

Pirkka Pulkkinen

Voimalaitoksen ennakoivan kunnossapidon värähtelymittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

28.11.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Pirkka Pulkkinen Voimalaitoksen ennakoivan kunnossapidon värähtelymittaukset 51 sivua 28.11.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja(t)	Toimitusjohtaja Timo Hietanen Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Hi-Tekno Oy:lle. Tavoitteena oli perehtyä voimalaitoksen ennakoivan kunnossapidon värähtelymittausprosessiin, sekä suorittaa värähtelymittaukset eli reittimittaukset voimalaitosympäristössä.</p> <p>Työ koostuu teoriaosiesta ja värähtelyvalvonnan suorittamisesta käytännössä. Teoriaosiossa käsitellään teollisuuden kunnossapitoa, kunnonvalvontaa ja värähtelymittauksen perusteita. Käytännönosuus käsittelee värähtelyvalvonnan eri vaiheet mittauksien valmisteluista tulosten raportointiin.</p> <p>Mittaukset suoritettiin pääkaupunkiseudulla toimivalla voimalaitoksella. Mittareitille valittiin voimalaitoksen kriittisimmät koneet. Mittauksien jälkeen tulokset analysoitiin ja koneiden kunto arvioitiin.</p>	
Avainsanat	voimalaitos, värähtelymittaukset, kunnossapito

Author(s) Title Number of Pages Date	Pirkka Pulkkinen Vibration Measurements of Predictive Maintenance in a Power Plant 51 pages 28 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical engineering
Specialisation option	Energy and environment technology
Instructor(s)	Timo Hietanen, CEO Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The Bachelor's thesis was commissioned by Hi-Tekno Oy. The main purpose of this thesis was to study vibration measurements of predictive maintenance in a power plant and perform real vibration measurements in a power plant environment.</p> <p>The study consists of a theory section, and a section about practical vibration monitoring. The theoretical part discusses industrial maintenance, condition monitoring and the basis of vibration measurement. The practical section examines the different phases of vibration monitoring.</p> <p>The measurements were performed in a power plant that operates in the Helsinki metropolitan area. The most critical machines were chosen from the power plant for the vibration measurement route. After the vibration measurements, the data was analyzed and the condition of the machinery was evaluated.</p>	
Keywords	vibration measurement, power plant, maintenance

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kunnossapito	2
2.1	kunnossapidon määrittelyä	2
2.2	Kunnossapidon filosofiat	3
2.2.1	Korjaava kunnossapito	3
2.2.2	Ehkäisevä kunnossapito	3
2.2.3	Ennakoiva kunnossapito	4
3	Kunnonvalvonta	5
3.1	Hyödyt	5
3.2	Suunnittelu	7
3.3	Valvontamenetelmät	9
3.3.1	Värähtelymittaus	9
3.3.2	Kulumishiukkasanalyysit	11
3.3.3	Lämpötilamittaukset	11
3.3.4	Hyötysuhdemittaukset	13
4	Värähtelymittaus	14
4.1	Värähtelymittauksen perusteet	15
4.2	Värähtelysuureet	17
4.3	Yleisimmät värähtelymittauksiin liittyvät parametrit ja käsitteet	18
4.4	Värähtelyn esittäminen taajuustasossa eli taajuusspektri	20
4.5	Värähtelysuureen valinta	22
4.6	Mittausanturit ja mittalaitteet	23
4.6.1	Kiihtyvyyssanturit	23
4.6.2	Nopeussanturit	25
4.6.3	Siirtymäanturit	26
4.7	Mittauspisteen valinta	27
4.8	Värähtelymittauksen valvontamenetelmät	28
4.8.1	Tunnuslukuvalvonta	28
4.8.2	Kokonaistasovalvonta	29
4.8.3	Spektrianalyysi ja spektrivalvonta	29
4.8.4	Verhokäyrä- ja PeakVue-valvonta	31
4.8.5	Muita valvontamenetelmiä	33
5	Värähtelyvalvonnan suoritus käytännössä	36

5.1	Koneiden kartoitus	36
5.2	Kriittisyysanalyysi	36
5.3	Tietokannan luominen	37
5.3.1	Analyysiparametrisarjat	40
5.4	Mittaukset	44
5.5	Mittauksetulosten analysointi	46
5.6	Kuntoarvio	48
6	Yhteenveto	49
	Lähteet	50

1 Johdanto

Kunnossapito mielletään nykyään teollisuudessa tärkeänä tuotannontekijänä, jonka avulla tuotantolaitosta saadaan käytettyä tehokkaammin ja pidettyä kilpailukykyisenä. Kunnossapidolla tarkoitettiin ennen yleisesti koneiden korjaamista, mutta nykypäivänä kunnossapito koostuu erilaisista toiminnoista, joiden tarkoituksena on pitää koneet käyttökunnossa jatkuvasti.

Nykyään kunnossapidon johtamisesta löytyy myös erilaisia filosofioita, joista käytetyimpiä teollisuus- ja prosessilaitoksissa ovat ehkäisevä, ja ennakoiva kunnossapito. Ehkäisevä perustuu aikamääreisiin ja ennakoiva koneiden kuntoon.

Insinööriö koostuu teoriaosiesta ja värähtelyvalvonnan suorittamisesta käytännössä. Teoriaosuudessa käsitellään teollisuuden kunnossapitoa, kunnonvalvontaa ja värähtelymittauksen perusteita. Käytännön osuus käsittelee värähtelyvalvonnan eri vaiheet mittauksien valmisteluista tulosten raportointiin. Vaiheet koostuvat koneiden kartoituksesta, kriittisyysanalyysistä, tietokannan luomisesta, mittauksista, analyysistä ja kuntoarviosta.

Työn tavoitteena on perehtyä voimalaitoksen ennakoivan kunnossapidon värähtelymittausprosessiin, sekä suorittaa värähtelymittaukset eli reittimittaukset voimalaitosympäristössä. Perehtyminen tapahtui aiheeseen liittyvän kirjallisuuden ja muiden materiaalien avulla sekä keskustelemalla alan ammattilaisten kanssa. Värähtelymittaukset suoritettiin pääkaupunkiseudulla toimivalla voimalaitoksella. Tarkoituksena oli kartoittaa mitattavaksi valittujen koneiden kunto ja raportoida mahdolliset viat.

2 Kunnossapito

2.1 kunnossapidon määrittelyä

Kunnossapito merkitsee monelle asiaan perehtymättömälle käsitteenä vain erilaisten asioiden korjaamista. Kunnossapito kuitenkin käsittää myös vikojen ja vikaantumisen hallintaa ja estämistä, sekä asioiden luotettavuuden parantamista. Nykypäivänä kunnossapidon tarkoituksena on pitää koneet käyttökunnossa jatkuvasti ja laitteiden pelkkää korjaustoimintaa ei pidetä kunnossapidon päätarkoituksena. Kunnossapito nähdään myös erittäin tärkeänä tuotannontekijänä, jonka avulla tuotantolaitosta saadaan käytettyä tehokkaammin ja pidettyä kilpailukykyisenä.

Kunnossapito on määritelty myös monissa kansainvälisissä ja kansallisissa standardeissa, samoin kuin myös useissa alan teoksissa, joista seuraavaksi on muutama käytössä oleva:

- Standardi PSK 6201: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana.”
- Eurooppalainen standardi SFS-EN 13306: ”Kunnossapito koostuu kaikista kohteen eliniän aikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon.”
- Tunnettu alan edelläkävijä John Moubray määrittelee seuraavasti: ”Kunnossapidolla varmistetaan, että laitteet jatkavat sen tekemistä, mitä käyttäjät haluavat niiden tekevän.” [1, s. 26.]

2.2 Kunnossapidon filosofiat

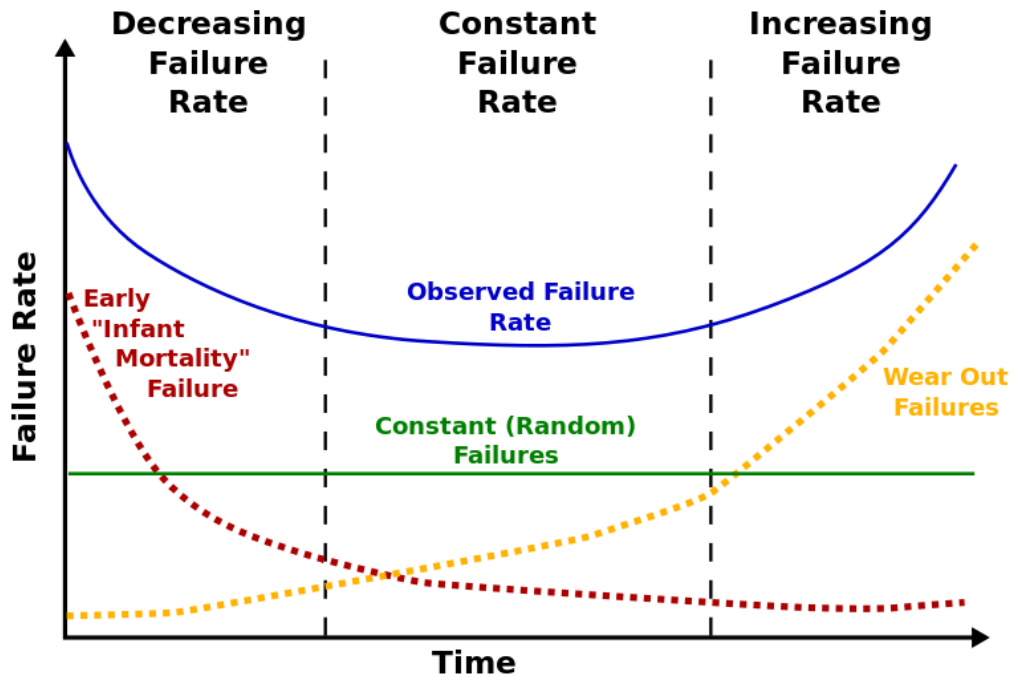
Teollisuus- ja prosessilaitoksista löytyy yleisesti kolmea erilaista kunnossapidon johtamisen tyyppiä: (1) Korjaava kunnossapito, (2) ehkäisevä kunnossapito tai (3) ennakkoiva kunnossapito. Nykypäivänä korjaava kunnossapito on kuitenkin harvinaista, kun ehkäisevän, ja ennakoivan kunnossapidon arvoa tehokkaana tuotannontekijänä on alettu ymmärtää.

2.2.1 Korjaava kunnossapito

Korjaavan kunnossapidon filosofia tarkoittaa tapaa, jossa laitokset ajavat koneilla, kunnes ne hajoavat, minkä jälkeen kone korjataan tai tilalle vaihdetaan uusi kone. Korjaavassa kunnossapidossa ei ajatella koneiden luotettavuuden parantamista tai kunnonvalvontaa. Tällainen kunnossapidon ajattelutapa merkitsee suuria kuluja, jotka johtuvat: (1) suurista varaosien varastoista, (2) ylityökorvauksista, (3) koneiden pitkistä seisokiajoista ja (4) matalasta käyttöasteesta. [6, s. 2–3.]

2.2.2 Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevälle kunnossapidolle löytyy monia määritelmiä, mutta kaikissa koneiden kunnossapito on aikamääreisiin perustuva. Koneille mielletään tietty ajanjakso, joka niiden ennustetaan kestävän, ja ennen tämän ajanjakson loppua koneet huolletaan. Kuvassa 1 nähdään tällaista ajanjaksoa kuvaava ”bathtub curve”, joka esittää tilastollisesti koneen vaurioitumismahdollisuuden ajan suhteen. Kuvaajasta nähdään, että uudella koneella on korkea mahdollisuus vikaantua alussa, laitteen asennuksesta johtuvien mahdollisten virheiden takia. Alun jälkeen vikaantumisen mahdollisuus laskee ja alkaa koneen niin sanottu normaali elämä, joka jatkuu tietyn ajanjakson. Normaaliajanjakson jälkeen vikaantumisen mahdollisuus nousee jyrkästi, ja koneen huolto yleisesti suunnitellaan ennen tämän tapahtuman alkua. [6, s. 3–4.]



Kuva 1. Bathtub curve [13]

Ehkäisevän kunnossapidon ongelmaksi muodostuu yleensä käytetty kunnossapidon jaksottaminen. Seisokit ja koneiden huollot pidetään tiettyinä ajanjaksoina, perustuen tilastollisiin oletuksiin koneiden eliniästä. Koneiden elinikään vaikuttavat kuitenkin suorasti laitoskohtaiset toimintatavat, systeemit ja muut muuttujat. Huoltojen jaksottaminen tilastojen perusteella johtaa siis normaalisti koneen ennenaikaiseen huoltamiseen tai rikkoutumiseen. Ennenaikainen huoltaminen johtaa siihen, että materiaali ja työ menevät hukkaan. Rikkoutuminen tarkoittaa, että joudutaan käyttämään korjaavaa kunnossapitoa, mikä on kolme kertaa kalliimpaa, kuin ennenaikainen huoltaminen. [6, s. 3–4.]

2.2.3 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoivasta kunnossapidosta löytyy myös monia erilaisia määritelmiä niin kuin ehkäisevästä kunnossapidostakin. Yleisesti ennakoiva kunnossapito mielletään koneiden kunnonvalvonnaksi erilaisilla mittauksilla. [6, s. 4.]

Ennakoiva kunnossapito on kuitenkin enemmän kuin vain koneiden kunnonvalvontaa. Se on kunnossapidon johtamisen filosofia, jolla parannetaan tuottavuutta, tuotelaatua

ja kokonaistehokkuutta laitoksissa. Ennakoiva kunnossapito hyödyntää erilaisia kustannustehokkaita kunnonvalvonnan työkaluja ja käyttää näitä saadakseen tietoa koneiden kunnosta, joiden perusteella huollot aikataulutetaan. Ennakoiva kunnossapito on kuntoon perustuvaa ehkäisevää kunnossapitoa. [6, s. 4–5.]

Ennakoivalla kunnossapidolla saadaan minimoitua vaurioista johtuvat suunnittelemattomat laitteiden alasajot ja varmistettua huollettujen koneiden kunto. Suuriosa vioista pystytään estämään muuttumasta vaurioiksi, jos viat havaitaan kunnonvalvonnalla ajoissa. Kunnonvalvonnan työkaluista värähtelymittausta pidetään erittäin hyvänä vaihtoehtona, koska sen avulla pystytään havaitsemaan viat aikaisessa vaiheessa. [6, s. 5–6.]

3 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonta on ennakoivan kunnossapidon osa-alue, mikä käsittää laitteiden kunnon ja suorituskyvyn seurannan erilaisilla mittaustyökaluilla. Mittaustyökaluilla saadaan aikaisessa vaiheessa havaittua koneen antamia merkkejä kunnon ja suorituskyvyn heikentymisestä, kun osataan katsoa oikeasta paikasta. Kuitenkin se miten mittausinformaatiota käytetään tuotannon ja kunnossapidon päätöksissä, kuuluu eri osaluueeseen. [4, s. 11–12.]

Laitteiden kunnonvalvonta on verrattavissa ihmisen terveyden seurantaan. Ihminen menee lääkärille testeihin ja lääkäri ottaa verikokeet, kuuntelee sydämen, tarkistaa verenpaineen ja katsoo nielun. Pyörivien laitteiden kunnonvalvonnassa voimme tarkistaa voitelun, kuunnella värähtelyä, tarkistaa moottorivirran, testata virtauksen ja poistopaineen, ja tunnustella laakereiden lämpötilaa. Testien avulla saavutetaan kuva laitteen kunnosta ja mitä laitteen sisällä tapahtuu. [4, s. 11–12.]

3.1 Hyödyt

Kunnonvalvonta on keino, jolla voidaan vaikuttaa yrityksen kannattavuuteen merkittävästi, sen tuottaman informaation avulla, mikä on oleellista laitoksen investointien, käytön ja kunnossapidon kannalta. [3, s. 11–13.]

