

Matti Mänttari

**VÄRÄHTELYMITTAUS OSANA KOKONAISVALTAISTA KUNNOSSAPITOA
BECKHOFF-YMPÄRISTÖSSÄ**

**VÄRÄHTELYMITTAUS OSANA KOKONAISVALTAISTA KUNNOSSAPITOA
BECKHOFF-YMPÄRISTÖSSÄ**

Matti Mänttari
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, tuotantotekniikka

Tekijä: Matti Mänttari

Opinnäytetyön nimi: Värähtelymittaus osana kokonaisvaltaista kunnossapitoa Beckhoff-ympäristössä

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Vibration measurement as part of comprehensive maintenance in Beckhoff environment

Työn ohjaaja: Petri Junttila

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2022

Sivumäärä: 46 + 2 liitettä

Opinnäytetyö tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun Käypi-hankeeseen. Työn aiheena oli kunnossapitolaitteen suunnittelu käyttäen Beckhoff-ympäristöä. Lopuksi laitteistolla suoritetaan mittauksia värähtelyanalysaattorilla.

Työssä perehdyttiin kunnonvalvonnan menetelmiin, värähtelyyn, antureihin, signaalin käsittelyyn ja laakerien vikaantumiseen. Työn päätavoitteena oli valmistaa toimiva värähtelymittauslaitteisto käyttäen Beckhoffin TF3600 TC3 Condition Monitoring -järjestelmää, jolla voidaan suorittaa laakerien kunnonvalvontaa. Työn aikana perehdyttiin kunnonvalvonnan standardeihin ja siihen min-kälaisia vaatimuksia ne luovat luotettavalle mittaukselle.

Työssä valmistettiin värähtelymittauslaite, jolla suoritettiin kunnonvalvonnan värähtelymittauksia laakeripukille. Kun Beckhoffin laitteistolla tehdyt mittaukset saatiin suoritettua, vertailtiin mittaukset SKF:n värähtelyanalysaattorin tuloksiin. Tuloksista huomattiin poikkeavuuksia SKF:n ja Beckhoffin laitteistojen välillä. Tietyt taajuudet ja amplitudit olivat keskenään hyvin samanlaisia, mutta spektrit eivät kokonaisuudessaan olleet yhdenmukaisia. Vika luultavimmin johtuu Beckhoffin mittakortista, joka jostain syystä ei käsitellyt mittaustuloksia oikealla tavalla vaan kopioi ja korvasi näytteitä keskenään mielivaltaisesti. Laite kokonaisuudessaan vaikuttaa lupaavalta, mutta mittakortin ongelmat vaativat tarkempaa selvitystä. Sen kautta laitteistosta voisi saada toimivan kokonaisuuden.

Asiasanat: kunnonvalvonta, värähtelymittaus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme Mechanical Engineering, Production Engineering

Author: Matti Mänttari

Title of thesis: Vibration measurement as part of comprehensive maintenance in Beckhoff environment

Supervisor: Petri Junttila

Term and year when the thesis was submitted: spring 2022

Number of pages: 46 + 2 appendices

This Thesis was done for the Käypi project of Oulu University of Applied Sciences. The topic of the work was designed of a maintenance device which using the Beckhoff environment. When the measuring device has been ready to use measurement were made against the vibration analyzer.

The theoretical part of the thesis consists of condition monitoring methods, vibration, sensors, signal processing and bearing failure. The main goal of the work was manufacture a vibration measurement equipment which using Beckhoff's TF3600 TC3 Conditional Monitoring system. The purpose of the device is to perform condition monitoring measurements.

During the thesis a measurement device was made to perform vibration measurements on the bearing bracket. When the measurements made with Beckhoff's equipment were completed, the comparative measurements were made with an SKF vibration analyzer. With the result discrepancies were noted between SKF and Beckhoff equipment. Certain frequencies and amplitudes were very similar to each other, but the spectra were not consistent. The fault is most likely due to Beckhoff's measurement card, which did not process the measurement samples correctly for some reason. The equipment seems promising, but the problems with the measurement card require a more detailed explanation of the fault, and through that the system could also become functional.

Keywords: condition monitoring, vibration measurement

ALKULAUSE

Opinnäytetyö on tehty Oulun ammattikorkeakoululle Käypi-hanketta varten. Suuret kiitokset haluan osoittaa Oulun yliopiston Yrjö Louhisalmelle, joka lainasi mittakorttia tätä työtä varten ja täten mahdollisti työn suorittamisen. Erityisesti haluan kiittää Lehtori Petri Junttilaa työn ohjaamisesta ja työn tilaajana toiminutta Yliopettaja Manne Tervaskantoa avusta ja vinkeistä opinnäytetyön suorittamiseen. Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta.

Raahessa 30.5.2022

Matti Mänttari

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	KUNNOSSAPIDON KUNNONVALVONTA	9
2.1	Aistinvarainen kunnossapito	9
2.2	Laitteilla tapahtuvat mittaukset	10
2.2.1	Värähtelymittaus.....	11
2.2.2	Lämpötilamittaukset.....	11
2.2.3	Öljyanalyysit.....	12
2.2.4	Virta-analyysi epätahtimoottoreille.....	12
2.2.5	NDT-menetelmät.....	12
3	VÄRÄHTELY	14
3.1	Värähtelysuureet ja mittayksiköt.....	15
3.2	Värähtely taajuustasossa.....	17
4	ANTURIT JA NIIDEN ASENTAMINEN	19
4.1	Anturin valinta	19
4.1.1	Siirtymäanturi.....	19
4.1.2	Nopeusanturi	20
4.1.3	Kiihtyvyyssanturi	21
4.2	Anturin sijoittaminen.....	22
4.3	Anturin kiinnitystavat	23
5	SIGNAALINKÄSITTELYMENETELMÄT	25
5.1	Signaalin eri esitystavat.....	25
5.2	Analogia/digitaali- muunnos.....	25
5.3	Fourier-muunnos	26
6	LAAKERIN VIKAANTUMINEN JA VIANMÄÄRITYS	28
6.1	Laakerivauriot.....	28
6.2	Verhokäyräanalyysi.....	30
6.3	Haystack-ilmiö.....	31
7	KUNNONVALVONTALAITTEISTOT	33
7.1	Beckhoff TF3600 TC3 Condition Monitoring	33
7.1.1	Mittakortti ja liitännät	34

7.1.2	Kunnonvalvontamenetelmän valinta.....	36
7.2	SKF Microlog analyzer AX.....	36
7.3	Antureiden kiinnitys.....	37
7.4	Ohjelman rakenne	37
8	MITTAUKSET.....	41
9	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	47

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Oulun ammattikorkeakoululle Käypi-hankkeen puitteissa. Käypi-hanke on Centria AMK:n, Oulun AMK:n ja Oulun yliopiston yhteinen hanke, jonka tavoitteena on parantaa osaamista ja valmiuksia käynnissäpidossa yritysten tarpeiden mukaisesti. (1.) Työssä tutustutaan Beckhoff:n kunnonvalvontaympäristön toimintaan ja valmistetaan kunnossapitolaitteisto, jolla voidaan suorittaa teollisuuden kunnossapitoon liittyviä mittauksia.

Työssä perehdytään Beckhoffin PC-pohjaiseen TF3600 Condition monitoring -kunnonvalvontasovellukseen ja selvitetään sen toimivuutta. Teollisuudessa yleisempi kunnonvalvonnan mittaus-tapa on erillisellä värähtelyanalysaattorilla suoritettu mittaus. Tällaisessa tapauksessa mittaukset käy suorittamassa mittamies, joka myöhemmin analysoi tulokset. Työssä on tarkoitus käyttää ELM 3604 -mittakorttia, jolla voitaisiin suorittaa kunnonvalvonnan värähtelymittauksia siten, että mittatuloksia voitaisiin tarkkailla suoraan käytettävän laitteen ohjauspaneelista. Tällaisessa tapauksessa erillisiä mittauksia ei tarvitsisi suorittaa vaan se voitaisiin korvata Online-valvonnalla koneen käytön yhteydessä.

Työssä perehdytään ensin kunnonvalvonnan taustoihin käymällä läpi kunnossapidon kunnonvalvontaa. Lisäksi tutustutaan värähtelyn teoriaan, mittaustapoihin, antureihin, signaalien käsittelyyn laakerin vikaantumiseen. Lopuksi valmistetaan kunnonvalvontalaitteisto, jolla suoritetaan kunnonvalvonnalle tyypillisiä mittauksia värähtelyanalysaattoria vastaan. Työssä ei ole tarkoitus analysoida mittaustuloksia perinpohjaisesti vaan silmämääräisesti vertailla niitä keskenään.

2 KUNNOSSAPIDON KUNNONVALVONTA

Kunnossapidon tehtävä on pitää laitteet jatkuvasti käyttökunnossa. Kunnossapitoon kuuluvat myös rikkoutuneiden laitteiden tai osien korjaustyöt, mutta varsinainen korjaustoiminta ei ole kunnossapidon päätarkoitus. Kunnossapitoa ajatellaan usein pelkästään kustannusten kannalta, mutta tuotantotekijöillä on myös valtava merkitys, sillä sen avulla pystytään varmistamaan tuotantolaitoksen kilpailukyky. (2, s. 25.)

Kunnossapitäjillä on yleensä selkeä käsitys siitä, mitä he tekevät työkseen. Työntekijän kokemuspohja luo suurilta osin ymmärryksen siihen, mitä kunnossapidolla tarkoitetaan ja mihin sillä pyritään. Nämä käsitykset vaihtelevat sen mukaan, minkälaisessa kunnossapidon tehtävässä henkilö on tottunut työskentelemään. Muilla kuin kunnossapidon parissa työskentelevillä ihmisillä saattaa olla hyvin poikkeava ja vanhakantainen käsitys kunnossapidosta. Kunnossapidon kunnonvalvonta voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään joko aistinvaraiseen tai mittalaitteilla suoritettavaan kunnonvalvontaa. (2, s. 25.)

2.1 Aistinvarainen kunnossapito

Aistinvarainen kunnossapito on yksinkertaisin kyky, jolla voidaan havaita tuotantolinjan tai prosessin kuntoa ajon aikana. Kun tilanne kohteessa on vasta alkutekijöissä, silloin aistinvarainen kunnonvalvonta on helppo ja toimiva tapa aloittaa vian määrittäminen. Aistien laatu ja taso ovat riippuvaisia ympäristön tilasta ja ovat yksilökohtaisia. Siksi aistinvaraiset kokeet kannattaa suorittaa siten, että ne ovat helposti toistettavissa. (4.)

Näkö

Näköaistin avulla operaattori pystyy havaitsemaan muun muassa vuotoja, tärinää ja lämmön luovuttamista. Yleisimmät vuototyypit ovat öljy- tai jäähdytysnestevuodot, jotka havaitaan vuotokohtaan ilmestyneenä kosteutena ja suuri vuoto näkyy tiputuksena. Mikäli vuotoa ei voida heti korjata, sitä pystytään mittaamaan esimerkiksi mitta-astialla tai laskemalla montako tippaa vuotokohdasta tulee minuutissa. Myös voiteluöljyssä olevat epäpuhtaudet voidaan havaita näköaistia käyttämällä. (4.)

Kuulo

Kuuloaistin hyödyntäminen voi olla todella hankalaa meluisassa tehdasympäristössä. Yleensä kuuloaistilla voidaan havaita vialliset laakerit, liialliset välykset tai irralliset osat. Myös runsaat paineilma- ja nestevuodot voidaan havaita kuulon avulla. (4.)

Haju

Hajuaistia on vaikea korvata antureilla, koska se on ainut aisti, joka on yksilön varassa pidettävä mittari. Hajuaistin avulla pystytään selvittämään mahdollisesta vuotokohdasta, mikä aine on kyseessä ja onko se vaarallista. Esimerkiksi sähkömoottorien ylläpidosta aiheutuva käämityslaikan palaminen on helposti hajuaistilla huomattava vika. Kitkalämmöstä aiheutuva materiaalin lämpeneminen voidaan helposti havaita hajuaistin avulla, kuten esimerkiksi muovin sulaminen ja puun palaminen. (4.)

Tunto

Tuntoaisti on erilainen kehon eri osissa, mutta sitä käytetään esimerkiksi värinän, lämpötilan ja kaasuvuotojen tarkkailuun. Kämmenselän iholla tuntee herkästi esimerkiksi kaasuvuodosta aiheutuvan puhalluksen. Ihmisen iho kestää n. 50 Celsiusasteen lämpötilaa ja sitä rajaa voidaan käyttää, vaikka laakerien lämpötilan analysointiin. Tuntoaisti on helpoin ja tehokkain aisti, jonka voi korvata anturitekniikalla. (4.)

Maku

Makuaistilla voi tunnistaa esimerkiksi ilmassa leijuvia kaasuja. Myrkylliset kaasut ovat vaarallisia aistittavia aineita ihmiskehölle. Esimerkiksi höyrystyneen glykolin voi tuntea makean tahmeana suussa. (4.)

2.2 Laitteilla tapahtuvat mittaukset

Kunnonvalvonnan yleisimmät mittaustavat ovat erilaiset värähtelymittaukset, lämpötilamittaukset, öljyanalyysit, virta-analyysi epätahtimoottoreille ja NDT-menetelmät (2, s. 417.)

2.2.1 Värähtelymittaus

Värähtelymittausta käytetään teollisuuden laitteistojen ja koneiden kunnonvalvonnassa. Värähtelyvalvonnan suunnittelu- ja mittaasetusten määrittäminen on hyvin monimutkainen prosessi ja vaatii useiden eri asioiden huomioonottamisen. Valvottavan kohteen ja sen kriittisyyden merkitys tuotannon ja talouden kannalta, määrittelevät käyttökelpoisimmat valvontamenetelmät. Lisäksi värähtelyvalvonnan pohjaksi on jollakin tasolla ymmärrettävä laitteen toimintaperiaate, mahdolliset vikaantumismekanismit sekä prosessi, jossa valvonnan kohteena olevat laitteet sijaitsevat. (2, s. 223.)

Värähtelymittauksia voidaan suorittaa erilaisilla värähtelykynillä tai kannettavilla monikanavaisilla tiedonkeruulaitteilla. Värähtelykyniä on saatavilla niin yksinkertaisista yhtä lukuarvoa näyttävistä laitteista aina muistipaikoilla ja tiedonsiirrolla varustettuihin laitteisiin asti. Peruslaitteella mitattava tunnusluku on yleensä värähtelyrasitus eli värähtelynopeuden kokonaistasoarvo laitteeseen kiinteästi asetetulla taajuusarvolla. Tällaisella mittalaitteella arvioidaan yleensä laitteen yleiskuntoa. Tarkempaan analyysiin tarvitaan kehittyneempi mittalaite, jolla tuloksia voidaan tarkastella taajuustasossa. (2, s. 259.)

