

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Antti Rastas

DIAGNOSTISET TYÖKALUT LAROX PAINESUODATTIMEN
KUNNONVALVONNASSA

DIAGNOSTIC TOOLS FOR LAROX PRESSURE FILTER CONDITION
MONITORING

Päivitetty 30.11.2019

Tarkastajat: Professori Juha Varis, TkT Mikael Ollikainen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Antti Rastas

Diagnostiset työkalut Larox painesuodattimen kunnonvalvonnassa

Diplomityö

2004

107 sivua, 32 kuvaa ja 12 taulukkoa

Tarkastaja: Professori Juha Varis, TkT Mikael Ollikainen

Hakusanat: Kunnossapito, ehkäisevä kunnossapito, ennakoiva kunnossapito, tiedonkeruu, tiedonkerääjä, vianhaku, painesuodatin

Teollisuuden laitteiden käytettävyys ja ennalta suunniteltu huoltotoiminta ovat avainasemassa nykyaikaisen tehtaan kunnossapidossa. Korjaavasta kunnossapidosta on haluttu siirtyä ennakoivaan toimintaan. Ennakoivaan kunnossapitoon panostamalla on mahdollista välttää laitteiden vikaantumisten aiheuttamia häiriöitä tuotantoon, joiden kustannus voi olla moninkertainen verrattuna hyvin suunnitellun ja toteutetun kunnossapidon ja kunnonvalvonnan kustannuksiin.

Tässä työssä perehdytään ennakoivan kunnossapidon menetelmiin ja -työkaluihin, jotka voisivat sopia Larox painesuodattimen kunnonvalvontaan. Painesuodattimen toiminnan erityispiireet, kuten vaihtelevalla kuormituksella ja vain ajoittain hitaasti pyörivät laakerit ja toiminnan aikana vaikea luokse päästävyys, rajoittavat sopivien kunnonvalvonnan menetelmiä. Oman haasteensa kunnonvalvonnalle aiheuttaa myös tosiasia, että Larox huoltopalvelut osallistuvat asiakkaan painesuodattimen kunnossapitoon vain ajoittain ja koska asiakkaat sijaitsevat ympäri maailman, matkustus tapahtuu useimmiten lentäen. Potentiaalisia ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmiä ja -työkaluja on kuitenkin olemassa, mutta niitä ei ole toistaiseksi liiemmin testattu tai hyödynnetty Laroxin huoltopalveluissa.

Työssä valitaan ensin painesuodattimen kunnonvalvontaan sopivat menetelmät ja kartoitetaan niihin työkalut, jonka jälkeen tehdään suunnitelma työkalujen testaukseen. Lopuksi suositellaan jatkotoimenpiteet ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmien käyttöönottoon Larox huoltopalveluiden henkilöstön koulutustarpeet huomioiden.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Antti Rastas

DIAGNOSTIC TOOLS IN LAROX PRESSURE FILTER CONDITION MONITORING

Master's thesis

2004

107 pages, 32 figures and 12 tables

Examiners: Professor Juha Varis, D.Sc. (Tech.) Mikael Ollikainen

Keywords: Maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance, data logging, data acquisition, data logger, diagnostics, trouble shooting, pressure filter

Industrial equipment availability and predictive maintenance activities are key to maintaining a modern plant. There is a desire to move from corrective maintenance to proactive activities. By investing in preventive maintenance, it is possible to avoid disruptions to production caused by equipment failures, which can cost up to several times the cost of well planned and executed maintenance and monitoring.

This work introduces methods and tools for preventive maintenance that could be appropriate for Larox pressure filter condition monitoring. Special features of pressure filter operation, such as occasionally slow-rotating bearings with variable load and difficult access during operation, limit the options of suitable condition monitoring methods. The fact that Larox after sales service is only occasionally involved in maintaining the customer's pressure filter and in global services travelling usually needs flying also poses its own challenge to condition monitoring. However potential preventive condition monitoring methods and diagnostic tools exist but have so far not been tested or utilized by Larox after sales service.

In this thesis appropriate methods for monitoring the condition of the pressure filter are first evaluated and then proper tools selected. After that plan for testing the tools is made. Finally further steps are recommended for the introduction of preventive condition monitoring methods taking into account the training needs of Larox maintenance personnel.

ALKUSANAT

Nyt on vuosi 2019. Pääsin sisälle Lappeenrannan teknilliseen korkeakouluun vuonna 1995 ja aloitin armeijan jälkeen opiskelut tammikuussa 1997, siitä on jo hieman aikaa. Edellä mainitusta vuosiluvusta voi päätellä, että opinnot eivät ole olleet tärkeysjärjestyksessä numero yksi vuosien varrella, mutta halu valmistumiseen jonain päivänä on säilynyt. Tämä diplomityö valmistui pääpiirteissään jo vuonna 2004 ja jäi odottamaan muiden opintojen loppuun saattamista. Loppuun saattaminen ja matkan varrella mukaan tullun kandidityön tekeminen on kestänyt melko pitkään, mutta parempi myöhään kuin ei milloinkaan. Kesken olevat opinnot ovat painaneet mieltä vuosien varrella, joten tämä on suuri hetki minulle!

Kiitokset vaimolleni Minnalle, joka on parhaansa mukaan yrittänyt kannustaa projektin loppuun saattamisessa. Erityiskiitokset yliopistolle Juha Varikselle, Mikael Ollikaiselle ja Harri Eskeliselle erittäin hyvästä tuesta, liikkeelle potkimisesta ja uskosta valmistumisen mahdollisuuteen. Minulla tuo usko jo hiipui loppumetreillä, mutta te palautitte sen ja teitte tästä mahdollista! Suuret kiitokset myös LUT tukipalveluille, nyt on vähän kiire saada kaikki valmiiksi vuoden loppuun mennessä, mutta teistä se ei ainakaan jää kiinni. Aivan mahtavaa, avuliasta ja nopeaa toimintaa!

Antti Rastas

Lappeenrannassa 30.11.2019

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1.1	Tutkimusongelma	8
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	8
1.3	Tutkimuksen rajaus.....	9
1.4	Larox painesuodattimen toiminta	9
1.4.1	Painesuodatuksen periaate.....	10
1.5	Ennakoivan kunnossapidon piiriin soveltuvia kohteita Larox painesuodattimissa 12	
1.5.1	Vierintälaakerit	13
1.5.2	Oikosulkumoottorit	14
1.5.3	Hydraulimoottorit ja –pumput	14
1.5.4	Hydraulisylinterit	15
1.5.5	Prosessiventtiilit ja putkistot.....	15
1.5.6	Suodatinlevyt	15
1.5.7	Kangas	17
1.5.8	Teräsrakenteet.....	17
1.5.9	Voiteluaineet.....	18
2.1	Aistihavaintoihin perustuvat menetelmät.....	19
2.1.1	Värähtelyn havainnointi kuulon, tuntoaistin ja kellon avulla.....	19
2.2	Hyötysuhdemittaukset.....	21
2.3	Värähtelymittaukset	21
2.3.1	Tunnuslukuvalvonta.....	22
2.3.2	Aikatasovalvonta.....	23
2.3.3	Spektrianalyysi.....	25
2.3.4	Verhokäyräanalyysi	28
2.3.5	Iskusysäysmenetelmä ja LR/HR-tekniikka	30
2.4	Akustinen emissio	33

2.5	Lämpötilamittaukset	37
2.5.1	Kosketukseton lämpötilan mittaus.....	37
2.5.2	Lämpökameratekniikka.....	38
2.6	Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvonnan mittaukset	41
2.6.1	Akselijännite- ja virtamittaukset.....	42
2.6.2	Magneettivuomittaukset.....	43
2.6.3	Staattorivirran spektrin mittaus.....	44
2.6.4	Liitinjännitteen mittaukset.....	45
2.6.5	Sähköverkon jännitteen laadun ja häiriöiden mittaus	46
2.7	Öljyanalyysit.....	47
2.7.1	Lämpötilan mittaus ja silmämääräinen tarkastelu	47
2.7.2	Vesipitoisuuden määrittely	47
2.7.3	Partikkelilaskenta	49
2.7.4	Öljyn neutraloitumisluku, TAN/TBN	50
2.7.5	Viskositeetti.....	51
2.7.6	Spektrometriset kulumametallien ja lisäaineiden mittaukset	51
2.8	Teräsrakenteiden kunnonvalvonta NDT –menetelmillä	52
2.8.1	Silmämääräinen tarkastus.....	52
2.8.2	Magneettijauhetarkastus.....	53
2.8.3	Tunkeumanestetarkastus	53
2.9	Ultraäänitekniikka.....	54
2.9.1	Ultraäänitekniikka NDT-tarkastuksissa	54
2.9.2	Ultraäänitekniikka vuotojen etsinnässä.....	55
3.1	Aistihavainnoinnin apuvälineet	57
3.1.1	Endoskoopit.....	58
3.1.2	Elektroniset stetoskoopit	60
3.1.3	Ultraäänimittalaitteet.....	61
3.2	Värähtelymittauksissa käytettävät laitteet.....	61
3.3	Värähtelymittausten anturointi	63
3.3.1	Kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa käytettävät anturityypit	63
3.3.2	Mittauspaikan valinta	65
3.3.3	Anturin kiinnitys	66

3.4	Kannettavat tiedonkerääjät	68
3.5	Puolikiinteät järjestelmät.....	69
3.6	Kiinteät automaattiset järjestelmät.....	69
3.7	Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvonnan laitteistot	69
3.8	Lämpötilan mittauslaitteet.....	70
3.8.1	Kannettavat infrapunalämpömittarit	70
3.8.2	Lämpökamerat	70
3.9	NDT-menetelmien laitteistot	71
3.10	Voiteluaineiden analysoinnin työkalut.....	71
3.10.1	Öljyn kunnonvalvonnan kenttäanalysaattorit	72
4.1	Valvottavien kohteiden kriittisyyden tarkastelu	75
4.2	Kunnonvalvonnan menetelmien vertailu ja valinta	77
5.1	Kannettavien dataloggereiden vertailu.....	80
5.1.1	Värähtelymittausantureiden ja niiden kiinnitysmenetelmien vertailu.....	82
5.2	Lämpötilanmittauslaitteiden vertailu	84
5.3	Akustisten mittalaitteiden vertailu	86
6.1	Dataloggerin ja oheislaitteiden valinta.....	89
6.2	Lämpötilanmittauslaitteiden valinta.....	90
6.3	Akustisten mittalaitteiden valinta	91
7.1	SPM-värähtelymittauksen testaussuunnitelma	93
7.2	Lämpökameran testaussuunnitelma	96
7.3	IR-lämpömittarin testaussuunnitelma	97
7.4	Ultraäänimittarin testaussuunnitelma.....	99
7.5	Elektronisen stetoskoopin testaussuunnitelma	100
8.1	Tulosten luotettavuuden tarkastelu	102

LÄHTEET

1. JOHDANTO

Teollisuuden laitteiden käytettävyys on prosessien kehittymisen myötä tullut yhä tärkeämmäksi ja korjaavasta kunnossapidosta on monilla teollisuuden aloilla siirrytty ennakoivaan ja siitä edelleen parantavaan kunnossapitoon. Perinteinen vikaantumisista aiheutuva korjaava kunnossapito aiheuttaa lähes poikkeuksetta suurimmat menetykset ja kustannukset, joten tutkimus- ja kehitystyö aiheen ympärillä on ollut viime vuosina vilkasta. Kehitystyön ansiosta on nykyään tarjolla suuri valikoima erilaisia ennakoivan kunnossapidon työkaluja yksittäisistä mittalaitteista täysin automaattisiin tiedonkeruujärjestelmiin.

1.1 Tutkimusongelma

Larox Servicen myymät huoltopalvelut painesuodatinasiakkailleen keskittyvät pääasiassa korjaavaan kunnossapitoon ja määräaikaishuoltoihin, ennakoivan kunnossapidon diagnostiikka menetelmien ja työkaluineen on Laroxilla suhteellisen tuntematon alue. Diagnostisten työkalujen käytön mahdollisuuksia Larox painesuodattimien kunnossapidossa ei ole laajemmin tutkittu ja diagnostiikan hyödyntäminen Laroxin huoltopalveluissa on vähäistä ja vaihtelee alueittain.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämä tutkimus on osa Larox Servicen tavoitetta kehittää huoltopalveluitaan. Pitkän aikavälin tavoitteena on luoda kattava valikoima palvelutuotteita Larox suodattimien ja niiden oheislaitteiden kunnossapitämiseen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on valita olemassa olevista ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmistä vaadittavien ominaisuuksien ja keskinäisen vertailun perusteella Larox Oyj:n tarpeisiin soveltuvat menetelmät niihin soveltuvine työkaluineen. Tutkimuksessa pyritään myös luomaan suunnitelma valittujen työkalujen kenttätestaukselle.

1.3 Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksessa keskitytään Larox painesuodattimien ennakoivaan kunnonvalvontaan soveltuviin työkaluihin jättäen ulkopuolelle joidenkin toimitukseen tapauskohtaisesti kuuluvien oheislaitteiden, kuten kuljettimien ja kompressoreiden, kunnonvalvonnan tutkimus. Ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmistä tarkempaan tutkimukseen otetaan potentiaaliset menetelmät työkaluineen. Huomiotta jätetään kunnonvalvonnan menetelmät, joita ei painesuodattimen ominaispiirteiden vuoksi ole järkevää ottaa tarkasteluun.

Larox painesuodattimien kunnonvalvonta tapahtuu lähes poikkeuksetta asiakkaan tiloissa eri puolilla maapalloa Larox asiakastukihenkilön toimesta. Näin ollen tutkimuksen pääpaino on ennakoivan kunnonvalvonnan kannettavissa mittalaitteissa painottaen vielä työkalujen pientä fyysistä kokoa. Edellä mainituista syistä nopeasti, päivän tai kahden aikana, suoritettavat mittaukset ovat etusijalla mittausmenetelmien valinnassa ja keskinäisessä vertailussa.

1.4 Larox painesuodattimen toiminta

Larox painesuodattimessa suodatinlevyt ovat päällekkäin ylä- ja alapainelevyn välissä. Levypakka on suljettuna suodatusvaiheen aikana ja suodatuksen aikana muodostunut kuiva ”kakku” poistetaan levypakan ollessa auki. Levypakkaa liikutellaan hydraulisyntereiden avulla.

Kangas kulkee suodatinlevyjen välissä telojen ohjaamana ja suodatettu kakku muodostuu kankaan jommalle kummalle puolelle. Kankaan tehtävä on suodatuksen lisäksi kuljettaa kakku ulos levypakasta. Kakun purkuvaiheen aikana kangas pestään korkeapaineisella vesisuihkulla. Kangasta ajetaan hydraulimoottoreiden ajamalla teloilla ja kankaan sopivasta tiukkuudesta vastaa kankaan kiristyslaite, joka toimii vain pakan ollessa auki.

Painesuodattimen automaatiotoimintoja ohjataan ohjauskeskuksen kautta. Toimintojen ohjaus tapahtuu kosketusnäytön ja painonappien avulla (Larox Oyj, 2003).

1.4.1 Painesuodatuksen periaate

Suodatusjaksossa levypakka on suljettuna ja liete pumpataan tasaisesti kuhunkin suodoskammioon syöttöputkien kautta. Suodos virtaa kankaan läpi suodoksen keräilyalueelle ja siitä edelleen poistoputkeen. Lietteessä oleva kiintoaine kerääntyy kankaan pinnalle ja muodostaa prosessitermillä ilmaistuna kakun (filter cake).

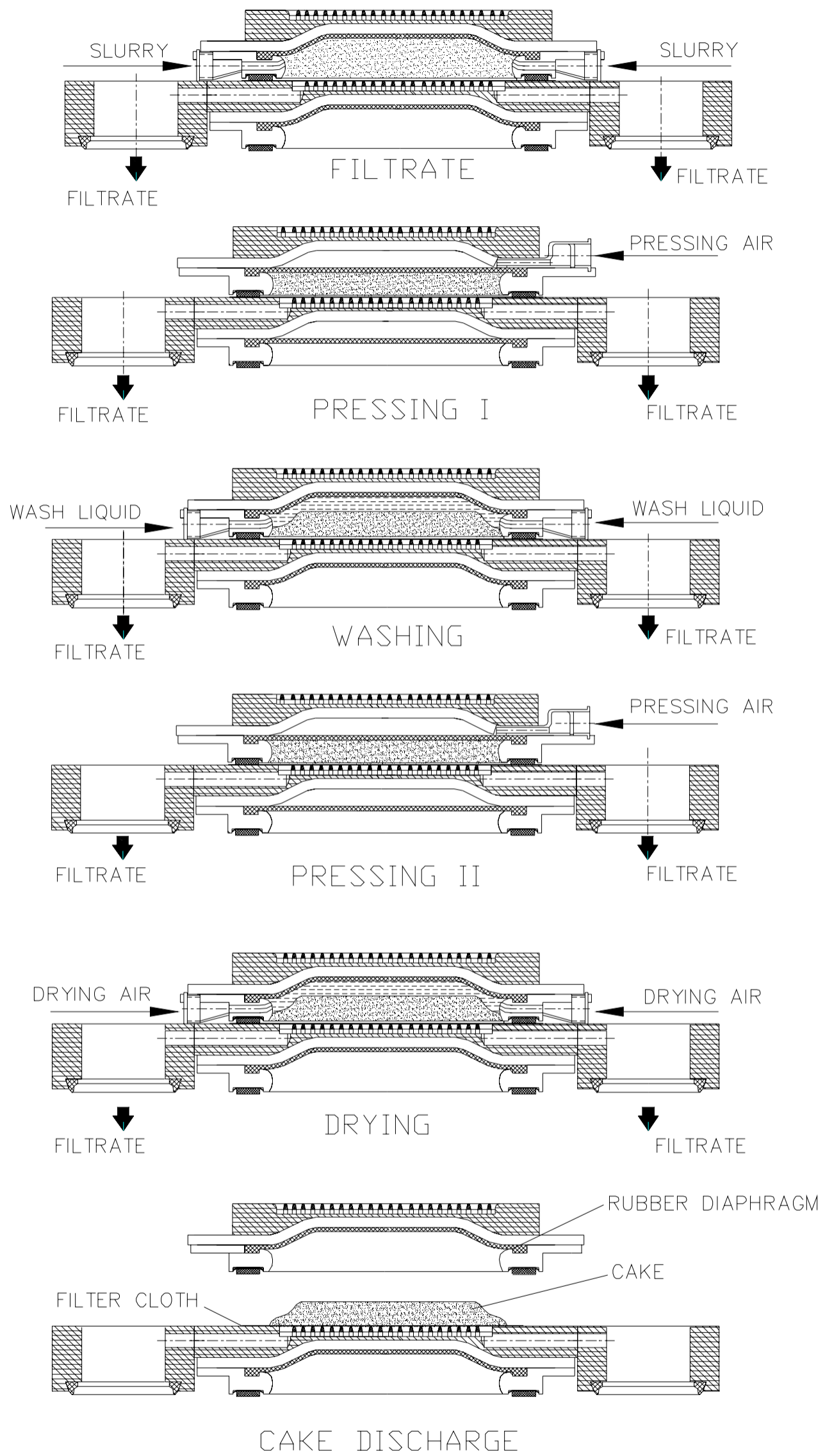
Ensimmäisessä puristusjaksossa paineistettu ilma tai vesi johdetaan kumisen kalvon taakse. Kalvo painaa kakkua kangasta vasten puristaen kakusta suodosta kankaan läpi.

Jos suodattimessa on lisävarusteena pesutoiminto, seuraavaksi pesuliuos pumpataan suodoskammioihin samaan tapaan kuin liete. Kun vesi täyttää suodoskammiot, kalvo nousee ylös ja ilma (tai vesi) pakotetaan pois kalvon yläpuolelta. Pesuliuos virtaa kakun ja kankaan läpi poistoputkiin.

Toinen puristusjakso on myös optiona saatava toiminto, jossa kammioihin jäänyt pesuliuos puristetaan ulos kakusta ensimmäisen puristusjakson tapaan.

Kakun lopullinen kuivaus haluttuun kosteusarvoon tehdään paineistetulla ilmalla. Ilma kulkee syöttöputkien kautta suodoskammioihin ja nostaa kalvot ylöspäin, jolloin kalvon toisella puolella oleva ilma (tai vesi) poistuu levypakasta. Ilma kulkee kakun läpi pienentäen kosteusprosenttia ja samalla suodoskammio tyhjenee.

Ilmakuivauksen jälkeen levypakka avataan ja kangas lähtee liikkeelle, jolloin kakku purkautuu suodattimen molemmista päädyistä jatkaen matkaansa prosessin seuraavaan vaiheeseen (Larox Oyj, 2003).

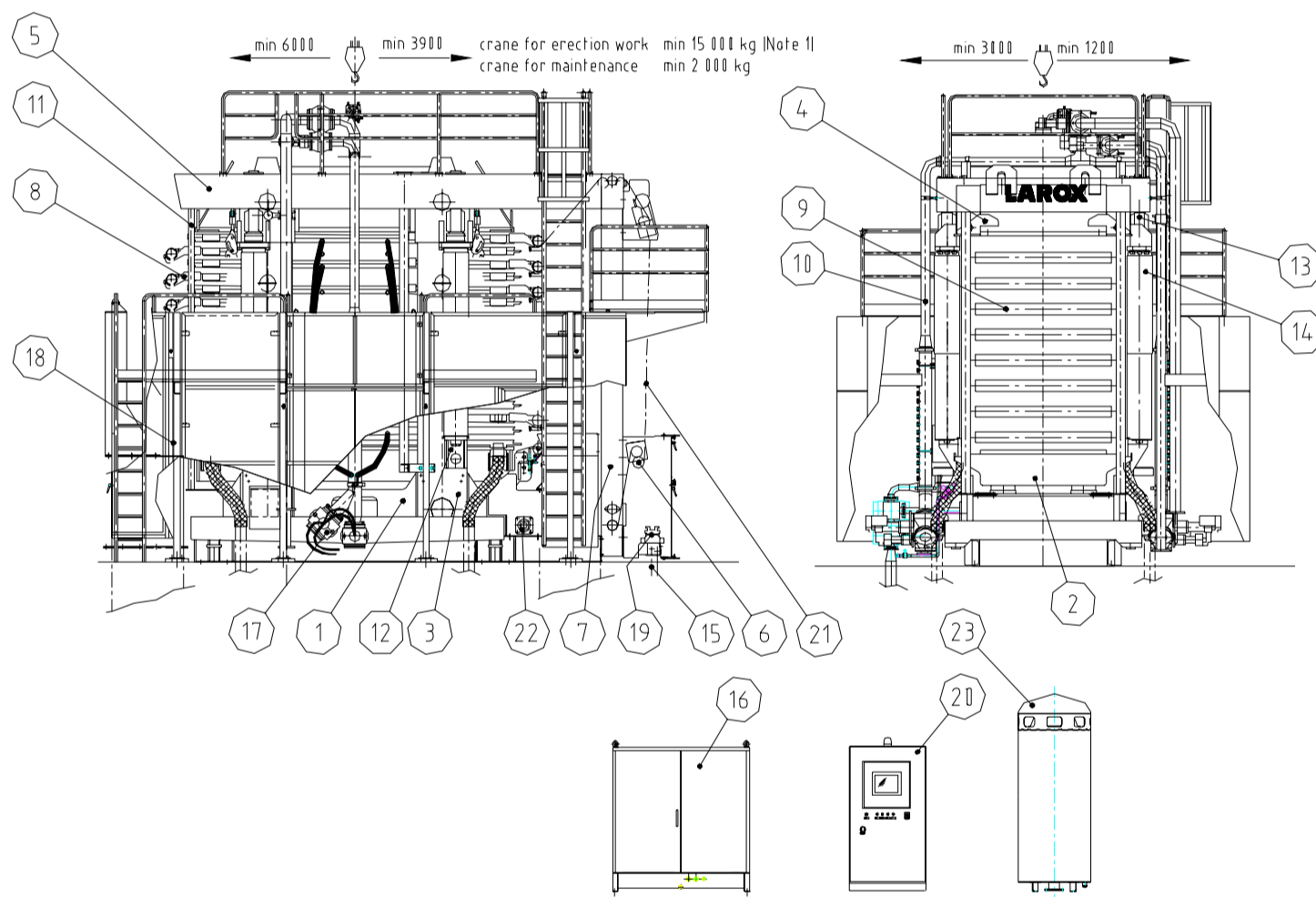


1-60E

Kuva 1. Suodatinlevyn toimintaperiaate (Larox Oyj, 2003)

1.5 Ennakoivan kunnossapidon piiriin soveltuvia kohteita Larox painesuodattimissa

Voidaan sanoa, että miltei jokainen Larox painesuodattimen osa voidaan sisällyttää ennakoivan kunnossapidon piiriin, jos ei muuten niin aistihavaintojen avulla. On kuitenkin mielekkäämpää tarkastella kokonaisuuksia keskittyen kustannusten kannalta merkittäviin vaurioriskialueisiin, kuin etsiä sopivaa menetelmää kaikille painesuodattimen osakokonaisuuksille. Kuvassa 2 on esitetty Larox painesuodattimen pääosat, joiden alueella ennakoivaa kunnonvalvontaa on aikomus toteuttaa. Tässä kappaleessa eritellään tutkimukseen mukaan otettavia osa-alueita ja niiden erityisesti kunnonvalvonnan kannalta merkittäviä ominaisuuksia.

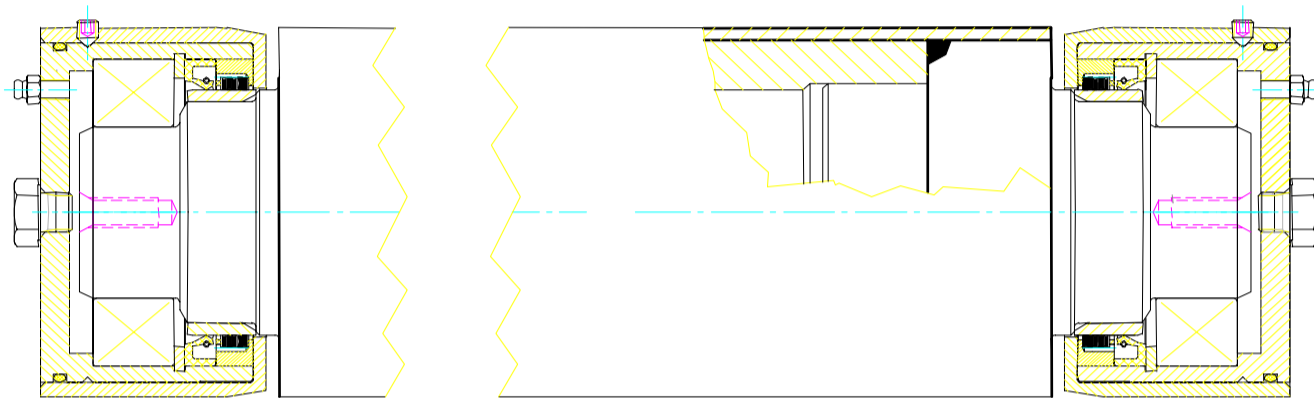


1	Alusta ja altaat	11	Johteet
2	Alapainelevy	12	Pikaliikesylinterit
3	Pilarit	13	Kakkukouru
4	Yläpainelevy	14	Kangas
5	Ylärunko	15	Sivusuojat
6	Kankaan kuljetuslaite	16	Hydrauliyksikkö
7	Kankaan kiristyslaite	17	Venttiilit
8	Levypakka	18	Huoltotasot
9	Telat	19	Hydrauliputkisto
10	Prosessiputkisto	20	Ohjauskeskus
		23	Äänenvaimennin (optio)

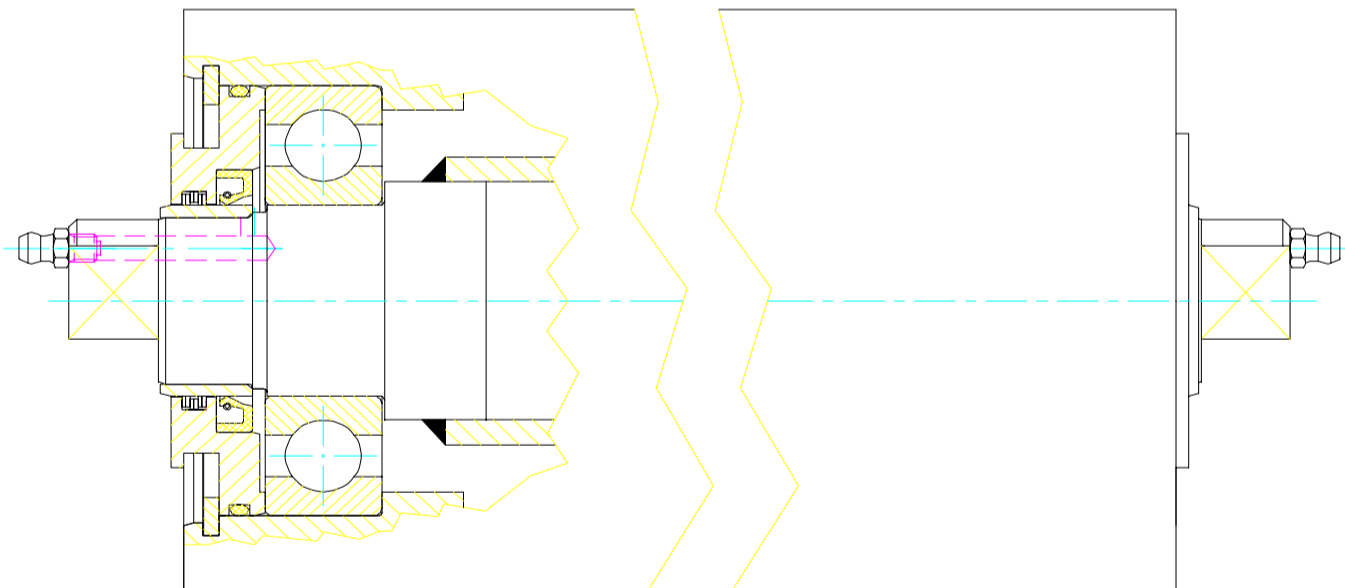
Kuva 2. Larox painesuodattimen pääosat (Larox Oyj, 2003)

1.5.1 Vierintälaakerit

Larox painesuodattimien vierintälaakereista suurin osa sijaitsee taittotelissa, joita käytetään suodatuskankaan ohjaamiseen ja kuljettamiseen. Telojen laakerointi on toteutettu pääasiassa käyttäen rasvalla voideltuja pallomaisia kuula- tai rullalaakereita halkaisijoiltaan välillä 90 – 130 mm. Kuvissa 3 ja 4 esitellään Larox painesuodattimen taittotelan laakeroinnin kaksi erilaista ratkaisua.



Kuva 3. PF 60 –sarjan painesuodattimen taittotelan laakerointi (Larox Oyj, 2003)



Kuva 4. PF 12 –sarjan painesuodattimen taittotelan laakerointi (Larox Oyj, 2003)

Telojen laakereiden pyörimisnopeudet ovat yleensä välillä 25 – 50 r/min. Telan pyörimissuunta suodatusjakson aikana on aina sama ja jatkuvalla kankaalla varustetuissa malleissa PF 12, PF 15 ja PF 60 teloja ei pyöritetä toiseen suuntaan lainkaan. PF 1.6 ja PF 30 suodatinmalleissa, joissa kangas kulkee yläkelaustelalta alakelaustelalle, teloja pyöritetään muutaman suodatusjakson välein toiseen suuntaan kankaan takaisin kelauksen yhteydessä. Laakerit pyörivät vain osan suodatusjakson kokonaisajasta ja laakereiden

kuormitus vaihtelee pyörimisen aikana. Suurin kuorma tulee suodoskakun purkuvaiheessa heti telojen pyörimisen alettua, jonka jälkeen pyöriminen jatkuu kankaanpesun ajan vailla ulkopuolista kuormaa kangasvoimia lukuunottamatta. Taittelalle tuleva kangas on yhdensuuntainen telalta lähtevän kankaan kanssa, joten telaan kohdistuva kokonaisvoima on $2 * \text{kangasvoima}$. Enimmillään telaan kankaasta kohdistuva voima on luokkaa 60 kN, eli 30 kN laakeria kohden. Suodattimen usein likainen toimintaympäristö ja telojen jaksottainen käynti vaihtelevine kuormituksineen ja alhaisine pyörimisnopeuksineen vaatii laakeroinnilta paljon ja toisaalta myös rajoittaa soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien määrää (Larox Oyj, 2003).

1.5.2 Oikosulkumoottorit

Sähkömoottorit Larox painesuodattimissa ovat pääasiassa oikosulkumoottoreita ja niitä käytetään tavallisimmin hydrauliyksikön ja puristusvesiaseman pumppujen voimanlähteenä. Sähkömekaanisissa painesuodattimissa oikosulkumoottoreita käytetään myös sulkulaitteen ja kankaan vedon voimanlähteenä. Moottoreiden toiminta on jaksottaista ja kuormitus vaihtelee. Tutkimuksessa tarkasteltujen oikosulkumoottoreiden tehot ovat välillä 4 – 110 kW ja kierrosluvut enimmillään 3000 rpm.

1.5.3 Hydraulimoottorit ja -pumput

Larox painesuodattimissa kankaan kuljetus on toteutettu hydraulimoottorein. Hydraulimoottoreita käytetään kankaankuljetusyksikössä kankaan vetomoottoreina, suodatuslevyjen teloissa kankaan apuvetomoottoreina, sekä kankaan kiristyslaitteen voimanlähteenä. Moottorit ovat tyypiltään vakio-tilavuuksisia geroottorimoottoreita. Moottoreiden toiminta on jaksottaista ja kuormitus vaihtelee suodattimen toimintajakson mukaan.

Hydrauliyksikön pumppu vastaa koko painesuodattimen hydrauliiikan paineentuotosta. Pumppuina käytetään säätötilavuuksisia aksiaalimäntäpumppuja. Hydraulipumpun tuottama paine on enimmillään 280 bar ja tilavuusvirta 350 l/min. Koko hydraulijärjestelmän sisällä paineet nousevat enimmillään 350 baariin.

Hydraulimoottoreiden ja -pumppujen vauriot aiheutuvat tyypillisimmin vieraista partikkeleista tai öljyn sekaan joutuneesta vedestä. Kavitaation aiheuttamat vauriot ovat melko harvinaisia.

1.5.4 Hydraulisyylinterit

Larox painesuodattimessa hydraulisyylinterit ovat merkittävä osa suodattimen toimintaa. Suurimmat sylinterit ovat kaksipuolisella männänvarrella varustetut pikaliikesyylinterit, joiden männänhalkaisija on suurimmillaan 250 mm ja liikepituus yli 1600 mm. Levypakan tiivistykseen käytetään differentiaalisylintereitä, joiden liikepituus on noin 100 mm ja männänhalkaisija enimmillään 250 mm. Sylintereiden kuormitus on suurimmillaan luokkaa 900 kN.

Hydraulisyylintereiden tavallisia vikoja ovat ulkoiset ja sisäiset vuodot, sekä männänvarren pinnoitteen vauriot. Sylinterin sisäinen vuoto on usein melko vaikeasti jäljitettävä syy toimintahäiriöön ja Larox painesuodattimien hydraulijärjestelmän laajuus vielä lisää vianetsinnän haastavuutta.