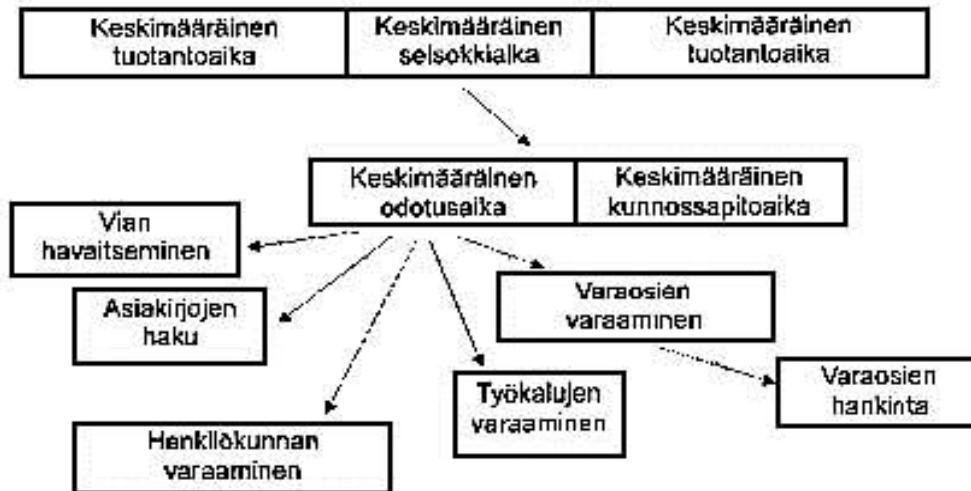
Kunnonvalvonnalla saavutettavia hyötyjä ovat muun muassa tuottavuuden kasvu, kunnossapidon suunnitelmallisuus, seisokkiaikojen parempi hyödyntäminen, suunnittele-

mattomien seisokkien väheneminen, koneen pidentynyt elinikä, seurannaisvaurioiden estäminen, turvallisuuden parantaminen ja vähemmän varaosien säilyttämistä. Kuvassa 2 esitetään kunnonvalvonnan eri liityntöjä. [3, s. 11–13.]



Kuva 2. Kunnonvalvonnan liityntöjä [7]

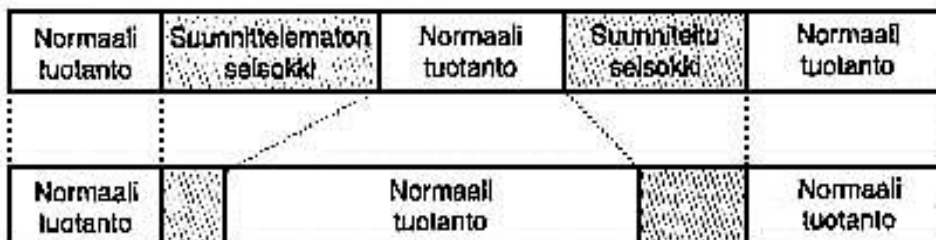
Kunnonvalvonnan avulla saavutettu seisokkiaikojen parempi hyödyntäminen mahdollistaa seisokkien keskimääräisen odotusajan poistamisen, kun siihen liittyvät toimenpiteet voidaan tehdä tuotantoajalla. Kunnonvalvonnan avulla saadaan myös suunniteltua laitteiden kunnossapitotyöt tarkemmin, ennen seisokin alkamista, kun mittauksilla saadaan ajoissa viat selville. Kunnossapitotöiden paremmalla suunnittelulla saadaan tämän myötä lyhennettyä keskimääräistä kunnossapitoaika. Kuvassa 3 on havainnollistettu kunnonvalvonnan vaikutus keskimääräisen seisokkiajan lyhentämiseen. [3, s. 11–13.]



Kuva 3. Kunnonvalvonta lyhentää keskimääräistä seisokkiaikaa [7]

Kunnonvalvonnan avulla on mahdollisuus saavuttaa myös tuotantoajan lisäämistä, kun keskimääräinen seisokkiaika lyhenee ja suunnittelemattomien seisokkien määrä vähenee. Kuvassa 4 esitetään tuotantoajat kunnonvalvonnan avulla ja ilman. [3, s. 11–13.]

Ilman kunnonvalvontaa



Kunnonvalvonnan avulla

Kuva 4. Tuotantoajan lisääminen kunnonvalvonnan avulla [7]

3.2 Suunnittelu

Laitteiden kokonaisvaltainen kunnonvalvonta vaatii eri tekniikoiden käyttämistä, mutta yleisesti kustannustehokkuussyistä käytetään vain muutamaa valittua tekniikkaa ja näillä saadaan usein riittävä kuva laitteen kunnosta. Yleisin käytetty valvontatekniikka kuitenkin on värähtelymittaus, koska se antaa aikaisessa vaiheessa tietoa vioista. Kunnonvalvonnassa käytettävien tekniikoiden, menetelmien ja valvottavien mittaussuurei-

den valintaan vaikuttavat laitteiden vikaantuvat komponentit ja todennäköiset vikaantumismekanismit. Se taas, miten ja millä aikataululla mittaukset tehdään, arvioidaan todennäköisen vikaantumisnopeuden kehityksen perusteella. [1, s. 162.]

Kunnonvalvonnan suunnittelu sisältää seuraavat vaiheet PSK 5705 standardin mukaan:

- Määritellään laitoksen koneiden kriittisyys ja kriittisten koneiden kunnonvalvonnan tarve.
- Selvitetään konekohtaisesti soveltuvat valvontamenetelmät.
- Arvioidaan menetelmien tekninen toteutettavuus
- Valitaan valvonnan piiriin ne laitteet, joille kunnonvalvonnan toteuttaminen on taloudellisesti kannattavaa.
- Valituilla laitteilla laaditaan kunnonvalvontasuunnitelma, joka määrittää:
 - käytettävät valvontatekniikat ja menetelmät sekä menetelmäkohtaiset raja-arvot
 - mittausvälit
 - käytettävät mittausjärjestelmät
 - mittaustoiminnan käytännön järjestelyt
 - mittausten dokumentoinnin, raportoinnin ja seurannan.

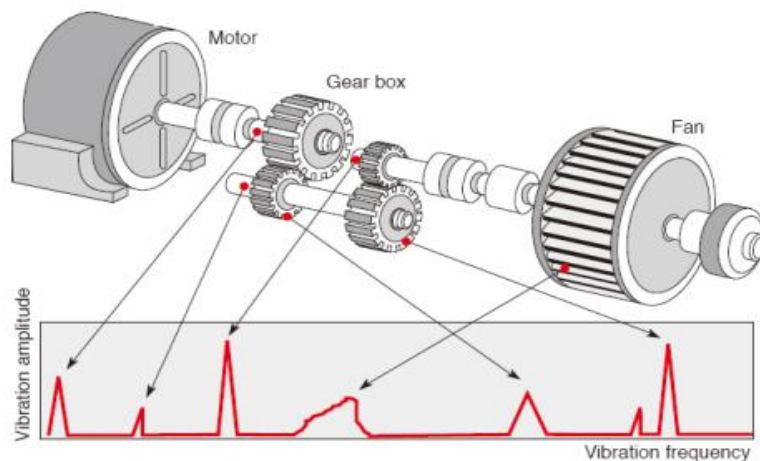
Jos laitoksesta löytyy kunnonvalvontajärjestelmä ennestään, voidaan suunnittelu aloittaa kartoittamalla nykyisen järjestelmän laajuus ja kattavuus. Kartoittamalla saadaan arvioitua kunnonvalvontaorganisaation toimintatavat ja käytössä olevat laitteet ja verrattua niitä asetettuihin tavoitteisiin. Arvioinnista saadulla tiedolla voidaan päättää onko tarpeen kehittää tai laajentaa nykyistä järjestelmää, jotta tavoitteet saavutettaisiin. [1, s. 162.]

3.3 Valvontamenetelmät

3.3.1 Värähtelymittaus

Kaikki pyörivät koneet kuten pumput, puhaltimet, turbiinit ja kompressorit, värähtelevät. Tämän värähtelyn voimakkuus ja malli kertoo koneen pyörivien osien sisäisestä kunnosta. [4, s. 14–15.]

Värähtelymittauslaitteilla saadaan seurattua koneiden aiheuttamaa värähtelyä ja sen voimakkuuden sekä mallin muutosta. Värähtelyn muutoksesta nähdään mittalaitteiden antaman tiedon perusteella, onko koneessa vikoja, ja tietoa vielä analysoimalla saadaan selville vian tyyppi ja sen mahdollinen aiheuttaja. Kuvassa 5 on havainnollistettu monimutkaisesta koneesta tulevia eri värähtäajuuksia. [4, s. 14–15.]



Kuva 5. Monimutkaisesta koneesta tulevat eri värähtäajuuudet [11]

Koneiden värähtelystä pystytään havaitsemaan useita erilaisia vikoja, kun osataan katsoa oikeasta paikasta, ja analysoimaan värähtelyn antamaa tietoa. Havaittavia vikoja ovat mm. laakeriviat, koneen epätasapaino, linjausvirhe, väljyys, epäkeskeinen roottori ja monia muita. [4, s. 14–15.]

Värähtelymittauksen perusmenettely yleisesti käsittää mittausanturin kiinnityksen laakeriin ja värähtelytasojen mittaamisen kannettavalla mittalaitteella, minkä jälkeen mittaukset siirretään tietokoneelle analysoitavaksi. Mittauksia voidaan suorittaa myös puolikiinteällä järjestelmällä ja kiinteällä järjestelmällä. Käytettävä järjestelmä valitaan mahdollisten vikojen kehitysnopeuden ja kohteen suojaustarpeen mukaan. Kannetta-

vaa mittalaitetta siirrettävällä anturilla käytetään kohteissa, joiden luokse päästävyys on helppoa ja vikaantuminen on hidasta suhteessa mittausväliin. Kuvassa 6 on havainnollistettu mittauksen suorittaminen kannettavalla mittauslaitteella.



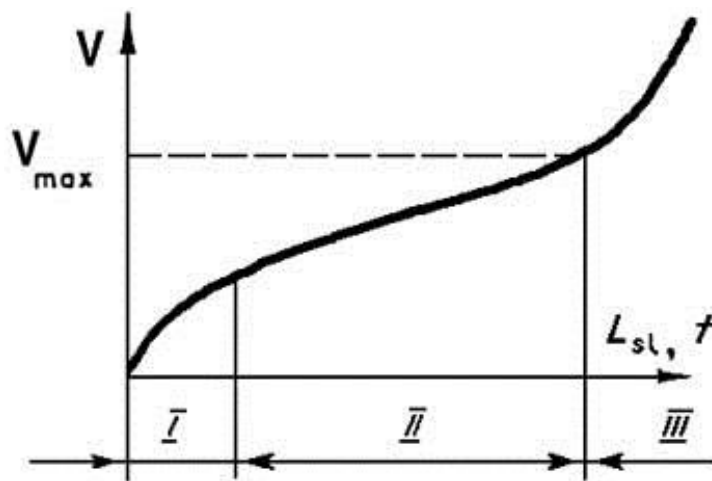
Kuva 6. Mittauksen suorittaminen kannettavalla mittauslaitteella [9]

Kiinteästi asennettua järjestelmää käytetään, kun laitteen vikaantumisenopeus ja häiriöherkkyys on suuri, mittausväli on lyhyt tai kuormitusvaihtelu on sellainen, että vertailukelpoisten mittausarvojen saanti on vaikeaa. Kiinteää järjestelmää käytetään myös jatkuvatoimisesti, kun laitteen vikojen kehittyminen vaurioiksi voi olla hyvin nopeaa, esimerkiksi turbiinit ja generaattorit.

Puolikiinteää järjestelmää käytetään, jos laitteen luokse on vaikea päästä tai sen lähellä mittaaminen nähdään henkilölle vaaralliseksi. Puolikiinteässä järjestelmässä anturi asennetaan kiinteästi, josta johdetaan kaapeli paikkaan, jossa mittaus voidaan suorittaa kannettavalla mittauslaitteella. [1, s. 263.]

3.3.2 Kulumishiukkasanalyysit

Kulumishiukkasanalyysi eli ferrografia on menetelmä, jossa seurataan koneiden voiteluöljyssä olevien kulumishiukkasten määrän ja kokojakauman muutoksia, joiden perusteella voidaan valvoa koneen kuntoa. Koneiden käynnin aikana tapahtuu aina normaalia kulumista, joka näkyy voiteluöljyssä noin 10 ym:n kokoisina kulumishiukkasina. Kulumisilmiön lisääntyessä ja voimistuessa, kulumishiukkasten koko kasvaa noin 10–100-kertaiseksi. Samalla tapahtuu myös hiukkasten muodossa muutoksia. Kun näitä yksittäisiä kulumishiukkasia tarkastellaan mikroskoopilla, saadaan tietoa kuluvasta komponentista ja mahdollisesta kulumismekanismista. Kuvassa 7 esitetään kuluminen toiminta-ajan funktiona. [3, s. 22–23.]



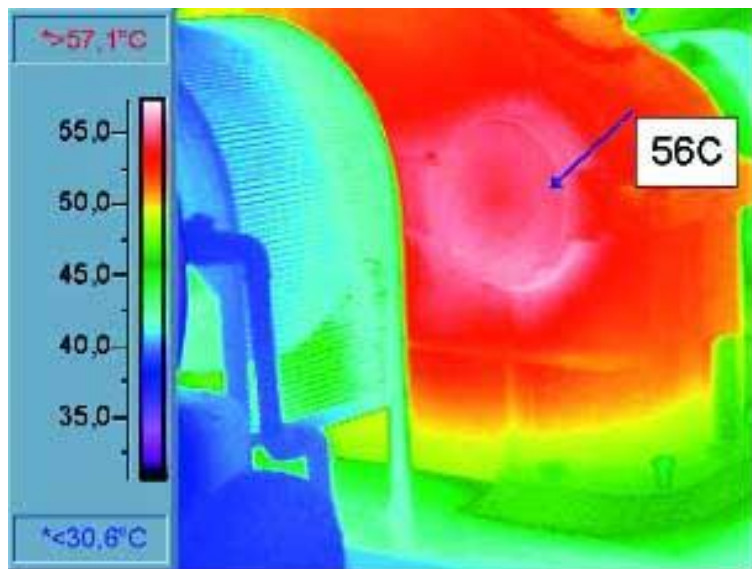
Kuva 7. Kuluminen (V) toiminta-ajan funktiona. Vaiheet: 1. Sisäänajokuluminen, 2. Tasainen kuluminen, 3. Voimakas kuluminen [10]

3.3.3 Lämpötilamittaukset

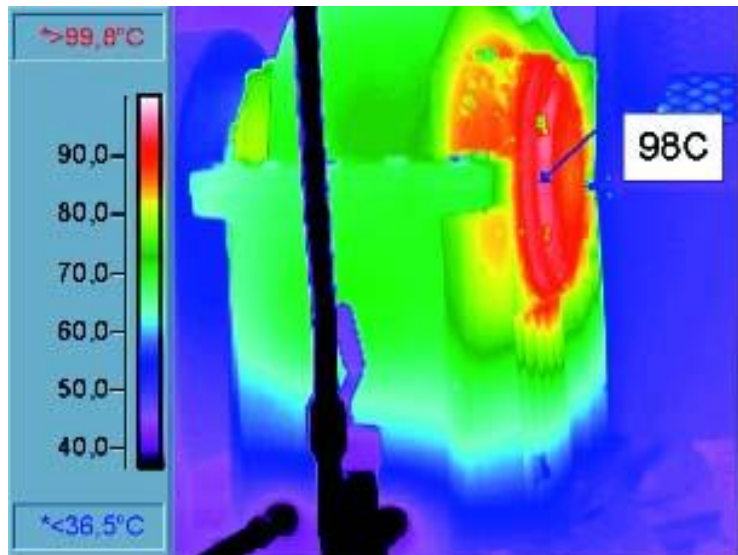
Lämpötilamittaukset ovat ennen olleet suosittuja tehtaiden kunnonvalvonnassa pyöriville koneille, laakereille ja muille laitteille. Mittauksilla yritetään saada selville laitteiden vikoja ja vaurioita, tutkimalla niiden aiheuttamia lämpötilojen muutoksia. Ne eivät kuitenkaan ole kovin tarkkoja havaitsemaan mm. vierintälaakerivikoja varhaisessa vaiheessa. Vikojen kuitenkin kehittyessä vaurioiksi on lämmönkehitys vikakohdassa huomattavaa, ja tämän takia lämpötilamittauksia kannattaa hyödyntää monien kohteiden kunnonvalvonnassa muita mittauksia täydentävänä menetelmänä. [3, s. 20.]

