

Eeli Reunanen

Värähtelymittausuunnitelma koneiden kunnonvalvontaan

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Kevät 2026



**KAMK • University
of Applied Sciences**

Tiivistelmä

Tekijä: Reunanen Eeli

Työn nimi: Värähtelymittaussuunnitelma koneiden kunnonvalvontaan

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), konetekniikka

Asiasanat: Värähtelymittauksen suunnittelu, Värähtelymittaus, Kunnonvalvonta, Ennakoiva kunnossapito ja Kunnossapito

Tämän työn toimeksiantajana toimi Sartorius Liquid Handling Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä värähtelymittausten teoriaperusteisiin ja tehdä värähtelymittaussuunnitelma, jonka avulla toimeksiantaja voi kehittää ja selkeyttää yrityksen värähtelymittauksia tulevaisuudessa.

Työ pohjautuu pääosin PSK:n 5700-sarjan standardeihin, joissa käsitellään kunnonvalvonnan värähtelymittauksia. Standardien lisäksi työssä hyödynnettiin aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, opintojen aikana saatua tietoa sekä värähtelyasiantuntijan vinkkejä. Työn suorittavassa osuudessa kartoitettiin laitteet, tehtiin laitteille värähtelyvalvonnan tarpeen arviointi, määritettiin valvontaan valikoiduille laitteille mittapistet sekä lopulta laadittiin värähtelymittaussuunnitelma.

Työn tuloksena syntyi toimiva ja käytännössä hyödynnettävä mittaussuunnitelma, jonka avulla toimeksiantaja voi lähteä kehittämään värähtelymittauksiaan ja tehostamaan ennakoivaa kunnossapitoaan. Mittauspisteet määritettiin onnistuneesti ja ne merkittiin laitekuviin. Mittauspisteisiin suunniteltiin asennettavaksi mittausnipat, joiden avulla mittaukset voidaan suorittaa toistettavasti ja luotettavasti, mikä parantaa mitausdatan laatua ja vertailtavuutta.

Työn luotettavuutta tukevat luotettava lähdeaineisto sekä asiantuntijan suositukset, joita hyödynnettiin työssä. Opinnäytetyössä osoitettiin, että selkeä ja standardeihin pohjautuva värähtelymittaussuunnitelma antaa toimivan lähtökohdan kunnonvalvonnan kehittämiseksi. Suunnitelma helpottaa värähtelymittausten toteuttamista yhtenäisellä tavalla ja parantaa mitaustulosten luotettavuutta. Mittaussuunnitelmaa voidaan jatkossa kehittää edelleen esimerkiksi raja-arvojen osalta sitä mukaa, kun mittauksista kertyy enemmän kokemusta ja mitausdataa.

Abstract

Author(s): Reunanen Eeli

Title of the Publication: Vibration Measurement Plan for Machine Condition Monitoring

Degree Title: Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering

Keywords: Vibration measurement planning, vibration measurement, condition monitoring, predictive maintenance and maintenance

This thesis was commissioned by Sartorius Liquid Handling Oy. The purpose of the study was to familiarize with the theoretical foundations of vibration measurements and to create a vibration measurement plan that enables the commissioning company to develop and clarify it in the future.

The thesis is mainly based on the PSK 5700 series standards of vibration measurements in condition monitoring. In addition to the standards, relevant literature, knowledge acquired during studies, and guidance from a vibration specialist were utilized. In the practical part of the thesis, the equipment was surveyed, the need for vibration condition monitoring was assessed for each device, measurement points were defined for the selected equipment, and finally a comprehensive vibration measurement plan was developed.

As a result of the thesis, a functional and practically applicable measurement plan was created. This plan provides the commissioning company with a solid foundation for developing its vibration measurements and improving predictive maintenance. The measurement points were successfully defined and marked in the equipment drawings. Measurement nipples were planned to be installed at the defined points to ensure repeatable and reliable measurements, thereby improving the quality and comparability of measurement data.

The reliability of the thesis is supported by credible source material and expert recommendations utilized in the work. The study demonstrates that a clear vibration measurement plan based on established standards provides an effective starting point for developing condition monitoring practices. The plan facilitates consistent implementation of vibration measurements and improves the reliability of measurement results. In the future, the measurement plan can be further developed, for example by refining alarm limits as more measurement experience and data are accumulated.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kunnossapito	3
2.1	Kunnossapitolajit.....	3
2.1.1	Korjaava kunnossapito.....	3
2.1.2	Ennakoiva kunnossapito	4
2.1.3	Parantava kunnossapito.....	5
2.2	Kunnonvalvonta	5
2.2.1	Tekoäly kunnossapidossa ja kunnonvalvonnassa	6
2.2.2	Kunnonvalvonnan tarve.....	7
3	Värähtely	8
3.1	Värähtelyn aiheuttajat	8
3.2	Suureet	9
3.3	Parametrit	10
4	Värähtelymittaus	12
4.1	Mittausanturit	12
4.1.1	Kiihtyvyyssanturi.....	12
4.1.2	Nopeusanturi	13
4.1.3	Siirtymäanturi	14
4.2	Mittalaitteet	14
4.3	Mittauspisteen valinta.....	15
4.4	Valvontamenetelmät.....	16
4.5	Mittauksen suunnittelu	18
4.5.1	Valvottavien kohteiden valinta ja tekninen toteutettavuus.....	18
4.5.2	Valvontamenetelmien ja raja-arvojen määrittely.....	19
4.5.3	Mittausjärjestelmän valinta ja mittausvälit	20
4.5.4	Mittaustoiminnan järjestely.....	20
4.5.5	Tiedonkeruu, raportointi ja seuranta	21
4.5.6	Mittaustulosten analysointi	21
5	Värähtelymittausten suunnittelu	22
5.1	Laitteiden kartoitus	22

5.2	Värähtelyvalvonnan tarpeen arviointi.....	22
5.3	Mittauspisteiden määrittäminen	24
5.4	Mittaussuunnitelma	36
6	Tulokset	40
7	Yhteenveto ja pohdinta	41
	Kuvaus tekoälyn käytöstä opinnäytetyössä.....	43
	Lähteet	44
	Liitteet	

1 Johdanto

Tuotantolaitosten on toimittava ympäri vuorokauden seitsemänä päivänä viikossa: jotta tämä on mahdollista, ennakoiva kunnossapito ja kunnonvalvonta nousevat keskeiseen rooliin. Yksi kunnonvalvonnan keskeisimmistä menetelmistä on värähtelymittaus. Värähtelymittausten avulla saadaan tärkeää tietoa laitteiden sen hetkisestä kunnosta. Tämän tiedon avulla huolto- ja korjaustoimenpiteisiin voidaan varautua etukäteen. Näin voidaan estää tilanne, jossa kriittinen laite rikkoutuu ja mahdollisesti koko tuotantolaitos joudutaan pysäyttämään. Tällaisessa tapauksessa kustannukset kasvavat nopeasti, kun huomioidaan sekä tuotannon menetykset että varaosien tai laitteiden toimitusajat, jos näitä ei ole varastossa valmiina. Korjauksessa voidaan joutua myös käyttämään ulkopuolista työvoimaa, mikä kasvattaa kustannuksia entisestään.

Toimeksiantaja on teettänyt laitteille värähtelymittaustarkastuksia ulkopuolisen toimijan toimesta vuodesta 2022 lähtien 1–3 kertaa vuodessa laitteiden kunnon mukaan. Yrityksessä värähtelymittaustoimintaa halutaan kehittää ja viedä eteenpäin, jotta mittaukset toteutettaisiin jatkossa suunnitelmallisemmin ja yhdenmukaisesti sekä saataisiin entistä parempi kokonaiskuva laitteiden kunnosta. Tässä työssä kartoitetaan valvottavat kohteet, tehdään niille kriittisyysarviointi, määritetään värähtelymittauksia varten mittauspisteet sekä laaditaan suunnitelma, jonka pohjalta värähtelymittauksia tullaan jatkossa toteuttamaan.

Tämän työn avulla yritys voi jatkossa kouluttaa omaa henkilöstöään suorittamaan värähtelymittauksia tai jatkaa mittauksia ulkopuolisen asiantuntijan toimesta. Kumpi vaihtoehto tahansa valitaan, työn lopputuloksena syntyy mittaussuunnitelma, jonka avulla mittaukset voidaan suorittaa yhdenmukaisesti. Näin varmistetaan, että mittaustulokset ovat vertailukelpoisia, eikä eroja synny erilaisten mittaustapojen vuoksi.

Opinnäytetyön aihe on rajattu kunnossapidon ja värähtelymittauksen teoriaan. Suorittavassa osuudessa työ tehdään siihen vaiheeseen, että värähtelymittauksia voitaisiin seuraavaksi lähteä toteuttamaan suunnitelman pohjalta. Työ ei suoraan liity aikaisempaan projektiin, vaan tarkoitus on kehittää ja selkeyttää toimeksiantajan värähtelymittauksia tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Sartorius Liquid Handling Oy Kajaani. Yrityksellä on Suomessa myös toinen toimipiste, joka sijaitsee Helsingissä. Sartorius Liquid Handling Oy kuuluu kan-

sainväliseen Sartorius AG -konserniin, jonka pääkonttori sijaitsee Göttingenissä Saksassa. Konserni työllistää maailmanlaajuisesti noin 13 500 henkilöä ja sillä on toimipisteitä yli 60 ympäri maailmaa [1].

Yritys tarjoaa laajan valikoiman laboratoriotuotteita ja bioprosessiratkaisuja. Valikoimaan kuuluu laitteita, kulutustarvikkeita sekä palveluja, joita hyödynnetään muun muassa biolääketieteen, kemian ja elintarviketeollisuuden sekä akateemisten laboratorioden tarpeisiin. [1.]

Kajaanin toimipisteessä keskitytään pipettien kokoonpanoon sekä pipettien kärkien valmistamiseen. Tuotantosaliissa on useita ruiskuvalukoneita, joilla pipetinkärjet saadaan valmistettua. Kokoonpano-osastolla puolestaan kootaan pipetit. Pipettien osat valmistetaan Helsingin toimipisteessä ja toimitetaan sieltä Kajaaniin kokoonpanoa varten.

2 Kunnossapito

Kunnossapidon tarkoitus on pyrkiä pitämään tehdas jatkuvassa käyttökunnossa korjaamalla vikaantuneita laitteita ja komponentteja sekä ennaltaehkäistä tuotantoa häiritsevät vikaantumistilanteet. PSK:n standardissa 6201 kunnossapito on määritelty seuraavasti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana” [2].

Ennen kunnossapito on ajateltu vain enemmän kustannustekijänä, mutta nykynäkemyksen mukaan asiaa ei enää ajatella näin. Nykyisin kunnossapito nähdään tärkeänä tuotannontekijänä, jonka avulla tuotantolaitoksen kilpailukyky pyritään varmistamaan [3, s. 25].

2.1 Kunnossapitolajit

Kunnossapitolajien luokittelusta on saatavilla useita eri versioita riippuen käytetystä standardista tai kirjallisuudesta. Tässä opinnäytetyössä kunnossapitolajit on jaoteltu seuraavasti: korjaava kunnossapito, ennakoiva kunnossapito sekä parantava kunnossapito. Tämän työn aihe liittyy erityisesti ennakoivaan kunnossapitoon, sillä värähtelymittaukset ovat tärkeä osa ennakoivaa kunnossapitoa. Alla on esitelty jokainen kunnossapitolaji tarkemmin.

2.1.1 Korjaava kunnossapito

Korjaavalla kunnossapidolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla jo ilmenneet viat tai häiriöt poistetaan ja laite palautetaan takaisin toimintakuntoon [4, s. 49]. Äkillinen laitevaurio pysäyttää usein koko prosessin, mikä johtaa tuotannon keskeytymiseen. Näistä odottamattomista seisokeista aiheutuvat taloudelliset menetykset ovat yleensä suurempia kuin itse korjauksen kustannukset. Aiemmin kriittisiin kohteisiin on asennettu varalaitteita, jotta vikatilanteista selvittäisiin nopeammin. Varalaitteiden ylläpito on kuitenkin kallista, eikä niiden toteuttaminen ole aina edes mahdollista. [5, s. 3.]

Korjaava kunnossapito sisältää tyypillisesti seuraavat toimet:

- Vian määrittäminen
- Vian tunnistaminen ja paikallistaminen
- Viallisten osien vaihdon tai korjaamisen sekä mahdolliset väliaikaiset toimet, joilla laite saadaan takaisin käyttöön ennen varsinaista korjausta
- Lopuksi varmistetaan, että laite toimii jälleen suunnitellulla tavalla ja täyttää suorituskykyvaatimukset [4, s. 49.]

