LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Juha Harjula

JATKUVATOIMISTEN TUOTANTOLINJOJEN KÄYNTIVARMUUDEN KASVATTAMINEN VÄRÄHTELYMITTAUSTEN AVULLA

Päiväys 26.9.2018
Työn tarkastajat: Prof. Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Juha Harjula

Jatkuvatoimisten tuotantolinjojen käyntivarmuuden kasvattaminen värähtelymittausten avulla

Diplomityö

2018

78 sivua, 33 kuvaa, 8 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Prof. Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: Ennakoiva kunnossapito, Ennustava kunnossapito, Värähtelyanalyysi, Värähtelymittaus

Tässä diplomityössä etsittiin keinoja käyttövarmuuden kasvattamiselle jatkuvatoimisilla tuotantolinjoilla ennustavan ja aktiivisen värähtelymittauksen avulla SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla. Työn tavoitteena oli kartoittaa ennustavan kunnonvalvonnan mahdollisuuksia, kouluttautua värähtelymittauksen teoriaan ja luoda tehokas kunnonvalvontamalli ennakoivien värähtelymittausten avulla.

Tutkimuksessa tehtaalle luotiin aktiivisen seurannan malli ennalta valitun ja määritetyn kriittisen laitekokonaisuuden avulla. Tässä tutkimuksessa käytettiin Caverion IoTFlex-järjestelmää kiinteiden värähtelymittausten testaamiseen ja suorittamiseen kriittisessä kohteessa sen kunnon arvioimiseksi määrätyllä aikavälillä. Värähtelymittauksia suoritettiin tämän jälkeen SKF Microlog-käsimittalaitteen ja SKF @ptitude Analyst-järjestelmän avulla laitteiston kunnon varmentamiseksi ja mittaustoiminnan vakinaistamiseksi. Mallia testataan jatkossa myös tehtaan muihin kriittisiksi luokiteltuihin laitekokonaisuuksiin.

Tässä tutkimuksessa suoritetussa kartoituksessa huomattiin aktiivisten värähtelymittausten palveluiden tarjonnassa olevan vain vähän eroavaisuuksia. Suurimmat erot syntyivät analysointipalveluiden ja laitteiston tarjonnasta. Värähtelymittaustoimintaa aloitettaessa huomattiin mittausdatan analysoimisen hankaluus mahdollisten vikaantumisten havaitsemisessa, mutta kokemuksen karttuessa ne on mahdollista havaita hyvinkin aikaisessa vaiheessa. Uudistuksen tuomia säästöjä ja todellista arvoa päästään tutkimaan vasta käytännön vakinaistamisen ja pohjadatan keräämisen jälkeen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engneering

Juha Harjula

The reliability increase of the continuous production lines by vibration measurements

Master's thesis

2018

78 pages, 33 figures, 8 tables and 1 appendice

Examiners: Prof. Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Keywords: Predictive maintenance, Preventive maintenance, Vibration analysis, Vibration measurement

This master's thesis investigates the ways to increase reliability of continuous production lines by vibration analysis at SSAB´s Hämeenlinna factory. The main goals of the research was to survey possibilities of predictive maintenance, to internalize the theory of vibration measurements and create a new effective predictive maintenance model by vibration measurements for the SSAB`s maintenance department.

In this research a model of predictive maintenance was created and tested with a critical set of equipment. This equipment was founded critical based on the criticality analysis and field interviews. Caverion IoTFlex-system was used with fixed vibration sensors to detect the condition of the device over a certain period of time. Manual vibration measurements with SKF Microlog vibration detector and SKF @ptitude Analyst-system were used after the fixed vibration method for condition monitoring. This condition monitoring model will be tested around the factory with other critically classified devises.

With the survey of predictive maintenance possibilities it was found that there were only few differences between the providers of vibration analysis systems. There were differences with the analysis service and equipment supply. It was noticed that the complexity of the vibrations analysis is high at the starting point but with the experience vibration measurements can be an effective part of a maintenance program. True value of this research will be seen after the collection of the base data and when the practice has been regularized.

ALKUSANAT

Nyt kun Diplomityöni on valmis ja opinnot lähenee loppuaan, on kiitosten aika. Ensiksi haluan kiittää tärkeimpiä eli vanhempiani ja perhettäni kaikesta heiltä saamastani tuesta elämäni aikana. Suuret kiitokset Timo Salmiselle ja SSAB konsernille, jotka tarjosivat minulle tämän mahdollisuuden tehdä Diplomityöni SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalle. Tämän työn myötä minulle avautui myös ensimmäinen vakituinen työsuhteeni mekaanisen kunnossapidon kehitysinsinöörinä Hämeenlinnan tehtaalla. Kiitän ohjaajiani Professori Aki Mikkolaa sekä Tekniikan tohtoria Kimmo Kerkkästä Diplomityöni hyvästä ohjauksesta. Lopuksi iso kiitos opiskelukavereilleni, jotka tekivät opiskeluvuosistani mahtavia.

Juha Harjula

Juha Harjula
Hämeenlinnassa 26.9.2018

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ **1**
ABSTRACT **2**
ALKUSANAT **3**
SISÄLLYSLUETTELO **5**
SYMBOLILUETTELO **7**
1 JOHDANTO **9**
1.1 Työn taustat 9
1.2 Ennustava kunnossapito 9
1.3 Työn tavoitteet 12
1.4 Työn rajaus 14
1.5 Tutkimuskysymykset 14
2 KÄYTETYT MENETELMÄT **16**
2.1 Kriittisyyden määrittäminen 19
2.2 Kirjallisuuskatsaus 23
3 TULOKSET **49**
3.1 Kriittisten kohteiden valinta 49
3.2 Aktiivisen seurannan kartoitus SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla 53
3.3 Valitut aktiivisen seurannan menetelmät ja käyttökohteet 54
3.4 Kunnonseurannan räätälöinti kriittisessä kohteessa 55
3.5 Aktiivisen kunnonvalvonnan demoaminen kentällä 56
3.6 Kerättävän datan analysointi 59
4 TULOSTEN ANALYSOINTI **64**
4.1 Uudistetun kunnonseurannan arviointi 64
4.2 Tutkimuskysymysten analysointi 66
4.3 Aktiivisen kunnonseurannan tuomat säästöt 68
4.4 Uudistuksista saatavat hyödyt 70
4.5 Kunnossapidon tulevaisuus SSAB:n tehtaalla 71
5 YHTEENVETO **73**
LÄHTEET **74**
LIITTEET

LIITE I: Horner-algoritmi.

SYMBOLILUETTELO

A	Amplitudi
a	Kiihtyvyys
a_0	Fourier-sarjan kerroin tasakomponentille
a_n	Fourier-sarjan kerroin kosinimuotoiselle komponentille
b_n	Fourier-sarjan kerroin sinimuotoiselle komponentille
f	Taajuus
F(a)	Vikatiheys
f_n	Hammaspyörän pyörimistaajuus
f_z	Hammaspyörän ryntötaajuus
g	Kiihtyvyyden mittayksikkö värähtelymittauksessa
gE	Verhokäyrämittauksen mittayksikkö värähtelymittauksessa
H	Systeemin resonanssi
h(max)	Linjan pitkittynyt seisonta-aika
h(min)	Linjan lyhin mahdollinen seisonta-aika
l_∞	Signaalin peak-arvo
m	Massa
mm/s	Nopeuden mittayksikkö värähtelymittauksessa
N_i	Hammaspyörän hampaiden lukumäärä
p	Jousivakio
R(a)	Toimintavarmuus
S_n	Fourier-sarjan osasumma
T	Jaksonaika
t	Aika
U	Käyttöaste
v	Nopeus
x	Poikkeama tasapainopisteestä
x_{RMS}	Tehollisarvo
φ	Vaihe-ero
δ_{st}	Massan poikkeama ulkoisen herätteen voimasta
μ	Hammasvaihteen välityssuhde
ω	Kulmataajuus

BSF	Laakerin vierintäelimien vikataajuus
BPFI	Laakerin sisäkehän vikataajuus
BPFO	Laakerin ulkokehän vikataajuus
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
FTF	Laakerin pidikkeen vikataajuus

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustat

Tuotannon kasvattamisen merkitys on lisääntynyt globaalisti kasvavilla teräsmarkkinoilla. Keskimäärin vuotuista kasvua on odotettavissa yli 2 % tulevina vuosina, mikä johtuu mm. teräksen kysynnän kasvusta Afrikan ja Latinalaisen Amerikan markkinoilla. Myös erikoislujien terästen käytön yleistyminen lisää tuotannon kasvua, kun teräksen käyttäjät tarvitsevat omille tuotteilleen parempaa suorituskykyä ja kestävyyttä. (SSAB 2018.) Jotta tuotantoa olisi mahdollista kasvattaa tehokkaasti ja nousujohteisesti, äkilliset ja ennakoimattomat laiterikot sekä niistä aiheutuvat linjojen pysähdykset ja suuret kustannukset halutaan minimoida.

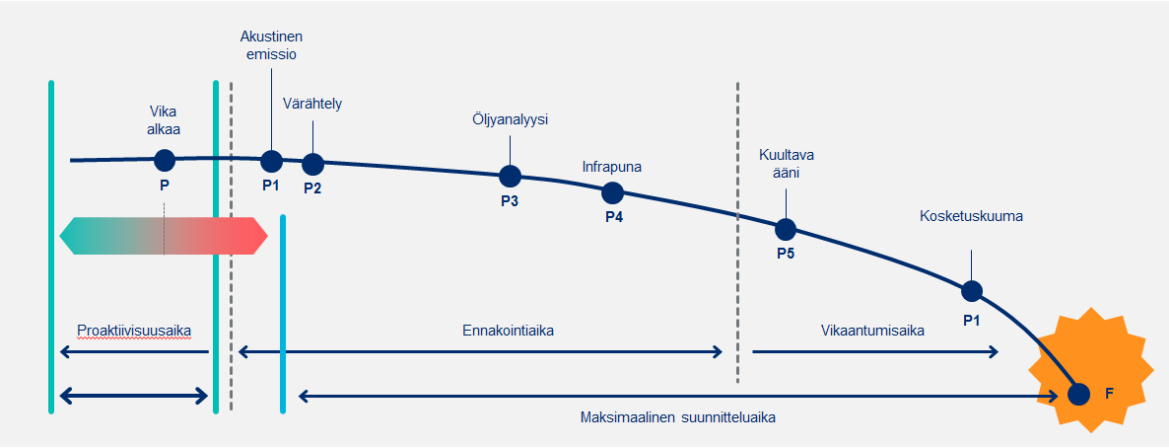
Kunnossapitoinsinöörinä toimivan Timo Salmisen (Salminen 2018) haastattelussa kävi ilmi, että tuotanto- ja laatuvaatimusten sekä entistä lujempien teräslaatujen lisääntymisen myötä tuotantolinjojen kapasiteettia käytetään nykyisellään äärirajoilla, mikä johtaa entistä useammin laiterikkoihin. Ennakoivan kunnossapidon kannalta tehtaalla on oltu nyt muutama vuosi lievässä taantumassa ja siihen ollaan nyt tekemässä muutosta. Tässä tutkimuksessa etsitään ratkaisuja toimeksiantoyrityksen jatkuvatoimisten tuotantolinjojen käyntivarmuuden kasvattamiseen ennalta valituissa ja määritellyissä linjojen kriittisissä kohteissa ennustavan ja aktiivisen kunnonseurannan avulla. Tätä tutkimusta lähdettiin tekemään kun toimeksiantoyrityksessä huomattiin kehittämiskohteita kriittisten linjojen käyntivarmuudessa tuotantovaatimusten kaiken aikaa kasvaessa.

1.2 Ennustava kunnossapito

Kunnossapidon käsitetään hyvin laajana ja monitahoisena ja sen tavoitteena on huolehtia esimerkiksi koneiden tai rakennusten kunnosta. Tuotanto voisi tapahtua mahdollisuuksien mukaan parhaissa olosuhteissa turvallisuuden ja laadun kannalta. Palvelu on tuotettava niin, että se olisi asiakkaan kannalta kaikkein kustannustehokkainta. Tämä edellyttää oikeaoppista kunnonvalvontaa sekä seurantaa, koneiden modifiointia ja korjausta. (Opetushallitus 2018a.) Kunnossapito on ollut suhteellinen käsite pitkään ja kansankielellä se tarkoittaa vioittuneen tai hajonneen koneen, laitteen tai tavaran huoltoa sekä korjaamista. Nyt digitalisaation aikakaudella aktiivinen seuranta on astunut esiin

ennustavan kunnossapidon muodossa. Aktiivisella seurannalla tarkoitetaan kriittiseksi määritellyn laitteen jatkuvaa seurantaa pitkällä aikavälillä keräten laitteen kunnon kehityksestä dataa. Kun trendikäyriä seurataan jatkuvasti, on niistä mahdollista havaita laitteen vioittuminen hyvissä ajoin, jotta mahdollisiin huoltotoimenpiteisiin sekä varaosahankintoihin osataan varautua ajoissa ennen laitteen ennustettua hajoamista.

Kuvassa 1 nähdään laitteen vikaantumisen kehittyminen. Kuvan kohdassa P huomataan vian alkavan. Vikaantumista ei tässä kohtaa vielä havaita (vikakohtainen) perinteisillä kunnossapidon menetelmillä ennen kuin vika on visuaalisesti nähtävissä, kuultavissa tai tunnettavissa (kuumentuminen). Kun vika on kehittynyt niin paljon, että siitä on havaittavissa ääni (P5) tai kuumentuminen (P6), on ennakointiaika jo menetetty ja laiterikko hyvin lähellä. Mikäli kriittiseen laiterikkoon (F) ei ole varauduttu ollenkaan ja vikaantuminen on tapahtunut äärimmäisen nopeasti, on koko linjan vikapysähdys mahdollinen. Aktiivisella seurannalla eli ennustavalla kunnossapidolla pyritään havaitsemaan laitteen vikaantuminen hyvissä ajoin kun ennakointiaikaa on jäljellä runsaasti. Esimerkiksi aktiivisella värähtelymittauksen (P2) seurannalla koneenosien vioittumiset huomataan hyvissä ajoin ja ennakointiaikaa on runsaasti jäljellä. Tällöin on mahdollista hankkia varaosia, kerätä tarvittavia työkaluja sekä suunnitella tulevaa huoltoa tuotannon vielä käydessä eikä niin, että rikko on jo tapahtunut ja tuotanto pysähtynyt kun esimerkiksi varaosien tilaaminen vasta alkaa.



Kuva 1. Laitteen vikaantumisen kehittyminen (muokattu Caverion 2018a).

Kuvassa 2 on esitetty havainnollistaen kunnossapidon kehitys digitalisaation avulla. Siitä on havaittavissa koneoppimisen lisääntyminen ja ihmisen tekemän päätöksenteon

vähentyminen tulevaisuudessa. Ensimmäisessä Toteava-kentässä todetaan, että jotain on tapahtunut. Kuvasta huomataan Ihmisen tekemä työ-alueen olevan suuri, kun on saatu prosessista tietoa, että jotain on tapahtunut ja se pitää korjata. Dataa ei ole liikkunut tähän aikaan vielä tarpeeksi ja koneet eivät ole tarpeeksi kehittyneet, jotta ne kykenisivät omiin analyyseihin tapahtuneesta. Tässä kohdassa päätökset liittyen vian analysointiin ja sen huoltoon ovat vielä täysin ihmisen varassa.

Rivi kerrallaan alaspäin tultaessa huomataan kerätyn datan osuuden kasvavan ja esimerkiksi keskimmäisessä Ennustava-kentässä ihmisen tekemä työ jää selvästi vähäisemmäksi taulukon ensimmäiseen riviin verratessa. Digitalisaation ja laitteiden kehittyessä koneet ymmärtävät kerättyä dataa ja oivaltavat vikatilanteet sekä niiden kehittymiset omatoimisesti käyttäen hyödyksi vikahistoriaa kyseisistä laitteista. Vikahistorian avulla ne itse päätelevät oikeat korjauskehotteet ja ihmisen tekemä työ analysoinnin parissa vähenee.

Alimmassa *Ohjaileva*-kentässä kerätyn datan määrä on jo suuri ja digitalisaatio kehittynyt tarpeeksi sen luentaan. Siitä nähdään ihmisen tekemän työn jääneen täysin pois analysoinnista ja päätöksenteosta ennen korjauskehotetta. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että koneet ohjailevat toimintaansa yksin, mutta siihen on tulevaisuudessa mahdollisuus. Tämä kuitenkin vaatii ihmisen suorittaman valvonnan näitä laitteita kohtaan. Vielä lähitulevaisuudessa ihminen on kuitenkin se, joka hoitaa mekaaniset korjaustoimenpiteet yleisellä tasolla. Kunnossapitopäällikön Aarne Vesasen haastattelussa (Vesanen 2018) kävi ilmi, että SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla ollaan tällä hetkellä reagoivan kunnossapidon piirissä, jolla tarkoitetaan kuvan 2 toista (Diagnosoiva) porrasta. Tavoitteena on nousta kolmannen portaan eli ennustavan kunnossapidon piiriin jo lähitulevaisuudessa.

Kuva 2. Kunnossapitotoiminnan kehitys tulevaisuudessa (muokattu Enfo 2018a).

1.3 Työn tavoitteet

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on luoda toimeksiantoyritykselle toimiva ennustavan kunnonseurannan malli ja testata sitä kriittiseksi valitun laitekokonaisuuden avulla. Tavoitteena on tulevaisuudessa laajentaa tätä mallia tehtaan muihin tuotantolinjoihin koskien niiden kriittisimpiä laitekokonaisuuksia. Tutkimus hyödyttää ensisijaisesti toimeksiantoyritystä, joka pystyy hyödyntämään tutkimusten tuloksia sekä toimintatapoja jokapäiväisessä toiminnassaan ja näin ollen vähentämään ennalta arvaamattomien seisakkien määrää johtuen vikatilanteista. Tämä näkyy mahdollisesti tulevaisuudessa myös suurina taloudellisina säästöinä.

Kuvassa 3 on esitetty portaiden avulla askeleet kohti tuottavaa kunnossapitoa. Lattiatasolta löytyy korjaukset vikatilanteissa eli korjaavan kunnossapidon porras. Siitä eroon pääsemiseksi on noustava toiselle eli ennakoivan kunnossapidon portaalle ja otettava ennakoivan huollon ohjelma käyttöön. Tälle portaalle nousun jälkeen huomataan vikatilastoissa parannuksia, mutta paljon olisi vielä tehtävissä. Kolmas porras on 5S optimoitu kunnossapito, joka kuvaa tuottavan kunnossapidon optimoimista kohti tuottavaa kunnossapitoa. Tehokkaalla organisoinnilla voidaan optimoida henkilöstön ja koneiden käyttöä kunnossapitotoiminnassa. Neljännellä portaalla on erikoistunut kunnossapito, jolla

kuvataan erikoistunutta kunnossapitoa, kuten esimerkiksi värähtelymittauksia suorittavaa kunnossapitoa, joka tukee tuottavaa kunnossapitoa eli viidettä ja ylintä porrasta. Ylöspäin noustessa saavutetaan ylintä ja tehokkainta tuottavan kunnossapidon - porrasta, joka tarkoittaa yrityksen johdon tuella suoritettavaa kunnossapitostrategiaa. Siinä koko henkilökunta on sitoutunut tuottavaan toimintaan ja siihen, että kunnossapito otetaan huomioon kaikissa kehityksen toiminnoissa (Opetushallitus 2018b).

Kuva 3. Askeleet kohti tuottavaa kunnossapitoa (muokattu Enfo 2018b).

Työn onnistumisen mittaamiseksi vanhoja kunnonseurantamenetelmiä verrataan tässä työssä kehitettyihin uusiin menetelmiin ja säästöä arvioidaan parametreilla:

1. laitekohtainen käyttövarmuuden kasvatus (tavoite > 10 %)
2. kunnossapidon vikaseisokkeihin käyttämät työtunnit
3. rahalliset säästöt

Näin saadaan kattava kokonaiskuva uusien seurantamenetelmien toimivuudesta käytännössä sekä huomataan kriittisten laitekokonaisuuksien käyttövarmuusasteen kasvu, kun ennalta osataan arvioida laitteen ja osien kunto. Tälle tutkimukselle on

kohdeyrityksessä selvä tarve vakiintumattoman aktiivisen seurannan mallin puuttumisen vuoksi.

1.4 Työn rajaus

Tämä tutkimus rajataan koskemaan jatkuvatoimisen tuotantolinjan yhtä (1) kriittistä laitekokonaisuutta tutkimalla sen kuntoa säädetyllä seurantavälillä tässä työssä ennalta valittujen aktiivisen värähtelykunnonvalvonnan avulla. Tässä tutkimuksessa luodaan kohdeyritykselle aktiivisen seurannan vaihtoehtoinen malli, jota voidaan tulevaisuudessa laajentaa, kun aktiivisesti tutkitun laitekokonaisuuden kautta saatavat hyödyt näytetään toteen. Työssä hyödynnetään värähtelymittauksiin perustuvaa aktiivisen seurannan kiinteää järjestelmää sekä käsin suoritettavia värähtelymittauksia jatkuvaa kunnonvalvontaa varten tulevaisuudessa.

Tämä tutkimus pitää sisällään katsauksen tämänhetkisiin aktiivisen värähtelymittausten työvälineisiin sekä tapauskohtaisesti on esitetty toimeksiantoyrityksen käyttöön soveltuvimmat työkalut ja niiden tulevat käyttökohteet. Työssä tehdään myös kirjallisuuskatsaus ennustavaan kunnossapitoon ja sen kehittymiseen tulevaisuudessa. Esimerkiksi värähtelymittauksia on tutkittu ja käytetty ennustavan kunnossapidon työkaluna jo pitkään, mutta mittausten analysoinnin haastavuus on estänyt käytön räjähdysmäisen yleistymisen.

1.5 Tutkimuskysymykset

Tässä työssä etsittiin ratkaisua tutkimusongelmaan kuinka saada käyttövarmuusastetta lisättyä jatkuvatoimisilla tuotantolinjoilla tuotantovaatimusten kaiken aikaa kasvaessa. Työ on haasteellinen johtuen kiihtyvän tuotannon tuomista linjojen rakenteellisen kapasiteetin ylikuormituksesta aiheutuvien ongelmien sekä vakiintuneista kunnonseurannan tottumuksista, joihin tässä työssä etsittiin muutoksia. Aktiivista kunnonseurantaa ei ole vielä tällä laajuudella SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla harjoitettu ja onnistuessaan se voi tuoda merkittäviä parannuksia laitteiston käyttövarmuuden kasvattamiseen liittyen. Tästä syystä tällä tutkimuksella on kohdeyritykselle suuri arvo. Alla lueteltuna tätä tutkimusta koskevat tutkimuskysymykset:

1) Miten määritellään jatkuvatoimisen tuotantolinjan kriittiset toimintalaitteet?