Nykyään teollisuuden kunnonvalvonnan lämpötilamittauksissa käytetään yleensä pistoolityyppisiä infrapunamittalaitteita tai infrapunakameroita. Pistoolityyppisillä mittalaitteilla on hyvänä puolena mahdollisuus tehdä mittauksia jopa 100 m:n päästä riippuen tietysti mittaustarkkuudesta. Mittauksia tehtäessä on kuitenkin muistettava erilaiset häiriöt, kuten lämpöheijastumat kohteiden pinnoista. [3, s. 20.]

Infrapunakameraa tulee käyttää, jos halutaan laajalta alueelta lämpötilamittauksia siten, että lähekkäin olevien pisteiden lämpötilat selviävät kerralla. Infrapunakameralla voidaan havaita yksityiskohtaisia koneenosien ongelmia, kuten telojen vinokuormitus ja epäkuntoisuus, venttiilien vuoto, tiivistimien huono voitelu, laakereiden kunto jne. Kuvassa 8 esitetään infrapunakameran kuvaa ehjästä laakerista ja kuvassa 9 viallisesta laakerista. [3, s. 20.]



Kuva 8. Infrapunakameran kuva ehjästä laakerista [8]



Kuva 9. Infrapunakameran kuva viallisesta laakerista [8]

3.3.4 Hyötysuhdemittaukset

Hyötysuhdemittauksilla tarkoitetaan kunnonvalvonnassa laitteiden ja prosessin toimintakyvyn selvittämiseksi suoritettavia erilaisia mittauksia. Tällaisia mittauksia ovat mm. virtausmäärien, lämpötilojen ja paineiden mittaukset eri kohdissa prosessia, jolloin voidaan verrata laskennallista ja todellista koneen tai prosessin hyötysuhdetta. Mitattavia kohteita voivat olla mm. turbiinit, lämmönsiirtimet, venttiilit, pumput ja prosessikokonaisuudet. [12.]

Mittauksilla pystytään havaitsemaan mm. seuraavia vikoja:

Turbiinit:

- siipien pinnan karheutuminen
- siipien kuluminen
- tiivistenauhojen välystenkasvu
- siipien mekaaninen vaurioituminen
- siipien pinnan kerrostumat

- akselitiivisteiden välysten kasvu
- asennusviat

Pumput:

- siipien kuluminen
- väärä toimintapiste

4 Värähtelymittaus

Teollisuudessa on käytetty pyörivien laitteiden ja koneiden kunnonvalvonnassa värähtelymittauksia jo pitkään, ja nykyään mittaukset ovat yleisesti käytössä. Voimalaitoksissa varsinkin värähtelymittauksien tekeminen kuuluu useasti kunnonvalvonnan strategiaan, laitosten kriittisyyden vuoksi. Värähtelymittaukset on mielletty tehokkaaksi työkaluksi kunnonvalvonnassa oikein käytettynä, koska niillä saadaan mahdollisesti havaittua aikaisessa vaiheessa vikoja ja vikojen alkua pyörivistä laitteista. Värähtelyvalvonnan suunnittelu ja mittausasetusten määrittäminen on kuitenkin varsinkin monimutkainen prosessi, joka vaatii monien asioiden ottamista huomioon. Valvonnan suunnittelu yleisesti riippuu valvottavasta kohteesta ja erityisesti sen kriittisyydestä tuotannon kannalta sekä toisaalta taloudellisista tekijöistä. [1, s. 223.]

Nykyään värähtelyn mittaaminen ja analysointi uusilla laitteilla ei vaadi käyttäjältä erityistä matemaattista osaamista, vaan enemmänkin huolellista suhtautumista pieniin muuttuviin yksityiskohtiin ja kiinnostusta asiaan. Jotta värähtelyvalvontaa voidaan kuitenkin alkaa suorittaa, on käytävä läpi värähtelymittausten teoriaperusteita, antureiden ja laitteiden valintaa sekä mittausasetusten tekemistä. Kaiken tämän lisäksi on myös jollain tasolla ymmärrettävä mm. valvottavien laitteiden toimintaperiaatteet, mahdolliset vikaantumismekanismit sekä myös prosessi, jossa valvonnan kohteena olevat laitteet ovat. Laitteiden mekaniikan perusymmärtäminen auttaa värähtelyvalvonnan tuloksien analysoimisessa. [1, s. 223.]

4.1 Värähtelymittauksen perusteet

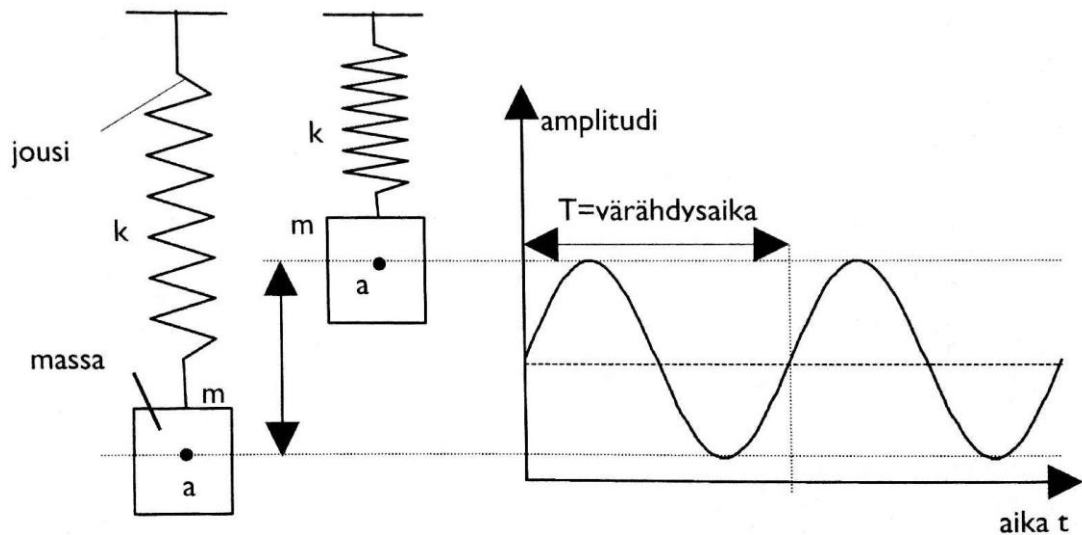
Kaikki pyörivät laitteet värähtelevät käydessään. Rakenteiden värähtely aiheutuu herätteiksi kutsutuista voimista, jotka voivat olla peräisin laitteiden normaalista käynnistä, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuuksista sekä vikaantumista. Laitteen normaalin värähtelyn herätteenä voivat toimia mm. polttomoottoreissa tapahtuvat räjähdykset, kampiakselikoneistojen liikkeet ja muut vastaavat käyntiin liittyvät tekijät. Värähtely saattaa myös johtua herätteistä, jotka ovat peräisin vioista ja epätarkkuuksista, kuten epätasapaino, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuudet ja virheet sekä kulumat tai muuten vaurioituneet osat. Jos värähtelyä ei ole tarkoituksella aiheutettu, niin vaikutukset laitteeseen ovat yleensä haitallisia. Haitallisuus ilmenee yleensä:

- väsymismurtumina
- liitosten löystymisenä
- meluna
- käyttöiän alenemisena
- lopputuotteen laadun heikkenemisenä
- käynnin epävarmuutena
- energiahäviönä
- lisääntyneinä jännityksinä
- häiriöinä muille koneille lähistöllä.

Mittaukset suoritetaan yleisesti laitteen kiinteästä osasta, kuten rungosta, koska herätteen aiheuttajat ovat tavallisesti liikkeessä olevia koneenosia, joihin ei pystytä mittausanturia kiinnittämään.

Vianmääritys värähtelymittausten avulla perustuu yleensä herätteiden ja erityisesti niiden muutosten selvittämiseen.

Periaatteessa kaikki värähtelevät laitteet ovat jousi-massasysteemejä, koska mikään laite ei ole täysin jäykkä. Yksinkertainen esimerkki värähtelevästä jousi-massasysteemistä on esitetty kuvassa 10. Kuvan jousi-massasysteemi esittää yhden vapausasteen värähtelijää, kun todellisuudessa tavallisella koneella, josta mitataan värähtelyä, on vähintään 6 vapausastetta. [2, s. 7.]



Kuva 10. Jousi-massasysteemin pisteen a värähtelyn esittäminen aikatasossa [1, s. 226]

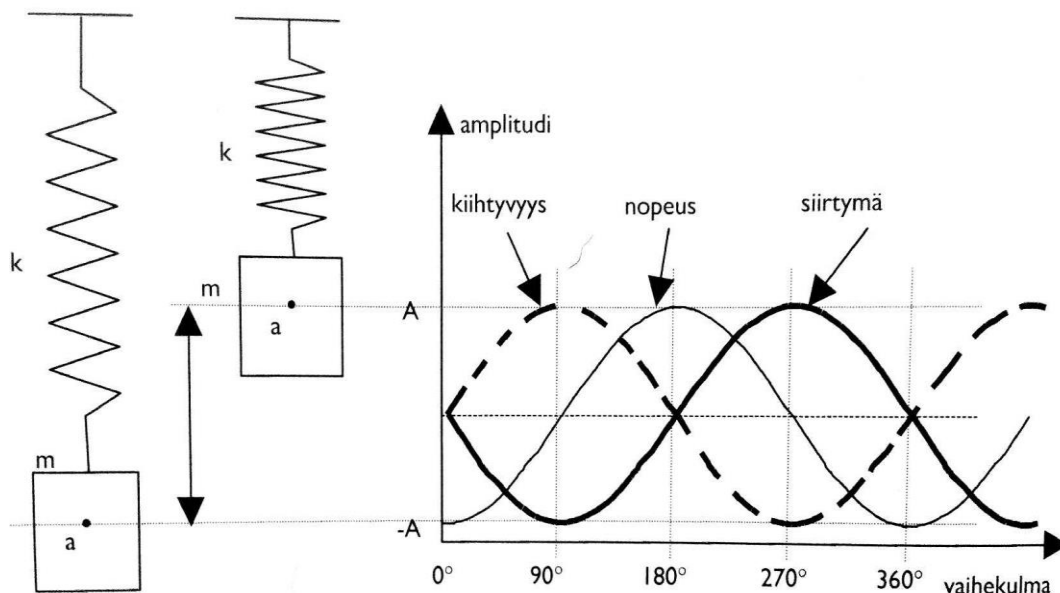
Kuvassa 10 kun massa m saatetaan liikkumaan, se liikkuu tasapainoaseman molemmin puolin käyden maksimissa sekä positiivisella että negatiivisella puolella kerran värähtelyliikkeen aikana. Kuvaan on piirretty tätä liikettä esittävä aikatasosignaali, jossa vaak akselilla on aika (t) ja pystyakselilla värähtelyliikkeen amplitudi (A). Yhden värähdysliikkeen kuluttua on palattu takaisin lähtötilanteeseen. Kuvassa esitetään värähtelyliikkeen jaksonaika, jota merkitään kirjaimella T . Pisteen (a) piirtämä käyrä on muodoltaan sinikäyrä. Värähtelyn amplitudi voidaan lukea pystyakselilta eli sillä kuvataan sitä, kuinka voimakasta värähtelyliike on.

Kuvan 10 signaalista käytetään nimitystä aikatasosignaali. Vaaka-akselilla on siis aika ja pystyakselilla pisteen siirtymä eli amplitudi. Värähdysaikaa T vastaa vaihekulma $\varnothing = 360^\circ$ eli $\varnothing = 2\pi$.

4.2 Värähtelysuureet

Edellä esitetyssä jousi-massasysteemissä käsiteltiin siirtymää, mutta yleisesti siirtymän lisäksi tarkastellaan myös nopeutta tai kiihtyvyyttä. Yleisimmin käytetty kunnonvalvonnan mittaussuure on värähtelynopeus. Matemaattisesti nopeus saadaan derivoimalla siirtymä kertaalleen ajan suhteen ja kiihtyvyys joko derivoimalla siirtymää kahteen kertaan ajan suhteen tai nopeus kertaalleen. Käänteinen toimitus derivoinnille on integrointi.

Kuvassa 11 nähdään, että siirtymällä, nopeudella ja kiihtyvyydellä on sama aaltomuoto, mutta vaihekulma eroaa 90° siten, että kiihtyvyys on 90° nopeutta edellä, joka taas on vastaavasti 90° siirtymää edellä. Kuvassa kaikkien käyrien amplitudit on piirretty samankorkuisiksi, mutta on huomattava, että niiden yksiköt eivät vastaa toisiaan. Taulukossa 1 on esitelty Euroopassa yleisesti käytettävät värähtelysuureet ja mittayksiköt. [2, s. 7–8.]



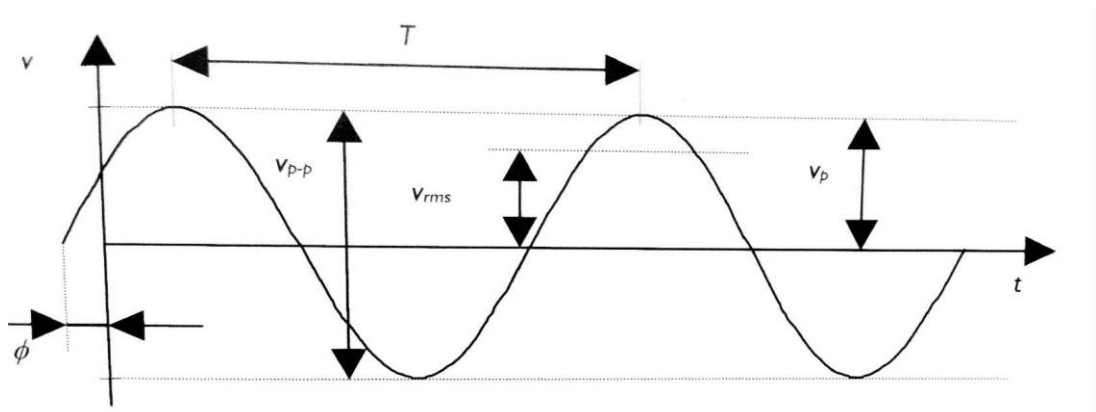
Kuva 11. Jousi-massasysteemin pisteen a värähtelyn siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys [1, s. 228]

Taulukko 1. Euroopassa yleisesti käytettävät värähtelysuureet ja mittayksiköt [1]

Suure	Lyhenne	Yksikkö
Siirtymä	s	μm
Nopeus	v	mm/s
Kiihtyvyys	a	m/s^2 tai $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Vaihekulma	ϕ	Aste ($^\circ$) tai radiaani ($360^\circ = 2\pi\text{rad}$)
Taajuus	f	Hz
Jakso	T	s

4.3 Yleisimmät värähtelymittauksiin liittyvät parametrit ja käsitteet

Jotta värähtelymittauksien tuloksia pystyy tulkitsemaan oikein, on edellä kuvattujen suureiden ja mittayksiköiden lisäksi tunnettava muutamia muitakin mittaukseen liittyviä asioita. Kuvassa 12 on esitetty signaalista saatavat yleisimmät perusparametrit nopeussignaalin avulla. Samoja parametreja käytetään vastaavasti myös siirtymälle ja kiihtyvyydelle.



