesta. Esimerkiksi matalien taajuuksien kiihdytyksiä mitattaessa anturi saattaa olla alttiina

iskumaisille kuormituksille. Matalimpia taajuuksia yleensä mitataan potentiometrisellä ja pietso-resistiivisellä kiihdytysantureilla. Kummankin anturin paras ominaisuus on soveltuvuus mitata matalimpia taajuuksia, joista sovelluskohteita ovat esimerkiksi seismiset värähtelyt. Kummallakin anturilla on kuitenkin yleisessä käytössä huonompia ominaisuuksia verrattuna pietsosähköiseen kiihdytysanturiin, minkä vuoksi niitä ei usein käytetä muuhun tarkoitukseen kuin matalimpien taajuuksien mittaamiseen.

5.1 Työn jatkoselvitys

Tässä työssä on nyt käyty läpi eri värähtelymitta-antureita ja niiden ominaisuuksia. Tämän lisäksi on selvitetty värähtelyn periaatteita ja värähtelyn mittaustulosten suunnitteluun huomioon ottavia tekijöitä. Samalle aiheelle on tarpeellista tehdä jatkoselvitys värähtelymittaustulosten analysoinnista, koska tästä työstä se on rajattu pois. Jatkoselvityksessä voitaisiin selvittää, mihin mittaustulosten analysointi perustuu, minkälaisia analysointilaitteistoja ja ohjelmistoja on olemassa, ja onko sopivan anturin ja analysointilaitteiston valinnalla mahdollisesti jonkinlainen riippuvuus olemassa.

LÄHTEET

Aalto-yliopisto. 2012. Analogisen säädön verkkokurssi. Siirtofunktio. [Viitattu 22.8.2018].
 Saatavissa: <http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/mallit/oppitunti3/siirtofunktio.html>

ABB:n TTT-käsikirja 2000-7. Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. ABB Oy, 2000. s. 17.
 [Viitattu 22.8.2018]. Saatavissa: PDF-tiedostona:
http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/230_0007.pdf

Bruel & Kjaer. Measuring Vibration. Tarkistettu 1982. s. 42. Saatavissa PDF-tiedostona:
<https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>

Button, Vera. 2015. Principles of Measurement and Transduction of Biomedical Variables.
 1. painos. Academic Press. s. 380.

Chaurasiya, Himanshu. 2012. Recent Trends of Measurement and Development of Vibration
 Sensors. [Viitattu 24.8.2018]. Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/230996793_Recent_Trends_of_Measurement_and_Development_of_Vibration_Sensors

Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors. 2009. [Lion Precisionin www-sivuilla].
 [Viitattu 24.8.2018]. Saatavissa: <http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/article-0011-cve.html>

Crawford, Arthur. 1992. The Simplified Handbook of Vibration Analysis Volume 1:
 Introduction to Vibration Analysis Fundamentals. Knoxville, TN. Computational Systems,
 Inc. s. 175.

Eddy Current displacement, distance and position sensors. 2018. [Micro-Epsilon www-
 sivuilla]. [Viitattu 24.8.2018]. Saatavissa: <https://www.micro-epsilon.co.uk/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/>

Elghraoui, Afif – Hung Lo, Yuan. 2010. Laser Doppler Velocimetry. Opetusmoniste. Kalifornian yliopisto, San Diego. s. 7. [Viitattu 25.8.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: https://neurophysics.ucsd.edu/courses/physics_173_273/Phys_173_LDV_2010.pdf

Hanly, Steve. 2016. Shock & Vibration Testing Overview eBook [sähköinen kirja]. s. 70. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/318827258_Shock_Vibration_Testing_Overview_eBook

Hoikkanen, Juhani. 2007. Liukulaakerien kunnonvalvonta: värähtelyn mittausanturit. Opetusmoniste. SKF Reliability Systems.

Huang, Shu-Tong. 2008. Study of the Groove Effect of the Sensor for High-Speed Maglev Train. Opinnäytetyö. Southwest Jia tong University. s. 12.