Monikanavaisilla mittauslaitteilla voidaan mittauksen tunnuslukujen lisäksi tehdä vianmäärittäyksiä. Kannettavilla laitteilla on monipuoliset mahdollisuudet spektrin ja aikatason tulkintaan. Mittaamista voidaan suorittaa yhtäaikaisesti useammalla kanavalla ja eri taajuuskaistoilla silloinkin, kun pyörimisnopeudet muuttuvat mittausten välillä. Tällaisia mittauslaitteita käytetään yleisesti värähtelyongelmien selvityksissä, kun värähtely aiheuttaa ongelmia teollisuuden tuotantolinjoilla. Tämän tyyppisissä kohteissa käytetään kohteeseen soveltuvaa analysaattoria tai PC-pohjaista mitatorttisovellusta. Kanavien määrä edellä mainituissa laitteissa vaihtelee 8 - 64 kanavan välillä ja mittausnopeus sekä signaalienkäsittelytoiminnot ovat monipuoliset. Tämän tyylisten laitteiden käyttö vaatii käyttäjältä ammattitaitoa ja hyvää teoriaosaamista. (2, s. 260 - 261.)

2.2.2 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittausta käytetään yleisesti teollisuuden kunnonvalvonnassa. Erilaisissa prosessien valvonnassa ja ohjauksessa lämpötilatiedoilla on hyvin keskeinen merkitys. Laitteiden lämpötilan

mittausmenetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: koskettavat menetelmät, koskettamattomat mittausmenetelmät ja lämpökamerat. (2, s. 439 - 440.)

2.2.3 Öljyanalyysit

Voiteluaineanalyysit ovat merkittävä osa koneen kunnonvalvontaa ja vianmäärittystä, silloin kun halutaan seurata koneenosien kulumistilannetta ja laitteessa tapahtuvia muutoksia. Esimerkiksi vaihteistojen ja hydraulikkajärjestelmän osien ja komponenttien vikaantuminen voidaan huomata öljyanalyysin avulla hyvin varhaisessa vaiheessa. Voiteluaineanalyysit voidaan jakaa perusanalyysiin, jossa tutkitaan yleisesti voiteluaineen kuntoa. Hiukkasanalyysiin, jossa seurataan voiteluaineen puhtautta ja epäpuhtaiden hiukkasten kokojakaumaa sekä koneenkuntoa. Kulumametallianalyysissa seurataan koneen kuntoa tutkimalla metallipitoisuuksien muutoksia. Yhtenä osana on myös vesipitoisuuksien seuranta voiteluaineessa. (2, s. 428 - 430.)

2.2.4 Virta-analyysi epätahtimoottoreille

Epätahtimoottoreille pystytään suorittamaan erilaisia kunnonvalvonnan mittauksia analyysointilaitteilla. Sähkövirta-analyysillä pystytään havaitsemaan moottoreiden vikoja. Mittaus suoritetaan virtapihdin avulla yhdestä sähkömoottoriin tulevasta vaiheesta. Tuloksen avulla pystytään selvittämään niin sähkömoottorin mekaaniset ja sähköiset vauriot. (3, s. 21.)

2.2.5 NDT-menetelmät

NDT-menetelmät eli yleisnimityksellään aineita rikkomattomat tarkastusmenetelmät ovat hyvin yleisiä kunnonvalvonnan menetelmiä. Kunnonvalvonnessa yleisimmät tarkastusmenetelmät ovat endoskooppitarkastelut, ultraääniluotaus tai stroboskooppitarkastelu. (2, s. 447.)

Endoskooppinen menetelmä mahdollistaa koneiden ja laitteiden ahtaiden paikkojen tarkastelun. Endoskooppeja voi olla joko kiinteäputkisia tai taipuisaputkisia. Taipuisaputkinen endoskooppi voi olla joko kuituoptyinen tai putken päässä voi sijaita pieni videokamera. Taipuisaputkisen endoskoopin etu on se, että sillä voidaan kulkea pitkin mutkaista reittiä tarkasteltavaan kohteeseen ja sen kuvauspäätä pystyy kääntämään eri suuntiin. (2, s. 447.)

Ultraääniluotaus perustuu materiaaliin lähetetyn ultraäänen heijastumiseen erilaisista epäjatkuvuuskohdista kuten halkeamista, huokosista ja rajapinnoista. Ultraäänellä voidaan mitata ainevahvuuksia ja havainnoida kappaleessa olevia valmistus- ja materiaalivikoja. Menetelmän mitausalue on noin 1... 200 mm:n ja ainevahvuuksien tarkkuus on 0,01 mm:n luokkaa. Menetelmän heikkous on se, että sillä ei pystytä helposti havaitsemaan pistemäisiä korroosiovaurioita. (2, s. 450.)

Ainetta rikkomattomista tarkastusmenetelmistä stroboskoopitarkastelu on ainut tarkastusmenetelmä, jota pystytään käyttämään tuotannon käydessä. Stroboskoopin avulla pystytään visuaalisesti tarkastamaan pyörivän laitteen kuntoa. Stroboskooppi valaisee kohdetta vilkkuvalla valolla. Kun valon vilkkumisen taajuus on sama kuin kohteen oma pyörimisnopeus, saa se liikkeen näyttämään pysähtyneeltä. Välähdystaajuuden nopeutta muuttamalla hieman nopeammaksi tai hitaammaksi saadaan kohde liikkumaan hitaasti ja laitteen mahdollisia vaurioita pystytään tarkastamaan. (2, s. 448.)

3 VÄRÄHTELY

Mekaaninen värähtely on koneen, koneenosan tai rakenteen aiheuttamaa liikettä tietyn tasapainoakselin ympärillä. Jotta värähtely saataisiin aikaiseksi, täytyy systeemiin vaikuttaa värähtelyä aiheuttava heräte. Värähtelyn herätteinä voivat toimia erilaiset dynaamiset liikkeet, jotka voivat olla peräisin esimerkiksi asennuksen epätarkkuudesta, laiteviasta tai epätasapainossa olevan akselin pyörimisliikkeestä. Teollisuuden laitteistojen herätetaajuuksien määrä on suuri ja niiden tunnistaminen on haastava prosessi. Rakenteesta aiheutuvaa herätettä kutsutaan myös pakovoimaksi. Pakovoimat voivat liittyä koneen normaaliin käyntiin tai aiheutua koneeseen syntyneestä viasta. Taulukossa 1 on muutama esimerkki. (2, s. 224 - 225; 3, s. 40.)

TAULUKKO 1. Esimerkkejä herätteinä toimivista pakovoimista (2, s. 225)

Koneen normaalista toiminnasta aiheutuvat herätteet	Vikojen aiheuttamia herätteitä
Leikkurin terien herätteet	Epätasapaino
Täristimien herätteet	Laakeriviat
Pyörimistaajuuksien herätteet	Kytkinviat
Mäntäkoneiden aiheuttamat herätteet	Linjausviat
Pumppujen ja puhallinten siipien aiheuttamat herätteet	Hammaspyöräviat

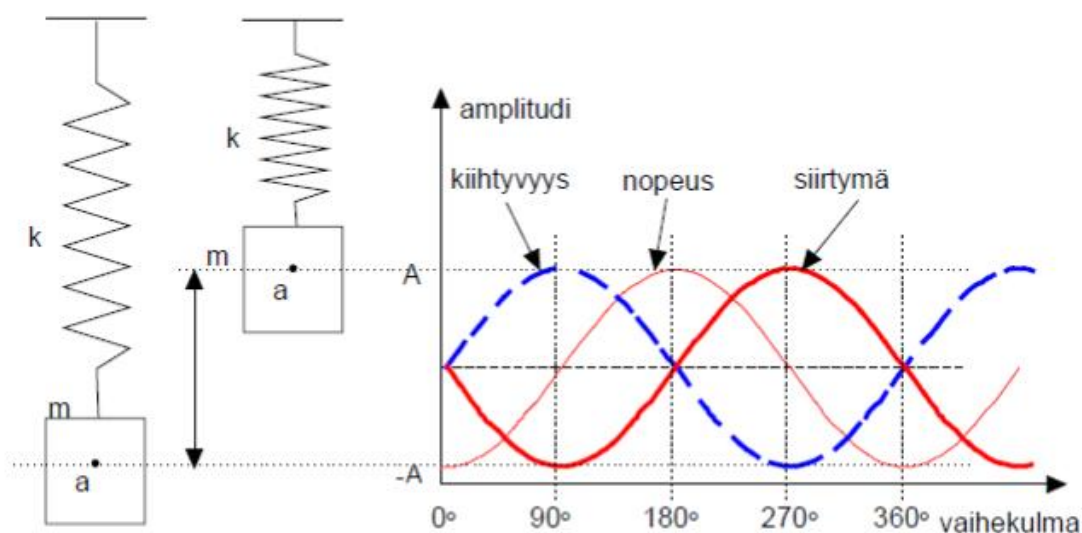
Kunnonvalvonnan kannalta värähtelymittauksia voidaan suorittaa pääasiassa kahdesta syystä. Ensinnäkin voidaan tulkita toimivista koneista tulevaa värinää ja sen pohjalta arvioidaan koneenosien kuntoa. Toiseksi selvitetään värähtelyn vaikutukset tuotannon koneisiin ja laitteisiin, jotka ovat pitkällä tähtäimellä haitallisia. Jotkut koneet ja laitteet kuitenkin käyttävät värähtelyä hyväksi toimiakseen, kuten seulat, maantiivistimet ja kuljettimet. Värähtelyn aiheuttamat haittavaikutukset ilmenevät

- väsymismurtumina rakenteissa
- jännityksien lisääntymisenä
- löystyvinä liitoksina
- käynnin epävarmuutta
- energiahäviönä
- meluhaittana

- alentuneena käyttöikä. (3, s. 40.)

3.1 Värähtelysuureet ja mittayksiköt

Kunnonvalvonnassa voidaan käyttää kolmea eri mittasuuretta, joita ovat värähtelynopeus, kiihtyvyys ja siirtymä. Värähtelynopeus on näistä yleisemmin käytetty. Nopeus on käyttökelpoisiin taajuuksialueella, joka ulottuu noin 10 Hz:stä 1000 Hz:iin. Nopeuden tarkastelua pidetään hyvänä tärinän vakavuutta arvioidessa, koska kiinnostavista taajuuksista suurin osa saadaan näkyviin nopeutta tarkastellessa. Kun taajuuksialue laskee alle 10 Hz:iin, siirtymän taajuuksialue on käyttökelpoisempi johtuen siitä, että siirtymä korostaa hyvin matalia taajuuksia. Taajuuden noustessa yli 1000:n Hz:n on kiihtyvyyden mittasuure toiminnaltaan parempi, koska se puolestaan korostaa korkeita taajuuksia. Usein korkeataajuisia värähtelyä aiheuttavat viat näkyvät aikaisemmin ja paremmin kiihtyvyydenspektrissä kuin nopeudenspektrissä. Kuvasta 1 voidaan havaita, kuinka siirtymällä, nopeudella ja kiihtyvyydellä on sama aaltomuoto, mutta taas vaihekulmat poikkeavat toisistaan 90 astetta. Kuvassa kaikkien kolmen suureen amplitudit on piirretty saman korkuiseksi mutta yksiköt eivät vastaa toisiaan. Taulukkoon 2 on koottu kunnonvalvonnassa yleisemmin käytetyt mittasuureet ja niiden yksiköt. (2, s. 227 - 228; 6, s. 8 - 11.)

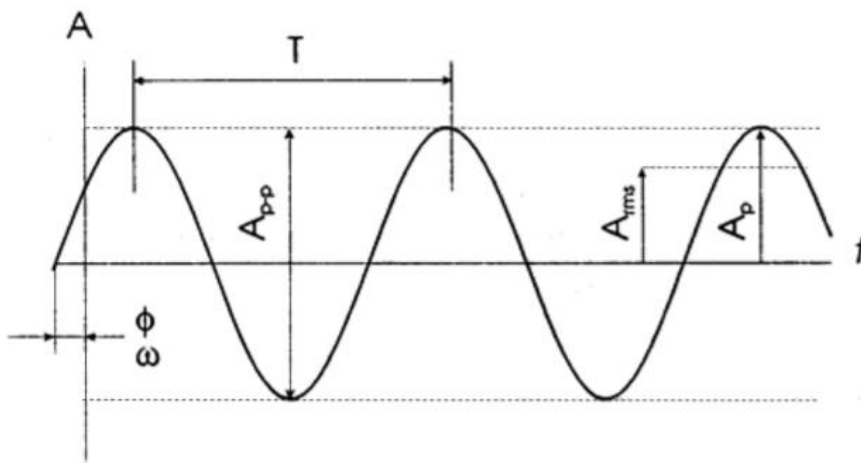


KUVA 1. Pisteen a kiihtyvyys, nopeus ja siirtymä jousi-massasysteemissä (6, s. 8)

TAULUKKO 2. Värähtelymittauksen yksiköitä (4, s. 1; 2, s. 230)

Suure	Lyhenne	Yksikkö
Jakso	T	s
Taajuus	f	Hz
Vaihekulma	φ	$^{\circ}$
Kulmanopeus	ω	rad/s
Huippuarvo	A_p	μm
Huipusta-huippuun-arvo	A_{p-p}	μm
Tehollisarvo	A_{rms}	μm
Siirtymä	s	μm
Nopeus	v	mm/s
Kiihtyvyys	a	m/s ² ; $g \approx 9,81\text{m/s}^2$

Tuloksien tulkitsemiseksi täytyy yleisten mittasuureiden lisäksi tuntee signaalista saatavat perusparametrit. Näitä parametrejä käytetään kiihtyvyyden, nopeuden ja siirtymän mittauksessa. Kuvassa 2 on esitetty signaalista saatavat perusparametrit. (2, s. 231.)



KUVA 2. signaalin mittausparametrit (5, s. 1)

Jakso ja taajuus

Jakso kuvaa, kuinka kauan kuluu aikaa yhteen värähtelyn jaksoon eli siihen kun taas sama aalto-
liike toistuu. Taajuus puolestaan kertoo värähtelyn määrät yhden sekunnin aikana. (6, s. 8 - 9.)