Kuva 12. Yleisimmät värähtelysignaaliin liittyvät parametrit [1, s. 231]

T on värähdysaika eli jakso

v_{p-p} on nopeuden huipusta-huippuun arvo

v_p on nopeuden huippuarvo

v_{rms} on nopeuden tehollisarvo

ϕ on vaihekulma

- **Huippuarvo** kertoo aikatasosignaalin itseisarvoltaan suurimman huipun korkeuden verrattuna nollatasoon. Huippuarvo on yleinen tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus.
- **Huipusta huippuun arvo** kertoo suurimman ja pienimmän arvon erotuksen, mikä on yleensä n . kaksinkertainen huippuarvoon verrattuna.
- **Tehollisarvolla** on yhteys värähtelyn sisältämään energiaan, ja se kuvaa hyvin värähtelyn vaarallisuutta. Siniaallolle tehollisarvo on huippuarvo jaettuna luvulla $\sqrt{2}$ eli 0,707 kertaa huippuarvo. Kun signaalin muoto poikkeaa sinistä, ei suhdeluku myöskään ole enää sama.
- **Vaihekulma** kertoo jakson kohdan, johon värähtely on edennyt vertailukohdasta.
- **Huippukerroin** eli Crest Factor on suhdeluku, joka saadaan jakamalla huippuarvo tehollisarvolla. Tämä suure kuvaa signaalin ”piikikkyyttä” ja kohonnut arvo antaa usein viitteitä iskumaisista herätteistä eli esimerkiksi laakerivioista. [1, s. 231.]

Yleisin parametri kunnonvalvonnan tunnuslukumittauksissa on nopeuden tehollisarvo. Toinen yleisesti käytetty parametri tunnuslukuvalvonnassa on tärinärasitus, joka on värähtelyn nopeuden tehollisarvo, mitattuna standardissa määritetyllä taajuuskaistalla. Tärinärasitus on määritelty standardissa PSK 5701. Vaikka tehollisarvo on yleisemmin käytössä, on mittaustuloksia vertailtaessa aina muistettava tarkistaa, varsinkin jos tulokset poikkeavat toisistaan, että mittaukset on tehty samoilla asetuksilla. [1, s. 231.]

4.4 Värähtelyn esittäminen taajuustasossa eli taajuusspektri

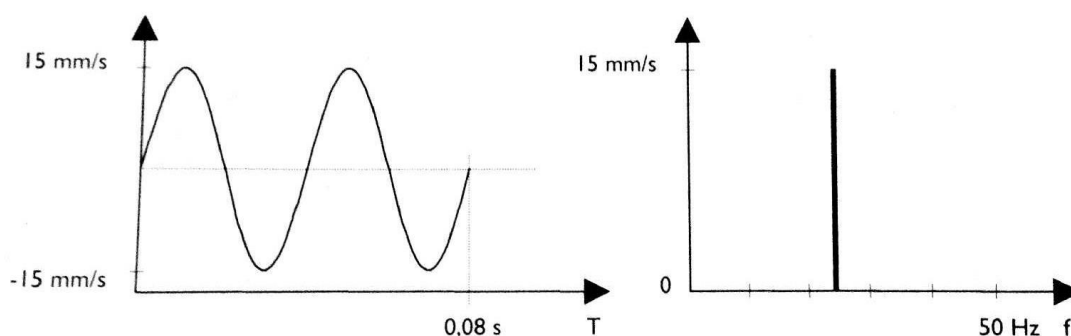
Värähtelyn taajuus kertoo, kuinka monta värähdysliikettä sekunnissa tapahtuu. Taajuuden lyhenne on f ja sen yksikkö on Hz (hertsi) = 1/s. Taajuuden määrittämiseksi aikatasosignaalista käytetään seuraavia kaavoja:

$$f = \frac{1}{T}, \text{ jossa } f \text{ on taajuus ja } T \text{ on värähdysaika}$$

$$f = \frac{n}{t}, \text{ jossa } f \text{ on taajuus, } n \text{ on värähdysten lukumäärä ja } t \text{ on aika}$$

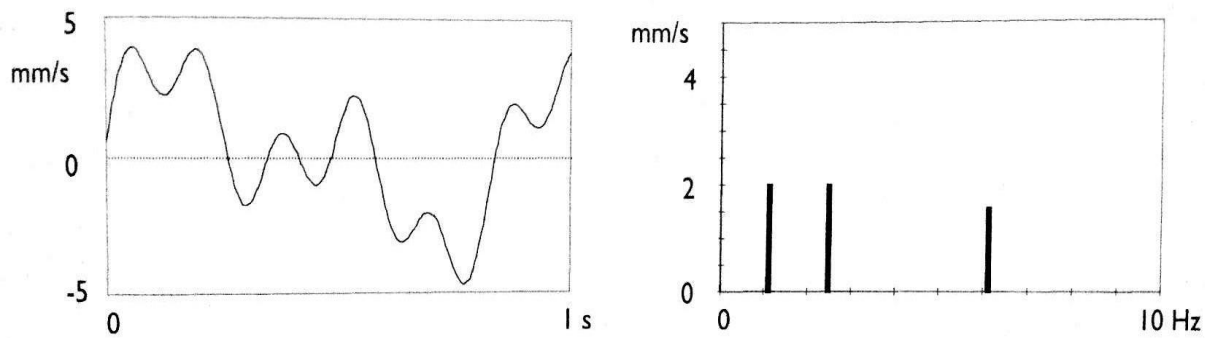
Esimerkiksi jos moottorin pyörimisnopeus on 1000 rpm (rounds per minute), saadaan pyörimistaajuudeksi 16,66 Hz, kun pyörimisnopeus jaetaan 60:lla.

Käytännön työssä kun värähtelymittausten tuloksia analysoidaan, esitetään värähtely yleisemmin taajuustasossa kuin aikatasossa, jota käsiteltiin aikaisemmissa kappaleissa. Taajuustasossa vaaka-akselina on taajuus ja pystyakselina värähtelyn amplitudi. Taajuustasossa amplitudi esitetään ainoastaan positiivisella puolella. Aikaisemmissa esimerkeissä kuvattiin hyvin yksinkertaista värähtelytapausta, jossa signaali sisälsi vain yhden värähtelykomponentin. Yhden värähtelykomponentin pystyy helposti havaitsemaan aikatasosta, mutta käytännössä tilanne on kuitenkin sellainen, että signaali sisältää eri koneenosien aiheuttamia värähtelyjä, joita aikatasosignaalista on vaikea erottaa. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertainen tapaus siniaallosta sekä aika- että taajuustasossa. Kuvassa nähdään taajuus selvästi jo aikatasosta, kun signaali käsittää vain yhden komponentin. [2, s. 9–10.]



Kuva 13. Yksittäisen siniaallon esittäminen aika- ja taajuustasossa. Taajuusspektrissä pylvään korkeus kuvaa siniaallon amplitudia ja sen paikka vaaka-akselilla taajuutta. [1, s. 232]

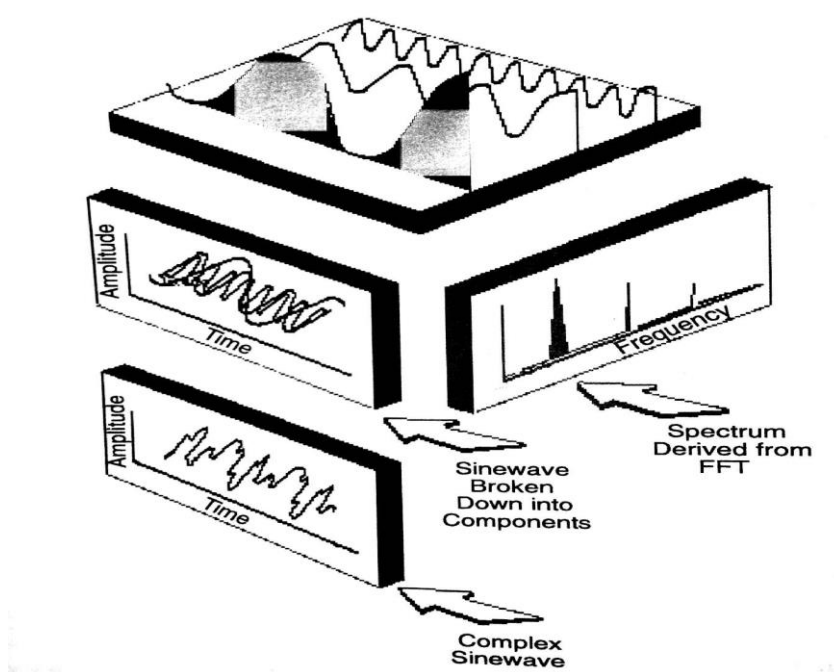
Kuvassa 14 on taas esitetty kolmesta komponentista koostuva signaali sekä aika- että taajuustasossa. Kuten nähdään, niin kuvan aikatasosignaalista on vaikea erottaa mitä taajuuksia signaalissa on. Taajuusspektrissä yksittäiset taajuudet voidaan erottaa helposti.



Kuva 14. Useasta taajuudesta koostuva aikatasosignaali ja sen esittäminen taajuustasossa [1, s. 233]

Kuten edellisistä esimerkkikuvista huomaa, on käytännön analysointityössä yleisesti järkevää tutkia värähtelyä taajuustasossa. On kuitenkin muistettava, että joissain tapauksissa aikatasosignaalia katselemalla saadaan sellaista tietoa, joka ei näy taajuustasossa. Taajuustasoesityksestä käytetään nimitystä taajuusspektri, joka lasketaan yleensä FFT (Fast Fourier Transform) muunnoksella aikatasosignaalista. Nykyään värähtelymittauksissa käytettävät analysaattorit tekevät tämän muunnoksen automaattisesti, minkä takia mittaajien ei tarvitse perehtyä sitä käsittelevään monimutkaiseen laskennan teoriaan. [2, s. 9–10.]

Kuvassa 15 nähdään, kuinka aikatasoa voisi kuvitella taajuusspektrin sivunäkymäksi ja taajuusspektriä aikataason päätynäkymäksi. FFT-muunnoksen avulla voisi taas kuvitella käännettävän jokaista taajuutta 90° aikatasossa.



Kuva 15. Aikatason ja taajuusspektrin vertailu [14, s. 4–10]

4.5 Värähtelysuureen valinta

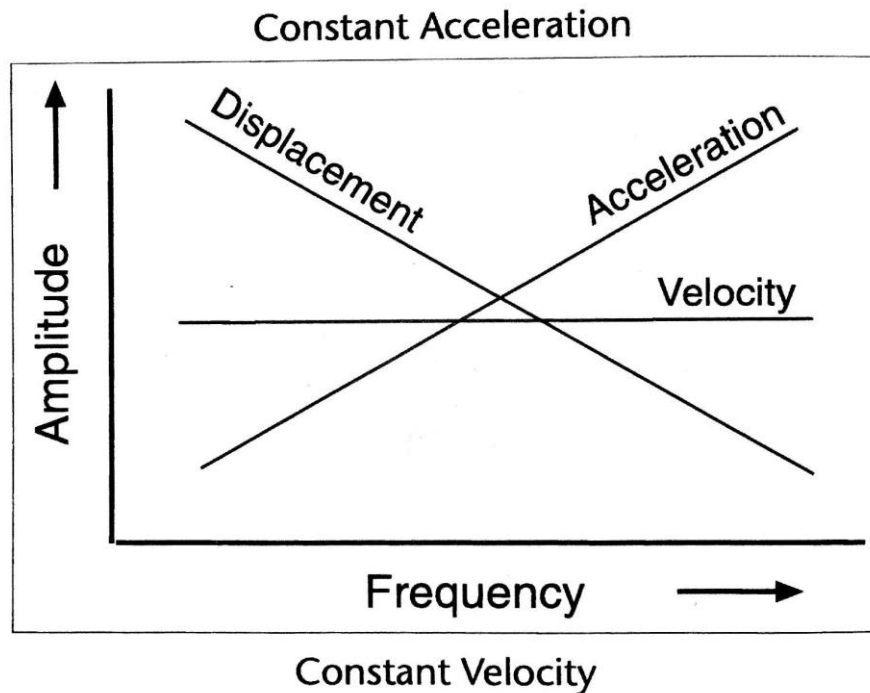
Mittauksia tehdessä on muistettava valita sellainen värähtelysuure, joka on riittävän herkkä havaitsemaan koneen kunnon muutoksen aiheuttamat värähtelyt. Mikäli mitattavasta kohteesta voidaan olettaa tulevan värähtelyä sekä matalilla että korkeilla taajuuksilla, voidaan mittauksia suorittaa eri suureilla, jotta saadaan luotettavampia tuloksia. [3, s. 50.]

Yleensä käytetään värähtelysuurena nopeutta, koska sillä on melko hyvä herkkyys laajalla taajuusalueella. Värähtelyn sisältämä energiamäärä on myös lähes verrannollinen värähtelyn nopeuteen, mikä myös puoltaa tämän suureen käyttöä. Monet standardit ja normit käyttävät värähtelyn nopeusarvoja kuvaamaan sallittuja ja ei-sallittuja värähtelyarvoja. [3, s. 50.]

Siirtymää on järkevintä käyttää mittaussuurena, kun mitattava kone on hidaskäyntinen, alle 300 rpm tai jos oletettavat viat ilmenevät matalilla alle 100 Hz:n taajuuksilla. Matalilla taajuuksilla havaittavia vikoja voivat olla mm. liukulaakeriviat, hihnaviat ja hitaasti pyörivien akselien linjausvirheet. [3, s. 50.]

Mikäli mitattava kone on nopeakäyntinen, yli 9000 rpm tai viat ilmenevät korkeilla yli 1000 Hz taajuuksilla, kannattaa käyttää kiihtyvyyttä mittaussuureena. Korkeilla taajuuksilla ilmeneviä vikoja saattavat olla mm. laakeriviat, hammasvial vaihteistoissa ja tietyt sähkömoottoriviat.

Kuvassa 16 nähdään kolmen värähtelysuureen suhteet, kun nopeus pysyy vakiona. Kuvasta huomataan, että kiihtyvyys korostaa korkeita taajuuksia ja siirtymä matalia.



Kuva 16. Taajuusspektri esitettyinä siirtymänä, nopeutena ja kiihtyvyytenä [14, s. 4–5]

4.6 Mittausanturit ja mittalaitteet

4.6.1 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturit ovat ylivoimaisesti yleisimmin käytettyjä antureita koneiden värähtelymittauksissa nykyään. Anturin yleinen käyttö johtuu sen monipuolisuudesta ja edullisesta hinnasta. Mittalaitteen elektroniikalla pystytään kiihtyvyyssignaali integroimaan nopeudeksi ja nopeus vielä siirtymäksi, jonka myötä samaa anturia voidaan käyttää sekä koneiden matalataajuisen, että korkeataajuisen vikojen havaitsemiseen. [3, s. 46.]

Toimintaperiaate kiihtyvyyssanturilla on hyvin yksinkertainen, vaikka se on rakenteeltaan monimutkainen. Tärkeimpänä komponenttina anturissa on pietsosähköinen kide, jonka kiinnityselementit kiinnittävät anturikuoreen, ja jonka päälle tai sivuille on asennettu massa. Mittauksia suorittaessa kun anturi on kiinnitettyä kohteeseen, liikkuu anturi yhtenevästi mittaushetken kanssa ja hitausvoimien vaikutuksesta pietsosähköiseen kiteeseen liittyvä massa joko puristaa tai venyttää kidettä hetkellisesti. Tämä venyminen ja puristaminen aiheuttaa jatkuvasti suuruuttaan vaihtavan varauksen, joka on verrannollinen anturin kiihtyvyyteen. Kiteessä syntyvä muuttuva varaus johdetaan anturin sisäiseen tai ulkoiseen varausvahvistimeen, jossa se muunnetaan jatkuvasti muuttuvaksi jännitteeksi, joka muodostaa mittaussignaalin. [3, s. 46–47.]

