

SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikka, Lappeenranta  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tuotantotekniikan ja kunnossapidon sv.

Teemu Voutilainen

## **MEESAUUNIN KUNNONVALVONTA**

Opinnäytetyö 2011

## TIIVISTELMÄ

Teemu Voutilainen

Meesauunin kunnonvalvonta 112 sivua, liitteitä 1

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotantotekniikka ja kunnossapito

Opinnäytetyö 2011

Ohjaajat: lehtori Heikki Liljenbäck, ennakkohuoltoinsinööri Mika Kolehmainen

Oy Botnia Mill Service Ab

Meesauunin välittömästi korjausta vaativissa rikkoutumistilanteissa voi aiheutua suuria kustannuksia muun muassa varaosien, työn, turvallisuuden ja ostokalkin ajettavuusongelmien takia. Meesauunin isoille ja kalliille sähkömoottoreille, vaihteille ja liukulaakereille ei useinkaan ole varaosaa saatavilla omalta paikkakunnalta. Kohdetta käyttävänä laitteena moottoreiden ja vaihteiden toimintakunto ja sen havainnointi ovat kriittisiä kohteen luotettavan toiminnan kannalta. Tämän lisäksi suurikokoisten kannatusrullien liukulaakereiden valvonta on tärkeää.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Botnian Joutsenon tehtaalla Botnia Mill Servicen toimeksiantona. Työn tavoitteena on löytää ratkaisu meesauunin käynninaikaiseen kunnonvalvontaan. Nykyiseen Acutest-kunnonvalvontajärjestelmään ei löydy enää varaosia ja sen modernisointi on kallis investointi. Tämän takia tuli tarvetta vertailla eri toimittajien tarjoamia kiinteitä kunnonvalvontajärjestelmiä. Tarjoukset pyydettiin Metsolta, Andritzilta ja SKF:ltä. Kirjallisuusosion tiedot olen hankkinut kirjalähteistä, opinnäytetöistä, toimittajilta sekä haastatteleamalla Botnia Mill Servicen työntekijöitä.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään ensin, miten meesauuni liittyy selluntuotantoprosessiin. Tämän jälkeen selvitetään meesauunin perustoimintaperiaatteet ja rakenne. Seuraavaksi tutustutaan laajasti värähtelyn valvontamenetelmiin ja lyhyesti muihin kunnonvalvontamenetelmiin, kuten öljyanalyysit ja sähkömoottorin monitorointi. Seuraavaksi käydään läpi meesauunin nykyinen kunnonvalvontastrategia ja tutustutaan toimittajien tarjouksiin. Toimittajien tarjouksia pohditaan Työn tulokset -luvussa yleisellä tasolla. Tärkeimmät työn tulokset ovat toimittajilta saadut tarjous- ja esittelymateriaalit, joiden pohjalta on mahdollista tarkemmin vertailla eri järjestelmiä keskenään.

Asiasanat: meesauuni, kunnonvalvontajärjestelmä, mekaaninen värähtely, akustinen emissio

## ABSTRACT

Teemu Voutilainen

Condition monitoring system for a pulp mill lime kiln 112 pages, 1 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Degree Programme in Mechanical Engineering

Production technology and Maintenance

Bachelor's Thesis 2011

Instructors: Mr Heikki Liljenbäck, Saimaa UAS, Mr Mika Kolehmainen, Preventive Maintenance Engineer, Oy Botnia Mill Service Ab

A lime kiln is an equipment that produces burnt lime from lime mud. Burnt lime is used as supporting chemical in sulphate process. The lime kiln consists of a horizontally slightly inclined tube and the supporting structures of the tube. While operating, the lime kiln is rotated longitudinally around its axis. This rotating kiln is supported by support rollers, which are traditionally supported by journal bearings.

Real-time proactive condition monitoring and diagnostics are a big part of the plant management nowadays. The customer wants to obtain additional information about online condition monitoring systems suitable for their lime kiln because the current Acutest-system spare parts are no longer available. Metso, Andritz, and SKF were asked to suggest a suitable condition monitoring control system for the motors, gears and support rollers of the lime kiln. Information was acquired from books, theses, and suppliers. In addition, information was also acquired by interviewing the employees of Botnia Mill Service.

First, this thesis examines how the lime kiln fits within wood pulp production process. After that the structure and functioning method of a lime kiln are described. Next, it widely introduces vibration monitoring methods and briefly other techniques, such as oil-analysis and electric motor-monitoring. Finally, the current condition control strategy of the lime kiln is introduced. Suppliers' offers are examined and then compared with each other. Suppliers' offers are discussed in the chapter called 'Results'. The most important results of the thesis are the received demonstration materials and suppliers' offers which allowed further comparing of different systems with each other.

Keywords: lime kiln, condition monitoring system, mechanical vibrations, acoustic emission

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	YRITYSESITTELY .....	8
2.1	Oy Botnia Mill Service Ab .....	8
2.2	Oy Metsä-Botnia Ab .....	9
3	SELLUNTUOTANTOPROSESSI .....	10
3.1	Kuitulinja .....	11
3.2	Talteenotto .....	11
3.3	Meesauuni ja siinä tapahtuvan prosessin kuvaus .....	12
4	TEKNINEN KUVAUS MEESAUUNISTA .....	14
4.1	Tekniset tiedot ja rakenne .....	14
4.2	Kantokehät ja kantopyörät .....	15
4.3	Aksiaaliturkilla .....	18
4.4	Käyttökoneisto .....	19
5	KUNNONVALVONTA .....	22
5.1	Kunnonvalvonnan ja kunnossapidon yhteys .....	27
5.2	Kunnonvalvontatarpeen määrittely .....	28
6	VÄRÄHTELYMITTAUSMENETELMÄT .....	32
6.1	Värähtelyn suureet, anturit ja mittayksiköt .....	33
6.2	Anturin kiinnitystapa ja mittauspisteen valinta .....	36
6.3	Kunnonvalvonnan mittalaitteet ja online-järjestelmät .....	38
6.4	Kunnonvalvonnan diagnostiikka .....	44
6.4.1	Vierintälaakerien diagnostiikka .....	45
6.4.2	Liukulaakerien diagnostiikka .....	50
6.5	Valvontamenetelmät .....	54
6.5.1	Tunnuslukuvalvonta .....	54
6.5.1.1	Värähtelyn kokonaistasovalvonta .....	55
6.5.1.2	Taajuustason tunnusluvut .....	55
6.5.1.3	Aikatason tunnusluvut .....	55
6.5.2	Aikatasovalvonta .....	56
6.5.3	Profiilivalvonta .....	56
6.5.4	Spektrivalvonta .....	58
6.5.5	Kepstrivalvonta .....	60
6.5.6	Vektorivalvonta .....	60
6.5.7	Verhokäyrävalvonta .....	61
6.5.8	PeakVue™ -menetelmä .....	62
6.5.9	Akselin aseman ja ratakäyrän valvonta .....	65
6.5.10	Vaihekulman ja vaihe-eron valvonta .....	66
6.5.11	SEE Technology™ -menetelmä .....	67
6.5.12	Ääni ja ultraääni .....	68
6.5.13	Akustinen emissio (AE) .....	68
6.5.14	Iskusysäysmenetelmä (SPM) .....	69
7	MUITA KUNNONVALVONTAMENETELMIÄ .....	71
7.1	Öljyanalyysit ja voitelujärjestelmän kunnonvalvonta .....	71
7.2	Lämpötilamittaus .....	73

7.3 Sähkömoottorin monitorointi.....	73
8 MEESAUUNIN KUNNONVALVONTA .....	77
8.1 Acutest-kunnonvalvontajärjestelmä.....	79
8.2 Kiinteää kunnonvalvontajärjestelmää toimittavien yritysten tarjoukset ....	85
8.2.1 Andritzin Acutest-järjestelmän uusinta.....	85
8.2.2 Metson tarjoama värähtelyjärjestelmä .....	91
8.2.3 SKF:n tarjoama värähtelyjärjestelmä .....	93
9 TYÖN TULOKSET .....	97
9.1 Andritzin järjestelmä .....	97
9.2 Metson järjestelmä .....	98
9.3 SKF:n järjestelmä .....	101
9.4 Kiihtyvyyssanturien soveltuvuus kantopyörille.....	102
10 YHTEENVETO.....	105
KUVAT .....	108
TAULUKOT.....	109
LÄHTEET.....	110

## LIITTEET

Liite 1 Esimerkkejä eri mittausmenetelmien käytöstä

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin Lappeenrannan Joutsenon kaupunginosassa toimivalle Botnia Mill Servicelle. Botnia Mill Servicen Joutsenon tulosityksikkö vastaa Botnia Joutsenon sellutehtaan kokonaisvaltaisesta prosessilaitteiden kunnossapidosta. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, mitkä kunnonvalvontamenetelmät soveltuvat parhaiten meesauunin sähkömoottoreiden, vaihteiden ja liukulaakeroitujen kannatusrullien kunnan mittaamiseen. Nykyisin meesauunilla on käytössä Andritz Oy:n akustiseen emissioon perustuva Acutest online-kunnonvalvontajärjestelmä. Järjestelmän 1990-luvulla toimitettujen ensimmäisen sukupolven anturien taloudellinen käyttöikä ja uudet varaosat ovat lopussa. Tarvittavia komponentteja ei enää ole saatavana. Nykyisen mittauskoneen (Linux AE -serveri ohjelmistoinen) suuren kuormituksen vuoksi järjestelmän käyttöliittymän käyttäminen on suunnattoman hidasta. Haluttaessa seurata jonkin tietyn laitteen, kuten esimerkiksi pidätinpyörän (aksiaaliturkulan) mittaustulosten trendiä tarkemmin, voi uuden trendi-ikkunan avaamiseen mennä useita minuutteja. Järjestelmään liittyvästä etävalvonnasta kokemukset eivät ole hyviä. Järjestelmästä puuttuu tiettyjä prosessiparametrejä, joiden takia etävalvonta ei ole saanut tarpeeksi informaatiota. Lisäksi järjestelmä ei sovellu sähkömoottoreiden ja hammasvaihteiden aikaisen vian indikointiin. Meesauunin sähkömoottoreille ja hammasvaihteille tehdään neljän viikon välein värähtelymittaukset kannettavalla analysaattorilla, joka on todettu toimivaksi menetelmäksi indikoimaan vioista kyseisessä kohteessa. Värähtelymittauksilla päästään hyvin käsiksi sähkömoottoreiden sähköisiin ja mekaanisiin vikoihin. Yhdessä vaihteessa on noin kaksikymmentä mittauspistettä ja hitaan pyörimisnopeuden vuoksi etenkin toisioakselin pyörimisnopeusalueella mitattaessa on mittausaika pitkä. Meesauunin välittömästi korjausta vaativissa rikkoutumistilanteissa aika on kirjaimellisesti rahaa, sillä jos uuni seisoo päivänkin, aiheuttaa se tehtaalle noin 50 000 - 100 000 euron menetykset (Kuusela & Harjula 2009, 26). Ilman meesauunia kaustisointiprosessiin jouduttaisiin käyttämään ostokalkkia, joka aiheuttaa myös ajettavuusongelmia.

Tavoitteena on löytää sopiva kiinteä kunnonvalvontajärjestelmä liittyen meesauunin käyttöihin ja kannatusrullastoihin. Joutsenon sellutehtaan kuivauskoneella

on SKF:n kunnonvalvontajärjestelmä ja soodakattilalla, massatehtaalla ja meesauunilla on Acutest-kunnonvalvontajärjestelmä. Tulevaisuudessa on tavoitteena, että tehtaalla olisi kaksi kunnonvalvontajärjestelmää. Tämä tarkoittaisi, että Acutest-järjestelmä pysyisi tai tilalle otettaisiin toinen järjestelmä, jolloin siirtymäkaudella olisi mahdollisesti kolme kunnonvalvontajärjestelmää. Aikaisemmin Acutest-järjestelmä mahdollisti soodakattilalla merkittäviä kustannussäästöjä esimerkiksi vakuutusmaksuihin. Lisäksi kunnonvalvontajärjestelmä alensi soodakattilan kunnossapitokustannuksia, johtuen lakien, säädösten ja määräysten tuomasta mahdollisuudesta vähentää määräaikaista kunnossapitotöitä. Nykyisin nämä kustannussäästöt eivät ole enää kovin merkittäviä. Tämä mahdollistaisi Acutest-järjestelmästä luopumisen kokonaan. Mikäli meesauunille otettaisiin käyttöön uusi kunnonvalvontajärjestelmä ja kokemukset olisivat siitä hyviä, niin massatehtaan laitteet voitaisiin liittää samaan järjestelmään.

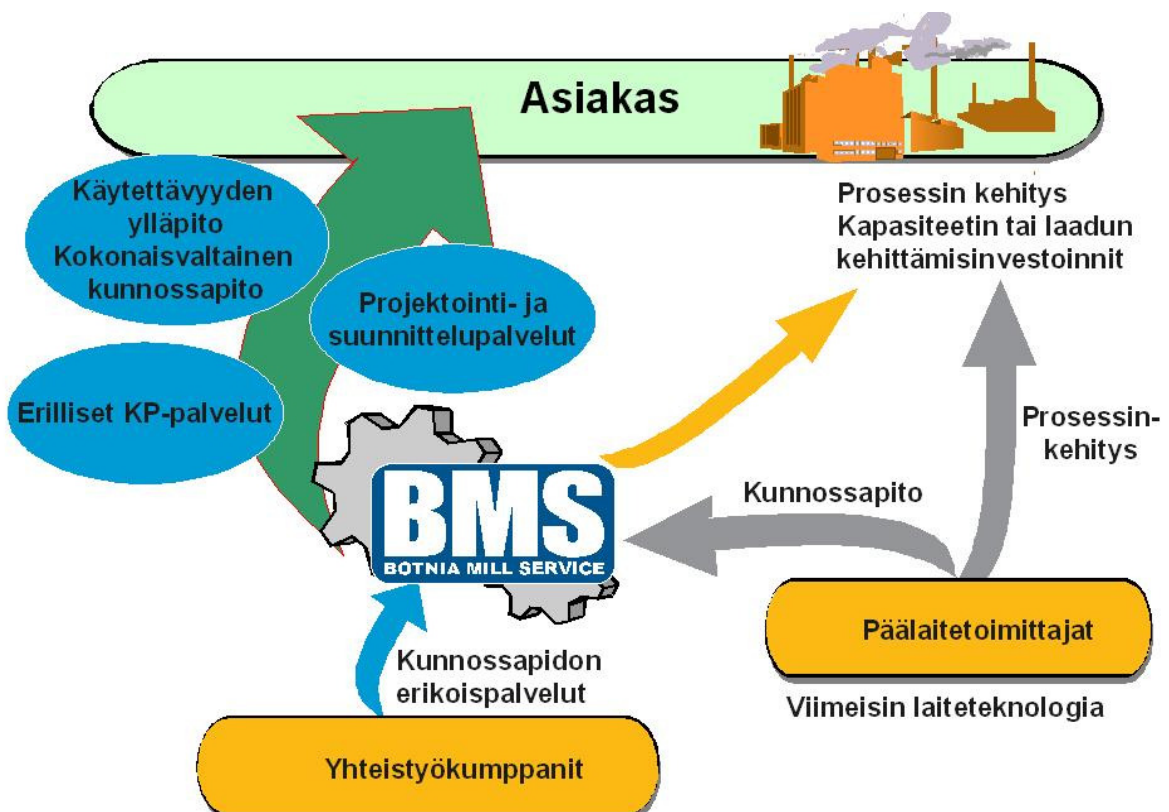
Tämä työ rajataan koskemaan käynninaikaisia kunnonvalvontamenetelmiä. Käynninaikaisen kunnonvalvonnan lisäksi täytyy sähkömoottorin, hammasvaihteen, kannatusrullan ja muiden meesauunin laitteiden tarkastukset suorittaa sopivin välein vuosihuoltojen yhteydessä. Tähän tarkastusväliin vaikuttaa kunnonvalvonnan taso ja sen avulla tehdyt havainnot. Tässä työssä ei käsitellä näitä menetelmiä, joita ovat esimerkiksi silmämääräinen tarkastus, ainetta rikko-mattomat NDT-menetelmät ja linjausmittaukset. Tässä työssä tutustutaan Metson ja SKF:n tarjoamiin kunnonvalvontajärjestelmiin sekä Andritzin tarjoamaan Acutest-järjestelmän uusintaan. Andritzilta ja SKF:ltä pyydetään tarjous, koska heidän järjestelmistään on tehtaalla käyttökokemuksia. Metsolta pyydetään tarjous, koska tehtaalla on käytössä DNA-automaatiojärjestelmä, johon Metsolla on tarjota kunnonvalvontajärjestelmä laajenuksena.

Teoria-aineisto on kerätty kirjoista, ammattilehdistä ja Internetistä. Teoriaosassa on perehdytty laajasti värähtelyvalvonta menetelmiin sekä lyhyesti kunnonvalvontaan ja muihin kunnonvalvontamenetelmiin. Työhön liittyvä aineisto on kerätty haastatteluiden ja toimittajien aineistojen (tarjoukset, esitteet) avulla. Toimittajiin on pidetty yhteyttä sähköpostitse, puhelimella ja tapaamisilla.

## 2 YRITYSESITTELY

### 2.1 Oy Botnia Mill Service Ab

Oy Botnia Mill Service Ab on Botnian ja YIT:n vuonna 1997 perustama kunnossapito- ja tehdaspalveluyhtiö, joka kuuluu YIT Teollisuuden palveluiden Kunnossapitopalvelut liiketoimintaryhmään. Botnia Mill Service tarjoaa palveluja metsäteollisuuden kunnossapitoon ja se vastaa Botnian kaikkien Suomen sellu-tehtaiden kokonaisvaltaisesta prosessilaitteiden kunnossapidosta. Botnia Mill Service harjoittaa kunnossapitotoimintaa myös omien tehtaiden ulkopuolella ja näin ollen pystyy paremmin käyttämään koko kapasiteettiaan. Palveluvalikoimaan kuuluvat kaikki kunnossapito- ja asennuspalvelut sekä projektointi- ja suunnittelupalvelut yksittäisistä työtilauksista kokonaisvastuulliseen teollisuuslaitosten kunnossapitoon (kuva 2.1). (YIT Oyj.)



Kuva 2.1 Botnia Mill Servicen toimintamalli (BMS)



Kuvassa 2.1 nähdään, että edes kunnossapitopalveluita tarjoavan yrityksen ei kannata pitää kaikkea huolto-, korjaus- ja kunnossapitotoimintaa itsellään. Aina-kin harvoin suoritettavien erityisosaamista ja erikoistyökaluja vaativien töiden osalta on usein järkevää hankkia ne yhteistyökumppaneilta sekä laitetoimittajien jälkimarkkinapalveluna.

Henkilöstön määrä yrityksen 8:ssa eri toimipisteessä on noin 500. Joutsenon yksikön pääasiakas on Botnia Joutsenon sellutehdas. Henkilöstön määrä Joutsenon toimipisteellä on noin 50. (Etelä-Saimaa 2010.)

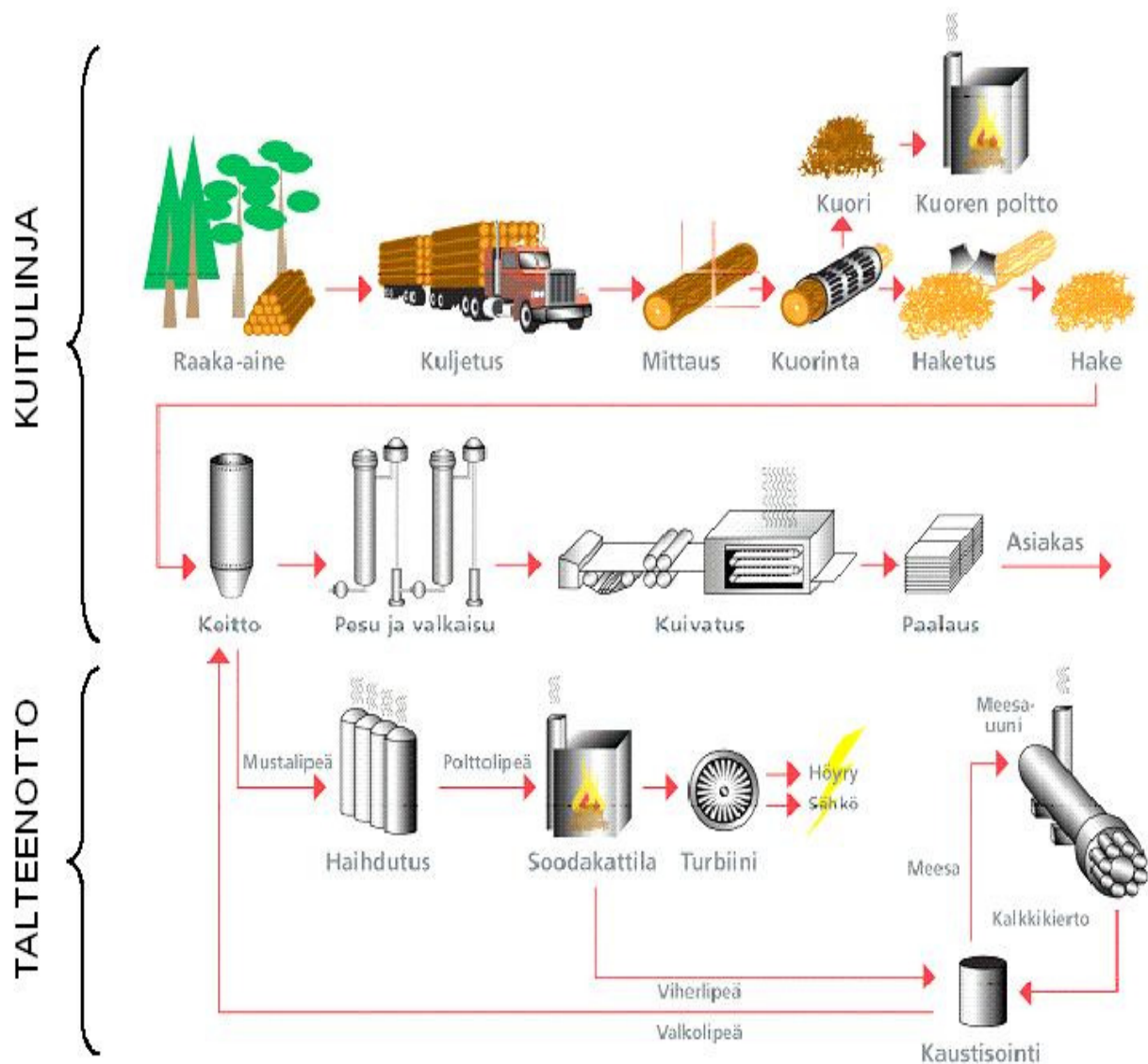
## **2.2 Oy Metsä-Botnia Ab**

Oy Metsä-Botnia Ab – markkinointinimeltään Botnia – perustettiin vuonna 1973. Botnian omistavat M-real Oyj, Metsäliitto Osuuskunta ja UPM-Kymmene Oyj. Botnia valmistaa ECF-valkaistua sellua neljällä tehtaalla Suomessa. Joutsenon, Kemin, Rauman ja Äänekosken tehtaiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 2,4 miljoonaa tonnia. Venäjällä sijaitseva Svir Timberin saha on Oy Metsä-Botnia Ab:n kokonaan omistama tytäryhtiö. (Oy Metsä-Botnia Ab.)

Joutsenon tehtaalla on pitkät perinteet. Saimaan rannalla on tuotettu sellua yli sata vuotta. Tehdas on vuosituhaten vaihteessa rakennettu täysin uudelleen. Uuden kuitulinjan käynnistyttyä vuonna 2001 tehtaasta tuli suurin yksilinjainen havusellutehdas maailmassa. Uusi tehdas hyödyntää tekniikan uusimpia saavutuksia (BAT) ja kuuluu sekä tehokkuudessa että ympäristöasioiden hoidossa maailman parhaimmiston. Tehtaan tuotantokapasiteetti on 650 000 tn/v ECF-valkaistua havusellua. Tehtaan energiaomavaraisuus on 173 %. Henkilöstön määrä tehtaalla on 160. Puunkäyttö on 3,5 miljoonaa kiintokuutiometriä vuodessa täydellä kapasiteetilla. (Oy Metsä-Botnia Ab.)

### 3 SELLUNTUOTANTOPROSESSI

Selluntuotantoprosessi voidaan jakaa kahteen pääosaan (kuva 3.1). Kuitulinjassa puu jalostetaan selluksi. Talteenotossa tuotetaan energiaa keitosta liuenneesta orgaanisesta aineesta ja otetaan talteen kuitujen erotukseen käytetyt keittokemikaalit uudelleen käytettäväksi. (KnowPulp.)



Kuva 3.1 Sellun valmistus (Botnia)

### 3.1 Kuitulinja

Sellun valmistus (kuva 3.1) alkaa puunkäsittelystä, jossa havupuutukkeja kuori-taan ja haketetaan hakekentälle. Täältä raaka-aine jatkaa kuljetinta pitkin seu-lomon kautta keittämölle, jossa keiton tehtävänä on kemikaalien ja lämmön avulla poistaa kuituja sitovaa ligniiniä. Keittämöltä puukuitu jatkaa pesun ja val-kaisun jälkeen kuivaamolle, jossa sellu kuivataan ja paalataan kuljetusta varten. (KnowPulp.)

### 3.2 Talteenotto

Keitosta vapautuva mustalipeä (keitossa reagoinutta valkolipeää, johon on liuennut puun yhdisteitä) johdetaan haihduttamolle, jossa ensisijaisena tehtävä-nä on poistaa mustalipeästä vettä. Tämän jälkeen mustalipeä poltetaan talteen-ottokierron suurimmassa komponentissa, soodakattilassa, jolloin keittokemikaa-lit sulavat soodakattilan pohjalle. Mustalipeän sisältämä orgaaninen puuaines vastaa noin puolta tehtaalle tuodusta puumäärästä. Soodakattilan pohjalta sula johdetaan jäähdytettyä sularänniä pitkin liuotinsäiliöön. Liuotinsäiliössä sula se-koitetaan heikkoon valkolipeään ja muodostuu viherlipeää. Viherlipeä johdetaan valkolipeän eli varsinaisen keittokemikaalit sisältävän lipeän valmistukseen. Kaustisoinnissa viherlipeä reagoi sammutetun kalkin kanssa, jolloin syntyy uutta valkolipeäliuosta. Kaustisoinnissa syntyvä kalkkiliete eli meesa poltetaan mee-sauunissa takaisin kalkiksi, jota käytetään uudelleen kaustisoinnissa. (Know-Pulp.)

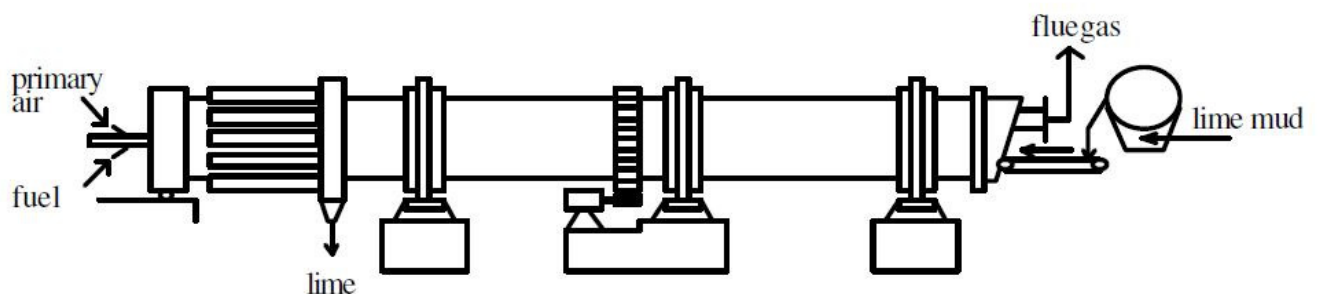
Soodakattilassa kehitetty korkeapaineinen höyry johdetaan turbiiniin, joka pyö-rittää sähköä tuottavaa generaattoria. Turbiinin läpimennyt höyry käytetään pro-cessin eri vaiheiden lämmittämiseen ja kaukolämmön tuottamiseen. Sellutehdas kykenee tuottamaan kaiken tarvitsemansa energian sekä myymään ylijäämä energiaa tehtaan ulkopuolelle. Pääosa energiasta saadaan mustalipeän poltta-misesta soodakattilassa. Lisäksi energiaa saadaan polttamalla kuorta ja joissa-kin laitoksissa jätelietettä kuorikattilassa. Sellutehtaalla meesauuni on ainoa merkittävä ostoenergiaa kuluttava kohde. Meesauunin polttoaineena käytetään

tällä hetkellä pääosin maakaasua tai raskasta polttoöljyä. (Wuorela & Kankkonen 1995; Ekbohm 2003, 14 - 18; Metsä-Botnia 2006, Näyhän 2006 mukaan.)

### 3.3 Meesauuni ja siinä tapahtuvan prosessin kuvaus

Meesauunilla tarkoitetaan polttouunia, jolla kaustisoinnissa syntyvästä meesasta voidaan valmistaa kalkkia. Uunissa meesan lämpötila nostetaan niin korkeaksi (1000 - 1100 °C), että se muuttuu kemiallisesti kalkiksi. Meesan reagoituminen kalkiksi tapahtuu uunin pyörivässä rumpuosassa, joka on loivasti kaltevaan asentoon tuettu putki tai lieriö, joka pyörii paikallaan oman akselinsa ympäri. Rumpu koostuu teräsvaipan sisälle muuratuista eristetiilistä sekä pinnan alumiinioksiditiilistä. Eristetiilien tehtävänä on vähentää uunin lämpöhäviöitä sekä suojata uunin teräsvaippaa ylikuumentumiselta. Pinnan alumiinioksiditiilien tehtävänä on suojata uunia sitä kuluttavilta kemikaaleilta ja polttimen liekiltä. Käytössä olevat uunit ovat pituudeltaan 50 - 130 m ja halkaisijaltaan 2 - 5 m. Vastaavasti kapasiteetti vaihtelee välillä 50 - 600 t kalkkia vuorokaudessa. (Impola 1999; Hiltunen 2009.)

Nykyaikaisilla uuneilla meesa kuivataan savukaasuilla, tarkemmin sanottuna meesa syötetään savukaasuvirtaan, josta se erotetaan sykloonan avulla ja syötetään uuniin. Meesa vierii putken pohjalla syöttöpäästä poltinta kohti ja polttimelta tulevat savukaasut virtaavat putken yläosassa syöttöpäähän, sekä edelleen sähkösuotimelle ja savukaasupesurille (kuva 3.2). (Impola 1999; Hiltunen 2009.)



Kuva 3.2 Meesauunin periaatekuva (Leiviskä, Rauma, Ahola, Juuso, Myllyneva & Alahuhta 1996)

Meesan läpimenoaika uunissa on pitkä, noin 3 - 4 tuntia. Uuniin jouduttuaan meesa ajautuu lämmitysvyöhykkeelle, jossa se lämpenee reaktiolämpötilaan. Uunin poltinpäässä noin neljännes osan uunin pituudesta tapahtuu varsinainen reaktio. (Impola 1999; Hiltunen 2009.)

Uunista poistuva palanut kalkki jäähdytetään uunin poltinpäässä sijaitsevassa sektorijäädyttimessä. Sen sisältämä lämpöenergia otetaan talteen jäädyttämällä se uunin tarvitsemalla palamisilmalla. Uuniin tuleva polttoilma virtaa jäädyttimen läpi vastavirtaan. (Impola 1999; Hiltunen 2009.)

Meesauunin polttimen liekki palaa samassa tilassa, jossa meesa kalsinoidaan (reaktiovyöhyke). Tämän vuoksi polttoaineen tuhka jäännös ja savukaasut vaikuttavat kalkin ominaisuuksiin. Tällä on suuri merkitys polttoaineen valinnan kannalta. Öljyn ja maakaasun käytöllä on pitkät perinteet meesauunin käytössä ja niiden vaikutukset kalkin valmistuksessa tunnetaan hyvin. Polttoaine ja polttoilman määrä vaikuttavat liekin lämpötilaan. Polttimen tehtävänä on sekoittaa polttoaine ja palamisilma mahdollisimman hyvin keskenään, jotta palaminen olisi tehokasta. Mitä korkeampi liekin lämpötila on, sitä korkeampi on tuotantokapasiteetti ja tehokkuus. Liian korkea lämpötila johtaa muurauksen kulumiseen sekä ylipalamiseen. Liekin pituus ja muoto vaikuttavat myös oleellisesti kalkin laatuun. Paras liekin pituus on noin kolme kertaa uunin halkaisijan pituus. Paras liekin leveys on noin 70 % uunin halkaisijasta. (Impola 1999; Hiltunen 2009.)

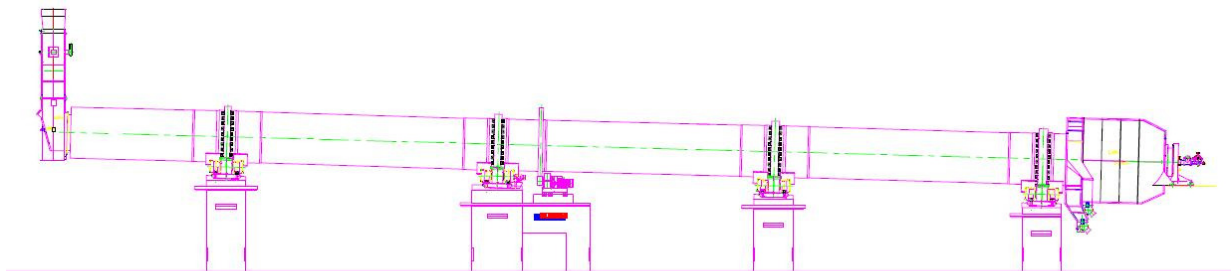
## 4 TEKNINEN KUVAUS MEESAUUNISTA

Tässä luvussa kerrotaan tekninen kuvaus Botnian Joutsenon meesauunista käyttäen lähteenä Ahlstrom Machinery Oy:n meesauunin prosessi-, käyttö- ja huolto-ohjetta.

### 4.1 Tekniset tiedot ja rakenne

Meesauunin vaipan halkaisija on 4,25 metriä ja pituus 115 metriä, kaltevuutta vaipalla on 2,5 %. Materiaalina vaipassa on käytetty S235JRG2 ja 16Mo3 terästä. Vaippa on kasattu hitsaamalla eripaksuisia ja erikokoisia teräslevyjä yhteen, paksuinta levyä on käytetty kannatusrenkaiden kohdalla. Sisäpuolelta vaippa on vuorattu tulenkestävillä tiilillä ja tulenkestävällä massalla. Vaippa on varustettu syöttöpäädyn puolelta syöttösiivillä, jotka ovat 13CrMo44 terästä. Lisäksi vaippa sisältää tarvittavat yhteen ja miesluukut. Vaipan polttopää on supistettu ulostulokynnykseksi, jonka jälkeen on pudotusaukot kalkinjähdyttimeen. 320 tonnia painava vaippa on laakeroitu neljästä kohdasta betonialustaan. Uunin vaipan pintalämpötilaa mitataan kahdella lämpökamerayksiköllä.

Meesauunin kokoonpano (kuva 4.1) käsittää vaipan lisäksi seuraavat osat: 4 kannatusrengasta, 8 kannatusrullaa, hammaskehä, 2 käyttökoneistoa, syöttöpäädyn ja poltinpäädyn. Painoa meesauunilla on noin 600 tonnia ja ajossa ollessa noin 700 tonnia. Meesauunin nimelliskapasiteetti on 575 tonnia poltettua kalkkia vuorokaudessa. Uunin pyörimisnopeus on normaalisti noin 1,0 - 1,5 rpm.

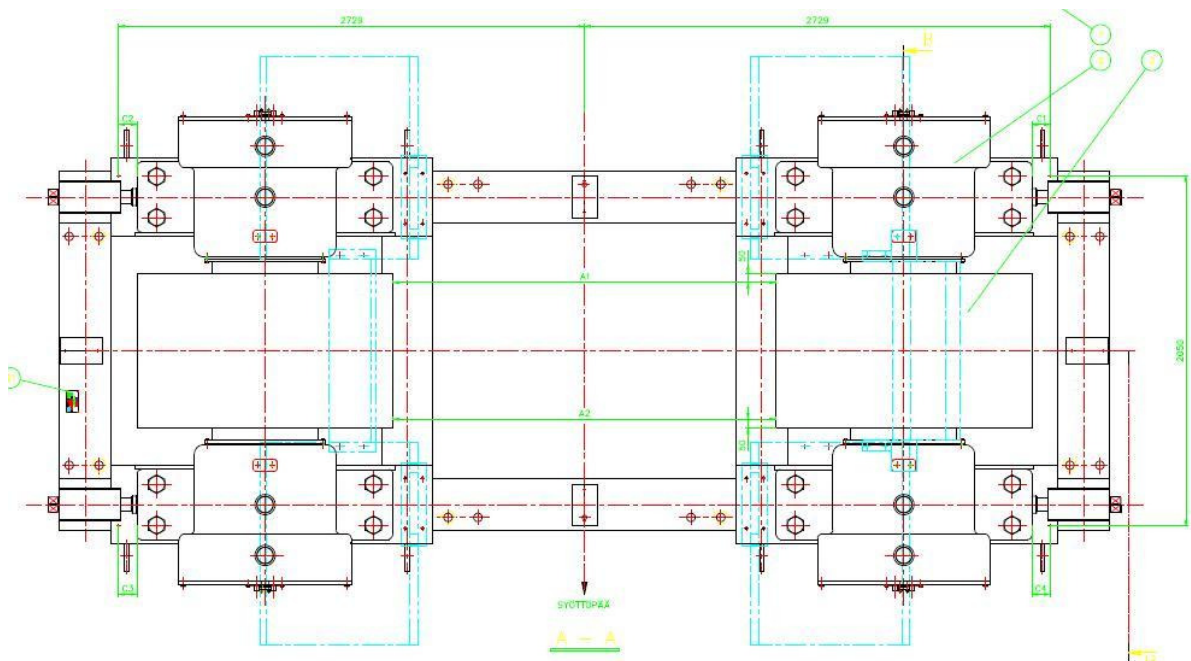


Kuva 4.1 Meesauunin kokoonpano (Ahlstrom 1998)

Polttoaineena uunissa käytetään maakaasua ja varapolttoaineena on kevyt polttoöljy. Myös metanolia voidaan polttaa maakaasun/kevytöljyn yhteydessä. Uunissa poltetaan myös kaustisoinnista ja meesauunin alueelta syntyvät laimeat hajukaasut.

