



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHO LUMIA
VUOTOVIRRRAN DIAGNOSOINTI HAMMASVAIHTEESSA
Diplomityö

Tarkastaja: dos. Juha Miettinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
3. huhtikuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

LUMIA, JUHO: Vuotovirran diagnosointi hammasvaihteessa

Diplomityö, 56 sivua

Toukokuu 2013

Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi

Tarkastaja: dos. Juha Miettinen

Avainsanat: Vuotovirta, diagnosointi, hammasvaihte, kunnonvalvonta, laakerivirta

Diplomityö tehtiin Moventas Gears Oy:n tehtävänannosta. Työssä tutkittiin vuotovirran aiheuttamaa hammasvaihteen vikaantumisen todentamista eri kunnonvalvontamenetelmillä kuten värähtely- ja vuotovirtamittaus sekä öljyanalyysi. Työn tavoitteena oli selvittää miten vuotovirtailmiö voidaan todentaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa käytetyillä kunnonvalvonta tekniikoilla.

Työn teoriaosuudessa on käsitelty vuotovirtailmiötä, sen syntymekanismeja, eri vuotovirta- ja vauriotyyppejä sekä toimenpiteitä hammasvaihteen suojelemiseksi vuotovirtakuormitukselta. Käytetyt kunnonvalvontamenetelmät sekä mittalaitteet on esitelty työn teoriaosuudessa.

Tutkimus suoritettiin vuotovirta- ja värähtelykenttämittauksilla teollisuuden asiakkaiden luona. Tuloksia analysoitiin ja vertailtiin keskenään sekä niistä etsittiin yhtäläisyyksiä, joiden perusteella voidaan todeta mittauskohteessa olevan vuotovirran aiheuttama vikaantumisprosessi. Vuotovirran vaurioittamien laakereiden värähtelymittaustuloksia verrattiin mekaanisen laakerivaurion tuloksiin. Analysoinnin perusteella etsittiin eroavaisuuksia, joilla laakerivaurion juurisyy voitaisiin identifioida vuotovirraksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

LUMIA, JUHO: Diagnostics of stray current in gearbox

Master of Science Thesis, 56 pages

May 2013

Major: Analysis of machines and structures

Examiner: dos. Juha Miettinen

Keywords: Stray current, diagnostic, gearbox, condition monitoring, bearing current

The thesis was done for Moventas Gears Oy. The purpose was to investigate the stray current caused failures in the gearbox with various condition monitoring techniques such as vibration, oil analysis, and stray current measurement. The aim of the work was to determine the stray current caused mechanical failure at an early stage with the used condition monitoring techniques.

The theory part includes the stray current phenomenon, its origins, the different stray current types, the damage types caused by electrical current and actions to protect the gearbox from the stray current. Used condition monitoring methods and instrumentation are presented in the theoretical part.

The study was conducted with stray current and vibration measurement at customer site. The results were analyzed and compared similarities in which can be seen the failure process is caused by stray current were seeking. Vibration measurement results of the stray current caused bearing damages were compared with mechanical bearing damage. The differences were searched to find out phenomenon which can identify the root cause of the bearing damage to stray current.

ALKUSANAT

Esitän kiitokseni työnohjaajana toimineelle Moventas Gearsin vanhemmalle kunnonvalvonta-asiantuntija DI Petteri Kantolalle sekä tarkastajana toimineelle Tampereen teknillisen yliopiston dosentti Juha Miettiselle. Lisäksi haluan kiittää kaikkia Moventas Gearsin sekä yhteistyöasiakkaiden henkilökunnasta jotka ovat olleet avustamassa ja tukemassa diplomityön valmistumista.

Erityisesti haluan kiittää vaimoani Marianne, joka on tukenut ja kannustanut minua läpi koko opintoprosessin. Sekä lapsiamme Elliä ja Ilaria, jotka motivoivat minua eteenpäin kohti tavoitteitani.

Vihtavuoressa toukokuussa 2013

Juho Lumia

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Vuotovirtailmiö.....	2
	2.1 Vuotovirtatyypit.....	3
	2.1.1 EDM – eli kipinävirta.....	4
	2.1.2 Akselin maadoitusvirta.....	5
	2.1.3 Kiertovirta	6
	2.1.4 Kapasitiivinen purkausvirta.....	7
	2.2 Vuotovirran vaikutus hammasvaihteessa.....	7
	2.2.1 Kipinätyöstö.....	11
	2.2.2 Vauriotyypit.....	12
	2.3 Vuotovirtavaurion estäminen.....	14
3	Kunnonvalvonta.....	18
	3.1 Värähtelymittaus.....	19
	3.1.1 Aikataso.....	20
	3.1.2 Värähtelyspektri.....	21
	3.1.3 PeakVue analyysi.....	22
	3.1.4 Hammasvaihteen värähtely.....	24
	3.2 Tribologia.....	25
	3.2.1 Öljyanalyysimenetelmät.....	26
	3.3 Sähköiset menetelmät.....	27
4	Kenttämittaukset.....	28
	4.1 Esimerkkitapauksen kohde.....	28
	4.2 Mittauskohteen historia.....	29
	4.3 Mittalaitteet.....	32
	4.4 Mittausten toteutus.....	33
5	Mittaustulokset ja analysointi.....	37
	5.1 Esimerkkitapaus.....	37
	5.1.1 Värähtelymittaus.....	37
	5.1.2 Vuotovirtamittaus.....	39
	5.2 Laakerivaurio esimerkkejä.....	45
	5.3 Öljyanalyysin mahdollisuudet.....	51
6	Yhteenveto.....	52
	Lähteet.....	54

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

α	Vierintälaakerin koskestuskulma
AC	Alternating current eli vaihtovirta
BPFI	Ball pass frequency of inner race eli laakerin sisäkehän ohitustaajuus
BPFO	Ball pass frequency of outer race eli laakerin ulkokehän ohitustaajuus
CBM	Condition-based maintenance eli kuntoon perustuva kun- nossapito
d	Vierintälaakerin vierintäelimen halkaisija
D	Vierintälaakerin keskihalkaisija
D-pää	Sähkömoottorin käyttöpää
DC	Direct current eli tasavirta
EDM	Electrical discharge machining eli kipinätyöstö
EHD	Elastohydrodynaaminen voiteluperiaate
FFT	Fast fourier transfer eli nopea fourier muunnos, jonka avulla muodostetaan aikatasosignaalista spektri.
FTF	Fundamental train frequency eli laakerin pitimen ohitustaajuus
gE	Värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvo verhoikärspektrissä
GM	Gearmesh eli hammasvälityksen ryntötaajuus
HF	High frequency eli tässä työssä korkeataajuinen mitta- ausalue
HSS	High speed shaft eli hammasvaihteen ensiöakseli
IGBT	Insulated Gate bipolar transistor eli eristehilabipolaaritransistori. Käytetään taajuusmuuttajissa sähköisenä kytkimenä.
n	Akselin pyörimistaajuus
N	Laakerin vierintäelinten lukumäärä
ND-pää	Sähkömoottorin käyttöpään vastainen pää
PWM	Pulse-width modulation eli pulssinleveysmodulaatio, jossa kuormaan menevää jännitettä säädetään muuttamalla pulssin- suhdetta.
RMS	Root mean square eli mitatun suureen neliöllinen keskiarvo eli tehollisarvo
RTF	Run to failure eli kone huolletaan vikaantumisen jälkeen
TAN	Total acid number eli kokonaishappoluku
WB	Wide band eli tässä työssä matalataajuinen mitta- ausalue

1 JOHDANTO

Hammasvaihteissa on havaittu yhä useammin sähkövirran eli vuotovirran aiheuttamia vauriojälkiä. Vaurion syntyminen on tapahtunut useassa tapauksessa huomattavasti vaihteiston normaalia vikaantumisväliä nopeammin. Juurisyyanalyyysien perusteella on todettu, että taajuusmuuttajaperäinen vuotovirta kulkeutuu sähkömoottorista vaihteistoon ja maadoittuu helpointa reittiä sen koteloon. Maadoitusreitti kulkee hammasryntöjen ja laakerointien välilyksellä. Vaurio paljastuu useasti vuotovirran aiheuttamaksi vasta vaihteen purkutarkastuksessa, jolloin sen tilalle asennetun varavaihteen vikaantuminen on jo alkanut.

Teollisuudessa vuotovirta mielletään helposti sähköpuolen ja ainoastaan sähkömoottorien ongelmaksi. Lukuisissa tapauksissa ongelmat ovat ensin tulleet esille sähkömoottorissa, jonka jälkeen sen vikaantuminen on estetty eri toimenpiteillä. Tämä on johtanut useasti siihen, että seuraavaksi vuotovirta on päässyt kulkeutumaan vaihteistoon ja vaurioittanut sen. Vuotovirtailmiötä on tutkittu sähköisestä näkökulmasta useamman eri tahon toimesta. Käytettävän laitteen ja kunnonvalvonnan osalta tutkimustyötä ei ole juurikaan tehty.

Tässä työssä tutkitaan vuotovirran aiheuttaman vaurion diagnosointia hammasvaihteessa kunnonvalvontamenetelmillä. Tavoitteena on löytää kunnonvalvontamenetelmä, jolla havaittu vaurio voidaan osoittaa tai epäillä vuotovirran aiheuttamaksi. Tämä antaa aikaa suorittaa vuotovirtamittaukset ja tarvittavat toimenpiteet vuotovirran ehkäisemiseksi ennen vaihteen huoltoa tai vaihtoa varavaihteeseen.

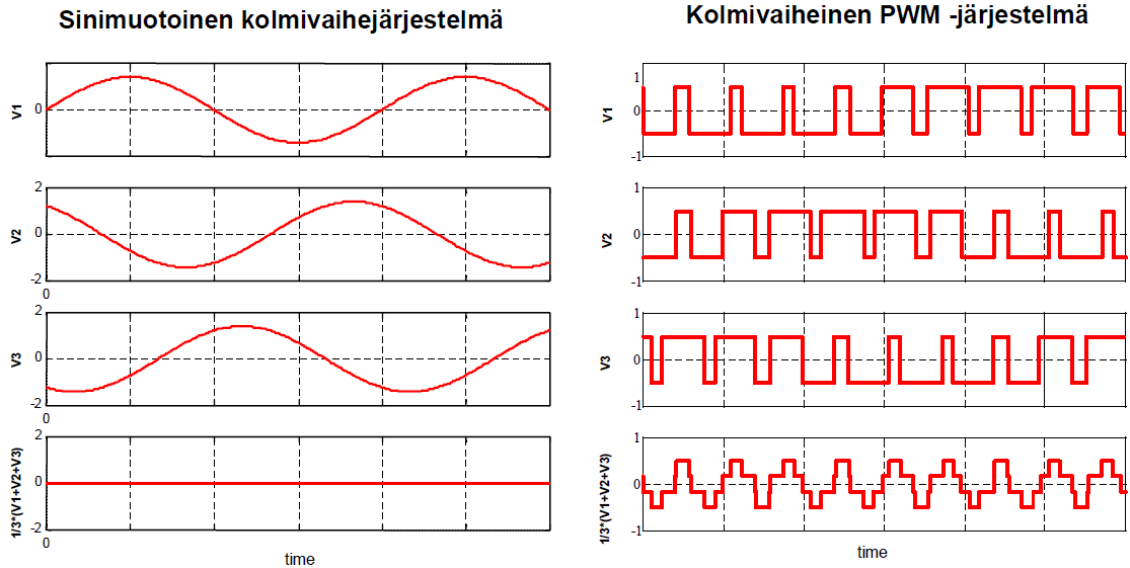
Työssä esitellään vuotovirtailmiö ja sen eri tyypit, jotta ymmärretään ongelman syntyperä sekä osataan suorittaa oikeita mittauksia ja suositella oikeita toimenpiteitä. Käytetyt kunnonvalvontamenetelmät käsitellään, jotta ymmärretään millaisia vaurioita niillä voidaan tunnistaa. Esimerkkitapauksena käsitellään yksi prosessiteollisuuden vuotovirtatapaus mittaustuloksineen. Tapauksessa useampi hammasvaihte vikaantui, ennen kuin juurisyy saatiin poistettua. Lisäksi käsitellään useampia vuotovirran aiheuttamia laakerivaurioita. Sekä etsitään mittaustuloksista yhtäläisyyksiä, joiden perusteella vaurio olisi voitu todeta vuotovirran aiheuttamaksi. Lopuksi vuotovirran vaurioittamia laakereiden värähtelymittaustuloksia verrattiin mekaanisen vaurion tuloksiin. Niistä etsittiin eroavaisuuksia joilla, vauriot pystytään erottamaan.

2 VUOTOVIRTAILMIÖ

Vuotovirta eli laakerivirta on vanha ilmiö vaihtovirta sähkökäytöissä. Ensimmäinen artikkeli ilmiöstä on jo vuodelta 1907. Aluksi vuotovirtailmiön sai aikaan tyypillisesti epäsymmetriat moottorien rakenteessa tai virran syötössä, jolloin jännitteet ja virrat olivat matalataajuisia. (Erkkilä 1999; Peltola 2006). Nykyään sähkökäyttöjen valmistustoleranssit ja -tarkkuus ovat niin hyviä, että perinteisistä epäsymmetriasta johtuvista vuotovirta ongelmista on päästy lähes kokonaan eroon (PSK 7708 2004).

Taajuusmuuttajaperäiset vuotovirran aiheuttamat vauriot ovat lisääntyneet ja yleistyneet teollisuudessa sähkömoottorien pyörimisnopeuden ja kuormituksen ohjaukseen käytettävien taajuusmuuttajien käytön kasvaessa ja kehittyessä. Vuotovirta on taajuusmuuttajakäyttöjen haitallinen ominaisuus, joka saattaa vikaannuttaa sähkömoottorin tai sähkömoottorilla käytettävän laitteen komponentteja. Voimansiirtoketjun komponentteja ovat taajuusmuuttaja, sähkömoottori sekä hammasvaihe. Tarkasteltaessa niitä erikseen ovat ne luotettavia ja toimivia. Mutta asennettaessa ne voimansiirtojärjestelmäksi, saattaa ongelmia esiintyä. (ABB 2000). On myös mahdollista, että hammasvaihteeseen pääsee oikosulkeutumaan staattista sähkövirtaa käytettävältä laitteelta, kuten paperikoneen telalta. Kuitenkaan tämän työn yhteydessä ei käsitellä staattista sähkövirtaa.

Teollisuudessa käytetään yleisesti kaksitasoisia jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajaperäisen vuotovirran syntymisen taustalla on yhteismuotoinen jännite, joka on kolmen vaihejännitteen summa. Puhtaan kolmivaiheisen sinimuotoisen jännitteen yhteismuotoinen jännite on nolla. Pulssileveysmoduloidussa (PWM) teholahteessa vaihejännitteiden summa ei voi olla koko ajan nolla kuten Kuvasta 1 nähdään. Tämä johtuu siitä että PWM -teholahteessa tasajännitteestä tuotetaan kolmivaiheinen jännite. (Iisakkala 2002; ABB 2003; Särkimäki 2009).



Kuva 1. Sinimuotoinen kolmivaihejärjestelmä vs. kolmivaihe PWM – järjestelmä (Iisakala 2002).

Vuotovirran synnyttää korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite sekä sähkömoottorin hajakapasitanssit, jotka aikaansaavat matalaimpedanssisen reitin korkeataajuiselle vuotovirralle. Hajakapasitanssit eivät ole merkittäviä matalilla operointitaajuuksilla, alle 100 Hz. Taajuusmuuttajan korkealla kytkentätaajuuksella tarkoitetaan vaihtosuuntaajan transistorisillan kytkentänopeutta, joka voi olla useita megahertsejä. Se saadaan aikaan IGBT- transistorilla eli eristehilabipolaaritransistorilla. IGBT:n korkea kytkentätaajuus saa aikaan korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen, jonka aiheuttama jännite oikosulkeutuu moottorin hajakapasitanssien välityksellä aiheuttaen haitallista korkeataajuisista vuotovirtaa. (Peltola 2006; Särkimäki 2007).

2.1 Vuotovirtatyypit

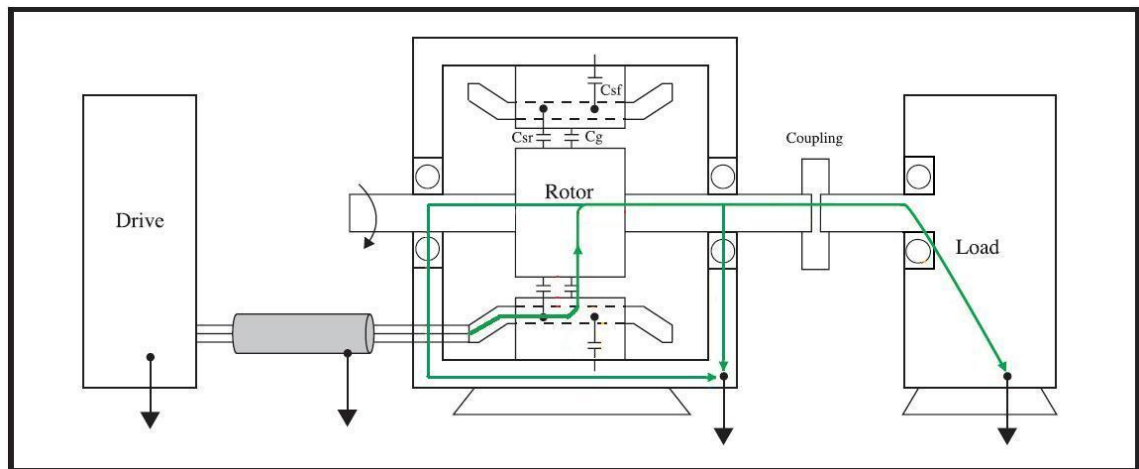
Vuotovirtaa ilmenee sähkömoottoreissa sekä käytettävissä laitteissa kuten hammasvaihteissa pääsääntöisesti neljässä eri muodossa. Niiden syntymekanismit eroavat toisistaan, mutta ongelmien taustalla on taajuusmuuttajan korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite, kuten kappaleessa 2 on esitetty. Taajuusmuuttajaperäinen vuotovirta voidaan jakaa neljään päätyyppiin:

- EDM – eli kipinävirta (Electrical Discharge Machining)
- akselin maadoitusvirta
- kiertovirta ja
- kapasitiivinen purkausvirta.

Seuraavissa alakappaleissa käsitellään eri vuotovirtatyypit sekä esitetään niiden maadoitusreitit voimansiirtoketjussa.

2.1.1 EDM – eli kipinävirta

Kipinävirralla tarkoitetaan vuotovirtatyyppiä, joka aiheuttaa kipinätyöstöä laakerin komponenttien tai hammasvaihteen hammastuksien pinnoilla. Sen saavat aikaan moottorin sisäiset hajakapasitanssit, korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite sekä laakerin tai hammastettujen osien öljykalvon aiheuttama kapasitanssi. Yhteismuotoinen jännite lataa roottoria ja laakerikapasitansseja, jolloin potentiaaliero roottorin ja koneen rungon välillä kasvaa tiettyyn pisteeseen asti. Jos akseliin varautunut jännite nousee suuremmaksi kuin laakerin öljykalvon läpäisyyn vaadittava jännite, purkautuu laakerin kapasitanssiin varautunut energia laakerin läpi aiheuttaen kipinävirran eli kipinätyöstöä laakerin komponenttien pinnoilla. Kipinävirtaa ei esiinny jatkuvasti. Eikä se ole riippuvainen IGBT:n kytkentätaajuudesta. Tuotantoparametreilla on suuri vaikutus sen esiintymiseen, koska laakerin öljykalvon paksuuteen vaikuttaa usea parametri. Tämän takia laakerin kapasitanssi muuttuu parametrien ja olosuhteiden mukaan. (Rockwell Automation 2002; Särkimäki 2009; Ahola 2011).

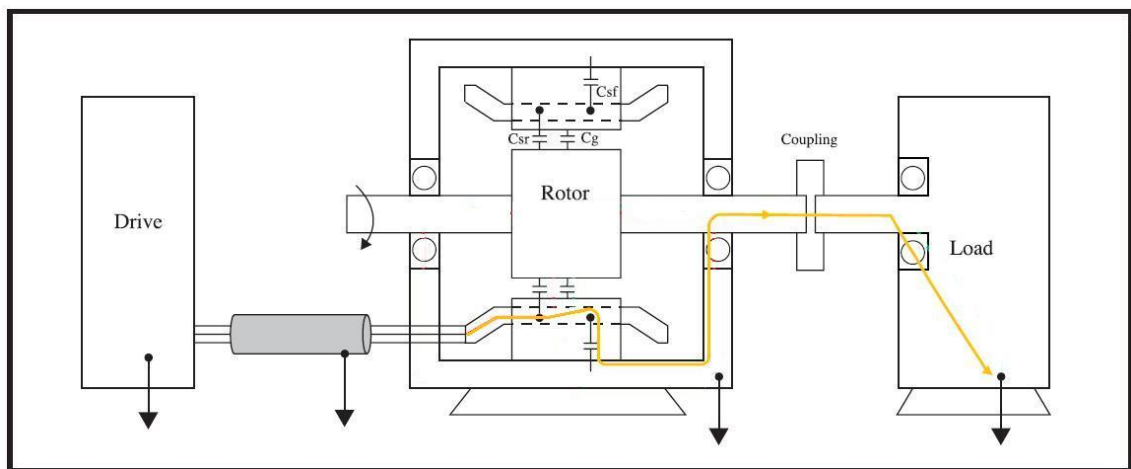


Kuva 2. Kipinävirran maadoitusreitti (Rockwell Automation 2002, muokattu).