1.5.5 Prosessiventtiilit ja putkistot

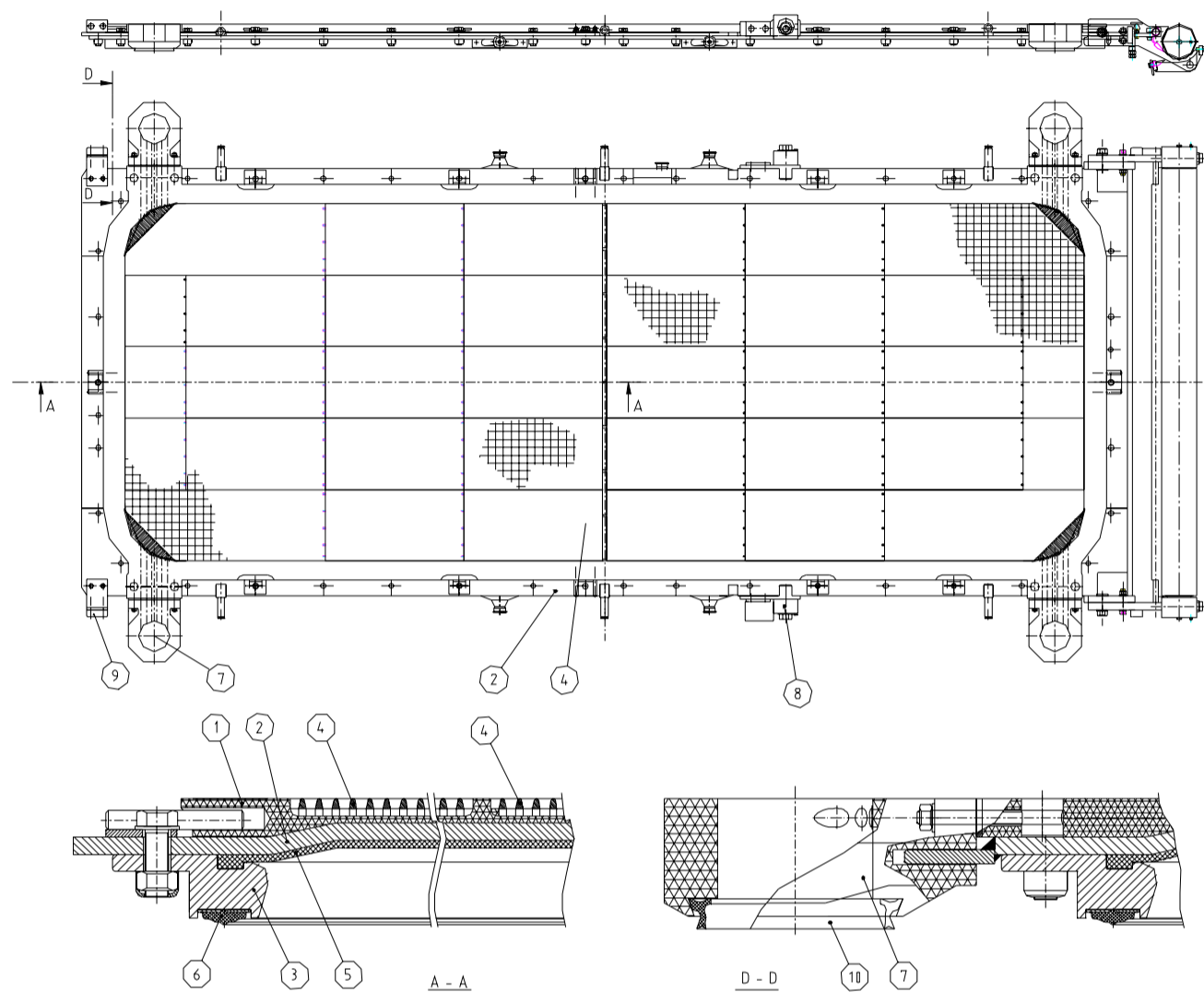
Prosessiventtiileinä Larox painesuodattimissa käytetään pääasiassa letkuventtiileitä, joiden koot ovat suurimmillaan luokkaa DN250. Myös muita venttiilityyppejä, kuten palloventtiileitä on käytetty joissain tapauksissa. Prosessiventtiilien tulee kestää suuria voimia tilanteessa, jossa suuri määrä putkessa virtaavaa lietettä pysäytetään äkillisesti venttiili sulkemalla, mikä aiheuttaa suuria rasituksia etenkin venttiilien letkuihin ja letkua puristaviin leukoihin. Tavallisimmat vauriot letkuventtiileissä ovatkin letkurikkoja ja kiinnitysleukojen vääntymisiä.

Painesuodattimen prosessiputkistot ovat yleisimmin terästä AISI 316, mutta myös muita teräksiä käytetään prosessin vaatimusten mukaan. Putkistolta vaadittava kulutuksen- ja korroosion kesto vaihtelee huomattavasti riippuen prosessista ja siinä käytetyistä aineista. Korroosion lisäksi valvottavia asioita prosessiputkistoissa ovat erityisesti lieteseulat, joiden vahingoittuminen voi johtaa liian suurien partikkeleiden pääsyyn suodatusprosessiin ja aiheuttaa esimerkiksi kalvovaurioita suodatinlevyissä.

1.5.6 Suodatinlevyt

Suodatinlevyn kolme pääosaa ovat suodoskammio, pohjalevy ja kehys. Kuvassa 5 esiintyvät edellisten lisäksi suodatinlevyn muut osat, kuten kalvo, tiivisteet ja ritilät. Pohjalevyn ja

kehysten materiaaleina käytetään yleisimmin terästä. Kalvot ja tiivisteet ovat kumia ja suodosallas, ritilät, sekä kollektorit muovia.



- | | |
|----|---------------------------|
| 1 | Suodosallas |
| 2 | Pohjalevy |
| 3 | Kehys |
| 4 | Ritilä |
| 5 | Kalvo |
| 6 | Tiiviste |
| 7 | Kollektori |
| 8 | Liukupalan pitkittäistuki |
| 9 | Liukupalan poikittaistuki |
| 10 | Kollektorin tiiviste |

Kuva 5. Larox Power PF painesuodattimen suodatinlevy pääosineen (Larox Oyj, 2003) Todennäköisimmät vauriokohteet suodatinlevyissä ovat koko levyn vääntymisen, kehysten syöttöyhteiden kulumisen, kalvon reikiintymisen, sekä altaan ja ritilöiden muodonmuutokset. Levyn vääntymisen on yleensä seurausta muualla olevasta viasta tai käyttövirheestä ja taipuman määrästä riippuen siitä aiheutuu usein myös tiivistysongelmia. Syöttöyhteiden kulumat johtuvat paljolti suodatettavan lietteen laadusta ja sitä voidaan vähentää esimerkiksi yhteiden muotoilulla ja käyttämällä vaihdettavia holkkeja kulumiselle herkissä kohteissa. Ritilöiden ja altaiden muodonmuutokset aiheutuvat yleisimmin korkeista

prosessin lämpötiloista, joten ehkäisevänä toimenpiteenä on lähinnä oikea materiaalin valinta prosessia ajatellen.

1.5.7 Kangas

Larox painesuodattimen suodatustapahtuma perustuu siihen, että kangasta vasten puristetaan kovalla paineella suodatettavaa lietettä, jolloin neste menee kankaan läpi ja kiintoaine jää kankaan päälle. Kankaan kudostyyppi ja rakenne vaihtelee vaatimusten mukaan harvasta erittäin tiheään ja yksikerroksisesta monikerroksiseen. Suodatinkankaat on valmistettu polyesteristä tai polypropyleenistä. Erikoistapauksissa on käytetty myös muita materiaaleja, kuten huopaa.

Kangas joutuu usein koville suodatusprosessin aikana suodatettavasta lietteestä ja lämpötilasta riippuen, mutta useimmiten repeämät ja reiät ovat kuitenkin seurausta muualla suodattimessa esiintyvistä vauriosta tai viallisesta toiminnasta. Yleensä vauriot kankaassa ovat syntyneet jonkin osan hankauksesta kangasta vasten.

Kankaan tukkeutumista voidaan vähentää valitsemalla prosessiin sopiva kangastyyppi, mutta joissain prosesseissa kankaat tukkeutuvat siitä huolimatta aika-ajoin.

1.5.8 Teräsrakenteet

Larox painesuodatin on melko massiivinen laite enimmillään yli 100 tonnin painollaan. Rakenteet ovat miltei yksinomaan terästä, keveämpiä materiaaleja kuten alumiinia ja komposiitteja ei suodattimen käyttötarkoituksella huomioon ottaen ole katsottu tarpeelliseksi hyödyntää. Asiakas voi vaikuttaa käytettyihin materiaaleihin, joten syövyttävissä olosuhteissa päädytään usein ruostumattoman tai haponkestävän teräksen käyttöön. Kalliimmat materiaalit vaikuttavat tietysti merkittävästi suodattimen hintaan, joten usein asiakas päätyy kompromissiin kestävyys ja hinnan välillä.

Massiivisin osa suodattimessa on itse levypakka, jossa levyjen teräsrakenteet joutuvat suoraan alttiiksi lietteelle ja mahdollisille pesu- ja liuotusaineille. Levyissä käytetyt materiaalit ovatkin usein tarkimmin harkitut. Levypakan ylä- ja alapuolella olevat painelevyt ovat raskaita, sokkeloisia teräsrakenteita, jotka on lähes poikkeuksetta tehty ”mustasta”

teräksestä ja maalattu. Tavallisin ongelma teräsrakenteiden kohdalla on korroosio, joka on tosin poistettavissa tai ainakin vähennettävissä oikeilla materiaalivalinnoilla ja säännöllisellä huollolla. Kuormituksesta syntyneet vauriot ovat harvinaisempia, mutta niitäkin tulee aika ajoin erityisesti virheellisen käytön tai toimintahäiriöiden seurauksena.

1.5.9 Voiteluaineet

Voiteluaineina käytetään erityyppisiä rasvoja ja öljyjä. Esimerkiksi telojen laakerointia voidellaan rasvalla. Öljyä käytetään pääasiassa vain hydraulijärjestelmän yhteydessä. Laakerointien rasvauksessa ei tavallisesti käytetä automatiikkaa, vaan rasvan lisäys tapahtuu telan päässä olevasta nipasta. Voiteluaineet hankitaan usein asiakkaan toimesta, joten Larox on antanut ainoastaan suositukset sopivista laaduista. Telojen laakereiden rasvaukseen käytetään tällä hetkellä rasvaa Gleitmo WSP5000 (tai sitä vastaavaa).

Voiteluaineiden kunnon seuranta on tällä hetkellä paljolti asiakkaan varassa, joten käytetyt menetelmät ja mielenkiinto seurantaan vaihtelevat. Ongelmat aiheutuvatkin usein riittämättömästä huollosta ja tavallisin syy voitelun puutteesta syntyneisiin vaurioihin on usein riittämätön voiteluaineen määrä, likainen voiteluaine tai voiteluaineeseen sekoittunut vesi. Hydraulijärjestelmän laajuudesta johtuen likainen ja vesipitoinen öljy voi saada aikaan laajoja vaurioita järjestelmään ja esimerkiksi puutteet levypakan laakereiden rasvauksessa aiheuttavat laakerointien ennenaikaista vaurioitumista. Näin ollen voiteluaineiden kunnon ja riittävyyden valvonta on tärkeä osa Larox painesuodattimen huoltotoimenpiteitä.

Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan hydraulijärjestelmän öljyanalyysin menetelmiin. Esimerkiksi telojen laakereissa käytetyt rasvamäärät ovat pieniä ja rasvan uusiminen on käytännössä helpompaa kuin sen analysoiminen. Laakeripesien kuluneisuutta ja vikoja ei myöskään ole mielekästä määrittää rasvaa analysoimalla, koska laakeripesän silmämääräinen tarkastus käy helpommin kuin rasvanäytteen tutkiminen.

2 KUNNONVALVONNAN MENETELMIÄ

Kunnonvalvontaan on olemassa lukemattomia menetelmiä laakereiden kuuntelusta akustiseen emissioon. Erityisesti pyörivien laitteiden kunnonvalvonnassa laitevalmistajien omat tekniikat laajentavat kirjoa entisestään. Todellisuudessa esimerkiksi useimmat laakerien kunnonvalvontaan kehitetyt laitevalmistajakohtaiset menetelmät perustuvat samoihin perustekniikoihin, värähtelyanalyysiin ja iskusysästekniikkaan. Kaikkia eri valmistajien menetelmiä ei tässä tutkimuksessa käydä läpi, vaan keskitytään yleisesti tunnettuihin ja käytettyihin perusmenetelmiin, joiden johdannaisia erikoistekniikat yleensä ovat.

2.1 Aistihavaintoihin perustuvat menetelmät

Aistihavaintoihin perustuva kunnonvalvonta tulee mitä todennäköisimmin aina säilyttämään asemansa tärkeänä menetelmänä nykytekniikan rinnalla. Näköä, kuuloa ja tuntoaistia käytetäänkin usein havaitsemaan tarpeet mittaukseen tai varmistamaan jo tehdyn mittauksen tuloksia.

Kunnonvalvonnan menetelmistä ehkä yksinkertaisin on silmämääräinen tarkastus, jonka etuja muihin aistihavainnoilla tehtäviin tarkastuksiin on tulosten tulkinnan helppous ja yksiselitteisyys. Jos jokin koneen osa on kulunut tai vaurioitunut, voidaan ongelma nähdä melko yksiselitteisesti. Kun taas tarkastusta tehdään kuulon tai tuntoaistin avulla, kasvaa henkilökohtaisen tulkinnan erojen vaikutus huomattavasti. Kokematonkin tarkastaja huomaa, jos koneen osassa on havaittava särö tai kuluma, mutta saman havaitseminen osan aiheuttaman äänen tai värähtelyn avulla vaatii jo enemmän harjaantumista.

2.1.1 *Värähtelyn havainnointi kuulon, tuntoaistin ja kellon avulla*

Jo kauan ennen erilaisten värähtelymittausinstrumenttien markkinoille tuloa ollaan värähtelyanalyysit tehty kuulo- ja tuntoaistia käyttäen. Näitä menetelmiä käytetään vieläkin erityisesti tapauksissa, joissa uudempaa mittaustekniikkaa ei ole mahdollista hankkia tai käyttää. Esimerkiksi ihmiskorvat ovat hämmästyttävän herkäät pienillekin paineen vaihteluille ja ihon tuntoaisti havaitsee jatkuvan paineen, paineen vaihtelut, sekä värähtelyn.

Todellisuudessa havaitsemme yleensä epätavallisen värähtelyn vasta vaurion tapahduttua. Suurin ongelma aistihavainnoilla suoritettavassa värähtelyn arvioinnissa on juuri se, että värähtelyn suuruus ja vakavuus on aina yksittäisestä ihmisestä riippuva arvio, ei tarkka mittaustulos. Ongelmia aiheuttaa erityisesti se, että pitkällä aikavälillä suoritettavissa tarkastuksissa ei tarkastajalla todennäköisesti ole selvää muistikuvaa edellisestä värähtelyn havainnointikerrasta. Ja toisaalta, jos seuraavalla kerralla tarkastuksen tekee eri henkilö, ei hänellä ole mitään vertailukohtaa siitä, millaiselta koneen pitäisi tuntua ja kuulostaa. Ihmiset ovat lisäksi yksilöitä ja toisen havaitsema korkea värähtelytaso voi tuntua toisesta täysin hyväksyttävältä.

Näin ollen värähtelyn määrittäminen aistihavainnoilla on järkevää vain silloin, kun tietyn kohteen arvioi aina sama henkilö mieluiten päivittäin ja lähistöllä on referenssiksi soveltuvia identtisiä kohteita. Taustamelun ja värähtelyn taso tulisi myös olla alhainen. Tällä menettelyllä voidaan aistihavainnointikin ”kalibroida” tyydyttävästi. Tässäkin tapauksessa tulee muistaa, että pelkällä ”aistien kalibroinnilla” ei voi erityisen menetyksekkäästi havaita vikojen ensimmäisiä tunnusmerkkejä, vaan tähän tarvitaan taajuusanalyysiä. Tämä ei kuitenkaan välttämättä nouse esteeksi aistihavainnoinnin hyödyntämisessä, sillä ihminen on varustettu taajuusanalysoijalla.

Ihmisen korvien ja aivojen yhdistelmä on suhteellisen hyvä spektrianalysoijaksi, vieläpä erittäin herkkä sellainen. Keski-ikäinen ihminen kuulee noin 40 Hz kaistanleveydellä ja kuuloalue on 20 – 20000 Hz, eli ihmisen korva on herkkä ilman värähtelyille tällä alueella. Samaan taajuusalueeseen sijoittuvat myös suurin osa koneiden ja laitteiden mekaanisista värähtelyistä, yli 10000 Hz mekaaniset värähtelyt ovat harvinaisia ja suurin osa värähtelyistä sijaitsee taajuuksilla alle 5000 Hz.

Ihmiskorvan käyttämistä taajuusanalyysiin auttaa huomattavasti, jos korva saadaan kiinni kuunneltavaan kohteeseen. Tähän käy apuvälineeksi stetoskooppi, puinen tikku tai ruuvimeisseli. Matalammilla värähtelytaajuuksilla ihon tuntoaisti on kuuloa tarkempi apuväline, joten värähtelyt taajuuksilla 30 – 60 Hz havaitsee parhaiten käden tuntoaistia käyttäen. Värähtelyille yli 100 Hz on kuulo parempi havainnointiväline ja näillä taajuuksilla

tulisi keskittyä äänensävyjen kuunteluun. Kaikki aistihavaintoihin perustuvat värähtelyn arvioinnit tulisi aloittaa kuuntelemalla ja tunnustelemalla sopivaa referenssikohdetta.

Värähtelyanalyysin muodostamiseksi on tärkeää selvittää värähtelyn taajuus ja amplitudi. Kuulo ja tuntoaisti avustettuna sekuntikellolla riittävät ainakin hitailla pyörimisnopeuksilla värähtelyn taajuuden ja amplitudin mittaamiseen. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla stroboskooppi on hyvä apuväline analyysin teossa. Usein värähtelyllä on tunnusomainen rytmensä, se voimistuu ja heikkenee tietyllä aikavälillä. Värähtelyn rytmi ja taajuus on mitattavissa sekuntikellolla ja näin on mahdollista havaita tietyn värähtelyn aiheuttaja pitemmänkin matkan päästä. Esimerkkinä voisi olla teräksinen taso, joka värähtelee samalla taajuudella kymmenien metrien päässä olevasta moottorista (Wowk, 1991, s.59).

2.2 Hyötysuhdemittaukset

Hyötysuhdemittauksilla tarkoitetaan tässä laitteiden ja prosessin toimintakyvyn selvittämiseksi suoritettavia mittauksia. Kohteina mittauksille voivat olla esimerkiksi pumput, venttiilit ja prosessikokonaisuudet. Mittauksiin kuuluu virtausmäärien, lämpötilojen ja paineiden mittaukset eri kohdissa prosessia, jolloin voidaan verrata laskennallista ja todellista koneen tai prosessin hyötysuhdetta. Käyttämällä radioaktiivisia merkkiaineita voidaan lisäksi saada selville viipymisaikajakaumia, sekoittumistehokkuuksia, virtausteknisiä vikoja ja prosessin stabiilisuutta.

Yksinkertaisimmillaan hyötysuhdemittaukset tehdään seuraamalla esimerkiksi sähkömoottorin ottamaa ampeerimäärää (Nohynek, 2003, s.27).

2.3 Värähtelymittaukset

Värähtelyä esiintyy lähes kaikissa koneissa ja laitteissa, joiden toiminnan yhteydessä on vähänkin liikettä tai läheisyydessä on muita liikkuvia ja värähteleviä koneita. Värähtelymittaukset ovatkin tavallisimpia koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnassa käytettäviä menetelmiä.

Värähtely esiintyy tavallisesti laitteen pyörimisnopeuden kerrannaisilla, mikä helpottaa olennaisesti värähtelyn lähteen paikantamista. Jos esimerkiksi tuulettimesta (2400 rpm), hihnasta (460 rpm) ja moottorista (2980 rpm) koostuva laite värähtelee voimakkaasti

taajuudella 40 Hz, värähtelyn aiheuttaja on mitä todennäköisimmin tuuletin, koska 40 Hz = 2400 1/min. Taulukossa 1 on listattu yleisimpiä värähtelytaajuuksia pyörimisnopeuden suhteen ja kyseisten värähtelyjen aiheuttajia.

Taulukko 1. Värähtelytaajuuksia ja värähtelyn aiheuttajia (Davies, 1998, s.282)

Värähtelytaajuus suhteessa kierroslukuun	Todennäköisin värähtelyn aiheuttaja	Muita todennäköisiä syitä ja huomautuksia
1 x rpm	Epätasapaino	1. Epäkeskiset laakeripesät, hammasrattaat tai hihnapyörät 2. Kohdistusvirheinen tai vääntynyt akseli 3. Vaurioitunut hihna 4. Resonanssi 5. Mäntävoimat 6. Sähköiset viat
2 x rpm	Mekaaninen löyhyys	1. Kohdistusvirhe 2. Mäntävoimat 3. Resonanssi 4. Vaurioitunut hihna
3 x rpm	Kohdistusvirhe	Yleensä syntyy kohdistusvirheen ja liiallisen aksiaalisen välyksen yhteisvaikutuksesta.
< 1 x rpm	Öljykalvon pyörteily (jos alle ½ x rpm)	1. Vaurioitunut käyttöhihna 2. Taustavärähtely 3. Aliharmoninen resonanssi 4. Iskuista aiheutuva värähtely
Synkroninen (a-c -linja värähtely)	Sähköiset viat	Yleiset sähköiset viat, kuten vialliset roottorisauvat, epäkeskinen roottori, epätasapaino vaiheiden välillä, erisuuri ilmapäli.
2 x synkroninen taajuus	Vääntöiskut	Harvinainen ellei esiinny resonanssia
Moninkertainen kierrostaajuuteen verrattuna (harmoninen)	Viallinen hammasratas Aerodynaamiset voimat Hydrauliset voimat Mekaaninen löyhyys	Hammasluku x rpm Tuuletinlavat x rpm Juoksupyörän lavat x rpm Voi esiintyä 2, 3, 4 tai useampi x rpm
Korkea taajuus (epäharmoninen)	Mäntävoimat Vierintälaakerin vika	Laakerivärähtely voi olla epävakaa 1. Kavitaatio, kierto ja virtauksen turbulenssi aiheuttavat korkeataajuisia värähtelyä 2. Liukulaakerien huono voitelu 3. Hankaus

Seuraavaksi tarkastellaan erilaisia värähtelymittauksen menetelmiä. Huomiotta jätetään menetelmät, joista voi jo ennen tarkempaa vertailua ja tutkimusta sanoa, etteivät ne sovellu Larox painesuodattimen kunnonvalvontaan. Tällainen menetelmä on esimerkiksi profiilivalvonta, joka on kehitetty erityisesti paperikoneen telojen pyöreiden ja huovan pinnan valvontaan.

2.3.1 Tunnuslukuvalvonta

Värähtelyn suuruuden ja vakavuuden arvioiminen mittaussignaalista laskettavilla tunnusluvuilla on aina ollut värähtelyvalvonnan perustyökaluja. Yksittäinen tunnusluku on yleensä valitulta taajuusalueelta laskettu värähtelyn tehollisarvo, kuten pyörimistaajuisen

tärinän suuruus tai mitatun tärinän kokonaistaso. Muita käytettäviä tunnuslukuja on lueteltu standardissa PSK 5706 (Nohynek, 2003, s.91).

Värähtelyn kokonaistaso

Värähtelyn kokonaistaso ilmaisee koko mittausalueen värähtelyn suuruuden yksiköissä, joissa mittaus on tehty (siirtymä, nopeus, kiihtyvyys tms.) Suuruuden ilmaisemiseen käytetään yleensä tehollisarvoa, mutta kokonaistaso voidaan haluttaessa ilmoittaa myös muilla tavoilla (Nohynek, 2003, s.91).

Tärinärasitus

Värähtelyn tärinärasitus on mm. standardeissa ISO 2372, VDI 2056 ja PSK 5701 määritelty tunnusluku. Tärinärasitus on värähtelyn nopeuden tehollisarvo laskettuna taajuusalueella 10 – 10000 Hz. Mikäli koneelle suoritettu värähtelymittaus on tehty tällä samalla taajuusalueella käyttäen mittaussuurena nopeutta, ovat värähtelyn kokonaistaso ja tärinärasitus samoja tunnuslukuja (Nohynek, 2003, s.91).

Taajuuskaistat

Taajuuskaistojen tunnusluvut lasketaan tietyltä taajuuskaistalta, jolla jokin ennalta määritelty vika saattaa ilmetä. Tällaisia taajuuskaistoja ovat muun muassa pyörimistaajuuden kerrannaisilta löytyvät vikataajuudet, joista on esimerkkejä taulukossa 2.3 – 1. Taajuuskaistan tunnuslukuna voidaan pitää joko valitun taajuuskaistan värähtelyn tehollisarvoa tai taajuuskaistalla olevaa korkeinta amplitudiarvoa.

Taajuuskaistaparametrit olivat aiemmin erittäin tärkeitä kunnonvalvonnassa, kun tietokoneen muistit eivät sallineet muistikapasiteettia vaativien spektrien ja aikatasojen suurta tallennusmäärää. Nykyisillä tietokoneilla ei muistikoko tuota ongelmia, joten taajuuskaistaparametrien merkitys on vähenemässä (Nohynek, 2003, s.92).

2.3.2 Aikatasovalvonta

Aikatasovalvontaa voidaan hyödyntää kunnonvalvonnassa usealla tavalla. Aikatasosta on laskettavissa erilaisia tunnuslukuja, joita voidaan käyttää kunnonvalvonnassa aivan kuten edellä lueteltuja tunnuslukujakin. Tämän lisäksi aikatasosta voidaan nähdä koneessa tapahtuvia iskumaisia ilmiöitä, joita spektri- tai kokonaistasovalvonnalla ei pystytä yhtä selvästi havaitsemaan. Tämä edellyttää kuitenkin oikean mittaussuureen valintaa.

Värähtelyspektri ja useimmat tunnusluvut mitataan yleensä nopeutena, mihin on syynä nopeuden käyttökelpoisuus laajakaistaisissa mittauksissa. Aikataso on kuitenkin yleensä järkevintä käyttämällä mittaussuureena kiihtyvyyttä tai sen aikaderivaattoja. Näissä suureissa ilmaistu mittaus korostaa iskumaisia ilmiöitä ja on näin sovelias laakeri- ja vaihteistovikojen toteamiseen jo vikaantumisen varhaisessa vaiheessa. Mittauksissa käytetty ylärajataajuus on myös syytä valita spektrimittauksessa käytettyä korkeammaksi, sillä jos siirtymää tai kiihtyvyyttä mitataan liian alhaiselta taajuudelta, saattaa alkavassa vaiheessa oleva iskun aiheuttava vika jäädä täysin havaitsematta.

Aikatason käyttö kunnonvalvonnassa on huomattavasti työläämpää kuin yksinkertainen tunnuslukuvalvonta tai tietokoneavusteinen spektrivalvonta, sillä aikatasojen vertailu on suoritettava silmämääräisesti. Suurella mittauspistejoukolla toimintaa voidaan nopeuttaa laskemalla ensin aikatasoista tunnusluvut ja keskittyä sitten tarkemmin aikatasoihin, joiden tunnusluvut ovat kasvussa (Nohynek, 2003, s.94).

Aikatason tunnusluvut

Tärkeimmät aikatasosta laskettavat tunnusluvut ovat tehollisarvo, värähtelyn huippuarvo, huipusta huippuun –arvo sekä huippukerroin (Crest-factor).

Tehollisarvo (rms) on tavallisin tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus. Kertomalla tehollisarvo tekijällä $\sqrt{2}$ saadaan huippuamplitudi, jota ei pidä sekoittaa todelliseen huippuarvoon. Tehollisarvo kuvaa melko hyvin värähtelyn keskimääräisen energiasisällön suuruutta, mutta hetkelliset esimerkiksi iskuista johtuvat korkeat arvot eivät kasvata tehollisarvoa juuri lainkaan.

Huippuarvo (peak) kertoo mittausaikana vallinneen korkeimman amplitudiarvon. Monien vikojen aikaisena havaintajana huippuarvon mittausmenetelmä on herkempi kuin tehollisarvon mittaus. Esimerkiksi laakerivika näkyy ensin huippuarvon kasvuna, ja vasta myöhemmin alkaa värähtelyn tehollisarvo kasvaa.

Huipusta huippuun –arvo on yleinen mittaustapa lähinnä siirtymää mitattaessa ja kertoo mittausaikana vallinneiden suurimman ja pienimmän arvon erotuksen. Siirtymänä se kuvaa

mittauskohdan liikeradan ääripäiden välistä etäisyyttä, joten välyksiin liittyvissä asioissa huipusta huippuun –arvo voi olla merkittävä tieto (Nohynek, 2003, s.61).

Huippukerroin saadaan jakamalla huippuarvo tehollisarvolla. Normaalikunnossa olevalle koneelle huippukerroin on lähellä kolmea. Kun koneessa alkaa kehittyä iskumainen vika, lähtee huippukerroin kasvamaan. Vian ollessa vakava saattaa kerroin olla yli 10. Viankehityksen loppuvaiheessa saattaa kerroin kuitenkin laskea lähelle kolmea, koska tällöin värähtelysignaalin tehollisarvo kasvaa yleensä voimakkaasti (Nohynek, 2003, s.94).

Aikatason muoto

Aikatasosignaalin muodosta voidaan nähdä selvästi, mikä vika koneessa on. Tällaisessa tarkastelussa keskitytään tulkitsemaan värähtelyn suuruuden lisäksi signaalin muotoa verrattuna ”normaalin” muotoiseen signaaliin. Vertailukohtana on tietysti hyvä olla kunnossa olevan koneen värähtelysignaali, vaikkakin kokenut mittaaja kykenee havaitsemaan ”epänormaanin” signaalin muodon ilman referenssiäkin.

Signaalista voi erottaa esimerkiksi huojunnan, iskut ja toispuoleisuuden. Tavallisimpia syitä huojuntaan ovat sähkömoottorin sähköinen vika, tärinän kantautuminen koneelta toiselle tai akselin linjausvika. Iskujen välistä aikaa tutkimalla voidaan signaalista lukea esimerkiksi laakeri- ja hammaspyöräviat, sekä roottorin osumat roottoripesään. Signaalin muodon ollessa toispuoleinen on syytä epäillä linjausvirhettä, hankausta, löysää liitosta tai osan irtonaisuutta (Nohynek, 2003, s.96).

2.3.3 Spektrianalyysi

Spektrianalyysi on yleisimpiä vikadiagnostisoinnin menetelmiä. Nykyaikaisilla laitteilla spektrilaskenta on nopeaa ja saavutettava resoluutio sekä dynamiikka riittävää vikojen havaitsemiseksi. Mittalaitteet hoitavat nykyään itse myös skaalauksen ja vahvistuksen, joten mittausjärjestelyt ovat helpottuneet merkittävästi (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.13).

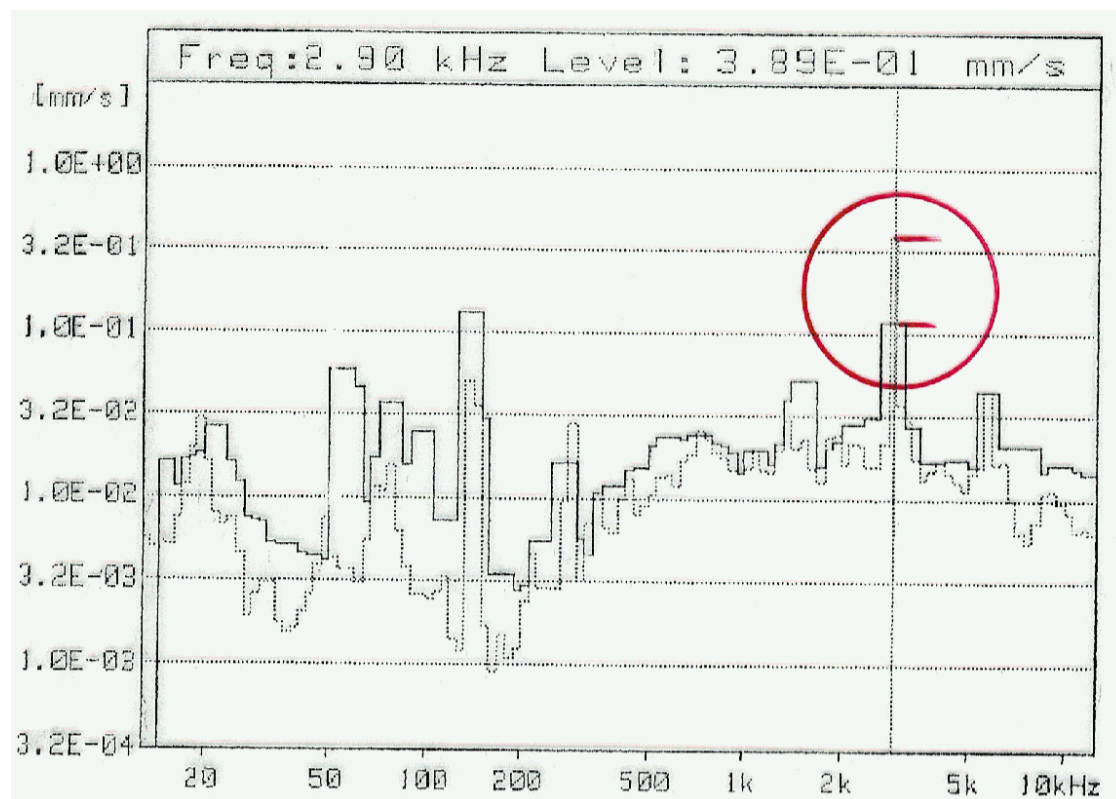
Värähtelyspektrit muodostetaan aikatasosignaalista joko FFT-laskennalla (Fast Fourier Transform, Fourierin muunnos) tai käyttäen kapeakaistaisia taajuussuotimia. Erottamalla eri koneenosista tulevan värähtelyn eri taajuudet ja niitä vastaavat värähtelyamplitudit, voidaan yksittäisten koneenosien kuntoa valvoa ja arvioida.

Tämä edellyttää, että erityisesti koneiden ja akselien kierrosluvut ovat tiedossa, sillä herätetaajuudet ovat yleensä suoraan verrannollisia koneen pyörimisnopeuteen. Myös koneenosien rakenteen vaikutukset värähtelyihin on huomioitava. Tarvittavia tietoja ovat esimerkiksi hammaspyörässä hampaiden lukumäärä, vierintälaakerissa laakerityyppi ja – valmistaja, jne. Lähtötietojen avulla määritetään koneen vikataajuudet ja tiedot syötetään mittausjärjestelmään spektrien tulkinnan helpottamiseksi.

Spektrit voidaan mitata siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Mittaus tulisi tehdä mahdollisimman tasaisen spektrin antavalla suureella, eli amplitudien tulisi olla mittausalueen ylä- ja alataajuuksilla lähellä samaa korkeutta. Mittaussuurena käytetään kuitenkin pääasiassa värähtelynopeutta, koska se ei korosta matalia tai korkeita taajuuksia (Riutta, 2003, s.34).

Koska joillakin taajuuksilla ovat jo melko matalatkin spektrihuiput vaarallisia, on tarkastelu tehtävä huolellisesti. Tarkastelun helpottamiseksi voidaan käyttää ns. kaista- tai spektrivalvontaa. Kaistavalvonnassa asetetaan tietyille taajuuskaistoille rajat, joiden ylittäminen laukaisee hälytyksen. Spektrivalvonnassa asetetaan hälytysraja mitatun spektrin ympärille siten, että millä tahansa taajuudella jokainen rajan ylittävä spektrikomponentti laukaisee hälytyksen (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.14).

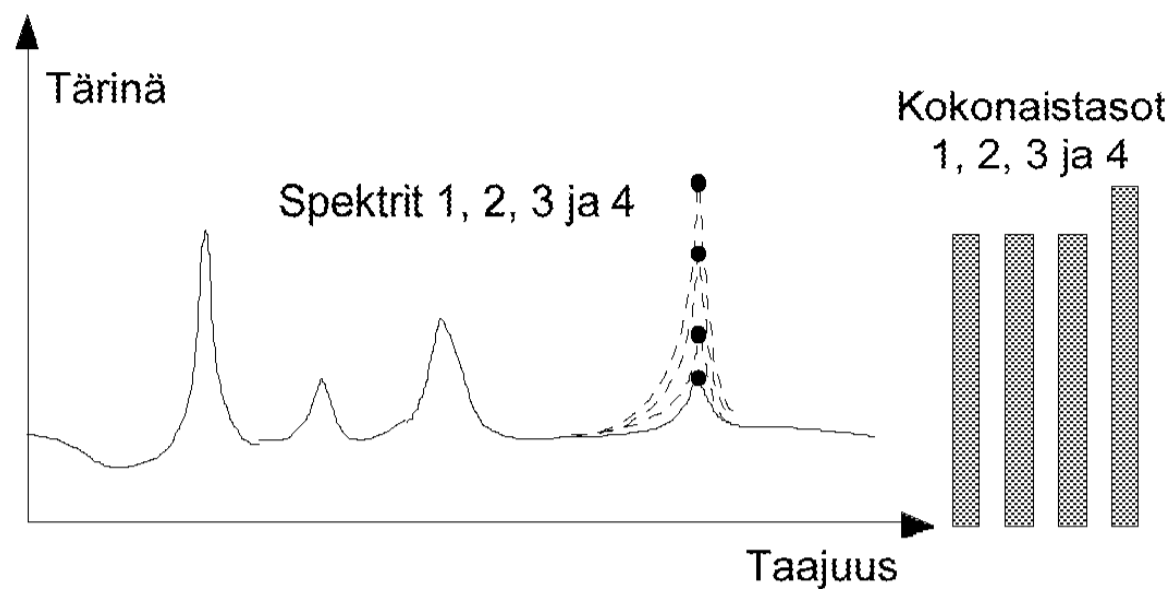
Spektrivalvonta perustuu kuvan 6 mukaisten spektrimaskien eli hälytysrajaspektrien käyttöön. Muuttuville kierrosnopeuksille tai kuormituksille voidaan luoda omat muuttuvat spektrinsä. Maski luodaan jonkin edustavan mittauksen mukaan, jossa koneen voidaan olettaa olevan hyvässä kunnossa. Mittauspisteelle voidaan myös määrittää useampikin hälytysmaski, jolloin alin maski toimii hälytysrajana ja ylin vauriorajana. Riippuen siitä, ylitetäänkö hälytys- vai vauriorajamaski, saadaan ylityksestä eritasoinen hälytys.