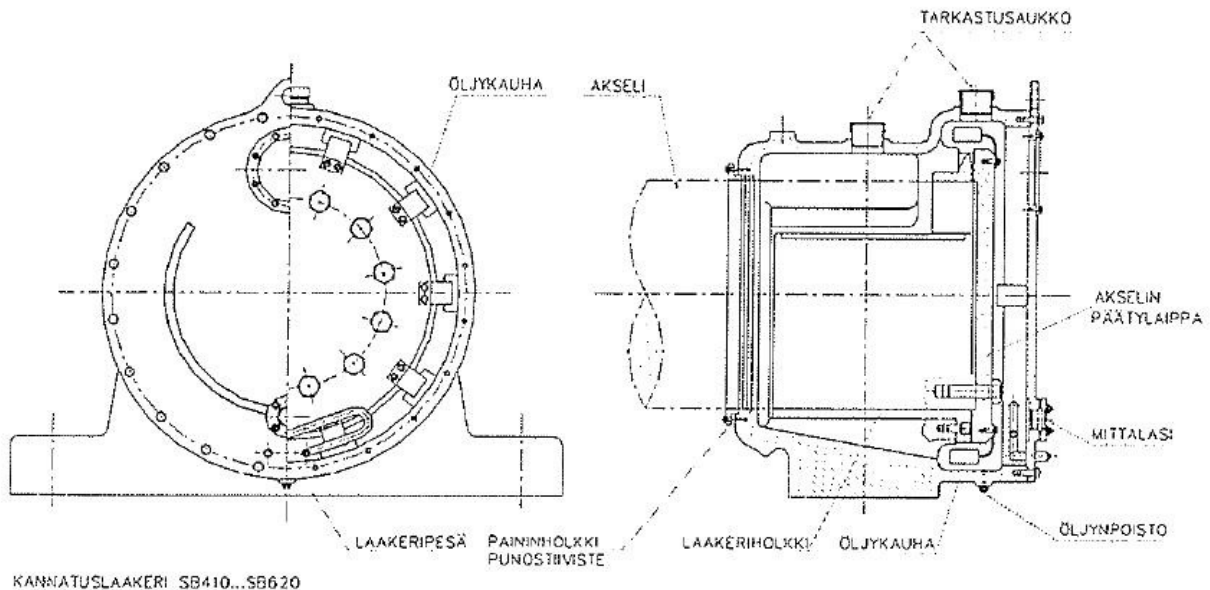
## 4.2 Kantokehät ja kantopyörät

Jokaisen uunin betonialustan kohdalla on uunin vaipassa liukusovitteinen kantokehä. Liukusovite tehdään mahdollisimman ahtaaksi, koska vaipan ja renkaan välyys vaikuttaa voimakkaasti uunin pyöreyyteen ja edelleen muurausten pysyvyyteen. Normaaliväly on käyttölämpötilassa alle 6 mm. Kannatusrenkas välittää uunin painon kannatusrullastoihin ja ylläpitää uunin pyöreyttä tuentapisteessä, jossa rasitus on myös suurin. Renkaan ulko- ja sisäpinnat ovat koneistetut. Vaipassa on renkaan sivuilla tukipalat, joiden avulla se uunin akselin suunnassa pysyy paikallaan. Tukipaloissa on kulutuspinnot, jotka on helppo irrottaa ja vaihtaa. Kannatusrullastojen tehtävänä on ottaa vastaan uunin paino siten, että uuni pääsee samalla pyörimään akselinsa ympäri. Kantokehä lepää kahden kantopyörän päällä. Kuvassa 4.2 on esitetty kantopyörät ylhäältäpäin kuvattuna.



Kuva 4.2 Kantopyörät ylhäältäpäin kuvattuna (Ahlstrom 1998)

Kantopyörät on kiinnitetty teräsalustan avulla betonialustaan. Jokainen ulkopin-  
naltaan koneistettu kantopyörä (8 kpl) on laakeroitu liukulaakerilla kantopyörän  
kummaltakin puolelta. Liukulaakerit uivat osittain öljyssä, mutta voitelua on kui-  
tenkin tehostettu kiinnittämällä akseliin kauhoja, jotka nostavat öljyä laakerin  
päälle. Kuvassa 4.3 on esitetty liukulaakerin osat.



Kuva 4.3 Liukulaakerin osat (Ahlstrom 1998)

Liukulaakerin neljä tärkeätä osaa ovat akseli, laakeriholkki, laakeripesä ja voite-  
luaine. Poltinpään puoleiset liukulaakerit ovat vesijäähdytteiset. Materiaalina  
kantokehässä on käytetty valuterästä GS-60 ja kantopyörässä (pyöräakseli)  
materiaalina on käytetty pallografiittivalurautaa. Liukulaakerin SB620 laakerihol-  
kin materiaali on CUPB20SN5.

Kuvassa 4.4 on meesauunin polttopään puoleinen kantopyörä.





Kuva 4.4 Meesauunin polttopään puoleinen kannatuspyörä

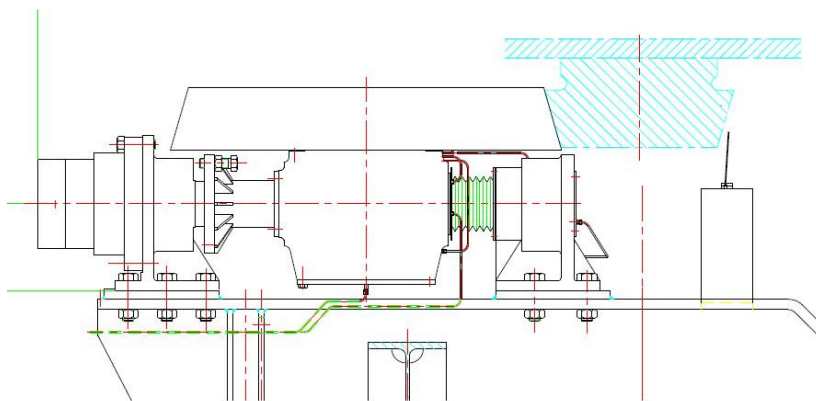
Kuvassa näkyy akustisen emission anturi, joka on kiinnitetty kantopyörän toiseen liukulaakeriin. Kuvassa näkyy myös öljyn lämpötilan valvontaan tarkoitettu PT-100 vastus, jotka ovat stabiilisuutensa vuoksi yleisimpiä lämpötilan mittaukseen tarkoitettuja antureita. Ainoastaan polttopään puoleisten kantopyörien liukulaakereilla on vesijäähdytys ja öljyn lämpötilan mittausanturi. Kuvassa oikeassa alakulmassa oleva vesijäähdytysputkisto, joka kiertää laakerin sisällä ei ole käytössä. Sen jäähdytys teho on todettu riittämättömäksi ja järjestelmää on jokin aika sitten muutettu. Nykyinen jäähdytys on toteutettu niin, että jokaisella neljällä liukulaakerilla on oma vesijäähdytteinen lämmönvaihdin, jonka läpi öljy kulkee ja samalla suodattuu suodattimen läpi kulkiessaan. Öljy kulkee pumpun tekemällä työllä laakerin alaosasta lämmönvaihtimen ja suodattimen kautta takaisin laakerin yläosaan, josta öljy suihkuaa voideltavaan kohteeseen. Öljynlämpötilatieto menee valvomoon ja on tärkeä tieto, jotta öljyn viskositeetti säilyy oikeana. Liian korkea lämpötila pienentää viskositeettia ja tätä kautta voitelun toimivuutta. Öljyt kestävät reilusti yli 100 asteen lämpötiloja, mutta hyvin usein

lämpötila karkaa jo paljon aikaisemmin välysten pienentyessä. Tämän takia öljyn lämpötila 75 astetta ja sen yli olevat öljynlämpötilat ovat jo vähintään jatkuvasti seurattavien luokkaa.

Uunin asennon säätö tapahtuu kantopyörien asentoa säätämällä eli niin sanottua aurausta säätämällä. Kantopyörien akselit asetetaan sopivaan kulmaan uunin akseliin nähden siten, että ne pitävät uunin paikoillaan ja estävät sen siirtymisen alaspäin. Jos auraus on asennettu liian suureksi, nostavat kantopyörät niin voimakkaasti uunia ylöspäin, että aksiaaliturulla lopettaisi pyörimisen ja lopulta uuni pysähtyisi turvarajaan. Aksiaaliturulla tulisi pyöriä ja nojata kevyesti ohjaavaan kantokehään. Kun aksiaaliturulla alkaa laskeutua, tulisi uunin laskeutua sen mukana. Uunin kuormitus ja kierrosluku voivat muuttaa uunin asemaa niin paljon, että auraus on aika-ajoin tarkistettava. Virheellinen auraus on vaarallista, koska se voi aiheuttaa tarpeetonta kulumista kannatusrenkaan ja vaipan, kannaturenkaan ja kantopyörän sekä kannatusrenkaan ja aksiaaliohjausrullan kosketuspintojen välillä. Aurauksen säädöstä samoin kuin kosketuspintojen voitelusta, joiden laiminlyönti voi olla kohtalokasta, on tarkka ohje olemassa.

### 4.3 Aksiaaliturulla

Uunin käyttökoneiston vieressä olevaan kannatusrullastoon liittyy vielä aksiaaliturulla uunin alapuolella, jonka koneistettu otsapinta osuu vastaavalla kohdalla olevan kannatusrenkaan koneistettuun sivupintaan (kuva 4.5).



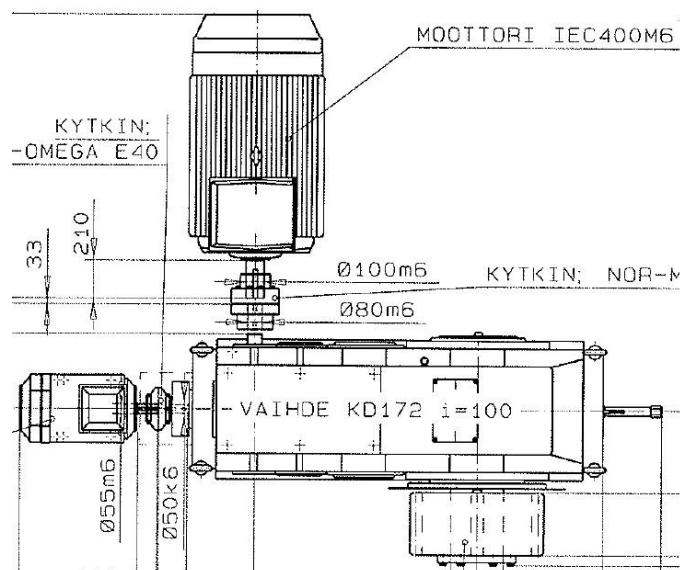
Kuva 4.5 Aksiaaliturulla (Ahlstrom 1998)

Aksiaaliturullin halkaisija on 1500 mm, ja painoa sillä on 2 tonnia. Aksiaaliturulla on laakeroitu kahdella rullalaakerilla. Materiaalina aksiaaliturullassa on käytetty pallografiittivalurautaa. Aksiaaliturullalla pystytään säännöstelemään uunin nousua ja laskua. Sääto tapahtuu muuttamalla aksiaaliturullan asemaa hydrauliihan avulla. Liikealue on noin 25 mm ja yksi liike kestää useita tunteja. Täten eliminoidaan kannatusrullien epätasainen kuluminen ja pidetään uuni paikallaan aksiaalisuunnassa tietyllä alueella. Sääto tapahtuu yksitoimisen sylinterin avulla, eli uuni työnnetään ylös ja annetaan valua omalla painollaan alas.

#### 4.4 Käyttökoneisto

Meesauunia pyöritetään kahden käyttökoneiston avulla noin puolessa välissä uunia. Toinen käyttökoneisto on varustettu pitojarrulla (rumpujarru). Käyttökoneisto (kuva 4.6) sisältää:

- 250 kW (1000 r/min) pääkäytön moottorin ja kytkimen
- 30 kW (1500 r/min) apukäytön moottorin, kytkimen ja keskipakoisjarrun
- päävaihteen, jossa on sisäinen vapaakytkin (kiilakappalerengas)
- käyttöhammaspyörän.



Kuva 4.6 Meesauunin käyttökoneisto 1 (Ahlstrom 1998)

Uunin pyörimisnopeutta ohjataan invertterisäädöllä, joka ohjaa molempia pääkäyttöjä. Uunin molemmat apukäytöt on kytketty sähköhäiriöiden varalta varavoimaan. Kuumaa uunia ei saa koskaan jättää seisomaan alasajo-ohjetta pidemmäksi aikaa, jotta uunin putki ei taipuisi kierroksi. Uunin vaipan ollessa kuuma on uunia pyöritettävä tasaisin väliajoin 90° kerrallaan, kunnes vaippa on kylmä.

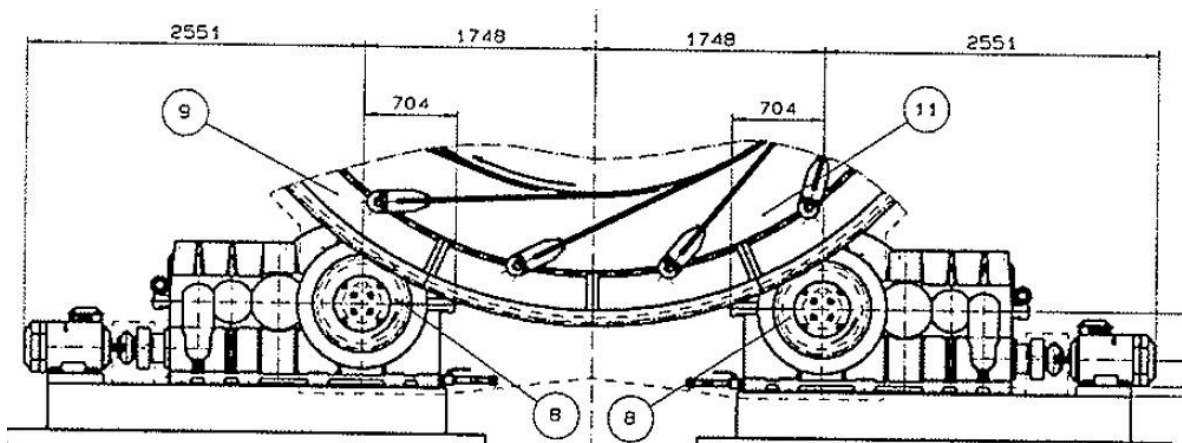
Käyttökoneistot pyörittävät meesauunia hammaskehän välityksellä, joka koostuu 15:sta hammassegmentistä (kuva 4.7).



Kuva 4.7 Valusegmentti Kymenite-ADI valuraudasta (Ahlstrom 1998)

Hammassegmenttien materiaali on Kymenite-ADI valurautaa (ns. bainiittikarkeaa pallografiittivalurautaa). Lämpökäsittelyn jälkeen austeniittis-ferriittisessä matriisissa on jäännösausteniittia, joka pintakarkaistuu koneistuksen ja käytön myötä.

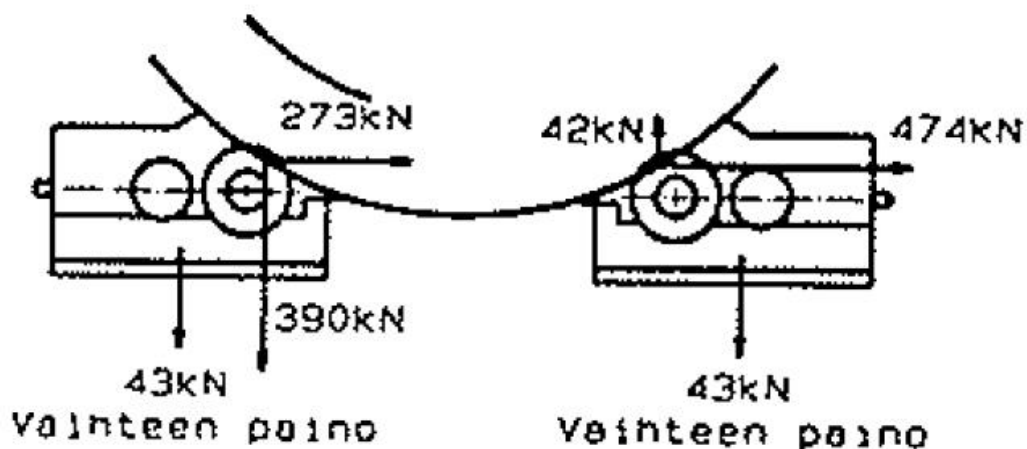
Hammaskehä on kiinnitetty uunin vaippaan lehtijousin (kuva 4.8).



Kuva 4.8 Käyttökoneisto (Ahlstrom 1998)

Lehtijousien toinen pää on hitsattu vaippaan ja toinen pää kiinnitetty nivelellisesti hammaskehään. Tämän konstruktion ansiosta vaipan lämpölaajeneminen ei vaikuta hammaskehän halkaisijaan ja sitä kautta ryntökosketukseen. Hammaskehä on halkaisijaltaan 6360 mm ja leveydeltään 260 mm. Hammaskehän voitelu tapahtuu automaattisella paineilmatoimisella rasvansuihkutuslaitteella kuuden suuttimen avulla (kolme suutinta molemmille käytöille).

Hammaskehän pyörittämisestä tuleva kuormitus ei suinkaan jakaannu tasaisesti molemmille käytöille (kuva 4.9).



Kuva 4.9 Kuormituksen jakautuminen eri käytöille (Ahlstrom 1998)

Vasemman puoleisessa käytössä on noin 10 kertaa suurempi voiman pystykomponentti kuin oikean puoleisessa. Oikean puoleisessa käytössä on voiman vaakakomponentti noin 2 kertaa suurempi kuin vasemman puoleisessa.

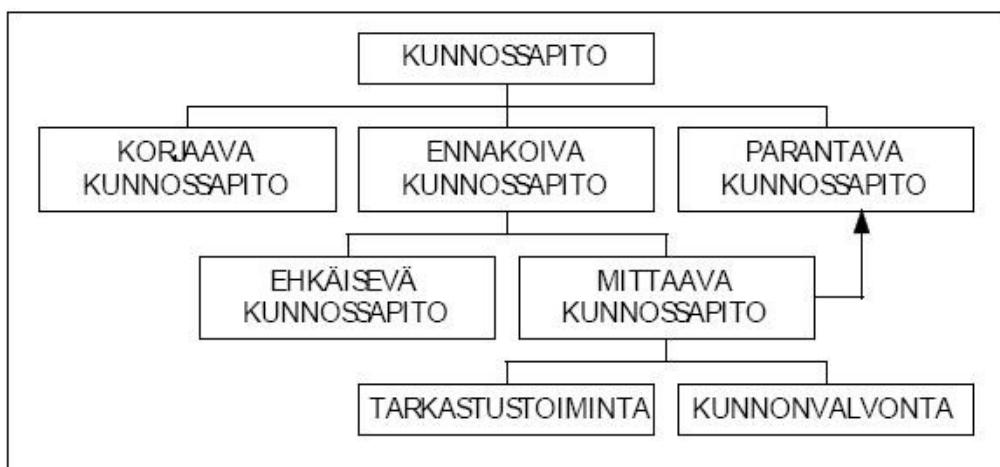
Hammasvaihteiden mitoitettu/laskettu elinikä on 4,5 vuotta. Meesauunille on jälkikäteen vaihdettu erilaiset tiilet/muuraukset, jotka ovat nostaneet uunin painoa huomattavasti. Tämän johdosta kantopyörien ja vaihteiden kuormitus on kasvanut alkuperäisestä suunnitteluarvosta jonkin verran. (Kunnonvalvontamittaja Juha Kempin kanssa 11.3.2011 käyty keskustelu.)

## 5 KUNNONVALVONTA

Perinteisesti kunnossapitotoiminnot on jaettu kolmeen alueeseen sen mukaan, mihin kunnossapitotoiminnoilla pyritään eli korjaavaan, ehkäisevään ja mittaavaan kunnossapitoon. Parantava kunnossapito on luonteeltaan sellaista, että normaalin toiminnan ohessa havaitaan usein, kuinka jonkin laitteen toimintaa tai koko tehtaan prosessia voidaan tehostaa tai saada luotettavammaksi jollain muutoksella. Esimerkiksi laakerivaurioiden tapauksessa täytyisi pyrkiä selvittämään vaurion varsinainen syy. Syy voi olla esimerkiksi puutteellinen voitelu, voimakas epätasapaino tai laakerin suunnitellun/mitoitettun eliniän loppuminen. Varsinkin vanhat laakerit saattavat vaurioitua ilman sen suurempaa, tiedossa olevaa syytä. (Kunnossapidon luentomuistiinpanot.)

Esimerkkinä parantavasta kunnossapidosta voidaan mainita, että erään paperikoneen laakerivaurioiden määrä ennen toimenpiteitä oli 19 kpl / 6 kk. Kiertovoi-  
telujärjestelmän suodatusta parannettiin muuttamalla 10 µm:n suodatin 6 µm:n suodattimeksi. Vaihdon vaikutus laakerivaurioiden määrään oli ilmeinen, sillä vaurioita esiintyi seuraavan 8 kk:n aikana ainoastaan 2 kpl. (Lahdelma & Leskinen 1991, 3.)

Seuraavassa kuvassa 5.1 esitetään ABB:n näkemys siitä, kuinka mittaava kunnossapito ja kunnonvalvonta sijoittuvat kunnossapidon kenttään.

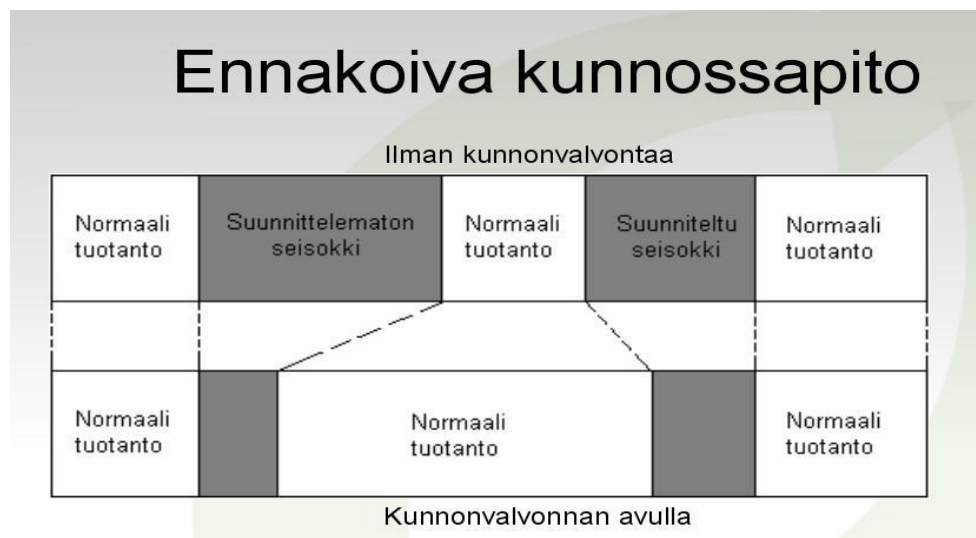


Kuva 5.1 Kunnonvalvonta osana kunnossapitoa (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 2)

Ennakoivan kunnossapidon tarkoituksena on ehkäisevillä toimenpiteillä estää yllättävät vauriot ja siten myös yllättävät käyttökatkokset. Ennakoivaan kunnossapitoon kuuluvat ehkäisevä kunnossapito eli säännöllinen huoltotoiminta sekä mittaava kunnossapito. (Helander 2008.)

Yhä useammassa yrityksessä kunnonvalvonta tiedostetaan merkittäväksi keinoksi vaikuttaa kannattavuuteen. Kunnonvalvonnalla saavutettavia hyötyjä ovat tuottavuuden kasvu (tuotantoaika kasvaa), kunnossapidon suunnitelmallisuus (työsuunnittelu helpottuu), seisokkiaikojen parempi hyödyntäminen (huollot voidaan ajoittaa hallitusti seisokkeihin), suunnittelemattomien seisokkien väheneminen (korjausaika ja -kustannukset pienenevät), koneen pidentynyt elinikä ja varaosatarve pienenee. (Helander 2008; Nohynek & Lumme 1996.)

Kuvassa 5.2 on esitetty, kuinka kunnonvalvonnan avulla voidaan voittaa lisää tuotantoaika.

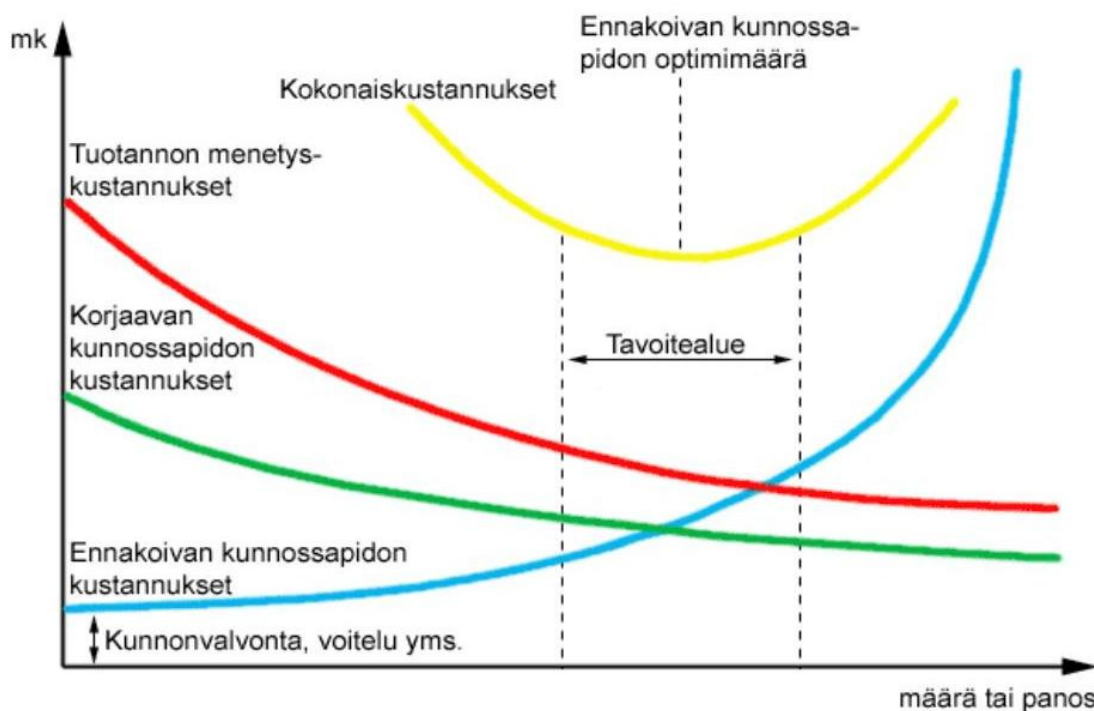


Kuva 5.2 Tuotantoajan lisääminen kunnonvalvonnan avulla (Nohynek & Lumme 1996, 12)

Kunnonvalvonnan avulla voidaan seisokin keskimääräinen odotusaika eliminoida, koska siihen liittyvät toimenpiteet voidaan tehdä tuotantoajalla. Toisaalta myös keskimääräistä kunnossapitoaika voidaan lyhentää, koska viat eivät pääse kehittymään vaurioiksi ja tarvittavat kunnossapitotyöt voidaan suunnitella paremmin vikojen ollessa jo tiedossa. (Nohynek & Lumme 1996, 12.)

Ennakoivan kunnossapidon kustannuksia voidaan verrata vakuuttamisen kustannuksiin, joiden on oltava järkevässä suhteessa riskien todennäköisyyteen ja vakavuuteen. Ennakoivan kunnossapidon taso perustuu vaurioitumisen todennäköisyyteen ja vaurioista syntyvien kustannusten vertaamiseen ennakoivan kunnossapidon kustannuksiin. Vaurioitumisen aiheuttama turvallisuusriski tulee myös ottaa huomioon konekohtaisesti ennakoivan kunnossapidon tasoa määrittäessä. Ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon sekä tuotannonmenetyskustannusten välinen vuorovaikutus on esitetty kuvassa 5.3. (Mikkonen 2009, 498.)

## Ennakoivan kunnossapidon vaikutus kustannuksiin



Kuva 5.3 Kunnossapidon kokonaiskustannusten riippuvuus ennakoivan kunnossapidon osuudesta (Patton 1983, Mikkosen 2009, 498 mukaan)

Haasteena kunnonvalvonnan kehittämisessä onkin kokonaiskustannusten optimaal alueen löytäminen. Kuvan tavoitealueen jälkeen ennakoivan kunnossapidon kustannukset kasvavat suhteessa tuotannonmenetys ja korjaavan kunnossapidon kustannussäästöihin huomattavasti enemmän.

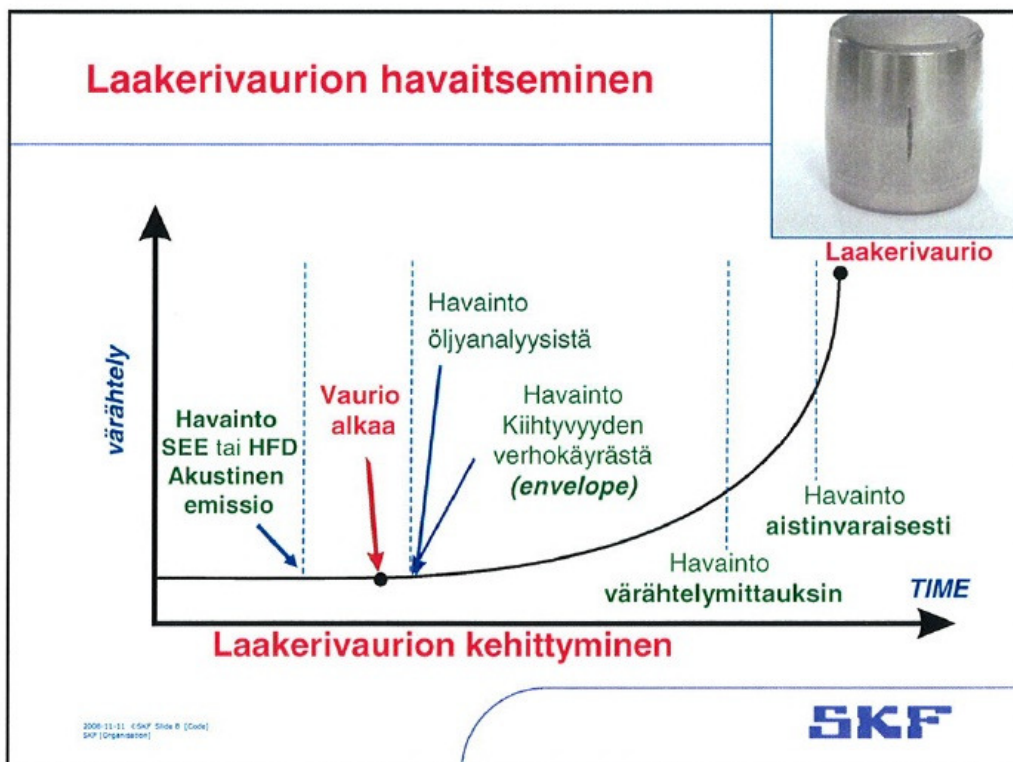


Yleisimmät ennakoivan kunnossapidon mittaus/tarkastusmenetelmät ovat:

- värähtelymittaukset
- NDT-menetelmät (ultraääni, magneettijauhe, röntgen, tunkeumajauhe)
- akustinen emissio
- visuaaliset tarkastukset
- lämpötilanmittaukset
- painemittaukset
- voimamittaukset
- sähköiset mittaukset
- materiaalikokeet
- öljyanalyysit (Helander 2008).

Mittausaikavälin määrittämisessä tulee ottaa huomioon erityisesti laitteen häiriöherkkyys ja vaurioiden kehittymisnopeus. Mittausaikavälin tulee olla niin lyhyt, etteivät viat pääse kehittymään vaurioiksi. (Nohynek & Lumme 1996, 37.)

Mittausmenetelmän ja mittausaikavälin täytyy olla sellainen, että vian havaitsemisen jälkeen täytyy olla riittävästi aikaa suunnitella tuleva seisokki. Parhaassa tapauksessa korjaus voidaan tehdä kuukausien päässä olevassa vuosihuollossa, jolloin ylimääräiseltä seisokilta vältytään kokonaan. Seuraavassa kuvassa 5.4 on esimerkki kuinka aikaisin laakerivika voidaan havaita eri menetelmillä ennen lopullista vauriota.



Kuva 5.4 Laakerivaurion havaitseminen eri menetelmillä (SKF)

Akustista emissiota on arvosteltu siitä, että sen havaitsema laakerivaurio on silmillä havaitsematon, jolloin laakeri on vielä täysin käyttökelpoinen. Kun esimerkiksi ulkokehävaurio kehitty lisää, sen reunat pyöristyvät, jolloin akustisen emission arvot laskevat normaaleiksi. Tällöin vaurio alkaa näkyä myös värähtelymittauksissa, mutta se ei vielä tarkoita sitä, ettei laakeri kestäisi ajaa. Eräällä tehtaalla oli laakereita mitattu akustisella emissiolla. Yhdessä koneessa oli laakeripesä silmin nähden ollut halki, mutta akustisen emission mittauksella siinä ei näkynyt mitään vikaa. Akustista emissiota syntyy vain silloin, kun murtuma ydintyy tai kasvaa eli passiiviset säröt eivät näy. (Luoto 2003, Sopasen 2004, 83 mukaan.)

Öljyanalysista vaurio havaitaan hyvin aikaisin, mutta yhden öljyanalyysin hinta voi olla useita satoja euroja. Mikäli useilta kymmeniltä tai jopa sadoilta laitteilta otettaisiin öljynäyte aina määrätysin väliajoin ja lähetettäisiin öljy-yhtiölle analysoitavaksi, tulisi se hyvin kalliiksi.

Kiihtyvyyden verhoikäyrä on hyvä menetelmä, jolla vika saadaan aikaisin näky-mään ja erityisesti hitaasti pyörivissä koneissa sillä saadaan huomattavasti ai-kaisemmin viat selville kuin normaaleilla (nopeus, kiihtyvyys) värähtelymittauk-silla. Kiihtyvyyden verhoikäyramittaus on nykyisin jokaisen kannettavan värähte-lyanalysointivälineen vakiovarusteena.

Kun vika havaitaan aistinvaraisesti, on vika kehittynyt jo pitkälle ja koneen väli-tön pysäyttäminen voi olla järkevää. Mikäli vika kehittyy vaurioon saakka, joudu-taan yleensä laakerin lisäksi uusimaan myös akseli. Uuden akselin koneistami-nen vie kallista aikaa. Mikäli akseli ei ole kovin pahasti vaurioitunut, akseli voi-daan yrittää korjata esimerkiksi päällehitsaamalla ja koneistamalla, jonka jäl-keen se asennetaan väliaikaisesti koneeseen, kunnes uusi akseli valmistuu.

### **5.1 Kunnonvalvonnan ja kunnossapidon yhteys**

Kunnonvalvonnan tehtäväksi voidaan määrittää tietojen tuottaminen, joiden avulla koneita ja laitteita voidaan käyttää keskeytyksettä suunnitellun käyttöjak-son ja suorittaa oikea-aikaisesti korjaukset, huollot sekä parannukset. Mitä ai-kaisemmin kunnonvalvonnan avulla havaitaan koneen kunnossa tapahtuneet muutokset, sitä enemmän aikaa on käytettävissä kunnossapitotöiden suunnitte-luun. (Nohynek & Lumme 1996, 43.)

Kokemusten perusteella on huomattu, että koneiden kunnossapitoon tarvittavat tiedot voidaan ilmaista hyvin yksikäsitteisesti:

- nopeasti kehittyvien vikojen ilmoittaminen (hälytys)
- kehittyvien vikojen havaitseminen ja tunnistaminen (diagnoosi)
- jäljellä olevan käyttöajan arviointi (prognoosi)
- korjaavien toimenpiteiden suunnittelu (Nohynek & Lumme 1996, 43).

Hälytystieto syntyy yleensä automaattisesti ja viesti kulkee suoraan käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnalle. Kunnonvalvonta itse tarvitsee palautetietona:

- tiedot koneen rakenteesta ja käyntiolosuhteista (nopeus, kuormitus)

- tiedot suoritetuista korjauksista, huolloista tai parannuksista. (Nohynek & Lumme 1996, 43.)

Edellisen perusteella voidaan esittää toimintamalli kunnonvalvonnan ja kunnossapidon tietojärjestelmien välille. Oleellinen seikka on havaittava, että kunnonvalvonta on ohjaava toimenpide, ei ohjattava. (Nohynek & Lumme 1996, 43.)

## **5.2 Kunnonvalvontatarpeen määrittely**

Seuraavat tässä luvussa esitetyt tiedot perustuvat suurimmaksi osin Petri Nohynek ja Veli-Erkki Lumpeen (1996) Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset teokseen. Tehdaslaitoksessa käytettävien laitteiden kunnonvalvonnan tarve vaihtelee. Laitteen mittaustarve määritellään seuraavien tekijöiden perusteella:

### 1. Kriittisyys tuotannon kannalta:

- tuotannon määrä
- tuotannon laatu
- käyttöolosuhteet
- häiriöherkyys

### 2. Turvallisuustekijät:

- henkilöriskit
- ympäristöriskit

### 3. Kunnossapitotekijät:

- kunnossapitokustannukset
- huollettavuus
- varaosien saatavuus
- luoksepäästävyys
- ympäristöolosuhteet

#### 4. Muut tekijät:

- vikaantumismekanismi
- vaurion laajuus
- laitteen pyörimisnopeus
- laitteen käyttöteho
- laitteen rahallinen arvo

Määrittelyä helpottaa seuraava menettelytapa. Valitaan tärkeiksi katsotut tekijät, joille annetaan keskinäistä tärkeyttä kuvaavat kertoimet, esimerkiksi pyörimisnopeudelle kerroin 5 ja kriittisyydelle 50. Tämän jälkeen arvioidaan yksittäisten koneiden kunkin tekijän painoarvoa, esimerkiksi pyörimisnopeus alle 500 1/min antaa painoarvon 1 ja pyörimisnopeus yli 12000 1/min antaa painoarvon 20. Laskemalla kunkin tekijän kohdalla kertoimen ja painoarvon tulo ja laskemalla kaikkien tekijöiden tulot yhteen saadaan laitekohtainen kunnonvalvontatarvetta kuvaava luku (taulukko 5.1).

Taulukko 5.1 Mittaustarpeen määrittely (PSK 5705, Nohynek & Lumpeen 1996, 34 mukaan)

Tekijä Factor	Painoarvo Weighting coefficients	Kerroin Multiplier	Valintakriteeri Criteria of choice
Kriittisyys Criticality	40	0 2 4 8	Pysähtymisellä ei merkitystä tehtaaseen tai osaston tuotannolle. <i>Shut-down of the machine does not affect the production of the plant or department.</i> Lyhyt seisokki, vähäinen tuotannon menetys, järjestelyvara tai käyttövalmis varalaite. <i>Short down-time, minor production loss, system resources or stand-by machine available.</i> Laaja seisokki, suuri tuotannonmenetys, vähän järjestelyvara tai ei varalaitetta. <i>Extensive down-time, major production loss, system resources or stand-by machine not available.</i> Tehtaaseen tai osaston täydellinen pysähtyminen, pitkä korjausaika, huono varaosien saatavuus tai katastrofivaara. <i>Total shut-down of the plant or department. Long repair time, poor availability of spare parts, risk of catastrophe.</i>
Häiriöherkkyyden Sensitivity to failures	15	1 2 4 8	Varmakäyntinen <i>High reliability</i> Vähäisiä häiriöitä <i>Minor malfunctions</i> Häiriöherkkä <i>Sensitive to failures</i> Erittäin häiriöherkkä <i>Extremely sensitive to failures</i>
Ympäristöolosuhteet ja luoksepäästävyys Accessibility and environmental conditions	15	1 2 4 8 16	Hyvät tai kohtuulliset, lattiatasolla <i>Good or reasonable, floor level</i> Kosteutta, likaa, syrjässä <i>Humidity, dirt, distant</i> Kuuma, kylmä tai hankala luoksepäästävyys <i>Hot, cold or poor accessibility</i> Erittäin kuuma, märkää, likaa, syövyttäviä kaasuja tai luoksepäästävyys käynnin aikana lähes mahdoton. <i>Extremely hot, wet, dirt, corrosive gases or extremely poor accessibility during machine operation</i> Erittäin ankarat olosuhteet tai mittaustapa ei pääse laitetta purkamatta <i>Extremely harsh environment or inaccessible without dismantling the machine</i>
Pyörimisnopeus Machine CPM	15	1 2 4 8 16	$n < 100$ 1/min $n = 100 \dots 2000$ " $n = 2000 \dots 5000$ " $n = 5000 \dots 10000$ " $n > 10000$ "
Rahallinen arvo Financial value	10	1 2 3 4 5	$H < 20000$ mk (FIM) $H = 20000 \dots 200000$ " $H = 200000 \dots 1000000$ " $H = 1 \dots 10$ Mmk (million FIM) $H > 10$ "
Käyttöteho Machine service output	5	1 2 4 6 8	$P < 5$ kW $P = 5 \dots 50$ " $P = 50 \dots 200$ " $P = 200 \dots 500$ " $P > 500$ "
n on pyörimisnopeus 1/min, H on kohteen hankintahinta mk, ja P on laitteen käyttöteho kW		n is machine CPM, 1/min H is the purchase price of the machine, FIM, and P is power rating of the machine in kW	

Kun kaikki laitoksen koneet on käyty läpi ja niille kullekin on saatu laskettua kunnonvalvontatarvetta kuvaava luku, jaetaan koneet tämän perusteella kolmeen ryhmään. Jos kone kuuluu ylimpään ryhmään, merkitsee se sitä, että koneeseen tulee asentaa kiinteä mittausjärjestelmä, joka jatkuvasti valvoo koneen kuntoa. Mittausjärjestelmä tulee valita siten, että se pystyy havaitsemaan varhaisessa vaiheessa koneen kunnossa tapahtuneet muutokset ja antamaan niistä hälytykset valvovalle henkilöstölle. Tällaisia järjestelmiä käytetään yleisesti suurten laitosten avainkoneissa, kuten paperikoneissa ja voimalaitosten turbiineissa, mutta myös pienempien tuotantolaitosten yksittäisissä avainkoneissa, kuten kompressoreissa ja puhaltimissa.