Kiihtyvyyssanturin tyypillinen mittausalue on noin 2–14.000 Hz, mutta ala- ja ylärajataajuuksiin vaikuttavat kiinnitystapa ja anturin ominaisuudet. Tyypillisimpiä kiinnitystapoja ovat magneetti, ruuvi tai käsillä painaminen.

Hyvät puolet:

- laaja taajuusalue
- laaja amplitudialue
- edullinen
- pieni koko ja keveys

Huonot puolet:

- rakenne herkkä
- korkeataajuinen osa signaalista voi hukuttaa matalataajuisen osan alleen
- signaali/häiriösuhde ei ole erityisen korkea
- anturilla on asettumisaika ennen kuin sillä voi alkaa mittaamaan (1 s – 600 s)

4.6.2 Nopeusanturit

Nopeusanturi koostuu pääasiassa anturikuoresta, jonka sisällä on käämi, ja sen sisällä on magneettinen massa, joka on kiinnitetty jousilla anturin päätyihin. Kun anturi on kiinnitetty mittauspisteeseensä ja rakenne värähtelee, seuraa jousitettu massa viiveellä anturikuoren liikkeitä. Tämän massan liikehdintä anturikuoren sisällä aiheuttaa käämiin anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, mikä johdetaan mittaussignaalina anturista ulos. [3, s. 47–48.]

Värähtelymittauksien analysoinnissa käytetään usein yksikköinä nopeutta, mutta anturina ei kuitenkaan tyypillisesti ole nopeusanturi nykypäivänä. Kehityksen myötä on siirrytty käyttämään usein kiihtyvyyssanturia, koska sen signaalia pystytään integroimaan helposti nopeussignaalksi. [3, s. 47–48.]

Hyvät puolet:

- mittaa värähtelyn nopeutta, mikä on yleisimmin käytetty mittaussuure kunnonvalvonnassa
- signaali on voimakas
- helppo käyttää
- herkkä
- ei vaadi ulkoista virtalähdettä

Huonot puolet:

- ei sovellu matalien tai korkeiden taajuuksien mittaamiseen
- kooltaan isoja
- rakenne herkkä, voi vaurioitua
- herkkiä lämmön vaihteluille

4.6.3 Siirtymäanturit

Siirtymäanturit mittaavat suhteellista liikettä akselin ja anturin kärjen välillä. Suhteellisen liikkeen mittaamisen takia anturi vaatii vakaata kiinnityskohtaa ja onkin yleensä pysyvästi asennettu. Siirtymäantureita käytetään tyypillisesti liukulaakeroitujen koneiden jatkuvassa kunnonvalvonnassa, kuten turbiinit, suuret pumput ja puhaltimet. Anturilla pystytään mittaamaan akselin värähtelyn lisäksi pinnanmuodon muutoksia, asemaa ja akselin ratakäyriä ja sitä voidaan käyttää linjaustilan kunnonvalvonnassa. [3, s. 49.]

Siirtymäanturin toiminta perustuu sen päässä olevan kelan muodostamaan magneettikenttään, joka induoi pyörrevirtoja kohtaamaansa ferromagneettiseen pintaan. Pyörrevirrat aiheuttavat oman muutoksensa anturin päässä olevan kelan jännitteeseen. Siirtymäanturin ja mitattavan kappaleen pinnan välimatkan muuttuessa, aiheutuu pinnan pyörrevirtoihin muutoksia, minkä myötä jännite muuttuu kelan päässä ja tämä muutos saadaan anturista ulos jännitteenä. Anturista ulos tuleva jännitesignaali kertoo anturin ja mittauspisteen välisen etäisyyden. [3, s. 49.]

Hyvät puolet:

- matala taajuusvaste
- pieni koko
- mittaa myös staattista etäisyyttä

Huonot puolet:

- kalliita ja vaikeita asentaa
- ei voi käyttää korkeilla taajuuksilla
- erilaiset magneettiset ominaisuudet mitattavassa pinnassa muuttavat mittaustulosta

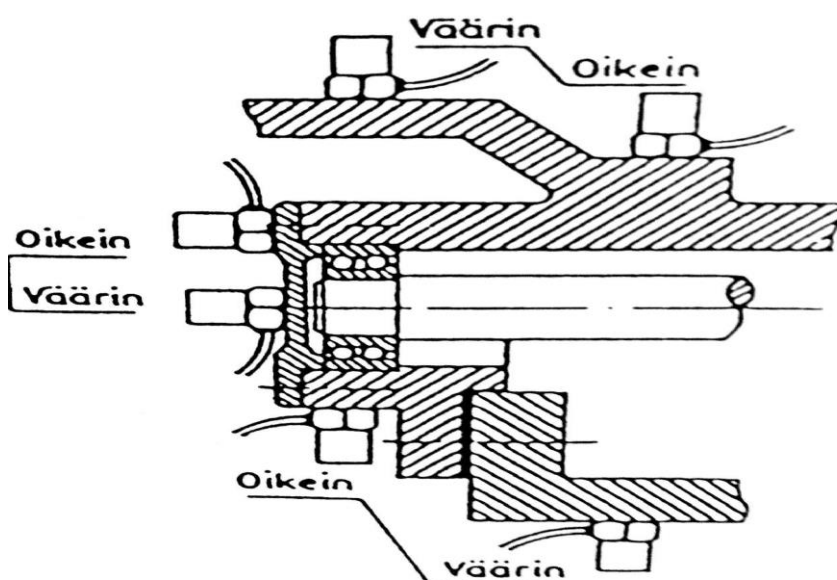
Soveltaminen:

- yleensä käytetään alhaisella nopeudella toimivien laitteiden mittaamiseen (Alle 600 rpm)

4.7 Mittauspisteen valinta

Mittauspiste tulee valita niin, että mittausanturi ja värähtelyn lähde ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Värähtely menettää aina osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan, minkä vuoksi rajapintojen määrä anturin ja lähteen välillä on oltava mahdollisimman pieni. Kuvassa 17 on havainnollistettu anturin paikan valinta. [5, s. 22–23.]

Värähtely siirtyy pyörivistä massoista laitteiden runkoon laakereiden kautta, ja tämän takia mittauspiste kannattaa valita laakereiden kohdalta. Mittaukset suoritetaan yleisesti säteissuunnassa ja tarvittaessa akselin suunnassa. [5, s. 22–23.]



Kuva 17. Anturin paikan valinta värähtelymittauksessa [3, s. 53]

Mittauspiste tulee valita niin, että mittausanturin asennukselle ja vaihtamiselle on tilaa. Anturin kaapelointi ja suojaus täytyy suorittaa luotettavasti hyvien asennustapojen mukaisesti. Anturiin ei myöskään saa kohdistua sallittua suurempaa kiihtyvyyttä tai lämpötilaa. [5, s. 22–23.]

Kun mittauspisteet on valittu, merkataan pisteet yleisesti yksinkertaisella merkillä, että seuraavat mittaukset saadaan mahdollisesti suoritettua samoista pisteistä. [5, s. 22-23]

4.8 Värähtelymittauksen valvontamenetelmät

Yleisimmät värähtelyvalvonnan menetelmät ovat tunnuslukujen kehittymisen eli trendin seuranta sekä taajuus- eli spektrianalyysiin perustuva valvonta. Spektrianalyysissä yleisimmin tarkastellaan värähtelynopeutta suureena, mutta myös paljon värähtelykiihtyvyyttä. Trendiseurannassa tavallisesti käytetään mitattavana suurena tyypillisesti nopeuden tehollisarvoa V_{rms} taajuusalueella 10–1000 Hz. Taajuusalueen oikea valinta on tärkeää kummallakin edellä mainitulla valvontamenetelmällä, jotta vian aiheuttama värähtely saadaan mitattua. Rutiiniseurantaan riittää yleensä kokonaistasovalvonta, varsinkin jos koneiden toiminnallisuus ja rakenne ovat mittaajalle tuttuja. [1, s. 282.]

4.8.1 Tunnuslukuvalvonta

Värähtelysignaalista voidaan laskea erilaisia tunnuslukuja, joiden avulla pystytään näkemään mitattavan laitteen toimintakunto ja arvioimaan sen kehittymistä mahdollisen vikaantumis-, huolto tai korjausajankohdan määrittämiseksi. Jokaisesta lasketusta tunnusluvusta muodostetaan myös trendi. Yleisimmät taajuustasosta ja aikatasosta laskettavat tunnusluvut löytyvät standardista PSK5706. [1, s. 282.]

Vaativimmat tehtävät tunnuslukuvalvonnan työvaiheissa ovat mittausmääritysten ja tunnuslukujen suunnittelu. Tunnusluvun täytyy ilmaista yksittäisen vian kehitys, jolloin siitä voidaan päätellä, mistä viasta on kysymys sekä kuinka nopeasti se kehittyy. [1, s. 283.]

Tunnuslukuvalvonnan suunnittelua helpottaa, kun mitattaville laitteille luodaan omat suunnittelumallit. Malleihin listataan laitteelle tyypilliset viat, minkä jälkeen jokaiselle vikatyypille määritellään tunnusluvut, joilla vian syntymistä ja kehittymistä voidaan valvoa. [1, s. 283.]

4.8.2 Kokonaistasovalvonta

Kokonaistasovalvonta on yksinkertainen värähtelyn voimakkuutta kuvaava menetelmä, mutta yleisesti liian epäherkkä useiden vikojen havaitsemiseen. [5, s. 68–69.]

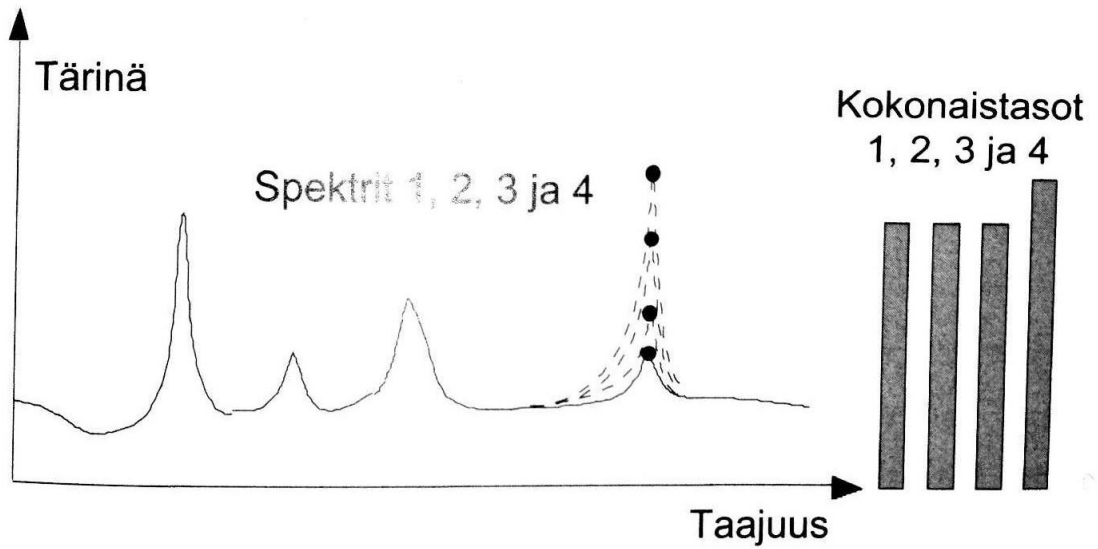
Akselinvärähtelyn kokonaistasona valvotaan huippuarvoa, huipusta huippuun-arvoa tai kahden värähtelysignaalin vektorisumman maksimiarvoa. Tärinän kokonaistasona valvotaan standardin PSK 5701 mukaista tärinärasitusta tai muuta arvoa sellaisella taajuuskaistalla joka sisältää oleelliset taajuuskomponentit. [5, s. 68–69.]

4.8.3 Spektrianalyysi ja spektrivalvonta

Spektrianalyysi on yleisin käytetty menetelmä viandiagnosoinnissa. Spektrianalyysissä muodostetaan ensin FFT-laskennalla amplitudispektri, jossa esitetään värähtelyn voimakkuus eri taajuuksilla. Amplitudispektristä saatua tietoa värähtelyn voimakkuuksista ja taajuuksista käytetään laitteen eri osien kunnan arvioinnissa. Nykyään FFT-laskenta tapahtuu nopeasti mittalaitteella ja tarkkuus on vikojen havaitsemiseksi yleensä riittävä. [1, s. 285.]

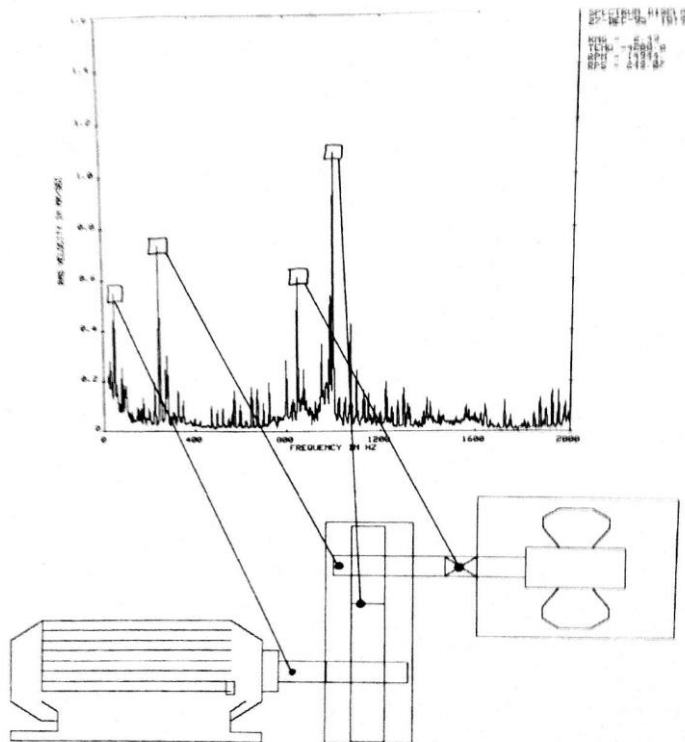
Laitteen vikaantuminen on havaittavissa yleisesti amplitudispektrissä vikatyypistä riippuen eri taajuuksilla olevien värähtelykomponenttien voimistumisena. Vaikka mitattava laite olisi täysin kunnossa, löytyy amplitudispektristä yleisesti silti pyörimistaajuuden värähtelykomponentti. Tämä komponentti saattaa johtua toleranssissa olevista valmistusvirheistä tai liittyä laitteen normaaliin toimintaan. [1, s. 285.]

Joissakin tapauksissa laitteen vika ei aiheuta mitään muutoksia pyörimistaajuuden värähtelykomponenttiin. Tällöin viasta aiheutuva värähtely ei käytännössä aiheuta merkittäviä muutoksia tehollisarvoon, vaikka vika olisi edennyt pitkälle. Tämän takia spektrin seuranta onkin kannattavaa useimpien vikatyypien valvonnassa, jotta saadaan riittävän aikaisin luotettavaa tietoa laitteen kunnosta. Kuvassa 18 nähdään esimerkki siitä, kuinka vian kehittyminen näkyy spektrissä selvästi aiemmin kuin tehollisarvossa. [1, s. 285,]



Kuva 18. Spektrissä selvästi näkyvä vika saattaa näkyä kokonaistasoarvossa vasta myöhäisessä vaiheessa [1, s. 285]

Kuvassa 19 nähdään esimerkki, kuinka spektrissä nähdään laitteen eri vikataajuudet. Vikataajuuksien määrittäminen edellyttää, että akselien kierroslukutiedot ja eri ko-
neenosien rakenne on tiedossa.