Vaihekulma ja kulmanopeus

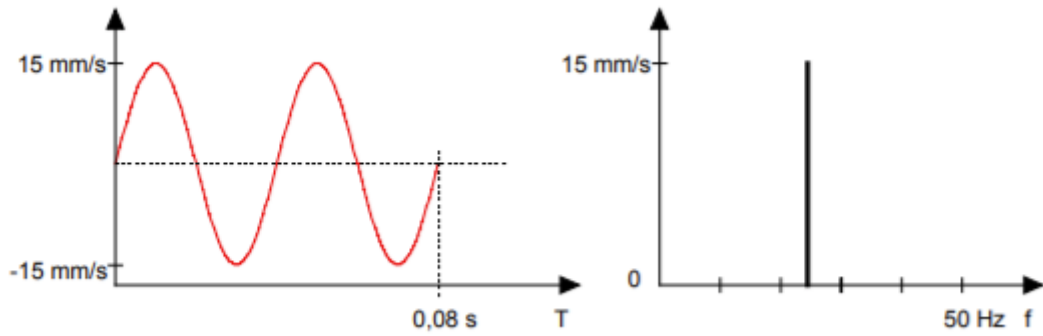
Vaihekulma on jakson kohta, johon aaltoliike on edennyt vertailukohtasta ja se ilmoittaa vektorin suunnan, kun kulmataajuus kertoo vektorin kulman muutoksesta nopeudesta aikayksikössä. (2, s. 231.)

Huippuarvo, huipusta huippuun -arvo, huippukerroin ja tehollisarvo

Huippuarvo kertoo signaalin suurimman amplitudin nolatasoon verrattuna. Huipusta huippuun -arvo kertoo positiivisen ja negatiivisen amplitudin välisen erotuksen ja se on yleensä noin kaksinkertainen huippuarvoon verrattuna. Tehollisarvo on yhteydessä värähtelyn sisältämään energiaan. Sinimuotoiselle aalloille tehollisarvo saadaan laskemalla huippuarvo jaettuna neliöjuuri kahdella. Crest factor eli huippukerroin saadaan jakamalla huippuarvo tehollisarvolla. Tämä suhdeluku kuvaa signaalissa esiintyvää piikikkyyttä ja korkeaksi kohonnut arvo viittaa iskumaisiin herätteisiin. Tällainen korkeaksi kohonnut arvo voi tarkoittaa esimerkiksi laakerivauriota. (2, s. 231; 6, s. 9, 17.)

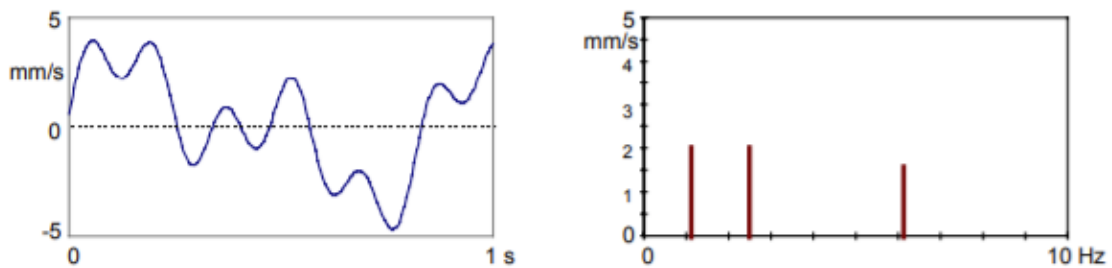
3.2 Värähtely taajuustasossa

Värähtelymittausta suorittaessa on hyvin harvinaista, että mittaustulokset esitetään aikatasossa eli vaaka-akselilla arvona on aika. Pääosa mittauksista ja sen analyysistä perustuu taajuusspektreihin eli taajuustasoon. Taajuustasossa vaaka-akselina toimii taajuus ja pystyakselilla puolestaan on värähtelyn amplitudi. Kun värähtelyä tutkitaan taajuustasossa, esitetään värähtelyn amplitudi ainoastaan positiivisessa muodossa. Käytännön tilanne on usein sellainen, että mitauspisteeseen tulee koneen tai laitteen eri komponenttien värähtelyä, joten aikatasosignaalisissa näiden erottelu on erittäin haastavaa. Kuvassa 3 on esitetty siniaalto sekä aika- että taajuustasossa. Taajuusspektrin paikka vaaka-akselilla kuvaa taajuutta ja pylvään korkeus amplitudia. (2, s. 232; 5, s. 9.)



KUVA 3. Siniaallon värähtelysignaali aika- ja taajuustasossa. (6, s. 10)

Tavallisesta laitteesta mitattava värähtely sisältää paljon eri taajuuksia, joiden selkeä havainnointi aikatasossa on hankalaa. Kuvassa 4 on esitetty kolmesta siniaallosta koostuva signaali, joka on vaikea tulkita aikatasossa, mutta taajuustasossa on huomattavasti helpompi tulkita eri amplitudit ja taajuudet. Kunnonvalvonnan yleisin mittaustulosten esitystapa on spektri. Joissakin tapauksissa aikatasosignaalista saadaan sellaista tietoa mikä ei spektrissä näy. Lähtökohtaisesti mittauksissa suurena käytetään nopeutta ja amplitudit esitetään tehollisarvona eli tehospetreinä. (6, s. 10.)



KUVA 4. Kolmen siniaallon värähtelysignaali aika- ja taajuustasossa (6, s. 10)

4 ANTURIT JA NIIDEN ASENTAMINEN

4.1 Anturin valinta

Koneen rakenne ja komponenttien todennäköiset viat sekä komponenttien värähtelyalue tulee ottaa huomioon anturityyppiä valittaessa. Kunnonvalvonnassa yleensä käytetään joko siirtymä-, kiihtyvyyss- tai nopeusanturia. Vaikka kaikki anturit mittaavat värähtelyä, poikkeavat niiden toimintaperiaatteet selvästi toisistaan. (8, s. 1 - 2; 2, s. 234.)

4.1.1 Siirtymäanturi

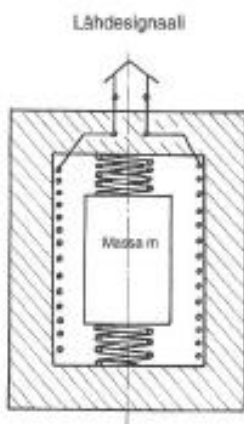
Siirtymäanturi mittaa anturin paikan ja kohteen välistä etäisyyttä suhteessa toisiinsa. Tällaista anturia voidaan käyttää akselin aksiaalisen ja radiaalisen värähtelyn tai aseman ilmaisemiseen. Pyörrevirta-anturi on yleisin siirtymäanturi. Suurimman ja pienimmän mitattavan signaalin suhde on 100:1 tätä kutsutaan dynamiikka-alueeksi. Teoreettinen mittausalue anturilla on 0 Hz... 10 kHz, mutta käytännössä sen yläpää rajoittaa 200 Hz:iin, johtuen pienistä siirtymäarvoista suurilla taajuuksilla. (2, s. 235.)

Pyörrevirta-anturi tarvitsee eräänlaisen esivahvistimen toimiakseen, joka on sijoitettu joko erilleen anturista tai anturin sisään. Tällainen anturijärjestelmä on kalibroitu tietylle kaapelipituudelle ja muutoksia tehdessä järjestelmä täytyy kalibroida uudelleen. Anturin toimintaperiaate perustuu siihen, että anturin kärjessä sijaitsee kela, joka muodostaa magneettikentän. Mittauskohteen etäisyyden muutos muuttaa anturin induktanssia ja ulostulojännitettä. Jännite on suoraan verrannollinen etäisyyden muutokseen. (2, s. 235.)

Pyörrevirta antureiden mittauskohteista tyypillisin on liukulaakeroidut koneet. Laakerin ja akselin suhteellista liikettä pystytään mittaamaan kahdella 90 asteen kulmaan toisistaan sijoitetuilla antureilla. Mittaustulos esitetään ratakäyrän muodossa tämä kertoo akselin liikeradan laakerin sisällä. Anturin käyttöä kunnonvalvonnan mittauksissa rajoittaa suppea taajuusalue, vaikeahko kiinnitystapa ja pieni dynamiikka. (2, s. 235.)

4.1.2 Nopeusanturi

Geofooni on seiminen nopeusanturi, jonka toiminta perustuu anturin sisällä olevaan magneettiin, joka liikkuu ulkoisen voiman aiheuttamana jousen ja vaimentimen varassa. Magneetti liikkuu keulan sisällä muodostaen indusoitunutta jännitettä, jota voidaan mitata. Jännite on verrannollinen liikkeen nopeuteen. Kyseinen anturityyppi toimii jousen ominaistaajuuden yläpuolella ja sen taajuusalue on melko kapea. Antureita on saatavissa yksi- tai moniaksaalisena ja laitteita valmistetaan mittaushetkestä riippuen erilaisille aallonpituuksille. Kuvassa 5 on havainnekuva seismisen anturin rakenteesta. (2, s. 237.)



KUVA 5. Nopeusanturin rakenne (3, s. 47)

Perinteinen nopeusanturi mittaa absoluuttista värähtelyä ja on toimintaperiaatteeltaan seisminen anturi. Tällaisen anturin taajuusalue on hyvin suppea noin 10...1000 Hz:n taajuusalueella. Dynamiikka-alue nopeusanturilla on 1000:1, joka on hieman parempi kuin siirtymä anturilla. Nopeusanturi sisältää paljon liikkuvia osia ja on siksi toimintaperiaatteensa vuoksi suurikokoinen. Liikkuvien osien määrä vaikuttaa anturin toimintaikään. Kyseinen anturityyppi reagoi hyvin herkästi magneettikenttiin sekä on tarkasti suunnattava. Nämä kaksi asiaa aiheuttavat hyvin helposti virheellisiä mittaustuloksia. Seismisten nopeusantureiden käyttö on koko ajan harvinaisempaa, mutta suurissa mäntä- ja turbokoneissa niitä vielä käytetään. (2, s. 237.)

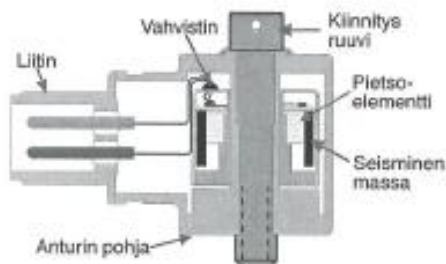
Nopeusmittauksessa voidaan käyttää myös lasermittausta, joka on koskematon mittaamenetelmä. Lasermittauksella pystytään mittaamaan etäisyyttä, translaatio- ja rotaatiovärähtelyä ja pinnan kulkunopeutta. Lasermittaukseen on olemassa myös laitteistoja, joilla mittaaminen voidaan suorittaa kolmessa suunnassa. Etuna tässä mittaustavassa on pitkä mittausetäisyys ja laaja taajuuskaista jopa 1 MHz:iin asti. Haittapuolena on laitteen suuri koko, sen vuoksi se on työläs asen-

taa kohteeseen. Lisäksi kahden lasersäteen käyttämä mittauslaitteisto tarvitsee ohjausyksikön, jonka jälkeen signaali voidaan ohjata tiedonkeruulaitteistoon. (2, s. 241.)

4.1.3 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi on yleisin kunnossapidon värähtelymittausanturi. Pieni koko ja se, että anturi ei vaikuta mittauskohteen värähtelytilaan tekee siitä erittäin kilpailukykyisen. Anturi ei sisällä liikkuvia tai kuluvia osia ja dynamiikka-alue on laajempi kuin nopeusanturissa. Taajuusalue on 1 Hz...10 kHz:iin. Lisäksi kiihtyvyyssanturi on helppo asentaa ja anturi on epäherkkä ympäristöolosuhteille. (2, s. 237.)

Kuvassa 6 on esimerkki kiihtyvyyssanturista, joka koostuu rungosta, seismisestä massasta ja pietsoelementistä. Rakenteeltaan anturit voidaan jakaa puristusherkkiin ja leikkausherkkiin tyyppeihin, mutta näiden yhdistelmiäkin on olemassa. Puristustyyppin anturissa osat ovat päällekkäin ja puristuvat jousikuormitetun pultin avulla toisiaan vasten. Leikkaustyyppin anturit ovat koottu joko liimaamalla tai puristusrenkaan avulla rungon ympärille. (2, s. 238.)



KUVA 6. Kiihtyvyyssanturin rakenne (3, s. 46)

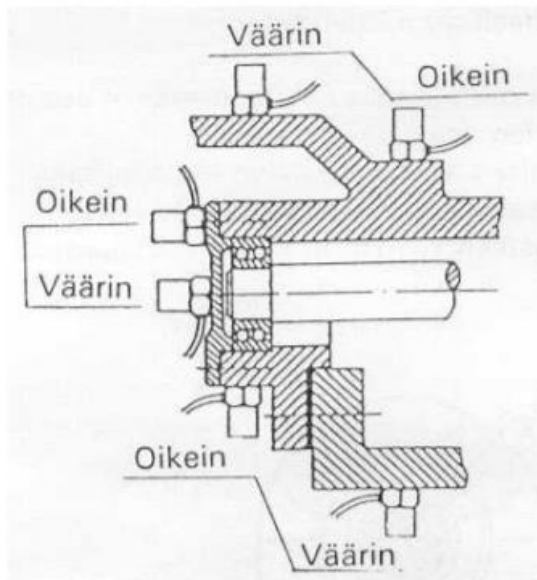
Anturi voidaan kiinnittää kohteeseen joko ruuvilla, magneetilla, mehiläisvahalla tai käsin painamalla siten, että anturi liikkuu mitattavan kappaleen mukana. Vaikka anturin toiminta itsessään on yksinkertainen, niin sen rakenne on hieman monimutkainen. Komponenteista keskeisin on pietsosähköinen kide, jonka päälle tai sivulle on asennettu seisminen massa. Kun anturi liikkuu kohteen mukana, niin hitausvoimien vaikutuksesta pietsosähköiseen kiteeseen liittyvä massa joko puristaa tai venyttää kidettä hetkellisesti. Tämä jatkuvasti suuruuttaan ja etumerkkiä (+, -) vaihtava varaus on suoraan kiihtyvyyteen verrannollinen. Varaus muutetaan varausvahvistimen avulla jatkuvasti muuttuvaksi jännitteeksi ja se muodostaa anturin mittaussignaalin. (3, s. 46.)