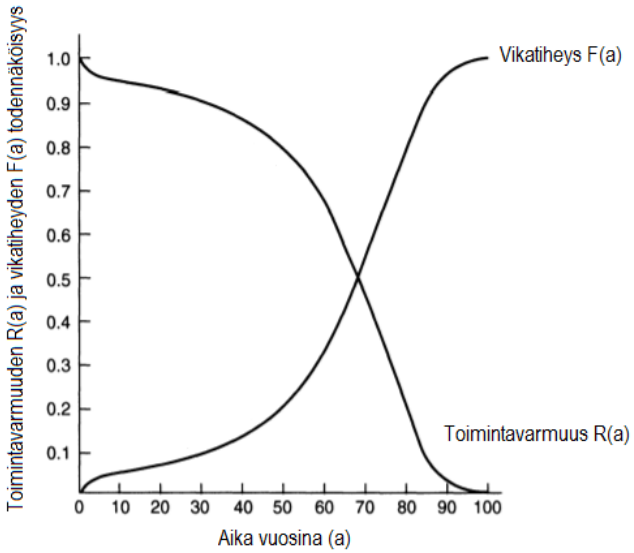
2) Mitä aktiivisen seurannan malleja voidaan hyödyntää SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla?
3) Mitä mahdollisuuksia ennustava kunnossapito tarjoaa SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalle?
4) Mikä on teollisen kunnossapidon tulevaisuus?

2 KÄYTETYT MENETELMÄT

Toimintavarmuus ja luotettavuusanalyysi

Luotettavuutta voidaan mitata monella tapaa, mutta yksi hyvä tapa siihen on mitata vikatiheyttä. Vika yleensä käsitetään mekaanisena hajoamisena tai esimerkiksi systeemin suorituskyvyn laskuna alle kriittisen tason ja näin ollen mekaanisen puolen ongelmana. Hankitun laitteiston kohdalla kuitenkin tavoitellaan korkeaa käytettävyyttä suhteessa aikaan määrätyissä olosuhteissa, eli korkeaa luotettavuutta. Luotettavuus pitää sisällään laitteen käytettävyyden. Toimintavarmuus tai käytettävyys itsessään voidaan käsittää mahdollisuutena, että laite tai linja kokonaisuutena toimii sille asetetuissa rajoissa tiettynä aikajaksona ja tuottaa sille asetetut tavoitteet. (Nakagawa 2005, s. 3-5.)

Kuvassa 4 on yleisellä tasolla esitetty laitteen vikatiheyden ja toimintavarmuuden kehitys ajan suhteen. Toimintavarmuuden kertymäfunktiolla *R(a)* tarkoitetaan, että laite ei ole vikaantunut ajanhetkeen a mennessä ja kertymäfunktio *F(a)* tarkoittaa vastaavasti vikaantumisien määrää ajanhetkeen a mennessä. Ajanhetkellä $a = 0$ oletetaan kuvan tapauksessa olevan uusi laite, jolloin toimintavarmuuden todennäköisyys on 1. Kuvasta voidaan huomata iän tuoma muutos toimintavarmuuteen.



Kuva 4. Laitteen toimintavarmuuden ja vikatiheyden kehitys (muokattu Kumamoto & Henley, 1996, s. 267.).

Kuvasta 4 voidaan olettaa, että laite on uutena toimintakuntoinen ja varmatoiminen. Se voidaan esittää myös matemaattisesti:

$$\lim_{a \to 0} R(a) = 1 \tag{1}$$

$$\lim_{a \to \infty} R(a) = 0 \tag{2}$$

jossa $R(a)$ tarkoittaa toimintavarmuutta ja a aikaa vuosina. Ikääntyessään laite on vikaantumistiheydeltään herkempi:

$$\lim_{a \to 0} F(a) = 0 \tag{3}$$

$$\lim_{a \to \infty} F(a) = 1 \tag{4}$$

jossa $F(a)$ tarkoittaa vikatiheyttä. Oletetaan myös, että todennäköisyys (Kumamoto & Henley 1996, s. 275):

$$R(a) + F(a) = 1 \tag{5}$$

Kunnossapidon keskeisiä tavoitteita on turvata tehokas tuotanto lisäämällä tuotantolinjan tai -laitteen käyntivarmuutta. Käyntivarmuudella tarkoitetaan laitteen kykyä toimia sille määrätyllä tavalla tietyissä olosuhteissa tietyllä ajanjaksolla olettaen ulkoisten resurssien olevan kaiken aikaa saatavilla. Käyntivarmuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi käyntiaika, käyttöaika, joutoaika ja valmiusaika. Käyntivarmuutta voidaan tutkia analyyttisesti käyttöasteen *U* avulla. (PSK 6201 2011, s. 4-9.):

$$U = \frac{t_0}{t} \times 100\ \% \tag{6}$$

Siinä suhteutetaan laitteen käyntituntien t_0 määrä kokonaiskäyntiaikaan t, joka tarkoittaa tässä kohtaa yhtä (1) vuotta ja 8760 käyttötuntia. Yhtälön 6 tulokset esitetään prosentuaalisena.

Vauriomuotomatriisi on keskeinen työkalu luotettavuusanalyysin suorittamiseen kunnossapidon tueksi. Sen avulla on mahdollista paikantaa vauriomuodot ja mekanismit ylimitoitetuista rakenteista tai erotella heikkoja laitteita järjestelmästä. Sen avulla voidaan linjakohtaisesti myös luokitella laitteet ja niiden osakokoonpanot. Taulukossa 1 on nähtävissä laadullinen vauriomuotomatriisi. Tässä tapauksessa laitekohtaisesti tutkitaan laadullisia osien vauriomuotoja.

Taulukko voidaan karkeasti jakaa kolmeen osaan:

1. pieni riski (vihreä)
2. keskinkertainen riski (harmaa) ja
3. suuri riski (punainen)

Vaaka-akselilla on esitetty todennäköisyydet ja pystyakselilla seuraukset, jotka myös värikoodattu punaisella ja vihreällä tapahtuman laajuuden mukaisesti: punaiset kohdat kertovat haitallisista vauriomuodoista, joko tapahtuman todennäköisyyden tai vaurion laajuuden kannalta ja vihreät suhteessa vähemmän todennäköisistä tai haitallisista tapahtumista.

Taulukossa ne voidaan lukea niin, että merkittävin vahinko suurimmalla todennäköisyydellä sijoitetaan kohti oikean yläreunan punaista laatikkoa ja tämän ympärille sijoitellaan suhteessa muut laitteen osat. Näin on visuaalisesti yksinkertaista nähdä laitteen heikoimmat ja mahdollisesti ylimitoitetut kriittiset osat.

Kun laitteen osat on sijoiteltu mahdollisimman tarkasti matriisin, vikakohtia on pyrittävä minimoimaan tulevaisuudessa niin, että alussa sijoitettu vika pyritään siirtämään toteutuneilla kehityssuunnitelmilla kohti pienen riskin ja todennäköisyyden puolta, eli vasenta alareunaa kohti. (Eskelinen 2018, s. 8.) Vauriomuotomatriisilla voidaan tukea laitteistoille suoritetun kriittisyysanalyysin tuloksia.

Taulukko 1. Vauriomuotomatriisi (Eskelinen 2018, s. 8).

Laadulliset	Epätodennä-köinen	Vähäinen	Keskimääräi nen	Suuri	Erittäin Suuri
Erittäin merkittävät					
Korkeat					
Keskimäärä iset					
Alhaiset					
Merkitykset tömät					

2.1 Kriittisyyden määrittäminen

Laitteen kriittisyyden määrittämiseen vaikuttaa moni asia ja jokaisessa yrityksessä se on mietittävä tapauskohtaisesti. Kriittisiä kohteita ja niiden valintaan käytettäviä painoarvotekijöitä on esimerkiksi turvallisuuteen, ympäristöön, tuotantoon ja kunnossapitoon liittyvät tekijät, kuten käyttövarmuus. (PSK 5705 2006, s. 3.)

Laitekokonaisuuden kriittisyyden voidaan ajatella muodostuvan käytettävyyden ja kustannusten mukaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että tietty laite ei välttämättä ole linjan kriittisin, mutta kappalemäärältään niitä on linjalla useita ja kokonaiskustannukset siinä suhteessa ovat laitteen osalta kriittisellä tasolla. Tällöin kannattaa mittauksia ja seurantaa suorittaa vain osaan kyseessä olevista osista tai laitteista. (Martinsuo & Kärri 2017, s. 154.) Laitteet, jotka operoivat pääosin ilman ihmisen läsnäoloa täyttävät kriittisyyden kriittisen kohteen vaatimukset (Mäki 2016).

Kriittisyys voidaan myös määritellä taulukon 2 mukaisesti. Koneelle annetaan taulukosta painoarvo, joka kerrotaan kertoimella. Kerroin saadaan valintakriteerit - kohdasta valitsemalla kohteesta riippuen. Kun kaikki painoarvot ovat käyty läpi, summataan saadut arvot toisiinsa ja näin ollen saadaan kunnonvalvontatarvetta kuvaava luku. Mitä korkeampi

kyseinen luku on, sitä kriittisemmäksi laite luokitellaan ja näin ollen tarkkaa kunnonseurantaa on perusteltua harjoittaa.

Mikäli kone kuuluu ylimpään ryhmään, olisi siihen perusteltua asentaa sellainen kiinteä seurantajärjestelmä, joka havaitsee koneen kunnossa tapahtuneet muutokset hyvissä ajoin. Kiinteällä seurantajärjestelmällä tarkoitetaan koneeseen asennetuista kiinteistä antureista ja anturikaapeleista sekä mittausyksiköstä koostuvaa kokonaisuutta, jonka viesti häiriöstä tai kunnon heikkenemisestä voidaan johtaa eteenpäin joko digitaalisena tai analogisena.

Keskimmäiseen ryhmään kuuluvat koneet, joilla tämä yhteenlaskettu luku on alle suurimman ryhmän. Näille koneille olisi perusteltua muodostaa säännöllinen kunnonvalvonta, jolla seurataan koneiden kuntoa ja sen muutoksia. Tämän järjestelmän ei ole tarvetta olla kiinteä.

Alimmassa ryhmässä on koneet, jotka kriittisyydeltään ovat alle säännöllisen seurantatason, eli ei ole syytä järjestää aktiivista eikä edes säännöllistä kunnonvalvontaa. (Nohynek & Lumme 1996, s. 33-35.) Kriittisyysluokan määritystä ei ole erikseen taulukoitu, vaan laitoskohtaisesti on itse löydettävä kriittisimmät kohteet ja luotava niihin asianmukainen pisteytys. Tämän jälkeen laitoksen mitatut koneet skaalataan toisiinsa nähden ja määritellään koneiden luokat kunnonseurantaan liittyen.

Taulukko 2. Kriittisyyden määrittäminen standardin PSK 5705 avulla (PSK 5705 2006, s. 13).

Kohde	Tekijä Factor	Painoarvo Weight	Kerroin Multiplier	Valintakriteeri Selection criteria
Turvallisuus- ja ympäristövaikutukset	**Turvallisuusriskit** Safety risks	20	0	Ei turvallisuusriskiä No safety risk
			4	Vähäinen turvallisuusriski Minor safety risk
			8	Merkittävä turvallisuusriski Major safety risk
	Ympäristöriskit Environmental risks	20	0	Ei ympäristöriskiä No environmental risk
			4	Vähäinen ympäristöriski Minor environmental risk
			8	Merkittävä ympäristöriski Major environmental risk
Tuotannonmenetyksen kustannusvaikutukset	**Kriittisyys** Criticality	20	0	Laitteen toimimattomuus ei merkitystä tehtaan tai osaston tuotannolle. Machine failure does not affect the production of the plant or department.
			2	Laitteen toimimattomuus voi johtaa tuotannon häiriintymiseen, laatukustannuksiin tai seisokkiin. Machine failure may lead to disturbances in production, quality costs or shut-down.
			4	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa tuotannonmenetystä. Machine failure causes loss of production.
			8	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa tuotantolaitoksen tai -linjan täydellisen pysähtymisen. Machine failure causes the total stop of the production plant or section.
	Laatu Quality	10	0	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta laatukustannuksia. Machine failure does not cause quality costs.
			2	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa laatukustannuksia. Machine failure causes quality costs.
			4	Laitteen puutteellinen toiminta aiheuttaa laatukustannuksia. Abnormal operation of a machine causes quality costs.

Taulukko 2 jatkuu. Kriittisyyden määrittäminen standardin PSK 5705 avulla (PSK 5705 2006, s. 13).

Kohde	Tekijä Factor	Painoarvo Weight	Kerroin Multiplier	Valintakriteeri Selection criteria
Kunnossapidon kustannusvaikutukset Maintenance cost effects	**Häiriöherkkyys** Sensitivity to failures	5	1	Varmakäyntinen High reliability
			2	Vähäisiä häiriöitä Minor disturbances
			4	Häiriöherkkä Sensitive to disturbances
	Kunnossapitotyön kustannukset Maintenance work costs	5	1	Vähäiset Minor
			2	Kohtuulliset Moderate
			4	Korkeat High
	Kunnossapidon materiaalikustannukset Maintenance material costs	5	1	Vähäiset Minor
			2	Kohtuulliset Moderate
			4	Korkeat High
	Jälleenhankinta-arvo Replacement value	5	1	Vähäinen Low
			2	Kohtuullinen Moderate
			4	Korkea High
	Elinkaarikustannus Life-cycle costs	5	1	Vähäinen Low
			2	Kohtuullinen Moderate
			4	Korkea High
	Kunnonvalvontakustannukset Condition monitoring costs	5	1	Vähäiset Low
			2	Kohtuulliset Moderate
			4	Korkea High

Laitteiden kriittisyydestä ja niiden määrittelemisestä käytiin keskusteluja kunnossapidon asiantuntijoiden kanssa ja huomattiin PSK 5705 standardin antavan hyvää tukea kriittisyyden määrittelemiselle, mutta se ei itsessään ole täysin aukoton. Se ei esimerkiksi ota huomioon laitteiston ja sen ympäristön siisteyttä. Päivittäisiin kunnossapidon perushuoltoihin kuuluu laitteiston ja sen ympäristön siisteyden ylläpitäminen. Likaantuminen voi aiheuttaa vakavia ongelmia laitteistossa ja johtaa käyttöiän merkittävään lyhenemiseen. (Kelly 2006, s. 264.)

Taulukko ei myöskään ota huomioon vikahistoriaa. On ensisijaisen tärkeää tuntea laitteiston vikahistoria ja nykytila ennen kriittisyyden määrittelemistä. Vaikka standardin mukaan laskettu kriittisyys on vähäinen, voi todellisuus olla täysin toinen vikahistoriaa tutkimalla. Laitekokonaisuus ja teollisuuslaitos ovat huomioitava yksilöinä, jonka merkitystä vikahistorian valossa ei voi aliarvioida.

2.2 Kirjallisuuskatsaus

Värähtelyn teoria

Värähtelyä syntyy, kun koneen tai osan liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä ylläpitää jatkuvasti suuruuttaan tai suuntaansa vaihtava voima. Värähtelyä voidaan kuvata aaltoliikkeenä, jonka muutosnopeutta vastaa taajuus *f*. Taajuuden yksikkö on hertsi. Yhden siirtymissuunnan (yhden vapausasteen) harmonista värähtelijää voidaan kuvata siihen vaikuttavien voimien avulla. Yhden vapausasteen värähtelijän voimatasapaino voidaan esittää seuraavasti:

$$F(t) = F_A(t) + F_B(t) + F_C(t) \tag{7}$$

Voimatasapainon yhtälössä 7 muuttuja $F(t)$ on kappaleeseen vaikuttava ulkoinen heräte, $F_A(t)$ kappaleen hitausvoima, $F_B(t)$ on kappaleen jousivoima ja $F_C(t)$ kappaleen vaimennusvoima. Tämä voidaan esittää myös liikeyhtälönä kappaleen sijainnin, nopeuden ja kiihtyvyyden ajan funktiona seuraavasti:

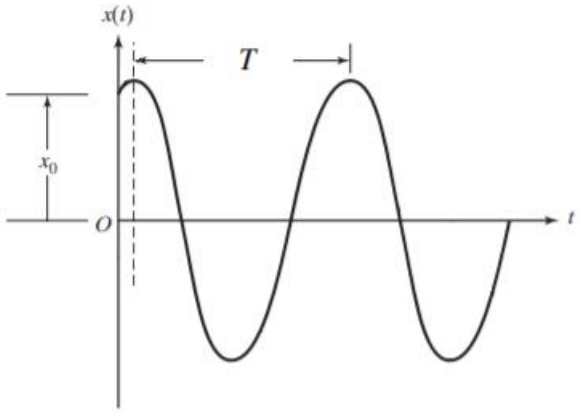
$$F(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + px \tag{8}$$

Yhtälössä muuttuja x tarkoittaa kappaleen sijaintia, $\dot{x}$ sijainnin ensimmäistä derivaattaa eli nopeutta ja $\ddot{x}$ sijainnin toista derivaattaa eli kiihtyvyyttä. Yhtälössä m tarkoittaa kappaleen massaa, c vaimennusta ja p sen jäykkyyttä. Kun kappaleelle annetaan tasapainoasemasta poikkeama, voidaan värähtely esittää matemaattisesti seuraavalla tavalla:

$$x(t) = x_0 \sin(\omega_n t + \varphi) \tag{9}$$

Yhtälössä 9 muuttuja x_0 tarkoittaa poikkeamaa tasapainoasemasta, ω_n tarkoittaa kappaleen ominaistaajuutta, t aikaa ja φ vaihe-eroa. Vaihe-ero kuvaa esimerkiksi poikkeaman

aiheuttaneen voiman ja värähtelyn vaiheiden välistä eroa. Lauseke $sin(\omega_n t + \varphi)$ kuvaa värähtelijän y-suuntaista siirtymää. (Nohynek & Lumme 1996, s. 48-52.) Kuvassa 5 on esitetty vaimentamattoman harmonisen värähtelijän kuvaaja. Kuvassa muuttuja *T* tarkoittaa jaksonaikaa, x_0 värähtelyn amplitudia ja *t* aikaa. Amplitudi kuvaa värähtelyn suuruutta. Muuttuja *O* tarkoittaa värähtelyn nollatasoa.



Kuva 5. Harmoninen värähtelijä (muokattu Singiresu 2000, s. 116).

Värähtelyn perussuure *f* on taajuuden yksikkö, ja se kertoo kuinka paljon siirtymäjaksoja tapahtuu sekunnin aikana:

$$f = \frac{1}{T} \tag{10}$$

Siinä muuttuja *T* on jaksonaika. Se esittää, kuinka kauan värähtelyllä kestää kulkea aallonpituutensa. (Törnqvist & Talja 2014, s. 34.) Toinen värähtelyn perussuureista on kulmataajuus ω, joka tarkoittaa sini-signaalin kulmaa radiaaneina sekunnissa. Se voidaan esittää matemaattisesti seuraavalla tavalla:

$$\omega = 2\pi T \tag{11}$$

Näiden värähtelyn perussuureiden f ja ω välillä on yhteys (Kelly 2007, s. 35.):

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{12}$$

Signaalia on hankala käsitellä ilman suodatusta. Fourier-sarjoilla on mahdollista approksimoida signaalien koostuvan sinimuotoisten signaalien summasta, jotka koostuvat eri amplitudeista ja taajuuksista (Nohynek & Lumme 1996, s. 77). Fourier-sarjan perustana on jaksollinen funktio $f(x)$, joka voidaan esittää sini- ja kosiniaaltojen summana, jossa jokaisen termin taajuus on funktion perustaajuuden monikerta ja se voidaan esittää seuraavasti:

$$f(x) = f(x + nT) \tag{13}$$

Funktio on jaksollinen, jos yhtälö 13 toteutuu kaikilla muuttujan x arvoilla ja jaksonajalla T, kun $n = 1, 2, \ldots$ Fourier-sarja voidaan esittää matemaattisesti funktion $f(x)$ avulla myös toisella tavalla:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\,x + b_n \sin nx) \tag{14}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)\, dx \tag{15}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx\, dx \tag{16}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)\, sin\, nx\, dx \tag{17}$$

Yhtälössä $f(x)$ esittää jaksollista signaalia, jossa $\cos(x)$ ja $sin(x)$ kuvaavat signaalin muotoa. Termit a_0, a_n, b_n tarkoittavat jaksollisen signaalin Fourier-sarjan tasamuotoista, sinimuotoista ja kosinimuotoista kerrointa. Jaksollisen funktion $f(x)$ kertoimet voidaan laskea kaavoilla 15, 16 ja 17. (Kreyszig 2010, s. 475-476.)

Etsittäessä Fourier-sarjan jaksollisen signaalin $f(x)$ kertoimia välillä:

$$f(x) = \begin{cases} -k\ kun & -\pi < x < 0 \\ k\ kun & 0 < x < \pi \end{cases} \text{, jossa } f(x) = f(x + 2\pi) \tag{18}$$

saadaan funktio, joka esiintyy, kun ulkoisia voimia vaikuttaa mekaanisessa systeemissä. Jos $a_0 = 0$, integroidaan vain yhtälöitä 16 ja 17 välillä $-\pi$ ja π. Näin on mahdollista saada Fourier-sarjaksi yhtälölle $f(x)$:

$$f(x) = \frac{4k}{\pi}(sin\ x + \frac{1}{3} sin\ 3x\ + \frac{1}{5}\sin 5x + \cdots) \tag{19}$$

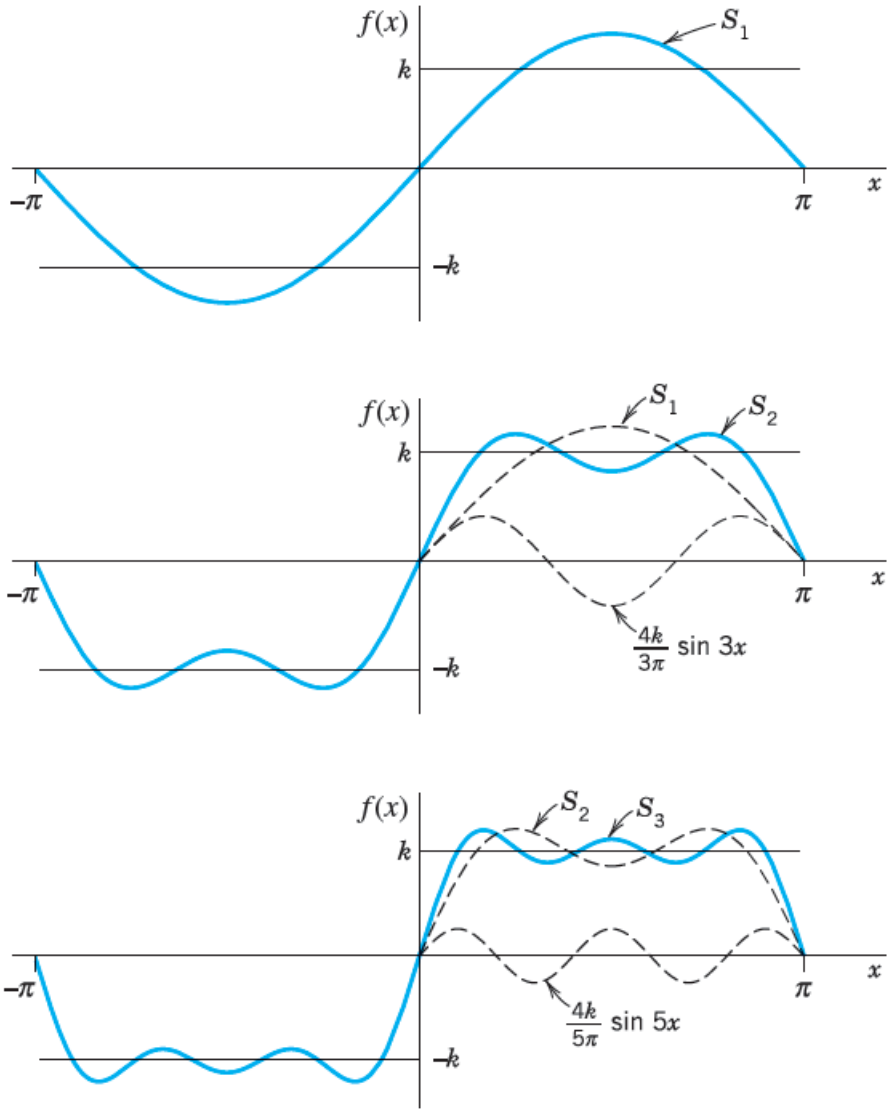
jossa sarjan osasummat S_1, S_2 ja S_3 ovat

$$S_1 = \tfrac{4k}{\pi} sin\ x \tag{20}$$

$$S_2 = \tfrac{4k}{\pi}(sin\ x + \tfrac{1}{3} sin\ 3x) \tag{21}$$

$$S_3 = \tfrac{4k}{\pi}(sin\ x + \tfrac{1}{3} sin\ 3x + \tfrac{1}{5}\sin 5x)\ldots \tag{22}$$

(Kreyszig 2010, s. 477-478). Kuvassa 6 on esitetty Fourier-sarjan ensimmäisiä kertoimia ja niiden muodostamat sinimuotoiset käyrät. S_1, S_2 ja S_3 ovat Fourier-sarjan osasummia funktion $f(x)$ arvojen k ja $-k$ välillä.