2.1.2 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on ehkäistä yllättäviä vaurioita ja käyttökatkoksia suunnitelmallisten huoltojen avulla. Se sisältää sekä säännölliset huollot että koneen kuntoa seuraavat mittaukset, ja sillä on tärkeä merkitys myös työ- ja käyttöturvallisuuden parantamisessa. [5, s. 3.]

Ennakoivan kunnossapidon toimintatavat ovat kehittyneet perinteisistä määräaikaishuolloista kohti oikea-aikaisia huoltoja, joiden ajankohta ja laajuus määräytyvät kunnonvalvonnan mittauksien ja erilaisten tarkastusten perusteella. Mittaava kunnossapito kattaa sekä jatkuvan kunnonvalvonnan että erilliset tarkastukset, joissa koneen kuntoa arvioidaan mittauksien avulla. Mittaavassa kunnossapidossa havaitut poikkeamat johtavat usein myös parantaviin toimenpiteisiin. [5, s. 3.]

Ennakoivaan kunnossapitoon sisältyvät seuraavat asiat:

- Tarkastukset, joilla arvioidaan laitteen yleiskuntoa
- Kunnonvalvonta, jossa koneen tilaa seurataan mittauksien avulla
- Määräystenmukaisuuden tarkastus, varmistetaan että laite täyttää sille asetetut vaatimukset
- Toimintakunnon toteaminen, testataan laitteen toimivuus
- Vikatietojen analysointi, trendien ja historiatietojen tarkastelu [4, s. 5.]

2.1.3 Parantava kunnossapito

Parantavan kunnossapidon tavoitteena on parantaa laitteiden suorituskykyä, käytettävyyttä, luotettavuutta ja turvallisuutta. Sen avulla pystytään poistamaan esimerkiksi suunnitteluvirheistä tai käytössä ilmenneistä heikkouksista johtuvia ongelmia, jolloin laitteiden viat vähenevät ja kunnossapidon tarve pienenee. Parantavaan kunnossapitoon voidaan lukea myös tietyt modernisoinnit ja laiteuusinnat, mikäli niiden taustalla on kunnossapidollinen tarve, kuten käytettävyyden tai luotettavuuden parantaminen. [5, s. 3.]

Parantavan kunnossapidon keskeisiä menetelmiä ovat erilaisten ongelmien juurisyiden tunnistaminen ja niiden poistaminen. Juurisyysanalyysiin perustuvalla tarkastelulla pyritään löytämään vian alkuperäinen syy ja estämään sen uusiutuminen esimerkiksi vaihtamalla kestävämpiä osia, kehittämällä materiaalivalintoja tai parantamalla voitelua. [5, s. 3.]

Parantava kunnossapito voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

1. Komponenttien tai osien vaihtaminen parempiin. Tällöin laitteen suorituskyky ei muutu, mutta käytettävyys ja luotettavuus paranevat. Esimerkiksi vanhojen tasavirtamoottoreiden korvaaminen taajuusohjatuilla oikosulkumoottoreilla kuuluu tähän ryhmään. [4, s. 51.]
2. Uudelleensuunnittelut ja rakenteelliset parannukset. Tarkoituksena poistaa laitteen alkuperäisiä heikkouksia ja lisätään luotettavuutta ilman, että suorituskyky sinänsä muuttuu. [4, s. 51.]
3. Modernisoinnit, joissa laitteen tai tuotantokoneen suorituskykyä parannetaan vastamaan nykyisiä tuotanto- ja laatuvaatimuksia. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi vanhan koneen modernisointia tilanteissa, joissa uuden laitteen hankinta ei ole taloudellisesti perusteltua. [4, s. 51.]

2.2 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvontaa voidaan tehdä sekä laitteen ollessa käynnissä että pysäytettynä. Sillä tarkoitetaan menetelmiä ja toimenpiteitä, joilla seurataan koneiden ja laitteiden teknistä tilaa, jotta mah-

dolliset viat tai poikkeamat havaittaisiin ajoissa. Näiden toimenpiteiden tavoitteena on tukea ennakkoivaa kunnossapitoa, vähentää äkillisiä käyttökatkoksia ja pidentää laitteiden elinkaarta. Värähtelymittaukset ovat yksi yleisimmin käytetyistä kunnonvalvonnan menetelmistä.

Kunnonvalvonta perustui pitkään aistinvaraisiin menetelmiin, kuten koneiden kuuntelemiseen, lämpötilan tunnustelemiseen ja värinän arvioimiseen käsin. Näillä menetelmillä saatiin vain suuntaa antava kuva laitteen kunnosta, minkä vuoksi vikojen havaitseminen oli usein sattumanvaraista. Tekniikan kehittyessä aistinvaraiset menetelmät ovat vähitellen korvautuneet erilaisilla mittausmenetelmillä, jotka tarjoavat tarkempaa ja luotettavampaa tietoa koneiden tilasta. [6, s.13.]

Varsinainen mittausperusteinen kunnonvalvonta alkoi yleistyä teollisuudessa 1960-luvulta lähtien ja 1980-luvulla tähän ruvettiin panostamaan merkittävässä määrin lisää. Nykyään lähes kaikissa teollisuuslaitoksissa käytetään jonkinlaisia mittauslaitteita koneiden kunnon seuraamiseen ja monissa suurissa tuotantolaitoksissa on myös erikseen kunnonvalvontaan keskittyviä asiantuntijoita. [6, s. 13.]

2.2.1 Tekoäly kunnossapidossa ja kunnonvalvonnassa

Teollisten tuotantoympäristöjen digitalisoituessa kunnossapidossa ja kunnonvalvonnassa syntyy yhä suurempia datamääriä, joiden tehokas hyödyntäminen edellyttää kehittyneitä analyysi- ja tiedonkäsittelymenetelmiä. Käytössä olevat tekoälyratkaisut ovat pääosin rajattuihin käyttötarkoituksiin suunniteltuja ja niitä on jo otettu käyttöön kunnossapitoprosesseissa. Tekoälyä käytetään kunnossapidossa tiedon käsittelyyn ja analysointiin. [7.]

Tekoälyn hyödyntäminen kunnossapidossa etenee vaiheittain osana laajempia kokonaisuuksia, joissa yhdistyvät perinteiset kunnossapitomenetelmät ja tekoälypohjaiset ratkaisut. Kunnossapidossa hyödynnetään hybridimalleja, joissa tekoäly toimii perinteisten ratkaisujen rinnalla tukevana osana toimintaa. Tekoälyä sovelletaan kunnossapidossa eri tasoilla, kuten yksittäisten laitteiden kunnonvalvonnassa, tuotantoyksiköiden toiminnassa sekä organisaation laajemmassa päätöksenteossa. [8.]

Kunnonvalvonnassa tekoälyä hyödynnetään mittaus- ja seurantadatan käsittelyssä sekä analysoinnissa. Koneoppimiseen perustuvien ratkaisujen avulla voidaan tunnistaa poikkeamia ja tietyn tyyppisten vikaantumisten syntymistä mittausdatasta. Näiden ratkaisujen avulla voidaan havaita

muutoksia laitteiden toiminnassa jo varhaisessa vaiheessa ja tukea kunnossapidon reagoitua ennen varsinaista vikaantumista. Tekoälyä hyödynnetään ennustavan kunnossapidon yhteydessä osana kunnossapidon suunnittelua ja toteutusta. [9.]

Tekoälyn soveltamiseen liittyy useita haasteita ja rajoitteita, jotka on huomioitava ratkaisujen kehittämisen ja käyttöönotossa. Käyttökohteiden vaatimukset vaihtelevat ja kaikkiin kohteisiin ei ole saatavilla riittävää tai tasapainoista dataa. Tämä vaikeuttaa luotettavien ratkaisujen toteuttamista. Tekoälyratkaisujen integrointi kunnossapitojärjestelmiin edellyttää huolellista validointia ja ratkaisujen käyttöönotto vaatii osakokonaisuuksien yhteensovittamista. Lisäksi laskennan toistettavuuden puutteet eivät lisää luottamusta tekoälyratkaisuihin. Myös datan hallinta muodostaa oman haasteensa, sillä datan määrä ja laatu vaihtelevat ja tiedon pitäminen tasapainoisena muuttuvissa olosuhteissa on vaativaa. [9.] On muistettava, että tekoälypohjaisia ratkaisuja käytettäessä järjestelmien tuottamien tulosten laadun arviointi jää aina lopulta käyttäjän vastuulle [7].

2.2.2 Kunnonvalvonnan tarve

Nykyisin tuotantolinjat on usein suunniteltu ilman varakoneita, jolloin yksittäisen laitteen häiriö vaikuttaa suoraan koko prosessin toimintaan. Samalla tuotantomäärien kasvu on lisännyt seisokkien kustannuksia, mikä korostaa tarvetta havaita viat mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. [6, s. 13.]

Koneiden pyörimisnopeudet ja kuormitukset ovat nousseet, mikä nopeuttaa vikojen kehittymistä ja edellyttää tarkempaa valvontaa. Rakenteiden keventäminen puolestaan tekee koneista alttiimpia värinästä johtuvalle rasitukselle, mikä lisää kunnonvalvonnan merkitystä erityisesti mekaanisesti kuormittuvissa kohteissa. Samalla prosessien säätötarkkuus on parantunut ja laitteet toimivat laajemmilla kierroslukualueilla kuin aiemmin. [6, s. 13.] Tämän vuoksi pelkkien aistinvaraisten havaintojen käyttö ei enää riitä laitteen todellisen kunnon arviointiin.

Huolto- ja käyttöhenkilöstön määrää on monissa laitoksissa vähennetty, mikä on vähentänyt jatkuvan visuaalisen ja kuuntelemalla tehtävän seurannan mahdollisuuksia. Tämän seurauksena mittausperusteinen kunnonvalvonta on noussut keskeiseen rooliin. Lisäksi mittalaitteiden kehittyminen on madaltanut niiden käyttöönottokynnystä. Myös meluisat ja muut haastavat työympäristöt ovat lisänneet tarvetta siirtyä aistinvaraisista tarkastuksista mittauksiin perustuviin tarkastuksiin. [6, s. 13.]

3 Värähtely

Mekaaninen värähtely tarkoittaa rakennetta, konetta tai sen osaa koskevaa liikettä, joka toistuu tietyn tasapainoaseman ympärillä. Värähtelyn synty edellyttää voimaa, joka pitää liikkeen yllä. Tällainen voima voi syntyä esimerkiksi koneen pyörivistä osista, kuten akselin liikkeestä. Vaikka värähtely on useimmiten ei-toivottu ilmiö, sitä hyödynnetään myös tarkoituksellisesti tietyissä koneissa ja laitteissa, kuten tiivistimissä, seuloissa ja kuljettimissa, joissa värähtely on osa laitteen toiminnallista periaatetta. [6, s. 40.]

3.1 Värähtelyn aiheuttajat

Edellisessä kappaleessa kuvattiin värähtelyn syntymisen periaate. Käytännön tilanteissa värähtelyä voivat kuitenkin aiheuttaa useat eri tekijät, jotka vaikuttavat koneen tai rakenteen käyttäytymiseen. Näiden aiheuttajien tunteminen helpottaa värähtelymittausten tulkintaa ja mahdollisten ongelmien tunnistamista. Alla on koottu PSK 5707 -standardin kannalta keskeisimpiä värähtelyn aiheuttajia.

Kaikissa pyörivissä koneissa esiintyy jonkin verran **epätasapainoa** johtuen valmistusepätarkkuuksista. Liiallinen epätasapaino voi syntyä esimerkiksi seuraavista syistä: epätasainen likaantuminen tai kuluminen, tasapainotusmassojen irtoaminen, siiven tai muun osan katkeaminen, puutteellinen tai virheellinen tasapainotus. Epätasapainon kehitys ei ole aina suoraviivaista. Esimerkiksi likaantumisen johtuva epätasapaino voi ajoittain jopa pienentyä, jos kertymän sijainti sattuu hetkellisesti parantamaan tasapainoa. [10.]

Resonanssi syntyy, kun ulkoinen heräte osuu lähelle rakenteen ominaistajuuutta. Tällöin värähtelyn taso kasvaa huomattavasti ja rakenne reagoi herkemmin pieniin häiriöihin. Resonanssin vaikutuksia voidaan vähentää muuttamalla rakenteen ominaisuuksia tai koneen pyörimisnopeutta. [10.]