4.2 Anturin sijoittaminen

Anturin kiinnityspiste tulee valita sillä tavoin, että värähtelynlähde ja mittausanturit sijaitsevat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Kiinnitystavalla on suuri merkitys tuloksiin ja mittauksien toistettavuuteen. Anturin kiinnityspistettä valittaessa on otettava huomioon seuraavia asioita

- kiinnitys ei saa rajoittaa taajuus- ja amplitudialuetta
- anturin oma massa ei saa kuormittaa kohdetta tai vaikuttaa värähtely ominaisuuksiin
- mittauspisteet on sijoitettu siten, että mittaus voidaan toistaa luotettavasti. (2, s. 244; 7, s. 1.)

Anturin paikkaan valinnassa tulee ottaa huomioon, että anturin ja värähtelylähteen välissä olisi mahdollisimman vähän rajapintoja, sillä ne vaikuttavat mittaustulokseen. Yleensä värähtelymittaukset suoritetaan akselin suuntaisesti ja säteissuunnassa. Kuvassa 7 on esimerkki anturin oikeasta ja väärästä sijoittelusta mitattavaan kohteeseen. (7, s. 2.)



KUVA 7. Anturin sijoittelu mitattavaan kohteeseen (7, s. 2)

Kunnonvalvonnamittauksissa koneista tehtävät mittaukset olisi suoritettava aina joka laakerin kohdalta kolmesta suunnasta eli vaakaa, pystyyn ja akselin suuntaan. Tämä tehdään siksi, että jotkin viat eivät välttämättä esiinny kuin tietyssä mittaussuunnassa. Eri mittaussuunnista tulevien värähtelyjen suuruuksien perusteella saadaan tarkemmin arvioitua koneessa esiintyvä vikaantumisen. Jos kyseessä on teollisuudessa käytettävä puhallin, joka on laakeroitu kummastakin päästä,

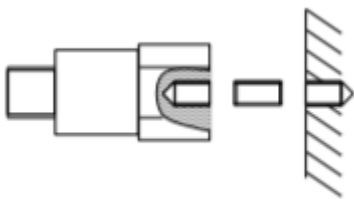
on siihen suoritettava kuusi mittausta. Käytännön tilanteessa tästä säännöstä voidaan joutua poikkeamaan, koska mittauksia ei välttämättä pystytä suorittamaan turvallisesti tai anturin kiinnittäminen ahtauden vuoksi on vaikeaa. (3, s. 53.)

Kiinteissä kunnonvalvontajärjestelmissä voidaan laakerien mittauspisteiden määrää rajoittaa puhtaasti kustannussyistä. Siksi on tarkasti mietittävä, että missä suunnassa anturin asentaa mitattavaan kohteeseen. Turbiineissa kiinteät anturit ovat yleensä sijoitettu radiaalisuunnassa, koska silloin on selvin havaita epätasapainon aiheuttama kasvava värinä. Toisena esimerkkinä paperikoneen telojen laakerivauriota saatetaan mitata akselisuunnassa, koska on huomattu, että laakeriviat esiintyvät parhaiten tässä suunnassa. (3, s. 53 - 54.)

4.3 Anturin kiinnitystavat

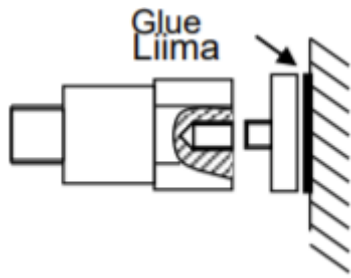
Anturin kiinnityspaikat valitaan kohteen mukaan. Yleisimmät kiinnitystavat ovat ruuvi-, ja magneettikiinnitykset. Lisäksi on olemassa erilaisia liima- tai vahakiinnityksiä. (8, s. 4.)

Ruuvikiinnityksessä anturi kiinnitetään kohteeseen vaamaruuvien avulla. Tällä kiinnitystavalla koko anturin taajuusalue on käytettävissä. Kuvassa 8 nähdään vaamaruuvikiinnityksen periaate. Hyvin toteutettuna kiinnitys ei aiheuttaa taajuusrajoitteita. Haasteita kohteelle saattaa tuoda tasopinnan koneistus- ja porausryvyyden huomioon ottaminen. (2, s. 245.)



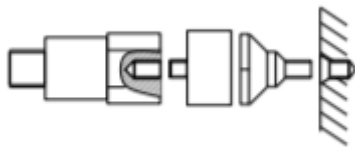
KUVA 8. Vaamaruuvikiinnitys (8, s. 4)

Kohteessa, joka ei jostakin syystä sovellu vaamaruuvikiinnitykselle, voidaan käyttää kierrealuslevyä. Kierrealuslevy liimataan mitattavan kohteen pintaan kiinni, jolloin voidaan tarkasti määrittää mittauspiste, jotta mittaukset tulee suoritettua aina samasta kohdasta. Rajoituksia kierrealuslevyn kanssa voi tuottaa ympäristöolosuhteet kuten liiman tarttumisen ja pysymisen. Kuvassa 9 on esitettyä esimerkki kiinnitystavasta. (2, s. 245; 8, s. 5.)



KUVA 9. Kiinnitys kierrealuslevyn avulla (8, s. 5)

Magneettikiinnitys on yleisin kiinnitysmenetelmä reittimittauksia tehdessä johtuen kiinnityksen helppoudesta ja nopeudesta. Tasomaisille ja kaareville pinnoille on olemassa omia magneetteja. Rajoituksena kyseiselle menetelmälle luo paksut maalipinnat, jolloin magneetti ei välttämättä pysy mitattavassa kohteessa. Lisäksi pintojen täytyy olla ferromagneettisia ja voimakas värinä saattaa ravistella magneetin irti kohteesta. Magneettikiinnitystä voidaan myös soveltaa kuvan 10 nipan tai aluslevyn välityksellä, jolloin myös reittimittauksissa pystytään varmistamaan mittauspisteen pysyminen samassa paikassa. (2, s. 246; 8, s. 7.)



KUVA 10. Magneettikiinnitys nipan välityksellä (8, s. 7)

5 SIGNAALINKÄSITTELYMENETELMÄT

5.1 Signaalin eri esitystavat

Värähtelymittaukset mitataan yleensä aikatasosignaalina. Mittauksen jälkeen tuloksia käsitellään mittauslaitteessa erilaisilla menetelmillä. Mittalaitteiden laskentateho on nykyään niin suuri, että mittauksen ja laitteilla tapahtuvan tuloksen suodatuksen välinen aika on olematon. Aikatasosignaalin suoritettava toimenpide on yleensä Fourier-muunnos. Muunnoksen avulla signaalista saadaan selville taajuussisältö, jonka avulla värähtelyn lähteitä pystytään selvittämään ja analysoimaan. Riippuen analysoitavan signaalin muodosta ja tyypistä on muunnokselle olemassa eri muotoja. Riippuen tapauksesta oletetaan, että aikatasosignaali muodostuu joukosta sinimuotoisia signaaleja, joilla on eri taajuudet, amplitudit ja vaihekulmat. (2, s. 181 - 182.)

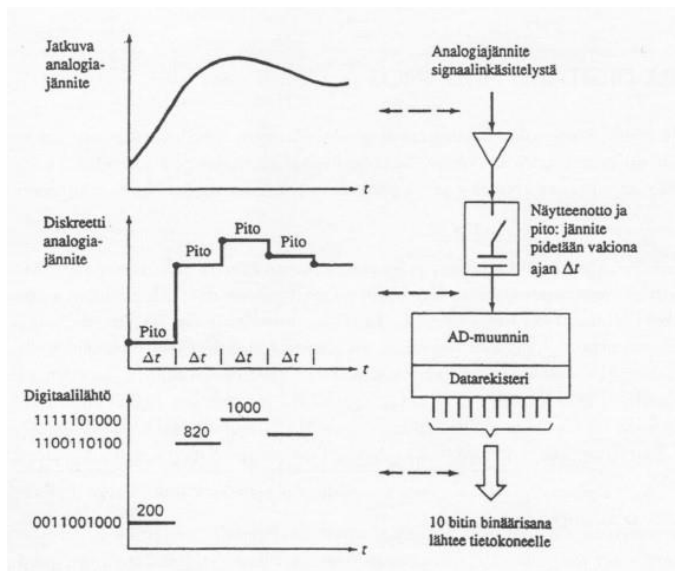
5.2 Analogia/digitaali-muunnos

Aikatasosignaali voi olla joko jatkuva tai diskreetti ajan suhteen. Diskreetistä aikatasosignaalia kutsutaan usein myös sekvenssiksi. Sekvenssi sisältää tietyn mittaisen ajanjakson, ja jokaista aikajaksoa vastaa signaalin lukuarvo, joka on tietyn suuruinen. (2, s. 185.)

Nykyaikainen mittaustekniikka käyttää digitaalitekniikan avulla toimivia mittalaitteita, jotka ovat yhdistetty tietokoneisiin. Tällaisen mittalaitteen mitattava signaali on muutettava numerojonoksi eli digitaaliseen muotoon. Tällaisella muunnoksella jatkuvasta signaalista saadaan aikaan sekvensseistä muodostuva diskreetti signaali. Tämä tapahtuu mittaussignaalin näytteistyksen avulla. Näytteistyksessä signaalin hetkellinen arvo luetaan tasaisin aikavälein. Näillä lukuarvoilla signaalista saadaan lukujono, joka on likiarvo alkuperäiselle signaalille. Mitä lyhyempi näytteiden mitauksien aikaväli ja näytteistysten resoluutio on, sitä tarkempi on myös likiarvo. (2, s. 185.)

Analogisen signaalin muuntaminen digitaaliseen muotoon tapahtuu AD-muuntimessa eli analogia-digitaalimuuntimessa. Muuntimessa oleva elektroninen piiri ottaa tasaisin väliajoin näytteitä analogisesta sisäänmenosignaalista digitaalista tiedonkäsittelyä varten ja muuttaa jännitearvon binääriluvuiksi. Kuvassa 11 on esitetty, kuinka digitaalinen diskreetti signaali muodostuu analogisesta signaalista. Binääriluvulla tarkoitetaan lukua, joka on kaksikantainen. Byte eli tavu on kut-

sumanimi 8- bittiselle binääriluvulle. AD-muuntimia on olemassa monenlaisia ja ne poikkeavat toisistaan rakenteelta ja toimintaperiaatteelta. Muuntimen nopeus ja resoluutio määrittää muuntimen suorituskyvyn. Muuntimen resoluutio määrittelee kuinka tarkasti digitaalinen signaali kuvaa analogista signaalia ja nopeus puolestaan määrittelee, kuinka korkeataajuisia värähtelyä voidaan mitata. (2, s. 185 - 187.)



KUVA 11. Signaalin muuntaminen analogisesta digitaalseksi diskreetti signaaliksi (2, s. 186)

5.3 Fourier-muunnos

Signaalien aikatasotarkastelun lisäksi niitä usein tarkastellaan myös taajuustasossa. Taajuustasoa tutkimalla voidaan erottaa signaalien värähtelyn komponentit. Kun halutaan saada selville signaalien taajuussisältö, käytetään siihen Fourier-muunnosta. Fourier-muunnoksen avulla voidaan erottaa usean jaksollisen värähtelyn signaalit näkyville summasignaalista. Riippuen asiayhteydestä taajuustaso esityksestä käytetään erilaisia nimityksiä kuten Fourier-muunnosta kutsutaan Fourier-spektriiksi. Värähtelymittauksessa puolestaan taajuustasoa kutsutaan spektriiksi ja esitystapaa kutsutaan amplitudispektriiksi. (2, s. 190.)

Yleensä käytännön kohteen signaalit ovat rajallisen pituisia sekvenssejä. Mitattu signaali on ajan suhteen joko jatkuva tai diskreetti. Riippuen siitä, käsitetäänkö signaalin jatkuvaksi vai diskreetiksi on Fourier-muunnoksen tekemiseen olemassa omat menetelmänsä. Myös signaalista, joka on diskreetti-aikainen, käytetään nimitystä sekvenssi. Sekvenssien taajuustasoesityksessä käytetään menetelmää Discrete Fourier Transformation eli DFT. DFT-menetelmä sisältää runsaasti eri las-

kutoimituksia. Yleisin laskutoiminta on Fast Fourier Transformation FFT-algoritmi, joka perustuu matriisioperaatioon. FFT-menetelmää käytetään yleensä nopeutensa takia. FFT-muunnos on keskeisin toiminto värähtelyanalysaattoreissa, sen takia niitä kutsutaan FFT analysaattoreiksi. (2, s. 191.)

6 LAAKERIN VIKAANTUMINEN JA VIANMÄÄRITYS

Laakerit ovat koneiden ja laitteiden tärkeimpiä osia. Laakerivaurioista seuraa kalliita seisokkeja. Käyttökohteeseen ja sen ympäristöön sopivan laakerin valinta tuo laitteistoon paremman toimintavarmuuden. Myös laakerin vikaantumisen tunnistaminen on yksi tärkeimmistä asioista, jolla laitteen toimintavarmuutta voidaan parantaa. Vaurion aiheuttajan syy ja sen tunnistaminen ovat tärkeässä roolissa luotettavan toiminnan varmistamiseksi. (10, s. 1 - 4; 11, s. 290.)

Laakeri voi vikaantua monella eri tavalla ja sen aiheuttajia on useita. Vian oireiden lukeminen voi olla usein haastavaa ja siksi toiminta painottuu korjaamiseen. Tällaisessa tapauksessa syyn selvittäminen jää taka-alalle ja oireiden selvittäminen jää toissijaiseksi. Oireita tulkitaan väärin tai niitä pidetään normaalina vierintäelimen vanhentumisena ja ne hyväksytään sellaisenaan. Alussa oire voi olla niin pieni, ettei sitä pidetä edes raportoinnin arvoisena.

Laakerien yleisimpiä vianaiheuttajia ovat

- epäkeskeinen roottoripari
- epätasapaino
- taipunut akseli
- akselin linjausvirheet
- mekaaninen väljyys
- vierintäelin viat
- vääränlainen voitelu
- laakerin likaantuminen. (10, s. 6 - 13; 12, s. 49.)