Introduction to Piezoelectric Accelometers. 2018. [PCB Piezotronicsin www-sivuilla]. [Viitattu 26.8.2018]. Saatavissa: [http://www.pcbpiezotronics.ca/TestMeasurement\(en-CA\)/Accelerometers\(en-CA\)/tech_accel\(en-CA\)](http://www.pcbpiezotronics.ca/TestMeasurement(en-CA)/Accelerometers(en-CA)/tech_accel(en-CA))

Jain, Preeti. 2018. Accelometers. [Viitattu 26.8.2018]. Saatavissa: <https://www.engineersgarage.com/articles/accelerometer>

Kawade, Nitin – Rawat, Aseem Singh. 2016. Development of Laser Vibrometer. BARC Newsletter. s. 15-18. [Viitattu 25.8.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2016/2016070805.pdf>

Kawano, Hiroyuki – Kurokawa, Toshiaki – Nakahara, Hironori – Takushima, Shigeru. 2018. On-machine multi-directional laser displacement sensor using scanning exposure method for high-precision measurement of metal works. Precision Engineering, 51. s. 437-444. [Viitattu 24.8.2018]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635917305603>

Keinänen, Toimi – Kärkkäinen, Pentti – Lähetkangas, Markku – Sumujärvi, Matti. 2007. Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat. 1. painos. Helsinki. WSOY Oppimateriaalit Oy. s. 292.

Kiger, Ken. 2010. Introduction to Laser Doppler Velocimetry. Opetusmoniste. Marylandin yliopisto. s. 30. [Viitattu 25.8.2018] Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www2.cscamm.umd.edu/programs/trb10/presentations/LDV.pdf>

Lahti, Tapio – Nevala, Kalervo, Vähänikkilä, Aki – Järviluoma, Markku. 2002. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa. Espoo. VTT. s. 286. [Viitattu 22.8.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>

Lawrence, Erik. 2018. Use of Laser Doppler Vibrometry for Ultrasonics. Polytec Inc. s. 46. [Viitattu 25.8.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.ultrasonics.org/aws/UIA/asset_manager/get_file/127102?ver=0

Lehto, Heikki - Havukainen, Raimo – Maalampi, Jukka – Leskinen, Janna. 2009. FYSIKKA 3. Aallot. 1. painos. Helsinki. Tammi. s.159.

Lehto, Heikki – Havukainen, Raimo - Maalampi, Jukka – Leskinen, Janna. 2010. FYSIKKA 5. Pyöriminen ja gravitaatio. 1. painos. Helsinki. Tammi. s.168.

Liljaniemi, Antti. 2008. Anturit automaatiassa. Opetusmoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Mikkonen, Henry – Miettinen, Juha – Leinonen, Pertti – Jantunen, Erkki – Kokko, Voitto – Riutta, Erkki – Sulo, Petri – Komonen, Kari – Lumme, Veli Erkki – Kautto, Juha – Heinonen, Kari – Lakka, Sami, Mäkeläinen, Risto. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. painos. Helsinki. KP-Media Oy. s.606.

Nohynek, Petri – Lumme, Veli Erkki. 2004. Kunnanvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki. KP-Media Oy. s.146.

Overview of Capacitive Displacement Sensors for Displacement Measurement. 2016. [Lion Precisionin www-sivuilla]. [Viitattu 24.8.2018]. Saatavissa: <http://www.lionprecision.com/capacitive-sensors/index.html>

Peltonen, Hannu – Perkkiö, Juha – Vierinen, Kari. 2007. Insinöörin (AMK) FYSIKKA OSA II. 7. painos. Lahti. Lahden Teho-opetus Oy. 2001. s. 478.

PSK 5701. 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. 8. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry. s. 15.

PSK 5702. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry. s. 4.

PSK 5703. 2006. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 4. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry. s. 10.

PSK 5713. 2013. Kunnonvalvonta, värähtelymittaus. Mittausjärjestelmän kalibrointi. 2. painos. PSK Standardisointiyhdistys ry. s. 7.

Sensors for vibration measurement: Principles of operation and measuring ranges. 2016. [Viitattu 25.8.2018]. Saatavissa: http://zfp.cbm.bgu.tum.de/mediawiki/index.php/Sensors_for_vibration_measurement:_Principles_of_operation_and_measuring_ranges

Värähtelymittaus. 2018. [Kiwa Inspectan www-sivuilla]. [Viitattu 23.8.2018]. Saatavissa: <https://www.inspecta.fi/Palvelut/Materiaalitekniikka-ja-kaynnissapitopalvelut/Varahtelymittaus/>