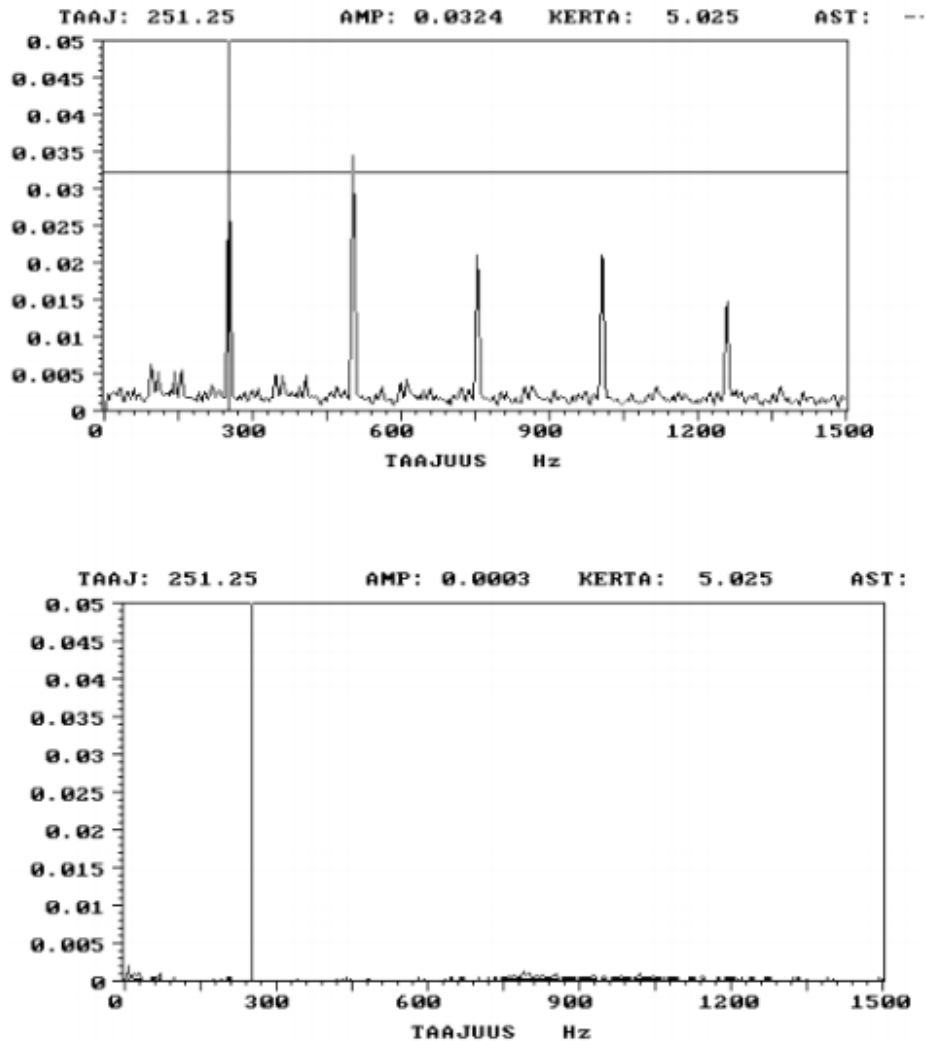
Kuva 19. Laitteesta tulevat eri vikataajuudet [3 s. 88]

Spektrit vaativat kuitenkin erittäin tarkkaa ja huolellista tarkastelua, että mitään tärkeää ei jää huomaamatta, koska joillakin taajuuksilla jo matalat spektrihuiput ovat vaarallisia. Apuna tähän ongelmaan on mahdollista käyttää ns. kaista- tai spektrivalvontaa. Kaista-valvonnassa asetetaan tietyille taajuuskaistoille rajat, joiden ylittäminen laukaisee hälytyksen. Spektrivalvonnassa asetetaan rajat aikaisemmin mitatun spektrin ympärille siten, että mikäli mikä tahansa spektrikomponentti ylittää rajan, aiheutuu hälytys. [2, s. 14]

4.8.4 Verhokäyrä- ja PeakVue-valvonta

Vierintälaakereiden alkavat vauriot ovat yleensä värähtelyvoimakkuudeltaan niin heikkoja, että ne peittyvät hallitsevan värähtelyn alle, joka aiheutuu mitattavasta laitteesta tai muualta ympäristöstä. Värähtelymittauksien perinteisillä tekniikoilla, kuten spektri- ja kokonaistasovalvonnalla, ei yleensä saada riittävän aikaista ja luotettavaa tietoa näistä laakereiden alkavista vaurioista, minkä takia laitevalmistajat ovat kehittäneet analyysimenetelmiä vaurioiden varhaiseen havaitsemiseen. Verhokäyrä- ja PeakVue- tekniikalla voidaan havaita jo varhaisessa vaiheessa olevia iskumaisia herätteitä aiheuttavia vikoja. Kummallakin menetelmällä valvonta perustuu mitattujen spektrien vertailuun ja eri amplitudien kasvun seuraamiseen aivan kuten tehdään spektrivalvonnassa. [1, s. 286.]

Verhokäyräanalyysi perustuu signaalinkäsittelytekniikkaan, jossa häiritsevien matalataajuuksien värähtelyiden vaikutus saadaan eliminoitua pois ja laitevicioista johtuvaa värähtelyn osuutta saadaan korostettua. Verhokäyräspektrissä piikit kertovat viasta, joka voidaan selvittää laskemalla laakerin vikataajuudet. Verhokäyräspektristä voidaan myös erottaa erityyppiset viat, kuten vierintäelimen sekä sisä- ja ulkokehän vauriot. Kuvassa 20 nähdään esimerkki verhokäyräspektristä. [1, s. 252.]



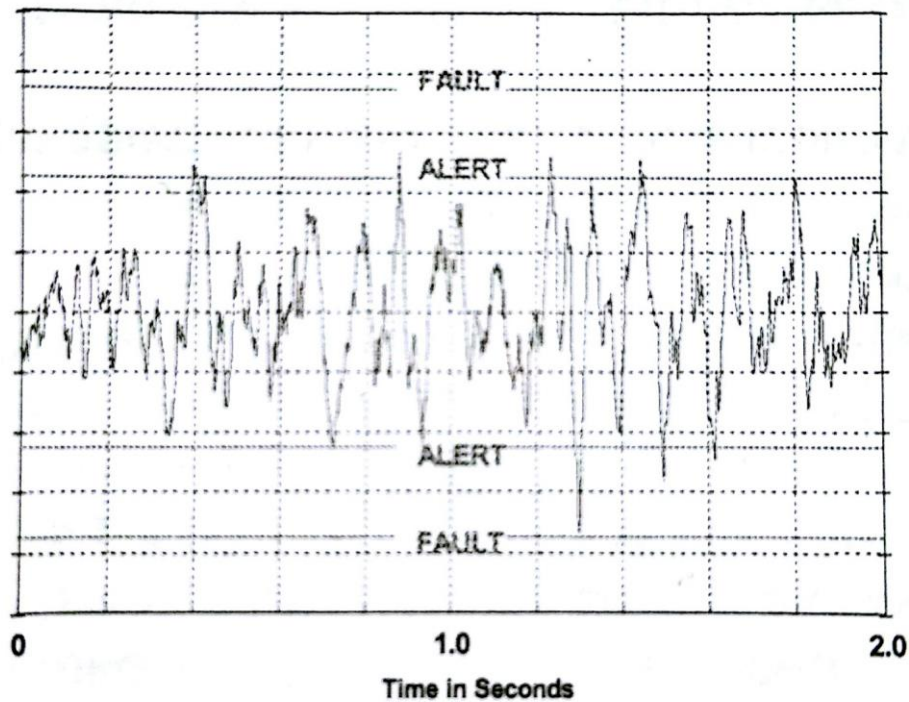
Kuva 20. Verhokäyräspektri vikaantuneesta ja ehjästä laakerista. Ensimmäisessä kuvassa näkyy viallinen laakeri, josta selvästi on havaittavissa vikataajuuudet. Jälkimmäisessä kuvassa viallinen laakeri on vaihdettu ja spektrissä ei näy vikataajuuskomponentteja [2, s. 16]

PeakVue-analyysi on menetelmä, joka määrittää aikatasosignaalin huippuarvon määritetyillä aikajakson pituuksilla ja muodostaa huippuarvoista ns. PeakVue-signaalin. Muodostunut PeakVue-signaali sisältää siten alkuperäisen signaalin todellisen amplitudin maksimiarvon aikajaksolta. Signaalinkäsittely voidaan tehdä normaaleilla menetelmillä, kuten tilastollisella menetelmällä tai spektrianalyysillä. PeakVue-menetelmä on kehitetty iskumaisen herätteen aiheuttamien värähtelypurskeiden havainnointiin. Menetelmää käytetään yleensä samoihin kohteisiin kuin verhokäyräanalyysiä, kuten hammasvaihteiden ja vierintälaakerien värähtelymittauksien sekä myös metallisten pintojen kosketuksiin toisiinsa. [1, s. 252.]

4.8.5 Muita valvontamenetelmiä

Aikatasovalvonta

Aikatasovalvonta (kuva 21) merkitsee aikatasonäytteen muodon vertailua valittuun hälytysrajaan. Hälytysrajana voidaan käyttää joko amplitudiarvoa tai referenssimittauksen perusteella muodostettua hälytysrajakäyrää. [5, s. 69.]



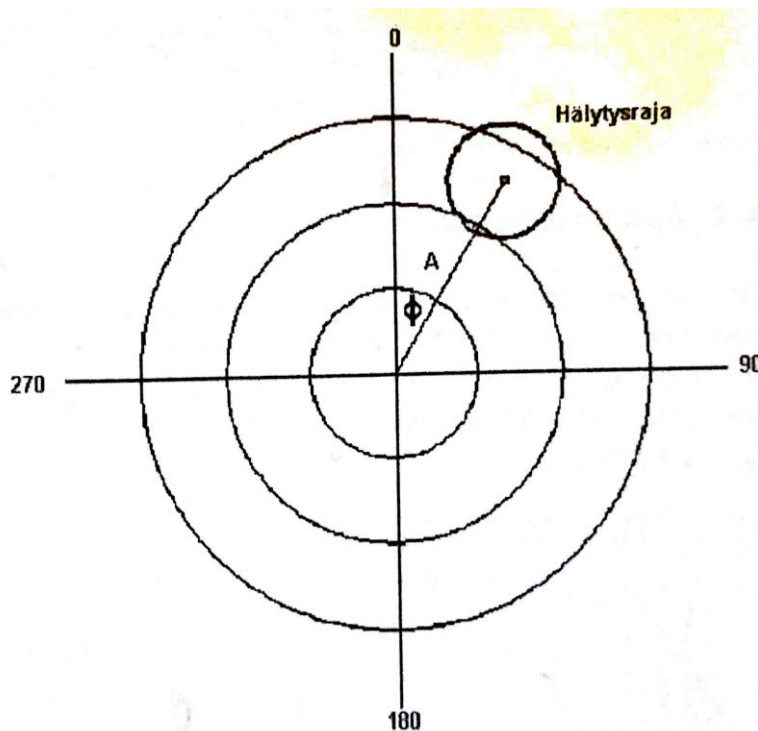
Kuva 21. Aikatasovalvonta [5, s. 69]

Vektorivalvonta

Vektorivalvonnalla (kuva 22) seurataan pyörimistaajuisen tai sen monikerralla tapahtuvan värähtelyn voimakkuuden ja vaihekulman muodostamaa vektoria napakoordinaatistossa.

Tyypillisiä käyttökohteita ovat tasapainotilan valvonta ja tasapainotus, roottorin poikittaisen särön havaitseminen, linjaustilanteen valvonta ja akselin epäsymmetrisen lämpenemisen havaitseminen. Käyttötilanteen muutoksista aiheutuvien värähtelymuutok-

sien takia tulee seurata erilaisia prosessisuureita kuten tehoa, virtausta, painetta ja kierroslukua, jotta viat saadaan erotettua taustalta. [5, s. 70.]



Kuva 22. Vektorivalvonta [5, s. 70]

Profiilivalvonta

Profiilivalvonta on esimerkiksi puristintelan tai puristinhuovan aiheuttaman värähtelyn mittausta kahden tai useamman telan muodostamassa puristimessa käynnin aikana. Mittausmenetelmänä on tahdistettu keskiarvostus aikatasossa. Tuloksia tarkastellaan pyöreys- tai pituusprofiilina. [5, s. 70.]

Korkeataajuiset valvontamenetelmät

Korkeataajuisilla valvontamenetelmillä tarkoitetaan tässä yhteydessä taajuudeltaan yli 20 kHz:n värähtelyn mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Käyttökohteita ovat tyypillisesti vierintälaakerin, hammasvaihteen ja liukulaakerin valvonta sekä niiden voitelutanteen ja voiteluaineen sisältämien epäpuhtauksien valvonta. Analysointimenetelmänä mitatulle korkeataajuiselle signaalille käytetään yleensä tunnuslukuvalvontaa, verho-

käyrävalvontaa, pulssilaskentaa tai signaalin nousu-, lasku- ja kestoajan mittaamista. [5, s. 70.]

Kepstrivalvonta

Kepstrivalvonnalla tarkoitetaan spektrin säännöllisyyksien tarkastelua, kuten harmoniset ja sivunauhataajuudet. Tyypillisiä valvontakohteita ovat hammasvaihteistot. [5, s. 71.]

5 Värähtelyvalvonnan suoritus käytännössä

Tässä luvussa perehdytään siihen miten käytännössä värähtelyvalvonta suoritetaan vaiheittain, voimalaitosympäristössä. Mittaukset suoritettiin Helsingissä toimivalla voimalaitoksella, jonka tiedot ovat luottamuksellisia. Värähtelyvalvonnan vaiheet ovat:

1. Koneiden kartoitus
2. Kriittisyysanalyysi
3. Tietokannan luominen
4. Mittaukset
5. Mittaustulosten analysointi
6. Kuntoarvio

5.1 Koneiden kartoitus

Ensimmäisenä vaiheena valvonnan aloittamisessa on voimalaitoksen koneiden kartoitus. Kartoituksen tarkoituksena selvittää, millaisia koneita voimalaitoksessa on, missä ne sijaitsevat ja miten ne liittyvät tuotannon prosessiin.

5.2 Kriittisyysanalyysi

Kriittisyysanalyysi on vaihe, joka suoritetaan koneiden kartoituksen jälkeen. Analyysin tarkoituksena on arvioida koneiden kriittisyys. Kriittisyyden perusteella valitaan, mitä koneita mitataan ja kuinka usein, koska kaikkien koneiden jatkuva valvominen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Kriittisyyttä voidaan pitää ominaisuutena, joka kuvaa riskin suuruutta. Riski voi tarkoittaa tuotannon menetyksiä, loukkaantumisia ja muita ei-hyväksyttäviä seurauksia. Kriittisyyttä voidaan arvioida erilaisten muuttujien avulla, joihin löytyy ohjeistusta standardeista. Standardissa PSK 6800 käytetään kriittisyyden arviointiin seuraavia muuttujia:

- vikaväli
- turvallisuusvaikutukset
- ympäristövaikutukset
- tuotannon menetykset
- lopputuotteen laatukustannukset
- korjauskustannukset

Tässä työssä kriittisyysanalyysia ei kuitenkaan suoritettu, koska aikaa oli rajoitetusti ja sen merkitys työhön oli vähäinen. Mitattavat koneet valittiin kokeneen mittaajan kanssa, joka tunsi työhön liittyvän voimalaitosympäristön ja sen kriittisimmät koneet. Mitattaviksi koneiksi voimalaitokselta valittiin mm.