6.1 Laakerivauriot

Laakerivaurio voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: ennen käyttöä ja käytöstä aiheutuvat vauriot. Ennen käyttöä tapahtuvia vaurioita ovat virheelliset sovitteet, virheellinen asennustapa, staattiset linjausvirheet, sähkövirran kulkeminen laakerin läpi ja kuljetuksesta, käsittelystä tai varastoinnista aiheutuvat vauriot. Käytöstä aiheutuvat vauriot aiheutuvat puutteellisesta voitelusta, materiaalin väsymisestä, tärinästä, dynaamisesta linjausvirheestä tai sähkövirran kulkemisesta laakerin läpi. (11, s. 298.)

Virheellinen laakeripesän tai akselin sovite aiheuttaa suuren esijännityksen tai välyksen. Siksi oikealla sovituksella on valtava merkitys laakerin kestoiän ja toiminnan kannalta: Liian tiukka akselisoitus voi aiheuttaa laakerin renkaaseen suuren kehäjännityksen. Kun kehäjännitys ylittää renkaan lujuuden, voi laakerin rengas murtua. Kuvassa 12 on esimerkki murtuneesta laakerin renkaasta. (11, s. 300 - 301.)



KUVA 12. Kehäjännityksen murtama laakerin sisärenkas (11, s. 301)

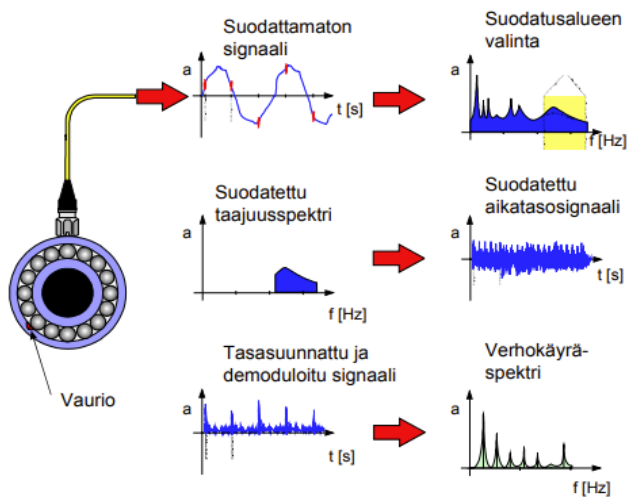
Puutteellinen voitelu aiheuttaa laakerille kuoriutumaa, jossa laakerin vierintäpinta vahingoittuu. Kuvassa 13 on laakeri, jonka pintaan on syntynyt kuoriutuma. Jokainen laakeri tarvitsee asianmukaisen voitelun ja yleensä voiteluun liittyvissä laakerivauriossa oletetaan, että laakerissa ei ollut öljyä tai rasvaa. Monet laakerivauriot johtuvat kuitenkin voiteluaineen viskositeetistä, liiallisesta voiteluaineen määrästä, riittämättömästä voitelusta, voiteluaineen epäsopivuudesta tai voiteluaineen sisältämistä epäpuhtauksista. Jos voiteluaine on tehotonta siitä seuraa pinnanväsyminen. Tällainen vaurio aiheuttaa sekundäärisiä vaurioita ja etenee vauhdilla. Jos vaurio pystytään havaitsemaan tarpeeksi aikaisin, voidaan vaurion todellinen aiheuttaja saada selville ja tilanteeseen pystytään reagoimaan. (11, s. 310 - 311.)



KUVA 13. Pallomaisen rullalaakerin sisäkehän vierintäpinnan vaurio (11, s. 311)

6.2 Verhokäyräanalyysi

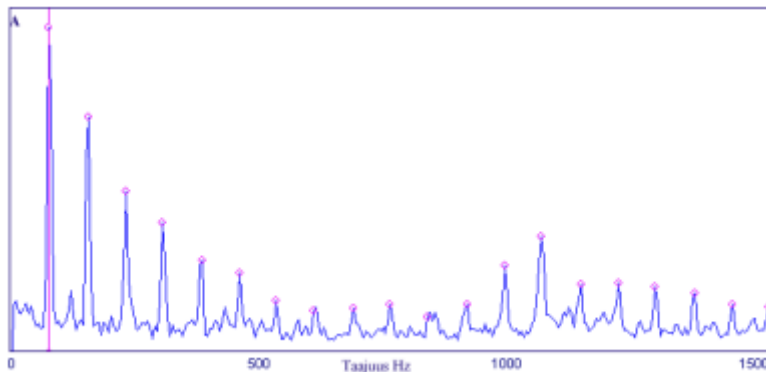
Laakerit on yleensä valmistettu metallista, joihin kohdistuu jaksottaisia voimia. Laakerin kehällä oleva vaurio tuottaa lyhyitä iskuja, jotka toistuvat jaksollisesti. Laajakaistaisesta spektristä on hankala erottaa vikoja koneen omien ja ympäristön aiheuttaman tärinöiden kuten epätasapainon vuoksi. Pienetkin impulssit herättävät laakerin ominaistajuuudet. Taajuusspektrissä tämä havaitaan laajakaistaisena resonanssikohtana suuremmilla taajuuksilla. Verhokäyrän toiminta on esitetty kuvassa 14. (6, s. 15.)



KUVA 14. Verhokäyrä analyysin toimintaperiaate (6, s. 15)

Laakerivaurioista aiheutuvat impulssit voidaan mitata, kun kaistanpäästösuodattimeen asetetaan resonanssi kohdan ympärille. Suodatinta käytetään mekaanisena vahvistimena vaurion aiheuttamille impulsseille. Signaalin tasasuunnataan ja demoduloidaan, jotta impulssien vikataajuus saadaan erotettua kantaaallostaa. Signaali, joka on amplitudidemoloitu sisältää vain vaurion aikaan saamat impulssit. Kun demoduloidulle signaalille suoritetaan FFT-analyysi, saadaan vikataajuuskomponentit näkyviin verhokäyräspektrissä. (6, s. 15; 2, s. 252.)

Terävät piikit verhokäyrässä kertovat laakeriviasta. Vika voidaan selvittää laskemalla laakerin vikataajuudet. Laakerin erityyppiset viat kuten vierintäelin- tai sisä- ja ulkokehänvaurio voidaan selvittää verhokäyräspektristä. Kuvassa 15 on vaurioituneen laakerin verhokäyräspektri. (9, s. 1 - 4; 2, s. 252.)



KUVA 15. Verhokäyrä, jossa erottuu laakerin sysäystaajuudet ja sen monikerrat (9, s. 4)

6.3 Haystack-ilmiö

Haystack-ilmiötä hyödynnetään laakerin värähtelymittauksissa voiteluongelmien tulkintaan. Spektrissä ilmiö näkyy, kilohertsien taajuudella heinäkasmaisena piikikkäänä kuviona. Kun vierintälaakerin voitelu ei ole riittävä, syntyy vierintäelimien ja vierintärajojen välille kosteuksista johtuvia impulsseja. Tällaiset impulssit herättävät laakerin tai siihen kiinnitetyn anturin ominaistajuuksia. Nämä herätteet ilmestyvät epäsäännöllisesti ja ominaistajuuksilla näkyvä värähtely ei ole sitoutunut tietyille taajuuksille. Yleensä haystack-ilmiön voi havaita tietyn taajuusalueen värähtelytason epäsäännöllisenä kohoamisena. (2, s. 254.)

Haystackin ilmenemistäajuus riippuu laakerin ominaistaajuudesta eli mitä pienempi laakeri on kyseessä, sitä korkeammalla taajuudella Haystack-ilmiö on havaittavissa. Yleensä aivan pienemmillä laakereilla ilmiö saattaa jäädä havaitsematta, jos värähtelymittausta ei pystytä suorittamaan kuin 10 kHz:iin. Vierintäradasta aiheutuvat impulssit aiheuttavat myös laakerin ominaistaajuuksien heräämisen, mutta tässä tapauksessa impulssin esiintymistäajuus on huomattavasti alhaisempi ja säännöllisempi. Impulssit ovat myös suurempia kuin voiteluun liittyvässä vauriossa, joten verhoikäryäanalyysillä voidaan tunnistaa mihin laakerin komponenttiin vaurio sijoittuu. Lisäksi pystytään erottamaan, että onko kyseessä rakenteellinen vaurio vai voitelusta johtuva ongelma. (2, s. 253.)

7 KUNNONVALVONTALAITTEISTOT

7.1 Beckhoff TF3600 TC3 Condition Monitoring

Beckhoff Automation on maailmanlaajuinen PC-pohjaisten ohjausteknologiaan perustuvien automaatiojärjestelmien toimittaja. Tuotevalikoiman pääalueita ovat teollisuus-PCt, I/O- ja kenttäväyläkomponentit, liikkeenohjaustuotteet ja automaatio-sovellukset. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Saksan Verlissä, jossa yrityksen keskeiset toiminnot kuten tuotekehitys, tuotanto, hallinto, myynti, markkinointi, tuki ja huoltopalvelut sijaitsevat. Suomessa yrityksellä on neljä toimipistettä. Suomen pääkonttori sijaitsee Hyvinkäällä ja sen lisäksi toimipisteitä on Tampereella, Seinäjoella ja Oulussa. Näissä paikoissa on tarjolla myynti-, tuki-, koulutus-, huolto- ja tuotekehityspalveluja. (16.)

Beckhoff tarjoaa kunnonvalvonnanjärjestelmistä koostuvaa ohjelmapakettia, joka on nimeltään Beckhoff TF3600 TC3 Condition Monitoring. Järjestelmän avulla voidaan suorittaa erilaisia kunnonvalvonnan mittauksia kuten värähtelytaajuuksien analysointia, moottorien ja vaihteistojen kunnonvalvontaa. Kunnonvalvonta sovellukseen tarvittavat algoritmit ovat saatavissa PLC-funktioblokkeina. (13.)

Kunnonvalvontalisäosa toimii samalla alustalla ja käyttää samoja suunnittelutyökaluja mitä normaali koneenohjaus. Tällä vältetään alisysteemien käyttöä eikä tule tarpeetonta ristinviestintää. Kenttäväyläterminaalina toimii sama EtherCAT, joka toimii niin kunnonvalvonnassa ja normaalissa koneenohjauksessa. Kuvassa 16 on esitetty eri mittaustoimintoja, joita voidaan suorittaa Beckhoff TF3600 Condition monitoring ohjelmalla. (13.)

Algorithms/Features:	TF3600 Condition Monitoring Level 1
Signal frame processing and inter-task communication	✓
Power Spectrum	✓
Magnitude Spectrum	✓
Sparse Spectrum	✓
Signal envelope	✓
Envelope Spectrum	✓
Power Cepstrum	✓
Fast-Fourier-Transform of real signal	✓
Fast-Fourier-Transform of complex signal	✓
Instantaneous Frequency	✓
Instantaneous Phase	✓
Analytic Signal	✓
Crest Factor	✓
Crest Factor Plus	✓
Moment Coefficients (mean, standard deviation, skewness, excess kurtosis)	✓
Histogram	✓
Time based RMS	✓
(Time-)Integrated RMS	✓
Multiband RMS	✓
Quantiles	✓
Discrete Classification	✓
Watch Upper Thresholds	✓
ArgSort	✓
Downsampling	✓
Vibration assessment (according to ISO 10816-3)	✓
Digital filter	✓ (component TC3 Filter)

KUVA 16. Condition monitoring- järjestelmän 1 tason toiminnot (13)

7.1.1 Mittakortti ja liitännät

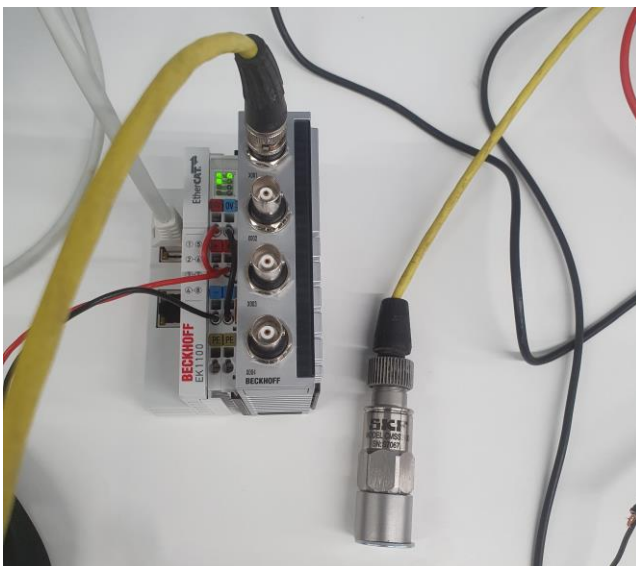
Anturin valintaan suoritetaan kohteen tarpeiden mukaan. Tässä työssä värähtelymittaukset suoritetaan laakeripukkiin, jonka laakereita mitattiin vertailumielessä. Koska toinen mittauslaite on SKF:n värähtelyanalysaattori, niin anturiksi valikoituu SKF:n mittalaitteen kanssa yhteensopiva kiihtyvyyssanturi CMSS 2100. Anturin tyyppi on pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi, joka näkyy kuvassa 17. Tämän kiihtyvyyssanturin mittausalue on 80 g, taajuusalue 0,5 - 20000:een Hz:iin ja herkkyys 100 mV/g. (14, s. 12 - 13).



KUVA 17. Työssä käytettävä kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturilta tuleva signaalitieto johdetaan ELM3604 EtherCat -terminaaliin. Tällaiseen terminaaliin pystytään liittämään maksimissaan neljä anturia. Kun anturissa on valmiiksi IEPE-käyttöliittymä, eli on pietsosähkökiteen sisältävä anturi. Tämän tyylinen anturi voidaan kytkeä suoraan ELM3604-terminaaliin.

Kunnonvalvonnan mittauksia varten mittakortti ja anturi täytyy kytkeä tietokoneeseen. Jotta kytkentä olisi mahdollinen, tätä varten tarvitaan EK1100 EtherCat -kytkin. Kaikki Beckhoffin kytkimet ja eri terminaalit voidaan kytkeä standardikiskoon ja toisiinsa. Kun osat ovat liitettynä toisiinsa, syntyy automaattisesti virtapiiri, joka syöttää kaikille osille kytkimelle kytketyn 24 V:n jännitteen. Kun kaikki tarvittavat kytkennät on suoritettu, voidaan EK1100 EtherCat-kytkimeltä lähtevä Ethernet-kaapeli kytkeä tietokoneeseen. Kuvassa 18 on mittauksiin valmis laitteisto.



