

VIILUSORVIN  
KUNNONVALVONTA-  
ANTUROINNIN  
SUUNNITTELU

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Suunnittelupainotteinen  
mekatroniikka  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Timo Nirikko

Lahden ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka

NIRKKO, TIMO:

Viilursorvin kunnonvalvonta-  
anturoinnin suunnittelu

Suunnittelupainotteisen mekatroniikan opinnäytetyö, 58 sivua, 6 liitesivua

Kevät 2015

TIIVISTELMÄ

---

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana oli Raute Oyj. Opinnäytetyön aiheena on viilursorvin kunnonvalvonta-anturointi. Työn tarkoituksena oli luoda alustava suunnitelma viilursorvin kunnonvalvonta-anturoinnista. Kunnonvalvonnan kohteena ovat etenkin sorvin kriittisimmät laakerit, joiden valvonnansuunnittelussa keskitytään värähtelymittauksiin.

Työhön etsittiin lähdemateriaalia kirjoista, standardeista, internetistä ja Rautelta. Käytännön näkökulmaa värähtelymittauksiin saatiin suorittamalla viilursorville testiluontoinen värähtelymittaus. Lopputulokseksi saatiin perusteorian sisältävä suunnitelma, jonka sisältöön on hyödynnetty käytännön kokemuksia viilursorvin värähtelymittauksista. Suunnitelmaa apuna käyttäen Raute voi alkaa toteuttamaan värähtelyanturointia käytännöntasolla.

Asiasanat: kunnonvalvonta, viilursorvi, värähtelymittaus, värähtely

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering

NIRKKO, TIMO:

Plan to assemble a monitoring sensor  
to a veneer lathe

Bachelor's Thesis in planning oriented Mechatronics, 58 pages, 6 pages of  
appendices

Spring 2015

ABSTRACT

---

The objective of this study was to create a preliminary plan to assemble a monitoring sensor to a veneer lathe. The work was commissioned by Raute Ltd. Raute services wood products industry worldwide. Plywood and LVL industry are the largest customer sectors.

Source material was found from literature, standards and from the internet. Practical data for the study were collected from veneer lathe's vibration measurements. Monitoring the condition was focused on the bearings of the lathe. Vibration measurements provided useful information about the operation of vibration measurements in a veneer lathe.

The study includes basic theory of vibration measurements and a plan on how vibration measurements could be done. With this study Raute can begin to implement a practical part of the condition monitoring sensor assembly for veneer lathe.

Key words: condition monitoring, veneer lathe, vibration measurement, vibration

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	YRITYSESITTELY	2
3	VIILUSORVIN TOIMINTAKUVAUS	4
4	KUNNOSSAPIDON KUNNONVALVONTA	6
4.1	Kunnonvalvonta	7
4.2	Yleisimmät kunnonvalvontamenetelmät	9
4.2.1	Aistinvaraiset havainnot	9
4.2.2	Lämpötilan mittaukset	10
4.2.3	Ultraäänimittaukset	11
4.2.4	Voiteluaineanalyysit	12
4.2.5	Virta-analyysit	13
4.2.6	Venymäliuskamittaukset	13
5	VÄRÄHTELYMITTAUKSET	14
5.1	Koneiden värähtely	14
5.2	Värähtelymittausten suureet ja käsitteet	15
5.2.1	Resonanssi	17
5.2.2	Värähtelysuureen valinta	18
5.3	Värähtelymittausten suunnittelu	18
5.3.1	Valvontamenetelmät	19
5.3.2	Raja-arvot	20
5.3.3	Mittausaikaväli	21
5.3.4	Mittausjärjestelmät	22
5.3.5	Käytännön mittausjärjestelyt	23
5.3.6	Mittausten dokumentointi ja seuranta	24
5.4	Mittauspisteen valinta ja merkintä	24
5.5	Yleisimmät anturityypit	26
5.5.1	Siirtymäanturit	27
5.5.2	Kiihtyvyyssanturit	27
5.5.3	Nopeusanturit	28
5.5.4	Iskusysäysanturit	29
5.5.5	Laseranturit	29
5.6	Värähteluanturin kiinnitystavat	30

5.6.1	Ruuvikiinnitykset	30
5.6.2	Magneetikiinnitykset	32
5.6.3	Muut kiinnitystavat	32
5.7	Kaapelointi	33
5.8	Yleisimmät värähtelymittausten valvontamenetelmät	34
5.8.1	Kokonaistasovalvonta	34
5.8.2	Spektrivalvonta	35
5.8.3	Verhokäyrävalvonta	35
5.8.4	Tunnuslukuvalvonta	36
5.8.5	Aikatasovalvonta	37
5.8.6	Vektorivalvonta	37
5.8.7	Kepstrivalvonta	37
5.9	Laakerien vikataajuudet	38
6	VÄRÄHTELYANTUROINNIN TOTEUTTAMINEN	40
6.1	Valvottavat komponentit	40
6.2	Valvontamenetelmät ja raja-arvot	41
6.3	Mittausjärjestelmä ja mittausaikaväli	44
6.4	Mittauspisteet	45
6.5	Anturit, asennus ja kaapelointi	53
6.6	Mittausajon määrittely	54
7	YHTEENVETO	57
	LÄHTEET	59
	LIITTEET	61

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella kunnonvalvonta-anturointi viilursorvin kriittisimmille laakereille. Opinnäytetyö tehtiin Raute Oyj:lle. Tärkeimpiä tavoitteita työssä on löytää kiinteään mittaukseen soveltuvat mittauspisteet viilursorvista sekä niihin soveltuvat anturityypit. Mittauspisteiden määrittelyjen pohjalta voidaan toteuttaa tarvittavat muutokset mekaniikkapiirustuksiin anturien kiinnityksien osalta. Mittauspisteiden määrittelyillä mahdollistetaan anturien tehdasasennus vakioituihin mittauspisteisiin. Lisäksi tutkittiin mittauksista saatavaa dataa ja sen käyttöä viilursorvin kunnonvalvonnassa. Laakerien kunnonvalvonnassa keskitytään erityisesti värähtelymittauksiin, koska värähtelyjä mittaamalla voidaan huomata alkavat viat jo aikaisessa vaiheessa.

Suunnitelmaa tehtäessä oli tutkittava lähemmin viilursorvin toimintaa, jotta voitiin löytää kaikkein kriittisimmät laakeroinnit. Raute on tehnyt laitteilleen värähtelymittauksia käsimittalaittein, joten viilursorvin värähtelymittauksista oli jo jonkin verran kokemusta sekä dataa. Tämä olikin tärkeää, koska kokeneiden asentajien tieto käytännönmittauksista oli hyödyllistä mittauspisteitä määritettäessä.

Raute oli jo aiemmin kehittänyt viilursorville hydrauliiikan kunnonvalvontajärjestelmän. Raute halusi kuitenkin kehittää entisestään viilursorvia, joka on tärkeä, ellei tärkein Rauten yksittäinen tuote. Laakerien kunnonvalvonnan lisääminen olisikin luonteva kehitysaskel viilursorville. Nykypäivänä koneiden kunnonvalvontaa halutaan jatkuvasti parantaa. Tähän on hyvät perusteet, sillä kalliit seisokit ovat näin paremmin ennakoitavissa. Raute haluaisikin tarjota asiakkailleen lisäarvoa juuri tälle osa-alueelle.

Viilursorville tehtiin värähtelymittaus, jolla saatiin arvokasta tietoa käytännön mittauksista värähtelymittausasiantuntijoiden avulla. Lähdemateriaalia etsittiin kunnonvalvontaa ja värähtelymittauksia käsittelevistä kirjoista, standardeista sekä internetistä. Rauten huoltoraportteja, käytännön kokemuksia ja tietotaitoa hyödynnettiin myös.

## 2 YRITYSESITTELY

Raute Oyj:n internetsivuilla on tiivistetysti kuvattu Rauten liiketoimintaa:

*Raute on puutuotetoimialaa maailmanlaajuisesti palveleva teknologia- ja palveluyritys, jonka tärkeimmät asiakasteollisuudet ovat vaneri- ja LVL-teollisuus (Raute Oyj 2014).*

Rauten asiakkaita ovat viilu-, vaneri-, lastulevy-, MDF- ja LVL- eli viilupalkki-tuotteita valmistavat puutuotetoimialan yritykset. Raute on 15–20 prosentin markkinaosuudella markkinajohtaja vaneriteollisuudessa. Lisäksi noin puolet maailman LVL-tuotteista tehdään Rauten valmistamilla laitteilla. Rauten tuotetarjonta sisältää kaikki tehdaslaajuiseen tuotantoprosessiin tarvittavat koneet. Kokonaisten tuotantolaitosprojektien lisäksi Rauten palveluihin kuuluvat teknologiapalvelut, jotka pitävät sisällään kunnossapidon, varaosapalvelut, modernisoinnit, koulutukset ja konsultoinnin. (Raute 2007; Raute 2014.)

Maailmanlaajuisen puutuoteteollisuuden tuotantoinvestointien arvioidaan olevan vuodessa noin 500–550 miljoona euroa. Maailman koko puutuoteteollisuuden markkinoiden koko on 150 miljardia euroa. Rauten liikevaihto vuonna 2014 oli noin 94 miljoonaa euroa ja tulos 2,6 miljoonaa euroa (Raute 2015). Rautella on työntekijöitä noin 500 yhdeksässä eri maassa. Rauten päätuotantoyksikkö ja konserninhallinto sijaitsevat Päijät-Hämeessä, Nastolassa. Lisäksi Kajaanissa on pienempi tuotantoyksikkö. Rautella on myös tuotantoyksiköt Kanadan Vancouverissa ja Kiinan Shanghaissa. Vuodesta 1994 lähtien Rauten A-osaketta on noteerattu NASDAQ OMX Helsinki Oy:ssä. (Raute 2014.)

### **Rauten historiaa**

Vuonna 1908 perustettu Raute aloitti toimintansa Lahden Rauta- ja metalliteollisuus Oy:n nimellä. Kolmen vuoden kuluttua nimi lyheni Lahden Rautateollisuus Oy:ksi. Yrityksen tuotteet olivat toiminnan alkuvaiheessa punnitusvaakoja, joiden valmistus aloitettiin vuonna 1914. Vuoden 1931 aikana aloitettiin tänäkin päivänä ydinosaamista olevien vanerikoneiden valmistaminen. Sodan aikana yritys valmisti tykinammuksia armeijalle.

Vuosien 1944–1952 välisenä aikana Lahden Rautateollisuus osallistui sotakorvauksien toimituksiin silloiselle Neuvostoliitolle. (Raute 2007.) Sotakorvaustoimitusten ohessa luodut kauppasuhteet pitivät viennin vahvana myös tulevana vuosina (Lahden kaupunginmuseo 2007).

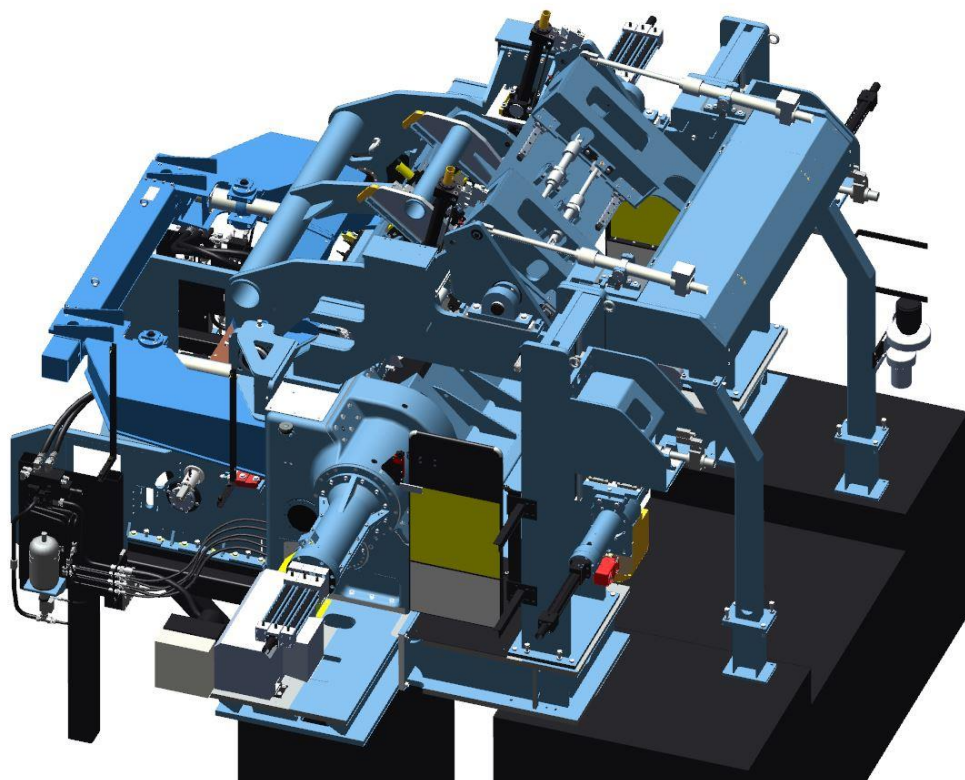
Sodan aikana 1943 vaakojen valmistusosastosta perustettiin oma Lahden Vaaka Oy. Vuonna 1945 perustettu huonekalutehdas Sopenkorpi Oy ja vuonna 1954 perustettu huonekalujen markkinointi yritys Sopekaluste Oy sulautuivat aiemmin perustetun Lahden Vaaka Oy:n kanssa Lahden Rautateollisuuteen vuonna 1960. Kolmen vuoden kuluttua Vesijärvenkatu 23:seen avattiin uusi Rautateollisuuden konttori-rakennus. (Raute 2007.) Tilojen käydessä ahtaiksi, vuonna 1968 Nastolasta hankittiin 10 hehtaarin teollisuustontti, jonne rakennettiin aluksi tuotantolaitos (Lahden kaupunginmuseo 2007). Yhtiön nimi vaihtui Raute Oy:ksi vuonna 1983. Vuonna 1991 tuotanto siirrettiin kokonaisuudessaan Lahden Vesijärvenkadulta Nastolan-tehtaalle. Raute yhtiöitti toimialansa vuonna 1992 kolmeen lohkoon: Raute Wood Processing Machinery Oy:ksi, Raute Precision Oy:ksi ja Sope Interior Oy:ksi. (Raute 2007.) Raute Precision myytiin helmikuussa 2004 pääomasijoitusyhtiö Eqvitec Partners Oy:n rahastoille ja Raute Precision Oy:n johdon omistamalle yhtiölle (Lahden kaupunginmuseo 2007). Vuoden 2007 aikana Raute Machinery Co., Ltd ja Raute Trading Co., Ltd tytäryhtiöt perustettiin Shanghaihin Kiinaan (Raute 2007).

### 3 VIILUSORVIN TOIMINTAKUVAUS

Tässä luvussa tarkastellaan viilusorvin toimintaperiaatetta yleisellä tasolla. Viilusorvilla pöllistä tehdään viilumattoa, minkä jälkeen viilun käsittelyä jatketaan muilla laitteilla. Viilusorvin jälkeisiin toimintoihin ei keskitytä tässä yhteydessä tarkemmin.

Ennen sorvausta pöllejä täytyy hautoa kuumassa vedessä tai höyryssä, jotta pöllien lämpötila nousee, jolloin pystytään valmistamaan korkealaatuista viilua. Haudonta myös lisää puun kosteuspitoisuutta, joka taas parantaa viilun elastisuutta. (Koponen 1995, 30.) Haudutuksen jälkeen pöllit voidaan kuoria ja katkaista tarvittaessa. Tämän jälkeen pöllit siirretään kuljettimella pöllikiramoon. Kiramosta pöllit siirretään välivarastokuljettimelle, josta ne syötetään porrasannostelijalle. Porrasannostelija toimii nimensä mukaisesti portaittain ja sen tehtävänä on erotella pöllit toisistaan. Porrasannostelija syöttää pöllin kerrallaan sen yläpäässä olevaan lineaariannostelijaan, jossa pöllin halkaisija mitataan kahdella laser-anturilla. (Vesterinen 2014.)

Tämän jälkeen pöllit siirretään lineaariannostelijalla XY-keskittäjän mittakarojen hakuasemaan. Mittakarat kiinnittyvät pöllin päihin ja mittaustiedon perusteella mahdollisimman lähelle pöllin keskipistettä. Kun pöllit on mittakarojen välissä, aloitetaan pöllin pyöritys. Pöllit pyöritetään yksi täysi kierros, jonka aikana pöllin säde mitataan pituussuunnassa laser-kameroilla. Pöllin skannauksen jälkeen siirtovarret hakevat pöllin XY-keskittäjän karoista ja siirtävät sen sorvin karojen väliin. Ensimmäisessä vaiheessa pöllit pyöristetään ja kuoret sekä muu viiluksi kelpaamaton materiaali poistetaan jätekuljettimelle. Varsinaisen viilunsorvauksen alkaessa pöllin päälle lasketaan tukilaite, joka voi olla vetävä tai vapaasti pyörivä. Tukilaitteen ylä- ja alatelan tehtävänä on antaa pöllille pyöritysmomenttia ja tukea sitä, jotta pöllit pysyisi paremmin sorvauskeskiössä. Tukilaitteessa ovat myös nokat, jotka auttavat purilaan tiputuksessa sorvin karoista. (Vesterinen 2014.)



KUVA 1. Viilusorvi (Raute 2015)

Kuvassa 1 pöllin kulkusuunta on oikealta vasemmalle. Keskellä nähdään ovi, josta päästään sorvin hoitotasolle.

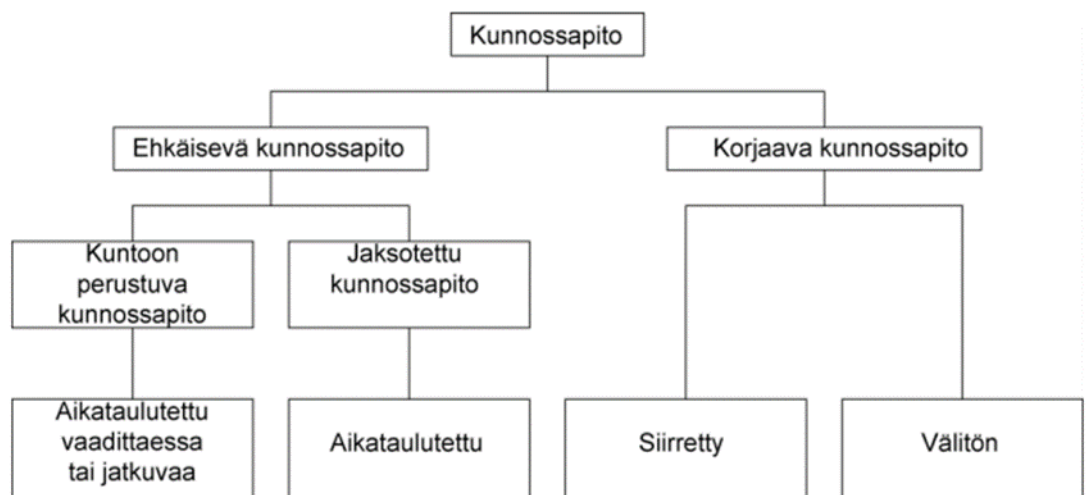
Sorvauksen aikana teräpenkkiä liikutetaan kohti karakeskiötä, jolloin teräpenkissä oleva leikkaava terä painuu pölliin leikaten siitä viilumattoa. Pöllin halkaisijan pienentyessä sorvin uloimmat karat vedetään sisään, jolloin pienemmät karat jatkavat pöllin pyörittämistä. Sorvi voidaan varustella myös kolmoiskaroilla. Terää ja koko teräpenkkiä voidaan säätää ja liikuttaa hyvin monipuolisesti, ja se onkin tärkeää, jotta saadaan optimoitua viilun laatu ja prosessin tehokkuus. Viilun laatuun ratkaisevasti vaikuttava komponentti on vastaterä. Vastaterä sijaitsee leikkaavan terän yläpuolella. Vastaterän tehtävänä on puristaa puuta leikkaavan terän väliin. Vastateriä on kahden mallisia: kiinteitä ja pyöriä. Pöyristyksen jälkeen viilu katkaistaan katkaisulaitteella ja ohjataan yhtenäisenä viilumattona leikkurille. Sorvilta viilu siirtyy jatkokäsittelyyn, jossa se kuivataan, lajitellaan, pinkataan, liimataan ja viimeistellään. (Vesterinen 2014.)