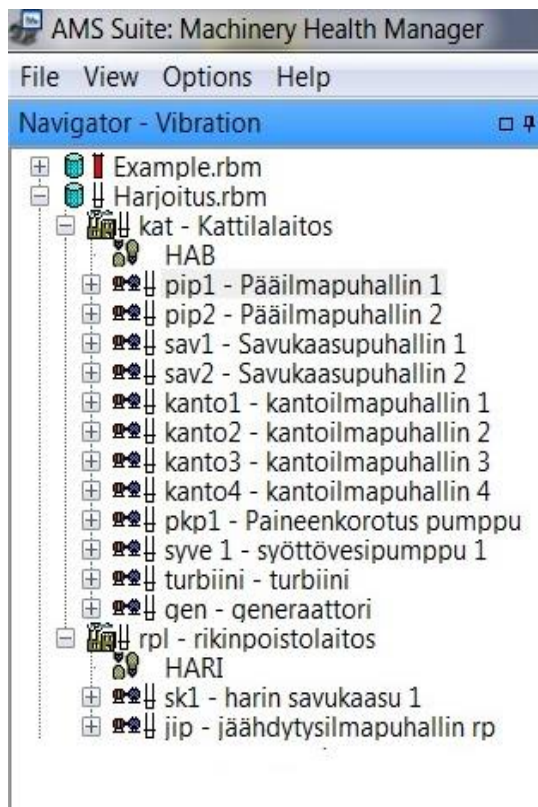
- pääilmapuhallin 1 ja 2
- savukaasupuhallin 1 ja 2
- kantoilmapuhallin 1-4
- paineenkorotuspumppu
- syöttövesipumppu 1
- turbiini
- generaattori

5.3 Tietokannan luominen

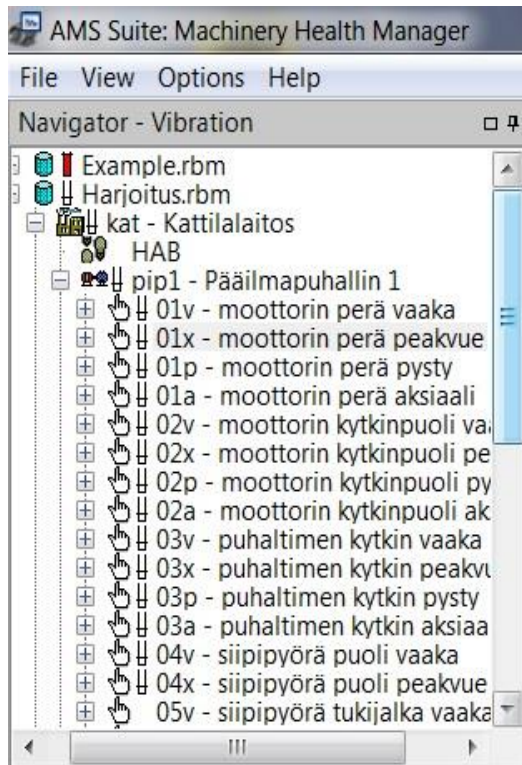
Seuraavana vaiheena oli tietokannan luominen tietokoneella ”AMS Suite: Machinery Health Manager”-ohjelmaa käyttäen. Tietokanta on hierarkkisista tasoista koostuva kokonaisuus. Korkeimmalla tasolla luodaan valittuihin koneisiin määrittäykset, jotka koostuvat esimerkiksi analyysiparametrisarjoista ja hälytysrajoista. Näillä määritellään koneille mittausasetukset ja hälytysrajat.

Seuraava alempi taso tietokannassa on alue, jossa mitattava laitos jaetaan alueisiin, jos se on tarpeellista. Aluejako tehdään yleensä, jos laitoksen ympäristö on laaja ja mitattavia koneita on paljon. Tässä mittaustyössä jaettiin voimalaitos kahteen alueeseen, kattilalaitos ja rikinpoistolaitos.

Seuraava alataso on laitetaso (kuva 23). Laitetasolla luodaan alueen sisälle kuuluvista koneista kokonaisuuksia. Kokonaisuus tarkoittaa esimerkiksi puhallinta tai pumppua. Alimmalla tasolla (kuva 24) määritellään näiden koneiden mittapisteet, joita yleensä tulee useampia yhdelle koneelle.



Kuva 23. Aluetaso ja laitetaso



Kuva 24. Mittapisteet

Ennen tietokannan rakentamista on kuitenkin löydettävä pumpuista, puhaltimista, moottoreista sekä vaihdelaatikoista tarvittavia laitetietoja, jotka yleensä löytyvät laitoksen tietokannoista. Tarvittavat laitetiedot ovat:

- laakeritiedot
- pyörimisnopeus
- napaisuus
- mahdollinen taajuusmuuttajien käyttäminen
- moottorin asento
- siipien lukumäärä
- hihnapyörien koot
- hihnan pituus

- välityssuhde
- porrasluku
- hammaspyörätiedot.

Tiedoista saadaan laskettua vikataajuuksia, joita voidaan syöttää ohjelmaan analysointia varten. Laakereista ja niiden vikataajuuksista löytyy valmis tietokanta Machinery health manager ohjelmassa.

5.3.1 Analyysiparametrisarjat

Reittimittauksissa käytetään niitä mittauspisteitä ja asetuksia, joilla koneen kuntoa voidaan valvoa luotettavasti. Reittimittauksella tarkoitetaan suunniteltua polkua, joka kertoo mittausjärjestyksen valituille koneille. Mittauspisteille luodaan valmiit parametrisarjat, joita on myös mahdollista muokata ja luoda lisää mittauslaitteella.

Voimalaitoksen mittauksia varten luotiin neljä erilaista parametrisarjaa, nopeus 0–1000 Hz, nopeus 0–2000 Hz, peakvue 0–1000 Hz ja peakvue 0–2000 Hz. Parametrisarjat valittiin kokemuksen perusteella. Tiedetään, että 0-1000 Hz väliltä löytyy suuri osa vioista ja se riittää peruskoneille. Tiettyjä vikoja löytyy kuitenkin korkeammilta taajuuksilta, minkä takia valittiin laajempi 0–2000 Hz väli. Aina kun mitattava taajuuskaista laajenee, mittaustulosten tarkkuus huononee, minkä takia pelkästään laajoja taajuuskaistoja ei mitata. Mitattavan taajuuskaistan valintaan vaikuttavat koneet osat ja pyörimisnopeus.

Kuvissa 25–26 nähdään nopeusmittausten parametrit ja kuvissa 27–28 nähdään Peakvue-mittausten parametrit.

```
VIEW PERIODIC ANALYSIS PARAMETER SET INFORMATION

Set 2      - 0-1000 hz                               Number of Parameters - 8

FFT: 0.0 - 1000.0 Hz
LOW FREQUENCY CUT-OFF: 2.0 Hz

LINES/AVERAGES      : 1600/5
AVERAGING MODE      : Normal
WINDOW TYPE         : Hanning
SPECTRAL WEIGHTING   : None
THIRD-OCTAVE ANALYSIS: No

SST CONTROL         : No
PRE-CONDITIONING UNIT : Disabled
FILTER SETTING      : None
PEAK ANALYSIS METHOD: None

SPECIAL TIME WAVEFORM: Yes
FMAX                 : 2000.0 Hz
DATA UNITS           : Default
NUMBER OF POINTS     : 1024
TRIGGER              : None
```

Kuva 25. Nopeusmittaus 0–1000 Hz:n parametrit

Kuvan 25 parametrisarjan mittausalueeksi määriteltiin 0–1000 Hz, josta suodatettiin alle 2 Hz:n taajuudet. Spektriviivojen lukumääräksi asetettiin 1600 ja keskiarvojen lukumääräksi 5. Keskiarvolla tarkoitetaan, kuinka monen mittauksen keskiarvosta mittausulos koostuu. Taajuusalue jaettuna spektriviivojen määrällä kertoo spektrin erottelukyvystä, eli mitä enemmän viivoja, sitä tarkemmin voidaan tulkita mittauksista saatuja spektrejä.

```

VIEW PERIODIC ANALYSIS PARAMETER SET INFORMATION

Set 3   - 0-2000 hz                               Number of Parameters - 8

FFT: 0.0 - 2000.0 Hz
LOW FREQUENCY CUT-OFF: 2.0 Hz

LINES/AVERAGES      : 3200/5
AVERAGING MODE     : Normal
WINDOW TYPE        : Hanning
SPECTRAL WEIGHTING  : None
THIRD-OCTAVE ANALYSIS: No

SST CONTROL        : No
PRE-CONDITIONING UNIT : Disabled
  FILTER SETTING    : None
  PEAK ANALYSIS METHOD: None

SPECIAL TIME WAVEFORM: Yes
  FMAX              : 2000.0 Hz
  DATA UNITS       : Default
  NUMBER OF POINTS  : 2048
  TRIGGER           : None

```

Kuva 26. Nopeusmittaus 0–2000 Hz:n parametrit

Kuvan 26 parametrisarjan mittausalueeksi määriteltiin 0–2000 Hz, josta suodatettiin alle 2 Hz:n taajuudet. Spektriviivojen lukumääräksi asetettiin 3200 ja keskiarvojen lukumääräksi 5.

```

VIEW PERIODIC ANALYSIS PARAMETER SET INFORMATION

Set 1   - Peakvue 0-1000 hz                       Number of Parameters - 8

FFT: 0.0 - 1000.0 Hz
LOW FREQUENCY CUT-OFF: 1.0 Hz

LINES/AVERAGES      : 1600/1
AVERAGING MODE     : Normal
WINDOW TYPE        : Hanning
SPECTRAL WEIGHTING  : None
THIRD-OCTAVE ANALYSIS: No

SST CONTROL        : No
PRE-CONDITIONING UNIT : Enabled
  FILTER SETTING    : 2000 Hz HP
  PEAK ANALYSIS METHOD: PeakVue

SPECIAL TIME WAVEFORM: Yes
  FMAX              : 2000.0 Hz
  DATA UNITS       : Default
  NUMBER OF POINTS  : 1024
  TRIGGER           : None

```

Kuva 27. PeakVue 0–1000 Hz:n parametrit

PeakVue-mittauksissa käytetään ylipäästösuodatusta, jonka avulla matalataajuiset pyörimistaajuiset värähtelykomponentit suodatetaan pois, jotta voidaan tutkia tarkemmin korkeampia taajuusalueita ja siellä esiintyviä pieniamplitudisia ilmiöitä. PeakVue-mittausmenetelmä soveltuu hyvin laakerien alkavien vaurioiden valvontaan, minkä takia se otettiin mittauksissa käyttöön.

Kuvan 27 PeakVue-parametreissa ylipäästösuodattimeksi asetettiin 2000 Hz. Kun korkeataajuuksilla tapahtuvat purskeet on mitattu, ne jaetaan jaksoihin, jotka tasasuunnataan ja siirretään 1–1000 Hz:n alueelle. Tasasuunnauksella tarkoitetaan, että mittauksista tallennetut purskeet eli huippuarvot tulostetaan positiiviselle puolelle aikatasoteikkaa. Aikataso on PeakVue-mittauksissa toispuoleista.

```

VIEW PERIODIC ANALYSIS PARAMETER SET INFORMATION

Set 4      - PeakVue 0-2000 hz                Number of Parameters - 8

FFT: 0.0 - 2000.0 Hz
LOW FREQUENCY CUT-OFF: 2.0 Hz

LINES/AVERAGES      : 3200/1
AVERAGING MODE      : Normal
WINDOW TYPE         : Hanning
SPECTRAL WEIGHTING  : None
THIRD-OCTAVE ANALYSIS: No

SST CONTROL         : No
PRE-CONDITIONING UNIT : Enabled
FILTER SETTING      : 2000 Hz HP
PEAK ANALYSIS METHOD : PeakVue

SPECIAL TIME WAVEFORM: Yes
FMAX                 : 2000.0 Hz
DATA UNITS           : Default
NUMBER OF POINTS     : 2048
TRIGGER              : None

```

Kuva 28. PeakVue 0–2000 Hz:n parametrit

Mittausasetuksia tehdessä on muistettava, että mitä korkeampia taajuuksia mitataan, sitä lyhyempi on aikanäyte. Hyvänä muistisääntönä voi pitää, että aikanäytteestä pitäisi näkyä tutkittava asia vähintään viisi kertaa, esimerkiksi laakerin pitimen pyörähdys.

5.4 Mittaukset

Tietokannan rakentamisen jälkeen luotiin uusi mittausreitti Machine Health Manager-ohjelmassa reittien hallinnan avulla. Mittareittiin valittiin mitattavat alueet ja halutut koneet siinä järjestyksessä, missä ne tullaan mittaamaan. Tämän jälkeen reitti siirrettiin kannettavaan värähtelyanalysaattoriin. Mittareittiin sisältyivät kaikki tietokannan alueet ja niihin sisältyvät koneet.

Voimalaitoksen mittareitti mitattiin 16.4.2014. Mittauksissa oli välineinä C.S.I 2130A-2 värähtelyanalysaattori (kuva 29), IMI 621B51-kiihtyvyyssanturi (herkkyys: 100 mV/g, taajuusalue: 0-20000 Hz) ja stroboskooppi testo 476. Stroboskoopin avulla saadaan tarkastettua koneiden oikea pyörimisnopeus, jos sitä ei saada tarkastettua värähtelyanalysaattorin omalla pyörimisnopeuden havaitsemistoiminnolla.

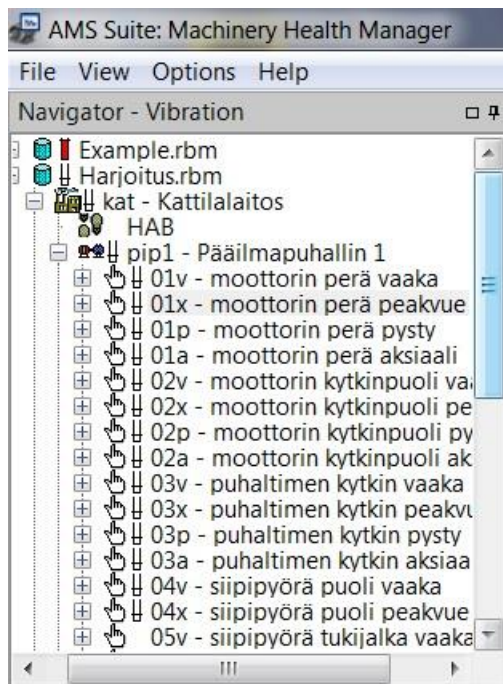
Stroboskooppi on mittalaite, jossa kirkas valo välkky tasaisesti. Valo kohdennetaan mitattavaan kappaleeseen, esim. akseliin, minkä jälkeen valon pulssia säädetään. Pulssia säädetään niin kauan, että mitattava kappale näyttää pysähtyvän, jolloin stroboskooppi näyttää sen pyörimisnopeuden.



Kuva 29. Kannettava C.S.I 2130A-2 värähtelyanalysaattori

Tavoitteena oli saada hyvät mittaustulokset kaikista koneista, jotta niiden senhetkinen kunto olisi saatu analysoitua. Mittaukset aloitettiin tarkistamalla ensin pyörimisnopeus värähtelyanalysointorin toiminnolla tai stroboskoopilla, että nähtiin poikkesiko se valmiiksi asetetuista nopeuksista. Saatu pyörimisnopeus asetettiin analysointoriin, minkä jälkeen oikeat mittaukset voitiin aloittaa. Seuraavaksi katsottiin analysointorista ensimmäinen mittapiste ja asennettiin magneetilla varustettu anturi pisteeseen kiinni. Tämän jälkeen painettiin analysointorista ENTER-näppäintä ja aloitettiin ennalta ohjelmoidut mittaukset. Kun kaikki mittaukset oli tehty ensimmäisessä mittapisteessä, siirrettiin anturi seuraavaan mittapisteeseen ja mitattiin asetetut mittaukset. Näin tehtiin mittapiste kerrallaan, kunnes kaikki mittaukset oli suoritettu.

Kuvassa 30 nähdään mittareitillä olleen pääilmapuhaltimen eri mittapisteet. Ensimmäisenä on lyhennetyt merkinnät, esimerkiksi 01v, jossa 01 tarkoittaa mittapisteen numeroa ja kirjain v mittauksen suuntaa, joka on tässä tapauksessa vaaka. Lyhenteen jälkeen on selitys mistä mittapisteestä on kyse ja suunnasta. PeakVue mittaukset otettiin vaaka suunnasta.



Kuva 30. Pääilmapuhallin 1 mittapisteet

Erilaisia mittauksia saatettiin tehdä jopa yli 15 yhdelle koneelle. Määrä saattaa tuntua aika suurelta, mutta kaikista pisteistä saatavat tiedot ovat tarpeellisia, jotta saadaan mahdollisimman tarkka kuva koneen kunnosta. Mittausten määrä saattoi vaihdella konekohtaisesti. Suunnitellun reitin mittaamiseen kului yhden työpäivän verran aikaa.