KUVA 18. Mittakortti ja anturi valmiina käyttöön

7.1.2 Kunnonvalvontamenetelmän valinta

Logiikan ohjelmointi tapahtuu Beckhoff TwinCat 3 -ohjelmalla. Ohjelma pystytään toteuttamaan useammalla eri ohjelmointikielillä, joita ovat funktioblokkidiagrammi, tikapuulogiikkadiagrammi, sekvenssikaavio ja strukturoitu teksti. Funktionblokkeja voidaan hyödyntää myös muissa ohjelmointikielissä kuin pelkästään funktioblokkidiagrammiohjelmointi tyylissä. Tässä työssä käytetään strukturoitua tekstiä, koska se on käytettävyydeltään sopivin vaihtoehto tähän työhön. TwinCat 3 sisältää Funktioblokkit työssä tarvittaville muutoksille ja funktioille.

Ennen kuin siirrytään ohjelmointiin, on tärkeä tiedostaa, minkälaista kunnonvalvontaa halutaan suorittaa ja mitä kyseisellä ohjelmalla halutaan saada aikaan. Tässä sovelluksessa halutaan mitata laakerien värähtelyä ja saada näkyville kiihtyvyyden spektri, jolloin ohjelmaksi valittiin magnitude spectrum. Tällä ohjelmalla mitattuja tuloksia voidaan myöhemmin vertailla värähtelyanalysointitorin tuloksiin. Koska käytössä ei ole kuin yksi anturi, värähtelymittaukset suoritetaan eri mittauspisteiden välillä anturia siirtämällä eli laakerin vaaka- ja pystysuuntaan.

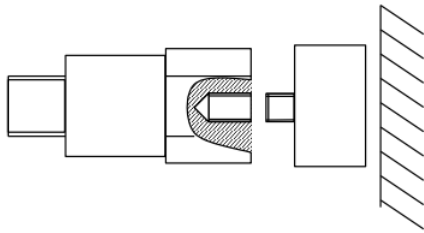
7.2 SKF Microlog analyzer AX

SKF Microlog analyzer AX on teollisuudessa käytettävä kannettava tiedonkeruulaitteisto, jolla voidaan suorittaa eri laitteiden ja koneiden kunnonvalvontaa kuten laakerien värähtelymittauksia. Laitte on vesi- ja pölytiivis IP 65- luokituksen omaava ja soveltuu hyvin teollisuuden eri kohteisiin. Laitteessa on neljä kappaletta, jolla pystytään suorittamaan mittauksia jopa 40 kHz:iin asti. Laitteisto käyttää värähtely mittauksendatan käsittelyyn Acceleration Enveloping gE - tekniikkaa. (15, s. 4-8.)

Mittaustulosten analysointiin SKF:ltä löytyy oma tietokonesovellus, johon mitaustulokset pystytään kätevästi siirtämään USB-kaapelin avulla ja tuloksiin pystytään perehtymään tarkemmin. Ohjelman avulla voidaan tutkia esimerkiksi laakerien sisä-, ulkokehän ja vierintäelimien taajuuksia ja sen pohjalta lähteä selvittämään mahdollisia laakerivaurioita.

7.3 Antureiden kiinnitys

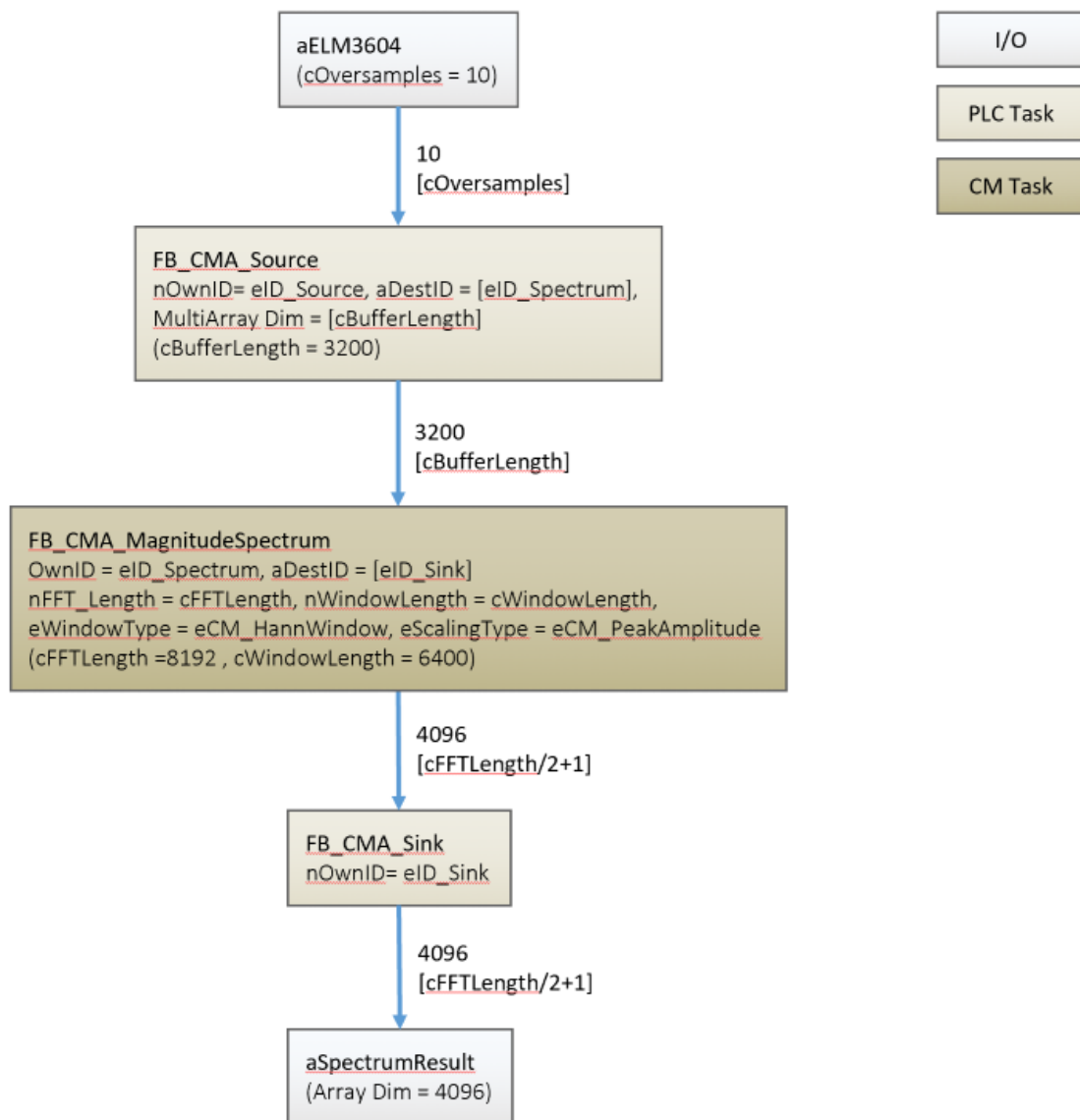
Antureiden kiinnitykseen vaikuttaa se, millaiseen kohteeseen anturit asennetaan ja täytyykö antureita siirrellä paikasta toiseen. Tässä tapauksessa helpoimmaksi vaihtoehdoksi valikoitu anturin kiinnittäminen mittauspisteeseen anturissa olevan magneetin avulla. Samaa anturia käytetään kummallakin mittalaitteella ja mittaukset ovat ajallisesti lyhyitä ja anturia joutuu siirtämään eri mittapisteiden välillä. Laakeripukki, johon anturi kytketään mittauksen ajaksi, on valmistettu koneistamalla, joten tasomaiset pinnat ovat pinnanlaadultaan riittäviä magneetilla kiinnittävää anturia varten. Kuvassa 19 havainnollistetaan, kuinka anturi kiinnitys laakeripukkiin tapahtuu.



KUVA 19. Anturin asennus magneetin avulla (8, s. 7)

7.4 Ohjelman rakenne

Kuvassa 20 on ohjelman rakenne lohkokaaaviona esitettyä. Ohjelma alkaa sillä, että tieto kerätään ELM3604-mittakortilta ja käsitellään FB_CMA_Source funktioblokilla. Seuraavassa vaiheessa edellisen funktioblokin ulostulo käsitellään FB_CMA_MagnitudeSpectrum-funktioblokilla. Tältä funktioblokilta saadaan aikaan kiihtyvyyden spektrin analyysi. Tämän jälkeen tiedot siirretään historiatietoihin FB_CMA_SINK-funktioblokille. Lopuksi kiihtyvyyden spektriä voidaan tarkastella aSpectrumResult:sta luodulla kuvaajalla.



KUVA 20. Ohjelman rakenne yksinkertaisesti esitettynä

Seuraavaksi käydään läpi ohjelman eri osia esimerkkikoodien avulla. Työn alkuvaiheessa on hyvä tarkastella datapuskurin pituutta, FFT:n pituutta ja spektrin pituutta. Ohjelmassa on tärkeä ottaa huomioon mittakorttiin ja anturiin liittyvä rajoitukset, kun määrittelee FFT:n pituutta, koska FFT:n tulee olla aina kahden potenssi. Tässä työssä käytetty mittakortti rajoittaa toimintansa 20 kHz:iin ja anturi 30 kHz:iin, joten maksimi arvo mitä pystytään käyttämään, on 16 384 Hz. Kuviossa 21 näkyy työssä käytetyt globaalit muuttujat. Lisäksi GVL:n on luotu muuttujat, jotta signaalin voidaan muuttaa ohjelman kierrossa suoraan kiihtyvyyden arvoksi m/s^2 . Arvot täytyy määrittellä valitun anturin ja mitta-alueen mukaan.

```

VAR_GLOBAL CONSTANT
  cOversamples      : UDINT      := 10;           // number of oversamples
  cBufferLength     : UDINT      := 3200;        // buffer size
  cWindowLength     : UDINT      := 6400;        // internal buffer size with 50% overlapping
  cFFTResult        : UDINT      := 4097;        // result of mag. spectrum (cFFTLengh/2+1)
  cFFTLengh         : UDINT      := 8192;        // length of FFT for mag. spectrum

  // optional constants if real sensors are applied
  cGravitationalAcc : LREAL := 9.81;           // 1 g approx 9.81 m/s^2 -> physical constant
  cSensitivity       : LREAL := 0.1;           // [in Volts/g] depends on sensor used in application, e.g. 100 mV/g
  cMeasurementRange : LREAL := 5;             // +5 Volts (ELM3604)
  cResolution        : LREAL := 7812500;      // (24 bits resolution + 1 bit sign) (ELM3604)
  cScale             : LREAL := cMeasurementRange*cGravitationalAcc/(cSensitivity*cResolution);
END_VAR

```

KUVIO 21. Työssä käytetyn GVL_constant tiedoston muuttujat.

Pääohjelma MAIN (PRG) löytyy kuviossa 22. MAIN (PRG)-ohjelmatiedosto löytyy kokonaisuutena liitteestä 1. Kun ohjelmassa halutaan käyttää mittakortilta tulevaa dataa, täytyy kohdasta nInput-Selection arvo muuttaa luvuksi 1, jolloin ohjelma käyttää mittauskortilta tulevaa dataa eikä funkti-
on generaattorilla luotuja arvoja.

```

PROGRAM MAIN

VAR CONSTANT
  cInitSource      : ST_MA_MultiArray_InitPars
  := ( eTypeCode := eMA_TypeCode_LREAL, nDims := 1, aDimSizes := [cBufferLength]);
END_VAR

VAR
  nInputSelection : UDINT := 0; // Switch between hardware and function generator
  nSample         : UDINT;
  aELM3604 AT %I* : ARRAY[1..cOversamples] OF INT; // Input from hardware e.g. ELM3604
  aBufferSignal1  : ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // signal part 1
  aBufferSignal2  : ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // signal part 2
  aBuffer         : ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // aBufferSignal1 + aBufferSignal2

  fbSource        : FB_CMA_Source :=( stInitPars := cInitSource,
                                       nOwnID := eID_Source,
                                       aDestIDs := [eID_Spectrum]); // Initialize source buffers
  fbSink          : FB_CMA_Sink := (nOwnID := eID_Sink);

  fbFunctionGenerator1 : FB_FunctionGenerator; // Signal Generator
  fSetFrequency1       : LREAL := 200; // Hz
  fSetAmplitude1       : LREAL := 2.6; // peak amplitude of sin signal
  fbFunctionGenerator2 : FB_FunctionGenerator; // Signal Generator
  fSetFrequency2       : LREAL := 1000; // Hz
  fSetAmplitude2       : LREAL := 3.8; // peak amplitude of sin signal

  aSpectrumResult : ARRAY[1..cFFTResult] OF LREAL; // Copy of result
  nCountResults   : ULINT;

  bCalculate : BOOL;
  (* RMS value calculation *)
  nChannel   : UDINT;
  fSum       : LREAL;
  fRmsValue  : LREAL;
  (* max amplitude calculation *)
  fMaxAmpl   : LREAL;
  nIdxOfMaxAmpl : UDINT; // index of max amplitude in spectrum result array
  (* frequency calculation *)
  fSampleTaskCycleTime : LREAL := 1; // ms
  fSampleRate          : LREAL; // Hz ( sample rate = oversampling factor / cycle time )
  fResolution          : LREAL; // Hz/Idx
  fFrequency           : LREAL; // Hz

  fbErrHist : FB_HRErrHist; // error monitoring
END_VAR