Jos kipinävirta ei pääse purkautumaan sähkömoottorin laakereiden lävitse tai hammasvaihte tarjoaa matalaimpedanssisemmän maadoitusreitit, kulkeutuu vuotovirta ensiöakselia pitkin hammasvaihteeseen. Akseleiden laakerointien ja hammasryntöjen kapasitanssien välityksellä kipinävirta voi vahingoittaa hammasvaihteen laakereita tai välitysosien hammastuksien kosketuspintoja (ks. Kuva 2).

2.1.2 Akselin maadoitusvirta

Akselin maadoitusvirran eli roottorin maadoitusvirran syntyminen edellyttää että roottorin impedanssi maahan nähden on alhaisempi kuin sähkömoottorin rungon maadoituksen impedanssi. Tämän kaltainen tilanne syntyy, kun roottori on maadoitettu käytettävän laitteen, kuten hammasvaihteen välityksellä. Jos käytettävän laitteen kautta kulkevalla maadoitusreitillä on matalampi impedanssi kuin moottorin rungon maadoitus, maadoittuu vuotovirta sähkömoottorin rungosta laakerin lävitse, moottorin akselia pitkin, kytkimen lävitse, käytettävän laitteen akselille ja oikosulkeutuu sen laakeroinnin välityksellä rungon kautta takaisin taajuusmuuttajan runkoon (ks. Kuva 3). (Rockwell Automation 2002; PSK 7708 2004; Särkimäki 2009)

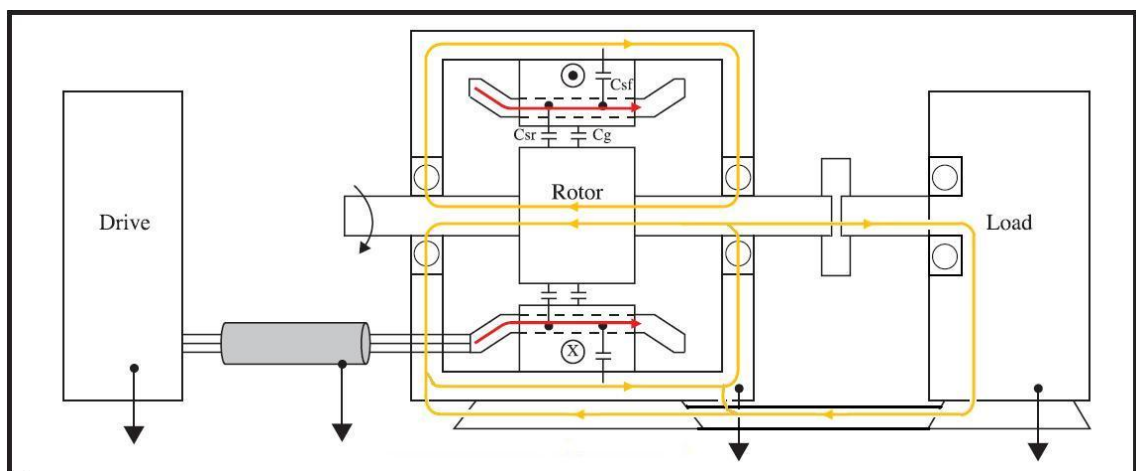


Kuva 3. Akselin maadoitusvirran maadoitusreitti (Rockwell Automation 2002, muokattu).

Akselin maadoitusvirta on haitallinen sähkömoottorille ja käytettävälle koneelle, koska vuotovirran maadoitusreitti kulkee molempien laitteiden laakerointien lävitse. Hammasvaihteessa virta voi kulkea myös hammasrynnön läpi. Silloin myös välitysosien hammastukset voivat vikaantua.

2.1.3 Kiertovirta

Kiertovirran sähkömoottorin sisällä aiheuttaa taajuusmuuttajan pääteasteen kytkentä. Se luo yhteismuotoisen jännitteen muutoksen. Roottorin käämityksen ja sähkömoottorin rungon välinen kapasitiivinen kytkentä saa aikaan aksiaalisuuntaisen yhteismuotoisen virtapulssin. Aksiaalisuunnassa etenevä virtapulssi aiheuttaa magneettivuon ympärilleen. Magneettivuon seurauksena syntyy potentiaaliero sähkömoottorin akselinpäiden välille. Tämä aiheuttaa sähkömoottorin laakerikapasitanssien kanssa kiertävän virran moottorin sisälle. Virran kulkureitti on moottorin akselista laakerin kautta moottorin runkoon ja rungosta takaisin akselille toisen pään laakerin välityksellä (ks. Kuva 4). (Rockwell Automation 2002; PSK 7708 2004; Särkimäki 2009; Ahola 2011).

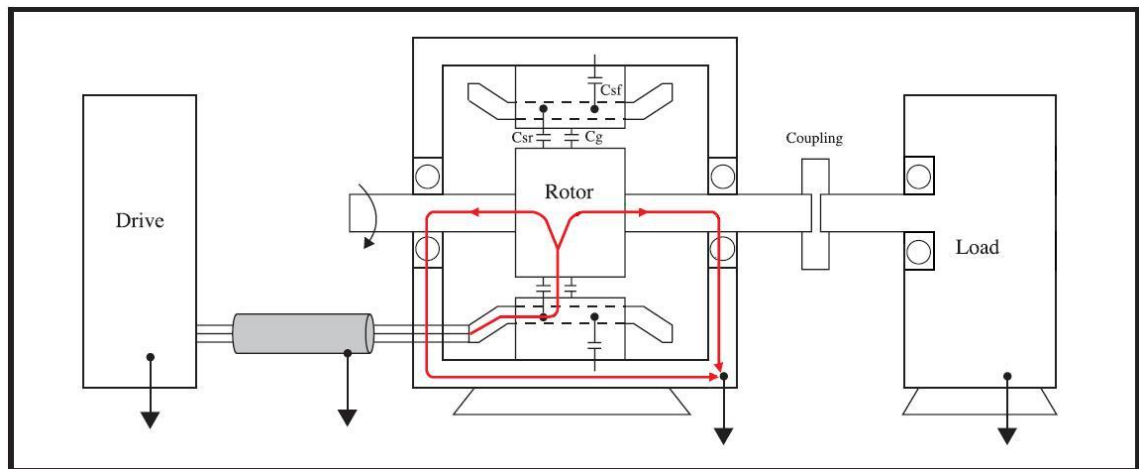


Kuva 4. Kiertovirran maadoitusreitti (Rockwell Automation 2002, muokattu).

Kiertovirta on tyypillisesti haitallista vain sähkömoottorin laakereille. Jos sähkömoottorin D – pään eli moottorin käyttöpään laakeri on eristetty saattaa kiertovirta kulkea hammasvaihteen kautta. Se voi maadoittua myös hammasvaihteen välityksellä mikäli sähkömoottori ja hammasvaihte on asennettu samalle johtavalle alustalle (PSK 7708 2004). Sähkömoottorin molempien laakereiden ollessa eristettyjä tulee akselin maadoitusharjan käytössä olla huolellinen. Jos harja kytketään niin että se luo vuotovirralla reitin ohi ND-pään laakerin, tarjoaa se kiertovirralla reitin käytettävälle koneelle. (Peltola 2006). Kiertovirran reitti kulkee moottorin akselia pitkin, kytkimen kautta käytettävän koneen akselille ja maadoittuu käytettävän koneen laakeroinnin ja rungon kautta takaisin sähkömoottorin runkoon, kuten Kuvassa 4 on esitetty.

2.1.4 Kapasitiivinen purkausvirta

Yhteismuotoisen jännitteen nopea korkea kytkentätaajuus aiheuttaa korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen aina kun taajuusmuuttajassa tapahtuu kytkentä (ks. kappale 2). Korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite kulkee sähkömoottorin staattorista ilmavälin yli roottorin kautta akselille. Akselia pitkin se virtaa laakerille ja aiheuttaa laakerin öljykalvon kapasitanssin kanssa pienimuotoisen kapasitiivisen purkausvirran laakerin lävitse moottorin runkoon. Kapasitiivisessa purkauksessa öljykalvon läpilyntokestoisuus ei ylitä, joten siinä ei tapahdu pintojen välistä kipinätyöstöä. (Rockwell Automation 2002; PSK 7708 2004; Särkimäki 2009; Ahola 2011).



Kuva 5. Kapasitiivisen purkausvirran reitti (Rockwell Automation 2002, muokattu).

Kapasitiiviset purkausvirrat ovat tyypillisesti hyvin pieniä. Niiden tehollisarvon suuruus on luokkaa 5-10 mA ja siksi niitä pidetään yleisesti harmittomina vaurioiden kannalta (Särkimäki 2009).

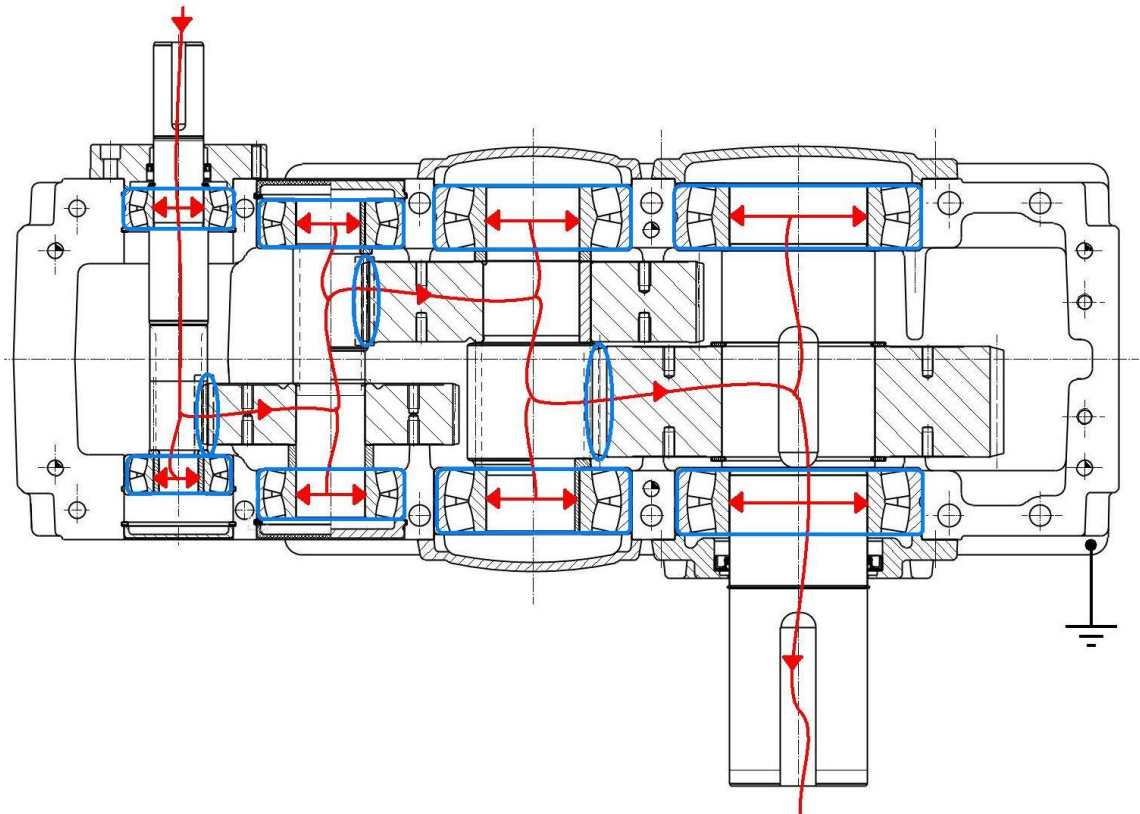
2.2 Vuotovirran vaikutus hammasvaihteessa

Vuotovirran aiheuttamia vaurioita on esiintynyt hammasvaihteissa niin kauan kuin on ollut sähkömoottorikäyttöjäkin. Nykyisillä taajuusmuuttajakäyttöillä ongelmasta on tullut entistä yleisempi ja vikaantumisprosessi on nopeutunut vuotovirran korkean taajuuden myötä. Vuotovirta voi kulkea pintojen välillä kolmella eri mekanismilla: (Tervola 2006).

- metalli-metalli kontakti
- purkaus matalaeristeen väliaineen läpi ja
- kipinätyöstö.

Metalli-metalli kontaktissa vastus riippuu kontaktipinnan pinta-alasta. Suurella virrantiheydellä pinta voi paikallisesti ylikuumentua tai jopa sulaa. Matalaeristeisen väliaineen purkauksessa väliaineella ei ole suurta kapasitanssia jolloin potentiaaliero ei pääse kasvamaan suureksi. Riippuen virran suuruudesta se voi aiheuttaa pinnalla ylikuumenemista tai jopa sulamista. Kipinätyöstössä puolestaan pintojen välillä on suuri kapasitanssi, jolloin purkauksessa on suurempi energiamäärä. Purkauksessa pinta sulaa ja partikkeleita irtoaa komponenttien pinnoilta. (Laitonen 2006; Tervola 2006).

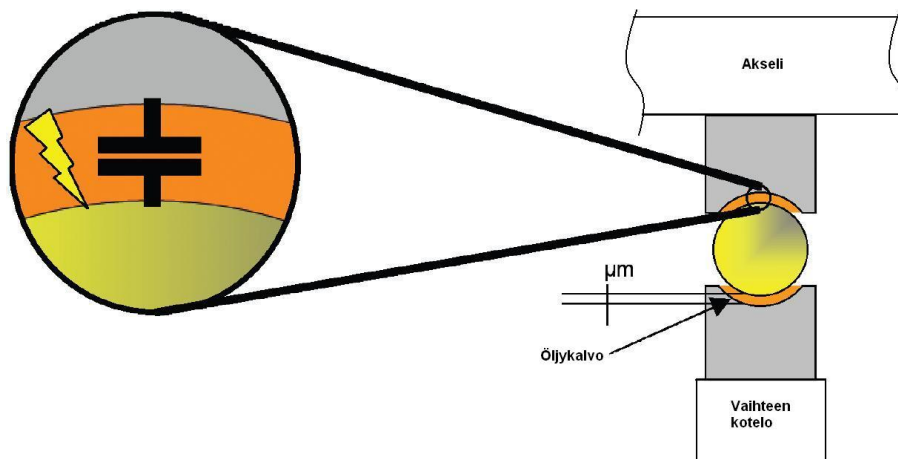
Vuotovirtaa pääsee virtaamaan sähkömoottorin akselia pitkin kytkimen yli hammasvaihteen ensiöakselille. Hammasvaihteessa vuotovirta pyrkii maadoittumaan vaihteen rungon välityksellä takaisin taajuusmuuttajan runkoon jolloin syntyy oikosulku. Ongelmia syntyy, kun virta ei pääse suoraan akselilta maadoittumaan vaihteen runkoon, koska laakereiden ja hammaspyörien pintojen välissä on öljykalvo. Joka aiheuttaa pintojen välille kapasitanssin (Peltola 2006). Kuvassa 6 on esitetty vuotovirran mahdolliset reitit, joita pitkin se voi maadoittua vaihteen runkoon. Punaisella on merkitty vuotovirran mahdolliset reitit ja sinisellä kohdat joissa se voi aiheuttaa vaurioita. Vuotovirta kulkee aina reittiä jolla on pieni-impedanssi, jos tällä reitillä on kapasitanssia seuraa ongelmia. Vaihteen sisällä pieni-impedanssinen reitti voi vaihdella tuotantoparametrien muuttuessa, koska öljykalvon paksuus laakereissa ja hammasrynnössä vaihtelee esimerkiksi lämpötilan (viskositeetti ominaisuudet), pyörimisnopeuden sekä kuormituksen funktiona (Kivioja et al. 2007). Tästä syystä vaihteessa voidaan havaita vuotovirran aiheuttamia vaurioita useammassa eri komponentissa.



Kuva 6. Vuotovirran maadoitusreitit hammasvaihteessa (Moventas Gears).

Yleisesti ottaen hammasvaihteen laakereissa voitelutilanne eli voitelukalvon ominaispaksuus on parempi vaihteen nopeammin pyörivillä akseleilla. Tämä johtaa siihen, että nopean akselin laakerit muodostavat korkeaimpedanssisen maadoitusreitit, jolloin vuotovirta saattaa kulkea hammasrynnön kautta vaihteen seuraavalle akselille. Myös hammasrynnössä voitelutilanne on parempi nopeammin pyörivillä akselilla.

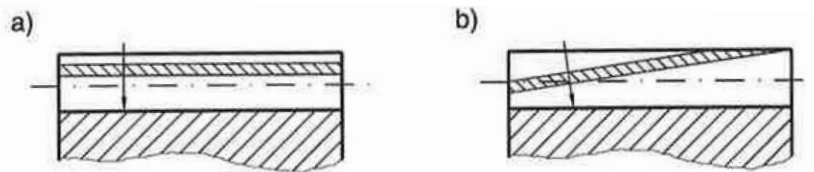
Laakerin kannalta vuotovirta pääsee vapaasti virtaamaan vaihteen akselilta laakerin sisäkehälle. Sisäkehältä sen on päästävä vierintäelimen välityksellä laakerin ulkokehälle maadoittuakseen vaihteen runkoon, kuten Kuvassa 7 on esitetty. Laakerin sisäkehän ja vierintäelimen sekä vierintäelimen ja ulkokehän välillä on voitelukalvot, jotka muodostavat laakerikapasitanssin. Kun akselin jännite on noussut tarpeeksi suureksi ylittääkseen öljykalvon läpilyöntikestoisuuden, purkautuu vuotovirta laakerin läpi aiheuttaen mahdollisesti kipinöintiä sisäkehän, vierintäelimen sekä ulkokehän pinnalla. Vuotovirta voi vahingoittaa kaikkia laakerin komponentteja. Vaurio tyypillisesti alkaa laakerin sisä- ja ulkokehän kuormitusvyöhykkeeltä. Koska siellä laakerin kuormitus on suurin ja öljykalvon paksuus eli läpilyöntikestoisuus pienin. Vierintälaakereissa voitelu toimii rajavoitelu-, sekavoitelu- tai EHD -alueella (elastohydrodynaaminen). Voitelukalvon paksuuteen vaikuttaa eniten voiteluaineen viskositeetti ja laakerin pyörimisnopeus (Kivioja et al. 2007). Vierintälaakereissa öljykalvon paksuus vaihtelee yleisesti 0,2-2,0 μm välillä. Öljyvoitelukalvon läpilyöntikestoisuus on 1-30 V/ μm . Joten tämän perusteella hyvin alhaiset, jopa alle 1 V suuruiset akselijännitteet voivat aiheuttaa laakereissa otollisissa olosuhteissa vuotovirran läpilyöntejä (Särkinen 2009; Ahola 2011).



Kuva 7. Vuotovirran reitti laakerissa (Errath & Hoppler 2007, muokattu).

Hammasrynnössä voitelutilanne vaihtelee rajavoitelu-, sekavoitelu- tai jopa EHD - alueella. Rynnössä esiintyy tyypillisesti ajoittain metalli-metalli kontakteja, jonka seurauksena akselille varautunut jännite pääsee purkautumaan hammasrynnön läpi. Purkaus aiheuttaa hampaan pinnalla mahdollisesti kipinöintiä riippuen purkautuvan virran suuruudesta sekä purkautumispinta-alasta. Jos hampaiden välillä esiintyy yhtenäinen voitelukalvo, aiheuttaa se pintojen välille kapasitanssin. Yhdessä akselijännitteen kanssa

se voi aiheuttaa läpilyönnin ja vaurioittaa hammastuksien pintoja. Hammasrynnössä vuotovirran aiheuttama läpilyönti voitelukalvon läpi tapahtuu ryntöpinnalla kosketusviivalla. Siinä voitelukalvo on ohuimmillaan. Lieriöhammaspareja on suora- sekä vinohampaisia. Niiden erona ryntötapahtumassa on kosketusviivan kulkeminen vinolla hammastuksella vinosti hampaan ryntöpintaan nähden, kuten kuvassa 8 on esitetty.



Kuva 8. Lieriöparin kosketusviiva ryntöpinnalla, a) suora hammastus b) vino hammastus (Kivioja et al. 2007).

Vuotovirta aiheuttaa hammastuksen ryntöpinnalle kosketusviivan suuntaisia vauriojälkiä koko ryntöpinnalla. Vinon hammastuksen tapauksessa kosketusviivaa eli kosketuspinta-alaa on enemmän hammastuksen ryntökulman tuoman peittosuhteen myötä. Suoralla hammastuksella ryntötapahtumassa on kerrallaan yksi tai kaksi hammasta. Vinolla hammastuksella (ryntökulma 20°) niitä on kahdesta jopa neljään hammasta, riippuen kokonaisryntösuhteesta. Vino hammastus luo vuotovirralla useamman mahdollisen maadoitusreitit kuin suora hammastus, mutta suoralla hammastuksella on pienempi maadoittumispinta-ala.

Suoranaisen hammasvaihteen vikaannuttamisen lisäksi vuotovirta edistää mekaanisten vikojen syntymistä ja kiihdyttää vaurioiden edistymistä heikentämällä hammasvaihteen voiteluöljyn laatua. Vuotovirran vaikutus öljyn laatuun on suurempi vaihteissa, jotka ovat omassa voitelupiirissä. Mikäli vaihde on liitettyä kiertovoiteluun, on kokonaisöljymäärä huomattavasti suurempi. Sen takia öljyn laadun heikkeneminen yksittäisen vaihteen vuotovirran vaikutuksesta on vähäinen. Vuotovirran aiheuttama kipinätyöstö pintojen välillä aiheuttaa öljyn palamista, hiiltymistä sekä hapettumista. Lisäksi partikkelien irtoaminen komponenttien pinnoilta öljyn sekaan heikentää öljyn lisäaineiden toimintaa (Posa & Ranta 2003). Öljyn voitelukyvyyn heikkeneminen huonontaa hammasvaihteen voitelutilannetta hammasrynnössä ja laakereissa. Tämä kiihdyttää mekaanista pintojen vaurioitumista.

