

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Aki Ihalainen

ÄLYKKÄÄT    ANTURIT    HAMMASKYTKIMIEN    KUNNONVALVONNAN  
VÄLINEINÄ

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2014



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Joulukuu 2014**  
**Kone- ja tuotantotekniikan**  
**koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. +358 50 260 6800

Tekijä  
Aki Ihalainen

Nimeke  
Älykkäät anturit hammaskytkimien kunnonvalvonnan välineinä

Toimeksiantaja  
MFG Components, Tohmajärvi

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön aiheena olivat älykkäät anturit hammaskytkimien kunnonvalvonnan välineinä. Opinnäytetyö perustuu MFG Componentsin toimeksiantoon ja heidän tarpeeseensa saada yksinkertaiselle koneistetulle tuotteelle älykkyyttä ja lisäarvoa. Tiedon kerääminen opinnäytetyön teoriaosaa varten tapahtui internetin ja aiheeseen liittyvän kirjallisuuden avulla.

Työn tarkoituksena oli tutkia Teknologian tutkimuskeskuksen kehittämän älykkään anturin hyödyntämistä hammaskytkimen kunnonvalvonnassa. Lisäksi haluttiin saada selville kunnonvalvontaan liittyviä työkaluja ja niiden erilaisia mittareita. Työn päämääränä oli päästä testaamaan älykästä anturia pyörivässä laitteessa ja saada testauksesta lisätietoa anturin käyttömahdollisuudesta. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada selville, voiko älykkäitä antureita käyttää hammaskytkimien kunnonvalvonnassa.

Työn tuloksena selvitettiin, että Teknologian tutkimuskeskuksen kehittämää anturia ei nykyisessä muodossaan voida käyttää hyväksi hammaskytkimien kunnonvalvonnassa. Anturi vaatii jatkokehittämistä hammaskytkimien kunnonvalvontaan liittyvien kiihtyvyyden ja lämpötilamittausten osalta. Toisaalta huomattiin, että anturin avulla saadaan luotettavaa mittaustietoa pyörivästä kohteesta tiettyyn pyörimisnopeuteen asti.

Kieli

suomi

Sivuja 73

Liitteet 0

Asiasanat

kunnonvalvonta, kiihtyvyys, lämpötila, älykkyys



**THESIS**  
**December 2014**  
**Degree Programme in Mechanical and  
Production Engineering**  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
Tel. +358 50 260 6800

Author  
Aki Ihalainen

Title  
Smart Sensors as Condition Monitoring Tools for Gear Clutches

Commissioned by  
MFG Components, Tohmajärvi

Abstract

The subject of this thesis was smart sensors as condition monitoring tools for gear clutches. The thesis is based on an assignment by MFG Components. The assignment from MFG Components is based on their wish to have intelligence in gear clutches. The intelligence of gear clutches will allow MFG Components to expand their business into new markets.

The main purpose of the thesis was to investigate the usage of the Little Node smart sensor in condition monitoring of gear clutches. An additional purpose was to get basic information on the tools of condition monitoring and the measurement tools for them. The main goal of the thesis was to test smart sensors in a rotating machine and get more information about the possibilities of smart sensor usages. The objective of the thesis was to find out if smart sensors are useable in condition monitoring of gear clutches.

As a result of the thesis, the Little Node smart sensor wasn't feasible enough to be used in condition monitoring of gear clutches as it is. The sensor needs more development and research on what comes to measuring the condition monitoring. On the other hand it was noticed that reliable data can be received from the sensor up to certain rotation speeds.

Language

Pages 73

Finnish

Appendices 0

Keywords

condition monitoring, acceleration, temperature, intelligence

# Sisältö

## Tiivistelmä

## Abstract

1	Johdanto .....	6
2	Yhteistyöyritykset .....	8
2.1	MFG Components .....	8
2.2	Teknologian tutkimuskeskus VTT ja VTT:n tuotekehitysprojekti -NIKSIT .....	9
3	Akselinliitokset .....	11
3.1	Liikkuvat, vääntöjäykät akselinliitokset .....	12
3.2	Hammaskytkimet .....	13
3.3	MFG Componentsin valmistamat Desch GC -hammaskytkimet .....	15
3.4	Metallilamellikytkimet .....	17
3.5	Yleisnivelet ja nivelakselit .....	18
3.6	Ketjukytkimet .....	19
4	Kunnossapito .....	20
4.1	Kunnossapidon historiaa .....	20
4.2	Kunnossapito yleisesti .....	21
4.3	Ehkäisevä kunnossapito .....	22
5	Koneiden kunnonvalvonta .....	24
5.1	Kunnonvalvonta yleisesti .....	24
5.2	Mittaavan kunnonvalvonnan merkitys .....	27
6	Kunnonvalvonnan mittausmenetelmät .....	28
6.1	Värähtelymittaukset .....	28
6.1.1	Värähtelyn mittaaminen .....	30
6.1.2	Värähtelyn mittauspaikan valinta .....	31
6.2	Lämpötilamittaukset .....	32
6.2.1	Koskettava lämpötilamittaus .....	32
6.2.2	Infrapunamittaus .....	33
6.3	Kulumishiukkasanalyysi .....	34
6.4	Voiteluöljyanalyysi .....	35
6.5	Hyötysuhdemittaukset ja epätahtimoottoreiden sähkövirta-analyysi .....	35
7	Anturit .....	37
7.1	Värähtelyä mittaavat anturit .....	37

7.1.1	Kiihtyvyyssanturit .....	37
7.1.2	Nopeusanturit .....	39
7.1.3	Siirtymäanturit .....	39
7.2	Lämpötilaa mittaavat koskettavat anturit .....	40
7.2.1	Vastuslämpötila-anturit PT-100 ja PT-1000 .....	40
7.2.2	Termoelementtianturi .....	41
7.3	Älykkäät anturit ja MEMS-anturit .....	42
7.4	VTT:n Little Node .....	43
8	Värähtelysignaalin tulkitseminen .....	44
8.1	Fourier-muunnos ja spektri .....	44
8.2	Hammasvälitysten vikatiilojen tulkitseminen spektristä .....	46
8.2.1	Hampaiden kuluminen .....	47
8.2.2	Hammasvälityksen ylikuormitus.....	47
8.2.3	Hammasvälityksen epäkeskeisyys, virheellinen hammasvälitys ja linjausvirhe.....	48
8.2.4	Viallinen hammas hammasvälityksessä.....	49
9	Teollisuuden palvelu.....	51
9.1	Teollisuuden palvelu liiketoimintana .....	51
9.2	Hammaskytkimien kunnonvalvonnan palveluaspekti.....	52
10	VTT:n Little Noden testaus.....	53
10.1	VTT:n Little Noden ensimmäinen testaus.....	53
10.1.1	Pyörimisnopeuden vaikutus mittaustietoon .....	55
10.1.2	Testaus sorvauksessa.....	61
10.1.3	Anturin testaus koteloidussa koneessa ja mittausetäisyyden testaus .....	64
10.2	VTT:n Little Noden ensimmäisen testauksen tulokset.....	65
11	Konepajatekniikan ja hammaskytkimien valmistuksen tulevaisuus .....	67
11.1	Teollinen internet .....	67
11.2	Hammaskytkimien valmistaminen polyamidista ruiskupuristamalla.....	68
12	Pohdinta ja yhteenveto .....	70
	LÄHTEET .....	72

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön pohjana toimii MFG Componentsin toimeksianto. MFG Componentsilla on käynnissä tuotekehitysprojekti Teknologian tutkimuskeskuksen eli VTT:n kanssa, jossa kehitetään älykkäiden anturien hyödyntämistä teollisuudessa luomalla niiden avulla uutta palveluliiketoimintaa. VTT:n tuotekehitysprojektiin osallistuu myös muita yrityksiä Suomesta, joilla on erilaiset vaatimukset ja toiveet kehitettävää tuotetta varten. MFG Components valmistaa kytkimiä, joten heidän mielenkiintonsa tuotekehitysprojektissa kohdistuu hammaskytkimien kunnonvalvontaan älykkäillä antureilla sekä mahdollisuuden luoda kunnonvalvonnasta palvelu asiakkaille. Palvelun avulla on tarkoitus saada yksinkertaiselle koneistetulle tuotteelle lisäarvoa ja kilpailuetua vallitsevilla markkinoilla. Tässä työssä kehitysideana on luoda hammaskytkimelle oma sisäinen kunnonvalvontajärjestelmä. Tällaista hammaskytkimen sisäänrakennettua kunnonvalvontajärjestelmää ei ole vielä markkinoilla. Kyseessä on uusi tuote ja palvelu, joka vaatii paljon tutkimista ja testaamista.

Tehtäväni tässä työssä on tutkia älykkäiden anturien hyödyntämistä hammaskytkimissä. Teoriaosion aluksi tarkastellaan akselinliitoksia ja hammaskytkimiä sekä eritoten MFG:n valmistamia Desch GC-kytkimiä. Lisäksi käydään läpi myös muut vaihtoehdot kiinteille akselinliitoksille. Akselinliitosten jälkeen tutustutaan kunnonvalvonnan merkitykseen ja hyötyyn nykyajan konepajatekniikassa. Kunnonvalvontaa varten on hyvä tietää myös perusteet kunnossapidosta. Perusteiden avulla saadaan käsitys siitä, miksi ylipäätään kunnonvalvontaa tehdään. Kunnonvalvontaan liittyvät olennaisesti erilaiset mittaukset, joiden avulla selvitetään koneen tai laitteen kuntoa. Kunnonvalvonnan mittauksista käydään tarkemmin läpi värähtely- ja lämpötilamittaukset, joita käytetään hyväksi myös VTT:n kehittelemässä anturissa. Näitä mittauksia suoritetaan erilaisilla antureilla, joista luvussa 7 on esitelty värähtely- ja lämpötilamittauksia sekä koskettavia lämpötilaa mittaavia antureita. Tämän lisäksi tässä työssä tutustutaan älykkäisiin antureihin sekä esitellään myös VTT:n anturi, jota tullaan käyttämään MFG:n valmistamien hammaskytkimien kunnonvalvonnassa. Lisäksi

käydään läpi perusteita värähtelysignaalin tulkitsemisesta hammasvälityksessä. Luvussa 9 tarkastellaan teollisuuden palvelua, jossa on tarkoitus saada käsitys palvelutoiminnan merkityksestä nykyaikana. Selvitetään hammaskytkimien älykkyyden merkitys ja miten sitä hyödynnetään palveluliiketoiminnassa.

Opinnäytetyön lopuksi määritetään VTT:n anturin testaus hammaskytkimien kunnonvalvonnan välineenä. Testaus pitää sisällään testausolosuhteet, testauskoneet ja testaustulokset. Testaustietojen avulla voidaan määritellä kehitettävät asiat seuraavaa testausta varten sekä miettiä seuraavan testauksen suoritusta ja päämäärää. Tämän työn päämääränä on saada kehiteltyä MFG Componentsille käyttökeino VTT:n kehittämälle älykkäälle anturille ja osoittaa testaustuloksissa asiat, jotka pitää huomioida kun anturia käytetään hammaskytkimien kunnonvalvonnan välineenä. Luvussa 11 pohditaan konepajatekniikan tulevaisuutta sekä mietitään nopeampaa tapaa valmistaa hammaskytkimiä.

## 2 Yhteistyöyritykset

Tähän työhön liittyy monia yhteistyöyrityksiä, joista suurimpana on toimeksiantaja MFG. MFG on tehnyt yhteistyötä Teknologian tutkimuskeskuksen eli VTT:n kanssa, joka puolestaan on kehittänyt ja valmistanut suomalaisia yrityksiä varten uuden Little Node -anturin, joka mittaa värähtelyä ja lämpötilaa. Anturin avulla on tarkoitus luoda suomalaisilla yrityksille uusia palveluliiketoimintoja.

### 2.1 MFG Components

MFG Components on Tohmajärvellä ja Ilomantsissa toimiva yritys, joka on erikoistunut voimansiirtokomponenttien, hydraulikkasyntereiden ja venttiililohkojen valmistukseen. MFG Components on myös yksi Pohjoismaiden suurimmista erikoishihnapyörien valmistajista. He pystyvät valmistamaan erikoispyörät aina 1000 mm asti. Ilomantsin toimipaikalla valmistetaan hydraulikkasyntereitä, venttiililohkoja ja kääntölaitteita. Ilomantsin toimipaikka on ollut toiminnassa 35 vuotta. Tohmajärven toimipaikka ollut toiminnassa jo 39 vuotta. Siellä valmistetaan akselikytkimiä sekä hammas- ja hihnapyöriä. Koko MFG Componentsin liikevaihto oli 13.4 miljoonaa euroa vuonna 2013. Työntekijöitä yrityksessä on noin 80, joista toimihenkilöitä 20. Tohmajärven toimipaikalla työskentelee 13 toimihenkilöä. [1; 2.]

MFG Componentsin liiketoiminta-alueet painottuvat liikkuvien koneiden komponentteihin, koneistavaan sopimusvalmistukseen, voimaa siirtävien komponenttien ja osakokonaisuuksien valmistamiseen sekä voimansiirtokomponenttien maahantuontiin. Liikkuvien koneiden komponentteja valmistetaan Ilomantsin toimipaikalla ja sen suurimmat asiakkaat ovat Kesla ja Juntta. Liikkuvien koneiden komponentit pitävät sisällään hydraulikkasyntereitä, kääntölaitteita ja venttiililohkoja. Koneistavaa sopimusvalmistusta tehdään molemmilla toimipaikoilla ja sen suurimmat



asiakkaat ovat Metso Automation, D-Hydro ja Kesla. Voimaa siirtävien komponenttien ja osakokonaisuuksien valmistaminen on alue, joka kehittyy koko ajan uusien koneiden tuomien mahdollisuuksien ansiosta. Tämän liiketoiminta-alueen pääasiakkaat ovat Moventas, ABB ja Desch. Voimansiirtokomponenttien maahantuonti on liiketoiminta-alue, joka täydentää muita osa-alueita. Maahantuontia tapahtuu Kiinasta, Japanista, Italiasta ja Saksasta. Merkittävin maahantuonnin yritys on saksalainen Desch Antriebstechnik GmbH. [1; 2.]

## **2.2 Teknologian tutkimuskeskus VTT ja VTT:n tuotekehitysprojekti -NIKSIT**

Teknologian tutkimuskeskus eli VTT on valtion omistama kansainvälisesti verkottunut monialainen tutkimuskeskus, joka on perustettu Risto Rydin toimeenpanemana tammikuussa vuonna 1942. VTT:n pääkonttori sijaitsee Otaniemessä Espoossa, se työllistää noin 2800 henkilöä ja sen liikevaihto oli 316 miljoonaa euroa vuonna 2013. VTT:n toiminta-ajatuksena on tuottaa kilpailukykyä lisääviä tutkimus- ja innovaatiopalveluita yrityksille, yhteiskunnalle ja muille asiakkaille. Tällä pyritään yhteiskunnan kestäväan kehitykseen, työllisyyteen ja hyvinvointiin. VTT pyrkii tuottamaan innovatiivisia ratkaisuja ja uusia liiketoimintoja ennakoimalla asiakkaidensa tarpeita jo strategisessa tutkimuksessa. Samalla VTT yhdistää omaa monialaista teknologista osaamistaan yhteistyökumppaneiden osaamisen kanssa ja hyödyntää palveluissaan yliopistojen tutkimustuloksia sekä globaalia verkottumista. [3; 4.]

VTT:llä eli teknologian tutkimuskeskuksella on kehitteillä mittausjärjestelmäprojekti, jossa tuotetaan käytössä ja ylläpidossa helposti hyödynnettäviä menetelmiä ja teknologioita, joilla voidaan toteuttaa kevyitä ja kustannustehokkaita ratkaisuja erilaisten palveluiden toteuttamiseksi. Projektin tarkoituksena on kehittää informaation tuottamiseen tarkoitettu mittausjärjestelmän arkkitehtuuri, joka sisältää anturoinnin, langattomat mittaussolmut, mobiilipäätelaitteet ja tietojärjestelmärajapintojen implementaation. Projektissa käytetään hyväksi VTT:llä kehitettyjä langattomia ns. VTT:n Little Node -antureita sekä muita antureita koneen tai laitteen ja

toimintaympäristön mittaamiseen. VTT:n projektin tavoitteena on tuottaa järjestelmä, jossa energian kulutus pyritään minimoimaan langattomassa VTT:n Little Nodessa tiedonsiirtokapasiteetin ja datan prosessointiajan tasapainottamisen avulla. Projekti pitää sisällään myös rajapintojen määrittämisen päätelaitteeseen sekä yhteyskäytäntöjen ja radioprotokollien määrittämisen sekä tiedonkeruun toteuttamisen. [14.]

NIKSIT-tuotekehitysprojektin tavoitteena on parantaa koneiden ja laitteiden käyttöön liittyvää turvallisuutta, tuottavuutta sekä kehittää yritysten palveluliiketoimintaa, jotta se vastaa paremmin kansainvälisten asiakkaiden tarpeisiin. Riippumatta käyttötilanteista tai ympäristöolosuhteista, koneiden ja laitteiden tulisi toimia joustavasti ja proaktiivisesti, jotta koneilla saavutetaan optimaalinen suorituskyky. Nykyään koneen käyttövarmuuden ja tehokkuuden optimointi perustuu taustajärjestelmissä tehtäviin analyysiin. NIKSIT-projektin avulla tietoa on tarkoitus saada suoraan mittauspisteestä mittaamalla ja rikastamalla tietoa käyttäjälähtöisellä, koneen ohjausjärjestelmästä kerättävällä ja ympäristölähtöisellä tiedolla. [14.]

### 3 Akselinliitokset

Tässä luvussa tutustutaan akselinliitoksiin, joista tarkemmin liikkuviin akselinliitoksiin ja hammaskytkimiin. Kytkimet jaetaan kahteen pääryhmään akselinliitoksiin ja akselinkytkimiin. Näistä akselinliitokset ovat kytkimiä, joiden kytkentä on suoritettava akselien ollessa liikkumatta. Akselinkytkimet voidaan taas kytkeä toisen akselin pyöriessä. Kytkimiä on olemassa monenlaisia ja eri käyttötarkoituksia varten. ”Kytkimiä käytetään tehonsiirtoon, kun halutaan yhdistää päittäin toisiinsa kaksi pyörivää akselia” toteaa Seppo Kivioja, Koneenosien suunnittelu 3 -kirjassa. [19, 182.]

Kuviosta 1 nähdään, että akselinliitokset on jaettu kolmeen ryhmään: kiinteät akselinliitokset, liikkuvat (vääntöjäykät) akselinliitokset ja joustavat akselinliitokset. Kiinteät akselinliitokset ovat jäykkiä, joustamattomia liitoksia ja niihin kuuluvat laippakytkimet, kuorikytkimet ja säteittäiset hammastukset. Liikkuvat akselinliitokset ovat liitoksia, jotka sallivat tiettyjä akselien välisiä siirtymiä kuten aksiaali-, radiaali- ja kulmapoikkeamia. Liikkuvia akselinliitoksia voidaan pitää myös vääntöjäykkinä, koska niihin kohdistuvan nimellismomentin aiheuttama vääntökulma on vähäinen. Liikkuviin akselinliitoksiin kuuluvat: hammaskytkimet, metallilamellikytkimet, yleisnivelet ja nivelakselit, ketjukytkimet, sakarakytkimet, Oldhamin kytkin sekä Schmidtin kytkin. Joustaviin akselinliitoksiin kuuluvat sellaiset liitokset, joissa on joustoelin lisäämässä vääntöjoustoja ja mahdollistamassa tehonsiirtoa akselien välillä, ja joilla on keskenään pieni vääntökulma. Joustavien akselinliitosten nimellismomentin arvolla vääntökulma on normaalisti alle 5°:tta, mutta erittäin joustavilla kytkimillä päästään jopa 30° vääntökulmiin. Joustaviin akselinliitoksiin kuuluvat: kumijousikytkimet, metallijousikytkimet ja ilmajousikytkimet. [19, 182–183.]



Kuvio 1. Akselinliitosten jaottelu [19, 182].

Akselinliitoksia käytetään usein sellaisissa paikoissa, joissa yhdistettävät akselit kuuluvat eri koneisiin tai akseli on liian pitkä valmistettavaksi, kuljetettavaksi tai asennettavaksi, jolloin akseli joudutaan jakamaan osiin ja yhdistämään asennusvaiheessa akseliliitoksilla. Liikkuvilla tai joustavilla kytkimillä voidaan asentaa akseleita, joita ei voida asentaa riittävän tarkasti ja myös akseleita, jotka pyrkivät liikkumaan toisiinsa nähden käytön aikana. Akselinliitoksilla voidaan yhdistää myös kaksi akselia siten, että ne toimivat tietyssä kulmassa toisiinsa nähden. Lisäksi joustavilla kytkimillä voidaan muuttaa järjestelmän vääntöominaistaajuutta ja vaimentaa vääntövärähtelyjä. [19, 183.]

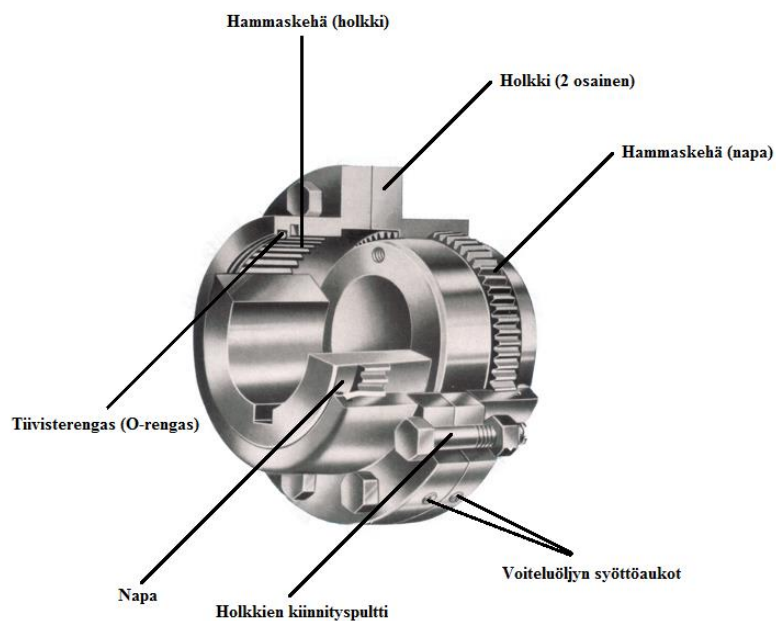
### 3.1 Liikkuvat, vääntöjäykät akselinliitokset

Liikkuvia vääntöjäykkiä akselinliitoksia käytetään, jos akselien päitä ei voi asentaa toistensa jatkeelle riittävän tarkasti tai silloin kun akselit pyrkivät liikkumaan toisiinsa nähden käytön aikana. Yleensä liikkuvien kytkimien liike perustuu osien väliseen liukumiseen tai vierintään, lukuun ottamatta metallilamellikytкимиä, joiden liike perustuu metalliosien joustoon. Metallilamellikytkimet ovat välyksettömiä, joten ne eivät tarvitse voitelua. Lämpötilan vaihtelut, akselien taipumat tai laakerien ja rungon

joustot vaikuttavat akselien liikkumisen määrään. Liikkumisen suunta ja suuruus taas määräävät millainen kytkin kohteeseen valitaan. [19, 197.] Seuraavaksi tutustutaan kiinteästi asennettuihin liikkuviin akselinliitoksiin ja eritoten hammaskytkimiin.