Kuva 6. Fourier-sarjan osasummat ja niiden muodostamat sinimuotoiset käyrät (muokattu Kreyszig 2010, s. 478).

Eulerin yhtälön avulla on mahdollista saada Fourier-sarjalle kompleksiset muodot (Kreyszig 2010, s. 633). Eulerin yhtälö e^{ix} kertoo kuljetun matkan ympyrän kehällä jonka säde on 1 käyttäen hyväksi radiaaneita ja se voidaan esittää seuraavasti:

$$e^{ix} = \cos(x) + isin(x) \tag{23}$$

Matkan pituus saadaan kertoimelta x luvusta e^{ix}, kun se annetaan imaginääriluvulle i, kulkiessa ympyrää vastapäivään. Komponentti $\cos(x)$ kertoo kuljetun matkan x-suuntaisen

siirtymän ja $sin(x)$ y-suuntaisen siirtymän. (Woit 2015.) Fourier-sarjan kompleksinen muoto voidaan esittää jaksollisen funktion $x(t)$ avulla:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_0 t} \tag{24}$$

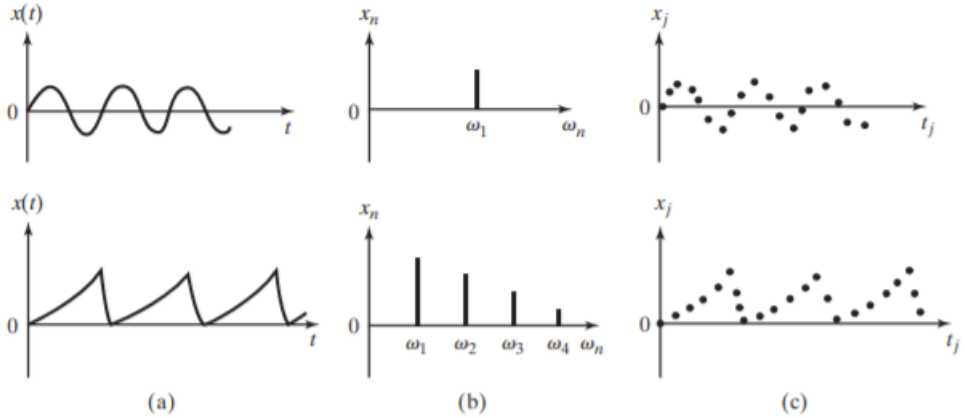
$$c_n = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)e^{-in\omega_0 t}\, dt \tag{25}$$

Yhtälöissä 24 ja 25 muuttuja c_n tarkoittaa Fourier-sarjan kertoimia. Jaksollinen funktio jaksonajalla T ja perustaajuudella ω_0 voidaan integroida yhden jaksonajan yli, jolloin tuloksena saadaan yhtälön 25 mukainen matemaattinen muoto. Tällöin $n = 0{,}1 \ldots$ (Singiresu 2000, s. 986-987).

Fourier-muunnoksen avulla voidaan aikatason funktio muuttaa taajuustason funktioksi. Integraali Fourier-muunnos ilmaisee ei-jaksollisen funktion taajuuden erittelyä jatkuvassa taajuustasossa. Sen avulla ei-jaksollinen funktio voidaan ajatella jaksollisena, jolla on ääretön jaksonpituus (Singiresu 2000, s. 990-991.):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t}\, dt \tag{26}$$

Komponentit, jotka halutaan saada eroteltua Fourier-muunnoksella, ovat sarjan suuruus eli amplitudi, kierron taajuus ja vaihekulma. Näiden avulla on mahdollista selvittää signaalin ominaisuudet. (Singiresu 2000, s. 57.) Kuvassa 7 on esitetty signaalin eri muodot ensin aikatasossa t (a) ja Fourier-muunnoksen jälkeen taajuustasossa ω_n (b). Digitaalisessa muodossa signaali on nähtävissä kohdasta (c). Analoginen signaali on esitetty muuttujan $x(t)$ ja $x_n = x(t_n)$ avulla ja digitaalinen signaali muuttujan $x_j = x(t_j)$ avulla. (Singiresu 2000, s. 772-773.)



Kuva 7. Signaali aika- ja taajuustasossa sekä digitaalisena (Singiresu 2000, s. 773).

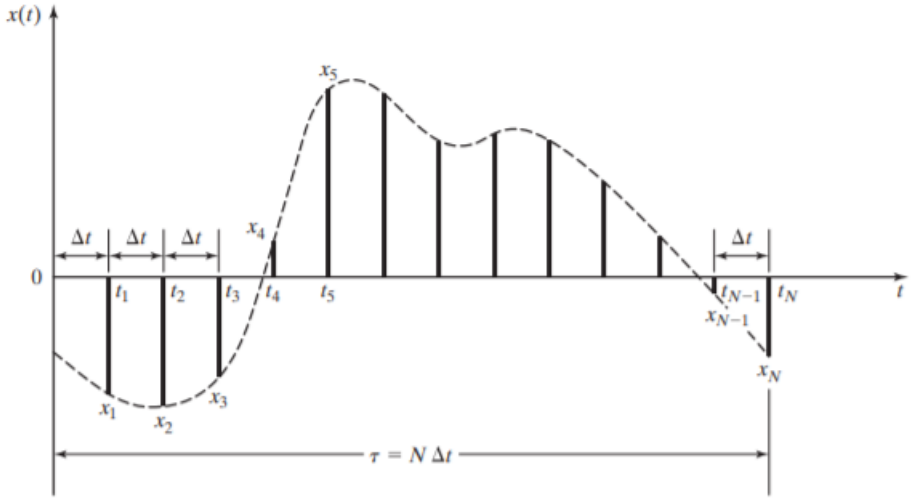
DFT-laskentaa (Discrete Fourier Transform) hyödynnetään, kun simuloitujen ongelmien kanssa halutaan keskittyä arvoihin funktioiden sijaan. Siinä ääreellisestä ja aikajatkuvasta funktiosta (signaalista) otetaan näytteitä määritellyiltä väleiltä, jonka jälkeen laskennassa voidaan käyttää Fourier sarjan kertoimia (Newland 1989, s. 283-284). Fourier-sarjan kertoimet c_n voidaan laskea aikadiskreetistä funktiosta seuraavasti:

$$c_n = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} f_k\, e^{-inx_k} \tag{27}$$

Yhtälössä 27 muuttuja N on näytteiden määrä, $f_k = f(x_k)$ on jaksollinen funktio, $x_k = \frac{2\pi k}{N}$ tarkoittaa näytteenottopisteitä, $n = 0, 1 \dots, N-1$ ja $k = 0, 1 \dots, N-1$. DFT:n ratkaisu on esitetty vektorin $\hat{f} = [\hat{f}_0 \ \dots \ \hat{f}_{N-1}]$ avulla seuraavasti:

$$\hat{f}_n = Nc_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k\, e^{-inx_k} \tag{28}$$

Yhtälössä 28 funktion (signaalin) $f_k = [f_0 \dots f_{N-1}]^T$ Fourier-muunnetut komponentit sijoitetaan vektoriin $\hat{f}$. Laskennan lopputuloksena saadaan signaalin taajuusspektri. (Kreyszig, 2010, s. 528-530.) Kuvassa 8 on esitetty diskreettinen aikajatkuva funktio jaksonajalla $N\Delta t$. Funktion x_t näytteistetyt pisteet on merkitty kuvassa t_1, t_2, t_3 ... t_N.



Kuva 8. Näytteistetty jaksollinen funktio (Singiresu 2000, s 61).

FFT-laskenta (Fast Fourier Transform) on signaalinkäsittelyä nopeuttamaan luotu matemaattista algoritmia hyödyntävä laskennallinen malli. FFT-laskenta käyttää laskennallista suoritusta $O(N)\log_2$, joka on merkittävästi kevyempi kuin DFT-laskennan $O(N^2)$. (Kreyszig 2010, s 531.) DFT-laskenta on FFT-laskentaa raskaampi, mutta parempi vaihtoehto suurille N:n arvoille. FFT-algoritmin avulla iteroidaan DFT:n arvoja ja se vaatii keskimäärin N^2 iterointikierrosta. Liitteessä 1 on esitetty Horner-algoritmi, joka on yleistetty FFT-algoritmi. (Kammler 2008, s. 291-293.)

Crest factor-algoritmia käytetään yksinkertaistamaan saatuja signaaleja ja se lasketaan signaalin suurimman arvon ja tehollisarvon suhteesta:

$$CF_x = \frac{l_\infty(x)}{x_{RMS}(x)} \tag{29}$$

CF-algoritmilla on suora yhteys signaalin vahvuuteen. Yhtälössä $l_\infty(x)$ tarkoittaa signaalin x suurinta arvoa ja $x_{RMS}(x)$ signaalin x tehollisarvoa. (Guillaume & Schoukens & Pintelon & Kollár 1991, s 982-983.) Tehollisarvo RMS (Root Mean Square) kuvaa signaalin energiasisällön suuruutta ja se esitetään laskemalla signaalin neliöllisen keskiarvon neliöjuuri määrätyllä aikavälillä:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t x^2(t)\,dt} \tag{30}$$

Yhtälössä 30 muuttuja *t* tarkoittaa signaalin ajanjaksoa ja *x* signaalia. (Nohynek & Lumme 1996, s 61.)

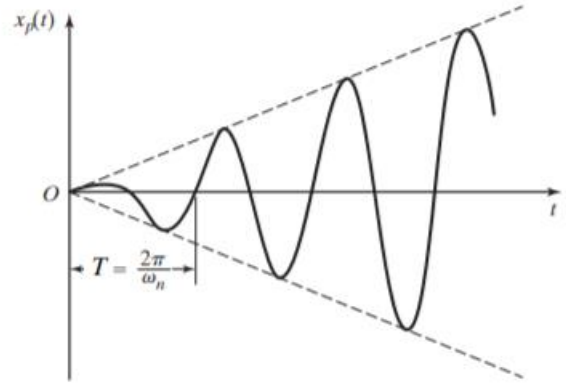
Pyörivissä koneissa syntyy aina värähtelyä työkierron toistuessa jatkuvasti. Näin syntyvää värähtelyä kutsutaan pakkovärähtelyksi, koska värähtely ei pääse vaimenemaan koneen rakenteisiin. Jokaisella rakenteella on oma ominaistaajuutensa, jolla rakenne värähtelee voimakkaasti, jos heräte eli tärinän aiheuttaja värähtelee samalla taajuudella tai hyvin lähellä sitä. Tällöin puhutaan laitteen tai rakenteen resonanssista. Voimakas resonointi voi pahimmillaan johtaa laitteen hajoamiseen, mutta sitä voidaan hallita vaimennuksella. (Singiresu 2000, s. 9-16.)

Jos ulkoisen herätteen taajuus on sama, kuin mekaanisen systeemin yksi tai useampi ominaistaajuus, voidaan resonanssin vaste $H(t)$kirjoittaa matemaattisesti muotoon:

$$H(t) = x_0 \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\sin(\omega_n t) + \frac{\delta_{st}\omega_n t}{2}\sin(\omega_n t) \tag{31}$$

Siinä muuttuja ω_n on systeemin joku ominaistaajuus, δ_{st} massan poikkeama ulkoisen herätteen voimasta, t aika, x_0 systeemin alkutilanteen siirtymää ja $\dot{x}_0$ systeemin alkutilanteen nopeutta. Termit $\cos(\omega_n t)$ ja $\sin(\omega_n t)$ kuvaavat värähtelyn muotoa.

Kuvassa 9 on graafisesti esitetty yhtälön 30 viimeinen termi $\frac{\delta_{st}\omega_n t}{2}\sin(\omega_n t)$, joka kasvattaa resonanssia lineaarisesti ajan myötä. Termi *T* tarkoittaa kuvassa kasvavan resonanssin jaksonaikaa. (Singiresu 2000, s. 221-224.)



Kuva 9. Resonanssi vaste systeemissä (Singiresu 2000, s. 225).

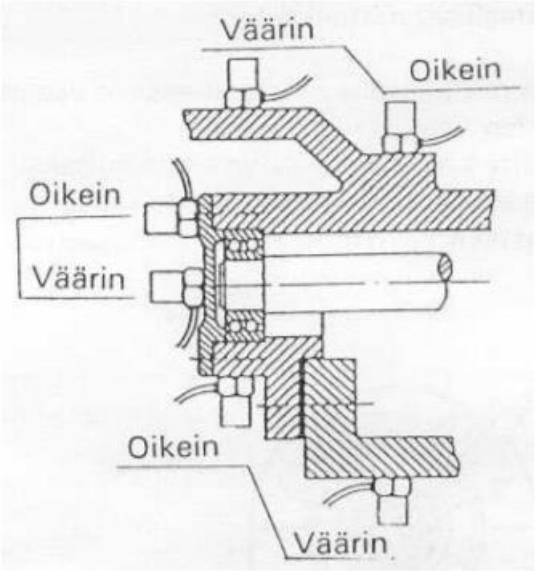
Ominaistaajuuksia voi laitteessa olla useita erilaisia johtuen laitteen vaihtelevista rakenteellisista jäykkyyksistä eri suunnissa. Näiden värähtelytaajuuksien lisäksi jokaisella osalla on oma ominaistaajuus, joka piirtyy mitattaessa taajuustason kuvaajaan ja tämän vuoksi vikakohteiden löytäminen on ajoittain erittäin hankalaa. (Nohynek & Lumme 1996, s. 123.)

Värähtelymittauksen laitteisto

Tässä tutkimuksessa tutkitaan värähtelymittauksen avulla suoritettavaa kunnonvalvontaa ja sen merkitystä SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla. Uskotaan, että vakiintuneella mittaavalla kunnossapidolla voidaan kunnossapitokustannuksia pudottaa jopa yli 50 % (Nohynek & Lumme 1996, s. 12). Värähtelymittauksessa perustana on kerätä tietoa mittauskohteesta säännöllisin väliajoin ja verrata mittausten tuloksia. Näin on mahdollista huomata koneen kuntoon liittyvät muutokset ja tarkemmalla analysoinnilla voidaan erottaa vialliset osat laitekokonaisuudesta. (Nohynek & Lumme 1996, s. 91.) Mittauksesta kerätään dataa mittalaitteella, jonka jälkeen analysointiohjelmaa käyttäen dataa voidaan lukea ja ymmärtää.

Koneista ja niiden käymisestä syntyvää värähtelyä mitataan siirtymäantureilla, kiihtyvyysantureilla ja nopeusantureilla. Siirtymämittaus kertoo mitattavan kohteen sijainnin suhteessa vertailupisteeseen. Nopeutena suoritettu mittaus ilmaisee kuljetun matkan tiettynä ajanhetkenä ja kiihtyvyys nopeuden muutoksen tiettynä ajanhetkenä. Kiihtyvyysanturilla käyttö on yleisintä värähtelymittauksissa ja sen mittayksikkö on *g*. (Nohynek & Lumme 1996, s. 54.) Mittausanturin asettamisella ja mittauspaikan

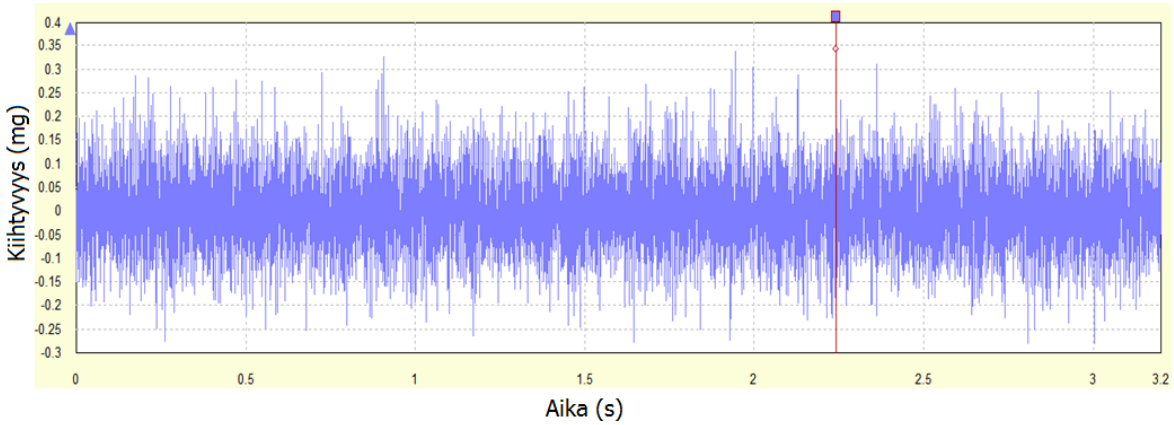
valitsemisella on suuri merkitys mittaustuloksiin. Mittauspisteitä on oltava riittävästi määritetty, jotta mittauksessa ei jää yksittäinen kone-elimen vika huomioimatta. Mittauspisteitä on oltava vähintään yksi jokaista laakeria kohti, jolloin mittauksesta voidaan arvioida sekä laakerin että muiden kone-elinten kuntoa. (Nohynek & Lumme 1996, s. 62.) Kuvassa 10 on nähtävissä oikein asennetut anturit ja niiden paikat värähtelymittausta suoritettaessa. Anturin paikka olisi valittava siten, että värähtelylähde ja anturi olisivat mekaanisesti hyvin lähellä toisiaan, koska värähtely menettää energiaansa rajapintoihin. (Nohynek & Lumme 1996, s. 64.) Väärä anturin paikka on esimerkiksi irrallinen olake.



Kuva 10. Mittausanturin paikan valinta (PSK 5702 2007, s. 2).

Mittaus voidaan suorittaa, kun anturit ovat oikein asennettu mitattavaan kohteeseen. Värähtelymittauksessa mitattusignaali suodatetaan niin, että vain halutun taajuuskaistan värähtely otetaan mittauksessa huomioon (Nohynek & Lumme 1996, s. 73). Käytettäviä mittauksia tässä työssä ovat nopeusmittaus, kiihtyvyysmittaus sekä envelope-verhokäyrämittaus. Mittayksikkö nopeudelle on *mm/s* ja verhokäyrämittaukselle *gE*. Aikatason mittaussignaalia hyödynnetään monella tavalla kunnonvalvonnassa. Siitä on esimerkiksi helposti havaittavissa laitteessa syntyvät iskumaiset värähtelyt ja sen kautta saatavia tärkeimpiä tunnuslukuja ovat huippukerroin, tehollisarvo, huipusta huippuun- arvo ja huippuarvo värähtelyssä. (Nohynek & Lumme 1996, s. 94.) Kuvassa 11 on aikatasossa

esitetty esimerkkimittaus. Värähtelyn suuruus kiihtyvyytenä (mg) on esitetty y-akselilla ja aika (*s*) x-akselilla.

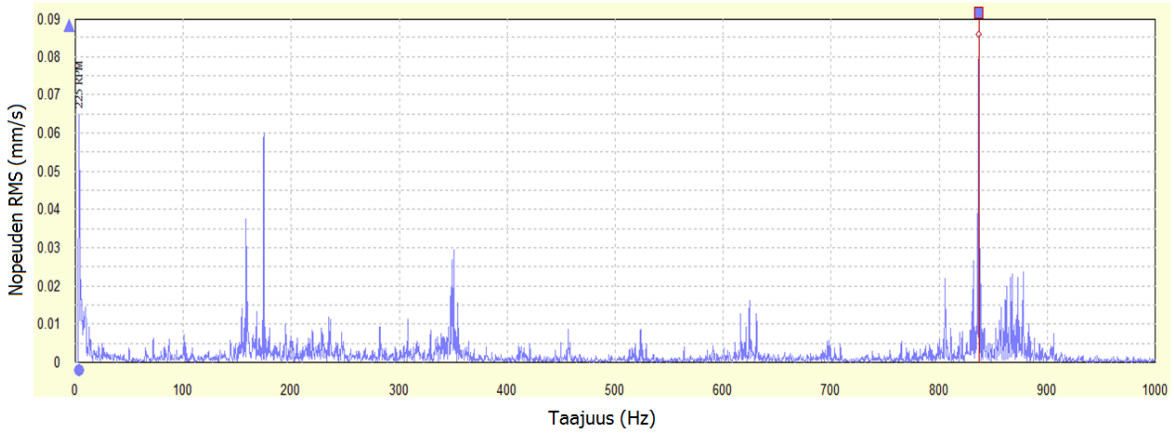


Kuva 11. Aikatason värähtelymittaus.