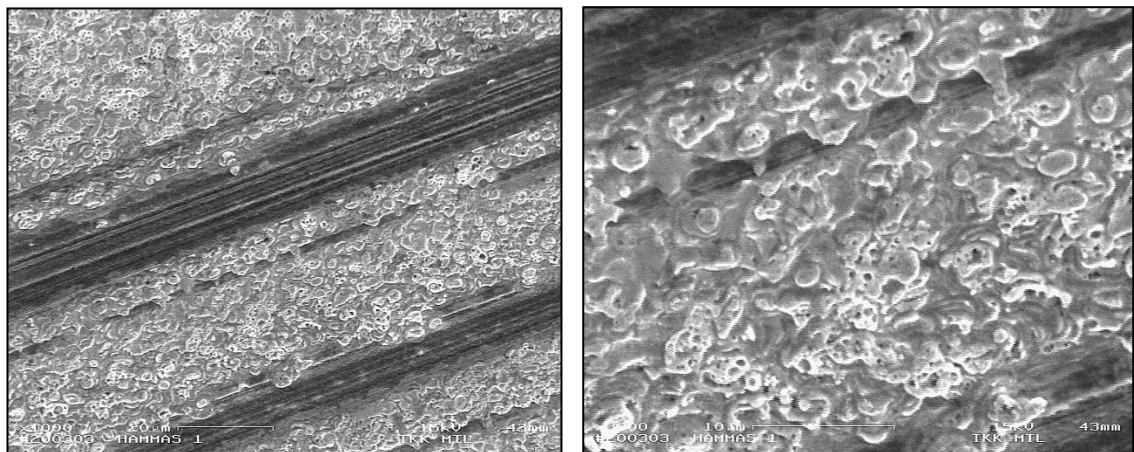
Hammasvaihteen voiteluöljyn puhtausluokasta käytetään yleisesti ISO4406 standardia joka antaa raja-arvoja kolmelle erikokoiselle partikkeliryhmälle. Kokoluokat ovat $> 4 \mu\text{m}$ / $> 6 \mu\text{m}$ / $> 14 \mu\text{m}$ (ISO4406 1999). Aiemmin todettiin että, vierintälaakerin voitelukalvonpaksuus vaihtelee yleisesti $0,2 - 2,0 \mu\text{m}$ välillä. Tämän perusteella voiteluöljyn seassa olevien partikkeleiden koko on useasti voitelukalvoa suurempi. Öljyn sekaan irronneet metallipartikkelit edistävät vuotovirtavaurion etenemistä. Kun öljykälvon paksuutta pienempi metallipartikkeli kulkeutuu läpi hammasrynnöstä tai laakerin sisä- tai ulkokehän ja vierintäelimen välistä, on voitelukalvo ohuempi partikkelin kohdalla. Silloin kapasitanssi on pienempi ja öljyn läpilyöntikestoisuus alenee hetkellisesti.

Öljykalvoa suuremman partikkelin kulkeutuessa rynnön tai laakerin kosketuspintojen välistä syntyy partikkelin välityksellä metalli-metalli kontakti, jonka kautta virta pääsee purkautumaan aiheuttaen mahdollisesti kipinäointia.

2.2.1 Kipinätyöstö

Vuotovirtavaurion taustalla on pintojen välinen kipinätyöstö (EDM). Kipinätyöstöllä tarkoitetaan alkuperäisesti metallikappaleiden valmistusmenetelmää. Siinä hyödynnetään sähköisen kipinöinnin aikaansaamaa termistä eroosiota kappaleen muokkaamiseen hallitusti. Vuotovirta aiheuttaa hammasvaihteen komponenteille saman ilmiön hallitsemattomasti. Kipinätyöstö edellyttää pintojen välistä eristävää ainetta sekä potentiaaliero pintojen välillä. Tarpeeksi suurella virrantiheydellä kipinätyöstö sulattaa metallia synnyttäen mikrokraattereita, jolloin sulat metallipartikkelit siirtyvät voiteluöljyyn. Hammasvaihteessa hammasryntö sekä laakereiden vierintäpintojen välinen öljykalvo yhdessä akselijännitteen kanssa saavat aikaan otolliset olosuhteet kipinätyöstölle. Vierintälaakerin vierintäelin toimii kipinätyöstössä sekä katodina että anodina, joten sen vaurioituminen on teoreettisesti laakerikomponenteista nopeinta. Hammasryntössä on teoreettisesti mahdollista vain toisen osapuolen vaurioituminen. (Posa & Ranta, 2003; Tervola 2006).

Kipinätyöstön aiheuttamissa vauriossa ensimmäisenä komponenttien pinoille syntyy kipinäpurkauksen aiheuttamia mikrokraattereita, kokoluokaltaan noin 10 µm. Mikrokraattereita on mahdotonta havaita paljaalla silmällä tai optisella mikroskoopilla. Niiden havaitsemiseen tarvitaan elektronimikroskooppi (ks. Kuva 9). Sen käyttö edellyttää koepalan ottoa vaihteen hammastuksesta tai laakeroinnista, joten se ei sovellu käytössä olevan vaihteen tutkimiseen. Mikrokraatterit seuraavat hiontajälkiä ja syntyvät tyypillisesti kappaleessa 2.2 mainittuihin kohtiin.



Kuva 9. Elektronimikroskoopilla kuvattuja mikrokraattereita hammastuksen pinnalla (Moventas Gears).

2.2.2 Vauriotyypit

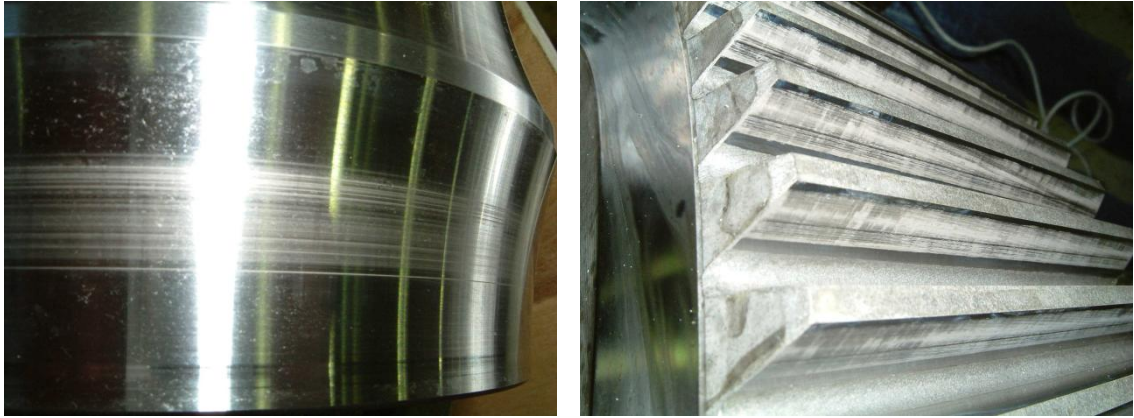
Kipinätyöstön aiheuttama paikallinen pinnan kuumentuminen ja sulaminen karkaisee pintaa ja sen alla oleva perusaine päästyy. Tämän seurauksena väsymislujuus pinnassa laskee vetojännitystilän syntymisen takia. Pinnan karkeneminen aiheuttaa pintaan halkeamia joiden seurauksena pinnasta irtoaa partikkeleita. Jos mikrokraaterit valsaantuvat ja uudelleen karkaisusta pinnasta poistuu partikkeleita, on vuotovirtavaurion erottaminen perinteisestä mikropittingistä (mikrokuoppauma) visuaalisesti ilman elektroni-mikroskooppia hyvin haastavaa. (Erkkilä 1999; Posa & Ranta, 2003; Laitonen 2006; Tervola 2006).

Sähkövirta voi aiheuttaa laakereiden vierintäpinnoille ja hammastuksien ryntöpinnoille erilaisia vaurioita riippuen vauriotyypistä. Sähkövirran aiheuttamat vauriot voidaan jakaa neljään eri ryhmään:

- harmaantuminen (frosting)
 - pyykkilautaurautuminen (fluting)
- kipinäurat (spark tracks)
- kuoppautuminen (pitting) ja
- hitsautuminen (welding).

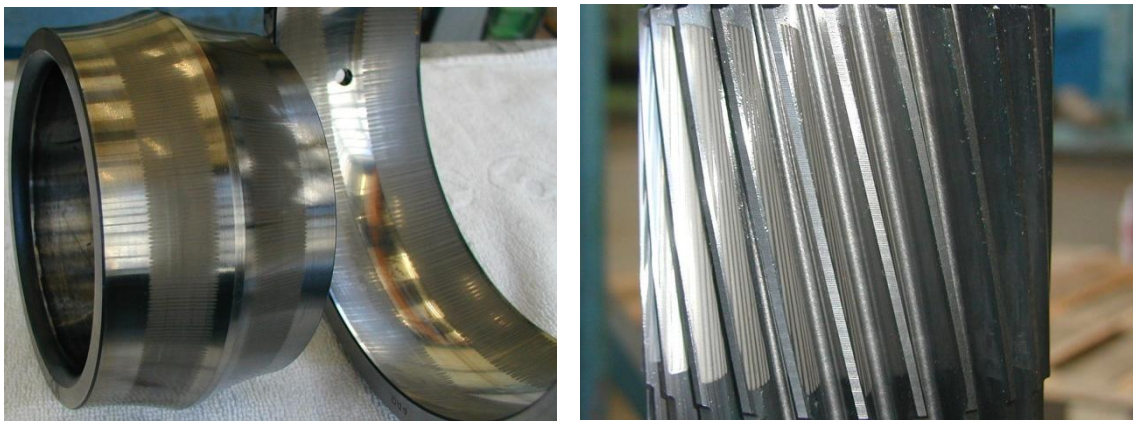
Näistä vauriotyypeistä vuotovirran aiheuttamia voivat olla frosting, fluting ja spark tracks. Pittingin ja weldingin muodostumiseen vaaditaan huomattavasti vuotovirtaa suurempi sähkövirta, joita voi aiheuttaa esimerkiksi hitsaus. Tässä työssä käsitellään vain vuotovirran aiheuttamia vauriotyyppejä.

Frosting eli pintojen harmaantuminen on yleisin vuotovirran aiheuttama vauriotyyppi. Vaurion edetessä pinnoista tulee mikrokraateroinnin seurauksena harmahtavia ja kiillottomia. Ilmiö vastaa sisäänajokulumista tai kovien partikkeleiden aiheuttamia pinnan naarmuja, jonka takia sitä on vaikea tunnistaa näin varhain visuaalisesti ilman elektroni-mikroskooppia. Sitä voi ilmetä hammastuksien, sisäkehän, vierintäelimen tai ulkokehän pinnalla. Pinta saattaa muistuttaa jopa hiekkapuhallettua pintaa mikäli vuotovirta ja työstövaikutus ovat olleet suuria (Peltola 2006). Pahimmillaan frosting ilmiö voi aiheuttaa halkeamia vierintälaakerin komponenteille ja olla osasyynä hampaan katkeamiselle (Ranta 2003).



Kuva 10. Frosting eli harmaantumisvaurio laakerin sisäkehällä ja hammastuksen pinnalla (Moventas Gears).

Frosting ilmiön vakavampaa muotoa kutsutaan nimellä fluting eli pyykkilautaurautuminen. Kun mikrokraaterointi etenee tarpeeksi pitkälle, muodostuu pinnoille flutingia joka on helposti tunnistettavissa visuaalisesti paljaalla silmällä. Siinä pinnalla vuorottelevat vaurioimaton ja vaurioitunut materiaali kuten Kuvassa 11 on esitetty. Flutingia syntyy hammastuksien tai laakereiden vierintä ratojen pinnalle, kun sähkövirta pääsee kulkemaan jatkuvasti öljykalvon läpi. Sähkövirran lämpövaikutus on niin suuri, että se aikaansaa pinnalle plastista muodonmuutosta, jonka seurauksena pinnasta irtoaa partikkeleita. Flutingin muodostuminen pinnalle on tyypillisesti jaksollinen ilmiö, hammastuksissa kuvio on ryntöviivan suuntainen ja vierintälaakereilla vierintäelimen vierintäviivan suuntainen. Säännöllisyydelle yksi selitys on voitelukalvon säännöllinen vaihtelu. Jolloin sen eristävyys vaihtelee säännöllisesti ja tämä seurauksena pinta vaurioituu jaksollisesti. Vierintäelimen vierieessä yli jaksollisesti vaurioituneen pinnan aiheuttaa se laajakaistaista värähtelyä joka herättää laakerin ominaistaajuuden. Resonanssin seurauksena öljykalvon paksuus vaihtelee ajoittain ja tämä taas edistää kipinätyöstöä. Tässä vaiheessa vauriota havaitaan todella korkeita melu- ja värähtelyarvoja. Kipinätyöstön aiheuttama vaurio ei aina ole puhdas pyykkilautakuvio vaan vaurio voi olla yhdistelmä eri vauriotyypeistä. (Ranta 2003; Peltola 2006; Tervola 2006).



Kuva 11. Fluting eli pyykkilautaurautumisvaurio laakerin sisä- ja ulkokehällä sekä hammastuksella (Moventas Gears)

Spark track vauriossa sähkövirta polttaa pintaan yhtenäisiä mutkittelevia naarmuja (Ranta 2003) Kuvan 12 osoittamalla tavalla. Naarmut näyttävät paljaalla silmällä tarkastaessa kovan partikkelin aiheuttamilta naarmuilta, mutta elektronimikroskoopilla ne voidaan todentaa vuotovirran aiheuttamiksi. Naarmu on pohjalta sulanut, mutkitteleva ja kiiltävä (Peltola 2006). Vaihdevalmistajan kokemuksen mukaan tätä vauriotyyppiä havaitaan harvemmin vierintälaakeissa ja hammasvaihteissa. Tätä vauriotyyppiä tavataan tyypillisesti turbogeneraattorien liukulaakereissa.



Kuva 12. Spark track eli kipinäuravaurio liukulaakerin liukupinnalla (Sohreturbo).

Yllä kuvatuista vauriotyypeistä yleisimpiä ovat hammasvaihteissa frosting ja sen alamuoto fluting. Frosting voi ilmentyä niin lievänä ilmiönä, ettei sitä pystytä todentamaan ilman elektronimikroskooppia. Vaikka vuotovirran aiheuttama vaurio olisikin lievä, on sillä vaikutusta laakeroinnin ja hammastuksen laskennalliseen elinikään suorasti sekä epäsuorasti öljyn ikäännytämisen välityksellä.

2.3 Vuotovirtavaurion estäminen

Vuotovirran syntymekanismi on alkuperältään sähkötiedettä. Tässä työssä tutkitaan vuotovirtoja mekaanisesta näkökulmasta. Vuotovirtavaurion estämisellä tässä kappaleessa tarkoitetaan vuotovirran pääsyn estämistä pääasiassa mekaaniseen käyttölaitteeseen kuten hammasvaihteeseen. Teollisuudessa on usein todettu, että uusia voimansiirtoketjuja rakentaessa tai vanhojen uusinnan jälkeen on sähkömoottorin laakerointi vikaantunut. Sähkömoottorin valmistaja on korjannut laakerivaurion takuuseen. Jos kyseessä on ollut vuotovirtavaurio, valmistaja on estänyt vian uusiutumisen tyypillisesti eristämällä vikaantuneen laakerin. Tämä on johtanut usein siihen, että vaurio on siirtynyt käytettävään laitteeseen, esimerkiksi hammasvaihteeseen. Mikäli vuotovirtavauriota havaitaan sähkömoottorissa, järkevä toimenpide on estää vuotovirran syntyminen ja pääsy sähkömoottorin roottorille ja sitä kautta akselille kokonaan. Tämä edellyttää oikeaoppisia kytkentöjä sekä käyttämään kaapeloinnissa valmistajan suosittelemia ratkai-

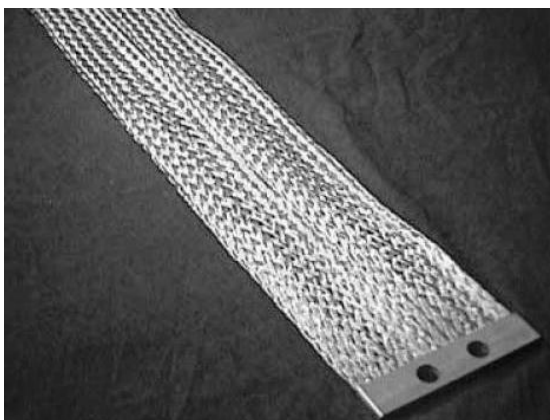
suja. Joista yhtenä esimerkkinä ABB:n tekninen opas numero 5 ”Laakerivirrät uusissa vaihtovirtakäytöissä”.

Vuotovirran tyyppi vaikuttaa siihen miten sen pääsy hammasvaihteeseen voidaan estää. Tyyppi saadaan selvitettyä vuotovirtamittauksilla. Jos tyyppi ei ole tiedossa vaarana on, että toimenpiteiden jälkeen vuotovirralla on pienempi impedanssinen reitti vaihteeseen ja se kiihdyttää vaurion etenemistä. Taulukossa 1 on esitetty toimenpidesuosituksia vuotovirtatyypeittäin hammasvaihteen suojelemiseksi. Toimenpiteillä estetään vuotovirran pääsy hammasvaihteeseen.

Taulukko 1. Toimenpidesuosituksia vuotovirtavaurion estämiseksi vaihteessa vuotovirtatyypeittäin.

Toimenpidesuositus:	Vuotovirran tyyppi		
	EDM	Akseli	Kierto
Potentiaalin tasauskaapeli + moottorin rungon maadoitus		x	
Moottorin eristetyt laakerit		x	x
Ensiöakselin maadoitus + ND-pään laakerin eristys			x
Moottorin eristetyt laakerit + ensiöakselin maadoitus	x	x	x
Eristetty kytkin	x	x	x

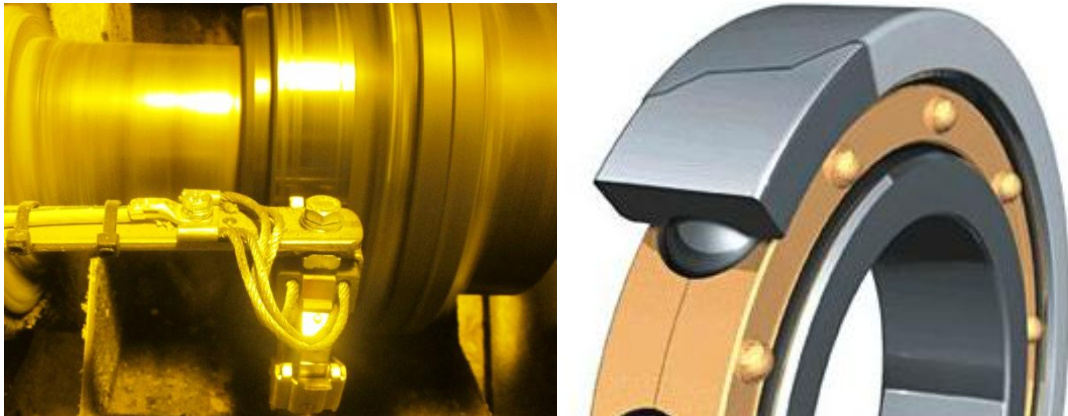
Akselin maadoitusvirran tapauksessa voidaan käyttää moottorin rungon ja vaihteen rungon välillä potentiaalin tasauskaapelia. Se muodostaa matalaimpedanssisemmän reitin moottorin runkopotentiaalin aiheuttamalle vuotovirralla, kuin vaihteen akseli ja laakerointi. Myös moottorinrungosta voidaan kytkeä lisämaadoitus tunnettuun maahan, joka estää moottorin rungon potentiaalin nousun. Kytkennöissä tulee käyttää 50–100 mm leveää kuparipunos kaapelia (ks. Kuva 13), joka tuottaa suurtaajuiselle virralle matalaimpedanssisemmän virtatien kuin pyöreä maadoituskaapeli (ABB 2000; Rockwell Automation 2002).



Kuva 13. Leveä kuparipunos kaapeli suurtaajuisen virran maadoitukseen (ABB 2000).

Myös moottorin eristettyjä laakereita voidaan käyttää estämään akselin maadoitusvirran pääsemistä vaihteistoon sekä kiertovirran muodostumista moottorissa. Eristetyt laakerit katkaisevat virtatien moottorin rungosta laakeroinnin läpi moottorin akselille. Laakeroinnin muutos ei vaikuta moottorin rungon potentiaalin kasvuun, joten laakeroinnin eristävyys kasvattama läpilyöntikestävyys on oltava riittävän suuri, ettei moottorin rungon potentiaali pääse kasvamaan sitä suuremmaksi. Tämä ratkaisu voi nostaa roottoriin varautuvaa jännitettä, joka pääsee purkautumaan käytettävään laitteeseen kuten hammasvaihteeseen. Etenkin sen kotelo on yhteydessä tunnettuun maahan. (Rockwell Automation 2002; Särkimäki 2009).

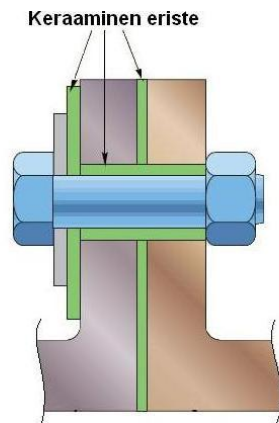
Maadoittamalla vaihteen ensiöakseli vaihteen runkoon (ks. Kuva 14) ja korvaamalla sähkömoottorin ND-pään laakeri eristetyllä laakerilla (ks. Kuva 14) saadaan katkaistua kiertovirran kulku moottorissa sekä estettyä sen pääsy hammasvaihteen hammastuksille ja laakeroinnille. Tämä ratkaisu suojelee hammasvaihdetta, mutta sähkömoottorin eristämätön laakeri voi saada vuotovirtakuormitusta, koska vuotovirta kulkee sen läpi moottorin rungosta akselille. Moottorin eristämätöntä laakeria voidaan suojella maadoittamalla akselin kyseinen pää moottorin runkoon. (Peltola 2006; Särkimäki 2009).