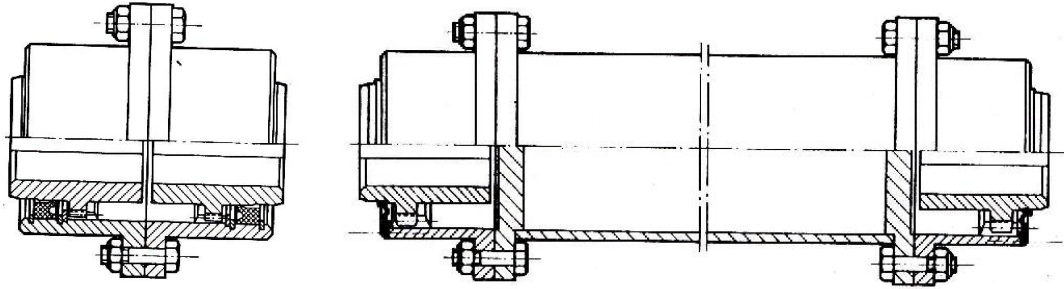
### 3.2 Hammaskytkimet

Koneenosien suunnittelu 3-kirjassa Seppo Kivioja toteaa: ”Hammaskytkin, jossa on kaksi hammastusta, sallii kaiken suuntaisia akselien välisiä pieniä asennusvirheitä.” Tämä tarkoittaa, että hammaskytkimiä pystytään asentamaan myös siten, että yhdistettävien koneiden akselien päät eivät ole suorassa toisiaan kohti eli toistensa jatkeita. Kuvassa 1 kuvataan hammaskytkimen rakenne. Hammaskytkimeen kuuluu molempiin akseleihin asennettava hammaskehällinen napa. Hammaskytkimen liikkuvuutta pyritään lisäämään tekemällä navan hampaista kuperia. Hammaskehät yhdistetään yleensä kaksiosaisella putkimaisella holkillä, jossa kummassakin päässä on sisäpuolinen hammastus. Holkin osat liitetään toisiinsa pulttien avulla. Voiteluöljy lisätään hammaskytkimeen sitä varten tehdyistä tiivistetyistä syöttöaukoista. O-rengas navan ja holkin välissä pitää voiteluöljyn kytkimen rakenteen sisällä. [19, 198–199.]



Kuva 1. Hammaskytkimen rakenne (Muokattu lähteestä) [20].

Kuvassa 2 kuvataan kaksi erilaista hammaskytkinrakennetta: normaali hammaskytkin ja väliputkella varustettu hammaskytkin. Väliputkella varustettua hammaskytkintä käytetään, jos asennettavien koneiden etäisyys on suuri. [19, 199.]



Kuva 2. Hammaskytkin ja väliputkella varustettu hammaskytkin [19, 198–199].

Hammaskytkimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: nopeasti pyöriviin turbokytkeisiin ja hitaasti pyöriviin tavanomaisiin kytkimiin, joilla siirretään suuria momentteja. Turbokytkeissä käytetään hampaanpääkeskitystä ja kulmapoikkeamat pyritään pitämään alle  $0.1^\circ$ :ssa. Hammaskytkimen holkki voi olla yksiosainen tai useampiosainen. Yksiosainen holkki on kevyt, mutta vaikea asentaa ja valmistaa. Useampiosainen holkki painaa enemmän, mutta hammastuksen tekeminen ja asennus on helpompaa. Kuvassa 2 oleva hammaskytkin on kaksiosainen. Hammaskytkimien hammastuksessa käytetään evolventtihammastusta, jossa ryntökulma on tavallisesti  $20^\circ$  tai  $30^\circ$ :tta. Hammas-kytkimien valmistusmateriaalina käytetään terästä tai korkealaatuista pallografiittivalurautaa sekä pienemmissä kytkimissä myös muovia. Muoviset hammaskytkimet eivät vaadi voitelua, mutta muusta valmistusmateriaalista valmistetut hammaskytkimet voidellaan rasvalla tai öljyllä. Turbokytkeiden voitelussa käytetään läpivirtausvoitelua, jossa öljy tuodaan suoraan hampaiden juureen hammaskytkimen navan sisälle tehtyjä kanavia pitkin. Hammaskytkin soveltuu käytettäväksi suurilla tehoilla ja pyörimisnopeuksilla ja sen tehohäviöt ovat pieniä. Hammaskytkimen sallittu kulmavirhe on normaalisti alle  $1^\circ$  hammastusta kohti ja suurin sallittu radiaalipoikkeama hammastuksen välisestä etäisyydestä ja sallitusta kulmavirheestä. Toisaalta kulmavirheen kasvaessa myös hammaskytkimen tehonsiirtokyky alenee huomattavasti. [19, 199–200.]

### 3.3 MFG Componentsin valmistamat Desch GC -hammaskytkimet

Pienimmät Desch GC -hammaskytkimet käyvät akselinhalkaisijaltaan 20 mm:n akseleille ja suurimmat aina 900 mm:n akselihalkaisijaan asti. Taulukosta 1 nähdään, että navan sisähalkaisija ja pituus ovat muunneltavissa annetuissa rajoissa. GC-kytkimien ulkoholkki ja napa on valmistettu EN 10083 -standardin mukaisesta 42CrMo4-nuorrutusteräksestä, jossa on seosaineena kromia ja molybdeenia. Päätylaipat, väliakselit ja liityntävaipat ovat valmistettu EN 10025 -standardin mukaisesta S355-rakenneteräksestä. GC-kytkimiä on mahdollista saada myös pintakäsittelyinä. Pintakäsittelymenetelmäksi voi valita maalauksen, mustauksen ja fosfatoinnin, anodisoinnin, sinkityksen ja keltapassivoinnin. Saatavilla olevia lämpökäsittelytapoja ovat puolestaan nitraus, induktiokarkaisu ja hiiletyskarkaisu. [13.]

Taulukko 1. Desch GC-hammaskytkimien valintataulukko [13].

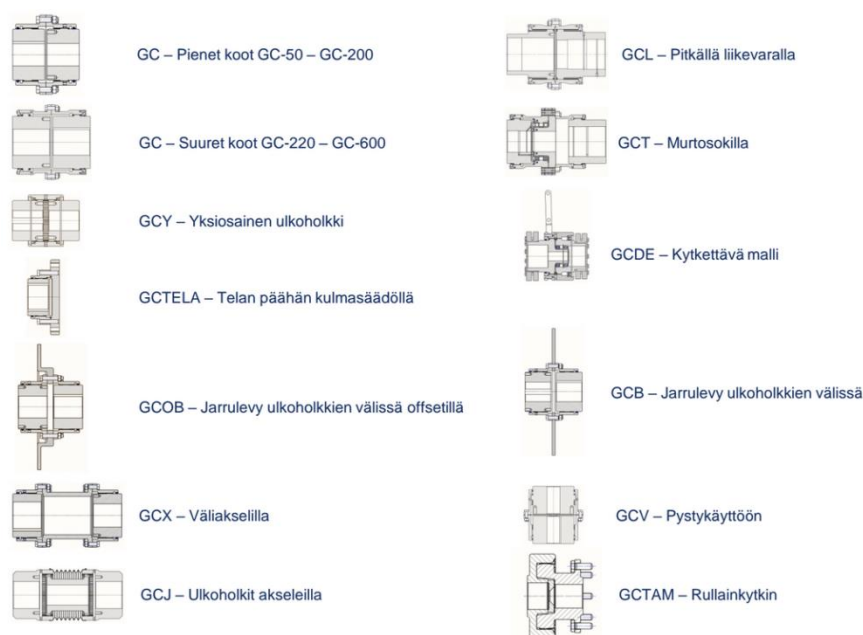
Pienet koot GC-50 - GC-220

Suurat koot GC-240 - GC-600

Tyyppi	$T_{nom}$	$T_{max}$	$n_{max}$	M	$D_{min}$	D	$D_{max}$	$D_h$	$D_n$	D1/D2	L	mm			$S_{min}$	S	$S_{max}$	$D_{ph}$	M
	Nm	Nm	$1/min$									$L_{min}$	$L_n1/L_n2$	$L_{max}$					
GC-50	1 920	3 840	5 000	3,6	111	111	250	83	64	20-50	92-186	43	45	100	1	3	8	57	M5
GC-60	3 050	6 100	4 400	8,7	148	148	250	105	83	20-60	124-254	50	65	150	1	6	16	70	M8
GC-75	5 800	11 600	4 000	13	169	169	250	126	100	20-75	154-254	62	75	150	1	6	16	86	M8
GC-100	10 900	21 800	3 600	25	209	209	300	162	135	30-100	174-254	76	85	150	1	6	16	120	M10
GC-115	17 200	34 400	3 350	37	233	233	300	186	160	40-115	204-404	90	105	200	1	6	16	144	M10
GC-140	31 300	62 600	3 100	70	308	308	400	246	200	50-140	253-613	105	120	300	1	6	18	168	M16
GC-160	35 400	70 800	2 800	103	336	336	500	262	220	60-160	293-613	120	150	300	1	10	28	196	M16
GC-190	78 000	156 000	2 700	148	366	366	500	303	255	80-190	373-813	150	170	400	1	10	28	228	M20
GC-220	118 600	237 200	2 500	215	428	428	600	345	290	80-220	376-820	175	200	400	1	10	28	246	M20
GC-240	156 000	312 000	2 450	325	458	458	600	394	320	80-240	416-820	190	230	400	3	16	44	284	M20
GC-265	186 000	372 000	2 300	415	490	490	600	436	360	120-265	522-820	220	250	400	3	16	44	314	M24
GC-285	219 000	438 000	2 150	565	534	534	800	474	380	120-285	563-820	250	280	400	3	16	44	330	M24
GC-320	250 500	501 000	1 900	717	580	580	800	518	431	160-320	563-820	280	300	400	3	16	44	390	M30
GC-365	345 000	690 000	1 700	927	668	668	800	586	480	180-365	630-830	325	350	400	5	30	58	422	M30
GC-400	470 000	940 000	1 400	1 299	730	730	1000	642	530	200-400	630-830	345	400	150	5	30	58	478	M30
GC-450	661 000	1 322 000	1 300	1 772	830	830	1000	720	621	200-450	630-930	400	400	150	5	30	58	560	M30
GC-500	790 000	1 580 000	1 150	2 214	882	882	1000	742	651	200-500	730-1030	410	450	500	5	30	58	600	M30
GC-600	1 250 000	2 500 000	1 000	3 242	970	970	1000	867	761	300-600	1030-1230	470	500	500	5	30	70	680	M30
GC-700	2 150 000	4 300 000	550	6 054	1 220	1 220	2000	1064	921	300-700	1165-1610	580	700	800	5	40	110	830	M42
GC-800	2 150 000	4 300 000	425	9 014	1 440	1 440	2000	1240	1061	300-800	1205-1610	600	700	800	5	40	110	920	M48
GC-900	5 300 000	10 600 000	350	11 866	1 600	1 600	2000	1416	1190	400-900	1365-1610	680	750	800	5	40	110	1100	M48

GC-sarjan kytkimissä otetaan huomioon myös huollettavuus ja logistiikka, joten niissä käytetään ainoastaan DIN-standardin mukaisia kiinnitystarvikkeita, jotka ovat fosfatoitu tai sinkitty. Lisäksi kaikki ruuvit ovat vähintään 8.8-lujuusluokan ruuveja, mutta on tapauskohtaisesti mahdollista saada lujempiakin. GC-kytkimiä on saatavilla suurella määrällä erilaisia sovitteita, mutta tyypillisin kiinnitystapa akselille on sovitereikä ja kiilaura. [13.]

Kuviosta 2 nähdään, että Desch hammaskytkinmallistoon kuuluu monia erilaisia malleja ja kokoja. Tyypillisimmät mallit ovat GC-50–GC-600, joissa ulkoholkki muodostuu kahdesta osasta. Mallistoon kuuluu myös jarrulevyllisiä kytkimiä, kytkimiä väliakselilla, pitkän liikevaran akseleita sekä murtosokilla varustettuja kytkimiä ja pystykäyttöön tarkoitettuja kytkimiä. Näitä hammaskytkimiä käytetään erilaisissa kytkennöissä käyttökohteen ja halutun ominaisuuden mukaan. Vaikka hammaskytkimet valmistetaan käyttökohteen mukaan, vaativat ne kuitenkin aina huoltoa ja öljynvaihtoa. GC-kytkimien huoltoväli normaalikäytössä on voiteluaineen vaihdon osalta 3000 käyttötuntia tai 1,5 käyttövuotta ja kytkimet pitää tarkastaa ja huoltaa 12000 käyttötunnin tai kolmen käyttövuoden jälkeen. Raskaassa tai nopeassa käytössä huoltoväli voiteluaineen vaihdon osalta tippuu 1500 käyttötuntiin tai yhteen käyttövuoteen ja kytkimet tulisi tarkastaa ja huoltaa 8000 käyttötunnin tai kahden vuoden jälkeen. [13.]

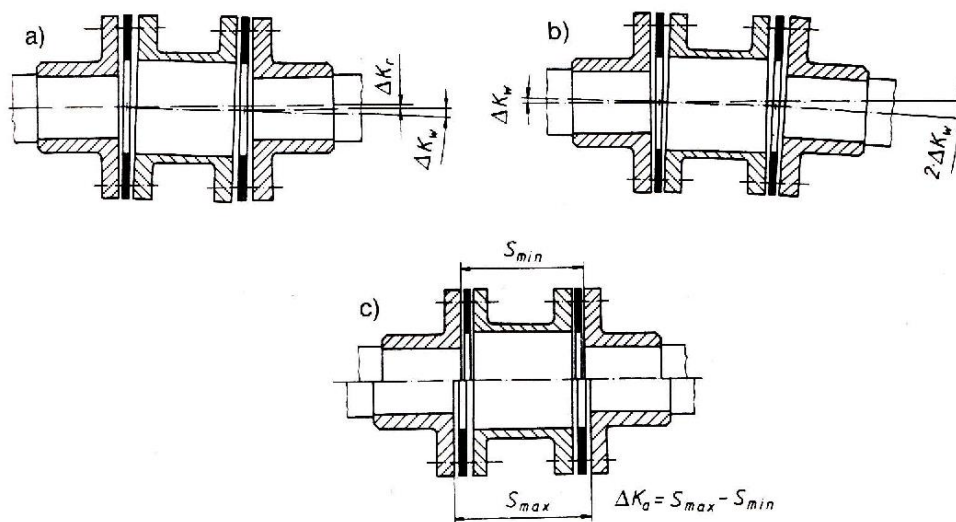


Kuvio 2. Desch GC-mallisto [13].



### 3.4 Metallilamellikytkimet

Metallilamellikytkimet ovat kytkimiä, joissa vääntömomentti siirtyy metalliosien välityksellä. Metalliosat ovat kehän suunnissa jäykkiä, mutta ne taipuvat kulma- tai aksiaaliliikkeen vaikutuksesta. Metallilamellikytkimiä tehdään yhdellä ja kahdella joustoelimellä. Yhden joustoelimen kytkin sallii ainoastaan kulma- ja aksiaalipoikkeamia. Kahden joustoelimen kytkin sallii myös radiaalipoikkeamia. Kuva 3 havainnollistaa, mitä poikkeamilla oikeastaan tarkoitetaan. [19, 201.]



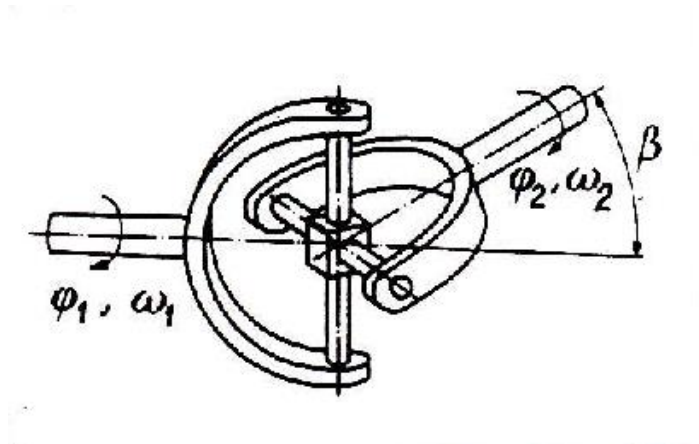
Kuva 3. Kaksoismetallilamellikytkimen sallimat akselipoikkeamat a) radiaalipoikkeama, b) kulmapoikkeama, c) aksiaalipoikkeama [19, 201].

Kuvassa 3 kuvataan kaksoismetallilamellikytkimen rakenne. Rakenne pitää sisällään väliholkin, kaksi joustavaa elintä ja laipat joihin akselien päät tulevat kiinni. Metallilamellikytkimet sallivat suuruusluokaltaan saman suuruisia kulmapoikkeamia kuin hammaskytkimet. Toisaalta metallilamellikytkimien sallima radiaalipoikkeama riippuu joustavien elinten välisestä etäisyydestä sekä sallitusta kulmavirheestä. Joustavat elimet valmistetaan usein ruostumattomasta jousiteräksestä. Muut osat eli laipat ja väliholkit valmistetaan teräksestä, teräsvalusta tai pallografiittivaluraudasta, jota käytetään suurissa kytkimissä. Metallilamellikytkimet ovat huoltovapaita, joten ne eivät tarvitse voitelua. Lisäksi ne kestävät suhteellisen korkeita lämpötiloja, mutta ovat

herkkiä ylikuormitussysäyksille, jolloin joustava elin voi äkillisesti murtua. [19, 201–203.]

### 3.5 Yleisnivelet ja nivelakselit

Nivelakseli sisältää yhden tai kaksi yleisniveltä ja sen rakenne on umpinainen tai putkimainen. Yleisnivelen avulla voidaan siirtää vääntömomenttia ja pyörimisliikettä akselista toiseen. Nämä nivelet ovat yleisiä autotekniikassa, jossa yleisniveliä kutsutaan murrosniveliiksi ja nivelakseleita kardaaniakseleiksi. Kuvassa 4 kuvataan kardaani-nivelen rakenne. [19, 203–204.]



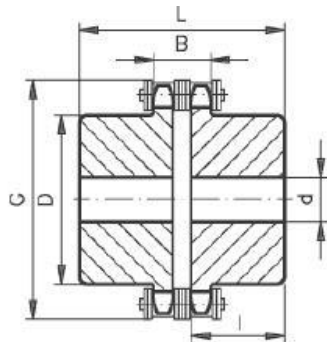
Kuva 4. Kardaani-nivelen malli [19, 204].

Kardaani-niveliä käytetään, kun halutaan yhdistää kaksi toisensa leikkaavaa akselia. Kardaani-niveliä akselien välinen kulma  $\beta$  voi olla 25–35°:tta tai jopa 45°:tta, eräillä nivelrakenteilla ja pienillä nopeuksilla. Mitä suurempi kulma, sitä epätasaisemmaksi akselin kulmanopeus muuttuu. Kardaani-nivelistä on kehitetty ja valmistettu monia erilaisia haarukka- ja laakerirakenteita eri kohteita varten. Useasti haarukat yhdistetään ristikkappaleella ja neljällä neulalaakerilla, jotka voidellaan rasvalla. Voitelurasva suojataan ajoneuvojen nivelissä suojakumeilla, jotka pitävät rasvan sisällään, mutta myös estävät lian pääsyn nivelen rakenteeseen. Kardaani-akselin etuja ovat alhaiset valmistuskustannukset, yksinkertainen rakenne ja helppo huollettavuus, kokoonsa

nähdessä suuri momentinsiirtokyky, kohtalaisen suurien aksiaalivoimien kestävyys ja hyvä hyötysuhde. Kardaaninivelistä on olemassa myös pari erikoismallia, joita käytetään esimerkiksi ajoneuvoissa. Nämä ovat kaksoiskardaaninivelet sekä tribodinivelet. [19, 205–215.]

### 3.6 Ketjukytkimet

Ketjukytkimen rakenteeseen (kuvassa 5) kuuluu ketju, hammaskehällä varustetut laipat ja mahdollisesti tiivistetty kotelo. Akselinpäihin kiinnitetyt ja hammaskehällä varustetut laipat ympäröidään yhteisellä tarkasti sopivalla ketjulla. Tämän jälkeen rakenne voidaan suojata tiivistetyllä kotelolla. Yleensä ketju on rullaketju, mutta myös hammasketjua käytetään. Ketjukytkin sallii pieniä akselipoikkeamia joka suuntaan ja on myös pienikokoinen. Lisäksi teräsketjun tilalla voidaan käyttää muoviketjua, joka ei vaadi voitelua ja on tietyissä rajoissa joustava. [19, 216.]



Kuva 5. Ketjukytkimen rakenne [21].

## 4 Kunnossapito

Kunnossapito on laaja-alainen käsite, joten tässä luvussa pyritään painottamaan opinnäytetyössä tarvitsemiani kunnossapitotietoja, jotka liittyvät koneiden kunnossapitoon ja ehkäisevään kunnossapitoon. Luvussa käydään läpi kunnossapidon historiaa, kunnossapitoa yleisellä tasolla sekä ehkäisevän kunnossapidon tarve ja suunnittelu.