Aikatasosta ei pystytä erottamaan vikoja tarkasti ja tarkempaa analysointia varten aikatasoinen signaali on muutettava taajuustasoon. Aikatasosta on noudettavissa värähtelyspektrit FFT-laskennalla mittauslaitteiston avulla. Värähtelyspektrien avulla on mahdollista löytää esimerkiksi tietyn laakerin vikataajuuksia ja se on siksi todella hyödyllinen väline kunnonvalvonnassa. Se kuitenkin edellyttää värähtelyyn liittyvien parametrien etukäteen tietämistä, kuten moottorien pyörimisnopeudet mittaushetkellä, akselien kierroslukutiedot ja koneenosien rakenteet. (Nohynek & Lumme 1996, s. 99-100.)

Taajuuserotuskyky on taajuusspektrin tärkeimpiä tehtäviä, koska sen kautta voidaan havaita mahdollisia vikataajuuksia. Spektriviivat kertovat, kuinka voidaan erottaa taajuudet, jotka ovat lähellä toisiaan. Toisiaan lähellä olevien taajuuksien spektrin erottamisen määräävät spektriviivojen lukumäärä sekä ylärajataajuus. Spektrin erotuskyky paranee, kun spektriviivojen lukumäärää lisätään ja samalla lasketaan ylärajataajuutta. Erotuskyky on laskettavissa ylärajataajuuden ja spektriviivojen lukumäärän osamäärästä. Esimerkiksi jos ylärajataajuus on 1000 Hz ja käytössä on 200 viivaa, saadaan erotuskyvyksi tällöin 5 Hz. Näin ollen tärinätaajuudet, jotka asettuvat 5 Hz sisään toisistaan ei voida erottaa erikseen, vaan ne nähdään yhtenä tärinäamplitudina. Ainoastaan korkeataajuusmittauksissa tulisi käyttää alle 2,5 Hz erotuskykyä. Mittausaika lasketaan jakamalla spektriviivojen lukumäärä ylärajataajuudella. Esimerkiksi 1000 Hz ylärajataajuudella ja 200 spektriviivalla saadaan mittausajaksi 0,2 s. (Nohynek & Lumme

1996, s. 80.) Kuvassa 12 on esimerkkimittaus taajuustasossa 1000 Hz asti. Y-akselilla värähtelyn suuruus on esitetty nopeutena *v* ja x-akselilla taajuus *f*.



Kuva 12. Teollisuuskulmavaihteen yhden mittauspisteen värähtelyspektri taajuustasossa.

Verhokäyrävalvontaa käytetään amplitudien kasvun seuraamiseen verhokäyräspektreistä. Siitä ei voi tehdä johtopäätöksiä yhden mittauksen perusteella, vaan jatkuvalla mittaustoiminnalla seurataan amplitudien kehittymistä tietyillä vikataajuuksilla ja tietyllä ajanjaksolla. (Nohynek & Lumme 1996, s. 103-104.)

Myös värähtelyn kokonaistasoa seuraamalla on mahdollista saada tehokkaita tuloksia kunnonvalvonnassa. Kokonaistasolla tarkoitetaan värähtelyn voimakkuutta kuvaavaa tunnuslukua, jota seurataan halutussa taajuustasossa. Trendikäyräseuranta on tehokas työkalu ja kokonaistason kanssa hyvin samantapainen. Trendikäyrällä seurataan haluttua värähtelymittauksen tunnuslukua aikatasossa ajan funktiona. Siitä käy helposti ilmi jopa vuosien muutokset nopealla silmäyksellä. (PSK 5701 2017, s. 6-11.)

Värähtelymittauksen tulosten analysointi

Värähtelyn analysointiin käytetään värähtelymittauksessa mitattua dataa. Esimerkiksi laakerivika on havaittavissa varhaisessa vaiheessa vian alkamisesta ja parhaiten se on todettavissa värähtelymittauksen taajuusspektristä (Nohynek & Lumme 1996, s. 99-100). Laakerivika on usein havaittavissa korkeataajuisena värähtelyä. Tyypillisesti yli 2000 Hz värähtelyistä on erotettavissa voitelusta ja metallikosketuksesta johtuvat viat. Paikallisesti vioittuneen vierintälaakerin viat voidaan löytää laakerin osien ominaistaajuusalueilta 500-2000 Hz. Liukulaakerien viat johtuvat usein voitelun puutteesta ja epäpuhtauksista.

Liukulaakerin vikataajuudet syntyvät verhokäyrään tai spektriin yleensä pyörimistaajuuden monikertoina. Samassa yhteydessä voidaan spektrissä usein havaita kohinatasojen nousu. (PSK 5707 2011, s. 14-17.)

Laakereiden eri osien vikataajuudet saadaan analyyttisesti selville seuraavien yhtälöiden avulla:

$$BPFO = \frac{n_i f_r}{2}\left\{1 - \frac{d}{D}\cos(\emptyset)\right\} \tag{32}$$

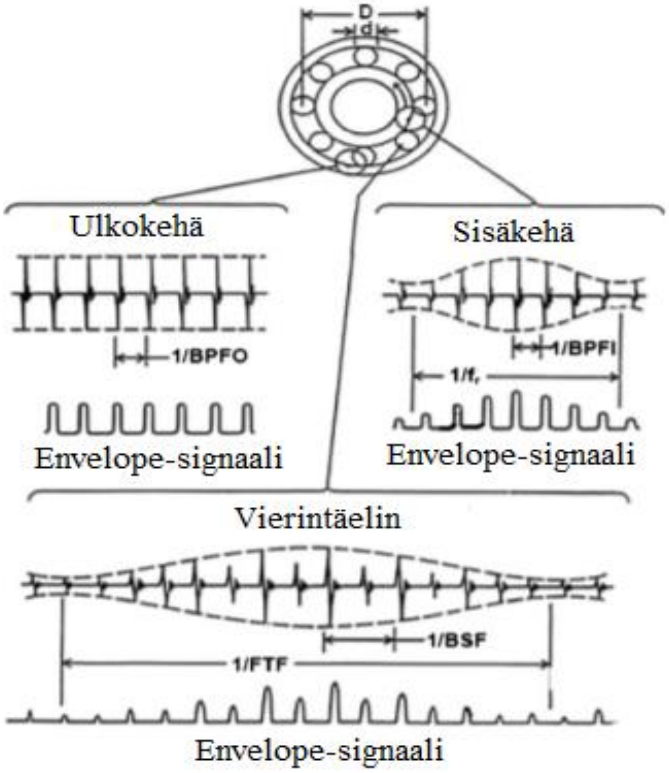
$$BPFI = \frac{n_i f_r}{2}\left\{1 + \frac{d}{D}\cos(\emptyset)\right\} \tag{33}$$

$$FTF = \frac{f_r}{2}\left\{1 - \frac{d}{D}\cos(\emptyset)\right\} \tag{34}$$

$$BSF = \frac{D}{2d}\left\{1 - \left(\frac{d}{D}\cos(\emptyset)\right)^2\right\} \tag{35}$$

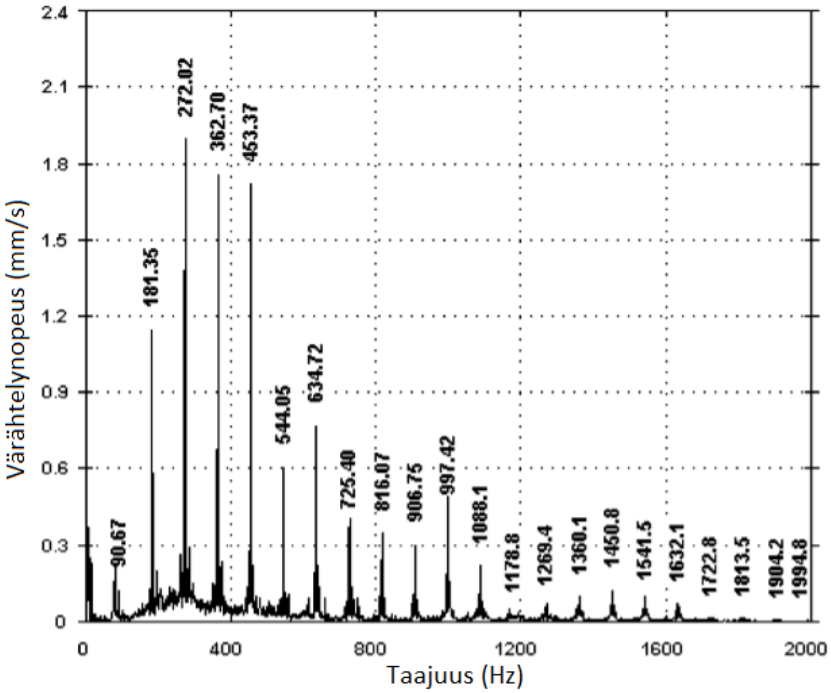
Yhtälössä 32 BPFO (Ball Pass Frequency of Outer) tarkoittaa ulkokehän vikataajuutta, yhtälössä 33 BPFI (Ball Pass Frequency of Inner) sisäkehän vikataajuutta, yhtälössä 34 FTF (Fundamental Train Frequency) pidikkeen ohitustaajuutta ja yhtälössä 35 BSF (Ball Spin Frequency) vierintäelimen vikataajuutta. Muuttuja f_r tarkoittaa akselin nopeutta, n_i vierintäelimien lukumäärää ja $\emptyset$ säteittäistä kuormaa. D tarkoittaa laakerin halkaisijaa ja d vierintäelimen halkaisijaa. (Randall & Antoni 2011, s. 486-487.)

Kuvassa 13 on esitetty vierintälaakerin vikataajuuksien esiintymispaikat. Kuvasta on helposti havaittavissa tietyllä vikataajuudella esiintyvän laakerivaurion signaalin muoto.



Kuva 13. Laakerin mahdolliset vikataajuudet ja niiden signaalimuodot (muokattu Randall & Antoni 2011, s. 487).

Kuvassa 14 on esitetty nopeusmittauksella puhaltimen viallinen laakeri. Nähtävissä on laakerin SKF NU 224 ulkokehän vikataajuus 90,67 Hz ja sen monikerrat. Monikerrat syntyvät pyörimistaajuuden välein taajuusspektriin. (Orhan & Aktürk & Celik 2005, s. 296.)



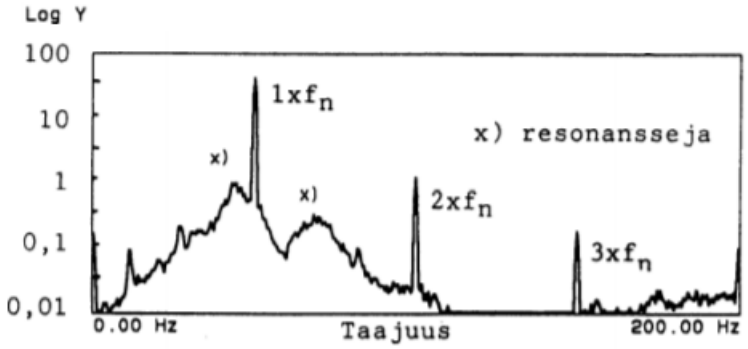
Kuva 14. Laakerivika ja sen monikerrat spektrissä (Orhan & Aktürk & Celik 2005, s. 295).

Akseleiden linjausvirheet voivat johtua asennusvirheestä tai lämpölaajenemisesta. Linjausvirhe voi aiheuttaa vakavia laiterikkoja välillisesti. Tyypillisesti linjausvirheet nähdään pyörimistaajuuden 1n, 2n ja 3n monikerralla ja linjausvirheen aiheuttama värähtely havaitaan tehokkaimmin akselin suuntaisella mittauksella. (PSK 5707 2011, s. 11-12.)

Pumppujen, puhaltimien ja kompressoreiden värähtelyanalyysissa on huomioitava niiden mekaaniset ominaisuudet. Lapataajuudella esiintyvät värähtelyt ja niiden monikerrat eivät aina merkitse vikaa, vaan niiden kehittymistä on seurattava tarkemmin. Jos lapataajuus ja sen monikerrat voimistuvat, voivat pumput, puhaltimet tai kompressorit oireilla esimerkiksi roottorin epäkeskeisyydestä. Virtauksista johtuvat vikataajuudet voidaan havaita matalilla taajuuksilla (< 50 Hz). (PSK 5707 2011, s. 21.)

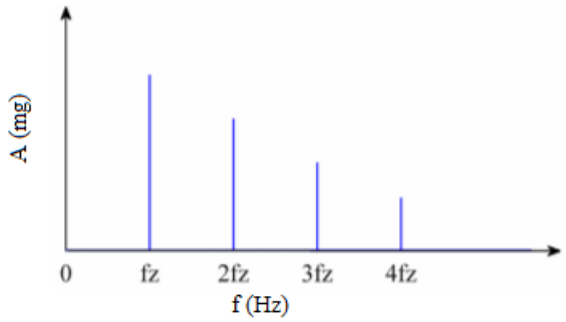
Resonanssivärähtelyt esiintyvät usein vakiopyörimisnopeuden taajuusspektrissä, jossa on käytetty logaritmista amplitudiasteikkoa. Pienet värähtelyt, kuten laitteen resonointi, on nähtävissä logaritmisen amplitudiasteikon avulla. Resonanssivärähtelyä syntyy taajuusspektriin laitteen ominaistaajuuden kohdalle usein spektrin korkeimpana

amplitudina kuvan 15 mukaisesti. Kuvassa f_n tarkoittaa laitteen pyörimistaajuutta ja 1*x*, 2*x* sekä 3*x* tarkoittavat pyörimistaajuuden monikertoja. Laitteen pyörimisnopeudesta syntyvän värähtelyn vaihekulmaa seuraamalla saadaan selvitettyä resonanssitaajuudet, kun sen ohi siirrytään nopeasti. Laitetta suunniteltaessa on ensisijaisen tärkeää, että käytettävien pyörimisnopeuksien tai pyörimistaajuuden toisen monikerran läheisyydessä ei vallitse mikään laitteen resonanssitaajuuksista. (PSK 5708 2018, s. 3-9.) Laitteen ominaistaajuuksia voidaan muuttaa jos havaitaan resonointia. Laitteiston massaa lisäämällä voidaan ominaistaajuuksia laskea ja lisäämällä laitteiston jäykkyyttä saadaan ominaistaajuuksia nostettua (Nohynek & Lumme 1996, s. 124).



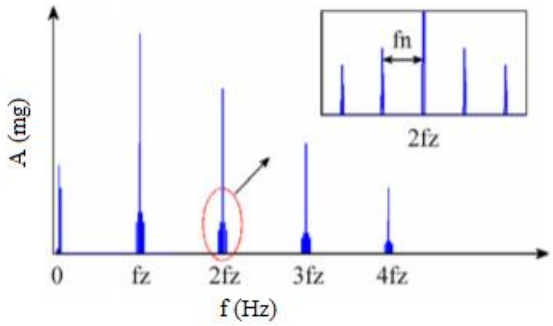
Kuva 15. Resonanssin esiintyminen logaritmisella amplitudiasteikolla (PSK 5708 2018, s. 9).

Vaihdelaatikoiden värähtelymittauksissa on huomioitava hammaspyörien ryntötaajuudet. Ryntötaajuuksien avulla taajuusspektristä voidaan havaita ongelmat hammaskosketuksissa. Ryntötaajuuden amplitudit kasvavat kuormituksen myötä, joten piikkien voimistuminen ei aina kuvaa mahdollista vikaa. Kun ryntötaajuuden ympärille kasvaa sivunauhoja hammaspyörän pyörimistaajuuden välein, on kyse hampaiden kulumisesta. (PSK 5707 2011, s. 23-24.) Kuvasta 16 on nähtävissä hyväkuntoinen vaihdelaatikko ja siitä syntyvät ryntötaajuudet f_z. Kuvan tapauksessa on kuitenkin oletettava, että kyseisen vaihdelaatikon pyörimisnopeuden muutokset korreloivat vallitseviin ryntötaajuuksiin ja niiden suuruuksiin. Y-akselilla on esitetty värähtelykiihtyvyys A (mg) ja x-akselilla taajuus *f* (Hz).



Kuva 16. Hyväkuntoisessa vaihdelaatikossa syntyvät ryntötaajuudet (muokattu Yongzhuo & Kang & Guolin & Xintao 2018, s. 454).

Kuvassa 17 on esitetty vaihdelaatikon tasaisesti alkanut vikaantuminen. Siitä huomataan pyörimistaajuuden f_n välein syntyviä sivunauhoja ryntötaajuuksien 1*fz*, 2*fz*, 3*fz* ja 4*fz* ympärillä. Tasaisen korkeat ja pyörimisnopeuden mukaan vaihtelevat ryntötaajuuksien piikit ilman sivunauhoja kertovat vaihdelaatikon olevan terve. Y-akselilla on esitetty värähtelykiihtyvyys A (mg) ja x-akselilla taajuus *f* (Hz).



Kuva 17. Vaihdelaatikon tasaisesti alkanut vikaantuminen (muokattu Yongzhuo & Kang & Guolin & Xintao 2018, s. 454).

Ryntötaajuus f_z voidaan matemaattisesti esittää hammaspyörän hampaiden lukumäärän ja pyörimisnopeuden tulona seuraavalla tavalla:

$$f_z = f_n \, N_i \tag{36}$$

Yhtälössä 36 muuttuja f_n tarkoittaa pyörimistaajuutta ja muuttuja N_i hammasvaihteen hampaiden lukumäärää (Pattabiraman & Srinivasan & Malarmohan 2015, s. 3). Koneiden kuntoa analysoitaessa on tiedettävä pyörimisnopeudet ja vaihteistoissa hammaspyörien välityssuhteet. Hammasvaihteen välityssuhde μ on laskettavissa seuraavasti:

$$\mu = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{37}$$

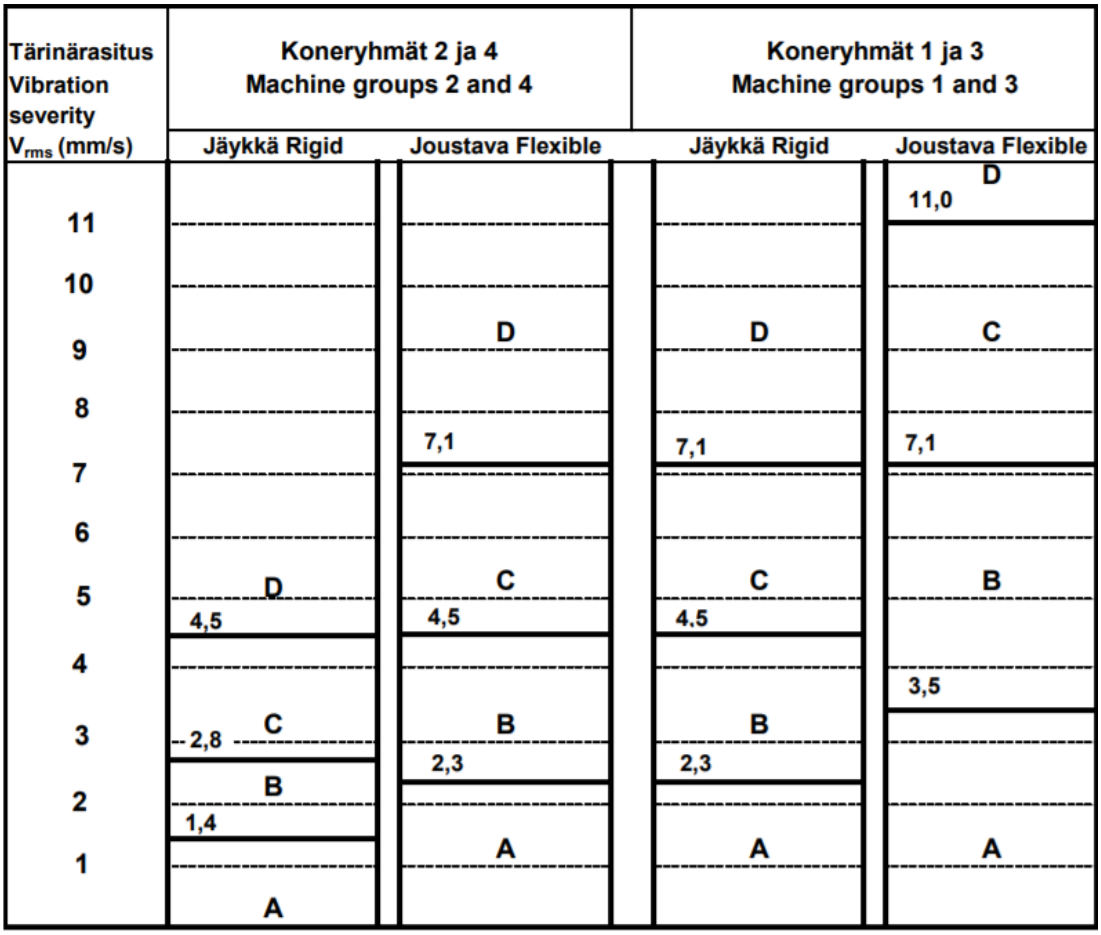
Siinä Z_1 ja Z_2 tarkoittavat hammasvaihteen hammaspyörien hampaiden lukumääriä. (Airila 1995, s. 491.)

Taulukossa 2 on esitetty koneryhmittäin sallitut tärinärajat sekä alueet, kun vika alkaa kehittyä vaurioksi. Alueella A uusi kone on testattu ja todettu toimivaksi, joten tärinärasitusalue uudelle koneella jää merkittyyn 1,4 mm/s. Kun uutta konetta on käytetty määrätty aika ja takuuaika umpeutunut, on tärinärasitusalue B vallitseva. Alueen B ylärajaa voidaan pitää hälytysrajana alkavalle vialle. Kuitenkin takuuaikana sallittu muutos tärinärasituksissa on alueen B ylärajasta 25 %. Näin ollen hälytysalueella C on vikaantuminen mahdollisesti jo merkittävää. Alue D käsittää vaurioaluetta, jolloin vaurio on hyvin todennäköinen tai jo syntynyt.

Taulukossa 3 koneryhmät on jaoteltu ryhmiin 1, 2, 3 ja 4. Ryhmästä 1 löytyvät koneet, joiden nimellisteho on korkeampi kuin 300 kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on 315 mm tai suurempi. Ryhmästä 2 löytyvät koneet, joiden nimellisteho on maksimissaan 300 kW sekä sähkökoneet, joiden akselikorkeus vaihtelu on 160 mm ja 315 mm. Ryhmä 3 sisältää pumppuja, puhaltimia sekä kompressoreita, joiden nimellisteho on alle 15 kW. Tämän ryhmän koneilla on erillinen akseli moottorin kanssa. Viimeisenä oleva ryhmä 4 sisältää myös pumppuja, puhaltimia sekä kompressoreita, joiden nimellisteho on suurempi kuin 15 kW. Tämän ryhmän koneilla akseli on yhteinen käyttävän moottorin kanssa.

Koneryhmät ovat standardissa jaoteltu myös jäykkiin ja joustaviin. Mittaussuunnassa alustan voidaan olettaa olevan jäykkä, jos sen alin ominaistaajuus on vähintään 25 % suurempi kuin laitteen tai koneen pyörimistaajuus. Muussa tapauksessa alustan voidaan olettaa olevan joustava. (PSK 5704 2013, s. 4-5.)