Kuva 14. Akselin maadoitus (Moventas Gears) ja eristetty laakeri (SKF).

Eristämällä moottorin molempien päiden laakerit sekä maadoittamalla ensiöakseli hammasvaihteen runkoon, estää se toimessaan kaikkien vuotovirtatyyppeiden pääsyn vaihteeseen sekä samalla suojelee moottorin laakereita. Kiertovirran ja akselin maadoitusvirran kulku on estetty, koska moottorin laakerit ovat eristettyjä. Kipinävirta pääsee edelleen varautumaan roottoriin ja siitä moottorin akselille, mutta se ohjataan ensiöakselin maadoituksella vaihteen runkoon ennen laakerointia ja hammastuksia. Ensiöakselin maadoituksessa on suositeltavaa käyttää useampaa maadoituspistettä, jotka on sijoitettu symmetrisesti ympäri akselia. Tällöin katetaan suurempi pinta-ala akselilta, ja lasketaan maadoitusratkaisun impedanssia. Tämä on tärkeää etenkin korkeataajuisilla vuotovirroilla, jotka kulkevat johtimien ulkopinnoilla. Moottorin rungon potentiaali pääsee nousemaan tässä ratkaisussa, jos moottorin rungon maadoitusreitit impedanssia ei madalleta.

Käyttämällä sähkömoottorin ja hammasvaihteen akselin välillä eristävää kytkintä saadaan vuotovirran pääsy vaihteeseen estettyä. Seurauksena voi olla moottorin laakeroinnin vaurioituminen, mikäli moottorille ei tehdä vuotovirtaa estäviä toimenpiteitä. Yleisesti eristävänä kytkimenä pidetään sakara- ja tappikytkimiä, joissa ei tapahdu suoraa metallikontaktia kumielementtien takia (Peltola 2006; Ahola 2011). Kenttämittauksissa on havaittu näiden eristävyyspuutteiden olevan riittämätön suuritehoisilla sähkömoottoreilla ja suuritaajuisten vuotovirtojen tapauksissa. Teoreettisesti ilmiön selittää kytkimen toimiminen kondensaattorina. Toimivaksi eristäväksi kytkimeksi on havaittu kuvan 15 esittämä erikoismallinen kytkin. Siinä on keraaminen levy kytkin puolikkaiden välissä sekä keraamisesti holkitut pultiliitokset, jotka estävät vuotovirran pääsyyn kytkimen yli käytettävän koneen akselille.



Kuva 15. Keraamisesti eristetty hammaskytkin.

Yllä esitetyt vuotovirran estämismenetelmät suojaavat pääasiassa hammasvaihdetta vuotovirtakuormitukselta. Valittaessa oikeaa vuotovirran estämismenetelmää tulee ensin todentaa mittaamalla, mikä vuotovirtatyyppi on kyseessä. Väärillä toimenpiteillä voidaan vaurion etenemistä kiihdyttää tai ohjata vuotovirta väärään paikkaan. Pahimmillaan seurauksena voi olla, että vuotovirta kulkeutuu hallitsemattomasti esimerkiksi viereiselle käyttölaitteelle ja vikaannuttaa sen. Esitetyillä toimenpiteillä ei vuotovirrasta päästä eroon, vaan estetään sen pääsy laakereille ja hammastuksille tekemällä pienempi impedanssinen reitti tai katkaisemalla reitti kokonaan.

3 KUNNONVALVONTA

Koneita käytettiin kunnossapidon alkuaikoina ”run to failure” (RTF) periaatteella eli korjausseisokki pidettiin vasta vikaantumisen jälkeen. Nykypäivänä yleisin ja tehokkain kunnossapitostrategia on kuntoon perustuva kunnossapito (CBM). Sen tärkeä osa-alue on kunnonvalvonta. Aluksi kunnonvalvontaa suoritettiin aistihavaintojen perusteella, mutta mittaustekniikan ja laitteiden kehityttyä otettiin mittalaitteet käyttöön merkittävässä määrin 1980-luvulla. Koneiden käyttöhenkilöstö suorittaa edelleen aistihavaintoihin perustuvaa kunnonvalvontaa työskennellessään samojen koneiden parissa päivittäin. Tietotekniikan kehityksen myötä mittaustulokset voidaan tallentaa tietokoneelle trendiseurantaa ja syvällisempää analysoimista varten. (Nohynek & Lumme 2007; Randall 2011).

Kunnossapito jaetaan yleisesti ehkäisevään kunnossapitoon ja korjaavaan kunnossapitoon. Ehkäisevä kunnossapito on ennen vikaantumista tehtävää ja korjaava kunnossapito suoritetaan vikaantumisen jälkeen (SFS-EN 13306 2001). Kunnonvalvonta kuuluu osaksi ehkäisevää kunnossapitoa. Sen avulla pyritään kasvattamaan tuottavuutta, suunnittelemaan kunnossapitoa, hyödyntämään tuotannon seisokit tehokkaammin, vähentämään suunnittelemattomia seisokkeja sekä pidentämään koneiden elinikää (Nohynek & Lumme 2007). Alkavat viat pyritään huomaamaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jotta niiden korjausajankohta voidaan määrittellä sekä tilata tarvittavat varaosat. Näin vältetään häiriökorjauksilta ja saadaan koneiden käyttöaste mahdollisimman korkeaksi (Vas 1993).

Kunnonvalvonta on noussut entistä suurempaan rooliin, koska nykyään tehtailla on minimoitu varakoneiden ja -osien määrä. Tämän seurauksena yksittäisen koneen kriittisyys prosessin kannalta on entistä korkeampi. Myös koneiden käyttöaste ja tuotantomäärät ovat nousseet, jolloin suunnittelemattomat seisokit aiheuttavat suuria kustannustappioita tuotantolaitoksille. Koneiden käytön kannalta niiden pyörimisnopeudet ovat nousseet ja samalla käyttökertoimet laskeneet. Nämä yhdessä johtavat nopeampaan vikojen kehittymiseen. Prosesseja ohjataan useasti nopeussäädöllä jolloin koneet toimivat laajalla nopeusalueella, siksi niiden värähtelykäyttäytyminen vaihtelee pyörimistajuuden funktiona. Käyttöhenkilöstön väheneminen tuotantolaitoksissa on vähentänyt aistinvaraisia havaintoja koneiden ja laitteiden käynnistä. (Nohynek & Lumme 2007).

Koneita, laitteita ja prosesseja valvotaan mittaamalla eri parametreja sekä analysoimalla mittaustulokset syvällisesti koneiden kunnon selvittämiseksi. Mittauksia voidaan suorittaa joko on-line mittauksina tai off-line mittauksina. On-line mittauksissa asennetaan kiinteä mittausjärjestelmä, joka mittaa valittuja parametreja jatkuvasti ja tuloksia voidaan tarkastella tiedonsiirron välityksellä mistä päin maailmaa tahansa. Off-

line mittauksissa käydään tekemässä mittaukset fyysisesti koneen luona erillisellä mittalaitteella. Off-line mittauksia suorittaa tyypillisesti tuotantolaitoksen oma tai ulkoistettu kunnonvalvontahenkilöstö ja mittaustuloksia tarkastellaan trendiseurantana. Nykypäivänä on-line järjestelmät ovat yleistyneet niiden hintojen laskemisen ja teknisen kehityksen myötä. Erityisesti energiateollisuudessa on miehittämättömiä kohteita kuten tuuli- ja vesiturbiinit, joiden kuntoa voidaan valvoa luotettavasti on-line järjestelmän ja etäyhteyden välityksellä. Kunnonvalvonnassa käytetään eri mittausten menetelmiä. Ne voidaan jaotella karkeasti diagnostiikkatekniikoiden mukaan seuraavasti:

- värähtelymittaus
- lämpökuvaus
- tribologia
 - öljyanalyysi
- sähköiset menetelmät
 - vuotovirtamittaus
- prosessi parametrit ja
- NDT –menetelmät. (Higgins et al. 2008).

Yllä mainituista kunnonvalvontamenetelmistä hammasvaihteiden kunnonvalvonnassa käytetään tämän työn yhteydessä värähtelymittauksia, tribologiaan kuuluvaa öljyanalyysiä ja sähköisiin menetelmiin kuuluvaa vuotovirtamittausta. Seuraavissa kapaleissa valittuja tekniikoita on käsitelty tarkemmin.

3.1 Värähtelymittaus

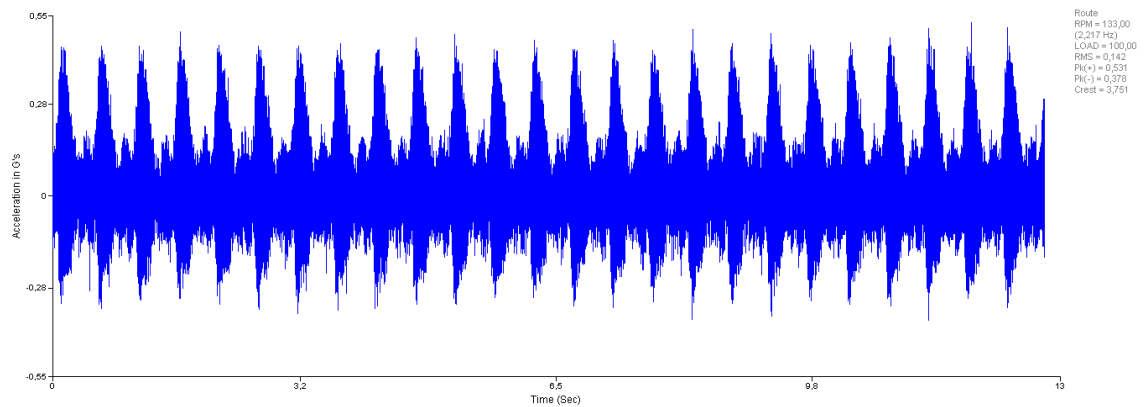
Pyörivien koneiden kunnonvalvonnassa tärkeimmäksi mittausmenetelmäksi on noussut värähtelymittaus. Kaikki koneet aiheuttavat värähtelyä toimiessaan. Yleisimpiä värähtelynlähteitä ovat epätasapaino, asennus – tai valmistusvirhe sekä komponenttien kuluminen ja vikaantuminen (Miettinen 2010). Värähtely esitetään joko aika – tai taajuustasossa ja sen voimakkuuden suureina käytetään siirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä. Nopeus on siirtymän derivaatta ajan suhteen ja kiihtyvyys siirtymän toinen derivaatta ajan suhteen. Värähtelymittausta voidaan käyttää yleisesti reittimittauksiin ja trendiseurantaan, käynninvalvontaan tai syvällisempään ongelmanratkaisuun (Nohynek & Lumme 2007). Teollisuudessa yleisimmin käytetty menetelmä on reittimittaukset ja kokonaistasojen trendiseuranta. Mitattavia kohteita on suuri määrä, joten jokaista laitetta ja konetta ei välttämättä voida analysoida erikseen aina mittauksen jälkeen. On-line värähtelymittausjärjestelmät ovat yleistyneet teollisuudessa. Ne antavat jatkuvasti tietoa koneen värähtelykäyttäytymisestä ja hälyttävät seurattavien parametrien ylittäessä asetetut hälytysrajat.

Moiventaksen suorittamat kenttävärähtelymittaukset suuntautuvat tyypillisesti teollisuudessa yksittäisiin tai pieneen määrään hammasvaihteita. Mittaustyyppiltään vä-

rähtelymittaukset ovat ongelmanratkaisua. Ongelmanratkaisumittauksissa suoritetaan samasta koneesta useampia mittauksia eri mittaasetuksilla ja mittaustulokset analysoidaan syvällisesti ongelman juurisyyn ja sen ehkäisyn selvittämiseksi. Hammasvaihteiden värähtelymittauksissa käytetään tyypillisesti spektri-, aikataso- sekä korkeiden taajuuksien menetelmiä kuten PeakVue -analyysiä tai verhoikäyräanalyysiä. Värähtelyanalyysointina käytetään tyypillisesti kaksikanavaista analyysointia ja antureina ICP-kiihtyvyyssantureita. Kaksikanavaisella mittalaitteella pystytään toteuttamaan sama mittaus yhtäaikaaisesti kahteen eri suuntaan samasta mittapistestä, jolloin säästetään mittausaikaa. Sillä voidaan myös mitata vaihe-eroa kahden pisteen välillä.

3.1.1 Aikataso

Värähtelymittauksissa mitataan ensin aikatasosignaali. Mittauksen jälkeen sitä käsitellään analyysointiosuimissa tai analyysointiohjelmistossa eri menetelmillä halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Aikataso koostuu joukosta sinimuotoisia signaaleja, joilla on eri taajuudet, amplitudit sekä vaihekulmat (Miettinen 2010). Aikatasossa kaikki värähtely on summutuneena samaan signaaliin, joka tekee sen analyysoinnista haasteellista. Hammasvaihteiden kunnonvalvonnassa aikataso on erittäin hyödyllinen. Sillä siitä havaitaan iskumaiset ilmiöt, jotka ovat vaihteen alkavan vikaantumisen kannalta oleellisia (ks. Kuva 16).



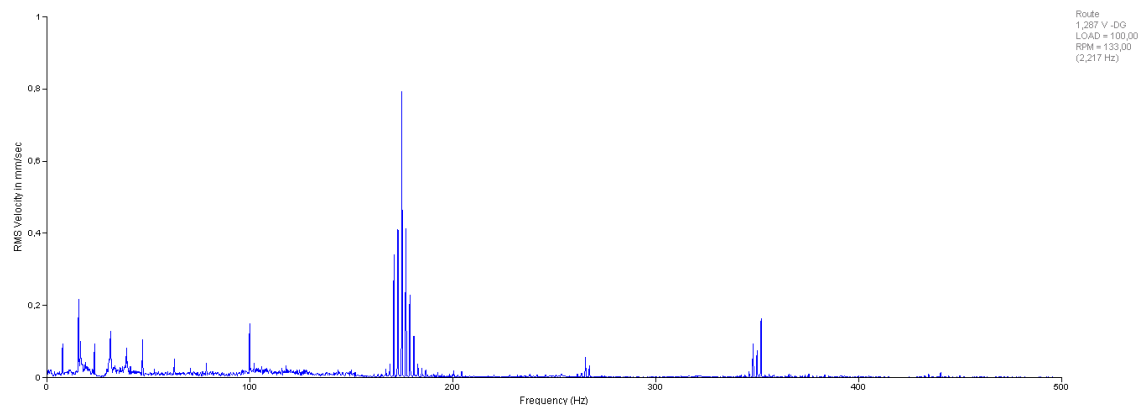
Kuva 16. Iskumainen aikatasosignaali hammasvaihteen toisioakselilta (Moventas Gears).

Aikatasosignaalin esitetään tyypillisesti kiihtyvyyden ajan funktiona, siinä esiintyvien ilmiöiden taajuudet voidaan laskea erotusajan perusteella. Aikatason muodon ja iskujen lisäksi siitä voidaan laskea tunnuslukuja, näistä yleisempiä ovat: värähtelyn huippuarvo (Peak), huipusta huippuun -arvo (Peak-to-Peak), tehollisarvo (RMS) sekä huippukerroin (Crest-factor). Signaali voidaan myös tahdistaa ja keskiarvoistaa akselin pyörimiseen, jolloin hammasvaihteesta saadaan signaali jokaisesta tahdistetun akselin hammaspyörän hampaasta. Aikatason pituus määräytyy signaalin näytepituudesta, joka on 2^n kappaletta. Tyypillisiä kokoja ovat 1024, 2048 ja 4096. Hitaasti pyörivien akseli-

den, kuten hammasvaihteiden toisioakseleiden tapauksessa käytetään jopa huomattavasti suurempaa näytenpiste määrää. Näin saadaan samaan aikatasosignaaliin vähintään neljästä kuuteen akselin pyörimiskierrosta ja havaitaan mahdollisesti pyörimistaajuudella toistuvat ilmiöt. (Nohynek & Lumme 2007; Miettinen 2010).

3.1.2 Värähtelyspektri

Värähtelyspektrin muodostamista varten tarvitaan aikatasosignaali. Siitä muodostetaan taajuustasoinen esitys eli spektri laskennallisesti Fourier-muunnoksella (FFT). Muunnoksen tekevät mittauksiin käytettävät analysointorit automaattisesti. FFT- muunnoksella aikatasosignaali puretaan yksittäisiksi siniaalloiksi. Jokainen siniaalto edustaa tiettyä taajuutta ja näin aikataso saadaan muunnettua taajuustasoksi. Spektri esitetään yleensä ns. amplitudispektrinä, jossa ei ole vaihetietoa. Spektrissä esitetään värähtelyn siirtymä, nopeus tai kiihtyvyys taajuuden funktiona. Värähtelysuureen valintaan vaikuttaa tarkasteltavan koneen pyörimistaajuus. Värähtelyn suurena käytetään yleisimmin nopeutta, koska se ei korosta matalia eikä korkeita taajuuksia. Siirtymä esiintyy voimakkaana matalilla taajuuksilla ja kiihtyvyys vastaavasti korkeilla taajuuksilla. Koneenosien pyörimisnopeudet ja tekniset tiedot, kuten hampaiden lukumäärät ja laakerityypit tulee olla tiedossa. Näin voidaan spektristä erottaa jokaiselta koneen eri osalta tuleva värähtely omalla taajuudellaan ja värähtelyn voimakkuutta kuvaavalla amplitudilla, kuten kuvassa 17 on havainnollistettu. (Miettinen 2010; Randall 2011)



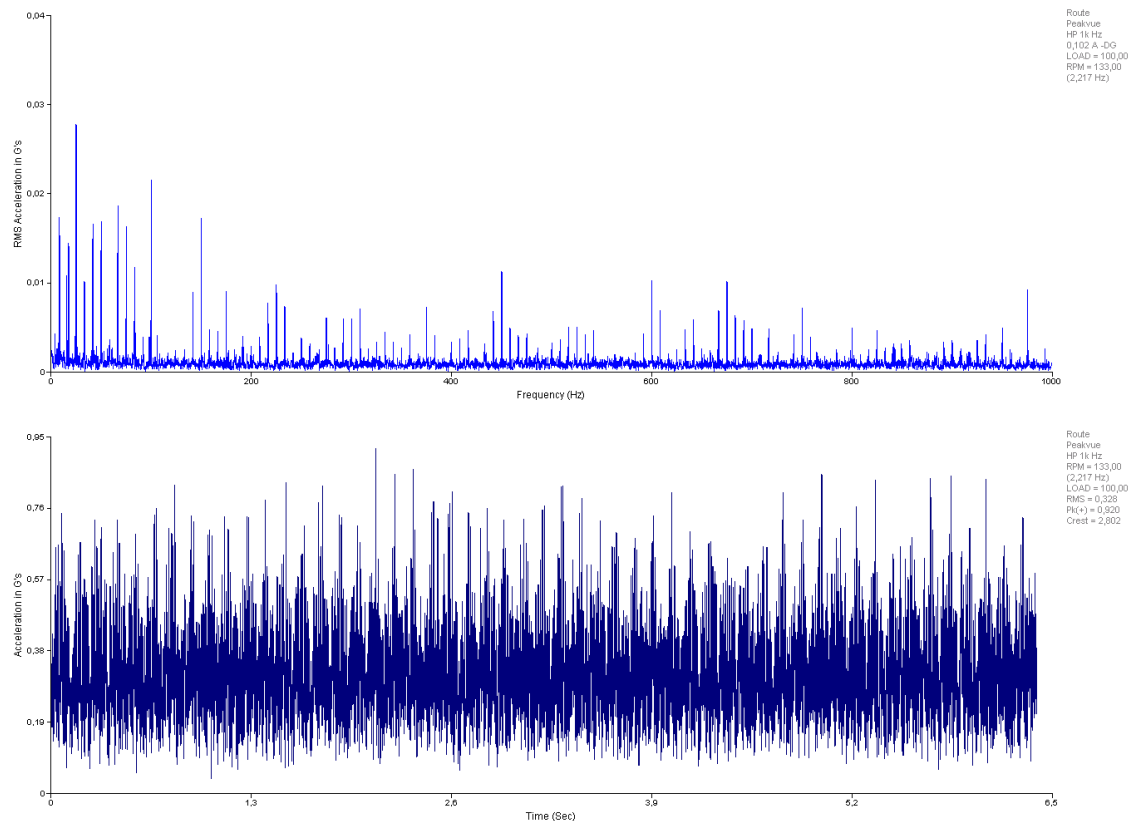
Kuva 17. Nopeusspektri hammasvaihteen toisioakselilta (Moventas Gears).

Teollisuudessa yleisin käytetty värähtelyn tunnusluku on nopeuden kokonaistason RMS-arvo taajuuskaistalla 10-1000 Hz ja alle 600 rpm pyörivillä koneilla 2-1000 Hz. Tällä arvolla seurataan koneiden kunnan muuttumista trendiseurantana. Sen käytöstä ongelmanratkaisu tapauksissa ei ole hyötyä, koska se ei kerro mikä tai mitkä taajuudet ovat aiheuttaneet kokonaistason nousun. Ongelmanratkaisumittauksissa spektrejä mitataan eri taajuuskaistoilla, jotta havaitaan tarkasteltavat matala- ja korkeataajuiset ilmiöt. ICP – kiihtyvyyssantureita käytettäessä suurin tarkastelutaajuus on tyypillisesti 10 kHz. Spektri mitataan yleensä keskiarvostettuna eli mitattavasta kohteesta mitataan use-

ampi näyte, joista analysaattori laskee keskiarvostetun spektrin. Tällä tekniikalla yksittäisten ilmiöiden, kuten iskujen merkitys häviää. Värähtelyspektrin tarkkuuteen vaikuttaa käytettyjen spektriviivojen määrä. Viivojen määrään vaikuttaa aikatason näytenäytteiden määrä sekä tarkastelutaajuuden ja keruutaajuuden suhde. Mitä tarkempi resoluutio spektrillä on sitä, paremmin lähellä toisiaan olevat taajuudet voidaan erottaa toisistaan. Tämä tulee olennaiseksi esimerkiksi hammasvaihteiden hitaasti pyörivillä akseleilla niiden ryntötaajuuksiin moduloituneiden akselinpyörimistaajuuksien sivunauhojen osalta.