### 4.1 Kunnossapidon historiaa

Koneiden kunnossapitoa on tehty yhtä kauan kuin ihminen on rakentanut ja käyttänyt koneita. Koneiden kunnossapidolla pyritään pitämään koneet toimintakuntoisena mahdollisimman pitkään. Aluksi koneiden kunnossapito oli ylimitoitettujen yksinkertaisten koneiden korjaamista seisokkien aikana. Vikoja edeltävä kunnossapito koostui puhdistamisesta, säätämisestä ja voiteluhuollosta. Vikojen korjaaminen ja paikantaminen olivat helppoja työtehtäviä sekä niihin tarvittava ammattitaitotaso matala, koska koneratkaisut olivat yksinkertaisia. Toisen maailmansodan aikoihin automaation määrää lisättiin teollisuudessa, jotta sotatarvikkeita pystyttäisiin valmistamaan tarvittavia määriä. Automatisaatio merkitsi myös monimutkaisempia koneita, mikä lisäsi kunnossapidon määrää, hallittavuutta ja kustannuksia. Kunnossapidon kustannusten kasvu vaikutti myös kunnossapidon suunnittelun ja johtamisen kehittymiseen. [6, 16–17.]

1970-luvulla kunnossapito muuttui teknisempään ja vaativampaan suuntaan, kun amerikkalaisten avaruusprojektien konsepteja ja innovaatioita aloitettiin ottamaan käyttöön teollisuudessa. Tämä johti tuotantokoneiden monimutkaistumiseen ja automaation kasvuun, jolloin tuotantolaitokset tulivat yhä enemmän riippuvaisiksi koneista. Maailmankaupan avautuminen ja kansainvälistyminen johtivat puolestaan

kilpailun kiristymiseen. Paikallisuuden merkitys kilpailutekijänä väheni ja yritykset alkoivat toiminnassaan painottaa laatua, osaamista, edullista hintaa ja toimitusvarmuutta. Päästääkseen näihin tavoitteisiin koneiden käytettävyyttä, luotettavuutta ja laadun tasaisuutta pyrittiin hallitsemaan kunnossapidolla. Kunnossapidon välineeksi tuli koneiden kunnonvalvonta, joka alkoi yleistyä teollisuudessa. [6, 17–18.]

1990-luvulla alkoi mikroelektroniikan ja IT-tekniologioiden läpimurto, joka on kestänyt nykypäivään asti. Tietokoneiden kehittyminen johti teollisuudessa valmistusprosessien integraation ja automaation lisääntymiseen. Kunnossapito ei ollut enää vain mekaanisen laitteen kunnossapitoa, vaan myös ohjelmien ja ohjelmistojen kunnossapitoa. Kunnossapidon avuksi tulivat erilaiset anturit, etävalvontalaitteet ja muut tietokoneteknologiat. Elektroniikan, pneumatiikan, tekoälyn, ohjelmistojen ja kompleksisten tuotantovälineiden yleistyminen kunnossapidossa on johtanut kunnossapidon ulkoistamiseen ja moniosaamiseen. Nykyään myös kunnossapidon ohjauksessa ja johtamisessa kiinnitetään enemmän huomiota laatuun, turvallisuuteen ja ympäristöystävällisyyteen. [6, 19–20.]

## **4.2 Kunnossapito yleisesti**

Kunnossapito tarkoittaa yleisesti käyttöomaisuuden ylläpitämistä, säätämistä ja säilyttämistä. Kunnossapitoa on yhteiskunnassa aina ollut olemassa ja voidaankin sanoa, että esimerkiksi ihmisten kunnossapito on lääketiedettä. Kunnossapitoon kuuluu seuraavia asioita: laitteen toimintakunnon ylläpitäminen (koneen ei anneta huonontua ja/tai hajota), laitteen käytön turvallisuus, laitteen laaduntuottokyky, laitteen elinjakson hallinta (jäljellä olevan elinjakson määrittäminen), oikeiden käyttöolosuhteiden noudattaminen, palauttaminen alkuperäiseen kuntoon, koneen modernisointi, suunnitteluheikkouksien korjaaminen, käyttö ja kunnossapitotaitojen kehittäminen. [6, 12–13.]

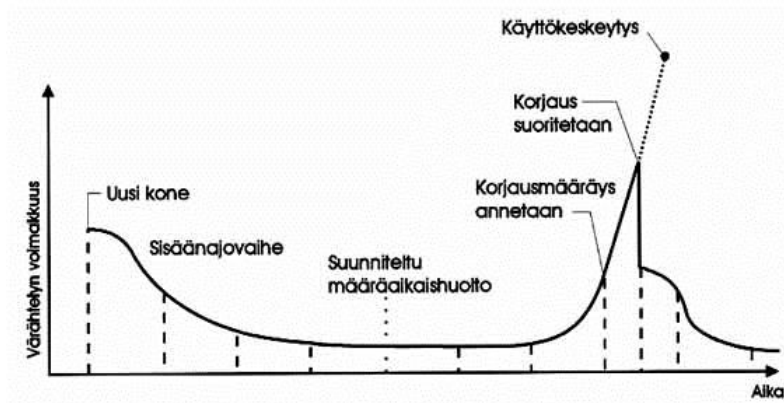
Kunnossapito jaotellaan SFS-EN 13306 -standardin mukaan kahteen pääläjiin vian havaitsemisen mukaan. Nämä ovat ehkäisevä kunnossapito ja korjaava kunnossapito. Ehkäisevään kunnossapitoon kuuluvat toimenpiteet, jotka suoritetaan ennen kuin vika pysäyttää laitteen. Standardi ei kuitenkaan vastaa nykypäivän kunnossapidon uudistumista. Standardi ei esimerkiksi tunne käsitettä RTF (Run To Failure). RTF tarkoittaa toimintatapaa, jossa kone ei ole ehkäisevän kunnossapidon piirissä, vaan sille suoritetaan vain normaalit huoltotoimenpiteet. Tällaisen koneen rikkoentuessa se joko korjataan tai korvataan. Esimerkiksi valaistuksessa käytettävät lamput voivat olla RTF-toimintatapaan kuuluvia. Kunnossapito voidaan jakaa viiteen pääläjiin seuraavasti: Huolto, ehkäisevä kunnossapito (sis. jaksotettu kunnostaminen, kunnonvalvonta, kuntoon perustuva kunnossapito, ennustava kunnossapito), korjaava kunnossapito (sis. kunnostaminen ja korjaaminen), parantava kunnossapito, vikojen ja vikaantumisen selvittäminen. [6, 47–49.]

### **4.3 Ehkäisevä kunnossapito**

Ehkäisevä kunnossapito tarkoittaa kunnossapitoa, jota suoritetaan ennen kuin itse laite vikaantuu. Ehkäisevä kunnossapito voidaan periaatteellisesti jakaa kolmeen osaan: käyttöseurantaan, jaksotettuihin huoltoihin ja kunnonvalvontaan. Käyttöseuranta tarkoittaa jatkuvaa, pääasiassa koneen käyttäjän toiminnan ohessa suorittamaa tarkkailua, hoitoa ja huoltoa. Jaksotetut huollot tarkoittavat etukäteen ohjelmoituja ja suunniteltuja huoltotoimenpidekokonaisuuksia. Kunnonvalvonta tarkoittaa jatkuvaa toimintaa, jossa laitteen tilaa tarkkaillaan erilaisten mittausten avulla. Mittaustavat voivat olla jatkuvia tai tietyin väliajoin suoritettavia. Kunnonvalvonnalle tyypillistä on, että siinä suoritettavat toimenpiteet ovat laajempia kuin käyttöseurannassa, mutta myös jatkuvampia ja pidempikestoisia kuin jaksotetuissa huolloissa. [7.]

Kuviossa 3 nähdään ehkäisevän kunnossapidon merkitys laakerin vaihtovälin tai korjauksen ajoittamisessa. Uudessa koneessa värähtely on voimakkaampaa ja sisäänajovaiheen kuluessa värähtelyn voimakkuus pienenee tasaisen käytön alueelle.

Tasaisen käytön alueella suoritetaan suunniteltuja määräaikaishuoltoja ja samalla seurataan jatkuvasti laakerin värähtelyn voimakkuutta. Laakerin kuluessa voimakkaasti alkaa värähtelyn voimakkuus nousta nopeasti. Tässä vaiheessa kunnonvalvonta on erityisen tärkeää. Laakerin värähtelyn voimakkuuden noustessa tietylle tasolle annetaan korjausmääräys, josta seuraa laakerin korjaus tai vaihto. Näin päästään tilanteeseen, jossa värähtelyn voimakkuus ei vielä tuhoa laakereiden kulumisen myötä koko laitetta. Tällöin korjauskustannukset olisivat vielä korkeammat. Korjauksen jälkeen suoritetaan taas sisänaajo ja sama kaava alkaa toistua.



Kuvio 3. Ehkäisevä kunnossapito laakerin värähtelyn voimakkuuden mittaamiselle [7].

Ehkäisevän kunnossapidon suunnittelun lähtökohtana on tarve. Ehkäisevää kunnossapitoa kannattaa tehdä silloin, kun ehkäisevän kunnossapidon kustannukset ovat pienemmät kuin sen puutteesta aiheutuvat vahingot ja menetykset. Kohteelle ja ehkäistävälle vialle täytyy olla olemassa myös tehokas ennakkohuoltomenetelmä. Jopa 40–70 % ehkäisevästä kunnossapidosta tehdään turhaan, joten ehkäisevän kunnossapidon suunnittelu on erityisen tärkeää ja sen hyvällä toteutuksella säästetään resursseja. Suunnittelun tulokset näkyvät hyvin kustannusjakautumassa. Yleensä suunnitellun ehkäisevän kunnossapidon kustannukset ovat noin puolet suunnittelemattomasta toiminnasta. Lisäksi ei-suunniteltu kunnossapito johtaa usein toimintahäiriöihin, joiden katemenetykset voivat olla vieläkin suurempia. Kunnossapidon suunnittelulla päästään 4–10 kertaa tehokkaampaan työhön kuin suunnittelemattomalla kunnossapidolla. [6, 73–77.]

## 5 Koneiden kunnonvalvonta

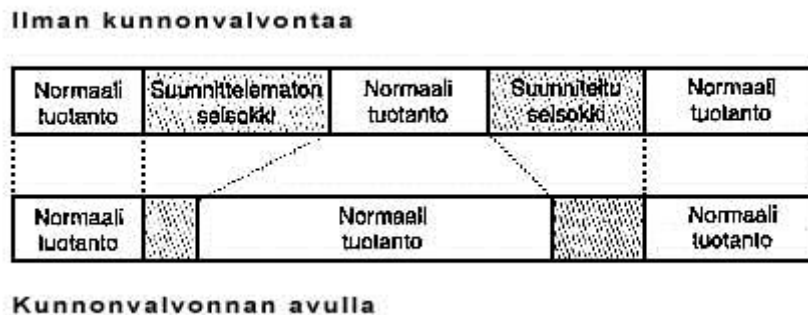
Kunnonvalvonta on tärkeä osa teollisuuden kunnossapitoa ja nimenomaan ehkäisevää kunnossapitoa. Kunnonvalvonta tuottaa tuotantolaitoksen investointien, käytön ja kunnossapidon kannalta oleellisia tietoja ja sen avulla voidaan vaikuttaa yrityksen kannattavuuteen. Tässä luvussa käydään läpi kunnonvalvontaa yleisesti sekä pohditaan mittaavan kunnonvalvonnan merkitystä.

### 5.1 Kunnonvalvonta yleisesti

Kunnonvalvonta on erilaisten mittausten avulla tehtävää jatkuvaa kohteen tilan seurantaa. Mittauksia voidaan tehdä joko jatkuvasti tai tietyin väliajoin. Teollisuudessa koneiden kunnonvalvonta on tärkeä osa-alue kunnossapitoa. Kunnonvalvonnan avulla voidaan: saavuttaa lisää tuottavuutta, suunnitella kunnossapitoa paremmin, hyödyntää seisokkiaikoja paremmin sekä vähentää suunnittelemattomien seisokkien määrää ja parantaa koneiden elinikää. Kunnonvalvonnan tavoitteena on päästä kunnossapitotöiden oikea-aikaiseen suorittamiseen silloin, kun koneiden kunto sitä vaatii. Aiemmin kunnonvalvonta perustui pääasiassa aistihavaintoihin. Esimerkiksi laakereiden kuunteleminen puukepin avulla tai tunnustelemalla jaloilla ja käsillä koneen tärinää. Lisäksi koneen kuntoa arvioitiin seuraamalla lopputuotteiden laatua. Nykyisin kunnonvalvonnassa käytetään apuna yhä enemmän hyväksi tietokoneavusteisia kunnonvalvontajärjestelmiä ja puhutaan mittaavasta kunnonvalvonnasta. Tietokoneavusteisilla kunnonvalvontajärjestelmillä pystytään hallitsemaan ja käsittelemään suurta määrää mittaustietoja, joilla voidaan tarkkailla koneiden kuntoa reaaliaikaisesti. Samalla erilaisten mittausantureiden hyödyntäminen mittaustulosten saamiseksi on kasvanut yhdeksi tärkeimmistä alueista teollisuuden kunnossapidossa.[5; 7; 18, 11–13.]



Kuviossa 4 nähdään kunnonvalvonnan vaikutus seisokkien aiheuttamiin tuotantokatkoksiin. Kunnonvalvonnan avulla voidaan tehdä ennakoivaa kunnossapitoa, jolloin mahdolliset laiteviat voidaan korjata ennen kuin ne aiheuttavat vaurioita. Tämä lyhentää myös keskimääräistä kunnossapitoaikaa ja pudottaa kunnossapitokustannuksia jopa yli 50 %.[5.]



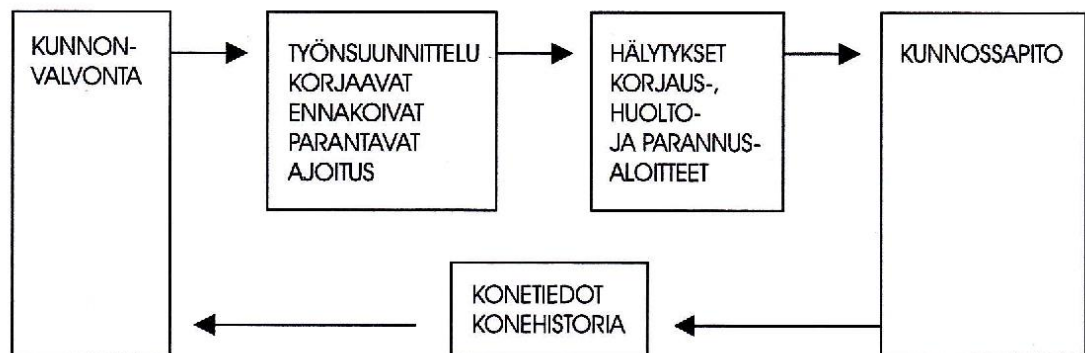
Kuvio 4. Kunnonvalvonnan vaikutus seisokkiaikoihin [5].

Kuviossa 5 nähdään kunnonvalvontatoiminnan jako elementteihin. Konetietojen avulla voidaan määrittää mittausten tarve ja laajuus. Pistetiedot määrittävät mittauspisteiden sijainnit, mittaussuunnat ja mittaustavat. Mittausmääritykset kertovat yksityiskohtaisesti mittalaitteen asetukset, jotka liittyvät mittauksen suorittamiseen. Historiatiedoista löytyvät kaikki koneisiin tulleet vauriot, tehdyt korjaukset ja osien vaihdot. Työsuunnittelu sisältää mittauspisteiden järjestämisen suunnitelmalliseksi reitiksi, mittauspisteiden mittausaikavälien määrittämisen sekä työn valvonnan mittausten suorittamiseksi. Mittaustuloksia syntyy kunnonvalvonnassa luonnollisesti paljon. Suurin osa mittaustuloksista ei ole suoraan käytettävissä, vaan ne pitää analysoida, jatkokäsitellä ja muuttaa haluttuun, ymmärrettävään muotoon. Näitä mittaustuloksia käytetään tutkittaessa trendejä, spektrejä, aikatasoja ja vaihetietoja. Kunnonvalvontaan liittyvät yhtenä osa-alueena myös erilaiset aistiensavainnot. Havainnot ja mittaustulokset saattavat johtaa hälytyksiin ja koneen korjaukseen, huoltoon tai osan vaihtoon. Mittaustulokset pitää aina analysoida käyttökelpoiseen muotoon. Analysointiin sisältyy diagnoosi, prognoosi ja toimenpide-ehdotukset. [18, 14.]



Kuvio 5. Kunnonvalvontatoiminnan jako elementteihin [18, 14].

Kuviosta 6 nähdään, että kunnonvalvonta on ohjaava toimenpide ja usein kunnonvalvontajärjestelmissä onkin sisäänrakennettu itseohjaus. Kunnonvalvonta tarvitsee kunnossapidolta palautetietona tiedot koneen rakenteesta ja käyntiolosuhteista sekä tiedot suoritetuista korjauksista, huolloista ja parannuksista. Hälytystiedot syntyvät automaattisesti ja viesti hälytyksestä tulee suoraan käyttö- ja kunnossapitohenkilöstölle. Muiden tietojen siirtäminen automatisoidusti on osoittautunut hankalaksi. [18, 35–36.]



Kuvio 6. Toimintamalli kunnonvalvonnan ja kunnossapidon välillä [18, 36].

## 5.2 Mittaavan kunnonvalvonnan merkitys

Mittaava kunnonvalvonta on nykyään yritykselle elintärkeää ja sen avulla voidaan saavuttaa yrityksen kannalta suuria rahallisia hyötyjä. Tuotantolinjoja rakennetaan nykyisin ilman varakoneita, joten yksittäisen koneen käyntikunto voi olla yrityksen kannalta erittäin tärkeää, jopa kriittistä. Seisokkituntihinnat nousevat jatkuvasti tuotantomäärien kohotessa. Tuotantomäärien nousu taas osaltaan vaikuttaa koneiden pyörimisnopeuksien nousuun, jolloin vikojen kehittyminen tapahtuu nopeammin. Nämä vaativat reaaliaikaista mittaamista ja ehkäisevää kunnossapitoa, jotta koneiden seisokkiaikoja voidaan lyhentää. Koneiden rakenteita valmistetaan yhä keveämmiksi, mutta samalla se aiheuttaa koneiden rakenteiden värinänkeston kannalta haasteita ja värinän kunnonvalvonta osoittautuu entistä tärkeämmäksi. Nykyään käytetään myös yhä enemmän kierroslukusäädettäviä koneita, jolloin värinäkäyttäytyminen muuttuu huomattavasti eri kierrosalueilla. Tämä aiheuttaa sen, ettei aistienvaarainen toiminta ole enää niin tarkkaa. Siksi koneita mittaamaan tarvitaan mittaava elementti esimerkiksi anturi. [18, 13.]

Eräs tärkeä asia mittaavassa kunnonvalvonnassa on se, että mitatusta suureesta saadaan kirjattua tunnuslukuja tietyille koneille tietyissä olosuhteissa. Näin voidaan ajoittaa koneiden ehkäisevä kunnossapito entistä tarkemmin. Tietoa keräävät mittalaitteet ovat kehittyneet ja ne kehittyvät edelleen yhä helpommin käyttöönotettaviksi. Tämä madaltaa yritysten kynnystä siirtyä vanhemmista kunnonvalvonnan mittausmenetelmistä tietoa kerääviin antureihin. Mittaavat kunnonvalvontavälineet ovat nykyään suosittuja olosuhteissa, joissa on melua, vaarallisia aineita tai muuten epämiellyttävä ympäristö. [18, 13.]

## 6 Kunnonvalvonnan mittausmenetelmät

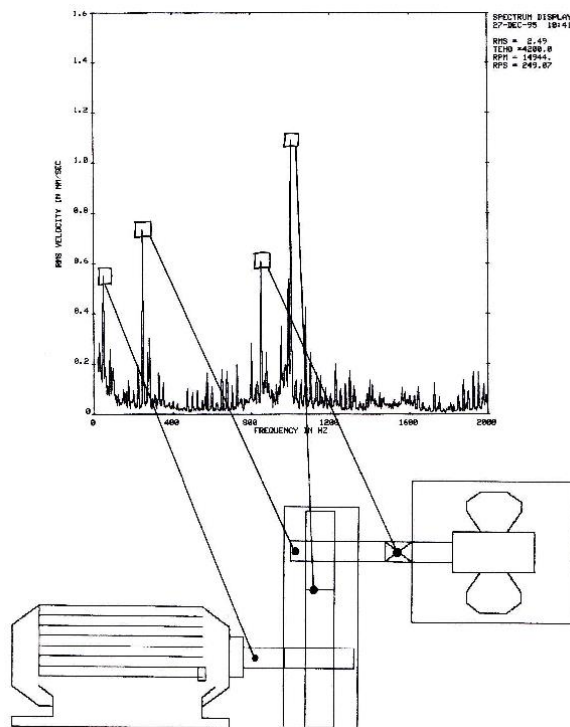
Kunnonvalvontaan kuuluu monia mittausmenetelmiä ja niitä tulisi käyttää kokonaisvaltaisen ehkäisevän kunnossapidon apuna. Kunnonvalvonnan erilaisia mittausmenetelmiä on käytetty suunnitellusti teollisuudessa 1960-luvulta lähtien. 1980-luvulla aloitettiin panostamaan mittaustoimintaan merkittävässä määrin ja nykyään lähes kaikista teollisuuden tuotantolaitoksista löytyy jokin mittauslaite, jolla valvotaan koneen tai koneiden kuntoa. Tässä luvussa käydään läpi tärkeimmät kunnonvalvonnan mittausmenetelmät: värähtelymittaukset, lämpötilamittaukset, hyötysuhdemittaukset, kulumishiukkasanalyysin ja epätahtimoottoreiden sähkövirta-analyysin. Näistä mittausmenetelmistä käydään tarkemmin läpi VTT:n Little Noden hyväksikäyttämät värähtely- ja lämpötilamittaukset. [18, 13.]