Taulukko 3. Koneryhmät ja tärinärasitusrajat (PSK 5704 2013, s. 5).



Aktiivisen seurannan menetelmä

Aktiivinen kunnonseuranta ja teollinen internet ovat tulevaisuutta. Sen uskotaan muuttavan rajusti perinteistä kilpailua ja synnyttävän uusia, entistä kilpailukykyisempiä yrityksiä. Tuottavuuden sekä liiketoimintamallien uskotaan muuttuvan todella merkittävästi älykkäiden, keskenään kommunikoivien järjestelmien myötä. On siis tiedossa, että kunnossapito tulee muuttumaan tulevaisuudessa digitaaliseen muotoon ja laitteet toimivat entistä itsenäisemmin etäseurannan avulla. Tästä syystä on tärkeää olla kehityksessä mukana jo hyvissä ajoin, kun kunnossapidosta voidaan tehdä kilpailukykyä edistävä malli. (Kortelainen & Hanski & Uusitalo 2016.)

Oppivat ja älykkäät järjestelmät tarjoavat etuja kunnossapitoon. Tällaisia edun luojia ovat muun muassa neuroverkot kunnossapidon kunnonvalvonnassa sekä valtavien datamassojen Big Data. (Hakonen 2014.) Dataa saadaan tänä päivänä runsaita määriä ja sitä halutaan eri lähteistä, esimerkiksi ostotapahtumista, sosiaalisesta mediasta, erilaisista antureista,

teollisuuden laitteista, älypuhelimien erilaisista sovelluksista ja toiminnoista sekä lukemattomista muista lähteistä (Hämäläinen 2017). Datan arvo on korkea ja sitä saadaan myös sellaisista paikoista, joita ei aina voida ennakoida. Tästä syystä sitä ei ole aikaisemmin pystytty hyödyntämään tehokkaiden datankäsittelyohjelmistojen puuttumisen vuoksi.

Erilaisten ohjelmistojen avulla näitä runsaita datamassoja voidaan kerätä ja analysoida. Tällaisia ohjelmistoja ovat esimerkiksi Tableau sekä Alteryx. (Solutive 2018.) Datan analysoinnilla tarkoitetaan esimerkiksi oppivia järjestelmiä, joita opettamalla vikahistorian ja päivittäisen toiminnan avulla saadaan järjestelmä toimimaan lopulta itseohjautuvasti. Järjestelmä itse optimoi oman toimintansa ja sen tuloksena voidaan esimerkiksi havaita tuotannon volyymin kasvu. (Mylly 2018.) Tämä kaikki on havaittavissa kuvasta 18. Älykkääseen kunnonvalvontaan ei kuitenkaan voida aivan sokeasti luottaa. Pahimmassa tapauksessa koneen älykkyys johtaa laitteen perusvaatimusten laiminlyönteihin, kun ajatellaan koneen itse hoitavan kaiken tarpeellisen (Mäki 2016). Jos mittauksia suoritetaan ulkopuolisen toimesta, on muistettava bisneskriittisen tiedon leviäminen. Esimerkiksi linjojen pyörimisnopeuksista on mahdollista saada tietoa, jotka kilpailijan näkökulmasta voivat olla merkityksellisiä. Tällaista tietoa on esimerkiksi linjojen käyttövarmuus.

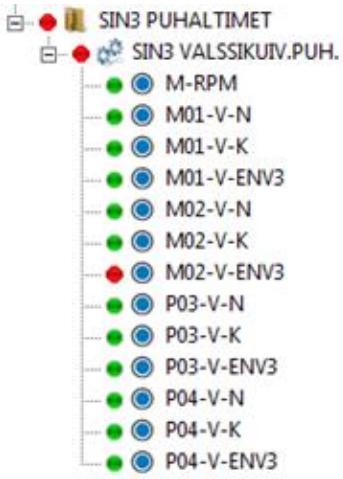
Kuva 18. Big Data ja sen mahdollisuudet (btelligent 2018).

Caverionin lanseeraama IoTFlex-järjestelmä mittaa älykkäiden antureiden avulla laitteiden ja koneiden todellista kuntoa ja ennustaa mahdolliset vikaantumiset hyvissä ajoin, jolloin reagointiaikaa on jäljellä vielä runsaasti. Analytiikan avulla tuotantolinjoissa esiintyvät häiriöt voidaan havaita koneen ajotavasta jo ensimerkeistä lähtien. Näin voidaan tuotantotehokkuutta parantaa turhien suunnittelemattomien seisakkien vähenemisen myötä. (Caverion 2018b.) Caverionin järjestelmä pitää sisällään analysointipalvelun, jolloin loppukäyttäjälle ei jää mahdollisuutta kuin visuaalisesti tarkastella tuloksia. Tällöin aktiivinen seuranta on mahdollista myös ulkoistaa.

Ennustavan kunnossapidon työkalujen vertailu

SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla on aikaisemmin käytetty SKF:n Migroloc analyzer-värähtelymittaria, joka on sellaisenaan todettu toimivaksi. Laitteen käyttö perustuu kokemukseen ja korkeaan koulutustasoon. Rajallisten resurssien vuoksi värähtelymittaus on tapahtunut yhden henkilön toimesta tähän asti Hämeenlinnan tehtaalla, mutta koska tietotaidon rajaaminen yhteen henkilöön on riskialtista, on koulutusta tämän diplomityön myötä laajennettu insinööritasolle.

Laite ei toimi itsenäisesti, vaan tarvitsee tietokoneen ja analysointiohjelman mittauspolun luomista ja mittaustulosten tarkastelua varten. Mittaustapahtuma aloitetaan reitin suunnittelulla ja luomisella tietokoneen analysointiohjelman avulla. Reitti tarkoittaa koneiden sarjaa, joita on tarkoitus mitata. Reitin luomisen jälkeen luodaan reittiin sisältyville koneille mittauspisteet, jonka jälkeen ne siirretään tietokoneelta mittalaitteelle liitäntäjohtoa pitkin. Langatonta tiedonsiirtoa laitteisto ei tue. Luotu reitti on esitetty kuvassa 19. Siinä reittiin on liitetty vain yksi mitattava kone ja sen mittauspisteet. Reitin mitattava kone on merkitty tietokantaan hammaspyörällä. Sininen ympyrä tarkoittaa mittauspistettä ja kantaa luetaan ylhäältä alaspäin. Ensimmäinen mittauspiste M01-V-N tarkoittaa moottorin vapaan eli N-pään laakeria, joka on mitattu vaakatasossa nopeusmittauksena. M-RPM tarkoittaa pyörivän laitteiston pyörimisnopeutta mittaushetkellä.



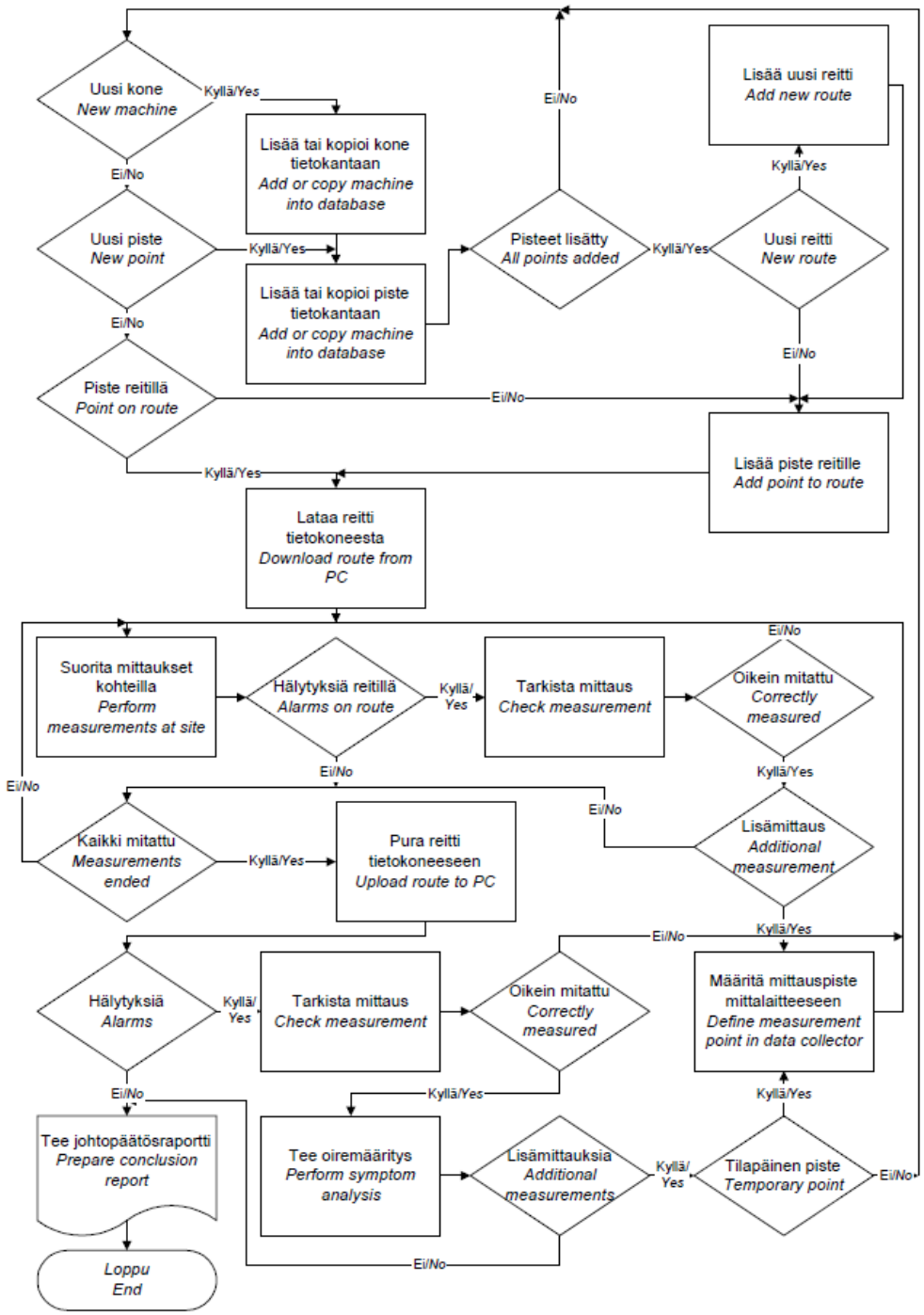
Kuva 19. Migrolocin analysointiohjelmaan luotu mittauspolku.

Mittaus tapahtuu ennalta luotua mittauspolkua pitkin laitekokonaisuudessa ulkoista mittausanturia hyväksi käyttäen kuvan 20 mukaisesti. Mittauksen jälkeen on palattava analysointiohjelman luokse siirtämään mittaustulokset mittalaitteelta analysointiohjelmaan. Pelkästään analysointiohjelman käyttö vaatii useiden tuntien koulutusta ja itse analysoiminen jopa vuosien kokemusta. Kokemuksen ja koulutuksen myötä Migroloc on tehokas ja tarkka työväline ennustavan kunnossapidon käytössä.

Kuva 20. Kiihtyvyysanturin tukeva kiinnitys mittauspaikassa.

Kuvassa 21 on nähtävissä kenttämittaustapahtuman kulku. Kuvaa luetaan ylhäältä alaspäin nuolien osoittamiin suuntiin, kun kysymyslaatikoiden kysymyksiin on vastattu oikeaksi

oletetulla tavalla. Aloitus tapahtuu kuvan vasemman ylälaidan kysymyslaatikosta, jossa vastataan kysymykseen koneen kunnosta ja uutuudesta. Mikäli kone on uusi, vastataan myöntävästi ja siirrytään vastauksen mukaista nuolta pitkin kohti seuraavaa kysymyslaatikkoa koskien koneen lisäämistä tietokantaan. Näin jatketaan eteenpäin, kunnes päästään kuvan vasempaan alanurkkaan tekemään johtopäätösraportti ja sen jälkeen lopettamaan kierto. Tätä kiertoa voidaan joutua tekemään useita kertoja, mikäli tilanne kentällä on sen mukainen ja mittaus esimerkiksi epäonnistuu syystä tai toisesta. Kun tätä kaaviota on noudatettu mittausta tehdessä, voidaan varmistua siitä, että mittauspisteet ovat oikein määritelty sekä merkitty ja että mittaus on suoritettu standardien mukaisesti.



Kuva 21. Mittaustoiminta kannettavalla mittalaitteella (PSK 5705 2006, s. 15).

Käsin suoritettavan ennustavan kunnossapidon etuna on sen edullisuus kun mittaavalla henkilöllä on useamman vuoden kokemus. Silloin täysin aktiivinen kunnonvalvonta ei kuitenkaan ole mahdollista. Tarkastuskierros tehdään tietyin väliajoin ja kriittisten

koneiden kuntoa seurataan näiden tarkastusten välissä mittauksiin perustuvan kuntokehityksen avulla. Verrattaessa käsin suoritettavaa ja antureilla reaaliajassa mitattavaa älykästä kunnonseurantaa toisiinsa, on tulevaisuudessa älykkäiden ohjelmistojen valta väistämätöntä. Kun tietoa saadaan kiinteiltä antureilta kaiken aikaa ja niiden seuranta on ulkoistettu koulutetuille organisaatioille, ei vakinaistetulla käsin mittauksella ole mahdollisuuksia kilpailussa. (Kortelainen & Hanski & Uusitalo 2016.) Älykäs kunnonseuranta vaatii enemmän resursseja käsin suoritettavaan mittaukseen verrattaessa, mutta tuottavan kunnossapidon avulla takaisinmaksuaika on lyhyt, kun tuottavuutta voidaan parantaa merkittävästi (Skyttä 2016).

3 TULOKSET

3.1 Kriittisten kohteiden valinta

SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla on useita erilaisia puhaltimia, pumppuja, vaihdelaatikoita ja teloja, jotka vaikuttavat suuresti linjojen toimintaan. Tähän diplomityöhön valittu yksi (1) kriittinen laitekokonaisuus määriteltiin tehtaan kunnossapidon asiantuntijoiden kanssa järjestetyssä palaverissa. Kriittisyysanalyysin jälkeen valittu laitekokonaisuus on sekä tuotannollisesti tärkeässä asemassa että häiriöherkkyydeltään kohtalainen.

Tähän työhön kriittiseksi laitekokonaisuudeksi aktiivisen seurannan testaamista varten valikoitiin Sinkityslinja 3:n S-tela 8.2:n teollisuuskulmavaihde. Kulmavaihdetta käyttävä päävaihde on aiheuttanut suuria tuotantotappioita tehtaan historiassa, joten kriittisyysanalyysin perusteella kulmavaihde oli tietoinen valinta. Kulmavaihteen raskaasta koteloinnista johtuen mittaava kunnonseuranta on tehokas tapa seurata laitteen kunnon kehitystä. Varaosia ei suoraan ole saatavilla, vaan rikkoutuneet osat on koneistettava ulkopuolisella ja toimitusajat voivat tästä syystä olla useita viikkoja.

Vaihde on suunniteltu 5 kNm momentille, johtuen linjassa ajettavista raskaista teräslaaduista. Kun kohteeseen asennetaan aktiivisen kunnonseurannan järjestelmä, voidaan kuntoa seurata vaivattomasti ja tehokkaasti etäältä. Kun toimintaa on testattu, laitteiston sen hetkiset lähtötasotiedot kerätty ja se on todettu hyväkuntoiseksi, voidaan seurannan harjoittamista laajentaa useisiin muihin ja vaativampiin kohteisiin. Teollisuuskulmavaihde on nähtävissä kuvassa 22. Ensiöakseli löytyy kuvan oikeasta reunasta.

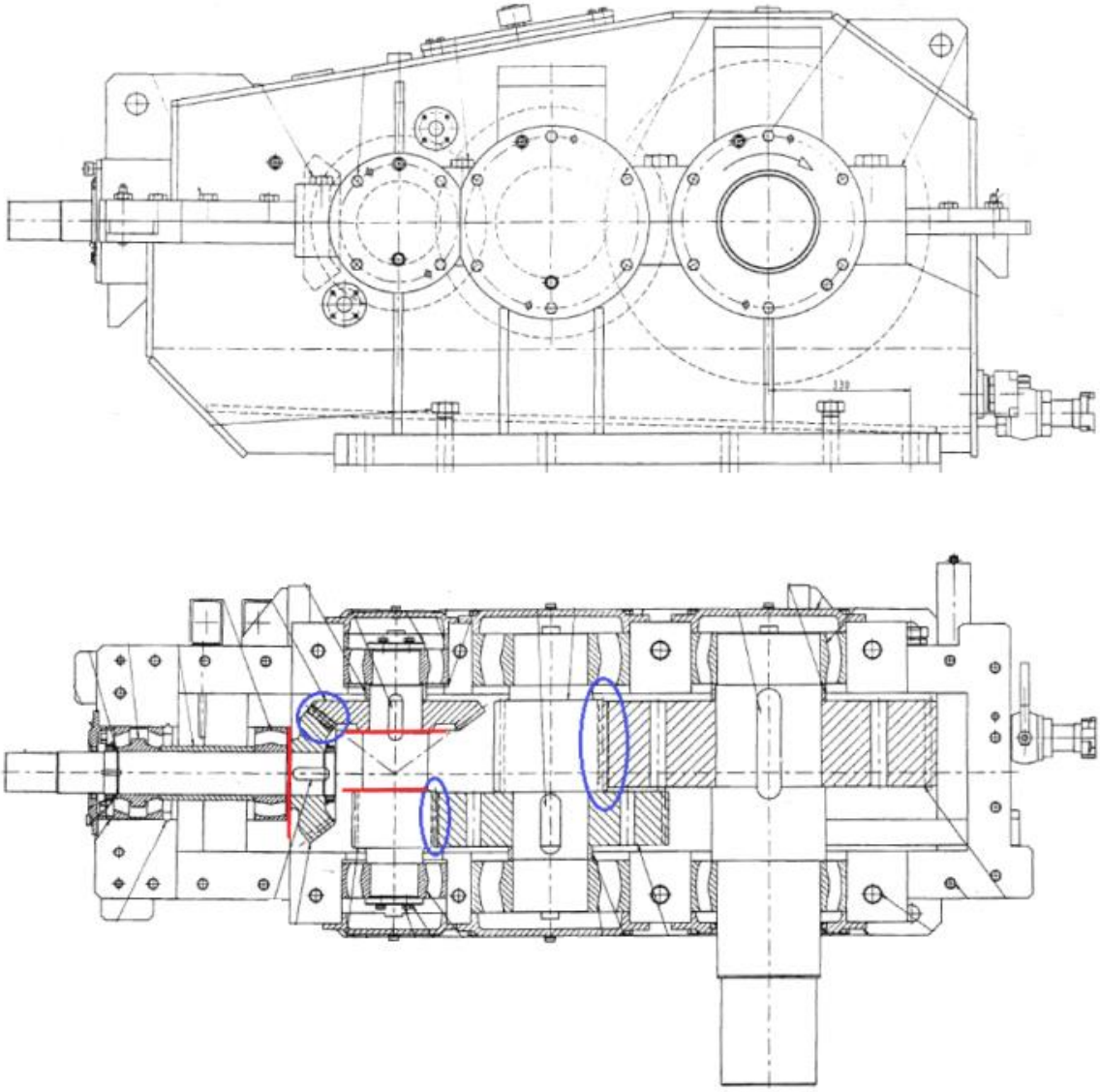
Kuva 22. Kriittiseksi laitekokonaisuudeksi valittu teollisuuskulmavaihde.

Taulukkoon 4 on tehty vauriomuotomatriisi kriittisestä teollisuuskulmavaihteesta, johon on asianmukaisesti sijoitettu vaihteen sisäiset osat ja kiertovoitelu. Vaihteen ensiöakseli ja 1.väliakseli ovat materiaalivahvuudeltaan selvästi toisioakselia sekä 2. väliakselia vähäisemmät, jonka takia ne oletetaan olevan kriittisemmässä asemassa. Kaikki osat omaavat merkittävän laadullisen potentiaalin. Minkä tahansa taulukkoon merkityn osan rikkoutuessa syntyy hyvin suurella todennäköisyydellä linjapysähdys. Aktiivisen värähtelymittauksen antureiden sijaintien suunnittelua varten käytettiin hyväksi kyseistä vauriomuotomatriisia.

Taulukko 4. Kriittisestä kohteesta muodostettu vauriomuotomatriisi.

Laadulliset	Epätodennä-köinen	Vähäinen	Keskimääräi nen	Suuri	Erittäin Suuri
Erittäin merkittävät	-2. väliakseli -Toisioakseli		-Vaihteen kiertovoitelu	-Ensiöakseli -1. väliakseli	
Korkeat	- Vaihdelaatikon laakeroinnit	-2. väliakselin hammaspyörät - Toisioakselin hammaspyörät	-Ensiöakselin hammaspyörät -1. välivaihteen hammaspyörät		
Keskimääräiset		-Akseleiden linjausongelmat			
Alhaiset					
Merkitykset tömät					

Kuvassa 23 on esitetty kokoonpanokuva kriittisestä kohteesta. Kuvaan on merkitty punaisilla viivoilla ja sinisillä ympyröillä vaihteen vikatilanteessa yleisimmin rikkoutuvat osat. Punaiset viivat tarkoittavat akseleiden katkeamista välittömästi hammaspyörän kiinnityskohdan jälkeen kuormituksen kasvaessa yli sallittujen arvojen ja siniset ympyrät merkitsevät hammaspyörien vikaantumista esimerkiksi voitelun pettämisestä johtuen. Akselikatkoihin on merkitty vain ensiöakseli ja 1.väliakseli johtuen niiden selvästi ohuemmasta materiaalivahvuudesta verrattuna 2.väliakseliin ja toisioakseliin. Laakereiden vikaantumisia ei kuvaan merkitty olettaen niiden kriittisyyden olevan ennalta tiedossa.



Kuva 23. Kriittisen kulmavaihteen yleisimmin rikkoutuvat osat ja niiden sijainnit.

Taulukossa 5 on suoritettu kriittisyystarkastelu standardin PSK 5705 ja kentällä käytyjen keskustelujen avulla. Teollisuuskulmavaihde pisteytettiin taulukon mukaisesti ja sille saatiin kriittisyyden pisteiksi 436 / 652. Tässä tapauksessa pisteet ylittävät selvästi puolivälin ja laitetta voidaan muuten pitää kriittisenä linjan pysähtymisen vuoksi laitteen vikaantuessa, vaikkakin vertailudataa kriittisyysluokitteluista ei vielä SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla ole. Ympäristön siisteys sisällytettiin kriittisyysluokitteluun perustuen kentällä käytyihin keskusteluihin kunnossapidon ammattilaisten kanssa ja sille annettujen kertoimien kriteerit määräytyvät seuraavasti:

1. Vähäinen (1)
2. Kohtuulliset (2)
3. Korkeat (4)

Taulukko 5. Kriittisen kohteen valinta PSK 5705 standardin ja kenttäkeskustelujen avulla.