3.1.3 PeakVue -analyysi

PeakVue -analyysi on värähtelyanalysaattoreita valmistaman Emersonin patentoima lyhytkestoisten korkeiden taajuuksien analysointimenetelmä. Lyhytkestoisia korkeataajuisia purskemaisia ilmiöitä syntyy metalli-metalli kosketuksissa syntyvien jännitysaaltojen seurauksena. Tyypillisesti jännitysaaltoja syntyy hammasvaihteissa alkavissa laakerivaurioissa, puutteellisessa voitelutilanteessa sekä alkavissa hammasvaurioissa. Aikatasosignaali jaetaan mittausasetuksien mukaisesti aikajaksoihin ja jokaiselta aikajaksolta valitaan huippuarvo. Ylipäästösuodattimen tai kaistapäästösuodattimen avulla matalataajuiset pyörimistaajuiset värähtelykomponentit suodatetaan pois, jolloin niiden amplitudien suuruus ei vaikuta lopputulokseen. PeakVue -aikatasosignaali on tasasuunnattu ja (ks. Kuva 18) koostuu siis alkuperäisen suodatetun aikatasosignaalin aikajaksojen huippuarvoista. (Reeves 1999).



Kuva 18. PeakVue -spektri ja -aikataso hammasvaihteen toisioakselilta (Moventas Gears).

Saadusta PeakVue -aikatasosignaalista voidaan muodostaa FFT -muunnoksella spektri, kuten kuvassa 18 on esitetty. PeakVue -menetelmä on käyttökelpoinen myös hyvin hitaasti pyörivillä koneilla, jopa alle 1 RPM, kuten joidenkin hammasvaihteiden toisioakselit. Sen mittaaminen ei vaadi erikoisvalmisteista anturia. Siihen soveltuu tavallinen kiihtyvyysanturi, jonka ylärajataajuus on 5 – 10 kHz. Eräs toinen korkeiden taajuuksien diagnosointimenetelmä on verhokäyräanalyysi. Siinä mitattua signaalia käsitellään ja suodatetaan, jotta eri vaurioista tulevaa värähtelyä saadaan korostettua alkuperäisestä signaalista. Verhokäyräspektrissä esitetään värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvon voimakkuus taajuuden funktiona. Värähtelyn kiihtyvyyden voimakkuuden yksikönä käytetään kiihtyvyyden huippuarvoa gE.

3.1.4 Hammasvaihteen värähtely

Hammasvaihteessa havaitaan useita eri taajuuskomponentteja, koska se sisältää useita eri pyörimisnopeuksisia akseleita, laakerityyppejä sekä hammasryntöjä ja näiden modulaatioita. Yleisimmät hammasvaihteessa esiintyvät pakkovärähtelytaajuudet ovat:

- akseleiden pyörimistaajuudet
- ryntötaajuudet
 - sivunauhat
- hammastoistotaajuus ja
- laakereiden ohitustaajuudet.

Akseleiden pyörimistaajuiset ilmiöt esiintyvät tyypillisesti ensiö- tai toisioakselien pyörimistaajuudella. Ne liittyvät tyypillisesti akselilla esiintyvään linjausvirheeseen, epätasapainoon tai väljyyteen.

Ryntötaajuuden amplitudin suuruus ei suoranaisesti kerro hammasvaihteen viasta. Sen suuruuteen vaikuttaa hampaiden lukumäärä, välityssuhde, valmistustarkkuus, voitelutilanne sekä vaihteen kuormitus. Trendiseurannassa vakiokuormitteisissa kohteissa ryntötaajuuden amplitudia voidaan käyttää karkeana voitelutilanteen seurantasuurena. Ryntötaajuus saadaan laskettua kertomalla akselin hampaiden lukumäärä sen pyörimistaajuudella. (Miettinen 2010).

Sivunauhojen ilmaantuminen ryntötaajuuden ympärille on merkki vikaantumista. Ne syntyvät amplitudimodulaation seurauksena, jossa kantoaaltona toimii ryntötaajuus ja moduloivana taajuutena vikaantuneen hammastuksen akselin pyörimistaajuus. Sivunauhat esiintyvät spektrissä molemmiin puolin ryntötaajuutta, moduloituneen taajuuden ja sen harmonisten komponenttien etäisyydellä ryntötaajuudesta. Ryntötaajuuden sivunauhoja aiheuttavat tyypillisesti seuraavat hammastuksien vikaantumismuodot; kuluminen, epäkeskeisyys, hammastettujen komponenttien välinen linjausvirhe sekä haljennut tai murtunut hammas (Mobius institute 2012).

Hammastoistotaajuus syntyy, kun hammasryntöparin tietyt ja samat hampaat kohtaavat hammasrynnössä. Ilmiön voi aiheuttaa yksittäisen hampaan valmistusvirhe tai kuluneisuus. Vika on aluksi yhdessä hampaassa, mutta voi edetä kiertävän hammaskosketuksen välityksellä myös muihin hampaisiin. Hammastoistotaajuus on tyypillisesti hyvin matalataajuinen ja se havaitaan parhaiten aikatasoanalyysillä. Taajuus saadaan laskettua jakamalla käyttävän akselin pyörimistaajuus käytettävän akselin hammasluvulla. (Miettinen 2010; Mobius institute 2012).

Hammasvaihteissa käytetään pääsääntöisesti vierintälaakerointia. Joissain erikoistapauksissa kuten suuritehoisissa laivavaihteissa ja kaasuturbiinien vaihteissa sekä kompressoreissa käytetään myös liukulaakerointia. Vierintälaakerin vikaantumisen alkaessa esiintyy satunnaisia korkeita taajuuksia, tyypillisesti useita kymmeniä kilohertsiä. Vikaantuvan komponentin vikaantunut kohta herättää laakerikomponentin ominaistaajuuden joutuessaan kontaktiin toisen komponentin kanssa. Ominaistaajuudet ovat

suuruudeltaan 200 – 2000 Hz. Laakerivauriota ei pystytä kohdistamaan satunnaisten korkeiden taajuuksien tai ominaistaajuuksien perusteella. Vierintälaakerin jokaisella komponentilla; sisä- ja ulkokehällä, vierintäelimellä sekä pitimellä on niiden rakenteesta johtuva laskennallinen ohitustaajuus. Niiden perusteella laakerivaurio voidaan kohdistaa värähtelymittauksen perusteella. Alkava laakerivaurio voidaan jo alkuvaiheessa havaita korkeataajuisilla menetelmillä kuten PeakVue analyysillä ja kohdistaa laakerikomponenttien ohitustaajuuksien perusteella. (Miettinen 2010; Mobius institute 2012).

3.2 Tribologia

Tribologia määritellään seuraavasti: ”Tribologia on tieteenala, joka käsittelee toisiinsa nähden liikkuvien pintojen vuorovaikutuksia ja niihin liittyvää teknologiaa eli pääasias- sa kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviä ilmiöitä.”. Hammasvaihteessa tribologiaa kosketuksia esiintyy laakeroinneissa, joilla ohjataan mekaanisesti kappaleen liikerataa sekä hammasrynnöissä välitettäessä voima akselilta toiselle akselille (Kivioja et al. 2007).

Tämän työn yhteydessä tribologisena kunnonvalvonta menetelmänä käytetään öljyanalyysiä. Voiteluöljy on erittäin kriittinen hammasvaihteen toiminnan kannalta, koska se voitelee laakerit ja hammasrynnöt. Jos voitelu ei toimi hammasvaihteessa vikaantuu se hyvin nopeasti ja pinnat kuluvat käyttökelvottomiksi. Kulumisessa voiteluöljyn sekaan irtoaa kulumispartikkeleita laakeroinneista sekä hampaista. Voiteluöljyn avulla voidaan todentaa hammasvaihteen alkava vikaantuminen hyvin varhaisessa vaiheessa. Hammasvaihteen on oltava omassa voitelupiirissä, jotta öljyanalyysin tulokset voidaan kohdentaa varmasti kyseiseen vaihteeseen. Mikäli hammasvaihte on kiertovoitelun piirissä, on partikkelien identifioiminen eri koneiden välillä todella haastavaa. Voiteluöljyn kuntoa voidaan valvoa off-linena, jolloin otetaan määrävälein öljynäyte, joka analysoidaan laboratoriossa. Tai on-linena, jossa osa öljystä johdetaan analysointiyksikköön, joka suorittaa analyysin reaaliajassa ja öljy johdetaan takaisin öljykiertoon. Myös in-line valvonta on mahdollista, siinä koko öljymäärää testataan jatkuvasti (Parikka & Vidqvist 2004).

Voiteluaineen sisältämät epäpuhtaudet voidaan jakaa kolmeen luokkaan alkupe- ränsä mukaan: ulkopuolelta tulleet epäpuhtaudet, kulumispartikkelit ja öljyjen kemialli- sissa reaktioissa synnyttämät epäpuhtaudet (Niilivuo 2003). Voiteluöljyanalyysillä pyri- tään selvittämään: ovatko öljyn voiteluominaisuudet pysyneet samoina, onko öljyn puh- tausluokka vaadittavalla tasolla sekä mahdolliset koneen tarvitsemat huoltotoimenpiteet. Huonokuntoinen ja epäpuhdas öljy lisää mekaanista kulumista sekä heikentää voiteluti- lannetta kappaleiden välillä. Nämä yhdessä kiihdyttävät kulumista ja huonontavat öljyn laatua entisestään. Öljyanalyysimenetelmät jaotellaan perusominaisuuksien analysointiin, partikkelien analysointiin sekä kulumismetallien analysointiin.

3.2.1 Öljyanalyysimenetelmät

Öljyn perusominaisuuksiin kuuluvat ulkonäkö, viskositeetti, TAN -arvo eli kokonaisu happoluku, kiintoainepainoprosentti sekä vesipitoisuus. Öljynäytteen väriä, sameutta ja epäpuhtauksien määrää voidaan visuaalisesti verrata vastaavaan uuteen öljyyn. Analysointi on hyvin karkea, mutta saattaa antaa viitteitä hapettuneesta tai vesipitoisesta öljystä.

Voiteluöljyn viskositeetin tulisi pysyä samana koko öljyn käyttöiän. Sen muutos heikentää voitelukalvoa, joka johtaa mahdollisesti alkavaan vikaantumiseen. Viskositeetin nousuun vaikuttaa öljyn hapettuminen ja runsas epäpuhtauspitoisuus. Sen lasku voi aiheutua lisäaineina olevien polymeerienn leikkautumisesta, ohuesta liuottimesta tai matalampi viskoosisesta öljystä tarkasteltavan öljyn seassa. (Kivioja et al. 2007).

TAN -arvo kertoo öljyn sisältämien happamien aineiden määrän. Se on riippuvainen perusöljystä ja lisäaineista, joten sen suuruus vaihtelee öljytyypeittäin. Sitä valvotaan tyypillisesti dielektrisyysvakion mittauksella, jonka pohjalta TAN – arvo voidaan määrittää. Dielektrisyysvakio kuvaa väliaineen eristävyyttä eli kykyä eristää vastakkaisia varauksia toisistaan. Dielektrisyysvakiota voidaan mitata kapasitanssin avulla. (Parikka & Vidqvist 2004; Higgins et al. 2008).

Kiintoainepitoisuus kertoo suodattimeen jääneen kiintoaineen pitoisuuden painoprosentteina suodattimen läpäisystä öljymäärästä. Suuri öljyn kiintoainepitoisuus voi olla merkki koneen kulumisesta, ympäristöstä/prosessista koneen sisään kulkeutuneesta pölystä tai huonosti toimivasta suodatuksesta.

Vettä voi esiintyä öljyn seassa liuenneena, emulgoituneena tai vapaana vetenä. Laboratorio analyysillä saadaan selvitettyä öljyn vesipitoisuus tarkasti. On-line ja in-line järjestelmillä mitataan anturin kapasitanssin muutoksen avulla öljyn kyllästymispistettä, jossa vesi erottuu öljystä. (Parikka & Vidqvist 2004).

Voiteluöljyn seassa on aina partikkeleita, teollisuudessa käytetään tyypillisesti öljynsuodattimina 20 µm suodatusluokan suodattimia. Koneenrakentaja ilmoittaa voiteluöljyltä vaaditun puhtausluokan koneen voiteluohjeessa. Öljyn puhtausluokkana käytetään yleisesti ISO 4406:1999 – standardin määrittämää luokitusta. Standardi ilmoittaa kumulatiivisen hiukkasten määrän kokoluokittain suhteutettuna tilavuuteen. Standardissa partikkelit jaetaan seuraaviin kokoluokkiin; > 4 µm / > 6 µm / > 14 µm. Joten näytteen tilavuus tulee olla tarkalleen tiedossa, jotta puhtausluokan analysointi onnistuu todenmukaisesti. Kulumisvaurion alkuvaiheessa pinnoilta irtoaa useiden kymmenien tai jopa satojen mikronien kokoisia partikkeleita. ISO 4406:1999 – standardi ei erottele suuria partikkeleita vaan ne kuuluvat kokoluokkaan yli 14 µm, mutta eivät todennäköisesti vaikuta puhtausluokkaan, koska niitä on määrällisesti vähän. Hiukkaskokoerotte- lussa partikkelit jaetaan kahdeksaan eri kokoluokkaan, joista suurin kokoluokka on yli 75 µm. Kyseisellä jaottelulla voidaan valvoa suuria kulumispartikkeleita erikseen. (ISO4406 1999).

Kulumismetallianalyysin avulla saadaan eroteltua partikkelit niiden materiaalin mukaan. Analysoitaessa kulumismetallipartikkeleita tulee tuntea koneenosien kom-

ponentit sekä tietää mistä raaka-aineista ne on valmistettu. Silloin partikkelien perusteella voidaan kohdentaa missä koneenosassa kulumista on tapahtunut. (Higgins et al. 2008).

3.3 Sähköiset menetelmät

Kunnonvalvonnalla on tyypillisesti ymmärretty lähinnä mekaanisten laitteiden ja koneiden värähtelymittauksiin perustuva valvonta. Teollisuuslaitoksissa työskentelevät kunnonvalvojat ovat pääsääntöisesti taustaltaan konetekniikan ammattilaisia, joten sähköiset ilmiöt ja niiden tulkinta eivät ole yleisesti tunnettuja. Teollisuudessa on pääsääntöisesti käytössä oikosulkumoottoreita sekä taajuusmuuttajakäyttöjä, joiden yleisempiä vikoja ovat staattoriviat, käämitysviat, roottorivauriot sekä laakeriviat. Näiden havaitsemiseksi käytetään sähköisiä ja magneettisia menetelmiä kuten; staattorivirta, sähköinen vääntömomentti, teho, aksiaalivuo, käämin päädyn hajavuo, ilmävälivuo sekä virtamittaus (Ahola & Keski-Säntti 2004). Tässä työssä perehdytään hammasvaihteiden vikaantumiseen jonka aiheuttaa vuotovirtakuormitus. Sen sähköisenä mittaamenetelmänä käytetään vuotovirtamittausta.

Vuotovirtamittauksissa käytetään Rogowskin keloja, jotka mittaavat magneettikentän muutosta ja toimivat AC – sähkövirran mittaamiseen. Niiden avulla saadaan mitattua todellinen hammasvaihdetta kuormittava vuotovirta mittaushetkellä. Lisäksi saadaan määritettyä vuotovirran tyyppi ja kulkureitit, joiden perusteella voidaan tehdä oikeat toimenpiteet vaurion syntymisen estämiseksi. Toimenpiteiden jälkeen tulee suorittaa tarkastusmittaus. Sen perusteella nähdään toimenpiteiden toimivuus ja voidaan määrittää tarvittaessa lisätoimenpiteitä. Vuotovirran todentamisen lisäksi voidaan mitata kahden eri pisteen välillä potentiaaliero, jonka perusteella arvioidaan toimenpiteiden tarvetta ja saadaan kartoitettua vuotovirtavaurion todennäköisyyttä.

4 KENTTÄMITTAUKSET

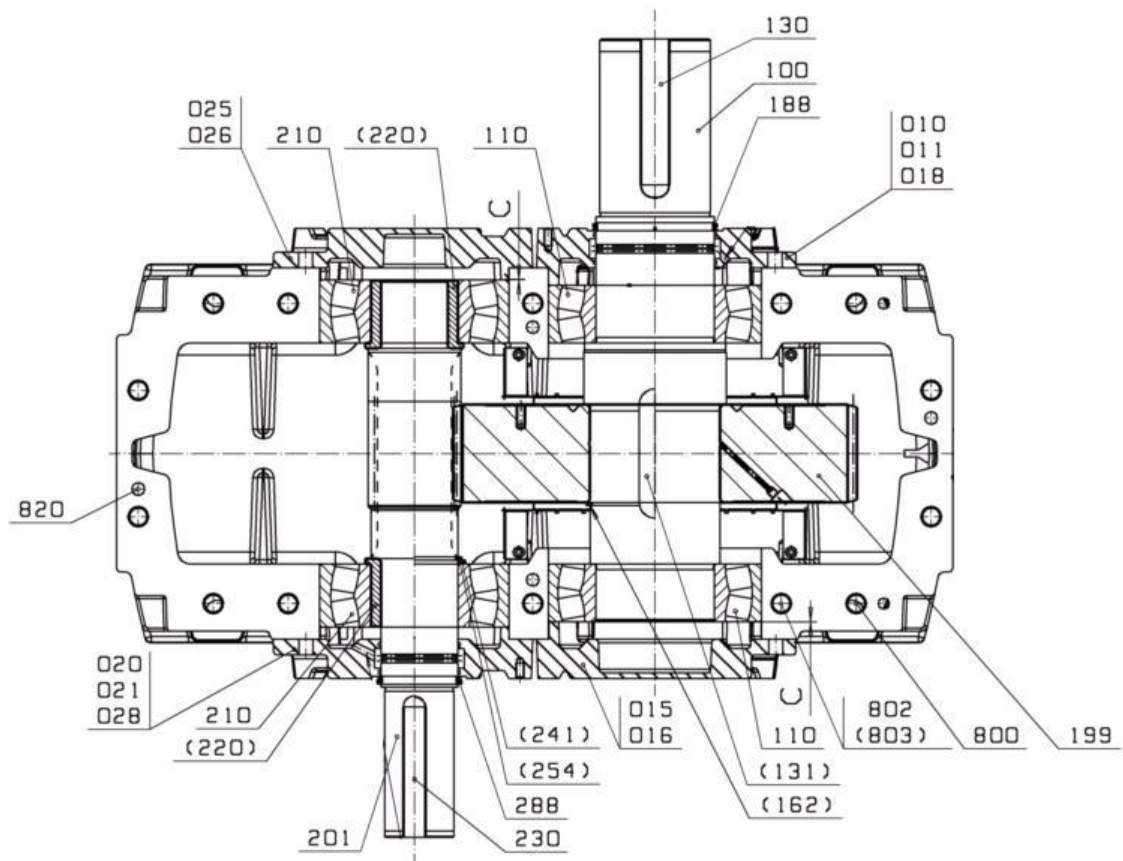
Kunnonvalvonnan kenttämittauksilla tarkoitetaan tämän työn yhteydessä hammasvaih-teen kunnonvalvonta mittauksia, jotka suoritetaan vaihteen tuotantoajan aikana. Tämän työn yhteydessä perehdytään yhteen esimerkkitapaukseen mittaustuloksineen syvällises-ti. Sekä verrataan sen tuloksia muiden tapauksien tuloksiin. Mittausmenetelminä käytetään värähtely- ja vuotovirtamittausta. Öljyanalyysiä ei voitu käsitellyissä esimerkkitapauksissa käyttää, koska vaihteiden voitelu oli toteutettu kiertovoitelulla. Tässä kappaleessa esitellään esimerkkitapauksessa mitattu kohde ja sen vauriohistoria sekä mittauk-siin käytetty mittauskalusto ja sillä suoritettut mittaukset.

4.1 Esimerkkitalpauksen kohde

Vuotovirtamittaustapauksista suurin osa on tullut selville vasta, kun asiakas tai Moventaksen vaihdeasiantuntija on todennut vaihteen vikaantumisen ja lähettänyt sen Moventaksen huoltoverstaalle korjattavaksi. Vaihteen purkuvaiheessa vaihteen kotelo avataan ja akselit hammaspyörineen poistetaan kotelosta. Akseleiden laakeroinnit puretaan, jotta niiden kaikki komponentit voidaan visuaalisesti tarkastaa. Laakerointien purkuvaiheessa havaitaan tyypillisesti pitkälle edennyt kipinätyöstön aiheuttama fluting -vaurio. Tämä vauriotyyppi on helpoin tunnistaa visuaalisesti, kuten kappaleessa 2.2.2. todettiin. Mikä-li pinnat ovat harmaantuneet, analysoidaan vaurio hyvin helposti normaaliksi kulumi-seksi ilman lisätutkimuksia. Vuotovirtavaurion havaitsemisen jälkeen asiakkaaseen ol-laan yhteydessä, kerrotaan vaurion epäilty juurisyy ja suositellaan vuotovirtamittauksia, jotta ongelma saadaan todennettua ja poistettua.

Esimerkkitalpauksen mittauskohde on prosessiteollisuuden laitoksessa telaa käyt-tävä hammasvaihde, Moventaksen mallimerkinnältä D1PSF50 (ks. Kuva 19). Vaihdetta käytetään tasavirtamoottorilla, jonka nimellinen pyörimisnopeus on 1500 1/min. Ham-masvaihde on yksiportainen vinohampainen jalkavaihde, jonka tekniset tiedot ovat alla:

- akseliväli 250 mm
- $z_1 = 18$ ja $z_2 = 90$, välitys 5, alentava
- käyttöteho 202 kW
- toisiomomentti 1600 Nm
- ensiöakselin pyörimisnopeus 1570 1/min ja
- käyttökerroin 2,6.