Linjausvirhe syntyy tyypillisesti asennusvirheiden tai lämpöliikkeiden seurauksena. Oireiden voimakkuus riippuu virheen määrästä sekä käytetystä kytkintyyppistä. Varsinainen linjausvirhe ei yleensä itsestään pahene, mutta se voi aiheuttaa muita vikoja pitkällä aikavälillä. Usein linjausvirhe koostuu sekä kulma- että säteispoikkeaman yhdistelmästä. [10.]

Mekaaninen väljyys aiheuttaa usein epälineaarista värähtelyä, koska väljät osat pääsevät liikkumaan dynaamisten kuormitusten mukana. Jo melko pieni pakkovoima voi synnyttää tyypillisiä väljyydelle ominaisia piirteitä. Väljyys voi esiintyä esimerkiksi löysissä kiinnityspulteissa, tukirakenteiden vaurioissa tai laakeripesän halkeamissa. Väljyys pyrkii kasvamaan käytön aikana ja oireiden voimakkuus kertoo yleensä sen vakavuusasteesta. Vian äkillinen paheneminen voi näkyä voimakkaana muutoksena värähtelytasossa, kuten silloin kun liitos alkaa täysin irrota. [10.]

Vierintälaakerit vikaantuvat tyypillisesti vaiheittain ja vian edetessä oireet voimistuvat ja lisääntyvät. Jos **laakerivikaa** ei havaita ajoissa se voi lopulta vaurioittaa myös akselia. Laakeriviat näkyvät useimmiten kasvavana tärinänä ja epänormaalina käyntiääninä. [10.]

Liukulaakereissa ongelmat liittyvät yleensä kulumiseen ja liialliseen välykseen. Yleisiä syitä ovat puutteellinen voitelu, vääränlainen voiteluöljy, epäpuhtaudet sekä asennus- tai suunnitteluvirheet. Myös virheelliset käynnistys- ja pysäytystavat sekä ylikuormitus voivat vaurioittaa liukulaakereita. [10.]

3.2 Suureet

Koneiden värähtelyä voidaan mitata kolmena eri suureena: siirtymänä, nopeutena ja kiihtyvyytenä. Suureet ja näiden mittayksiköt on esitetty selkeämmin alempana taulukossa (taulukko 1). Suureita voidaan derivoida ja integroida keskenään, jolloin saadaan muunnettua yksi suure toiseksi esimerkiksi kiihtyvyyssignaali nopeussignaaliksi. Siirtymä ilmaisee kohteen sijainnin muutoksen, nopeus kappaleen siirtymän muutoksen ajan funktiona ja kiihtyvyys ilmaisee nopeuden muutoksen tietyssä ajassa. [6, s. 45.]

Kunnonvalvonnassa yleisimmin käytetty mittaussuure on värähtelynopeus, mutta tarvittaessa mitataan myös kiihtyvyyttä ja siirtymää. Nopeutta suositaan syystä, että sen vaste on paras niillä taajuuksilla, joista yleensä ollaan kiinnostuneita. Matemaattisesti nopeus saadaan derivoimalla siirtymä kerran ajan suhteen, kiihtyvyys saadaan derivoimalla siirtymä kaksi kertaa ajan suhteen tai nopeus kerran. [3, s. 227–228.]

Hitaasti pyörivissä koneissa alle 300 rpm käytetään yleensä siirtymää mittasuureena sekä jos oletetaan vikojen ilmenevän matalilla taajuuksilla alle 100 Hz. Tällaisia vikoja voivat olla esimerkiksi hihna- ja linjausvirheet. Jos kuitenkin odotetaan vikoja, jotka ilmenevät korkeammilla taajuuksilla,

kuten vierintälaakeri tai vaihteistovikoja, kannattaa käyttää kiihtyvyyssmittausta myös hitailla koneilla. Nopeakäyntisissä koneissa, kuten yli 9000 rpm pyörivissä, kiihtyvyyssmittaus on yleensä järkevin, koska viat esiintyvät usein korkeilla taajuuksilla, esimerkiksi laakeriviat tai hammasvrat vaihteistossa tai sähkömoottoriviat. Jos nopeakäyntinen kone käyttää liukulaakereita, tällöin pyörrevirta-anturi antaa parhaiten tietoa roottorin käyttäytymisestä ja silloin siirtymämittaus on suositeltavin mittaussuure. [6, s. 50.]

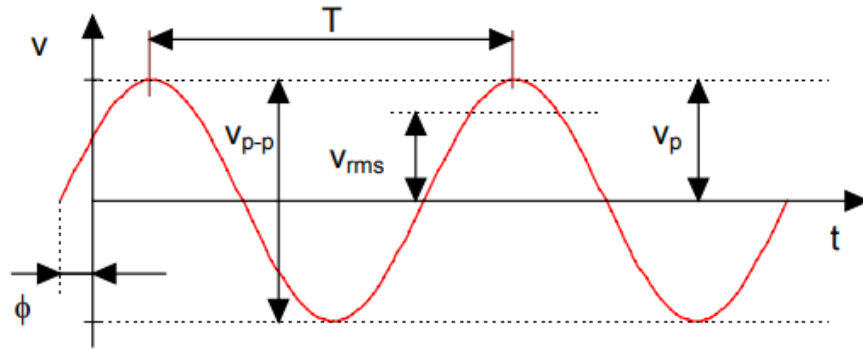
Jokaiselle mittasuureelle on oma anturinsa ja ne poikkeavat rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan selvästi toisistaan. Mitta-antureihin perehdytään paremmin opinnäytetyön myöhemmässä vaiheessa.

Taulukko 1. Euroopassa yleisesti käytettävät värähtelysuureet ja mittayksiköt [3, s. 230.]

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

3.3 Parametrit

Edellä mainittujen mittasuureiden lisäksi on tunnettava myös signaalista saatavat perusparametrit, jotta tuloksia pystytään tulkitsemaan oikein. Alla olevassa kuvassa (kuva 1) on esitetty perusparametrit nopeussignaalin avulla. Samat parametrit ovat myös käytettävissä siirtymälle ja kiihtyvyydelle. [3, s. 231.]



kuva 1. Perusparametrit esitettynä nopeussignaalin avulla [5, s. 8]

T on värähdysaika eli jakso

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

V_p on nopeuden huippuarvo

V_{rms} on nopeuden tehollisarvo

ϕ on vaihekulma

Huippuarvo tarkoittaa aikatasosignaalin suurinta poikkeamaa nollatasoon nähden.

Huipusta huippuun arvo on signaalin korkeimman ja matalimman arvon välinen ero. Se on tavallisesti noin kaksinkertainen verrattuna huippuarvoon.

Tehollisarvo liittyy värähtelyn sisältämään energiaan ja kuvaa hyvin sen vaarallisuutta. Siniaalto saa tehollisarvon kaavalla: huippuarvo / $\sqrt{2}$ ($0,707 \times$ huippuarvo). Signaalin muodon poiketessa sinistä ei myöskään suhdeluku ole enää sama.

Vaihekulma ilmaisee, mihin kohtaan jaksoa värähtely on edennyt suhteessa vertailukohtaan.

4 Värähtelymittaus

Värähtelymittaus on yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä teollisten koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnassa [3, s. 223]. Menetelmää hyödynnetään erityisesti pyörivien koneiden, kuten moottoreiden, pumppujen ja voimansiirtolaitteiden kunnon seurantaan, mutta myös vikojen selvityksessä ja käytönvalvonnassa [6, s. 17]. Oikein toteutettuna värähtelymittaus on usein paras ennakoivan kunnossapidon menetelmä. Tämän avulla alkavat viat voidaan havaita ajoissa ennen vakavampia laiterikkoja. Virheellisesti sovellettuna menetelmä voi kuitenkin johtaa ajan ja resursien tuhlaamiseen [6, s. 17]. Värähtelyvalvonnan suunnittelu ja mittaasetusten määrittäminen on monivaiheinen prosessi, joka edellyttää ymmärrystä valvottavan kohteen toiminnasta, kriittisyydestä tuotannon kannalta sekä taloudellisista reunaehdoista [3, s. 223].

Nykyaikaiset värähtelymittaus- ja analyysijärjestelmät on kehitetty siten, että niiden käyttö ei vaadi käyttäjältä syvällistä matemaattista osaamista. Mittausten onnistuminen perustuu kuitenkin siihen, että mittaaja ymmärtää värähtelyilmiöihin, mittaamiseen ja signaalien käsittelyyn liittyvät keskeiset periaatteet. Ilman tätä perustietoa mittaustulosten tulkinta ja luotettavien johtopäätösten tekeminen on haastavaa. Värähtelymittausten suunnittelussa ja toteutuksessa korostuvat huolellinen työskentely sekä kiinnostus asiaa kohtaan. [3, s. 224].

4.1 Mittausanturit

Värähtelymittauksissa käytettävien anturien tehtävänä on muuntaa mitattavan kohteen mekaaninen värähtely sähköiseksi signaaliksi. Tästä syystä sitä pidetään yhtenä tärkeimmistä osista mitä mittalaitteistoon tulee. Värähtelymittauksissa käytettävät anturit voidaan karkeasti jakaa toimintaperiaatteensa perusteella kolmeen pääryhmään: kiihtyvyy-, nopeus- ja siirtymäantureihin. Vaikka kaikki anturityypit mittaavat värähtelyä, niiden toimintaperiaatteissa on eroja. Alla esitelty jokainen anturi yksityiskohtaisemmin. [3, s. 234.]

4.1.1 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturit ovat värähtelymittauksissa yleisesti käytettyjä antureita ja niitä on saatavilla useissa eri kokoluokissa. Niiden rakenne on tyypillisesti pienikokoinen, eikä anturissa ole liikkuvia

osia, minkä vuoksi mittaustarkkuus ei yleensä heikkene käytön aikana. Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate perustuu pietsosähköiseen ilmiöön, jossa anturin sisällä oleva pietsosähköinen kide ja siihen kiinnitetty massa tuottavat kiihtyvyyteen verrannollisen sähköisen varauksen, kun anturiin kohdistuu värähtelyä. [6, s. 46.]

Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään mitattavaan kohteeseen tavallisimmin magneetilla, ruuvilla tai painamalla. Kiinnitystavalla on merkittävä vaikutus mitattavaan taajuusalueeseen. Tyypillinen mittausalue on noin 2–14 000 Hz, mutta sopivalla anturilla ja riittävän tukevalla ruuvikiinnityksellä voidaan mitata jopa yli 20 000 Hz:n taajuuksia. Kiihtyvyyden mittayksikkönä käytetään m/s^2 tai g :tä ($9,8 m/s^2$). Kiihtyvyyssanturien etuina ovat pieni koko, kevyt rakenne, laaja taajuusalue ja edullinen hinta. Haittapuolia puolestaan ovat rakenteen herkkyys vaurioitumiselle, signaalin häiriöherkkyys sekä anturin asettumisaika, joka voi olla 1–600 sekuntia ennen luotettavan mittauksen aloittamista. Tästä huolimatta kiihtyvyyssanturi on nykyisin ylivoimaisesti eniten käytetty anturi värähtelymittauksissa sen monipuolisuuden ja laajan käyttöalueen vuoksi. [6, s. 46–47.]

4.1.2 Nopeusanturi

Nopeusanturi on rakenteeltaan tyypillisesti suurempi ja raskaampi kuin kiihtyvyyssanturi. Anturin kuoren sisällä on käämi sekä jousien varaan kiinnitetty magneettinen massa, joka värähtelyn aikana liikkuu viiveellä suhteessa anturin runkoon. Tämä liike synnyttää käämiin nopeuteen verrannollisen jännitteen, jota voidaan käyttää suoraan mittaussignaalinä ilman erillistä signaalin muunnosta. Nopeusanturit kiinnitetään mitattavaan kohteeseen tavallisimmin ruuveilla tai magneetilla. Niiden käyttökelpoinen taajuusalue on parhaimmillaan noin 5–2000 Hz, mutta alarajataajuuteen vaikuttavat anturin sisäinen resonanssi sekä rakenteen jäykkyys. Nopeusanturit ovat häiriöherkempiä kuin kiihtyvyyssanturit, ja niihin voivat vaikuttaa muun muassa sähkömagneettiset kentät, lämpötilan vaihtelut sekä anturin suuntaus. Hyvinä puolina nopeusanturit mittaavat suoraan tärinän nopeutta, joka on yleisesti käytetty suure kunnossapidon värähtelymittauksissa ja niiden signaali-häiriösuhde on hyvä. Haittapuolia ovat rajallinen mittaustaajuus, rakenteen herkkyys vaurioille sekä verrattain suuri koko. Nopeusantureiden käyttö on vähentynyt, koska kiihtyvyyssantureilla mitattu signaali voidaan nykyisin integroida mittalaitteissa nopeudeksi. [6, s. 47–48.]