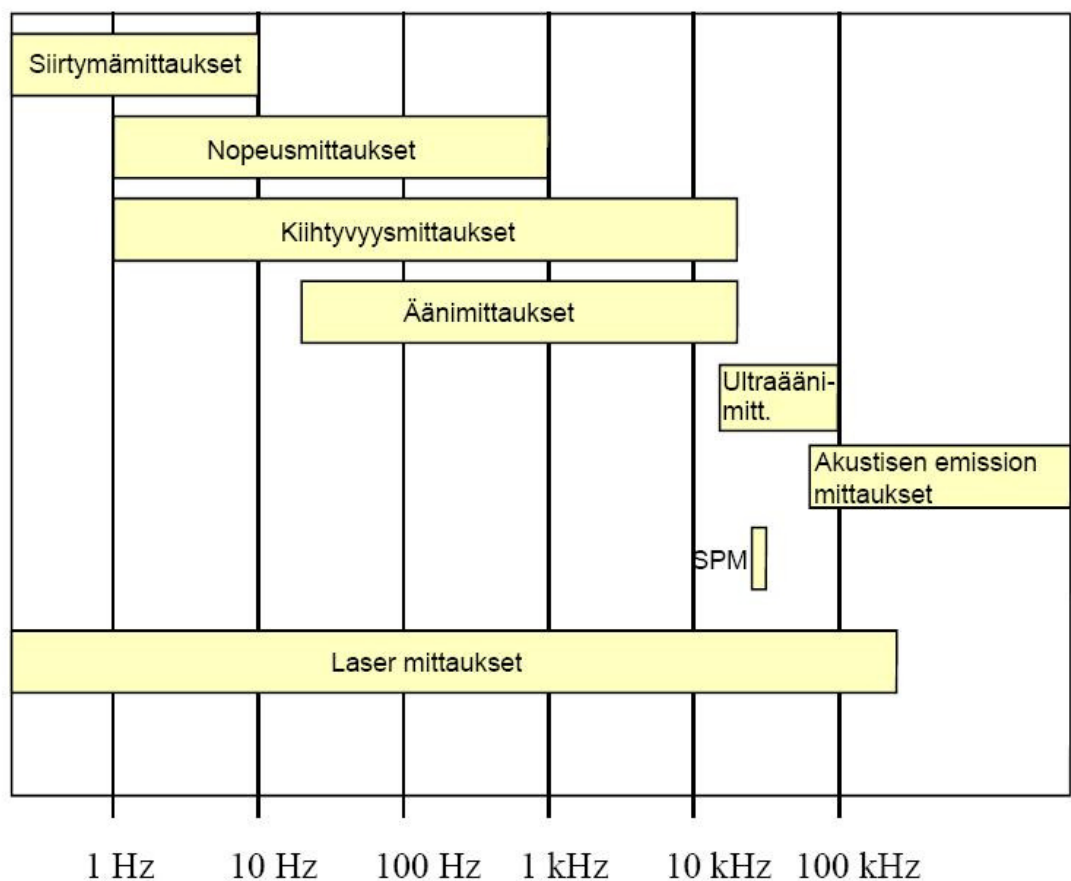
Ne koneet, jotka arvioinnin perusteella kuuluvat keskimmäiseen ryhmään, kuuluvat myös säännöllisen kunnonvalvonnan piiriin. Näitä koneita tulee valvoa niillä mittausmenetelmillä, joilla voidaan riittävän ajoissa havaita koneiden kunnossa tapahtuneet muutokset.

Jos kone arvioidaan kuuluvan alimpaan ryhmään, merkitsee se sitä, että koneelle ei suoriteta mitään säännöllistä kunnonvalvontaa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö koneelle olisi hyödyllistä tehdä mittauksia. Esimerkiksi ennen seisokkia voidaan mittauksia suorittaa näille koneille, jotta niissä mahdollisesti havaittavia vikoja voidaan korjata samalla, kun korjaustoimia muutenkin tehdään.

## 6 VÄRÄHTELYMITTAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käytettyjen termien, käsitteiden ja merkkien luettelo löytyy standardista PSK 5701.

Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset kattavat laajimmillaan taajuusalueen 0...1 GHz (kuva 6.1). (Mikkonen 2009.)



Kuva 6.1 Värähtelymittauksille tyypilliset taajuusalueet (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 11)

Värähtelymittauksilla tarkoitetaan siirtymän, nopeuden, kiihtyvyyden tai äänen mittaamista kohteen pinnasta tai sen läheltä yleensä taajuusalueilla 0 - 20 kHz sekä myös ultraäänen, akustisen emission tai iskusysäysten (SPM) mittaamista taajuuksilla, jotka voivat olla huomattavasti korkeampia kuin 20 kHz. Laserilla voidaan mitata värähtelyä taajuusalueella 0 hertsistä useihin satoihin kilohertseihin saakka. (Mustonen 2000, 5.)

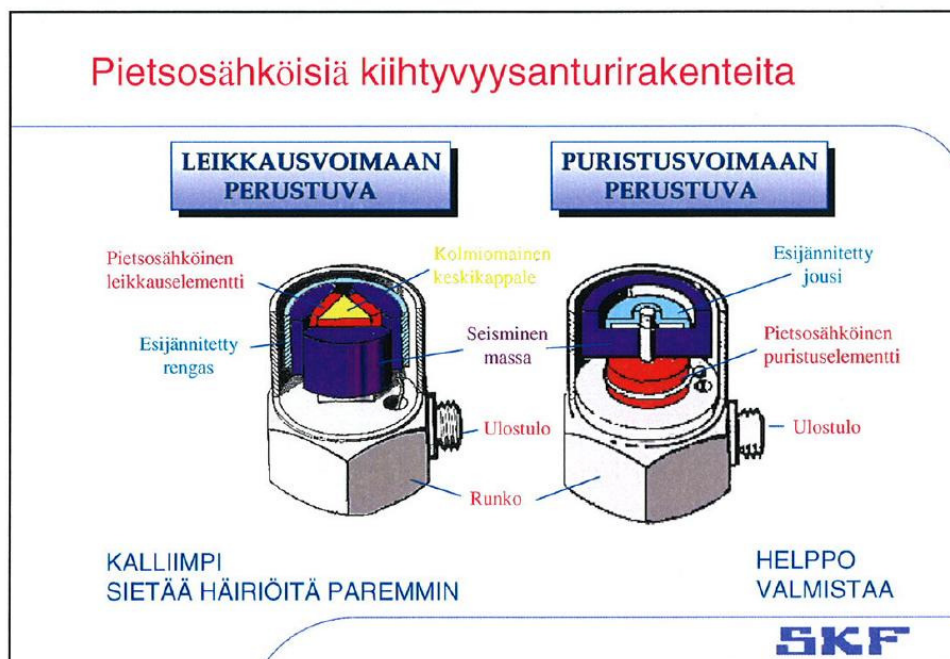


Värähtelyn taajuusalue voidaan jakaa mekaaniseen värähtelyyn 0...20 kHz, ultraääneen 20...80 kHz ja akustiseen emissioon 80 kHz...1 GHz. Värähtelymittausmenetelmät mittaavat värähtelyä koskettavalla anturilla kappaleen pinnasta, vaikka nimitykset akustinen emissio ja ultraäänen mittaaminen viittaavatkin ilmaaänen mittaamiseen. (Mikkonen 2009.)

## 6.1 Värähtelyn suureet, anturit ja mittayksiköt

Koneen värähtelyä mitataan siirtymänä ( $\mu\text{m}$ ), nopeutena ( $\text{mm/s}$ ) ja kiihtyvyytenä ( $\text{m/s}^2$  tai  $\text{g}$ :n monikerta).

Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi on yleisin värähtelymittausanturi. Sen ominaisuudet sopivat tyypillisiin kunnonvalvonnan mittauksiin ja lisäksi niiden hinta on varsin kohtuullinen. Anturi on pienikokoinen eikä juuri vaikuta mittaushohteen värähtelytilaan. Siinä ei ole liikkuvia eikä kuluvia osia. Anturit kattavat taajuusalueen hertsin osista jopa yli 20 000 Hz. Pietsosähköiset anturit ovat epäherkkiä ympäristöolosuhteille sekä helppoja asentaa. Kuvassa 6.2 on esitetty leikkausvoimaan ja puristusvoimaan perustuvan kiihtyvyyssanturin rakenne. (Mikkonen 2009.)



Kuva 6.2 Kiihtyvyyssanturin rakenne (SKF)

Leikkausvoimaan perustuvan kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate on seuraava. Keskiön ja seismisten massojen väliin on puristettu kolme pietsoelementtiä. Rakennetta ympäröivä puristusrenkas aiheuttaa tasaisesti jakautuvan säteisvoiman. Kun anturia liikutetaan akselin suunnassa, pietsoelementteihin kohdistuu leikkausvoima, jonka suuruus on verrannollinen koko anturin kiihtyvyyteen. Pietsoelementit antavat näin ollen kiihtyvyyteen verrannollisen sähköisen signaalin. (Mekaaniset värähtelyt luentomuistiinpanot.)

Pietsosähköisten levyjen tuottama signaali on suuri-impedanssinen varaussignaali. Signaali muutetaan vahvistimessa pieni-impedanssiseksi jännitesignaaliksi, joka ei ole yhtä herkkä häiriöille kuin suuri-impedanssinen signaali. Muutos pieni-impedanssiseksi signaaliksi tehdään joko anturin sisäisellä varausvahvistimella tai erillisellä ulkoisella vahvistimella. Kiinteässä asennuksessa ilman sisäistä vahvistinta olevan kiihtyvyyssanturin kanssa käytettävän kaapelin tulee olla mahdollisimman lyhyt ja hyvälaatuinen, matalakohinainen koaksiaalikaapeli. Sisäisellä vahvistimella varustettujen kiihtyvyyssantureiden tulee olla lyhytnousuista kierrettyä parikaapelia, joka on suojattu kokonaan metallivaipalla tai alumiinikalvolla. (PSK 2007, 33)

Kunnonvalvonnassa käytettävät mittalaitteet muuttavat kiihtyvyyden yleensä nopeudeksi. Tähän käytetään analogista sähköistä integraattoria tai digitaalista laskentaa joko aikatasosignaalista tai taajuusspektristä. Nopeus voidaan tarvittaessa muuttaa integroimalla siirtymäksi. Vastaavasti derivoimalla voidaan siirtyä siirtymästä kiihtyvyyteen. Kiihtyvyyssanturin taajuusalue rajoittaa yläpäässä resonanssitaajuus ja alapäässä lähinnä se fysiikan lainalaisuus, että matalilla taajuuksilla saavutettavat kiihtyvyydet jäävät väistämättä pieniksi. On olemassa myös kaksoisantureita joissa on kiihtyvyyssanturiin integroitu jokin toinen kunnonvalvonnassa käytetty anturi. Tällaisissa antureissa toisena mittauserämittaustapa on esimerkiksi lämpötila tai akustiseen emissioon perustuva laakerien vianpaikannusmenetelmä SEE (Spectral Emitted Energy). (Mikkonen 2009.)

*Seismisten nopeusantureiden käyttö on nykyään jo harvinaista, mutta varsinkin suurikokoisissa turbo- tai mäntäkoneissa niitä käytetään edelleen. Markkinoilla on myös pietsosähköisiä nopeusantureita, jotka perustuvat kiihtyvyyssantureihin. Tällaiset anturit sisältävät elektronisen integraattorin, joka muuntaa kiihtyvyyssignaalin anturin sisällä nopeussignaalksi. Varsinkin vanhempiin, nopeusantureille suunniteltuihin kiinteisiin kunnonvalvontajärjestelmiin tällaiset anturit tarjoavat luotettavan vaihtoehdon. Tosin on otettava huomioon, että pietsosähköiset nopeusanturit tarvitsevat toimiakseen vakiovirtasyötön. (Mikkonen 2009, 237.)*

Yleisin siirtymäanturi on niin sanottu pyörevirta-anturi. Anturin kärjessä olevan kelan ja mittaushaaran etäisyyden muuttuessa muuttuu anturin induktanssi ja samalla ulostulojännite, joka on suoraan verrannollinen etäisyyden muutokseen. Anturin taajuusalue on käytännössä 0 Hz...200 Hz. Eräs pyörevirta-antureiden tärkeimmistä sovelluskohteista on liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonta. Pyörevirta-antureiden lämpötila-alue on laaja (esimerkiksi -55 °C...+150 °C), ja ne kestävät hyvin iskuja ja tärinää. Näiden antureiden mittaushaaran suuruusluokkaa 0...11 mm. Pyörevirta-antureiden hyödyntämistä kunnonvalvonnassa rajoittavat anturin suppea taajuusalue ja hankala kiinnitystapa. Anturit ovat yleensä kiinteästi asennettuja, koska muunlainen kiinnitys on epäluotettava. Pyörevirta-anturia voidaan käyttää myös tahdistus- eli takopulssin saamiseen. (Mikkonen 2009; Lahdelma, Leinonen & Ahola 2004.)

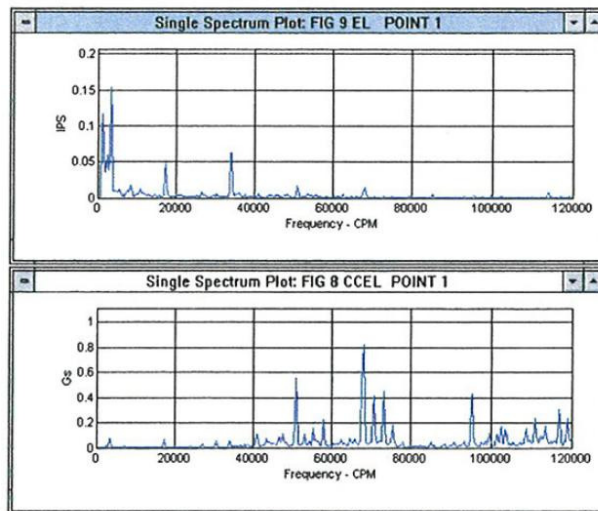
Yleisimmin käytetty kunnonvalvonnan mittaussuure on värähtelynopeus, koska sen vaste on sopivin niillä taajuuksilla, joista yleensä ollaan kiinnostuneita. Nopeus on käyttökelpoinen taajuusalueella noin 10 Hz...1 kHz. Tätä matalimmilla taajuuksilla siirtymä on käyttökelpoisempi ja vastaavasti tätä korkeammilla taajuuksilla kiihtyvyys on käyttökelpoisin. Mikäli mitattava kone on hidaskäyntinen tai oletettavat viat ovat matalilla taajuuksilla voi siirtymä ollaärkevin mittaussuure. Mikäli mitattava kone on nopeakäyntinen tai oletettavat viat ovat korkeilla taajuuksilla, kannattaa käyttää kiihtyvyyttä mittaussuurena. Usean mittaussuureen tarkastelu on useinärkevää sillä esimerkiksi hitaasti pyörivän laitteen laakeriviat herättävät korkeita taajuuksia (kuva 6.3). (Mikkonen 2009.)

# Usean mittaussuureen tarkastelu

## Nopeus- spektri

Samassa laakerin mittauspisteessä matalan taajuuden viat (epätasapaino, linjausvirhe jne.) näkyvät parhaiten nopeusspektrissä; kun taas korkean taajuuden viat (laakerivauriot, hammasvauriot) näkyvät parhaiten kiihtyvyysspektrissä

## Kiihtyvyysspektri



Oy SKF Ab Reliability Systems

SKF

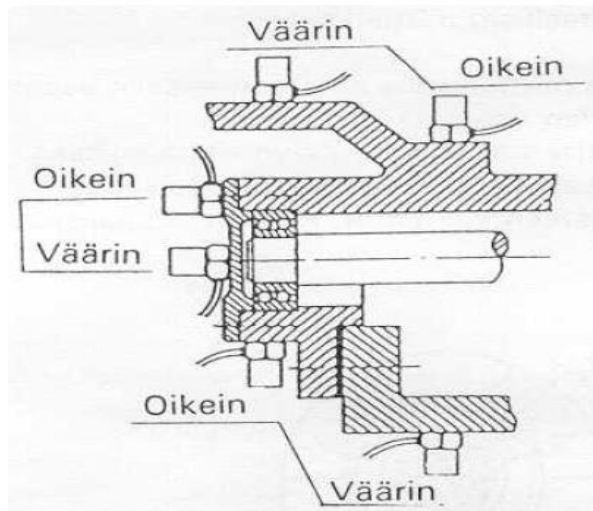
Kuva 6.3 Nopeus- ja kiihtyvyysspektri samassa laakerin mittauspisteessä (SKF)

Hitaasti pyörivien laakerien kunnonvalvonnassa on todettu, että kiihtyvyyssignaalin derivoiminen kertaalleen tai kahdesti helpottaa vikaantumisten havaitsemista hyvin varhaisessa vaiheessa (Lahdelma & Riutta 1996, 24 - 30, Mustosen 2000, 5 mukaan). Siirtymän kolmannesta aikaderivaatasta käytetään nimitystä jerkki (Mikkonen 2009).

Siirtymän integrointia voidaan käyttää, jos esimerkiksi liukulaakerin öljykalvon pyörteily halutaan paremmin esille tehollisarvomittauksissa (Lahdelma 1995, 1996, 1997, Järvisen, Miettisen, Kivistön & Lahdelman 2004 mukaan).

## 6.2 Anturin kiinnitystapa ja mittauspisteen valinta

Mittauspiste valitaan siten, että värähtelylähde ja mittausanturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan. Tämän vuoksi tulee mittauspiste valita siten, että värähtelylähteen ja anturin välillä on mahdollisimman vähän rajapintoja (kuva 6.4). (PSK 2007, 26.)



Kuva 6.4 Anturin paikan valinta värähtelymittauksessa (PSK 2007, 27)

Pyörivistä massoista värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon, joten mittauspisteet on tarkoituksenmukaista valita laakerointikohdista. Värähtelymittaus suoritetaan pääsääntöisesti säteissuunnassa ja tarvittaessa akselin suunnassa. Iskusysäysmenetelmää käytettäessä mittaamaan vierintälaakerin kuntoa ja voitelutilannetta tulee mittauspisteeksi valita laakerin kuormitusvyöhyke. (PSK 2007, 27.)

*Kiinteissä kunnonvalvonta järjestelmissä joudutaan yleensä kustannussyistä tyytymään yhteen mittauspisteeseen laakeria kohti. Tällöin tulee erityisen tarkkaan miettiä asennettavan anturin suunta. Turbiinien kiinteät anturit ovat yleensä laakerin radiaalisuunnassa, koska tässä suunnassa havaitaan selvimmin epätasopainon kasvun aiheuttama tärinä. Paperikoneen telojen laakerien anturit saattavat olla akselin suunnassa, koska laakeriviat kokemuksen mukaan näkyvät usein parhaiten tässä mittaussuunnassa. (Nohynek & Lumme 1996, 63.)*

Anturin kiinnityksen vaikutusta mittaustulokseen käsitellään standardissa PSK 5703. Ohjeellisina arvoina voidaan todeta, että koetinsauvalla tyypillinen ylärajataajuus on noin 500 Hz, magneetilla noin 1 - 2 kHz ja hyvin toteutetulla suoralla ruuvikiinnityksellä (kierretapilla) anturin valmistajan ilmoittamaan maksimitaajuuteen. Kiinteissä asennuksissa käytettävässä suorassa ruuvikiinnityksessä tasopinnan koneistus saattaa olla vaikeaa, jolloin kiinnitys voidaan tehdä nipan välityksellä helpomman koneistuksen takia. Mikäli suora kiinnitys tai nipan välityksellä tapahtuva kiinnitys ei sovellu voidaan käyttää liimattavan kierrealuslevyn välityksellä tapahtuvaa kiinnitystä. (PSK 2007, 33 - 34; Mikkonen 2009.)

### 6.3 Kunnonvalvonnan mittalaitteet ja online-järjestelmät

Värähtelymittaus voidaan suorittaa kiinteiden, puolikiinteiden tai kannettavien mittalaitteiden avulla. Kannettavien mittalaitteiden kanssa tehdään yleensä tietyn aikataulun mukaisesti niin sanottuja reittimittauksia. Aikataulutuksessa mittauksessa oletetaan, että vikaantuminen on hidasta suhteessa mittausväliin. Kannettavalla mittalaitteella voidaan myös täydentää kiinteällä mittauksella saatua tietoa. Puolikiinteissä mittauksissa anturit on asennettu kiinteästi mitattavaan kohteeseen, mutta itse mittaus suoritetaan kiertomittauksena kannettavalla mittalaitteella. Kiinteissä mittauksissa voidaan suorittaa sekä jatkuvatoimisia (suojausjärjestelmä) että määräväleihin tehtäviä mittauksia (online-järjestelmä). Standardissa PSK 5705 jatkuvatoimisia mittauksia suositellaan käytettäväksi kohteissa, joissa vikojen kehittyminen vaurioiksi voi olla hyvin nopeaa. Esimerkkinä tällaisista kohteista mainitaan turbiinit, kompressorit ja generaattorit. (PSK 2007, 58 - 59.)

Seuraavassa on Nome Oy:n malli online-mittauksen ja reittimittauksen eroista (Helander 2008).

#### Online-mittaus

- Jatkuva mittaus
- Nopeat hälytykset
- Vaatii päivittämistä
- Suuret järjestelmät kalliita
- Vaatii osaamista

#### Reittimittaus

- Jaksollinen mittaus
- Hälytykset vain mittauksen yhteydessä
- Vaatii mittausresursseja
- Laajat reitit vaativat paljon resursseja
- Vaatii osaamista

Standardissa PSK 5710 (PSK 2007, 110) ja käsikirjassa Mikkonen 2009 esitetään värähtelyn mittaamiseen käytettävien mittalaitteiden jako neljään tyyppiin, jotka esittelen seuraavassa.

Tyyppiin 1 mittalaitteita käytetään yleensä yksinkertaisten vikaantumismekanismien todentamiseen kuten puhaltimen tasapainotilan valvontaan. Laitteet ilmaisevat värähtelyn kokonaistasoa yhdellä tunnusluvulla. Tällaisten värähtelykyni-

en ja muiden yksinkertaisten käsimittareiden tavallisin tunnusluku on värähtelyrasitus eli värähtelynopeuden kokonaistasoarvo laitteeseen kiinteästi asetetulla taajuusalueella. Näillä mittalaitteilla arvioidaan laitteen yleiskuntoa, tarkempaan analyysiin tarvitaan yleensä kehittyneempi mittalaite, jolla mittaustulosta voidaan tarkastella taajuustasossa.

Tyypin 2 mittalaitteita käytetään yleensä vierintälaakereiden kunnan ja voitelun valvontaan. Nämä mittalaitteet mittaavat tyypillisesti korkeataajuisista yli 5000 Hz värähtelyä. Mitattua värähtelyä kuvaa korkeintaan kaksi tunnuslukua. Tällaisten värähtelykynien ja muiden yksinkertaisten käsimittareiden tunnuslukuja voivat olla muun muassa kiinteällä taajuuskaistalla mitattavat verhoikäyrä arvot (ENV), akustisen emission taajuuksilla mitattavat tunnusluvut (SEE) sekä iskusysäysmittaus (SPM). Tarkempaan analyysiin tarvitaan yleensä kehittyneempi mittalaite jolla mittaustulosta voidaan tarkastella taajuustasossa.

Tyypin 3 mittalaitteita käytetään yleensä reittimittauksissa ja erityyppisten vikojen vakavuuden määrittämisessä. Mittalaitteissa on valittava taajuusalue. Mitattua värähtelyä voidaan esittää aika- ja taajuustasossa. Laitteita on monen tasoisia ja hintaisia. Laitteissa on tyypillisesti useita värähtelymittaukseen tai kunnanvalvontaan liittyviä lisäominaisuuksia, kuten tasapainotus, ylös–alasarjo, monikanavaisuus, signaalin nauhoitus, iskukoe ja niin edelleen. Ominaisuuksia voi yleensä hankkia optiona perusmittalaitteeseen. Mittaustuloksia voidaan analysoida suoraan mittalaitteen näytöltä tai tietokoneelta erityistä analysointi- ja tietokanta-ohjelmaa käyttäen. Tietokantaohjelmalla luodaan reittimittauspisteet, mittaasetukset sekä reitit. Mittaustulokset tallennetaan tietokantaohjelmaan. Ohjelmissa ja mittalaitteissa on yleensä monipuoliset spektrin ja aikatazon tulkinintaan tehtyjä työkaluja ja kursoreita. Hälytysrajoja voidaan yleensä asettaa monipuolisesti, esimerkiksi tilanteisiin joissa valvotaan vain tiettyä taajuuskaistaa tai kun kohteen pyörimisnopeus muuttuu mittausten välillä.

Tyypin 4 mittalaitteita käytetään yleensä automaattisessa vikadiagnostiikassa. Tällaisia kohteita, joissa mittaustiheyden tarve on suuri tai jatkuva, käytetään kiinteästi asennettavia online-kunnanvalvontalaitteita. Tällöin järjestelmä tekee mittaukset siihen asetetun mittausjakson mukaisesti sekä generoi mitatun suu-

reen (värähtely, paine, lämpötila...) riittävän suurista muutoksista hälytyksen järjestelmään. Järjestelmään voidaan tuoda tietoa muista ohjausjärjestelmistä.

Kunnonvalvonnassa käytettävät online-järjestelmät eivät yleensä mittaa kanavia yhtäaikaisesti, vaan yksi kerrallaan. Sellaisissa järjestelmissä, joissa vikaantuminen voi olla vaaraksi tai aiheuttaa huomattavia kustannuksia, käytetään reaaliaikaista mittausta tekevää automaattista suojausjärjestelmää, joka tietyn raja-arvon ylittyessä sulkee koko laitteen. Tällaisia on käytössä muun muassa höyryturbiineissa. Tyypillinen paperikoneen kunnonvalvontajärjestelmä käy läpi kaikki järjestelmän piiriin kytketyt laakerit yhden vuorokauden kuluessa. Järjestelmä mittaa kiihtyvyyssantureilla jokaisesta laakerista muutaman sekunnin mittaisen jakson signaalia, josta määritetään värähtelyn spektri ja muutamia värähtelyn laatua kuvaavia tunnuslukuja. Järjestelmä antaa hälytykset suoraan automaatiojärjestelmään. (Mustonen 2000.)

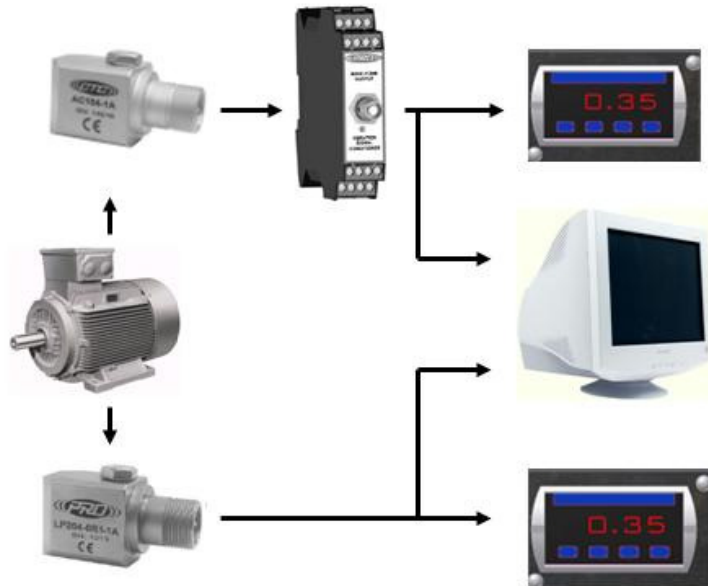
Seuraavana esittelen Nome Oy:n mallin online-järjestelmien jaosta kokonaistasomittaukseen, online-järjestelmään ja räätälöityyn online-järjestelmään.

### **Kokonaistasomittaus**

Kokonaistasomittaus on edullinen, yksinkertainen ja käyttöönotto (järjestelmän rakentaminen) on nopea. Siinä valvotaan värähtelyn kokonaistasoa tietyltä taajuuskaistalta. (Helander 2008.)

Esimerkki järjestelmän rakenteesta on esitetty seuraavassa kuvassa 6.5.





Kuva 6.5 Kokonaistasomittausjärjestelmän rakenne (Helander 2008)

Järjestelmä rakentuu seuraavista komponenteista:

- anturi
- värähtelymuunnin / kokonaistasoanturi
- näyttö
- relelähtö (Helander 2008).

Kohteelta tuleva värähtely muutetaan valitulta kaistalta mA- tai volttitiedoksi. Saatu signaali voidaan viedä automaatiojärjestelmään tai erilliselle näytölle tarpeen mukaan. Järjestelmään voidaan lisätä varoitus- ja hälytystoimintoja releiden avulla. Tyypillisiä käyttökohteita ovat puhaltimet, pumput ja yksittäiset koneet ja laitteet. (Nome Oy.)

### **Online-järjestelmät**

Online-järjestelmät on suunniteltu usein laajojen kokonaisuuksien valvontaan, mutta saatavilla myös edullisempia ratkaisuja yksittäisten kohteiden valvontaan. Ne perustuvat valittujen värähtelyn tunnuslukujen trendiseurantaan. Kun valittu tunnusluku ylittää asetetun hälytysrajan, niin järjestelmä antaa hälytyksen. Voidaan käyttää sekä laajakaistaista tunnuslukujen valvontaa, jotta laitteiden kokonaisvärähtelyn muutokset havaittaisiin varhaisessa vaiheessa, että taajuusselektiivistä valvontaa. Taajuusselektiivisellä valvonnalla kyetään havaitsemaan

laitteen yksittäisissä komponenteissa tapahtuvat muutokset, joita ovat esimerkiksi vierintälaakerin ulkokehän tai hammastuksen kapeakaistaiset tunnusluvut. Nämä muutokset voidaan tunnistaa ja analysoida ajoissa vastaavissa signaaleissa esiintyvien ominaismallien perusteella. Tässä yhteydessä verhokäyräspektrin käytöllä on usein ratkaiseva merkitys. Näiden signaalien avulla voidaan havaita ja analysoida varhaisessa vaiheessa vaihteen tai vierintälaakerin aiheuttamat vaurioimpulssit. (Helander 2008; Schaeffler 2008.)

Laajakaistaisen valvonnan aika-alueella voidaan laskea alkuperäisestä signaalista esimerkiksi seuraavat tunnusluvut:

- tehollisarvo (RMS)
- crest factor (huippuarvon ja tehollisarvon suhde)
- huippuarvo
- huipusta-huippuun-arvo (Schaeffler 2008).

Taajuusselektiivisessä valvonnassa analyysissä voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia tunnuslukuja:

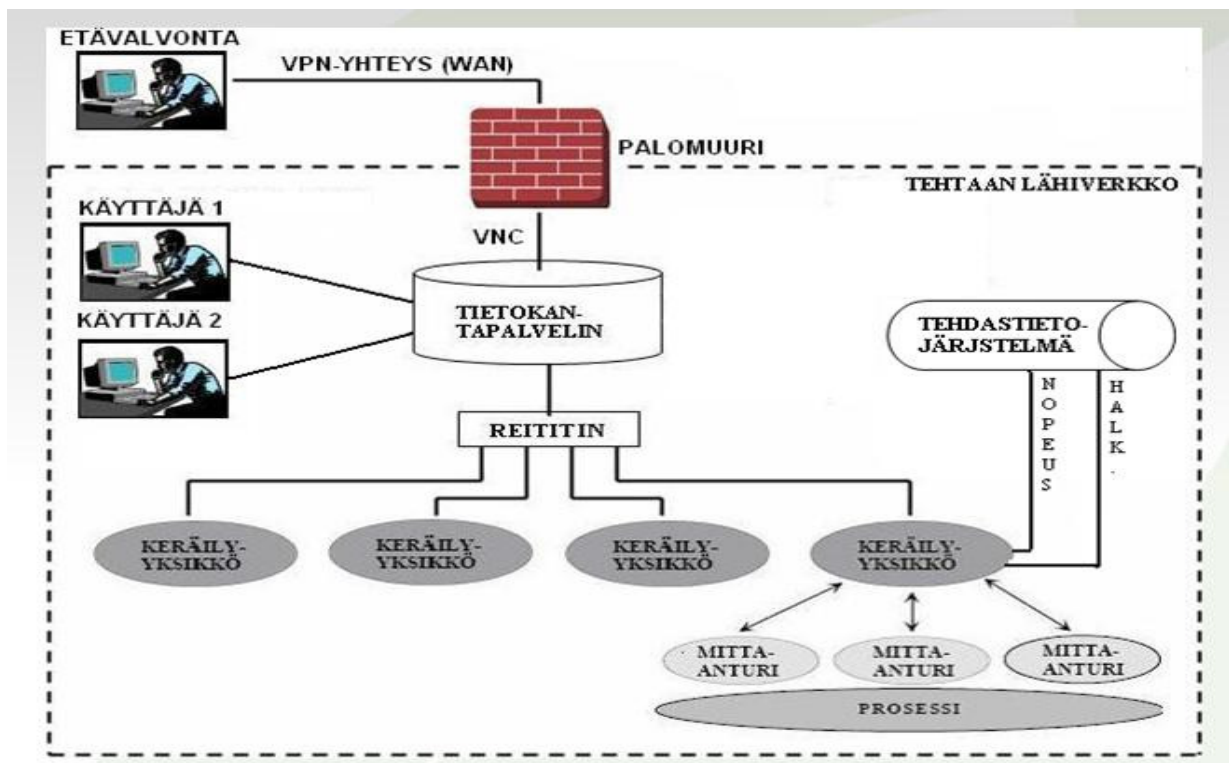
- värähtelynopeuden laajakaistainen tehollisarvo koneen kunnon yleistä arviointi varten standardin ISO 10816:n mukaisesti
- RMS, laajakaistainen tai selektiivinen
- laakerin diagnoositunnusluku, laajakaistainen tai selektiivinen (Schaeffler 2008).

Värähtelysignaalien lisäksi voidaan tarkastella muita prosessitietoja, kuten:

- lämpötila
- paine
- kuormitus
- pyörimisnopeus
- vääntömomentti
- öljyn kunto/öljyalaatu (Schaeffler 2008).

Nämä tiedot voidaan tallentaa ja niiden riippuvuutta värähtelysignaaleista voidaan tutkia. Näiden riippuvuussuhteiden tarkastelu mahdollistaa vielä tarkemmat arviot koneen kunnosta. Nämä prosessitiedot saadaan digitaalisten tai analogisten sisääntulojen kautta. Prosessisignaaleita voidaan käyttää myös käynnistämään aika- tai tapahtumaohjattuja mittaustehtäviä, ja siten ne mahdollistavat tietyissä käyttökohteissa tietojen tallennuksen automatisoinnin. Lisäksi on mahdollista välittää tietoja, kuten esimerkiksi hälytystilat, ylemmän tason järjestelmään ja säilyttää niitä siellä jatkokäsittelyä varten. (Schaeffler 2008.)

Seuraavassa kuvassa 6.6 on esimerkki online-järjestelmän rakenteesta.



Kuva 6.6 Esimerkki online-järjestelmän rakenteesta (Helander 2008)

Keräily-yksikköön voidaan kytkeä erilaisia mitta-antureita (värähtely, lämpötila jne.). Mitta-antureiden ja keräily-yksikön välinen tiedonsiirto voi tapahtua langattomasti tai kaapelilla. Langaton tiedonsiirto mahdollistaa antureiden vapaan sijoittelun ja niiden asentamisen pyöriviin ja liikkeessä oleviin laitteisiin. Lisäksi vältetään kaapeloinnin kalliilta jälkiasennustyöltä. Keräily-yksikkö voi lisäksi vastaanottaa ja lähettää dataa tehdastietojärjestelmään. Mittaussignaalin käsittely/prosessointi tapahtuu keräily-yksikössä ja mittaustulokset siirretään tietokan-

tapalvelimelle ja käyttäjän työasemalle, joiden sijoitus on riippumaton mittauspaikasta. Käyttäjän työasemalla on työkalut myös tarkempaan analysointiin. Mittaustulokset voidaan siirtää myös tehtaan lähiverkosta Internetin välityksellä asiantuntijoiden suorittamaan etävalvontaan.

Yhteenvetona voidaan todeta, että online-järjestelmässä on etuna hyvät analysointityökalut, muunneltavat valvontaparametrit ja ohjelmistojen kehitys (käyttäjä ystävällisyys ja automaattinen vikadiagnosointi). Haittoja taas on kallis hinta, tarpeettomat ominaisuudet, lisenssien ja päivitysten maksullisuus ja päivitys vaatii asiantuntemusta. (Helander 2008.)

### **Räätälöity online-valvonta**

Koneet ja laitteet ovat erilaisia eri teollisuuden aloilla. Tämän vuoksi kaikille sopivaa kaupallista online-järjestelmää on mahdotonta rakentaa. Lisäksi usein halutaan valvoa useita eri parametreja värähtelyn lisäksi. Online-järjestelmät voidaan rakentaa myös valvottavan kohteen mukaan, jolloin järjestelmään valitaan vain tarvittavat ”standardikomponentit”. Järjestelmään liitetyt signaalit, analysointi, ulostulot ja näytöt ovat vapaasti valittavissa. Visuaalisten ohjelmointityökalujen avulla voidaan nopeasti rakentaa tarvittava analysointi. Näytöt/käyttöliittymä voidaan rakentaa tarpeen ja toiveiden mukaan. Se on edullinen ja tehokas ratkaisu yksittäisten kriittisten kohteiden valvontaan. (Helander 2008; Nome Oy.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että räätälöidyssä online-järjestelmässä on etuna, että se sisältää vain tarvittavat komponentit, valvotaan vain haluttuja asioita, räätälöidyt näytöt ja myöhemmin laajennettavissa. Haittoja taas on kallis hinta ja päivitys vaatii asiantuntijaa. (Helander 2008.)

## **6.4 Kunnonvalvonnan diagnostiikka**

Värähtelysignaalia voidaan tarkastella aikatasossa ja taajuustasossa (spektri). Aikatasosta tai spektristä voidaan laskea erityyppisten vikojen kehittymistä eli trendiä kuvaavia tunnuslukuja. Muita kunnonvalvonnan värähtelymittausten mit-

taus- ja analysointimenetelmiä ovat muun muassa verhokäyräanalyysi (envelope), kepstri ja tahdistettu aikakeskiarvostus (profiilivalvonta). Näitä ja muita menetelmiä käsitellään myöhemmin tarkemmin luvussa 6.5 Valvontamenetelmät.