#### 4 KUNNOSSAPIDON KUNNONVALVONTA

Tässä luvussa käsitellään yleisesti kunnossapitoa ja koneiden kunnonvalvontaa sekä kunnonvalvonnan käyttöönoton syitä. Lisäksi tarkastellaan kunnonvalvonnan yleisimpiä menetelmiä.

Moubray (1997, 6) määrittelee kunnossapidon seuraavasti: ”Kunnossapito varmistaa, että laitteet jatkavat sen tekemistä, mitä niiden käyttäjät haluavat niiden tekevän.”

Standardi SFS-EN 13306 esittää kunnossapidon kokonaisnäkömän kaaviomuodossa (KUVIO 1):



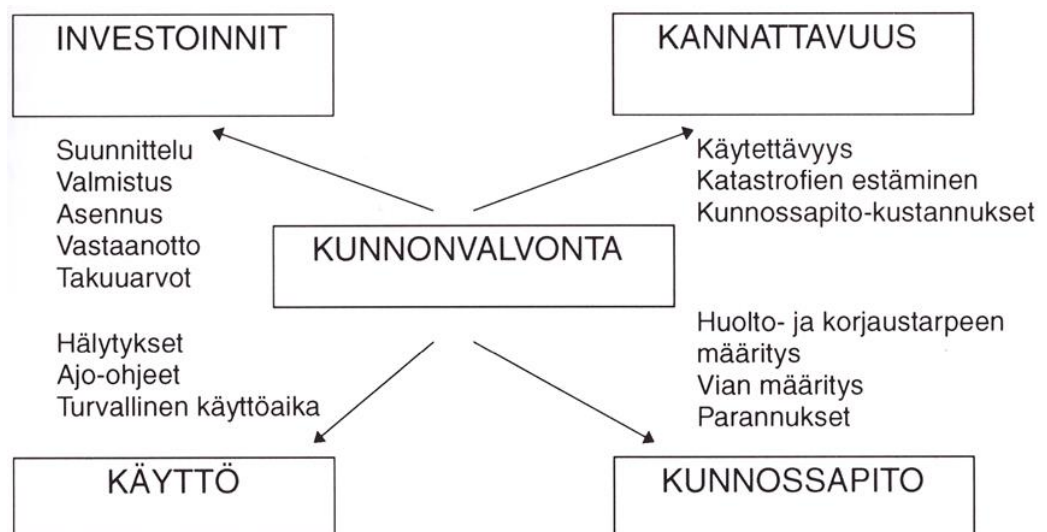
KUVIO 1. Kunnossapidon kokonaisnäkömä (SFS-EN 13306 2010)

Standardi jaottelee kunnossapidon ehkäisevään kunnossapitoon ja korjaavaan kunnossapitoon. Ehkäisevä kunnossapito tehdään ennalta määritetyin ajanjaksoin tai suunniteltujen kunnossapitokriteerien täytyessä, joita valvotaan järjestelmällisesti. Korjaavaa kunnossapitoa käytetään vasta vian havaitsemisen jälkeen. Tavoitteena saattaa kone käyttökuntoon välittömästi tai ohjeistuksen mukaan myöhemmin. (SFS-EN 13306 2010.)

Ehkäisevän kunnossapidon alalaji, kuntoon perustuva kunnossapito, pyrkii tutkimaan koneen tilaa testaamalla, tarkastamalla ja kunnonvalvonnan perusteella. Kunnossapitotoimintaa suunnitellaan tutkimuksen tulosten pohjalta. Jaksotettu kunnossapito pohjautuu aikajaksoihin tai koneen käyttömäärään tai -aikaan. (SFS-EN 13306 2010.) Kuviosta 1 nähdään kunnonvalvonnan sijoittuminen kunnossapidon sisälle. Ennen kunnonvalvontaan ryhtymistä on tarkasteltava kunnossapidon resurssit ja mielekkäisyys, minkä jälkeen voidaan valita käytettävä kunnossapidon periaate.

#### 4.1 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnalla pyritään siihen, että koneiden kunnossapitotoimenpiteitä tehdään vain tarvittaessa. Kun kunnonvalvonnalla saadaan informaatiota koneen vioista ja niiden kehittymisestä, voidaan huoltoseisokki ajoittaa parhaaseen mahdolliseen ajankohtaan. (Nohynek & Lumme 2007, 11–12.) Nohynek ja Lumme (2007, 11–12) kuvaavat kunnonvalvonnasta saatavia hyötyjä: ”Kunnonvalvonnalla saavutettavia hyötyjä ovat tuottavuuden kasvu, kunnossapidon suunnitelmallisuus, seisokkiaikojen parempi hyödyntäminen, suunnittelemattomien seisokkien väheneminen ja koneen pidentynyt elinikä.”



KUVIO 2. Kunnonvalvonnan liityntöjä (Nohynek & Lumme 2007, 11)

Kuviossa 2 Nohynek ja Lumme listaavat kunnonvalvontaan liittyviä toimintoja investointien, kannattavuuden, käytön ja kunnossapidon näkökulmista. Kuvioista nähdään kunnonvalvonnan tärkeys koko tuotannon kannalta. Kunnonvalvonnan kannattavuutta on kuitenkin tarkasteltava suhteellisen kriittisesti, koska ylimääräisiä kunnonvalvontatoimenpiteitä ei ole hyödyllistä eikä kannattavaa tehdä.

Teollisuudessa mittaavaa kunnonvalvontaa on käytetty erilaisin menetelmin jo 1960-luvulta lähtien. 1980-luvulla panostusta kunnonvalvontaan lisättiin, ja nykypäivänä se on jo arkipäivää lähes jokaisessa tuotantolaitoksessa. Ennen kunnonvalvontaa tehtiin pääasiassa pelkästään aistihavainnoin, kuten tunnustelemalla tärinää ja laakerien lämpöä. Nämä vanhat kunnonvalvontamenetelmät toimivat vielä tänäkin päivänä, mutta niiden rinnalle on kehitetty lukuisia tehokkaita valvontamenetelmiä. (Nohynek & Lumme 2007, 13.)

Mittaavan kunnonvalvonnan käyttöönoton tärkeimpiä syitä Nohynekin ja Lumpeen (2007, 13) mukaan:

- Tuotantomäärät ovat kasvaneet paljon, jolloin tuotannon kallis seisokkiaika on pidettävä mahdollisimman lyhyenä.
- Tuotantolinjassa ei yleensä varakonetta, jolloin yksittäinen kone on kriittisempi koko prosessin kannalta.
- Vikojen kehittyminen on nopeutunut pyörimisnopeuksien kasvun takia.
- Prosesseissa enemmän kierroslukusäätöisyyttä, jolloin tärinän seuranta vaihtelee eri kierrosnopeuksilla.
- Aistinvaraisilla kunnonvalvontamenetelmillä ei voida seurata koneen kuntoa tarkasti, koska niistä ei voida muodostaa tunnuslukuja.

Rakenteiden keventymisen takia tärinävalvonta on tärkeää myös rakenteiden kestämissä kannalta.

## 4.2 Yleisimmät kunnonvalvontamenetelmät

Koneiden kunnonvalvontaan on olemassa useita menetelmiä, joista seuraavissa luvuissa käsitellään lähinnä laakerien kunnonvalvontaan yleisimmin käytetyt menetelmät. Osa käsitellyistä kunnonvalvontamenetelmistä soveltuu muihinkin valvontakohteisiin. Värähtelymittauksia käsitellään erikseen kokonaan omassa luvussaan, koska opinnäytetyön aihe perustuu erityisesti värähtelymittauksiin. On tärkeää käsitellä myös muita menetelmiä, koska laakerien viat sekä vauriot voivat aiheuttaa muutoksia järjestelmän toimintaan, joita on kyettävä tunnistamaan eri menetelmin. Erilaisia kunnonvalvontamenetelmiä onkin mahdollisuuksien mukaan hyödyllistä käyttää täydentävinä menetelminä laakerien kunnonvalvonnassa.

### 4.2.1 Aistinvaraiset havainnot

Koneiden kunnonvalvonnassa voidaan hyödyntää ihmisen aisteja. On kuitenkin huomioitava tekijät, jotka voivat vaikuttaa aisteihin ja tätä kautta myös kunnonvalvonnan laatuun. Ihmiset ovat erilaisia, joten myös aistitkin eroavat eri henkilöiden välillä. Lisäksi henkilön ikä, vireystila, sairaudet ja ympäristön häiriöt voivat vaikeuttaa aistinvaraisten havaintojen tekemistä. (Mikkonen 2009, 421.)

Näköhavainnoilla voidaan huomata laitteiden nestevuodot, jotka ilmenevät kosteutena, tiputuksena tai isompana vuotona. Löystyneet liitokset huomataan pahimmassa tapauksessa vasta irtoavina osina. Ennen irtoamista oireina voidaan havaita esimerkiksi irronnutta ruostetta tai maalia liitoskohdassa. Yleinen näköhavainnointikohde on öljy. Öljyn määrää, laatua ja virtausta voidaan tarkkailla hyvin yksinkertaisinkin tavoin. Stroboskooppia käytetään pyörivien osien tarkkailuun. Stroboskooppi on laite, jossa vilkkuva valo säädetään samalle pyörimistaajuudelle tarkkailtavan kohteen kanssa. Kun pyörivästä kohteesta nähdään pysäytyskuva, ollaan samalla taajuudella. Samalla saadaan selville myös kohteen pyörimistaajuus. (Mikkonen 2009, 422–423.)

Kuulohavaintoja tehdessä kunnonvalvojalta vaaditaan paljon kokemusta, jotta uutta havaintoa voidaan verrata aiempaan. Kuulolla tehtäviä havaintoja vaikeuttavat lisäksi ympäristön muut äänet. Laitteiden äänien tarkasteluun on kuitenkin apuvälineitä. Yksinkertaisimpana voidaan pitää kuuntelukeppiä. Keppi asetetaan kuunneltavaan kohtaan ja toisesta päästä kuunnellaan korvalla. Kehittyneempiä laitteita ovat stetoskooppi ja akustinen koetin. Stetoskoopissa on koetinkärki, josta ääni johdetaan letkuja pitkin korviin. Periaate on kuitenkin sama kuin kuuntelukepissä. Akustinen koetin on elektroninen versio stetoskoopista. (Mikkonen 2009, 424.)

Tuntoaistilla voidaan tarkkailla kohteen lämpötilaa, värähtelyä ja kaasuvuotoja. Erityisesti lämpötilan valvontaan tuntoaisti on sopiva menetelmä. Esimerkiksi laakeripesän tuntuessa polttavalta on sen lämpötila noin +50 °C. Tätä lämpötilaa voidaan pitää rajana, jonka ylittyessä on tehtävä lisätutkimuksia kohteen kunnosta. Sen sijaan värähtelyiden tarkkailu tuntoaistilla rajautuu lähinnä alle 200 Hz:n taajuuksiin. Harvoin tuntoaistilla kuitenkaan voidaan toteuttaa värähtelyiden tarkkailua kovinkaan luotettavasti. Kaasuvuotoja havainnoitaessa on tiedettävä vuotavan kaasun koostumus, koska se voi olla terveydelle haitallista. Hyvä tapa on tutkia mahdollisia vuotokohtia kostutetulla kämmenselällä, joka aistii herkästi kaasun virtauksen. Myös hajuaistilla voidaan haistaa esimerkiksi kaasu- ja öljyvuotoja tai palamisesta aiheutuvaa hajua. (Mikkonen 2009, 425–426.)

#### 4.2.2 Lämpötilan mittaukset

Lämpötilamittauksia on käytetty ennen paljon enemmän kuin nykyään. Suosiota on kuitenkin heikentänyt niiden heikko kyky havaita vika aikaisessa vaiheessa. Tosin vieläkin lämpötilamittaukset ovat käyttökelpoisia menetelmiä kunnonvalvonnan täydentävinä mittauksina. (Nohynek & Lumme 2007, 20.)

Lämpötilan mittauksia voidaan suorittaa mittauskohdetta koskettavalla anturilla, koskemattomalla menetelmällä ja lämpökameralla. Koskettaviin

menetelmiin kuuluvat perinteiset lämpömittarit, bi-metallilämpömittarit, metallivastusanturit, termoparit, termistorit ja lämpötilaindikaattorit. Teollisuuden käytetyimpiä koskettavia lämpötilanmittausantureita ovat termopari- ja metallivastusanturit. Termopari koostuu kahdesta eri metallista valmistetusta langasta, jotka ovat galvaanisesti yhdistetty toisiinsa. Kun termoelementtian turin mittapää (kuumapää) viedään eri lämpötilaan kuin vertailupää (kylmäpää), muodostuu virtapiiriin lämpötilaeroon verrannollinen jännite. Metallivastusanturin toiminta perustuu lämpötilan mukaan muuttuvaan resistanssiin. (Mikkonen 2009, 439–441.)

Koskemattomia lämpötilanmittausmenetelmiä ovat kiinteät ja skannaavat infrapunälämpötilamittarit. Yleisesti käytetty infrapunälämpötilamittari on kannettava malli, jolla voidaan mitata manuaalisesti kohteen pintalämpötilaa halutuista pisteistä. Skannaavia mittareita voidaan käyttää leveämmän alueen mittaukseen, kuten telan pintalämpötilan mittaukseen. (Mikkonen 2009, 440, 444.)

Lämpökameralla mitataan kohteen pinnasta lähtevää lämpösäteilyä eli infrapunasäteilyä. Mitattu lämpösäteily muunnetaan ilmaisimatriisissa lämpötilatiedoksi, josta muodostetaan lämpökuvaa. Lämpökamera mahdollistaa mittauksen laajalta alueelta samanaikaisesti. Lämpökameroita on jäähdytetyillä ja jäähdyttämättömällä ilmaisimatriisilla eli ilmaisinkennoilla varustettuina. Jäähdyttämätön versio on yleisimmin käytetty malli, koska se soveltuu hyvin jatkuvaan valvontaan. Jäähdytetty ilmaisinkenno jäähdytetään noin  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  heliumkiertopumpun avulla. Tämä mahdollistaa hyvin nopeiden lämpötilamuutosten valvonnan. (Mikkonen 2009, 440, 444–445.)

#### 4.2.3 Ultraäänimittaukset

Ultraäänimittauksilla mitataan muutoksia äänitasossa, joita voivat aiheuttaa vuodot, kuluminen ja rakenteen väsyminen. Ultraäänimittauksista käytetään 20 kHz:n – 100 kHz:n taajuusalueella. Korkeataajuiset ääniaallot ovat hyvin lyhyitä, ja ne liikkuvat suhteellisen suoraviivaisesti.

Siksi onkin usein mahdollista eristää taustääänet pois ja löytää äänen alkulähde. Oireen havaitsemisen ajankohta vaurioon nähden riippuu hyvin paljon vauriotyypistä. Ultraäänilaitteistolla on mahdollista suodattaa pois ympäristön taustamelu ja muut taajuudet, joita ei haluta mitata. Mittauslaite myös kääntää mitatun ultraäänin ihmisen kuuloalueelle sopivaksi, jolloin mittaja voi havaita muutoksen heti. Mittaustuloksia voidaan tarkastella myös visuaalisesti mittarista tai tietokoneelta. Ultraäänimittauksen etuja ovat nopea ja suhteellisen helppo mittaustapahtuma. (Moubray 1997, 360–361.)

#### 4.2.4 Voiteluaineanalyysit

Voiteluaineanalyysillä saadaan tietoa koneen osien kulumisesta, prosessin toiminnasta, voiteluaineen kunnosta ja voitelun tehokkuudesta. Voiteluaineanalyysit ovat tärkeitä kunnonvalvonnan menetelmiä, koska esimerkiksi hydraulijärjestelmien ja vaihteiden vikoja pystytään havaitsemaan jo aikaisessa vaiheessa. Analyysit tehdään voiteluöljyille ja voitelurasvoille. Analyysit voidaan jakaa ryhmiin: perus-, hiukkas- ja kulumametallianalyysihin. Voiteluaineen kunnonvalvonnan eli perusanalyysin yleisimmät analyysikohteet voiteluaineesta ovat ulkonäkö, viskositeetti, happoluku (TAN) ja kiintoaine (paino-%). Näiden lisäksi voidaan tarvittaessa suorittaa lisäanalyysit, kuten vesipitoisuus-, vaahtoamis- ja hapettumisanalyysit. (Mikkonen 2009, 428–430.)

Hiukkasanalyysillä tutkitaan voiteluainejärjestelmästä otetun öljynäytteen puhtausluokkaa joko manuaalisesti mikroskoopin avulla tai automaattisella hiukkaslaskimella. Myös voitelurasvoja voidaan tutkia hiukkasanalyysin avulla, mutta tämä edellyttää sopivan liuottimen löytymistä rasvalle. Näytteistä otettujen valokuvien avulla voidaan arvioida epäpuhtauksien määrää voiteluaineessa. Kulumishiukkasten muodosta voidaan päätellä kulumisenaiheuttaja koneessa ja korjata se ennen vaurion syntymistä. (Mikkonen 2009, 432–435.)

Kulumametallianalyysissä on hyvin keskeistä tietää koneen rakenteissa käytetyt metallit, jolloin kulumishiukkasten avulla voidaan paikantaa

kulumisen aiheuttaja prosessissa. Kulumisen seurantaan käytetään usein trendiä, josta voidaan huomata hiukasmäärien ja hiukkasten kokojen muutokset. Laajoissa kiertovoitelujärjestelmissä voidaan joutua suorittamaan näytteidenotto toimilaittekohtaisesti vian paikantamiseksi. Kulumametallianalyseillä voidaan saada vian kehittymisestä tietoa aikaisemmin kuin värähtelymittausten kokonaistasovalvonnalla. (Mikkonen 2009, 435–436.)

#### 4.2.5 Virta-analyysit

Epätahtimoottoreille suoritettavassa virran spektrianalyysissä mitataan sähkömoottorille tulevasta vaihejohtimesta mittaussignaali virtapihtien avulla. Menetelmällä voidaan havaita mekaanisia ja sähköisiä vikoja. Esimerkiksi seuraavia vikoja voidaan havaita sähkömoottorista virta-analyysin avulla: roottorisauvojen vauriot, oikosulkurenkaiden vauriot, akselin taipuma, komponenttien epäkeskisyydet, juotosvauriot häkkikämeissä, huonot liitokset, roottorien valuvirheet ja liukurengas-koneiden roottorien käämitysongelmat. (Nohynek & Lumme 2007, 21–22.)

#### 4.2.6 Venymäliuskamittaukset

Venymäliuskamittauksilla valvotaan tai määritetään rakenteiden paikallisia jännityksiä. Venymäliuska kiinnitetään rakenteen pintaan yleensä liimalla. Käytännössä venymäliuskoilla mitataan Wheatstonen sillan avulla epätasapainojännitettä. Rasituksesta aiheutuva kappaleen venyminen venyttää myös liuskaa, jonka resistanssi muuttuu samalla. Venymäliuskan muuttunut resistanssi aiheuttaa Wheatstonen siltaan epätasapainojännitteen, joka johdetaan vahvistimelle ja edelleen mittalaitteistolle. Hooken lain  $\sigma = E\varepsilon$  avulla voidaan laskea jännitys mittauspisteessä. Mittaussillan kalibrointi vallitseviin olosuhteisiin on huomioitava, koska liuska mittaa kaikki mittauspisteen venymät. Myös lämpötilan muutokset on otettava huomioon ja tarvittaessa suoritettava kompensointitoimenpiteitä mittausliuskoille. Liuskoja on saatavilla metallilangasta, metallifoliosta tai puolijohteista valmistettuina. (Mikkonen 2009, 467–468, 470.)

## 5 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

Tässä luvussa keskitytään värähtelymittauksiin ja niihin liittyviin toimintoihin. Luvussa käydään läpi koneissa esiintyvän värähtelyn perusteita, suureita, värähtelymittausten suunnittelua ja toteutusta, värähtelyantureita sekä värähtelymittauksia.

Nohynek ja Lumpeen (2007, 40) mukaan värähtelymittausten tarkoitus on tuottaa luotettavaa tietoa koneen tilasta, jotta voidaan ennakoida ja korjata mahdollisia vikoja, ennen kuin ne muodostuvat vaurioiksi. Koneessa esiintyvän värähtelyn haitallisia seurauksia voivat olla muun muassa seuraavat:

- lopputuotteen laadun heikentyminen
- prosessin energiahäviöt
- jännitysten lisääntyminen rakenteissa
- liitoksien löystyminen
- koneen käyttöiän lyhentyminen
- lisähäiriöt ympäristölle.