Kuva 6. Spektrimaskin eli hälytysrajaspektrin periaate. Yhtenäinen viiva kuvaa spektrimaskia ja katkoviiva mittaustulosta, ympyröidyssä kohdassa mittaustulos ylittää hälytysrajan. (Riutta, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Spektrivalvonta vaatii mittausten tulkitsijalta enemmän kokemusta ja koneiden käyttäytymisen ymmärrystä kuin yksinkertaisempien mittausten tulosten tulkinta. Kaikki spektrissä olevat piikit eivät kuvaa vikaa, vaan suurin osa niistä johtuu luonnollisista, koneen normaalista käynnistä syntyvistä voimista ja käytännössä hyväkuntoisessakin koneessa nähdään yleensä pyörimistaajuinen spektrikomponentti, joka johtuu mm. valmistusepätkätyksistä. Joskus koneen vikaantumista ei edes huomaa vikataajuuksien amplitudien kasvusta, vaan ainoastaan spektrin muodon muuttumisesta (Riutta, 2003, s.37).

Toisaalta, jos vika aiheuttaa värähtelyvoimien nousua siten, että normaalitilassa vallitseva vaikkapa pyörimistaajuinen komponentti ei vikaantumisen edetessä voimistu, ei esimerkiksi värähtelyn tehollisarvossa välttämättä juurikaan näy muutosta, mutta spektrissä muutos havaitaan selvästi. Kuvasta 7 käy hyvin ilmi ero herkkyydessä spektrin ja tehollisarvon välillä.



Kuva 7. Spektrivalvonnan ja kokonaistasovalvonnan ero vian havaitsemis herkkyydessä (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.14)

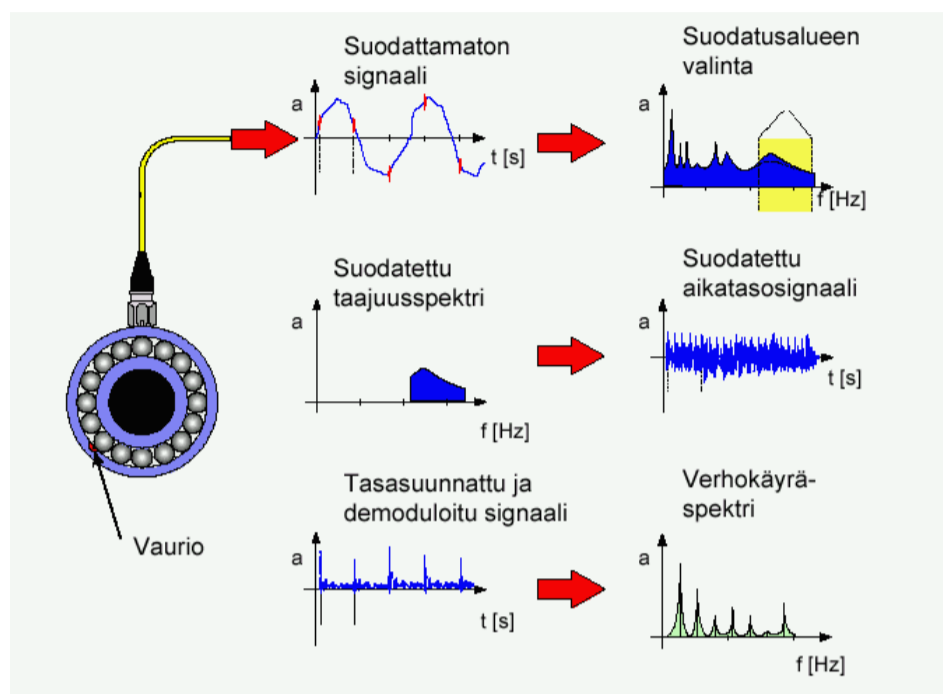
2.3.4 Verhokäyräanalyysi

Vierintälaakerien kunnonvalvonta perinteisillä tekniikoilla, kuten värähtelyjen kokonaistasojen ja taajuusspektrien seurannalla, ei aina tuota riittävän luotettavaa ja varhaista indikaatiota kehittyvistä vaurioista. Alkavat laakerivauriot ovat usein värähtelyvoimakkuuksiltaan niin heikkoja, että ne peittyvät vallitsevien tärinöiden alle. Verhokäyrätekniikan etuna tavalliseen nopeus- ja kiihtyvyyssignaalista tehtävään taajuusanalyysiin verrattuna on mahdollisuus suodattaa signaalista pois tärinät, jotka haittaavat alkavan laakerivian havaitsemista.

Verhokäyräanalyysi perustuu amplitudimodulaatioon, jolla tarkoitetaan signaalin kertomista toisella signaalilla, jota sanotaan kantaalloksi. Kahden signaalin summautuessa syntyy uusia taajuuskomponentteja, sivunauhoja, jotka muodostuvat kantaallon taajuuden molemmille puolille. Pyörivien koneiden vierintälaakereissa ja hammasvaihteissa syntyy amplitudimoduloituneita signaaleja, joista laakeri- ja hammasvauriot voidaan havaita usein varsin aikaisessa vaiheessa.

Verhokäyräanalyysin periaate on esitelty kuvassa 8. Vaurio laakerin ulkokehällä saa aikaan lyhyitä iskuja, jotka toistuvat ajan T välein. Laajakaistaisesta spektristä vioista kertovia värähtelyjä on usein vaikea erottaa voimakkaan ympäristötärinän ja koneen muiden tärinöiden vuoksi. Kuitenkin pienetkin impulssit kykenevät herättämään laakerin

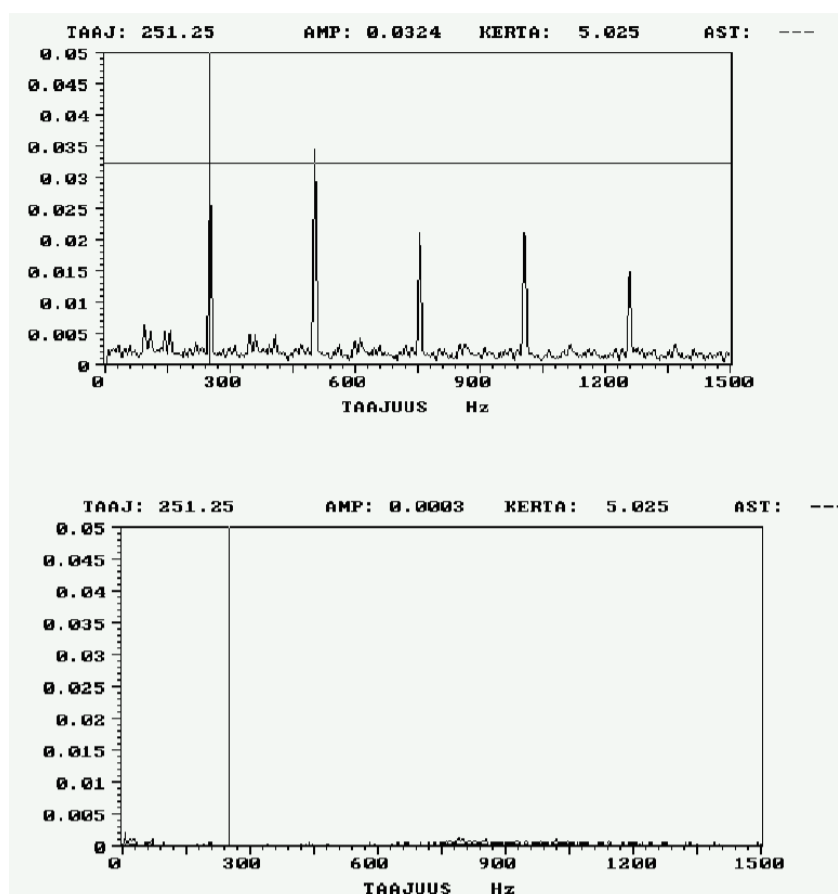
ominaistaajuudet. Tavallisessa taajuusspektrissä tämä ilmenee laajakaistaisena resonanssikohtana suuremmilla taajuuksilla.



Kuva 8. Verhokäyräanalyysin periaate. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.15)

Laakerivaurion aiheuttamat impulssit voidaan mitata asettamalla kaistanpäästösuodatin resonanssikohtaan ympärille. Suodatin toimii mekaanisena vahvistimena vaurion aikaansaamille impulsseille. Impulssien toistumis- ja vikataajuuksien erottamiseksi kantoaallostaa signaali tasasuunnataan ja demoduloidaan ja näin saadaan vain vaurion impulssit sisältävä signaali. Demoduloidulle signaalille suoritetaan vielä FFT-analyysi, eli aikatasosignaali muutetaan taajuusspektriä, jolloin laakerin vikataajuuskomponentit tulevat selvästi esille verhokäyräspektrissä.

Kuvassa 9 on viallisen ja vasta vaihdetun laakerin verhokäyräspektrit. Spektrin ollessa tasainen on laakeri ehjä ja vastaavasti ”piikit” spektrissä kertovat viasta. Laskemalla laakerin vikataajuudet on verhokäyräspektristä helppo erottaa erityyppiset viat, kuten kuulan sekä sisä- ja ulkokehän vauriot (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.15).



- Viallinen laakeri, ulkokehävaurio. Komponentti (f_u) kerrannaisineen näkyy selvästi.
- Laakerin vaihdon jälkeen mitatussa verhoikärspektrissä ei ole havaittavissa vikataajuuskomponentteja.

Kuva 9. Verhoikärspektri mitattu ennen ja jälkeen laakerin vaihdon (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.15)

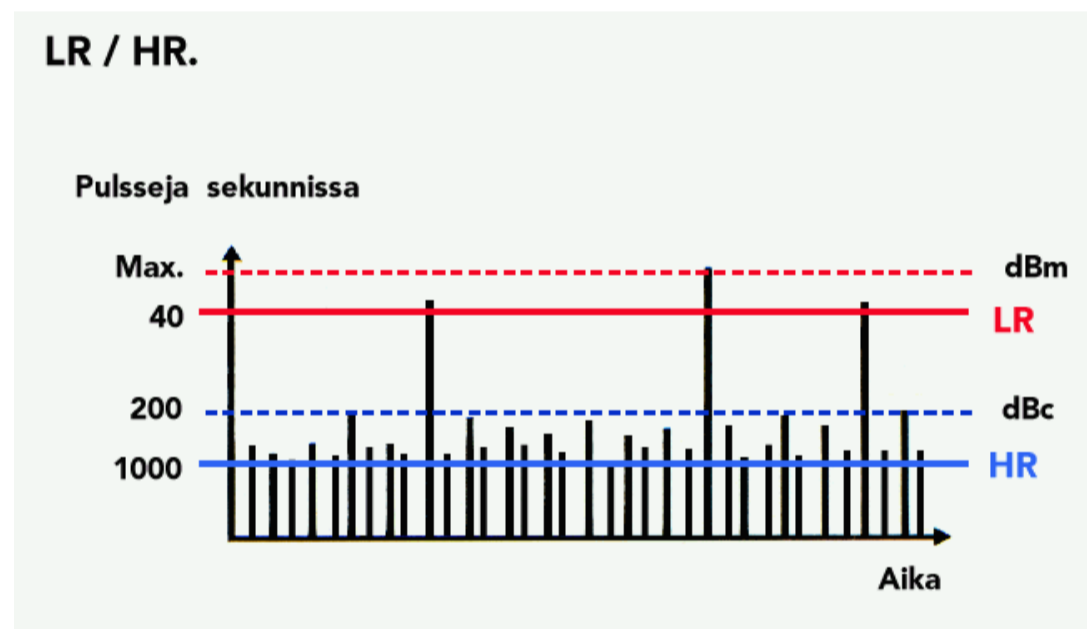
2.3.5 Iskusysäysmenetelmä ja LR/HR-tekniikka

Iskusysäysmenetelmää käytetään mittaamaan vierintälaakerien kuntoa normaalin käynnin aikana. Menetelmän kehitti 60-luvulla SPM Instrument AB, joka myöhemmin täydensi alkuperäistä dBm/dBc –tekniikkaa tuomalla markkinoille vuonna 1984 Low rate/High rate (LR/HR) –tekniikan. Alkuperäistä iskusysäysmenetelmää käytetään ensisijaisesti laakerivaurioiden ilmaistamiseen, parannettu LR/HR –tekniikka pystyy myös voitelukalvon paksuuden määrittelyyn.

Menetelmässä iskusysäysanturi lähettää jatkuvan jonon heikompia ja voimakkaampia signaaleja, jotka ovat suoraan verrannollisia iskujen voimakkuuteen. Iskut mitataan logaritmisella asteikolla dBsv:nä (desibel shock value) ja iskujen voimakkuus tuhatkertaistuu alueella 0-60 dBsv. Analysaattori antaa mittaustuloksena kaksi arvoa iskusysäyksistä. Heikoille iskuille käytetään HR (High Rate of occurrence) dBsv tasoa, jolla esiintyy 1000 iskua sekunnissa. Voimakkaille iskuille käytetään LR (Low Rate occurrence)

dBsv tasoa, jolla esiintyy noin 40 iskuja sekunnissa. HR:n ja LR:n eroa kutsutaan delta-arvoksi.

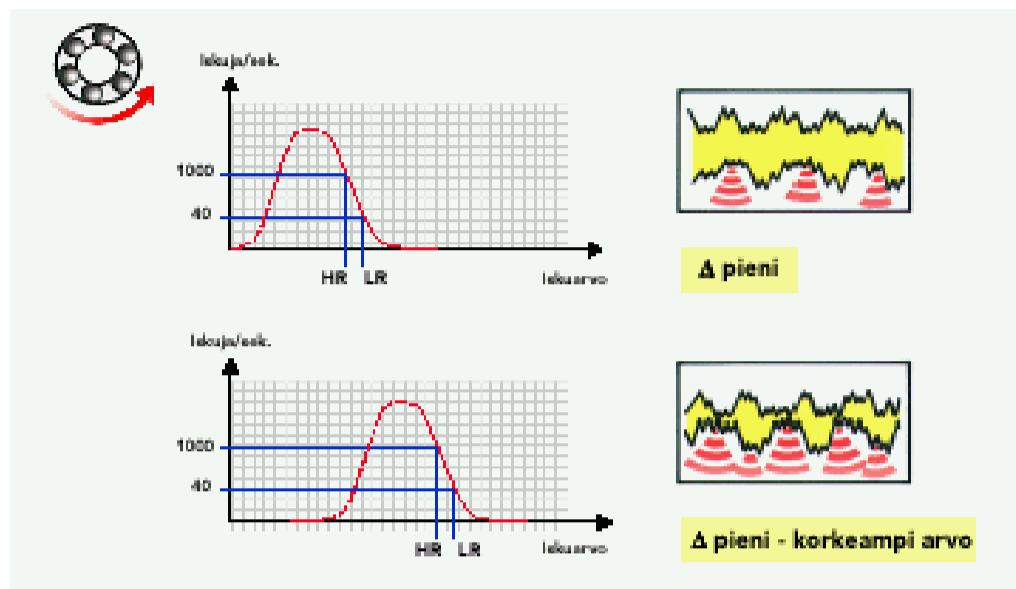
Kuvasta 10 käy ilmi alkuperäisen dBm/dBc -tekniikan ja LR/HR -tekniikan mittaussignaalin käsittelyn ero. LR vastaa suurinpiirtein iskujen maksimiarvoa dBm, mutta on tavallisesti matalampi, koska se mitataan keskiarvona huippuarvoista. HR vastaa äänimattoarvoa dBc, mutta on hieman matalampi, koska se luetaan kohdassa, jossa on enemmän heikkoja iskuja (1000/s). Kunnossa olevan laakerin iskusysäyskuvion voimakkuus seuraa kaikille laakerityypeille ominaista normikäyrää, mutta käyrän muoto ja sijainti vaihtelee laakerityypeittäin. LR/HR -tekniikka vaatii siksi alkuperäistä iskusysäysmentelmää seikkaperäisempiä alkutietoja, laakerin koon ja vierintänopeuden lisäksi tarvitaan tieto laakerityypistä.



Kuva 10. Alkuperäisen dBm/dBc -tekniikan ja LR/HR -tekniikan välinen ero mittaussignaalin käsittelyssä (Auvinen, 2003)

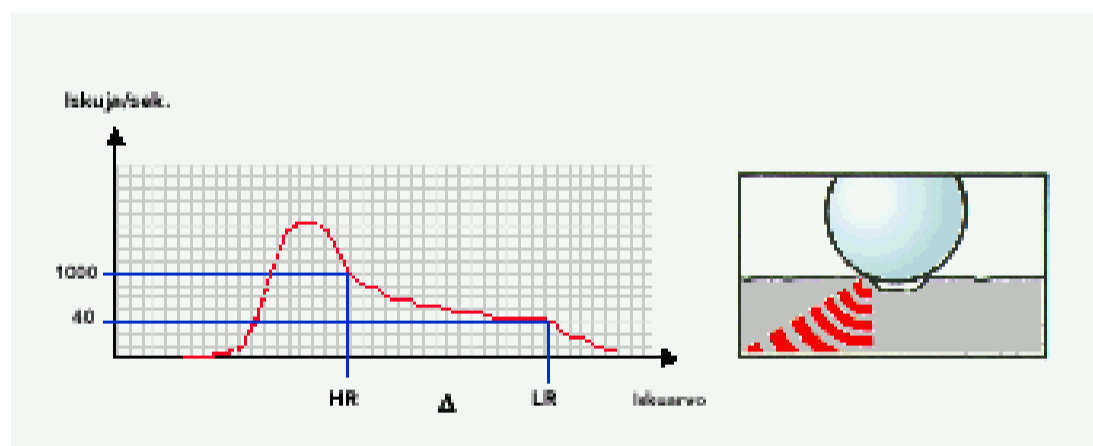
Vaurioutumattomassa laakerissa iskusysäyksien lähteenä ovat pinnankarheudet, jolloin myös iskut ovat heikkoja. Tällöin LR ja HR arvot ovat lähellä toisiaan ja delta-arvo on pieni. Hyvin voidellussa laakerissa iskujen kokonaistaso on matala. Jos laakerin voitelukalvo on niin ohut, että se ei täysin pysty erottamaan vierintäelementtejä vierintäpinnoista, kohoaa iskusysäystaso. Kohonnut iskusysäystaso siirtää normikäyrää kohti korkeampia arvoja, mutta delta-arvo pysyy muuttumattomana edellyttäen että puutteellinen voitelu ei ole ehtinyt vaurioittaa laakeria. Kuvassa 11 ylempi käyrä kuvaa tilannetta, jolloin voitelukalvo on

riittävän paksu. Kuvan alemmassa käyrässä näkyy liian ohuen voitelukalvon vaikutus normikäyrään.



Kuva 11. Voitelun vaikutus normikäyrään (Auvinen, 2003)

Laakerin ollessa vaurioitunut iskusysäykset eivät seuraa normikäyrää. LR arvo kasvaa paljon HR arvoa enemmän ja seurauksena on suuri delta-arvo, kuva 12.



Kuva 12. Laakerivaurion normikäyrää vääristävä ja delta-arvoa kasvattava vaikutus (Auvinen, 2003)

Ennen laakerivalmistajat käyttivät voitelukalvon paksuuden yksikkönä lambda (λ). Lambdan arvon ollessa yksi voitelukalvon paksuus on yhtä suuri kuin vierintäelementtien ja vierintäpintojen keskikarheuksien (R_a) summa ja näin ollen muodostuu erottava voitelukalvo. Lambdan arvot alle yhden tarkoittavat, että laakerissa syntyy metallien kosketuksia vierintäelementtien ja -pintojen välillä.

Nykyään käytetään voitelukalvon paksuuden yksikkönä kappa (κ), joka vastaa öljyn viskositeettia käyttöolosuhteessa, joka antaa voitelukalvon lambda-arvoksi yksi. Arvo $\kappa = 1$ kuvaa käytännössä samaa tulosta kuin arvo $\lambda = 1$. Laakerivalmistajat testaavat L10 käyttöiän laakereistaan voitelukalvon ollessa vähintään $\kappa = 1.2$. Sekä κ että λ ovat suhteellisia voitelukalvopaksuuden mittoja verrattuna pintojen keskikarheuksiin.

SPM analysointilaitteiden ilmoittama LUB numero on mitta voitelukalvon absoluuttiselle paksuudelle. Yksikkönä on mikrotuuma, joka on noin $0,03 \mu\text{m}$. Koska rullalaakereiden pintojen karheus on suurempi kuin kuulalaakereiden, L10 käyttöiän saavuttamiseksi vaaditaan rullalaakereilta LUB numero 6 ja rullalaakereilta LUB numero 3.

Laakerin iskusysäystason ja voitelutilanteen välisen suhteen toteen näyttämiseksi tutkittiin suuri määrä eri tyyppisiä ja kokoisia laakereita. Muuttujina käytettiin vierintänopeutta ja kuormaa, sekä voiteluaineen lämpötilaa, laatua ja virtausta. Auvisen mukaan hydrodynaamisten voitelukalvojen paksuutta on tutkinut pääasiassa T. E. Tallian ja hänen havaintonsa voitiin vahvistaa SPM tutkimuksilla. Tallian käytti tutkimuksessaan sähköä laakerin tarkistamaan laskettua erottavaa voitelukalvoa vierintäelementtien ja – pintojen välillä.

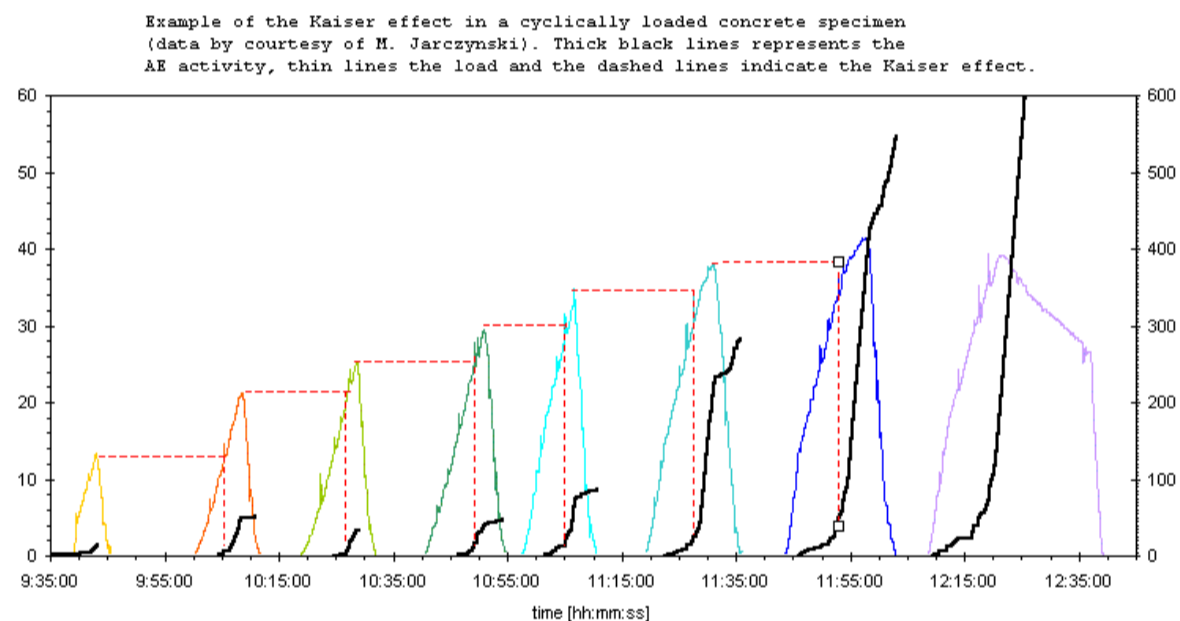
Vertailemalla Tallianin tuloksia ja laakerin lambda-arvoa, todetaan että lambda-arvon ollessa >3 , ovat pinnat täysin voitelukalvon erottamat ja sähkö ei pääse kulkemaan laakerin läpi. Havainnot todistivat myös LUB numeron ja sähköä kulkuajan hyvin läheisen riippuvuuden. Tallianin laskema lambda-arvo, mitattu iskusysäystaso ja laskettu LUB numero ovat kaikki suorassa suhteessa toisiinsa, kun seurataan sähköä kulku-aikaa laakerin läpi (Auvinen, 2003).

2.4 Akustinen emissio

Ensimmäiset tunnetut havainnot ilmiöstä akustinen emissio (AE) teki arabialainen alkemisti Jabir ibn Hayyan 800-luvulla jälkeen Kristuksen. Hän kirjoitti teoksessaan ”Summa

Perfectionis Magisterii” raudasta kuuluvista äänistä sitä taottaessa. Nämä äänet johtuivat todennäköisesti martensiitin muodostumisesta raudan jäähtyessä.

Nykyisen akustiseen emissioon perustuvan tekniikan isänä pidetään Joseph Kaiseria Münchenin Teknillisestä korkeakoulusta. Hän julkaisi väitöskirjan akustisesta emissiosta vuonna 1950. Tutkimuksessaan hän muun muassa havaitsi, että materiaali ei ala uudelleen lähettämään akustista emissiota ennen kuin materiaaliin kohdistuvan jännityksen suuruus ylittää aikaisemman emission synnyttäneen jännityksen maksimiarvon. Materiaali käyttäytyy elastisesti aikaisemman jännityksen maksimiarvoon saakka. Tätä ilmiötä kutsutaan Kaiser efektiksi, kuva 13.



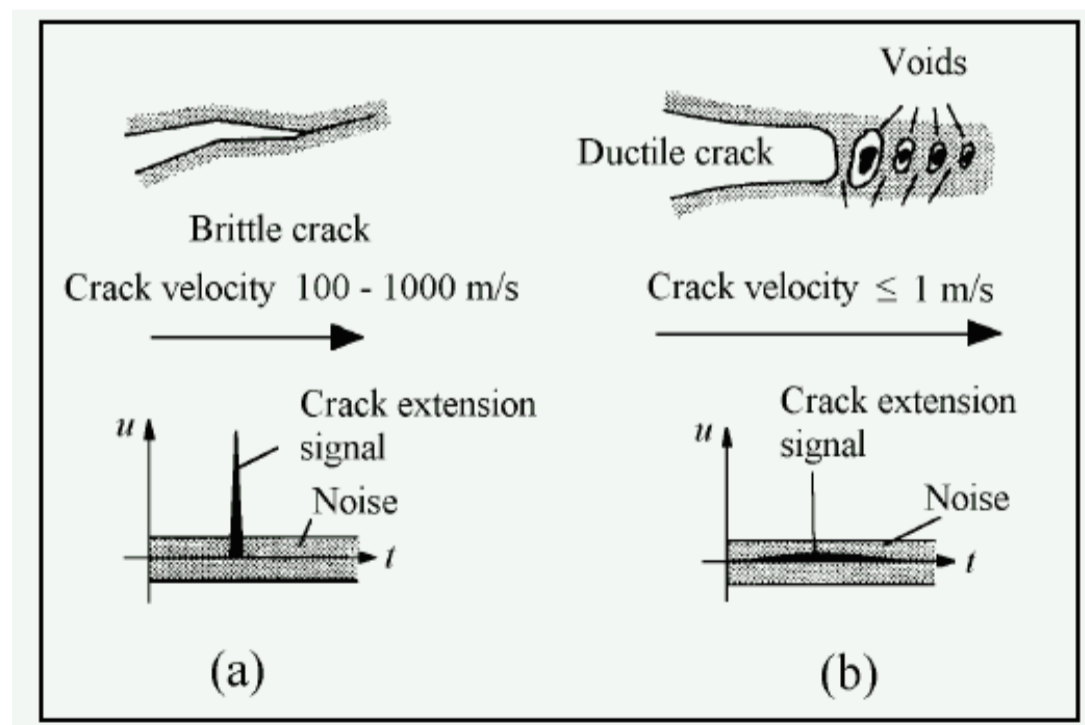
Kuva 13. Kaiser efektin periaate (Saatu: <http://www.ndt.net/article/az/ae/kaisereffect.htm>)

Akustinen emissio on eräänlainen materiaalin sisällä etenevä iskuaalto, joka saa materiaalin pinnan liikkumaan ja tämä liike voidaan mitata riittävän herkällä anturilla. Iskuaalto syntyy äkkinäisen materiaalin sisällä tapahtuvan energian vapautumisen seurauksena. Esimerkiksi teräksen kyseessä ollessa kuormituksen tai sisäisten jännitysten aiheuttama raerajojen välinen liike ja raerajamurtumat synnyttävät akustista emissiota (Miettinen 2000, s.12) . American Standards for Testing and Materials (ASTM) kuvaa ilmiötä seuraavasti: ”A phenomenon whereby transient elastic waves are generated by the rapid release of energy from localized sources within a material, or the transient elastic waves so generated” (ASTM E 610:1977). Yleisesti akustisella emissiolla käsitetään aaltoja, jotka saapuvat materiaalin pintaan taajuualueella 100 kHz – 1 MHz. AE-tekniikkaa käytettäessä on kuitenkin

huomioitava, että mitattavan kohteen rakenteella ja aallon kulkemalla reitillä on suuri vaikutus materiaalin pintaan saapuvaan emissioon (Esward 2002, s.5).

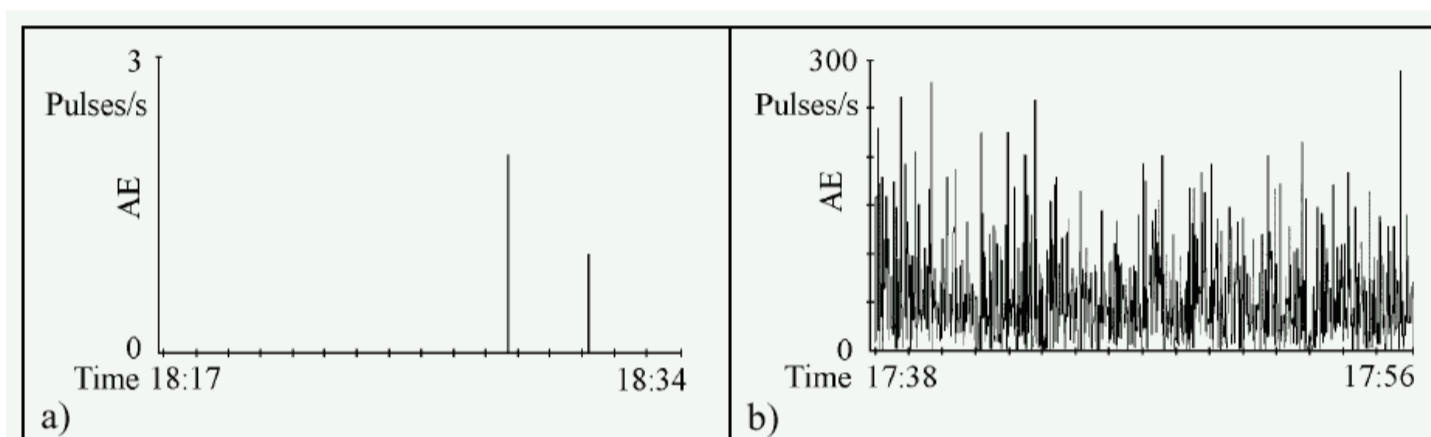
Akustista emissiota synnyttävät lähteet voidaan jakaa kahteen luokkaan. Perinteiseen määrittelyyn sopivia ovat mekaanisen muodonmuutoksen tai jännitystilän vaikutuksesta akustista emissiota tuottavat lähteet metalleissa. Tällaisia ovat esimerkiksi särönkasvu, dislokaatiot ja raerajojen liukumiset. Uusi ASTM standardi hyväksyy akustisen emission lähteiksi myös sellaisia ilmiöitä, joissa ei tapahdu muodonmuutoksia. Näin ollen akustista emissiota voivat synnyttää myös nestevuodot, kavitaatio, nesteytyminen, jähmettyminen, kitka ja materiaalin magneettikentän suunnan muutokset (Esward 2002, s.6).

Riippuen jännitysaallon syntymekanismista voi emissio esiintyä jatkuvana tai purskeina, esimerkiksi kitkan ja vuotojen aiheuttama emissio on tavallisesti jatkuvaa ja impulssimaisten tapahtumien kuten särön kasvun aiheuttama emissio purskemaista. Kuvassa 14 nähdään akustisen emission voimakas aikariippuvuus. Hidas särönkasvu tuottaa heikon signaalin, kun taas samanlaisen särön nopea muodostuminen saa aikaan terävän ja voimakkaan signaalin. Hitaan särön kasvun tuottama heikko signaali sekoittuu taustameluun ja voi näin jäädä kokonaan huomaamatta. (Miettinen 2000, s.13).



Kuva 14. (a) Nopean särönkasvun tuottama terävä ja voimakas signaali
 (b) Särön hitaan kasvun tuottama leveä ja heikko signaali, joka sekoittuu taustameluun (Miettinen 2000, s.14)

Akustisen emission mittausten herkkyydestä saa hyvän käsityksen kuvassa 15 näkyvien testitulosten perusteella. Testissä mitattiin uusia kuulalaakereita, joista toinen oli puhdistettu kaikesta voiteluöljystä ja toinen oli normaalisti voideltu. Pyörimisnopeudella 450rpm voitelemattoman laakerin AE aktiivisuus on korkealla tasolla, kun taas voideltu laakeri lähettää tuskin lainkaan emissiota (Miettinen 2000, s.31).



Kuva 15. Uuden käyttämättömän kuulalaakerin akustinen emissio. a) Laakeri voideltu öljyllä (SAE 80W/90) ja b) voitelematon laakeri. Tulokset ovat eri mittauksista, mutta mittaussaitteen asetukset ovat identtiset ja laakerin pyörimisnopeus 450 rpm (Miettinen 2000, s.31)

Emissiosignaalien havaitsemiseen käytetään tavallisimmin pietsosähköisiä antureita, jotka muuttavat mekaanisen värähtelyn sähköiseksi signaaliksi. Sähköinen signaali on niin heikko, että anturin lähellä tulee olla esivahvistin. Esivahvistin vahvistaa signaalin ennen kaapelilla tapahtuvaa siirtoa varsinaiseen mittaussyksikköön, jossa signaalin käsittely tapahtuu tietotekniikkaa hyväksi käyttäen. Yksinkertaisimmillaan lasketaan havaittujen emissiotapahtumien tai tapahtumien sisältämien värähdysten määrää tietyssä ajassa.

AE mittauksia häiritsevä tekijä on taustamelu, jonka vaikutusta mittaustulokseen pyritään minimoimaan suodattamalla mittaussignaalista häiriötaajuuDET pois ja keskittymään vain tiettyyn, usein varsin kapeaan taajuuskaistaan, jolla esimerkiksi laakerivauriot esiintyvät. Tavallisin käytetty taajuuskaista on 100 – 200 kHz, missä emissiopulssit etenevät riittävän hyvin mahdollistaen jopa useiden metrien anturivälin ja toisaalta mekaanisten lähteiden häiriöalue jää tämän kaistan ulkopuolelle (Sarkimo 1990, s.8).

2.5 Lämpötilamittaukset

Yksi perinteisimpiä menetelmiä arvioida koneen kuntoa on sen toimintalämpötilan määrittäminen. Kaikki koneet ja laitteet, joissa on liikkuvia osia, tuottavat toimiessaan infrapunasaateilyä eli lämpöä. Yleensä viat laitteen toiminnassa aiheuttavat lämmön nousua vioittuneen osan ympärillä esimerkiksi kasvaneen kitkan tai oikosulun seurauksena. Tietysti asia voi myös olla juuri päinvastoin, eli vika aiheuttaakin lämpötilan laskua, kuten lämmittimen rikkoutuminen tai eristevuodot. Joka tapauksessa lämpötilan seuraaminen perustuu lämpötilan muutosten havainnoimiseen ja laitteen toimintakunnon määrittämiseen muutosten perusteella.

Kaikkiin lämpötilamittausmenetelmiin pätee tosiasia, että mitattavan kohteen pinnalta havaittu lämpösaateily ei välttämättä ole pelkästään kohteen itsensä synnyttämää, vaan voi olla vaikkapa moottorista johtuvaa lämpöä tai yksinkertaisesti pelkkä heijastuma esimerkiksi valaisimesta. Kuitenkin pelkkä kohteen itsensä lähettämä lämpö on kunnonvalvonnan kannalta merkittävää, heijastumat ja lämmön johtuminen muualta vain vääristävät mittaustuloksia.

2.5.1 Kosketukseton lämpötilan mittaus

Kosketuksettomassa lämpötilan mittauksessa yleimmin käytetty menetelmä on infrapunatekniikkaan perustuva pyrometria. Pyrometriassa mitataan optiikan kohdistaman alueen lämpötilaa, tai itse asiassa kohteen lähettämää lämpösaateilyä. Mitattava alue osoitetaan käyttäjälle laserilla. Koska pyrometrit mittaavat kohteen tietyn alueen keskiarvolämpötilaa, on mitattavan kohteen peitettävä täysin mittarin ”näkökenttä” luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi.

Toinen mittaustuloksiin vaikuttava asia on mitattavan kohteen emissio, eli kyky säteillä lämpösaateilyä. Luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi tulee emissioarvo asettaa mitattavan materiaalin mukaiseksi. Poikkeuksena on kaksivärimittaus, jossa käytetään kahta ilmaisinta hieman eri aallonpituudella, jolloin emission vaikutus mittaukseen voidaan eliminoida pois.