4.1.3 Siirtymäanturi

Siirtymäanturit ovat tyypillisesti pyörrevirta-antureita, joilla mitataan mitattavan kohteen ja anturin välisen etäisyyden muutosta. Anturi mittaa yleensä hyvin läheltä, noin muutaman millimetrin etäisyydeltä ja sitä käytetään erityisesti liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonnassa akselin värähtelyn mittaamiseen. Anturin toiminta perustuu siihen, että sen kärjessä oleva kela synnyttää magneettikentän, joka indusoi pyörrevirtoja mitattavaan ferromagneettiseen pintaan. Kun anturin ja mitattavan pinnan välinen etäisyys muuttuu, muuttuvat myös pyörrevirrat ja tätä kautta kelan jännite, jolloin saadaan siirtymää kuvaava mittaussignaali. Siirtymäanturilla voidaan mitata akselin värähtelyn lisäksi esimerkiksi akselin ratakäyriä, pinnanmuodon muutoksia sekä asentoa ja sitä hyödynnetään muun muassa linjaus- ja liukulaakerivalvonnassa. Anturin etuja ovat pieni koko, kevyt rakenne ja kyky mitata myös staattista etäisyyttä. Haittapuolia ovat ulkoisen virtalähteen tarve sekä mittaustuloksiin vaikuttavat mitattavan pinnan magneettiset ominaisuudet ja käyttö on hankalaa, jos anturia ei ole asennettu kiinteästi. [6, s. 49–50.]

4.2 Mittalaitteet

PSK 5705 -standardissa mittalaitteet ja järjestelmät luokitellaan niiden asennustavan mukaisesti kiinteisiin, puolikiinteisiin tai kannettaviin laitteisiin. Järjestelmä valitaan vikojen oletetun kehittymisnopeuden ja kohteelle asetettujen suojausvaatimusten perusteella. [11.]

Kiinteästi asennettua järjestelmää käytetään kohteissa, joissa vikojen kehittyminen on nopeaa ja laite on herkkä häiriöille. Järjestelmä soveltuu myös tilanteisiin, joissa mittausvälin on oltava lyhyt tai kuormituksen vaihtelu vaikeuttaa vertailukelpoisten mittaustulosten saamista. Tiedonkeruu voidaan toteuttaa joko jatkuvana tai ennalta määritellyin mittausvälein. Jatkovatoimista järjestelmää käytetään laitteiden suojaukseen ja valvontaan silloin, kun vikojen eteneminen vaurioksi voi tapahtua nopeasti, kuten turbiineissa, kompressoreissa ja generaattoreissa. [11.]

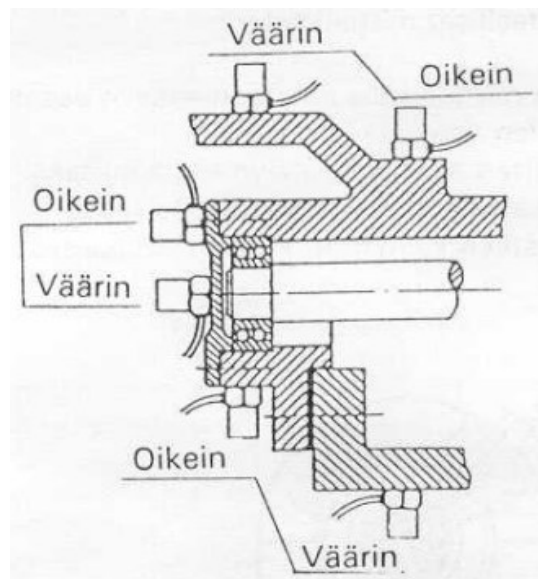
Puolikiinteää järjestelmää käytetään laitteissa, joihin pääsy on hankalaa. Tällöin anturit asennetaan laitteeseen pysyvästi ja johdotetaan mittauspisteeseen, jossa mittaukset suoritetaan kannettavalla mittauslaitteella. Järjestelmää voidaan käyttää myös kohteissa, joissa mittausten luotettavuutta halutaan paremmaksi kuin siirrettävää anturia käytettäessä. [11.]

Kannettavaa mittalaitetta ja siirrettävää anturia käytetään kohteissa, joihin pääsy on helppoa sekä turvallista ja joissa vikojen kehittyminen on hidasta suhteessa mittausväliin. Kannettavilla

mittalaitteilla voidaan lisäksi kerätä täydentävää mittaustietoa kohteista, joita valvotaan myös kiinteästi asennetuilla järjestelmillä. [11.] Tässä opinnäytetyössä tarkasteltavat laitteet mitataan jatkossa kannettavalla mittalaitteella.

4.3 Mittauspisteen valinta

Mittauspiste valitaan siten, että värähtelyä aiheuttava kohde ja mittausanturi sijaitsevat rakenteellisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Korkeataajuinen värähtely vaimenee kulkiessaan rajapintojen läpi, minkä vuoksi värähtelyn ja mittausanturin välissä olevien rajapintojen määrä tulisi pitää mahdollisimman pienenä. Pyörivien osien aiheuttama värähtely siirtyy rakenteeseen laakerien kautta, joten mittauspisteet sijoitetaan yleensä laakerointien yhteyteen (kuva 2). Värähtelymittaukset tehdään pääosin säteissuuntaan ja tarvittaessa mittauksia suoritetaan myös akselin suuntaisesti. [12.]



Kuva 2. Anturin paikan valinta värähtelymittauksissa [12]

Minimimääränä mittauspisteitä pidetään yhtä mittauspistettä kutakin laakeria kohden. Kunnonvalvontamittauksissa tavoitteena on kuitenkin tehdä mittaukset jokaisen laakerin kohdalta useassa mittaussuunnassa, jotta koneen värähtelyistä saadaan mahdollisimman kattava kuva. Mittauspistettä valittaessa tulee ottaa huomioon myös se, että käytettävissä oleva tila sallii anturin asianmukaisen asennuksen sekä tarvittavan suojauksen. Anturiin ei myöskään saa kohdistua ym-

päristöstä sallittua suurempia kiihtyvyyksiä, lämpötiloja tai muita rasituksia. Lisäksi on huolehdittava, jos anturit asennetaan kiinteästi, etteivät ne haittaa laitoksen käyttöä tai huoltotoimenpiteitä. [6, s. 53–54.]

Mittauspisteet ovat tärkeä merkitä selkeästi, jotta mittaukset voidaan tehdä aina samasta kohdasta ja samalla tavalla. Suositeltavaa on käyttää kohteeseen kiinnitettäviä mittausnippoja, joihin anturi voidaan kiinnittää. Monissa tapauksissa myös mittauspintojen huolellinen hionta riittää, kunhan pinta on riittävän tasainen ja laaja magneettikiinnityksen varmistamiseksi. Pelkkä merkintä maalilla tai kynällä ei ole pitkäikäinen ratkaisu, koska nämä kuluvat tai jäävät liian peittäviksi ajan myötä. Se ei myöskään takaa mittauspinnan tasaisuutta, minkä vuoksi se soveltuu huonosti pysyviin mittauspisteisiin. [6, s. 54.]

4.4 Valvontamenetelmät

Yleisimmät värähtelyvalvonnassa käytettävät menetelmät perustuvat tunnuslukujen kehityksen eli trendin seurantaan sekä taajuus- eli spektrianalyysiin perustuvaan valvontaan. Näiden menetelmien avulla seurataan värähtelyn muutoksia ja arvioidaan koneiden kunnon kehittymistä käytön aikana. Kunnonvalvonta toteutetaan mittaamalla värähtelyä eri suureina ja käytettyjen valvontamenetelmien sekä toteutustavan valinnalla on keskeinen vaikutus koneen kunnon muutosten havaitsemiseen. Tässä luvussa tarkastellaan yleisimpiä käytössä olevia valvontamenetelmiä. [3, s. 282.]

Kokonaistasovalvonta on yksinkertainen valvontamenetelmä, mutta sen herkkyys useiden vikojen havaitsemisessa on rajallinen. Akselinvärähtelyn kokonaistason valvonnassa seurataan tyypillisesti värähtelyn huippuarvoa, huipusta huippuun arvoa tai kahden värähtelysignaalin vektorisumman maksimiarvoa. Pelkän kokonaistason seuranta ei aina riitä antamaan kattavaa kuvaa koneen kunnosta, minkä vuoksi valvontaa on tarvittaessa täydennettävä muilla värähtelyvalvontamenetelmillä. [10.]

Tunnuslukuvalvonta on menetelmä, jossa laitteen kuntoa seurataan mittaussignaaleista laskettujen tunnuslukujen avulla. Yleisimmät tunnusluvut ovat löydettävissä PSK 5706 -standardista. Menetelmässä mittausdata tiivistetään yhdeksi tai useammaksi tunnusluvuksi, joiden avulla kuvataan laitteen toimintakunnon nykytilaa ja sen muutoksia ajan kuluessa. Tunnuslukujen kehitystä tarkastellaan trendinä, jolloin huomio kohdistuu muutoksiin eikä yksittäisiin mittaustuloksiin.

Tunnuslukuvalvontaa voidaan toteuttaa sekä kunnonvalvontamittauksiin että prosessiparametreihin perustuen. Prosessiparametrien avulla voidaan täydentää laitteen kunnon seuranta ja tukea poikkeamien havaitsemista. Menetelmän käyttö edellyttää mittausten ja tunnuslukujen huolellista suunnittelua sekä hälytysrajojen määrittämistä. [3, s. 282–283.]

Spektrivalvonta ja spektrianalyysi ovat viantunnistuksessa yleisesti käytettyjä menetelmiä, joissa värähtelysignaali muunnetaan taajuustasoon. Tämä toteutetaan FFT-laskennan avulla muodostamalla amplitudispektri, joka esittää värähtelyn voimakkuuden eri taajuuksilla. Saatua taajuus- ja amplituditietoa hyödynnetään koneen eri osien kunnon arvioinnissa. Spektrivalvonnan etuna on, että se mahdollistaa vikojen havaitsemisen aikaisessa vaiheessa tilanteissa, joissa kokonaisvärähtelytaso ei vielä muutu merkittävästi. Tästä syystä spektrivalvontaa käytetään vikatyypeissä, joissa kokonaisarvoihin perustuva seuranta ei ole riittävän luotettava. [3, s. 285.]

Aikatasovalvonta tarkoittaa mitatun signaalin aikamuodon vertailua ennalta määritettyyn hälytysrajaan. Hälytysrajana voidaan käyttää esimerkiksi amplitudiarvoa tai referenssimittauksen perusteella muodostettua rajaa. Yleensä yksittäisten aikatason signaalien tarkastelu ei ole tarkoituksenmukaista, koska tällöin seuranta kohdistuu käytännössä signaalin huippuarvoihin. [3, s.287.]

Tahdistetulla aikakeskiarvotuksella voidaan paikallistaa toistuvia ilmiöitä, kun värähtelysignaali tahdistetaan mitattavan akselin pyörimisnopeuteen. Tällöin keskiarvotuksen jälkeen signaalista voidaan erottaa toistuvat tapahtumat paremmin kuin käsittelemättömästä aikatason signaalista. Menetelmän avulla pystytään paikallistamaan hammaspyörävaurio jopa hammaskohtaisesti. [3, s. 287.]

Perinteiset värähtelyvalvontamenetelmät, kuten kokonaisvärähtelytason ja amplitudispektrin seuranta, eivät aina anna riittävän aikaisia tai luotettavia merkkejä alkavista vioista. Erityisesti vierintälaakereissa alkavat vauriot voivat olla niin heikkoja, että ne peittyvät muun värähtelyn alle. Verhokäyrä- ja PeakVue-valvonnalla voidaan havaita varhaisessa vaiheessa iskumaisia herätteitä aiheuttavia vikoja. Näissä menetelmissä spektrissä näkyvät huiput viittaavat herätteisiin ja taajuuden perusteella vika voidaan paikallistaa. Menetelmiä käytetään yleisesti vierintälaakereiden kunnonvalvonnassa sekä voitelutilan valvonnassa. [3, s. 286.]