### 5.1 Koneiden värähtely

Koneissa esiintyvä värähtely voidaan määritellä yksinkertaisesti koneen tai sen osan edestakaiseksi liikkeeksi. Värähtelyä voi esiintyä usealla eri tavalla. Värähtely voi olla matala- tai korkeataajuista, tai värähtelevä komponentti voi liikkua paljon tai vähän. Näiden lisäksi kohteessa saattaa ilmetä lämpöä ja ääntä värähtelyn seurauksena. Yleensä värähtelyt ovat epätoivottuja ilmiöitä koneenrakennuksessa ja ne halutaan minimoida. Tosin värähtelyä hyödyntäviä laitteitakin on olemassa, kuten tärinämaljat ja seulat. (GE Energy Ltd. 2014, 2.)

Koneiden värähtely aiheutuu herätteistä, jotka ovat erilaisia dynaamisia voimia. Herätteitä kutsutaan myös pakkovoimiksi. Tyypillisiä herätteitä

aiheuttavia vikoja ovat epätasapaino, linjausvirheet, kuluminen, asennusvirheet, energian syötön ongelmat ja liitosten väljyys. Herätteitä esiintyy myös normaalisti toimivissa koneissa, eli kaikki pyörivät rakenteet värähtelevät pyöriessään. (Mikkonen 2009, 224–225; GE Energy Ltd. 2014, 3–6.)

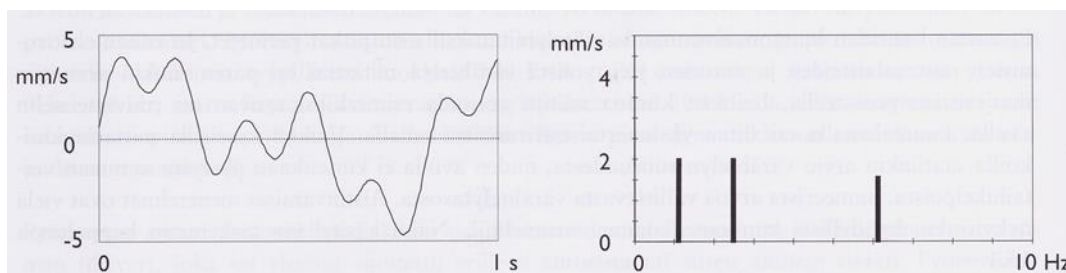
## 5.2 Värähtelymittausten suuret ja käsitteet

Koneiden värähtelymittauksissa käytettyjä mittaussuureita ovat siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys. Mittaussuureita derivoimalla ja integroimalla voidaan muuntaa mitattu suure toiseksi. (Nohynek & Lumme 2007, 45; Mikkonen 2009, 227.) Taulukkoon 1 on listattu värähtelymittauksissa yleisesti käytetyt suuret. Värähtelysignaalia analysoitaessa on kiinnitettävä huomiota käytettyihin suureisiin ja yksiköihin, jotta ylimääräisiltä sekaannuksilta ja virhetulkinnoilta vältyttäisiin.

TAULUKKO 1. Mekaanisissa värähtelymittauksissa yleisesti käytettävät suuret ja mittayksiköt (Mikkonen 2009, 230; PSK 5701 2011 yhdistetty lähteistä)

SUURE	LYHENNE	MITTAYKSIKKÖ
Siirtymä	s	μm
Nopeus	v	mm/s
Kiihtyvyys	a	m/s <sup>2</sup> , g = 9,81 m/s <sup>2</sup>
Taajuus	f	Hz
Vaihekulma	φ	° (aste)
Pyörimisnopeus	n	1/min, rpm, 1/s
Jakso	T	ms

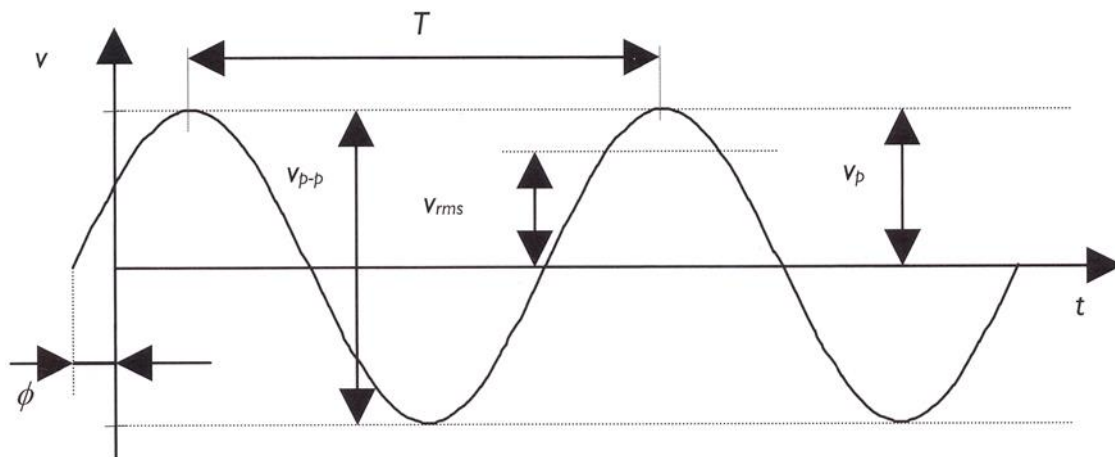
Kuviossa 3 on esitetty värähtelyn yhden sekunnin mittainen aikatasosignaali ja siitä muodostettu spektri. Kuvioista huomataan spektrin helpottavan värähtelyn analysointia merkittävästi. Spektrissä pystyakselina on värähtelyn amplitudin voimakkuus yksikössä millimetriä sekunnissa ja vaaka-akselina ovat värähtelykomponenttien taajuudet. (Mikkonen 2009, 232–233.) Aikatasosignaali ja spektrianalyysi ovat värähtelymittauksen perustoimintoja, joita täytyy osata hyödyntää värähtelyjä analysoitaessa.



KUVIO 3. Vasemmalla on kolmea taajuutta sisältävä aikatasosignaali ja oikealla siitä muodostettu taajuustaso (Mikkonen 2009, 233)

Kuviossa 4 esitetään mittaussignaalin perusparametrit nopeuden suhteen, mutta samoja parametreja käytetään myös kiihtyvyydelle ja siirtymälle. Huippuarvolla tarkoitetaan aikatasosignaalissa mittausaikana hetkellisesti esiintyneen korkeimman amplitudin arvoa. Huippuarvon kasvusta voidaan havaita, joitakin vikojen oireita jo aikaisessa vaiheessa. Huipusta-huippuun arvo kertoo suurimman ja pienimmän mittausarvon erotuksen. Mittaustapaa käytetään usein siirtymän mittaukseen, jolloin saadaan värähtelyn liikeradan ääriarvot selvitettyksi. Huipusta-huippuun arvo on yleensä noin kaksi kertaa huippuarvo. Siniaaltomaisen värähtelyn tehollisarvo saadaan huippuarvo jaettuna  $\sqrt{2}$ . Tehollisarvolla kuvataan värähtelyn sisältämää energia määrää, jolloin siitä ei voida nähdä yksittäisiä iskumaisia piikkejä värähtelyssä. (Nohynek & Lumme 2007, 52; Mikkonen 2009, 231.) Tehollisarvosta käytetään myös nimitystä RMS-arvo, eli Root Mean Square, ja värähtelymittaus (Mikkonen 2009, 209–210).

Vaihekulma kertoo värähtelyn vaiheen, johon se on edennyt määritetystä vertailukohdasta (Nohynek & Lumme 2007, 52; Mikkonen 2009, 231).



$T$  on värähdysaika eli jakso  
 $v_{p-p}$  on nopeuden huipusta-huippuun arvo  
 $v_p$  on nopeuden huippuarvo  
 $v_{rms}$  on nopeuden tehollisarvo  
 $\phi$  on vaihekulma

KUVIO 4. Värähtelymittaussignaalin perusparametrit (Mikkonen 2009)

### 5.2.1 Resonanssi

Jokaisella rakenteella on omia ominaistajuuksia, joiden taajuuksilla ne pyrkivät värähtelemään herätteiden vaikutuksesta. Jos rakenteen ominaistajuus ja herätteen taajuus osuvat samalle taajuudelle, muodostuu usein voimakasta värähtelyä. Värähtelyn voimakkuus voi vahvistua jopa 50-kertaiseksi. (Mikkonen 2009, 224–226.) Tämä johtuu siitä, että ainoa värähtelyamplitudia rajoittava tekijä on rakenteen vaimennus (Mikkonen 2009, 302). Tämän takia resonanssitaajuuden ja pyörimistaajuuden tulee yleensä erota ainakin 20 % toisistaan (PSK 5708 2003). Jos herätteen taajuus osuu rakenteen pyörimistaajuudelle, kutsutaan sitä kriittiseksi nopeudeksi, jota tulee välttää (Mikkonen 2009, 226).

Rakenteen vaimennus vaikuttaa merkittävästi resonanssin käyttäytymiseen. Resonanssivärähtelyn huippu muodostuu korkeaksi ja kapeaksi rakenteen sisäisen vaimennuksen ollessa pieni. Vaimennuksen ollessa suuri resonanssin huippuarvo pienenee, mutta samalla levittäytyy laajemmalle taajuuskaistalle. Suuri osa värähtelyongelmista aiheutuu ominaisvärähtelyistä. Ominaisaajuuksien laskeminen ja huomioiminen on kuitenkin hyvin hankalaa monimutkaisissa rakenteissa. (Mikkonen 2009, 225–226.)

### 5.2.2 Värähtelysuureen valinta

Värähtelysuure tulee valita valvonnan kohteena olevan värähtelyn mukaan. Käytetyin mittaussuure värähtelyjen mittauksissa on nopeus. Useimmat standardit ilmoittavat värähtelyjen raja-arvot nopeutena. Värähtelyn energiamäärä ja värähtelynopeus ovat lähes suoraan verrannollisia, mikä tekee nopeudesta hyvin käyttökelpoisen suureen. Lisäksi nopeudella on suhteellisen hyvä herkkyys laajalla taajuusalueella. (Nohynek & Lumme 2007, 50.)

Siirtymää käytetään yleensä hidaskäyntisten koneiden värähtelymittausten suurena. Alle 300 rpm käytettävää konetta voidaan pitää hidaskäyntisenä. Alle 100 Hz:n taajuuksilla esiintyviä vikoja voidaan myös valvoa siirtymän avulla. Vaikka kone olisi hidaskäyntinen, sen viat saattavat ilmetä korkeilla taajuuksilla, jolloin siirtymää ei voida käyttää mittaussuurena. (Nohynek & Lumme 2007, 50.)

Kiihtyvyydellä mitataan korkeita, 1000 Hz:n yläpuolelle yltäviä taajuuksia ja yli 9000 rpm käyviä koneita. Korkeita vikataajuuksia esiintyy esimerkiksi laakereissa ja vaihteistoissa. (Nohynek & Lumme 2007, 50.)

### 5.3 Värähtelymittausten suunnittelu

PSK 5705 (2006) käsittelee värähtelyvalvonnansuunnittelua laajemmin, jossa ensin määritetään valvottavat laitteet tehdastasolla ja niiden

valvonnan kannattavuus sekä tekninen toteutettavuus. Tässä luvussa käsittely on rajattu laitekohtaiseen värähtelymittausten suunnitteluun.

Mikkonen (2009, 162) linjaa kunnonvalvonnan suunnittelun lähtökohdat: ”Koneiden ja laitteiden vikaantuvat komponentit, todennäköiset vikaantumismekanismit määrittävät ne kunnonvalvontatekniikat ja menetelmät, joita kunnonvalvonnassa hyödynnetään. Todennäköiset vikaantumisnopeudet määrittävät miten ja millä aikataululla valvonta tulee toteuttaa.” PSK 5705:n (2006) mukaan laitekohtaisessa mittaussuunnitelmassa tulee huomioida

- valvontamenetelmät ja niiden raja-arvot
- mittausvälit
- mittausjärjestelmät
- mittausten käytännönjärjestelyt
- mittausten dokumentointi, raportointi ja seuranta.

### 5.3.1 Valvontamenetelmät

PSK 5705:ssä (2006) laitekohtainen mittaussuunnittelu aloitetaan vikaantuvien komponenttien määrittelyllä. Komponenteista määritetään myös niiden vikaantumismekanismit ja vikaantumisnopeudet.

Komponenttien tutkinnan jälkeen laitteelle määritellään kunnonvalvonnan taso, eli kuinka tarkkoja tunnuslukuja mittauksista halutaan saada. Yksinkertaisissa kohteissa pelkkä kokonaistason tarkkailu saattaa olla riittävä toimenpide. Toisaalta joissakin kohteissa viat voivat jäädä huomaamatta ilman tarkempien tunnuslukujen tai spektrin valvontaa. Jos värähtelymittauksilla ei kyetä kohteen riittävään valvontaan, voidaan valvontaa täydentää esimerkiksi luvun 4.2 mukaisilla menetelmillä. Luvun 4.2 mukaisia kunnonvalvonnanmenetelmiä voidaan käyttää myös diagnoosin varmistamiseen. (PSK 5705 2006.)

### 5.3.2 Raja-arvot

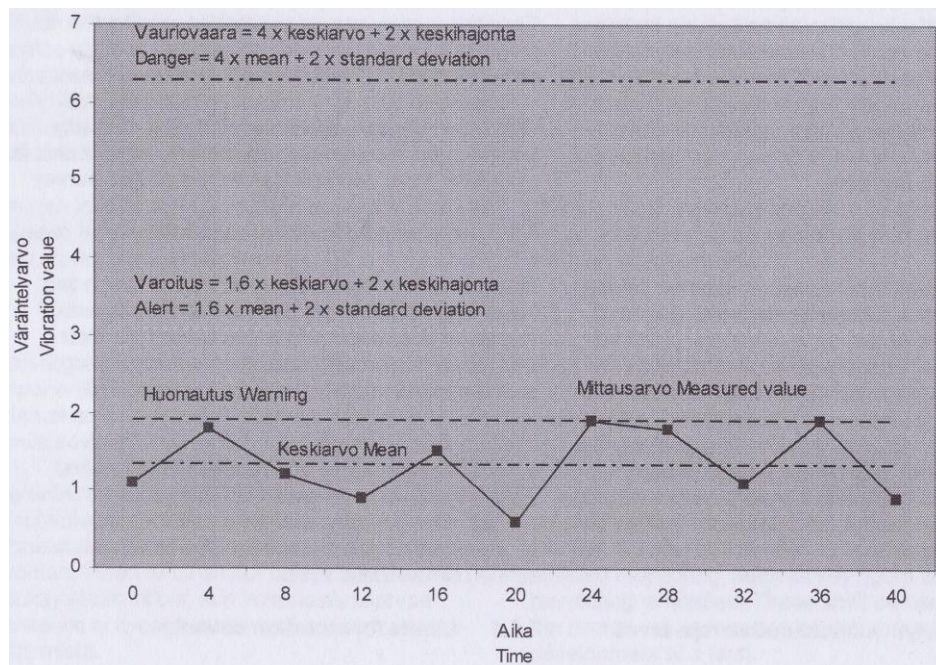
Raja-arvoja määritetään mittauksista saataville tunnusluvuille, jotta voidaan huomata värähtelyssä tapahtuvat muutokset. Numeerisia raja-arvoja voidaan määrittää värähtelystandardien, PSK 5704:n, valmistajan suositusten ja kunnonvalvonnan käytännökokemusten perusteella. (PSK 5705 2006). Kuviossa 5 on taulukoitu värähtelyarvoja, joita voidaan käyttää alustavina raja-arvoina, jos mittausten perusteella arvioitavia raja-arvoja ei ole vielä mahdollista tehdä.

Tärinärasitus Vibration severity $V_{rms}$ (mm/s)	Koneryhmät 2 ja 4 Machine groups 2 and 4		Koneryhmät 1 ja 3 Machine groups 1 and 3	
	Jäykkä Rigid	Joustava Flexible	Jäykkä Rigid	Joustava Flexible
11				11,0 D
10				
9		D	D	C
8				
7		7,1	7,1	7,1
6				
5	D 4,5	C 4,5	C 4,5	B
4				3,5
3	C 2,8	B 2,3	B 2,3	
2	B 1,4			
1	A	A	A	A

KUVIO 5. Tärinärasitus alueet eri koneryhmille (PSK 5704 2013)

Kun värähtelymittaustoiminnalla saadaan analysoitua mittaustuloksia määritellyille arvoille, voidaan alustavia raja-arvoja päivittää mittausten perusteella (KUVIO 6). Raja-arvoja tulisi olla ainakin kaksi: varoitus- ja vaurioraja. Näiden alapuolelle voidaan lisäksi määrittellä myös huomautusraja. Huomautusrajan ylittävä tunnusluku kertoo normaalista poikkeavasta tilanteesta, joka ei vielä välttämättä aiheuta välittömiä toimenpiteitä. Varoitusrajan ylittyessä mittausaikaväliä tihennetään ja

kunnonvalvontaa tehostetaan mahdollisuuksien mukaan. Lisäksi aletaan selvittämään varoituksen syytä ja valmistaudutaan mahdolliseen huoltotoimenpiteeseen. Vauriorajan ylittyminen merkitsee pahimmillaan välitöntä koneen pysäyttämistä ja korjaustoimenpiteisiin ryhtymistä. Kymmenen onnistuneen mittauksen jälkeen voidaan määritettyjä raja-arvoja tarvittaessa tarkentaa laitekohtaisesti. Jos mittauksen kohteena olevan koneen kuormitus on epäsäännöllisesti vaihtelevaa, kuten hakkujen tai murskaimien, on värähtelymittaus suoritettava koneen tyhjäkäynnillä. (PSK 5705 2006.)



KUVIO 6. Raja-arvojen määrittäminen mittauksen perusteella (PSK 5705 2006)

### 5.3.3 Mittausaikaväli

Mittausaikavälillä tarkoitetaan ajanjaksoa kunnonvalvontamittauksen välillä. Mittausaikavälin on oltava niin lyhyt, ettei havaittu alkava vika ehdi kehittyä vaurioksi mittauksien välillä. Uuden laitteiston valvontaa aloitettaessa on

mittauksien tiheys määriteltävä riittävän lyhyeksi. Tyypillisenä aikavälinä uudella mittauskohteella voidaan pitää 2:ta–4:ää viikkoa. Yleinen mittausaikaväli teollisuudessa on noin neljä viikkoa. Kiinteä mittausjärjestelmä on järkevä valinta, jos mittausvälin arvioidaan olevan aina alle viikko. Mittausaikavälin ylärajana voidaan pitää ennakoivassa kunnonvalvonnassa kahta kuukautta. Laitekohtaisen kokemuksen karttuessa voidaan mittausaikaväli määritellä uudelleen tarpeen mukaan. Mittausaikavälin pituuteen vaikuttavat valvottavan koneen häiriöherkkyys ja vikojen kehittymisnopeudet. (Nohynek & Lumme 2007, 29–30.)

Vikojen ilmettyä on mittausaikaväliä lyhennettävä, jotta vian kehittymistä voidaan seurata ja tarvittaessa estää lisävahinkojen syntyminen. Tihennettyjen mittausten lisäksi voidaan mahdollisuuksien mukaan käyttää täydentäviä kunnonvalvontamenetelmiä varsinaisten mittausten rinnalla. (Nohynek & Lumme 2007, 30.)

#### 5.3.4 Mittausjärjestelmät

Kunnonvalvonnan mittausjärjestelmät voidaan jakaa asennustavasta riippuen kolmeen ryhmään: kiinteään järjestelmään, puolikiinteään järjestelmään ja kannettaviin mittalaitteisiin. (PSK 5705 2006; Nohynek & Lumme 2007, 28–29.)

Kiinteällä järjestelmällä tarkoitetaan sitä, että anturit, kaapelit ja signaalinkäsittely-yksikkö on asennettu pysyvästi laitteen rakenteisiin. Kiinteän valvontajärjestelmän mittaus on yleensä kokoaikaista. Kiinteitä valvontajärjestelmiä asennetaan pääasiassa koneille, joiden toiminta on kriittistä koko tuotannon kannalta, vikojen kehittyminen on nopeaa tai kone on erityisen vikaherkkä. (PSK 5705 2006; Nohynek & Lumme 2007, 28–29.)