5.5 Mittaustulosten analysointi

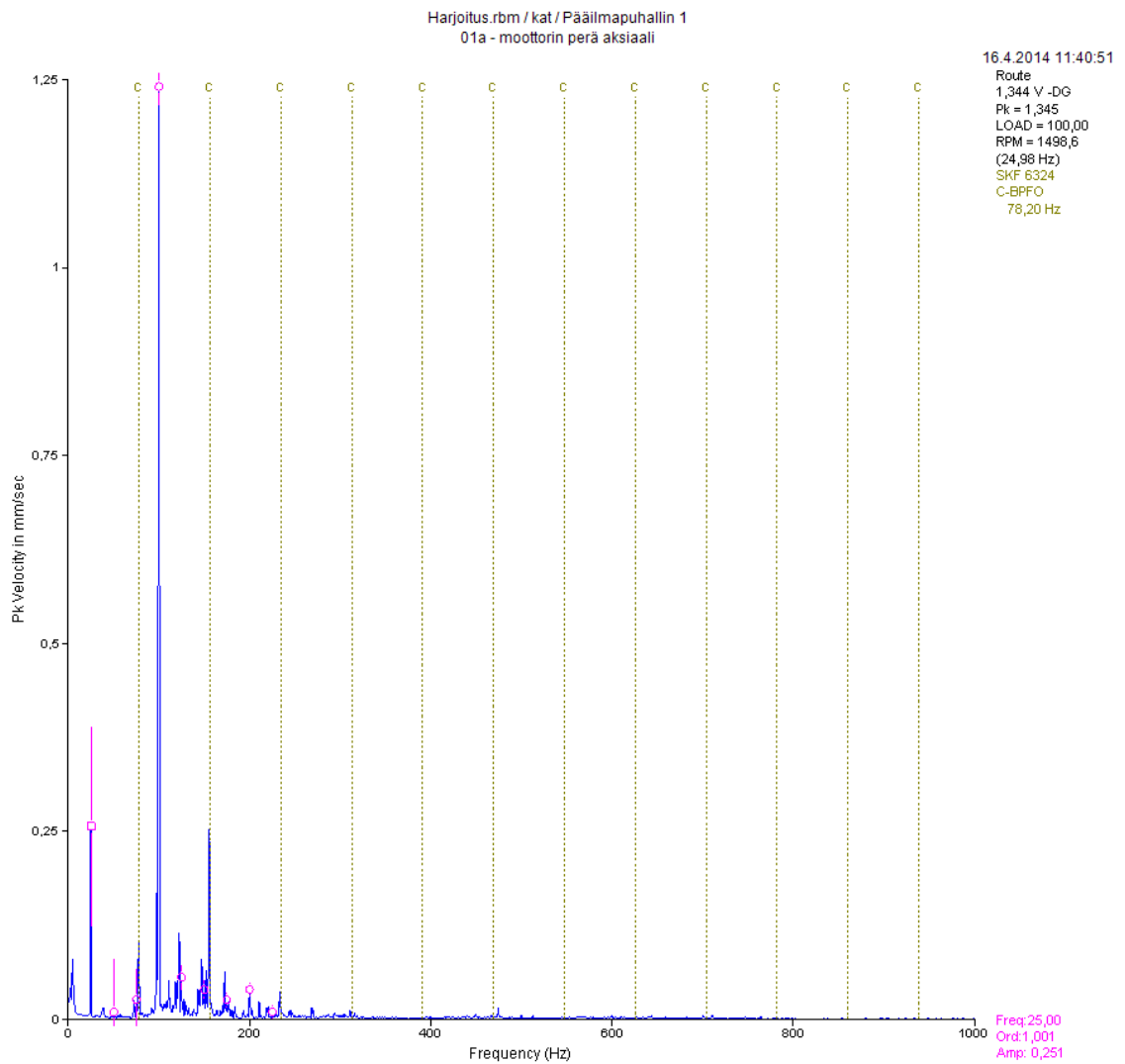
Voimalaitoksella tehtyjen mittausten jälkeen mittaustulokset siirrettiin kannettavasta analysaattorista tietokoneelle, jolla analysointi suoritettiin Machinery health manager-ohjelmaa käyttäen. Tulosten analysointiin kului aikaa noin 4–7 työpäivää (ammattilaisella kuluu noin 30–60 min/kone). Analysoinnissa tarkasteltiin pääsääntöisesti, löytyykö spektreistä laakerien vikataajuuksia ja muita selkeitä vikojen ilmenemismuotoja. Aikatasoja ei katsottu tässä työssä niin tarkasti läpi, koska se olisi vaatinut ylimääräisiä työpäiviä.

Jokaisella laakerilla, joka poikkeaa toisesta laakerista mitoiltaan tai malliltaan on omat vikataajuutensa. Machinery health manager ohjelmassa oli laakereista ja niiden vikataajuuksista oma tietokantansa, josta oikeat tiedot valittiin jokaiselle mitattavalle koneelle analysointia varten. Vikataajuuksien käytön periaate on yksinkertainen: Laakerien vikataajuuksia verrataan mitatussa värähtelysignaalissa esiintyviin taajuuksiin ja jos nämä täsmäävät keskenään, on todennäköistä, että värähtely on lähtöisin laakerista. Muiden mahdollisten vikojen etsintään käytettiin avuksi ohjeita, jotka löytyivät värähtelymittauksien analysointiin liittyvistä kirjoista ja standarteista.

Analysoinnissa selvisi, että mitattujen koneiden senhetkinen kunto oli hyvä ja vikoja ei löytynyt. Tämä ei ollut yllätys, koska voimalaitoksen kunnossapito ja kunnonvalvonta toimi hyvin. Pääilmapuhallin 1:n mittaustulosten spektreissä oli kuitenkin näkyvissä laakerin SKF 6324 ulkokehän vikataajuuksia, mutta amplitudit olivat erittäin pieniä, kun verrattiin standardin PSK 5704 tärinärasitusrajoihin, minkä takia vikataajuudet eivät olleet huolestuttavia.

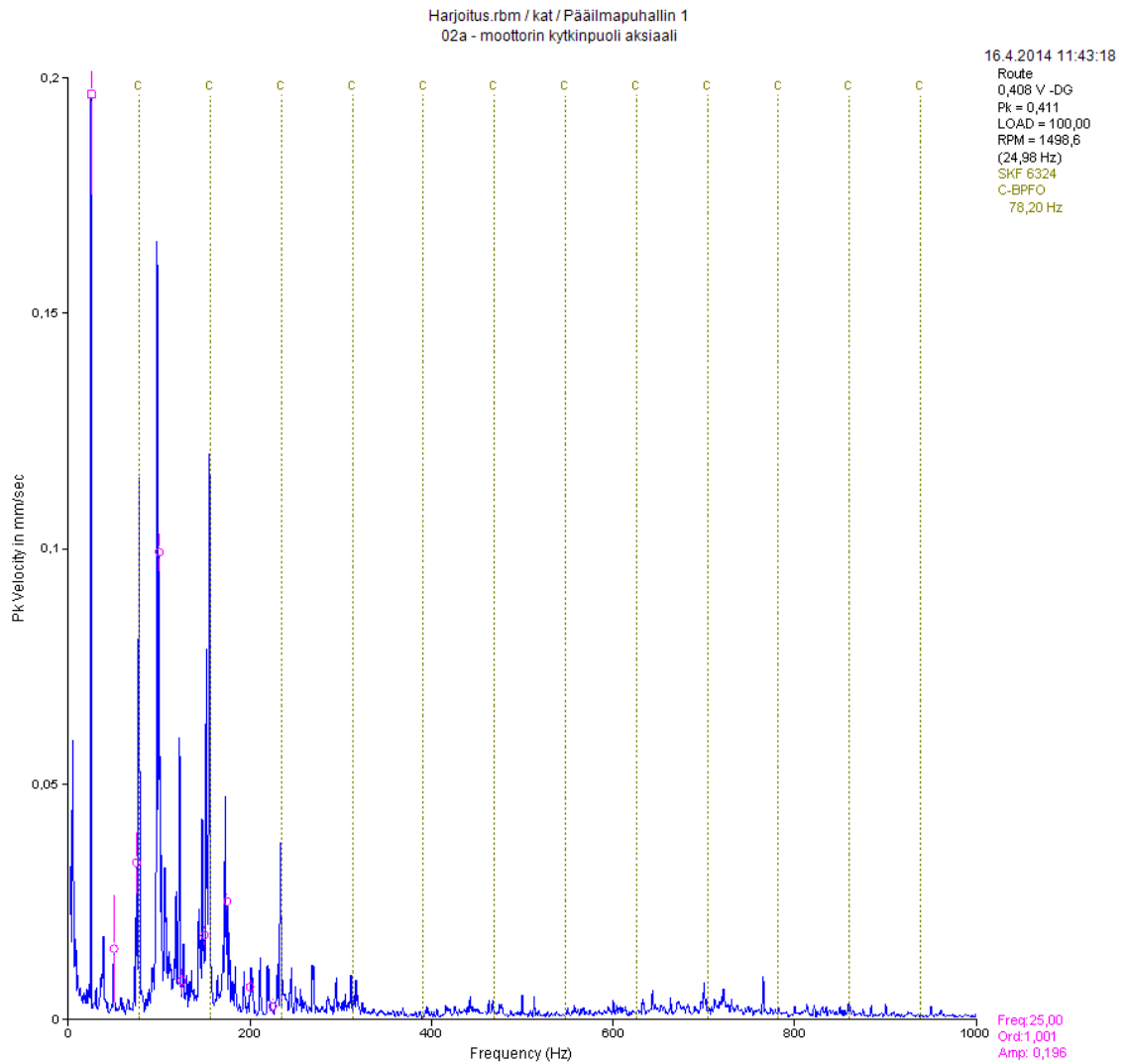
Kuvassa 31 on nähtävissä pääilmapuhaltimen 1 moottorin perästä suoritettujen mittausten nopeusspektri ja laakerin ulkokehän vikataajuudet C kirjaimella merkittyinä. Vaaleanpunaisella merkitty ensimmäinen piikki on pyörimisnopeuden taajuus ja seuraavat

vaaleanpunaisella merkityt ovat pyörimistaajuuden monikertoja. Spektrissä on myös selvä resonanssialue 100–200 Hz välillä, joka vahvistaa alueen piikkejä.



Kuva 31. Pääilmapuhallin 1, 01a – moottorin perä aksiaali

Kuvassa 32 on nähtävissä pääilmapuhaltimen 1 moottorin kytkinpuolelta suoritettun mittauksen nopeusspektri ja laakerin ulkokehän vikataajuudet C kirjaimella merkittyinä.



Kuva 32. Pääilmapuhallin 1, 02a – moottorin kytkinpuoli aksiaali

5.6 Kuntoarvio

Kaikkien mittareitillä olleiden koneiden kunto todettiin hyväksi analysoinnista saatujen tietojen perusteella, vaikka pääilmapuhallin 1:stä löytyi laakerin ulkokehän vikataajuuksia. Amplitudit olivat kuitenkin vikataajuuksilla kovin matalia, kun verrattiin standardin PSK 5704 tärinärajoitusrajoihin, minkä takia ne eivät aiheuttaneet huolta.

Pääilmapuhallin 1:n laakerin tilaa katsottiin järkeväksi seurata tarkemmin jatkossa. Muille jatkotoimenpiteille ei katsottu olevan tarvetta mittareitillä olevien koneiden kohdalla.

6 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutustua voimalaitoksen ennakoivan kunnossapidon värähtelymittausprosessiin, sekä suorittaa värähtelymittaukset eli reittimittaukset voimalaitosympäristössä.

Insinööriyön ensimmäisenä vaiheena oli aiheeseen liittyvien teorioiden opiskelu, jotka koostuivat teollisuuden kunnossapidon, värähtelyn ja värähtelymittauksen erilaisista kirjallisuuksista. Opastusta värähtelymittaukseen sekä siihen liittyviin työvälineisiin antoivat myös toimitusjohtaja Timo Hietanen ja asennusvalvoja Mikko Hietanen Hi-Tekno Oy:stä.

Seuraavana vaiheena oli värähtelyvalvonnan suorittaminen käytännössä. Värähtelyvalvonta koostui viidestä eri vaiheesta: koneiden kartoittamisesta, kriittisyysanalyysistä, tietokannan luomisesta, mittauksista, analyysistä ja kuntoarviosta. Mittaukset suoritettiin pääkaupunkiseudulla toimivan voimalaitoksen kriittisimmille koneille. Mittaukset sujuivat hyvin muutaman opastetun mittauskerran jälkeen. Voimalaitoksella vietetyn työpäivän jälkeen mittaustuloksia analysoitiin Hi-Tekno Oy:n toimistolla n. 4–7 työpäivää. Analysoinnissa ei löytynyt mitatuista koneista vikoja, joten jatkotoimenpiteille ei ollut tarvetta. Tämä ei tullut yllätyksenä, koska voimalaitoksella oli toimiva kunnossapito ja värähtelyvalvontajärjestelmä.

Insinööriyön aihe osoittautui todella haastavaksi ja laajaksi heti alussa, koska värähtelymittaus oli aivan uusi aihe opiskeltavaksi. Kokemusta oli kuitenkin teollisuuden kunnossapidosta voimalaitosympäristöissä, mikä oli työn kannalta auttava tekijä. Insinööri työ oli oman kehittymisen kannalta opettavainen prosessi, joka antoi hyvän kuvan värähtelymittauksista ja niiden käyttämisestä kunnonvalvonnan menetelmänä. Tutustuminen värähtelymittaukseen avasi myös yhden uuden oven tulevaisuuden uran kannalta.

Värähtelymittaus osoittautui todella käteväksi kunnonvalvonnan työkaluksi, jonka avulla saadaan tietoa koneiden alkavista vioista aikaisessa vaiheessa. Mittauksien jatkamiselle ei kuitenkaan ollut tarvetta, koska voimalaitoksella oli oma värähtelyvalvontajärjestelmä.

Lähteet

- 1 Mikkonen, Henry. 2009. Kuntoon perustuva Kunnossapito. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 13. Helsinki: KP-Media Oy
- 2 Kunnonvalvonta ja huolto. Verkkodokumentti.
http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/230_0007.pdf. Luettu 28.11.2014
- 3 Nohynek, Petri & Lumme, Veli Erkki. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 11. Rajamäki: KP-Media Oy.
- 4 Vibration training course book. Mobius Institute. www.mobiusinstitute.org
- 5 Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 2011. PSK-käsikirja 3. 15. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 6 R. Keith Mobley. 2004. Maintenance fundamentals. 2nd ed. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- 7 Johdanto kunnonvalvontaan. Verkkodokumentti.
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k1_johdanto_kunnonvalvontaan.html. Luettu 28.11.2014
- 8 Lämpökamera. Verkkodokumentti.
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k5_lampokamera.html. Luettu 28.11.2014
- 9 Maskinövervakning. Verkkodokumentti.
<http://www.askalon.com/sv/businessarea/AssetManagement/Machine%20Monitoring>. Luettu 28.11.2014
- 10 Kulumishiukkasanalyysi. Verkkodokumentti.
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k3_kulumishiukkasanalyysi.html. Luettu 28.11.2014
- 11 Vibration fault prediction. Verkkodokumentti. http://www.acoustic-science.gr/wp-content/uploads/2012/07/vibration_fault_prediction.png. Luettu 28.11.2014
- 12 Hyötysuhdemittaukset. Verkkodokumentti.
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k4_hyotysuhdemittaukset.html. Luettu 28.11.2014
- 13 Bathtub curve. Verkkodokumentti.
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Bathtub_curve.jpg. Luettu 28.11.2014

- 14 Ultraspec Analyze -Dynamic Signal Analyzer. User Manual. 1994. Compunational Systems.