### 6.1 Värähtelymittaukset

Värähtelymittausta käytetään yleisesti kunnonvalvonnassa, mutta sitä käytetään myös käytönvalvonnassa ja vikaselvityksissä. Mekaaninen värähtely on rakenteen, koneen tai koneen osan liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä. Vakiovoima ei pysty aiheuttamaan värähtelyä. Värähtely tarvitsee jatkuvasti suuntaansa tai suuruuttaan vaihtavan voiman. Muuttuva voima voi aiheutua esimerkiksi akselin pyörimisliikkeestä. Värähtelymittauksen oikealla analysoinnilla pystytään hyvin ennakoimaan kunnossapidon tarve. Toisaalta väärällä analysoinnilla tuhlataan vain aikaa ja resursseja. Niinpä onkin erityisen tärkeää, että mittaustulokset käsitellään ja dokumentoidaan järkevästi, jotta vauriokehitys pystytään havaitsemaan sekä arvioimaan vaurion ajankohta. Värähtelymittalaitteita ja menetelmiä on olemassa paljon, joista omaan käyttötarkoitukseen sopiva on vaikea valita. Värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: yksinkertaiset menetelmät koneiden yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan, monimutkaisemmat menetelmät koneiden tärinän yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan. [15; 18, 40.]

Yksinkertaisiin menetelmiin kuuluvia mittalaitteita tarvitaan koneiden kunnonvalvonnassa yleensä kaksi. Toinen mittalaite mittaa koneiden kokonaistärinää 10–1000 Hz:n taajuusalueelta ja sen avulla saadaan tietoon koneen akselin pyörimiseen liittyviä vikoja. Toisella mittalaitteella mitataan vierintälaakereiden kuntoa korkeammalla, yli 2000 Hz:n taajuusalueella. Esimerkiksi korkeataajuisen värähtelyn on havaittu kasvavan voitelukalvon kadotessa vierintälaakerista tai laakerivian syntyessä. Luokan 1 mittalaitteet ovat yleensä tarpeeksi herkkiä valvomaan koneita, joissa ei ole useita akseleita pyörimässä eri nopeuksilla. [15.]

Kuvassa 6 nähdään, että monimutkaisesta koneesta tulevan värähtelysignaalin eri osataajuuksia ja niiden suuruuksia voidaan erottaa toisistaan. Tällä tekniikalla voidaan tunnistaa yksittäisten koneenosien aiheuttama tärinä ja seurata tunnistettujen osien kunnon kehittymistä. Värähtelymittauksissa, riippumatta millaista mittalaitteistoa käytetään, on tärkeää mitaustulosten järjestyminen ja dokumentointi, jotta vauriokehitys pystytään havaitsemaan ja vaurioitumisen ajankohta arvioimaan. [18, 19.]



Kuva 6. Monimutkaisesta koneesta tulevat eri tärinätaajuuksia [18, 19].

Kunnonvalvonnan värähtelymittauksia tehdään kahdesta eri syystä. Pyörivien koneiden värähtelymittauksista voidaan oikein analysoimalla luotettavasti arvioida koneenosien kuntoa. Toisaalta värähtelyn vaikutukset ovat yleensä haitallisia koneissa, rakenteissa ja tuotantoprosesseissa. Haittavaikutuksia voivat olla lisääntyneet jännitykset, rakenteiden väsymismurtumat, liitosten löystymiset, käyttöiän aleneminen, lopputuotteen laadun heikkeneminen, käynnin epävarmuus, energiahäviöt, melu tai muu ergonominen haitta sekä häiriöt muille koneille. [18, 40.]

### **6.1.1 Värähtelyn mittaaminen**

Värähtelyjen mittaamiseen liittyy kolme eri suureta: siirtymä/poikkeama, nopeus ja kiihtyvyys. Näitä suureita eli värähtelysuureita voidaan derivoida tai integroida, jolloin mittaussuure saadaan muutettua toiseksi, esimerkiksi integroimalla kiihtyvyyssignaali nopeussignaaliksi. Siirtymämittaus kertoo kohteen sijainnin suhteessa vertailupisteeseen. Nopeusmittaus kertoo kappaleen siirtymän tietyssä ajassa ja kiihtyvyyssmittaus nopeuden muutoksen tietyssä ajassa. Kutakin mittaussuuretta mitataan eri antureilla ja ne mittaavat värähtelyjä eri kierrosnopeusalueilla. Mittaavia antureita ovat kiihtyvyyssanturit, nopeusanturit ja siirtymäanturit. [18, 45.] Näihin antureihin palataan luvussa 7.

Mitattava värähtelysuure ja koneen nopeus vaikuttavat saatuihin mittaustuloksiin. Värähtelysuureen tulisi olla riittävän herkkä havaitsemaan koneen kunnan muutoksen aiheuttama tärinä. Jos mitattavasta kohteesta tulee värähtelyjä matalilla ja korkeilla taajuuksilla, suositellaan mittausten luotettavuuden kannalta käytettävän kaikkia mittaussuureita eli siirtymää, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Värähtelymittauksissa käytetään yleensä nopeusmittausta, koska sillä on hyvä herkkyys laajalla taajuusalueella. Lisäksi nopeusmittauksen sisältämän värähtelyn energiamäärä on lähes verrannollinen värähtelynopeuteen. [18, 50.]

Värähtelyn suuruutta kuvataan erilaisilla lukuarvoilla, joita lasketaan mittaussignaalista. Suuruutta voidaan kuvata huippuarvolla, huipusta-huippuun-arvolla, tehollisarvolla, keskiarvolla tai desibeliarvolla. Mittaustuloksia esittäessä on erityisen tärkeää kertoa myös mitta-arvon suuruuden esitystapa. Tehollisarvo on yleisin tapa ilmoittaa mitatun värähtelysignaalin suuruus. Tehollisarvon avulla saadaan selville melko hyvin värähtelyn keskimääräisen energiasisällön suuruus. Toisaalta hetkelliset korkeat arvot eivät juurikaan nosta tehollisarvoa. Toiseksi yleisin tapa ilmoittaa värähtelysignaalin suuruus on huippuarvo, joka kertoo mittaustuloksen korkeimman amplitudin arvon. Huipusta-huippuun-arvoa käytetään lähinnä siirtymämittauksessa. Se kertoo mittaustuloksen suurimman ja pienimmän arvon erotuksen. [18, 51–52.]

### **6.1.2 Värähtelyn mittaustuloksen valinta**

Mittaustuloksen valinta vaikuttaa oleellisesti siihen, saadanko mittaustuloksista tarpeeksi tietoa koneen kunnosta. Jokaisesta koneesta tulisi valita niin monta mittaustulosta, ettei mikään ennakoitava vika eri kone elimissä jää havaitsematta mittaustulosten vähäisyyden takia. Pääsääntöisesti mittaustulosten minimimääränä pidetään yhtä mittaustulosta laakeria kohti. Tästä mittaustuloksesta tehdään mittaus, joka arvioi sekä laakerin että muiden koneen elimien kuntoa. Suositeltu mittaustulosten määrä kunnonvalvonta-mittauksissa on kuitenkin laakerin värähtelyn mittaaminen kolmeen suuntaan: vaakaa, pystyyn ja akselin suuntaan. Usein suositellusta määrästä joudutaan kuitenkin poikkeamaan esimerkiksi ahtauden, työturvallisuuden tai kustannusten takia. Asennettavan anturin suuntaan on siis kiinnitettävä erityistä huomiota. Mittaustulosta koneessa valitaan siten, että värähtelylähteen ja anturin väliin jää mahdollisimman vähän rajapintoja eli ne ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Myös ympäristö-olosuhteet vaikuttavat mittaustuloksen valintaan. Ympäristöstä ei saa kohdistua anturiin sallittua suurempia kiihtyvyyksiä, lämpötiloja tai muita liiallisia rasituksia. Toisaalta on myös huolehdittava, etteivät anturit vaikeuta käyttö- ja huoltotoimenpiteitä. [18, 53–54.]

## 6.2 Lämpötilamittaukset

Tuotaessa lisää energiaa kappaleeseen, sen lämpötila nousee kappaleen materiaalin ominaislämpökapasiteetin mukaisesti. Kappale laajenee lämpötilan noustessa. Jos laajenemista rajoitetaan, syntyy kappaleeseen lämpöjännityksiä, jotka voivat aiheuttaa kappaleeseen pysyviä muodon muutoksia. Tästä syystä lämpötilamittauksia käytetään koneiden, rakenteiden ja systeemien kunnonvalvonnassa. Lämpötilamittaukset ovat olleet aiemmin suosittuja laakereiden kunnonvalvonnassa. Ongelmana kuitenkin oli, että lämpötilamittaukset eivät olleet tarpeeksi herkkiä havaitsemaan laakerivikoja, etenkin varhaisessa vaiheessa. Nykyään lämpötilamittauksia käytetään kunnonvalvonnassa muita mittauksia täydentävänä menetelmänä. [17, 172; 18, 20; 25, 439.] Tässä luvussa tutustutaan lämpötilamittaustekniikoihin.

### 6.2.1 Koskettava lämpötilamittaus

Koskettava lämpötilamittaus on helppokäyttöinen mittaustapa. Siinä ei tarvitse ottaa huomioon pintojen erilaisia emissiokertoimia tai heijastuvista lämpöaalloista johtuvia häiriöitä. Toisaalta koskettavan lämpötilamittauksen soveltamisalueet eri vikojen analysointiin ovat huonot, jos sitä verrataan infrapunakameralla tehtyihin mittauksiin. Ongelmaksi muodostuu myös anturin pitkä asettumisaika ja se tosiasia, että koskettavaa lämpötilamittausta ei läheskään aina voida suorittaa. [18, 20.]

Kuviossa 7 on esitetty yleisimpiä lämpötilan mittausmenetelmiä ja käyttölämpötiloja. Metallivastusanturit ja termoparianturit ovat yleisemmin käytettyjä koskettavia lämpötilan mittausantureita. Kuten huomataan, lämpötilanmittausta varten on olemassa koskettavia mittausmenetelmiä, joilla päästään mittaamaan jopa 2200 °C:n ja -273 °C:n lämpötiloja. Normaalisissa koneiden kunnonvalvonnassa mitattava lämpötila-alue ei ole lähelläkään näitä ääripäitä, vaan pysyttelee 0–100 °C:n välissä. [25, 440.]



<b>Koskettavat menetelmät</b>	
<p><i>Lasilämpömittarit</i> Lasisäiliössä oleva neste laajentuu ja nousee kapillaariputkeen lämpötilan noustessa. Pinnan korkeus kertoo lämpötilan. Nesteenä on esim. elohopea, -273 °C...750 °C.</p>	<p><i>Metallivastusanturit</i> Vastusanturit ovat metallista valmistettuja antureita. Menetelmä perustuu siihen, että anturien resistanssin lämpötilariippuvuuden avulla voidaan mitata lämpötila, -250 °C ... 850 °C.</p>
<p><i>Termoparimittaus</i> Termoparin toiminta perustuu lämpösähkö- eli Seebeckin ilmiöön. Kun kaksi eri metallista valmistettua metallilankaa yhdistetään toisesta päästään (kuumapää), lankojen toisten päiden (kylmäpää) välille syntyy kuuma- ja kylmäpään lämpötilaeroon verrannollinen tasajännite, -273 °C... 2200 °C.</p>	<p><i>Bi-metallilämpömittari</i> Bi-metallilla eli kaksoismetallilla tarkoitetaan kahdesta eri metallia olevasta liuskasta yhteen valssaamalla saatua liuskaa. Metallien erilaisten lämpötilakertoimien johdosta liuska taipuu lämpötilan muuttuessa, -70 °C...550 °C.</p>
<p><i>Termistorit</i> Puolijohdetyyppinen anturi, jonka herkkyys on suuri, mutta on voimakkaasti epälineaarinen, -100 °C... 320 °C</p>	<p><i>Lämpötilaindikaattorit</i> Lämpötilavärit ja tarrat, jotka muuttavat väriään kun lämpötila muuttuu, kapea lämpötila-alue.</p>

Kuvio 7. Koskettavia lämpötilan mittausmenetelmiä ja käyttölämpötiloja [25, 440].

## 6.2.2 Infrapunamittaus

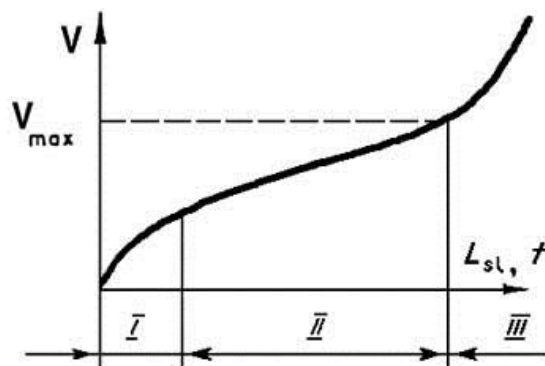
Lämpötilamittaukset koneissa perustuvat yleisimmin infrapunateknologiaan. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on korkeampi kuin absoluuttinen nollapiste -273 °C:ta, lähettävät energiaa tai säteilyä infrapunasäteilyn taajuusalueella. Infrapunasäteilyn intensiteetti on suoraan verrannollinen kappaleen pinnan lämpötilan suuruuteen. Infrapunamittauksen ongelmana on, että jokaisesta kappaleesta lähtee kolmea erilaista lämpöenergian lähdettä: kappaleen itsensä lähettämää, kappaleen heijastamaa ja kappaleen siirtämää energiaa. Jotta infrapunamittauksen tulos saadaan analysoitua oikein, pitää kappaleen heijastama ja siirtämä energia suodattaa pois mittauksista. Kunnonvalvonnassa voidaan käyttää kolmea erilaista infrapunamittausapua: infrapunälämpötilamittausta tai pisteradiometriä, linjaskannausta ja infrapunakuvausta. Nämä mittausmenetelmät eroavat toisistaan mitattavan pinta-alan suhteen. Infrapunälämpötilamittaus tai pisteradiometri mittaa lämpötilan kappaleen pinnalta tietyssä pisteessä. Linjaskannaus toimii kuten viivakoodinlukija ja se skannaa säteilyä yksiulotteisesti tai suhteellisen säteilyn linjaa. Infrapunakuvaus näyttää laajan alueen

kappaleen pinnasta. Se toimii kuten videokamera ja kappaleen lämpösäteilyn voi nähdä suoraan laitteen optiikalta tai näytöltä. [17, 172–175.]

### 6.3 Kulumishiukkasanalyysi

Kulumishiukkasanalyysi eli ferrografia perustuu voiteluöljyssä olevien kulumishiukkasten koon ja määrän tarkkailemiseen. Koneiden kuluessa voiteluöljyyn siirtyy kulumishiukkasia, joiden koko kasvaa ja määrä lisääntyy, kun koneen kuluminen kasvaa voimakkaasti. Normaali kulumisessa kulumishiukkaset ovat halkaisijaltaan noin 10  $\mu\text{m}$ :ä, mutta voimakkaan kulumisen myötä ne kasvavat 10–100-kertaisiksi ja niiden muodot muuttuvat. Kulumishiukkasanalyysi tehdään joko erillisestä voiteluöljynäytteestä tai valvontajärjestelmällä kiinteästi. Näytteenotossa on oltava erittäin huolellinen, jotta näyte pysyy puhtaana. [16.]

Kuviossa 8 nähdään, että kuluminen kasvaa koko toiminta-ajan. Voimakkaan kulumisen alkaessa nousee kulumisen määrä huomattavasti nopeammin kuin tasaisen kulumisen aikana. Onkin erityisen tärkeää, että voimakas tuhoava kuluminen huomataan riittävän ajoissa, jotta välttyttäisiin konerikoilta.



Kuvio 8. Kuluminen ( $V$ ) toiminta-ajan funktiona, jossa I. Sisäänajokuluminen, II. Tasainen kuluminen, III. Voimakas tuhoava kuluminen [16].

## 6.4 Voiteluöljyanalyysi

Voiteluöljyanalyysin avulla voidaan tutkia voiteluöljyn kuntoa mekaanisissa ja sähköisissä laitteissa. Tällä tekniikalla ei kuitenkaan voida tutkia koneen yleistä käyntikuntoa tai etsiä häiriöiden syytä, vaan voiteluöljyanalyysin tarkoituksena on suojella ja pidentää voiteluöljyjen käyttöaikaa. Osalla voiteluöljyanalyysimittausavoista voidaan saada tietoa myös öljyssä olevista partikkeleista, mutta siltikään tällä mittausten menetelmällä ei voida paikantaa tarkkaa syytä koneen vikaantumiselle. Voiteluöljyanalyysin avulla voidaan kontrolloida laatua paremmin, vähentää voiteluöljyjen varastomäärää ja määritellä kustannustehokkain öljyn vaihtoväli. Tämän analyysin avulla voidaan myös määritellä, onko käytetty voiteluöljy sopiva koneelle. Tulosten avulla voidaan voiteluöljy vaihtaa tai parantaa vastaamaan käyttövaatimuksia. Voiteluöljyanalyysin avulla voidaan saada aikaan isoja säästöjä, koska voiteluöljyn vaihtoväli voidaan päättää senhetkisen öljyn kunnon avulla. [17, 108–109.]

## 6.5 Hyötysuhdemittaukset ja epätahtimoottoreiden sähkövirta-analyysi

Hyötysuhdemittaukset tarkoittavat mittauksia, joilla selvitetään laitteiden ja prosessin toimintakykyä. Hyötysuhdemittauksia ovat esimerkiksi virtausmäärien, lämpötilojen ja paineiden mittaukset. Mittauksen kohteina voivat olla turbiinit, lämmönsiirtimet, venttiilit, pumput ja prosessikokonaisuudet. Mittausten avulla voidaan vertailla koneen tai prosessin laskennallista ja todellista hyötysuhdetta. Hyötysuhdemittausten avulla pystytään havaitsemaan seuraavia vikoja turbiineissa: siipien pinnan karheutuminen, siipien kuluminen, tiivistenauhojen välysten kasvu, siipien mekaaninen vaurioituminen, siipien pinnan kerrostumat, akselitiivisteiden välysten kasvu ja asennusviat. Teollisuudessa hyötysuhdemittaukset eivät ole kovinkaan käytettyjä, vaikka niillä saataisiin pienennettyä kustannuksia. [11.]

Epätahtimoottoreiden sähkövirta-analyysi on mittaus, joka suoritetaan spektrianalyysinä yhdestä sähkömoottoriin tulevasta vaiheesta. Vaiheesta saadaan mittaussignaali

analyssaattorille sähköjohdon ympärille asetetun virtapihdin avulla. Mittauksen avulla voidaan havaita epätahtimoottoreiden sähköisiä ja mekaanisia vikoja. Näitä vikoja voivat olla esimerkiksi vaurioituneet roottorisauvat, rikkoontuneet oikosulkurenkaat, dynaaminen ja staattinen epäkeskeisyys ja taipunut akseli. [18, 21–22.]

## 7 Anturit

Tässä luvussa tutustutaan antureihin ja käydään läpi erilaisia värähtelyä mittaavia antureita, lämpötilaa mittaavia antureita sekä näiden yhdistelmiä eli älykkäitä antureita. Lisäksi tutustutaan MEMS-antureihin sekä tietenkin työssä käytettävään VTT:n Little Node -anturiin.

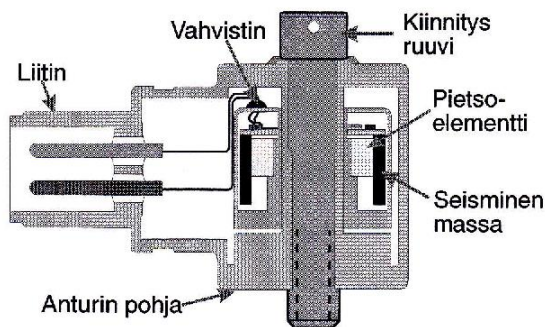
### 7.1 Värähtelyä mittaavat anturit

Kuten luvussa 6.1.1 todettiin: Värähtelyjen mittaamiseen liittyy kolme eri suureta: siirtymä/poikkeama, nopeus, kiihtyvyys. Näistä jokaista mittaamaan on suunniteltu erilaiset anturit: Siirtymäanturit, nopeusanturit ja kiihtyvyysanturit. Tässä luvussa käydään läpi näiden antureiden ominaisuudet ja toimintaperiaate.

#### 7.1.1 Kiihtyvyysanturit

Kiihtyvyysanturilla mitataan kohteen kiihtyvyyttä, jonka mittayksikkönä käytetään  $m/s^2$  tai  $g$  ( $9,81 m/s^2$ ). Pienimmät kiihtyvyysanturit ovat pienempiä kuin nuppineulan nuppi, mutta on olemassa myös suurempia, jopa nyrkin kokoisia kiihtyvyysantureita. Kuvassa 7 kuvataan kiihtyvyysanturin rakenne. Kiihtyvyysanturin tärkein komponentti on pietsosähköinen kide, joka on kiinnitetty anturikuoreen kiinnityselementeillä. Pietsosähköisen kiteen päälle tai sivuille on asennettu massa, joka hitausvoimien vaikutuksesta hetkellisesti, joko puristaa tai venyttää kidettä. Tällöin kiteeseen syntyy anturin kiihtyvyyteen suoraan verrannollinen varaus, joka muuttaa jatkuvasti suuruuttaan ja etumerkkiään. Varauksen määrä johdetaan anturin sisäiseen tai ulkoiseen varausvahvistimeen, jossa se muutetaan jännitteeksi, joka muodostaa anturista saatavan

mittaussignaalin. Kiihtyvyyssanturin mittaustarkkuus ei laske käytettäessä, koska se ei sisällä liikkuvia osia. [18, 46.]



Kuva 7. Kiihtyvyyssanturin rakenne [18, 46].

Kiihtyvyyssanturi kiinnitetään yleensä magneetilla, ruuvilla, käsin painamalla tai mehiläisvahalla. Normaalisti kiihtyvyyssanturin mittausalue on noin 2–14000 Hz:ä, mutta anturin ominaisuudet ja kiinnitystapa vaikuttavat anturin ala- ja ylärajataajuuksiin. Painamalla kiihtyvyyssanturi käsin, saadaan lineaarimittauksen ylärajataajuudeksi noin 600 Hz:ä. Magneettikiinnityksen avulla päästään 800–4000 Hz:n ylärajataajuuksiin riippuen pinnan tasaisuudesta ja magneetin voimakkuudesta. Ruuvikiinnityksellä, sopivalla anturilla ja tarpeeksi kireällä kiinnityksellä päästään jopa yli 20000 Hz:n ylärajataajuuksiin. [18, 46.]