Puolikiinteää järjestelmää hyödynnetään usein koneissa, joiden mittauksia on hankalaa tai vaarallista suorittaa käsimittalaittein. Puolikiinteää järjestelmää voidaan myös käyttää parantamaan mittausten luotettavuutta käsimittauksiin verrattuna. Anturit, kaapelit ja liitäntäyksikkö on asennettu kiinteästi, kuten kiinteässä järjestelmässäkin. Erona on mittaustapahtuma,

joka suoritetaan kytkemällä kannettava mittalaite liitäntäyksiköön johdettuihin anturikaapeleihin. (PSK 5705 2006; Nohynek & Lumme 2007, 29.)

Kannettavilla mittalaitteilla voidaan suorittaa koneen säännöllistä kunnonvalvontaa hyvin kattavasti. Kannettavilla mittalaitteilla voidaan tarvittaessa täydentää kiinteiden järjestelmien mittauksia (PSK 5705 2006). Kannettavan mittalaitteen mittaustulokset voidaan siirtää tietokoneelle mittaustietokantaan, jossa mittaustietoa pystytään käsittelemään ja dokumentoimaan. Mittausarvojen kehitystä voidaan näin seurata mittauspistekohtaisesti. (Nohynek & Lumme 2007, 29.)

### 5.3.5 Käytännön mittausjärjestelyt

Tärkeimpiä PSK 5705:n (2006) määrittelemiä käytännön mittauksissa huomioitavia asioita ovat:

- mittaustoiminnan vastuiden määrittely
- toimivan mittauskäytännön määrittely
- koulutusta kaikilla organisaatiotasolla
- mittausten tulkinta ja raportointi
- historiatietojen tallentaminen ja hyödyntäminen.

Mittaukset tulee suorittaa laaditun mittaussuunnitelman mukaisesti. Mittauksen jälkeen tuloksia verrataan hälytysrajoihin ja aiempiin mittauksiin. Tarvittaessa referenssiä mittauksille, voidaan tuloksia verrata standardien tai vastaavien koneiden antamiin mittauksiin. (PSK 5705 2006.)

Hälytysrajan ylityksen tai muuten poikkeavan värähtelyn havaitsemisen jälkeen on ryhdyttävä diagnosoimaan vikaa ja sen aiheuttajaa. On kuitenkin suositeltavaa uusien mittauksien, jotta voidaan varmistua mittausten luotettavuudesta. Lisäksi voidaan suorittaa diagnoosia

täydentäviä mittauksia koneen eri paikoista ja verrata mitattuja tuloksia koneen aiempiin mittaustuloksiin. Vian vakavuutta ja kehittymistä arvioidaan ja suositellaan jatkotoimenpiteitä havaintojen perusteella. Suositeltuna jatkotoimenpiteenä voidaan esittää esimerkiksi koneen normaalin käytön jatkamista tihennetyllä mittausaikavälillä tai koneen käytön jatkamista kevennetyllä kuormituksella. Korjaustoimenpiteiden jälkeen tulee varmistua diagnoosista viallisten komponenttien avulla. Jos mittauksissa ei havaita mitään poikkeavaa, ei muita toimenpiteitä tarvita. (PSK 5705 2006.)

### 5.3.6 Mittausten dokumentointi ja seuranta

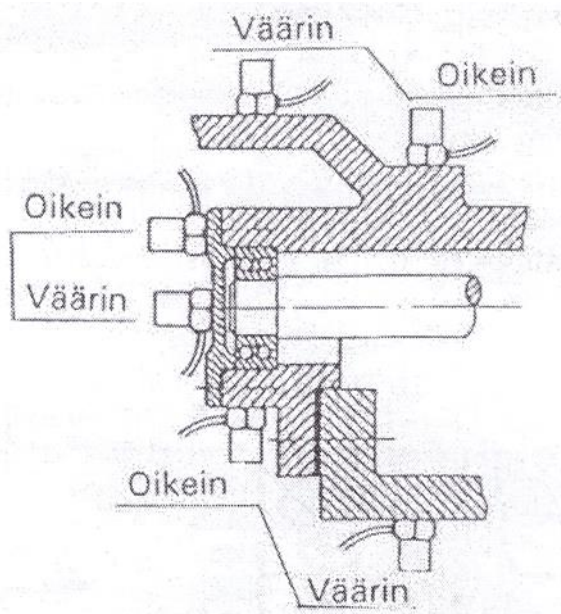
Värähtelymittaustulokset, jotka on mitattu koneen ollessa uusi tai uutta vastaava, tulee säilyttää koko koneen eliniän ajan. Muita mittaustuloksia tulisi säilyttää vähintään kolmen vuoden ajan. Koneen vikojen selvityksiin liittyvät mittaukset, havainnot, valokuvat, laskelmat, viat, diagnoosit ja raportit tulee säilyttää laitteen historiatiedoissa jatkokäyttöä varten. (PSK 5705 2006.)

PSK 5705 (2006) opastaa seuraamaan kunnonvalvonnasta saatavaa hyötyä, sekä kunnonvalvontasuunnitelman toteutumista käytännössä. Kunnonvalvonnan hyötyjä tarkasteltaessa tulee kiinnittää huomiota valvottavan koneen muutoksiin käytössä ja huollossa. Toimintaa tulee kehittää määrittämällä hälytysrajoja tarvittaessa uudelleen tai uudistamalla valvontamenetelmiä tarpeen tullen.

### 5.4 Mittauspisteen valinta ja merkintä

Mittausanturi on sijoitettava sellaiseen mittauspisteeseen, että se on mekaanisesti mahdollisimman lähellä värähtelylähdettä (KUVIO 7). Värähtelylähde on usein pyörivä tai muunlaisessa liikkeessä oleva massa, josta värähtely siirtyy laakerointien kautta eteenpäin muihin rakenteisiin, eli on tarkoituksenmukaista valita mittauspiste mahdollisimman läheltä laakeria. Värähtelyjä mitataan pääsääntöisesti akselin säteissuunnassa. Värähtelyanturi tulisi sijoittaa akselin säteissuunnassa mahdollisimman

lähelle kuormitusvyöhykettä, jonne suurin voima kohdistuu akselin pyöriessä (Hänninen 2015b). Joissakin tapauksissa on tarpeen suorittaa mittaus akselin suuntaisesti. Lisäksi tulee huolehtia, että anturin ja värähtelylähteen välillä on niin vähän rajapintoja kuin mahdollista. Rajapinnoissa korkeataajuisinen värähtely menettää osan energiastaan. (PSK 5702 2007.)



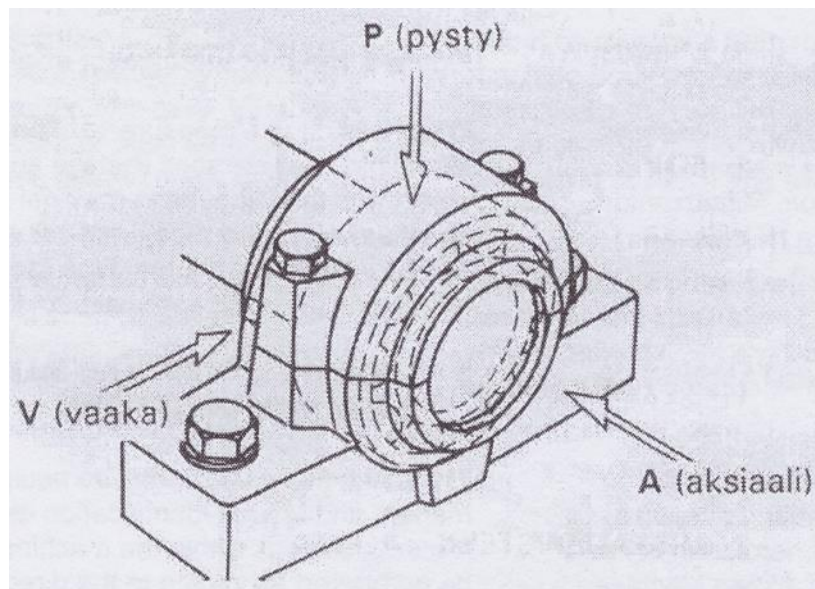
KUVIO 7. Anturin mittauspisteen valinta värähtelymittauksessa (PSK 5702 2007)

Mittauspisteen valinnassa joutuu tekemään usein kompromisseja, koska parhaaseen mittauspisteeseen ei ole aina mahdollista asentaa anturia. On tärkeitä huomioida anturin asennettavuus, huolto, kaapelointi ja olosuhteet. Koneen normaalikäyttö ei saa hankaloitua anturin sijainnin vuoksi. (PSK 5702 2007.)

TAULUKKO 2. Mittauspisteiden nimeäminen PSK 5702:n (2007) mukaan

Laitepaikan tunnus	Mittauspaikan juokseva numero	Mittaussuunta	Lisämerkinnät tarvittaessa
aa..aa	bb	c	dd

Koneen mittauspaikat numeroidaan ja nimetään voimansiirron suuntaisesti käyttävän laitteen vapaasta päästä alkaen, käytettävän laitteen vapaaseen päähän. Taulukko 2 kuvaa PSK 5702 –standardin (2007) mukaista mittauspisteiden nimeämistapaa. Mittauspiste merkitään selkeällä tavalla maalilla, nipalla tai muulla luotettavalla tavalla. Anturi sijoitetaan mittauspisteeseen ja sille määritellään mittaussuunta (KUVIO 8). Anturin mittaussuunnan ollessa muu kuin pysty- tai vaakasuunta voidaan suunnaksi merkitä S, eli säteissuuntainen mittaus. Mittauspaikka on koneikon osa, jossa voi olla useita eri mittauspisteitä. (PSK 5702 2007.)



KUVIO 8. Mittaussyunnan määrittäminen mittauspisteessä (PSK 5702 2007)

### 5.5 Yleisimmät anturityypit

Värähtelyjen mittauksiin nykyisin yleisimmin käytettävät anturityypit voidaan luokitella neljään pääryhmään: siirtymä-, kiihtyvyy-, nopeus- ja iskusyysäysantureihin (PSK 5703 2006; Mikkonen 2009, 234). Anturia valittaessa on tiedettävä mitattavan kohteen värähtelyn taajuusalue ja vikaantumistyyppit (PSK 5703 2006). Anturityyppien ominaisuuksissa ja

käyttökohteissa on paljonkin eroja, jotka tulee huomioida anturin valinnassa.

### 5.5.1 Siirtymäanturit

Siirtymäantureilla mitataan käytännössä muuttuvaa etäisyyttä anturin ja mittauskohteen väliltä. Anturi asennetaan noin kahden millimetrin etäisyydelle mittauskohteesta (Nohynek & Lumme 2007, 49). Mittaus kohdistuu yleensä akselin aksiaalisen ja radiaalisen aseman tai värähtelyn mittaamiseen. Yleisimmin käytetty siirtymäanturi on induktiota hyödyntävä pyörrevirta-anturi. Pyörrevirta-antureiden tärkeimpiä mittauskohteita ovat liukulaakeroidut sovellukset. Näissä tapauksissa käytetään yleensä kahta pyörrevirta-anturia 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden, jolloin saadaan mittaustulokseksi akselin liikerata laakerin sisällä. Pyörrevirta-anturin teoreettinen taajuusalue on tyypillisesti 0 Hz–10kHz välillä, mutta käytännössä se rajoittuu yläpäästä jo noin 200 Hz:iin. Tämä johtuu anturityypin heikosta dynamiikasta, joka on tyypillisesti luokkaa 100:1. Näin ollen pyörrevirta-anturit eivät sovellu korkeiden taajuuksien mittaamiseen. (Mikkonen 2009, 235.)

### 5.5.2 Kiihtyvyyssanturit

Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi on yleisimmin käytetty anturityyppi värähtelymittauksissa. Tähän ovat syynä anturityypin hyvät ominaisuudet, jotka ovat lähes jokaisella osa-alueella parempia kuin muilla anturityypeillä. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturilla on laaja dynamiikka-alue, joka laajentaa sen käyttökohteita oleellisesti. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi on myös pienikokoinen ja se on yksinkertainen asentaa. Lisäksi anturi kestää hyvin ympäristöolosuhteita ja siinä ei ole liikkuvia tai huollettavia osia, mikä lisää sen käyttövarmuutta. Kiihtyvyyssanturin rakenne on suhteellisen yksinkertainen. Anturiin kuuluvat seisminen massa, jonka välissä on pietsoelementti ja tietysti runko, jonka sisällä osat ovat suojassa. Kiihtyvyyssanturit voidaan jakaa vielä rakenteensa mukaan puristus- ja leikkaustyyppisiin. Puristustyyppin antureissa seisminen massa

ja pietsoelementti ovat aseteltu päällekkäin pinoon, joita puristetaan jousella yhteen. Leikkaustyyppin anturien osat on tavallisesti kiinnitetty puristusrenkaan tai liiman avulla rungon ympärille. (Mikkonen 2009, 237–238.)

Anturin toiminta perustuu Newtonin toiseen lakiin  $F=ma$ , jossa  $F$  on voima,  $m$  on massa ja  $a$  on kiihtyvyys. Anturi on kiinnitetty värähtelevään kohteeseen, jolloin liikkeestä aiheutuu pietsoelementtiin sähköinen varaus, joka on voimaan  $F$  verrannollinen. Näin ulostulevaksi signaaliksi saadaan kiihtyvyyttä kuvaava signaali. (Mikkonen 2009, 237–238.) Kiihtyvyyksianturin herkkyyttä kuvataan tyypillisesti mV/g suhteella. Esimerkiksi 100 mV/g herkkyyden omaavan anturin amplitudin mittausalue on noin  $\pm 50$  g:n huippu, jota ei saa ylittää. Amplitudialueen ylittyessä voidaan käyttää mekaanista suodatinta tai epäherkempää anturia. (PSK 5703 2006.) Kiihtyvyyksianturilla voidaan tyypillisesti mitata 2 Hz:n – 20 kHz:n taajuuksia. Tosin anturin kiinnitystapa vaikuttaa merkittävästi mittausalueen ala- ja ylärajataajuuksiin. Esimerkiksi käsin mitattaessa voi mittauksen ylärajataajuus rajoittua jo 600 Hz:iin. (Nohynek & Lumme 2007, 46.)

### 5.5.3 Nopeusanturit

Nykyaikana perinteisten nopeusanturien käyttö on jo hyvin vähäistä ja niiden käyttö onkin rajautunut suuriin mäntä- ja turbokoneisiin. Nopeusanturin toiminta perustuu seismisyyteen, ja se mittaa absoluuttista värähtelyä. Anturin rakenne koostuu kelan sisällä olevasta magneetista, joka on kiinnitetty kahden jousen ja vaimentimen väliin. Kun ulkoinen liikevoima vaikuttaa anturiin, voidaan liikkeestä indusoitunut jännite mitata. Näin ollen anturille ei tarvita ollenkaan ulkoista virransyöttöä.

Rakenteensa vuoksi anturi on kuitenkin melko suurikokoinen, ja sen liikkuvat osat lisäävät huollon tarvetta. Lisäksi anturityyppi on herkkä magneettikentille ja sen suuntaus saattaa vaikuttaa virheellisesti mittaustuloksiin. Nopeusanturien taajuusalue ja dynamiikka ovat hieman parempia kuin siirtymäantureilla. Taajuusalue on luokkaa 10...1000 Hz ja dynamiikka-alue noin 1000:1. Perinteisestä nopeusanturista on nykyään

saatavilla myös pietsosähköinen versio. Pietsosähköinen nopeusanturi perustuu kiihtyvyyssanturin tekniikkaan, joka lisää huomattavasti anturin luotettavuutta ja on samalla pienikokoisempi. Kyseisiin antureihin on integroitu elektroninen integraattori, joka muuttaa mitatun kiihtyvyyssignaalin nopeussignaaliksi. (Mikkonen 2009, 237.)

#### 5.5.4 Iskusysäysanturit

Iskusysäysantureita käytetään valvomaan vierintälaakereihin kohdistuvien iskumaisten herätteiden aiheuttamaa korkeataajuisia värähtelyä (Mikkonen 2009, 249). Iskusysäysanturina käytetään resonanssityyppistä pietsosähköistä anturia, joka mittaa värähtelyä 32 kHz:n taajuudelta (PSK 5706 2002). Mittaussignaalista tutkitaan iskusysäyksen huippuarvo ja pohjakohinan taso (PSK 5706 2002; Mikkonen 2009, 249). Vierintäelimen osuma vauriokohtaan aiheuttaa herätteen anturin ominaistaajuuksella. (Mikkonen 2009, 249).

#### 5.5.5 Laseranturit

Laserantureita käytetään etäisyyden, pinnan nopeuden, translaatio- ja rotaatiovärähtelyjen mittaamiseen. Laseranturilla voidaan suorittaa mittauksia useiden metrien etäisyydeltä kohteesta. Laseranturin taajuusalue on laaja, jopa megahertsien luokkaa. Anturityypin huonoja puolia ovat suuri koko ja hankala asennus. (Mikkonen 2009, 241.)

Laseranturien eri mittausmenetelmien toimintaperiaatteita ovat laserinterferometria, laservalopulssin kulkuaika, vaihe-eromittaus ja dopplermittaus. Laserinterferometria menetelmällä voidaan määrittää etäisyyksiä erittäin tarkasti. Menetelmässä laserin monokromaattinen valo jaetaan peilissä mittasäteeseen ja vertailusäteeseen. Mittauskohteesta heijastuvaa mittasädettä ja laitteen sisällä peilistä heijastunutta vertailusädettä vertaillaan interferometrisesti, jolloin ilmaisimeen muodostuu intensiteettiminimejä. (Airila 2004, Dantec 1985, Mikkosen 2009, 242 mukaan.)

Pulssilasereiksikin kutsutut laservalon kuluaikaa mittaavat anturit soveltuvat etäisyyden ja nopeuden mittaamiseen. Järjestelmän toiminta perustuu lähetin-vastaanotin pariin, joiden välillä pulssinmittaus tapahtuu (Airila 2004, Mikkosen 2009, 242 mukaan). Lähettimen valopulssi heijastuu mittauskohteesta vastaanottimeen, johon kuluneesta ajasta voidaan laskea etäisyys. Myös nopeus voidaan laskea, koska anturi lähettää mittauspulsseja tunnetulla taajuudella. Anturin taajuusalue on noin 10 kHz. (Mikkonen 2009, 242.)

Vaihe-eromittauksella voidaan mitata myös etäisyyttä. Laitteen lähettämää valoa käsitellään tietyllä taajuudella (Airila 2004, Mikkosen 2009, 242 mukaan). Etäisyys saadaan laskettua kohteesta takaisin heijastuneen valon ja lähetetyn valon vaihe-erosta. (Mikkonen 2009, 242.)

Doppler-mittaus perustuu kahteen laserin lähettämään valonsäteeseen ja kappaleesta heijastuneiden säteiden taajuuksien muutokseen.

Menetelmällä voidaan mitata akselien pyörimisnopeuksia ja vääntöväärähtelyitä. Mittauskohteen pinta ei vaadi mitään esivalmisteluja, eikä pinnanmuodolla ole merkitystä. Lisäksi mitattavan akselin halkaisijan koolla ei ole rajoituksia. Pyörimisnopeuksia mitattaessa taajuusalue on noin 0,5 Hz...10 kHz. Translaatioliikkeen mittauksissa menetelmän taajuuskaista ylittää useisiin megahertseihin. (Mikkonen 2009, 242–243.)

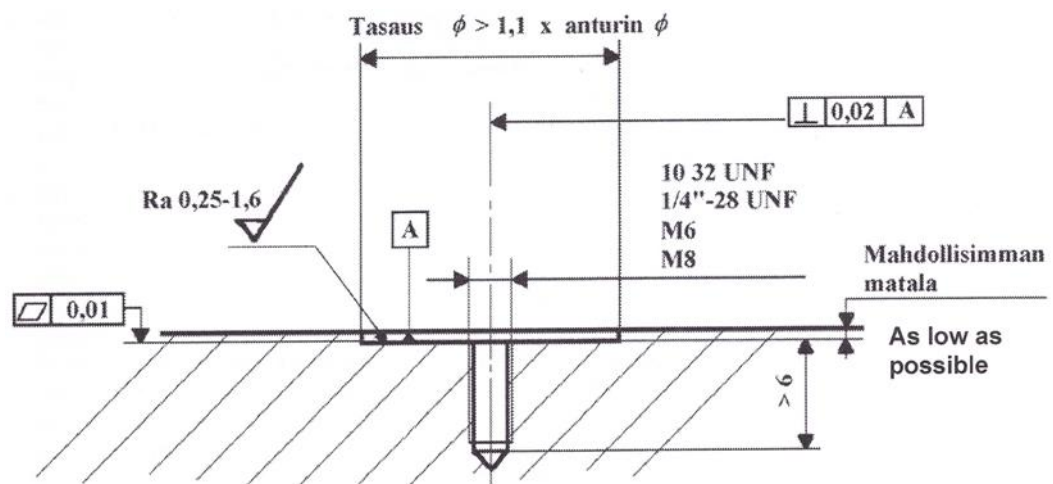
## 5.6 Värähteluanturin kiinnitystavat

Värähtelyanturien asennuksiin on käytettävissä useita kiinnitystapoja, joista täytyy valita sovellukseen parhaiten toimiva vaihtoehto. Tässä luvussa käsitellään yleisimpiä kiihtyvyydianturin kiinnitystapoja. Kiinnitystavat ovat jaettu kolmeen kokonaisuuteen, ruuvikiinnityksiin, magneettikiinnityksiin ja muihin kiinnitystapoihin.