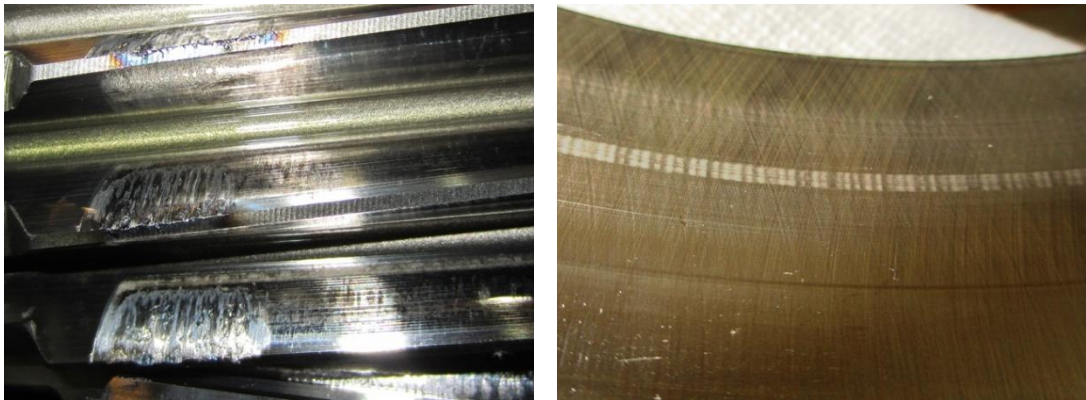
Kuva 19. D1PSF50 yksiportainen jalkavaihte (Moventas Gears).

Vaihteen molemmat akselit on laakeroitu pallomaisilla rullalaakereilla. Voitelu on toteutettu painevoitelulla ja se on liitettyä tehtaan kiertovoitelujärjestelmään. Voiteluöljynä käytetään ISO VG220EP luokan öljyä. Mittauskohteessa havaittiin sähkömoottorin rungossa poikkileikkaukseltaan pyöreä maadoituskaapeli. Vaihteen ja sähkömoottorin välillä ei ollut potentiaalintasauskaapelia. Eivätkä hammasvaihte ja sähkömoottori olleet sijoitettu samalle johtavalle alustalle. Moottorin ja vaihteen ensiöakselin välillä on sähköä johtava hammaskytin. Asiakkaan kanssa pidetyssä aloituspalaverissa suunniteltiin asennettavaksi maadoitusharja (ks. Kuva 14) sähkömoottorin akselin D – pään ja moottorin rungon välille. Maadoitusharjan toimivuus todennettiin vuotovirtamittauksien yhteydessä.

4.2 Mittauskohteen historia

Koneenrakentaja tilasi loppuasiakkaalle uuden vaihteen Moventakselta vuonna 2009 konelinjan uusintaprojektin yhteydessä. Uusi hammasvaihte toimitettiin koneenrakentajalle vuoden 2010 alkupuolella ja se asennettiin käyttökohteeseen kesällä 2010. Koneelinjan ylösajon aikana ei havaittu epänormaalia värähtelykäyttäytymistä tai muita poikkeavia ilmiötä käyttöpisteessä. Loppuasiakas tilasi Moventakselta varavaihteen käyttö-pisteeseen alkuperäisen vaihteen alkaneen hammastuksen vikaantumisen diagnosoimi-

sen jälkeen marraskuussa 2011. Varavaihte toimitettiin loppuasiakkaalle tammikuun lopulla 2012. Loppuasiakas lähetti alkuperäisen vaihteen Moventaksen huoltoverstaalle kunnostettavaksi kesällä 2012, hammasvaihte oli ollut käytössä kaksi vuotta ja yhden kuukauden. Vaihteen purun yhteydessä kaikki välitysosat tarkastettiin sekä laakerit purettiin ja niiden kaikki komponentit tarkastettiin. Ensiöakselin hammastuksella ja toisioakselin hammaspyörän hammastuksella (ks. Kuva 19 osat 201 ja 199) sähkömoottorin puoleisessa reunassa havaittiin voimakasta tahmaumaa (ks. Kuva 20) ja lämpövauriota. Niiden pääteltiin syntyneen huonon voitelun seurauksena. Toisioakselin sähkömoottorin puoleisen laakerin ulkokehällä havaittiin fluting vauriojälkiä, jonka perusteella epäiltiin vuotovirtaa. Hammastusvaurion juurisyyn osasyllisenä ei pidetty vuotovirtaa vaurio jäljen perusteella. Sähkövirran on kuitenkin täytynyt kulkea hammasrynnön läpi, koska se on maadoittunut vaihteen runkoon toisioakselin laakerin kautta (ks. Kuva 19 osa 110). Huollon yhteydessä vaihteen kotelon akselilinjat tarkistusmitattiin 3D – mittakoneella ja niiden todettiin olevan toleranssien mukaiset. Vaihteen ensiöakseli ja toisiohammaspyörä, sekä kaikki laakerit ja tiivisteet uusittiin huollon yhteydessä.

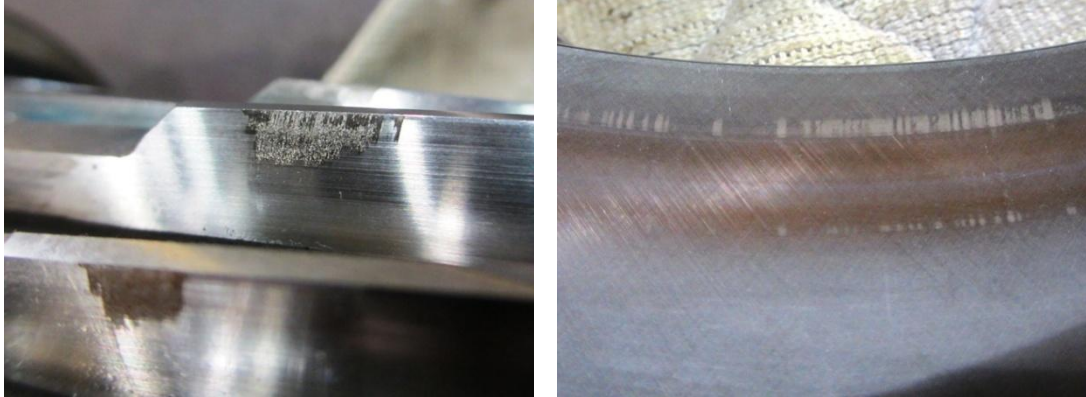


Kuva 20. Ensiöakselin hammastuksen vaurio ja toisioakselin laakerin ulkokehän fluting eli pyykkilautaurautumisvaurio (Moventas Gears).

Loppuasiakas asensi varavaihteen käyttöpisteeseen kesällä 2012. Asiakkaan suorittamien lähtötasovärähtelymittauksien mukaan hammasvaihte oli kunnossa. Neljän kuukauden kuluttua loppuasiakas ilmoitti Moventakselle, että vaihteen värähtelytasot ovat nousseet ja vaihteen hammastuksessa on havaittu tahmaamaan viittaava jälki ensiöakselin sähkömoottorin puoleisessa reunassa. Moventas lähetti asentajan tarkastamaan vaihteen marraskuun alussa 2012, hammastusvaurion perusteella hammasvaihte päätettiin vaihtaa kesällä 2012 huollettuun vaihteeseen seuraavassa konelinjan seisokissa.

Tammikuun alussa 2013 vikaantunut varavaihte vaihdettiin huollettuun käyttöpisteeseen alkuperäiseen vaihteeseen. Varavaihte ehti olla käytössä ainoastaan kuusi kuukautta. Vaihte toimitettiin Moventaksen huoltoverstaalle purettavaksi ja analysoitavaksi juurisyyn selvittämistä varten. Vaihteessa havaittiin vastaavia vauriojälkiä kuin alkuperäisessä vaihteessa kesällä 2012. Tällä kertaa hammastusvauriot

olivat jättökyljellä eivätkä vetokyljellä. Ensiöakselin hammastus sekä toisioakselin hammaspyörän hammastus olivat tahmaantuneen näköisiä molemmista hammastuksen reunoista (ks. Kuva 21). Toisioakselin sähkömoottorin puoleisen laakerin ulkokehällä havaittiin selviä merkkejä vuotovirran aiheuttamasta fluting-vauriosta (ks. Kuva 21).



Kuva 21. Varavaihteen ensiöakselin hammastuksen vaurio sekä toisioakselin laakerin ulkokehän fluting- eli pyykkilautaurautumisvaurio (Moventas Gears).

Huollon yhteydessä vaihteen ensiö- ja toisioakseli sekä kotelo tarkistusmitattiin 3D-mittakoneella mahdollisten valmistusvirheiden todentamiseksi. Toisioakselin hammaspyörän sekä kotelon akselilinjojen todettiin olevan valmistustoleranssien mukaiset. Ensiöakselin hammastuksen jättökyljellä paljastui muotovirhe. Sen molempien päiden reuna-alueilla joissa tahmaumaa havaittiin esiintyi hammasprofiilissa ulkoneva patti, joka oli korkeudeltaan 0,02 mm. Huoltotoimenpiteenä ensiöakselin hammastus ja toisioakselin hammaspyörän hammastuksen jättökyljet hiottiin ja kaikki laakerit ja tiivistet uusittiin. Esimerkkitapauksen vaihdetyypin hammasvälyksen toleranssialue on 0,19 – 0,49 mm, joten pattien kohdalla ei mekaanista kosketusta jättökyljellä pääse tapahtumaan. Ne kuitenkin luovat vuotovirralla teoreettisesti pienempi impedanssien reitin, koska pinnat ovat lähempänä toisiaan niiden erkaantuessa rynnöstä ja pinta-alaa on vähemmän, jolloin kyseisen maadoitusreitien kapasitanssi pienenee. Jäljet ovat todennäköisesti syntyneet vuotovirran seurauksena, koska hammasvaihdetta käytetään vain yhteen pyörimissuuntaan. Eivätkä jättökyljet olleet mekaanisessa kosketuksessa toisiinsa.

Kummassakaan vauriotapauksessa hammastuksella ei havaittu visuaalisesti selvää vuotovirta vauriotyyppiä, elektronimikroskooppikuvauksia ei suoritettu. Sähkövirta on ollut vähintäänkin osasyllisenä molemmissa vauriotapauksissa, koska molemmilla kerroilla toisioakselin laakerin ulkokehällä havaittiin selvä fluting-vauriojälki. Virran reitti on kulkenut ensiöakselilta toisioakselille hammasrynnön välityksellä ja maadoittunut vaihteen koteloon toisioakselin moottoripuoleisen laakerin lävitse. Oikeilla toimenpiteillä ja mittauksilla oltaisiin juurisyy voitu selvittää ja poistaa jo ensimmäisen vaihteen vikaantuessa, jolloin oltaisiin saatu selviä kustannussäästöjä.

4.3 Mittalaitteet

Mittauslaiteina käytettiin Moventaksen kunnonvalvontamittauskalustoa, jota käytetään päivittäisessä asiakastyössä ongelmanratkaisuun ja kunnonvalvontaan. Värähtelyanalyysaattorina käytettiin Emersonin valmistamaa CSI2130 kaksikanavaista mittalaitetta ja antureina ICP- kiihtyvyyssantureita (ks. Kuva 22). Värähtelymittauksia suoritettiin eri taajuuskaistoilla, jotta havaittaisiin myös korkeataajuiset ilmiöt, sekä erotettaisiin matalataajuiset ilmiöt toisistaan riittävän hyvällä resoluutiolla.



Kuva 22. CSI 2130 kaksikanavainen värähtelyanalyysaattori (Moventas Gears).

Mittauspisteet valittiin siten, että värähtelynlähteen ja kiihtyvyyssanturin välissä on mahdollisimman vähän värähtelyä vaimentavia rajapintoja. Vaihteet mitattiin kaikkien akselien molemmista laakerointipisteistä aksiaali- sekä radiaalisuuntaan, lisäksi sähkömoottorit mitattiin molemmista laakerointipisteistä. Jokaisesta mittauspisteestä mitattiin myös PeakVue -mittaus, jolla todennetaan alkavat laakeri- ja hammasvauriot mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Värähtelymittaustulosten analysointi suoritettiin Emersonin Machinery Health Manager analysointiohjelmistolla.

Vuotovirran todentamiseen käytettiin Moventaksen vuotovirtamittauskalustoa eli Rogowskin keloja, RMS-vahvistimia sekä Fluken 199C kaksikanavaista oskilloskooppia (ks. Kuva 23). Oskilloskoopin ulostulossa sata millivoltia vastaa yhtä ampeeria. Rogowskin kelat ja RMS-vahvistimet ovat valmistettu Tampereen teknillisessä yliopistossa tilaustyönä. Rogowskin kela on taipuisa, sisähalkaisijaltaan noin 430 mm oleva virta-anturi. Tehollisarvomittarissa olevalla virtakytkimellä saadaan muutettua mittauksen suuruusluokkaa sekä suodatettua mittauksen taajuusaluetta korkeiden ja matalien taajuuksien välillä.



Kuva 23. Vuotovirtamittauskalusto (Moventas Gears).

Vuotovirtamittauksien avulla todennettiin vaihteen vuotovirtakuormitus sekä sen tyyppi mittaamalla virran suuruutta tehonsiirtoketjun eri pisteistä ja vertaamalla niiden samanaikaisia aaltomuotoja keskenään. Mittauksilla todennettiin havaitun vuotovirran tehollisarvon suuruus matala- ja korkeataajuisilla kaistoilla sekä mitattiin molemmilla kaistoilla suurimmat mittaushetkellä esiintyvät huippuarvot.

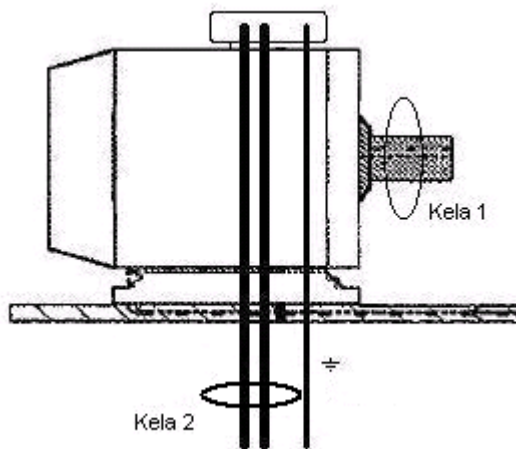
4.4 Mittausten toteutus

Todettujen vaurioiden ja juurisyy selvityksen jälkeen suositeltiin asiakkaalle vuotovirtamittauksien suorittamista käyttöpisteessä. Asiakkaan kanssa järjestettiin aloituspalaveri, jossa käytiin vaihteen purussa havaitut vauriot sekä vuotovirtamittauksien ja -ilmiön teoriaa ja taustoja läpi. Aloituspalaverin yhteydessä suunniteltiin ja sovittiin asiakkaan kanssa maadoitusharjan asentamisesta moottorin akselin ja rungon välille. Maadoitusharjan käyttöön ja sen toimivuuden testaukseen päädyttiin, koska kyseistä hammasvaihdetta käytetään tasavirtamoottorilla (DC). DC -moottorissa jännite syötetään suoraan roottorin ankkurikämeihin, jotka muodostavat magneettikentän joka aikaansaa staattorina toimivan sähkö- tai kestopagneetin kanssa pyörimisliikkeen. Todennäköisin virran reitti on DC -moottorin tapauksessa suoraan moottorin akselia pitkin kytkimen yli vaihteen ensiöakselille. Virta voidaan ohjata vaihteen ohi maadoitusharjalla tai sen reitti voidaan katkaista eristävällä kytkimellä. Maadoitusharjan käyttäminen on huomattavasti edullisempi vaihtoehto. Eikä sen asentaminen vaadi välttämättä seisokkia. Huonona puolena maadoitusharjan käytössä on harjan tai maadoituspalan kuluminen ajanfunktiona. Lisäksi se tarvitsee toimiakseen jatkuvan akselikontaktin.

Kenttämittaukset toteutettiin suunnitellusti helmikuussa 2013. Mittauksien tarkoituksena oli todentaa vuotovirtaongelma käyttöpisteessä ja määrittää vuotovirran tyyppi oikeiden toimenpiteiden takaamiseksi. Sekä testata käytännössä asiakkaan asen-

taman maadoitusharjan toimivuus. Mittauskohteen ensiöakselin suoja oli avattavaa mallia, joka mahdollisti Rogowskin kelan asentamisen sekä maadoitusharjan kontaktin auki kytkennän normaalin tuotannon aikana. Tyypilliset suoritettavat vuotovirtamittaukset ovat akselin maadoitusvirran mittaus, kiertovirran mittaus sekä maadoituksen toimivuus. Akselin maadoitusvirran ja maadoituksen toimivuus mittauksien käyrämuotoja ja vaihe-eroja verrataan syöttökaapeleiden summavirtaan. Lisäksi voidaan suorittaa lisämittauksia mitattavan kohteen tarpeiden mukaan sekä vuotovirran kulkureitin selvittämiseksi. Kaikki mittaukset toteutettiin kaksikanavaisesti, jolloin mitattavien virtojen aaltomuotoja voitiin verrata reaaliaikaisesti. Seuraavassa on esitetty mittausperiaatteet eri vuotovirtamittauksista.

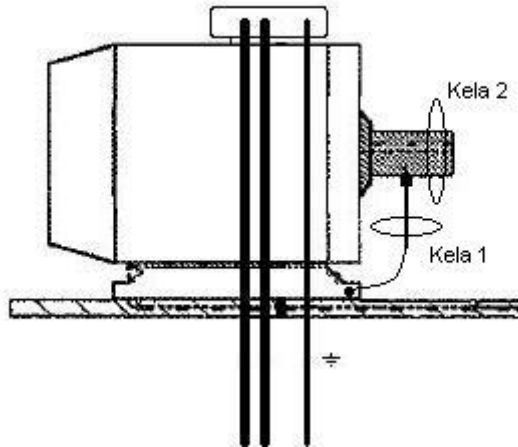
Esimerkki vaihteelle D1PSF50 ja sähkömoottorille suoritettiin akselin maadoitusvirran mittaukset tuotantoajossa. Akselivirran mittauksessa Rogowskin kelat kytketään RMS-vahvistimiin ja ne kytketään oskilloskooppiin. RMS-vahvistin näyttää virran tehollisarvon (RMS). Vahvistimen WB-alue näyttää matalat taajuudet, noin 50 Hz. Korkeat taajuudet, noin 10 kHz, näyttää HF-alue. Yli 10 kHz taajuudet saadaan oskilloskoopista. Oskilloskooppi näyttää signaalin muodon ja virran huippuarvon suuruuden. Moottorin syöttökaapeloinnin ja akselivirran suuruus mitattiin asentamalla Rogowskin kela 2 syöttökaapelin ympärille ja kela 1 vaihteen akselin ympärille kuten Kuvassa 24 on esitetty.



Kuva 24. Akselin maadoitusvirran mittaus (Moventas Gears).

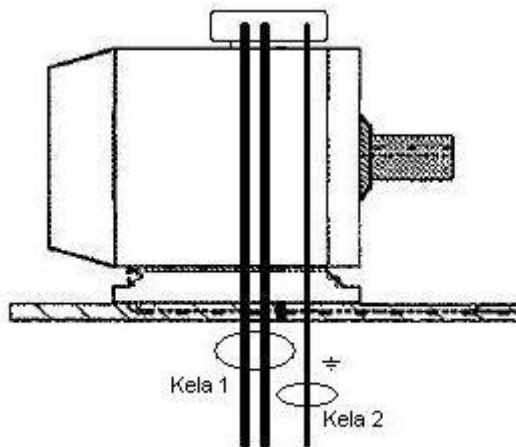
Akselin maadoitusvirralle suoritettiin lisämittauksia asiakkaan asentaman maadoitusharjan toimivuuden todentamiseksi. Mittaukset suoritettiin maadoitusharja kiinni akselilla sekä maadoitusharja irti akselilta. Näin nähtiin suoraan maadoitusharjan toimivuus sekä vuotovirtakuormituksen suuruus ilman akselin maadoitusta. Akselin maadoitusvirran aaltomuotoa verrattiin syöttökaapeloinnin summavirtaan sekä maadoitusvirtaan. Myös akselin maadoitusharjan maadoituskaapelin toimivuus todennettiin mittamalla sen maadoittama virta kytkettynä kiinni sekä irti akselilta.

Moottorin kiertovirran mittauksessa mittauksen tarkoituksena on selvittää kiertovirran suuruus sekä selvittää akselilla mahdollisesti kulkeva virta oikosulun jälkeen. Moottorin akseli oikosuljettiin vaihteen runkoon manuaalisesti maadoitusharjalla. Kela 1 asennettiin maadoitusharjan kaapelin ympärille ja kela 2 vaihteen ensiöakselin ympärille. Kelat kytkettiin RMS-vahvistimien kautta oskilloskooppiin. Oskilloskoopista mitattiin oikosulkuvirta ja samanaikaisesti mahdollinen akselilla kulkeva virta. Näiden aaltomuotoja verrattiin keskenään. Kuvassa 25 on esitetty kiertovirtamittauksen kytkentä.



Kuva 25. Kiertovirran mittaus (Moventas Gears).

Maadoitusmittauksen tarkoituksena on selvittää sähkömoottorin syöttökaapeleiden sekä maadoituskaapeleiden virta ja niiden yhtäläisyys. Kela 1 asennettiin moottorin syöttökaapeleiden ja kela 2 maadoituskaapeleiden ympärille. Kelat kytkettiin RMS-vahvistimien kautta oskilloskooppiin. Sen avulla havaittiin samanaikaisesti syöttökaapeleiden sekä maadoituskaapeleiden aaltomuodot. RMS-vahvistimista saadaan kummankin kaapelin virran tehollisarvo. Kuvassa 26 on esitetty Rogowskin kelojen kytkentä maadoitusmittauksessa.