Kiihtyvyyssanturin hyviä puolia ovat: pieni koko, kevyt rakenne, edullinen hinta, laaja taajuusalue ja niiden jatkuva kehitys. Heikkouksia puolestaan ovat: herkkä rakenne, signaali-häiriösuhde, korkeataajuiset signaalien osat voivat hävittää matalataajuisia signaalien osia alleen, elektrostaattiset häiriöt voivat vaikuttaa mittaustuloksiin sekä anturilla on 1–600 sekunnin asettumisaika ennen mittaamista. Asettumisaikaan vaikuttavat anturin asennuksessa tulevat iskut, jotka lamaannuttavat pietsosähköisen kiteen. Mitä kovempi isku, sitä pidempi on kiteen toipumisaika. Toinen häiriön aiheuttaja johtuu anturin vahvistimen rakenteesta ja mittausalueen alarajataajuudesta. Kytettäessä anturiin jännite, anturi asettuu sitä kauemmin, mitä matalampi alarajataajuus on. [18, 46–47.]

### 7.1.2 Nopeusanturit

Nopeusantureita käytetään kohteen nopeuden mittaamiseen ja sen mittayksikkönä käytetään mm/s. Nopeusanturin sisällä on anturin päätyihin jousilla kiinnitetty magneettinen massa. Se liikkuu käämin sisällä kohteen värähtelyä mukailleen ja aiheuttaa käämiin mitattavan kohteen nopeuteen suoraan verrannollisen jännitteen. Tästä jännitteestä saadaan tuotua anturin ulkopuolelle mittaussignaali. Signaalia ei tarvitse muokata, jos nopeus on haluttu mittaussuure. Nopeusanturilla päästään parhaimmillaan 5–2000 Hz:n mitta-alueelle, kiinnitystavan ollessa vakaa. Alarajataajuuteen vaikuttaa anturin sisäinen resonanssi, joka aiheutuu jousessa olevan magneetin massasta ja jousen jäykkyydestä. Sisäinen resonanssi on tyypillisesti 3–12 Hz:ä ja alarajataajuuden tulee olla muutamia hertsejä korkeampi. [18, 47–48.]

Nopeusantureiden hyviä puolia ovat: se mittaa yleisintä mittaussuuretta kunnonvalvonnassa eli värähtelyn nopeutta, se ei tarvitse ulkopuolista virtalähdettä, sillä on erinomainen signaali-häiriösuhde, se on herkkä ja helppo käyttää. Heikkouksia puolestaan ovat: anturit ovat usein isokokoisia ja raskaita, käyttölämpötila on rajoitettu, mittaustaajuus on rajallinen, rakenne vaurioherkkä ja altis sähkömagneettisten kenttien häiriöille sekä anturin asento voi vaikuttaa mittaustulokseen. Ennen nopeusantureiden käyttö oli paljon yleisempää. Nykyään kiihtyvyyssantureiden avulla saadaan kiihtyvyyssignaali integroitua nopeussignaaliksi ja integroiminen voidaan hoitaa suoraan anturin sisällä. [18, 48.]

### 7.1.3 Siirtymäanturit

Siirtymäanturit, jotka mittaavat siirtymää, ovat useasti pyörrevirta-antureita. Pyörrevirta-anturilla mitataan noin 2 mm:n päästä kiinnityskohdan ja mittauspisteen keskinäistä suhteellista liikettä. Sen mittayksikkönä käytetään  $\mu\text{m}$ . Siirtymäantureita käytetään tyypillisesti liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonnassa, jossa ne mittaavat akselivärähtelyä. Pyörrevirta-anturin toiminta perustuu sen päässä olevan

kelan muodostamaan magneettikenttään, joka indusoi pyörrevirtoja mitattavan kohteen ferromagneettiseen pintaan. Pyörrevirrat aiheuttavat muutoksia anturin päässä olevan kelan jännitteeseen, kun anturin ja mitattavan kohteen välimatka muuttuu. Muutos saadaan ulos anturista jännitteenä, joka kertoo anturin ja mittauspisteen välisen etäisyyden. Siirtymäantureilla voidaan värähtelyjen lisäksi mitata pinnanmuotojen muutoksia, asemaa tai akselin ratakäyriä. [18, 49.]

Siirtymäantureiden hyviä puolia ovat: pieni koko, keveys, staattisen etäisyyden mittaaminen. Heikkouksia puolestaan ovat: mittaamiseen tarvitaan vakaa kiinnityskohta, tarvitsee ulkoisen virtalähteen, mitattavan pinnan magneettiset ominaisuudet muuttavat mittaustuloksia sekä se on hankala käyttöinen ilman kiinteää asennusta. Nykyään myös kiihtyvyyden- ja nopeusantureita käytetään siirtymän mittaamiseen, jolloin mittaussignaali täytyy integroida sopivaan muotoon. [18, 50.]

## **7.2 Lämpötilaa mittaavat koskettavat anturit**

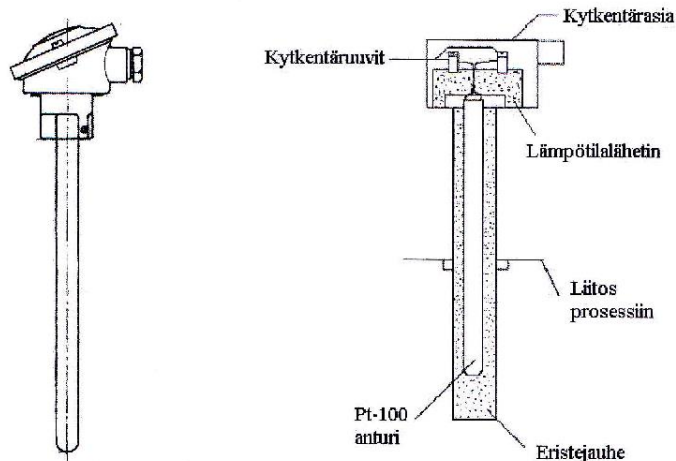
Lämpötilaa voidaan mitata koneesta, joko koskettavalla mittauksella tai infrapunasäteilyyn perustuvalla koskemattomalla mittauksella. Tässä luvussa tutustutaan erilaisiin koskettaviin lämpötilanmittausantureihin, jollaista tullaan käyttämään hyväksi myös VTT:n Little Noden seuraavassa versiossa.

### **7.2.1 Vastuslämpötila-anturit PT-100 ja PT-1000**

PT-100 ja PT-1000 ovat yleisimpiä teollisuudessa käytettyjä metallivastusantureita. Antureiden nimet tulevat standardin DIN 43760 mukaan siitä, että antureiden resistanssi 0 °C:ssa on joko 100 Ω:a tai 1000 Ω:a. Nämä anturit sopivat hitaisiin lämpötilamuutosten mittaamiseen, joissa tarvittavat vasteajat ovat sekunneista muutamiin minuutteihin. Antureiden mittatarkkuus on tyypillisesti n. 0,5 °C:tta mittaussvälissä -



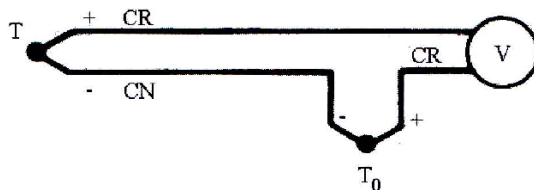
50...+100 °C:tta. Anturin lähettimeen syötetään jännite, josta saadaan ulostulona lämpötila joko virta- tai jänniteviestinä. Kuvassa 8 kuvataan PT-100 -anturin rakenne. Anturi on kohtalaisen suuri ja vaatii johdon liittämiseen. [25, 440–441; 26.]



Kuva 8. PT-100 -anturin rakennekuva [25, 441].

## 7.2.2 Termoelementtianturi

Termoelementtianturin rakenne sisältää termoelementtiparin, joka muodostuu kahdesta eri metallia olevasta galvaanisesti yhdistetystä langasta. Kuvassa 9 kuvataan termoelementtianturin toimintaperiaate. Anturin mittaava kohta T ja vertailukohta  $T_0$  muodostavat niiden lämpötilaeroon suoraan verrannollisen jännitteen V. Erilämpötila-alueita varten on olemassa erilaisia lankamateriaaleja. Anturista saatava ulostulojännite on epälineaarinen, joten termoelementtianturin käytössä tarvitaan aina elementtimateriaalista riippuva jännitteen lineaarisointipiiri. [25, 441.]



Kuva 9. Termoelementtianturin toimintaperiaate [25, 441].

### 7.3 Älykkäät anturit ja MEMS-anturit

Älykäs anturi tarkoittaa teollisuudessa käytetyn määrittelyn mukaan anturia, joka yhdistää mittaavan elementin, analogisen rajapintapiirin, A/D-muuntimen eli analogisen tiedon muuntamisen digitaaliseen muotoon ja tietoliikenneväylän rajapinnan. Nykyään älykkäällä anturilla tarkoitetaan anturia, jossa on myös itsenäistä älykkyyttä. Itsenäinen älykkyys voi olla testausta, tunnistusta, hyväksymistä tai muuttumista. Englanninkieleissä älykkäistä antureista puhutaan nimillä smart sensor ja intelligent sensor, joista intelligent sensor on itsenäisen älykkyyden sisältämä anturi. Suunnittelijat pyrkivät kehittämään älykkäitä antureita, jotka pystyvät kalibroittamaan tai diagnosoimaan itsenäisesti, ja joilla on kyky käyttää signaalin prosessointia ja mitata useampia suureita. Älykkäillä antureilla voidaan mitata esimerkiksi valoa, lämpötilaa, ääntä, liikettä, värinää ja kosketusta. Älykkäitä antureita käytetään terveydenhuollon seurannassa, törmäysten ehkäisemisessä, suurnopeustyöstössä, automaatiosovelluksissa ja öljynporauslautoilla. Tuotannossa älykkäillä antureilla voidaan: optimoida koneistus ja tuottaminen, nopeuttaa tuotantoa, vähentää huoltoaikoja, minimoida susikappaleet ja parantaa koko tuotetta sekä prosessin laatua. Erilaisia älykkäitä antureita on markkinoilla suuria määriä. Jatkuvasti tulee myös uusia pienempiä ja tehokkaampia antureita. [9; 10.]

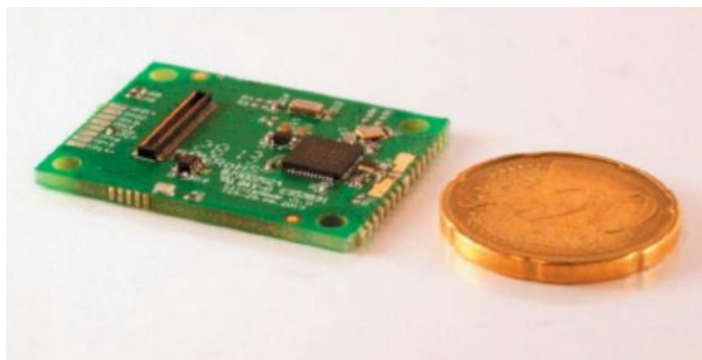
Älykkäiden antureiden markkinat tulevat olemaan maailmanlaajuisesti 7.8 miljardia dollaria vuonna 2015. Älykkäiden antureiden kehittäminen on kallista ja vaikeaa, mutta Global Industry Analystsin markkinatutkimus osoittaa, että älykkäiden antureiden markkinat kasvavat. Älykkäitä antureita kehitetään jatkuvasti tehokkaampaan ja älykkäämpään suuntaan. Siispä tulevaisuudessa markkinoille tulee yhä enemmän älykkäitä antureita, jotka pystyvät suorittamaan loogisia funktioita, kommunikoimaan kahteen suuntaan, sopeutumaan ympäristön muutoksiin ja tekemään päätöksiä itsenäisesti. Antureissa tulee olemaan myös yhdenaikaista mittausta ja analysointia useammalle kuin yhdelle mittaussuurelle. [9.]

MEMS tulee sanoista Micro Electro Mechanical Systems ja se tarkoittaa mikroelektroniikan ja mikromekaniikan yhdistämistä. MEMS-tekniikan avulla saadaan

mikromekaaniset anturit ja toimilaitteet integroitua mikroelektroniikkaan. MEMS-antureissa käytetään perusmateriaalina piitä, koska sillä on hyvät mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet. Kunnonvalvontamittauksia varten MEMS-anturi tarvitsee mittauspiirin ja koteloinnin. Näitä antureita käytetään pääasiassa autoteollisuudessa, mutta ne ovat yleistymässä myös koneiden kunnonvalvonnassa. MEMS-antureiden etuna tulevaisuuden kunnonvalvonnassa ovat koko ajan aleneva hinta ja mahdollisuus integroida anturiin signaalinkäsittelyä sekä langatonta kommunikaatiota. [25, 243–244.]

#### 7.4 VTT:n Little Node

VTT:n Little Node on Teknologian tutkimuskeskuksen kehittämä ja valmistama älykäs anturi, jonka avulla voidaan mitata lämpötilaa ja värähtelyä. Anturi sisältää mikrokontrollerin, jossa on 32 bitin mikroprosessori, 256 kilotavua sisäistä flash-ohjelmamuistia ja 16 kilotavua RAM:ia, 31 I/O-pinniä ja kahdeksan 10 bittistä kanavaa sekä UART-sarjaliikennepiiri. VTT:n Little Noden langaton yhteys toimii 2,4 GHz:n taajuudella ja 250 kbps/1 Mbps/2 Mbps tiedonsiirtonopeudella. Se käyttää hyväkseen bluetoothin pienen virran moodia ja ant protokollaa sekä AES HW salausta. VTT:n Little Node on energiatehokas ja halpa tiedonkerääjä sekä se voi toimia kuukausia yhdellä litium paristolla. Mittaustietoja voidaan lukea Android- tai Apple iOS -käyttöjärjestelmiin perustuvilla BTLE-mobiililaitteilla. [22.] Kuvassa 10 kuvataan VTT:n Little Noden ja 20 sentin kolikon koko-suhdetta. Kuvasta nähdään, että kyseessä on erittäin pieni anturi, joka sisältää kuitenkin paljon toimintoja.



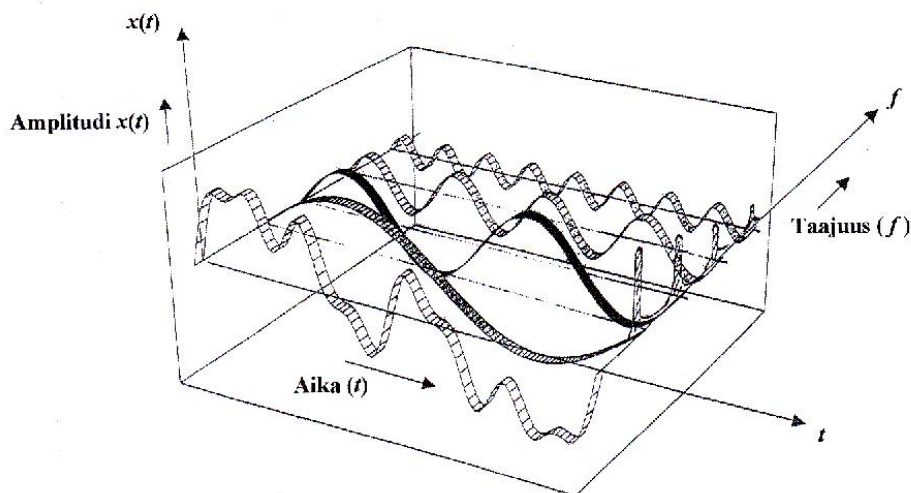
Kuva 10. VTT:n Little Node anturi ja 20 sentin kolikko [22].

## 8 Värähtelysignaalin tulkitseminen

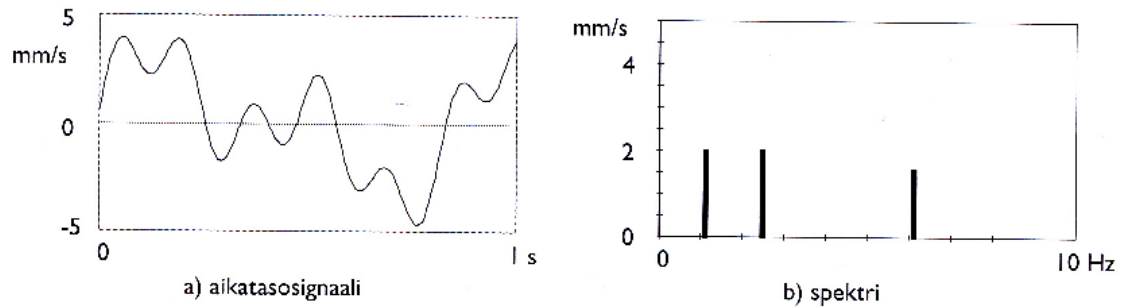
Tässä luvussa tutustutaan värähtelysignaalin tulkitsemiseen ja eritoten kunnonvalvontasovellutuksissa käytettyihin spektreihin ja Fourier-muunnokseen. Tutustutaan myös erilaisten vikatilojen vaikutuksiin hammasvälitysten taajuus-spektrissä.

### 8.1 Fourier-muunnos ja spektri

Normaalisti värähtelysignaaleja tarkastellaan aikatasossa, mutta joskus signaalia on parempi tarkastella taajuustasossa. Tätä tarkastelua varten tarvitaan Fourier-muunnosta. Fourier-muunnoksen avulla signaalista voidaan erottaa sinimuotoiset osataajuudet. Kuviossa 9 nähdään Fourier-muunnoksen periaate. Kuvassa aikatasolla näkyy vain yksi ns. summasignaali, mutta taajuustasolla summasignaalista voidaan erottaa sen osasignaalit. Fourier-muunnoksen tarkoituksena on erottaa ja muodostaa nämä sinimuotoiset osasignaalit. Saadusta amplitudi-taajuus-koordinaatistosta nähdään osasignaalien voimakkuus eli amplitudi (mm/s tai m/s<sup>2</sup>) sekä niiden taajuus (Hz). Fourier-muunnoksella aikaan saatua taajuustason esitystä kutsutaan spektriksi. Kuviossa 10 nähdään aikatasosignaali ja sitä vastaava spektrin. [25, 190–191.]



Kuvio 9. Fourier-muunnoksen periaatekuva [25, 190].



Kuvio 10. Aikatasosignaali ja sitä vastaava spektri [25, 191].

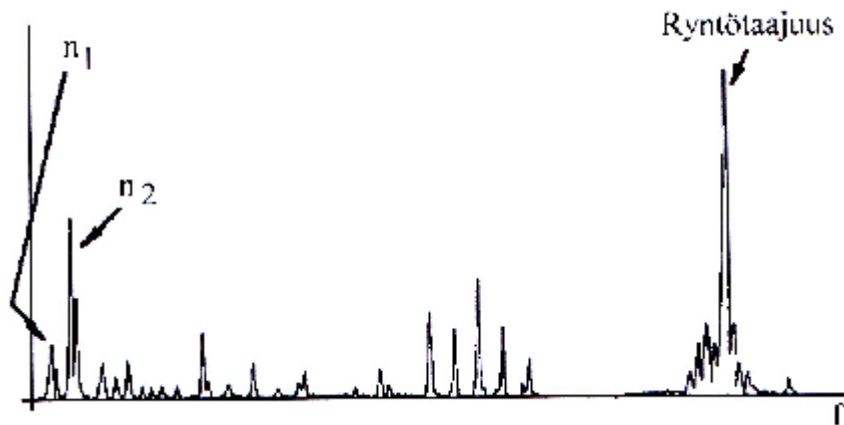
Fourier-muunnos voidaan tehdä kahden eri algoritmin avulla riippuen siitä, onko signaali ajan suhteen jatkuva vai diskreetti eli epäjatkuva. Diskreettiä Fourier-muunnosta kutsutaan DFT:ksi, joka tulee sanoista Discrete Fourier Transformation. Yleisemmin käytetty algoritmi on ns. Fast Fourier Transformation eli FFT ja sen avulla spektrin laskenta onnistuu lähes reaaliaikaisesti. FFT on huomattavasti kevyempi spektrin laskentatapa kuin DFT ja juurikin siitä syystä enemmän käytetty. [25, 191–195.] Kuviossa 11 on havainnollistettu laskutoimitusten määrä näillä eri tavoilla suhteessa spektriviivojen lukumäärään. Karkeasti laskettuna FFT:ssä on siis noin 100 kertaa vähemmän laskutoimituksia kuin DFT:ssä.

spektriviivojen lukumäärä	laskutoimitusten lukumäärä, DFT algoritmi	laskutoimitusten lukumäärä, FFT algoritmi
$N = 1024$	$1024 \times 1024 = 1\,048\,576$	$1024 \times \log_2 1024 = 10\,240$

Kuvio 11. DFT:n ja FFT:n laskutoimitusten lukumäärä [25, 195].

## 8.2 Hammasvälitysten vikatiilojen tulkitseminen spektristä

Hammaskytkimien osalta ei suoraan löydy niissä esiintyvien vikatiilojen spektrejä, mutta hammaskytkimiin voidaan soveltaa hammasvälityksissä esiintyviä vikoja. Molemmissa vikaantumistilat ovat samankaltaisia ja ne liittyvät usein hammastuksiin. Kuviossa 12 nähdään normaalikuntoisen hammasvaihteen spektri, jossa näkyvät akselien pyörimistaajuudet  $n_1$  ja  $n_2$ , ryntötaajuus sekä mahdollisesti niiden harmoniset monikerrat sekä rakenteellisia resonansseja. [25, 321.]



Kuvio 12. Normaalikuntoisen hammasvaihteen spektri [25, 321].