### 5.6.1 Ruuvikiinnitykset

Suorassa kiinnityksessä anturi kiinnitetään koneistettuun tasopintaan vaarnaruuvien tai pulttien avulla (KUVIO 9). Anturin ja pinnan väliin lisätään

hieman öljyä tai rasvaa parhaan kontaktin varmistamiseksi (SFS-ISO 5348 2012). Tämä on ensisijainen tapa kiinteässä mittausjärjestelmässä. Vaarnaruuvikiinnitys mahdollistaa oikein tehtynä anturin koko taajuusalueen käytön. Mitattava ylärajataajuus vaarnaruuvikiinnityksellä voi ylittää reilusti yli 10 kHz:iin. (Nohynek & Lumme 2007, 57.) Haittapuoleksi saattaa muodostua koneistuksen tarve (PSK 5703 2006).



KUVIO 9. Koneistukset anturin vaarnaruuvikiinnitystä varten (PSK 5703 2006)

Nippakiinnitystä käytetään myös kiinteässä mittauksessa. Nippakiinnitys ei tarvitse tasopinnan koneistamista, joten sen toteuttaminen on helpompaa verrattuna vaarnaruuvikiinnitykseen. Lisäksi mittauksia voidaan suorittaa ahtaistakin kohdista. Tosin tilantarve lisääntyy pystysuunnassa. Nippakiinnitys laskee mittauksen ylärajataajuutta hiukan verrattuna suoraan vaarnaruuvikiinnitykseen. (PSK 5703 2006.)

Kierrealuslevyn avulla toteutettua kiinnitystapaa käytetään, kun edellä kuvatut menetelmät eivät sovellu tarkoitukseen. Aluslevy liimataan kappaleen pintaan ja kierreosaan kiinnitetään anturi. Liimauksessa on oltava huolellinen ja liimanvalinnassa otettava huomioon käyttöolosuhteet. Kiinnitystapa mahdollistaa galvaanisen erotuksen anturin ja mittauskohteen välillä. Kiinnitystapa laskee ylärajataajuutta hieman, verrattuna suoraan kiinnitykseen. (PSK 5703 2006.)

### 5.6.2 Magneetikiinnitykset

Reitti- ja tilapäismittauksissa tulisi ensisijaisesti käyttää suoraan rakenteen pintaan kiinnitettävää magneettia, joka on kiinnitettynä anturiin.

Pinnanmuoto on huomioitava mittauksessa, sillä kaarevalle pinnalle on käytettävä siihen soveltuvaa magneettia. Käyttökelpoinen mittaustaaajuusalue on riippuvainen magneetin voimakkuudesta, kiinnityspinnan puhtaudesta ja laadusta sekä anturin massasta. (PSK 5703 2006.) Tyypillisesti kiinnitystavan ylärajataajuus on noin 2 kHz (Nohynek & Lumme 2007, 59). Magneetikiinnityksessä on huomioitava, että voimakas värinä saattaa irrottaa anturin ja kiinnitystapa soveltuu ainoastaan ferromagneettisille kiinnityspinnoille (PSK 5703 2006).

Magneetikiinnitys on mahdollista toteuttaa myös nipan välityksellä. Nipan avulla voidaan varmistaa reittimittauksien yhdenmukainen mittaus. Nippa voidaan kiinnittää ei-ferromagneettiselle pinnalle, mutta itse nipan on oltava ferromagneettinen. Nipan välityksellä suoritettavalla mittauksella voidaan päästä jopa laajemmalle taajuusalueelle, kuin suoralla magneetikiinnityksellä, koska nipan pinta on suora ja maalamaton. Nippa vaatii luonnollisesti enemmän tilaa pystysuunnassa, kuin suora kiinnitys. (PSK 5703 2006.)

Magneetikiinnitteinen kiihtyvyyssanturi voidaan kiinnittää myös aluslevyn välityksellä. Aluslevy liimataan tai hitsataan haluttuun mittauspisteeseen. Kiinnitystapaa käytetään ei-ferromagneettisille pinnoille. Liimausta käytettäessä voidaan anturi erottaa galvaanisesti rakenteesta. (PSK 5703 2006.)

### 5.6.3 Muut kiinnitystavat

Edellä mainittujen lisäksi voidaan kiinnitys toteuttaa käsin, pikakiinnittimellä, mehiläisvahalla, liimalla tai kaksipuolisella teipillä, sekä erityistapauksissa voidaan käyttää mekaanista suodatinta värähtelyn vaimentamiseen (Nohynek & Lumme 2007, 59–60).

Värähtelyanturia pidetään käsivaralla vain silloin, kun muut kiinnitystavat eivät ole mahdollisia. Anturi voidaan painaa suoraan kohteeseen tai koetinsauvan välityksellä. Mitattava ylärajataajuus jää varsin matalaksi, etenkin koetinsauvan kanssa. Koetinsauvamittauksen ylin mitattava taajuus on noin 500 Hz. (PSK 5703 2006; Nohynek & Lumme 2007, 59–60.)

Pikakiinnitystä käytetään varmistamaan yhdenmukainen mittausta samasta mittauspisteestä. Anturiin kiinnitetään pikakiinnityslaitin, joka asetetaan mittausta kohteeseen asennettuun vastinkappaleeseen, esimerkiksi mittausta nippaan. Pikakiinnityksen ylärajataajuus jää matalammaksi kuin suorassa ruuvikiinnityksessä, noin 4 kHz:iin. Lisäksi tilantarve mittauspisteessä kasvaa. (PSK 5703 2006; Nohynek & Lumme 2007, 58.)

Liimaa tai mehiläisvahaa käytetään tilapäisiin mittauksiin korkeilla taajuuksilla. Erityisesti mehiläisvahakiinnityksissä on huomioitava ympäristön olosuhteet, sillä sen korkein käyttölämpötila on noin +40 °C. (PSK 5703 2006.) Ohuen mehiläisvaha kerroksen mitattava ylärajataajuus on noin 10 kHz (Nohynek & Lumme 2007, 60).

Kaksipuolista teippikiinnitystä käytetään erikoistapauksissa, kuten ei-ferromagneettisten putkien mittauksiin. Paksun teipin käyttökelpoinen ylärajataajuus jää noin 500 Hz:iin, mutta ohuella teipillä voidaan päästä noin 5000 Hz:iin. (Nohynek & Lumme 2007, 60.)

Mekaanista suodatinta käytetään vaimentamaan häiritsevää korkeataajuisia värähtelyä etenkin ruuvi- ja magneettikiinnityksissä. Joustavaa materiaalia oleva suodatin asennetaan anturin ja kiinnityspinnan väliin. Suodatin mahdollistaa myös galvaanisen erotuksen. (PSK 5703 2006.)

## 5.7 Kaapelointi

Kiinteän asennuksen kaapelin valinnassa on huomioitava käyttöympäristön lämpötila. Valittavaan kaapelityyppiin vaikuttaa myös anturin sisäinen vahvistin. Jos anturissa on sisäinen vahvistin, tulee

käyttää metallikalvolla häiriösuojattua lyhytnousuista kierrettyä parikaapelia. Ulkoisella vahvistimella toimivien anturien kanssa käytetään hyvälaatuista ja matalakohinaista koaksiaalikaapelia. (PSK 5703 2006.)

Kaapelit tulee asentaa suojaavaan rakenteeseen, kuten suojaputkeen tai kaapelihyllylle. On myös varmistettava siitä, ettei kaapelointi olennaisesti vaikeuta koneen käyttöä tai huoltoa. Signaalijohtimien etäisyys samansuuntaisista vahvavirtakaapeleista tulee olla vähintään 250 mm. Suojamaakytkentä on suositeltavaa tehdä kytkentäkoteloon. Johtimien häiriösuojamaadoituskytkentä tulee toteuttaa niin, ettei maasilmukoita pääse muodostumaan. Kaapelien alumiinikalvo maadoitetaan vain kaapelin toisesta päästä. (PSK 5703 2006.) Kaapelin asennuksessa on huomioitava vedonpoisto, jotta anturiliitos ei altistu rasitukselle. Löysien ja roikkuvien kaapelien asennuksia tulee välttää, koska mahdollisesti syntyvä hankaussähkö saattaa häiritä pietsosähköisiä antureita. (SFS-ISO 5348 2012.)

## 5.8 Yleisimmät värähtelymittausten valvontamenetelmät

Yleisimpiä valvontamenetelmiä ovat tunnuslukujen kehittymisen eli trendin seuranta ja spektrianalyysivalvonta (Mikkonen 2009, 282).

Värähtelymittaukset perustuvat värähtelyn aikatasosignaaliin, joka mitataan jokaisessa käytännön mittauksessa. Aikatasosignaalia voidaan käsitellä useilla menetelmillä, jotta saadaan mittaussignaalista suodatettua haluttu tieto. Yleisin käsittelymenetelmä on Fourier-muunnos. (Mikkonen 2009, 181.) Seuraavissa luvuissa käsitellään yleisimpiä värähtelyn valvontatekniikoita.

### 5.8.1 Kokonaistasovalvonta

Värähtelymittausten kokonaistasovalvonnassa seurataan kiihtyvyyden, nopeuden tai siirtymän tehollis- tai huippuarvoa. Nopeuden tehollisarvo (rms) on yleisimmin käytetty suure. (Mikkonen 2009, 284.)

Kokonaistasovalvonta ei kuitenkaan sovellu epäherkkyytensä vuoksi monien vikojen valvontaan ja siksi sitä on yleensä tarpeen täydentää

muilla menetelmillä. (PSK 5706 2002). Tärinärasitus määritellään PSK 5701:n (2011) mukaan: ”Värähtelynopeuden tehollisarvo taajuusalueella 10...1000 Hz. Alle 600 rpm pyöriviä koneita käytetään taajuusalueella 2...1000 Hz.”

Mikkosen (2009, 284) mukaan säännöllisellä ja huolellisella kokonaistasovalvonnalla voidaan seurata joidenkin vikatyypin kehittymistä varsin luotettavasti. Seurattavia vikatyyppejä ovat esimerkiksi linjausvirheet, epätasapaino ja resonanssiongelmat.

### 5.8.2 Spektrivalvonta

Spektrivalvonnalla voidaan tarkkailla värähtelyn voimakkuutta eri taajuuksilla. Spektristä voidaan valvoa eri kohteiden värähtelyä paljon tarkemmin kuin kokonaistasosta, ja se onkin värähtelymittauksen käytetyin perustyökalu. (Mikkonen 2009, 285.) Aiemmin mitatuista spektreistä voidaan muodostaa mittauspistekohtainen hälytysrajaspektri, johon mitatun spektrin muotoa verrataan (PSK 5706 2002). Spektri muodostetaan raakasignaalista FFT-laskennan (Fast Fourier Transform) avulla (Mikkonen 2009, 285).

### 5.8.3 Verhokäyrävalvonta

Verhokäyrävalvonnalla voidaan havaita kehittyvät viat aiemmin ja luotettavammin kuin kokonaistaso- tai spektrivalvonnalla.

Verhokäyrämenetelmällä voidaan havaita vian kehittymisen alkuvaiheen vaihteita iskumaisia herätteitä ja menetelmää käytetäänkin vierintälaakerien ja voitelutilan valvontaan. (Mikkonen 2009, 286.)

Menetelmässä matalaenerginen korkeataajuinen värähtelysignaali käsitellään amplitudidemodulaatiolla matalataajuisiksi, jolloin käsiteltyä signaalia voidaan valvoa tunnuslukujen, kokonaistason tai spektrin avulla (PSK 5706 2002). Verhokäyräspektrin huipuista voidaan tutkia vikojen aiheuttamia vikataajuuksia samalla periaatteella kuin normaalista spektristäkin. Verhokäyrävalvontaa käytetään esimerkiksi hidaskäyntisiin koneisiin. (Mikkonen 2009, 286.)

#### 5.8.4 Tunnuslukuvalvonta

Tunnuslukuvalvonta on värähtelyvalvonnan perustoimintoja ja se perustuu mittaussignaalista muodostettujen tunnuslukujen kehityksen vertailuun. Tällainen tunnusluku voi esimerkiksi olla tietyn taajuusalueen värähtelyn tehollisarvo. Tunnusluvuilla voidaan siis havaita useimmat viat ja seurata niiden kehittymistä. Tunnuslukuja on kehitetty useita, koska yhdellä tunnusluvulla ei voida seurata kaikkien mahdollisten vikojen kehittymistä. (Nohynek & Lumme 2007, 80.) PSK 5706:n (2002) mukaan yleisimpiä taajuustasosta valvottavia tunnuslukuja ovat seuraavat:

- pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn voimakkuus
- pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn vaihekulma
- pyörimistaajuuden monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus
- värähtelyn voimakkuus vierintälaakerin sysäystaajuuksilla ja niiden monikerroilla
- värähtelyn voimakkuus lapataajuudella ja sen monikerroilla
- värähtelyn voimakkuus hammaspyöräparin ryntötaajuudella, sen monikerroilla ja niiden sivunauhoilla
- rakenteen valitun ominaistaajuuden sisältävän taajuuskaistan tehollisarvo
- harmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo
- ei harmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo
- aliharmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo
- valitun taajuuskaistan tehollisarvo.

PSK 5706 (2002) listaa myös aikatasosta laskettavat tunnusluvut:

- tehollisarvo
- huipusta huippuun arvo

- huippuarvo
- huippukerroin eli Crest Factor
- kurtosis.

Crest Factor tarkoittaa mitatun suureen huippuarvon suhdetta tehollisarvoon. Sinimuotoisella värähtelyllä huippukerroin on  $\sqrt{2}$ . (PSK 5701 2011.) Kurtosis arvolla kuvataan mitatun signaalin piikikkyyttä (Mikkonen 2009, 254).

#### 5.8.5 Aikatasovalvonta

PSK 5706 (2002) määritelmä aikatasovalvonnasta: ”Aikatasovalvonta tarkoittaa näytteen muodon vertailua valittuun hälytysrajaan.” Hälytysraja voidaan muodostaa amplitudin voimakkuuden tai referenssimittausten perusteella. Hälytysrajaan vertailtavaan mittausnäytteseen voidaan käyttää yksittäistä mittausnäytettä tai useamman näytteen tahdistettua keskiarvoa. (PSK 5706 2002.)

#### 5.8.6 Vektorivalvonta

Vektorivalvonnalla havaittavia vikoja ovat akselin linjausvirheet, tasapaino-ongelmat, roottorin poikittaiset säröt ja akselin epäsymmetrinen lämpeneminen. Värähtelyn voimakkuuden ja vaihekulman muodostamaa vektoria seurataan värähtelyn pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla napakoordinaatistossa. Vektorivalvonnassa on lisäksi seurattava prosessisuureita, kuten kierroslukua, tehoa, virtausta ja painetta, jotta saadaan vian diagnoosi varmistettua. (PSK 5706 2002.)

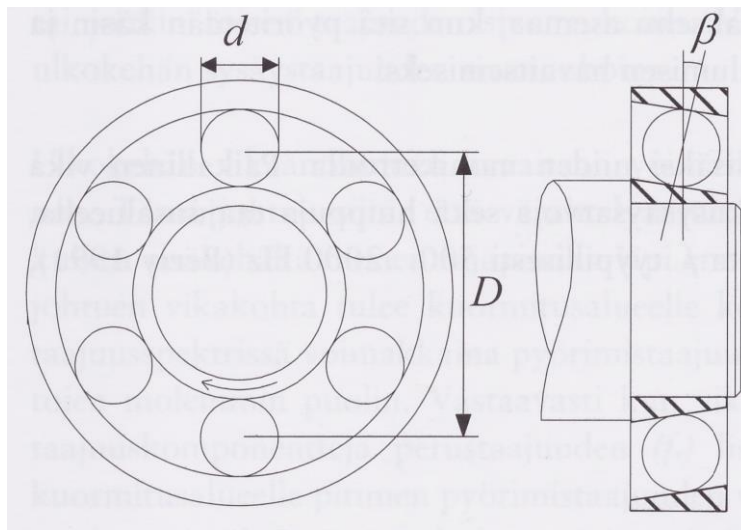
#### 5.8.7 Kepstrivalvonta

Kepstrivalvonnan tyypillinen sovelluskohde on hammasvaihteiden värähtelyt. Valvonta perustuu logaritmisien spektrin säännöllisyyden tarkkailuun. Säännöllistä värähtelyä voidaan tarkkailla esimerkiksi harmonisista ja sivunauhataajuuksista. (PSK 5706 2002; Mikkonen 2009, 289.)

## 5.9 Laakerien vikataajuudet

Vikataajuuksilla tarkoitetaan laakerikomponenttien sysäystaajuutta. Tämä laskettu taajuus kertoo taajuuden, jolla kyseinen laakerin komponentti värähtelee sen vikaantuessa. Vioista aiheutuu myös sysäystaajuuksien monikertoja. (PSK 5707 2011.)

Ulkokehän pyöriessä nopeammin kuin sisäkehä on kaavassa 4 miinusmerkki muutettava plusmerkiksi (Palmgren 1945, Verkasalo 1986, Springer 1990, Mikkosen 2009, 313 mukaan; PSK 5707 2011).



KUVIO 10. Laakerin vikataajuuksien laskennassa käytetyt mitat (Mikkonen 2009, 313)

$$f_u = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) n \quad (\text{Ulkokehän ohitustaajuus}) \quad (\text{KAAVA 1})$$

$$f_s = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) n \quad (\text{Sisäkehän ohitustaajuus}) \quad (\text{KAAVA 2})$$

$$f_r = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta\right)^2\right) n \quad (\text{Vierintäelimen vikataajuus}) \quad (\text{KAAVA 3})$$

$$f_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) n \quad (\text{Pitimen vikataajuus}) \quad (\text{KAAVA 4})$$

$d$  = vierintäelimen halkaisija

$D$  = vierintäelimien välinen halkaisija

$\beta$  = vierintäelimen kontaktikulma

$n$  = akselin pyörimistaajuus

$N$  = vierintäelimien lukumäärä.

## 6 VÄRÄHTELYANTUROINNIN TOTEUTTAMINEN

Seuraavissa luvuissa määritetään valvottavat komponentit sekä niiden mittauspisteet. Mittauspisteiden havainnollistamiseksi on käytetty valokuvia. Luvuissa käsitellään myös mittausjärjestelmää, mittausaikaväliä ja mittauspisteissä käytettäviä valvontatekniikoita. Lisäksi mittauspisteille määritetään alustavia värähtelymittauksen raja-arvoja.

### 6.1 Valvottavat komponentit

Valvottavien komponenttien valinnassa kartoitettiin viiluservin vikaantumiselle kriittisimmät laakerit. Sorvin kanssa toimivat henkilöt listasivat kokemuksepäisesti vikaantuvat komponentit. SKF:n suorittamat värähtelymittaukset antoivat mittauskokemusta mittauspisteiden toimivuudesta käytännössä. Alla olevassa taulukossa 3 on järjestelty valvottavat komponentit kriittisyysjärjestykseen. Kriittisyysjärjestyksen ensimmäinen laakeri on valvottavista komponenteista tärkein, koska sen vikaantuminen voi aiheuttaa nopeastikin laadun alenemaa ja tuotantoseisokin. Taulukon loppua kohden mentäessä kriittisyysluokitus laskee, mikä tarkoittaa, että laakerien vikaantuminen on toiminnan kannalta siedettävämpää eikä tuotantoseisokin vaara ole välitön.