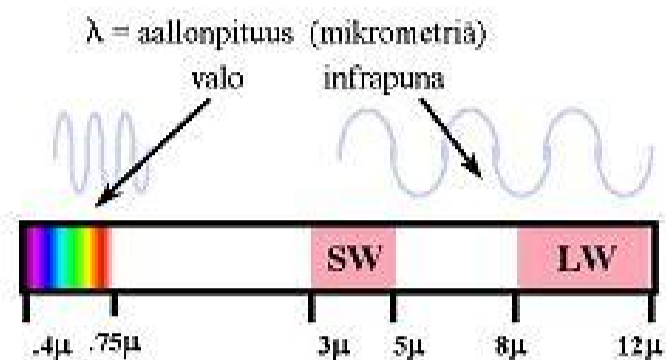
2.5.2 Lämpökameratekniikka

Lämpökamera oli vielä viime vuosikymmenellä lähinnä sotilaallisessa käytössä tähtäinjärjestelmien ydinkomponenttina ja kameroiden fyysinen koko, sekä korkea hinta asettivat rajoituksia siviilikäytölle. Lämpökameroiden ilmaisinteknologian kehitys ja elektroniikan miniatyrisointi ovat johtaneet siihen, että nykyään tavallisen videokameran kokoinen ja käytöltään helppo laite on yhä useamman ulottuvilla.

Lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin. Jokainen kohde tai kappale, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen (-273°C), lähettää lämpö- eli infrapunasäteilyä. Infrapuna on käsitteenä laaja, jolla tarkoitetaan näkyvää valoa pitkäaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä. Täydellistä mustakappaletta (=täydellinen säteilijä) lukuunottamatta jokainen kappale myös heijastaa ja absorboi muista lähteistä tulevaa säteilyä. Kappaleen pinnan rakenne määrittelee, kuinka suuri osa kappaleesta tulevasta säteilystä on sen itsensä lähettämää. Metalliset tasaiset pinnat heijastavat enemmän ympäristön energiaa kuin ei-metalliset epätasaiset pinnat. Heijastumat ovat lämpökuvauksessa yleensä haitallinen ilmiö, mutta niiden vaikutusta voi vähentää kuvattavan kohteen esivalmistelulla, kuten pintojen mattaamisella tai teippaamisella. Useimmissa lämpökameroissa on säädettävä emissiivisyyskerroin, jolla voidaan myös vähentää heijastumien haittavaikutusta.

Ilmakehän vesihöyry ja hiilidioksidi absorboivat osan lämpösäteilystä lyhyillä infrapunan aallonpituuksilla ja tietyillä aallonpituuksilla lämpösäteily suodattuu lähes olemattomaksi. Lämpökamerat rakennetaan tämän vuoksi ilmaisemaan ilmakehässä olevien ”infrapunaikkunoiden” läpi. Käytännössä puhutaan lyhytaalto- ja pitkäaaltoalueesta. Kuvassa 16 on esitetty näkyvän valon, lyhytaaltoalueen (Short Wave, SW) ja pitkäaaltoalueen (Long Wave, LW) aallonpituudet.

Näkyvä valo ja infrapunasäteily

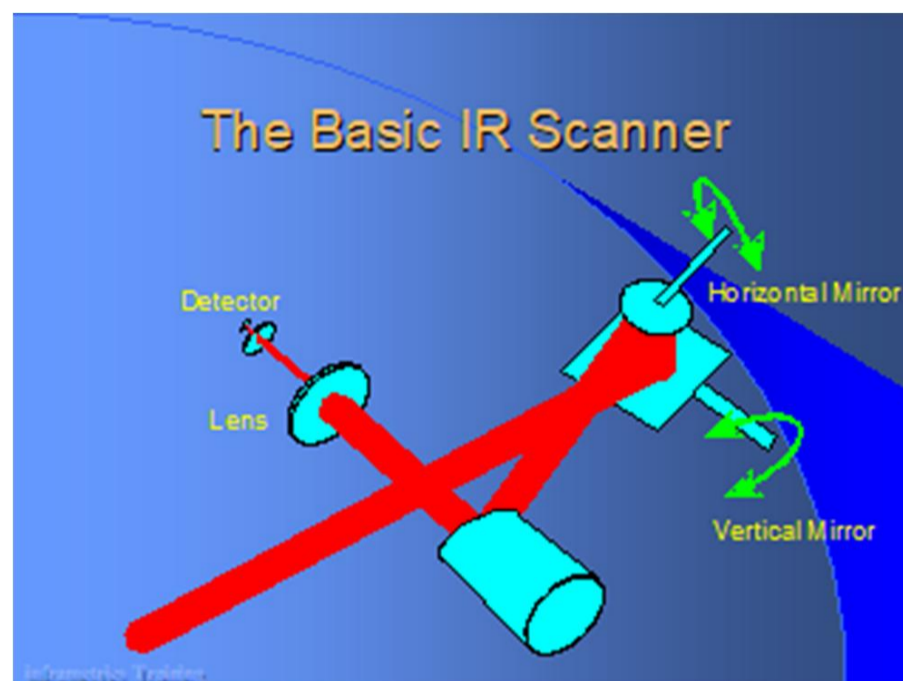


Kuva 16. Näkyvän valon ja infrapunasäteilyn aallonpituudet. Näkyvä valo 0.4 – 0.75 μm , lyhytaaltoalue 3 – 5 μm ja pitkäaaltoalue 8 – 12 μm (Saatu: <http://www.infradex.com/teoria.html>)

Oma lukunsa ovat kamerat, joissa on pimeäkuvausmahdollisuus, joka toimii lähellä näkyvän valon aluetta (0.4 – 1 μm) käyttäen IR-ledejä kohteen valaisemiseen. Vaikka tätä ominaisuutta kutsutaan infrapunakuvaukseksi, ei sen käyttämällä aallonpituusalueella havaita kappaleen lähettämää alle n.650°C lämpösäteilyä ja näin ollen tällaisia kameroita ei voi käyttää lämpökuvaukseen.

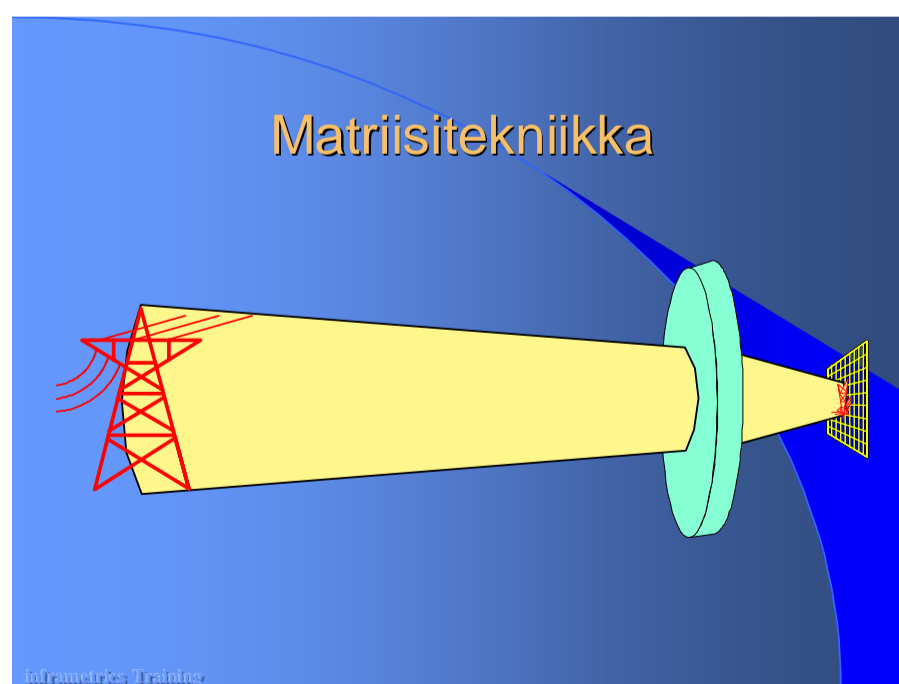
Lämpökameran ilmaisin muuttaa kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti reaaliajassa. Ilmaisintyyppinä käytetään yleisimmin jäähdettyjä tai jäähdyttämättömiä matriisi-ilmaisimia yhden jäähdetyn ilmaisimen (skanneritekniikka) ollessa jo hieman vanhanaikainen.

Kuvassa 17 on esitetty skanneritekniikan periaate. Mekaaninen juovaskanneri pyyhkii mittauskohteen pysty- ja vaakasuunnassa. Tavallisimmin alkuaineseosta oleva ilmaisin on jäähdytetty –200°C lämpötilaan. Mekaaninen skanneri ja jäähdytyksen tarve johtaa kameran suureen kokoon. Kun lisäksi kameratekniikassa pyritään vähentämään liikkuvia osia ja yksinkertaistamaan rakennetta, ovat matriisi-ilmaisimet syrjäyttäneet skanneritekniikan.



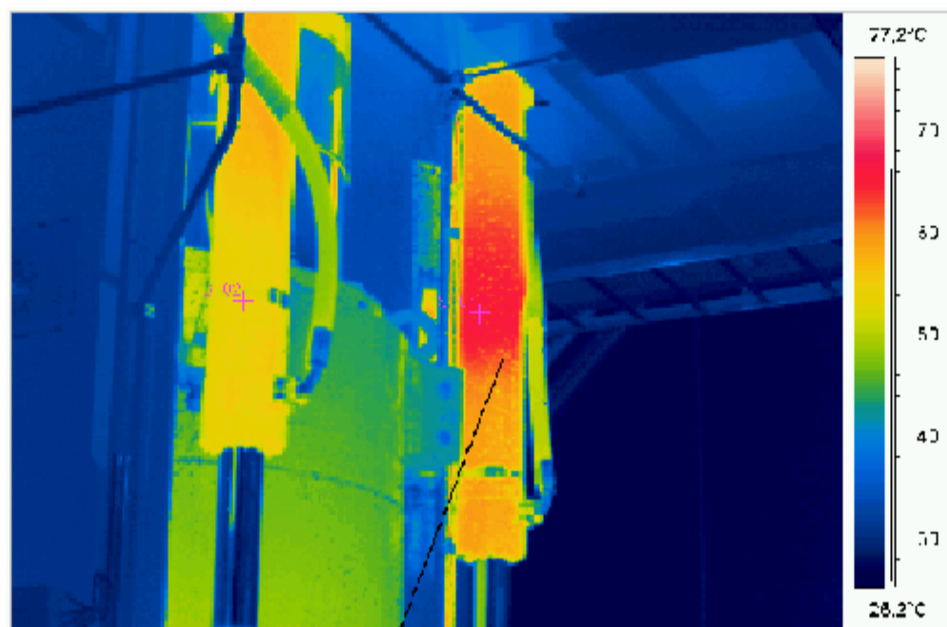
Kuva 17. Yhtä ilmaisinta käyttävän skanneritekniikan periaate (Infradex CD-ROM, 2003)

Matriisi-ilmaisimissa jokaiselle kuvapisteele on oma ilmaisim, kuva 18. Matriisi ei kuitenkaan toimi kuten videokameran CCD-kenno varaustilan muutoksiin perustuen, vaan ilmaisu perustuu kohteen lämpösäteilyn aiheuttamaan ilmaisimen resistiiviseen muutokseen. Jäähdytettyjen matriisien lyhyt vasteaika antaa mahdollisuuden kuvata erittäin nopeita lämpöilmiöitä, toisaalta jäähdytys tuo mukanaan liikkuvia osia ja heikentää luotettavuutta ympärivuorokautisessa valvonnassa. Jäähdytys toimintalämpötilaan -200°C on toteutettu erittäin pienikokoisella heliumkiertopumpulla. Yleisimmin tänä päivänä käytetään kuitenkin jäähdyttämättömiä matriisi-ilmaisimia niiden luotettavuuden ja pienen koon vuoksi.



Kuva 18. Matriisitekniikan toimintaperiaate (Infradex CD-ROM, 2003)

Erilaisilla optiikoilla voidaan vaikuttaa lämpökameran näkymäalueeseen. Lämpökameran erotuskyvyllä tarkoitetaan pienintä kameran erottamaa pinta-alaa ja se on riippuvainen kameran optiikasta. Pienin eroteltava pinta voidaan laskea kertomalla mittausetäisyys kameran geometrisella erottelukyvylä. Geometrinen erottelukyky ilmaistaan yksittäisen pisteen mittauskulmana milliradiaaneissa ja erottelukyvyn määrittelyn lähtökohta on ilmaisinmatriisin yksittäisen ilmaisimen koko (Infradex Oy, 2003).

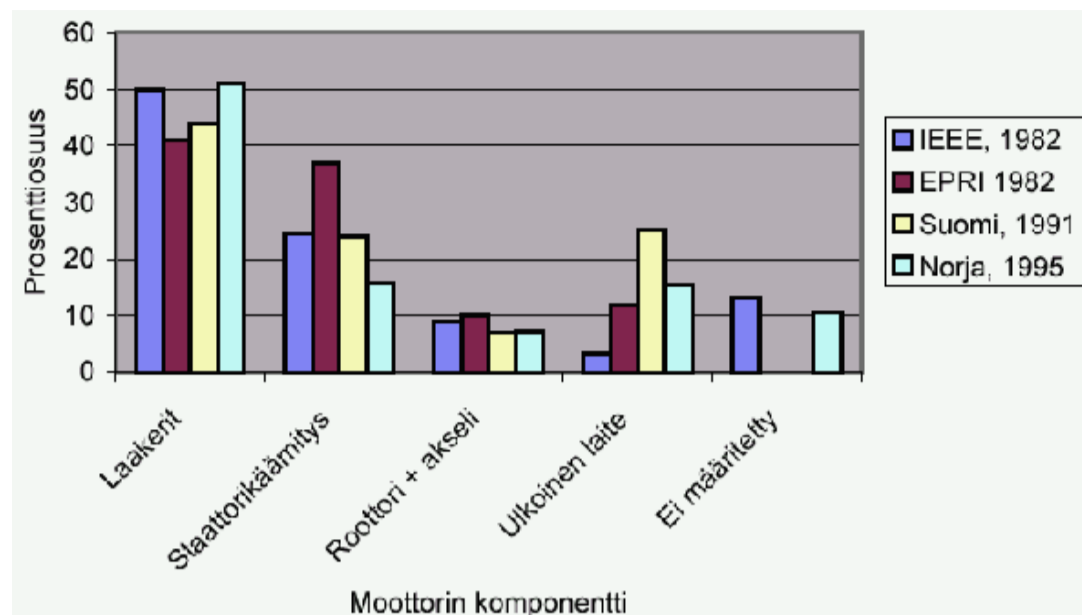


Kuva 19. Lämpökameralla kuvattu paalipuristimen pikaliikesynterin sisäinen vuoto (Infradex CD-ROM, 2003)

2.6 Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvonnan mittaukset

Sähköisten signaalien mittaaminen, käsittely ja tulkinta on kehittynyt huomattavasti elektroniikan, digitaalisen signaalin käsittelyn ja mikrotietokonetekniikan ansiosta. Oikosulkumoottoreiden sähköisillä mittausmenetelmillä on mahdollista havaita sähköiset viat helpommin kuin esimerkiksi värähtelymittauksilla ja osa mekaanisistakin vioista on sähköistä alkuperää ja näin ollen havaittavissa sähköisillä mittauksilla. Paras tulos tietenkin saadaan yhdistämällä analysointivaiheessa mekaanisten, kuten esimerkiksi värähtelymittausten, ja sähköisten suureiden mittaustulokset.

Kuvassa 20 esitetään oikosulkumoottoreiden vikajakauma, josta huomataan mekaanisten vikojen olevan yleisin sähkömoottoreilla esiintyvä vikatyyppe. Laakeriviat ovat suurin vikaantumisryhmä edustaen lähes 50 prosenttia kaikista vioista, seuraavaksi tulevat staattori ja roottoriviat.



Kuva 20. Oikosulkumoottoreiden tilastollinen vikajakauma (Lindgren, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

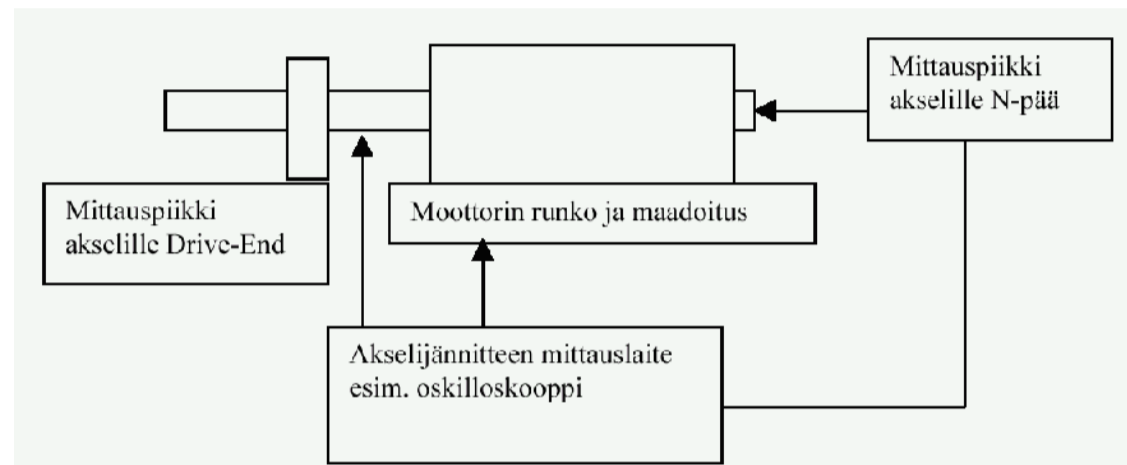
2.6.1 Akselijännite- ja virtamittaukset

Aiemmin todettiin mekaanisten vikojen olevan yleisin syy epätahtikoneiden vaurioitumisiin. Viime vuosina on ollut havaittavissa kasvua akselijännitteen ja –virran aiheuttamissa laakereiden ja tiivisteiden vaurioissa. Tämä selittyy parhaiten nopeiden taajuusmuuttajakäyttöjen yleistymisellä, jotka voivat aiheuttaa laakerivirtaongelmia oikosulkumoottoreilla. Akselivirran aiheuttamia laakereiden vikatyyppejä ovat huurtuminen tai hioutuminen, kipinäjäljet, rokottuminen ja hitsautuminen. Tyypillisin erityisesti taajuusmuuttajakäytöstä aiheutuva vauriopinta on ns. pyykkilautakuvio, kuva 21.



Kuva 21. Taajuusmuuttajakäytön aiheuttaman laakerivirran synnyttämä laakerivaurio, ns. pyykkilautakuvio (Lindgren 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Akselijännitteet pyörivissä koneissa eivät ole aina sinimuotoisia. Yleismittari ei yleensä ole akselijännitteen mittaukseen soveltuva laite, joten mittauslaitteena käytetään esimerkiksi oskilloskooppia ja/tai spektrianalysointia. Kuvan 22 mukaisesti yleensä mitataan akselin ja maadoitetun rungon väliset jännitteet sekä akselin päiden välinen jännite. Akselivirtaa mitattaessa voidaan mitata maadoitetun rungon ja akselin välinen virta.

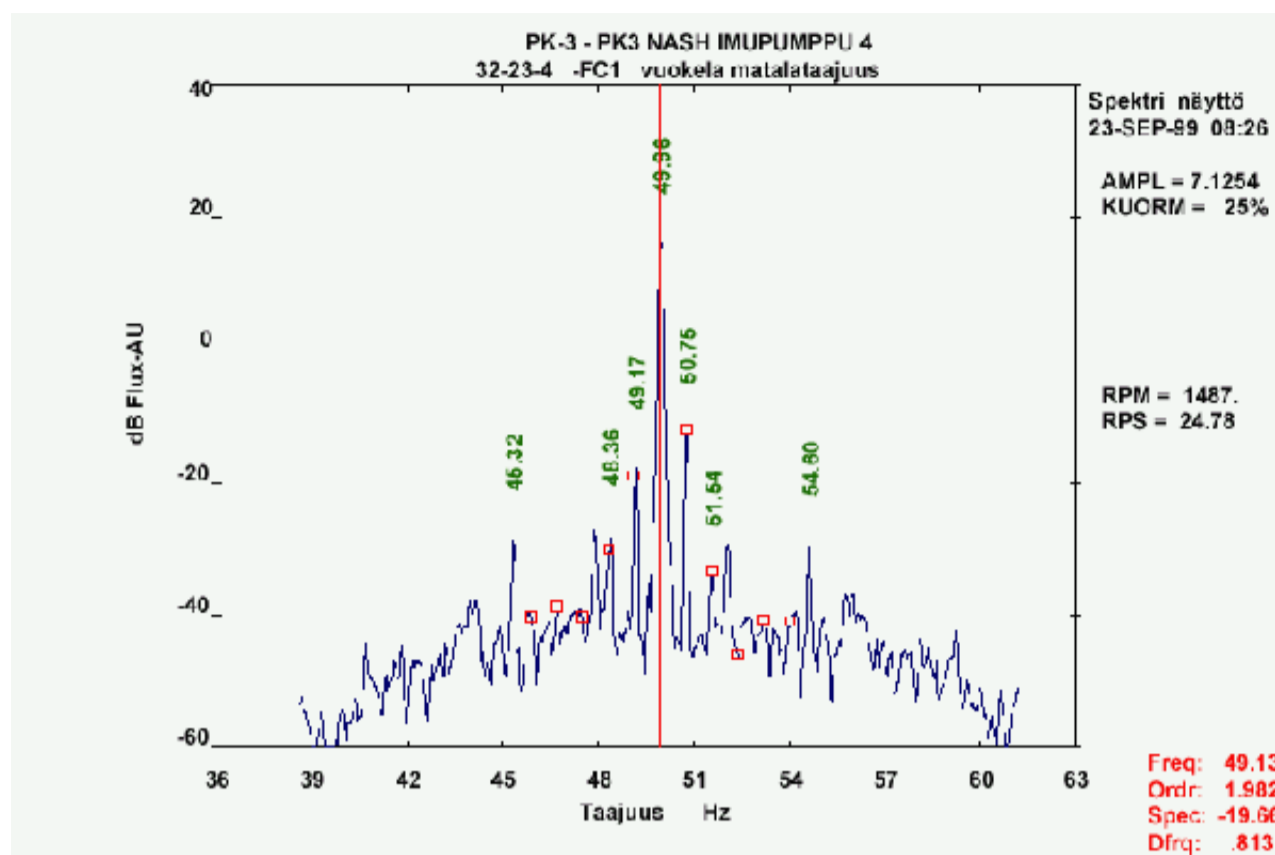


Kuva 22. Akselijännitteen mittaamisen periaatekaavio (Lindgren, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

2.6.2 Magneettivuomittaukset

Jokaisessa moottorissa on luonnostaan hieman epäsymmetriaa, joka aiheuttaa moottoriin akselin suuntaisen magneettisen hajavuon. Magneettivuo sisältää sekä staattorivirran roottoriin indusoiman vuon että roottorin virtojen staattoriin indusoiman vuon. Näin ollen kaikki moottorissa syntyvät sähköiset epäsymmetriailmiöt summautuvat magneettivuossa. Mittausmenetelmässä mitataan akselin suuntainen hajavuo ja tehdään siitä spektrianalyysi.

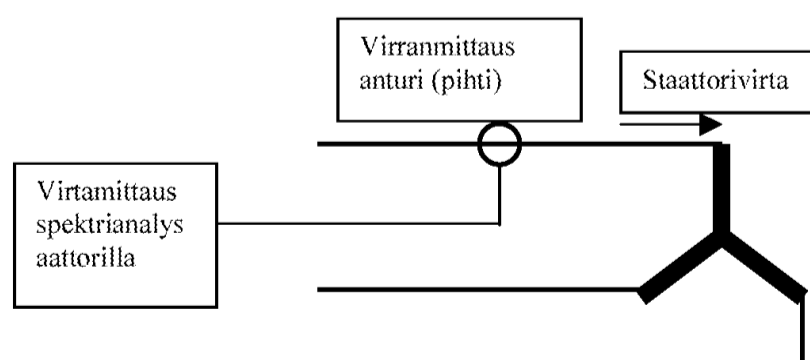
Oikosulkumoottorin magneettivuon mittauksella voidaan valvoa magneettikenttää, joka muuttuu roottori- tai staattorikäämityksen vikaantuessa. Mittaustuloksista voidaan tunnistaa roottorin sauvojen katkeaminen, roottorin päätyrenkaan katkeaminen sekä staattorikäämityksen kierrosoikosulku. Taajuusmuuttajakäyttöisillä koneilla voidaan lisäksi havaita invertterissä olevia vikoja kuten diodiviat. Kuvassa 23 esitetään aksiaalisen magneettivuomittauksen tulos moottorista, jossa on useita katkenneita roottorisauvoja ja roottorin oikosulkurengas poikki. Nämä viat nähdään kahdesta korkeasta sivunauhasta (49,17 Hz ja 50,75 Hz) verkkotaajuuden ympärillä (Lindgren, 2003, s.6).



Kuva 23. Aksiaalinen magneettivuo viallisesta moottorista (Lindgren, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

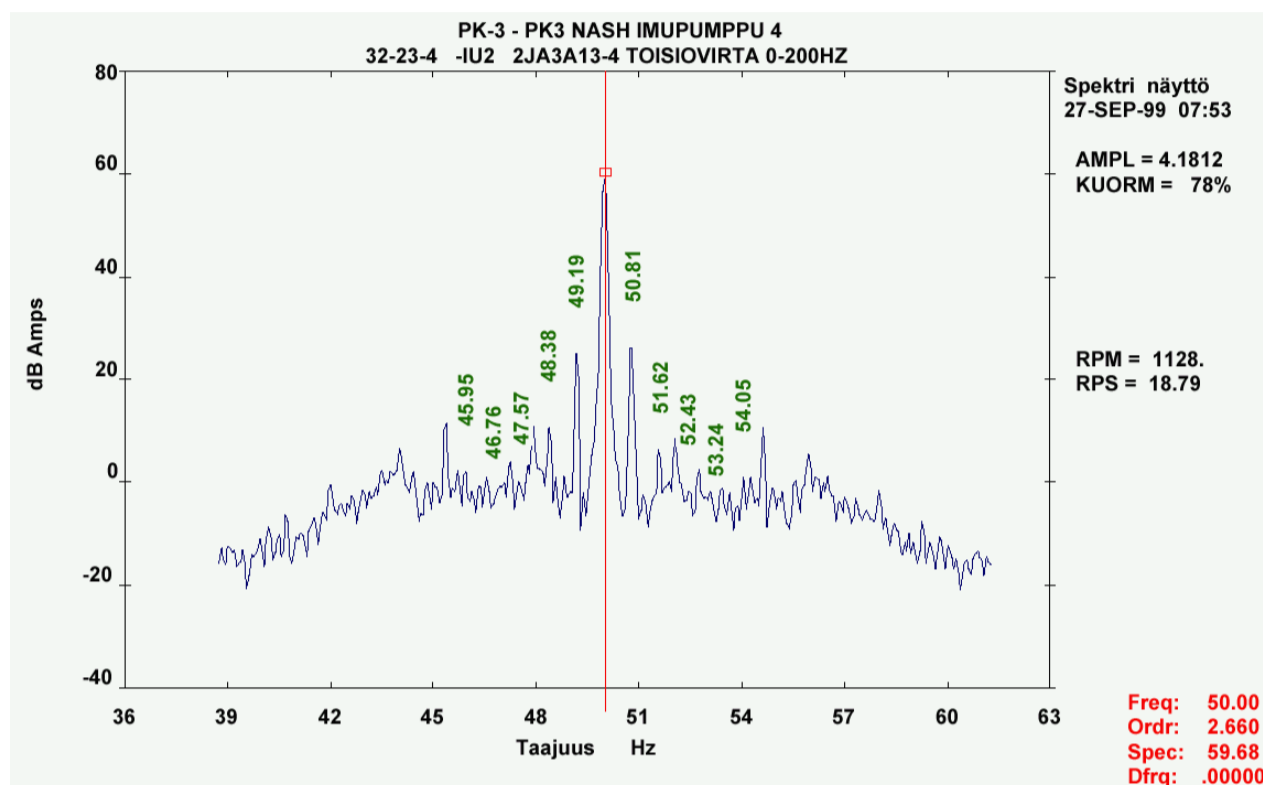
2.6.3 Staattorivirran spektrin mittaus

Epätahtikoneen jättämästä johtuen tuottaa roottorisauvavika kasvua staattorivirtaan tietyille taajuuksille, joka on verrannollinen jättämään. Roottorisauvan vaurioituminen on näin todettavissa käytönaikaisen staattorivirran spektrin mittaamisella ja analysoimisella. Kuvassa 24 esitetään periaatekaavio staattorivirran mittaamisesta. Virta mitataan ensiö- tai toisiopiiristä virtapihdillä tai muulla sopivalla tavalla, jonka jälkeen automaattinen mittalaite laskee virran spektriviivojen amplitudit. Lisäksi on mitattava tarkasti jättämäätaajuuden arvo (kierrosluku). Katkenneiden sauvojen lukumäärää voidaan arvioida sivunauhan ja perustaajuuden amplitudien suhteella.



Kuva 24. Staattorin virtaspektrin mittauksen periaatekaavio (Lindgren, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

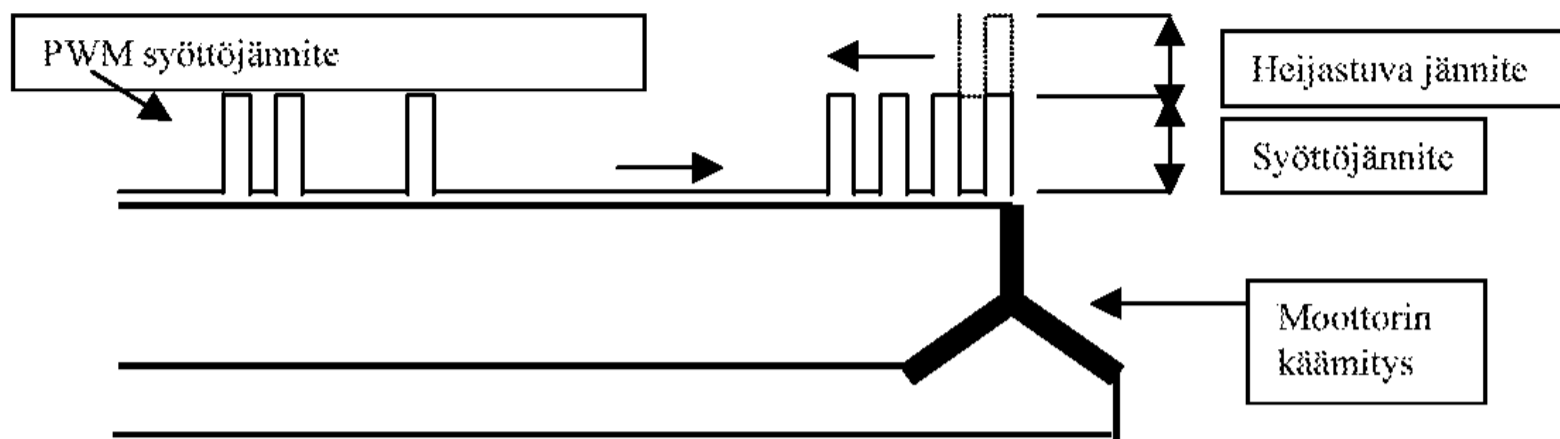
Kuvassa 25 on virtaspektrimittauksen tulos moottorista, jossa on useita katkenneita roottorisauvoja (roottori on sama joka esiintyy aksiaalisen vuon mittauksessa kuvassa 23). Katkenneet roottorisauvat nähdään kahdesta korkeasta sivunauhasta, 49.19 Hz ja 50.81 Hz, verkkotaajuuden ympärillä (Lindgren, 2003, s.11).



Kuva 25. Staattorivirran spektrin mittaustulos viallisesta moottorista (Lindgren 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

2.6.4 Liitinjännitteen mittaukset

Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin nopeuden säätö toteutetaan yleisimmin taajuusmuuttajan avulla. Nykyaikaiset taajuusmuuttajat käyttävät jännitesyöttönä pulssinleveysmoduloitua jännitettä (PWM, Pulse Width Modulated), joka muodostuu erittäin suuren nousunopeuden omaavista pulssimaisista jänniteaskelista. Tämä aiheuttaa korkeita taajuuksia syöttöjännitteen päälle ja voi johtaa jännitepulssin heijastumiseen takaisin moottorin liitinnavoista ja pahimmassa tapauksessa kuvan 26 mukaisen summautumisen tulevan jännitepulssin päälle.



Kuva 26. Moottorin liitinnavoista heijastuvan jännitteen summautuminen syöttöjännitteeseen (Lindgren, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito – seminaari CD-ROM)

Pulssien summautumisen seurauksena voi käämiin syntyä jopa kaksinkertaisia jännitepulsseja normaaliin käyttöjännitteeseen verrattuna ja koska moottorin käämitys on usein mitoitettu kestämään vain normaalia käyttöjännitettä, voi moottorin käämieriste vaurioitua pulssien vaikutuksesta. Jännitepulssien heijastumista pyritään vähentämään kaapeloinnilla ja syöttöpään suodattimilla.

Jännitepiikkejä voidaan mitata liitinjännitemittauksin, joilla taajuusmuuttajan staattorikäämitykselle aiheuttama jänniterasitus on määritettävissä yksinkertaisesti ja nopeasti. Mittausta varten moottoriin kiinnitetään anturi, jonka jälkeen mittaus tapahtuu käytönaikaisesti. Mittaustuloksesta nähdään suoraan jännitepulssin nousunopeus, amplitudi ja lukumäärä ajan suhteen (Lindgren 2003, s.12).

2.6.5 Sähköverkon jännitteen laadun ja häiriöiden mittaus

Sähköverkosta tulevassa syöttöjännitteessä voi olla monenlaisia häiriöitä, kuten piikkejä, heijastuksia tai harmonisia yliaaltoja. Häiriöt rasittavat käämieristettä ja voivat aiheuttaa akselijännitteitä, joten sähköverkon jännitteen laadun mittauksella voidaan tunnistaa etukäteen esimerkiksi moottorin staattorin vaurioitumisriskejä.

Syöttöjännitteen laadun mittaamiseen käytetään erilaisia analysaattoreita. Harmonisten yliaaltojen mittaukseen on kehitetty pieniä kädessä pidettäviä helppokäyttöisiä mittalaitteita, mutta vaikeammissa ongelmissa tarvitaan jo monikanavaisia analysaattoreita varustettuna

nauhoituksella ja liipaisulla. Liipaisu tarkoittaa mittalaitteen kykyä laukaista mittaustapahtuma jännitepiikistä tai muusta verkon häiriöstä (Lindgren, 2003, s.13).

2.7 Öljyanalyysit

Teollisuuden koneiden ja laitteiden käyttämän öljyn kunnon määrittämiseen on perinteisesti käytetty öljyanalyysia. Toisaalta jo vuosien ajan erityisesti autoteollisuudessa on voiteluaineanalyysissä menty askelta pidemmälle ja hyödynnetty voiteluaineen kunnon valvontaa ei pelkän öljyn, vaan koko laitteen kunnon määrittämiseen. Öljyn analysointiin on kehitetty useita eri tekniikoita, joista osa on yleisesti teollisuuden käytössä ja osaa käytetään vain poikkeustilanteissa. Oli käytetty tekniikka mikä tahansa, tärkeää on tarkkailla voiteluaineiden kuntoa riittävän usein käyttäen tapaukseen sopivaa menetelmää ja oikeanlaista sekä yhdenmukaista näytteenottotekniikkaa (Davies, 1998, s.435). Seuraavaksi esitellään yleisimpiä öljyn kunnonvalvonnassa käytetyistä analyysimenetelmistä.

2.7.1 Lämpötilan mittaus ja silmämääräinen tarkastelu

Yksinkertaisin öljyn kunnonvalvonnan mittauksista on käyttölämpötilan seuranta. Ylikuumentuneessa öljyssä viskositeetti laskee ja lisäaineiden vaikutus muuttuu. Tästä seuraa yleensä huonontuneet voiteluominaisuudet ja lyhentynyt öljyn käyttöikä.

Silmämääräisellä tarkastelulla voidaan arvioida öljyn vesipitoisuutta ja puhtautta. Öljy voi olla kirkasta, utuista, sameaa, kellertävää tai äärimmäisissä tapauksissa maitomaisen valkoista. Vain silmämääräisesti tarkastelemalla on kuitenkin mahdollisuus päätyä täysin väärään diagnoosiin öljyn puhtaudesta tai vesipitoisuudesta. Kirkkaalta näyttävä öljy voi sisältää runsaasti partikkeleita ja tumma öljy voi olla puhdasta.

2.7.2 Vesipitoisuuden määrittely

Öljyyn sekoittunut vesi voi olla erittäin haitallista itse öljylle sekä koko hydraulijärjestelmälle. Vesi aiheuttaa korroosiota hydraulijärjestelmään ja huonontaa voiteluaineen voiteluominaisuuksia, kuten kuormankantokykyä. Jopa niinkin alhainen vesipitoisuus kuin 400 ppm voi aiheuttaa mineraaliöljyvoidellulla laakerilla 2½ kertaa lyhyemmän eliniän verrattuna 100 ppm vettä sisältävään öljyyn (Rao, 1996, s.230).