Tekijä	**Painoarvo**	**Kerroin**
Turvallisuusriskit	20	4
Ympäristöriskit	20	4
Kriittisyys tuotannolle	20	8
Laatu	10	4
Häiriöherkkyys	5	1
Kunnossapitotyön kustannukset	5	4
Kunnossapidon materiaalikustannukset	5	2
Jälleenhankinta-arvo	5	4
Elinkaarikustannus	5	2
Kunnonvalvontakustannus	5	1
Ympäristön siisteys	3	2
	Yhteistulos	436 / 652

3.2 Aktiivisen seurannan kartoitus SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla

Aktiivisella kunnonseurannalla voidaan vastata nykyisiin tuotantovaatimuksiin. Ennen työn aloittamista käytiin keskusteluja kunnossapitoinsinöörin ja kunnossapitopäällikön kanssa mekaanisen asentajan siirtämisestä vakinaisista tehtävistään ennakoivan kunnossapidon mittaajaksi. Värähtelymittauksen vaativuuden vuoksi oli huomioitava asentajan oma motivaatio aihetta kohtaan. Laaja koulutus ja ongelmakohtien omakohtainen soveltaminen vaatisivat aikaa ja omia resursseja, joten motivaatiota aiheeseen olisi löydyttävä. Mittaamiseen sidotun ja motivoituneen mittaajan avulla on mahdollista vakinaistaa mittauskäytännöt ja kunnonseurannan jatkumo tämän diplomityön jälkeen. Perehdytetty asentaja osaisi suorittaa värähtelymittauksia kentällä ja tulkita aktiivisen kunnonvalvonnan tuloksia niiden kehittyessä.

Aktiivisen värähtelymittauksen kartoitus

Aktiivisen ja kiinteän kunnonseurannan järjestelmistä käytiin keskusteluja ja suoritettiin testaus Caverionin IoTFlex-järjestelmän avulla. Kartoitusvaiheessa tärkeäksi aiheeksi muodostui värähtelymittaustulosten analysoinnin tukeminen tarpeen vaatiessa. Kuitenkin tiedetään, että värähtelymittausten alkaessa nollatasolta ei vielä omata laajaa analysointikokemusta tai käyttökelpoista vertailuhistoriaa värähtelyiden suhteen. Tärkeää on löytää tätä toimintaa tukeva organisaatio, jossa molemminpuolinen keskusteluyhteys toimii ja apua löytyy sitä pyydettäessä helposti ja nopeasti.

Käsin suoritettavat värähtelymittaukset

Käsin suoritettaviin värähtelymittauksiin mittalaitteeksi valikoitiin SKF:n Microlog Analyzer-mittalaite aiempien mittauskokemuksien perusteella. Micrologilla tullaan suorittamaan värähtelymittauksia pääsääntöisesti ennakkohuoltosuunnitelman mukaisesti laitteille, joiden kunto vaikuttaa oleellisesti linjan käyttövarmuuteen. Mittauksia voidaan tarpeen vaatiessa suorittaa myös laitteille, jotka eivät sisälly ennakkohuoltosuunnitelmaan.

SKF:n käsimittarin avulla on tehokasta seurata kohteita, joihin aktiivisen seurannan kiinteää järjestelmää ei kannata asentaa ja kohteita, joissa värähtelyiden lähtötiedot on jo aikaisemmin kerätty esimerkiksi kiinteällä mittausjärjestelmällä. Käsimittaukselle sopivia ovat kohteet ja laitekokonaisuudet, jotka ovat helposti mitattavissa ja yksinkertaisia. SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla olevat erilaiset laitteet eivät usein poikkea suuresti toisistaan, vaan esimerkiksi puhaltimet ja vaihdelaatikot ovat rakenteiltaan ja toiminnoiltaan hyvin samanlaisia. Näin ollen jo kerran SKF:n analysointiohjelmaan luotua mittausreittiä voidaan soveltaa tehokkaasti myös ennakkohuoltosuunnitelman ulkopuolisiin mittauksiin.

3.3 Valitut aktiivisen seurannan menetelmät ja käyttökohteet

Tätä työtä koskevat tulokset aktiivisen seurannan menetelmistä rajattiin koskemaan vain värähtelymittauksia, mutta tulevaisuudessa värähtelymittauksen tueksi on mahdollista lisätä erilaisia seurantamenetelmiä, kuten esimerkiksi öljyjärjestelmien partikkelimittauksia, joka on tehokas työväline mm. vaihdelaatikoiden kunnonseurantaan.

Käyttöön valitun aktiivisen värähtelyseurannan menetelmän avulla seurataan tulevaisuudessa kohteita, jotka vaikuttavat suoraan linjan käyttövarmuuteen. Nämä kohteet tullaan valitsemaan kriittisyysanalyysin, kenttäkeskustelujen ja vikahistorian pohjalta. Aluksi ennakkohuoltosuunnitelmaan ei voi sisällyttää kuin muutamia yksittäisiä kohteita, joita seurataan, johtuen vain yhdestä päätoimisesta mittaajasta. Kun toiminnasta on kerätty riittävästi kokemuksia ja mittaaja on esittänyt ammattitaitonsa kehittyneen, voidaan toimintaa laajentaa. Tämän diplomityön aikana kartoitettiin myös muita aktiivisen seurannan järjestelmien tarjoajia, mutta lopullista testausta varten tässä työssä päädyttiin Caverionin IoTFlex-järjestelmään.

3.4 Kunnonseurannan räätälöinti kriittisessä kohteessa

Tässä diplomityössä suoritettujen testien avulla todetaan kriittisen laitteiston kunto aktiivisen kiinteän järjestelmän avulla ennalta määrätyllä aikavälillä, jonka jälkeen kiinteä järjestelmä poistetaan linjasta ja kohteelle suoritetaan käsimittauksella säännöllisiä värähtelymittauksia määrätyllä mittausaikavälillä kunnon todentamista ja seurantaa varten. Näin on mahdollista aluksi kartoittaa suuri määrä tehtaalla kriittiseksi määriteltyjä laitekokonaisuuksia kohtuullisilla resursseilla, kun kiinteää mittausjärjestelmää voidaan siirtää laitteesta ja linjasta toiseen. Näin saadaan myös vahva pohjatyö suoritettua alkavalle värähtelymittaustoiminnalle. Kun lähtötasot ovat tarkasti mitattu ja analysointidataa säännöllisesti kerätty ja tallennettu kriittisistä kohteista, on laitekokonaisuuksien kunnon kokonaistasojen kehityksen seuranta yksinkertaisempaa ja tehokkaampaa.

Jos laitteessa havaitaan vikaantumista jo kiinteän mittauksen aikana, on perusteltua jatkaa kiinteää mittaamista suunniteltua pidempään vikaantuneen osan paikantamiseksi ja todentamiseksi. Jos paikallistettu vikaantunut osa on jo mittausaikana todettu vaihtokuntoiseksi, on huollon jälkeen tärkeää tehdä uusintamittaus laitekokonaisuuden korjaantuneen kunnon toteamiseksi.

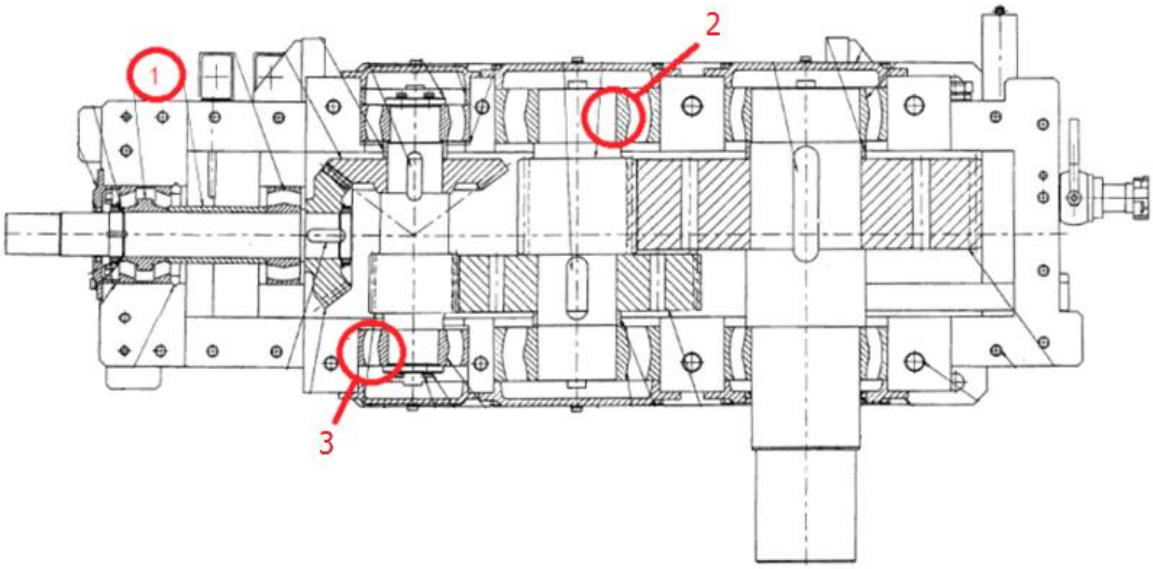
Käsimittausten suoritustaajuutta voidaan säädellä kohteen ja ennalta mitattujen lähtötietojen mukaan. Mittaustaajuus voi vaihdella viikoista kuukausiin kohteesta riippuen. Tähän työhön kriittiseksi kohteeksi valittu teollisuuskulmavaihde tullaan tulevaisuudessa mittaamaan kuukauden välein käsimittalaitteella ja tätä käsin mitattua dataa verrataan kiinteän mittauksen tuloksiin. Trendikäyrät kertovat tehokkaasti vaihdelaatikon kunnon

muutokset, kun dataa seurataan aktiivisesti. Käsin suoritettu säännöllinen mittaus ei kuitenkaan poista äkillisen vikaantumisen vaaraa ellei mittausta olla sattumalta suorittamassa juuri äkillisen vikaantumisen yhteydessä. Tällainen vika voi syntyä esimerkiksi puutteellisen voitelun tuomista ongelmista, kuten hammaspyörien ongelmat, jotka voivat kehittyä erittäin nopeasti. Käsin suoritetulla mittauksella voidaan pääsääntöisesti havaita normaalia tai ylikuormitustilanteista johtuvia ja rauhallisesti kehittyviä vikaantumista sekä niiden muutoksia. Tämä tieto itsessään on jo sen sijaan erittäin arvokasta tehtaan kunnonvalvonnan kannalta.

3.5 Aktiivisen kunnonvalvonnan demoaminen kentällä

Aktiivisen seurannan järjestelmää testattiin kahden ja puolen viikon ajan aikaisemmin kriittiseksi kohteeksi määritetyssä vaihdelaatikossa. Kannettava järjestelmä sisälsi nopeusanturin, kolme kiihtyvyysanturia, langattoman tiedonsiirron mahdollistava 3G-reitittimen sekä mittausyksikön. Tarkkuuden lisäämiseksi olisi kiihtyvyysantureiden lukumäärää ja mittaussuuntia lisättävä. Testausvaiheessa tulokset kuitenkin osoittautuivat riittävän tarkoiksi.

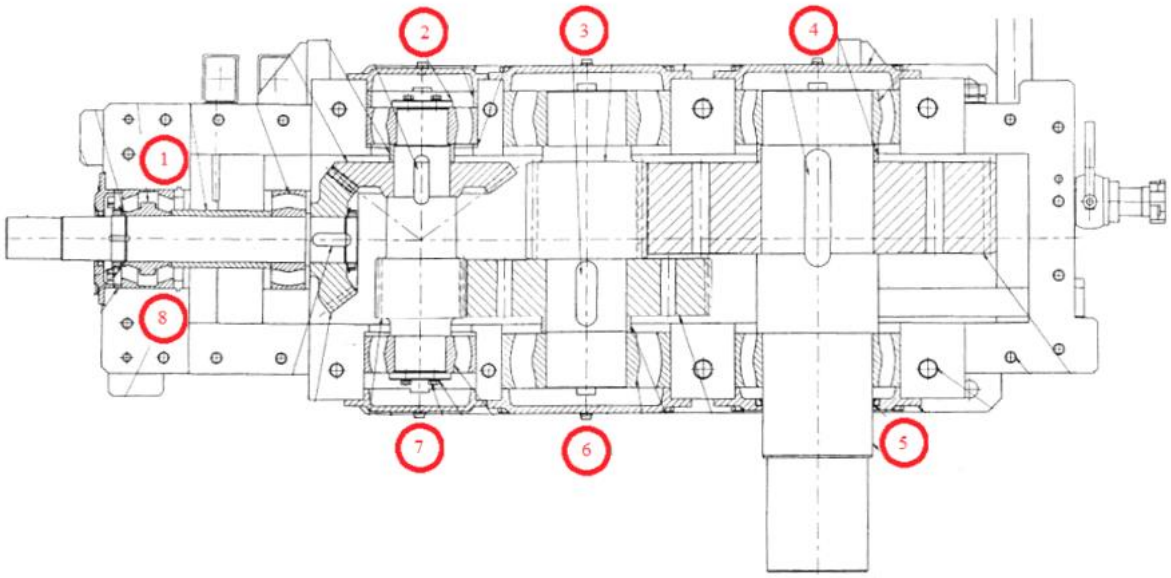
Kuvasta 24 on nähtävissä kriittiseksi valittu teollisuuskulmavaihde ja sen mittauspisteet aktiivisen järjestelmän mittauksissa. Kuvaan on merkitty kolme kiihtyvyysanturia, joilla varsinaiset värähtelyt mitattiin. Mittauksessa käytettiin nopeusanturia ensiöakselin pyörimisnopeuden mittaamiseen. Kuvaan on merkitty anturin nimi, mittauspaikka ja mittaussuunta. Kuvassa kohdasta 1 on mittaus suoritettu ensiöakselilta vaakasuuntaisena. Kohdasta 2 mittaus on suoritettu vaihteen toiselta portaalta hoitopuolen laakerilta pystysuuntaisena ja kohdasta 3 vaihteen kolmannelta portaalta käyttöpuolen laakerilta pystysuuntaisena.



Kuva 24. IoTFlex - mittauspisteet S-tela 8.2:n teollisuuskulmavaihteessa.

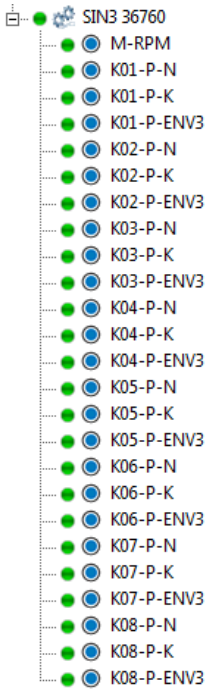
Aktiivisen järjestelmän lisäksi myös SKF:n käsimittalaitteella suoritettiin värähtelymittaus teollisuuskulmavaihteelle tämän tutkimuksen tavoitteiden mukaisesti ja sen tuloksia verrataan aktiivisella järjestelmällä saatuihin tuloksiin.

Kuvassa 25 on esitetty käsimittauksella suoritettavan värähtelymittauksen mittauspisteet teollisuuskulmavaihteessa. Mittauspisteiden lukumäärä on tässä tapauksessa suoraan verrannollinen laakereiden lukumäärään. Jokaisen laakerin kohdalta kiihtyvyysanturilla suoritetaan pystysuuntainen mittaus nopeutena (*mm/s*), kiihtyvyytenä (*mg*) sekä verhokäyränä (*gE*).



Kuva 25. Käsimittauksella suoritettavan värähtelymittauksen mittauspisteet.

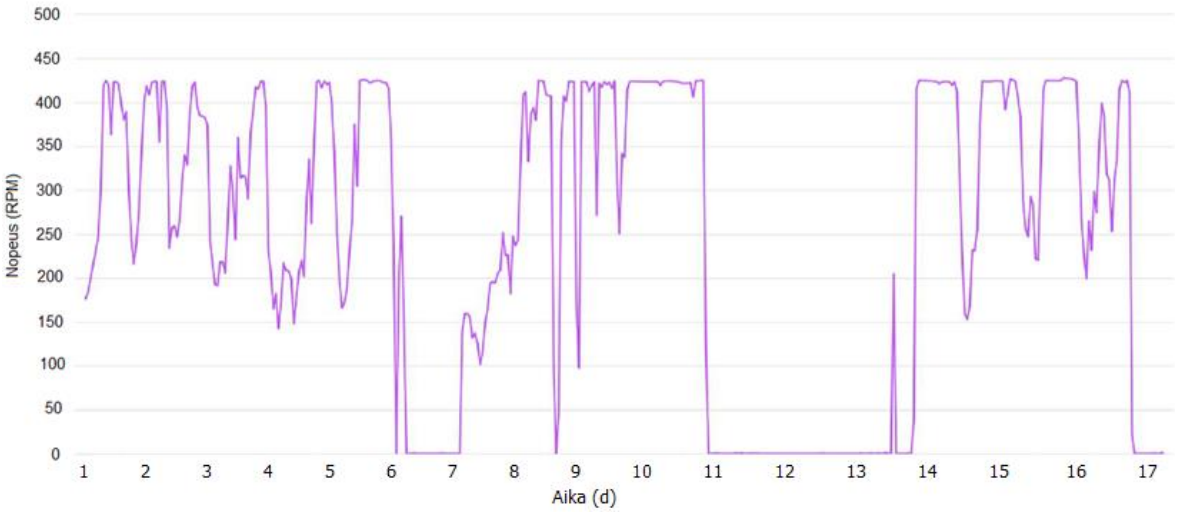
Kuvassa 26 on esitetty teollisuuskulmavaihteelle luodut mittapisteet käsin suoritettavia värähtelymittauksia varten. Mittaukset suoritetaan pystysuuntaisina ulkoisista turvasuojista johtuen, jotta kaikki mittapisteet voidaan mitata samalla tavalla. Mitattava kohde on nimetty hierarkiaan konenumeroin laitteiston tunnistamisen helpottamiseksi.



Kuva 26. Käsimittauksella suoritettavan mittausreitin mittapisteet.

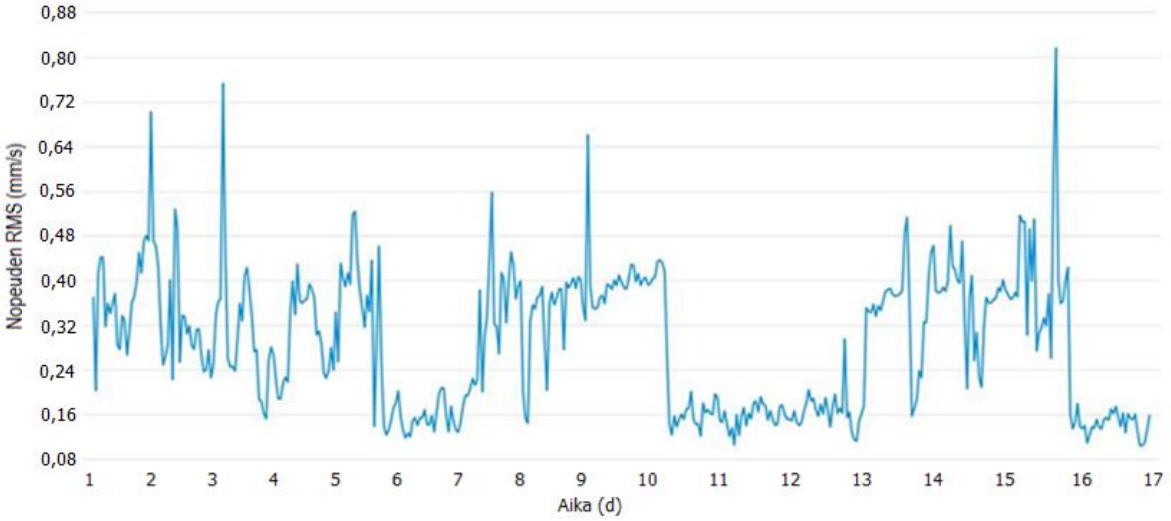
3.6 Kerättävän datan analysointi

Kuvasta 27 on nähtävissä nopeuden muutokset kiinteän järjestelmän mittausaikavälillä. Mitattava vaihdelaatikko sijaitsee Sinkityslinja 3:sen venytysoikaisukoneen yhteydessä. Nopeudet muuttuvat aika ajoin rajusti johtuen linjassa ajettavasta materiaalista, sen lujuudesta ja paksuudesta. Nopeus on mitattu aikatasossa teollisuuskulmavaihteeseen päävaihteelta tulevalta ensiöakselilta nopeusanturilla. Venytysoikaisukoneella säädellään ja viimeistellään teräsnauhan profiilia ennen sen pinnan jälkikäsittelytoimenpiteitä.



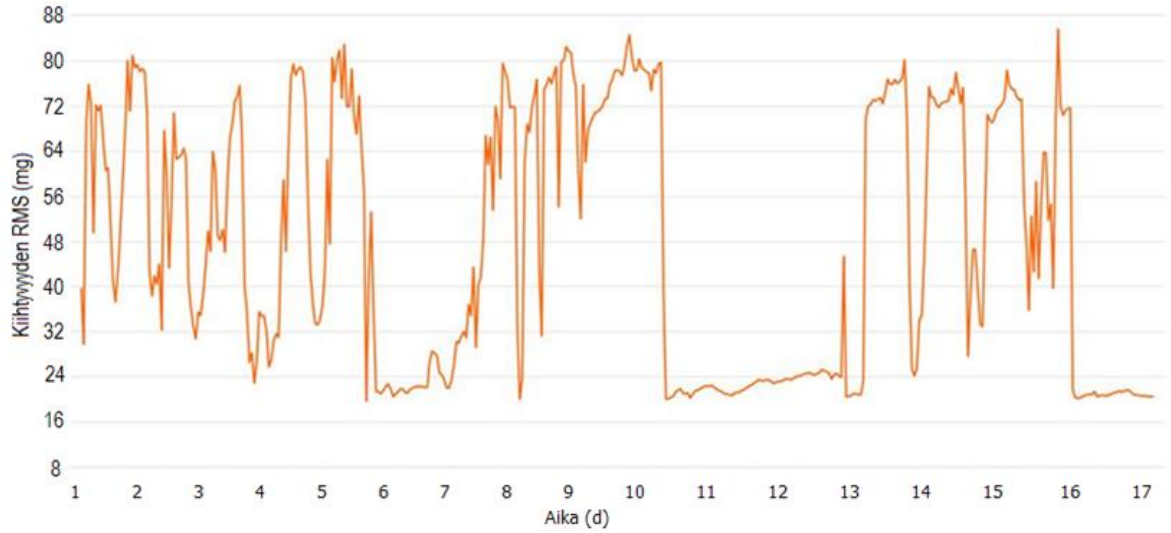
Kuva 27. Teollisuuskulmavaihteen nopeuden muutokset testausaikavälillä.