Muita käytettäviä valvontamenetelmiä edellä mainittujen lisäksi on vektorivalvonta, profiilivalvonta, voitelun valvonta, ylös ja alasajovalvonta sekä korkeataajuiset valvontamenetelmät eli akustinen emissio, iskusysäys ja ultraääni [13].

4.5 Mittauksen suunnittelu

Värähtelyvalvonnan suunnittelun tavoitteena on määrittellä toimintamalli, jonka avulla koneiden kuntoa voidaan seurata luotettavasti ja vertailukelpoisesti. Suunnitteluvaiheessa tehdyt valinnat vaikuttavat suoraan mittaustulosten laatuun, tulkittavuuteen sekä valvonnan tehokkuuteen.

Tässä luvussa käsitellään värähtelyvalvonnan suunnittelun keskeiset periaatteet PSK 5705 -standardin mukaisesti. Suunnittelu kattaa valvottavien kohteiden valinnan, mittausten teknisen toteutettavuuden arvioinnin, valvontamenetelmien määrittelyn sekä mittausjärjestelmän ja mitausvälien suunnittelun. Lisäksi suunnittelussa huomioidaan mittaustulosten tulkintaa ohjaavat raja-arvot. Näiden periaatteiden avulla varmistetaan, että värähtelyvalvonta kohdistuu tarkoituksenmukaisiin kohteisiin ja tukee ennakoivaa kunnossapitoa. [11.]

Luvussa esitetyt periaatteet muodostavat teoreettisen perustan työn suorittavalle osuudelle, jossa värähtelyvalvonnan suunnittelua sovelletaan käytännössä laitekartoituksen, kriittisyysanalyysin ja mittaussuunnitelman laatimisen yhteydessä.

4.5.1 Valvottavien kohteiden valinta ja tekninen toteutettavuus

Värähtelyvalvonnan suunnittelu alkaa valvottavien kohteiden kartoituksella ja määrittämisellä. PSK 5705 -standardin mukaan valvonta kohdistetaan ensisijaisesti laitteisiin, joiden vikaantumisen merkittävä vaikutus tuotantoon, turvallisuuteen tai kunnossapidon kustannuksiin. Tässä työssä painopiste asetettiin tuotantoon kohdistuviin vaikutuksiin.

Värähtelymittauksiin perustuva kunnonvalvonta on teknisesti toteutettavissa, kun vikaantumiseen liittyy mitattavia ja ennalta tunnistettavia muutoksia värähtelyssä. Lisäksi vikaantumismekanismiin tulee edetä siten, että vian kehittymistä voidaan seurata ja ennakoida mittaustulosten perusteella. Mittausten on myös oltava toteutettavissa riittävän tiheästi suhteessa vian etenemiseen, jotta vaurio havaitaan ennen häiriötä. Teknisen toteutettavuuden arviointi voidaan tehdä

aiempaan kokemukseen perustuen tai hyödyntämällä systemaattisia menetelmiä, kuten vika- ja vaikutusanalyysiä. [11.]

4.5.2 Valvontamenetelmien ja raja-arvojen määrittely

Värähtelyvalvonnassa käytettävät menetelmät on esitelty työn aiemmassa teoriaosuudessa ja tässä luvussa niitä tarkastellaan PSK 5705 -standardin näkökulmasta osana mittausten suunnittelua. Kullekin laitteelle määritellään tarkoituksenmukainen kunnonvalvonnan taso sen ominaisuuksien ja valvonnan tavoitteiden perusteella. Arvioinnissa ratkaistaan, riittääkö laitteen kunnon seurantaan kokonaistasoon perustuva valvonta vai tarvitaanko tarkempia menetelmiä, kuten tunnusluku- tai spektrivalvontaa. Tarkempia valvontamenetelmiä hyödynnetään silloin, kun pelkän kokonaistason perusteella ei voida luotettavasti arvioida vian kehittymistä. [11.]

Mikäli laitteen vikaantumismekanismit ovat sellaisia, että värähtelyvalvonta ei yksinään anna riittävää tietoa laitteen kunnosta tai vian kehittymisestä, valvontaa täydennetään muilla kunnonvalvontamenetelmillä, kuten lämpökuvauksella tai voiteluaineanalyysillä. Täydentäviä menetelmiä käytetään myös vianmäärityksen ja tehtyjen johtopäätösten varmentamiseen. [11.]

Laitteiden kunnossa tapahtuvien muutosten havaitsemiseksi värähtelyvalvonnassa määritellään kullekin tunnusluvulle useampi hälytysraja. Alempi hälytysraja toimii varoitusrajana, jonka ylittyminen edellyttää kunnonvalvonnan tehostamista, poikkeaman syyn selvittämistä sekä tarvittaviin korjaustoimenpiteisiin varautumista. Ylempi hälytysraja kuvaa vauriorajaa, jonka ylittyminen merkitsee vakavaa vauriovaaraa ja edellyttää laitteen korjaamista viipymättä tai tarvittaessa laitteen välitöntä pysäyttämistä. Näiden lisäksi voidaan määrittää huomautusraja, joka ilmaisee normaalista poikkeavan mutta vielä ei-kriittisen tilan. [11.]

Raja-arvojen määrittely perustuu valmistajan suositukseen, konetyyppikohtaisiin värähtelystandardeihin sekä kunnonvalvonnasta saatuun kokemukseen [11]. Tässä työssä raja-arvojen määrittelyssä on hyödynnetty standardia ISO 10816-1, vaikka se on sittemmin kumottu. Standardia käytettiin, koska se sisältää soveltuvia ohjearvoja pienille koneille, joita tarkasteltiin tässä työssä.

4.5.3 Mittausjärjestelmän valinta ja mittausvälit

Värähtelymittaukset voidaan toteuttaa kiinteillä, puolikiinteillä tai kannettavilla mittausjärjestelmissä. Kullekin kohteelle soveltuva järjestelmä valitaan mahdollisten vikojen kehittymisnopeuden sekä kohteen kriittisyyden ja suojaustarpeen perusteella. Mittausjärjestelmä valitaan siten, että se tuottaa laitteen kunnon arviointiin tarvittavan mittaustiedon oikea-aikaisesti ja luotettavasti. [11.]

Mittausväli määritellään valvontamenetelmän sekä kohteen kriittisyyden, häiriöherkkyyden, vikojen kehittymisnopeuden ja käytettävissä olevan kunnossapitohistorian perusteella. Mittausvälejä voidaan tukea kokemusperäisillä suosituksilla, joita tarkennetaan tarpeen mukaan valvonnan aikana. [11.]

Mittaukset suoritetaan myös aina huolto- tai korjaustoimenpiteiden jälkeen, jotta voidaan varmistaa huollon onnistuminen ja määrittää uudet vertailuarvot laitteen kunnonseuranta varten. Mikäli valvottavissa suureissa havaitaan merkittäviä muutoksia, mittaustoimintaa tehostetaan tilapäisesti esimerkiksi lyhentämällä mittausväliä tai täydentämällä käytössä olevaa mittausjärjestelmää. Kunnonvalvonnan alkuvaiheessa mittausväli valitaan usein suosituksia lyhyemmäksi ja kokemuksen karttuessa mittausvälejä voidaan muuttaa. Näin varmistetaan, että mittausväli tukee laitteen kunnon luotettavaa seuranta eri elinkaaren vaiheissa. [11.]

4.5.4 Mittaustoiminnan järjestely

Mittaustoiminnan järjestelyssä on huomioitava useita toisiinsa liittyviä tekijöitä, jotta toiminta olisi johdonmukaista, luotettavaa ja jatkuvasti kehittyvää. Keskeisessä roolissa on henkilöstön koulutus kaikilla organisaatiotasolla, sillä osaaminen vaikuttaa suoraan mittausten laatuun ja tulosten hyödyntämiseen. Toimivat ja yhtenäiset mittauskäytännöt tulee laatia ja dokumentoida selkeästi ja samalla on määriteltävä mittaustoiminnan kehitys- ja suoritusvastuut. Lisäksi mittausohjelmistojen ylläpidosta sekä laitteisiin liittyvien tietojen keräämisestä on nimettävä vastuuhenkilöt. Mittaustulosten tulkinnan ja hyödyntämisen tulee olla systemaattista. Tulokset on saatettava tarkasteltaviksi mahdollisimman pian mittausten jälkeen. Välitön tarkastelu ei kuitenkaan aina ole mahdollista, sillä analysointi voi viedä aikaa. Raportoinnin tulee olla selkeää ja sen yhtey-

dessä on varmistettava toimenpidevastuun siirtyminen oikeille tahoille. Palautetiedon hyödyntäminen on tärkeä osa mittaustoiminnan jatkuvaa kehittämistä. Historiatiedon tallentaminen puolestaan mahdollistaa pitkän aikavälin vertailun ja kehityssuuntien analysoinnin. [11.]

4.5.5 Tiedonkeruu, raportointi ja seuranta

Tiedonkeruun tulee perustua ennalta laadittuun mittaussuunnitelmaan, jonka mukaisesti mittaustulokset kerätään, tallennetaan ja saatetaan analysoitaviksi. Mittaustuloksia seurataan vertaamalla niitä asetettuihin raja-arvoihin sekä aikaisempiin mittaustuloksiin, jotta muutokset laitteen kunnossa voidaan havaita ajoissa. Kerätty tieto tulee olla helposti saatavilla ja vertailukelpoisessa muodossa, mikä tukee sekä lyhyen että pitkän aikavälin seuranta. [11.]

Raportoinnin tehtävänä on esittää mittaustulokset selkeästi ja tarkoituksenmukaisesti niille tahoille, jotka vastaavat päätöksenteosta ja kunnossapitotoimenpiteistä. Seurannan avulla arvioidaan mittaustoiminnan toimivuutta, mittaustarpeiden ajantasaisuutta sekä asetettujen raja-arvojen sopivuutta. Seurantatietoa hyödynnetään mittauskäytäntöjen ja kunnonvalvontatoiminnan kehittämisessä. [11.]

4.5.6 Mittaustulosten analysointi

Mittaustulosten analysoinnin perusteella tehdään johtopäätökset laitteen kunnosta ja mahdollisten vikojen vakavuudesta. Johtopäätökset toimivat perustana päätöksille, jotka voivat koskea esimerkiksi käytön jatkamista, seurantavälin tiivistämistä, lisämittausten suorittamista tai kunnossapitotoimenpiteiden suunnittelua. [11.]

Suoritettujen toimenpiteiden jälkeen on tärkeää arvioida niiden vaikutus ja varmistaa, että asetetut tavoitteet on saavutettu. Mittaustulokset, havainnot ja tehdyt toimenpiteet dokumentoidaan, jotta tietoa voidaan hyödyntää jatkossa kunnossapidon suunnittelussa ja mittaustoiminnan kehittämisessä. Näin mittaustieto tukee järjestelmällistä päätöksentekoa ja jatkuvaa parantamista. [11.]

5 Värähtelymittausten suunnittelu

Suorittavassa osuudessa edellä kuvattu värähtelymittausten suunnittelu toteutetaan käytännössä. Ensimmäisessä vaiheessa kartoitetaan laitteet, minkä jälkeen valituille laitteille tehdään värähtelyvalvonnan tarpeen arviointi. Tämän perusteella määritetään, onko laitteelle tarpeellista suorittaa värähtelymittauksia. Kun lopullinen valvottavien laitteiden määrä on selvillä, määritetään laitteille mittauspisteet, joista värähtelyt mitataan. Viimeisenä vaiheena laaditaan mittaus-suunnitelma, jota noudatetaan jatkossa värähtelymittauksia suorittaessa.

5.1 Laitteiden kartoitus

Laitteiden kartoitusta lähdettiin tekemään aiemman värähtelymittauslistan pohjalta. Listaan li-
sättiin muutamia uusia kohteita, joita ei ole aiemmin mitattu ja vastaavasti poistettiin laitteita, kuten tehdasrakennuksen katolla sijaitsevat lauhdutuspuhaltimet sekä yksittäisille tuotan-
tosoluille ja roboteille kuuluvat alipainepumput. Nämä jätettiin pois, koska kartoituksessa halut-
tiin keskittyä suurempiin kokonaisuuksiin ja valita erityisesti sellaiset laitteet, jotka ovat koko teh-
taan toiminnan kannalta kriittisempiä.