Kuva 26. Maadoituksen toimivuus mittaus (Moventas Gears).

Mittauksien aikana pidettiin mittauspöytäkirjaa, johon kirjattiin ylös molempien mittauskanavien tehollisarvolukemat WB- ja HF-alueilla. Jokaisesta mittauksesta tallennettiin oskilloskooppiin kolme eripituista aikatasosignaalia. Nämä siirrettiin tietokoneelle ja analysoitiin erillisellä Fluken analysointiohjelmalla. Mittauksia suoritettiin yhteensä kahdeksasta eri mittauspisteestä, joista aikatasosignaaleita tallennettiin kaikkiaan 24 kappaletta.

Vuotovirtamittausten yhteydessä ei suoritettu erikseen värähtelymittauksia kyseisessä esimerkkitapauksessa. Asiakkaalla oli käytössään vastaava värähtelyanalysointtori kuin Moventaksella, joten asiakas antoi omat mittauksensa Moventaksen käyttöön. Esimerkkitaapauksen yhteydessä ei havaittu värähtelymittauksissa viitteitä laakerivauriosta, hammastusvaurio todettiin mittauksien avulla. Laakerivaurioiden osalta käytetään toisista prosessiteollisuuden kohteista mitattuja tuloksia. Niissä on havaittu värähtelymittauksilla laakerivaurio joka on osoittautunut vaihteen purkutarkastuksessa vuotovirran aiheuttamaksi.

Vuotovirtamittauksien tuloksien haitallisuuden vertailupohjana käytetään PSK standardia 7708 ”Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät, pyörivät epätahtikoneet, akselijännitteen ja -virran mittaus.”. Standardi esittää kokemuseräisiä raja-arvoja vuotovirran tehollis- sekä piikkiarvojen haitallisuudelle (ks. Kuva 27).

Laakerivirran tehollisarvo

Laakerivirran tehollisarvo I_{rms}	Haitallisuusluokitus
< 20mA	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
20mA ... 50mA	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 50mA	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Laakerivirran huippuarvo

Laakerivirran huippuarvo I_p	Haitallisuusluokitus
< 1 A	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
1 A ... 2 A	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 2A	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Kuva 27. Vuotovirran haitallisuusluokitus (PSK 7708 2004).

Kuitenkin todella pienet virrat voivat olla haitallisia tietyissä olosuhteissa. Tämän takia on suositeltavaa suorittaa myös potentiaalieromittaukset. Sekä mahdollisuuksien mukaan suorittaa arviolaskelma riittääkö vuotovirtapurkauksen teho sulattamaan metallia.

5 MITTAUSTULOKSET JA ANALYSOINTI

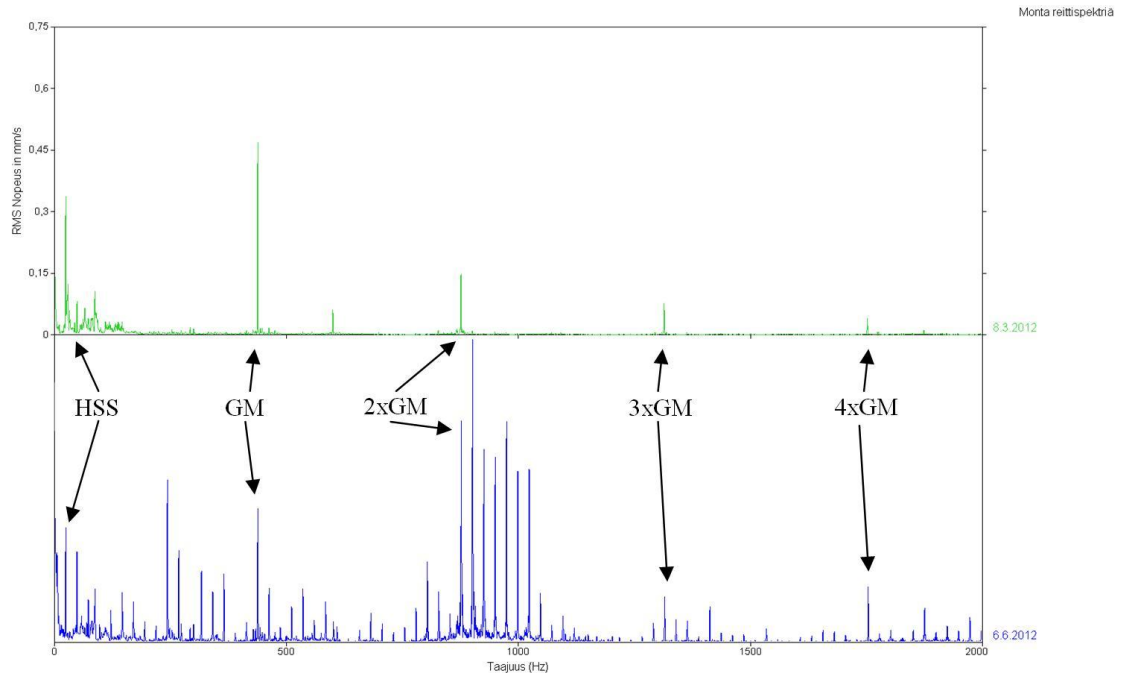
Tässä kappaleessa esitetään ja analysoidaan esimerkkitapauksen mittaustulokset vuoto- ja värähtelymittauksien osalta. Lisäksi käsitellään muita hammasvaihteiden vauriotapauksia, joissa laakerivaurio on havaittu värähtelymittauksessa ja sen juurisyys on paljastunut vuotovirta. Värähtelymittaustuloksista pyritään löytämään yhtäläisyyksiä, joiden perusteella voitaisiin epäillä vaurion aiheuttajaksi vuotovirtaa jo varhaisessa vaurion havainnointi vaiheessa. Lisäksi vuotovirran aiheuttamia laakerivaurioiden värähtelymittaustuloksia verrataan mekaanisen laakerivaurion aiheuttamaan värähtelyyn. Värähtelyanalyysin perusteella voitaisiin suorittaa käyttökohteelle vuotovirtamittaukset ja tehdä tarvittavat toimenpiteet ongelman poistamiseksi ja saman vaurion uudelleensyntymisen estämiseksi. Öljyanalyysiä ei työn yhteydessä voitu käyttää, koska vuotovirran mittaustulokset olivat prosessiteollisuuden hammasvaihteita, jotka oli liitetty kiertovoitelun piiriin. Öljyanalyysin mahdollisuuksia vuotovirran havaitsemiseksi käsitellään teoreettisesti tässä kappaleessa.

5.1 Esimerkkitapaus

Tässä kappaleessa tarkastellaan ensin värähtelymittaustuloksia alkuperäisen vaihteen sekä varavaihteen osalta. Niiden jälkeen tarkastellaan vuotovirtamittauksien tulokset läpi yksityiskohtaisesti. Lopuksi käsitellään vuotovirran aiheuttamien laakerivaurioiden värähtelymittaustuloksia.

5.1.1 Värähtelymittaus

Loppuasiakas suoritti alkuperäiselle vaihteelle lähtötasomittaukset 8.3.2012 joiden perusteella hammasvaihte oli normaalissa käyttökunnossa. Mittaus suoritettiin nopeusspektrinä taajuuskaistalla 2 – 2000 Hz, vaihteen molempien akseleiden moottorinpuoleisista laakerointipisteistä radiaalisuuntaan. Nopeusspektrissä, joka on esitetty kuvassa 28 ylempänä, havaitaan vaihteen ensiöakselin pyörimistaajuus (HSS) ja vaihteen ryntötaajuus (GM) sekä sen kolme seuraavaa harmonista (2xGM, 3xGM ja 4xGM). Ryntötaajuuden ja sen harmonisten taajuuskomponenttien amplituditasot ovat matalat eikä niiden ympärillä esiinny merkittäviä sivunauhoja. Sivunauhojen ilmeneminen kertoo tyypillisesti hammastuksen vikaantumisen. Ensiöakselin pyörimistaajuudella ei esiinny korkeamplitudeja harmonisia taajuuskomponentteja. Lähtötasomittauksen nopeusspektri on tyypillinen normaalissa käyttökunnossa olevan hammasvaihteen spektri.

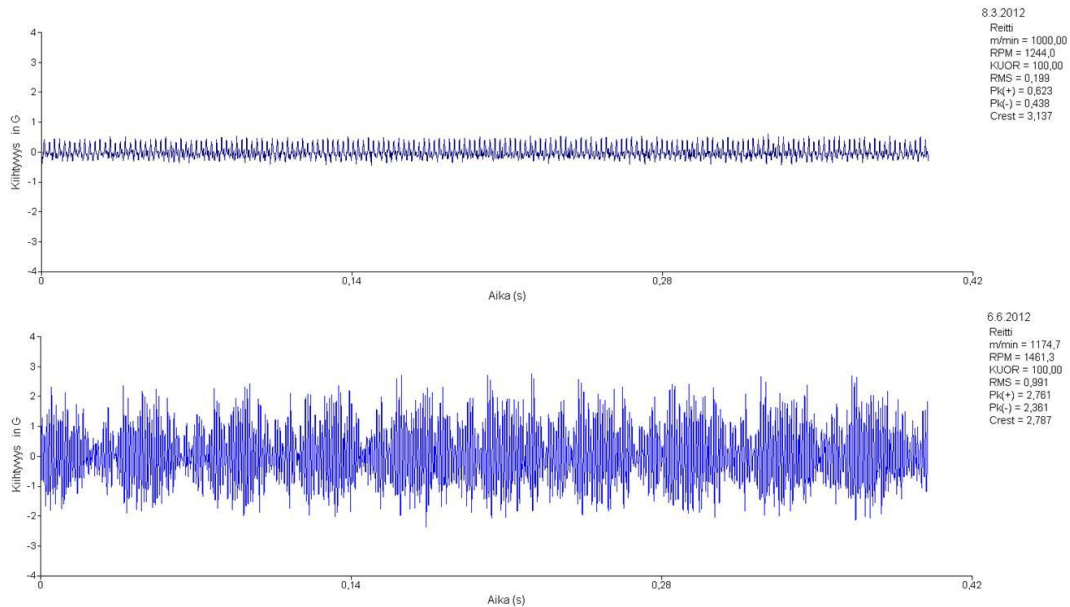


Kuva 28. Lähtötaso (ylempi) ja vaurio (alempi) nopeusspektrit vaihteen ensiöakselilta radiaalasuuntaan.

Loppuasiakas suoritti hammasvaihteelle seuraavan kerran värähtelymittaukset 6.6.2012. Muutos nopeusspektrissä oli huomattava lähtötasomittauksiin verrattuna. Spektri on esitetty kuvassa 28 alempana, spektrit ovat skaalattu samalle asteikolle. Nopeusspektriä amplitudien tasot eivät ole korkeat, mutta niiden muoto ja muutos lähtötasomittaukseen on selvä. Spektrissä havaitaan HSS:n harmonisia komponentteja koko taajuuskaistalla. GM:n amplitudi on pysynyt samalla tasolla, mutta sen yläpuoliselle taajuusalueelle on syntynyt HSS:n sivunauhoja. Suurin muutos nopeusspektrissä on tapahtunut 2xGM:n amplitudin kasvussa ja erityisesti sen yläpuoliselle taajuusalueelle syntyneissä HSS:n sivunauhoissa. Osan sivunauhojen amplituditasot ovat jopa korkeampia kuin 2xGM:n amplitudi. HSS:n sivunauhoja esiintyy myös korkealla taajuusalueella 3xGM:n ja 4xGM:n yhteydessä. Sivunauhojen ilmentyminen ja HSS:n runsas harmonisten määrä nopeusspektrissä viittaavat hammasvaihteiden yhteydessä kyseisen akselin hammastuksen vikaantumiseen tai väärin linjattuihin hammasvaihteen akseleihin. Huollon yhteydessä vaihteen välitysosat ja kotelon akselilinjat tarkastettiin 3D –mittakoneelle, jonka perusteella akselilinjat olivat toleranssien mukaiset.

Hammasvaihteiden hammasvauriot havaitaan yleisesti aikatasosignaalista paremmin kuin spektristä. Koska vauriot yleensä ovat iskumaisia ja lyhytkestoisia ilmiöitä. Kuvassa 29 on esitetty kuvaa 28 vastaavat aikatasosignaalit, ylempänä lähtötaso ja alempana vaurioituneen vaihteen signaali. Lähtötasosignaali on hieman suuntautunut ja siinä havaitaan iskumaisuutta säännöllisesti vaihteen GM:n välein. Aikatasosignaalin Peak-to-Peak -arvo on noin 1 ja Crest factor -arvo noin 3,1. Arvot ovat tyypillisiä hammasvaihteelle. Vaurioituneen vaihteen aikatasosignaali on muodoltaan amplitudimodu-

loitunut eli siinä erottuu GM:n taajuus johon on moduloitunut HSS:n taajuus pulssimaisesti. Signaalista ei erotu terävää iskumaisuutta vaihteen kummankaan akselin pyörimistaajuudella. Signaalin Peak-to-Peak -arvo on noussut arvoon 5,1. Joten ae on viisinker- taistunut lähtötasomittaukseen verrattuna. Crest factor -arvo on pysynyt samalla tasolla eli signaali ei ole muuttunut iskumaisemmaksi.



Kuva 29. Lähtötaso (ylempi) ja vaurio (alempi) aikatasot vaihteen ensiöakselilta radi- aalisuuntaan.

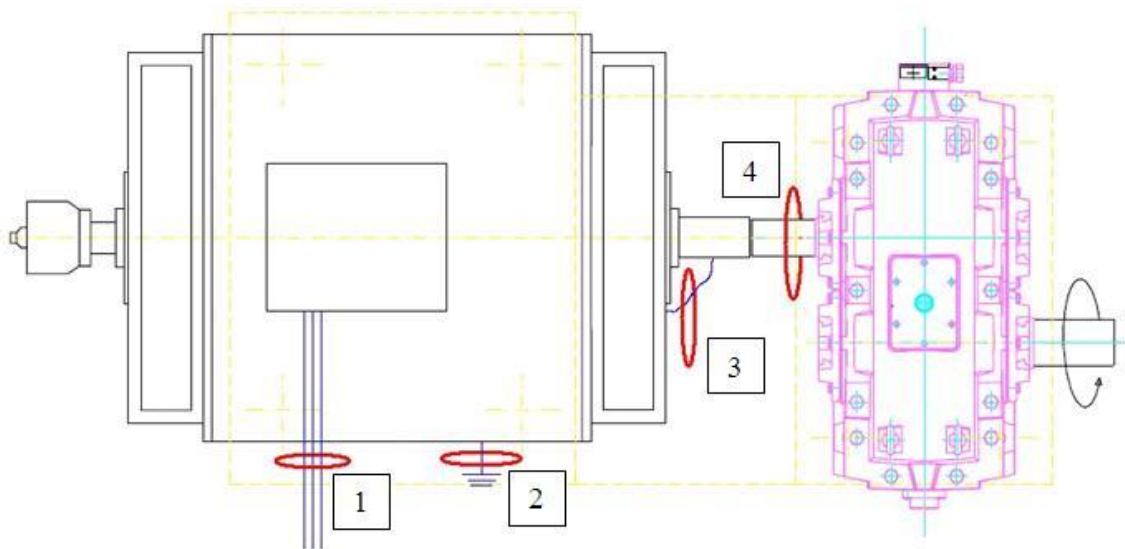
Värähtelymittauksien perusteella hammasvaihteessa todettiin olevan hammas- tusvaurio, kuten nopeusspektrissä esiintyvistä ilmiöistä voidaan diagnosoida. Aika- tasosignaalin muoto ei anna epäilystä yksittäisen hampaan vaurioon, mutta sen perus- teella hammaskosketus on muuttunut mittauksien välillä. Vaihteen huollon yhteydessä ensiö – ja toisioakseleiden hammastuksilla havaittiin voimakasta tahmaumaa hammas- tuksen toisessa reunassa, kuten kappaleessa 4.2 yksityiskohtaisesti kerrottiin. Tämän esimerkkitapauksen värähtelymittauksien tulosten perusteella on lähes mahdotonta diagnosoida vaurion juurisyysksi tai osasyyliseksi sähkövirtaa.

5.1.2 Vuotovirtamittaus

Vuotovirtamittaukset toteutettiin 27.2.2013, koska käyttöpisteen hammasvaihte oli vi- kaantunut useamman kerran viimeisen parin vuoden aikana. Vuotovirran aiheuttamaa vikaantumista vahvasti huollossa havaitut fluting -jäljet toisioakselin moottorin puolei- sen laakerin ulkokehällä. Vuotovirtamittauksien tavoitteena oli todentaa vuotovirta käyttökohteessa sekä testata asiakkaan asentaman maadoitusharjan toimivuus.

Vuotovirtamittaukset suoritettiin Moventaksen vuotovirtamittauslaitteistolla, joka on esitelty kappaleessa 4.3. Kaikki mittaukset suoritettiin kaksikanavaisesti, jolloin

mittauspisteiden virtojen aaltomuotoja pystyttiin vertaamaan keskenään reaaliaikaisesti. Rogowskin kelojen mittauspisteet on esitetty käyttöpisteen pohjapiirustuksen yhteydessä kuvassa 30.



Kuva 30. Esimerkitapauksen käyttöpisteen pohjapiirustus ja Rogowskin kelojen mittauspisteet (Moventas Gears).

Mittauksissa pyrittiin vertaamaan kaikkia mittauspisteitä keskenään sekä selvittämään impedanssiltaan matalin maadoitusreitti. Jokaisesta mittauksesta kirjattiin ylös RMS-arvot WB- sekä HF-taajuuskaistoilla. Tulokset on esitetty taulukossa 2 ja mittauspisteiden pistenumerointi kuvassa 30. Suurimmat RMS -arvot mitattiin WB-taajuuskaistalla moottorin rungon maadoituskaapelista noin 4,8 A RMS. Moottorin maadoitusvirta koostuu pääasiassa moottorin syöttötaajuudesta 50 Hz. Samaan aikaan moottorin syöttökaapeleiden summavirta oli huomattavasti alhaisempi ollen vain noin 0,27 A RMS. HF-taajuuskaistalla moottorin syöttökaapeleita pitkin tuli sähkömoottorille virtaa noin 0,10 A RMS ja vastaavasti moottorin rungon kautta maadoittui noin 0,11 A RMS.

Moottorin akselin maadoitusharjan ja akselin välisellä kontaktilla ei ollut vaikutusta pyöreäprofiilisen maadoitusharjan maadoituskaapelissa kulkevan vuotovirran RMS-arvoihin. Teoreettisesti kaapelissa ei pitäisi kulkea virtaa, kun akselin maadoituskytkentä on auki ja kiinni kytkennän tapahtuessa virta-arvon pitäisi nousta. Molemmissa tapauksissa maadoituskaapelia pitkin kulki WB-taajuuskaistalla virtaa noin 0,65 A RMS ja HF-taajuuskaistalla noin 0,03 A RMS. Maadoitusharjalle oli rakennettu metallinen teline, joka oli kiinnitetty pulttiliitoksella moottorin runkoon. Tämä tarjosi vuotovirralla matalaimpedanssisemmän maadoitusreittein kuin erillinen maadoitusharjan telineestä moottorin rungon maadoitusliittimeen liitetty maadoituskaapeli. Todennäköisesti virta kulki jatkuvaa kiertoa moottorinrungosta maadoitusharjan telineen kautta maadoituskaapelia pitkin takaisin moottorin runkoon. Tämä kierto selittäisi miksi virran tehollisuus

lisarvo ei muuttunut maadoitusharjan auki ja kiinni kytkentöjen välillä kummallakaan taajuusalueella.

Vaihteen ensiöakselia pitkin vaihteeseen mitattiin virtaavan vuotovirtaa maadoitusharjan ollessa auki kytkettynä 0,11 A RMS WB-taajuuskaistalla ja 0,11 A RMS HF-taajuuskaistalla. PSK 7708 standardin haitallisuusluokitukseen mukaan yli 0,05 A RMS vuotovirran arvot vaikuttavat merkittävästi laakeroinnin käyttöikäen. Kun maadoitusharja kytkettiin kiinni moottorin akselille, tippuivat vuotovirran arvot WB-taajuuskaistalla 0,03 A RMS ja HF-taajuuskaistalla 0,02 A RMS. PSK standardin haitallisuusluokituksen mukaan tämän suuruisilla virroilla voi olla vaikutusta tai ei ole merkittävää vaikutusta laakeroinnin kestoikäen. Tämän mittauksen perusteella moottorin akselin maadoitusharjan todettiin olevan riittävä lisämaadoitusratkaisu poistamaan haitallinen vuotovirtakuormitus käyttöpisteen hammasvaihteelta. Mittaustuloksissa on huomioitavaa, että ensiöakselia pitkin vaihteeseen virtaava vuotovirta on molemmilla taajuuskaistoilla samansuuruista. Tämä osaltaan näyttää, että haitallinen vuotovirta on korkeataajuista, koska matalataajuinen virta saadaan helpommalla maadoitettua. Vertailemalla HF-taajuuskaistan RMS-arvoja eri mittauspisteiden välillä huomataan, että moottorin syöttökaapeleita pitkin tuleva korkeataajuinen virta kulkeutuu pääsääntöisesti ensiöakselia pitkin hammasvaihteeseen.

Taulukko 2. Vuotovirtamittausten RMS -tulokset mittauspisteittäin.