Värähtelymittauksessa käytettävät anturit

Anturi	Hyvät puolet	Huonot puolet	Milloin kannattaa käyttää	Milloin ei kannata käyttää
Pyörrevirta-anturi Taajuusalue: 1 Hz – 100 kHz Mittausalue: 0.05 – 80 mm	- Laajempi mittausalue kuin kapasitiivisella anturilla - Ei ole herkkä ympäristötekijöille - Kosketukseton	- Kalibroinnin vaikeus - Tarvitsee erillisen esivahvistimen/teholähteen - Mitattavan kohteen pitää olla ferromagneettinen	- Kun halutaan tietää siirtymäsuure suoraan - Pyörivät koneet - Liukulaakerit	- Kun halutaan asentaa anturi nopeasti ja vaivattomasti
Kapasitiivinen siirtymäanturi Taajuusalue: 10 – 15 kHz Mittausalue: 0,25 - 2 mm	- Suurempi tarkkuus kuin pyörrevirta-anturilla - Mahdollisuus mitata pieniä kohteita - Kosketukseton	- Herkkä ympäristötekijöille - Mittaa ainoastaan sähköä johtavaa materiaalia - Rajallinen mittausalue - Teholähteen tarve	- Kun halutaan tietää siirtymäsuure suoraan - Pyörivät koneet - Liukulaakerit	- Kun halutaan asentaa anturi nopeasti ja vaivattomasti
Optinen sensori Taajuusalue: 0,1 – 1000 Hz Mittausalue: 2 µm – 10 mm	- Nopea mittaus Toiminta-kustannukset alhaiset pitemmällä aikavälillä tarkasteltuna - Kosketukseton	- Laitteiston suuri koko -Koneistettujen metallipintojen havaitseminen hankalaa	- Kun halutaan tietää siirtymäsuure suoraan	- Tilan puute laitteistoa varten - Koneistettujen osien mittaus
Magneettinen nopeusanturi Taajuusalue: 1 Hz – 2 kHz	- Ei tarvitse erillistä teholähdettä - Kestää iskuja	- Kookas - Herkkä eri häiriöille - Kapea mittausalue	- Kun halutaan tietää nopeussuure suoraan - Keskisuurten taajuuksien mittaamiseen	- Ei ole enää yleinen, minkä vuoksi suositellaan kiihdytysanturin käyttämistä ja integroimista

Jatkuu seuraavalla sivulla

Anturi	Hyvät puolet	Huonot puolet	Milloin kannattaa käyttää	Milloin ei kannata käyttää
<p>Laser-Doppler anturi Taajuusalue: 0 – 1,2 GHz Mittausalue: 0,02 pm/s – 30 m/s</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tarkka - Ympäristön-kestävä - Kosketukseton 	<ul style="list-style-type: none"> - Kallis - Seinien lähellä toteutettava mittaus saattaa olla hankalaa 	<ul style="list-style-type: none"> - Kun halutaan tietää nopeussuure suoraan - Tutkimuslaitokset/laboratoriot 	<ul style="list-style-type: none"> - Kun alhainen budjetti on rajoittavana tekijänä
<p>Pietsosähköinen kiihdytysanturi Taajuusalue: 2 Hz - 20 kHz Mittausalue: 0,03 – 1000 g</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Yleinen - Laaja mittausalue - Keveys - Pieni koko - Ei ole herkkä ympäristötekijöille - Edullinen 	<ul style="list-style-type: none"> - Vaurioitumiselle herkkä rakenne - Kohinaherkkyys - Korkea asettumisaika 	<ul style="list-style-type: none"> - Useisiin eri kohteisiin, muut suureet voidaan määrittää integroimalla 	<ul style="list-style-type: none"> - Ei sovellu matalimpien taajuuksien mittaamiseen, jossa on alttiina iskumaiselle kuormitukselle
<p>Potentiometrinen kiihdytysanturi Taajuusalue: 15 – 30 Hz Mittausalue: 0 – 50 g</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Voidaan mitata matalimpia taajuuksia 	<ul style="list-style-type: none"> - Ei voida mitata suurempia kiihtyvyyksiä - Huono tarkkuus 	<ul style="list-style-type: none"> - Seismisten värähtelykohteiden mittaamiseen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ei sovellu kuin matalimpien (alle 30 Hz) taajuuksien mittaamiseen
<p>Pietso-resistiivinen anturi Taajuusalue: 7000 Hz Mittausalue: 0 – 200 g</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Voidaan mitata matalimpia taajuuksia 	<ul style="list-style-type: none"> - Herkkyys lämpötilavaihteluille - Vaatii erillisen tehonlähteen 	<ul style="list-style-type: none"> - Seismisten värähtelykohteiden mittaamiseen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kohteet, joissa lämpötilavaihtelut ovat yleisiä - Rajoitukset koskien tehon saantia