TAULUKKO 3. Valvottavat laakerikomponentit kriittisyys järjestyksessä sekä niiden lukumäärät ja vikaantumisnopeudet

<b>Ensisijaisesti valvottava komponentti</b>	<b>Lukumäärä (kpl)</b>	<b>Keskimääräinen vikaantumisnopeus (vuotta)</b>
1. Pyörivän vastaterän neulalaakerit	0-7	yli 1
2. Ala-akselin sisä- ja ulkopuolen rullalaakerit	4	5-7
3. Sisäkarojen painelaakerit	2	3-5
4. Ulkokarojen painelaakerit	2	5-7
5. DC-moottorin käyttöpään laakeri	1	yli 10
6. Teräpenkin syöttöruuvien laakerit	2	yli 5
7. Ala-akselin keskilaakeri	1	5-10
8. Kara-akselin laakerit	4	10-15

Keskimääräisellä vikaantumisnopeudella tarkoitetaan kyseisen komponentin keskimääräistä toiminta-aikaa. Viilursorvin laakerien vikaantumisia aiheuttavat yleensä hetkellisen ylikuorman aiheuttamat rasisuspiikit, laakerien voitelun odottamattomat keskeytykset, sekä asennusvirheet. Normaalin kulumisen aiheuttamat huollot on pystytty ennakoimaan melko hyvin kokemuseräisesti. Käsimittalaittein suoritettut värähtelymittaukset ovat olleet myös tärkeitä apuvälineitä huoltoja suunniteltaessa. Mahdollisesti käyttöön otettavalla kunnonvalvontajärjestelmällä pystytään varmistamaan komponenttien kunto entistä tarkemmin. Värähtelymittauksilla pystytään havaitsemaan myös muita vikojen aiheuttajia, epätasapainoa tai komponenttien valmistusvikoja.

## 6.2 Valvontamenetelmät ja raja-arvot

Kaikista mittauspisteistä voidaan valvoa ainakin värähtelynopeuden tehollisarvoa, kiihtyvyyden huippuarvoa sekä verhokäyräsignaalin huippuarvoa. Lisäksi spektrivalvonnalla voidaan valvoa laakerin vikataajuuksien taajuuskaistoja, jolloin saadaan hälytys laakerin mahdollisesta vikaantumisesta. Lähes kaikkien komponenttien vikaantumisnopeudet ovat suhteellisen pitkiä, jolloin värähtelyn kokonaistason trendiseurannalla pystytään seuraamaan melko luotettavasti niiden kuntoa. Poikkeuksen tekevät vastaterän laakerit, joiden vikaantuminen on tyypillisesti nopeampaa ja vikaantuminen aiheuttaa myös viilun laadun alenemaa. Myöskään planeettaruuvien kunnosta ei saada riittävää informaatiota kokonaistasovalvonnasta.

Verhokäyräsignaalin tarkkailulla voidaan saada aikaisempi indikaatio vastaterien ja ruuvien vikaantumisesta. Minkään mittauspisteen valvonta ei saa kuitenkaan perustua pelkän kokonaistason seurantaan, koska piilevät viat saattavat jäädä huomaamatta.

Kokonaistasovalvonnan suureina käytetään nopeuden tehollisarvoa. Nopeuden tehollisarvon säännöllisellä trendiseurannalla pystytään varsin hyvin huomaamaan linjaus- ja tasapaino-ongelmat sekä mahdolliset

resonanssitilanteet. Myös laakerien pidemmälle kehittyneet viat havaitaan tehollisarvon noususta, kuten liitteestä 1 huomataan.

Spektrivalvonnan avulla pystytään havaitsemaan vikojen aiheuttamia vikataajuuksia ja pystytään rajaamaan vian juurisyitä tarkemmin kuin pelkällä kokonaistasovalvonnalla. Kaavojen 1 – 4 avulla voidaan laskea laakerien vikataajuudet, jolloin laakerivikojen diagnosointi tehostuu. Laakerivalmistajat tarjoavat myös laskentaohjelmia verkkosivuillaan. Lisäksi aiemmin mitatuista spektreistä voidaan muodostaa referenssi hälysrajaspektrit, joiden muotoihin uusia mittauksia vertaillaan. Rajan ylittyessä voidaan antaa varoitus operaattorille värähtelyarvojen noususta.

Verhokäyrävalvonnalla saadaan aikainen indikaatio vikaantumisesta. Verhokäyrälle voidaan muodostaa mittauskokemuksen karttuessa tunnuslukuja tai hälytysrajaspektrejä, joiden avulla mittauskohteen kuntoa tarkkaillaan.

Alustavat värähtelyrajasuorat perustuvat PSK 5704 –standardiin (2013), jossa viiluserien koneryhmälle on määritelty

- 1,4 mm/s koneen vastaanotossa sallittu värähtely
- 2,8 mm/s alustava hälytysraja
- 4,5 mm/s alustava vaurioraja.

Standardin määrittelemät arvot, joita voidaan käyttää mittaustoiminnan alussa raja-arvoina, ovat kuitenkin vain suuntaa antavia. Raja-arvoja voidaan tarkentaa konekohtaisesti kymmenen onnistuneen mittauskerran jälkeen. Trendin seurannassa voidaan käyttää kolmea raja-arvoa: huomautus-, varoitus- ja vauriorajaa. Alla on laskettu kara-akselin pöllin puoleiselle laakerille kolme nopeuden värähtelyrajasuoran raja-arvoa (RMS) testimittauksista saadun datan perusteella:

$$\text{Huomautusraja} = \text{Keskiarvo} + 3 * \text{Keskihajonta} \quad (\text{KAAVA 5})$$

$$\text{Huomautusraja} = (0,913 + 3 * 0,120) \text{ mm/s} \approx 1,27 \text{ mm/s}$$

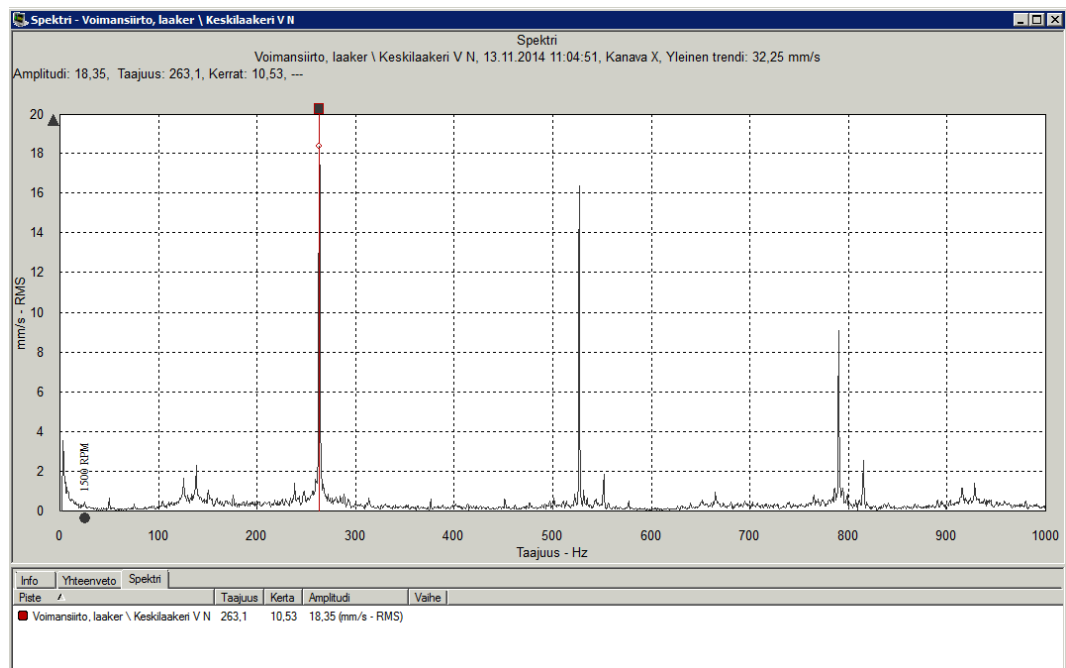
$$\text{Varoitusraja} = 1,6 * \text{Keskiarvo} + 2 * \text{Keskihajonta} \quad (\text{KAAVA 6})$$

$$\text{Varoitusraja} = (1,6 * 0,913 + 2 * 0,120) \text{ mm/s} \approx 1,70 \text{ mm/s}$$

$$\text{Vaurioraja} = 4 * \text{Keskiarvo} + 2 * \text{Keskihajonta} \quad (\text{KAAVA 7})$$

$$\text{Vaurioraja} = (4 * 0,913 + 2 * 0,120) \text{ mm/s} \approx 3,89 \text{ mm/s}$$

Liitteessä 1 on laskettuna kaikkien valvottavien komponenttien tärinärasitusrajat yllä esiteltujen kaavojen mukaisesti. Ala-akselin keskilaakerille ei ole laskettu raja-arvoja, koska laakeri oli vikaantunut mittaushetkellä, kuten RMS-arvostakin voi huomata (KUVIO 11). Kaikki lasketut arvot jäävät PSK 5704 (2013) alustavien raja-arvojen alapuolelle, jolloin mittauksista laskettuja arvoja voidaan käyttää alustavina raja-arvoina. Mittaukset on uusittava järjestelmän asennuksen jälkeen ja mitattuja raja-arvoja tarkennettava.



KUVIO 11. Ala-akselin keskilaakerin nopeusspektri (Hänninen 2015a)

Sorvin operaattorille mittausdata tulee tiivistää ja esittää selkeällä tavalla. Esimerkiksi trendiseurannan käyrä kertoo mittauspistekohtaisesti valvottavan kohteen kunnon. Laskettujen hälytysarvojen ylittyessä voidaan

antaa tapauskohtaisesti varoitus tai hälytys arvojen ylityksistä. Raja-arvon ylityksen jälkeen aloitetaan hälytyksen syyn tutkinta ja varaudutaan jatkotoimenpiteisiin.

### 6.3 Mittausjärjestelmä ja mittausaikaväli

Viilursorville soveltuvia mittausjärjestelmiä ovat puolikiinteä ja kiinteä mittausjärjestelmä. Valinta näiden kahden väliltä perustuu siihen, mitä asiakkaalle halutaan tarjota. Asiakkaan kannalta lisäarvoa tuova palvelu voisi perustua kiinteään mittausjärjestelmään ja online-palveluun. Vähintäänkin anturointien kiinnitykset on tehtävä kiinteällä tavalla. Kiinteästi asennettavien anturien määrän tulisi pysyä järkevällä tasolla, koska analysaattorien kanavamäärä on rajallinen. Viilursorvin testimittauksessa käytetyssä SKF:n IMx-S 16 –analysaattorissa oli 16 analogiatuloa antureille. Jos anturien määrää halutaan kasvattaa, kasvavat myös kustannukset.

Laakereille käsimittalaittein suoritettaviin mittauksiin liittyy turvallisuusriski, joka jo itsessään antaa hyvän syyn kiinteisiin anturiasennuksiin. Vaarallisia mittauskohteita ovat ala-akselin uloimmat laakerit, joissa joudutaan menemään hyvin lähelle pyörivää akselia ja kytkintä. Lisäksi pyörivän vastaterän laakerointien mittauksissa ollaan lähellä pyörivää akselia ja terärakoa. Hankalasti mitattavia mittauspisteitä ovat ala-akselin sisemmät laakerit ja ala-akselin keskilaakeri, joissa mittausta varten joudutaan irrottamaan suojapeltejä.

Mittausaikaväli voidaan pitää kunnonvalvontajärjestelmän käyttöönoton alkuvaiheessa kahdessa viikossa. Alussa tiheämmällä valvontavälillä voidaan havaita myös mahdolliset valmistus- ja asennusvirheet. Kymmenen onnistuneen mittauksen jälkeen mittausaikaväliä voidaan tarvittaessa muuttaa, esimerkiksi kolmeen tai neljään viikkoon. Vikaantumisnopeudet (TAULUKKO 2) ovat suhteellisen pitkiä, jotka sinällään tukevat puolikiinteää järjestelmää.

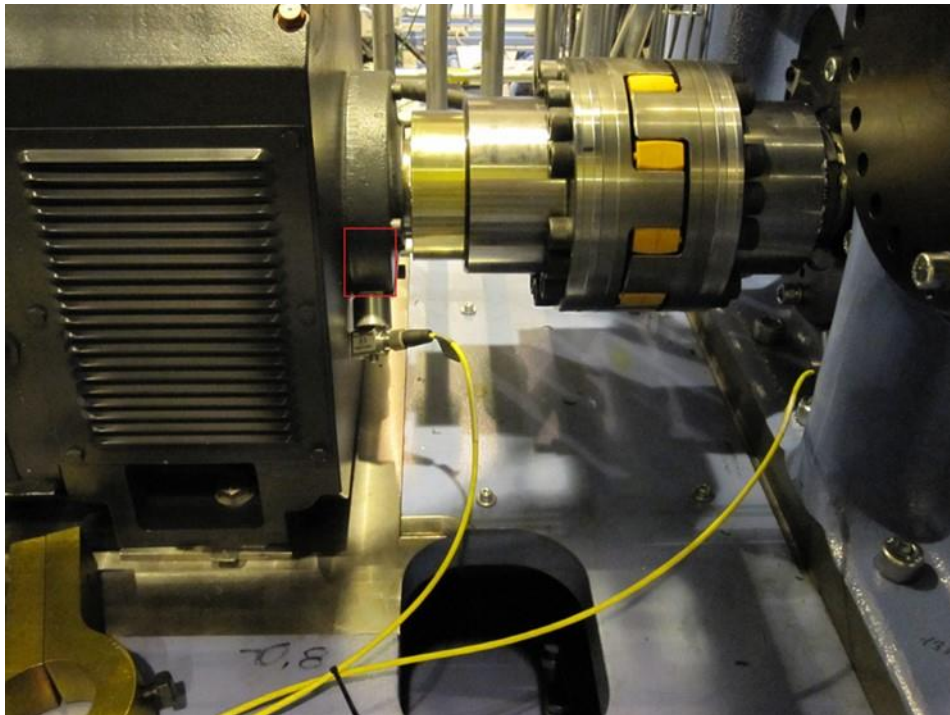
#### 6.4 Mittauspisteet

Mittauspisteiden valintaan ja toimivuuteen saatiin tärkeätä informaatiota sorvin testimittausten avulla. Tässä luvussa on valokuvien avulla esitelty anturien mittauspisteet sekä esimerkit niiden nimeämisestä.

Mittauspisteiden nimeämisesimerkit on annettu kuvatekstin yhteydessä. Useimmat valokuvat ovat sorvin käyttöpäästä, mutta anturien mittauspisteet ovat vastaavilla kohdilla myös käytettävässä päässä.

DC-moottorin käyttöpään laakerin mittauspiste nähdään kuvasta 2.

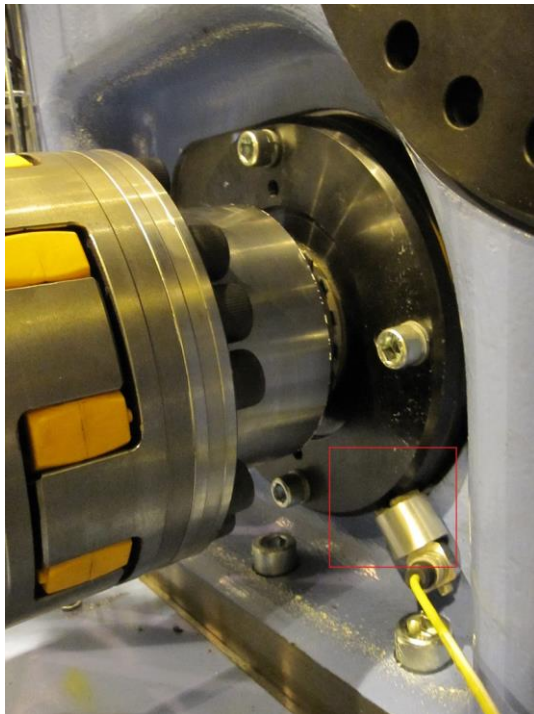
Mittauspiste on alaviistossa kuorman puolella. Moottoriin ei välttämättä kannata asentaa anturia kiinteästi, koska se ei ole erityisen vikaherkkä, vikaantumisnopeus on pitkä ja värähtelymittaus voidaan suorittaa helposti käsimittalaitteella. Liitteessä 2 on toinen valokuva mittauspisteestä.



KUVA 2. DC-Moottorin mittauspiste, SORVIDCM01S

Mittauspaikkojen nimeäminen aloitetaan PSK 5702:n mukaan käyttävän laitteen vapaasta päästä, jolloin ensimmäinen mittauspaikka on ala-akselin ulompi laakeri. Mittauspisteiden nimeämisesimerkeissä on käytetty seuraavanlaista tapaa (TAULUKKO 2). SORVI:lla tarkoitetaan laitetta. Sorvin jälkeen on annettu kolme kirjainta, jotka kuvaavat mittauspistettä tarkemmin, esimerkiksi DCM:llä tarkoitetaan DC-moottoria. Kirjainten jälkeen ilmoitetaan juokseva kaksinumeroinen luku alkaen käyttöpäästä. Viimeinen kirjain ilmaisee mittaussuunnan. Merkintätapoja on varmasti useita, mutta tärkeintä on, että värähtelymittaajat tietävät tarkasti nimetyt pisteet. DC-moottorin mittauspiste voidaan nimetä esimerkiksi näin: SORVIDCM01S.

Kuvassa 3 on ala-akselin ulkopuolen rullalaakerin mittauspiste sijoitettuna laakerin laippaan. Anturi on tärkeätä sijoittaa juuri laakerin laippaan, koska silloin varmistetaan säteissuuntainen mittaus ja rajapintoja ei ole kuin yksi kiinnityspisteen lisäksi. Anturien mittaussuunnaksi voidaan asettaa myös alaviistosta ylöspäin, jolloin mittaussuunta on suurimman voiman suunnassa kuormanpuolella. Käytettävän päään ala-akselin ulkopuolinen laakeri voidaan nimetä: SORVIAAU12S.