Öljyn vesipitoisuuden määrittäminen on suhteellisen helppoa ja menetelmiä on useita, joista osa soveltuu tosin vain vesipitoisuuden karkeaan arviointiin. Seuraavaksi on esitelty yleisimmät vesipitoisuuden mittaussuunnitelmat.

Vesipitoisuuden arviointi räiskymistestillä

Erittäin yksinkertaisessa räiskymistestissä öljyä pudotetaan kuumalle (120°C) pinnalle, jolloin mahdollinen öljyyn sekoittunut vesi saa öljyn räiskymään. Tämä testi on hyvä kyllä/ei-menetelmä havaitsemaan yli 1000 ppm vesipitoisuuksia (Elo, 2001, s.8).

Vesipitoisuuden määrittely tislauksella

Tässä testissä tarvitaan tisluslaitteisto. Alussa näytteeseen lisätään liuotinta, kuten toluenia. Kolonnissa vesi tislautuu öljystä liuottimen mukana. Jäähdyttimen jälkeen liuotin ja vesi tiivistyvät veden painuessa mittalasin pohjalle, josta sen määrä on luettavissa. Tämäkään menetelmä ei ole kovin tarkka ja soveltuu vesipitoisuuksille yli 500 ppm (Elo, 2001, s.8).

Potentiometrinen Karl-Fischer titraus

Perinteisesti Karl-Fischer titraus perustuu veden, jodin, rikkidioksidin, metanolin ja emäksen väliseen hapetus-pelkistysreaktioon. Titrausastiassa on kaksi platinaelektrodia, joiden välillä on potentiaaliero. Potentiaaliero esiintyy niin kauan kuin liuoksessa on vesimolekyylejä. Veden reagoitua titrantin kanssa alkavat ionit kuljettaa virtaa ja potentiaaliero tasoittuu. Vesipitoisuus saadaan määritettyä käytetyn titrantin tilavuuden perusteella ja käyttökelpoinen mittausalue volumetrisessä titrauksessa on 10 ppm:stä ylöspäin. Kokemuksen mukaan jotkut öljyn lisäaineet voivat vääristää tulosta (Elo, 2001, s.8).

On-line vesimittaus infrapunamenetelmällä

Infrapunamenetelmällä mittaus perustuu veden ominaisuuteen absorboida tiettyä infrapunasäteilyn aallonpituutta. Mittaus tapahtuu kahdella eri aallonpituudella, joista toisella vesi absorboi infrapunasäteilyä ja toisella absorptiota ei tapahdu. Mittaamalla eri ilmaisimien tasojen eroa voidaan laskea näytteen vesipitoisuus. Menetelmällä voidaan määrittää sekä vapaana, että sitoutuneena oleva vesipitoisuus, mutta haittapuolena on tarve kalibroida laite erikseen jokaiselle öljytyypille (Elo, 2001, s.9).

On-line vesimittaus upotettavalla anturilla

Mittarilla nähdään öljyn suhteellinen kosteus prosentteina kyllästymispisteeseen, jossa öljyyn muodostuu vapaata vettä. Mittaus perustuu anturin kalvon resistanssin muutokseen vesipitoisuuden mukaan. Menetelmällä ei nähdä öljyssä olevaa todellista vesimäärää, mutta sillä voidaan määrittää marginaali, jonka jälkeen haitallista vapaata vettä alkaa muodostumaan järjestelmään (Elo, 2001, s.9).

2.7.3 Partikkelilaskenta

Partikkelilaskenta on tarpeellinen öljyn kunnonvalvonnan testi useissa hydraulijärjestelmissä, erityisesti volyymiltään suurissa sovelluksissa. Öljyn puhtausvalvonnan eri menetelmiä ovat ainakin membraani-suodatustekniikka, paine-eron mittaukset ja optiset hiukkaslaskimet. Laskennan tuloksia voi tulkita monella tavalla, kuten jakamalla partikkelit eri kokoluokkiin ja arvioimalla partikkelimäärän haitallisuutta kokoluokan perusteella tai käyttämällä esimerkiksi ISO-standardin mukaisia puhtausluokkia.

Membraani-suodatustekniikka

Menetelmää voidaan käyttää sekä pullonäytteen että suoraan painelinjasta otettavan näytteenoton yhteydessä. Näyte suodatetaan membraanin läpi ja suodattimen pinnalle jääneitä partikkeleita tarkastellaan mikroskoopin avulla (Elo, 2001, s.9).

Paine-eron mittaus

Paine-eron mittaukseen käytetään epäpuhtausanalysointia, joka mittaa paine-erojen muutosta ajan funktiona. Paine-erot mitataan eri tiheyksisten mesh-suodattimien yli käyttäen vakiovirtausta (Elo, 2001, s.9).

Optinen hiukkaslaskenta

Optiset hiukkaslaskimet ovat yleisimpiä öljyn epäpuhtauden mittalaitteista, mikä johtuu varmasti osaltaan niiden nopeudesta ja helppokäyttöisyydestä. Hiukkaslaskimella saadaan selville öljyssä olevien hiukkasten lukumäärät eri kokoluokissa, mutta se ei kerro mitä materiaalia hiukkaset ovat. Helppokäyttöisyydestään huolimatta myös optisella hiukkaslaskennalla voidaan saada merkittäviä virheitä mittaustulokseen, joten tämä kuten useimmat muutkin öljyn analysoinnin menetelmät, vaatii perehtyneisyyttä käytettyyn tekniikkaan ja tulosten tulkintaan (Elo, 2001, s.9).

Mikroskopointi

Optinen mikroskopointi eli manuaalinen hiukkaslaskenta on vanhin menetelmä analysoida öljyn hiukkaspitoisuuksia. Mikroskooppia käytetään edelleen laajalti täydentämään automaattisilla hiukkasanalysointilaitteilla suoritettavaa laskentaa. Mikroskoopilla voidaan havaita näytteestä partikkeleiden koot, muodot ja värit. Havaintojen perusteella on mahdollista määrittää tietyn hiukkasen alkuperä ja arvioida koneen kulumisen tilaa (Davies, 1998, s.440).

Mikroskooppia voidaan hyödyntää myös ferrografiassa, eli hiukkasten magneettisuuden tutkimisessa. Suuri osa koneiden kulumisen seurauksena syntyneistä hiukkasista on ferromagneettisia ja hiukkasten magneettisuuden perusteella voidaan niitä erotella tutkittavasta näytteestä (Elo, 2001, s.10).

2.7.4 Öljyn neutraloitumisluku, TAN/TBN

Kokonaishappolukua, Total Acid Number (TAN), käytetään yleensä havaitsemaan sekä öljyn pitkäaikaista altistumista korkeille lämpötiloille että öljyn hapettumista. Pitkälle edennyt voiteluaineen hapettuminen nostaa merkittävästi voiteluaineen viskositeettia aiheuttaen korroosiota ja voiteluongelmia.

Kokonaisemäsluku, Total Base Number (TBN), kertoo voiteluaineen emäksisyyden ja sitä käytetään erityisesti kampikammioiden voiteluaineen analysointiin. Emäksisyys syntyy voiteluaineeseen jo valmistusvaiheessa, mutta esimerkiksi polttomoottorin kampikammiossa hapokkaan polttoaineen vaikutuksesta syntyvät hapot kuluttavat emäkset loppuun. Kun emäksisyys on vähentynyt 50% alkuperäisestä, tulisi voiteluaine vaihtaa korroosion estämiseksi (Rao, 1996, s.230).

Yleisesti käytössä on kaksi tapaa määrittää eri neutraloitumisluvut. Yksinkertaisinta on käyttää väri-indikaattoria titrauksessa, jolloin saadaan määritettyä happoluku. Tummillä öljyillä menetelmä ei toimi, koska värin muutoksia on vaikea havaita. Toinen tapa on titrata näyte, jolloin saadaan määritettyä sekä happo- että emäsluku.

Neutraloitumisluvun määrittämisestä ei ole sanottavaa hyötyä, jos ei tiedetä analysoidun öljyn lisäaineistuksen vaikutusta mittaustulokseen sekä alkuperäistä neutraloitumislukua (Elo, 2001, s.9).

2.7.5 Viskositeetti

Öljyn viskositeetilla tarkoitetaan virtausvastuksen eli sisäisen vastuksen määrää. Hydraulikkaöljyn viskositeetti ilmoitetaan tavallisesti kinemaattisen viskositeetin avulla. Kinemaattisen viskositeetin (yksikkö cSt) arvo voidaan määrittää esimerkiksi Canon-Fenske kapillaari –viskositeettiputkella. Mittauksessa annetaan öljyn valua omalla painollaan ohuen lasikapillaarin läpi. Öljyn läpivirtausaika mitataan ja sitä verrataan tunnetun kalibrointiöljyn läpivirtausaikaan.

Alhaisissa lämpötiloissa käytettävien öljyjen viskositeetti-arvona käytetään tavallisesti dynaamisen viskositeetin arvoja (Pa s). Dynaaminen viskositeetti voidaan määrittää esimerkiksi CCS-kylmäkäynnistyssimulaattorilla. CCS –laitteessa on liukulaakeria jäljittelevä staattori-roottoriyhdistelmä, jonka väliin tutkittava öljynäyte syötetään. Laite mittaa roottorin pyörimistä vastustavan momentin ja sen avulla määritetään dynaaminen viskositeetti (Elo, 2001, s.10).

2.7.6 Spektrometriset kulumametallien ja lisäaineiden mittaukset

Erilaisia spektrometrejä on käytetty öljyn analysointiin jo 50 vuoden ajan. Tärkeimmät kulumametallien ja lisäaineiden seurantalaitteet ovat atomiabsorbtiiospektrometri (AAS) ja atomiemiissiospektrometri (ICP). Hienoista nimistään huolimatta näitä laitteita käytetään nykyään jo tavallisessa teollisuuden kunnonvalvonnassa.

ICP –tekniikalla voidaan öljynäytteestä identifoida metalleja, mineraaleja ja kemiallisia yhdisteitä, joten sillä voidaan määrittellä öljyn ja koneen kunnon lisäksi öljyn lisäaineiden pitoisuuksien riittävyttä kyseessä olevaan käyttötarkoitukseen. Spektrometriset menetelmät vaativat vertailuarvoiksi tarkat tiedot analysoidun voiteluaineen koostumuksesta (Davies, 1998, s.440).

2.8 Teräsrakenteiden kunnonvalvonta NDT –menetelmillä

Ainetta rikkomattomat tarkastusmenetelmät (Non Destructive Testing, NDT) kuuluvat konediagnostiikkaan. Tarkastus voidaan suorittaa valmistuksen jäljiltä vastaanottokokeissa tai käytön aikana ennaltaehkäisevän kunnossapidon työkaluna. NDT –tarkastusta voi käyttää myös jo syntyneen vaurion paikallistamisessa, korjaamisessa ja syiden selvityksessä.

NDT –tarkastuksen ensimmäinen tavoite on löytää epäjatkuvuuskohdat, kuten halkeamat ja korroosion tai eroosion aiheuttamat ohentumat. Toinen tavoite on kartoittaa epäjatkuvuuden dimensiot. Tarkastuksen tuloksia hyödynnetään seuraavaksi murtomekaniikan laskuissa arvioimaan kriittinen vikakoko ja vian etenemisnopeus. Vian arvioimiseksi tarvitaan lähtötietoina vian dimensiot, jännitysrasitukset ja tutkittavan materiaalin murtumissitkeys.

Tärkeä asia NDT-tarkastusta suoritettaessa on tietää, mitä epäjatkuvuuskohteita oikeastaan ollaan hakemassa. Eri menetelmiä yhdistämällä nostetaan tarkastustulosten luotettavuutta ja näin ollen NDT-menetelmät eivät kilpaile keskenään vaan täydentävät toisiaan. Seuraavaksi esitellään joitakin Larox painesuodattimien kunnonvalvontaan mahdollisesti soveltuvia NDT-menetelmiä (Åström, 2003, s.2).

2.8.1 Silmämääräinen tarkastus

Silmämääräinen tarkastus on vanhin ja eniten käytetty menetelmä myös NDT-tarkastuksissa. Ihmissilmän tarkkuus on hyvä ja kun siihen yhdistetään kokemusperäistä tietoa, jota voi myös tallentaa tietokoneelle, on tuloksena tehokas ja joissain tapauksissa täysin riittävä tarkastusmenetelmä. Ihmissilmä pystyy havaitsemaan taustasta värillisesti eroavan viivan, jonka leveys on hiuskarvan halkaisijan luokkaa, eli noin 50 µm. Pyöreitä, taustasta väriltään eroavia pisteitä silmä havaitsee halkaisijasta 100 µm ylöspäin.

Silmämääräistä tarkastusta helpottavat erilaiset suurennuslasit ja peiliasetelmat, joilla päästään katsomaan esimerkiksi kulmien taakse ja ahtaisiin paikkoihin, joihin ei muutoin saa katsekontaktia. Myös endoskoopeilla, TV-tarkastusmenetelmillä ja videoskoopeilla suoritettu tarkastus on silmämääräistä tarkastusta käyttäen apuna uudempaa teknologiaa (Åström, 2003, s.6).

2.8.2 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastus on ferromagneettisten aineiden pintaan ulottuvien säröjen etsintämenetelmä, jota käytetään lähinnä hitsien tarkastukseen ja lisäksi kapeiden epäjatkuvuuskohtien, kuten väsymissäröjen etsintään.

Magneettijauhemenetelmässä muodostetaan tarkastettavaan pintaan voimakas magneettinen vuo käyttäen iesmagnetointilaitetta, megnetointikelaa tai virtamagnetointilaitetta. Vuo pysyy kappaleessa, jos pinta on ehjä, mutta ”vuotaa ulos” epäjatkuvuuskohdista. Kun tällaiseen vuotokohtaan sirotellaan rautaoksidishiukkasia, kerääntyvät hiukkaset vuotokohdan ympärille huomattavasti säröä leveämmälle alueelle, jolloin särön havaitseminen tulee mahdolliseksi. Käytössä on värillisiä ja fluoresoivia tarkastusaineita, joista fluoresoivan aineen herkkyys on parempi, mutta se vaatii tarkastukseen UV-valoa.

Magneettijauhetarkastuksella on mahdollista havaita säröjä pituudeltaan luokkaa millimetri leveyden ollessa 0,01 mm. Vaikka menetelmä on tarkoitettu pinnalla olevien säröjen etsimiseen, voidaan myös maalattuja ja päällystettyjä pintoja yleensä tarkastaa edellyttäen, että pintakalvo ei ole yli 100 µm paksuinen (Åström, 2003, s.7).

2.8.3 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus on NDT-menetelmä, jota käytetään pintaan avautuvien vikojen havaitsemiseen. Tarkastusmenetelmä soveltuu kaikille aineille, jotka eivät luonnostaan ole huokoisia.

Tunkeumanestetarkastuksessa tarkasteltavaan pintaan levitetään värillistä tai fluoresoivaa nestettä, joka tunkeutuu epäjatkuvuuskohtiin. Neste puhdistetaan pois tietyn vaikutusajan kuluttua, pinta kuivataan ja seuraavaksi levitetään ohut kehitekerros, joka imee epäjatkuvuuskohtiin jääneen nestetilavuuden saaden aikaan särön havaitsemisen mahdollistavan suurenoksen. Suotuisissa oloissa menetelmällä havaitaan pintasäröjä pituudeltaan 1 mm ja leveydeltään 0,1 µm.

Tunkeumanestetarkastus on magneettijauhemenetelmää herkempi ulkopuolisille vaikutuksille ja suoritustapavaihteluille, minkä vuoksi pintamenetelmistä tulisi käyttää

ensisijaisena magneettijauhetarkastusta, jos tutkittava aine vaan on ferromagneettinen (Åström, 2003, s.9).

2.9 Ultraäänitekniikka

Ultraäänitekniikka perustuu ihmisen kuuloalueen yläpuolella olevan äänen mittaukseen. Käytetyin ultraäänitekniikan sovellus on vuotojen etsinnän alueella, mutta ultraäänitarkastus kuuluu myös NDT-menetelmiin. Ero näiden käyttökohteiden välillä on se, että pääasiallisesti vuotojen etsintään kehitetyssä tekniikassa kuunnellaan mitattavan kohteen synnyttämää ultraääntä, kun taas NDT-ultraäänitarkastuksessa tarkastuslaitteisto lähettää ultraääntä tarkastettavaan kappaleeseen ja mittaa lähetetyn äänen heijastumia.

2.9.1 Ultraäänitekniikka NDT-tarkastuksissa

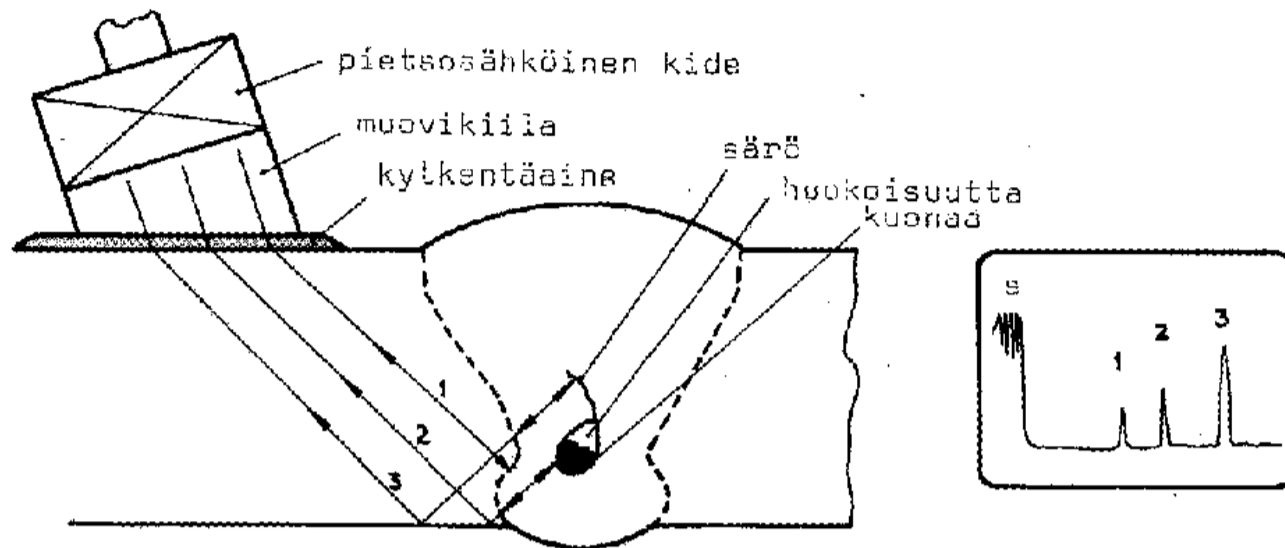
NDT-ultraäänitekniikassa ääni ei ole tutkittavan kappaleen itse synnyttämää, vaan mittalaite lähettää äänen tutkittavaan kappaleeseen. Ultraäänitekniikassa tutkitaan lähetetyn äänen heijastumista ja muuntumista tutkittavassa kappaleessa äänen kulkiessa lähettimeltä vastaanottimelle. Esimerkiksi epäjatkuvuuskohdat ja rajapinnat heijastavat lähetettyä ultraäänisignaalia. Mittauksissa käytettävät taajuudet sijoittuvat tavallisesti välille 250 kHz – 25 MHz (Davies, 1998, s.127).

Puhuttaessa NDT-ultraäänimittauksesta tarkoitetaan yleisesti paksuusmittausta, jossa mitattavan kohteen paksuus määräytyy rajapinnasta heijastuvan ultraäänien mittaukseen. Mitattu paksuus on keskiarvo vaikutusalueen sisällä olevasta paksuudesta, joten paikallisia paksuuseroja kuten kuoppakorroosiota ei voida havaita.

NDT-ultraäänitarkastus käsitteenä sisältää myös aineen volumetrisen tarkastamisen. Volumetrisessä ultraäänitarkastuksessa haetaan pinnasta käsin mahdollisia äänenheijastajia, joihin toimivat lähes kaikki epäjatkuvuuskohdat. NDT-tarkastajan vastuulle jää tulosten tulkitseminen ja määrittelemisen, onko kysymys viasta vai onko heijastus geometriasta johtuva. Mittaus ja tulosten tulkinta vaativatkin vankkaa tietämystä käytetystä menetelmästä.

Ultraäänitarkastus soveltuu useimmille prosessiteollisuuden aineille alkaen noin 5 mm paksuudesta ylöspäin. Poikkeuksena voidaan pitää austeniittista terästä, joka varsinkin

valetussa ja hitsatussa muodossa vaimentaa ultraääntä voimakkaasti. Kuvassa 27 on esitetty ultraäänitarkastuksen periaate.



Kuva 27. Periaatekuva hitsin ultraäänitutkimuksesta (Åström, 2003, s.11)

2.9.2 Ultraäänitekniikka vuotojen etsinnässä

Tarkastettavan kohteen lähettämän ultraäänen mittaukseen kehitetyt menetelmät toimivat hieman matalammilla taajuuksilla kuin NDT-tarkastusten menetelmät. Tavallisimmin taajuusalue on 20 – 100 kHz.

Kun kaasu tai neste purkautuu pienestä aukosta, syntyy korkeataajuisia ääntä, joka voidaan vastaanottaa ultraäänianturein ja muuttaa taajuusmuuntimella kuuluvaksi ääneksi. Ultraääneen perustuvia vuodonilmaisimia käytetään putkistojen, venttiilien ja erilaisten prosessiteollisuuden laitteiden tarkastukseen (Davies, 1998, s.51). Ultraääntä syntyy myös korona-ilmion kautta tapahtuvissa sähköisissä purkauksissa ja sopivalla suuntausanturilla voidaan esimerkiksi sähkölaitteiden purkauksia havaita jopa useiden kymmenien metrien päästä (Åström, 2003, s.11).

Vuotojen etsinnän ohella ultraääntä käytetään nykyisin laakerien kunnon arviointiin. Koska ultraäänitekniikan taajuudet ovat korkeita, ei mittausta häiritsevää taustamelua juurikaan ole. Näin ollen pystytään vika yleensä paikallistamaan tarkasti (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, s.12).

Ultraäänilähettimen avulla voidaan ultraäänitekniikkaa hyödyntää myös esimerkiksi tankkien ja putkistojen liitosten sekä hitsien tarkastuksessa jo ennen laitteen käyttöönottoa

tai tilanteessa jolloin prosessi on seisahduksissa ja tarkastettavat laitteet paineettomia. Ultraäänilähetin sijoitetaan tutkittavan laitteen sisään, jolloin mahdollisista vuotokohdista ”vuotaa” ultraääntä, joka havaitaan ultraäänimittalaitteella (Davies, 1998, s.52).

3 KUNNONVALVONNAN MENETELMIIN SOVELTUVIA TYÖKALUJA

Ennakoivassa kunnonvalvonnassa käytetyt työkalut voidaan karkeasti jakaa perinteisiin mekaanisiin aistihavainnoinnin apuvälineisiin ja nykyaikaisiin elektroniikkaa ja tietotekniikkaa sisältäviin laitteisiin. Edelleen jakoa voidaan tehdä kannettavien ja kiinteiden kunnonvalvonnan työkalujen kesken. Painopisteen ollessa kannettavissa työkaluissa jätetään kiinteät tai muuten isokokoiset työkalut ja laitteistot vähemmälle huomiolle.

Perinteisiä apuvälineitä, kuten laakereiden kuunteluun käytettävät puutikku tai ruuvimeisseli, on myös turha tarkastella samalla viivalla dataloggereiden tai elektronisten stetoskooppien kanssa. Tämä ei tarkoita sitä, että perinteiset menetelmät olisivat toimimattomia, mutta liittyvät kuitenkin enemmän korjaavaan-, kuin ennakoivaan kunnossapitoon. Ehkä suurin ongelma vaikkapa laakerin kuuntelussa puutikun avulla on tulosten tulkinnanvaraisuus, eli mittauksen lopputulos on täysin riippuvainen mittauksa suorittavasta henkilöstä ja hänen kyvystään kuulla laakerivaurioita. Jopa mittauksessa käytettävän puutikun vaihtaminen voi muuttaa mittauksen lopputulosta.

3.1 Aistihavainnoinnin apuvälineet

Teollisuuden kunnonvalvonnassa joudutaan usein tarkastamaan hankalasti luoksepäästäviä, meluisia ja valaistukseltaan heikkoja kohteita. Ihmisen aistien suuresta herkkyydestä huolimatta tällaisissa tilanteissa erilaiset apuvälineet lisäävät havaintojen luotettavuutta, sekä säästävät usein huomattavasti aikaa ja vaivaa.

Silmämääräisen tarkastuksen apuvälineitä ovat perinteisten peilien lisäksi erilaiset endoskoopit, joiden tekniikka mahdollistaa nykyään jopa kohteen kolmiulotteisen näkemisen. Kuuntelun apuvälineitä tyypillisimmillään ovat stetoskoopit, jotka ovat yleisimmin elektronisia, kuulokkeilla varustettuja malleja.

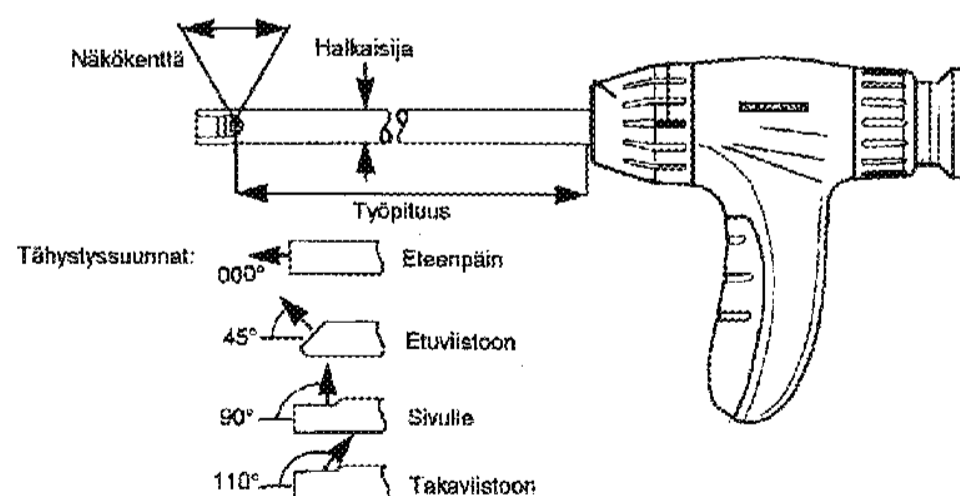
3.1.1 Endoskoopit

Endoskoopit ovat laajalti käytettyjä diagnostisia työkaluja lääketieteellisistä sovelluksista koneiden kunnossapitoon. Endoskopiassa itse tarkastuksen ja kunnan arvioinnin suorittaa ihmissilmä, joten endoskoopit ovat periaatteessa ainoastaan apuväline visuaaliseen NDT-tarkastukseen. Teollisessa mielessä endoskoopit ovat optisia laitteita, joiden avulla pystytään tarkastamaan koneiden osia, joihin käsiksi pääsy muutoin vaatisi rakenteiden purkamista (Davies, 1998, s.138).

Vaikka endoskoopit ovat kaikki toimintaperiaatteeltaan samanlaisia, jakaantuvat ne rakenteensa ja ominaisuuksiensa perusteella kolmeen ryhmään. Jäykkävartista endoskooppia kutsutaan boreskoopiksi, taipuisalla varrella varustettua fiberoskoopiksi ja videokuvauksominaisuuksilla varustettua fiberoskoopiksi videoskoopiksi.

Boreskoopit

Boreskooppi on optinen laite, jossa valo viedään valokuituja pitkin skoopin kärkeen ja siten valaistetaan tähystettävä kohde. Näkymä tuodaan silmälle jäykän skoopin läpi linsseillä ja prismoilla ohjaten. Boreskooppi on endoskooppivaihtoehdoista edullisin ja silti se omaa parhaan erottelukyvyn. Boreskoopeilla pystyy myös näkemään huomattavasti kauemmas kuin fiberoskoopeilla. Boreskoopin käyttöä rajoittaa taipumaton varsi, joten kohteeseen on oltava suora reitti. Tyypillisimpiä käyttökohteita ovat paineastioiden ja vaihdelaatikoiden tarkastukset.

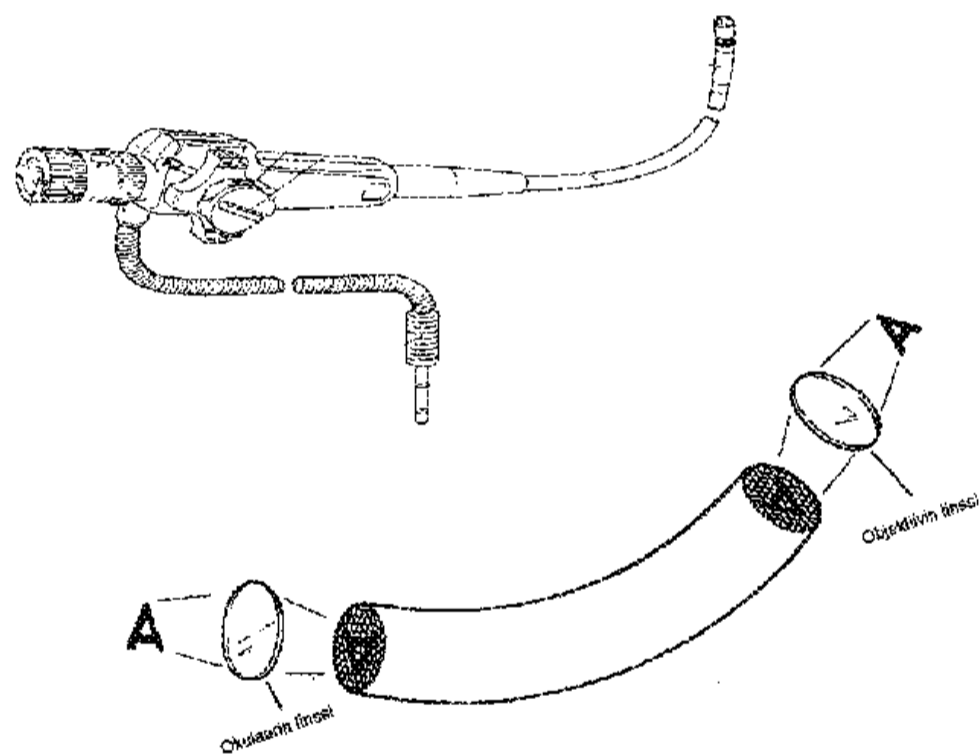


Kuva 28. Boreskoopin tähystyssuunnan vaihtoehdot (Talvitie, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Fiberoskoopit

Fiberoskoopissa sekä valo että kuva kuljetetaan valokuituja pitkin, joita fiberoskoopin kaapelissa on kymmeniä tuhansia. Kuidun halkaisija on vain noin 10 μm eli kymmenesosa hiuksen halkaisijasta. Fiberoskoopilla ei nähdä niin kauas kuin boreskoopilla, mutta toisaalta taipuisa varsi mahdollistaa kohteen tarkastelun useammankin mutkan ja nurkan takaa. Ahtaissa paikoissa etenemistä auttaa kädensijasta ohjattavissa oleva kärkiosa. Fiberoskooppien halkaisijat ovat pienimmillään 0,6 mm ja pituudet maksimissaan 3 m.

Tyypillisimpiä käyttökohteita ovat erilaisten putkistojen tarkastukset, joissa määritetään korroosiota, tukkeumia ja hitsausten kuntoa. Fiberoskooppia käytetään myös koneiden ja laitteiden tarkastuksessa erityisesti silloin, kun on päästävä useamman kuin yhden mutkan taakse.



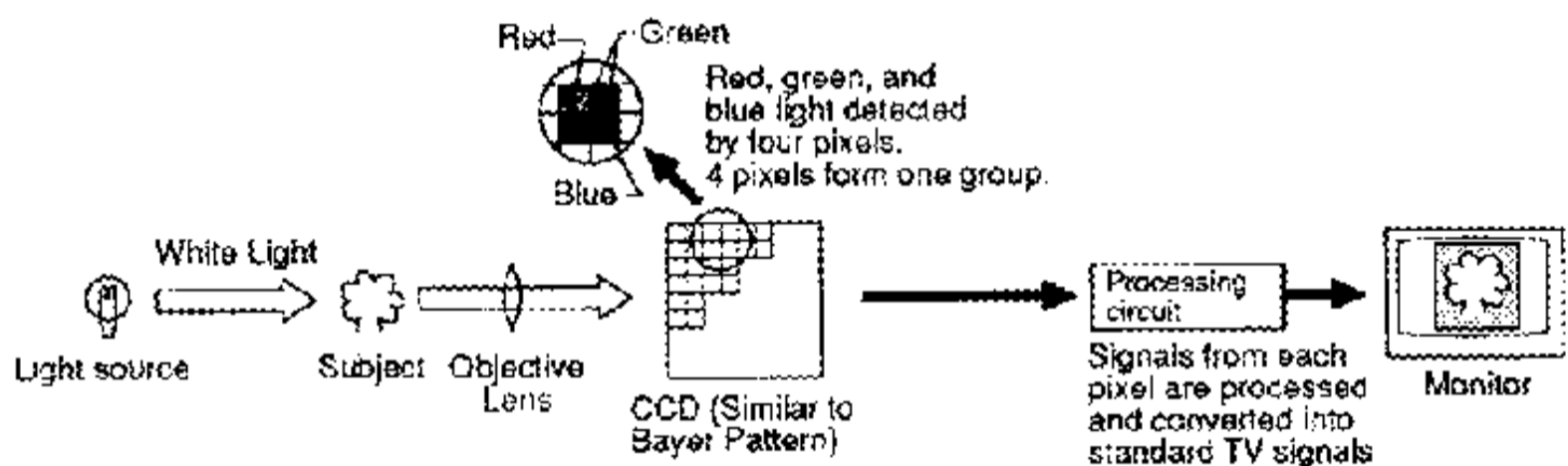
Kuva 29. Fiberoskoopin toimintaperiaate (Talvitie, 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Videoskoopit

Videoskooppi on taipuisa ja rakenteeltaan muutenkin fiberoskooppia vastaava lukuunottamatta varsinaista kuvansiirtoa. Videoskoopissa kuva siirretään alusta loppuun sähköisesti skoopin kärjessä olevalta CCD kennolta monitorille asti.

Videoskoopilla kuvan tarkastelu tapahtuu aina erillisestä monitorista, joten se on yleensä kooltaan muita endoskooppityyppejä suurempi laitteisto. Videoskoopeilla on kuitenkin fiberoskooppeja parempi erottelukyky ja lisäksi niiden valoteho ei heikkene sähköisestä kuvansiirrosta johtuen. Näin ollen on mahdollista tehdä huomattavan pitkällä, jopa 16 metrin varrella varustettuja endoskooppeja, joiden varren halkaisija on vain 6 mm.

Videoskooppeja käytetään erityisesti pitkää työpituuksia vaativiin kohteisiin, kuten putkistojen tarkastuksiin. NDT –tarkastuksissa videoskooppi mahdollistaa erinomaisen resoluutionsa johdosta pienienkin säröjen havaitsemisen.



Kuva 30. Videoskoopin toimintaperiaate (Talvitie, 2003, Endoskoopit kunnonvalvonnassa –CD-ROM)

3.1.2 Elektroniset stetoskoopit

Elektroninen stetoskooppi välittää tarkasteltavan laitteen värähtelyn ja melun metallisen anturipuikon kautta muuttimeen, jossa värähtely muuttuu sähköiseksi signaaliksi. Sähköinen signaali muokataan ja vahvistetaan kuultavaan muotoon stetoskoopin kahvaosassa olevan elektroniikan avulla. Stetoskoopilla kuultava taajuusalue sijoittuu ihmisen kuuloalueelle, sillä se on vain ääntä vahvistava laite, eikä kykene taajuuden muuntamiseen ultraäänimittareiden tapaan.

Elektronisessa stetoskoopissa on yleisimmin kaksi liitintää vahvistettua signaalia varten, joista toinen on kuulokkeille ja toinen nauhurille. Stetoskooppien mukana toimitetaan yleensä vertailunauha, jonka avulla kokematon kuuntelija voi tutustua eri kuntoisten laakereiden ja eri toimintavaiheiden aiheuttamiin ääniin.

3.1.3 Ultraäänimittalaitteet

Vuotojen havaitsemiseen kehitetyt ultraäänilaitteet ovat periaatteessa ultraäänitaajuuksilla toimivia stetoskooppeja, tekniikka on tosin erilaista, mutta laitteen koko, käyttö ja usein muotokin ovat hyvin samankaltaisia stetoskooppiin verrattuna.

Ultraäänimittalaitteet toimivat joko kosketuksettomasti ns. skannausantureilla tai stetoskooppien tapaan kosketuksellisesti metallisen anturipuikon välityksellä. Yleensä kosketuksettomaan mittaukseen pystyviin laitteisiin voi asentaa myös kosketuksellisen mittauksen mittapään metallipuikkoineen. Usein lisävarusteena hankittavan ultraäänilähettimen myötä ultraäänimittaukselle saadaan lisää käyttökohteita, kuten säiliöiden tiiviyyden tarkastukset (Davies, 1998, s.51).