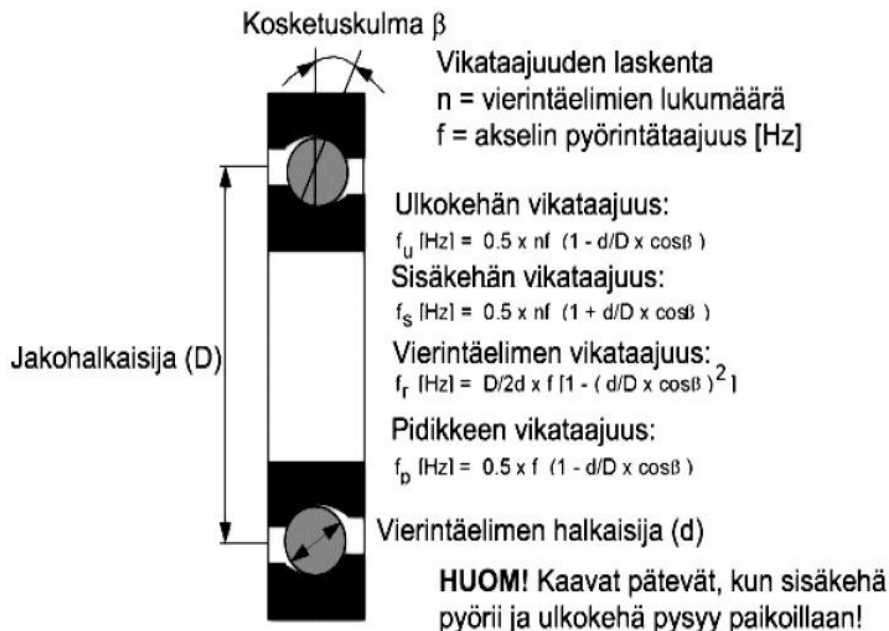
PSK 5707 -standardissa on määritelty pyörivien koneiden vikoja ja niiden havaitsemistapoja käyttäen standardin PSK 5706 valvontamenetelmiä. Tunnistamalla taajuustasossa vikojen aiheuttamat herätetaajuudet voidaan keskittyä valvomaan niitä. Tällaisia vikojen aiheuttamia herätteitä ovat esimerkiksi epätaapaino, laakeriviat, kytkinviat, linjausvial, hammaspyöräviat, väljät kiinnitykset ja resonanssit. Koneen normaalista toiminnasta aiheutuu myös herätteitä, joita ovat esimerkiksi pyörimistaajuiset herätteet, pumpun siipien aiheuttamat herätteet ja puhaltimen siipien aiheuttamat herätteet. Esimerkiksi vaihteistossa kiinnostavia ovat kaikkien akselien pyörimistaajuudet, kaikkien portaiden ryntötaajuudet sekä kaikkien laakerointien vikaantumistaajuudet. Hammaspyörien hampaiden kohtaaminen aiheuttaa jaksollista värähtelyä. Tähän liittyvää taajuutta kutsutaan ryntötaajuudeksi, joka saadaan kertomalla käyttävän akselin pyörimistaajuus saman akselin hampaiden lukumäärällä. Amplitudin voimistuminen ryntötaajuudella ei välttämättä kuvaa vian kehittymistä, koska amplitudi on riippuvainen kuormituksesta. Muiden oireiden ilmaantuminen on otettava huomioon vian määrittämisessä. Vaikka voimakas amplitudi ryntötaajuudella ei välttämättä merkitse vikaa, näkyy vaihteen ylikuormitus spektrissä amplitudin nousuna ryntötaajuudella. Värähtelymittauksissa onkin tärkeää ymmärtää koneen toiminta ja rakenne, ettei synny vääriä johtopäätöksiä mitatuista signaaleista.

#### **6.4.1 Vierintälaakerien diagnostiikka**

Laakerivauriot aiheuttavat sekä matalataajuisista laitteen pyörimisnopeuteen verrannollista värähtelyä (vaimenevia pulsseja ohitustaajuuksilla) että korkeataajuisista iskujen aiheuttamaa laakerin komponenttien tai koneen osien resonanssivärähtelyä, jonka taajuus on riippumaton laitteen pyörimisnopeudesta. Resonanssivärähtelyn voimakkuus lisääntyy kuitenkin pyörimisnopeuden kasvaessa. Näiden lisäksi vikaantuneesta laakerista voi tulla satunnaisvärähtelyä ultraääni- ja taajuudella sekä summautuneita ja moduloituneita värähtelyjä. Laakerin vikaantuminen voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen. Kaikkein aikaisimmissa vaihees-

sa voidaan laakeriongelmat havaita erittäin suuritaajuisten värähtelyn (yli ~80 kHz) ilmaantumisesta. Näin korkeiden taajuuksien mittaaminen vaatii akustisen emission antureiden käyttöä. Seuraavana vaiheena heräävät laakerin ominaistaajuudet (~20...~80 kHz). Näihin taajuuksiin on mahdollista päästä käsiksi kiihtyvyyksianturilla ja signaalin käsittelyllä eri tavoin. Kolmantena vaiheena tulevat esiin laakerin ohitustaajuudet (alle ~20 kHz). Neljäntenä vaiheena edellisten oireiden voimakkuus lisääntyy ja määrä kasvaa sekä esiintyy laajakaistaista satunnaisvärähtelyä (spektrin pohjakohinataso lisääntyy). (Mustonen 2000; Technical Associates of Charlotten taulukko.)

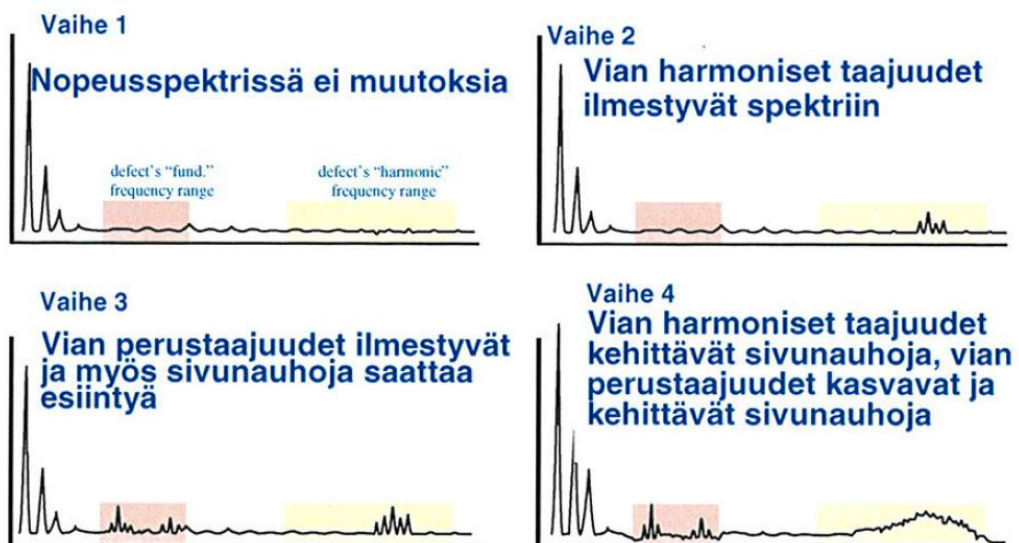
Koska kunnonvalvonnassa seurataan juuri laakereiden vikaantumista, on niiden toiminnassa syntyvien ohitus/vikataajuuksien tietäminen tärkeää. Laakerointien vikaantumistaajuudet saadaan laakerivalmistajien tai analysointiohjelmien laskentakaavoista tai laskemalla itse (kuva 6.7). Myös laakerin valmistaja ja tarkka tyyppi olisi syytä tietää, koska rullaluvut sekä laakerin sisäiset mitat vaihtelevat valmistajien välillä ja jopa saman valmistajan eri mallien välillä.



Kuva 6.7 Vierintälaakerin osien vauriotaajuuksien laskenta (KnowPap, Mustosen 2000 mukaan)

Laakerilta mitatun värähtelyn taajuudessa on aina havaittavissa pyörimisnopeuden taajuus riippumatta tasapainotuksen tai linjauksen onnistumisesta, mutta

jonkin osan vauriotaajuuden näkyminen värähtelyspektrissä on aina merkki jonkin asteisesta laakerivauriosta. Laakereiden vauriotaajuuksien havaitseminen on erityisen ongelmallista silloin, kun nämä taajuudet osuvat lähelle jotakin koneen pyörimistaajuuden harmonista komponenttia. Tällöin voidaan yrittää ratkaista ongelma suorittamalla värähtelymittaus spektrianalysointilaitteiden tarjoamalla zoom-toiminnolla, jolla taajuuserotuskyky saadaan mahdollisimman hyväksi. Vauriotaajuuksien amplitudeille ei ole olemassa mitään yksiselitteisiä sallittuja arvoja, koska amplitudit riippuvat huomattava paljon koneesta, laakerin ja anturin asennustavasta ja vauriomekanismista. Pääsääntöisesti vierintälaakereiden vikojen kehittyessä oireiden voimakkuus kasvaa ja niiden määrä lisääntyy. Jatkuessaan vika johtaa lopulta vierintälaakerin ja myös akselin vaurioitumiseen. Berry (1991) on todennut, että vaurion vakavuutta voidaan arvioida esiintyvien vauriotaajuuksien harmonisten monikertojen määrästä (kuva 6.8) (Mustonen 2000, 8). (Mustonen 2000; Mikkonen 2009.)



Kuva 6.8 Laakerin vaurioitumisen vaiheet (SKF)

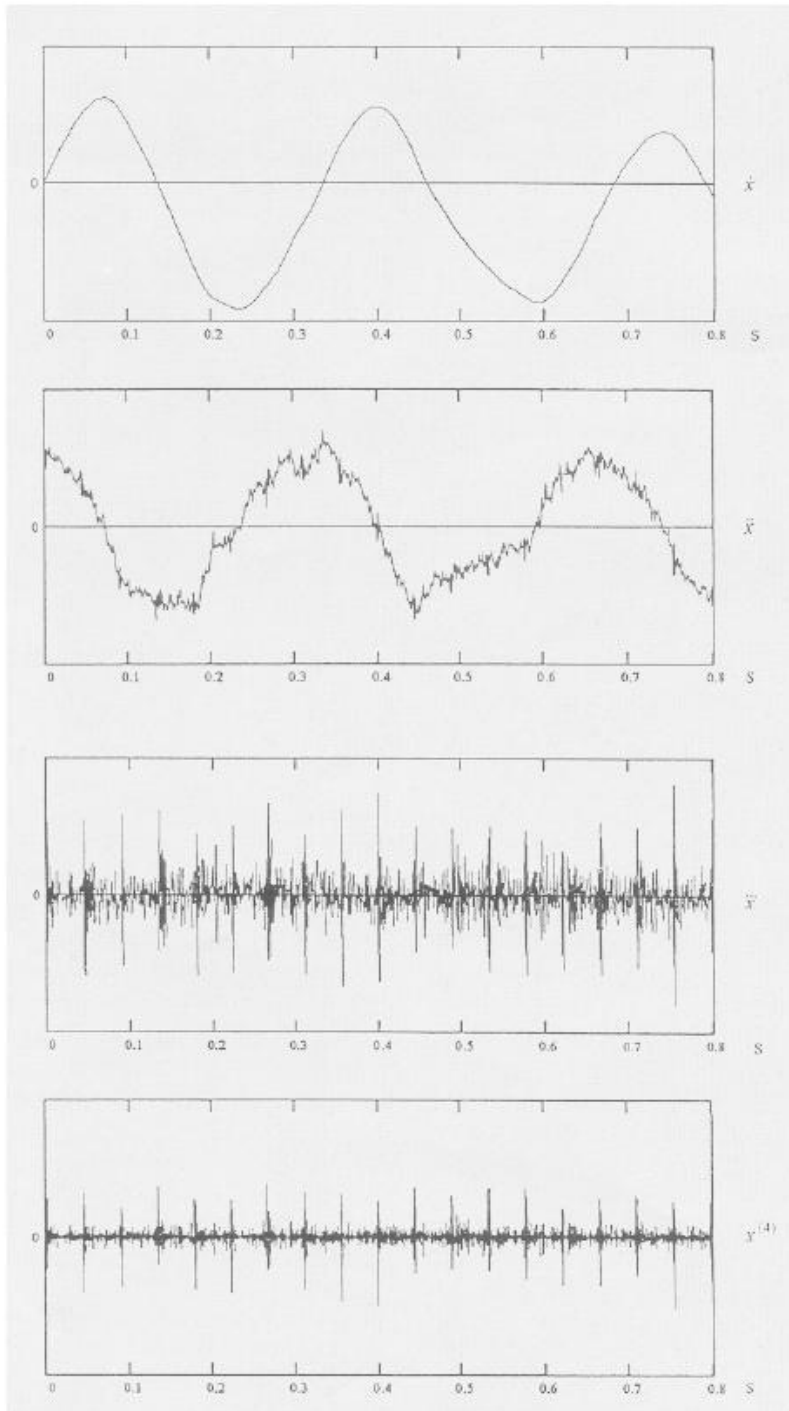
Jos monikertoja on useita ja näillä esiintyy sivunauhoja pyörimisnopeuden tai muiden vauriotaajuuksien etäisyydellä, on laakerin mahdollisimman nopea uusiminen suositeltavaa. (Mustonen 2000, 8.)

Laakerivaurioiden aiheuttamien iskujen voimakkuus on usein varsin vähäinen suhteessa laitteiden muuhun värähtelyyn erityisesti, jos käyntinopeus on mata-

la. Vaurion aiheuttama muutos saattaa siten jäädä huomaamatta nopeus- tai kiihtyvyysspektristä koneen normaalista toiminnasta johtuvien matalataajuisten ja suuriamplitudisten herätteiden takia. Laakerivian havaitsemiseen käytetäänkin taajuusspektrin lisäksi usein myös aikatasoesitystä. Pienemmillä nopeuksilla aikatasosignaali on spektrin tarkastelua parempi, mutta ollakseen havainnollinen vaatii yleensä ylipäästösuodatuksen, jotta korkeataajuinen vaurion aiheuttama isku korostuu. Muita yleisiä laakerivian havaitsemiseen käytettyjä menetelmiä ovat erilaiset korkeataajuiset menetelmät, kuten verhokäyräanalyysi, PeakVue-menetelmä, iskusysäys-mittaus (SPM), kiihtyvyyttä korkeampiasteiset aikaderivaatat tai akustinen emissio. Laakerivauriot pystytään löytämään nopeus- tai kiihtyvyysspektristä luotettavasti, kun tutkittava ohitustaajuus on kymmeniä hertsejä tai korkeampi. Hitaasti pyörivillä laitteilla ohitustaajuuksien havaitseminen on huomattavasti vaikeampaa. Hitaasti pyöriville vierintälaakereille parhaiten toimivat erilaiset verhokäyrämenetelmät. Verhokäyrämittaus on tehokas myös nopeakäyntisille koneille, jolloin se tarjoaa mahdollisuuden laakerivaurioiden havaitsemiseen riittävän aikaisessa vaiheessa. Verhokäyrätekniikan etuna tavalliseen nopeus- tai kiihtyvyyssignaalista tehtävään taajuusanalyysiin verrattuna on mahdollisuus suodattaa signaalista pois esimerkiksi epätasapainon ja huonosta linjauksesta aiheutuvat värähtelyt, jotka yleensä peittävät alleen alkavat laakeriviat. Laakerin vaurion aiheuttamat impulssit kykenevät kuitenkin herättämään laakerin tai laakeripesän värähtelemään omalla resonanssitaajuudellaan, joka on selvästi ympäristömelun taajuutta korkeampi. Verhokäyrämittauksessa kierretään matalataajuisten ja suuriamplitudisten ympäristömelun aiheuttamat esteet suodattamalla mitattavaksi ainoastaan kapea kaista korkeataajuisia värähtelyjä laakerin pesän resonanssitaajuuden ympäristöstä. Tämä signaali tasasuunnataan ja siitä piirretään verhokäyrä. Verhokäyrän spektrissä tulevat laakerin vikataajuuskomponentit selvästi esille. (Mustonen 2000; Mikkonen 2009; ABB:n TTT-käsikirja 2000.)

Mikäli laakeriviat ovat pieniä ja kierrosluvut ovat alhaisia, niin syntyvät iskut voivat olla niin heikkoja, etteivät ne näy kunnolla kiihtyvyyssignaalista ilman erikoistoimenpiteitä. Mikäli tällöin käytettäisiin nopeus- tai siirtymäsignaalia, niin tulokset yleensä huononisivat entisestään. Apua saadaan derivoimalla kiihtyvyyssignaali (kuva 6.9). (Järvinen, Miettinen, Kivistö & Lahdelma 2004.)





Kuva 6.9 Kiihtyvyyssignaalin derivoimisen vaikutus laakerivian näkymiseen (Lahdelma & Riutta 1996, Järvisen, Miettisen, Kivistön & Lahdelman 2004 mukaan)

Oheiset signaalit osoittavat, miten kiihtyvyyssignaalia derivoimalla saadaan laakerivika paremmin esille. Akselin pyörimistaajuus oli 3 Hz ja mittaukset tehtiin taajuusalueella 5 - 1000 Hz. Kuvassa ylimpänä on nopeussignaali ja siitä alas-

päin tultaessa on seuraavana kiihtyvyys, kiihtyvyyden ensimmäinen aikaderivaatta (jerkki) ja alimpana kiihtyvyyden toinen aikaderivaatta. Kiihtyvyyssignaalin derivoinnin seurauksena tapahtuu ylipäästösuodatus korkeiden värähtelykomponenttien vahvistumisen vuoksi. Kiihtyvyyttä korkeampiasteisia aikaderivaattoja voidaan käyttää esimerkiksi verhoikäyrä- tai PeakVue-mittauksissa korvaamaan kiihtyvyyssignaali, jolloin saadaan lisää herkkyyttä. Suomessa näitä aikaderivaattoja on käytetty menestyksellisesti erilaisten kohteiden mittauksissa ja niistä mainittakoon vierintälaakerit, hammasvaihteet, meesauunit, sähkö- ja hydraulimoottorit. Voidaan todeta, että kiihtyvyyttä korkeampiasteisten aikaderivaattojen käyttö ulottuu osaksi samalle alueelle kuin akustisen emission mittausten. Niiden etuna akustiseen emissioon verrattuna on se, että tullaan toimeen tavanomaisilla edullisilla kiihtyvyyssantureilla, joiden vaste on hyvin lineaarinen verrattuna akustisen emission antureihin. Lisäksi vältetään kaksinkertaiselta anturoinnilta, koska joka tapauksessa tarvitaan kiihtyvyyssantureita esimerkiksi normienmukaisten värähtelyarvojen saamiseksi. Vaikka nopeuden tehollisarvo ei ole hyvä indikaattori etsittäessä iskumaisuutta aiheuttavia vikoja, niin se on tärkeä esimerkiksi epätasapainon, asennusvirheen, käyrän akselin, mekaanisen välyksen tai resonanssin toteamisessa. Aikaderivaattoja käytettäessä mittausten ylärajataajuuden ei tarvitse myöskään olla mikään erikoisen korkea. Eräessä esimerkkitapauksessa viallista laakerista taajuusalueella 3 - 2000 Hz mitattu kiihtyvyyssignaali ja siitä muodostetusta aikaderivaatasta voidaan todeta, että viallisen ja ehjän laakerin huipukkuus- eli kurtosismittauksissa muutos oli ainoastaan 2-kertainen käytettäessä kiihtyvyyssignaalia, mutta se oli peräti 6-kertainen aikaderivaattaa hyödynnettäessä. (Järvinen, Miettinen, Kivistö & Lahdelma 2004.)

#### **6.4.2 Liukulaakerien diagnostiikka**

Liukulaakereilla varustetut koneet ovat yleensä suuria ja tuotantolaitoksen tärkeimpiä koneita. Niiden tehokas kunnonvalvonta on erityisen tärkeää kustannusten optimoinnissa ja riskien hallinnassa. Liukulaakerin vaurioissa riski koneen kiinnileikkauksesta on suuri ja vaurio voi kehittyä hyvinkin nopeasti. Siksi tehokas valvonta edellyttää jatkuvatoimista kiinteää järjestelmää. (Villanen & Luukkanen 1998, 3, 9.)

Liukulaakerin vioittumisen syyt voidaan jakaa seuraavasti:

- öljyn epäpuhtaudet
  - hankaus
  - murtumat ja säröt
  - korroosio
  - kavitaatioeroosio
  - laakerivirta
  - virheellinen asennus
  - riittämätön voitelu
  - liiallisen kuumenemisen aiheuttamat vauriot
  - ulkopuolisen lähteen aiheuttamasta värähtelystä aiheutuvat vauriot
- (Villanen & Luukkanen 1998, 3 - 4.)

Kunnonvalvontamenetelmien valinnan tulee perustua valvottavan koneen tai sen osan tehtäviin ja analyysiin siitä, miten nämä tehtävät voivat epäonnistua. Radiaalilaakerin tehtävänä on tukea ja ohjata pyörivää koneenosaa, ottaa vastaan roottorilta laakeriin kohdistuvat staattiset ja dynaamiset kuormitukset, vaimentaa niitä ja pitää roottori oikeassa asemassaan. Voiteluöljyn tehtävänä on lisäksi kehittää riittävä öljykalvon paksuus ja huolehtia laakerin jäähdytyksestä. (Villanen & Luukkanen 1998, 4.)

*Laakeriin kohdistuvia dynaamisia kuormituksia voidaan valvoa värähtelymittauksilla. Värähtelymittauksilla voidaan määrittää myös roottori laakerijärjestelmän dynaamisia ominaisuuksia, kuten taivutusominaistaajuudet ja vaimennukset. Värähtelymittauksilla pystytään valvomaan ja selvittämään liukulaakerin vaurioiden syitä ja niiden seurauksia. Vaurion syitä voivat olla epätasapaino, akselin taipuma, linjausvirheet, löysyydet, liian suuri tai liian pieni laakerivälitys, voitelun riittämättömyys ja epästabiilit värähtelyt. Seurauksia voivat olla esim. kiinniotto, hankaus ja kuluminen. (Villanen & Luukkanen 1998, 4.)*

Laakeriin kohdistuvia staattisia kuormituksia voidaan valvoa mittaamalla akselin radiaalinen asema laakerissa sekä laakerin ja laakeriöljyn lämpötila. Kun akseli pyörii hydrodynaamisesti voidellussa laakerissa, asettuu akselin keskipiste epäkeskisyyden verran sivuun laakerin keskipisteestä. Epäkeskisyys riippuu radiaa-

livoiman suuruudesta, laakerin mitoista ja geometriasta, pyörimisnopeudesta ja öljyn viskositeetista. Mikäli esimerkiksi laakerin staattisissa voimissa radiaalisuunnassa tapahtuu muutoksia, siirtyy akselin keskipiste tunnetusta asemastaan. Tällaisia voimia voivat aiheuttaa muun muassa linjausvirheet, lämpötilamuodonmuutokset ja vaihteiston hammasvoimat. Seuraamalla järjestelmällisesti akselin asemaa sekä vertailemalla sitä koneiston värähtelytasoihin saadaan tietoa laakerin radiaalivoimissa tapahtuvista muutoksista. Akselin radiaalisen aseman mittausta käytetään myös laakerin ja akselin kiinnioton ennakointiin. (Villanen & Luukkanen 1998, 4, 6.)

*Liukulaakereiden kunnonvalvonnassa hyödynnetään sekä laakerivärähtelyn että akselivärähtelyn mittauksia. Laakerivärähtelyt mitataan yleensä nopeuden tehollisarvona, mutta iskujen aiheuttaman korkeataajuisen värähtelyn valvontaan käytetään usein kiihtyvyyden huippu- tai huipusta huippuun -arvoa. Akselivärähtely mitataan siirtymänä ja amplitudi huipusta huippuun -arvona. (Villanen & Luukkanen 1998, 5.)*

*Värähtely on koneen tai koneen osan edestakaista liikettä tai pyörivän akselin kieppumista. Akselin kieppuminen on taipuneen akselin keskipisteen kiertoliikettä pituusakselin ympäri. Kieppumisen hallitseva taajuus esiintyy yleensä pyörimistaajuudella ja sen alimmilla kerrannaisilla, mutta taajuus voi joissakin tapauksissa myös poiketa pyörimistaajuudesta. Kieppuminen voi tapahtua akselin pyörimissuuntaan tai pyörimissuuntaa vastaan. Liukulaakerin kohdalla tapahtuva kieppuminen esitetään ratakäyrän muodossa. (Villanen & Luukkanen 1998, 5.)*

Roottorin tai akselin hankaus on epälineaarinen ilmiö, josta voi olla seurauksena useita värähtelymekanismeja ja niistä aiheutuvia ongelmia. Hankaus voi olla osittaista, jolloin sitä esiintyy vain osalla pyörimätöntä kehää. Osittainen hankaus voi johtaa täyteen rengasmaiseen hankaukseen. Tällöin hankausta esiintyy pyörimättömän osan kehällä koko matkalla. Hankaus aiheuttaa laakerimetallin kulumisen ja mahdollisesti sulamisen. Akselin kiinniotto valkometalliin on aina erittäin vaarallinen, joten se täytyy havaita välittömästi tai mieluiten ehkäistä sen tapahtuminen kokonaan. Hankaus voidaan parhaiten ennakoida valvomalla akselivärähtelyjä ja akselin asemaa laakerissa. (Villanen & Luukkanen 1998, 3, 7.)

Liukulaakerin kulumisen ja välisongelmat voivat radiaalilaakerissa aiheuttaa värähtelyominaisuuksissa monia muutoksia, joista tyypillisimpiä ovat Villasen & Luukkasen (1998, 11) mukaan:

- Laakerivälysten kasvaminen ja öljykalvon ominaisuuksien muuttuminen voi aiheuttaa värähtelyä aliharmonisilla ja ei-harmonisilla komponenteilla ja roottorin epästabiiliuden.
- Kulumisen lisääntyessä kasvaa värähtely pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla. Myös spektrin pohjataso on usein kohonnut.
- Kulunut liukulaakeri voidaan usein havaita vertailemalla vaakasuuntaisen akselivärähtelyn amplitudeja. Tavallisesti vaakasuuntainen akselivärähtely on hieman suurempi kuin pystysuuntainen johtuen suuremmasta välisestä vaakasuunnassa ja suuremmasta jäykkyydestä pystysuunnassa. Kulunut laakeri sallii epätavallisen suuren värähtelyn pystysuunnassa.
- Väljässä ja kuluneessa laakerissa akselin asema voi muuttua, mikä voi aiheuttaa muutoksen linjauksessa ja värähtelytaso kasvaa 2·RPM taajuudella. Väljä laakeri voi aiheuttaa myös akselin kiinnioton esimerkiksi tiivisteseeseen.

Laakerivärähtely mitataan laakeripukin pintaan kiinnitetyllä anturilla. Nykyisin käytetään yleensä pietsosähköistä kiihtyvyyssanturia, joka mittaa kiinnityspisteensä absoluuttista värähtelyä. Liukulaakereilla varustetuilla koneilla, joiden roottorit ovat kevyitä suhteessa perustukseen ja laakerointiin, ovat laakerit epäherkkiä niihin kohdistuville voimille. Laakeripukin värähtely voi siis olla hyvinkin pieni vaikka akseli värähtelee vaarallisen paljon. Suurten liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonnassa ja diagnostiikassa akselivärähtely onkin laakerivärähtelyyn verrattuna merkittävästi parempi mittaussuure. (Villanen & Luukkanen 1998, 7 - 8)

Liukulaakerien värähtelyvalvonnassa käytettävät menetelmät pohjautuvat viiden perusominaisuuden tarkasteluun:

- värähtelyn tunnusluvut eri taajuuksalueilla

- vaihekulma
- spektri
- aikataason signaalin aaltomuoto
- akselin ratakäyrä
- akselin asema laakerissa. (Villanen & Luukkanen 1998, 9.)

Akustisen emission mittausta käytetään jonkin verran myös liukulaakerien kunnonvalvonnassa. Liukulaakerien vauriot kehittyvät pahimmillaan hyvin nopeasti, ja kosketuksen mahdollisuus tulisi ennakoida ennen kuin sitä laakerissa syntyy. Siksi esimerkiksi öljyn paineen, akselin aseman ja akselivärähtelyjen systemaattista mittausta pidetään liukulaakerien kunnonvalvonnassa akustista emissiota parempina menetelminä. (Villanen & Luukkanen 1998, 12.)

## **6.5 Valvontamenetelmät**

Liitteen 1 kuvassa 1 on esimerkkejä eri mittalaitetyyppien käytöstä eri kohteille. Saman liitteen kuvassa 2 on esimerkkejä eri mittausmenetelmien soveltuvuudesta erityyppisten vikojen havainnointiin. Näiden esimerkkien sekä tässä opinäytetyössä käytettyjen lähteiden perusteella kerron lyhyesti yleisimmät värähtelyn valvontamenetelmät liittyen sähkömoottoreihin, hammasvaihteisiin, vierintälaakereihin ja säteisliukulaakereihin.

### **6.5.1 Tunnuslukuvalvonta**

Värähtelysignaalista voidaan laskea erilaisia tunnuslukuja, joiden kehittymistä eli trendiä seurataan. Rutiiniseurantaan riittää usein kokonaistasojen valvonta, varsinkin kun kyseessä on kone, jonka rakenne ja toiminta tunnetaan hyvin. Kokonaistasovalvonnassa ongelmana on se, että usein laitteille sallitaan varsin voimakas värähtely esimerkiksi pyörimistaajuudella. Joillain muilla taajuuksilla, kuten pyörimistaajuuden harmonisilla monikerroilla ja laakereiden vikataajuuksilla, jo melko vähäinen värähtely voi olla merkinä vakavasta vauriosta. Tämän vuoksi kunnonvalvonnassa on tarpeen käyttää useita tunnuslukuja. Trendiseuranta perustuu säännöllisesti toistettaviin mittauksiin, jotka tulee tehdä huolellisesti samasta pisteestä. Tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi anturin

on oltava aina tukevasti kiinnitetty. Tunnusluvuille luodaan hälytysrajat, ja kokemuksen lisääntyessä hälytysrajoja voidaan lisätä ja tarkentaa. (Mikkonen 2009.)

#### **6.5.1.1 Värähtelyn kokonaistasovalvonta**

Seurattavana suureena käytetään tavallisimmin tehollis- tai huippuarvoa kiihtyvyydelle, nopeudelle tai siirtymälle. Tavallisimmin nopeuden tehollisarvoa mitataan taajuusalueella 10 Hz...1 kHz ja siitä käytetään nimitystä värähtely (PSK 5701). Värähtely sopii tunnusluvuksi esimerkiksi oikosulkumoottorin epätasapainon valvontaan. Korkeilla taajuuksilla saadaan nopeutta paremmin indikaatio vikaantumisesta kiihtyvyyden kokonaistason mittauksilla esimerkiksi taajuusalueella 1 kHz...10 kHz. (Mikkonen 2009.)

#### **6.5.1.2 Taajuustason tunnusluvut**

Tunnusluvut lasketaan tietyltä taajuuskaistalta, jolla vian oletetaan ilmenevän. Tunnuslukuna on yleensä joko valitun kaistan tehollisarvo tai suurin amplitudi. Esimerkiksi oikosulkumoottorin pyörimistaajuisen värähtelyn (1·RPM) voimakkuutta voidaan valvoa, koska sen kasvu merkitsee yleensä epätasapainoa. Oikosulkumoottorin linjausvirhettä voidaan valvoa taajuuskaistalla 1·RPM...3·RPM. Oikosulkumoottorin roottorivika voi ilmetä esimerkiksi sähköverkon taajuudella tapahtuvan värähtelyn voimakkuuden kasvamisena ja staattorivika voi ilmetä esimerkiksi verkkotaajuuden kerrannaisilla kuten 2·verkkotaajuus olevan värähtelyn voimakkuuden kasvamisena. (Mikkonen 2009.)

#### **6.5.1.3 Aikataso tunnusluvut**

Aikatasosignaalin laskettuja tunnuslukuja ovat esimerkiksi huippuarvo, huipusta huippuun arvo ja tehollisarvo. Kurtosis on tilastollinen menetelmä, joka sopii erityisesti vierintälaakereiden kunnan mittaamiseen, ja se kuvaa aikatasosignaalin ”piikikkyyttä”. Kurtosis on muita menetelmiä riippumattomampi koneen käyntiparametreista. Kurtosis-arvo perustuu siihen oletukseen, että ehjän laake-

rin värähtely on satunnaisvärähtelyä, joka noudattaa Gaussin jakaumaa. Sen avulla on mahdollista tehdä vierintälaakerin kunnosta arvio yhdellä mittauksella ilman pitkään jatkunutta trendiseurantaa. Kunnossa olevan laakerin kurtosisarvo on limain 3 ja arvon kasvamista pidetään merkinä laakerivauriosta. Huippukerroin (Crest-factor) määritellään huippuarvon ja tehollisarvon suhteena. Huippukerroin perustuu, kuten kurtosiskin, mitattujen näytteiden jakauman muuttumiseen. Normaalikuntoisessa koneessa arvot ovat yleensä 2 - 6 ja vakava vika alkaa, kun arvo on suurempi kuin 10. Vikakehityksen loppuvaiheessa tehollisarvo kasvaa ja samalla iskujen voimakkuus pienenee, joten huippukerroin palaa kohti alkuperäistä arvoaan. (Mikkonen 2009.)

### **6.5.2 Aikatasovalvonta**

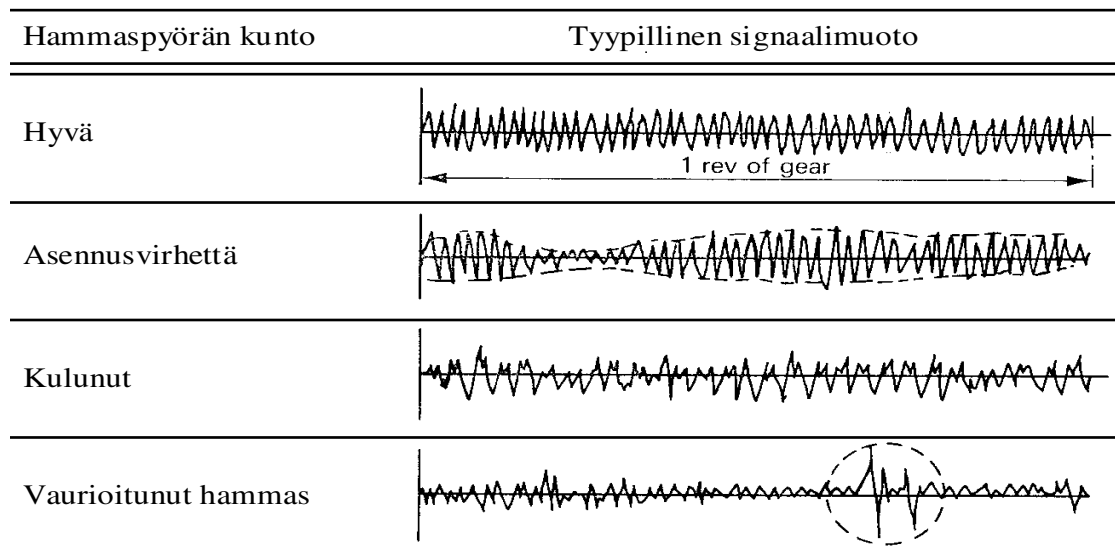
Aikatasosignaalin analysointia käytetään usein spektrimittauksen lisäksi, kun halutaan varmistaa vianmäärittystä tai kun haetaan aikatasosta viitteitä sellaisista vioista, jotka voivat jäädä spektrissä helposti huomaamatta. Jo pelkästään aikatasosignaalin silmämääräinen tutkiminen antaa paljon tietoa koneen kunnosta. Aikatasosignaalin muodosta voidaan usein nähdä, mikä vika koneessa on. Esimerkiksi huojunta voi merkitä sähkömoottorivikaa, tärinää toisesta koneesta tai nivelakselin linjausvirhettä. Iskut voivat merkitä esimerkiksi laakerivikaa tai roottorin siiven osumista pesään. Toispuoleinen signaali voi merkitä esimerkiksi linjausvirhettä, hankausta tai löysää liitosta. Aikatasosignaalin silmämääräinen lukeminen on kuitenkin riippuvainen analysoijasta ja vaatii aikaa. (Mikkonen 2009.)

### **6.5.3 Profiilivalvonta**

Mittausmenetelmänä on tahdistettu aikakeskiarvostus, jonka avulla pystytään kohdentamaan vauriosignaali tietylle koneenosalle. Esimerkkinä tästä ovat monitelaiset kalanteriyksiköt tai moniportaiset vaihteet, kun viallinen hammaspyörä tai tela on tarkoitus jäljittää. Tällöin monikanavainen liipaisu järjestetään jokaiselle mielenkiintoiselle osalle ja jokaisesta lasketaan oma STA (Synchronous Time Averaging), joka kuvaa yksinomaan liipaisukohteen värähtelyä. Vaurion sisältävän koneenoson lisäksi voidaan paikallistaa myös vauriokohta, esimer-



kiksi vioittunut hammas tai telapäällysteen vaurion kulma-asema. Tahdistetussa aikakeskiarvostuksessa värähtelyä mitataan tavallisesti kiihtyvyyssanturilla, joka kiinnitetään tutkittavaan hammaspyörää lähinnä olevaan laakeripesään. Tahdistuspulssit saadaan esimerkiksi hammasvaihteen sisäänmeno- tai ulostuloakselilta takometrin avulla. Kun liipaisusignaali on otettu eri akselilta kuin haluttu värähtelymittaus, on mittauksessa käytettävä pulssilaskuria tai niin sanottua virtuaalista takometriä, jonka avulla takometrin liipaisutieto saadaan siirrettyä vastaamaan mittauksen liipaisua halutulla akselilla. Tahdistetun aikakeskiarvostuksen idea perustuu siihen, että jos keskiarvostetaan tarpeeksi monta aikanäytettä, niin signaalista kumoutuvat muiden koneenosien aiheuttamat värähtelyt, koska ne toistuvat eri jaksonpituuksina kuin mitä on tutkittavan hammaspyörän pyörimisjakso. Menetelmää käytetään hammaspyörävaurioiden tunnistamiseen ja paikannukseen signaalimuodon perusteella (kuva 6.10). (VTT; Mikkonen 2009.)

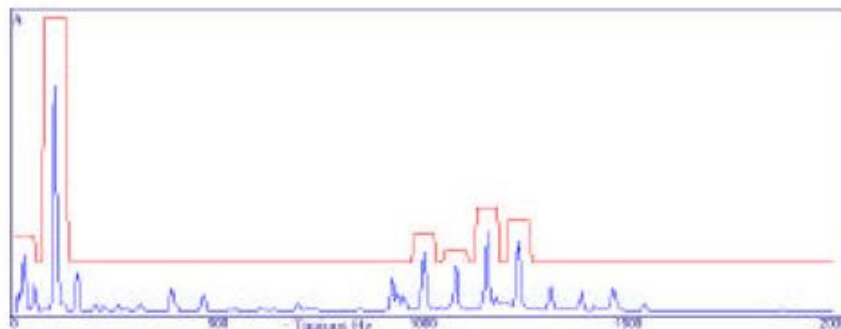


Kuva 6.10 Hammasvaihteesta keskiarvostamalla saatuja tyypillisiä signaalimuotoja (Neale 1979, VTT:n mukaan)

Kuva esittää tutkittavan hammaspyörän pyörimisperiodia pituusprofiilina, jonka avulla nähdään hammaspyörän kunto ja pystytään paikallistamaan vaurioitunut hammas.

## 6.5.4 Spektrivalvonta

Värähtelyspektrit muodostetaan aikatasosignaalista joko FFT- laskennalla tai kapeakaistaisilla taajuussuotimilla. Värähtelyspektri on erittäin käyttökelpoinen kunnonvalvonnassa ja vika-analyyseissä. Yksittäisten koneenosien kuntoa voidaan valvoa, kun erotetaan eri osista tulevan värähtelyn taajuudet ja niitä vastaavat värähtelyamplitudit. Tämä edellyttää, että akselien pyörimisnopeudet ja eri koneenosien rakenne tunnetaan (hammasluvut, laakerityypit, kuormitusvaihtelut, paine jne.). Herätetaajuudet ovat yleensä suoraan verrannollisia koneen pyörimisnopeuteen. Kaikki spektrissä olevat piikit eivät suinkaan kuvaa jotain vikaa, vaan suurin osa niistä johtuu koneen normaalin käynnin aiheuttamista voimista. Matalilla taajuuksilla ilmiöt näkyvät usein pyörimistaajuuden päässä toisistaan (vaaditaan suurta erotuskykyä) ja korkeilla taajuuksilla ilmiöt esiintyvät usein satojen hertsien päässä toisistaan (riittää vähäisempi erotuskyky). Näiden syiden takia käytetään usein logaritmista spektriä. Koska joillakin taajuuksilla jo melko vähäiset spektrin amplitudien kohoamiset ilmaisevat vikaantumista, on spektrien tarkastelu tehtävä huolellisesti. Valvonnan helpottamiseksi voidaan käyttää kaistahälytyksiä tai hälytysrajaspektriä. Kaistavalvonnassa asetetaan halutuille taajuuskaistoille amplitudille rajat, joiden ylittyminen laukaisee hälytyksen. Spektrivalvonnassa muodostetaan aikaisempien mittausten perusteella hälytysrajaspektri (kuva 6.11). (Kunnossapitoteknologia luentomuistiinpanot.)