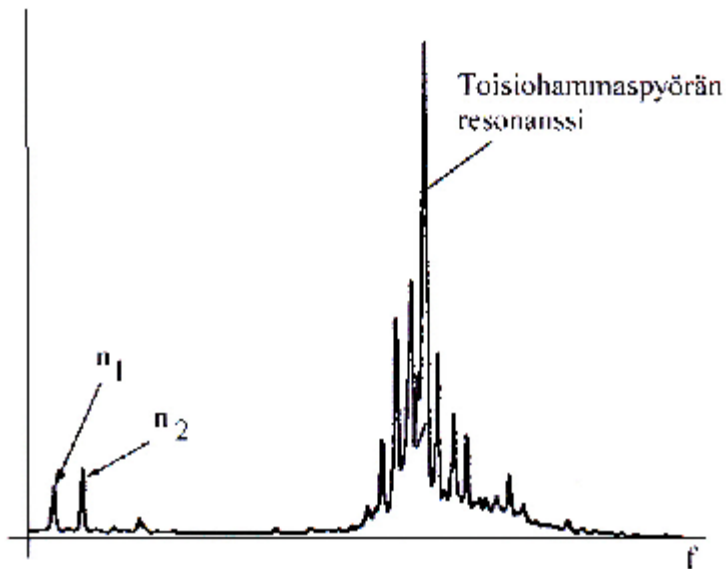
Ryntötaajuus  $f_r$  voidaan laskea kaavalla:

$$f_r = z * n ,$$

jossa  $z$  on hammasluku ja  $n$  on kyseisen hammaspyörän pyörimistaajuus.

### 8.2.1 Hampaiden kuluminen

Hampaiden kuluminen ei välttämättä aiheuta muutosta värähtelyn voimakkuuteen. Kuntoon perustuva kunnossapito-kirjan mukaan; ”Ryntötaajuuden ympäristöön ilmestyvät voimakkaat sivunauhat kuluneen hammaspyörän pyörimistaajuuden välein kertovat vakavasta kulumisesta”. Kuviossa 13 nähdään voimakkaasti kuluneen hammaspyörän ryntötaajuuden viereen ilmestyneitä sivunauhoja, jotka kertovat hampaiden kulumisesta. [25, 322.]

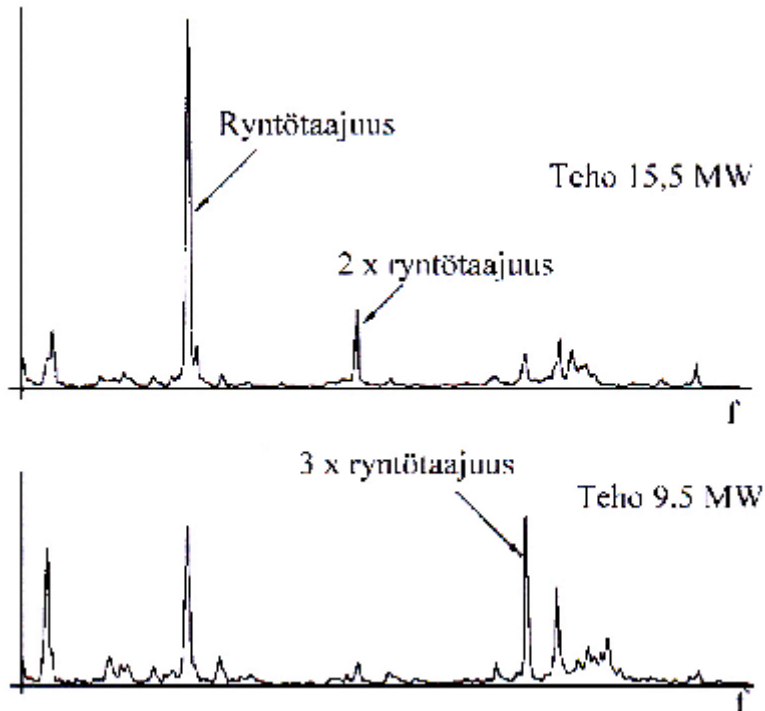


Kuvio 13. Voimakkaasti kuluneen hammaspyörän hampaiden aiheuttama resonanssi [25, 322].

### 8.2.2 Hammasvälityksen ylikuormitus

Hetkellinen ylikuormitus ei välttämättä aiheuta vikatilaa, mutta jatkuva ylikuormitus ei ole hyväksi. Ylikuormitus ilmenee yleensä voimakkaana amplitudina ryntötaajuudella. Kuviossa 14 nähdään vaihteen spektri normaali kuormitustilanteessa 9,5 MW:a sekä

ylikuormitettuna 15,5 MW:a. Huomataan, että ryntötaajuudella amplitudi on selvästi kohonnut. [25, 322.]

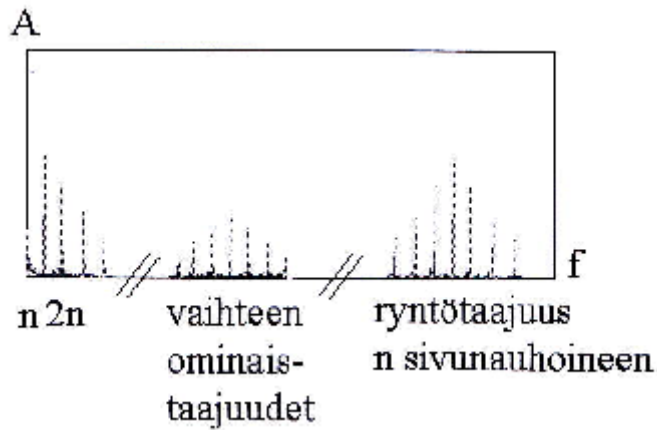


Kuvio 14. Ylikuormitetun ja normaalisti kuormitetun vaihteen spektri [25, 322].

### 8.2.3 Hammasvälityksen epäkeskeisyys, virheellinen hammasvällys ja linjausvirhe

Hammasvälityksen epäkeskeisyys, virheellinen hammasvällys ja linjausvirhe näkyvät spektrissä voimakkaina sivunauhoina ryntötaajuuden molemmilla puolilla ja myös monikertojen ympärillä. Kuviossa 15 on esimerkki millaisena sivunauhat näkyvät spektrissä. [25, 323.]

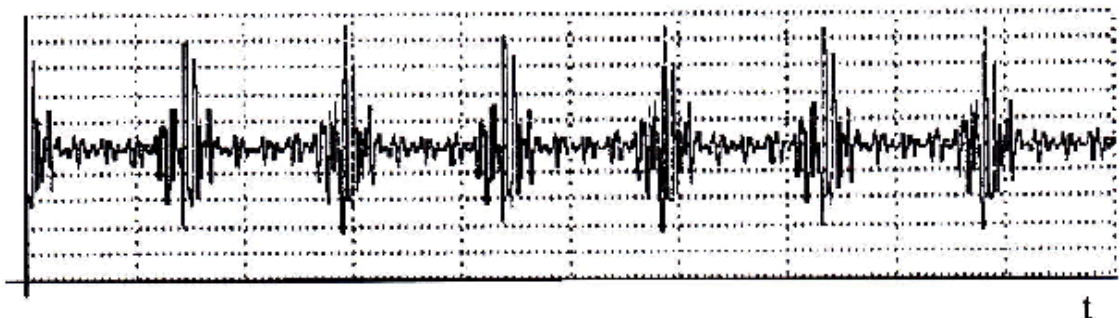




Kuvio 15. Esimerkki sivunauhojen näkymisestä spektrissä [25, 323].

#### 8.2.4 Viallinen hammas hammasvälityksessä

Viallinen hammas havaitaan paremmin aikatasosignaalista kuin spektristä. Viallinen hammas aiheuttaa signaaliin huippukohdan joka kierroksella. Mittaus voidaan tahdistaa viallisen hammaspyörän pyörimisnopeuteen sekä käyttää usean näytteen keskiarvoa, jolloin ilmiö saadaan paremmin näkyville aikatasossa. Kuviossa 16 kuvataan viallisen hammaspyörän aiheuttama aikatasosignaali. [25, 324.]



Kuvio 16. Viallisen hammaspyörän aiheuttama aikatasosignaali [25, 324].

Viallinen hammaspari syntyy kun samat kaksi hammasta kohtaavat toisensa. Tämä on mahdollista vain, jos pyöräparin hammaspyörien hampaiden lukumäärä on

kokonaislukukerrannainen. Hammasparin kohtaamistaajuus voidaan laskea kaavasta:  
[25, 324.]

$$f_{jt} = \frac{f_{rt} * N_a}{Z_1 * Z_2},$$

missä  $f_{jt}$  on samojen hampaiden kohtaamistaajuus

$f_n$  on ryntötaajuus

$N_a$  on hammaslukujen  $Z_1$  ja  $Z_2$  suurin yhteinen tekijä

$Z_{1,2}$  on hammaspyörien hammasluvut

## **9 Teollisuuden palvelu**

Palvelulla tarkoitetaan Tekesin mukaan toimintaa tai toimintojen yhdistelmää, jota palveluntarjoaja toteuttaa vuorovaikutuksessa asiakkaan kanssa vastatakseen asiakkaan tarpeisiin. Teollisuuden palvelu taas on palvelu, jolla palveluntarjoaja pyrkii tukemaan asiakkaan teollista arvonluontiprosessia tai teollisten tuotteiden käyttöä. [23.] Tässä luvussa tutustutaan palvelukonseptiin liittyen VTT:n Little Nodeen ja sen hyödyntämiseen MFG:n palveluliiketoiminnassa.

### **9.1 Teollisuuden palvelu liiketoimintana**

ETLAN vuonna 2012 julkaiseman uutisen mukaan palvelut vastaavat noin 70 % suomen työllisyydestä ja kokonaistuotannosta. Lisäksi mainitaan, että lähes 90 % työssä olevista suomalaisista on palvelutehtävissä ja teollisuudessa noin puolet työtehtävistä ovat oikeastaan palvelutehtäviä. Tulevaisuudessa palveluiden lisääminen teollisuuden tuotteisiin on yritysten elinehto kehittyneissä maissa. Palvelutoiminnan liittäminen tuotteeseen parantaa yrityksen kilpailukykyä globaaleilla markkinoilla. Tämä johtaa yhä enemmän ja enemmän siihen, että yritykset ottavat palvelut osaksi liiketoimintaansa. Jotta palvelua voidaan käyttää hyväksi liiketoiminnassa, tulee sen sisältää: ansaintamallin, palvelun keskeisien ominaisuuksien, palvelun asiakkaalle tuottaman arvon sekä palvelun tuottamiseen vaadittavien resurssien määrittämisen. Lisäksi palvelun laatua voidaan parantaa ja hallita dokumentoinnilla ja vakioimalla palvelutuotteen tuottaminen tai valmistaminen. [23; 24.]

## 9.2 Hammaskytkimien kunnonvalvonnan palveluaspekti

VTT:n tuotekehitysprojektin -NIKSIT tarkoituksena on luoda liiketoimintapalveluita yrityksille VTT:n Little Noden avulla. Kuviossa 17 on arvoketju, joka perustuu älykkäisiin anturiratkaisuihin ja niiden hyödyntämiseen palvelukonseptina. Tärkeänä osana MFG:n hammaskytkimien kunnonvalvontapalvelun tarjoamista on anturivalmistaja CEF, joka tuottaa ja valmistaa anturin, jolla voidaan mitata hammaskytkimen värähtelyä ja lämpötilaa. MFG asentaa mittaavan anturin hammaskytkimeen ja näin antaa tuotteelleen lisäarvoa ja kilpailukykyä. Näitä älykkäitä hammaskytkimiä voidaan tarjota nykyisille asiakkaille sekä kuvion 17 mukaan huolto- ja kunnossapitoyrityksille sekä tuotantolaitosyrityksillä sekä julkisille toimijoille. Hammaskytkimien ja antureiden mukana tulee ohjelma, jonka avulla anturista saatava tieto muutetaan ymmärrettävään muotoon Android tai Apple iOS -laitteilla. Markkinaetuna tällaisella palvelulla on muuten niin yksinkertaisiin hammaskytkimiin tuotu äly, sekä mahdollisuus seurata kytkimien kuntoa langattomasti. [14.]



Kuvio 17. Älykkäisiin anturiratkaisuihin ja uuteen palvelukonseptiin perustuva arvoketju [14].

## 10 VTT:n Little Noden testaus

Testauksen tarkoituksena oli saada tietoa, voiko VTT:n Little Nodea käyttää pyörivissä laitteissa tehdasolosuhteissa. Tarkoituksena oli testata miten pyörimisnopeuden vaikuttaa VTT:n Little Noden mittaustietoon. Sekä testata toimiiko anturi koteloidussa koneessa. Tarkoituksena oli myös vertailla anturia kiinteään käyttöasteen mittausjärjestelmään, mutta tämä ei onnistunut yhteyden pätkimisen takia.

### 10.1 VTT:n Little Noden ensimmäinen testaus

Aloitettiin testaus laittamalla anturi kiinni käsikäyttöiseen karkisorviin kahdella nippusiteellä. Nippusiteen ja anturin väliin laitettiin kumin pala, jolla nippusidekiinnitykseen saatiin parempi pito (kuvat 11, 12, 13).

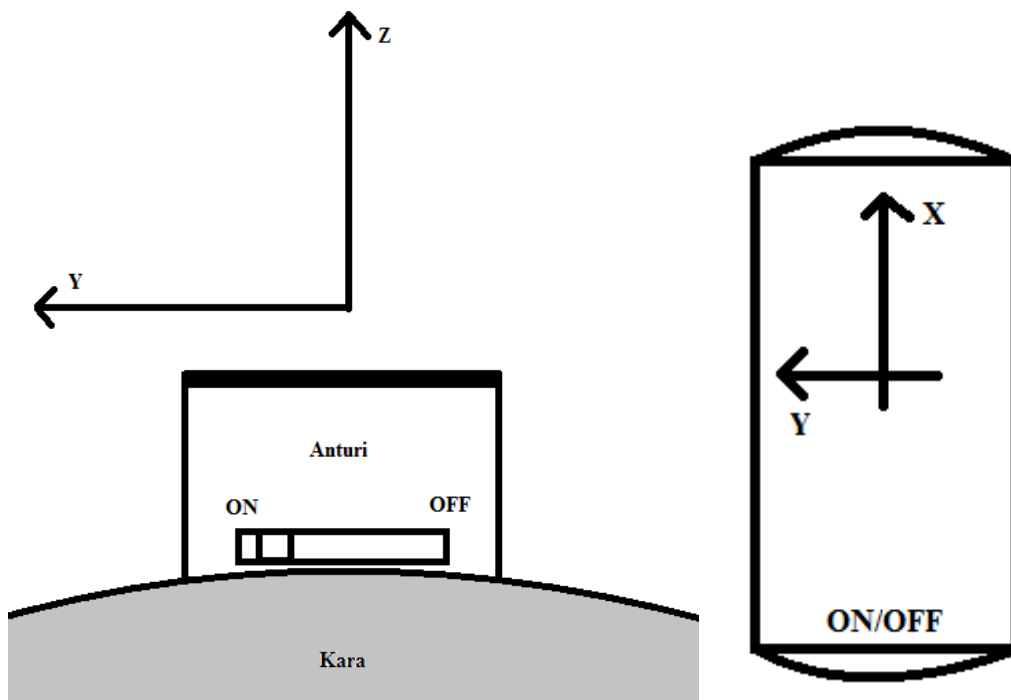


Kuva 11. Anturin kiinnitys (Kuva: Aki Ihalainen).



Kuva 12. Kärkisorvi (Karan halkaisija 350 mm:ä) (Kuva: Aki Ihalainen).

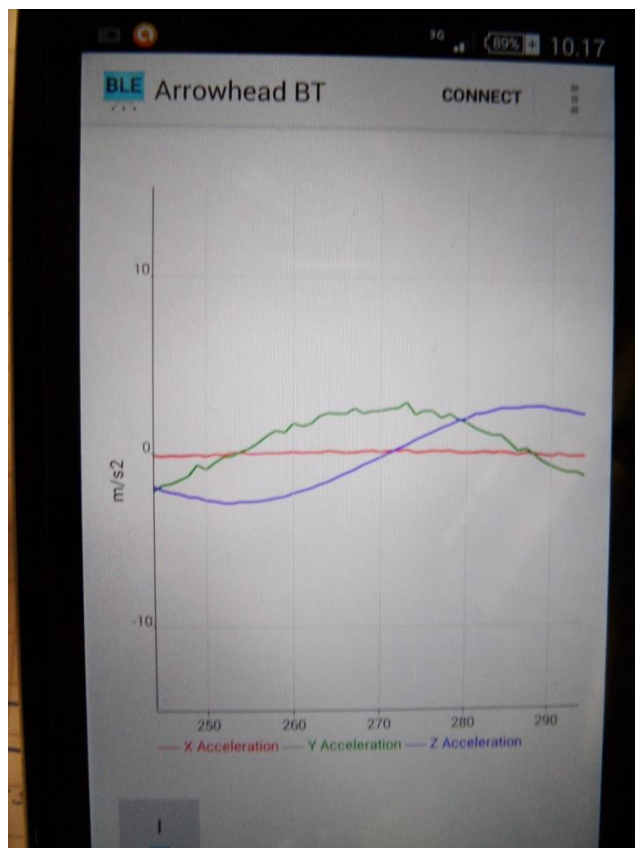
Kuvassa 13 kuvataan anturin suunta ja kiihtyvyysskoordinaatisto karaan verrattuna.



Kuva 13. Anturi sivulta ja anturi päältä sekä kiihtyvyysskoordinaatisto (Kuva: Aki Ihalainen).

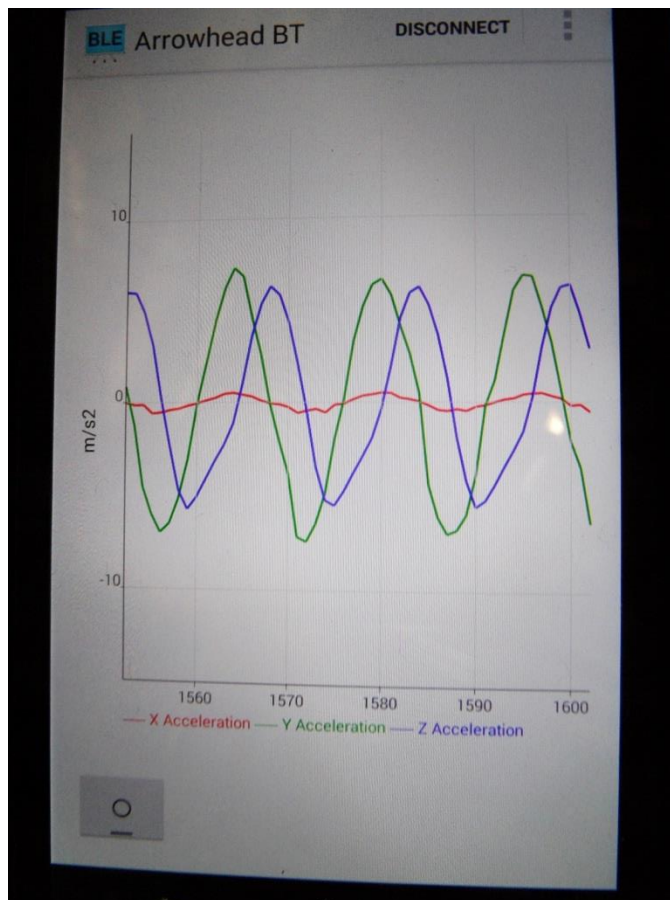
### 10.1.1 Pyörimisnopeuden vaikutus mittaustietoon

Aloitettiin testaus pienimmällä kärkisorvin nopeudella 21 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 14 mukainen signaali. Kuvasta 14 nähdään, että pienellä kierrosnopeudella anturi näyttää signaalit kolmen akselin suunnassa luotettavasti. X-akselin suuntaiset eli karan päähän kohtisuoraan kohdistuvat värähtelyt pysyvät pieninä. Y-akselin suuntaiset värähtelyt eli tangentiaalikiihtyvyyden aiheuttamat värähtelyt ovat hieman suurempia. Z-akselin eli keskipakoiskiihtyvyyden suuruus on vielä maltillinen. Y- ja Z-akselien sinimuotoinen signaali kertoo karan pyörimisnopeuden ja taajuutta voidaan vertailla koordinaatistossa olevien signaalien huippujen avulla. Sinisignaali johtuu anturin asennon muuttumisesta pyörimisliikkeessä. X-akselin asento ei muutu karan pyöriessä, jos se on asennettu karan akselin suuntaisesti.



Kuva 14. Mittausdata 21 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

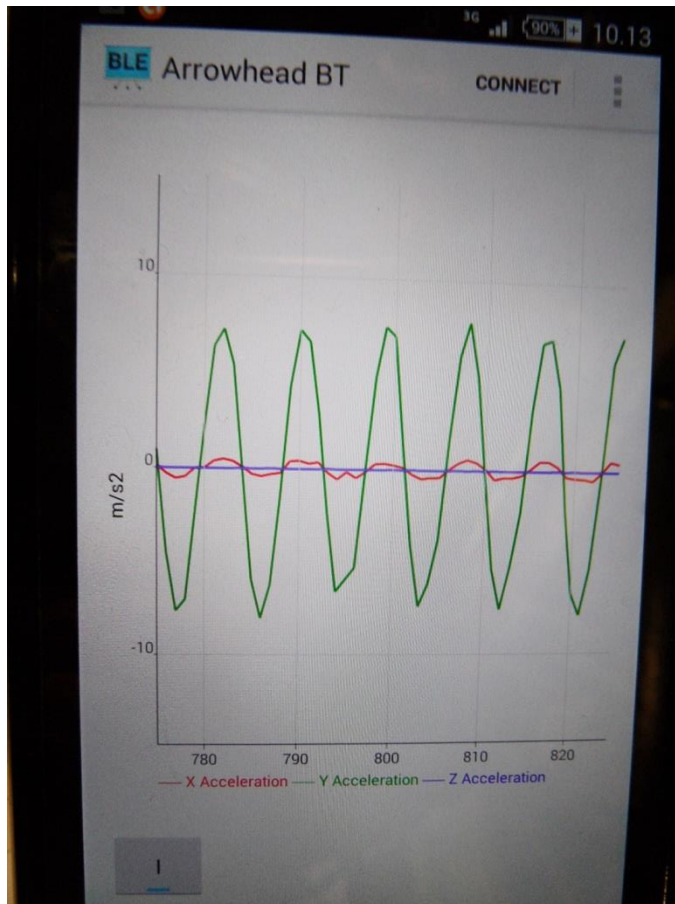
Jatkettiin testausta nostamalla karan nopeus 96 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 15 mukainen signaali. 96 rpm nopeudella kiihtyvyyksien määrät ovat kasvaneet ja huomataan, ettei X-akseli ole täysin suorassa karan akseliin nähden. Pyörimisnopeuden aiheuttamat kiihtyvyydet Y- ja Z-akseleilla ovat yli kaksinkertaistuneet ja myös signaalin taajuus on noussut yli nelinkertaiseksi. Signaali ei ole enää täydellisen näköistä sinisignaalia.