```

KUVIO 22. Pääohjelman ja sen sisältämät muuttujat

Kuviossa 23 on vianmäärityksen pääohjelma pyörittää MAIN_CM. MAIN_CM-tiedosto löytyy kokonaisuudessa liitteestä 2. Ohjelmassa on vaihdettu ikkunatyyppeiksi eWindowType kohdasta HanningWindow tyyliseksi vakion HannWindow sijaan ja skaalausta muutettu RMS tyyppiseksi PeakAmplituden sijaan.

```
PROGRAM MAIN_CM
VAR CONSTANT
  cInitSpectrum : ST_CM_MagnitudeSpectrum_InitPars := ( nFFT_Length := cFFTLength,
                                                       nWindowLength := cWindowLength,
                                                       bTransformToDecibel:= FALSE,
                                                       eWindowType := E_CM_WindowType.eCM_HammingWindow,
                                                       eScalingType := E_CM_ScalingType.eCM_RMS);

  // change eScalingType to E_CM_ScalingType.eCM_PeakAmplitude if max of spectrum has to be the amplitude value of a sine-wave
END_VAR
VAR
  fbSpectrum : FB_CMA_MagnitudeSpectrum :=( stInitPars := cInitSpectrum,
                                           nOwnID := eID_Spectrum,
                                           aDestIDs := [eID_Sink] );

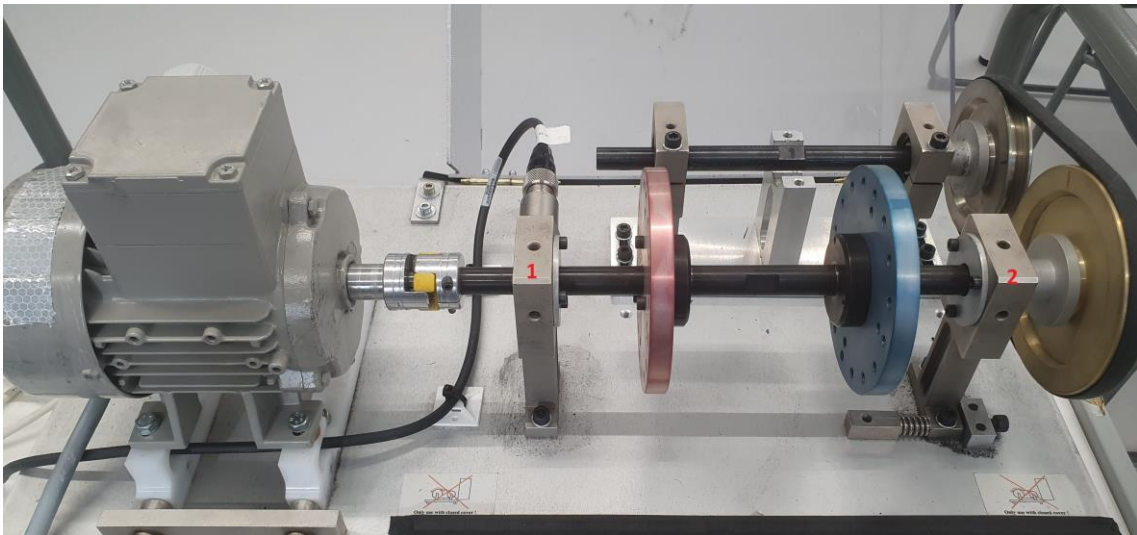
  fbErrHist : FB_HRErrHist; // error monitoring
END_VAR
```

KUVIO 23. CM_MAIN-pääohjelman tiedoston muuttujat

Kunnonvalvontasovelluksen luonti edellyttää hyvää ohjelmoinnin osaamista sekä perehtymistä TwinCat 3 -ohjelmiston käyttöön. Lisäksi tarvitaan perehtymistä kunnonvalvonnan suorittamisesta sekä laaja-alaista perehtymistä värähtelyn teoriaan sekä signaalien käsittelyyn. Kun suunnitellaan tiettyyn kohteeseen kunnonvalvonnan mittauksien suorittamista, on hyvä miettiä, millaista kunnonvalvontaa halutaan suorittaa. Kunnonvalvontatyyppin varmistuttua on hyvä miettiä, millaisia eri elementtejä ohjelman täytyy sisältää, jotta voidaan luoda oikeanlainen kunnonvalvontaohjelma kyseiseen ympäristöön. Hyvän suunnitelman pohjalta on hyvä lähteä valmistamaan juuri sellaista ohjelmaa, mitä kohteeseen kaivataan. Ohjelman toimivuuden ja käytettävyyden kannalta tekijän olisi järkevintä valmistaa ohjelma itse ja luoda työhön tarvittavat funktioblokit historia tietojen kirjaamista varten ja spektrin laskennan luomiseksi.

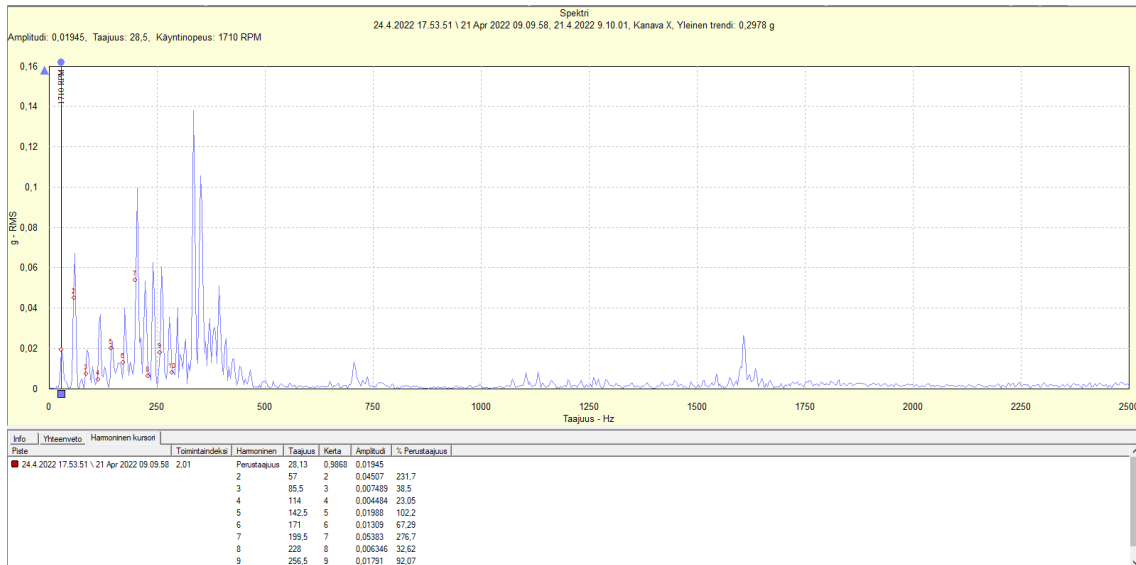
8 MITTAUKSET

Tässä luvussa vertaillaan Beckhoffin mittakortilla ja SKF:n värähtelyanalysointilaitteella saatuja tuloksia toisiinsa. Mittaustuloksia vertaillaan hyvin pintapuolisesti siten, että tarkastellaan suurempien amplitudipiikkien esiintymistä taajuustasolla. Mittaukset suoritettiin testipenkkin kahdelle laakeripukille ja sen laakereille x- ja y-suunnassa. Kuvassa 22 näkyy työssä käytetty testipenki, jota pyöritettiin noin 1720:n rpm nopeudella. Laakeripukin laakerit olivat eri valmistajien tekemiä urakuula-laakereita mutta kaikki olivat numeroltaan 6002.

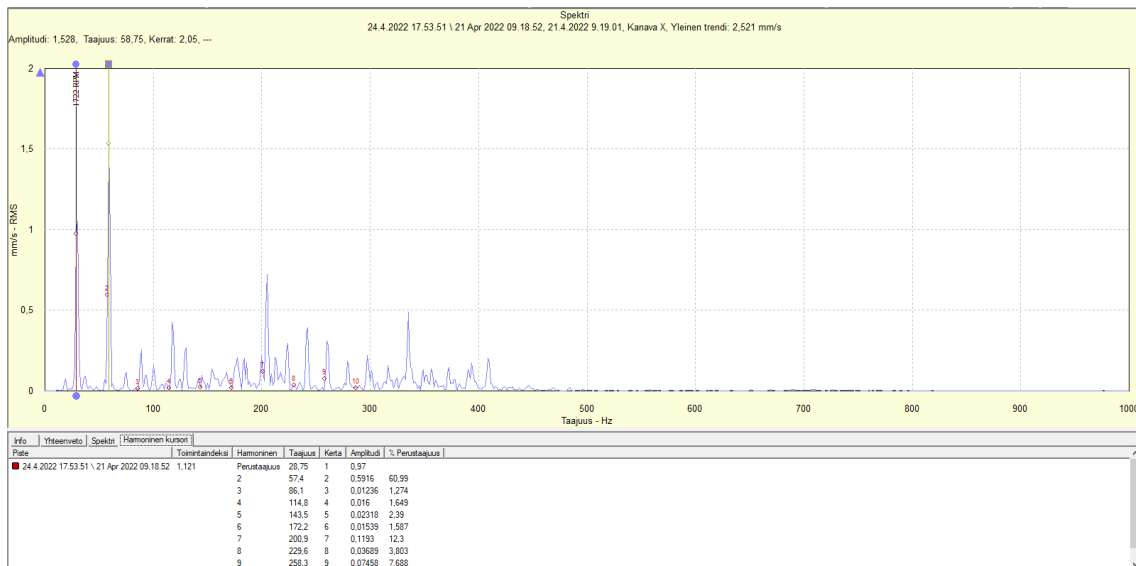


KUVA 22. Testipenki ja laakeripukit 1 ja 2 joita mitattiin työssä

Seuraavaksi tarkastellaan mittaustuloksia, jotka mitattiin kytkimen puoleisen laakeripukin laakerilta eli laakeripukista 1. SKF:n värähtelyanalysointilaitteella laakerista mitattiin kiihtyvyyden ja nopeuden spektrit. Kiihtyvyyden spektri näkyy kuvassa 23 ja nopeuden spektri kuvassa 24. Kiihtyvyyden ja nopeuden spektrit poikkeavat hieman toisistaan sisällöllisesti, mutta kuitenkin sisältää samat pyörimisnopeuden monikerran komponentit. SKF:n ohjelman avulla nämä komponentit ovat helposti tunnistettavissa analysointityökalun avulla.

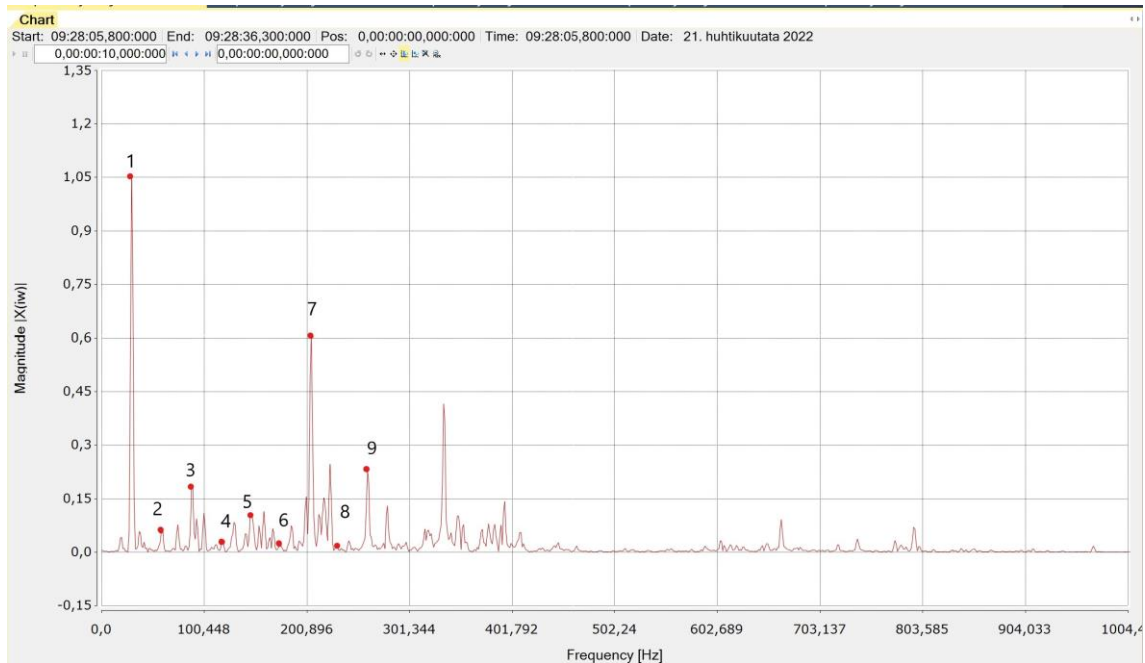


KUVA 23. Laakeripukin kiihtyvyyden spektri pystysuunnasta pyörimisnopeuden monikerroilla



KUVA 24. Laakeripukin nopeuden spektri pystysuunnasta pyörimisnopeuden monikerroilla

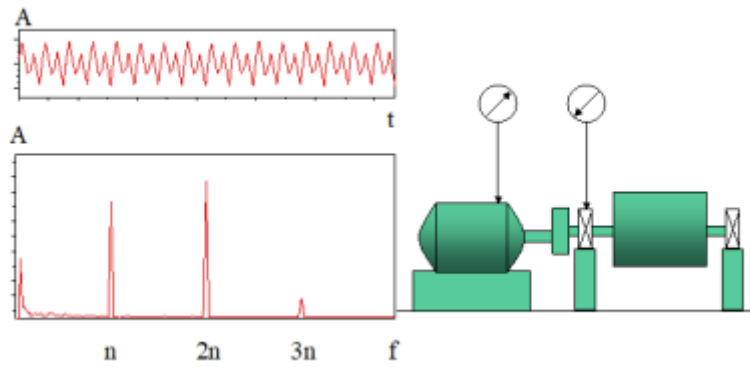
Beckhoffin laitteella saadut mittaustulokset näkyvät kuvassa 25. Samalla lailla kuin SKF:n laitteella mitatuissa tuloksissa niin Beckhoffin laitteella mitattiin noin 1720:n rpm nopeudella. Beckhoffin ohjelmalla ei pystynyt määrittämään hienosti pyörimisnopeutta eikä sen aiheuttamia monikertoja kuten SKF:n analysointi ohjelmalla, mutta tuloksia voidaan tarkastella myös päällisin puolin.



KUVA 25. Beckhoffin mittalaitteistolla pystysuunnasta mitattu tulos

Niin kuin työssä aiemmin mainittiin, Beckhoffin mittalaitteistolla oli tarkoitus saada aikaiseksi kiihtyvyyden spektri. Mittalaitteilla mitattu tulos ei suoraan muistuta SKF analysaattorilla mitattua kiihtyvyyden spektriä, vaan enemmänkin nopeuden spektriä. Vaikka nopeuden spektrikään eivät ole aivan yhdenmukaisia keskenään, silti niissä on jonkin verran yhtäläisyyksiä. Kun verrataan SKF:n mittalaitteella mitattua nopeuden spektriä ja Beckhoffin mittalaitteistolla saatuja tuloksia keskenään, niin lähes kaikki pyörimisnopeuden monikerrat ovat silmämääräisesti erotettavissa ja samalla taajuusalueella. SKF:n laitteella mitatusta nopeuden spektristä ja Beckhoffin mittalaitteella saadusta tuloksesta pisteet 1 ja 7 ovat ainoat amplitudit, jotka ovat lähelle samalla taajuudella ja saman arvoisia. Esimerkiksi Beckhoffin mittalaitteella mitatusta tuloksesta toinen piste poikkeaa huomattavasti SKF:n analysaattorilla mitattuun toiseen nopeuden monikertaan.