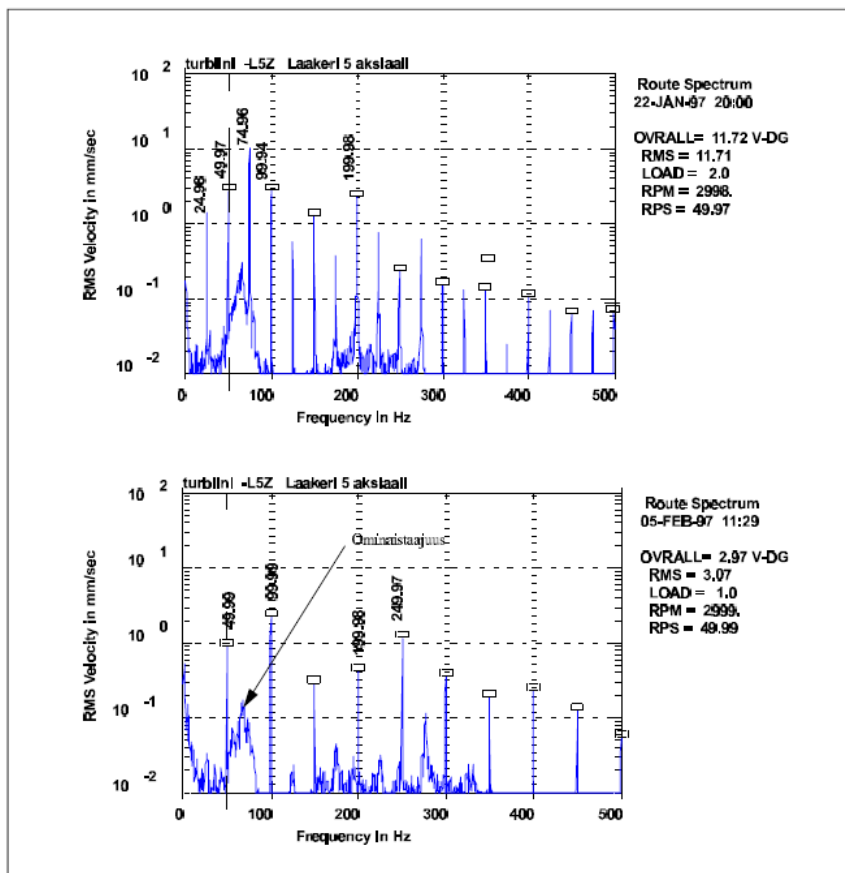


Kuva 6.11 Hälytysrajaspektri (PSK 5706)

Jos asetettu raja ylittyy, minkä tahansa spektrikomponentin vaikutuksesta, aiheutuu hälytys.

Haystack-ilmioitä on käytetty erityisesti vierintälaakeriden voiteluongelmien tunnistamisessa. Se näkyy amplitudispektrissä muutaman kilohertsin taajuudella piikikkäänä kuviona, joka muistuttaa jonkin verran heinäkasaa. Silloin kun vierintälaakerin voitelu ei ole optimaalinen, tuottavat vierintäelinten ja vierintäratojen väliset kosketukset pieniä rakenteen ominaistajuuksia herätteleviä impulsseja epäsäännöllisellä taajuudella. Näkyvä värähtely ei ilmene millään täsmällisellä taajuudella, vaan tietyn taajuusalueen hieman epäsäännöllisenä kohoamisena. Taajuusalue riippuu laakerin ominaistajuuksista. Pienemmällä laakereilla ominaistajudet ovat tyypillisesti korkeampia, joten pienimmillä laakereilla haystack-ilmio ei välttämättä näy, jos mittausalue ei ulotu riittävän korkeille taajuuksille. (Mikkonen 2009, 253)

Kuvassa 6.12 on esitetty eräästä liukulaakerista kiinniottotilanteessa ja ilman kiinniotta mitatut värähtelyspektrit. Kuvassa pyörimistaajuus on 50 Hz.



Kuva 6.12 Liukulaakerin värähtelyn spektrejä. Ylhäällä kiinniotto ja alhaalla ilman kiinniotta (Villanen & Luukkanen 1998, 9)

Kiinniotto laakerissa synnyttää epälineaarisen värähtelyilmiön, joka näkyy spektrissä ei-harmonisten komponenttien kasvuna. Kuvan kiinnioton tapauksessa kasvaneita komponentteja ovat  $1/2 \cdot \text{RPM}$  ja sen monikerrat. (Villanen & Luukkanen 1998, 9)

### 6.5.5 Kepstrivalvonta

Kepstri (cepstrum) on logaritmisen tehospektrin Fourier-muunnoksen neliö. Taajuusakselia vastaa kepstrin esityksessä jaatuusakseli. Jaatuuden (qufreny) yksikkö on  $1/\text{Hz}$  eli sekunti. Kepstristä voidaan havaita spektrin erilaisia säännöllisyyksiä, joita voivat olla harmonisten taajuuksien sarjat ja sivunauhataajuuDET. Tällaisia ovat esimerkiksi shokkipulssit hammas- tai laakerivioista. Taajuuden monikerrat näkyvät kepstrissä yhtenä piikkinä. Kepstrianalyysistä on saatu hyviä kokemuksia erityisesti vaihteiden kunnonvalvonnassa. Mitattava signaali on suodatettava halutulta taajuusalueelta, jotta kepstrianalyysi olisi tehokas. Suodatus voi olla esimerkiksi ryntötaajuuden ympärillä oleva  $200 \text{ Hz:n}$  kaista. (Nohynek & Lumme 1996; Mikkonen 2009.)

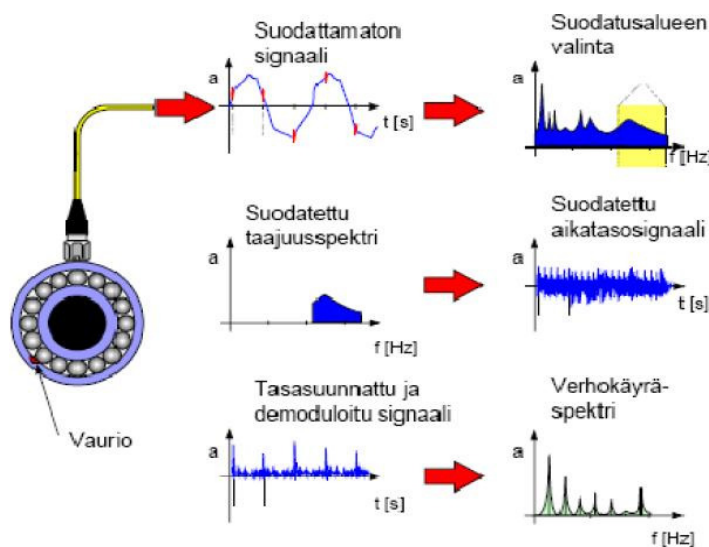
### 6.5.6 Vektorivalvonta

Vektorivalvonta on tarkka menetelmä seurattaessa koneen tasapainotilaa ja niitä vikoja, jotka aiheuttavat muutoksen sekä tärinän taajuuteen että vaihekulmaan. Esimerkkinä tällaisesta viasta on poikittainen särö. Vektorivalvonnassa mitataan ensin valvottavan värähtelytaajuuden amplitudi ja vaihekulma. Vaihekulman mittaukseen tarvittava tahdistussignaali otetaan akselin pyörimisliikkeestä. Mittausarvot yhdistetään värähtelyvektoriksi, jota voidaan tarkastella polaarikoordinaatistossa. Valvottavien värähtelyvektorien ympärille asetetaan hälytysrajat, jolloin sallitun alueen ylityksestä annetaan hälytys. Tietyllä värähtelytaajuudella voidaan saada vektorivalvonnassa hälytys, vaikka spektrissä tätä taajuutta vastaava amplitudi ei ole muuttunut ollenkaan tai se on pienentynyt. Vektorivalvonnalla voidaan koeluonteisesti määrittää myös koneen ominaistajuuDET, kun mittauspisteen värähtelyvektoria seurataan koneen kierrosluvun muuttuessa. Saaduista tuloksista voidaan piirtää Nyquistin tai Boden diagrammi. (Nohynek & Lumme 1996, 104-106.)

### 6.5.7 Verhokäyrävalvonta

Verhokäyräanalyysi (envelope analysis) on signaalinkäsittelymenetelmä, jolla signaalista erotetaan säännöllisesti toistuvia heikkotehoisia komponentteja. Tällaisia herätteitä muodostavat laakerivauriot ja vaihteiston hammaspyörävauriot. Se perustuu amplitudimoduloituneen signaalin suodatukseen ja demodulointiin. Amplitudimodulaatiossa moduloitava signaali kerrotaan sitä korkeampitaajuisen kantoaallon signaalin kanssa. Moduloiduksi signaaliksi voidaan ajatella vikataajuus ja kantoaaloksi jokin korkeataajuinen värähtely, kuten esimerkiksi vierintälaakerin ominaistajuus, ryntötaajuus tai jokin muu vikataajuutta oleellisesti korkeampi taajuus. Verhokäyräanalyysi on osoittautunut luotettavaksi erityisesti hitaasti pyörivien koneiden vierintälaakereiden vikojen selvityksessä. (Nohynek & Lumme 1996; Mikkonen 2009.)

Kuvassa 6.13 suodattamaton laakerista mitattu aikatasosignaali sisältää laakerin alkavan vaurion aiheuttamia korkeataajuisia signaaleita ohitustaajuudella, jonka jaksonaika on  $T$ . Signaalista suodatetaan purskeet sisältävä taajuusalue, jolla sijaitsee iskujen herättämä laakerin ominaistajuus. Suodatetun signaalin vahvistuksen jälkeen se demoduloidaan tasasuuntaamalla ja alipäästösuodattamalla siitä kantoaalto pois. Demoduloidusta signaalista lasketaan lopuksi niin sanottu verhokäyräspektri, jossa näkyy ohitustaajuus ja sen kerrannaisia sekä mahdollisesti sivunauhataajuuksia. (Mikkonen 2009.)

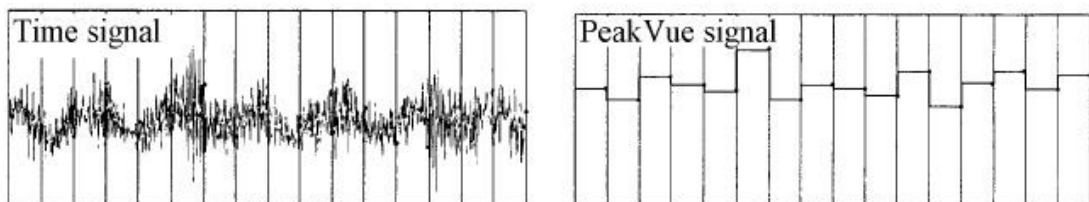


Kuva 6.13 Verhokäyräanalyysin periaate (Mikkonen 2009)

Yleisesti laakerivauriot voidaan mitata laittamalla kaistanpäästösuodatin tai ylipäästösuodatin laakerin ominaistaajuuden ympärille, demoduloimalla se ja tekemällä sille spektrianalyysi. Verhokäyräanalyysissä alarajataajuus valitaan tavallisesti väliltä 5 Hz - 5 kHz. Myös demoduloidun signaalin aikatason analyysiä voidaan hyödyntää samaan tapaan kuin normaalissa spektrivalvonnassa ja siitä voidaan laskea tehollisarvo. On myös mahdollista asettaa hälytysrajat verhokäyräanalyysille. (Nohynek & Lumme 1996; Mikkonen 2009.)

### 6.5.8 PeakVue™ -menetelmä

PeakVue on analysointimenetelmä, joka määrittää aikatasosignaalin huippuarvon määritetyillä aikajakson pituuksilla ja muodostaa huippuarvoista niin sanotun PeakVue-signaalin. Saatua signaalia voidaan käsitellä normaaleilla signaalinkäsittelymenetelmillä kuten tilastolliset menetelmät tai spektrianalyysi. Menetelmässä ylipäästö- tai kaistanpäästösuodatettu signaali jaetaan aikajaksoihin, joiden pituus määräytyy samalla periaatteella kuin yleensäkin värähtelyanalyysaattoreissa eli  $1 / (2,56 \cdot \text{ylärajataajuus})$ . Aikajakson korkein amplitudi etsitään 100 kHz:n näytteenottotaajuudella. Korkealla näytteenottotaajuudella pyritään varmistamaan, että mittauksesta havaitaan viasta aiheutuvat lyhytkestoiset iskut. Saadut maksimiarvot tasasuunnataan ja lopulta niistä muodostetaan PeakVue-signaaliksi kutsuttu aikatason kuvaaja, jossa esitetään pelkät tasasuunnatut maksimiarvot mitatuilta aikajaksoilta (kuva 6.14). (Mikkonen 2009; Sulo & Koski 2006.)



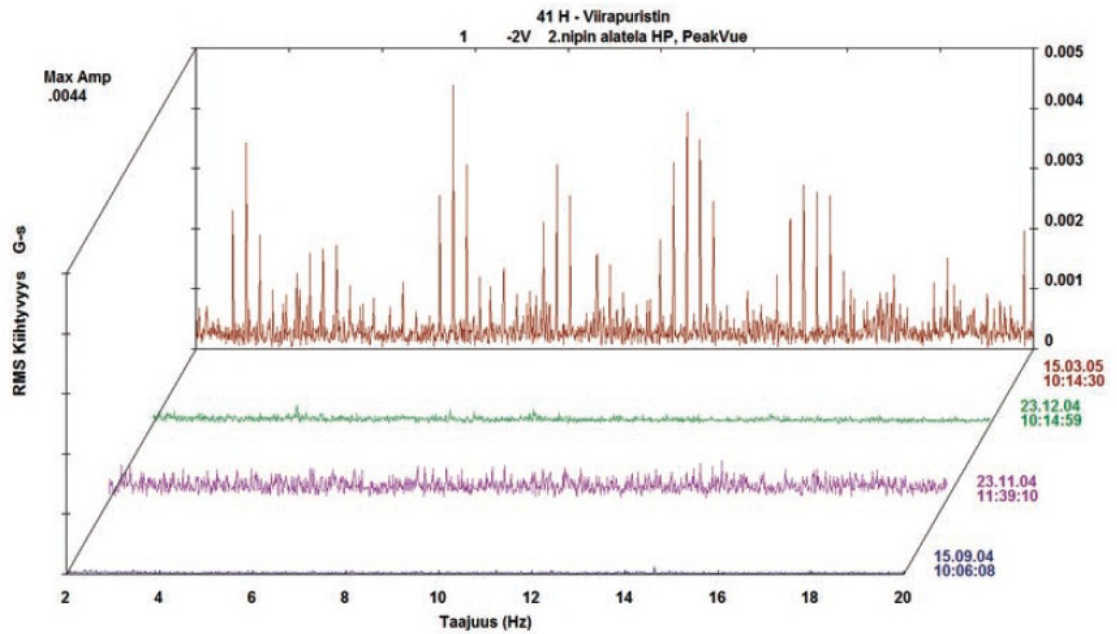
Kuva 6.14 Värähtelyn aikatasosignaali ja sen PeakVue signaali (Mikkonen 2009)

Menetelmällä on siten mahdollista nähdä korkeataajuiset purskeet helpommin aikatasossa.

Menetelmää käytetään lyhytkestoisten, korkeataajuisien ilmiöiden analysoinnissa. Niitä syntyy metalli-metalli-kosketuksissa, hankauksessa tai vastaavissa tapauksissa, esimerkiksi kun vierintälaakerin vierintäelin ohittaa vierintälaakerin ulko- tai sisäkehällä olevan vauriokohdan tai kun murtumassa olevan vaihteen hammaspyörän hammas on kuormitettuna rynnössä. Korkealla taajuudella ilmenevät lyhytkestoiset iskumaiset signaalit ovat usein amplitudiltaan niin matalia, että ne häviävät normaalissa värähtelymittauksessa koneen matalataajuisen värähtelyyn mittalaitteen rajallisen dynamiikan takia. (Sulo & Koski 2006.)

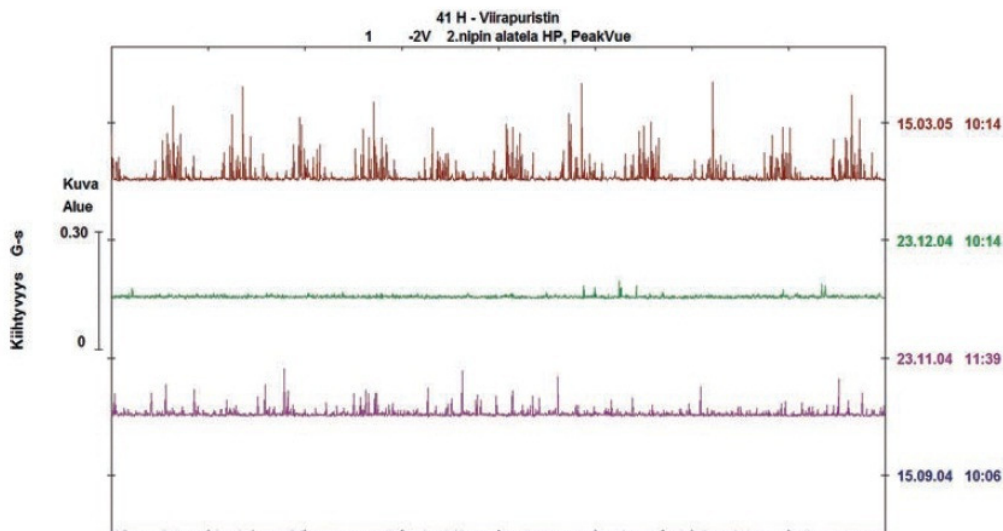
Toisin kuin verhokäyrämittauksessa ei PeakVue-mittauksessa käytetä signaalin alipäästösuodatusta, eikä mittausmenetelmässä lähdetä oletuksesta, että etsitävällä matalataajuisemmalla ilmiöllä on oltava jokin korkeataajuinen kantoaalto. Signaalinkäsittelystä johtuen on aikataso spektrin ohella tehokas työkalu iskujen huippuarvojen analysoinnissa, koska sen amplitudi on mittausasetuksista riippumaton ja siten mielekkäästi trenditettävissä, toisin kuin verhokäyrämittauksen aikataso amplitudi. Hitaasti pyörivien laakerien kunnonvalvonnassa tarkastellaan taajuusanalyysin lisäksi erityisesti muutoksia aikatasosignaalisissa. Laakerin vikataajuuksia ei niinkään haeta taajuustasosta eli spektristä. Kokemus on osoittanut, ettei spektrissä välttämättä nähdä laakerin komponenttien sysäystaajuuksia tai niiden kerrannaisia, koska vierintäelin saattaa liukua osan kehälleen kulkemasta matkasta. (Sulo & Koski 2006.)

Seuraavissa kuvissa on esimerkit, kuinka laakerivika näkyy huippuarvoihin perustuvassa menetelmässä spektrissä (kuva 6.15) värähtelytason kohoamisen ja aikatasossa (kuva 6.16) selkeinä iskuina.



Kuva 6.15 Vesiputouskuva PeakVue spektristä (Sulo & Koski 2006)

Ylimpänä kuvassa 6.15 on viimeinen mittaus ennen laakerinvaihtoa, josta näkee selvästi värähtelytason kohoamisen.



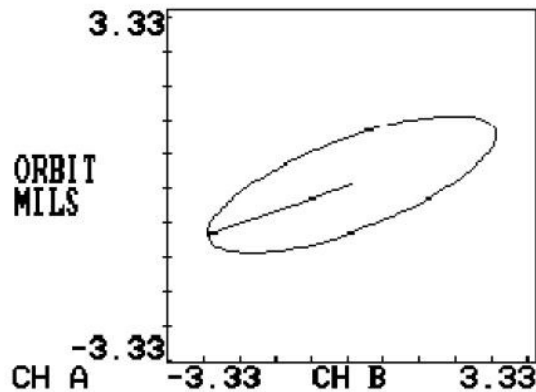
Kuva 6.16 Vesiputouskuva PeakVue aikatasosta (Sulo & Koski 2006)

Ylimpänä on kuvassa 6.16 viimeinen mittaus ennen laakerinvaihtoa. Aikatason iskut näkyvät viimeisessä mittauksessa selkeästi.



### 6.5.9 Akselin aseman ja ratakäyrän valvonta

Ratakäyrämittauksessa mitataan akselin asemaa kahdella kosketuksettomalla anturilla, jotka ovat 90° kulmassa toistensa suhteen. Antureina käytetään yleensä pyörrevirta-antureita. Anturit mittaavat akselin ja laakerin (anturin kiinnityskohdan) suhteellista liikettä. Mittaus voidaan suorittaa joko tasajännitemittauksena (DC) tai vaihtojännitemittauksena (AC). DC-mittauksella mitataan akselin staattinen asema, esimerkiksi liukulaakerin akselin asema voiteluainekalvon muodostuessa. AC-mittauksella voidaan määrittää akselin liikerata käynnin aikana (kuva 6.17). (Mikkonen 2009.)



Kuva 6.17 Akselin ratakäyrä (Kunnossapitoteknologia luentomuistiinpanot)

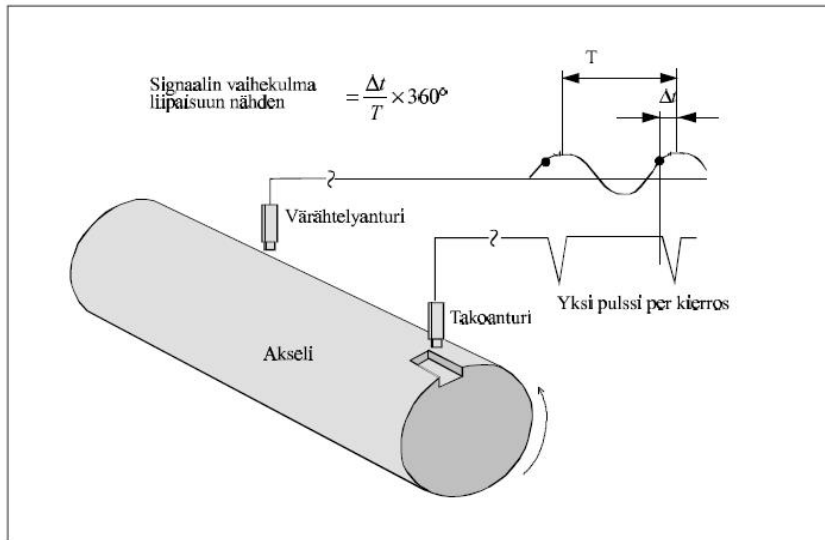
Ratakäyrä on hyvin toimivalla liukulaakerilla ellipsin muotoinen. Ratakäyrän avulla voidaan havaita esimerkiksi linjausvirhe, roottorin hankaus ja öljykalvon pyörteily. (Kunnossapitoteknologia luentomuistiinpanot.)

*Akselin ratakäyrä näyttää akselin keskipisteen liikeradan laakerin sisällä. Ratakäyrä voidaan tutkia joko suodattamattomana tai suodattaa erillisiä taajuuskomponentteja, kuten 1·RPM ja 2·RPM. Ratakäyrää käytetään muun muassa epästabiliilien värähtelyjen, kiinnitöiden, epätasapainon ja linjaustilan tulkitsemiseen. Normaalitilanteessa ratakäyrän muoto on ympyrä tai soikea. Kuormituksen kasvaessa ratakäyrä litistyy kuormituksen vaikutussuunnassa. Suurilla kuormilla ratakäyrän muoto voi olla banaanin tai kahdeksikon muotoinen. Poikkeuksellinen laakerikuorma voi johtua esimerkiksi laakereiden linjausvirheestä. (Villanen & Luukkanen 1998, 10)*

Akselin aseman referenssiarvo mitataan pyörrevirta-antureilla ennen nostoöljypumpun ja pyörityslaitteen käynnistystä - siis tilanteessa, jossa akseli lepää laakerin pohjalla. Kierrosluvun kasvaessa ja hydrodynaamisen öljykalvon kehittyessä akseli nousee ylöspäin ja siirtyy sivuun laakerin keskilinjasta. Kaikki laakeriin kohdistuvat staattiset radiaalivoimat vaikuttavat akselin asemaan laakerissa. Tällaisia voimia voivat aiheuttaa muun muassa linjausvirheet, lämpötilamuodonmuutokset, vaihteiston hammasvoimat ja virtauksesta roottoriin kohdistuvat sivuttaisvoimat. Staattisten radiaalivoimien aiheuttamat muutokset havaitaan siis akselin aseman systemaattisella valvonnalla. (Villanen & Luukkanen 1998, 10)

### 6.5.10 Vaihekulman ja vaihe-eron valvonta

Vaihekulma-analyysi antaa tiedon siitä, missä kohtaa mittauspisteen pyörimistaajuisen värähtelyn huippu on akselilla. Tässä mittausmenetelmässä mittalaitteeseen tulee kaksi signaalia, jotka ovat koneen värähtely sekä takometrilta tulevat liipaisut (kuva 6.18). (Nohynek & Lumme 1996, 84.)



Kuva 6.18 Takoanturi vaihekulman mittauksessa (Villanen & Luukkanen 1998)

Mittalaite vertaa värähtelysignaalin huippukohdan aikaeroa takopulssiin. Aikaerosta saadaan laskettua värähtelyn vaihekulma.

Vaihekulma on eräs tärkeimmistä tunnusluvuista liukulaakerisen koneen kunnonvalvonnassa ja diagnostiikassa. Vaihekulman valvonnalla voidaan selvittää useita vikoja, kuten löysyydet, resonanssit, linjausvirheet ja erilaiset epätasapainot. (Villanen & Luukkanen 1998, 10.)

Monikanavaisella analysaattorilla voidaan vaihe-ero mitata ilman koneen pysäyttämistä eikä takometriä tai mitään muutakaan liipaisulähdettä tarvita mittaukseen. Yksinkertaisimmissa kaksikanavamittauksessa anturit asennetaan mitauspisteisiin ja suorittamalla ristispektrimittaus saadaan tulokseksi näiden kahden mittapisteen välinen vaihe-ero koko mitatulta taajuusalueelta. (Nohynek & Lumme 1996, 148.)

PSK 5707 -standardissa on esimerkkejä pyörivien koneiden vioista, joissa värähtelyn vaihe-eroa on havainnollistettu kuvissa nuolimerkinnöin.

Sellaisia tapauksia, joissa vaihe-ero mittausta tarvitaan ovat muun muassa:

- epätasapaino (vaaka- ja pystysuuntaisen pyörimistaajuisen tärinän vaihe-ero on noin  $90^\circ$ )
- epäkeskeinen roottoripari (vaaka- ja pystysuuntaisen pyörimistaajuisen tärinän vaihe-ero on noin  $0^\circ$ )
- taipunut akseli (akselipäiden laakereiden akselisuuntaisen pyörimistaajuisen tärinän vaihe-ero on noin  $180^\circ$ )
- linjausvirhe (akselinsuuntaisen pyörimistaajuisen tärinän vaihe-ero kytkimen yli on noin  $180^\circ$ )
- vinosti asennettu laakeri (laakerin eri puolien akselinsuuntaisen tärinän vaihe-ero on noin  $180^\circ$ ) (Nohynek & Lumme 1996, 148 - 149).

### **6.5.11 SEE Technology™ -menetelmä**

SEE (Spectral Emitted Energy) on kaupallinen menetelmä, joka on kehitetty vierintälaakerien monitorointiin. Menetelmä on "samankaltainen" kuin verhoikäyräanalyysi, mutta toimii akustisen emission taajuusalueella 250 kHz...350 kHz. Menetelmällä havainnoitavat ilmiöt ovat luonteeltaan jaksollisia, esimerkiksi vierintälaakerin kehä- ja vierintäelinvauriot. SEE-mittauksella havainnoitavia vikaantumistapoja ovat esimerkiksi laakerivauriot, laakereiden puutteellinen voitelu, kavitaatio, pyörivien tai värähtelevien osien koskettaminen toisiinsa. Havaittavat vikaantumistavat ovat samankaltaisia kuin akustisen emission mittauk-

sella löytyvät, mutta ne ovat luonteeltaan enemmän jaksollisia. (Mikkonen 2009.)

#### **6.5.12 Ääni ja ultraääni**

Äänellä tarkoitetaan ilman välityksellä tapahtuvaa aaltoliikettä, jonka taajuus on ihmisen kuulu-alueella. Tätä korkeammalla taajuudella tapahtuvaa aaltoliikettä kutsutaan ultraääneksi. Äänen ja ultraäänen mittaukset perustuvat koneen värähtelevien pintojen aikaansaamien paineaaltojen mittaamiseen kosketuksettomasti mikrofoniilla. Käsitettä ultraääni käytetään myös silloin, kun tarkoitetaan rakenteen mekaanista värähtelyä taajuudella 20 kHz...80 kHz, ja se mitataan pintaa koskettavalla menetelmällä. Äänen analysointi voidaan suorittaa kuten värähtelyn analysointi samoilla menetelmillä ja yleensä myös samoilla laitteistoilla, joskaan äänimittauksia ei juuri käytetä kunnonvalvonnassa. Ultraääntä käytetään laakerien kunnonvalvontaan lähinnä aistihavaintomenetelmänä erityisellä laitteella, joka muuttaa ultraäänen korvin kuultavaan muotoon. Näin korkeilla taajuuksilla ei häiritseviä signaaleja juuri ole, joten joidenkin vikojen aiheuttama värähtely havaitaan selvästi. Lisäksi laitteesta voidaan saada vertailukelpoinen lukuarvo tunnuslukuvalvontaa varten. Anturina käytetään resonanssityyppistä pietsosähköistä anturia tai ilmaääntä mittaavaa mikrofonia. (Mikkonen 2009; PSK 2007, 75.)

#### **6.5.13 Akustinen emissio (AE)**

Akustisella emissiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa materiaalissa tapahtuva paikallinen nopea energian vapautuminen synnyttää siinä etenevän hetkellisen jännitysaaltoimpulssin. Tällaisia impulsseja syntyy esimerkiksi toisiinsa nähden liikkuvien pintojen kosketuksessa, särönkasvussa tai materiaalin deformoitumisen yhteydessä. Ne etenevät materiaalissa ultraäänen tapaan heijastuen, vaimentuen ja synnyttäen erilaisia aaltomuotoja. Muutosten tuloksena materiaaliin syntyvät energia-aallot voidaan havaita materiaalin pinnalle kiinnitetyllä herkällä AE-anturilla, joka toimintaperiaatteeltaan on korkeataajuisia värähtelyä vastaanottava mikrofoni. Kappale ei siten silminnähdessä värähtele eikä värähtelyä voi tuntea esimerkiksi käsin koskettamalla kappaleen pintaa (Mikkonen 2009,

250). (Villanen & Luukkanen 1998; Lahdelma & Leskinen 1991, Lahdelman, Leinosen & Aholan 2004 mukaan.)

AE-antureina käytetään tavallisimmin pietsosähköisiä antureita, jotka muuttavat mekaanisen värähtelyn sähköiseksi signaaliksi. Se vastaa rakenteeltaan kiihtyvyyssanturia, mutta pietsosähköisen kiteen päällä ei ole yleensä lisämassaa. AE-anturit mittaavat korkeataajuisista värähtelyä, esimerkiksi alueella 40 kHz...1 MHz. Yleensä taajuuskaista valitaan väliltä 100...200 kHz. Tällöin mekaanisten häiriölähteiden kuten koneen normaalista käynnistä johtuvat värähtelyt jäävät tämän mittausalueen ulkopuolelle, eivätkä ne vaikuta mittaussignaaliin. (Lahdelma, Leinonen & Ahola 2004.)

Analysointitapoina käytetään esimerkiksi amplitudihuipun mittausta, määrätyn tason tietyssä ajanjaksossa ylittävien pulssien määrän laskentaa sekä AE-purskeiden keston, tehollisarvon ja esiintymisvälin seuranta. AE-purske koostuu useasta peräkkäisestä tietyn amplitudirajan ylittävästä aallosta. (Mikkonen 2009, 251.)

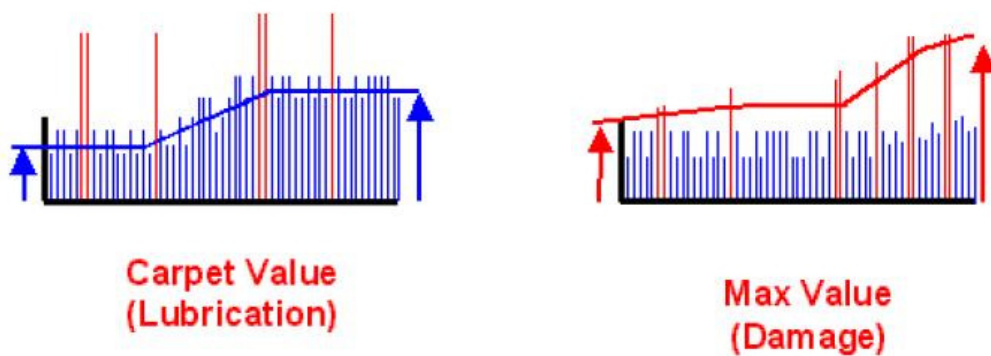
Akustista emissiota hyödynnetään laajasti muun muassa kattiloiden, painelaitteiden, hammasvaihteiden ja vierintälaakereiden kunnonvalvonnassa. Akustisen emission mittauksia ei kyetä kalibroimaan värähtelysuureeksi, koska anturin taajuusvaste on hyvin epälineaarinen. Käytännössä mittaukset toteutetaan suhteellisina mittauksina. (Mikkonen 2009, 252.)

#### **6.5.14 Iskusysäysmenetelmä (SPM)**

Iskusysäysmittaus eli SPM-mittaus (Shock Pulse Method) on SPM Instrumentin patentoima laakerien kunnonvalvontamenetelmä. Se perustuu kiihtyvyyssmittauksessa käytettävän pietsosanturin resonanssitaajuuden hyödyntämiseen, toisin kuin yleensä kiihtyvyyssmittauksissa, joissa toimitaan anturin taajuusvasteen lineaarisella alueella. SPM-mittauksessa anturin resonanssitaajuus on 32 kHz, ja sillä mitataan vain kapeata kaistaa resonanssitaajuuden alueella. Laakerit alkavat tuottaa runsaasti korkeataajuisista värähtelyä laajalla kaistalla ennen ha-

joamistaan, joten SPM-mittauksen kokonaistasosta voidaan periaatteessa havaita alkanut vikaantumisen. (Mikkonen 2009; ABB:n TTT-käsikirja 2000, 13.)

Iskusysäysanturin signaali kuvaa laakerin vierintäpintojen kosketusvyöhykkeen painevaihteluja. Laakerin voitelukalvon paksuus määrittelee iskusysäystason. Jos kalvo on paksu, iskusysäystaso on matala. Iskusysäystaso kohoaa, kun voitelukalvo ohenee, mutta erottuvia huippuja ei ole (kuva 6.19). Laakerivaurio aiheuttaa iskusysäysanturin signaaliin piikkejä epäsäännöllisin välein (6.19). (Mikkonen 2009.)



Kuva 6.19 Iskusysäysmittaus antaa tietoa laakerin voitelusta ja kunnosta (Kunnossapitoteknologia luentomuistiinpanot)

Vasemmassa kuvassa on pohjakohinataso noussut (voitelu vika) ja oikeassa kuvassa esiintyy korkeita piikkejä epäsäännöllisin väliajoin (laakerivika).

## 7 MUITA KUNNONVALVONTAMENETELMIÄ

Liitteen 1 kuvassa 1 on esimerkkejä eri mittalaitetyyppien käytöstä eri kohteille. Saman liitteen kuvassa 2 on esimerkkejä eri mittausmenetelmien soveltuvuudesta erityyppisten vikojen havainnointiin. Näiden esimerkkien sekä tässä opinnäytetyössä käytettyjen lähteiden perusteella kerron lyhyesti yleisimmät kunnonvalvontamenetelmät liittyen sähkömoottoreihin, hammasvaihteisiin, vierintälaakereihin ja säteisliukulaakereihin.

### 7.1 Öljyanalyysit ja voitelujärjestelmän kunnonvalvonta

Koska öljyä voidaan pitää yhtenä koneenosana, tulee siitäkin saada entistä enemmän irti. Tämä edellyttää öljyn säännöllistä kunnontarkkailua ja huolto-toimenpiteitä. Öljyyn tulee laitteistosta kulumahiukkasia ja järjestelmästä tai sen ulkopuolelta vettä ja muita epäpuhtauksia. Öljyn kunnonvalvonta on näiden ominaisuuksien seuranta ja siihen reagoimista. Seuranta tapahtuu tekemällä analyysejä online-laitteilla ja laboratoriotutkimuksien avulla.

Öljyanalyysit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään. Osa öljyanalyyseista tähtää puhtaasti voiteluöljyn kunnon seurantaan ja osa taas voideltavan koneen tai laitteen kunnon seurantaan. Jälkimmäisestä käytetään nimitystä kulumishiukkasanalyysit. (Villanen & Luukkanen 1998.)

Öljyn perusominaisuuksista voidaan analysoida ulkonäkö, viskositeetti, happoluku (TAN), kiintoaine (paino-%). Näiden perusteella jo usein pystytään päättämään käyttökelpoisuus ja tarvittavien lisäanalyysien tarve. Öljyn ulkonäkö antaa viitteitä siitä, onko sen käytön aikana tapahtunut jotain epänormaalia. Ulkonäössä kiinnitetään huomiota öljyn väriin, sameuteen, kiinteiden epäpuhtauksien määrään ja partikkeleiden kokoon ja väriin. Ulkonäön lisäksi esimerkiksi ”palaneen haju” kertoo öljyn olevan pilalla. Öljyn viskositeetti on niitä perusominaisuuksia, jotka varmentavat öljyalaadun ja on öljyn käytettävyyden kannalta aina tutkittava. Hapettuminen ja runsaat epäpuhtaudet saattavat nostaa viskositeettia. Viskositeetin lasku voi johtua lisäaineistetun öljyn polymeerin leikkautumi-

sesta tai vieraasta öljystä tutkittavan öljyn seassa. Kokonaishappoluku (TAN) riippuu sekä hydraulijärjestelmien ja voiteluöljyjen komponentteina käytetyistä perusöljyistä että lisäaineistuksesta. Kun öljyn happoluku nousee yli kaksi- tai kolmekertaiseksi lähtöarvostaan, kannattaa selvittää tarkemmin nousun syy. Kiintoainepitoisuus ilmoitetaan painoprosenttina (p-%), joka lasketaan suodattimeen jääneen kiintoaineen suhteesta sen läpäisseeseen öljymäärään. Tyypillisenä maksimiarvona vaihteisto- ja kiertovoiteluöljyille pidetään 0,1...0,3 painoprosenttia. Hydraulijärjestelmissä tyypilliset arvot ovat alle 0,05 p-%. Näiden lisäksi mitattavia perusominaisuuksia ovat: öljyalaatu, vesipitoisuus (ppm. %), viskositeettiindeksi, lisäaineet, vieraat ainesosat, hapettuminen ja vaahtoaminen. (Suontama, Korpi, Manninen & Rinkinen 1998.)

Kulumishiikkasanalyysit jaetaan kahteen osaan: suoralukuferrografiaan ja analyttiseen ferrografiaan. Suoralukuferrografiassa lasketaan isojen ja pienten (< 5 µm) partikkeleiden määrää ja niiden suhteellisia osuuksia. Määrissä tapahtuvat huomattavat muutokset indikoivat alkavaa vauriota. Analyttisessä ferrografiassa analysoidaan mikroskopian avulla partikkeleiden kokoa ja muotoa, millä pyritään arvioimaan vaurion syntymekanismia ja vakavuutta. Jos kohteen rakennemateriaalit ovat tiedossa, voidaan vaurio pyrkiä kohdentamaan tiettyyn komponenttiin, selvittämällä kulumishiikkasten alkuainekoostumus. Järjestelmällisesti ja säännöllisesti suoritettujen kulumishiikkasanalyysien avulla pystytään selvittämään laakerin normaali kulumisnopeus ja poikkeamat siinä. (Villanen & Luukkanen 1998.)

Voitelujärjestelmän kunnonvalvontaa voidaan tehdä mittaamalla esimerkiksi öljyn määrää, öljyn lämpötilaa, laakerille tulevan öljyn painetta (pumpun jälkeen), öljyn tilavuusvirtaa tai suodattimen kuntoa, joiden muutokset voivat vaikuttaa esimerkiksi laakerin voitelutilanteeseen. Öljyn lämpötilan ja öljyn paineen valvonnalla on liukulaakereiden kohdalla suurempi merkitys, sillä liukulaakereiden voitelukalvon oheneminen voi johtaa nopeaan kiinnileikkautumiseen ja vakavaan vaurioitumiseen. (Villanen & Luukkanen 1998.)