Kuva 15. Mittausdata 96 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

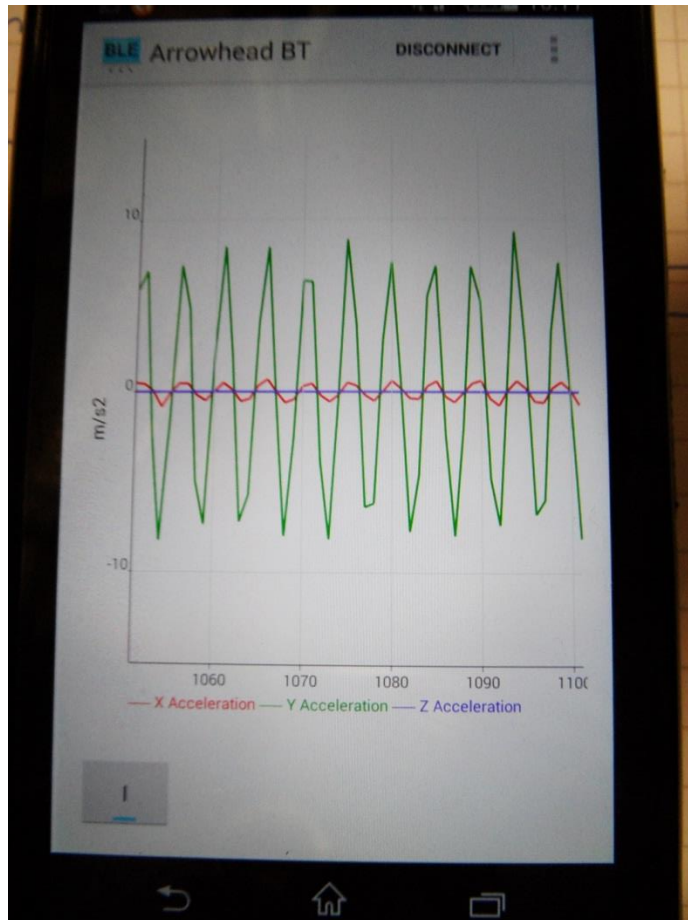
Seuraavaksi karan nopeus nostettiin 170 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 16 mukainen signaali. Kuvasta 16 nähdään, että 170 rpm nopeudella Z-akselin suuntainen signaali muuttuu pelkäksi viivaksi eli keskipakoiskiihtyvyys on liian suuri mitattavaksi kyseisellä 2G:n anturilla. Y-akselin signaalin amplitudi ei ole noussut edelliseen mittaukseen verrattuna, mutta signaalin taajuus on noin kaksinkertaistunut ja muuttunut terävämmäksi. X-akselin suunnassa havaitaan pientä epämääräistä värähtelyä.





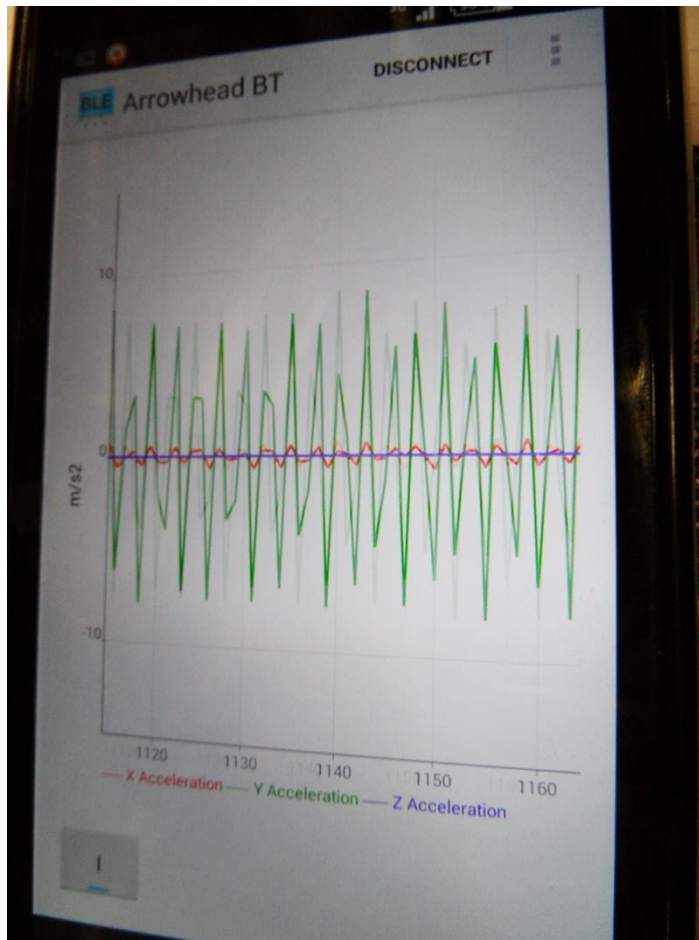
Kuva 16. Mittausdata 170 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

Jatkettiin testausta nostamalla karan nopeus 320 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 17 mukainen signaali. Kuvassa 17 nähdään tangentiaalikiiihtyvyyden eli Y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden signaalin muuttumisen terävämmäksi sekä signaalin huippujen nousevan korkeammalle eli amplitudi on hieman kasvanut. Y-akselin signaalin taajuus on kasvanut noin kaksinkertaiseksi ja muuttunut epäsäännöllisemmäksi. X-akselin suuntaiset kiihtyvyydet ovat suurin piirtein säännöllisiä.



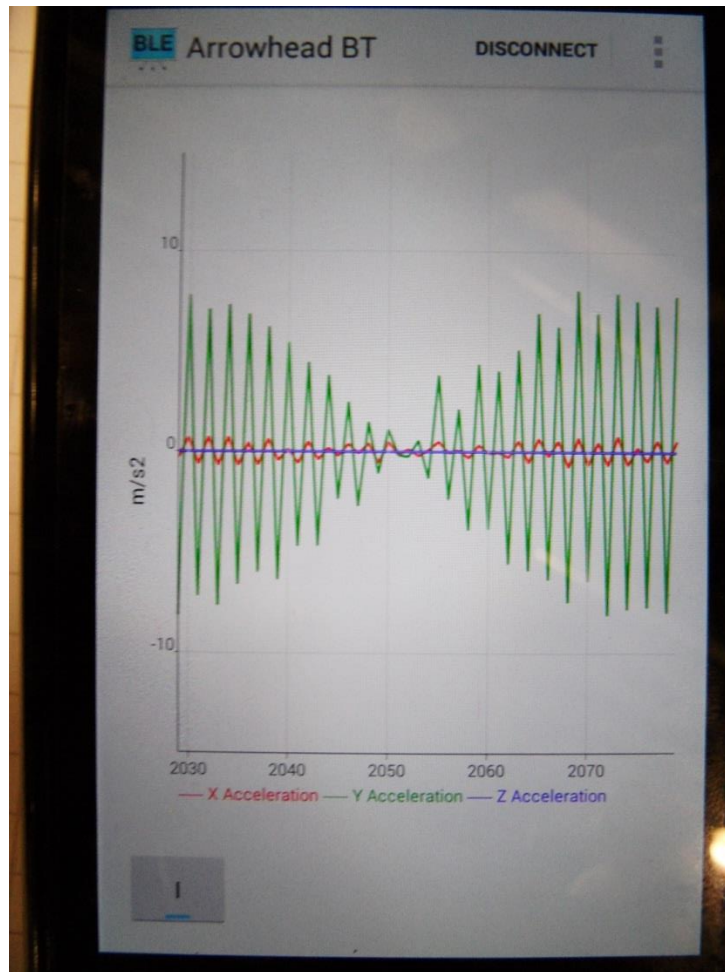
Kuva 17. Mittausdata 320 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

Seuraavaksi karan nopeus nostettiin 568 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 18 mukainen signaali. Kuvasta 18 huomataan, että Y-akselin kiihtyvyyssignaalin amplitudi ei ole enää säännöllinen vaan vaihtelee rajusti noin 3–8 m/s<sup>2</sup> välillä. Myös X-akselin signaali näyttää epäsäännölliseltä. Laskemalla signaalin huippujen määrä voidaan vertailla taajuuden muutosta 320 rpm tulokseen ja huomataan, että suhdeluvuksi saadaan  $10/18 \rightarrow 320 \text{ rpm}/10 \cdot 18 = 576 \text{ rpm}$ . Kierrosnopeuden pystyy vielä määrittämään kuvasta.



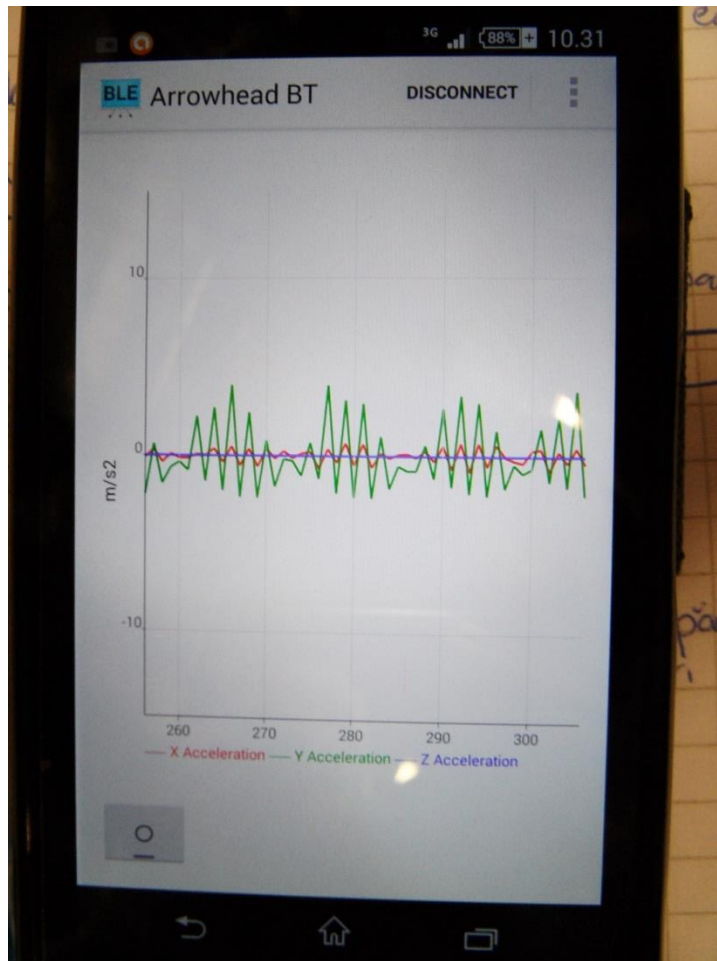
Kuva 18. Mittausdata 568 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

Seuraavaksi karan nopeus nostettiin 770 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 19 mukainen signaali. Kuvasta 19 nähdään, että Y-signaaliin alkaa tulla huomattava määrä huojuntaa eli tangentialikiihtyvyyden signaalin amplitudi vaihtelee  $0.5\text{--}8\text{ m/s}^2$  välillä siten, että signaalin huippuarvot muuttuvat sinikäyrän mukaisesti. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset -kirjan mukaan yleisimpiä syitä huojuntaan ovat: sähkömoottorin sähköinen vika, tärinän kantautuminen rakenteita pitkin toiselta koneelta tai nivelakseli on linjattu väärin [18, 84]. Myös X-akselin signaalissa on epämääräisyyttä enemmän kuin aikaisemmin. Kierrosnopeuden määrittäminen onnistuu vielä signaalin huipuista.



Kuva 19. Mittausdata 770 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

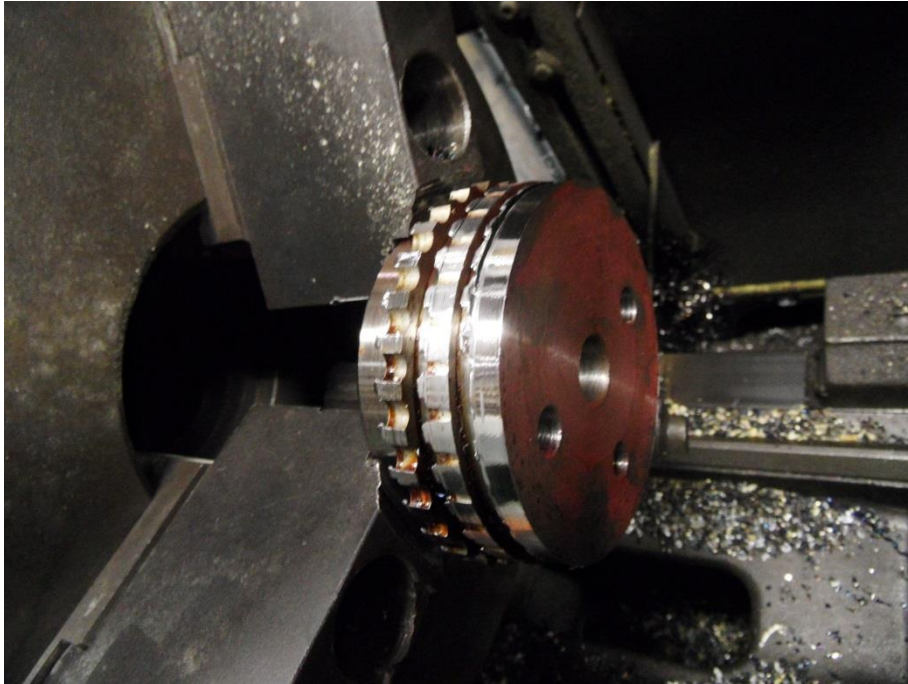
Seuraavaksi karan nopeus nostettiin 815 rpm ja mittauskäyräksi saatiin kuvan 20 mukainen signaali. Kuvasta 20 nähdään, että Y-signaali muuttuu epäsäännöllisemmäksi ja Y-signaalin amplitudi on pudonnut rajusti. Kuvasta ei enää pysty määrittämään oikeaa signaalin taajuutta, sillä signaalin huippujen määrä on pudonnut edellisestä testistä. Mahdollista on, että 2G:n anturin mittausrajat ovat tulleet vastaan. Viimeisin pyörimisnopeustesti tehtiin 1105 rpm, mutta mittauskäyräksi saatiin vain pelkkää viivaa. VTT:n Little Node anturi ei siis nykyisellä raudallaan sovellu käytettäväksi suurilla kierrosnopeuksilla.



Kuva 20. Mittausdata 815 rpm (Kuva: Aki Ihalainen).

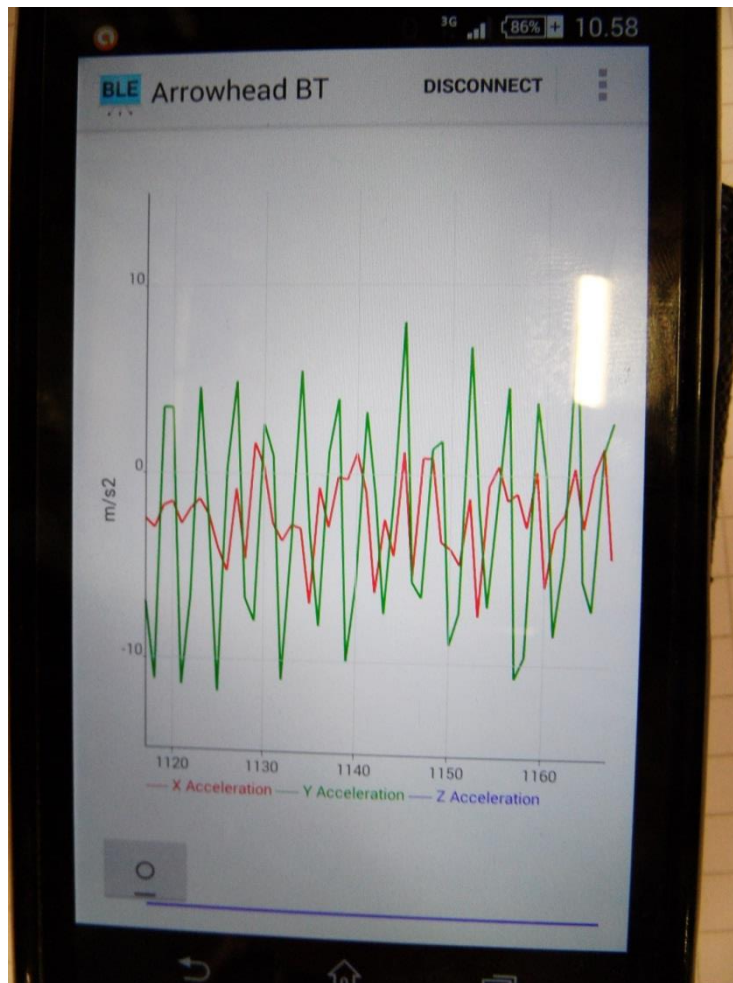
### 10.1.2 Testaus sorvauksessa

Anturia testattiin myös hammaspyörän sorvauksessa kärkisorvissa. Tarkoituksena oli sorvata hammaspyörän hampaat pois kuvan 21 mukaisesti, mahdollisimman suurten värähdysten aikaansaamiseksi. Sorvauksessa tapahtuvia värähdyksiä testattiin seuraavilla arvoilla: syöttönopeus: 0,277 mm/kierros, kierrosnopeus: 420 rpm ja kahdella eri lastun koolla: 4 mm:ä ja 6 mm:ä.



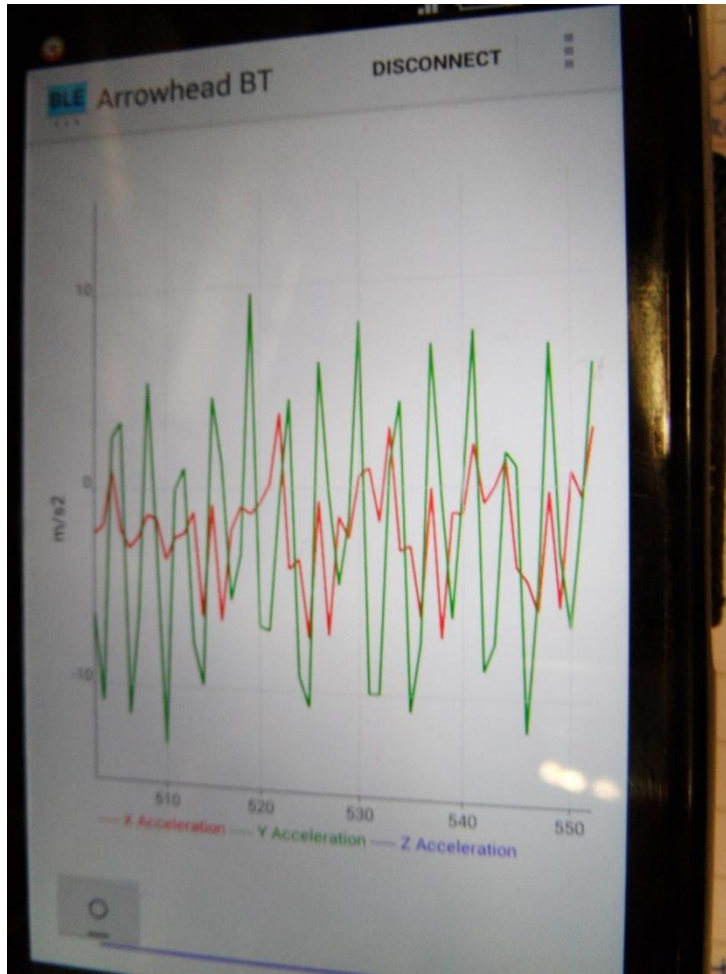
Kuva 21. Sorvattu hammaspyörä (Kuva: Aki Ihalainen).

Ensimmäisessä testauksessa sorvattiin 4 mm:n lastua ja tuloksena saatiin kuvan 22 mukainen signaali. Kuvasta 22 huomataan, että X-signaalin eli karan akselin suuntaisen kiihtyvyyden amplitudi muuttuu merkittävästi sorvauksen aikana esimerkiksi verrattuna 320 rpm nopeuteen. Y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden määrä ei muutu merkittävästi ja siitä pystyy vielä laskemaan karan pyörimisnopeuden. X-akselin suuntaisesta kiihtyvyydestä ei voida laskea karan pyörimisnopeutta, koska sorvauksesta johtuvat kiihtyvyydet aiheuttavat ylimääräisiä signaalihuippuja.



Kuva 22. Mittausdata sorvauksella ja 4mm:n lastulla (Kuva: Aki Ihalainen).

Toisessa testauksessa sorvattiin 6 mm:n lastua ja tuloksena saatiin kuvan 23 mukainen signaali. Kuvasta 23 nähdään, että 6 mm:n lastulla sorvattaessa X- ja Y-akselien kiihtyvyyssignaalien huiput nousevat korkeammalle kuin 4 mm:n lastua sorvattaessa. Tämä on loogista johtuen suuremmista työstövoimista.