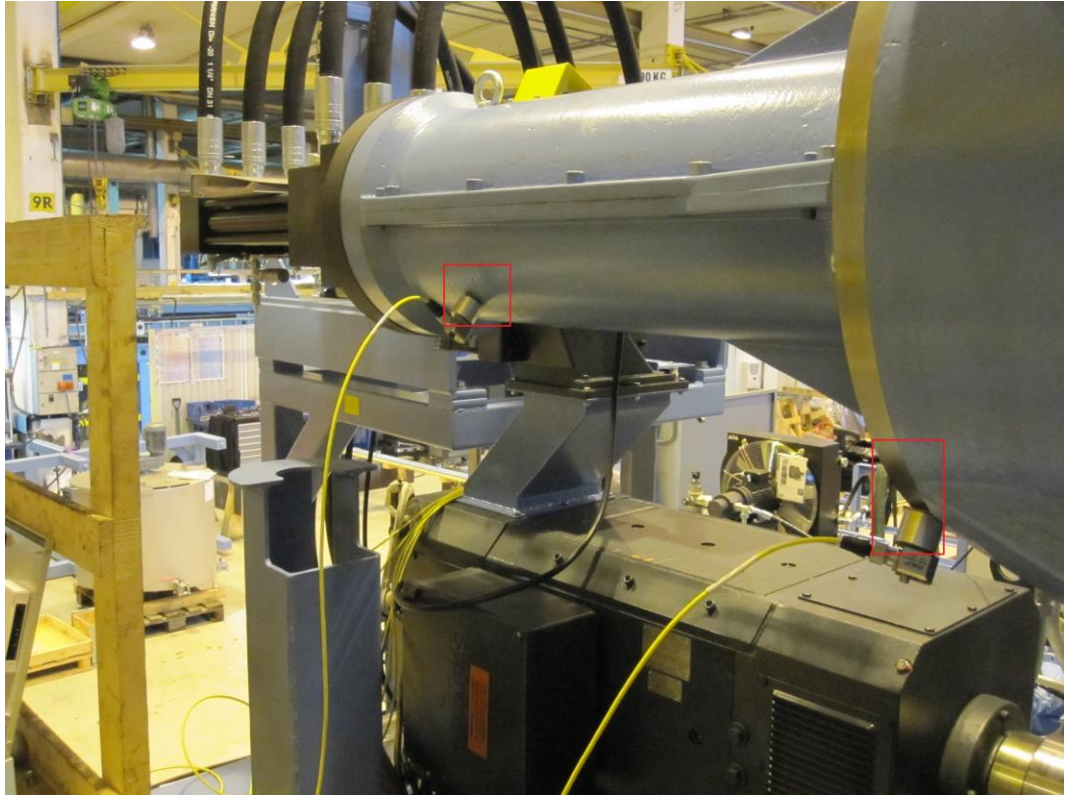


KUVA 3. Ala-akselin ulkopuoli, käyttöpää, SORVIAAU02S



KUVA 4. Ala-akselin sisäpuoli, käyttöpää, SORVIAAS03S

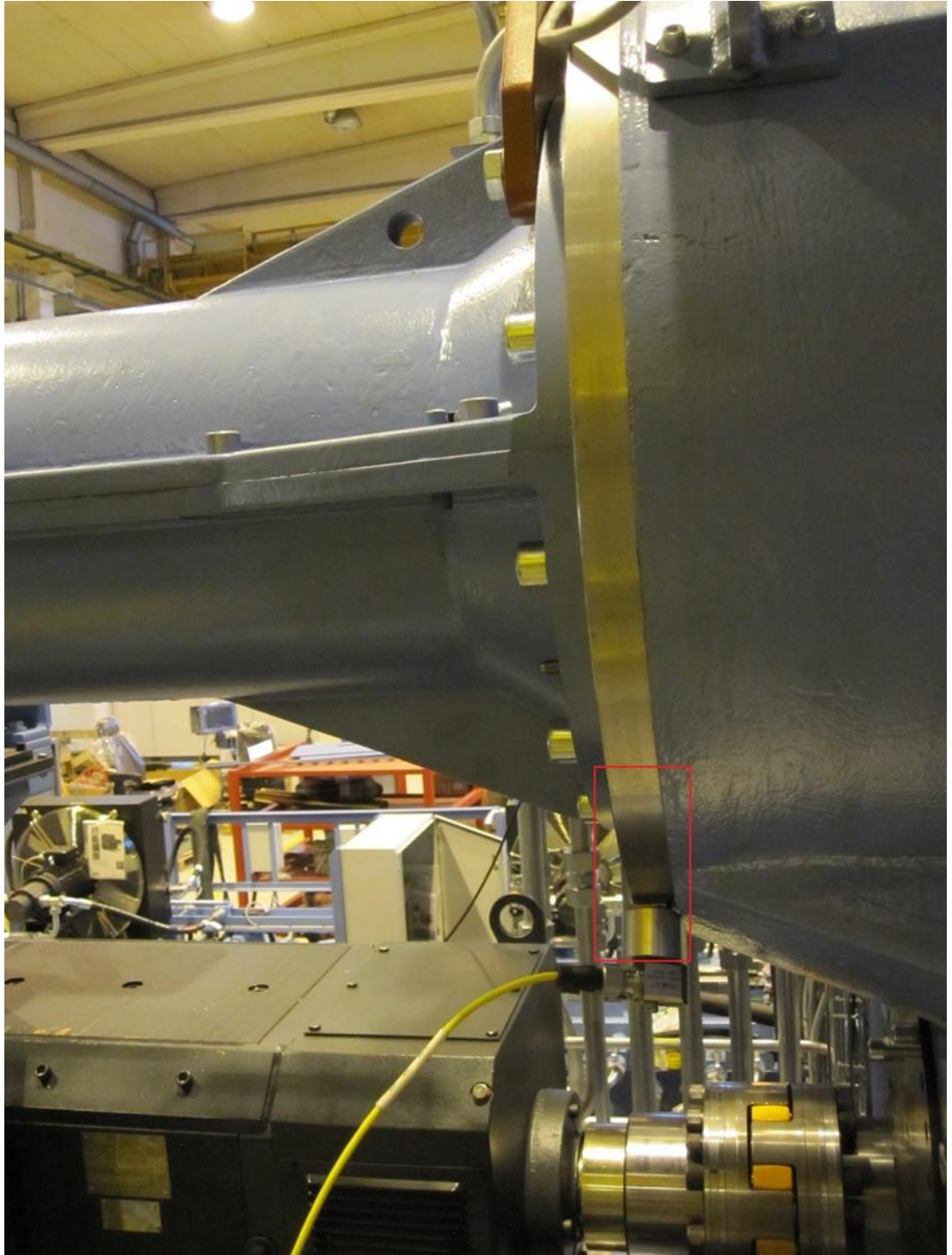
Kuvasta 4 nähdään ala-akselin sisäpuolen rullalaakerin mittauspiste. Tilanne on samankaltainen kuin ala-akselin ulkopuolisessa mittauspisteessä. Laippaan sijoitettu mittauspiste varmistaa luotettavan ja tarkan mittauksen. Käytettävän pään mittauspiste voidaan nimetä: SORVIAAS11S.



KUVA 5. Karan painelaakerit, käyttöpää, SORVIKAP04S

Sisä- ja ulkokarojen painelaakereita valvotaan samasta mittauspisteestä. Painelaakerien mittauspiste nähdään kuvasta 5, vasemman puoleinen punainen suorakaide. Liitteessä 3 nähdään sama mittauspiste eri kuvakulmasta. Anturi tulee sijoittaa alaviistoon kantopinnalle voitelupisteen kohdalle, jossa se on mekaanisesti mahdollisimman lähellä laakereita, kun karat ovat sisällä. Mittauspisteen kohdalla sijaitsee kolme painekuulalaakeria ja yksi urakuulalaakeri, joten mittauspisteen signaalin analysoinnissa on huomioitava tämä asia. Valvottavat laakerit ovat vaikeassa paikassa suojarakenteen sisällä. Karan liike hankaloittaa anturin sijoittamista entisestään, jolloin paras kiinnityspiste on karojen suojarakenteen ulkopinnassa. Käytettävän pään nimeämisesimerkki: SORVIKAP10S.

Kara-akselin ulkopuolisen rullalaakerin mittauspiste nähdään myös kuvasta 5. Mittauspiste on oikealla olevan suorakaiteen kohdalla. Kuvassa 6 on sama mittauspiste.

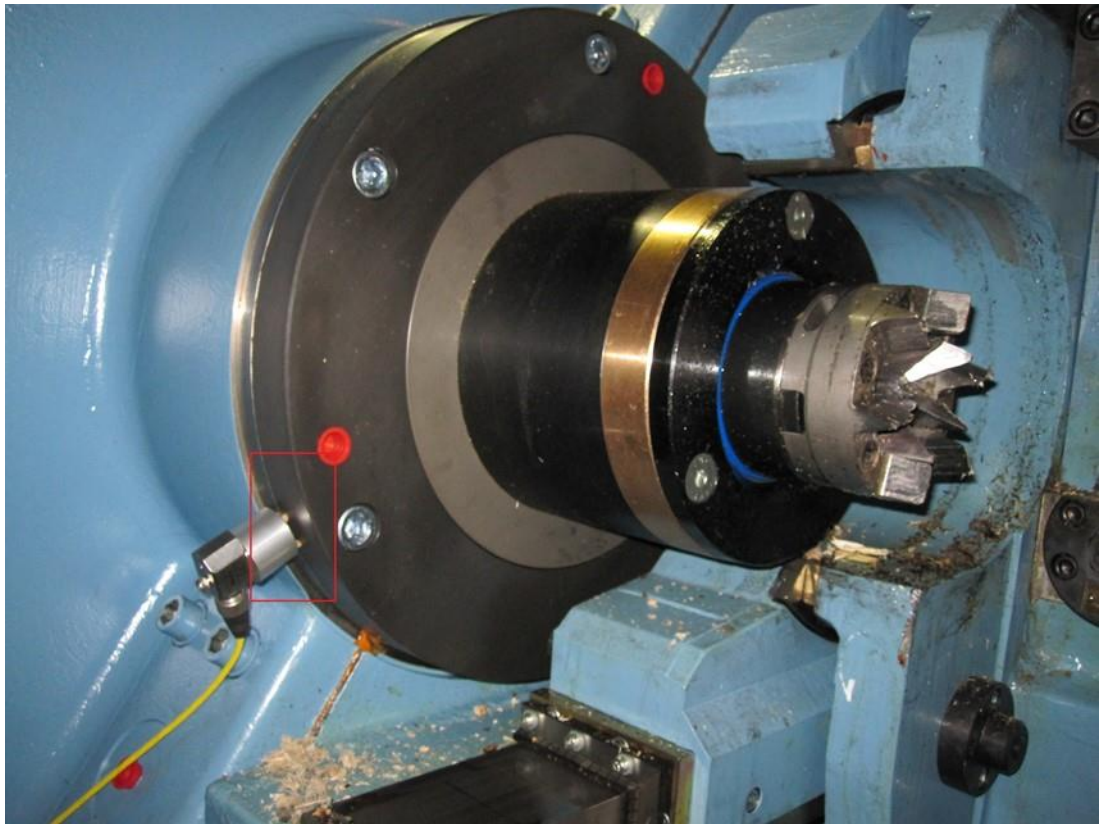


KUVA 6. Karan ulkopuoli, käyttöpää, SORVIKAU05S

Kara-akselin ulkopuolisen rullalaakerin mittauspiste voidaan sijoittaa myös kuorman puolelle alaviistoon. Liitteessä 4 nähdään mittauspisteen sijainti DC-moottorin suunnasta katsottuna. Mittauspiste sijaitsee laakerin laipassa, joka parantaa mittauksen tarkkuutta. Laipan pulttikiinnitykset

tulee huomioida anturin kiinnitysreikää tehtäessä. Vastaava mittauspiste käytettävässä päässä voidaan nimetä: SORVIKAU09S.

Kara-akselin sisäpuolisten rullalaakerien (KUVA 7) antureille voisi olla järkevää suunnitella suoja Pellit, koska anturit ovat lähellä pölliä sorvaustilanteessa. Suojat auttaisivat erityisesti pöllin hajotessa, jolloin hajonneen pöllin kappaleet saattaisivat vahingoittaa anturia tai sen kaapelia. SORVIKAS08S-lyhenne tarkoittaa käytettävän päädyn mittauspistettä.



KUVA 7. Karan sisäpuoli, käyttöpää, SORVIKAS06S

Kuvasta 8 nähdään ala-akselin keskilaakerin mittauspiste. Kyseisen laakerin kohdalla värähtelymittaus pystytään suorittamaan suoraan laakerista, mikä varmistaa mittaustuloksen luotettavuuden. Mittausanturi sijaitsee suoja Pelltien alla, jolloin kaapelille on suunniteltava ulostuloreitti. Ratkaisuksi voi riittää suoja Pellin reunaan tehtävä viiste kaapelia varten.



KUVA 8. Ala-akselin keskilaakeri, SORVIAAK07S

Teräpenkin käyttöpään planeettaruuvin (KUVA 9) ja käytettävän pään planeettaruuvin, SORVIPRK14P (LIITE 5) mittauspisteet voidaan sijoittaa ruuvin alapuolelle laakerin kohdalle. Anturia ei välttämättä tarvitse asentaa ruuvin päälle tai sivulle, koska ruuvin rakenteesta johtuen sen pyörimisliike eroaa huomattavasti perinteisestä roottorin pyörimisestä, jonka takia samanlaista kuormitusvyöhykettä ei muodostu.



KUVA 9. Planeettaruuvi käyttöpää, SORVIPRK13P

Kuvassa 10 on pyörivän vastaterän laakerien yksi mittauspiste. Kuvaan ei ole merkitty useampia merkintöjä, jotta kuvasta ei tulisi epäselvä. Vastaterän neulalaakerien yksi mittauspiste nähdään myös liitteessä 6. Mittauspisteet sijaitsevat teräpenkin rungon takaosassa, jossa ovat myös laakerien voitelukanavat. Voitelukanavaletkuja voidaan käyttää kaapelivetojen kiinnityksissä hyödyksi. Vastaterien mittauspisteiden ja laakerien välillä on kolme rajapintaa, kiinnityspiste mukaan lukien, koska teräpenkin ja laakeripukkien välissä on kiinnityslevy. Tämä hieman heikentää korkeiden taajuuksien mittaamista, jolloin ruuvikiinnitys on ainoa vaihtoehto teräpenkin anturien kiinnittämiseen.

Anturien kiinnittäminen suoraan laakeripukkeihin ei ole mahdollista, koska ne sijaitsevat erittäin lähellä pölliä sorvauksen aikana. Pöllin hajotessa anturit voisivat vahingoittua. Koneistukset voidaan tehdä jokaisen laakerin kohdalle, vaikka mittaasantureita ei jokaiseen pisteeseen

tehdasasennuksena asennettaisikaan. Tyhjäksi jäävät kiinnityspisteet mahdollistavat anturien määrän lisäämisen tai mittauspisteiden vaihtamisen teräpenkissä.



KUVA 10. Vastaterän mittauspisteet, SORVIVAT15V

Jos valittava mittausjärjestelmä sisältää 16 mittauskanavaa, ei vastaterien valvontaan ole mahdollista sijoittaa kuin kolme värähtelyanturia. Tässä tapauksessa voisi olla järkevää sijoittaa anturit ulommaisten ja keskimmäisen laakerin kohdalle.

#### 6.5 Anturit, asennus ja kaapelointi

Mittauspisteisiin voidaan sijoittaa kiihtyvyyssanturit, joiden herkkyys mittausalueella on 100 mV/g. Herkkyystaso on yleisesti käytetty, ja herkemmän anturin käytöllä ei saavutettaisi suurta hyötyä.

Kiihtyvyyssanturin valintaa puoltaa sen laaja taajuusalue muutamasta

hertsistä jopa yli 10 kHz:iin. Kiihtyvyyssanturin etuna on myös se, että mittaussuureena voidaan käyttää kiihtyvyyttä tai nopeutta.

Jokaiseen mittauspisteeseen on suositeltavaa valita anturi sivuliittimellä, jolloin varmistutaan siitä, ettei kaapeleihin tule liian tiukkoja taivutussäteitä ja anturi on mahdollista asentaa jokaiseen mittauspisteeseen. Esimerkiksi testimittauksissa käytetty kiihtyvyyssanturi CMSS2200:n herkkyys on 100 mV/g, mittausalueen huippuarvo 80 g:tä ja kaapeliliitin on sivulla. Anturin kuoren pitää olla hermeettisesti suljettu, jotta se kestää likaisia ja kosteita olosuhteita. Anturin lämmönkesto ei muodostu ongelmaksi missään mittauspisteessä, mittauspisteiden pintalämpötilat eivät normaalin toiminnan aikana ylitä 120 °C:ta.

Jokaiseen mittauspisteeseen on mahdollista tehdä tarvittavat koneistukset vaarnaruuvikiinnitystä varten. Koneistuksessa on huomioitava materiaalin paksuus, jotta ruuvi pystytään kiinnittämään rakenteeseen. Koneistus on tehtävä luvussa 5.6.1 esitellyllä tavalla. Anturin kiinnityksessä on varmistettava, ettei ruuvi jää ”kantamaan”, jolloin anturi ei painaudu kunnolla rakenteen pintaan kiinni. Asennuksessa anturin ja rakenteen pinnan väliin on suositeltavaa sivellä ohuelti öljyä, jotta kontaktin laatu saadaan varmistettua.

Kaapelointi tulee suorittaa hyvän asennustavan mukaisesti, luvussa 5.7 esiteltyjen periaatteiden mukaisesti. Kaapelien kiinnitykset on tehtävä huolellisesti, jottei anturiin ja sen liittimeen kohdistu ylimääräistä räsitusta. Teräpenkin vastaterien anturien kaapelointi on suoritettava laadukkaalla ja taipuisalla kaapelilla, koska kiinteä johdinasennus ei ole mahdollinen teräpenkin liikkeen vuoksi.

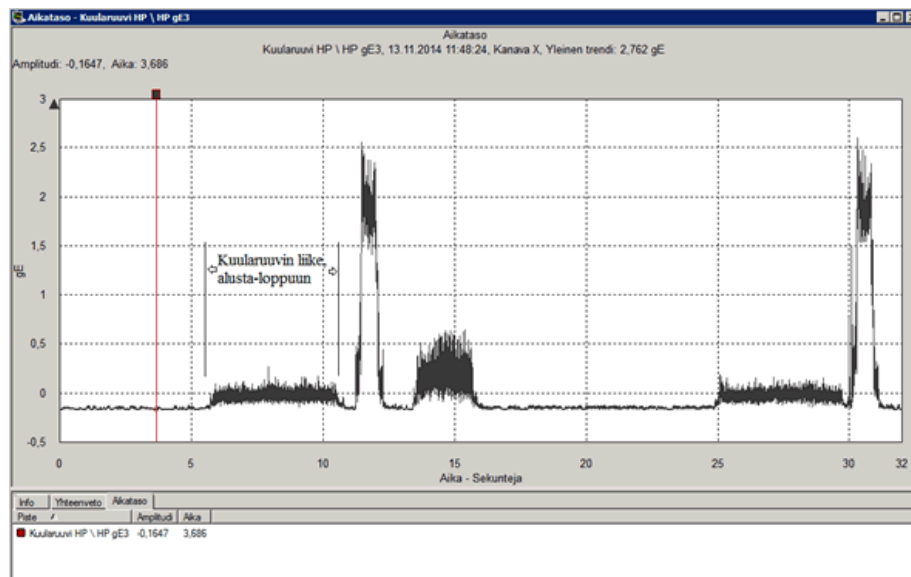
## 6.6 Mittausajon määrittely

Sorvin mittausajot on suoritettava ilman kuormaa, eli täydellä kierrosnopeudella ilman pöllä. Pöllin sorvaus mittauksen aikana aiheuttaisi mittaussignaaliin liikaa taustakohinaa, koska pöllin muoto, tiheys ja muut fyysiset ominaisuudet vaihtelevat.

Mittaukset on pyrittävä suorittamaan aina samankaltaisissa olosuhteissa mittausten vertailukelpoisuuden takia. Sorvin öljyjen on oltava normaaleissa käyttölämpötiloissa, jolloin mittauksia ei kannata tehdä ”kylmäkäynnistyksen” yhteydessä, ellei tästä haluta erillistä mittaustietoa. Tämä seikka voidaan huomioida ohjelmallisesti siten, että värähtelymittausnäytteisiin liitetään öljyn lämpötilalukema, jolloin näytteiden vertailukelpoisuutta voidaan vertailla.

Värähtelymittaukset voidaan jakaa kolmeen osaan: teräpenkin planeettarullaruuvit, pyörivä vastaterä ja muut laakerit. Lisäksi mittauksia voitaisiin tehdä koneen kaikkien toimilaitteiden toimiessa, jolloin nähtäisiin mahdolliset resonanssit. Suorittamalla mittaukset kolmessa osassa, saadaan värähtelyn taustakohinaa vähennettyä, jolloin värähtelysignaalin analysointi helpottuu.

Teräpenkkiä liikuttavien planeettarullaruuvien mittaukset voidaan suorittaa ajamalla teräpenkki ääriasennosta toiseen, jolloin verhoikärspektristä voidaan seurata ruuvien värähtelyä. Kuviossa 12 nähdään noin 6 – 11 sekunnin ajankohdassa ruuvien värähtely teräpenkin liikkeen aikana. Noin 12 sekunnin kohdalla esiintyvä korkea värähtelypiikki syntyy teräpenkin pikaliikkeestä. Tämän jälkeen on teräpenkin paluuliikkeen signaali.



KUVIO 12. Viilusorvin teräpenkin hoitopuolen planeettarullaruuvien verhoikärspektri (Hänninen 2015a)

Pyörivän vastaterän värähtelymittaus voidaan suorittaa myös omana mittauksenaan. Vastaterien mittaus suoritetaan täysillä kierroksilla, jolloin terien pyörimisnopeus on noin 830 rpm. Muiden valvottavien komponenttien mittaus voidaan suorittaa samalla kerralla pääkäytön vakiokierrosnopeudella 1500 rpm.

## 7 YHTEENVETO

Tämän työn aiheena on viilusorvin kunnonvalvonta-anturoinnin suunnittelu. Työn tarkoituksena oli suunnitella kunnonvalvonta-anturointi viilusorvin kriittisimmille laakereille. Tärkeimpinä tavoitteina oli määrittää mittauspisteet ja anturityypit.

Tutkimukseen saatiin mielenkiintoista näkökulmaa värähtelymittauksilla. Värähtelymittaukset suoritettiin SKF:n asiantuntijoiden toimesta. Mittauksista saatiin hyvää kokemusta ja dataa tutkimuksen tueksi. Kokemusperäistä tietoa saatiin asentajilta ja esimiehiltä, jotka ovat tekemisissä koneiden värähtelyjen kanssa. Käytännön mittausten lisäksi teoriatietoa haettiin standardeista, alan kirjallisuudesta ja internetistä. Värähtelymittauksista löytyi tietoa melko hyvin. Muutemassa käyttämässäni lähteessä oli lähes kaikki työhön tarvittava materiaali. Ehkäpä vieraskielisiä lähteitä olisi voinut hankkia enemmän.