3.2 Värähtelymittauksissa käytettävät laitteet

Perinteisesti värähtelyjä on mitattu, tai pikemminkin arvioitu, tunto- ja kuuloaistia käyttäen. Ruuvimeisseliä ”stetoskoopina” ja värähtelyn välittäjänä käyttävä ja tällä tavoin laakerin kuntoa arvioiva huoltomies ei ole vielä nykyäänkään kovin harvinainen näky. Siinä vaiheessa, kun tarkastuksen tulokset halutaan raportoida tarkkoina ja vertailukelpoisina lukuarvoina, tarvitaan jo uudenaikaisempia menetelmiä ja laitteita.

Nykyaikaisen värähtelyanalyysin muodostaminen vaatii usein monimutkaisia laskutoimituksia, signaalin muokkausta ja tiedonkäsittelyä, jotka on järkevintä jättää itse mittausslaitteen tai värähtelyanalyysiin tarkoitetun tietokoneohjelman suoritettavaksi. Mittalaitteet jaetaan signaalin- ja tiedonkäsittelyn perusteella neljään tyyppiin.

Tyyppi 1

Kokonaistasoa mittaavat laitteet. Mitattua värähtelyä kuvaa yksi tunnusluku.

Tyyppi 2

Korkeataajuisia, tyypillisesti yli 5000 Hz värähtelyä mittaavat laitteet. Mitattua värähtelyä kuvaa korkeintaan kaksi tunnuslukua.

Tyyppi 3

Mittalaitteet, joissa on valittava taajuusalue. Mitattu värähtely voidaan esittää aika- ja taajuustasossa.

Tyyppi 4

Laitteet ja ohjelmat sisältävä mittausjärjestelmä, joka tekee vianmäärityksen ja ennusteen koneen jäljellä olevasta turvallisesta käyttöajasta.

Esimerkkejä mittalaitteiden käytöstä on annettu taulukossa 2. Mittalaitteet ja –järjestelmät voivat myös olla ominaisuuksiltaan useamman tyyppin yhdistelmä.

Taulukko 2. Esimerkkejä eri mittalaitetyyppien käytöstä (Standardi PSK 5710, Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta)

Kohde	Valvottava komponentti	Valvottava menetelmä tai mitattava suure	Mittalaitetyyppi	Kunnonvalvonta	Vianmääritys	Suojaus
Pumppu	--	Tärinärasitus	1	x		x
	Kytkin	Stroboskooppi		x	x	
	Juoksupyörä	Spektri	3	x	x	
	Tiiviste	Lämpötila, Akustinen emissio		x x		
Ruuvi-kompressori	--	Tärinärasitus	1	x		x
	Juoksupyörä	Spektri	3	x	x	
Sähkömoottori	--	Tärinärasitus	1	x		x
	Roottori	Virrankulutus	1	x		x
		Virtaspektri	4	x	x	
	Staattori	Spektri Lämpötila	3	x x	x	 x
Tela	--	Tärinärasitus	1	x		x
	Profiili	Tahdistettu keskiarvostus aikatasossa	3	x	x	
	Hitaasti pyörivä vierintälaakeri	Verhokäyrä	3	x	x	
Vaihte	--	Tärinärasitus	1	x		x
	Hammaspyörä	Spektri	3	x	x	
		Tahdistettu keskiarvostus aikatasossa	3	x	x	
		Kepstri	3	x	x	
		Kulumishiukkasanalyysi				x
	Laakeri	Spektri	3	x	x	

Nykyään suuntaus on lähinnä tyyppin 4 laitteiden vikadiagnostiikkaan, eli mittalaitte kertoo suoraan mittauksen jälkeen tulokset ja antaa tunnusluvut esimerkiksi koneen kunnosta ja voitelutilanteesta (Standardi PSK 5710, Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta).

3.3 Värähtelymittausten anturointi

Värähtelyn määrittelyssä ihmisen aistit ovat hyvin subjektiivisia, jonka vuoksi on usein tarpeen saada tarkkoja lukuarvoja värähtelyn tasosta. Värähtelyanturit ovat ihmisen tuntoaistia herkempiä, joten niillä pystyy havaitsemaan suuremman taajuusalueen ja pienemmät taajuuden muutokset.

Täysin mekaanisia värähtelyn mittauslaitteita käytetään vain tapauksissa, joissa mitattavan kohteen värähtelyn amplitudi on suuri ja värähtelytaajuus pieni. Tällaiset värähtelyn mittauslaitteet (anturit) eivät yleensä pysty seuraamaan nopeampaa värähtelyä, koska niiden rakenteeseen kuuluu liikkuvia massoja ja anturin osien välillä esiintyy kitkavoimia ja vaimennusta. Kun täysin mekaanisilla mittalaitteilla on vielä taipumus muutta oman liikkuvan massansa vuoksi mitattavan kohteen värähtelyarvoja, on yleisesti päädytty käyttämään värähtelyantureita, jotka muuntavat mitattavan kohteen mekaanisen liikkeen sähköiseksi signaaliksi (Lipovszky, 1990, s.34).

3.3.1 *Kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa käytettävät anturityypit*

Koneen värähtelyä voidaan mitata kolmena eri suureena, siirtymänä eli poikkeamana, nopeutena ja kiihtyvyytenä. Värähtelysuureita voidaan derivoida tai integroida, jolloin saadaan muutettua yksi näistä mittaussuureista toiseksi ja tällä tavalla voidaan aikaansaada myös kokonaan uusia suureita, kuten kiihtyvyyden derivaatat.

Värähtelyn mittaus siirtymänä ilmaisee kohteen sijainnin suhteessa vertailupisteeseen, mittaus nopeutena ilmaisee kappaleen kulkeman siirtymän tietyn ajan kuluessa ja mittaus kiihtyvyytenä ilmaisee kappaleen nopeuden muutoksen tietyn ajan kuluessa. Näille kolmelle mittaussuureelle on omat toisistaan selvästi poikkeavat anturinsa (Riutta, 2003, s.4).

Kiihtyvyydsanturit

Kiihtyvyydsanturit ovat pienikokoisia, rakenteeltaan monimutkaisia, mutta toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia värähtelymittausantureita. Kiihtyvyydsantureissa ei ole lainkaan liikkuvia osia ja näin ollen anturi ei menetä tarkkuuttaan kovin nopeasti. Kiihtyvyydsanturin pääkomponentti on pietsosähköinen kide, joka on kiinnitetty anturikuoreen. Kiteen päälle tai sivulle on asennettu massa, joka puristaa kidettä. Puristus synnyttää kiteeseen varauksen, joka muuttuu massan liikuessa kiihtyvyydsvoimien

vaikutuksesta. Varaus johdetaan anturin sisäiseen tai ulkoiseen varausvahvistimeen, jossa se muutetaan jännitesignaaliksi.

Kiihtyvyysanturin mittausalue on tyypillisesti noin 2 Hz – 5000 Hz, mutta kiinnitystapa ja anturin ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti ylä- ja alarajataajuuksiin. Sopivalla anturilla ja riittävän kireällä ruuvikiinnityksellä voidaan mitata jopa yli 20000 Hz taajuuksia. Värähtelymittauksissa kiihtyvyyden mittayksikkö on m/s^2 tai g.

Kiihtyvyysanturilla on ns. asettumisaika, tyypillisesti välillä 1 – 600 s, joka menee mittausta aloitettaessa anturin toipumiseen esimerkiksi asennuksesta aiheutuneesta iskusta. Siirrettävää anturia asennettaessa anturiin kohdistuva isku lamaannuttaa pietsosähköisen kiteen sitä kauemmaksi aikaa mitä kovemmin anturi isketään paikalleen. Toinen häiriö anturiin tulee jännitteen kytkemisvaiheessa. Tämän häiriön kestoon vaikuttaa anturin vahvistimen rakenne ja mittausalueen alarajataajuus. Mitä matalampi taajuus, sitä pitempi asettumisaika (Nohynek, 1996, s.55).

Nopeusanturit

Nopeusanturi on rakentuu kuoren sisällä olevasta käämistä ja sen sisällä anturin päätyihin kiinnitetyistä magneettisista massoista. Anturin ollessa kiinnitettynä mittauspisteeseen, seuraa jousitettu massa viiveellä mittauspisteestä anturikuoreen johtuvaa värähtelyä. Magneettinen massa aiheuttaa anturin käämiin anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, joka voidaan johtaa anturin ulkopuolelle mittaussignaaliksi. Jos nopeus on haluttu mittaussuure, nopeusanturin signaalia ei tarvitse muuntaa tulkitsemista varten.

Nopeusanturin mittausalue on parhaimmillaan 5 – 2000 Hz, mutta alarajataajuuteen vaikuttaa anturin sisäinen resonanssi. Magneetin massasta ja jousen jäykkyydestä riippuen resonanssi voi esiintyä välillä 3 – 12 Hz. Mittausalueen alarajataajuuden tulee olla joitakin hertsejä resonanssitaajuuden yläpuolella. Ylärajataajuuden 2000 Hz saavuttamiseksi tulee kiinnitystavan olla riittävän tukeva. Nopeuden mittayksikkö on mm/s.

Perinteiset nopeusanturit ovat jääneet kehityksessä kiihtyvyysantureille ja niiden käyttö on vähentynyt viime aikoina. Nopeusmittaukseen on kuitenkin kehitetty uusi menetelmä, jossa nopeusmittaus suoritetaan kosketuksettomasti laserin avulla. Menetelmän mittausalue on

laaja, 0 – 20 kHz. Ongelmana on takaisinheijastuminen, mikä vaatii usein heijastavan teipin kiinnittämisen mitattavaan pintaan tai mittalaitteen tuomisen erittäin lähelle kappaletta. Tärinälaserien hinta on lisäksi tällä hetkellä erittäin korkea (Nohynek, 1996, s.56).

Siirtymäanturit

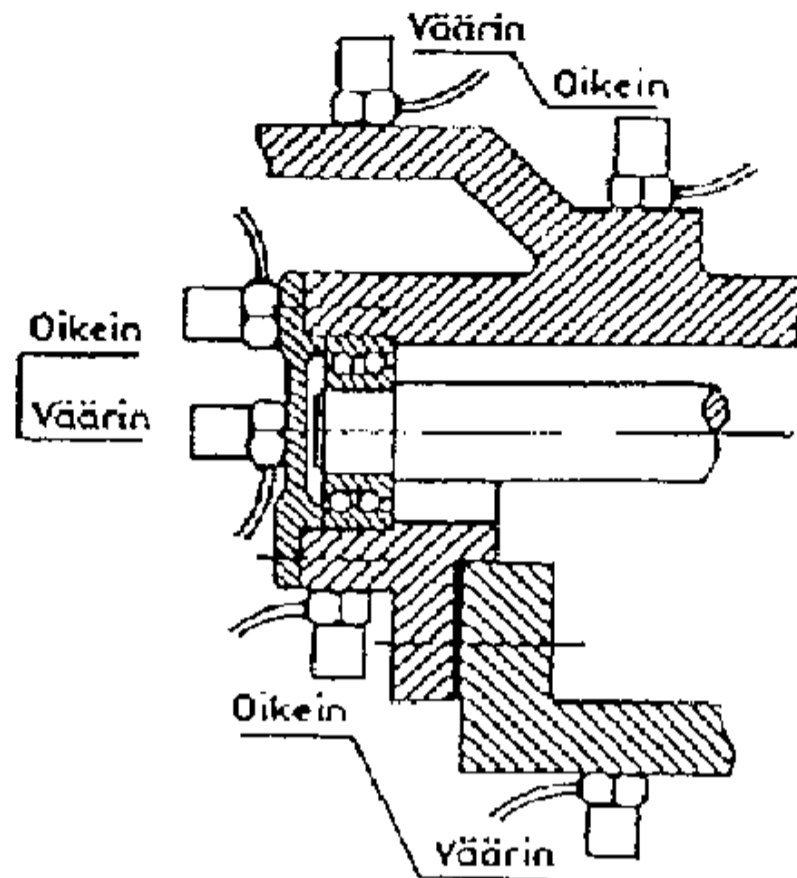
Siirtymäanturit ovat usein pyörrevirta-antureita, joilla mitataan läheltä, tyypillisesti noin 2 mm etäisyydeltä, kiinnityskohdan ja mitattavan kohteen keskinäistä suhteellista liikettä. Anturin päässä oleva kela muodostaa magneettikentän, joka indusoi pyörrevirtoja kohtaamaansa ferromagneettiseen pintaan. Nämä pyörrevirrat aiheuttavat muutoksen anturin päässä olevan kelan jännitteeseen. Anturin ja magneettisen pinnan välimatkan muuttuessa muuttuvat myös pyörrevirrat ja sen myötä kelan jännite. Anturista ulos saatava jännitesignaali kertoo anturin ja mittauspisteen välisen etäisyyden, mittayksikkönä on μm .

Anturilla voidaan mitata myös pinnanmuodon muutoksia, staattista etäisyyttä, akselin ratakäyriä ja lisäksi sitä voidaan käyttää linjauksen ja liukulaakerin kunnonvalvonnassa. Aikaisemmin konevalmistajilla oli tapana ilmoittaa hälytysrajat siirtymän huippuarvona ja huipusta huippuun –arvona. Mittaukset tehtiin koskettavilla siirtymäantureilla, joita ei enää nykyään liiemmin valmisteta. Nykyään voidaan siirtymää mitata myös kiihtyvyy- ja nopeusantureilla integroimalla signaalia, mikä voi tosin aiheuttaa vääristymiä mittauksen matalataajuiseen osaan.

Siirtymäanturimittauksessa käytetty suhteellinen mittaus voi antaa huomattavan erilaisia tuloksia esimerkiksi saman akselin eri laakereissa riippuen mittauspinnan ja anturin kiinnityskohdan värähtelyn vaiheesta. Jos värähtely on samanvaiheista, ei suhteellinen etäisyys pintojen välillä muutu ja mittaus osoittaa pientä värähtelyä, mutta värähtelyn ollessa vastakkaisvaiheista mittaus osoittaa erittäin voimakasta värähtelyä (Nohynek, 1996, s.57).

3.3.2 Mittauspaikan valinta

Absoluuttisessa mittauksessa mittauspiste valitaan siten, että värähtelylähde ja mittausanturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan, minkä vuoksi anturin ja värähtelylähteen välillä tulee olla mahdollisimman vähän rajapintoja kuvan 31 mukaisesti.



Kuva 31. Anturin paikan valinta värähtelymittauksessa (Riutta 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Pyörivissä massoissa värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon, joten mittauspaikat on tarkoituksenmukaista valita laakerointikohdista. Värähtelymittaus suoritetaan pääsääntöisesti säteissuunnassa ja tarvittaessa akselin suunnassa. Iskusysäysmentelmää käytettäessä mittauspisteeksi tulee valita laakerin kuormitusvyöhyke.

Mittauspiste tulee valita siten, että käytettävissä oleva tila sallii anturin vaihdon ja anturin kaapelointi sekä suojaus voidaan toteuttaa luotettavasti. Anturiin kohdistuvat kiihtyvyyss- ja lämpötilarasitukset eivät saa ylittää suositeltuja arvoja. Myös anturin mahdollisesti aiheuttama haitta laitteen käytölle ja huoltotoimenpiteille tulee huomioida (PSK 5702 Standardi: Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen).

3.3.3 Anturin kiinnitys

Valittaessa joko anturin kiinnityspaikkaa tai itse anturia kiinnityspaikan perusteella, tulee tietää seuraavat asiat:

- anturin vaatima kiinnityspinta, pinnan karheus ja tasomaisuus
- anturin geometriset mitat
- ruuvikiinnityksessä käytettävä kiinnitysmomentti

- anturin käyttölämpötila-alue
- anturin massa
- anturin taajuusvaste kiinnitettynä ja kiinnittämättömänä
- anturin kiinnitykseen käytettävien osien kuvaus, kuten mitat, kierre ja rakenneaine
- anturin herkkyys mittaussuuntaa kohtisuoralle liikkeelle

Mittaus tulisi aina suorittaa siten, että anturin taajuusvaste on lineaarinen koko mittausalueella. Kiihtyvyyssantureilla lineaarinen alue päättyy tyypillisesti välillä 0,1 – 3 Hz, jonka alapuolella taajuusvaste lähestyy nopeasti nollaa. Anturin massaa kasvattamalla pystytään madaltamaan alarajataajuutta, mutta silloin myös anturin asettumisaika on suuri.

Erityisesti kiihtyvyyssanturin ylin mittausalue on riippuvainen kiinnitystavasta. Kiinteällä anturilla päästään yleensä korkeimpiin taajuuksiin, kun taas toista ääripäätä edustaa koetinpuikko, jolla ylimmät mitattavat taajuudet ovat luokkaa 500 Hz. Larox painesuodattimien värähtelyvalvonnassa kiinteä anturi tai mittausnipa on käytännössä välttämätön, koska pyörimisnopeudet ovat pieniä ja tästä johtuen mittausajat suhteellisen pitkiä.

Vaarnaruuvilla kiinnitetyllä anturilla pääsee laajimpaan mittausalueeseen ja esimerkiksi nopeakäyntisten vaihteistojen kunnonvalvontaan se on ainoa mahdollinen kiinnitystapa. Toisaalta vaarnaruuvikiinnitys ei ole kätevin tapa siirrettävän anturin kiinnitykseen. Vaarnaruuvien kiinnityspintojen tulee olla puhtaita ja sileäksi työstettyjä, sekä anturin ja kiinnityspinnan reikien kohtisuorassa pintoihin nähden. Ruuvi ei saa yltää kiinnitysreiän pohjaan.

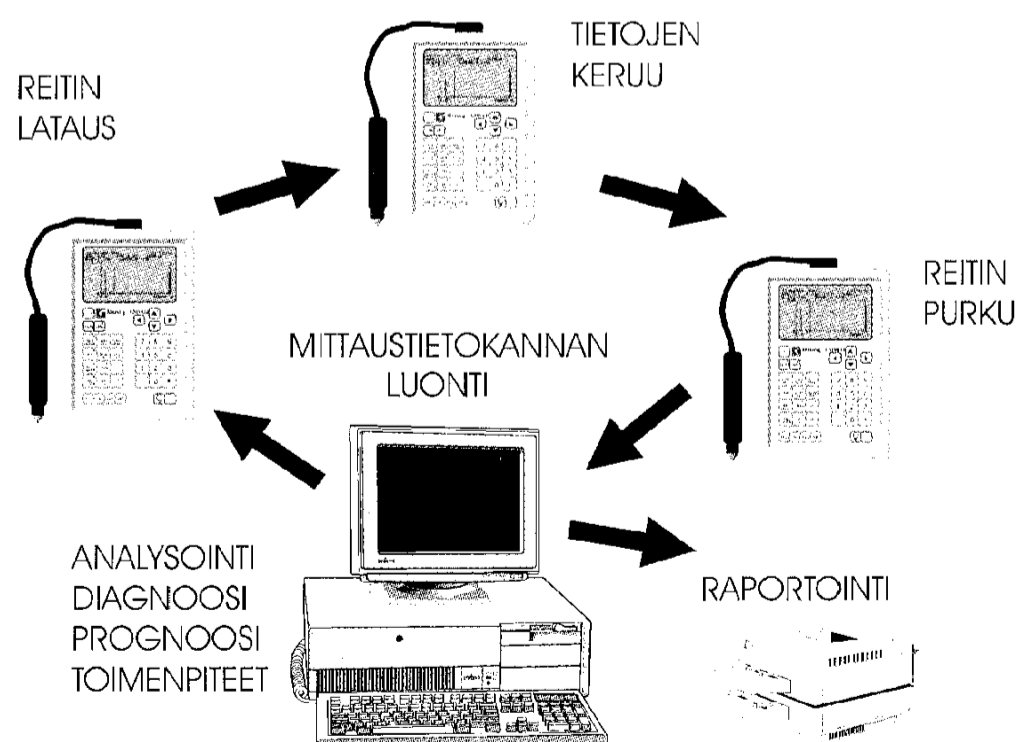
Mittaustoimintaan standardisoitua nippaa ei ole vielä olemassa, mutta laitevalmistajat ovat kehittäneet toisiinsa nähden melko samantyyppisiä ratkaisuja. Nipan tarkoitus on tuoda mittauspiste esille ja tarjota mahdollisimman suora mittausyhteys laakeriin. Jos anturissa on vielä kiinnityselimenä nippaan sopiva pikakiinnitin, on mittaus luotettavampaa ja nopeampaa. Ylin mitattava taajuus riippuu täysin anturin kiinnityselimen rakenteesta, tyypillisesti ylin taajuus on noin 4000 Hz.

Muita kiinnitysmenetelmiä, kuten liima- ja magneettikiinnitystä, teippiä tai vahaa, käytetään yleensä tapauksissa, joissa kiinteän anturin tai nipan asentaminen ei ole mahdollista. Nämä vaihtoehtoiset kiinnitystavat eivät ole yhtä luotettavia ja rajoittavat usein mitattavaa taajuusaluetta. Nopein, mutta epäluotettavin tapa mittaukseen on käyttää mittauspuikkoa, jossa puikko painetaan käsin mitattavaan kohteeseen (Nohynek, 1996, s.66).

3.4 Kannettavat tiedonkerääjät

Tehokas kunnonvalvonta edellyttää jatkuvaa seuranta sopivin väliajoin, sekä usein suuria määriä mittauksia. Ennen tietokoneavusteisia mittausjärjestelmiä vei mittausarvojen kerääminen, esittäminen ja viallisten koneiden tunnistaminen jopa 80 % kunnonvalvontaan käytetystä kokonaisajasta. Aikaa vievät ja yksitoikkoiset lajittelut, raportoinnit ja tulosten esittäminen on tehokkainta suorittaa tietokoneen avulla ja näin keskittää kunnonvalvojan aika ongelmien analysointiin ja ratkaisuun.

Nykyaikaisessa kunnonvalvonnassa voidaan erottaa kuvan 32 mukaiset toiminnot. Tyypillisesti tiedonkerääjässä on eritasoisia mahdollisuuksia lähtien helposti suoritettavasta mittaus tietojen taltioinnista aina monimutkaisten FFT-spektrien paikan päällä suoritettaviin analysointeihin. Nykyaikaiset tiedonkerääjät usein kertovat esimerkiksi laakerin kunnon suoraan mittauksen jälkeen, jolloin tulosten tietokoneelle siirtoa ei välttämättä tarvita.



Kuva 32. Toiminnot nykyaikaisessa mittaavassa kunnonvalvonnassa (Riutta 2003, Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –seminaari CD-ROM)

Ennen mittausta määritetään mittaustyyppit ja mittausreitit ohjelman avulla ja siirretään digitaalisesti tai modeemin välityksellä tiedonkerääjään. Useimmat tiedonkerääjät sallivat mittausreitin pisteiden mittauksen satunnaisessa järjestyksessä ja myös pisteiden lisäyksen reittipisteiden oheen. Tiedonkerääjät voidaan ohjelmoida tallentamaan tarkkaerotteisia FFT-värähtelyspektrejä aina jokaisesta pisteestä tai ainoastaan esimerkiksi kokonaistason ylittäessä hälytysrajan (Riutta, 2003, s.40).

3.5 Puolikiinteät järjestelmät

Puolikiinteitä järjestelmiä käytetään, kun mitattavan kohteen luoksepäästävyys on hankalaa tai mahdotonta, tai sisältää suuren työturvallisuusriskin. Puolikiinteä järjestelmä eroaa kannettavasta käytännössä usein vain siinä, että kiinteästi asennetuista antureista on johdettu kaapelit liitäntäyksikköön, jonka kautta mittaukset suoritetaan kannettavalla mittalaitteella (Nohynek, 1996, s.35).

3.6 Kiinteät automaattiset järjestelmät

Kiinteät automaattiset järjestelmät ovat usein asiakaskohtaisesti räätälöityjä järjestelmiä, jotka koostuvat koneeseen asennetuista antureista, anturikaapeleista sekä mittausyksiköstä. Mittausyksiköstä johdetaan mittautieto eteenpäin joko analogisena, digitaalisena tai hälytysviestinä. Automaattisia järjestelmiä käytetään myös esimerkiksi erittäin nopeakäyntisten koneiden suojausjärjestelminä, jolloin hälytysrajan ylittävät mittausarvot pysäyttävät koneen ja suorittavat mahdollisesti muita ennalta määriteltyjä toimenpiteitä (Nohynek, 1996, s.35).

3.7 Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvonnan laitteistot

Nykyiset digitaaliset yleismittarit ovat lisävarusteineen hyvin monipuolisia laitteita virran, jännitteen ja vastuksen mittaamiseen, joiden lisäksi hyvin varustetuilla mittareilla voidaan mitata myös taajuutta ja lämpötilaa. Mittautiedot tallennetaan mittarin muistiin, jonne tallentuu haluttaessa automaattisesti mittausten minimi-, maksimi- ja keskiarvot.

Yleismittari ei kuitenkaan ole yksistään riittävä työkalu oikosulkumoottoreiden kunnonvalvontaan. Akselijännitteet pyörivissä koneissa eivät ole aina sinimuotoisia aaltoja ja mittaus vaatii yleensä oskilloskoopin ja/tai spektrianalysointia. Myöskään taajuusmuuttajien aiheuttamien laakerivirtojen mittaamiseen ei tavallinen pihtivirtamittari

riitä, vaan tarvitaan Rogowskin kela –tyyppinen mittausanturi, jolla pystytään mittaamaan korkeatkin taajuudet.

Magneettivuon, staattorivirran ja liitinjännitteen mittausten tulkinta vaatii spektrianalysointia. Staattorivirtaa mitataan virtapihdillä tai muulla sopivalla tavalla ja liitinjännitteen mittaus tapahtuu käytön aikaisesti anturin avulla (Lindgren, 2003, s.4).

3.8 Lämpötilan mittauslaitteet

Lämpötilan mittauksiin soveltuvissa laitteissa tutkittiin ainoastaan kosketuksettomaan mittaukseen soveltuvia infrapunalämpömittareita ja lämpökameroita. Kosketuksellisessa mittauksessa on usein ongelmana luoksepäästävyys mitattavaan kohteeseen.

3.8.1 Kannettavat infrapunalämpömittarit

Kannettavat infrapunatekniikkaan perustuvat lämpömittarit ovat tavallisesti pistoolin mallisia, kooltaan melko pieniä laitteita. Alue, jonka lämpötilan keskiarvoa laite mittaa, osoitetaan yleensä laserin avulla. Mittauskeila on tiimalasimainen, eli pienin mittausala on tietyn matkan päässä laitteen mittapäästä. Joihinkin mittareihin voi valita lähi- tai kauko-optiikan, joilla saavutetaan mahdollisimman pieni mittausalue halutulla etäisyydellä kohteesta.

Infrapunalämpömittareiden perusmalleissa lasertähtäimessä on yleensä vähemmän yksittäisiä mittausaluetta osoittavia säteitä ja mittausalueen koko on suurempi, mikä tarkoittaa epätarkempaa tietyn pisteen lämpötilan määrittämistä. Kalleimmissa versioissa on parhaillaan jopa 16 lasersäteestä muodostuva tähtäinkuvio keskipisteen osoittimiseen ja pienin mittausalueen halkaisija luokkaa 6 mm.

3.8.2 Lämpökamerat

Lämpökameroita on kahta tyyppiä, mittaavia ja ei-mittaavia. Mittaavia kameroita käytetään yleisesti rakennusmittauksissa, teollisuuden ennakoivassa kunnossapidossa, lämpöprosessien tutkimuksissa ja lämpökorreloivien vikojen paikantamisessa, kun taas ei-mittaavat lämpökamerat ovat tavallisesti valvonta- ja etsintäkäytössä.

Ennakoivaan kunnonvalvontaan soveltuvat siis parhaiten mittaavat lämpökamerat, joiden mittausominaisuuksia ovat mm. määritellyn pisteen ja/tai alueen lämpötilamittaus (min, max

ja keskiarvo), isotermi (lämpötilan osa-alue tai ”värihälytys”), sekä vaaka- tai pystysuora profiili (yksittäisen janan lämpötilakuvaaja). Lämpötilan erotuskyky on parhaimmillaan $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. Aivan riisutuimpia lämpökameroita lukuunottamatta lämpökuvaukset voi tallentaa videolle, muistikortille tai kameran sisäiseen muistiin (Infradex, 2003).

3.9 NDT-menetelmien laitteistot

Parhaimpia ja edullisimpia ”työkaluja” NDT-tarkastuksissa ovat varmasti ihmisaistit, joiden käyttöön suurin osa NDT-menetelmistä tavalla tai toisella perustuu. Voidaankin sanoa, että peilit, endoskoopit, videoskoopit, magneettijauheet ja tunkeumanesteet ovat ainoastaan silmämääräistä tarkastusta suuresti helpottavia apuvälineitä.

Endoskooppeja ja videoskooppeja käsiteltiin jo aiemmin kappaleessa 3.1.1. Muita NDT-menetelmien laitteistoja ovat magneettijauhetarkastuksessa käytettävät ies- tai virtamagnetointilaitteet ja magnetointikelat. Lisäksi magneettijauhetarkastus on kalibroitava erityisillä kalibrointikappaleilla, jotta indikaatiot voitaisiin tulkita oikealla tavalla.

Ultraäänimittaus on yksinkertaisimmillaan paksuuden mittausta, jota varten on kehitetty pieniä, taskuun sopivia ja digitaalinäytöllä varustettuja laitteita. Uusimmat mittarit ovat prosessoriohjattuja, jolloin tulostusmahdollisuudet ovat moninaiset. Mittareiden mitta-alue on tyypillisimmillään 1 – 100 mm ja tarkkuus noin 0,1 mm. Tuloksista saadaan tarvittaessa mm. keskiarvot ja keskipoikkeamat.

Volumetrisessa ultraäänitarkastuksessa käytetään joko normaali- tai kulmaluotaimia. Normaaliluotaimella löydetään kerrostumat parhaiten, kun taas korroosio- ja väsymisvauriot sekä halkeamat, jotka lähtevät yleensä komponentin pinnasta, löytyvät parhaiten kulmaluotaimella (Åström, 2003, s.11).

3.10 Voiteluaineiden analysoinnin työkalut

Voiteluaineen, tässä tapauksessa öljyn analysoimiseksi on ensin otettava näyte tutkittavasta öljystä. Öljynäytteen ottoon tarvitaan minimissään imupumppu, letku ja näytepullo. Näytepullojen osalta on tärkeää, että ne ovat täysin puhtaita, mieluiten tarkoitukseen tehtyjä steriilejä pulloja. Sama pätee tietysti muihinkin näytteenottovälineisiin. Likaiset välineet voivat oleellisesti vääristää analyysin tuloksia.

Öllyanalyysit tehdään useinmiten laboratorio-olosuhteissa mikroskooppien ja erilaisten analyysointilaitteiden avulla. 1990-luvulta alkaen mittalaitteiden kehitys on ollut voimakasta ja nykyään on saatavilla myös kenttäanalyysointilaitteita öljyn kunnon valvontaan. Tässä työssä käsitelläänkin ainoastaan kenttäanalyysointilaitteita, koska laboratorio-olosuhteita vaativat öljyanalyysit ovat asiakkaalla tapahtuvan kunnonvalvonnan kyseessä ollessa järkevintä jättää öljyn analysoinnin asiantuntijoiden tehtäväksi. Öljyanalyysijä tekevät öljymerkkien edustajat ja alaan erikoistuneet yritykset.

3.10.1 Öljyn kunnonvalvonnan kenttäanalyysointilaitteet

Öljyn analysoinnin kenttämittauksiin soveltuvat laitteet ovat vasta tulossa yleiseen tietoisuuteen. Nykyiset analyysointilaitteet muistuttavat parhaillaan ihmisen veren analysointiin kehitettyjä laitteita ja myös analyysiin tarvittava öljymäärä on jatkuvasti pienentynyt. Laitteiden suunnittelussa on painotettu automaattista toimintaa, jolla vähennetään inhimillisen virheen osuutta mittaustuloksissa.

Kenttäanalyysointilaitteita, kuten OilView ja RULER, on vielä toistaiseksi vähän käytössä, joten seuraavaksi kerrotaan ainoastaan laitteiden esitietoja ilman käytännön kommentteja. Samasta syystä laitteita ei lähdetty myöskään vertailemaan keskenään.

OilView-analyysointilaitteita on kehitetty seuraamaan öljyn kulumista osoittavia tekijöitä erilaisten tunnuslukujen avulla. Mittaus perustuu sähkönjohtavuuteen, jonka perusteella määritellään öljystä ferromagneettiset hiukkaset, korroosio ja epäpuhtaudet.

Analysointi suoritetaan 100 ml näytenäytteenä ja siihen kuluva aika on noin 10 minuuttia. Testituloksena saadaan kolme määrää kuvaavaa lukua (indeksiä) ja kaksi lukua, jotka kuvaavat tiettyjen hiukkasten läsnäoloa tutkittavassa näytteessä. Korroosioindeksi kertoo lisäaineiden häviämisen, epäpuhtausindeksi liukenemattomien epäpuhtauksien määrän näytteessä ja ferromagneettiset hiukkaset –indeksi kertoo äskettäisestä vakavasta kulumisesta öljyn kastelemisissa rauta- tai teräsosissa. Suurten epäpuhtauksien osoitin –luku kertoo suurten vesipisaroiden tai suurten johtavien epäpuhtauksien (>20...60 µm) esiintymisen näytteessä. Suurten ferromagneettisten hiukkasten osoitin –luku puolestaan kertoo suurten ferromagneettisten hiukkasten esiintymisen näytteessä.

Jäljellä olevaa käyttöikää öljylle määrittää RULER –mittari, jonka toiminta perustuu öljyn antioksidanttimitaukseen. RULER –luvun pienentyessä laite ilmoittaa öljyn jäljellä olevan käyttöiän vähenevän. Mittari arvioi siis vain öljyn käyttöikää, eikä määritä öljyssä olevia epäpuhtauksia. RULER –mittari on kannettava, pienikoinen ja antaa tuloksen nopeasti pienestä öljynäytemäärästä.

4 KUNNONVALVONNAN MENETELMIEN VERTAILU JA VALINTA

Toimiva kunnossapitojärjestelmä sisältää yleensä elementtejä useammasta menetelmästä ja toimintatavasta. Valvottavasta laitteesta riippuen saattaa olla myös tarpeellista hyödyntää useita menetelmiä rinnakkain varmistamaan kunnonvalvonnan luotettavat tulokset ja laitteen häiriötön käynti. Ei myöskään pidä unohtaa, että vaikka käytettäisiin vain yhtä nykyaikaista kunnonvalvontamenetelmää, kunnonvalvontaa suoritettaessa tehdään yleensä aina myös aistihavaintoja.

Usein menetelmien valinnassa loppujen lopuksi ratkaisevat pelkästään investointikustannukset, vaikka paremminkin tulisi verrata kunnossapidon menetelmien kustannuksia niiden tuomiin arvioituihin säästöihin. Esimerkiksi paperikone on jo kooltaan ja toiminnaltaan sitä luokkaa, että useamman menetelmän käyttö samaan aikaan, sekä on-line valvonnan ja tietyin väliajoin suoritettavien mittausten yhdistäminen on myös taloudellisesti järkevää. Edellä mainitun ymmärtää, kun ajatellaan paperikoneen vaurioitumisen seurauksia, jotka ovat usein kustannuksiltaan sadoissa tuhansissa euroissa ja johtavat tuotantolinjan alasajoon.

Larox painesuodattimien kunnonvalvonnassa on jo lähtökohtana kustannuksiltaan huomattavasti keveämpi järjestelmä. Yksi syy tähän on se, että kunnonvalvonta on suunniteltu tapahtuvaksi huoltokäynneillä Larox asiakastuki-insinöörin toimesta Larox Oyj:n omalla laitteistolla. Tämän vuoksi Laroxin mielenkiinto kohdistuu erityisesti kannettaviin mittalaitteisiin.

Lähtökohtana on siis se, ettei asiakkaan tarvitse investoida itse mittauslaitteistoon mahdollisia mittausnippoja tai antureita lukuunottamatta. Tähän on päädytty pääasiassa sen vuoksi, että jopa itse painesuodattimen hintaisen kiinteän valvontajärjestelmän myyminen asiakkaalle on useimmissa tapauksissa hankalaa. Mutta toki painesuodattimien käyttöympäristöstä löytyy myös sellaisia prosesseja, joissa tuotannonmenetyksestä aiheutuneet kulut ovat sitä luokkaa, että kasvaneesta toimintavarmuudesta ollaan valmiita maksamaan suuriakin summia.

4.1 Valvottavien kohteiden kriittisyyden tarkastelu

Kunnossapitostrategian valinnassa yksi tärkeimpiä toimenpiteitä on määritellä, mitä kannattaa valvoa. Valvontakohteiden valinnassa on suurena apuna kriittisyyspistetaulukko, jossa pyritään luokittelemaan valvontakohteet sen mukaan, miten kohteen vaurioituminen vaikuttaa tuotantoon, käyttökustannuksiin ja turvallisuuteen.