Kartoituskierron tehtiin yhdessä kokeneen kunnossapitoasentajan kanssa. Kierroksen tuloksena saatiin ajantasainen lista laitteista ja niiden sijainneista. Laitteita kertyi yhteensä 26 kappaletta. Vaikka määrä on melko suuri, moni laite on samaa tyyppiä ja käytössä eri kohteissa. Tämän ansi-
osta jokaiselle laitteelle ei tarvitse määrittää erikseen mittapisteitä, vaan samoja voidaan hyödyn-
tää useammassa eri kohteessa.

5.2 Värähtelyvalvonnan tarpeen arviointi

Kartoituksen jälkeen vuorossa oli laitteiden arviointi. Arvioinnin perusteella päätettiin, onko vä-
rähelyvalvontaa tarpeellista suorittaa jokaisen laitteen kohdalla. Arviointia varten koottiin Excel-
taulukko, johon määritettiin kriteerit, jotka vaikuttavat päätöksentekoon. Taulukon rakenne pe-
rustuu pääosin PSK 5705 - ja PSK 6800 -standardeihin.

Taulukko on jaettu kolmeen kategoriaan: turvallisuus- ja ympäristöriskit, tuotannonmenetyksen kustannukset sekä kunnossapidon kustannukset. Jokaiselle kategorialle on määritelty omat arviointitekijänsä. Esimerkiksi tuotannonmenetyksen kustannusten arvioinnissa yhtenä tekijänä on laitteen kriittisyys. Lisäksi jokaiselle tekijälle on asetettu painoarvo ja kerroin, joiden perusteella pisteytys muodostuu. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on esitetty valintakriteeri.

Alla oleva kuva (kuva 3) havainnollistaa edellä kuvattua taulukkoa ja esimerkkinä siinä on esitetty tuotannonmenetyksen kustannuksia käsittelevä osio. Liitteessä 1 esitetty koko taulukko.

Laitte: 3TF-2.1 Tuloilma puhallin puhdistila / 3PF-2.1 Poistoilma puhallin puhdistila				
Kohde	Tekijä	Painoarvo	Kerroin	Valintakriteeri
Tuotannonmenetyksen kustannukset	Kriittisyys	20	0	Ei vaikutusta tehtaan tai osaston toimintaan
			2	Voi mahdollisesti johtaa tuotannon häiriintymiseen tai seisokkiin
			4	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa tuotannonmenetystä
			8	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa laitoksen tai tuotantosolun täydellisen pysähdyksen
	Laatu	10	0	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta laatuksustannuksia
			2	Laitteen virheellinen toiminta voi aiheuttaa laadun heikkenemistä ja siihen liittyviä kustannuksia
4			Laitteen toimimattomuus aiheuttaa laatuksustannuksia	

Kuva 3. Värähtelyvalvonnan tarpeen arviointi

Arvioinnin tuloksena lopulliseen värähtelyvalvontaan valikoitui 22 laitetta. Osa tarkastelussa olleista laitteista jätettiin listauksen ulkopuolelle, koska ne eivät olleet tuotannon kannalta kriittisiä tai niiden huolto on ulkoistettu. Ulkoistettujen huoltojen yhteydessä huoltoliike tekee värähtelymittaukset.

Arviointitaulukossa suurimman painoarvon sai tuotannonmenetyksen kustannuksia kuvaava osio. Tämä oli luontevaa, sillä kartoitusta aloitettaessa toimeksiantajan kanssa käytiin läpi yleiset tavoitteet ja todettiin, että valvonta on tarkoituksenmukaista kohdistaa tuotannon kannalta kriittisiin laitteisiin. Näillä laitteilla tarkoitetaan käytännössä niitä, jotka mahdollisen vikaantumisen tai rikkoontumisen sattuessa pysäyttävät tuotannon tai aiheuttavat siihen häiriöitä ja ongelmia.

5.3 Mittauspisteiden määrittäminen

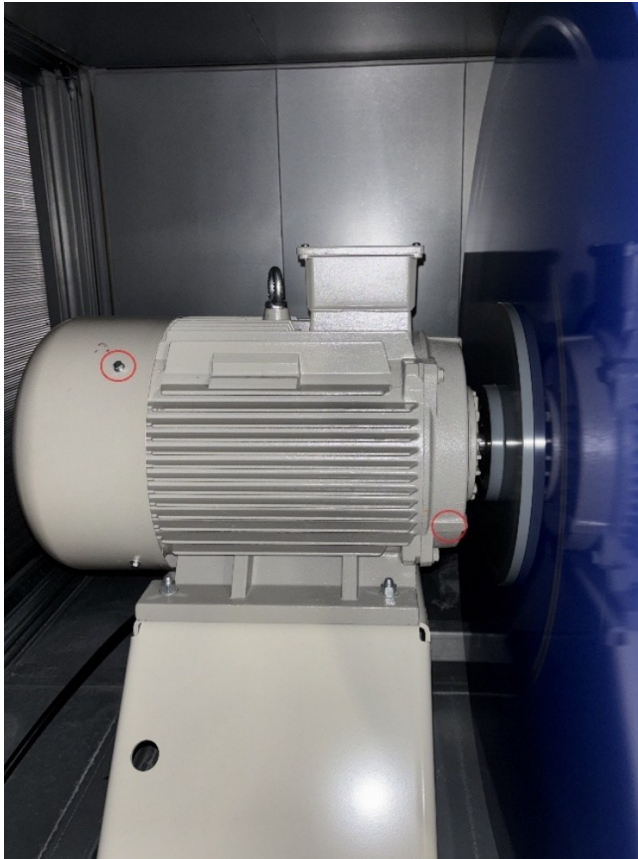
Kun valvottavat laitteet oli määritetty, työn seuraava vaihe oli käydä jokainen laite erikseen läpi ja merkitä niihin mittapisteet, joista värähtelymittaukset jatkossa suoritetaan. Kuten aikaisemmin mainittiin, mittauspisteiden määrittäystä ei tarvinnut tehdä jokaiselle 22 laitteelle erikseen, koska toimeksiantajalla on käytössä useita samanlaisia laitteita. Määrittely tehtiin yhden laitteen osalta, minkä jälkeen samat mittapisteet voitiin merkitä myös muihin vastaaviin laitteisiin tämän pohjalta.

Mittauspisteet on valittu PSK 5702 -standardin ohjeiden mukaisesti. Pisteet on sijoitettu mahdollisimman lähelle värähtelyn lähdettä, laakerointikohtiin. Pisteitä määrittäessä asiantuntija suosittelee mittausnippojen käyttöä, sillä niiden avulla värähtelyt saadaan parhaiten esiin. Tämän suosituksen pohjalta mittausnipat valittiin myös käyttöön tässä työssä. Mittauspisteissä hyödynnetään kahta erilaista nippaa: kierteellistä sekä liimalla mitattavan kohteen runkoon kiinnitettävää nippaa. Alla on esitetty kuva nipoista (kuva 4).



Kuva 4. Mittausnipat

Seuraavaksi alla on kuvat (5–16) mitattavista kohteista mittapisteineen. Mittapisteet etenevät moottorin vapaasta päästä kohti käyttöpäätä ja toimilaitetta. Mittapisteet ovat nimetty seuraavalla periaatteella esimerkiksi 1PU1.1 MO1 NDE, 1PU1.1 MO2 DE ja 1PU1.1 PU3 DE.



Kuva 5. TK05-TK06

Mittapisteet:

- TK05 TF01 MO1 NDE
- TK05 TF01 MO2 DE

Moottorin vapaaseen pätyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa ja käyttöpäähän liimannippa. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on neljä kappaletta ja samat pisteet pätevät jokaiselle laitteelle.



Kuva 6. 3TF/3PF-1.1-2.1

Mittapisteet:

- 3TF-1.1 MO1 NDE
- 3TF-1.1 MO2 DE

Tässä molempiin päihin laitetaan liimanipat. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on neljä kappaletta ja samat pisteet pätevät jokaiselle laitteelle.



Kuva 7. 3TF/PF-3.1

Mittapisteeet:

- 3TF-3.1 MO1 NDE
- 3TF-3.1 MO2 DE

Moottorin molempiin päihin laitetaan liimanipat. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on kaksi kappaletta ja samat pisteet pätevät molemmille laitteille.



Kuva 8. 5PU-1.1 ja 1.2

Mittapisteet:

- 5PU-1.1 MO1 NDE
- 5PU-1.1 MO2 DE
- 5PU-1.1 PU3 DE

Moottorin vapaaseen ja käyttöpähän asennetaan kierteelliset nipat. Käyttöpäätä muokataan siten, että olemassa olevaan reikään tehdään kierteet ja siihen asennetaan noin 60 mm:n tanko, jonka päähän kierretään nippa. Pumpun käyttöpähän asennetaan liimanippa. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on kaksi kappaletta ja samat pisteet pätevät molemmille laitteille.



Kuva 9. 5PU-1.3 ja 1.4

Mittapisteeet:

- 5PU-1.3 MO1 NDE
- 5PU-1.3 MO2 DE

Moottorin vapaaseen päättyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa ja käyttöpähän liimannippa. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on kaksi kappaletta ja samat pisteet pätevät molemmille laitteille.

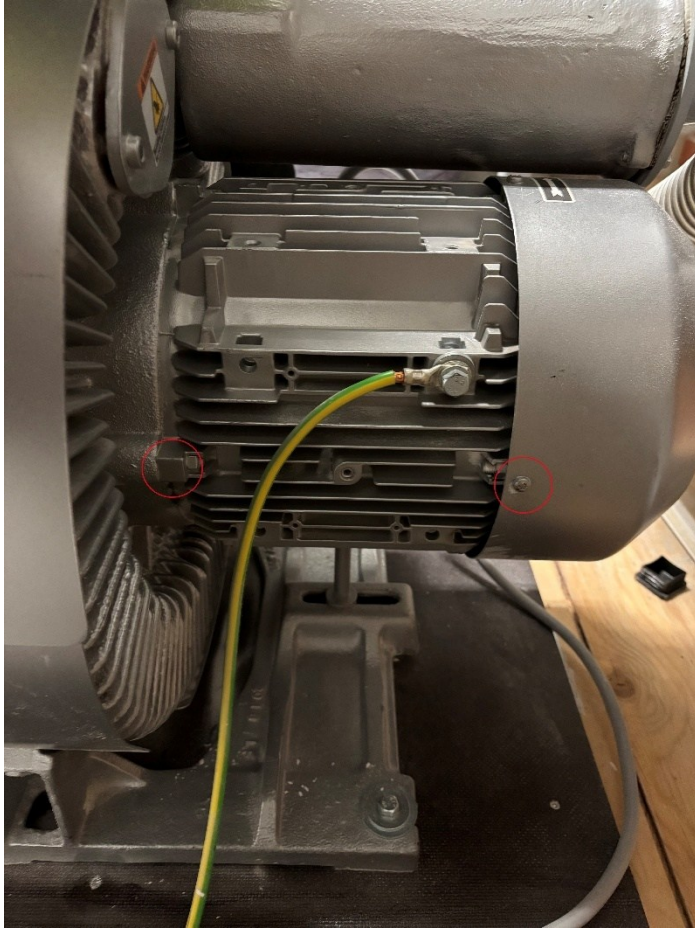


Kuva 10. 5PU-2.1 ja 2.2

Mittapisteet:

- 5PU-2.1 MO1 NDE
- 5PU 2.1 MO2 DE
- 5PU-2.1 PU3 DE

Moottorin vapaaseen pätyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa. Moottorin sekä pum-
pun käyttöpäihin asennetaan liimanipat.



Kuva 11. JP19.5

Mittapisteet:

- JP19.5 MO1 NDE
- JP19.5 MO2 DE

Moottorin vapaaseen päättyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa ja käyttöpäähän asennetaan liimanippa.