Sain toimeksiannon opinnäytetyöhön loka-marraskuussa 2014. Tämän jälkeen aloin tutustumaan aiheeseen ja keräämään tausta-aineistoa. Marraskuussa suoritettiin käytännön värähtelymittaukset, joiden pohjalta lähdin kokoamaan tarkempaa suunnitelmaa. Opinnäytetyön tekeminen ei ollut tarkalleen aikataulutettua, mikä toi rentoutta tekemiseen. Selkeiden välitavoitteiden asettaminen olisi kuitenkin saattanut selkeyttää prosessin etenemistä.

Työ oli kokonaisuudessaan melko haastava. Itse opin paljon kunnonvalvonnan värähtelymittauksista. En ollut aiemmin paljoakaan lukenut tai muuten käsitellyt aiheetta, joten uutta asiaa tuli paljon. Useisiin asioihin sai kuitenkin apua aiemmista opinnoista. Mielestäni kunnonvalvontaa tulisi lisätä opetuksessa, koska se on lähes jokaisen teollisuusyrityksen arkipäivää ja sen rooli on tärkeä.

Raute voi hyödyntää suunnitelmaa värähtelyanturointi järjestelmän hankinnassa ja toteutuksessa. Työssä on myös suhteellisen kattava teoria alustus, josta kunnossapitohenkilöstö saattaa löytää uusia näkökulmia ja vinkkejä kunnonvalvontaan.

Luonnollinen jatkokehitys tälle työlle olisi siirtyä toteuttamaan sitä käytännön tasolla. Jatkokehitys voisi sisältää värähtelyvalvontajärjestelmän komponenttien tarkan määrityksen sekä niiden hankinnan. Sitä ennen mekaniikkapiirustukset olisi päivitettävä anturointien osalta, jotta asennus olisi mahdollinen. Järjestelmän asentamisen jälkeen työtä voidaan jatkaa käyttöönottovaiheeseen, jossa säädetään mittausasetukset ja kalibroidaan anturit. Järjestelmän toimintaa olisi seurattava järjestelmällisesti ja analysoitava, toimiiko järjestelmä parhaalla mahdollisella tavalla.

Työn lopputuloksena saatiin käyttökelpoista tietoa viilursorvin värähtelymittauksista sekä alustava suunnitelma värähtelyanturoinnin toteutukselle. Työn tärkein tavoite, mittauspisteiden määrittäminen, toteutui mielestäni hyvin. Lisäksi tärkeimmän tavoitteen ympärille saatiin koottua suhteellisen kattavasti tietoa värähtelymittauksissa huomioitavista asioista. Tutkimuksen pohjalta Raute voi alkaa toteuttamaan ja tuotteistamaan kiinteää värähtelyanturointia tulevaisuudessa myytäviin viilursorveihinsa.

## LÄHTEET

GE Energy Ltd. 2014. Beginner's Guide. Machine Vibration. GE Energy [viitattu 7.1.2015]. Saatavissa:

[http://www.commtest.com/training\\_services/training\\_materials](http://www.commtest.com/training_services/training_materials)

Hänninen, P. 2015a. PdM Engineer. Oy SKF Ab. Demomittaukset [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Nirkko, T. Lähetetty 10.2.2015.

Hänninen, P. 2015b. PdM Engineer. Oy SKF Ab. Rauten viilusorvi [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Nirkko, T. Lähetetty 24.3.2015.

Koponen, H. 1995. Puulevytuotanto. Opetushallitus. Saarijärvi: Gummerus Oy Kirjapaino.

Lahten kaupunginmuseo. 2007. Kuka, Mitä, Lahti [viitattu 23.3.2015].

Saatavissa: <http://www.lahdenmuseot.fi/kuka-mita-lahti/lahden-historia/teollisuuskaupunki/metalliteollisuus-sotien-jaelkeen/>

Mikkonen, H. (toim.) 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Kunnossapidon julkaisusarja n:o 13. Helsinki: KP-Media Oy.

Moubray, J. 1997. Reliability-centered Maintenance. 2. painos. New York: Industrial Press Inc.

Nohynek, P. & Lumme, V. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki: KP-Media Oy.

PSK 5701. 2011. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5702. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5703. 2006. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5705. 2006. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5706. 2002. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5707. 2011. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5708. 2003. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

Raute Oyj. 2007. Vuosikertomus 2007. Vuosikertomus.

Raute Oyj. 2014. Tietoa Rautesta [viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: <http://www.raute.fi/fi/tietoa-rautesta>

Raute Oyj. 2015. Tilikausiluvut. Tuloslaskelma, tase, rahavirtalaskelma ja taloudellinen kehitys 2007–2014 [viitattu 17.4.2015]. Saatavissa: <http://www.raute.fi/fi/avainluvut1>

SFS-EN 13306. 2010. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia [viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/DownloadServlet?action=getFile&productId=240922&forContract=10215>

SFS-ISO 5348. 2012. Mechanical vibration and shock. Mechanical mounting of acclerometers [viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: <http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/DownloadServlet?action=getFile&forContract=10215&productId=246483>

Vesterinen, M. 2014. Viilusorvin toimintakuvaus. Raute Oyj. Intranet.

LIITTEET

LIITE 1. Testimittausten perusteella lasketut tärinärasitusarvot

TESTIMITTAUSTEN PERUSTEELLA MÄÄRITETYT TÄRINÄRASITUS ARVOT VIILUSORVILLE

PSK 5705:n mukaan

	MITTAUSPISTE	TEHOLLISARVO, RMS	KESKIHAJONTA	HUOMAUTUSRAJA	VAROITUSRAJA	VAURIORAJA	mm/s	Näyte lkm
1	DC-Moottori	0,508	0,188	1,073	1,190	2,409	mm/s	21 kpl
2	Ala-akselin ulko	0,687	0,019	0,743	1,136	2,784	mm/s	12 kpl
3	Ala-akselin sisä	0,365	0,088	0,630	0,760	1,636	mm/s	14 kpl
4	Kara ulko	0,146	0,052	0,301	0,337	0,687	mm/s	10 kpl
5	Kara sisä	0,913	0,120	1,272	1,700	3,891	mm/s	7 kpl
6	Painelaakeri	0,173	0,053	0,332	0,383	0,799	mm/s	10 kpl
7	Vastaterä	0,120	0,103	0,429	0,398	0,686	mm/s	23 kpl
8	Kuularuuvi KP	0,581	0,068	0,786	1,066	2,460	mm/s	20 kpl
9	Kuularuuvi HP	0,254	0,044	0,385	0,494	1,103	mm/s	22 kpl
10	Keskilaakeri	17,119	2,898	-	-	-	mm/s	21 kpl

**LASKUKAAVAT:**

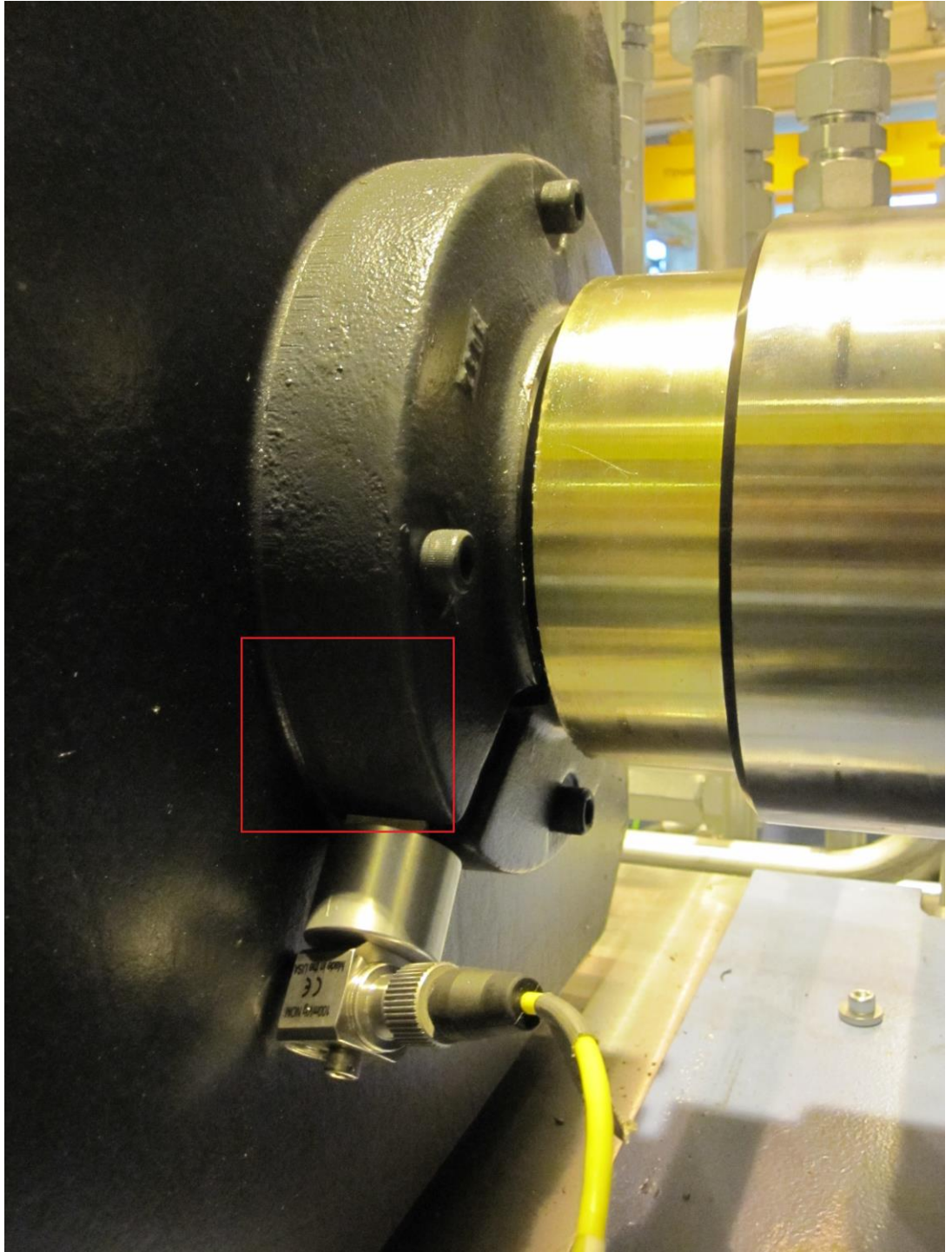
Huomautusraja = keskiarvo + 3 x keskihajonta

Varoitusraja = 1,6 x keskiarvo + 2 x keskihajonta

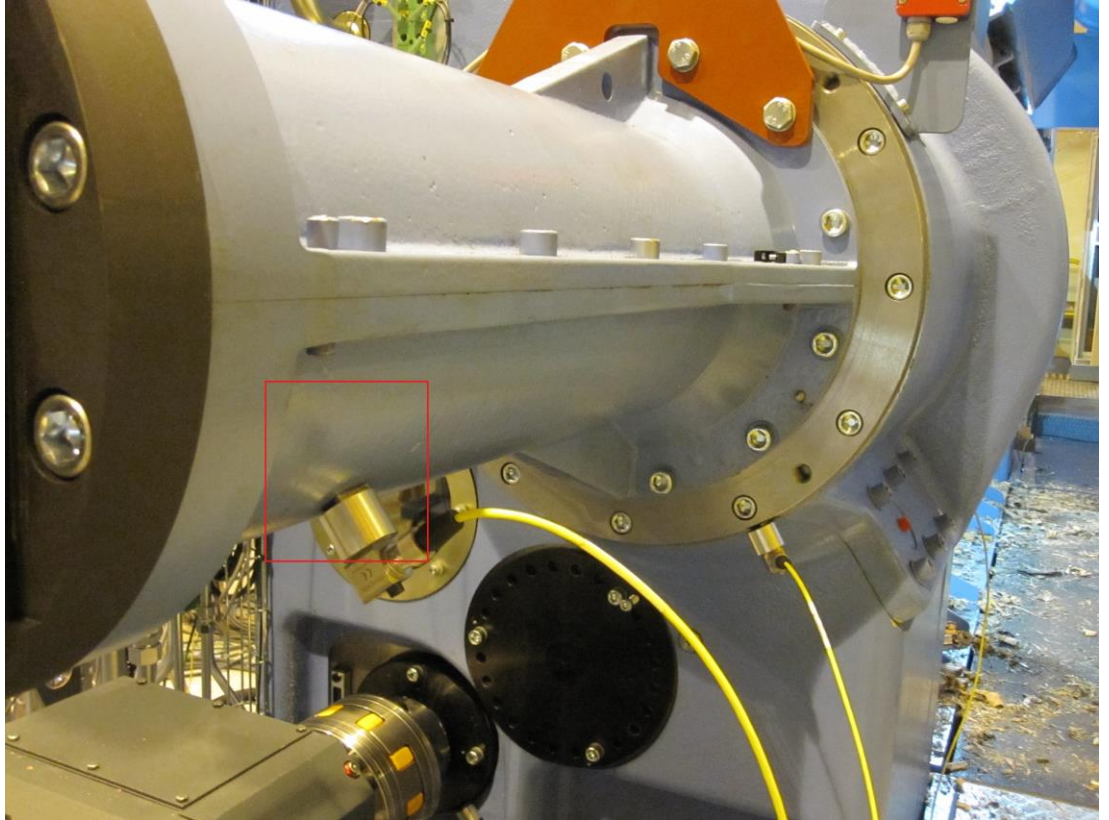
Vaurioraja = 4 x keskiarvo + 2 x keskihajonta

Näyte lkm, kertoo kuinka monta mittausta laskennassa on käytetty.

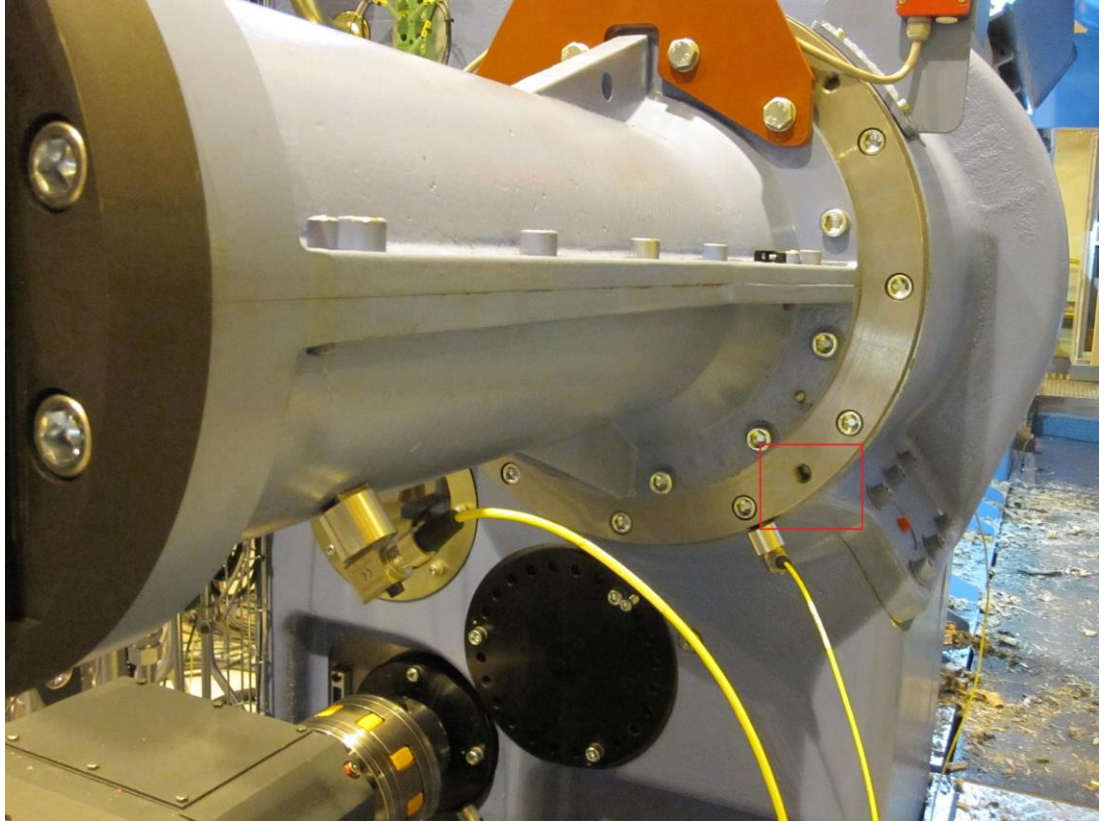
LIITE 2. DC-Moottorin mittauspiste, SORVIDCM01S



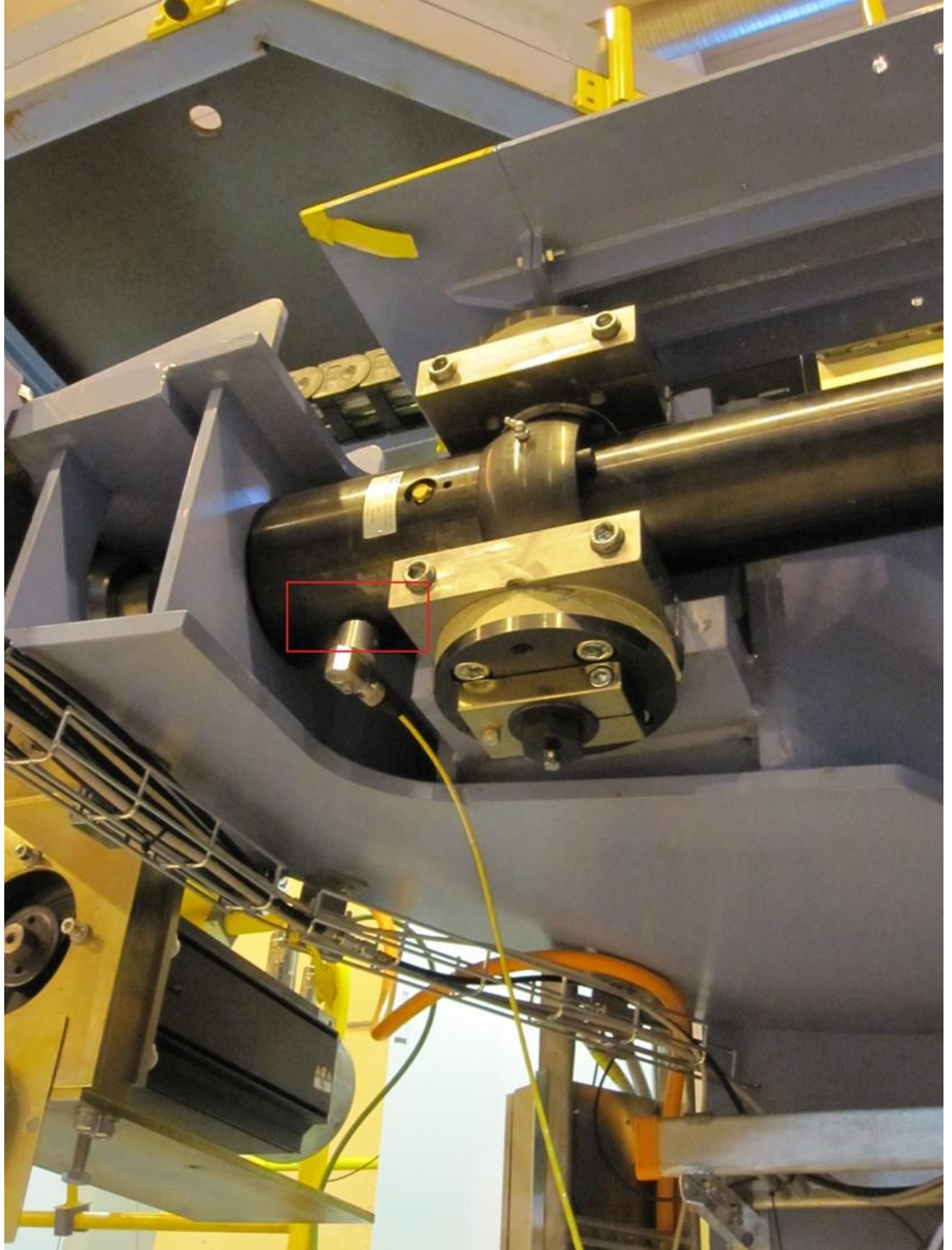
LIITE 3. Karan painelaakerit, käyttöpää, SORVIKAP04S



LIITE 4. Karan ulkopuoli, käyttöpää, SORVIKAU05S



LIITE 5. Planeettaruuvi käytettävä pää, SORVIPRH14P



LIITE 6. Vastaterän mittauspiste, SORVIVAT15V