Taulukossa 4.1 – 1 on määritetty kriittisyyspisteytyksen perusteet standardia PSK 5705 O3 mukailleen. Joillekin alkuperäisessä PSK 5705 O3 –standardin taulukkomallissa esiintyvillä kriittisyystekijöille on vaikea löytää yhteistä kaikille tutkittaville osa-alueille sopivaa yksikköä. Pyörimisnopeuden perusteella voi pisteyttää pyörivät laitteet ja käyttötehon perusteella laakerit, pumput ja moottorit. Mutta esimerkiksi sylinterien osalta pyörimisnopeus ja käyttöteho eivät ole parhaat mahdolliset arvostelutekijät. Toisaalta sylinterien liikenopeudet ovat niin pieniä, että liikenopeutta ei ole mielekästä ottaa vertailukohdaksi. Vertailun helpottamiseksi muutettiin alkuperäistä PSK –standardin taulukkoa lisäämällä käyttötehon vaihtoehdoiksi käyttöpaine ja kuormitus, joiden avulla pisteytystä saatiin vertailukelpoisemmaksi.

Taulukkoa 3 avuksi käyttäen lasketaan taulukossa 4 olevien valvottavien kohteiden kriittisyyspisteet. Yksittäisen valvottavan kohteen kriittisyyspisteet lasketaan valitsemalla sopivin kriittisyyden valintakriteeri kullekin kriittisyystekijälle ja seuraavaksi kerrotaan valintakriteeriä vastaava kerroin kriittisyystekijän painoarvolla. Esimerkiksi taulukon 4.1 – 1 tekijän häiriöherkkyys kohdalla erittäin häiriöherkkä laite saa kriittisyyspisteet $15 \times 8 = 120$ pistettä. Kaikkien tekijöiden antamat kriittisyyspisteet tietylle valvottavalle kohteelle lasketaan lopuksi yhteen ja näin saadaan pisteytettyä Larox painesuodattimen valvottavat kohteet keskinäistä vertailua varten.

Taulukko 3. Valvottavien kohteiden kriittisyyspistetaulukko (mukailtu PSK 5705 O3 – standardista)

Tekijä	Painoarvo	Kerroin	Valintakriteeri
Kriittisyys	40	0	Vioittumisella ei merkitystä prosessin toiminnalle.
		2	Lyhyt seisokki ja vähäinen tuotannon menetys, järjestelyvaraa tai käyttövalmis varalaite.
		4	Laaja seisokki ja suuri tuotannonmenetys, vähän järjestelyvaraa tai ei ole varalaitetta.
		6	Prosessin täydellinen pysähtyminen ja pitkä korjausaika, huono varaosien saatavuus tai kontrolloitavuus.
Häiriöherkkyys	15	1	Varmakäyntinen
		2	Vähäisiä häiriöitä
		4	Häiriöherkkä
		8	Erittäin häiriöherkkä
Ympäristö-olosuhteet ja luokse-päästävyys	15	1	Hyvät tai kohtuulliset, lattiatasolla.
		2	Kosteutta, likaa, hankalahko luoksepäästävyys
		4	Kylmä, kuuma, hankala luoksepäästävyys, vaihto vaatii laitteen pysäyttämisen
		8	Erittäin kuumaa, märkää, likaa, syövyttäviä kaasuja tai luoksepäästävyys käynnin aikana lähes mahdotonta.
Pyörimisnopeus	15	16	Erittäin ankarat olosuhteet, korjaus tai vaihto vaatii laitteen laajempaa purkamista
		1	$n < 100$ [1/min]
		2	$n = 100 \dots 1000$
		4	$n = 1000 \dots 3000$
Pyörimisnopeus	15	8	$n = 3000 \dots 5000$
		16	$n > 5000$
		1	$H < 500$ [€]
		2	$H = 500 \dots 2000$
Rahallinen arvo	10	3	$H = 2000 \dots 10000$
		4	$H = 10000 \dots 20000$
		5	$H > 20000$
		1	$P < 5$ [kW] $p < 10$ [bar] $F < 50$ [kN]
Käyttöteho / Kuormitus	5	2	$P = 5 \dots 50$ $p = 10 \dots 100$ $F = 50 \dots 200$
		4	$P = 50 \dots 200$ $p = 100 \dots 200$ $F = 200 \dots 1000$
		6	$P = 200 \dots 500$ $p = 200 \dots 300$ $F = 1000 \dots 2500$
		8	$P > 500$ $p > 300$ $F > 2500$

Pyörimisnopeuden kohdalla pyörimättömien kohteiden pisteluvuksi annettiin yksi, koska näissä kohteissa esiintyy muunlaista liikkeen aiheuttamaa rasitusta, mikä on kuitenkin liikkeiden hitauden vuoksi vähäistä.

Taulukko 4. Larox painesuodattimen valvottavien kohteiden kriittisyyden arviointi

Valvottava kohde	Kriittisyys (x 40)	Häiriö-herkkyys (x 15)	Ympäristöolosuhteet (x 15)	Pyörimis/liikenop. (x 15)	Rahallinen arvo (x 10)	Käyttöteho /kuormitus (x 5)	Yhteispisteet
Hitaasti (<100 rpm) pyörivät laakerit	2	8	4	8*	2	2	400
Oikosulku-moottorit	4	1	4	4	4	4	345
Hydraulimoottorit	2	2	4	1	2	4	225
Hydraulipumput	4	1	4	4	3	4	345
Hydrauliiventtiilit	2	1	4	1	2	4	225
Hydraulisylinterit	4	2	4	1	4	6	335
Prosessiventtiilit	2	4	4	2	3	4	280
Prosessiputkistot	2	1	4	1	3	2	210
Suodatinlevyt	4	4	8	1	5	8	445
Instrumentointi	2	2	2	1	2	1	180
Kangas	4	4	4	1	4	2	345
Teräsrakenteet	2	2	4	1	4	6	255
Voiteluaineet	2	2	4	1	2	6	235

* Laakereiden erittäin pieni pyörimisnopeus on niiden elinikää lyhentävä tekijä, joten sen katsotaan lisäävän valvonnan tarvetta

Käytetyn kriittisyyspisteytysmenetelmän mukaan kriittisimpiä valvontakohteita Larox painesuodattimessa ovat suodatinlevyt, telojen laakerit, sähkömoottorit, sekä hydraulipumput ja –sylinterit. Näistä kohteista sähkömoottorit ja hydraulipumput ovat korkeasta kriittisyyspisteluvusta huolimatta käytössä varmatoimisia ja aiheuttavat harvoin ongelmatilanteita Larox painesuodattimissa.

4.2 Kunnonvalvonnan menetelmien vertailu ja valinta

Kunnonvalvonnan menetelmien valinta suoritettiin vertailemalla menetelmien soveltuvuutta valvottaviin kohteisiin. Vertailu tehtiin taulukon 5 avulla pisteyttämällä kukin menetelmä sen perusteella, miten menetelmä soveltuu kunkin kohteen valvontaan. Pisteytys annettiin välillä 1 – 5 niin, että pisteluku 1 tarkoittaa kyseiseen kohteeseen soveltumatonta menetelmää ja pisteluku 5 taas erinomaista valvontamenetelmää kyseiselle kohteelle. Valvottavien kohteiden kriittisyys otettiin huomioon kertomalla menetelmän saama pisteluku kyseisen valvottavan kohteen kriittisyyspisteillä. Lopullinen yksittäisen menetelmän pisteluku saatiin summaamalla edellä mainitut tulot yhteen.

Taulukko 5. Kunnonvalvonnan menetelmien vertailu

Koneen osa	Valvottava asia	Kriittisyys -kerroin	Aisti- havainnot	Hyötysuhd e	Värähtelyn kok.taso	Tärinä- rasitus	Spektri- analyysi	Verhokäyrä -analyysi	Iskusäys (dBc/dBm)	Akustinen emissio	Lämpötilan mittaus	Lämpö- kamera	Sähköiset mittaukset	Endoskopia	Voiteluaine -analyysi	Ultraääni- mittaus	NDT- menetelmät
Hitaasti(<100rpm) pyörivät laakerit	Laakerielementtien kunto, voitelu	400	2	1	1	1	3	4	4	4	3	4	1	1	1	2	1
Oikos.moottorit	Laakerit, sähköisten osien kunto	345	2	4	3	3	4	4	4	3	3	4	5	1	1	1	1
Hydraulimoottorit	Vuodot, kulumat, kavitointi	225	2	2	1	2	2	2	2	2	3	4	1	1	2	2	1
Hydraulipumput	Vuodot, kulumat, kavitointi	345	2	2	1	2	2	2	2	2	3	4	1	1	2	2	1
Hydrauliventtiilit	Vuodot, karan kunto, kulumat	225	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	3	1
Hydraulisylinterit	Sisäiset ja ulkoiset vuodot, kulumat	335	3	2	1	1	1	1	1	1	4	5	1	1	2	4	1
Prosessiventtiilit	Vuodot, letkun kunto, kulumat	280	4	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	2	1
Prosessiputkistot	Vuodot, kulumat, korroosio, tukkeumat	210	4	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	4	1	2	2
Suodatinlevyt	Vuodot, vääntymät, korroosio	445	4	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	3	3
Instrumentointi	Rikkinäiset tai löystyneet osat	180	2	1	1	1	1	1	1	2	3	4	4	1	1	2	1
Kangas	Läpäisykyky, sauman ja kankaan kulumat, reiät	345	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
Teräsrakenteet	Murtumat, vääntymät, kulumat, korroosio	255	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	1	1	4
Voiteluaineet	Epäpuhtaudet, vesipitoisuus, riittävyys	235	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	5	1	1
Yht:		11055	11055	5765	4515	5085	6230	6630	6630	6690	8535	11745	5745	6035	5895	7810	5690

1 = Ei soveltu 2 = Soveltuu rajoituksin 3 = Soveltuu kohtalaisesti 4 = Soveltuu hyvin 5 = Erinomainen menetelmä

Taulukon 5 mukaan parhaat pisteet saivat lämpökameratekniikka, aistihavainnot, lämpötilan mittaus, ultraäänimittaus, akustinen emissio, iskusysäysmenetelmä ja verhokäyräanalyysi. Taulukon 5 keskinäisen vertailun lopputulosten lisäksi menetelmien valinnassa otettiin huomioon edellä mainittu sopivien mittalaitteiden saatavuus, menetelmän monipuolisuus, sekä menetelmään soveltuvien mittalaitteiden fyysinen koko, helppokäyttöisyys ja teknisen tuen saatavuus.

Laakereiden kunnonvalvontaan tarkoitetulta laitteelta vaaditaan kykyä mitata hitaasti pyöriviä laakereita, jolloin esimerkiksi pelkästään kokonaisvärähtelyä ja muita standardin ISO 10816-3 värähtelyarvoja mittaavat laitteet voi jättää pois laskuista. Akustinen emissio taas on suurelta osin vasta tutkimuksen alla oleva kunnonvalvonnan menetelmä ja sen vuoksi kaupallisia Laroxin tarkoituksiin soveltuvia laitteita ei tällä hetkellä ole saatavilla.

Tarkempaan tutkimukseen otettiin iskusysäysmenetelmä (dBm/dBc), verhokäyräanalyysi, lämpökameratekniikka, kosketukseton lämpötilan mittaus, stetoskopia ja ultraäänimittaus. Verhokäyräanalyysiä hyödyntävien laitteiden testaus laakereiden kunnonvalvonnan yhteydessä voi myös tulla kyseeseen, mutta tämän työn puitteissa keskitytään vain iskusysäystekniikkaan. Huomioitava on myös aistihavaintojen käyttökelpoisuus miltei kaikissa valvottavissa kohteissa, mikä korostaa visuaalisen tarkastuksen ja kuulolla sekä tuntoaistilla tapahtuvan tarkastuksen tärkeyttä uusien tekniikoiden rinnalla.

5 VALITTUIHIN MENETELMIIN SOVELTUVIEN TYÖKALUJEN VERTAILU

Larox painesuodattimien kunnonvalvontaa toteutetaan yksinomaan asiakkaan tiloissa ja näin ollen suunnitelmana on käyttää kunnonvalvonnassa pääasiassa kannettavia laitteita. Kiinteiden valvonta- ja tiedonkeruulaitteiden käyttöä rajoittaa kustannusnäkökohtien lisäksi niiden usein vaatima anturointi kaapeleineen. Esimerkiksi levypankan telojen kunnonvalvonnassa kiinteä anturointi johtaa helposti suodattimen toimintaa ja huoltoa haittaavaan kaapeliviidakkoon. Lämpökameratekniikkaa ja kosketuksetonta lämpötilanmittausta hyödynnettäessä painesuodattimen monimutkainen rakenne ja lukuisat valvontakohteet eri puolella suodatinta vaativat käytännössä liikuteltavan mittalaitteen. Sama pätee myös ultraäänimittaukseen.

Työkalujen eli tässä tapauksessa mittalaitteiden vertailussa painotettiin helppokäyttöisyyttä, pientä kokoa, yleistä saatavuutta ja maailmanlaajuisia tukiverkostoja tekniikkaan ja käyttöön liittyvissä asioissa. Kustannusnäkökohdat pitää väistämättä ottaa huomioon laitteiden hankintaa ajatellen, mutta investointikustannuksia ei haluttu nostaa määrääväksi tekijäksi tässä tutkimuksessa. Laitteiden kustannusten ja valvonnan tuomien hyötyjen vertailu on käytännössä mahdollista vasta terkeemmän testauksen jälkeen.

5.1 Kannettavien dataloggereiden vertailu

Tarkempaan tutkimukseen valittua iskusysäysmenetelmää käyttävät useat laitevalmistajat, jotka ovat kehittäneet omia versioitaan iskuja mittaavista menetelmistä. Esimerkiksi SPM käyttää dBm/dBc- ja LR/HR-menetelmiä ja Pruftechnik dBsv/dBn-menetelmää. Sama pätee myös muihin perusmenetelmiin. Erilaisista nimityksistä huolimatta eri menetelmille ominaiset periaatteet ja mittaustekniikat ovat samoja. Taulukossa 6 on eri valmistajien hitaasti pyörivien laakereiden mittaukseen pystyviä kannettavia dataloggereita ja niiden tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 6. Kannettavia dataloggereita ja niiden ominaisuuksia

Mittalaite	Päämenetelmä	Muut mittaukset	Analyysit	Käyttöjärjestelmä ja ohjelmistot	Tiedon-siirto	Virtalähde	Näyttö	Mitat	Hintaluokka
CSI RBMconsultant Model 2120A	PeakVue® analyysi, Slow Speed Technology (SST)	Tasapainotus* Laser-linjaus* Sähkömoott. mitt. Pyörimisnop.	Laakerin ja vaihteiston kunto Sähkömoott. analyysi	Cascade Analysis – ohjelmisto, VibPro*, CSI's MotorView*	Suora kaapeli tai modeemi, 300-115,2 K baud	NiMH akku, kesto n. 11 tuntia jatk. käyttöä	LCD 320x240, taustavalo	273x174x38 Paino 2180g	18500 € 2-kanavainen 22500 € + ohjelma 17500 €
Pruftechnik Vibrotip	Värähtelyn kok.taso Iskusysäys dBsv, dBn	Pyörimisnopeus Lämpötila	Laakerin kunto	Tiptrend - ohjelmisto	RS232C	1xIEC 6LR61, kesto max 20 tuntia	Digitaali 5x10 mm	180x81x32 Paino 300g	£ 1779 (UK)
Pruftechnik Vibscanner	ISO 10816-3 Värähtelymittaus Iskusysäysmittaus	Pyörimisnopeus Lämpötila Tasapainotus* Kavitaatio Laserlinjaus*	Laakerin kunto FFT-spektri* Signaalianalyysi	Omnitrend - ohjelmisto	RS232	NiMH akku, kesto 6-10 tuntia	Graafinen 128x64, taustavalo	250x100x55 Paino 690g	5723 € ohjelman kanssa 8945 €
SKF Microlog CMXA 50 (Enpac)	Verhokäyrä	Tasapainotus Lämpöt. infrapunalla* Pyörimisnopeus laserilla*	Verhokäyräanalyysi Laakerin ja vaihteiston kunto FFT-spektri	Windows CE, SKF Machine Analyst- ohjelmisto*	RS232	Li-Ion akut	LCD 240x160, taustavalo	186x134x60 Paino 715g	15000 €+ ohjelmisto 17000 €
SPM T30 Logger	SPM Iskusysäys dBm/dBc	ISO -standardin väräht.mittaukset Pyörimisnopeus* Lämpötila* Jatkuva mittaus*	Laakerin kunto Värähtelyspektri* EVAM-väräht.analyysi*	Condmaster Pro - ohjelmisto*	RS232	6x1.5V LR6 Alkaalikennoa, kesto 50 tuntia jatk. mittausta	LCD 4x16, LED taustavalo	255x105x60 Paino 850g	6033 € Condmaster Pro -ohjelma 1889 €
SPM Leonova	SPM Iskusysäys dBm/dBc ja LR/HR	ISO -standardin väräht.mittaukset Tasapainotus* Pyörimisnopeus Lämpötila	Laakerin kunto Värähtelyspektri* EVAM-väräht.anal.* Voitelukalvon paksuus	Windows CE, Condmaster Pro - ohjelmisto sis. hintaan	RS232, USB	Li-Ion akut, kesto n. 8 tuntia no rm.käytössä	Yksiväri kosketus- näyttö 240x320, taustavalo	285x102x63 Paino 600g	Yli 20000 € (hinta riippuu ominaisuuksista)

5.1.1 Värähtelymittausantureiden ja niiden kiinnitysmenetelmien vertailu

Iskusysäysmenetelmä ei periaatteessa ole värähtelymittausta ja tämän vuoksi myöskin anturit ovat erityisesti iskusysäysmenetelmälle tarkoitettuja. Laitevalmistajat ovat kehittäneet omat dataloggereihin sopivat anturinsa, joten iskusysäysantureiden vertailu ei ole käytännössä mielekäästä, vaan anturin valinta riippuu valitusta laitevalmistajasta.

Useimmat dataloggerit sisältävät kuitenkin myös värähtelymittausominaisuudet, joten värähtelyantureiden valinta tulee todennäköisesti eteen jossain vaiheessa. Koneiden värähtelyä voidaan mitata siirtymänä (poikkeamana), nopeutena ja kiihtyvyytenä. Kullekin mittaussuurelle on omat anturinsa, jotka poikkeavat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan toisistaan selvästi. Taulukossa 7 on vertailtu eri anturityyppejä ja taulukossa 8 antureiden erilaisia kiinnitystapoja.

Taulukko 7. Yleisesti käytettyjen värähtelyanturityyppien vertailua (Nohynek 1996, s.54)

Anturityyppi	Taajuusalue	Mittaussuure	Edut	Haitat
Siirtymäanturi	0 – 1500 Hz	Siirtymä	Pieni koko Kevyt Mittaa myös staattista etäisyyttä	Tarvitsee vakaan kinnityskohdan Vaatii ulk. virtalähteen Pinnan magn. omin. muuttavat mitt.tulosta Hankala käyttää, jos ei kiinteästi asennettu
Nopeusanturi	5 – 2000 Hz	Nopeus	Mittaa tärinänopeutta (yleisin suure) Ei ulkop. virtalähdettä Erinomainen signaali/häiriösuhde Herkkä Helppo käyttää	Isokokoisia ja raskaita Rajoit. käyttölämpötila Rajoit. mittaustaajuus Herkkä rakenne Sähkömagneettiset häiriöt Anturin asento vaikuttaa mittaukseen
Kiihtyvyyssanturi	2 – 20000 Hz	Kiihtyvyys	Pieni koko Kevyt rakenne Melko edullinen Laaja taajuusalue Jatkuva kehitys	Herkkä rakenne Matalahko signaali/häiriösuhde Korkeat taajuudet ”hukuttavat” matalia Elektrostaattiset häiriöt Asettumisaika 1-600s

Taulukko 8. Kiihtyvyyssanturin kiinnitystapojen soveltuvuus ja rajoitukset (PSK 5703 Standardi: Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus)

Kiinnitys		Soveltuvuus	Rajoitukset
Ruuvi- kiinnitys	Suoraan	Ensisijainen menetelmä kiinteässä asennuksessa Ruuvin koko ja kiristysmomentti anturivalmistajalta	Hyvin toteutettuna ei rajoita taajuusaluetta Tasopinnan koneistus voi olla vaikeaa Poraussyvyys/ainepaksuus
	Nipan välityksellä	Käytetään kiinteässä asennuksessa helpomman koneistuksen takia Mahdollistaa mittauksen suorituksen ahtaassa paikassa Ruuvin koko ja kiristysmomentti anturivalmistajalta	Käyttökelpoinen ylärajataajuus hieman matalampi verrattuna suoraan kiinnitykseen Suoraa kiinnitystä suurempi tilantarve Poraussyvyys/ainepaksuus
	Kierre-aluslevyn välityksellä	Käytetään kun edellä mainitut kiinnitystavat eivät sovellu Aluslevy liimataan kohteeseen Ruuvin koko ja kiristysmomentti anturivalmistajalta Mahdollistaa galvaanisen erotuksen	Käyttökelpoinen ylärajataajuus hieman matalampi verrattuna suoraan kiinnitykseen Liiman valinnassa otettava huomioon ympäristöolosuhteet
Magneetti- kiinnitys	Suoraan	Ensisijainen menetelmä reitti- ja tilapäismittaukselle Taso- ja kaareville pinnoille käytettäessä niille tarkoitettuja magneetteja	Käyttökelpoinen taajuusalue riippuu anturin massasta ja magneetin voimakkuudesta sekä kiinnityspinnan laadusta ja puhtaudesta Paksu maalikerros heikentää pitovoimaa Sopii ainoastaan ferromagneettisille pinnoille Voimakas värinä ravistaa irti
	Nipan välityksellä	Kun halutaan varmistaa yhdenmukainen kiinnitys ja mittauspaikka Ei-ferromagneettisille pinnoille Mahdollistaa mittauksen suorituksen ahtaassa paikassa Usein suoraa magneetikiinnitystä laajempi taajuusalue	Käyttökelpoinen taajuusalue riippuu anturin massasta ja magneetin voimakkuudesta Suoraa kiinnitystä suurempi tilantarve Poraussyvyys Nipan materiaali oltava ferromagneettista Voimakas värinä ravistaa irti
	Aluslevyn välityksellä	Ei-ferromagneettisille pinnoille Liimataan tai hitsataan kohteeseen Liimaus mahdollistaa galvaanisen erotuksen	Käyttökelpoinen taajuusalue riippuu anturin massasta ja magneetin voimakkuudesta Liiman valinnassa otettava huomioon ympäristöolosuhteet Voimakas värinä ravistaa irti
Käsin painamalla		Poikkeustapauksessa, kun muut kiinnitystavat eivät sovi Anturi painetaan joko suoraan tai koetinsauvaan kiinnitettynä	Matala ylärajataajuus erityisesti koetinsauvaa käytettäessä
Mehiläisvaha tai liima		Tilapäisessä mittauksessa korkealla taajuusalueella	Ympäristöolosuhteet, kuten lämpötila, vaikuttavat anturin kiinnipysyvyyteen Anturin paino tai voimakas värinä voi irroittaa anturin
Pikakiinnitin		Kun halutaan varmistaa yhdenmukainen kiinnitys- ja mittauspaikka Anturi kiinnitetään pikakiinnittimellä vastinkappaleeseen	Käyttökelpoinen ylärajataajuus matalampi kuin suoralla ruuvikiinnityksellä Tilantarve

Kiihtyvyyssanturi on ylivoimaisesti eniten käytetty anturi värähtelymittauksissa johtuen sen monipuolisuudesta ja edullisesta hinnasta. Lisäksi mittalaitteen elektroniikalla on mahdollista integroida kiihtyvyyssignaali nopeudeksi, joten samaa anturia voi käyttää sekä matalataajuisten, akselien pyörimisestä johtuvien vikojen havaitsemiseen, että korkeataajuisten kuten vierintälaakerien vikojen havaitsemiseen.

Kiihtyvyyssantureiden kyseessä ollessa ruuvi- ja magneettikiinnityksen yhteydessä käytetään joskus mekaanista suodatinta, eli joustavaa kappaletta anturin ja kiinnityspinnan välissä. Suodatin vaimentaa mittausta häiritsevää korkeataajuista värähtelyä ja muodostaa galvaanisen erotuksen (PSK 5703 Standardi: Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus).

5.2 Lämpötilanmittauslaitteiden vertailu

Lämpökameroiden hintahaitari on laaja alkaen noin 10000 eurosta ja päätyen lähes 100000 euroon. Tämän vuoksi kannattaa miettiä tarkkaan, mitä ominaisuuksia kameralta tarvitsee. Rahalla saa lämpökameran kyseessä ollessa enemmän pikseleitä ilmaisinkennoon, monipuolisemmat tiedonsiirto- ja raportointiominaisuudet, sekä monipuolisemmat kuvansäätöominaisuudet. Usein kameran korkea hinta selittyy vanhemmalla ja kalliimmalla konstruktiolla. Lämpökameran käyttökohteet ovat alkujaan olleet sotilaallisia, jolloin rakenteelle ja toiminnalle asetettavat vaatimukset ovat olleet korkealla tasolla.

Jos hieman vaatimattomampi resoluutio vain riittää käyttötarkoitukseen, ovat edullisimpien kameroiden ominaisuudet usein täysin riittävät normaaliin kunnonvalvontakäyttöön. Ainoa joissain halvemman hintaluokan kameroissa oleva puute on kuvamuistin ja tiedonsiirron puuttuminen, jolloin kamera toimii ainoastaan reaaliaikaisena tarkastusvälineenä. Toinen joistain kameroista puuttuva ominaisuus on kuvien muokkaus ja analysointi jälkikäteen, eli tietokoneelle siirrettävät kuvat ovat tavallisia JPEG-kuvia ilman jälkeempään muokattavaa lämpötilatietoa. Mahdollisuus kuvien muokkaukseen ja lämpötilatarkasteluun jälkikäteen tietokoneella on tietysti merkittävä etu, mutta ei aivan välttämätöntä tavallisessa kunnonvalvonnassa. Taulukossa 9 on eri kameramallien ominaisuuksia ja hintaluokkia.

Taulukko 9. Lämpökameroiden ominaisuuksia

Lämpö-kamera	Ominaisuudet	Muisti, tiedonsiirto ja ohjelmistot	Virtalähde	Näyttö	Mitat	Hintaluokka
Flir ThermaCAM E2	160x120 pix jäädyttämätön matriisi-ilmais Lämpötila-alue -20-250°C Resoluutio 0,12°C Tarkkuus ± 2°C Säädettävä emiss.keroin Laserosoitin	50 JPEG-kuvan FLASH-muisti Portit USB ja RS-232* Kuvien siirto-ohjelmisto Ei mahdollisuutta raportointiin tai kuva-analyysiin	Li-Ion akut Kesto 2 tuntia jatkuvaa käyttöä	2,5” LCD värinäyttö	265x80x105 Paino 700 g	25000 € Sisältää kuvien siirto-ohjelmiston
Flir ThermaCAM P60	320x240 pix jäädyttämätön matriisi-ilmais Lämpötila-alue -40-500°C Resoluutio 0,08°C Tarkkuus ± 2°C Säädettävä emiss.keroin Laserosoitin Digit. videokamera Kuvien kommentointi äänellä ja tekstillä	50 JPEG-kuvan kiinteä FLASH-muisti 128 Mb FLASH-kortti Äänen taltiointi kuvaan, 30s/kuva Portit USB, RS-232 ja IrDA (langaton) Video out RS170 EIA/NTSC, CCIR/PAL Composite- ja S-video Kuvien siirto-ohjelmisto ThermaCAM Reporter-ohjelmisto*	Li-Ion akut Kesto 2 tuntia jatkuvaa käyttöä, säädettävä automaattinen sammutus ja unitoiminto	4” LCD irroittettava värinäyttö, erillinen LCD infonyttö	100x120x220 Paino 2000 g	52000 € Sisältää kuvien siirto-ohjelmiston Raportointi- ja analysointiohj. erikseen
Raytek ThermoView Ti30	160x120 pix jäädyttämätön matriisi-ilmais Lämpötila-alue 0-250°C Resoluutio 0,1°C Tarkkuus ± 2°C Säädettävä emiss.keroin Laserosoitin	100 kuvan FLASH-muisti USB-portti InsideIR raportointi- ja analysointiohjelmisto	Ladattava akku tai 6 x AA-paristot Kesto 5 tuntia jatkuvaa käyttöä	3” LCD värinäyttö	Paino 1000 g	11900 € Sisältää raportointi- ja analysointiohjelmiston
Icon digiCam- IR	Jäädyttämätön matriisi-ilmais Lämpötila-alue 0-600°C Resoluutio Tarkkuus ± 2°C Säädettävä emiss.keroin	300 kuvan FLASH-muisti RS-232-portti Video out PAL/NTSC Icon 100 PS raportointi- ja analysointiohjelmisto	Ladattava 3 Ah akku Kesto 60 min jatkuvaa käyttöä	4” LCD värinäyttö	240x100x130 Paino 2000 g	16000 € Sisältää raportointi- ja analysointiohjelmiston
VisIR Ti 200	320x240 pix jäädyttämätön matriisi-ilmais Lämpötila-alue -20-500°C Resoluutio Tarkkuus ± 2°C Säädettävä emiss.keroin	250 kuvan JPEG / TGW muisti USB, Bluetooth ja IrDA VisIR raportointi- ja analysointiohjelmisto	Li-Ion akku Kesto 4 tuntia	4” TFT DayBrite värinäyttö	105x160x175 Paino 1600 g	

Infrapunälämpömittareiden hinnan muodostumiseen pätee pitkälti samat asiat kuin lämpökameroihin, eli rahalla saa lisää ominaisuuksia ja hieman enemmän tarkkuutta. Edullisimmissa IR-pyrometreissä mittauskohtaa osoittava laser on vain yksittäinen piste, kun

taas kalliimmissa laitteissa kohdistuslaser muodostaa tarkan renkaan merkitsemään mitattavaa aluetta. Koska IR-pyrometri mittaa tietyn alan keskilämpötilaa, tulee huomiota kiinnittää lämpömittarin käyttökelpoiseen mittausetäisyyteen. Toisin sanoen vielä 4-5 metrin etäisyydeltäkin tulisi mitattavan pinta-alan olla riittävän pieni telan laakeripesän lämpötilan mittaamiseksi. Taulukossa 10 on esitetty IR-lämpömittareiden ominaisuuksia.

Taulukko 10. IR-lämpömittareita ja niiden ominaisuuksia

IR-lämpömittari	Ominaisuudet	Kohdistus ja mittausoptiikka	Virtalähde	Mitat ja paino	Hintaluokka
Raytek ST80 ProPlus	Mitt.alue -32...+720°C Tarkkuus ±1°C Säädettävä emissiokerroin Min, max, avg, dif näytöt Ala- ja ylärajahälytys	8 pisteinen kohdistus rengaslaserilla Mittauskeilan suhde 50:1	9V alkali tai NiCd paristo Toiminta-aika 20 tuntia	200x160x55 mm Paino 320 g	664 €
Raytek PhotoTemp MX6	Mitta.alue -30...+900°C Tarkkuus ±0,75°C Säädettävä emissiokerroin Min, max, avg, dif näytöt Ala- ja ylärajahälytys Integroitu digikamera mittauskohteen valokuvaamiseksi USB-väylä datan ja kuvien siirtoon	16 pisteinen kohdistus rengaslaserilla Mittauskeilan suhde 60:1	2 x AA paristo Toiminta-aika 8 tuntia	250x170x50 mm Paino 580 g	2300 €
Irtec Miniray 100XL	Mitt.alue -32...+520°C Tarkkuus ±1°C Säädettävä emissiokerroin Min, max, avg näytöt Ala- ja ylärajahälytys	1 pisteinen kohdistus laserilla, rengaslaser lisävaruste Mittauskeilan suhde 30:1	9V alkali tai NiCd paristo Toiminta-aika 60 tuntia ilman laseria	180x140x45 mm Paino 380 g	450 €
Fluke 61	Mitt.alue -18...+275°C Tarkkuus ±2°C Kiinteä emissiokerroin 0,95	1 pisteinen kohdistus laserilla Mittauskeilan suhde 8:1	9V alkali tai NiCd paristo Toiminta-aika 12 tuntia	184x45x38 mm Paino 227 g	129 €
Fluke 80T-IR mittapää	Mitt.alue -18...+260°C Tarkkuus ±3°C Kiinteä emissiokerroin 0,95 Liitetään Fluke yleismittariin	Ei laserkohdistusta Mittauskeilan suhde 4:1	9V alkali tai NiCd paristo	180x30x50 mm Paino 180 g	193 €

5.3 Akustisten mittalaitteiden vertailu

Akustisista mittalaitteista valittiin tarkempaan tutkimukseen ultraäänimittalaite ja elektroninen stetoskooppi. Ultraäänimittareita kutsutaan usein myös vuodonilmaisimiksi, koska niiden pääasiallinen käyttökohde on vuotojen aiheuttamien ultraäänien havaitseminen. Toisaalta

ultraäänien perusteella voidaan myös määrittää laakerien kuntoa, sillä laakerien vierintäpintojen vauriot ja voitelun puute aiheuttavat laakerin pyöriessä iskuja, jotka on kuultavissa ihmisen kuuloalueen yläpuolella olevilla taajuuksilla.

Ultraäänimittausta käytetään myös NDT-tarkastuksissa määrittelemään ainepaksuuksia ja epäjatkuvuuskohtia, mutta kyseisiin mittauksiin soveltuvat laitteet eivät ole tarkoitettu normaaliin kunnonvalvontaan. Taulukossa 11 on kunnonvalvontaan soveltuvia kannettavia ultraäänimittalaitteita.

Taulukko 11. Ultraäänimittauslaitteita ja niiden ominaisuuksia.

Ultraäänimittari	Ilmaisu	Ominaisuudet	Virtalähde	Mitat ja paino	Hintaluokka
SPM Leak Detector LDE-10	Visuaalinen ilmaisu LED-rivistöllä Kuultava ilmaisu kuulosuojainkuulokkeilla, VCO 0 – 5 kHz	Herkkyys säädettävä 50 dB Pienin havaittava äänen paine 1 nbar alueella 25 – 40 kHz	9 V paristo	215x50x40 mm Paino 240 g	1320 €
The Ultraprobe 2000	Visuaalinen ilmaisu viisarinäytöllä Kuultava ilmaisu kuulosuojainkuulokkeilla 100 Hz – 3 kHz	Taajuusalue 20 – 100 kHz 10-kierroksinen potentiometrillä säädettävä herkkyys Logaritminen ja lineaarinen mittaus Skannaus- ja kosketusanturi	Ladattavat NiCd -paristot	381x559x178 mm Paino 900 g (Kantolaukku varusteineen 6,4 kg)	9000 €
SKF Inspector 400 Ultrasonic Probe CMIN 400-K	Visuaalinen ilmaisu LED-rivistöllä Kuultava ilmaisu kuulosuojainkuulokkeilla	Taajuusalue 20 – 100 kHz 8-portainen säädettävä herkkyys	9 V paristo	133x50x203 mm Paino 300 g	1940 €
Monarch Instrument VPE 1000	Visuaalinen ilmaisu LED-rivistöllä Kuultava ilmaisu kuulosuojainkuulokkeilla	Taajuusalue kosketuksettomalla anturilla 36 – 42 kHz ja kosketusanturilla 18 – 22 kHz	9 V paristo Kestoikä 8 tuntia	179x61x21 mm Paino 272 g	\$ 799 Ultraäänilähetin \$ 129

Jos tarkastettava kohde on laaja tai mahdollista vauriokohtaa ei ole tiedossa, on ultraäänimittaus kosketuksettomalla anturilla usein paras vaihtoehto, koska sillä voidaan helposti etsiä vuotoja laajemmalla alueella, jopa yli kymmenen metrin etäisyydeltä. Kaikkiin taulukossa 11 oleviin laitteisiin saa kiinnitettyä sekä kosketus-, että kosketuksettoman anturin.

Elektronisella stetoskoopilla kuuntelua voidaan pitää perinteisen ruuvimeisselillä tai puutikulla kuuntelun nykyaikaisempaa versiona. Elektroninen stetoskooppi ei sinänsä eroa mekaanisesta stetoskoopista käyttösä puolesta, mutta on herkempi ja lisäksi kytkettävissä nauhuriin. Tämän lisäksi teollisuuskäyttöön tehdyn elektronisen stetoskoopin kuulokkeet ovat yleensä kuulosuojainmallia, mikä on lähes välttämättömyys tehtaiden meluisassa ympäristössä.

Elektronisia teollisuuskäyttöön tehtyjä stetoskooppeja on melko vähän markkinoilla ja toisaalta samaa laitetta markkinoidaan useammalla eri merkillä. Taulukossa 12 on esitelty kaksi Suomen markkinoilla yleisesti esiintyvää stetoskooppia.