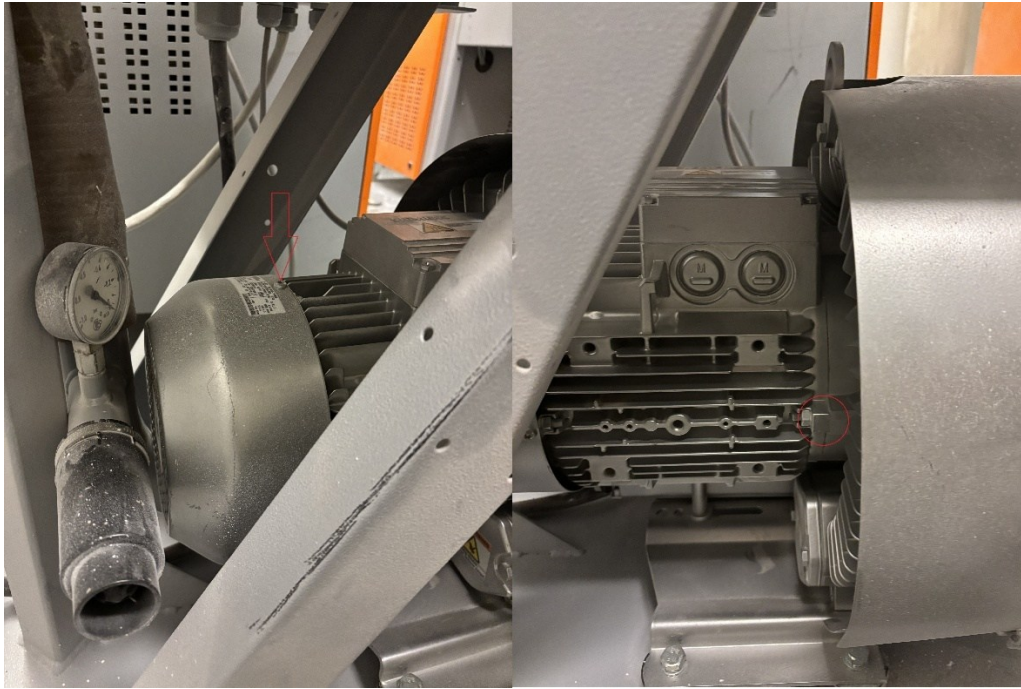


Kuva 12. JP19.6

Mittapisteet:

- JP19.6 MO1 NDE
- JP19.6 MO2 DE

Moottorin vapaaseen pätyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa ja käyttöpähän asennetaan liimanippa.



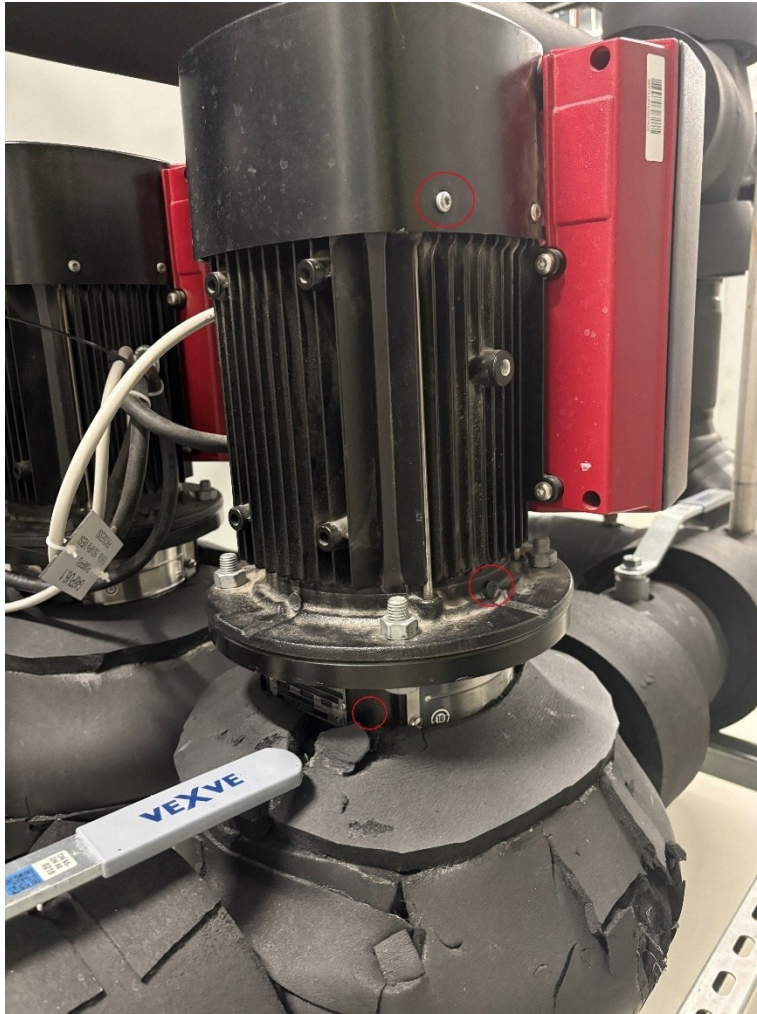
Kuva 13. JK11F65

Mittapisteeet:

- JK11F65 MO1 NDE
- JK11F65 MO2 DE

Moottorin vapaaseen päätyyn pultin tilalle laitetaan kierteellä oleva nippa ja käyttöpäähän asennetaan liimanippa.

Tässä kohteessa vapaan päädyn mittaus joudutaan suorittamaan pystysuunnassa johtuen pal-
kista, joka estää vaakasuunnassa mittaamisen. Tämä on huomioitava analysoinnissa, sillä pysty-
suuntainen rakenne on jäykempi ja voi vaimentaa värähtelytasoa verrattuna vaakasuuntaiseen
mittaukseen.



Kuva 14. G46-PU6.1 ja 6.2

Mittapisteet:

- G46-PU6.1 MO1 NDE
- G46-PU6.1 MO2 DE
- G46-PU6.1 PU3 DE

Moottorin vapaaseen ja käyttöpäähän asennetaan kierteelliset nipat. Käyttöpäätä muokataan siten, että olemassa olevaan reikään tehdään kierteet ja siihen asennetaan noin 60 mm:n tanko, jonka päähän kierretään nippa. Pumpun käyttöpäähän asennetaan liimanippa. Samoja moottoreita toimeksiantajalla on kaksi kappaletta ja samat pisteet pätevät molemmille laitteille.



Kuva 15. TK TF01

Mittapiste:

- TK TF01 MO1 NDE

Mittaus tehdään ympyröidystä kohdasta. Pultinkanta on vain vaihtoehtoinen piste, jos suoraan moottorin kyljestä ei saada mitattua johtuen rivojen kapeasta välistä. Valmistajan ohjeistuksen mukaan värähtelymittaus voidaan suorittaa moottorin kiinnikkeistä aina moottorin tukilevyyn saakka.



Kuva 16. TK PF01

Mittapiste:

- TK PF01 MO1 NDE, sama piste kuin TK TF01:llä

Kohteen tilan ja saavutettavuuden ollessa rajalliset on perusteltua harkita kiinteän kiihtyvyyssanturin asentamista laitteeseen. Anturilta vedetään kaapeli laitteen ulkopuolella sijaitsevaan jakolaatikkoon, josta värähtelydata voidaan kerätä BNC-liitännän kautta.

5.4 Mittaussuunnitelma

Mittaussuunnitelmaa lähdettiin rakentamaan PSK 5705 -standardin pohjalta. Standardissa on määritelty, mitä suunnitelman tulisi sisältää: Käytettävät valvontamenetelmät, raja-arvot, mittausväli, käytettävä mittausjärjestelmä, mittaustoiminnan järjestely, mittauksen dokumentointi ja raportointi sekä seuranta. Tässä osiossa perustellaan miksi, suunnitelmassa on päädytty tiettyihin ratkaisuihin.

Suunnitelman tavoitteena on koneiden yleiskunnon seuranta ja ennakoivan kunnossapidon tukeminen. Mittauksilla pyritään optimoimaan huolto- ja vaihtopäätösten ajankohta. Mittaukset kohdistuvat sähkömoottoreihin ja niiden toimilaitteisiin.

Mittauksissa **käytettävä valvontamenetelmä** on ensisijaisesti värähtelyn kokonaistasovalvonta, jolla seurataan koneiden yleiskuntoa. Kokonaistasomittauksia täydennetään tarvittaessa taajuusanalyysillä (FFT) ja muilla tarkentavilla mittausmenetelmillä, mikäli kokonaistaso ylittää määritellyn raja-arvon tai trendissä havaitaan poikkeava muutos. Tarkentavia menetelmiä käytetään vian tyypin ja sijainnin paikantamiseen ennen kunnossapitotoimenpiteitä.

Uudemmat standardit ISO 20816 sekä PSK 5704 käsittelevät koneiden värähtelymittausten tärinärasitusalueita, mutta niiden soveltamisala koskee laitteita, joiden teho on vähintään 15 kW. Tässä työssä tarkasteltavien laitteiden tehot ovat 4–13 kW välillä, minkä vuoksi kyseisiä standardeja ei voida soveltaa suoraan **raja-arvojen** määrittämiseen.

Tämän vuoksi raja-arvojen määrittelyssä on hyödynnetty ISO 10816-1, jossa on esitetty värähtelyluokitus myös pienille koneille (luokka I). Raja-arvot on esitetty tarkemmin alempana kuvassa (kuva 17). Vaikka standardi on sittemmin kumottu, sen luokitteluperiaatetta käytetään tässä työssä pohjana, sillä uudemmat standardit eivät sisällä arviointikriteerejä pienitehoisille koneille.

Raja-arvojen määrittämisessä on lisäksi hyödynnetty aiempaa mittausdataa, jonka avulla standardin viitearvojen soveltuvuutta voidaan arvioida käytännössä. Aiemmissa mittauksissa normaaliksi toimintatasoksi on havaittu värähtelyarvot, jotka vaihtelevat tyypillisesti noin 0,2–2 mm/s RMS. Kun värähtelytasot ovat nousseet yli 4,5 mm/s RMS, on mittaushistoriassa havaittu selkeää viikaantumisen lisääntymistä, kuten nopeasti kehittyviä laakerivaurioita ja kunnossapitotoimenpiteiden tarvetta.

Mittausdatan perusteella ISO 10816-1 -standardin pienille koneille esittämät viitearvot ovat yhdenmukaisia kohteiden mittaushistorian kanssa ja soveltuvat siten suuntaa antavien värähtelyraja-arvojen määrittämiseen tässä työssä.

Raja-arvojen soveltuvuutta arvioidaan mittaushistorian perusteella ja rajoja voidaan tarvittaessa päivittää käytön ja kokemuksen karttuessa.

Värähtelyn nopeuden tehollisarvo (RMS) mm/s	Luokka I, pienet koneet alle 15kW
0,20	A
0,45	
0,71	
1,12	B
1,8	
2,9	C
4,5	
7,1 tai yli	D

Kuva 17. Värähtelyn nopeuden tehollisarvoja

A = Hyvä

B = Tyydyttävä

C = Hälytys (seuranta lisättävä)

D = Vaarallinen (laiterikko)

PSK 5705 -standardissa jatkuvatoimisten laitteiden suositelluiksi **mittausväleiksi** esitetään 2 viikkoa–2 kuukautta. Osa kohteen valvottavista laitteista ei ole jatkuvassa käytössä, mikä pienentää mekaanista kuormitusta ja hidastaa vikaantumismekanismien kehittymistä. Tästä syystä mittausväleiksi asetetaan yksi kuukausi. Mittaustoimintaa tehostetaan väliaikaisesti, mikäli jonkin valvottavan laitteen mitatuissa suureissa havaitaan merkittäviä muutoksia.

Laitteiden kunnossapitohistoria osoittaa niiden olevan varmatoimisia ja aikaisempien mittaustulosten perusteella voidaan todeta kunnonvalvonnan olleen hyvällä tasolla myös harvemmillä mittausväleillä. Tarvittavia toimenpiteitä on onnistuttu toteuttamaan ajoissa ennen laitteiden rikkoutumista. Tyypilliset vikaantumismekanismit kehittyvät hitaasti ja ovat havaittavissa seurannan avulla riittävän ajoissa valitulla kuukauden mittausväleillä. Mittausvälin määrittelyssä on huomioitu lisäksi taloudelliset tekijät, sillä mittaustoiminta on toistaiseksi ulkoistettua ja valittu mittausväli mahdollistaa kustannustehokkaamman kunnossapidon ilman merkittävää vaikutusta laitteiden toimintavarmuuteen.

Käytettäväksi mittalaitteeksi valitaan kannettava mittalaite, jossa käytetään siirrettävää anturia. Tämä ratkaisu on kyseisessä kohteessaärkevin ja tehokkain, sillä jokaisen toimilaitteen luokse on helppo ja turvallinen päästä. Lisäksi laitteiden vikaantumisaika on hidas suhteessa mittausväliin, jolloin jatkuvaa tai kiinteää seuranta ei tarvita. Aiempi käyttöhistoria myös osoittaa laitteiden olevan toimintavarmoja, mikä tukee kannettavan mittausjärjestelmän valintaa.