## 7.2 Lämpötilamittaus

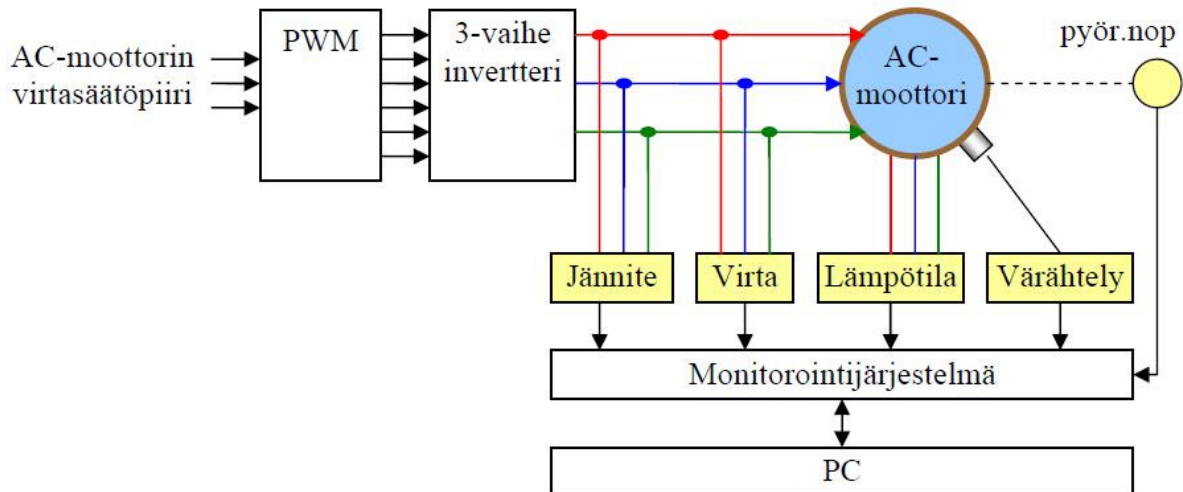
Laakerin lämpötila on verrannollinen laakerin kuormitukseen. Kiinniotto ja hankaus voi aiheuttaa laakerin lämpenemisen tai jopa sulamisen. Laakerin sallittu lämpötila riippuu laakerimetallin koostumuksesta. Koska lämpötilan perusteella saatava tieto kohteessa tapahtuvista muutoksista saadaan suhteellisen myöhään, soveltuu se parhaiten jatkuvaan mittaukseen. Lämpötilamittauksia voidaan soveltaa esimerkiksi sähkömoottoreihin, voiteluöljyihin ja laakereihin. Laakerissa lämpötilan kohoamista aiheuttavat muun muassa voiteluaineen vähyys tai sen liian suuri määrä, epäpuhtaudet voiteluaineessa, liian pieni väly, laakeriviat, liian suuri kuormitus jne. Yleisimmin käytettyjä lämpötilan mittaustureita ovat termoelementit, vastusanturit sekä termistorit. (Villanen & Luukkanen 1998; Lahdelma, Leinonen & Ahola 2004.)

Pintalämpötilamittauksessa voidaan käyttää termoelementtejä. Jos tarvitaan kosketuksetonta mittausta, käytetään lämpösäteilyn mittaamiseen perustuvia laitteita. Näitä ovat säteilypyrometri, IR-mittari sekä lämpökamera. Säteilylämpömittaus soveltuu vain sellaisten vikojen havaitsemiseen, jotka ilmenevät lämpötilan muutoksina kohteen ulkopinnalla. Lämpökameralla voidaan helposti mitata nopeasti laajoja pintoja. Muut mittausten menetelmät soveltuvat paremmin pienempien kohteiden tarkkailuun. (Kuoppala, Leskinen & Leppämäki 1986, Sopasen 2004 mukaan.)

## 7.3 Sähkömoottorin monitorointi

Kohdetta käyttävänä laitteena sähkömoottoreiden toimintakunto ja sen havainnointi ovat molemmat kriittisiä kohteen luotettavan toiminnan kannalta. Erilaisien havainnointimenetelmien soveltamisessa toimintaresurssit kannattaa keskittää ensin moottorien tyypillisimpien ja taloudellisesti vaikuttavimpien vikojen, vikatilanteiden ja vaurioiden havainnointiin soveltuviin menetelmiin. Sähkömoottorin kunnonvalvontaa on mahdollista suorittaa epäsuorasti sähköisillä suureilla, prosessisuureilla tai näiden yhdistelmillä. Pelkästään näihin tukeutuminen on kuitenkin epävarmaa verrattuna suoraan kohteen mittaukseen. Yksinkertaisimmillaan voi suora kohteen mittaus olla esimerkiksi sähkömoottorille asennettava

tiedonsiirtoyhteydellä varustettu lämpötila-anturi. Sähkömoottorin toimintakuntoa ja sen muutoksia havainnoivaan mittausjärjestelmään voi kuulua moottorin vaiheiden jännite- ja virtamittaukset sekä lämpötila- ja värähtelymittaukset (kuva 7.1). (Halme & Parikka 2005.)



Kuva 7.1 Sähkömoottorin mittaus- ja monitorointijärjestelmä (Kazzaz 2003, Halmeen & Parikan 2005 mukaan)

Järjestelmän mittausvasteiden ja/tai ohjausjärjestelmäsuureista saatavien vastesten avulla voidaan päätellä moottorin toimintatila ja -kunto sekä osa ohjaus- ja säätöjärjestelmän häiriöistä tai puutteista. Taajuusmuuttajakäytössä haasteena ovat usein muuttuvat moottorin pyörimisnopeudet sekä invertteriltä (taajuusmuuttaja) tulevat nopeat ohjauspulssit. Ensin mainittu aiheuttaa sen, että esimerkiksi värähtelyanalyysiin perustuvat ratkaisut joudutaan liipaisemaan työsekvenssin mukaisesti samasta pyörimisnopeudesta (ja kuormitustilanteesta) paremman vertailukelpoisuuden tuottamiseksi. Tällöin mittaustilanne on yhtäläinen ja järkevä vikatilanneanalysoinnin kannalta. Taajuusmuuttajan generoimat jännitepulssit herättävät moottorilla todellista värähtelykohinaa, joka jakautuu laajalle taajuuskaistalle ja saattaa peittää alleen todellisista vikaantumisista heränneitä ilmiöitä. Keskiarvoistamalla mittaussignaalia voidaan vaimentaa satunnaisien häiriövärähtelyiden synnyttämää vaikutusta värähtelymittaustuloksiin. (Halme & Parikka 2005.)

Moottoreiden kuntoa valvotaan sekä mekaanisesti, että sähköisesti. Mekaanisia mittauksia ovat lähinnä moottorin laakereista ja staattorin rungosta tehtävät värähtelymittaukset (tärinäspektri). Sähköisiä mittauksia edustavat akselijännitteen/virran, osittaispurkausten ja syöttövirtaspektrin mittaus. Lisäksi on mahdollista arvioida pelkästään virran tehollisarvojen ja/tai pyörimisnopeuden muutoksista koneen käytössä tapahtuneita muutoksia. Laakerivirtojen aiheuttamat vauriot ovat yleistyneet kovasti taajuusmuuttajan tultua käyttöön. Ongelmaa voidaan välttää käyttämällä eristettyjä laakereita, eristettyjä kytkimiä tai maadoittaa akseli. Laakerivirran aiheuttamien vaurioiden ehkäisemiseksi laakerin kuntoa voidaan valvoa mittaamalla akselijännitettä/virtaa. Akselijännitteen/virran mittaaminen on kuitenkin harvinaista vielä teollisuuslaitoksissa. Eristyksen hyvyttä voidaan tarkastella yleensä parhaiten huollon yhteydessä, mutta ”suurille” suurjännitekoneille on olemassa osittaispurkausmittaus. Osittaispurkausmittaus määrittelee eristeen hyvyyden sähköisessä mielessä. Staattorivirran mittaus on yksinkertaisin tapa tutkia moottorin tilaa. Mitatusta moottorin ottamasta virrasta muodostetaan spektri, jonka avulla saadaan selville muun muassa viallinen roottorisauva. Katkennut roottorisauva aiheuttaa helposti havaittavia sivukeiloja verkkotaajuuden ympäristöön. Myös roottorin epäkeskeisyys ja pitkälle edenneet laakerivauriot näkyvät spektrissä. Käytännön kunnonvalvonnassa staattorivirran spektrianalyysin avulla ilmaistaan lähinnä roottorisauvarikkoja sekä mekaanisia epäsymmetrioita. Taajuusmuuttajakäytöllä ainakin laakerivikojen ja roottorivikojen tunnistaminen staattorivirran mittauksen perusteella on erittäin vaikeaa tai mahdotonta (Järvinen, Miettinen, Kivistö & Lahdelma 2004). (Kohopää ABB Service Oy.)

Yleisesti sähkömoottoreiden mittauspohjaisessa monitoroinnissa ja diagnostiikassa tarvitaan hyvää taajuusresoluutiota silloin, kun halutaan seurata roottoriin liittyviä vikoja/vikaantumisia, kuten roottorin epäkeskisyyttä ja roottorisauvojen kuntoa. Näissä vikatyypeissä värähtelyspektrissä voi näkyä sivunauhoja, joiden taajuus on moottorin synkronisen ja todellisen pyörimisnopeuden välinen erotus, jota kutsutaan moottorin jättämäksi. Tyypillisesti tämä taajuus on vain muutama hertsi. Riittävän resoluution varmistamiseksi spektri voidaan tarvittaessa kohdentaa zoomaamalla tietylle kapealle taajuuskaistalle. Tämä edellyttää, että kyseinen ominaisuus on käytössä käytettävässä mittausjärjestelmässä. Lisäksi

kaikki taajuustasossa tapahtuvien ilmiöiden seuranta, ja niistä tehtävät päättelyt edellyttävät mitattavan kohteen pyörimistaajuuden mittaamista/seuranta. Tämä koskee niin itse sähkömoottoria kuin sen mekaanisia oheislaitteita, esimerkiksi vaihteita ja tuulettimia. Usein moottorin koteloon on integroitu takaisinkytkentäanturi. Takaisinkytkentäanturit voivat olla tyypiltään muun muassa pulssiantureita (inkrementaalinen tai absoluuttinen), resolveereita tai takometrejä (AC tai DC). Anturitiedon perusteella tiedetään moottoriakselin mitattu asema ja/tai nopeus. Mahdolliset eri mittausten väliset vertailut tulee liipaista yhtäläisistä tilanteista, joissa sekä pyörimisnopeus ja kuorma että työkierto ovat kaikki samassa vaiheessa. (Halme & Parikka 2005.)

## 8 MEESAUUNIN KUNNONVALVONTA

Sellutehtaan laitteille on tehty kriittisyysluokittelu, jossa sellutehtaan laitteet on jaoteltu kolmeen eri ABC-luokkaan, joista 1-luokka on kaikkein kriittisimmille laitteille, 2-luokka melko kriittisille ja 3-luokka vähemmän kriittisille laitteille (taulukko 8.1). Taulukossa ylimpänä oleva meesauuni tarkoittaa koko laitetta yleisesti. Meesauuniin kuuluu seuraavana esitettävien laitteiden lisäksi huomattava määrä muita laitteita, joita ovat muun muassa polttopääty, poltin, sektorijäähdytin, syöttöruuvi ja kalkin murskain. Olen valinnut taulukkoon vain tähän opinnäytetyöhön liittyviä laitteita.

Taulukko 8.1 Ote meesauunin laitteiden kriittisyysluokittelusta (Kolehmainen 2010)

Nimitys	ABC	Painoarvo	40	25	15	20
		Pisteet	Kriittisyys 0...8	Häiriö- herkkyys 1...6	Luokse- päästävyys 1...6	Ympäristö- vaikutus 0...8
MEESAUUNI	1	460	8	3	3	1
KANNATUSRENGAS 1	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRENGAS 2	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRENGAS 3	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRENGAS 4	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRULLASTO 1	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRULLASTO 2	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRULLASTO 3	1	375	8	1	2	0
KANNATUSRULLASTO 4	1	375	8	1	2	0
AKSIAALITUKIRULLASTO	2	175	3	1	2	0
HAMMASKEHÄ	1	400	8	2	2	0
HAMMASKEHÄN VOITELUYKSIKKÖ	2	200	3	2	2	0
KÄYTTÖKONEISTO 1	2	265	4	3	2	0
KÄYTTÖKONEISTO 2	2	265	4	3	2	0
HYDRAULIPUMPPU, (AKSIAALIRULLASTO HYDR.)	2	240	4	2	2	0
HAMMASKEHÄN VOITELUPUMPPU	2	200	3	2	2	0
KANNATUSRULLASTO 4 JÄÄHDYTYS, LAAKERI 13	3	40	0	1	1	0
KANNATUSRULLASTO 4 JÄÄHDYTYS, LAAKERI 15	3	40	0	1	1	0

Meesauunin kannatusrullastot on luokiteltu kaikkein kriittisimpään luokkaan. Niiden häiriöherkkyys (ennakoimattoman vian todennäköisyys) on hyvin pieni, vikavälin ollessa yli 10 vuotta. Luoksepäästävyys turvallisten huoltojen/tarkastusten tekemiseksi on määritelty hankalaksi (huoltoaika 1 - 4 tuntia), kuumuuden, kylmän ja tilanpuutteen vuoksi. Kannatusrullastojen kriittisyys prosessin kannalta (laatu/määrä) on määritelty suureksi, pitkän korjausajan (yli 24

tunnin seisokki) ja ostokalkin aiheuttamien ajettavuusongelmien vuoksi. Meesauunin aksiaaliturilla on luokiteltu melko kriittiseksi laitteeksi. Aksiaaliturilla ei ole määritelty yhtä kriittiseksi prosessin kannalta kuin kannatusrulla, johtuen sen aiheuttamasta pienemmästä korjausajasta/seisokista. Hammaskehä on luokiteltu kaikkein kriittisimpään luokkaan. Sen pisteet ovat hieman kannatusrullia suuremmat hieman suuremman häiriöherkkyyden takia, vikavälin ollessa 2 - 10 vuotta. Käyttökoneistot on luokiteltu melko kriittisiksi laitteiksi. Niiden häiriöherkkyys on luokiteltu hieman suuremmaksi kuin hammaskehän. Käyttökoneistot eivät ole määritelty yhtä kriittisiksi prosessin kannalta kuin kannatusrullat tai hammaskehä, johtuen sen aiheuttamasta pienemmästä korjausajasta/seisokista (2 - 8 tunnin seisokki).

Meesauunilla on käytössä Andritz Oy:n akustiseen emissioon perustuva Acutest online-kunnonvalvontajärjestelmä. Järjestelmä on kuitenkin aikansa elänyt ja tarvitsee modernisoinnin, jotta siitä saataisiin paras mahdollinen hyöty.

Meesauunin vaihteille ja sähkömoottoreille tehdään neljän viikon välein värähtelymittaukset kannettavalla SKF:n CMVA60 Microlog -värähtelyanalysointilaitteella. Analysointi- ja tietokantaohjelmalla on SKF:n @ptitude analysointilaitteella. Jokaiselta laakerilta mitataan aksiaali- ja pystysuunnasta. Jokaisessa mittauspisteessä tehdään vähintään kaksi mittausta (nopeusmittaus, kiihtyvyyden mittaus ja kiihtyvyyden verhokäyrämittaus). Jokaisesta mittauksesta tallennetaan aikataso ja spektri mittalaitteen muistiin, jotka analysoidaan mittauskierroksen jälkeen analysointiohjelmalla. Mitattavaa signaalia voidaan myös kuunnella analysointilaitteeseen liitettävillä kuulokkeilla. Kuunneltavaa signaalia voidaan myös ylipäästösuodattaa, jolloin kuunneltavasta signaalista on helpommin erotettavissa laakerin vikaantumisen kertovat korkeataajuiset, iskumaiset äänet. Tarvittaessa voidaan laakeripesien lämpötiloja mitata kosketusmittarilla.

Kannatusrullille ja vaihteille tehdään vuoden välein öljynvaihto ja tarvittaessa myös öljyanalyysi. Lämpökameramittauksia tekevä kunnonvalvontamittaus Ismo Kellokangas kertoo, että lämpökameralla on hyvin vaikea saada vertailukelpoisia mittaustuloksia meesauunin lämpösäteilyn vuoksi. Lisäksi täytyy määrittää oikea emissiokerroin.

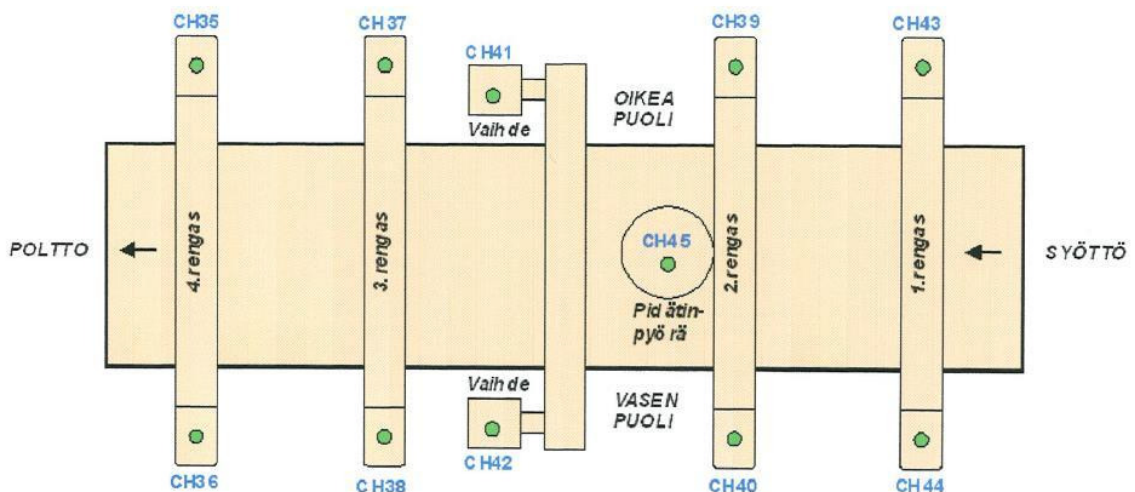
Emissiokertoimella kerrotaan mittalaitteelle, kuinka paljon mittaushetken pinta lähettää IR-säteilyä. Emissiokerroin on maalatuilla tai vastaanvanlaisille mattapinnoille tyypillisesti 0,8...0,9 ja kiiltäville metallipinnoille 0,1...0,5. Suurilla emissiokertoimilla saadaan tarkempi mittaustulos kuin pienillä, koska ympäristö vaikuttaa silloin vähemmän mittaustulokseen. Käytännössä emissiokerroin saadaan mittaamalla mittaushetken lämpötila vertailumittarilla ja korjaamalla emissiokerrointa kunnes näyttöön saadaan oikea lämpötila. (Nokeval.)

Näiden seikkojen takia lämpökameraa ei käytetä meesauunin alueella. Koskettava lämpötilamittari on osoittautunut luotettavammaksi.

### 8.1 Acutest-kunnonvalvontajärjestelmä

Tässä luvussa käydään läpi tällä hetkellä käytössä oleva akustiseen emissioon perustuva online-kunnonvalvontajärjestelmä, käyttäen lähteenä Andritz Oy:n akustinen emissio -koulutusmateriaalia.

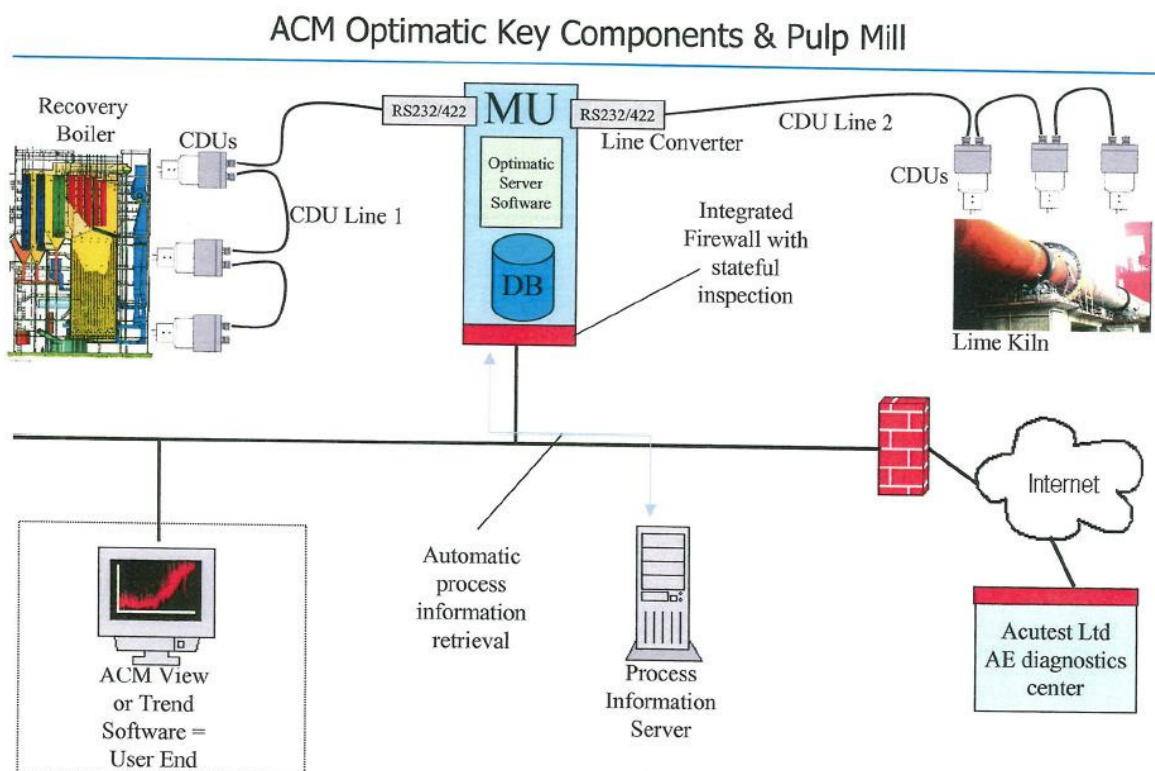
Kuvassa 8.1 on esitetty akustisen emission antureiden sijainti meesauunissa.



Kuva 8.1 Meesauunin anturikartta (Andritz)

Jokaisen kannatusrullan toiseen liukulaakeriin on asennettu anturi. Molemmilla vaihteilla on yksi anturi ja aksiaaliturullassa (pidätinpyörä) on yksi anturi. Järjestelmää tarkkaillaan valvomosta, ja vihreä väri anturissa kertoo kaiken olevan kunnossa. Keltainen on hälytysraja, ja mikäli mittausravot jatkavat nousuaan yli vauriorajan (punainen), tulee koneen käytön jatkaminen asettaa kyseenalaiseksi.

Seuraavassa kuvassa 8.2 on esitetty järjestelmän rakenne.



Kuva 8.2 Kunnonvalvontajärjestelmän rakenne (Andritz Oy)

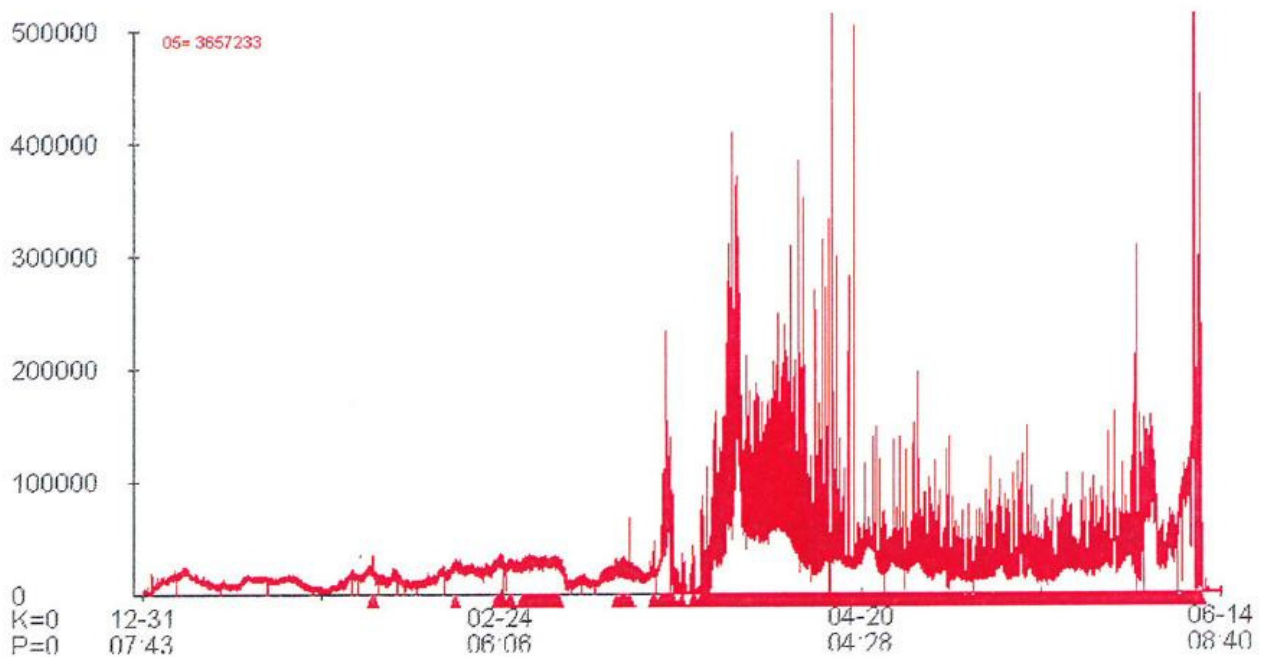
Botnian Joutsenon tehtaalla on yksi mittausyksikkö (MU), johon on kytketty tehtaalla kaikki valvottavat kohteet (soodakattila, meesauuni ja massatehdas). Kaikki anturit (CDU:t) kytketään sarjaan kuvan mukaisesti. Mittausyksikkö käsittelee ja tallentaa AE-datan valittujen prosessiparametrien kanssa. Prosessitiedot kerätään tehtaalla tietoverkon kautta informaatiopalvelimelta. Mittauskone lähettää mitatun AE-datan valvontakoneelle, jossa AE-data ja prosessitiedot esitetään selkeinä käyriä tietyltä aikaväliltä (esim. päivän tai viikon ajalta). Ohjelmasta nähdään käyrien trendikäyttäytyminen ja esimerkiksi soodakattilalla jyrkästi



nouseva AE-kanavan taso merkitsee yleensä särön kasvua. Näin särö havaitaan ja voidaan korjata ennen kuin syntyy vuotoja. Etävalvonta on lisävarmistus käyttäjän itse tekemän tarkkailun lisäksi. Se on käytössä lähes jokaisessa valvottavassa kohteessa. Etävalvonta tarkastaa joka viikko kohteen ja kirjoittaa sen tilasta raportin. Jos kohteen tilassa tapahtuu suuria muutoksia, etävalvojat soittavat heti kohteen valvojalle. Tyypillisiä etävalvonnan havaintoja ovat muun muassa tiettyjen käyttö-parametrien aiheuttamat särönkasvut rakenteessa, jotka havaitaan poikkeavina AE-tasojen nousuna kyseessä olevassa tilanteessa. Ennen huoltoseisokkeja kannattaa myös pyytää etävalvonnalta pidemmän ajan raportti, josta käy ilmi missä osissa rakennetta on eniten ollut säröilyä, jotta nämä osat voitaisiin huoltaa ja tarkistaa erityisen huolella.

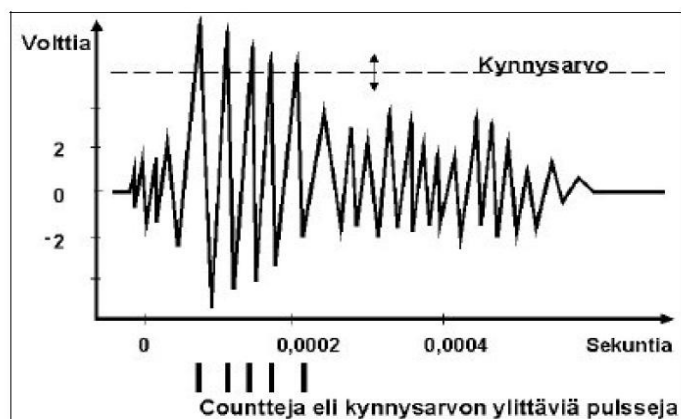
Andritzin mukaan hitaasti pyörivien meesauunien tukirullaparien, vaihdelaatikoiden ja pidätinpyörien kunnonvalvonta on ollut perinteisillä menetelmillä vaikeaa. Muun muassa kiihtyvyyssanturit eivät toimi hitaasti pyörivässä meesauunissa johtuen alhaisista kiihtyvyyksistä. Pietsokiteisillä AE-antureilla tämä ongelma vältetään ja AE-valvonta antaa tärkeää tietoa linjausvirheistä (ylikuormitus, jolloin joku tukirullista kantaa kohtuuttoman kuorman muihin nähden), murtumankasvusta, voitelu- (kitkamekanismit), laakeri- sekä hammaspyöräongelmista.

Seuraavassa kuvassa 8.3 on esimerkki meesauunin kantorullan laakerivaurion vian havaitsemisesta AE-datasta.



Kuva 8.3 Monitoroinnin kuva, joka esittää vian kehittymistä kantorullalla usean kuukauden ajan (Andritz)

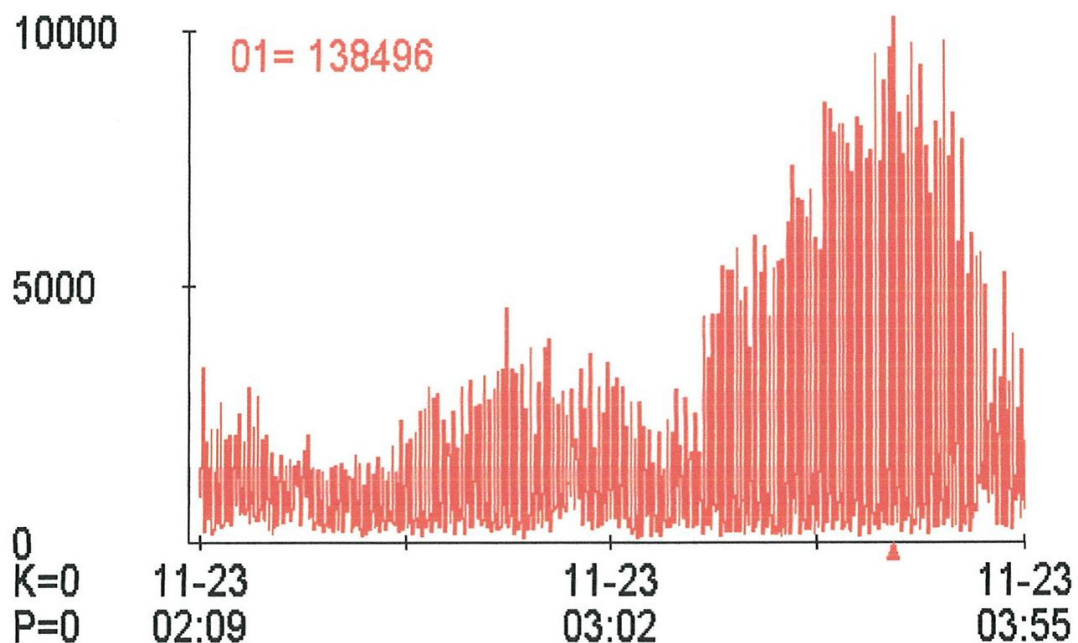
Vian tunnistaminen perustuu lähinnä trendin tarkkailuun. Kun tasot alkavat nousta, jotain on tapahtunut järjestelmän kunnossa. Yksittäiset piikit eivät haittaa, mutta jos ne ovat selkeästi korkeampia kuin perustaso, ne kertovat särön kasvusta. Järjestelmässä akustinen emissio esitetään counttien lukumääränä suhteessa aikaan. Vaaka-akselilla on aika, jonka lukuväli voi olla sekunnista ylöspäin. Yleinen lukuväli on minuutti. Pystyakselilla on counttien lukumäärä, joka kertoo kuinka monta kynnyksen ylittävää arvoa kyseisellä lukuvälillä on tullut. Hälytysrajan ylitykset aiheuttavat punaisen kolmion ilmestymisen aikajalalle (kuva 8.3 ja 8.5). Seuraavassa kuvassa 8.4 on esitetty mittauksen periaate.



Kuva 8.4 Vahvistettu lyhytaikainen porskemainen AE-signaali (Andritz)

Kuvassa 8.4 on esitetty purskemainen emissio ja kynnysarvon asettaminen. Esimerkiksi särön synty ja kasvu synnyttää purskemaista emissiota, jota voidaan mitata vaikeissakin kenttäolosuhteissa. Akustista emissiota syntyy vain silloin, kun murtuma ydintyy tai kasvaa eli passiiviset säröt eivät näy. Toinen akustisen emission syntymekanismi on tyypillisesti kitkamekanismi, joka synnyttää jatkuvaa emissiota.

Pidätinpyörän laakerin voitelua ja kuntoa voidaan valvoa reaaliajassa. Kaikki häiriöt voitelussa ja pyörinnässä havaitaan heti. Linjaukset ja kuormituksen vaihtelut näkyvät näyttöpäätteellä heti häiriön ilmetessä. Amplitudin muutokset kuvastavat rullan laakerin toimivuutta ja antavat trendin, miten laitteisto pysyy linjauksessaan eri kuormitustilanteissa (kuva 8.5).



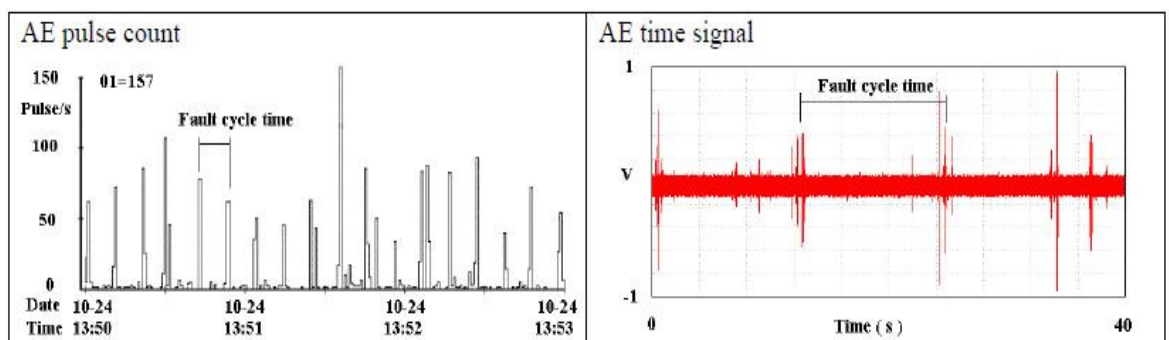
Kuva 8.5 Amplitudin muutokset kuvastavat rullalaakerin toimivuutta (Andritz)

Akustinen emissio mittaa laakerin kitkaa eikä sen värinöitä, sillä hitaasti pyörivässä laakerissa ei Andritzin mukaan ole kiihtyvyyksiä. Se kertoo, missä laakerissa on jotain vialla. Tämän laakerin voitelu, linjaus ja kunto pitää tarkastaa ennen vaurion syntymistä. Akustisen emission trendi laakereissa korreloi laakerikuormaan, pyörimisnopeuteen, lämpötilaan, voitelun toimivuuteen ja laakerin vikaantumiseen.

AE-dataa voidaan kerätä ja analysoida myös purskemittauksena, jolla voidaan mitata emissiota hetkellisesti nopeassa tahdissa. Mitattava suure on täsmälleen sama kuin normaalissa AE-mittauksessa, ero on vain mittausnopeudessa, joka purskemittauksen yhteydessä on luokkaa 3...9000 Hz (mittausintervallivälillä noin 0,33 s...0,00011 s), kun normaalimittauksen yhteydessä puhutaan sekunnin monikertaa olevista intervalleista. Jokaisesta mittausjaksosta on tuloksena yksilöity mittausraportti, jossa mitattu data esitetään sekä aikatasossa että FFT-muunnettuna taajuustasossa. Purskemittauksen pääasiallinen käyttökohde on vianmäärityksen tehostaminen erityisesti sellaisissa liikkuvissa kohteissa, joissa normaalimittauksen ajallinen erottelukyky ei riitä. Purskemittauksen antama hienojakoisempi "kuva" emission kertymästä mahdollistaa yksittäisten rattaiden hampaiden, laakerin kuulien, leikkurin terien ja muiden nopeasti liikkuvien kohteiden emissiokäyttäytymisen näkemisen ja keskinäisen vertailun. Ehkäpä tärkein sovellus ja käyttökohde on laakerivikojen tunnistaminen havaitsemalla laakerin tyyppille ja pyörimisnopeudelle ominainen vikataajuus taajuustason esityksestä.

Taajuusanalyysiä (FFT) käytetään harvoin, koska AE-anturit toimivat yleensä resonanssiperiaatteella ja niiden taajuusvaste on hyvin epälineaarinen (Miettinen 2006).

Kuvassa 8.6 on esitetty akustisen emission mittaustuloksia vierintälaakerista, jonka pyörimisnopeus on 0,5 Hz. Kuvassa vasemmalla on signaali analysoitu pulssilaskennalla ja oikealla on esitetty sama signaali aikatasossa.



Kuva 8.6 Akustisen emission mittaustuloksia vierintälaakerista, jonka akselin pyörimistaajuus oli 0,5 Hz. (Miettinen 2004, 47)

Pulssilaskennan tuloksesta voidaan havaita selvästi jaksollisuus, joka vastaa laakerin ohitustaajuutta. Pulssilaskennan aikajakso on valittava sopivasti vastaamaan purskesarjan esiintymisen jaksoaikaa, jotta pulssilaskennalla voidaan erottaa laakerin ohitustaajuus. Aikatasosignaalista on myös nähtävissä laakerin ohitustaajuus. Akustisen emission signaalin luonne riippuu esimerkiksi laakerissa olevan vaurion koosta ja muodosta. (Miettinen 2004, 45 - 47.)

Acutest-järjestelmällä on mahdollista huomata myös, jos kannatusrullan ja kannatusrenkaan välillä on epäjatkuvuuskohtia tai lovia. Kerran kierroksella esiintyvä emissiopurske ilmoittaa, millä kohdin vikaantunut paikka on.

## **8.2 Kiinteää kunnonvalvontajärjestelmää toimittavien yritysten tarjoukset**

Tässä luvussa esitellään kiinteää kunnonvalvontajärjestelmää toimittavien yritysten järjestelmät. Niitä ei arvostella mitenkään vaan niiden ominaisuudet ja rakenne esitetään sellaisenaan. Saatujen materiaalien erojen vuoksi niiden esittelyt eivät ole rakenteeltaan ja sisällöltään samanvertaiset.

### **8.2.1 Andritzin Acutest-järjestelmän uusinta**

Andritzin edustajan Kari Auran tarjous esitellään seuraavaksi.

Järjestelmään tulee 21 kappaletta Andritzin kehittämiä ja valmistamia kolmannen sukupolven ACU-130-mittausyksiköitä (kuva 8.7).