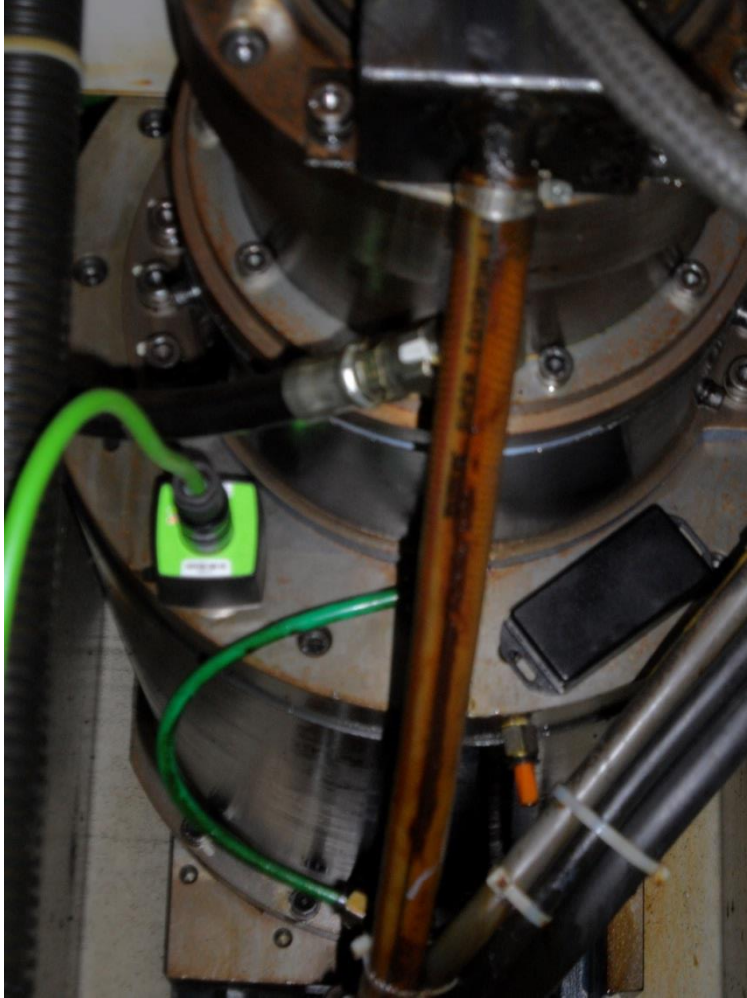


Kuva 23. Mittausdata sorvauksella ja 6 mm:n lastulla (Kuva: Aki Ihalainen).

### 10.1.3 Anturin testaus koteloidussa koneessa ja mittausetäisyyden testaus

Mittausetäisyys testattiin kärkisorvissa ja päästiin maksimissaan n.30 metrin päähän koneesta, jolloin anturin tiedot vielä välittyivät reaaliaikaisesti. Koteloidun koneen testaus suoritettiin Mori Seiki MH-630 vaakakaraisella sorvilla. Bluetooth-yhteydellä anturi tunnistettiin helposti ainakin koneen käyttäjän kohdalta. Kuvassa 24 nähdään anturi magneetilla asennettuna käyttöasteen mittausanturin vieressä karan päässä.





Kuva 24. VTT Little Node karan päässä käyttöasteen mittausanturin vieressä (Kuva: Aki Ihalainen).

Anturia yritettiin testata myös vaakasorvin työstössä, mutta ainoastaan karan liikkeet näkyivät ruudulla. Työstössä syntyneet värähtelyt olivat liian pieniä, jotta anturi olisi ne havainnut. Lisäksi Bluetooth-yhteyden pätkiminen häiritsi testauksia.

## 10.2 VTT:n Little Noden ensimmäisen testauksen tulokset

Ensiksi käydään läpi testauksessa onnistuneita asioita. Bluetooth-yhteys toimi oletettua paremmin tehdasympäristössä. Bluetooth-yhteyden kantama oli hyvä ja päästiin jopa 30 m:n päähän testilaitteesta, johon yhteys vielä toimi. Kiihtyvyysanturi toimi pyörivässä

laitteessa, mutta vain tiettyyn rajaan asti. Tässä on vielä kehitettävää anturin osalta. Anturin kiinnitys nippusiteilla toimii siltä osin, että anturi pysyi kiinni ainakin 1105 rpm asti. 350 mm:n karan halkaisijalla tämä tarkoittaa n. 20 m/s kehänopeutta ja hammaskytkimen maksimi kehänopeus on luokkaa 32 m/s. Toisaalta kiinnitys vaikuttaa myös anturin mittausalueeseen. Ruuvikiinnityksen avulla päästäisiin korkeampi taajuuksisiin mittausalueisiin. Tällaista kiinnitystä käytetään nopeakäyntisissä vaihteistoissa [18, 57].

VTT:n Little Nodea pitää vielä kehittää. Ensinnäkin anturin ja kännykän välinen Bluetooth-yhteys pitää saada paremmaksi. Tällä hetkellä yhteys pätkii aivan liikaa. Lisäksi anturin kiihtyvyyssaluetta täytyy suurentaa 2G:stä 10G:hen eli vaihdetaan kiihtyvyyssanturi mahdollisimman suureen. Otetaan anturiin mukaan lämpötilamittaus, koska lämpötila on yksi muuttujista, joka kasvaa hammaskytkimen vikaantuessa. Tällä hetkellä mittausohjelmistossa ei ole ollenkaan tallennusta. Tämä on ehdottomasti saatava käyttöön, jotta värähtelysignaalin käsittely ja analysointi olisi helpompaa. On myös otettava selvää, johtuiko testauksissa esiintynyt huojunta mitattavasta kärkisorvista vai jostain muusta esimerkiksi näytteenottotaajuudesta tai näytevälistä. Signaalin analysointia varten olisi hyvä, jos signaalista tehtäisiin spektrianalyysi ja RMS-käyrä.

Seuraavaa testiä varten anturista pitää saada uusi versio paremmalla yhteydellä, kiihtyvyyssanturilla sekä lämpötila-anturilla. Seuraavassa testissä voitaisiin testata anturin toimintaa hammaskytkimessä. Testaus tapahtuisi ensiksi hammaskytkimen käytöllä normaalitilassa, jonka jälkeen tutkittaisiin miten lämpötila- ja kiihtyvyyssarvot muuttuvat voitelun loppuessa. Testauksessa saataisiin vikaantumisen raja-arvot testatulle vikaantumistapaukselle.

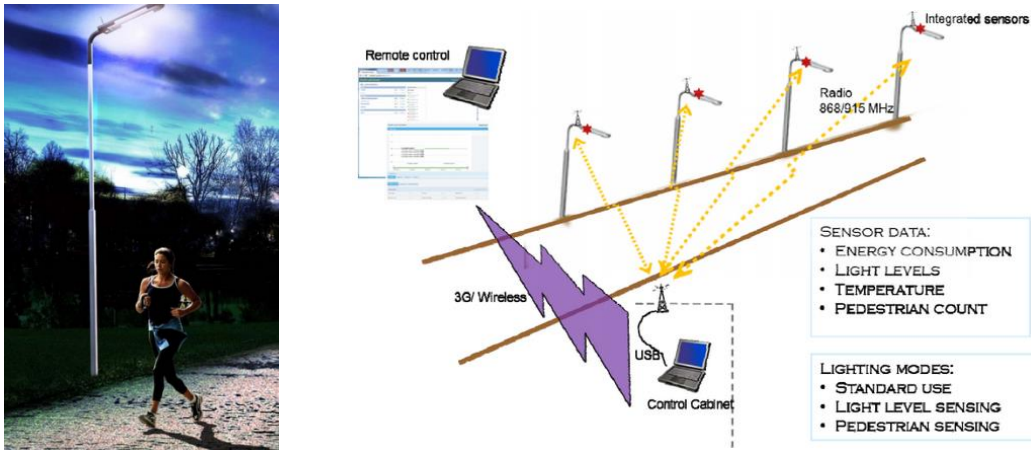
## 11 Konepajatekniikan ja hammaskytkimien valmistuksen tulevaisuus

Tässä luvussa pohditaan, miltä konepajatekniikka ja hammaskytkimien valmistus tulee näyttämään tulevaisuudessa. Luvussa käsitellyistä aiheista olisi mahdollista soveltaa aihe myös opinnäytetyöksi.

### 11.1 Teollinen internet

Teollinen internet eli IoT tarkoittaa systemaattista tapaa lisätä antureita, tiedon analysointia ja keskustelua laiteiden välillä, jotta voidaan parantaa tuottavuutta ja luoda uusia aloja. IoT:n tarkoituksena on yhdistää kaikki yrityksen sisällä niin ihmiset, prosessit, tiedot, valvonta jne. digitaalisesti toisiinsa internetin avulla. Teollisen internetin kehityksen taustalla on teollisuuden tietojen digitalisoituminen. IoT -teknologiat ovat jo olemassa ja hankittavissa, mutta niiden hyödyntäminen on yrityksestä itsestään kiinni. Teollisen internetin lisäämän tuottavuuden avulla voidaan parantaa kilpailukykyä, jonka lisäksi annetaan mahdollisuuksia valloittaa uusia markkina-alueita. VTT:n tutkimusprofessori Heikki Ailiston mukaan; teollinen internet tulee vaikuttamaan lähes kaikkiin liiketoimintoihin ja julkisiin palveluihin seuraavien 3–15 vuoden sisällä. [27.]

Kuviossa 18 nähdään esimerkki teollisen internetin hyödyntämisestä. Siinä on esitelty älykäs katuvalaisin, jonka toiminta perustuu katuvaloihin, jotka lähettävät yksilöllistä tietoa tietokoneelle ja joita pystytään ohjaamaan tietokoneelta. Tietokoneelta voidaan esimerkiksi määritellä normaalikäyttö, säättää valon voimakkuutta ja säättää katuvalot niin, että ne menevät päälle liikkeestä esimerkiksi jalankulkijan tullessa katuvalotolpan lähelle. Katuvalot puolestaan lähettävät tietoa valon voimakkuudesta, lämpötilasta ja jalankulkijoiden määrästä tietokoneelle. [27.]



Kuvio 18. Älykäs katuvalaisin AthLEDics [27].

## 11.2 Hammaskytkimien valmistaminen polyamidista ruiskupuristamalla

Tässä kappaleessa tutustutaan yhteen mahdollisuuteen valmistaa hammaskytкимиä. Tämä mahdollisuus on ruiskupuristaminen polyamidista. Tällä hetkellä maailmalla valmistetaan polyamidista ruiskupuristamalla hammaspyöriä, auton imusarjoja, sähkökoteloita, kytkimiä ja jopa auton vanteita [28]. Ottaen huomioon autonvalmistajien vaatimat vanteiden lujuus- ja kestävyys ominaisuudet, uskoisin että tulevaisuudessa olisi mahdollista valmistaa myös kestäviä hammaskytкимиä polyamidista. Nykyään hammaskytkimien valmistus tehdään koneistamalla ja olettaisin että ruiskupuristamalla päästään valmistusnopeuteen, joka olisi alle 10 % nykyisestä. Tämä olisi suuri kilpailukykyä edistävä etu. Kuvioista 19 nähdään, että polyamidin etuna olisi myös niin sanottu itsevoitelevuus, jolloin voitaisiin päästä eroon hammaskytкимиä vaivaavasta huollon tarpeesta. Toisaalta polyamideilla on myös huonoja ominaisuuksia kuten veden absorptio ja haurastuminen UV-valossa [28]. Tämä aihe vaatii lisää tutkimista ja olisi hyvä opinnäytetyön aihe. Aihetta voitaisiin soveltaa vaikka tutkimalla polyamidista puristamalla tehtyjä työkaluja ja varaosia.

<i>Hyviä ominaisuuksia</i>	<i>Huonoja ominaisuuksia</i>
<i>Iskulujuus</i>	<i>Veden absorptio</i>
<i>Väsymislujuus</i>	<i>Haurastuu UV-valossa</i>
<i>Sitkeys</i>	<i>Amorfiset ja aromaattiset polyamidit kalliita</i>
<i>Kulutuskestävyys</i>	
<i>Pieni kitka, itsevoitelevuus</i>	
<i>Vaimennusominaisuudet</i>	
<i>Kemiallinen kestävyys</i>	
<i>Suhteellisen korkea käyttölämpötila</i>	
<i>Hyvä seostettavuus</i>	

Kuvio 19. Polyamidin ominaisuuksia [28].

## 12 Pohdinta ja yhteenveto

Tämän opinnäytetyön perustana toimi MFG Componentsin toimeksianto. MFG Componentsilla on jo pitkään ollut käynnissä tuotekehitysprojekti VTT:n kanssa, jossa kehitetään älykkäille antureille hyödyntämiskohteita teollisuudessa luomalla niiden avulla uutta palveluliiketoimintaa. Minun tehtäväni tässä opinnäytetyössä oli tutkia älykkäiden antureiden hyödyntämistä hammaskytkimien kunnonvalvonnassa. Tällaista hammaskytkimen sisäistä kunnonvalvontajärjestelmää ei ole markkinoilla saatavilla. Tarkoituksena oli luoda yksinkertaiselle koneistetulle tuotteelle lisäarvoa sekä ottaa etulyöntiasema markkinoilla. Koska kyseessä on uusi tuote ja palvelu, vaati aihe paljon tutkimista ja testaamista. Valitettavasti testaaminen jäi vähäiseksi aikataulurajoituksesta johtuen.

Tätä opinnäytetyötä tehdessäni minun täytyi tutkia ja lukea runsaasti teoriamateriaalia, mutta onneksi sitä oli myös paljon saatavilla. Opinnäytetyöhön sisältyi teoriapohjaa akselinliitoksista, kytkimistä, kunnossapidosta, kunnonvalvonnasta, kunnonvalvonnan mittausten menetelmistä, antureista ja värähtelysignaalien tulkitsemisesta sekä teollisuuden palvelusta. Näistä asioista pyrin valitsemaan tärkeimmät ja opinnäytetyön päämäärää vastaavat aiheet. Toimeksiantajan pyynnöstä teoria-osiossa mainitaan myös teollinen internet, jonka ennustetaan olevan tärkeää tulevaisuuden konepajatekniikassa. Opinnäytetyön aiheeseen liittyvää teoriamateriaalia olisi ollut saatavilla reilusti enemmänkin. Teoria-osion lähteisiin pyrin valitsemaan aiheeseen liittyviä tieteellisiä artikkeleita sekä kirjallisuutta koulun ja kaupungin kirjastoista.

Teoriaosiota tehdessäni otin huomioon, mitä hammaskytkimien kunnonvalvonnasta tulisi tietää ennen kuin itse anturointia aletaan suunnittelemaan. Työssä käydään läpi erilaisia vaihtoehtoja kiinteästi asennetulle liikkuvalla akselinliitokselle, joista jokaisia käytetään erilaisia vaatimuksia varten. Lisäksi käydään läpi perusteet kunnossapidosta, koska kunnonvalvonta pohjautuu pitkälti kunnossapidon tarpeisiin ja vaatimuksiin. Kunnonvalvonnasta yritin tuoda asioita esille selkeästi, jotta lukija ymmärtäisi, miksi

kunnonvalvontaa tarvitaan koneissa ja laitteissa. Toivottavasti tämä myös havainnollisti tämän opinnäytetyön aiheen ja tavoitteen tarpeellisuuden nykyajan konepajatekniikassa.

Ensimmäinen testaus onnistui mielestäni hyvin, vaikka se ei vielä antanutkaan vastausta, voiko älykästä anturia käyttää hammaskytkimen kunnonvalvonnassa. Testauksessa huomattiin paljon puutteita anturissa, mutta myös hyviä asioita. Puutteita olivat mm. Bluetooth-yhteyden pätkiminen ja anturin toimimattomuus suurella kierrosnopeudella. Toisaalta hyvää oli Bluetooth-yhteyden kantama, silloin kun yhteys ei pätkenyt. On vielä mahdotonta sanoa, tuleeko MFG Componentsilta koskaan älykkäitä hammaskytкимиä markkinoille. Testausvaiheessa on kuitenkin päästy eteenpäin ja seuraava testausvaihe kertoo mahdollisuuksista jo paljon enemmän.

Ongelmaksi opinnäytetyössä muodostui aikataulu, johon en henkilökohtaisesti voinut vaikuttaa. Tällaiset uuden tuotteen tuotekehitysprojektit voivat vaatia yritykseltä paljon aikaa ja kehityskeskusteluja projektissa olevien yritysten välillä. Varsinkin kun kyseessä on monen yrityksen yhteisprojekti. Se on harmittava asia, sillä olisin halunnut viedä aloitetun projektin loppuun asti. Toisaalta tällaisessa yhteisprojektissa mukana olevien yritysten taloudellinen riski alenee verrattuna kokonaan omaan tuotekehitysprojektiin. Toinen ongelma oli aiheen rajaaminen. Minun piti miettiä, mitä valitsen opinnäytetyöhön mukaan ja mitä en. Vaikka opinnäytetyöstä tuli kohtuullisen pitkä, niin kaikki teoria-asiat liittyvät olennaisesti opinnäytetyön aiheeseen.

Tämä opinnäytetyö opetti minulle paljon asioita. Tiedän nyt miten tiedonhankintaa tehdään järkevästi. Pitää etsiä tietoa oikeista paikoista ja merkitä lähteet aina muistiin. Järkevä tiedonhankinta auttaa tulevaisuudessa uusien tuotteiden kehitysprojekteissa. Sain myös valtavasti tietoa kunnossapidosta ja kunnonvalvonnasta sekä kunnonvalvonnan mittauksista. Opin myös projektiin kuuluvaa yhteistoimintaa toimeksiantajan kanssa, lähinnä sähköpostin välityksellä. Ennen kaikkea opin sen, ettei tuotekehitysprojektin valmistuminen tapahdu sormia napsauttamalla, vaan se vaatii rutkasti aikaa ja kärsivällisyyttä sekä paljon tutkimista ja testausta.

## LÄHTEET

1. MFG Componentsin kotisivut. 2014. Saatavissa: <http://www.mfg.fi/>. Hakupäivä 18.3.2014.
2. Ala-Jääski, Timo. MFG Componentsin Yleisesitys PowerPoint-esitys. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Aki Ihalainen. Lähetetty 3.3.2014.
3. VTT:n kotisivut. 2014. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/>. Hakupäivä 18.3.2014.
4. VTT Wikipedia. 2014. Vapaa tietosanakirja. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/VTT>. Hakupäivä 18.3.2014.
5. Johdanto kunnonvalvontaan. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k1\\_johdanto\\_kunnonvalvontaan.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k1_johdanto_kunnonvalvontaan.html). Hakupäivä 24.3.2014.
6. Järviö, Piispa, Parantainen, Åström. Kunnossapito. 2007/4. painos. Hamina: KP-Media Oy.
7. Kunnossapidon toiminnot ennen vian ilmenemistä. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_2-3\\_kunnossapidon\\_toiminnot\\_ennen\\_vian\\_ilmenemista.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-3_kunnossapidon_toiminnot_ennen_vian_ilmenemista.html). Hakupäivä 24.3.2014.
8. Kunnossapidon käsitteet ja määritelmät. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_2-1\\_kunnossapidon\\_kasitteet\\_ja\\_maaritelmät.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-1_kunnossapidon_kasitteet_ja_maaritelmät.html). Hakupäivä 24.3.2014.
9. Mathas, Carolyn. Smart Sensors – Not Only Intelligent, but adaptable. Electronic Products. [Electronic Products lehdessä julkaistu artikkeli Digi-Keyn verkkosivuilla] Saatavissa: <https://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/intelligent-adaptable-smart-sensors.html> . Hakupäivä 27.3.2014.
10. Intelligent sensor Wikipedia. 2014. Vapaa tietosanakirja. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_sensor). Hakupäivä 27.3.2014.
11. Hyötysuhdemittaukset. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k4\\_hyotysuhdemittaukset.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k4_hyotysuhdemittaukset.html). Hakupäivä 31.3.2014.
12. Virta-analyysi epätahtimoottoreille. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k6\\_virta-analyysi.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k6_virta-analyysi.html). Hakupäivä 31.3.2014.
13. Ala-Jääski, Timo. MFG Componentsin Desch GC -hammaskytkimet PowerPoint-esitys. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Aki Ihalainen. Lähetetty 3.3.2014.
14. Ala-Jääski, Timo. VTT:n Kunnossapitopalveluita tukevat kevyet etäkunnonvalvontaratkaisut – NIKSIT PowerPoint-esitys. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Aki Ihalainen. Lähetetty 3.3.2014.
15. Värähtelymittaukset. Opetushallitus. saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k2\\_varahtelymittaukset.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k2_varahtelymittaukset.html). Hakupäivä 31.3.2014.
16. Kulumishiukkasanalyysi. Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k2\\_varahtelymittaukset.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k2_varahtelymittaukset.html). Hakupäivä 31.3.2014.
17. Mobley, R. Keith. An Introduction to Predictive Maintenance: Second Edition. 09/2002. Burlington USA: Butterworth-Heinemann.



18. Nohynek, Petri ja Lumme, Veli Erkki. Kunnanvalvonnan värähtelymittaukset. 2004/2. täydennetty painos. Hamina: KP-Media Oy.
19. Airila, Karjalainen, Mantovaara, Nurmi, Ranta, Verho. Koneenosien suunnittelu 3: Tehonsiirto. 1985. Porvoo: WSOY.
20. Rakennokuva hammaskytkimistä. Tecmac India –kotisivut. Saatavissa: [http://tecmacindia.com/spare\\_parts.aspx](http://tecmacindia.com/spare_parts.aspx) . Hakupäivä 22.4.2014.
21. Rakennokuva ketjukytkimestä. Kettentechnik –kotisivut. Saatavissa: <http://www.kettentechnik.de/en/2011/09/kettenkupplungen/> . Hakupäivä 28.4.2014.
22. Ala-Jääski, Timo. VTT Little Node –PDF. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Aki Ihalainen. Lähetetty 6.3.2014.
23. Palveluliiketoiminnan sanasto. Tekes –kotisivut. Saatavissa: [http://www.tekes.fi/Julkaisut/palveluliiketoim\\_sanasto.pdf](http://www.tekes.fi/Julkaisut/palveluliiketoim_sanasto.pdf) . Hakupäivä 2.5.2014
24. Palvelu tuo uutta arvoa teollisuuteen ja koko talouteen. ETLA –kotisivut. Saatavissa: <http://www.etla.fi/uutiset/palvelu-tuo-uutta-arvoa-teollisuuteen-ja-koko-talouteen/> . Hakupäivä 2.5.2014.
25. Mikkonen, Henry. Kuntoon perustuva kunnossapito. Lokakuu 2009/1. painos. Kerava: KP-Media Oy.
26. Vastuslämpötila-anturi Wikipedia. 2013. Vapaa tietosanakirja. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Vastusl%C3%A4mp%C3%B6tila-anturi> . Hakupäivä 12.5.2014.
27. Ala-Jääski, Timo. VTT:n Teollinen internet Hype vai mahdollisuus –PowerPoint –esitys. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Aki Ihalainen. Lähetetty 26.5.2014.
28. Tekniset muovit. Muovimuotoilu –kotisivut. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/33/63/> . Hakupäivä 13.10.2014.