Taulukko 12. Elektronisia stetoskooppeja

Stetoskooppi	Taajuusalue	Ominaisuudet	Virtalähde	Mitat ja paino	Hintaluokka
SKF TMST 2	30 Hz – 15 kHz	Säädettävä äänentoiston voimakkuus Kuulosuojainkuulokkeet Heikon pariston osoitin	9 V alkaaliparisto Kestoikä n. 20 tuntia	190x60x30 mm Paino 200 g + kuulokkeet 250 g	430 €
SPM ELS-12	?	Säädettävä äänentoiston voimakkuus Kuulosuojainkuulokkeet Mittakärjet 60 mm ja 290 mm	9 V alkaaliparisto Kestoikä n. 30 tuntia	205x50x40 mm Paino 300 g + kuulokkeet ??? g	740 € Hintaan sisältyy kuulokkeet EAR-10 (242 €)

6 POTENTIAALISTEN TYÖKALUJEN VALINTA

Työkalujen valinnassa painotettiin niiden käyttämän menetelmän toimivuuden lisäksi erityisesti helppokäyttöisyyttä ja soveltuvuutta Larox painesuodattimien kunnonvalvontaan asiakkaan tiloissa. Pieni koko oli myös tärkeä valintakriteeri, koska asiakastuki-insinöörit joutuvat kuljettamaan työkaluja ympäri maapalloa. Jokaiseen valittuun menetelmään verhokäyräanalyysiä lukuunottamatta päätettiin valita yksi työkalu, jota lähdetään tarkemmin testaamaan ja sitä kautta arvioimaan kunnonvalvonnan todellista toimivuutta Larox painesuodattimissa. Verhokäyräanalyysi pidetään kuitenkin vaihtoehtoisena laakereiden kunnonvalvonnan menetelmänä, joka voidaan tarpeen vaatiessa ottaa tarkempaan tutkimukseen.

6.1 Dataloggerin ja oheislaitteiden valinta

Lähtökohtana pääasiassa laakereiden kunnonvalvontaan käytettävän kannettavan dataloggerin valinnassa oli kyky hitaasti pyörivien laakereiden mittaukseen. Tämän vaatimuksen pohjalta valittiin valvontamenetelmiksi iskusysäysmittaus ja verhokäyräanalyysi.

Dataloggereiden keskinäisessä vertailussa kiinnitettiin huomioita tarpeettomien ominaisuuksien määrään. Esimerkiksi voitelukalvon paksuuden mittauksella on hyvin vähän käyttöä Larox painesuodattimen laakerien kunnon määrittämisessä, koska suurin osa laakereista pyörii niin pienellä kierrosnopeudella, ettei kyseistä voitelukalvon arvoa pystytä mittaamaan. Kaikenlaiset muutkin lisätoiminnot, kuten tasapainotus ja linjaus, eivät ole välttämättömiä painesuodattimen kunnonvalvonnassa. Lisäominaisuudet myös nostavat lähes poikkeuksetta laitteen hintaa tuntuvasti ja tekevät laitteesta monimutkaisemman käyttöä.

Värähtelyanalyysin tulkitseminen on useinmiten asiaan perehtyneen asiantuntijan tehtävä, mutta tässä tapauksessa laitteen käyttäjät eivät ole asiantuntijoita tällä alalla. Paras vaihtoehto Larox painesuodattimen laakereiden kunnon arviointiin on, että laite tekee sen automaattisesti ja kertoo yksiselitteisesti laakerin kunnon laitteen käyttäjälle.

Laakereiden kunnonvalvonnan testiin päätettiin valita SPM Instrument Oy:n mittalaite suurelta osin toimittajan pitkäaikaisen kokemuksen ja itse laitteen Laroxin käyttöön sopivien

ominaisuuksien johdosta. Testeri SPM T30 on käytöltään yksinkertainen iskusysäyksiä mittaava laite, joka sisältää myös ISO-standardin värähtelymittausominaisuudet. SPM T30 kertoo iskusysäysmenetelmällä mitatun laakerin kunnan automaattisesti väreillä. Vihreä tarkoittaa kunnossa olevaa laakeria, keltainen heikentynyttä käyttökuntoa ja punainen varoittaa laakerivauriosta. Kuntoarvion muodostamiseen vaaditaan alkuarvoina vain laakerin sisähalkaisija ja pyörimisnopeus, joiden perusteella laite laskee automaattisesti kunnanmäärityksessä tarvittavan vertailuarvon.

SPM T30 Logger –testerin taulukossa 6 mainittuun hintaan sisältyy testerin lisäksi iskusysäysmittausvarusteet pikaliitin- ja koetinantureineen, kuulosuojainkuulokkeet laakereiden kuuntelua varten, tärinänmittausvarusteet antureineen, sekä tiedonsiirtotarvikkeet Condmaster Pro –ohjelmaa varten. Edellä mainittu varustelu riittää Laroxin tarpeisiin, mutta myös Condmaster Pro –ohjelman hankinta on erittäin suositeltavaa. Ohjelma tuo mahdollisuuden muun muassa jatkuvaan mittaukseen, mikä on hitaasti pyörivien laakereiden mittauksessa käyttökelpoinen ominaisuus. Ilman ohjelmalla tapahtuvaa reitin ja jatkuvan mittauksen määrittäminen mittauksista on kirjattava muistiin käsin yksittäisten mittausten välillä.

Logger –versiossa ei ole mahdollisuutta värähtelyspektrin muodostamiseen tai EVAM värähtelyanalyysiin, tosin nämäkin toiminnot on saatavissa lisävarusteena. Varustelua voi tarvittaessa täydentää myös pyörimisnopeuden ja lämpötilan mittausvarustuksella.

6.2 Lämpötilanmittauslaitteiden valinta

Lämpökameran ja IR-lämpömittarin valinnassa painotettiin jo edellä mainittuja asioita, kuten helppokäyttöisyyttä ja pientä kokoa. Lämpökameran osalta kiinnitettiin erityistä huomiota hintaan, koska hintahaitari on erityisen suuri ja ainakin paperilla näyttää siltä että kameran kaksinkertainen hinta ei välttämättä tuo paljoakaan lisäominaisuuksia. Lämpökameralta päätettiin vaatia kuvamuistia ja mahdollisuutta siirtää kuvat tietokoneelle.

Taulukon 9 lämpökameroista testaukseen valittiin Raytek ThermoView Ti30, joka on juuri markkinoille tullut kamera varustettuna 100 kuvan muistilla, kuvansiirto-ominaisuuksilla ja InsideIR raportointiohjelmalla. Ominaisuuksiin ja nykyiseen hintatasoon nähden ThermoView Ti30 on edullinen kamera, kilpailijoiden ominaisuuksiltaan vastaavien mallien hinnat ovat

lähes kaksinkertaiset. Lisätua tuo ilmainen ohjelma, jossa on myös lämpökuvien muokkausmahdollisuus jälkikäteen. Rakenteeltaan Raytek vaikuttaa tukevalta ja on käyttöominaisuuksiltaan erittäin yksinkertainen.

IR-lämpömittarin osalta Laroxin tarkoituksiin soveltuisi ominaisuuksiltaan mahdollisimman yksinkertainen malli, mutta edullisimmissa mittareissa mittauskeilan suhdeluku on aivan liian pieni, tavallisesti 1:8. Koska Larox painesuodattimen ylimpien telojen laakerit ovat korkealla ja mittaus suoritetaan käynnin aikana, jolloin kiipeily painesuodattimen kyljessä ei ole mahdollista, vaaditaan mittarilta kykyä mitata telan laakerin pääty riittävällä tarkkuudella noin 5 metrin etäisyydeltä. Käytännössä tähän vaaditaan 1:50 luokkaa oleva mittauskeila. Tällaista ”pitkän matkan optiikkaa” ei yleensä ole saatavilla aivan edullisimpiin malleihin.

Yksi taulukon 10 vaihtoehtoista IR-lämpömittariksi on Raytek ST80 ProPlus, jossa on säädettävä emissiokerroin, 8 pisteen kohdistus rengaslaserilla ja mittauskeilan suhde 1:50. Jos hieman vaatimattomampi mittausetäisyys (mittauskeila 1:30) ja yhden laserpisteen kohdistus vain riittää esimerkiksi pienempien painesuodattimien lämpötilojen mittaukseen, on Irtec Miniray 100XL toinen vaihtoehto ollen noin 200 € Raytek mittaria edullisempi.

6.3 Akustisten mittalaitteiden valinta

Ultraäänimittauslaitteen ja elektronisen stetoskoopin kohdalla testiin tulevien laitteiden valinta on helppo, koska Larox Servicellä on käyttökelpoiset testiyksilöt omasta takaa.

Laroxille ostettiin vuosia sitten The Ultraprobe 2000 –ultraäänimittalaite tarkoituksena havainnoida uuden suodatinmallin levyypakan kalvovuotoja. Silloisen testauksen perusteella ultraäänimittaus havaittiin sopimattomaksi menetelmäksi kalvovuotojen havaitsemiseen ja mittalaite on ollut käyttämättömänä vuosia. Taulukossa 11 esiteltä The Ultraprobe 2000 on yhä markkinoilla ja ominaisuuksiltaan täysin kilpailukykyinen uudempien mallien kanssa, joten akun vaihdolla siitä saa toimivan testiyksilön. Jos menetelmä todetaan toimivaksi, kannattaa laitteeksi valita huomattavasti edullisempi malli, kuten SPM Leak Detector LDE-10. Hintaaero laitteiden välillä on yli 8000 € ja ominaisuuksiltaan edullisempi SPM LDE-10 on sopiva Laroxin käyttökohteisiin.

Elektronista stetoskooppia on Laroxilla käytetty satunnaisesti laakereiden ja muiden painesuodattimen osien kuunteluun. Larox Servicen stetoskooppi on taulukossa 12 esitelty SPM ELS-12, joka soveltuu hyvin Laroxin käyttöön pienen kokonsa ja tukevan rakenteensa johdosta. Lisätuna SPM T30 –testerin mukana tulevat kuulosuojainkuulokkeet sopivat myös ELS-12 stetoskooppiin. Näin voidaan haluttaessa säästää kustannuksissa hankittaessa molemmat mittalaitteet ja toisaalta pienentää mittalaitteiden tilantarvetta.

7 SUUNNITELMA VALITTUJEN TYÖKALUJEN TESTAUKSEEN

Larox painesuodattimen ennakoivaa kunnonvalvontaa suunniteltaessa törmätään siihen tosiasiaan, että käytettävissä ei juuri ole vertailukohteita, joiden avulla työkalujen toimivuutta Larox painesuodattimien kaltaisten laitteiden valvonnassa voisi arvioida etukäteen. Tämän takia valittujen työkalujen testaus on tärkeä osa lopullista käyttökelpoisuuden arviointia. Testijakson pituuden tulisi olla vähintään puoli vuotta.

Esimerkiksi lämpökameraa on paras testata tilanteessa, jolloin asiakkaalla on painesuodattimessaan todellinen vauriotilanne, kuten pikaliikesylinterin sisäinen vuoto. Tällaista testitilaisuutta ei välttämättä tule tarjolle joka kuukausi. Iskusysäysmittauksen osalta taas useamman kuukauden testijakso on välttämättömyys, sillä yhdenkään laakereiden kuntoa arvioivan menetelmän käyttökelpoisuus painesuodattimen telan laakereiden ennakoivassa kunnonvalvonnassa ei ole itsestään selvä.

Testausta varten avattiin sisäinen projekti CO0122, jonka kulut menevät kustannuspaikkaan BU3 / SA3 / 625.

7.1 SPM-värähtelymittauksen testaussuunnitelma

Menetelmä:

SPM iskusysäysmittaus (dBm/dBc) laakerien kunnon valvomiseksi.

Testilaitte:

Dataloggeri SPM T30 Logger. Laite on kannettava, alle kilon painoinen mittalaite, joka mittaa iskusysäyksiä ja ISO-standardin mukaista tärinän kokonaistasoa. Lisävarusteena saatavia ominaisuuksia ovat lisäksi lämpötilan ja kierrosnopeuden mittaus, sekä värähtelyspektri ja värähtelyanalyysin arviointi (EVAM).

Testausjärjestely:

Syksyllä 2003 käyttöön otettavaan uuteen PowerPF –painesuodattimeen asennetaan taittotelojen päätyjen laakeripesiin mittausnipat. Suodattimen malli on PF 120/120 C1 60, jonka levypakassa on 20 taittotelaa. Taittoteloista 6 kappaletta on varustettu hydraulisilla kankaan apuvetomootoreilla.

Koemittaukset suoritetaan vasta noin kuukausi suodattimen käyttöönoton jälkeen, jolloin laakerit ovat ”sisäänajautuneet”. Ensimmäisen koemittauksen suorittaa SPM Instrument Oy, jonka jälkeen arvioidaan lisätestien tarve ja mahdollisesti sovitaan SPM Instrument Oy:n kanssa mittauslaitteen vuokraamisesta tai hankkimisesta. Jos aihetta pitempiäaikaiseen testaukseen, mittaukset suoritetaan Larox henkilön toimesta noin yhden kuukauden välein. Testijakso kestää 4 – 6 kuukautta ja mittaukset käy tekemässä aina sama henkilö.

Toimenpiteet Laroxilla:

Toimenpiteet ennen ensimmäistä testimittausta:

- tilataan 25 kpl liimattavia mittausnippoja (SPM 36010, rst) ja 25 kpl suojahattuja nippoihin (SPM CAP-02), toimitus Laroxille
- mittausnipat asennetaan teloihin ennen suodattimen käyttöönottoa Laroxin toimesta
- Laroxin edustaja mukaan ensimmäiselle SPM Instrument Oy:n suorittamalle mittauskäynnille

Jos pitempiäaikaiseen testaukseen ryhdytään, Laroxin edustaja suorittaa mittaukset kerran kuukaudessa ja analysoi testitulokset. Asiantuntija-apuna käytetään tarvittaessa SPM Instrument Oy:n asiantuntijoita.

Toimenpiteet asiakkaalla:

Porataan ja liimataan Laroxin toimesta 20 kappaletta mittausnippoja teloihin. Nipat tulevat levypakan kummankin päädyn kuuteen alimpaan telaan. Apuviedolla varustettuihin teloihin nipat tulevat vain vapaaseen pätyyn, muihin teloihin nipat asennetaan kumpaankin pätyyn. Nipat asennetaan laakeripesän kannen ulkoreunaan laakerin kuormitusalueelle, joka käytännössä on telan päädyistä katsoen noin kello neljän kohdalla.

Asiakkaan tehtävänä ainoastaan mittauskäyntien mahdollisesti vaatimat käytännön järjestelyt. Mittaukset pyritään suorittamaan niin, ettei niistä koidu haittaa asiakkaan normaaliin tuotantoajoon.

Kustannukset:

Projektille CO0122, kustannuspaikka BU3 / SA3 / 625.

Ensimmäisen testimittauksen kustannukset:

- 25 kpl liimattavia mittausnippoja, tyyppi SPM 36010, materiaali rst, **280 €**
- 25 kpl suojahattuja, tyyppi SPM CAP-02, **14 €**
- nippon asennuksen matkakustannukset **250 €**
- ensimmäinen testimittaus SPM Instrument Oy:n toimesta, **300 € / päivä + Larox edustajan matkakustannukset 250 €**
- ensimmäinen vaihe **yhteensä 1094 €**

Seuraavien testimittauksien kustannukset riippuvaisia siitä, vuokrataanko vai hankitaanko mittalaite ensimmäisen testimittauksen jälkeen. Laitteen hankinta on etusijalla, koska laitevalmistajalla ei ole vuokraustoimintaa. SPM T30 –testerin käyttö on mahdollista myös ilman Condmaster Pro ohjelmaa, jolloin mittaustulokset on kirjattava käsin reitityksen ja jatkuvan mittauksen puuttumisen takia.

Testilaitteen hankinnan kustannukset:

- SPM T30 Logger –testerin tiedonsiirtotarvikkeineen **6033 €**
- ohjelma SPM Condmaster Pro **1889 €**
- **yhteensä 7922,70 €**

Muut mittauskäynneistä muodostuvat kustannukset ovat matkakustannuksia, jotka ovat noin **250 – 400 €** mittauskäynniltä riippuen mittauksiin menevästä ajasta.

Aikataulu:

Mittausnippon asennus 16.10.2003, matkan kesto 2 päivää. Mittausnipat asentaa Laroxin edustaja.

Ensimmäinen testimittaus SPM Instrument Oy:n toimesta 25.11.2003, Laroxin edustaja mukaan mittauskäynnille.

Seuraava testimittaus tammikuussa 2004 Laroxin toimesta, jonka jälkeen mittaukset kuukauden välein.

7.2 Lämpökameran testaussuunnitelma

Menetelmä:

Infrapunasäteilyn mittaamiseen perustuva lämpökamera.

Testilaitte:

Raytek ThermoView Ti30 mittaava lämpökamera.

Testausjärjestely:

Lämpökameralla kuvataan pajalla olevaa uutta painesuodatinta koekäytön yhteydessä. Tällä tavoin todetaan painesuodattimen lämpiäminen käytön aikana ja testataan kameran erottelukyky ja kuvan laatu. Painesuodattimen osien lisäksi kuvataan myös sähkökaappi ja hydrauliyksikkö.

Pajalla tapahtuvan koekuvauksen jälkeen kuvataan asiakkaalla käytössä olevaa painesuodatinta. Asiakkaan painesuodattimesta kuvataan telojen laakereiden lisäksi pikaliikesylinterit, hydrauliyksikkö, venttiileitä, prosessiputkistoa ja sähkökaappi. Jos kuvauksen yhteydessä löydetään potentiaalisia laakerivaurioita, sylinterivuotoja tai sähkölaitteiden vaurioita, niiden todenperäisyys pyritään varmistamaan perinteisillä huoltotarkastusmenetelmillä.

Erityistä huomiota kiinnitetään laakereiden kuvaamiseen ja pikaliikesylintereiden sisäisten vuotojen etsintään. Jos ensimmäisellä kuvauskäynnillä ei suodattimesta löydetä vikoja, joiden avulla kameran käyttökelpoisuutta voidaan arvioida, järjestetään uusi testikuvaus sopivan kuvauspaikan löydyttyä. Kuvauspaikaksi pyritään löytämään asiakas, jolla on painesuodattimessaan vuotavia sylintereitä ja/tai laakeriongelmia.

Toimenpiteet Laroxilla:

Laroxin edustaja suorittaa koekuvaukset pajalla Sintrol Oy:n edustajan kanssa. Koekuvauksen tuloksia arvioidaan kummankin osapuolen toimesta testauksen yhteydessä. Koekuvausta varten käytetään toimintakunnossa olevaa painesuodatinta niin kauan, että suunnitellut kohteet saadaan kuvattua toimintalämpötiloissaan.

Ensimmäisen asiakkaalla tapahtuvan testikuvauksen jälkeen Larox joko hankkii tai vuokraa lämpökameran Sintrol Oy:ltä.

Toimenpiteet asiakkaalla:

Asiakkaalla tapahtuva koekuvaus suoritetaan Larox edustajan toimesta, jonka lisäksi koekuvaukseen osallistuu huoltokäyntejä suorittanut Laroxin asiakastuki-insinööri. Koekuvaus suoritetaan erillisenä asiakaskäyntinä, mutta mahdolliset testin aikana esiin tulleet vikaepäilyt pyritään varmistamaan viimeistään seuraavalla huoltokäynnillä vian laadusta riippuen.

Asiakkaan tehtävänä ovat ainoastaan testauskäyntien mahdollisesti vaatimat käytännön järjestelyt.

Kustannukset:

Projektille CO0122, kustannuspaikka BU3 / SA3 / 625.

Lämpökamera saadaan lainaksi ensimmäiseen testiin, joten kustannuksia kertyy ainoastaan matkoista ja päivärahasta yhteensä **130 €**

Seuraavien testikuvausten kustannukset riippuvat siitä, hankitaanko vai vuokrataanko kamera. Kameran hankintakustannukset ovat **11900 €** sisältäen raportointi- ja analysointiohjelman. Kameran vuokrauksesta pitää sopia tapauskohtaisesti, mutta vuokraus on tarvittaessa mahdollista.

Aikataulu:

Koekuvaukset pajalla 12.11.2003 Sintrol Oy:n edustajan läsnäollessa.

Koekuvaukset asiakkaalla Laroxin toimesta 2.12.2003.

Seuraavat koekuvaukset asiakkaalla alkuvuoden 2004 aikana sopivan kuvauspaikan löydyttyä.

7.3 IR-lämpömittarin testaussuunnitelmaMenetelmä:

Kosketukseton lämpötilan mittaus infrapunatekniikalla.

Testilaitte:

Raytek ST80 ProPlus IR –käsipyrometri, lämpötila-alue -32°C ... +720°C.

Testausjärjestely:

Käsi­pyrometriä testataan lämpökameran testauksen yhteydessä, jolloin päästään vertailemaan lämpökameran ja IR-lämpömittarin keskinäistä paremmuutta Larox painesuodattimen ennakoivassa kunnonvalvonnassa.

Toimenpiteet Laroxilla:

Laroxin edustaja suorittaa koemittaukset pajalla. Koemittauksessa arvioidaan erityisesti IR-lämpömittarin käyttökelpoista mittausetäisyyttä esimerkiksi telan laakerien mittauksessa. Koemittauksia varten käytetään toimintakunnossa olevaa painesuodatinta niin kauan, että suunnitellut kohteet saadaan mitattua toimintalämpötiloissaan.

Toimenpiteet asiakkaalla:

Asiakkaalla tapahtuva koekuvaus suoritetaan lämpökameran testauksen yhteydessä Larox edustajan toimesta, jonka lisäksi koekuvaukseen osallistuu huoltokäyntejä suorittanut Laroxin asiakastuki-insinööri. Koekuvaus suoritetaan erillisenä asiakaskäyntinä, mutta mahdolliset testin aikana esiin tulleet vikaepäilyt pyritään varmistamaan viimeistään seuraavalla huoltokäynnillä vian laadusta riippuen.

Asiakkaan tehtävänä ovat ainoastaan testauskäyntien mahdollisesti vaatimat käytännön järjestelyt.

Kustannukset:

Projektille CO0122, kustannuspaikka BU3 / SA3 / 625.

Testimittausten kustannukset muodostuvat IR-käsi­pyrometrin hankintakustannuksesta, joka on **664 €**. Koska testaus suoritetaan lämpökameran testikuvausten yhteydessä, sisältyvät mittauskäynneistä aiheutuvat kulut lämpökameran testisuunnitelman matkakustannuksiin.

Aikataulu:

Koemittaukset asiakkaalla lämpökameran testikuvausten yhteydessä alkuvuoden 2004 aikana sopivan mittauspaikan löydyttyä.

7.4 Ultraäänimittarin testaussuunnitelma

Menetelmä:

Ultraäänimittaus vuotojen havaitsemiseen ja laakereiden kunnon määrittämiseen.

Testilaitte:

The Ultraprobe 2000 ultraäänimittauslaite kuulosuojainkuulokkeilla.

Testausjärjestely:

Koekuuntelu suoritetaan asiakkaalla iskusysäysmenetelmän ja elektronisen stetoskoopin testauksen yhteydessä. Asiakkaan painesuodattimesta, erityisesti sylintereistä ja venttiileistä, pyritään löytämään vuotokohtia, joiden perusteella arvioidaan laitteen käyttökelpoisuutta. Laakereita kuunneltaessa päästään vertailemaan iskusysäysmittauksen antamia tuloksia laakereista kuuluviin ultraääniin. Mahdollisen laakerivaurion ilmaantuessa voidaan vaurioituneen laakerin lähettämää ultraääntä verrata stetoskoopilla kuultavaan ääneen.

Mittaukset suoritetaan iskusysäysmittausten ohella Larox henkilön toimesta 1 kuukauden välein. Testaus suoritetaan Laroxin toimesta ja mittaukset tekee aina sama henkilö. Testijakso kestää 4 – 6 kuukautta riippuen iskusysäysmittauksen testijakson pituudesta.

Toimenpiteet Laroxilla:

Laroxin edustaja suorittaa koekuunteluita Laroxin tiloissa, esimerkiksi laboratorion laakeritestin yhteydessä. Koekuuntelujen avulla pyritään tunnistamaan erilaisten laitteiden synnyttämää ultraääntä ja yhdistämään vaurio tai vuoto niiden synnyttämään ultraääneen.

Toimenpiteet asiakkaalla:

Asiakkaalla tapahtuva koekuuntelu suoritetaan iskusysäysmenetelmän testauksen yhteydessä Larox edustajan toimesta.

Asiakkaan tehtävänä ainoastaan testauskäyntien aiheuttamat käytännön järjestelyt.

Kustannukset:

Testilaitte on jo Larox Servicen omistuksessa, joten testausta varten tehtävät hankinnat rajautuvat uuden akun ostoon.

Testaus suoritetaan iskusysäysmenetelmän testauksen yhteydessä, jolloin mittauskäynneistä aiheutuvat kulut sisältyvät iskusysäysmenetelmän testisuunnitelmassa ilmoitettuihin matkakustannuksiin.

Aikataulu:

Ensimmäinen testikuuntelu asiakkaalla iskusysäysmittauksen yhteydessä tammikuussa 2004, jonka jälkeen kuuntelut kuukauden välein iskusysäysmittausten aikataulun mukaisesti.

7.5 Elektronisen stetoskoopin testaussuunnitelma

Menetelmä:

Laakereiden kuuntelu elektronista stetoskooppia käyttäen.

Testilaitte:

SPM ELS-12 elektroninen stetoskooppi kuulosuojainkuulokkeilla.

Testausjärjestely:

Koekuuntelu suoritetaan asiakkaalla iskusysäysmenetelmän testauksen yhteydessä, jolloin päästään vertailemaan iskusysäysmittauksen antamia tuloksia laakereista kuuluvaan ääneen. Lisäksi mahdollisen laakerivaurion ilmaantuessa voidaan vaurioituneen laakerin lähettämää ääntä verrata ultraäänimittalaitteella kuultavaan ääneen.

Toimenpiteet Laroxilla:

Laroxin edustaja suorittaa koekuunteluita Laroxin tiloissa, esimerkiksi laboratorion laakeritestin yhteydessä. Koekuuntelujen avulla pyritään tunnistamaan laakereiden synnyttämää ääntä ja yhdistämään laakerivauriot niiden synnyttämään ääneen.

Toimenpiteet asiakkaalla:

Asiakkaalla tapahtuva koekuuntelu suoritetaan iskusysäysmenetelmän testauksen yhteydessä Larox edustajan toimesta.

Asiakkaan tehtävänä ainoastaan testauskäyntien aiheuttamat käytännön järjestelyt.

Kustannukset:

Testilaitte on jo Larox Servicen omistuksessa, joten testauksesta ei aiheudu hankinta- tai vuokrauskustannuksia.

Koska testaus suoritetaan iskusysäysmenetelmän testauksen yhteydessä, sisältyvät mittauskäynneistä aiheutuvat kustannukset iskusysäysmenetelmän testisuunnitelmassa ilmoitettuihin matkakustannuksiin.

Aikataulu:

Ensimmäinen testikuuntelu asiakkaalla iskusysäysmittauksen yhteydessä tammikuussa 2004, jonka jälkeen kuuntelut kuukauden välein iskusysäysmittausten aikataulun mukaisesti.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmien ja työkalujen kartoitus, vertailu ja valinta tehtiin pääasiassa kirjallisuutta tutkimalla käytännön osuuden seurattessa tätä tutkimusta valittujen työkalujen testijakson muodossa. Tutkimuksessa löytyi muutamia potentiaalisia työkaluja Larox painesuodattimien ennakoivaan kunnonvalvontaan.

Lämpötilanmittausta ja stetoskoopilla kuuntelua on satunnaisesti käytetty Laroxin laitteiden kunnonvalvonnassa ja ultraäänimittausta on kokeiltu vuosia sitten levypankan kalvojen vuodon etsinnässä. Sen sijaan iskujen- ja värähtelyjen mittausta, sekä lämpökuvaus ovat Larox Servicelle aivan uusia menetelmiä. Kaikilla edellä mainituilla menetelmillä pystyy Larox painesuodatinta mittaamaan, mutta vasta testijakson aikana selviää, onko niistä todellista hyötyä ennakoivassa kunnonvalvonnassa. Epävarmuus valittujen työkalujen toimivuudesta johtuu painesuodattimen ennakoivalle kunnonvalvonnalle asettamista erityisvaatimuksista. Hitaasti lyhyissä jaksoissa pyörivät ja vähän lämpenevät telojen laakerit ovat vaikeita mitattavia millä tahansa menetelmällä ja toisaalta suodattimen sokkeloiset rakenteet ja suojat vaikeuttavat pääsyä valvottaviin kohteisiin suodattimen käytön aikana.

On myös huomattava, että painesuodattimen lukuisten toimintojen ja useiden erilaisten valvottavien kohteiden johdosta on lähes mahdoton löytää yhtä työkalua, jolla kaikki valvottavat kohteet pystyttäisiin luotettavasti tarkastamaan. Esimerkiksi hitaasti pyörivien vierintälaakereiden ennakoivaan kunnonvalvontaan pystyvillä mittausmenetelmillä ja työkaluilla on hyvin vähän käyttöä painesuodattimen muiden osien valvonnassa.

Käytännössä painesuodattimen kunnonvalvonta vaatii useampia menetelmiä, kuten värähtelymittausta, laakereiden kuntoanalyysiä, lämpötilanmittausta, vuodonmittausta ja aisteilla tapahtuvaa kunnonvalvontaa tukemaan kaikkia edellä mainittuja.

8.1 Tulosten luotettavuuden tarkastelu

Larox painesuodattimen valvottavien kohteiden valinta ja kriittisyyden arviointi tehtiin pohjautuen omaan kokemukseeni Larox Servicen teknisessä tuessa, sekä haastatteleamalla kokeneempia asiakastuki-insinöörejä ja teknisiä asiantuntijoita. Asiakaspalautetta ja erilaisia vikatilanteita on myös kirjattu ylös muutaman vuoden ajan Vineyard Vintage –ohjelmaan, josta

voi hakutoiminnoilla etsiä tiettyjä vikaantumistilanteita ja näin arvioida ongelman yleisyyttä. Käytännössä kaikki asiakaspalautteet tai ongelmatilanteet eivät vielä nykyäänkään tule kirjatuiksi Vineyardiin ja tarkempia tilastoja eri suodattimen osien vikaantumistodennäköisyyksistä ei ole tehty.

Koska valvottavien kohteiden valinnassa ja arvioinnissa turvauduttiin pääasiassa Laroxin asiantuntijoiden muistitietoon ja erityisesti kriittisyyden arvioinnissa kokemusperäiseen tietoon eri asiakkaiden ongelmatilanteisiin perustuen, ei valvottavien kohteiden kriittisyyspisteiden määrittäminen ollut mahdollista tehdä täydellisen tarkasti. Kriittisyyden arviointi antoi kuitenkin tulokset, jotka vastaavat ainakin tällä hetkellä hyvin todellisuutta. Jo aiemmin mainittiin, että sähkömoottoreiden ja hydraulipumppujen käytännön kriittisyys ei aivan vastaa niiden saamaa korkeaa pistelukua johtuen yksinkertaisesti niiden toimintavarmuudesta Laroxin käyttökohteissa.

Menetelmien ja työkalujen valinnassa oli alunperinkin tarkoitus löytää potentiaalisia välineitä painesuodattimen kunnonvalvontaan, eli työkalujen todellinen hyöty ja toimivuus todetaan vasta testijakson aikana. Kaikki valitut työkalut täyttävät kuitenkin teoriassa niille asetetut vaatimukset, joten testauksen ensisijainen tarkoitus on arvioida työkalujen käytännön kätevyys asiakkaalla tapahtuvassa ennakoivassa kunnonvalvonnassa. Ilman pitkäaikaisempaa testausta on myös vaikea arvioida laakereiden kunnonvalvonnan toimivuutta erityisesti vasta alkuvaiheessa olevien laakerivaurioiden ilmaisijana. Esimerkiksi jatkuvasti 1500 r/min pyörivien laakereiden valvontamenetelmien valinnassa voisi paremmin luottaa laitevalmistajien lupauksiin ja valvontamenetelmien toimivuuteen, mutta 30 r/min jaksottaisesti pyörivät laakerit ovat aivan eri asia ja vaativat valvontamenetelmän soveltuvuuden arviointia tapauskohtaisesti.

9 JATKOTOIMENPIDESUOSITUKSET

Tutkimuksessa kartoitettiin ja valittiin ennakoivan kunnonvalvonnan työkaluja, joiden todellinen toiminta asiakkaalla tapahtuvassa kunnonvalvonnassa tulee erikseen todeta tätä tutkimusta seuraavan testijakson aikana. Testijakson aikana hyväksi havaittujen työkalujen käyttöönotto tulee todennäköisesti olemaan projektin vaikein vaihe ja sen vuoksi toiminnan suunnittelu tulee tehdä huolella yhteistyössä työkaluja lopulta käyttävien ihmisten kanssa.

Toimenpiteitä ennakoivan kunnonvalvonnan käyttöön ottamiseksi:

- huoltotarkastuksia tekevien asiakastuki-insinöörien kouluttaminen menetelmien, työkalujen ja niihin liittyvien raportointiohjelmien käyttöön
- suodatinmalli- ja asiakaskohtaisten toimintaohjeiden luominen
- menetelmäkohtaisen referenssitiedon keruu ja raja-arvojen määrittely suodatinmalli- ja asiakaskohtaisesti
- ennakoivan kunnonvalvonnan huomioon ottaminen painesuodattimen suunnittelu- ja valmistusvaiheessa
 - ✓ mittausnipat tarvittaviin kohteisiin jo suodattimen valmistusvaiheessa
 - ✓ telan laakeripesien seinämävahvuuden kasvattaminen ruuvilla kiinnitettävää mittausnippaa varten
 - ✓ tarkastusluukkuja suojiin esimerkiksi lämpökameralla tehtävän käynnin aikaisen tarkastuksen helpottamiseksi

Koulutus ja erityisesti asiakastuki-insinöörien motivointi uusien työkalujen käyttöön on ehkä tärkein vaihe ennakoivan kunnonvalvonnan käyttöönotossa Laroxilla. Vaikka ennakoiva kunnonvalvonta parhaillaan säästää työtunteja ja tekee suodattimen tarkastamisesta entistä helpompaa, tuo se mukanaan myös lisää vaativuutta suodattimen tarkastukseen ja erityisesti lisääntyntä raportointitarvetta.

Raportointi on osa-alue, johon tulee kiinnittää erityishuomiota, sillä ilman toimivaa raportointikäytäntöä ja sen mukanaan tuomaa referenssitietoa ei uusista menetelmistä saada irti niiden todellista potentiaalia. Asiakastuki-insinöörit viettävät suurimman osan aikaansa reissun päällä, joten raportointi tulisi olla mahdollisimman helppoa ja onnistua myös ilman verkkoyhteyttä. Paras vaihtoehto tietysti olisi, että kaikki kunnonvalvontaan liittyvä tieto

löytyisi yhdestä ohjelmasta. Laroxilla jo käytössä oleva Vineyard Vintage –ohjelma voisi periaatteessa toimia tällaisena tietopankkina, jos siihen olisi mahdollista räätälöidä toimiva raportointi ja mahdollisuus lämpökuvien ja tavallisten digikuvien tallennukseen ja katseluun.

LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. Saatu: [http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/230_0007.pdf](http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/230_0007.pdf)

Auvinen, V. SPM Instrument Oy: Laakereiden voitelukalvon paksuuden mittaus. Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –koulutus, Kunnossapitoyhdistys Ry, Lahti 2003.

Davies A. Handbook of Condition Monitoring, Techniques and Methodology. Chapman & Hall, London 1998, 565s.

Elo L. Mitä öljystä voidaan mitata? –Menetelmistä ja laitteista, Kunnossapito –lehti 8/2001. Kunnossapitoyhdistys ry, Itä-Uudenmaan Paino Oy, Loviisa 2001, 82s.

Esward T. J., Theobald P. D., Dowson S. P., Preston R. C. An investigation into the establishment and assessment of a test facility for the calibration of acoustic emission sensors. NPL Report CMAM 82, July 2002. Saatu: <http://www.npl.co.uk/npl/acoustics/publications/pdf/nplrepcmam082.pdf>

Holmberg K., Ronkainen H. VTT tiedotteita 1557: Käyttövarmuuden tekniikat. VTT Offsetpaino, Espoo 1994, 96s.

Infradex Oy. Lämpökuvausjärjestelmät, 2003. Saatu: <http://www.infradex.com/teoria.html>

Lindgren O. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät: Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvonta – Mittausmenetelmät, niiden valinta ja käyttö. Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –koulutus, Kunnossapitoyhdistys Ry, Lahti 2003.

Miettinen, J. Condition Monitoring of Grease Lubricated Rolling Bearings by Acoustic Emission Measurements. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisuja 307. Tampere 2000, 69s.

Nohynek P., Lumme V. E. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Kunnossapitoyhdistys ry. Painoyhtymä Oy, Loviisa 1996, 159s.

Rao B.K.N. Handbook of Condition Monitoring, First Edition. Elsevier Science Ltd, Oxford 1996, 603s.

Riutta E. Värähtelymittaukset. Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito –koulutus, Kunnossapitoyhdistys Ry, Lahti 2003.

Sarkimo M. Akustinen emissio prosessiteollisuuden kunnonvalvontamenetelmänä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1106. Espoo 1990, 18 s.

Stjenberg T. Lämpökamera kunnossapidon työkaluna. Kunnossapito-koulu N:o 56, Lehti 4, 2000.

Wowk V. Machinery Vibration - Measurement and Analysis. McGraw-Hill, Inc. USA 1991, 358s.