Kuvassa 26 on havainnollistettu säteislinjausvirhe. Säteislinjausvirheessä akselien keskilinjat eivät ole samassa linjassa, mutta ovat yhdensuuntaiset. Tällaisessa tilanteessa se aiheuttaa säteissuuntaista värähtelyä. Säteensuunnassa taajuudella n värähtelyn vaihe-ero on 180 astetta kytkimen eri puolilla sijaitseissa laakereissa. Pyörimisnopeuden toinen monikerta $2n$ on usein korkeampi mitä pyörimistaajuudella n . Näiden kahden amplitudin keskinäiseen suhteeseen vaikuttaa kytkimen rakenne ja tyyppi. (10, s.12.) Kun säteislinjaus virhettä verrataan SKF:n analysaattorilla mitattuun nopeuden spektriin voisi siitä päätellä, että testipenkissä on jonkin asteinen säteislinjausvirhe. Beckhoffin mittalaitteen tuloksesta säteislinjausvirhettä ei kuitenkaan pystytä havaitsemaan.



KUVA 26. Esimerkki säteislinjausvirheestä spektrissä (10, s. 12)

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutustuttiin Beckhoff-ympäristön toimintaan kunnonvalvonnassa. Yhtenä osana työtä valmistettiin Beckhoff TF3600 TC3 condition monitoring -kunnonvalvontajärjestelmä ja vertailtiin laitteiston antamia tuloksia SKF:n värähtelyanalysaattoria antamiin tuloksiin. Työn alussa perehdyttiin kunnonvalvonnan aistinvaraisiin menetelmiin ja erinäisillä mittalaitteilla suoritettaviin menetelmiin. Seuraavaksi tutkittiin värähtelyä, antureita ja signaalinkäsittelyn teoriaa.

Opinnäytetyön alussa tietämykseni ohjelman luonnista oli aika vähäinen, joten alkuun kului paljon aikaa ohjelman rakentamisen opetteluun ja mittakortin käytön opetteluun. Ohjelmoinnista tietoa löytyi runsaasti, mutta kyseisestä Beckhoffin kunnonvalvontasovelluksesta, eikä sen käytöstä löytynyt tietoa juuri muualta kuin valmistajan sivuilta, joten aikaa kului paljon tiedon etsimiseen. Kunnonvalvonta aiheena on itselle tutumpi. Kiinnostus kunnonvalvontaa kohtaan ja sen kehittäminen oli yksi syy ryhtyä tähän työhön.

Haasteena työssä oli mittalaitteistoon liittyvien osien saatavuus koronasta johtuvan komponenttipulan takia. Työhön tarvittavien teollisuus-PC:n ja mittakorttien toimitusajat kasvoivat puolen vuoden mittaiseksi. Ongelmaan löydettiin ratkaisu lainaamalla Oulun yliopistolta tähän työhön Beckhoffin mittakortti, jolla mittaukset saatiin suoritettua. Kun työ oli edennyt siihen vaiheeseen, että mittauksia oli suoritettu sekä Beckhoffin mittalaitteella sekä SKF:n värähtelyanalysaattorilla törmäsin ongelmaan, jossa havaittiin, etteivät mittaustulokset olleet täysin vertailukelpoisia keskenään. Ohjelman ja mittalaitteiston tutkimisen jälkeen havaittiin ongelma mittakortilta tulevien näytteiden kanssa. Näytteistä osa saattoi tulla mittakortista oikein, mutta osa näytteistä oli suoraan kopiota edellisistä tai mittakortti ei antanut joltakin paikalta ollenkaan näytettä. Valitettavasti aika ei riittänyt siihen, että ongelma olisi löytynyt ratkaisua ja mittalaitteella olisi pystytty tuottamaan todenmukaisempia mittaustuloksia.

Opinnäytetyö oli prosessina melko haastava, mikä johtui TwinCat-ohjelman huonosta tuntemuksesta. Vaikka työn lopputuloksessa ei päästy haluttuun tavoitteeseen, eteni se loogisesti ja uutta tietoa tuli paljon. Tulevaisuutta ajatellen tällaisen kunnonvalvontalaitteiston käyttöönotto tarvitsi lisää aikaa mittakortin asetuksien ja toimivuuden tutkimiselle. Vika mittakortissa ei välttämättä ole suuri, mutta vaikuttaa olennaisesti lopputulokseen. Tällaisen toimivan laitteiston käyttö teollisuudessa helpottaisi kunnonvalvontaa, sillä mittauksia ei tarvitsi suorittaa erillisellä laitteistolla, vaan

ne voitaisiin tarkistaa reaaliaikaisesti laitteen käyttöpaneelistä. Tällainen toiminto helpottaisi vaurion etenemisen seuranta ja tilanteen vakavuuden arviointia.

LÄHTEET

1. Käypi-Hanke 2022. Käypi-hanke. Hakupäivä 27.4.2022. <https://kaypi.sytes.net/>.
2. Mikkonen, Henry, Miettinen, Juha, Leinonen, Pertti, Jantunen, Erkki, Kokko, Voitto, Riutta, Erkki, Sulo, Petri, Komonen, Kari, Lumme, Veli Erkki, Kautto, Juha, Heinonen, Kari, Lakka, Sami & Mäkeläinen, Risto 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Kerava: KP-Media Oy.
3. Nohynek, Petri & Lumme, Veli Erkki 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. Täydennetty painos. Hamina: KP-Media Oy.
4. Mänttari, Jyrki 2021. Kunnonvalvonnan perusteet. Ammatilliset aineet.127. Opintojakson luennot keväällä 2021 Oulu: Oulun ammattiopilaitos, tekniikan yksikkö.
5. PSK 5701 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus: Käsitteet ja määritelmät. 8. painos. PSK-Käsikirja. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
6. ABB 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. Luku 23. Kunnonvalvonta ja huolto.
7. PSK 5702 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus: Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3. painos. PSK-Käsikirja. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
8. PSK 5703 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus: Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 8. painos. PSK-Käsikirja. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
9. PSK 5706 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus: Valvontamenetelmät. 4.painos. PSK-Käsikirja. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
10. PSK 5707 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus: Vianmääritys. 6. painos. PSK-Käsikirja. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
11. SKF-Yhtymä 2016. SKF-Laakerien kunnossapito.
12. Järviö, Jorma 2004. Kunnonvalvonta 2. Täydennetty painos. Hamina: KP-Media Oy.

13. Beckhoff Automation GmbH & Co. 2016. TF3600 TC3 Condition Monitoring, Frequency analysis. Hakupäivä 20.2.2022.
[https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf3600_tc3_condition_monitoring/1162492299.html&id=.](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf3600_tc3_condition_monitoring/1162492299.html&id=)
14. SKF Group 2018. SKF Vibration Sensors Catalog. Hakupäivä 12.2.2022.
https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196804926fe-11604_16-EN-Vibration-Sensor-Catalogue--OK_tcm_12-267858.pdf.
15. SKF Group 2021. SKF Microlog series catalogue. Hakupäivä 24.2.2022.
https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/09421da5a7541373-14285_11-EN--SKF-Microlog-Product-Catalog_tcm_12-317959.pdf.
16. Beckhoff Automation 2022. Beckhoff Automation. Hakupäivä 20.11.2021.
<https://www.beckhoff.com/fi-fi/company/>.
17. Beckhoff Automation GmbH & Co. 2016. TF3600 TC3 Condition Monitoring, Frequency analysis Hakupäivä 20.2.2022.
[https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf3600_tc3_condition_monitoring/1162492299.html&id=.](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf3600_tc3_condition_monitoring/1162492299.html&id=)

PROGRAM MAIN

VAR CONSTANT

```

cInitSource          : ST_MA_MultiArray_InitPars
                    := ( eTypeCode := eMA_TypeCode_LREAL, nDims := 1, aDimSizes
                    := [cBufferLength]);

```

END_VAR

VAR

```

nInputSelection:          UDINT:= 0; // Switch betweenhard-
                           ware and function generator

nSample                  : UDINT;
aELM3604 AT %I*          : ARRAY[1..cOversamples] OF INT; // Input from
                           hardware e.g. ELM3604

aBufferSignal1: ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // signal part 1
aBufferSignal2: ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // signal part 2
aBuffer                  : ARRAY[1..cOversamples] OF LREAL; // aBufferSignal1 +
                           aBufferSignal2

fbSource                 : FB_CMA_Source :=(          stInitPars := cInitSource,
                                                       nOwnID := eID_Source,
                                                       aDestIDs:= [eID_Spectrum]); //

Initialize source buffers

fbSink                   : FB_CMA_Sink := (nOwnID := eID_Sink);

fbFunctionGenerator1    : FB_FunctionGenerator; // Signal Generator
fSetFrequency1          : LREAL := 200; // Hz
fSetAmplitude1          : LREAL := 2.6; // peak amplitude of sin signal
fbFunctionGenerator2    : FB_FunctionGenerator; // Signal Generator
fSetFrequency2          : LREAL := 1000; // Hz
fSetAmplitude2          : LREAL := 3.8; // peak amplitude of sin signal

aSpectrumResult         : ARRAY[1..cFFTResult] OF LREAL; //
                           Copy of result
nCountResults           : ULINT;

bCalculate               : BOOL;
(* RMS value calculation *)
nChannel                : UDINT;
fSum                    : LREAL;
fRmsValue               : LREAL;
(* max amplitude calculation *)
fMaxAmpl                : LREAL;
nIdxOfMaxAmpl          : UDINT; // index of max amplitude in spectrum
                           result array
(* frequency calculation *)
fSampleTaskCycleTime    : LREAL := 1; // ms
fSampleRate             : LREAL; // Hz ( sample rate = over-
sampling factor / cycle time )
fResolution             : LREAL; // Hz/Idx
fFrequency              : LREAL; // Hz

fbErrHist               : FB_HRErrHist; // error monitoring

```

END_VAR

CASE nInputSelection OF

```

0: (* input from ELM3604 *)
    FOR nSample := 1 TO cOversamples DO
        aBuffer[nSample] :=
cScale*INT_TO_LREAL(aELM3604[nSample]); // convert from Volts to acceleration in m/s^2
    END_FOR
1: (* signal generator *)
fbFunctionGenerator1(
    fFrequency := fSetFrequency1
    fAmplitude := fSetAmplitude1,
    eFunction := E_FunctionType.Sine,
    aSignal := aBufferSignal1 )
fbFunctionGenerator2(
    fFrequency := fSetFrequency2,
    fAmplitude := fSetAmplitude2,
    eFunction := E_FunctionType.Sine,
    aSignal := aBufferSignal2 );
    FOR nSample := 1 TO cOversamples DO
        aBuffer[nSample]:=aBufferSignal1[nSample]+aBufferSignal2[nSample]
    ];
END_FOR
END_CASE

// Call source to collect data
fbSource.Input1D( pDataIn := ADR(aBuffer),
    nDataInSize := SIZEOF(aBuffer),
    eElementType := eMA_TypeCode_LREAL,
    nWorkDim := 0,
    pStartIndex := 0,
    nOptionPars := cCMA_Option_MarkInterruption );
IF fbSource.bError THEN
    fbErrHist.AddError(bErr:=TRUE,hrErrCode:=fbSource.hrErrorCode,
sErrSource:='MAIN.fbSource'); // error monitoring
    // ToDo: if error
END_IF

// Push results to sink
fbSink.Output1D(pDataOut := ADR(aSpectrumResult),
    nDataOutSize := SIZEOF(aSpectrumResult),
    eElementType := eMA_TypeCode_LREAL,
    nWorkDim := 0,
    nElements := 0
    pStartIndex := 0,
    nOptionPars := 0,
    bNewResult => bCalculate );
IF fbSink.bError THEN
    fbErrHist.AddError(bErr:=TRUE,hrErrCode:=fbSink.hrErrorCode,sErrSource:='MAIN.fbSink');
    // error monitoring
    // ToDo: if error
END_IF
IF bCalculate THEN
    nCountResults := fbSink.nCntResults;
    IF NOT LrealIsNaN(aSpectrumResult[1]) THEN
        // Calculate RMS value of signal
        fSum := 0;
        FOR nChannel := 1 TO cFFTResult DO
            fSum := fSum + (aSpectrumResult[nChannel] * aSpectrumResult[nChannel]);
        END_FOR
        fRmsValue := SQRT(fSum);

        // Calculate max amplitude in spectrum
        fMaxAmpl := 0;
        FOR nChannel:=1 TO cFFTResult DO
            IF aSpectrumResult[nChannel] > fMaxAmpl THEN
                fMaxAmpl := aSpectrumResult[nChannel];
                nIdxOfMaxAmpl := nChannel;
            END_IF
        END_FOR
    END_IF
END_IF

```

```
END_IF
END_FOR
// Calculate frequency for max amplitude [ frequency = index * (sample
rate / FFT length) ]
    fSampleRate := cOversamples * (1000.0 / fSam-
pleTaskCycleTime);
    fResolution := fSampleRate / cFFTLenght;
    fFrequency := (nIdxOfMaxAmpl-1) * fResolution; // -1 to
consider DC = 0*fResolution
END_IF
// ToDo: if new result is ready
END_IF
```

PROGRAM MAIN_CM

VAR CONSTANT

```

    cInitSpectrum: ST_CM_MagnitudeSpectrum_InitPars := ( nFFT_Length:=
    cFFTLenght,

                nWindowLength := cWindowLength,
                bTransformToDecibel:= FALSE,
                eWindowType:= E_CM_WindowType.eCM_HammingWindow,
                eScalingType := E_CM_ScalingType.eCM_RMS);

```

```

// change eScalingType to E_CM_ScalingType.eCM_PeakAmplitude if max of spectrum has
to be the amplitude value of a sine-wave

```

END_VAR

VAR

```

    fbSpectrum      : FB_CMA_MagnitudeSpectrum :=(stInitPars := cInitSpectrum,
                nOwnID := eID_Spectrum,
                aDestIDs := [eID_Sink] );

    fbErrHist       : FB_HRErrHist; // error monitoring

```

END_VAR

```

// Call spectrum call

```

```

fbSpectrum.Call();

```

```

IF fbSpectrum.bError THEN

```

```

    fbErrHist.AddError(bErr:=TRUE,hrErrCode:=fbSpectrum.hrErrorCode,
    sErrSource:='MAIN_CM.fbSpectrum'); // error monitoring
    // ToDo: if error

```

END_IF