Kuvasta 28 on nähtävissä värähtelynopeuden trendi mittausaikavälillä. Mitattu suure on värähtelynopeuden kokonaistason RMS (anturi port 3). Värähtelynopeuden tehollisarvot ovat mitattu taajuusväliltä 2 - 1000 Hz. Mittauksessa havaittiin, että värähtelyt ovat matalalla tasolla ja ne seuraavat selvästi pyörimisnopeuden muutoksia. Suurimmat värähtelynopeuden arvot saatiin ensiöakselin laakeroinnilta kiihtyvyysanturilla Port 3 0,82 mm/s.



Kuva 28. Värähtelynopeuden tehollisarvot aikatasossa.

Kuvasta 29 on nähtävissä värähtelykiihtyvyyden trendi mittausaikavälillä. Kuvassa mitattu suure on kiihtyvyyden kokonaistason RMS (anturi port 3). Myös kiihtyvyyden kokonaistasoja mitattaessa huomattiin värähtelyiden seuraavan pyörimisnopeuden muutoksia. Nyt taajuusalueena mittauksissa käytettiin 2 – 5000 Hz.



Kuva 29. Värähtelyiden kiihtyvyyden tehollisarvot aikatasossa.

Taulukossa 6 on esitetty teollisuuskulmavaihteen välitystietoja kiinteän aktiivisen mittauksen värähtelyanalyysiä varten. Välityssuhteet on tunnettava ennen mittauksen aloittamista, jotta tuloksia voidaan tarkastella luotettavasti.

Taulukko 6. Teollisuuskulmavaihteen välitystietoja pyörimisnopeudella 312 RPM.

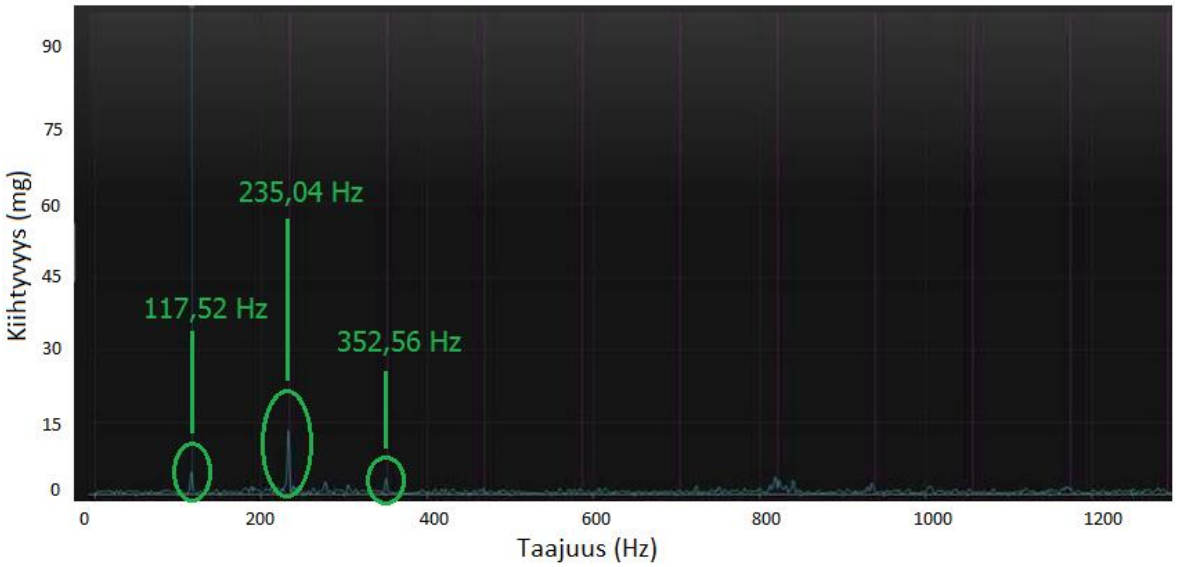
Akseli	Hampaiden lukumäärä	Pyörimisnopeus (RPM)	Pyörimistaajuus (Hz)	Välityssuhde	Ryntötaajuus (Hz)
Ensiöakseli	26	312,00	5,20	-	-
1.vaihde	34 ja 30	238,80	3,98	0,764	135,20
2.vaihde	86 ja 23	83,40	1,39	0,348	119,40
Toisioakseli	75	25,80	0,43	0,306	31,97

Taulukossa 7 on esitetty teollisuuskulmavaihteessa olevat laakerityypit ja niiden vikataajuudet. Vikataajuudet voidaan laskea analyyttisesti kappaleessa 2 esitetyllä tavalla tai ne on myös mahdollista saada laakerivalmistajien tuottamien eri sovellusten avulla helposti selville. Laakerityypit muuttuvat akselin halkaisijan kanssa samassa suhteessa.

Taulukko 7. Teollisuuskulmavaihteen laakerityypit ja niiden vikataajuudet pyörimisnopeudella 312 RPM.

Laakerityyppi	Pidike (Hz)	Sisäkehä (Hz)	Ulkokehä (Hz)	Vierintäelin (Hz)	Pyörimistaajuus (Hz)
SKF 31320XJ2/DF	2,13	48,78	34,42	12,79	5,20
SKF 22320	1,98	22,72	13,68	9,78	5,20
SKF 22322	1,63	32,73	24,53	10,62	3,98
SKF 22334	0,57	12,22	8,59	3,76	1,39
SKF 24048	0,19	6,07	4,99	0,43	0,43

Kuvasta 30 on nähtävissä nopeuden taajuusspektri pyörimisnopeuden ollessa 271 RPM. Siinä hallitsevana taajuutena vallitsee ensimmäisen portaan ryntötaajuus 117,52 Hz ja sen monikerrat. Muiden hammaspyörien väliset ryntötaajuudet ei synnytä piikkejä taajuusspektriin. Jos vallitsevan taajuuden piikin ympärille tulevaisuudessa muodostuisi piikit pyörimistaajuuden välein, olisi se merkki mahdollisesta hammasvälitysviasta (PSK 5707 2011, s. 23). Tällaisessa tapauksessa esimerkiksi teollisuuskulmavaihteen voitelu olisi syytä tarkastaa. Taulukon 7 mukaisia laakereiden vikataajuuksia ei taajuusspektrin piikkien kohdilla havaita.



Kuva 30. Väliakseleiden välistä pystysuuntaan mitattu kiihtyvyysspektri kiinteällä järjestelmällä.

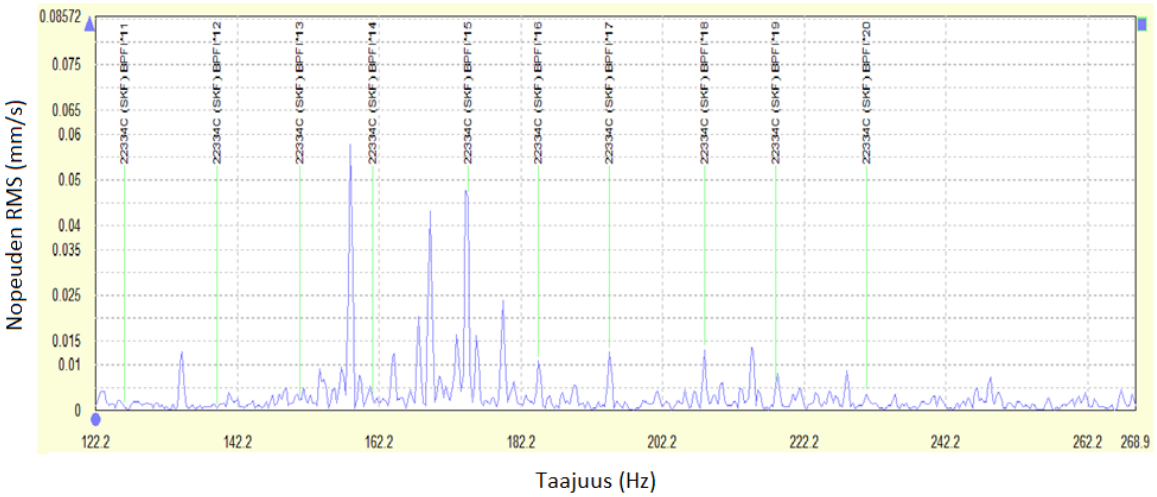
Taulukossa 8 on esitetty teollisuuskulmavaihteen välitystietoja käsin suoritettavan värähtelymittauksen analyysiä varten. Käsimittauksen aikana ensiöakselin pyörimisnopeus oli 294 RPM, kun aktiivisen järjestelmän mittauksissa se oli 312 RPM. Tästä syystä tarkasteltavat ryntötaajuudet ovat hiukan erilaiset.

Taulukko 8. Teollisuuskulmavaihteen välitystietoja pyörimisnopeudella 294 RPM.

Akseli	Hampaiden lukumäärä	Pyörimisnopeus (RPM)	Pyörimistaajuus (Hz)	Välityssuhde	Ryntötaajuus (Hz)
Ensiöakseli	26	294,00	4,90	-	-
1.vaihde	34 ja 30	224,62	3,74	0,764	127,16
2.vaihde	86 ja 23	78,17	1,30	0,348	111,80
Toisioakseli	75	23,92	0,39	0,306	29,25

Kuvassa 31 on esitetty teollisuuskulmavaihteesta käsimittauksella mitattu taajuusspektri kolmannen laakerin kohdalta (kuva 25) nopeusmittauksena. Käsimittaus suoritettiin kuukauden myöhemmin kuin aktiivisen järjestelmän mittaus. Värähtelytasot ovat yleisesti erittäin pieniä (< 1 mm/s) ja lähtökohtaisesti vaihde on mittausten perusteella kunnossa. Tarkemman ja yksityiskohtaisemman analysoinnin jälkeen voidaan kuitenkin havaita laakerin 22334C sisäkehän vikataajuuksien (kuvassa merkitty vihrein viivoin) ja sen

monikertojen korrelointi spektrin taajuuspiikkien kanssa. Näitä laakereita löytyy teollisuuskulmavaihteesta kohdista 3 ja 6 (kuva 25). Tämän perusteella voidaan havaita hyvin pientä alkavaa vikaantumista laakerissa ja sen kehittymistä tulee seurata tarkasti tulevaisuudessa. Äkillistä vikaantumista ei ole odotettavissa lähitulevaisuudessa mittausten perusteella. Ryntötaajuuksien piikit eivät olleet yksittäisen käsimittauksen perusteella vallitsevia.



Kuva 31. SKF:n käsimittalaitteella saatuja mittaustuloksia 3. laakerilta.

Näiden Caverion IoTFlex-järjestelmän ja SKF:n Microlog-käsimittalaitteen avulla suoritettujen värähtelymittausten pohjalta tällä aikavälillä voidaan todeta teollisuuskulmavaihteen olevan kunnossa. Käsimittauksia ja ennakkohuoltosuunnitelman mukaisia visuaalisia tarkastuksia jatketaan tulevaisuudessa. Ryntötaajuuden ja kolmannen sekä kuudennen laakerin (22334C) sisäkehän vikataajuuksien piikkejä on syytä tutkia jokaisen mittauksen jälkeen tarkasti, jotta on mahdollista huomioida niiden kehitykset. Teollisuuskulmavaihteen hammaspyörien äkillinen vikaantuminen voi johtaa tilanteeseen, jossa varaosia sekä työvoimaa on rajatusti saatavilla vikaantumishetkellä ja korjaaminen voi tästä syystä pitkittyä.

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

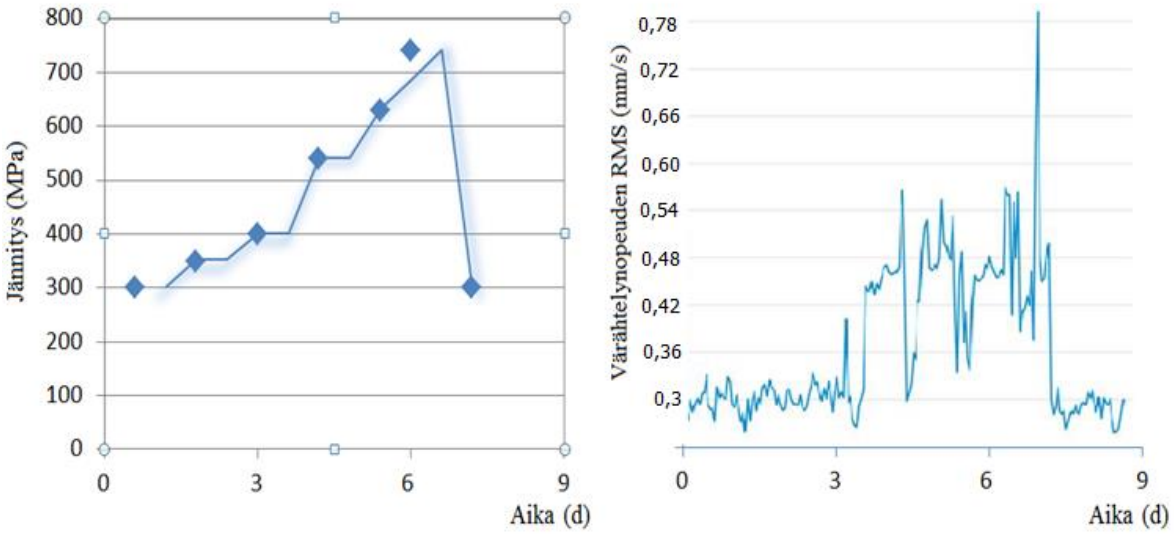
Jatkuvatoimisten linjojen käyntivarmuutta kasvattamaan luotu ennustavan kunnossapidon malli tarjoaa vahvaa tukea perinteiselle kunnonvalvonnalle SSAB:n Hämeenlinna tehtaalla. Tämän tutkimuksen kautta huomattiin värähtelymittauksen tehokkuus ja samalla mittaamisen harjoittamisen vaativuus koskien laitteiden kuntoanalyysejä. Tarkan ja luotettavan analyysin luomiseksi on mittaushenkilöstöllä oltava aiheeseen liittyen motivaatiota sekä useamman vuoden kokemus. Koulutus vaatii resursseja, mutta onnistuessaan värähtelymittauksella voidaan tehokkaasti tehostaa perinteistä kunnonvalvontaa vikaseisokkien määrän karsimiseksi, kun laitteiden vikaantuminen huomataan hyvissä ajoin ja reagointiaikaa jää runsaasti.

4.1 Uudistetun kunnonseurannan arviointi

Värähtelymittausmarkkinoita kartoittamalla huomattiin aktiivisen seurannan palveluiden olevan lähes kaikilla toimittajilla samanlaisia. Paketit sisälsivät kiinteitä antureita, mittausyksikön ja laitteen langattomaan tiedonsiirtoon sekä tarvikkeita järjestelmän aktivoimiseen. Erot aktiivisessa värähtelyiden seurannassa eri toimittajien välillä syntyvät kunnonvalvonnan laitteistojen tarjonnassa ja tulosten analysoinnin sekä mahdollisesti sen ulkoistamisen myötä. Värähtelymittaustulosten analysointi vaatii vuosien kokemuksen mitattavista kohteista ja resursseja, jos analysointi suoritetaan omalla henkilöstöllä. Värähtelymittausten ulkoistaminen tulee kysymykseen, mikäli mittauksia halutaan suorittaa vain muutamiin laitteisiin ja saada asiantuntevia tuloksia ilman vuosien kouluttautumista sekä välttää kouluttautumiskustannukset.

Oman henkilöstön kouluttamisen etuina voidaan pitää hyvä laitteiston tuntemus ennalta. Kun laitteet tunnetaan ennalta, tiedetään käynnin normaali perustaso, jolla laite yksilöllisesti toimii, jolloin hälytysrajojen asettaminen on helpompaa. Kokemuksen avulla voidaan saada tarkempia analyyseja, kun mahdollisia vikapiikkejä osataan varmuudella sulkea pois. Toisaalta oman henkilöstön kouluttaminen vaatii suuria resursseja ja harjaantuneeksi värähtelymittaajaksi kehittyminen vie vuosia.

Kuvassa 32 on nähtävissä SSAB:n Hämeenlinnan tehtaan kuvitteellisen tuotannon vaikutus värähtelytasoihin. Tuotannonsuunnittelun (Tuotannonsuunnittelu 2018) kanssa käytyjen kenttäkeskustelujen perusteella on mahdollista, että tuotannossa ajetaan määrätyllä ajanjaksolla tasaisesti lujenevia teräslaatuja, jolloin värähtelynopeus kasvaa luontaisesti värähtelymittauspisteessä samassa suhteessa rakenteiden kokonaisjännitysten kasvaessa kuvan 32 mukaisesti. Siinä jännityksellä (MPa) tarkoitetaan siis värähtelymittaustuloksiin vaikuttavaa, tuotantolinjan rakenteissa syntyvää jännitystä, joka kasvattaa rakenteiden värähtelytasoja johtuen tuotantolinjan normaalista käyttäytymisestä tuotantoprosessin aikana. Kuvassa 32 värähtelynopeuden RMS (mm/s) tarkoittaa värähtelynopeuden muutosta suhteessa tuotantoprosessin muutokseen annetulla aikavälillä. Molemmissa käyrissä x-akselilla kuvataan aikaa päivissä (d).



Kuva 32. Kuvitteellisen tuotannon aiheuttaman jännitysten ja värähtelytasojen vaihtelu tuotantolinjassa.

Jos suunniteltu värähtelymittaus suoritetaan ajanjaksolla d = 1 (jännitys 300 MPa ja värähtelynopeus 0,3 mm/s) ja uudestaan ajanjaksolla d = 7 (jännitys 730 MPa ja värähtelynopeus 0,78 mm/s) voidaan havaita kokonaisvärähtelyiden nousu. Näin ollen on mahdollista tehdä väärä analyysi koskien tässä tapauksessa vioittumattoman laitteen kuntoa. Tuotannon vaikutukset on huomioitava värähtelymittauksia suunniteltaessa. Mikäli toinen mittaus olisi suoritettu ajanjaksolla d = 8 (jännitys 300 MPa ja värähtelynopeus 0,3 mm/s) olisivat mitatut värähtelytasot olleet eri luokkaa. Linjojen normaali toiminta on

otettava huomioon mittauksia suoritettaessa. Kuvalla 32 tuetaan tässä tutkimuksessa määritettyä kunnossapidon mallia, jossa laitteen normaalitila määritellään kiinteällä värähtelymittauksella juuri tuotannon vaihteluista johtuen. Kun kiinteä mittaus kestää useita viikkoja kerrallaan, voidaan todeta koko tuotannon aiheuttaman värähtelyiden vaihtelun näkyvän jo mittaustuloksissa.

Tässä työssä kehitetyn ennustavan kunnonseurannan mallilla tuetaan jo ennestään harjoitettua perinteistä kunnonvalvontaa, mutta se ei takaa laitteiden toimivuutta. Aktiivisella värähtelyiden seurannalla ja käsin suoritettavalla säännöllisellä värähtelymittauksella voidaan mahdolliset vikaantumiset havaita hyvissä ajoin, mutta se ei poista nopean äkillisen vikaantumisen mahdollisuutta mittausten välillä tai laitteiden äkillistä vaurioitumista. Se ei myöskään poista inhimillisten virheiden mahdollisuutta koskien laitteen huoltoa ja osien vaihtoa. Asennusvaiheessa tehty virhe voi vioittaa uuden osan jo ennen laitteen uudelleenkäynnistystä, jolloin vika mahdollisesti uusiutuu.

4.2 Tutkimuskysymysten analysointi

Tutkimuskysymyksiä tälle työlle asetettiin neljä kappaletta. Ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä kysyttiin *”Miten määritellään jatkuvatoimisen tuotantolinjan kriittiset kohteet?”* Kirjallisuuskatsauksen ja SSAB:n Hämeenlinnan tehtaan kunnossapidon ammattilaisten kanssa käytyjen keskustelujen avulla selvitettiin kriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä. PSK 5705 standardissa on esitetty kaavio kriittisyyden määrittämisen tueksi teollisuudessa. Tässä työssä hyödynnettiin PSK 5705 standardista löytyvän kaavion lisäksi myös vauriomuotomatriisia kriittisyyden luokittelemiseksi. Tutkimusta tehdessä huomattiin kaavion olevan tehokas työväline, joka soveltuu useimpiin tapauksiin.

Huomattiin kuitenkin myös, että kriittisyyden määrittäminen voi olla hankalaa ja siihen on useita eri näkökulmia. Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin, että PSK Standardin taulukoissa ei huomioida esimerkiksi laitekokonaisuuksien ja sen välittömän läheisyyden siisteyttä. Kunnossapidon kannalta laitteiden perushuoltoihin kuuluu erityisesti siisteyden ylläpitäminen. Likaantuminen on laitteen käyttöiän kannalta vakava epäkohta. Esimerkiksi puhaltimissa ja sähkömoottoreissa vakavaa resonointia ja epätasapainoa voi aiheuttaa epätasaisesti likaantunut siipipyörä (PSK 5707 2011, s. 7). Puhaltimien kriittisyyden

määrittelemisessä on tärkeää huomioida myös laitteen ympäristö ja sen mahdollisuus likaantumiselle. Laitteiston vikahistoriaa ja nykyistä tilaa ei voida aliarvioida kriittisyyttä määriteltäessä. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen ratkaisua tukivat kirjallisuuskatsaus ja keskustelut kunnossapidon ammattilaisten kanssa.

Toisessa tutkimuskysymyksessä kysyttiin *”Mitä aktiivisen seurannan malleja voidaan hyödyntää SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla?”* Tässä työssä etsittiin ratkaisuja ennustavan kunnossapidon mallien hyödyntämisen mahdollisuuksiin SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla ja lopputuloksena päädyttiin ratkaisuun, jossa värähtelymittausten avulla seurataan laitteiden kuntoa aktiivisesti sekä käsin suoritettavina mittauksina normaalin kunnossapitotoiminnan lisäksi. Aktiivinen kunnonvalvonta suoritetaan kiinteiden kiihtyvyysantureiden ja langattoman tiedonsiirron avulla, jolloin kriittisen laitteen kunnon seuranta ei ole aikaan tai paikkaan sidottua.

Jatkokehityskohteina tulevaisuudessa on mahdollista lisätä aktiiviseen seurantaan värähtelymittausten lisäksi myös lämpötilan seurantaa tai öljyjärjestelmien partikkelimittauksia käyntivarmuuden ylläpitämiseksi ja kasvattamiseksi. Aktiivisen seurannan tehostamista ajatellen jatkokehityskohteeksi sopisi kriittisten kohteiden tarkempi ja yksinkertaisempi kartoittaminen esimerkiksi erilaisten simulaatiotyökalujen avulla. Toisen tutkimuskysymyksen ratkaisua tukivat kirjallisuuskatsaus aktiivisen kunnossapidon malleihin sekä keskustelut ulkopuolisten kunnossapidon ammattilaisten kanssa.

Kolmannessa tutkimuskysymyksessä kysyttiin *”Mitä mahdollisuuksia ennustava kunnossapito tarjoaa SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalle?”* Ennustavan kunnossapidon avulla on mahdollista tukea linjojen käyttövarmuuden kasvattamista tehokkaasti. Sen avulla voidaan vastata nykyisiin ja tiukentuviin laatu- sekä tuotantovaatimuksiin, kun laitteistojen kunto tunnetaan entistä paremmin. Parhaiten se voidaan havaita vikaseisokkien määrän laskuna. Kunnossapidon resursseja voidaan ohjata entistä paremmin, kun määrättyjen kriittisten laitteiden kunnonvalvonta on jatkuvaa.