Mittaustoiminta toteutetaan tämän mittaus suunnitelman mukaisesti. Toistaiseksi mittaukset ja tulosten analysoinnin suorittaa ulkopuolinen asiantuntija. Tämä on järkevin ratkaisu, sillä toimeksiantajalla ei ole tällä hetkellä käytettävissä mittausten edellyttämää osaamista eikä tarvittavaa laitteistoa. Ulkoistaminen varmistaa mittausten luotettavan toteutuksen ja tulosten asianmukaisen analysoinnin.

Suunnitelman pohjalta toimeksiantaja voi halutessaan ryhtyä toteuttamaan mittauksia omatoimisesti, mikäli tarvittava laitteisto hankitaan sekä henkilöstöä koulutetaan. Mittaukset on helppo suorittaa ennalta määritellyistä ja merkityistä mittauspisteistä, mutta tulosten analysoinnissa on edelleen perusteltua hyödyntää ulkopuolista asiantuntijaa. Analysointi on värähtelymittausten haastavin ja eniten asiantuntemusta vaativa vaihe.

Mittaustulokset dokumentoidaan järjestelmällisesti ja tallennetaan siten, että ne ovat helposti hyödynnettävissä myöhempää tarkastelua ja vertailua varten. Näitä tulee myös säilyttää vähintään kolme vuotta. Jokaisesta mittauskerrasta laaditaan **raportti**, joka sisältää vähintään mitatut kohteet, mittaajankohdan, käytetyn mittaustulokkeiston, keskeiset mittaus tulokset, tulosten tulokinnan sekä toimenpidesuositukset. Hyvin dokumentoidut ja raportoidut mittaus tulokset mahdollistavat laitteiden kunnon seurannan pitkällä aikavälillä ja tukevat mittausvälin sekä mittaus toiminnan kehittämistä tulevaisuudessa.

Ulkoistetussa mittaustoiminnassa raportointi toteutetaan mittaajan käyttämiä raportointipohjia hyödyntäen, mutta raporttien sisällölle asetetaan vaatimukset toimeksiantajan tarpeiden mukaisesti. Omatoimisen mittaustoiminnan aloittamisen tueksi voidaan tarvittaessa hyödyntää PSK 5718 -standardissa esitettyjä raportointimallipohjia.

Kunnonvalvontatoiminnan **seuranta** perustuu mittaus tulosten ja niistä laadittujen raporttien arviointiin. Seuranta ei tehdä jatkuvasti, vaan sitä toteutetaan mittauskertojen yhteydessä sekä mittauskertojen välillä syntyneiden havaintojen perusteella.

Seurannassa tarkastellaan, onko mittaus suunnitelma tuottanut kunnossapidon kannalta hyödyllistä ja riittävästi tietoa sekä onko havaittuihin poikkeamiin pystytty reagoimaan ajoissa. Lisäksi arvioidaan, onko kunnonvalvonnalla saavutettu käytännön hyötyjä, kuten kunnossapitotoimien ennakoitavuutta ja parempaa ajoitusta.

6 Tulokset

Työn tavoitteet saavutettiin ja lopputuloksena syntyi onnistunut ja käytännöllinen mittaussuunnitelma. Suunnitelman avulla toimeksiantaja voi kehittää yrityksen värähtelymittauksia ja tätä kautta tehostaa ennakoivaa kunnossapitoa. Mittaussuunnitelmaa on myöhemmin helppo muokata ja tarkentaa esimerkiksi raja-arvojen osalta, kun mittauksista kertyy enemmän tallennettua dataa.

Mittaussuunnitelman lisäksi oli olennaista määrittää valvottaville laitteille mittauspisteet. Mittauspisteet saatiin määritettyä onnistuneesti ja ne on merkitty kuviin. Myöhemmässä vaiheessa mittauspisteisiin asennetaan mittausnipat, joiden kautta mittaukset suoritetaan. Nippon avulla anturi kiinnittyy mittauspisteeseen aina samalla tavalla ja yhtä tiiviisti, mikä parantaa mittausdatan laatua ja vertailtavuutta. Lisäksi nipat tekevät mittauspisteistä selkeitä, jolloin mittauksen suorituspaikasta ei jää epäselvyyksiä eikä virheiden mahdollisuutta.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Työn perusteella kunnonvalvonnan kehittäminen edellyttää selkeää ja suunnitelmallista toimintamallia. Ennakkohuoltosuunnitelmaan on järkevää luoda työ, joka generoituu automaattisesti kuukausittain, jolloin toiminta saadaan vakiinnutettua ja osaksi normaalia kunnossapitoa. Ennakkohuoltotyön liitteisiin voidaan liittää erikseen mitattavat laitteet. Valmistuneet mittaustulokset voidaan liittää jälkikäteen työn alle tiedostoon, minkä lisäksi ne tallennetaan erikseen tietokoneelle myöhempää tarkastelua ja vertailua varten.

Kun toimintamalli on määritelty, nousee keskeiseksi kysymykseksi mittausten toteutustapa ja siihen liittyvät kustannukset. Mikäli mittauspalvelua ei ole saatavilla paikallisesti, täysin ulkoistettu mittaus aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Tällöin palveluntarjoaja suorittaa mittaukset paikan päällä ja analysoi tulokset. Tämä ratkaisu ei ole kustannustehokas, jos kunnonvalvontaa toteutetaan esimerkiksi kerran kuukaudessa, sillä kustannukset nousevat nopeasti korkeiksi.

Työssä tarkasteltujen vaihtoehtojen perusteella järkevin ratkaisu säännöllisten värähtelymittausten aloittamiseen on oman mittalaitteiston hankinta sekä tarvittavan koulutuksen järjestäminen. Mittaukset voidaan suorittaa yrityksen oman henkilöstön toimesta, mutta tulosten analysointi on suositeltavaa edelleen ulkoistaa asiantuntevalle palveluntarjoajalle. Kertainvestointi laitteistoon, koulutuksiin ja asennustöihin on noin 19500 €. Tämän jälkeen kuukausittaiset kustannukset ovat noin 452 euroa, minkä lisäksi mahdolliset lisämittaukset ja analysoinnit aiheuttavat lisäkuluja.

Tällä hetkellä lähin mittauspalveluja tarjoava yritys sijaitsee noin 180 kilometrin päässä toimeksiantajan tehtaalta. Mikäli mittaukset ja analysointi tilataan paikan päälle kerran kuukaudessa, kustannus on arviolta noin 1 000 euroa per kerta. Vuositasolla tämä tarkoittaa noin 12 000 euron kustannuksia ilman mahdollisia lisämittauksia.

Edellä mainittujen kustannusten perusteella oman mittalaitteiston takaisinmaksuajaksi muodostuu noin kolme vuotta. Tämän jälkeen investointi alkaa tuottaa säästöjä verrattuna täysin ulkoistettuun mittauspalveluun.

Mikäli toimeksiantaja ei päädy toteuttamaan värähtelymittauksia tiheästi, voi täysin ulkoistettu palvelu olla perusteltu vaihtoehto. Tällöin toiminta painottuu enemmän laitteiden kuntokartoitukseen ja mittaukset voidaan suorittaa esimerkiksi 1–2 kertaa vuodessa.

Tämä insinöörityö toteutettiin pääosin itsenäisesti toimeksiantajan asettamat vaatimukset ja tavoitteet huomioiden. Työ oli kokonaisuudessaan mielekäs ja siinä pääsi soveltamaan opintojen aikana opittuja asioita käytännönläheisesti. Työn teoriaosuus rakentui sujuvasti, eikä merkittäviä haasteita ilmennyt. Aiheesta on saatavilla runsaasti standardeja, kirjallisuutta ja muuta luotettavaa lähdemateriaalia, minkä ansiosta teoreettisen taustan kokoaminen oli melko vaivatonta.

Työn käytännön toteutusosuudessa värähtelymittauksia koskevat standardit ohjasivat työn etenemistä selkeästi ja johdonmukaisesti, mikä helpotti työn etenemistä. Haastavimmaksi vaiheeksi osoittautui mittapisteiden määrittäminen, sillä aikaisempaa kokemusta aiheesta ei ollut. Tämä aiheutti alkuvaiheessa epävarmuutta. Tästä huolimatta suurin osa pisteistä oli määritetty oikein ja asiantuntijan vinkeillä sekä suositelluilla mittausnipparatkaisulla haastavampienkin kohteiden pisteet sai määritettyä onnistuneesti.

Kuvaus tekoälyn käytöstä opinnäytetyössä

Tässä opinnäytetyössä on käytetty tekoälysovellusta opinnäytetyöprosessin aikana seuraavasti:

Tekoälysovellusten nimi ja versio:

ChatGPT 5.2

Käyttökohde ja -tarkoitus:

Tässä opinnäytetyössä tekoälyä on hyödynnetty tukivälineenä työn suunnittelussa, rakenteen jäsentelyssä sekä tekstin kielellisessä muokkaamisessa. Sen avulla on parannettu tekstin selkeyttä, sujuvuutta ja asiallisuutta, sekä helpotettu kappaleiden yhdistämistä ja loogisten siirtymien muodostamista eri aiheiden välillä. Lisäksi tekoälyä on käytetty vaihtoehtoisten sanamuotojen ja ilmaisutapojen tuottamiseen.

Vakuutus - Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytetyöni sisällöstä mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat ja hyväksyn vastuun mahdollisista hyvän tieteellisen käytännön ohjeiden rikkomuksista ja sen mahdollisista seuraamuksista. Tarvittaessa ohjaava opettaja käynnistää tarkasteluprosessin.

Lähteet

1. Sartorius. [Internet]. [Viitattu 18.11.2025]. Saatavilla: <https://www.sartorius.com/en/company>
2. PSK 6201. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. PSK Standardisointi. 2022. Saatavilla: <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>
3. Mikkonen H. Kuntoon perustuva kunnossapito. KP-Media; 2009.
4. Järviö J. 4. Uudistettu painos. Kunnossapito. KP-Media; 2007.
5. ABB:n TTT-käsikirja. 2000. luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. ABB Oy, 2000. [Viitattu 27.11.2025]. Saatavilla: https://heikkilaakso.com/opetus/abb/230_0007.pdf
6. Nohynek P. & Lumme V. E. 2. täydennetty painos. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. KP-Media Oy; 2007.
7. Promaint. 2/2024. [Internet]. [Viitattu 19.1.2026]. Saatavilla: <https://www.promaint-lehti.fi/lehtiarkisto/?issue=76>
8. Promaint. 4/2024. [Internet]. [Viitattu 19.1.2026]. Saatavilla: <https://www.promaint-lehti.fi/lehtiarkisto/?issue=74>
9. Promaint. 3/2024. [Internet]. [Viitattu 19.1.2026]. Saatavilla: <https://www.promaint-lehti.fi/lehtiarkisto/?issue=75>
10. PSK 5707. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. PSK Standardisointi. 2024. Saatavilla: <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>
11. PSK 5705. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. PSK Standardisointi. 2024. Saatavilla: <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>
12. PSK 5702. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. PSK Standardisointi. 2024. Saatavilla: <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>
13. PSK 5706. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät. PSK Standardisointi. 2015. Saatavilla: <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>

Liitteet

Laite:				
Kohde	Tekijä	Painoarvo	Kerroin	Valintakriteeri
Turvallisuus- ja ympäristöriskit	Turvallisuusriskit	5	0	Ei turvallisuusriskiä
			4	Pieni turvallisuusriski
			8	Suuri turvallisuusriski
	Ympäristöriskit	5	0	Ei ympäristöriskä
			4	Pieni ympäristöriski
			8	Suuri ympäristöriski
Tuotannonmenetyksen kustannukset	Kriittisyys	20	0	Ei vaikutusta tehtaan tai osaston toimintaan
			2	Voi mahdollisesti johtaa tuotannon häiriintymiseen tai seisokkiin
			4	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa tuotannonmenetystä
			8	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa laitoksen tai tuotantosolun täydellisen pysähdyksen
	Laatu	10	0	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta laatukustannuksia
			2	Laitteen virheellinen toiminta voi aiheuttaa laadun heikkenemistä ja siihen liittyviä kustannuksia
Kunnossapidon kustannukset	Häiriöherkkyyks	5	1	Varmatoiminen
			2	Ajoittain ongelmia
			4	Häiriöherkkä
	Kunnossapitotyön kustannukset	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Kunnossapidon materiaalikustannukset	5	1	Vähäiset
			2	Kohtuulliset
			4	Korkeat
	Jälleenhankinta-arvo	5	1	Vähäinen
			2	Kohtuullinen
			4	Korkea