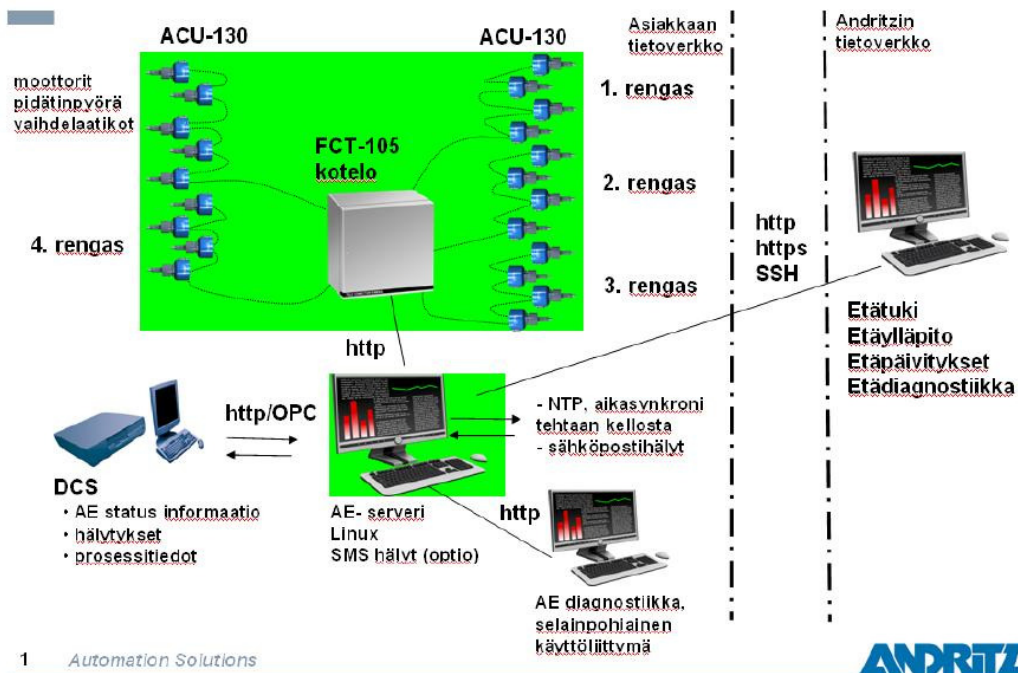


Kuva 8.7 ACU-130-mittausyksikkö (Aura 2011)

Kuvassa alempana on erillinen anturiosa, joka sisältää erittäin herkän korkeita taajuuksia aistivan pietsokiteen. Anturiosa kiinnitetään kohteeseen halkaisijaltaan 12 mm aaltojohtimen (wave guide) avulla, kierre tai hitsaus. Esimerkiksi Outokummun terästehtaaseen toimitetussa sovelluksessa käytetään pietsokidettä, joka reagoi herkimmin 150 kHz:n taajuuteen, toki kide poimii signaaleja laajalta taajuusalueelta (Aura & Nikula 2011, 30). Kiteen tuottama sähköinen signaali siirtyy kolmen metrin analogikaapelin kautta kuvassa ylempänä olevaan koteloon, joka sisältää signaalinkäsittelyelektroniiikan. Näitä mittausyksiköitä voidaan kytkeä sarjaan enintään 8 kappaletta yhteen segmenttiin.

Anturit asennetaan jokaiselle liukulaakerille (16 kpl). Näin saadaan voiteluongelmatilanteissa kannatusrullilta välitön, suora laakerikohtainen hälytys, joka nopeuttaa tilannearvion teossa. Tämä järjestely on myös huomattava reaaliaikainen apu uunin säädössä ja myös renkaan aiheuttaman tai muun ylikuorman havaitsemisessa. Pidätinpyörälle asennetaan 1 anturi. Kumpaakin moottoriin asennetaan 1 anturi (yhteensä 2 anturia). Kumpaakin vaihteeseen asennetaan 1 anturi (yhteensä 2 anturia).

Seuraavassa kuvassa 8.8 on järjestelmän rakenne.



Kuva 8.8 Järjestelmän rakenne (Aura 2011)

Materiaalitoimitus sisältää ACU-130-anturit, FCT-105-kotelon ja AE-serverin.

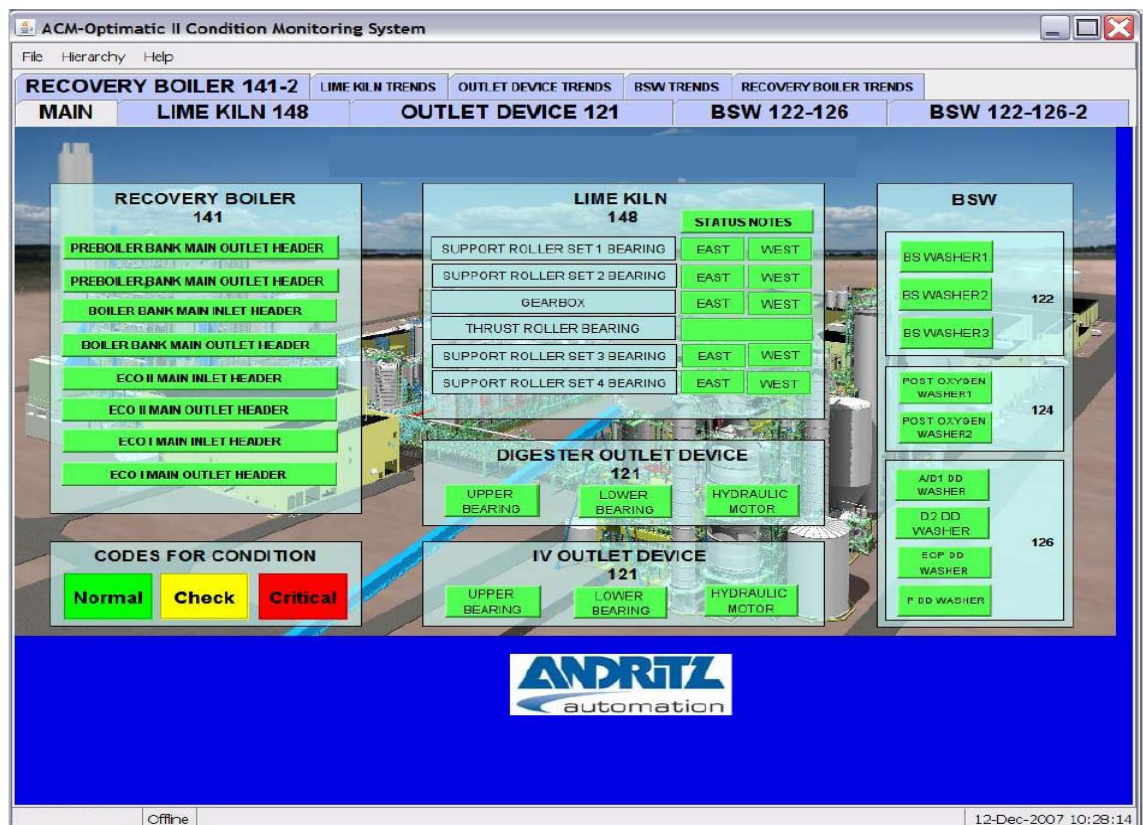
ACU-130-mittausyksiköt kytketään kentältä FCT-105-koteloon (protokollamuunnin), joka muuttaa digitaalisen AE-datan Ethernet-yhteensopivaksi ja välittää mittaustiedot AE-serverille. Tuotettu data siirretään uudelle Linux AE -serverille varastoon, katselua ja pitkäaikaisseuranta varten. AE-serveri tarjoaa selainpohjaisen käyttöliittymän tehtaan tietoverkkoon käyttäjien omille tietokoneille.

Tehtaalla toiminnassa olevat toisen sukupolven anturit massatehtaalta voidaan liittää uuteen AE-serveriin ja niiden käyttö jatkuu silloin normaalisti uuden käyttöliittymän kautta. Muut ensimmäisen sukupolven anturit (soodakattila) jäävät edelleen toimimaan kytkettynä nykyiselle Linux-mittauskoneelle, sieltä anturien data siirtyy uudelle AE-serverille ja on käyttäjien saatavilla uuden selainpohjaisen käyttöliittymän kautta. Näin saadaan kaikki syntyvä AE-data kaikkien käytettäväksi saman käyttöliittymän kautta. Lisäksi nykyisen Linux-mittauskoneen kuorma laskee, elinikä pitenee edelleen ja meesauunilta vapautuvat toimintakykyiset osat voidaan käyttää varaosina.

Uusi AE-serveri on varustettu Linux-käyttöjärjestelmällä ja Optimatic4-sovellusohjelmistolla. AE-serveri tallentaa AE-mittausdatat ja prosessista saatavan datan sisäiseen tietokantaansa. Mittaukset on luettavissa trendimuodossa näytöltä. AE-serverilla toteutetaan myös ACU-130-mittausyksiköiden säädöt ja kaikki hälytykset. Normaalien perushälytysten luonti sisältyy toimitukseen. Varoitukset ja hälytykset voidaan lähettää selkokielisinä viesteinä valinnaisilla tavoilla käyttäjille (SMS-viestit puhelimiin, sähköpostiviestit tai tehtaan automaatiojärjestelmään).

Andritz antaa uuden järjestelmän käyttöön tarvittavan lyhyen koulutuksen ja käyntiinajotuen. Tehtaan (Botnia & Botnia Mill Service) oma henkilökunta hoitaa käytännössä ACU-mittausyksiköiden asennuksen, virityksen ja varoitus/hälytysrajojen säädön Andritzin asennusvalvonnan (service-insinööri) tuella.

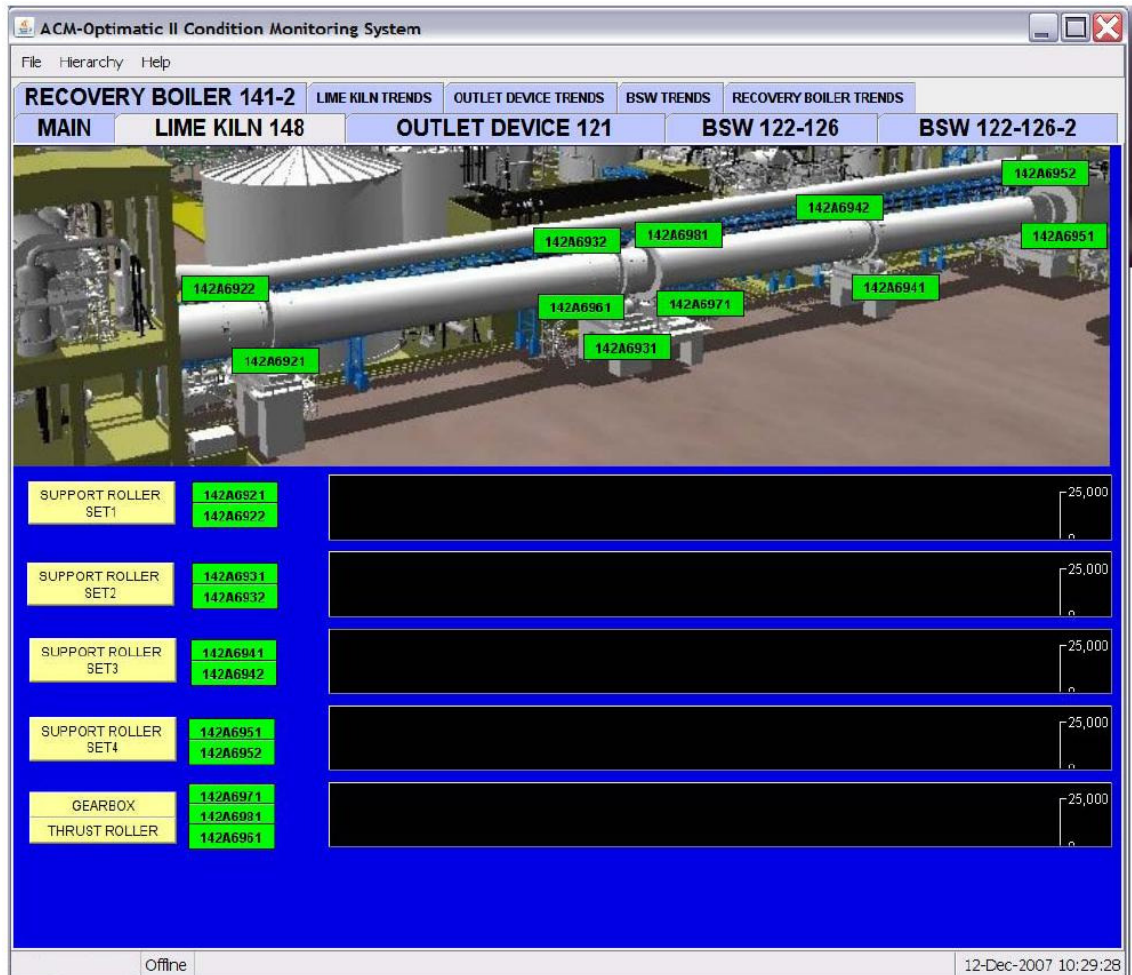
Seuraavissa kuvissa (kuva 8.9 ja 8.10) on esimerkit käyttöliittymän käyttöikkunoista.



Kuva 8.9 Tehdaskohtainen käyttöikkuna (Aura 2011)



Kuvassa 8.9 on esitetty tehtaan kaikki valvottavat kohteet ja niiden statusikkunat. Vihreä väri kertoo kaiken olevan kunnossa. Keltainen väri merkitsee sitä, että kohdetta on seurattava aktiivisesti. Punainen väri tarkoittaa, että kohde vaatii välittömiä toimenpiteitä.



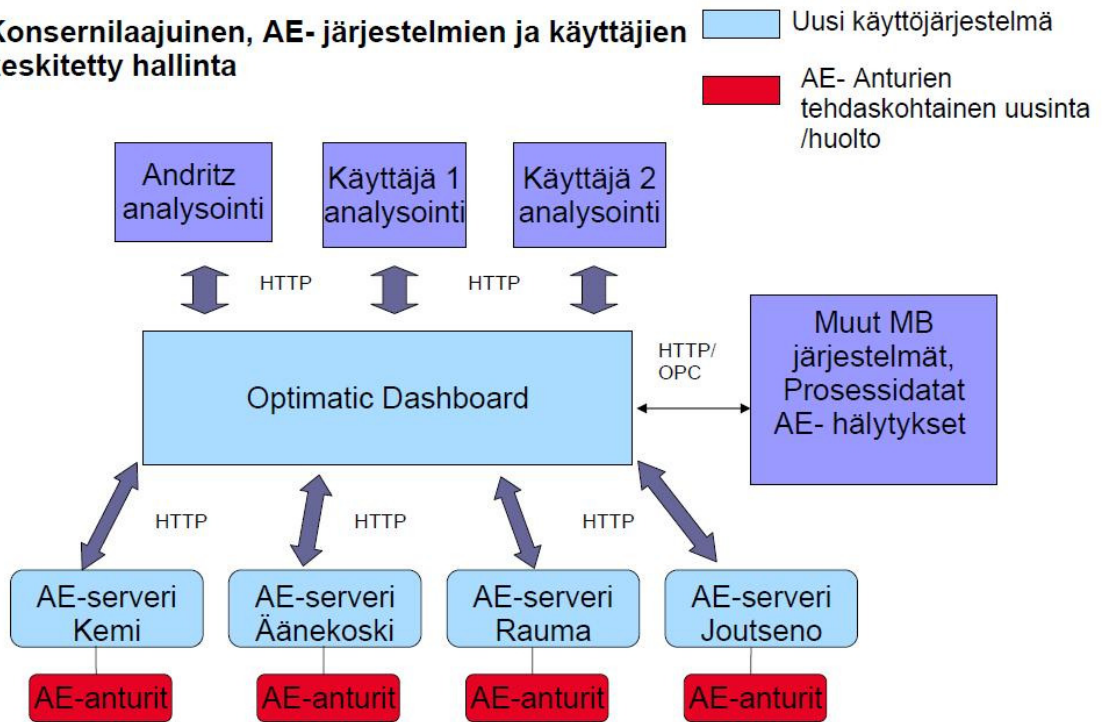
Kuva 8.10. Laitekohtainen käyttöikkuna (Aura 2011)

Kuvan 8.10 käyttöikkunassa voidaan seurata reaaliaikaisesti meesauunin kannatusrullien, pidätinpyörän ja vaihteiden emissiokäyttäytymistä.

Andritzilla on myös ratkaisu konsernitason ennakoivan kunnonvalvonnan selainpohjaiseen hallintaan (kuva 8.11). Tämä ratkaisu ei sisälly tähän tarjoukseen.

## Optimatic Dashboard

Konsernilaajuinen, AE- järjestelmien ja käyttäjien keskitetty hallinta



Kuva 8.11 Konsernilaajuinen AE-järjestelmien ja käyttäjien keskitetty hallinta (Aura 2011)

Järjestelmä keskittää usean eri valvottavan kohteen hallinnan yhden WEB-käyttöliittymän taakse. Botnian kaikkien tehtaiden AE-järjestelmien tehdaskohtaisten uusimisten/huoltojen jälkeen voidaan kaikkien antureiden mittaamat tiedot syöttää Botnian uuteen Optimatic Dashboard -järjestelmään. Dashboard on saatavilla jokaiselta PC:ltä Botnian verkossa. Järjestelmä mahdollistaa sen, että tietyt henkilöt voivat vastata koko konsernitason AE-datan analysoinnista. Andritzin analysointipalveluja voidaan hyödyntää tarvittaessa.

Andritzin järjestelmän hinta on X1. Hintaan ei sisälly muun muassa seuraavat tilaajan velvollisuudet:

- nykyisten antureiden purku, nykyisten aaltojohtimien tarkastus, uusien aaltojohtimien valmistus ja aaltojohtimien asennus annettujen ohjeiden mukaan
- ACU-130-yksiköiden mekaaniset ja sähköiset asennukset, kaapelit ja kaapelien veto

- FCT-105 ja AE-serverin mekaaninen ja sähköinen asennus.

Hintaan ei sisälly myöskään muun muassa seuraavat optiot:

- OPC-serveri + konfiguroinnit prosessitietojen siirtoa varten AE-serverille
- analogisten, kuten esimerkiksi lämpötilamittausten liittäminen ACU-130-mittausyksiköihin ja niihin liittyvät asennustyöt
- etädiagnostiikkapalvelu.

### **8.2.2 Metson tarjoama värähtelyjärjestelmä**

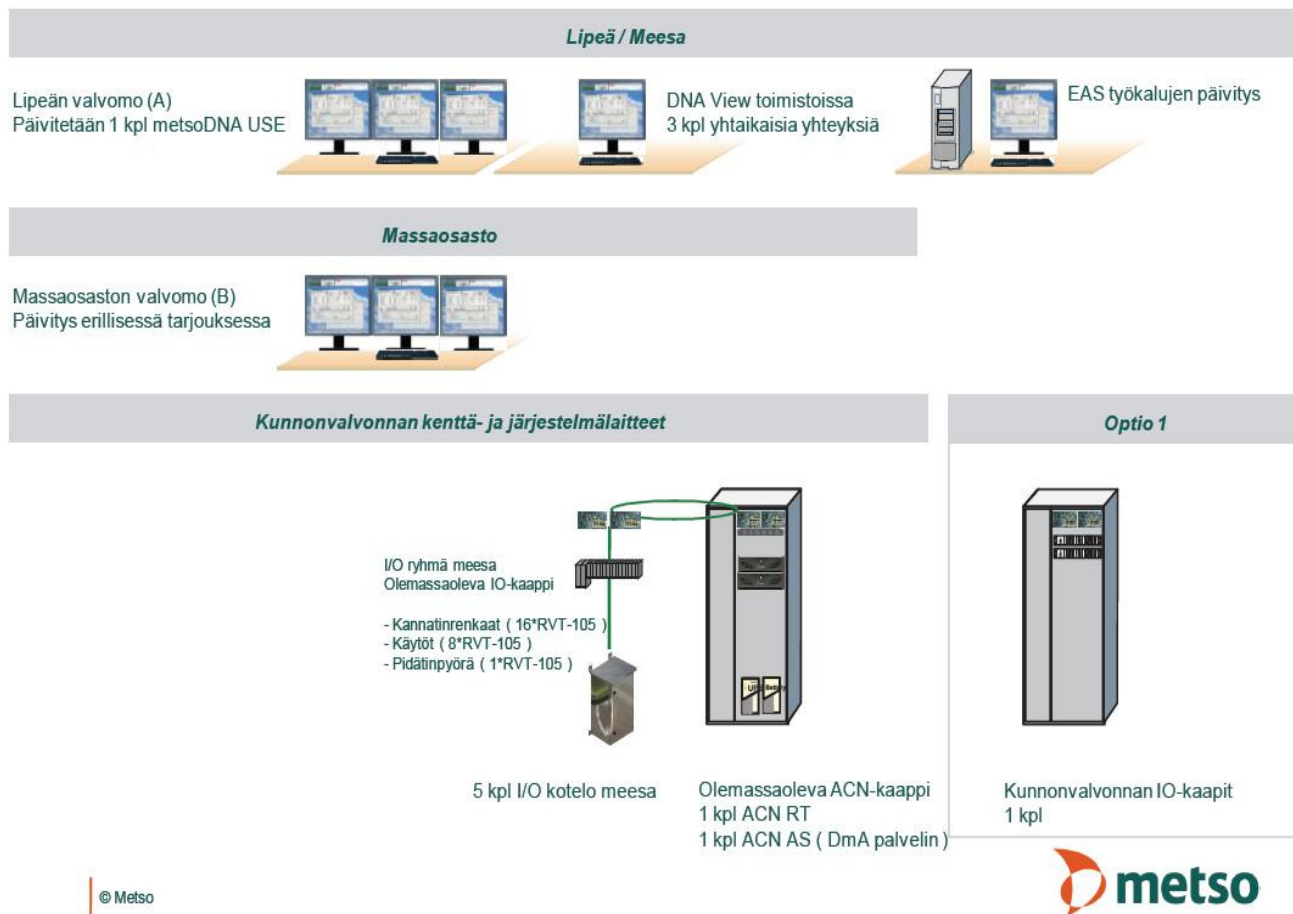
Metson tarjous esitellään seuraavaksi.

Metso tarjoaa värähtelyvalvonnan ratkaisua automaatiototeutuksen laajennuksena olemassa olevaan MetsoDNA-automaatiojärjestelmään. Tämä tarjous on avaimet käteen -paketti, ja se kattaa tarvittavat järjestelmälaitteet (tietokantapalvelin, käyttöliittymälaitteet, verkkolaitteet, prosessiaseman, ohjelmistot), kentälaitteet (anturit, kaapelit), asennuksen, käyttöönoton ja koulutuksen.

Järjestelmään tulee 25 kappaletta RVT-105 kiihtyvyyssantureita. Anturit asennetaan jokaiselle liukulaakerille (yhteensä 16 kpl), pidätinpyörälle (1 kpl), kumpaakin moottoriin asennetaan 2 anturia (yhteensä 4 anturia) ja kumpaakin vaihteeseen asennetaan 2 anturia (yhteensä 4 anturia). Luvussa 9.2 on vaihteen antureiden määrä päivitetty kolmeen laatikkoa kohti.

Automaatiojärjestelmään integroidussa kunnonvalvonnassa ei tarvita pyörimisnopeusantureita, koska pyörimisnopeustieto saadaan suoraan ohjaussovelluksista.

Seuraavassa kuvassa 8.12 on järjestelmän rakenne.



Kuva 8.12 Järjestelmän rakenne (Metso 2011)

Järjestelmä sisältää 5 kappaletta kytkentärasioita (I/O kotelaita), joihin anturit on kytketty anturikaapelilla. Kytkentärasialta lähtee runkokaapelit olemassa olevaan I/O-kaappiin (I/O ryhmä meesa), joka on kytketty I/O-ryhmien loogiseen rengasverkkoon. Rengasverkon kautta anturien tuottama data siirtyy olemassa olevaan räkkiin (ACN-kaappi). Olemassa olevaan ACN-kaappiin (ristikytkentätila) asennetaan uusi ACN RT -prosessiasema kunnonvalvonnan mittauksia varten. Lisäksi uusi ACN AS -tietokantapalvelin asennetaan samaiseen räkkiin.

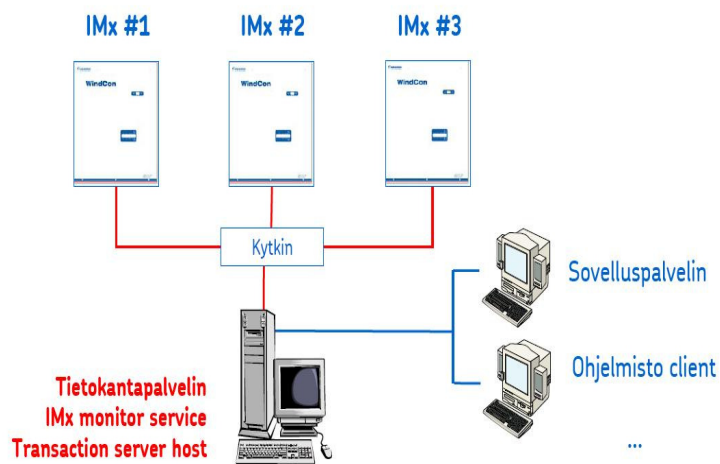
Analysoinnit tehdään prosessiaseman (ACN RT) avulla ja tallennetaan tietokantapalvelimelle (ACN AS). Valvomossa olevalla näytöpöydällä voidaan tarkastella prosessidataa ja värähtelydataa rinnakkain, mikä helpottaa diagnosointia. Näytöpöydällä voidaan tutkia esimerkiksi aikatasoa, spektriä ja trendiä. Tarpeen vaatiessa muodostetaan verhokäyrä, tahdistettu aikakeskiarvostus tai jo-

kin muu signaalinkäsittelymenetelmä, jonka avulla vika voidaan paikallistaa ja analysoida. Ohjelma näyttää värähtelysignaalista lasketut tunnusluvut pylväsdiagrammina ja antaa hälytyksen mikäli hälytysrajat ylittyvät. Käyttöliittymässä on lisäksi analysointityökalut, joilla saa spektrikäyrään lisättyä merkkaimet esimerkiksi laakerin vikataajuuksille ja niiden harmonisille monikerroille.

### 8.2.3 SKF:n tarjoama värähtelyjärjestelmä

SKF:n edustajan tarjous esitellään seuraavaksi.

SKF:n tarjoamassa ratkaisussa kantopyörien laakerien kunnonvalvonnassa on mahdollisuus tarkastella samasta kohteesta korkeataajuisen AE-signaalin lisäksi myös normaalia kiihtyvyyssignaalia. SKF uskoo tämän ratkaisun tuovan huomattavaa lisäarvoa meesauunin kunnonvalvontaan. SKF:n tarjoamassa ratkaisussa hyödynnetään tehtaalla olemassa olevia SKF:n järjestelmiä (kuva 8.13).



Kuva 8.13 Kunnonvalvontajärjestelmän rakennekaavio (SKF 2011)

Kunnonvalvontajärjestelmän anturit kaapeloidaan kentälle sijoitettaviin mittausyksiköihin (IMx), joista mittausdata siirretään olemassa olevan lähiverkon avulla olemassa olevalle tietokantapalvelimelle. Palvelimella on koko kunnonvalvontajärjestelmän tietokanta, mistä käyttäjät hakevat mittaustiedot verkon välityksellä. Olemassa olevia tietokoneita voidaan hyödyntää tiedonkeruussa ja analysoin-

nissa. Kuvassa 8.13 olevista kolmesta mittausyksiköstä kaksi (IMx) on uusia meesauunille tulevia ja kolmas on kuivauskoneella käytössä oleva mittausyksikkö. Seuraavassa kuvassa 8.14 on esitetty kentälle tulevat mittausyksiköt.



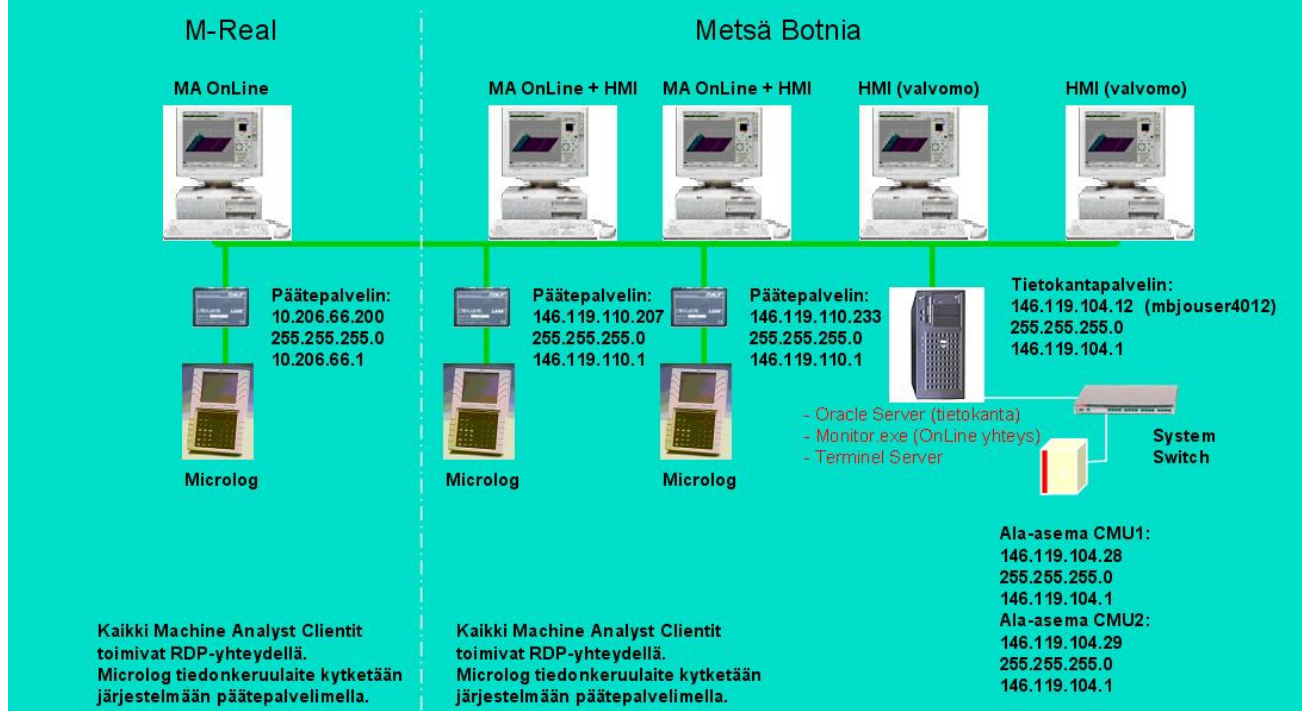
Kuva 8.14 IMx-S 16-kanavainen mittausyksikkö (vasemmalla) ja IMx-S 32-kanavainen mittausyksikkö (SKF 2011)

Mittausyksikössä on muun muassa seuraavanlaisia signaalinkäsittely/analysointi ominaisuuksia:

- FFT: 100 - 6400 viivaa
- aikatasovalvonta
- neljä eri kiinteää verhoikäyrimittauksessa käytettävää kaistanpäästösuodattimen arvoa
- vektorivalvonta
- hälytysrajat voidaan asettaa eri pyörimisnopeuksille (ja kuormituksille).

Seuraavassa kuvassa 8.15 on esitetty SKF:n nykyisen kunnonvalvontajärjestelmän rakenne Botnian Joutsenon tehtaalla.

## Metsä Botnia Joutseno kunnonvalvontajärjestelmän IP-osoitteet



Kuva 8.15 Joutsenon nykyinen SKF:n kunnonvalvontajärjestelmä (Botnia Hummingbird DM)

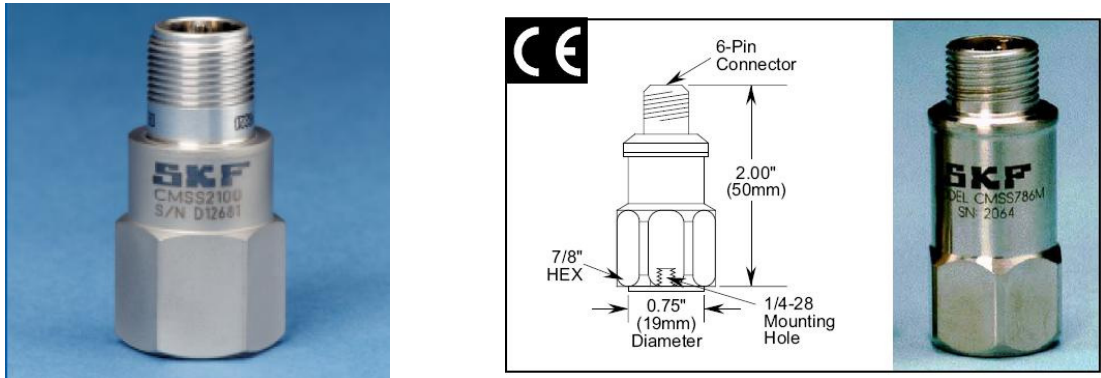
Kuvassa 8.13 oleva kytkin on sama kuin kuvassa 8.15 oleva kytkin (System Switch). Kytkimeen lisätään kaksi uutta mittausyksikköä ja kaikki muu olemassa oleva käytetään hyväksi. Ainoastaan meesauunin valvomoon tarvitaan uusi näyttöpäätte käyttökäyttäjille. Tässäkin tapauksessa voidaan hyödyntää samaa tietokonetta kuin mitä käytetään nykyisessä Acutest-järjestelmässä. Kunnonvalvontamittauslaitteet voivat tehdä tarkempia analysointejä omilla olemassa olevilla koneilla samaan tapaan kuin kuivauskoneella.

SKF:n tarjoama kunnonvalvontajärjestelmä on avaimet käteen -paketti, ja se sisältää toimituksen, käyttöönoton ja koulutuksen.

Jokaiselle liukulaakerille asennetaan yhdistelmäanturi (yhteensä 16 kpl), joka on tavallinen kiihtyvyyssanturi, johon on integroitu akustiseen emissioon perustuva SEE-anturi. Lisäksi asennetaan kiihtyvyyssanturit pidätinpyörälle (1 kpl),

moottoreille (yhteensä 4 kpl) ja vaihteille (yhteensä 8 kpl). Tämän lisäksi sähkömoottorille/vaihteen ensiöakselille asennetaan takoanturi (yhteensä 2 kpl).

Seuraavassa kuvassa 8.16 on esitetty kiihtyvyyssanturi ja yhdistelmäanturi.



Kuva 8.16 SKF:n kiihtyvyyssanturi (vasemmalla) ja yhdistelmäanturi (SKF)

SKF:n järjestelmän hinta on X3. Hintaan ei sisälly muun muassa seuraavat tilaajan velvollisuudet:

- instrumenttikaapelihyllyt, mikäli uusia tarvitaan
- asennusvaiheessa tarvittavat erikoistyökalut, kuten henkilönostimet, telitneet tms.
- jännitesyöttö IMx-yksikölle 230 V (suunnittelu ja kytkentä)
- instrumenttimaadoitus mittausyksikölle (suunnittelu ja kytkentä)
- ethernetin kaapeloinnista IMx-yksikölle (suunnittelu ja kytkentä)
- IMx-yksiköiden verkko-osoitteiden suunnittelu.



## 9 TYÖN TULOKSET

Tässä luvussa analysoidaan saatuja kunnonvalvonnan ratkaisuehdotuksia. Tämän lisäksi Botnia ja Botnia Mill Service ovat saaneet käyttöönsä tarjousmateriaalit, joiden avulla on mahdollista vertailla eri järjestelmien ominaisuuksia ja näin helpottaa päätöksentekoa niiden hankinnan suhteen.

### 9.1 Andritzin järjestelmä

Andritzin tarjoama järjestelmä on ehkä turhankin laaja. Kun järjestelmän hintaan lisätään vielä tilaajan velvollisuudet, OPC-serveri prosessitietojen siirtoa varten, muutama analoginen lämpötilamittaus ja laajin mahdollinen etädiagnostiikkapalvelu, niin investointi- ja käyttökustannukset saattavat kohota todella suuriksi. Lisäksi kustannuksia tulee ACU-130-mittausyksiköiden 1 - 2 vuoden välein suoritettavasta vuosihuollosta. Muita kustannuksia tuottavat järjestelmän ylläpito- palvelu (esim. ohjelmistojen päivitykset), jotka hoidetaan etäpalveluna Andritzin toimipisteestä. Tällainen järjestelmä mahdollistaisi reittimittauksista luopumisen kokonaan sähkömoottoreilta ja vaihteilta. Värähtelyanalysointorille tulisi tarvetta vain, kun havaitaan jotain poikkeavaa ja halutaan lisäselvityksiä. Lisäksi värähtelyanalysointorilla tehtävä analyysi saattaisi olla järkevää ennen vuosihuoltoja, jotta saataisiin kuva sähkömoottoreiden ja vaihteiden nykyisestä kunnosta.

Haluttaessa tietää, kuinka paljon järjestelmän laajentaminen tulevaisuudessa maksaa, voidaan laskea yksinkertainen tunnusluku. Jakamalla järjestelmän hankintahinta X1 antureiden lukumäärällä (21 kpl) voidaan arvioida, kuinka paljon järjestelmän laajentaminen maksaa lisättäessä mittauspisteitä. Tässä tapauksessa yhden mittauspisteen hinta on noin Y1.

Edellä esitetystä järjestelmästä olisi mahdollista räätälöidä suppeampi järjestelmä, joka saattaisi olla hyvä kompromissi. Sähkömoottoreiden kunnonvalvontaan akustisen emission antureiden käyttäminen on kyllä liioiteltua, mutta saattaa olla hyödyllistä etädiagnostiikkapalvelun kannalta. Lisäksi voitaisiin tulla hyvin toimeen ratkaisulla, jossa jokaiselle kannatusrullalle asennettaisiin vain yksi

anturi toiseen liukulaakeriin, kuten aikaisemminkin. Akustisen emission etuna on vaikeasti saavutettavat kohteet, joissa signaali joudutaan ottamaan välittävän rakenteen kautta huomattavienkin matkojen päästä, parhaimmillaan valvotaan kymmeniä laakereita yhdellä AE-mittausyksiköllä (Aura & Nikula 2011). Uusi tekniikka kykenee tuottamaan 100 tunnuslukua sekunnissa ja vanha yhden tunnusluvun sekunnissa, lisäksi vahvistus- ja suodatustekniikka sekä signaalin käsittely on edelleen kehittynyt (Aura & Nikula 2011). Tämän takia tullaan yhdellä anturilla yhtä kantopyörää kohden varmasti hyvin toimeen. Tässä esittämässäni suppeammassa järjestelmässä antureiden määrä olisi ennallaan (11 kpl). Tämän lisäksi on pohdittava, riittääkö poikkeavan tilanteen toteaminen, jolloin tehdään tarkempia tutkimuksia (endoskooppi, värähtelyanalysointilaite, silmämääräinen tarkistus). Tällöin voitaisiin tulla toimeen ilman kallista ja asiantuntemusta vaativaa etädiagnostiikkapalvelua. Vai halutaanko, että järjestelmän avulla pystytään tekemään vikadiagnosointia, joka tarkoittaisi käytännössä Andritzin etädiagnostiikkapalvelua, sillä akustisen emission avulla tehtävä diagnosointi vaatii paljon asiantuntemusta?

Andritzin ratkaisuehdotuksen hyvänä puolena voidaan mainita erityisesti se, että järjestelmä ei sisällä mitään teknistä uutuusriskiä. Kaikki meesauunin akustisen emission avulla tapahtuvan ennakoivan kunnonvalvonnan tekniset ratkaisut ja menetelmät ovat olleet vuosia käytössä. Tämän lisäksi Andritzilta löytyy täydellinen tietämys meesauunin toiminnasta, sillä meesauunin on valmistanut Ahlstrom Machinery Oy, joka kuuluu nykyisin Andritzille. Lisäksi Andritz tekee kaikki meesauunin liittyvät vuosihuollot/tarkastukset.

## **9.2 Metson järjestelmä**

Metson järjestelmässä kunnonvalvonta integroituu osaksi metsoDNA-automaatiojärjestelmää. DNAmachineAssessor-sovelluksella operaattorit ja kunnossapidon henkilöstö pystyvät seuraamaan värähtelymittauksiin pohjautuvaa koneiden kuntotietoa suoraan prosessin ohjausjärjestelmän käyttöliittymästä. Operointiasema tarjoaa havainnollisia näyttöjä värähtelymittausten visualisointiin ja tulkintaan. Yksi yhteinen näkymä koneiden kuntotietoon auttaa operaattoreita ja kunnossapidon henkilöstöä ratkaisemaan yhdessä mekaanisten

laitteiden kuntoon liittyviä ongelmia nopeasti ja tehokkaasti. Operaattorit voivat seurata omalta operointiasemaltaan mekaanisten vikojen kehittymistä ja vakavan vaurioitilanteen uhatessa välittää tiedon nopeasti kunnossapidolle. Kunnossapidon henkilöstö saa saman informaation omille työasemilleen ja voi analysoida yksityiskohtaisemmin värähtelymittauksia häiriöiden syiden selvittämiseksi sekä oikea-aikaisten toimenpiteiden suunnittelemiseksi.