Ennustavan kunnossapidon avulla voidaan lisätä tietoisuutta linjasta ja sen laitteistosta, mutta se ei poista mahdollisuutta ennalta arvaamattomien ja nopeasti kehittyvien laiterikkojen synnystä. Tiedon lisääminen saattaa vaikuttaa käyttävään henkilöstöön myös

negatiivisesti, mikäli laitteistoissa havaitaan uusia puutteita ja kehityskohteita. Kolmannen tutkimuskysymyksen ratkaisua tukivat kirjallisuuskatsaus sekä keskustelut kunnossapidon ammattilaisten kanssa aktiivisen seurannan mahdollisuuksista.

Neljännessä tutkimuskysymyksessä kysyttiin *”Mikä on teollisen kunnossapidon tulevaisuus?”* Digitalisaation myötä myös kunnossapitotoiminta kehittyy. Älykkäät ja oppivat järjestelmät mahdollistavat tiedon saannin ajasta ja paikasta riippumatta. Ne tekevät vikadiagnoosit pohjautuen vikahistoriaan ja suorittavat jopa itse tarvittavat korjaukset.

Tulevaisuudessa älykkäät järjestelmät vaikuttavat operaattoreiden ja muun henkilöstön määrään teollisuudessa. Kun järjestelmät ajattelevat itse ja valvovat tuotantoa, ei tuotannon vuoroihin mahdollisesti enää tarvita suurta määrää henkilöstöä. Älykkäitä järjestelmiä on huollettava, mikä mahdollisesti tarkoittaa koulutetun kunnossapitohenkilöstön tarpeen lisääntymistä teollisuudessa digitalisaation yleistyessä. Kilpailukykyä kasvattaessa teollisen kunnossapidon merkitys kasvaa edelleen ja Tableau:n sekä alteryx:n kaltaiset datan käsittely ohjelmistot tulevat valtaamaan alaa. Neljännen tutkimuskysymyksen ratkaisua tukivat kirjallisuuskatsaus aktiivisen kunnossapidon malleihin sekä keskustelut kunnossapidon ammattilaisten kanssa.

4.3 Aktiivisen kunnonseurannan tuomat säästöt

Kunnossapitokustannuksissa on mahdollista säästää merkittävästi, jos laitteiden mahdollinen vikaantumismuoto on havaittavissa ja havaitaan kunnossapitotoiminnalla, joka hyödyntää aktiivista kunnonvalvontaa. Kuvassa 33 on esitetty kustannusten määräytyminen jatkuvatoimisen linjan vikaseisokissa. Kuvan vasemmalla puolella vikaantuminen on ollut ajoissa tiedossa ja siihen on osattu reagoida riittävällä tasolla. Oikealla puolella on tilanne kuvattu ilman etukäteistä tietoa mahdollisesta vikaantumisesta ja siitä seuranneista kustannusten kasvusta. Kustannukset ovat esitetty indekseinä aina täydellisestä tuotannosta (1) täydelliseen tappioon (-1).

Tuotannon materiaalikustannukset syntyvät linjaan vikatilanteessa jääneestä materiaalista, jota ei myydä virheettömänä tuotteena linjan äkillisen pysähtymisen jälkeen. Esimerkiksi materiaalikustannukset on merkitty vikatilanteessa positiiviseksi (0,2-0,4), koska tuote

voidaan kuitenkin myydä toisessa kategoriassa, mutta tappioita syntyy. Linjakustannukset on suhteutettu negatiiviseksi (-0,8), johtuen suorista tappioista vikatilanteessa. Varaosakustannukset ovat tapauskohtaisia. Tämän työn kriittisessä kohteessa ne määrittyvät yksittäisien laakereiden vaihdosta koko vaihdelaatikon vaihtokustannuksien välille. Kaavalla d (vrk) x 24 h x linjakustannukset tarkoitetaan varaosien valmistuksesta johtuvaa seisonta-aikaa.

Aktiivisen kunnonseurannan avulla on mahdollista saada kriittistä tietoa laitteen kunnosta hyvissä ajoin, joka mahdollistaa työntekijäresurssien tehokkaan hyödyntämisen. Kun vika on ajoissa tiedossa, voidaan huoltoajankohta sopia sekä kunnossapidon että tuotannon kanssa sopivaan ajankohtaan ilman turhia seisakkeja. Näin ollen linjakustannuksia eikä työntekijäkustannuksia ei synny ylimääräistä. Kuvassa *h(min)* tarkoittaa lyhintä mahdollista linjan seisonta-aikaa vian havaitsemisen ja huoltamisen aikana ja *h(max)* pitkittynyttä seisonta-aikaa tilanteessa, jossa vikaantumiseen ei ole varauduttu.

Linja pysähtyy hallitusti	
Kyllä	Ei
↓	↓
Ei materiaalikustannuksia (1)	Materiaalikustannukset linjassa olevasta materiaalista (0,2-0,4)
Varaosat paikalla kun tarve pysähtyä tai vika ilmaantuu	
Kyllä	Ei
↓	↓
Linja ei seiso ylimääräistä	Linja seisoo ylimääräistä tai operoi vajaalla kapasiteetilla
↓	↓
Ei linjakustannuksia (1)	Linjakustannukset (-0,8)
↓	↓
Varaosakustannukset	Varaosakustannukset + x (vrk) x 24 h x Linjakustannukset
Työntekijät paikalla kun tarve pysähtyä tai vika ilmaantuu	
Kyllä	Ei
↓	↓
Ei hälytyslisiä	Mahdolliset hälytyslisät
↓	↓
0 €	3 h + 100 % ylityö
↓	↓
Minimaaliset ylityöt	Mahdollisesti suuret ylityökustannukset
↓	↓
50 - 100 % x palkka x h(min)	100 % x palkka x h(max)
↓	↓
Linja ei seiso ylimääräistä	Linja seisoo ylimääräistä tai operoi vajaalla kapasiteetilla
↓	↓
0 €	h(max) x linjakustannukset
↓	↓
Käyntivarmuus kasvaa	*Käyntivarmuus laskee*
↓	↓
Kustannukset laskee	*Kustannukset kasvaa*

Kuva 33. Aktiivisen kunnonseurannan vaikutus kustannuksiin kriittisessä kohteessa.

Kuvasta 33 voidaan havaita, että linjan seisominen vikatilanteessa, jossa teollisuuskulmavaihde on äkillisesti hajonnut tuottaa suuria tappioita. Mikäli varaosia ei ole saatavilla heti, kasvavat linjakustannukset moninkertaisiksi.

Kustannukset vikatilanteessa eivät kuitenkaan rajoitu pelkästään kuvan 33 mukaisiin kohtiin. Tuotannonsuunnittelun (Tuotannonsuunnittelu 2018) kanssa käytyjen keskusteluiden kautta selvisi, että näiden lisäksi tuotantoon liittyviä kustannuksia tuovat myös logistiset ja tuotantohenkilöstöön liittyvät seikat. Logistisia kustannuksia tuovat sovitut ja vajaina kulkevat rahdit, kun tuotantoa ei syntynyt suunnitellusti. Myöhästynyt tilaus pyritään kuitenkin toimittamaan, joten samasta tuotteesta voidaan joutua maksamaan moninkertainen pikarahti. Tuotantohenkilöstöön liittyvät kustannukset syntyvät, kun linja pysähtyy odottamattomasti ja tuotantohenkilöstö jää hetkellisesti toimettomaksi. Yhteenvetona voidaan todeta aktiivisen kunnonvalvonnan tuovan merkittäviä säästöjä, mikäli vikaantumismuoto on mahdollista havaita hyvissä ajoin ennustavan kunnossapidon avulla.

4.4 Uudistuksista saatavat hyödyt

Säännöllisten värähtelymittausten avulla on mahdollista saada hyvissä ajoin tarkkaa tietoa laitteiston kunnosta. Reagointiaikaa jää mahdollisesti aikaisempaa enemmän, kun kriittisen laitteen vikaantuminen huomataan ennen visuaalisia vian merkkejä, kuten ääntä ja kohonneita lämpöarvoja. Tuotantoaikaa säästetään merkittävästi, kun esimerkiksi varaosat voidaan tilata jo ennen linjan pysähtymistä ja varata sopivat työvälineet sekä työntekijät huoltoa varten. Näin ollen vikaseisokkien määrää voidaan säännöllisten mittauskierrosten tai aktiivisen värähtelymittauksen avulla tehokkaasti karsia.

Tietoisuutta linjojen laitteistoista voidaan lisätä aktiivisen kunnonseurannan avulla ja hyötyjä saadaan erityisesti kriittisten laitteistojen seurannasta, joiden valvonta on hankalaa johtuen sijainnista tuotantolinjassa. Kun laitteistojen kunto tunnetaan koko ajan hyvin, voidaan kunnossapidon resursseja ohjata kriittisimpiin kohteisiin entistä tehokkaammin. Aktiivisen seurannan ansiosta ei tarvitse enää arvuutella laitteiden vikaantumisen ajankohtaa vaan voidaan keskittyä tehokkaammin vikojen ennaltaehkäisyyn. Kokonaisvärähtelyjen avulla voidaan ennustaa laitteen tai sen osan hajoaminen ennalta. Tämä kuitenkin edellyttää vuosien mittausdatan vertailua.

Muokatun kriittisyysanalyysitaulukon avulla on mahdollista luokitella tulevaisuudessa tehtaan laitteita ja verrata niitä tässä työssä käytettyyn kriittiseen kohteeseen. Taulukko on yksinkertainen ja mahdollistaa luokittelun myös monimutkaisemmissa kohteissa. Se ei kuitenkaan ole aukoton, vaan eroavaisuuksia myös samanlaisten laitteiden välillä voi syntyä aina kun kriittisyyden määrittelijä vaihtuu. Jatkokehityskohteena kriittisyyden analysointiin voitaisiin tuoda myös laitteen ikä ja vikahistoria tulevaisuudessa, kun tiedon kerääminen tehostuu.

Käyntivarmuuden parantamista laitekohtaisesti ei voida tämän tutkimuksen pohjalta vielä määrittää, koska mittaustoimintaa on harjoitettu vasta vähän. Aktiivisella ja jaksottaisella värähtelymittaustoiminnalla on mahdollista saada laakereiden vikaantumiset, hammaspyörien kulumat ja nopeasti pyörivien akseleiden linjausvirheet kiinni ennen laitteen täydellistä vikaantumista. Äkillinen vikaantuminen voidaan värähtelymittauksella havaita, mutta reagointiaika voi jäädä lyhyeksi riippumatta kunnonvalvonnasta. Kuitenkin voidaan todeta, että kehitystä on odotettavissa käyntivarmuuden kasvattamiselle tulevaisuudessa säännöllisen värähtelymittauksen myötä. Näkemys pohjautuu tässä tutkimuksessa suoritettuihin värähtelymittaustuloksiin, joista jo nyt havaittiin mahdollinen laakerivikaantuminen ja vallitseva ryntötaajuus, jonka kehittymistä tulee seurata. Tutkimusta ennen havainnot laitteiden vikaantumisesta pohjautuivat lähinnä visuaalisiin oireisiin, jolloin reagointiaikaa huollon valmistelulle ei mahdollisesti ole ollut runsaasti jäljellä. Tämän tutkimuksen jälkeen vikaantumisdataa kerätään säännöllisesti, jolloin tutkimuksen todellinen hyöty voidaan todeta.

4.5 Kunnossapidon tulevaisuus SSAB:n tehtaalla

Kunnossapitotoiminta tulee kehittymään SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla lähivuosina. Tarkoituksena on tuoda tehtaalle tämän diplomityön jatkokehityskohteina laajemmin aktiivisen ja ennustavana kunnossapidon järjestelmiä, jolloin kunnonvalvonta ei enää ole paikkaan tai aikaan sidottua. Kunnossapitotoimintaa voidaan käyttää entistä tehokkaammin, kun eräitä kriittisiä ja vikaantumistaajuudeltaan herkkiä kohteita eri tuotantolinjoilla valvotaan jatkuvasti ja hälytysrajat ovat säädetty kunnossapitotoiminnan kannalta tehokkaasti.

Tulevaisuudessa myös laitteiden vikahistoriaa tullaan keräämään entistä tehokkaammin, jotta värähtelytasojen vertailu ja vikojen kehittymisen ennustaminen onnistuisi mahdollisimman tarkasti. Laitteiden vikahistorian tunteminen auttaa paikallistamaan tarkemmin tuotantolinjojen suurimmat vikakohteet, jolloin niiden kehitystyötä voidaan tulevaisuudessa selkeyttää ja parantaa. Näin voidaan mahdollisesti kokonaan korvata linjoilta vikaantumistaajuudeltaan herkimmät laitekokonaisuudet ja nostaa käyntivarmuutta entisestään. Tutkimusta voidaan toisaalta pitää luotettavana, johtuen laajasta kirjallisuuskatsauksesta. Toisaalta vielä tarvitaan lisää käyttökokemuksia värähtelymittaustoiminnan toimivuudesta ennen lopullista käytännön toteutuksen luotettavuuden määritystä.

5 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin ennustavan kunnossapidon mahdollisuuksia ja sen vaikutuksia käyntivarmuuden kasvattamiselle sekä kehitettiin ennustavan ja aktiivisen kunnossapidon malli tukemaan kunnossapitotoimintaa SSAB:n Hämeenlinnan tehtaalla.

Ennen työn aloittamista oli selvää, että kohdeyrityksellä on suuri tarve kehittää kunnossapitotoimintaansa ja nostaa käyntivarmuutta jatkuvatoimisilla linjoilla. Ennustavan ja aktiivisen kunnossapitotoiminnan tuominen kohdeyritykseen oli ollut suunnitteilla jo jonkun aikaa, mutta kehitystyön käynnistämistä ei vielä ollut aloitettu. Tämän diplomityön avulla pyrittiin luomaan käsitys ennustavan ja aktiivisen kunnossapidon toimintamalleista, resurssivaatimuksista ja mahdollisuuksista sekä tuomaan taloudellisia ja teknisiä hyötyjä kohdeyritykseen värähtelymittausten avulla. Tämä diplomityö antaa pohjan jatkokehitykselle koskien kohdeyrityksen kunnonvalvonnan kehittämistä tulevaisuudessa.

Tulevaisuudessa haasteita tuovat iäkkäiden tuotantolinjojen liittäminen kehittyneisiin kunnonvalvontajärjestelmiin. Resurssien tarve kasvaa kunnossapitotoimintaa kehitettäessä ja pelkästään käyttökokemuksien kerääminen ja vikahistorian tehokas hyödyntäminen vie useamman vuoden. Koulutetun kunnossapitohenkilöstön tarve mahdollisesti kasvaa tulevaisuudessa älykkäiden järjestelmien valvonnan ja huoltamisen myötä, mutta kustannustehokkuuden voidaan odottaa kasvavan tuottavan kunnossapidon myötä.

LÄHTEET

Airila, M. 1995. Koneenosien suunnittelu. 4. painos. Porvoo: WSOY. 796 s.

btelligent. 2018. What is big data and for what purposes is it needed?. [btelligent verkkojulkaisu]. [Viitattu 15.8.2018]. Saatavissa: https://www.btelligent.com/en/portfolio/big-data/

Caverion. 2018a. Kunnonvalvonnan anturoinnin mahdollisuudet pyörivissä koneissa. Caverion esittelymateriaali. [Viitattu 12.5.2018]. Pääsy vain SSAB:n henkilökunnalla.

Caverion. 2018b. IoTFlex-palvelukonsepti teollisuuden ennakoivaan kunnossapitoon. [Caverion verkkojulkaisu]. [Viitattu 21.5.2018]. Saatavissa: https://www.caverion.fi/palvelut/tekninen-huolto-ja-kunnossapito/iotflex-teollisuudelle

Guillaume, P & Schoukens, J & Pintelon, R & Kollár, I. 1991. Crest-Factor minization using nonlinear Chebyshev approximation mehtods. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 1991. Vol. 40. No. 6. S. 982-983. ISSN 0018-9456

Enfo. 2018a. Business Intelligence Vs Machine Learning. Enfo esittelymateriaali. [Viitattu 12.5.2018]. Pääsy vain SSAB:n henkilökunnalla.

Enfo. 2018b. Maintenance development. Enfo esittelymateriaali. [Viitattu 12.5.2018]. Pääsy vain SSAB:n henkilökunnalla.

Eskelinen, H. 2018. Luentomoniste, Reliability based machine element design. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 26 s.

Hakonen, M. 2014. Toimintavarmuus kunniaan. [ProMaint verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: https://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Toimintavarmuus-kunniaan

Hämäläinen, T. 2017. Big Data. [tiedon www-sivuilla]. [Viitattu 21.5.2018]. Saatavissa: https://www.tieto.fi/konseptit-tieto/big-data

Kammler, D.W. 2008. A first course in fourier analysis. 2. painos. New York: Cambridge University Press. 862 s.

Kelly, A. 2006. Strategic maintenance planning. 1. painos. Amsterdam: Elsevier. 284 s.

Kelly, S. Graham. 2007. Advanced vibration analysis. 1. painos. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 637 s.

Kortelainen, H & Hanski, J & Uusitalo, T. 2016. Tuotantotehokkuuden ja kunnossapidon kehittämisen uudet mahdollisuudet. [ProMaint verkkojulkaisu]. [Viitattu 18.5.2018]. Saatavissa: https://promaintlehti.fi/Laite-ja-korjaustekniikat/Tuotantotehokkuuden-ja-kunnossapidon-kehittamisen-uudet-mahdollisuudet

Kumamoto, H & Henley, E. 2000. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. 2. painos. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. S. 620.

Kreyszig, E. 2010. Advanced engineering mathematics. 10. painos. Hoboken: John Wiley & Sons. 1113 s.

Martinsuo, M & Kärri, T. 2017. Teollinen internet uudistaa palveluliiketoimintaa ja kunnossapitoa. [Tampereen teknillisen yliopiston kirjaston www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 2017. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/10991976/teollinen_internet_kirja_digi.pdf

Mylly, J. 2018. Älykäs varasto on automaattinen ja oppiva. [talouselämä verkkojulkaisu]. [Viitattu 21.5.2018]. Saatavissa: https://www.talouselama.fi/kumppaniblogit/symbio/alykas-varasto-on-automaattinen-ja-oppiva/10c97134-65ca-3368-ac0a-f74f27ca26ec

Mäki, K. 2016. Älykäs kunnossapito. [ProMaint verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: https://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Alykas-kunnossapito

Nakagawa, T. 2005. Maintenance theory of reliability. 1. painos. Lontoo: Springer-Verlag London Limited. 265 s.

Nohynek, P & Lumme, V. 1996. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 1. Painos. Loviisa: Painoyhtymä Oy. 159 s.

Newland, D.E. 1989. Mechanical vibration analysis and computation. 1. Painos. Harlow: Longman. 583 s.

Opetushallitus. 2018a. Mitä on kunnossapito? [Opetushallitus verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_1-1_mita_on_kunnossapito.html

Opetushallitus. 2018b. Tuottava kunnossapito. [Opetushallitus verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_5-4_tuottava_kunnossapito.html

Orhan, S & Aktürk, N & Celik, V. 2005. Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. NDT & E International, 2006. Vol. 39. 4. S. 295-296. ISSN 0963-8695

Pattabiraman, T.R & Srinivasan, K & Malarmohan, K. 2015. Assessment of sideband energy ratio technigue in detection of wind turbine gear defects. Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, 2015. Vol. 2. S. 3. ISSN 2351-9886

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

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

PSK 5704. 2013. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Vastaanottotarkastus ja tärinärasitusrajat. 7. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry. 9 s.

PSK 5705. 2006. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. 5. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry. 19 s.

PSK 5707. 2011. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. 5. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry. 34 s.

PSK 5708. 2018. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet. 3. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry. 11 s.

PSK 6201. 2011. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 3. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry. 30 s.

Randall, R & Antoni J. 2011. Rolling element bearing diagnostic – A tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. Vol. 25:2. S. 486-487. ISSN 0888-3270.

Salminen, T. 2018. Kunnossapitoinsinööri; SSAB Hämeenlinna. Haastattelu 29.5.2018. Haastattelijana Juha Harjula. Muistiinpanot haastattelijan hallussa. [Tekstiviite: (Salminen 2018)]

Singiresu, S. 2000. Mechanical vibrations. 4. painos. Intia: Prentice Hall. 1078 s.

Skyttä, M. 2016. MP Intelligence valittiin parhaaksi Business-to-Business-palvelukonseptiksi. [maintpartneri verkkojulkaisu]. [Viitattu 21.5.2018]. Saatavissa: https://www.maintpartner.com/index.php/fi/uutisia/8-mp-intelligence-valittiin-parhaaksi-business-to-business-palvelukonseptiksi

SSAB. 2018. Globaalit megatrendit ja SSAB:n vastaukset. [SSAB verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.5.2018]. Saatavissa: https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/markkinaymparisto/globaalit-megatrendit-ja-ssabn-vastaukset

Solutive. 2018. Big Data analytiikka. [Solutive www-sivuilla]. [Viitattu 21.5.2018]. Saatavissa: https://www.solutive.fi/big-data/?gclid=EAIaIQobChMIy_KezoWW2wIVXouyCh0V3g9fEAAYAiAAEgJ0B_D_BwE

Tuotannonsuunnittelu. 2018. SSAB Hämeenlinna. Haastattelu 31.8.2018. Haastattelijana Juha Harjula. Muistiinpanot haastattelijan hallussa. [Tekstiviite: (Tuotannosuunnittelu 2018)]

Törnqvist, J & Talja, A. 2014. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. Espoo: VTT. 58 s.

Vesanen, A. 2018. Kunnossapitopäällikkö; SSAB Hämeenlinna. Haastattelu 7.6.2018. Haastattelijana Juha Harjula. Muistiinpanot haastattelijan hallussa. [Tekstiviite: (Vesanen 2018)]

Woit, P. 2015. Euler’s Formula and Trigonometry. [Columbia University-verkkodokumentti]. [Viitattu 1.6.2018]. Saatavissa: https://www.math.columbia.edu/~woit/eulerformula.pdf

Yongzhuo, L & Kang, D & Guolin, H & Xintao, J. 2018. Non-stationary vibration feature extraction method based on sparse decomposition and order tracking for gearbox fault diagnosis. Measurement, 2018. Vol. 124. S. 454. ISSN 0263-2241

Horner-algoritmi

$z := 1$
$\omega := e^{-2\pi i/N}$
For $k = 0, 1, \ldots, N-1$ do:
    $S := f[N-1]$
    For $\ell = 2, 3, \ldots, N$ do:
        $S := f[N-\ell] + z \cdot S$
    $F[k] := S/N$
    $z = z \cdot \omega$