Kunnonvalvonnan integroituminen osaksi ohjausjärjestelmää helpottaa prosessimittauksista ja värähtelymittauksista saatavan informaation yhdistämistä. Tulosten tulkinta ja johtopäätösten tekeminen tehostuu, kun kaikki tarvittava informaatio saadaan koottua helposti yhteen. Erillisiä data-linkkejä tai OPC-servereitä prosessitietojen siirtämiseen erilliseen kunnonvalvontajärjestelmään ei enää tarvita. Tämän lisäksi voi syntyä säästöjä elinkaarikustannuksissa, kun sekä ohjaus- että kunnonvalvontasovellukset jakavat yhteisiä järjestelmäresursseja, kuten käyttöasemia ja historiatietokantaa. Myös järjestelmän ylläpito tehostuu, kun kaikki sovellukset hallitaan samassa suunnittelu ympäristössä.

Haluttaessa tietää, kuinka paljon järjestelmän laajentaminen tulevaisuudessa maksaa voidaan laskea yksinkertainen tunnusluku. Jakamalla järjestelmän hankintahinta X2 antureiden lukumäärällä (25 kpl) voidaan arvioida, kuinka paljon järjestelmän laajentaminen maksaa lisättäessä mittauspisteitä. Tässä tapauksessa yhden mittauspisteen hinta on noin Y2. Tässä tapauksessa kyseessä on avaimet käteen -paketti, jonka takia investointikustannukset eivät ilmoitetusta summasta voi kovin paljon nousta. Järjestelmän ylläpidosta ja vuosihuolloista tulee tietenkin kustannuksia, kuten kaikissa kunnonvalvontajärjestelmissä.

Tämän järjestelmän hyvänä puolena voidaan mainita, että käytetään ”normaaleja” värähtelyvalvonnan menetelmiä, joiden avulla kunnonvalvontamittaajat pystyvät tekemään erillisiä analysointeja. Järjestelmän uutuusriskistä johtuen saattaa esiintyä alussa ”lastentauteja” ja kokemuksen karttuessa opitaan tuntemaan laitteiston normaali värähtelykäyttäytyminen. Suurin uutuusriski liittyy liukulaakereiden valvontaan kiihtyvyyssantureilla. Moottorin kunnonvalvontaan ei liity mitään erityistä uutuusriskiä, sillä moottorin molempiin laakeripesiin tulee kiihty-

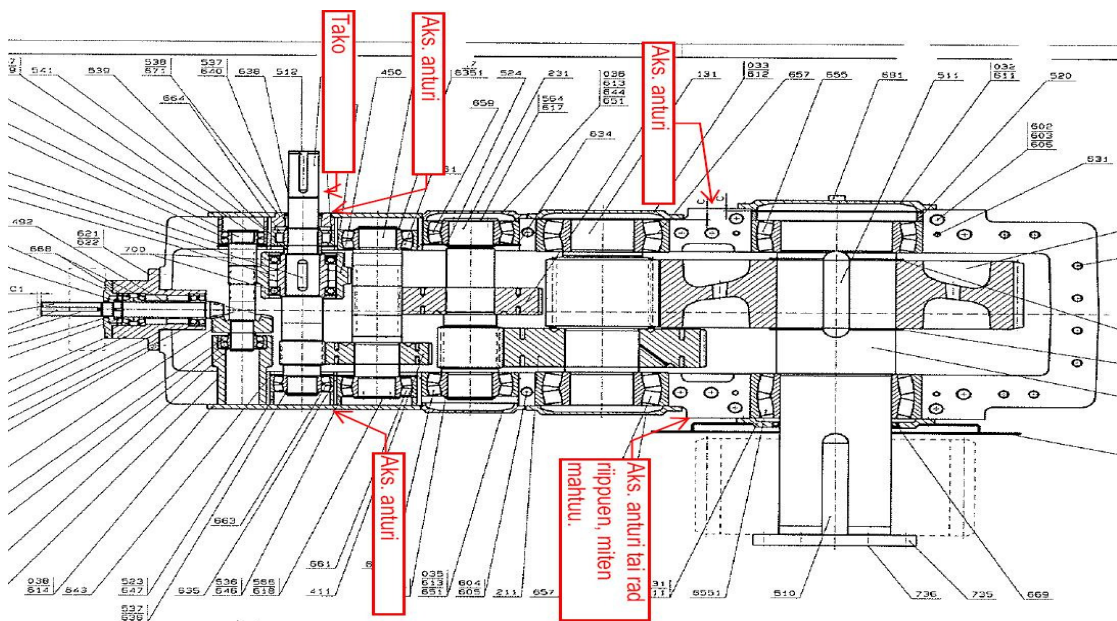
vyysanturit. Lieriöhammasvaihteesta värähtelyt mitataan kahdella kiihtyvyyssanturilla laatikkoa kohti.

Vaihde on neliportainen alennusvaihde, tällöin pyörimisnopeudet ovat viimeisillä akseleilla todella matalia. Tämä merkitsee sitä, että kaikkien laakerien valvontaa ei voida kovin yksityiskohtaisesti suorittaa kahdella kiihtyvyyssanturilla. Meesaunun vaihteessa vain ensiö- ja toisioakselin molemmissa päissä on eri laakerit (4 erilaista laakeria). Kolmella muulla akselilla on molemmissa päissä samat laakerit (3 erilaista laakeria). Asentamalla näiden kolmen akselin molemmille puolille anturit (yhteensä 6 kpl), voidaan jäljelle jääneiden ensiö- ja toisioakselien laakereiden valvonta suorittaa, vaikka niillä ei omaa anturia olekaan. Tämä johtuu siitä, että kaikki viisi akselia pyörivät eri nopeudella ja jäljelle jääneiden laakereiden vikataajuudet ovat erilaisia, koska akselien molemmissa päissä on eri laakerit. Käytännössä ei ole väliä, jos akselin molemmilla puolilla on samat laakerit ja spektrissä esiintyy kyseisen laakerin vikataajuus, jota ei pystytä kuitenkaan kohdentamaan tiettyyn laakeriin. Vaihde täytyy joka tapauksessa korvata toimintakuntoisella vaihteella tulevassa seisokissa. Viallinen vaihde viedään tällöin korjaamolle tarkempiin tutkimuksiin. Kannettavalla värähtelyanalyysointilaitteella voidaan kuitenkin tarvittaessa paikantaa viallinen laakeri, jolloin viallisen laakerin laakeripesän läheisyydestä mitattu värähtely on voimakkaampaa kuin ehjän laakerin. Nopeilla pyörimisnopeuksilla laakeriviat näkyvät selvästi, vaikka mittauspiste olisi vastakkaisella puolella vaihdetta, kuin missä on viallinen laakeri. Hitaalla pyörimisnopeudella laakeriviat näkyvät aikaisin vain mitattaessa läheltä laakeria ja vasta kun vika on todella vakava, niin se alkaa näkyä muissakin mittauspisteissä. Näiden syiden takia anturit kannattaa asentaa lähelle hitaasti pyöriviä laakereita. Nopeallekin akselille kannattaa kuitenkin asentaa anturi, jotta havaitaan mahdolliset linjauspoikkeamat, löysyydet ja muut vastaavat. Hammasvaihde on suhteellisen monimutkainen värähtelysystemi, tarvittavia lähtötietoja (laakeritiedot, hammastuksen tyyppi, käytettävän laitteen ominaisuudet, invertteri vai suora käyttö...) mittausparametrien ja mittaussäätöjen määrittämiseksi on useita. Suositeltavaa on laittaa kullekin akselille ainakin yksi mittaussuunta (aksiaalinen usein ainoa mahdollinen). Mittaussuunta kannattaa valita hammasvoimien puolelta, koska ilmiöt paremmin havaittavissa siltä puolelta ja se puoli on myös vaurioalttiimpi laakeroinniltaan.

Pydyttyäni Metsolta vaihteen anturisijoitusta ilmeni, että aikaisemmissa BMS:n ja Metson neuvotteluissa asiakas halusi mahdollisimman vähäisen anturimäärän, jonka takia tässäkin tarjouksessa oli tarjottu kahta anturia laatikkoa kohti. Metso päivittikin tarjousta myöhemmin, jotta se vastaisi paremmin hitaasti pyörivän 4-portaisen vaihteen kunnonvalvonta vaatimuksia. Tässä päivitettyssä tarjouksessa anturimäärä on nostettu kolmeen laatikkoa kohti. Tämä ratkaisu nostaa järjestelmän hankintahinnan aikaisemmin mainitusta X2 hintaan X4.

### 9.3 SKF:n järjestelmä

SKF:n tarjoamassa ratkaisussa hyödynnetään olemassa olevia SKF:n kunnonvalvontajärjestelmiä. Tässä ratkaisussa käyttökäytännöllä olisi erillinen näyttöpääte, josta he näkevät mahdolliset hälytykset ja voivat ilmoittaa hälytyksistä kunnonvalvontamittajille, jotka voivat omilla työasemillaan tehdä lisämittauksia. Järjestelmään voidaan siirtää prosessitietoja tekniikoilla jotka ovat mA-viesti, XML ja OPC. Järjestelmästä voidaan siirtää tietoa ulos esimerkiksi automaatiojärjestelmään releviestillä. Sähkömoottoreiden kunnonvalvonta kahdella kiihtyvyyssanturilla on hyvin tavanomainen ja toimiva ratkaisu. Jokaiselle vaihteelle tulee 4 kiihtyvyyssanturi laatikkoa kohti. Seuraavassa kuvassa 9.1 on esitetty vaihteen antureiden sijoitus.



Kuva 9.1 Meesauunin vaihteen antureiden sijoitus (SKF 2011)

Antureiden sijoitukset ovat yleensä tapauskohtaisesti sovittavissa tilaajan kanssa, mutta tässä on esimerkki SKF:n ratkaisusta sijoittaa anturit.

Haluttaessa tietää kuinka paljon järjestelmän laajentaminen tulevaisuudessa maksaa voidaan laskea yksinkertainen tunnusluku. Jakamalla järjestelmän hankintahinta X3 antureiden lukumäärällä (29 kpl) voidaan arvioida, kuinka paljon järjestelmän laajentaminen maksaa lisättäessä mittauspisteitä. Tässä tapauksessa yhden mittauspisteen hinta on noin Y3. Tässä tapauksessa kyseessä on avaimet käteen -paketti, jonka takia investointikustannukset eivät ilmoitetusta summasta voi kovin paljon nousta. Järjestelmän ylläpidosta ja vuosihuolloista tulee tietenkin kustannuksia, kuten kaikissa kunnonvalvontajärjestelmissä.

Tämän järjestelmän hyvänä puolena voidaan mainita, että käytetään ”normaaleja” värähtelyvalvonnan menetelmiä, joiden avulla kunnonvalvontamittajat pysyvät tekemään erillisiä analysointeja. Suurin uutuusriski liittyy liukulaakereiden valvontaan, mutta toisin kuin Metson järjestelmässä tässä käytetään lisäksi SEE-menetelmällä saatavaa tietoa. SEE-menetelmä löytää samantapaisia vikoja kuin akustinen emissio, kuten mekaaninen hankaus, laakeriviat, kavitaatio ja voiteluongelmat.

#### **9.4 Kiihtyvyyssanturien soveltuvuus kantopyörille**

Olen edellä pohtinut, että liukulaakeroitujen kantopyörien valvontaan kiihtyvyyssantureilla liittyisi tekninen uutuusriski. On kuitenkin todennäköistä, että ilmiöt, jotka liittyvät esimerkiksi liukulaakerin vikaantumiseen ja uunin linjaustilan muuttumiseen, voidaan havaita sekä AE- että kiihtyvyyssignaaliin perustuvilla menetelmillä. Laurilan & Lahdelman (2009) kirjoituksessa, jossa tutkittiin akustisen emission ja kiihtyvyyssignaalin sopivuutta haasteellisten kohteiden kunnonvalvontaan, todetaan seuraavasti. Molemmilla menetelmillä saatiin paljon tietoa eri ilmiöistä, mutta kiihtyvyyssignaalin oli yleensä kohinasesta selvästi erotettavia tapahtumia enemmän kuin AE-signaalissa. Tämän lisäksi työssä todetaan, että kiihtyvyyssignaalin (ja sen 1. ja 2. aikaderivaatan) todetaan saavuttavan useimmiten suurempi herkkyys transienttien iskujen kohdalla, kun taas AE-signaalin herkkyys on joko sama tai suurempi hankausilmiöiden yhteydessä.

Toisaalta työssä todetaan, että kiihtyvyyssignaalit (ja sen 1. ja 2. aikaderivaatta) sekä AE-signaalit muistuttivat usein paljon toisiaan. Näiden havaintojen pohjalta todennäköisesti molempiin mittausmenetelmiin nojautuen on mahdollista kehittää tehokkaita kunnonvalvontamenetelmiä.

Lahdelman (2002) artikkelissa käsitellään lyhyesti mittausesimerkkiä, joka liittyy kiihtyvyyssignaalin käyttämiseen meesauunin liukulaakeroiduilla kantopyörillä. Tässä artikkelissa tehdyt mittaukset ovat tehty 2 - 2000 Hz taajuusalueella käyttäen mittausparametreina kiihtyvyyden 1. ja 2. aikaderivaatan huippuarvoa. Tämän lisäksi mitattiin normien mukaiset nopeuden tehollisarvot. Mittaukset tehtiin laakeripesästä mitattuna vaakasuuntaan. Tämän tutkittavana olleen uunin yhteen kierrokseen kului aikaa eri mittauskerroilla 42 - 45 s, jolloin kantopyörän yksi kierros vei aikaa 12,2 - 13,1 s. Kantopyörän halkaisija oli 1098,5 mm ja siinä oli liukulaakerit. Mittauksen kohteena olevasta kantopyörästä oli aiemmin katkennut akseli ja tilalle asennettiin toinen käytetty pyörä, jonka pinta ei ollut tasainen. Kantopyörää hiottiin myöhemmin paikallaan. Ajan mittaan uuniin tuli suuntausvirhettä, joka sittemmin korjattiin. Näihin eri tilanteisiin liittyvät mittaukset tehtiin ajanjaksolla 1997 - 1999. Ensimmäinen mittaus tehtiin ennen hiontaa, toinen mittaus tehtiin hionnan jälkeen, kolmas mittaus tehtiin, kun uunissa esiintyi suuntausvirhettä, ja neljäs mittaus tehtiin, kun suuntausvirhe oli korjattu. Näistä mittaustuloksista laskettiin kaksi eri suhdelukua (taulukko 9.1).

Taulukko 9.1 Meesauunin kantopyörän laakeripesästä mitattuja arvoja (Lahdelma 2002)

Tilanne	$\frac{\text{km}}{\text{s}^3}$	$10 \frac{\text{Mm}}{\text{s}^4}$	mm/s
1. Ennen hiontaa	19,3	56,7	0,2
2. Hionnan jälkeen	4,0	3,3	0,2
3. Kun suuntausvirhettä	73,0	123,0	0,3
4. Ei suuntausvirhettä	2,3	2,0	0,1
1. ja 4. liittyvä suhdeluku	8	28	2
3. ja 4. liittyvä suhdeluku	31	61	3

Normien mukaisten nopeuden tehollisarvojen suhdeluvut olivat 2 ja 3. Kiihtyvyyden 1. aikaderivaatta antoi suhdeluvuiksi 8 ja 31. Kiihtyvyyden 2. aikaderivaatta antoi suhdeluvuiksi 28 ja 61. Tuloksista voidaan todeta, että kiihtyvyyden 2. aikaderivaatta oli herkempi kuin kiihtyvyyden 1. aikaderivaatta. Nopeuden tehollisarvojen kohdalla suhteelliset muutokset olivat vähäisiä ja myös värähtelyarvot itsessään olivat erittäin pieniä. Näin ollen nopeusmittausten perusteella kantopyörien kuntoa ei voitu arvioida.

Käytäntö on osoittanut, että normaalin kiihtyvyysanturin ulostulon derivoimalla ajan suhteen joko kerran tai kaksi kertaa on voitu korvata useassa tapauksessa akustisen emission mittaukset ja näin on välttytty kahdenlaisten anturien käytöltä.



## 10 YHTEENVETO

Parhaiten sopivat valvontamenetelmät riippuvat valvottavasta kohteesta ja erityisesti sen kriittisyydestä tuotannon kannalta ja toisaalta taloudellisista tekijöistä. Tämän lisäksi värähtelyvalvonnan pohjaksi on vähintäänkin jolloin tasolla ymmärrettävä muun muassa valvottavien laitteiden toimintaperiaatteet, mahdolliset vikaantumismekanismit sekä myös prosessi, jossa valvonnan kohteena olevat laitteet ovat.

Botnia Mill Servicessä nähtiin tarvetta saada lisätietoa meesauunille sopivasta kiinteästä kunnonvalvontajärjestelmästä. Nykyisen Acutest-järjestelmän taloudellinen käyttöikä ja uudet varaosat ovat lopussa. Osa järjestelmän antureista on mykkiä eikä tarvittavia komponentteja enää ole saatavana. Lisäksi järjestelmän modernisointi/uusinta tiedettiin kalliiksi investoinniksi. Tämän lisäksi etävalvonnasta kokemukset olivat mitä olivat. Esimerkiksi tehtaalla huomattiin omissa mittauksissa, että vaihteessa olisi laakerivikaa. Tämän jälkeen etävalvonnalta kysyttiin heidän mittaustuloksistaan. Etävalvonta löysi hieman normaalia poikkeavaa emissiokäyttäytymistä, mutta ei pystynyt kertomaan tarkemmin, mistä se johtuu. Asioiden pitäisi todellisuudessa mennä toisinpäin, jolloin etävalvonta ilmoittaa tehtaalle, kun se havaitsee vikoja. Tämän lisäksi on esimerkiksi saatu etävalvonnalta toimenpide-ehdotus, että jokin laakeri on vaihdettava mahdollisimman pikaisesti. Kyseinen laakeri vaihdettiin kuitenkin lopulta vasta vuoden päästä.

Aluksi tutustuin värähtelyn kirjallisuuteen sekä laitteiston mekaaniseen rakenteeseen. Tämän jälkeen haastattelin kunnonvalvontamittaajia ja ennakkohoolto vastaavaa saadakseni kuvan meesauunin nykyisistä kunnonvalvonta menetelmistä. Meesauunin kunnonvalvonta neljän viikon välein suoritettavalla värähtelyanalysointimittauksella sähkömoottoreille ja vaihteille on todettu toimivaksi menetelmäksi. Kunnonvalvontamittaajien mukaan tämä neljän viikon mittausväli voisi olla pidempikin, erityisesti vaihteiden kannalta. Meesauunille on yhden kerran vaihdettu uusi liukulaakeri poltinpäädyn puoleiselle kannatusrullalle. Tämä vika havaittiin laitosmiesten suorittamasta jaksottaisissa tarkastuksissa, jolloin

havaittiin palaneen öljyn hajua ilmassa. Myöhemmin järjestelmään lisättiin polttopäädyn puoleisten kannatusrullien liukulaakereille öljyn jäähdytin ja öljyn lämpötilan mittausanturi. Seuraamalla reaaliaikaisesti öljyn lämpötilaa voidaan estää samanlainen tilanne, jossa laakerin välykset menetetään liiallisen lämpötilan takia.

Pyysin Andritzilta, Metsolta ja SKF:lta tarjoukset meesauunin kunnonvalvonnasta. Andritzin kunnonvalvontajärjestelmän modernisoinnissa/uusinnassa uusitaan kaikki. Andritz lupaa uuden järjestelmän ratkaisevan vanhaan järjestelmään liittyvät ongelmat. Se kuinka laajaksi järjestelmä rakennetaan on sovittavissa tilaajan ja toimittajan kanssa. Andritzilta saamani tarjous on kaikkein laajimmista (ja myös kalleimmasta) päästä. Hintaa on mahdollista saada alemmas ottamalla käyttöön yhtä monen anturin järjestelmä kuin aikaisemmassakin järjestelmässä. Metson järjestelmässä kunnonvalvonta integroituu osaksi automaatiojärjestelmään. Suurin uutuusriski liittyy liukulaakereiden kunnonvalvontaan kiihtyvyyssantureilla. Andritzin mukaan hitaasti pyörivissä laakereissa ei ole kiihtyvyyksiä. Metsolla on mittauskokemuksia laitteiston toimivuudesta meesauunin vierintälaakeroiduilla kantopyörillä. Botnian Joutsenon tehtaalla on kuitenkin käytössä liukulaakeroidut kantopyörät. SKF:n järjestelmä on samantapainen kuin Metson. Tässä järjestelmässä kunnonvalvonta on erillinen järjestelmä, toisin kuin Metson. SKF:n järjestelmässä liukulaakereiden kuntoa mitataan kaksoisantureilla. Kiihtyvyyden ja akustiseen emissioon perustuvat SEE-menetelmän uskotaan antavan lisäarvoa meesauunin kunnonvalvonnalle. Tämä on huomattava ero vertailtaessa Metson ja SKF:n järjestelmiä. Metson järjestelmässä prosessitiedot ovat rinnan kunnonvalvontatietojen kanssa. Haluttaessa prosessitietoja SKF:n tai Andritzin järjestelmään vaatii se lisäpanostuksia, kuten esimerkiksi OPC-serverin.

Erilaisten prosessisuureiden käyttö koneiden kunnonvalvonnassa on melko vähäistä, vaikka ne ovat periaatteessa helposti saatavissa prosessin ohjauksesta. Prosessitiedon käyttö rinnan esimerkiksi värähtelymittausten kanssa antaa usein lisäpohjaa päätöksen teolle. Tällaisia suureita ovat esimerkiksi prosessista saatavat paine-, lämpötila-, virtaus- ja nopeustiedot. Prosessiautomaation ja kunnonvalvonnan integroiminen näyttää olevan tulevaisuuden kehityssuunta.

Esimerkiksi paperiteollisuudessa tämänsuuntaista kehitystä on selvästi nähtävissä. (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 6.)

Tulevaisuudessa on tavoitteena, että tehtaalla on enintään kaksi kunnonvalvontajärjestelmää. On hyvin todennäköistä, että SKF:n nykyisten järjestelmien lisäksi tulevaisuudessa toinen järjestelmä on Metson tai Andritzin. Periaatteessa valitsemalla SKF:n järjestelmä ja laajentamalla sitä myöhemmin on tehtaalla käytössä yksi kunnonvalvontajärjestelmä. Tämän opinnäytetyön tulos on, että Botnia ja Botnia Mill Service voivat tutustua tarkemmin toimittajien tarjouksiin ja esitteisiin vertailtaessa eri mahdollisuuksia. Tämän lisäksi Botnian on tarkemmin määriteltävä, kuinka laajan järjestelmän se haluaa meesauunilla käyttöönsä. Riittääkö pelkän poikkeavan tilanteen toteaminen vai pitää järjestelmän pystyä tekemään vikadiagnosointia? Valitsemalla Andritzin järjestelmän mahdollisimman laajana voi Botnia keskittyä ydinliiketoimintaansa, eikä kovin suurta osaamista tarvita meesauunin kunnonvalvontaan. Valitsemalla SKF:n tai Metson järjestelmän on tehtaalta löydyttävä osaavaa henkilökuntaa, jotka ymmärtävät myös prosessin toiminnan sekä kuinka uunin linjaustilan muutokset vaikuttavat värähtelykäyttäytymiseen. Andritzin järjestelmä tarjoaa lisäksi reaaliaikaisen avun uunin linjaukseen. Seisokin aikana tehtyjen uunin linjausmittausten avulla voidaan ennakoida kantopyörien laakerien, kantopyörien tai kehien rikkoontumiset. Linjausmittausten mukaan säädetyn uunin kuluminen on vähäisempää ja sen käyttöikä pitenee. On syytä todeta vielä, että hyvässä kunnossa oleva uuni kuluttaa vähemmän energiaa saman tuotemäärän valmistamiseen. Jos uuni jurnuttaa vastaan, syö se enemmän energiaakin.

## KUVAT

- Kuva 2.1 Botnia Mill Servicen toimintamalli, s. 8
- Kuva 3.1 Sellun valmistus, s. 10
- Kuva 3.2 Meesauunin periaatekuva, s. 12
- Kuva 4.1 Meesauunin kokoonpano, s. 14
- Kuva 4.2 Kantopyörät ylhäältäpäin kuvattuna, s. 15
- Kuva 4.3 Liukulaakerin osat, s. 16
- Kuva 4.4 Meesauunin polttopään puoleinen kannatuspyörä, s. 17
- Kuva 4.5 Aksiaaliturilla, s. 18
- Kuva 4.6 Meesauunin käyttökoneisto 1, s. 19
- Kuva 4.7 Valusegmentti Kymenite-ADI valuraudasta, s. 20
- Kuva 4.8 Käyttökoneisto, s. 20
- Kuva 4.9 Kuormituksen jakautuminen eri käytöille, s. 21
- Kuva 5.1 Kunnonvalvonta osana kunnossapitoa, s. 22
- Kuva 5.2 Tuotantoajan lisääminen kunnonvalvonnan avulla, s. 23
- Kuva 5.3 Kunnossapidon kokonaiskustannusten riippuvuus ennakoivan kunnossapidon osuudesta, s. 24
- Kuva 5.4 Laakerivaurion havaitseminen eri menetelmillä, s. 26
- Kuva 6.1 Värähtelymittauksille tyypilliset taajuusalueet, s. 32
- Kuva 6.2 Kiihtyvyyssanturin rakenne, s. 33
- Kuva 6.3 Nopeus- ja kiihtyvyysspektri samassa laakerin mittauspisteessä, s. 36
- Kuva 6.4 Anturin paikan valinta värähtelymittauksessa, s. 37
- Kuva 6.5 Kokonaistasomittausjärjestelmän rakenne, s. 41
- Kuva 6.6 Esimerkki online-järjestelmän rakenteesta, s. 43
- Kuva 6.7 Vierintälaakerin osien vauriotaajuuksien laskenta, s. 46
- Kuva 6.8 Laakerin vaurioitumisen vaiheet, s. 47
- Kuva 6.9 Kiihtyvyyssignaalin derivoimisen vaikutus laakerivian näkymiseen, s. 49
- Kuva 6.10 Hammasvaihteesta keskiarvostamalla saatuja tyypillisiä signaalimuotoja, s. 57
- Kuva 6.11 Hälytysrajaspektri, s. 58
- Kuva 6.12 Liukulaakerin värähtelyn spektrejä, s. 59
- Kuva 6.13 Verhokäyräanalyysin periaate, s. 61
- Kuva 6.14 Värähtelyn aikatasosignaali ja sen PeakVue-signaali, s. 62
- Kuva 6.15 Vesiputouskuva PeakVue spektristä, s. 64
- Kuva 6.16 Vesiputouskuva PeakVue aikatasosta, s. 64
- Kuva 6.17 Akselin ratakäyrä, s. 65
- Kuva 6.18 Takoanturi vaihekulman mittauksessa, s. 66
- Kuva 6.19 Iskusysäysmittaus antaa tietoa laakerin voitelusta ja kunnosta, s. 70
- Kuva 7.1 Sähkömoottorin mittaus- ja monitorointijärjestelmä, s. 74
- Kuva 8.1 Meesauunin anturikartta, s. 79
- Kuva 8.2 Kunnonvalvontajärjestelmän rakenne, s. 80
- Kuva 8.3 Monitoroinnin kuva, joka esittää vian kehittymistä kantorullalla usean kuukauden ajan, s. 82
- Kuva 8.4 Vahvistettu lyhytaikainen purskemainen AE-signaali, s. 82
- Kuva 8.5 Amplitudin muutokset kuvastavat rullalaakerin toimivuutta, s. 83
- Kuva 8.6 Akustisen emission mittaustuloksia vierintälaakerista, jonka akselin pyörimistaajuus oli 0,5 Hz, s. 84
- Kuva 8.7 ACU-130-mittausyksikkö, s. 86

Kuva 8.8 Järjestelmän rakenne, s. 87  
Kuva 8.9 Tehdaskohtainen käyttöikkuna, s. 88  
Kuva 8.10. Laitekohtainen käyttöikkuna, s. 89  
Kuva 8.11 Konzernilaajuinen AE-järjestelmien ja käyttäjien keskitetty hallinta, s. 90  
Kuva 8.12 Järjestelmän rakenne, s. 92  
Kuva 8.13 Kunnonvalvontajärjestelmän rakennekaavio, s. 93  
Kuva 8.14 IMx-S 16-kanavainen mittausyksikkö (vasemmalla) ja IMx-S 32-kanavainen mittausyksikkö, s. 94  
Kuva 8.15 Joutsenon nykyinen SKF:n kunnonvalvontajärjestelmä, s. 95  
Kuva 8.16 SKF:n kiihtyvyyssanturi ja yhdistelmäanturi, s. 96  
Kuva 9.1 Meesauunin vaihteen antureiden sijoitus, s. 101

## **TAULUKOT**

Taulukko 5.1 Mittaustarpeen määrittely, s. 30  
Taulukko 8.1 Ote meesauunin laitteiden kriittisyysluokittelusta, s. 77  
Taulukko 9.1 Meesauunin kantopyörän laakeripesästä mitattuja arvoja, s. 104

## LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Luku 23.

[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23\\_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf) (Luettu 15.2.2011)

Ahlstrom Machinery Oy. 1998. Meesauuni 3:n prosessi-, käyttö- ja huolto-ohje.

Andritz Oy. AKUSTINEN EMISSIO -KOULUTUS. Koulutusmateriaali.

Aura, K. 2011. Andritzin edustajan Kari Auran 24.2.2011 lähettämä tarjous.

Aura, K. Nikula, T. 2011. Akustinen emissio ennakoivassa kunnonvalvonnassa. Promaint-lehti 1.

BMS. Botnia Mill Service presentation (PowerPoint).

Botnia. Botnia presentation (PowerPoint).

Botnia Hummingbird DM. Dokumenttitietokanta.

Etelä-Saimaa 2010. Botnia Mill Service:n työpaikkailmoitus. 28.11.2010.

Halme, J. & Parikka, R. 2005. AC-servomoottori - rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Tutkimusraportti. VTT.

[http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori\\_rakenne\\_vikaantuminen&havainnointi.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf) (Luettu 16.2.2011)

Helander, T. 2008. Nome Oy. Prosessilaitteiden kunnonvalvonta (PowerPoint). [www.lprinno.fi/includes/file\\_download.asp?depid=15004&fileid=7222&file=Nome\\_Oy\\_10\\_12\\_08.ppt](http://www.lprinno.fi/includes/file_download.asp?depid=15004&fileid=7222&file=Nome_Oy_10_12_08.ppt) (Luettu 8.2.2011)

Hiltunen, A. 2009. Meesauunin vaihtoehtoiset polttoaineet. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kandidaatintyö.

Impola, S. 1999. Meesauunin säädön kehittäminen. Diplomityö. Oulun yliopisto.

Järvinen, V. Miettinen, J. Kivistö, M. Lahdelma, S. 2004. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka LUONNOS. Signaalinkäsittely ja –analysointimenetelmät. [http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/prognoskartoitus\\_v1.5.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/prognoskartoitus_v1.5.pdf) (Luettu 8.2.2011)

KnowPulp -oppimisympäristö.

Kohopää, P. Sähkömoottorien kunnonvalvonta moniste. ABB Service Oy.

Kolehmainen, M. 2010. Botnia Joutsenon kriittisyysluokittelu.

Kuusela, J. & Harjula, H. 2009. Case: Tarkemmin, nopeammin ja luotettavammin. Promaint-lehti 6, 26.

Lahdelma, S. 2002. Kokemuksia kiihtyvyyttä korkeampiasteisten aika-derivaattojen käytöstä vikojen toteamisessa. Kunnossapito-lehti 9, 29 - 32.

Lahdelma, S. Leinonen, J. & Ahola, J. 2004. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka LUONNOS. Anturit.  
[http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/prognoskartoitus\\_v1.5.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/prognoskartoitus_v1.5.pdf) (Luettu 8.2.2011)

Lahdelma, S. & Leskinen, R. 1991. Kunnonvalvonta. Kunnossapito-lehden 2 erikoisliite nro 7, 3.

Laurila, J. & Lahdelma, S. 2009. Oikea menetelmä haasteellisten kohteiden kunnonvalvontaan. Promaint-lehti 1, 32 - 36.

Leiviskä, K. Rauma, T. Ahola, T. Juuso, E. Myllyneva, J. & Alahuhta P. 1996. Sumea mallintaminen, viritys ja säätö. Oulun yliopisto. Sääätötekniikan laboratorio. Raportti B No 2.

Metso. 2011. Metson edustajan 4.3.2011 lähettämä tarjous.

Miettinen, J. 2004. Hitaasti pyörivät laakerit. Kunnossapito-lehti 2, 45 - 47.

Miettinen, J. 2006. Vierintälaakerien rasvavoitelun monitorointi. SKF kunnonvalvonnan ja käyttövarmuuden koulutuspäivien luentomateriaali.

Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-Media

Mustonen, M. 2000. VTT:n tutkimusraportti. Paperikoneiden vierintälaakerien kunnonvalvontamenetelmät.  
<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kunvalvmenetf.pdf> (Luettu 15.2.2011)

Nohynek, P. & Lumme, V-E. 1996. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Lo-  
viisa: Painoyhtymä

Nokeval. Paneelimitari 2031 IR-antureille. Datasheets.  
<http://www.nokeval.com/pdf/datasheets/fi/2031esite.pdf> (Luettu 1.3.2011)

Nome Oy. [http://www.nome.fi/onlinesystems.html#procheck\\_system](http://www.nome.fi/onlinesystems.html#procheck_system) (Luettu 15.2.2011)

Näyhä, A. 2006. Liikenteen biopolttonesteiden tuotanto selluteollisuudessa tulevaisuudessa. Jyväskylän yliopisto. Taloustieteiden tiedekunta. Pro gradu - tutkielma.

Oy Metsä-Botnia Ab. <http://www.botnia.fi/Pages/Default.aspx> (Luettu 16.2.2011)

PSK-käsikirja 3. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Helsinki: PSK.

Schaeffler 2008. FAG ProCheck. Tekniset tuotetiedot.  
[http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/library/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi\\_wl\\_80-69\\_2\\_fi\\_fi.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/library/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_wl_80-69_2_fi_fi.pdf) (Luettu 15.2.2011)

SKF Värähtelyanalyysi - Taso 1 ja Taso 2. Koulutusmateriaali.

SKF. 2011. SKF:n edustajan 4.3.2011 lähettämä tarjous.

Sopanen, H. 2004. Online-kunnonvalvonnan soveltaminen Lahnaslammen rikastamoon. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Insinööriyö.

Sulo, P. & Koski, M. 2006. Huippuarvoihin perustuvat mittaukset hitaasti pyörivien koneiden kunnonvalvonnassa. Kunnossapito-lehti 1  
<http://www.promaint.net/downloader.asp?id=1780&type=1> (Luettu 11.2.2011)

Suontama, K. Korpi, A. Manninen, A. Rinkinen, J. 1998. Öljyn kunnonvalvonta osana tuotantolaitteiden käynnissäpitoa. Kunnossapitokoulu nro 43.

Technical Associates of Charlotten taulukko. Table 1 Illustrated vibration diagnostic chart.

Villanen, A. & Luukkanen, P. 1998. Liukulaakerin kunnonvalvonta. Kunnossapito-lehden erikoisliite.

VTT. Kirjallisuusselvitys tuuletusilmapuhaltimen koneenosien käynninvalvonnan ja vikadiagnostiikan menetelmistä LUONNOS.  
[http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/vikadiagnostiikkaselvitys\\_luonnos\\_v4.doc](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/luonnokset/vikadiagnostiikkaselvitys_luonnos_v4.doc) (Luettu 10.2.2011)

YIT Oyj. <http://www.yit.fi/palvelut/yritykset/teollisuus> (Luettu 2.12.2010)



## LIITE 1

## 1 (2)

Kohde	Valvottava komponentti	Valvontamenetelmä tai mitattava suure	Mittalaitetyyppi	Kunnonvalvonta	Vianmäärittäminen	Suojaus
Object/Subject	Monitored component	Monitoring method or measured quantity	Measurement device type	Condition monitoring	Diagnosis	Protection
Pumppu Pump	Kaikki osat	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Kytkin Coupler/Switch	Stroboskooppi Stroboscope		X	X	
	Juoksupyörä Fly wheel	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Tiiviste Gasket	Lämpötila Temperature		X		
	Tiiviste Gasket	Akustinen emissio Acoustic emission		X		
Puhallin Blower/Fan	Kaikki osat All components	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Hihna Belt	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Hihna Belt	Stroboskooppi Stroboscope		X	X	
	Vierintälaakeri Roller bearing	Iskusysäys Shock pulse	2	X	X	
	Vierintälaakeri Roller bearing	Verhokäyrä Envelope	3	X	X	
Turbogeneraattori Turbo generator	Kaikki osat All components	Kokonaistaso Overall level	1	X		
	Roottori Rotor	Vektori Vector	3	X		
	Liukulaakeri Sleeve bearing	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Liukulaakeri Sleeve bearing	Ratakäyrä Orbit	3	X	X	
	Liukulaakeri Sleeve bearing	Lämpötila Temperature		X		
Ruuvikompressor Screw compressor	Kaikki osat All components	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Juoksupyörä Fly wheel	Spektrivalvonta Spectrum monitoring	3	X	X	
Sähkömoottori Electric motor	Kaikki osat All components	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Roottori Rotor	Virrankulutus Power consumption	1	X		X
	Roottori Rotor	Virtaspektri Current spectrum	4	X	X	
	Staattoni Stator	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Staattoni Stator	Lämpötila Temperature		X		X
Tela Cylinder	Kaikki osat All components	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Profiili Profile/Section	Tahdistettu keski- arvostus aikatasossa Synchronized averaging in time domain	3	X	X	
	Hitaasti pyörivä vierintälaakeri Slowly rotating roller bearing	Verhokäyrä Envelope	3	X	X	
Vaihte Gear	Kaikki osat All components	Tärinärasitus Vibration severity	1	X		X
	Laakeri Bearing	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Hammaspyörä Gear wheel	Spektri Spectrum	3	X	X	
	Hammaspyörä Gear wheel	Tahdistettu keski- arvostus aikatasossa Synchronized averaging in time domain	3	X	X	
	Hammaspyörä Gear wheel	Kepstri Cepstrum	3	X	X	
	Hammaspyörä Gear wheel	Kulumishiukkas- analyysi Wear particle analysis		X	X	

Kuva 1 Esimerkkejä eri mittalaitetyyppien käytöstä (PSK 2007, 115)

Vikatyyppi	MENETELMÄ																
	Kokonaistaso	Spektrianalyysi	Akustinen emissio	Kurtosis	Crest factor	SPM	Kepstrianalyysi	Öljyanalyysi	Kulumishiukkasanalyysi	Hiukkaslaskenta	Magneettitulpat	Lämpötilamittaus	Akselin ratakäyrä	Stroboskooppi	Ultraäänimittaus	Ääni	
Epätasapaino	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	
Asennusvirhe	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	
Vierintälaakerit	x	x	o	x	x	1	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	
Liukulaakerit	x	x	x	-	-	-	-	x	x	x	x	x	1	-	x	-	
Hammasyörät	x	1	o	o	o	x	1	x	x	x	x	-	-	-	x	x	
Resonanssi	x	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	x	
Kavitaatio	x	x	x	o	o	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	
Mek. välykset	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	
Käyrä akseli	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	
Sähk. epätasap.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Öljykalvon pyörteily	x	1	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	1	-	-	-	
Kitka	x	x	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	x	x	-	x	x
Vialliset käyttöhihnat	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
Likaantumisen	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	
Öljyn puhtaus	-	-	-	-	-	-	-	1	x	x	x	-	-	-	-	-	
Kulumisvoimakkuus	-	-	-	-	-	-	-	x	1	x	x	-	-	-	-	-	
Puutteellinen voitelu	x	x	x	-	o	1	-	x	x	-	-	x	x	-	x	x	

1 = soveltuu yleensä

x = soveltuu rajoituksin

o = vaatii tapauskohtaisen selvityksen

- = ei käytetä

Kuva 2 Mittausmenetelmien soveltuvuus erityyppisten vikojen havainnointiin (Kuoppala, Leskinen & Leppämäki 1986, Sopasen 2004, 102 mukaan)