Mittaus	Mittauspisteet	Piste nro.	WB RMS [A]	HF RMS [A]
1	Moottorin syöttökaapelit	1	0,27	0,10
	Moottorin maadoituskaapeli	2	4,75	0,11
2	Moottorin syöttökaapelit	1	0,27	0,10
	Hiiliharjan maadoituskaapeli	3	0,60	0,03
3	Moottorin syöttökaapelit	1	0,28	0,11
	Ensiöakseli (MH ON*)	4	0,03	0,02
4	Moottorin syöttökaapelit	1	0,17	0,09
	Ensiöakseli (MH OFF*)	4	0,10	0,09
5	Hiiliharjan maadoituskaapeli	3	0,68	0,03
	Ensiöakseli (MH ON*)	4	0,02	0,02
6	Hiiliharjan maadoituskaapeli	3	0,68	0,03
	Ensiöakseli (MH OFF*)	4	0,11	0,11
7	Moottorin maadoituskaapeli	2	4,80	0,11
	Ensiöakseli (MH ON*)	4	0,02	0,02
8	Moottorin maadoituskaapeli	2	4,80	0,11
	Ensiöakseli (MH OFF*)	4	0,13	0,12

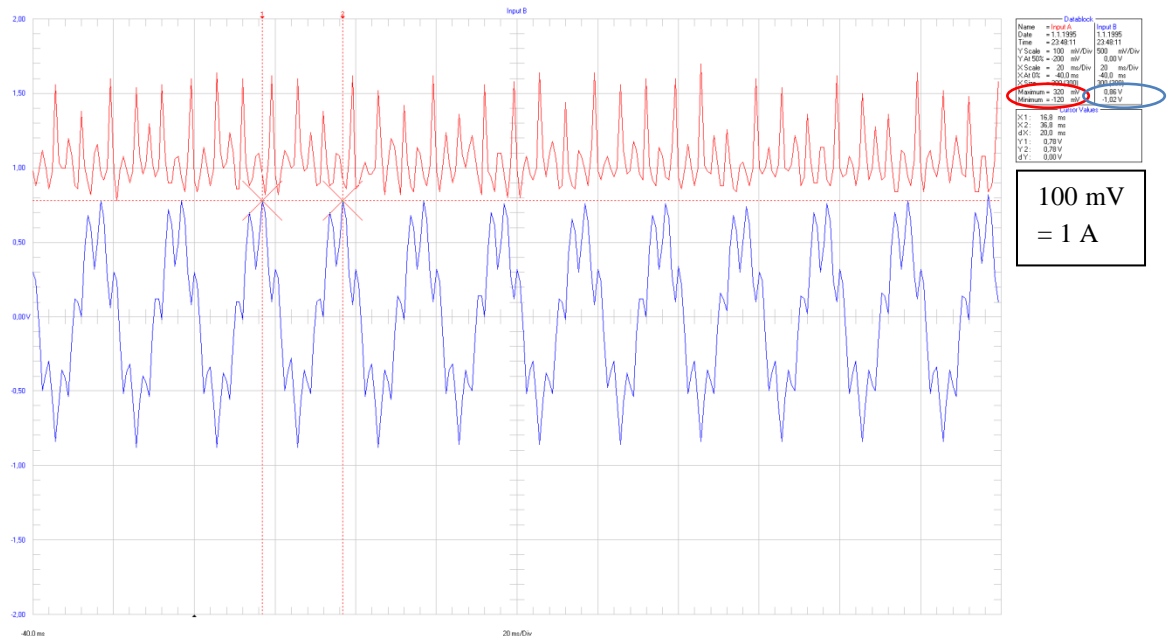
*MH OFF = maadoitusharja kytketty irti ensiöakselilta

*MH ON = maadoitusharja kytketty ensiöakselille

Esimerkitapauksessa maadoitusharjan toimintaa ja sen kontaktia akselin pintaan tulee tarkkailla säännöllisesti. Harja on kuluvaa materiaalia ja sitä kuormitetaan jousella akselin kaulaa vasten, joten sen kontakti ei ole vakio. Maadoitusharjoja suositellaan asennettavaksi symmetrisesti useampia akselin kaulalle niiden maadoituksen

toimivuuden varmistamiseksi, kuten kappaleessa 2.3 on todettu. Seuraavassa on esitetty vuotovirtamittauksien tulokset läpi.

Moottorin maadoituskaapelin toimivuuden mittaus.

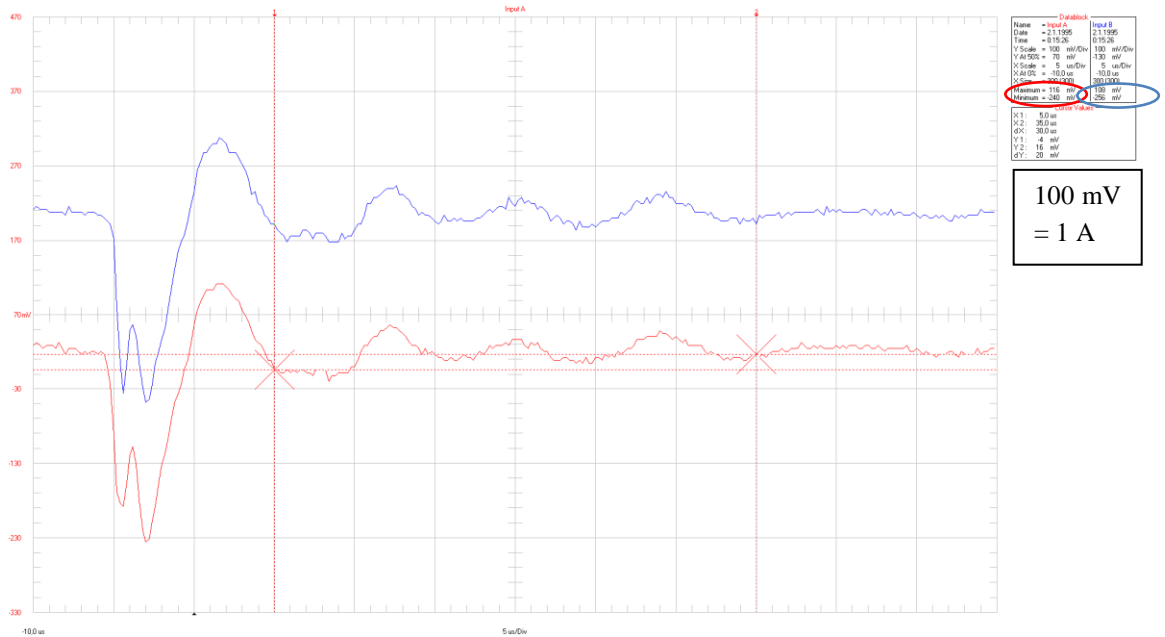


Kuva 31. Moottorin syöttökaapelit (punainen eli ylempi), noin 3,2A Huippu ja 0,27 A RMS WB ja moottorin maadoituskaapeli (sininen eli alempi), noin 10,2A Huippu ja 4,8 A RMS WB.

Mittauksessa havaittiin moottorin syöttökaapeleiden summavirran olevan noin 3,2 A huippu ja 0,27 A RMS. Moottorin rungon maadoituskaapelointia pitkin maadoitettava virta oli noin 10,2 A huippu ja 4,8 A RMS WB-taajuuskaistalla. Kuva 31 näyttää moottorin syöttökaapeleiden virran ja moottorin rungon maadoitusvirran aaltomuotojen olevan erimuotoisia. Moottorin rungon maadoituskaapelin virran taajuus on 50 Hz, joka vastaa moottorin syöttötaajuutta. HF-taajuuskaistalla moottorin rungon maadoituskaapelointia pitkin maadoitettava virta oli noin 0,80 A huippu ja 0,11 A RMS ja aaltomuodoltaan vastasi moottorin syöttökaapeloinnin summavirtaa. Moottorin syöttökaapeloinnin summavirran aaltomuodossa piikit esiintyvät taajuudella 150 Hz, joka vastaa syöttötaajuuden toista monikertaa. Tämän ilmiön takana on kolmivaiheinen syöttöjännite.

Mittauksen perusteella todettiin, ettei pelkkä moottorin rungon maadoitus ole riittävä toimenpide estämään vuotovirran pääsyä hammasvaihteeseen. Rungon maadoituskaapelointi toimii hyvin matalataajuisia virtaa vastaan, mutta ei tarjoa riittävän matalaimpedanssista reittiä korkeataajuiselle vuotovirrälle. Mittaustulosten perusteella moottorin syöttökaapeleilta tuleva vuotovirta voi antaa vuotovirtakuormitusta hammasvaihteelle ilman kunnollista maadoitusta. Mittaustulosten vertailu PSK7708 standardiin; mitattu tehollisarvo $270 \text{ mA} > 50 \text{ mA}$, vaikuttaa merkittävästi käyttöikään ja mitattu huippuarvo $3,2 \text{ A} > 1 \text{ A}$, vaikuttaa merkittävästi käyttöikään.

Akselin maadoitusvirran mittaus, hiiliharja kytketty irti akselilta.

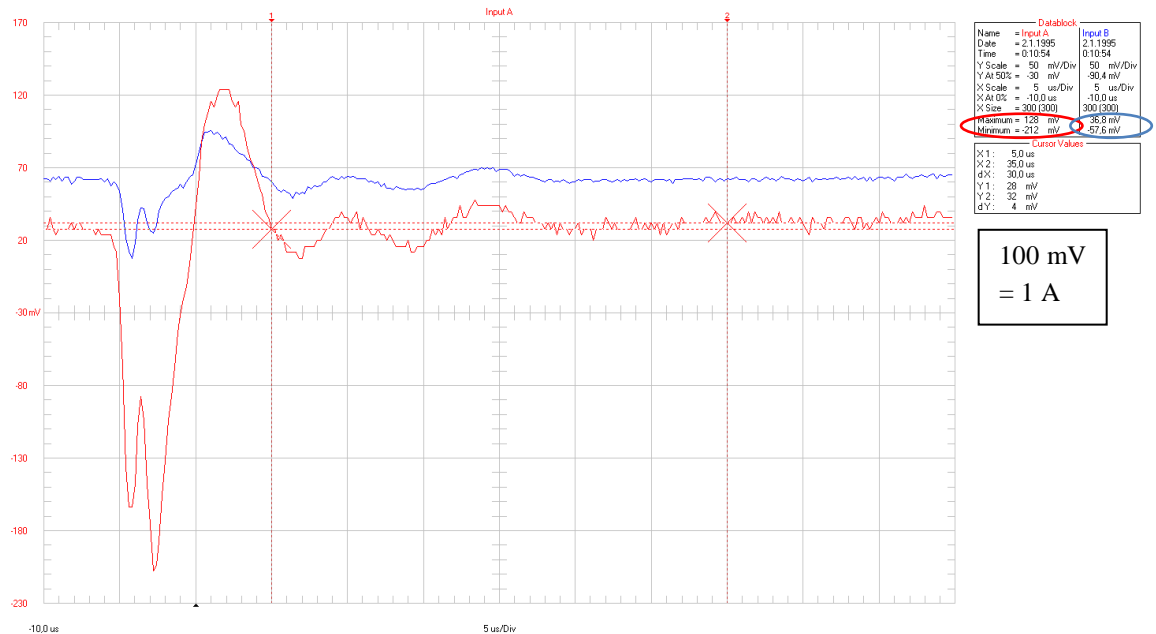


Kuva 32. Moottorin syöttökaapelit (punainen eli ylempi), noin 2,4 A Huippu ja 0,17 A RMS WB ja akselin maadoitusvirta (sininen eli alempi), noin 2,6 A Huippu ja 0,1 A RMS WB.

Mittauksessa havaittiin moottorin syöttökaapeleiden summavirran olevan noin 2,4 A huippu ja 0,17 A RMS WB-taajuuskaistalla. Tämä virta maadoittuu jotain muuta kautta kuin syöttökaapelointia pitkin. Osa tästä virrasta (2,6 A huippu ja 0,1 A RMS WB) maadoittuu moottorin akselia pitkin hammasvaihteen kautta. Kuva 32 näyttää moottorin syöttökaapeleiden virran ja akselivirran olevan samanmuotoisia.

Mittauksissa havaittiin, että vuotovirta maadoittuu moottorin akselia pitkin hammasvaihteen kautta, kun maadoitusharja on irti akselilta. Mittaustulosten perusteella moottorilta tuleva vuotovirta antaa vuotovirtakuormitusta hammasvaihteelle, jos maadoitusharja on kytketty irti. Mittaustulosten vertailu PSK7708 standardiin; mitattu tehollisarvo $100 \text{ mA} > 50 \text{ mA}$, vaikuttaa merkittävästi käyttöikään ja mitattu huippuarvo $2,6 \text{ A} > 1 \text{ A}$, vaikuttaa merkittävästi käyttöikään.

Akselin maadoitusvirran mittaus, hiiliharja kytkettynä akselille.



Kuva 33. Moottorin syöttökaapelit (punainen eli ylempi), noin 2,1 A Huippu ja 0,28 A RMS WB ja akselin maadoitusvirta (sininen eli alempi), noin 0,6 A Huippu ja 0,02 - 0,03 A RMS WB.

Mittauksissa havaittiin moottorin syöttökaapeleiden summavirran olevan noin 2,1 A huippu ja 0,28 A RMS WB – taajuuskaistalla. Tämä virta maadoittuu jotain muuta kautta kuin syöttökaapelointia pitkin. Osa tästä virrasta (0,6 A huippu ja 0,02 - 0,03 A RMS WB) maadoittuu moottorin akselia pitkin hammasvaihteen kautta. Kuva 33 näyttää moottorin syöttökaapeleiden virran ja akselivirran olevan samanmuotoisia. Hiiliharja pienentää vaihteen vuotovirtakuormitusta huomattavasti.

Mittauksissa havaittiin, että osa vuotovirrasta maadoittuu moottorin akselia pitkin hammasvaihteen kautta, vaikka hiiliharja on kytketty akselille. Mittaustulosten perusteella moottorilta tuleva vuotovirta voi antaa ajoittain pientä vuotovirtakuormitusta hammasvaihteelle. Mittaustulosten vertailu PSK 7708 standardiin; mitattu tehollisarvo $20 - 30 \text{ mA} \leq 20 - 50 \text{ mA}$, voi vaikuttaa käyttöikään ja mitattu huippuarvo $0,6 \text{ A} < 1 \text{ A}$, ei vaikuta merkittävästi käyttöikään.

5.2 Laakerivaurio esimerkkejä

Laakerivaurio havaitaan tyypillisesti korkeataajuisien kiihtyvyyksimittauksien avulla jo vikaantumisen alkuvaiheessa. Yleisimmin vikaantuva laakerikomponentti on laakerin sisäkehä ja vika diagnosoidaan sisäkehän ohitustaajuuden sen harmonisten sekä ohitustaajuuteen moduloituneen akselin pyörimistaajuuden perusteella. Vuotovirtavauriotapa-uksissa havaitaan kokemuksen mukaisesti ulko- (BPFO) tai sisäkehän (BPFI) ohitustaajuus sekä sen korkea-amplitudisia harmonisia komponentteja korkeataajuisen mittausmenetelmien spektreissä. Ulko- ja sisäkehän ohitustaajuudet lasketaan kaavoilla:

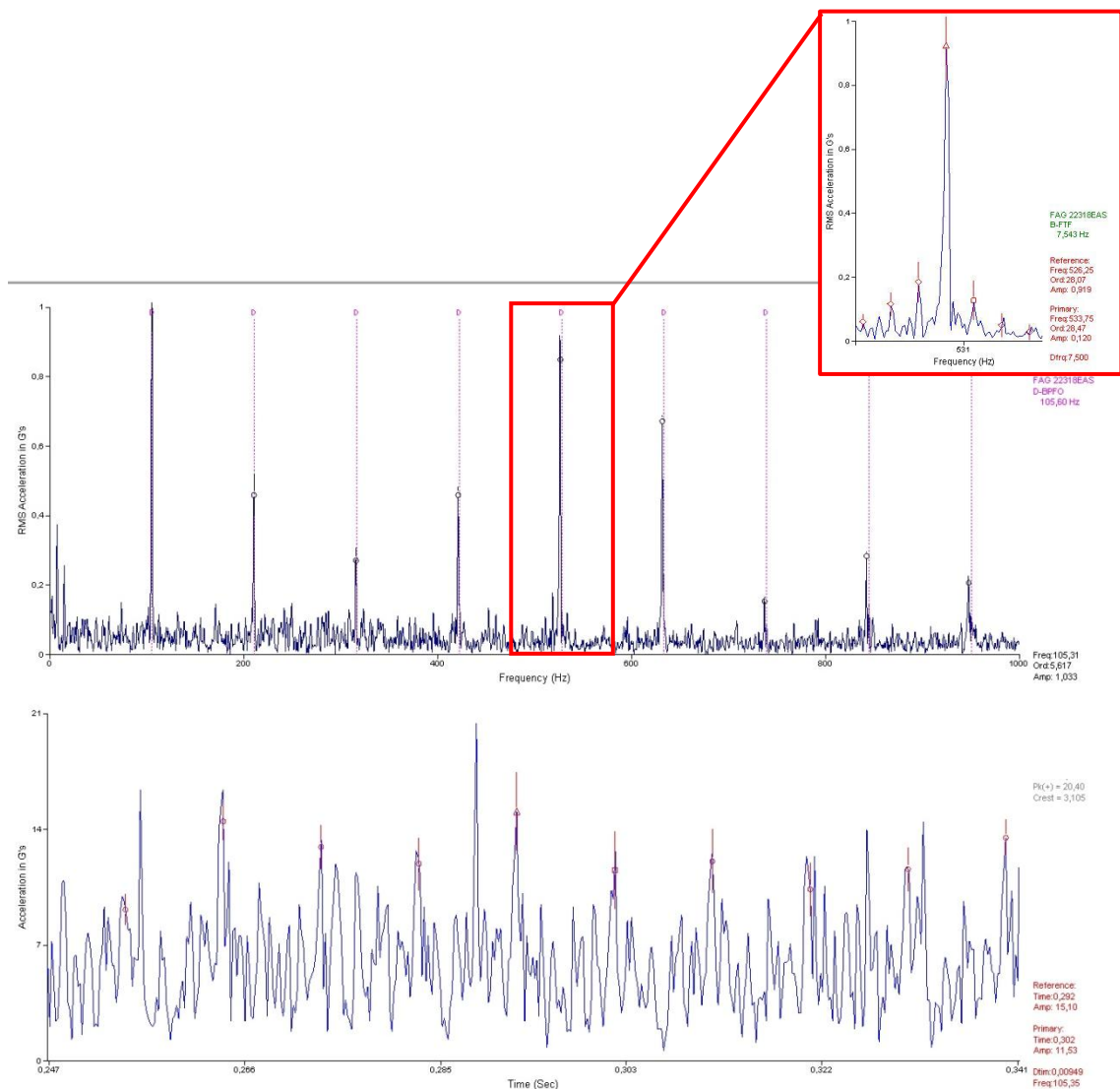
- $BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) n$
- $BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) n$

missä N on laakerin vierintäelinten lukumäärä, d on vierintäelimen halkaisija, D on laakerin keskihalkaisija, n on pyörimistaajuus ja α kosketuskulma.

Laakerin vierintäradan pinnan pitää olla vaurioitunut, jotta laakerin ohitustaajuus ilmenee värähtelymittauksissa. Vuotovirran fluting vauriotyyppi aiheuttaa laakerin vierintärataan nähden poikittaissuuntaisia uria (ks. kappale 2.2.2). Laakerin vierintäelinten kulkiessa näiden urien yli aiheuttaa se laakerin vierintäradan ohitustaajuuden heräämiseen. Urat syntyvät laakerin vierintäradoille jaksottaisesti, koska öljykalvon paksuus ja sen läpilyöntikestoisuus vaihtelevat jaksottaisesti laakerin vierintäelimen ja vierintäradan pintojen välisessä kosketuskohdassa. Jaksottainen vauriojälki aiheuttaa useita jaksollisia pulsseja aikatasosignaaliin jokaisella akselin kierroksella. Aikatasosignaalin pulsseista syntyy FFT-laskennan yhteydessä spektriin perustaajuus sekä sen harmonisia komponentteja. Mittauksissa on todettu että, mitä enemmän vauriojälkiä on vierintäradalla jaksollisesti sitä enemmän ne synnyttävät spektriin vierintäradan ohitustaajuuden harmonisia komponentteja. Teoreettisesti vierintäradan vauriojäljellä ja sen jaksollisuudella on vaikutusta aikatasosignaaliin sekä siitä lasketun spektrin muotoon ja siinä esiintyvien eri taajuuksien amplitudien suhteeseen. Myös mittausasetuksien pitää olla oikein asetettu jotta halutut ilmiöt voidaan erottaa mittaustuloksista.

Tässä kappaleessa esitellään ja analysoidaan kenttämittauksissa havaittuja vuotovirran aiheuttamia laakerivauriota sekä niiden mittaustuloksia. Tuloksia verrataan mekaanisen laakerivaurion ilmentymiseen värähtelymittauksissa, jotta vuotovirran aiheuttama laakerivaurio voitaisiin diagnosoida purkamatta laakeria.

Kuvassa 34 on esitetty hammasvaihteen ensiöakselilla havaitun ulkokehän laakerivaurion PeakVue -mittaustulokset. Vaihteen huollon yhteydessä otettu vauriokuva kyseisen laakerin ulkokehän vierintäradalta on esitetty kuvassa 35. Kyseisessä laakerivauriotapauksessa vuotovirtavaurio oli edennyt pitkälle. Laakerin ulkokehän vierintäradalla havaittiin flutingin aiheuttamaa vauriojälkeä koko vierintäradan kierroksella. PeakVue -spektrissä on todella selkeä ja korkea amplitudinen piikki laakerin ulkokehän ohitustaajuutta vastaavalla taajuudella. Ulkokehän ohitustaajuudella esiintyy koko taajuuskaistan leveydellä harmonisia komponentteja, joiden amplitudit ovat todella korkeita verrattuna spektrin muiden taajuuksien amplitudeihin. Vastaavasti aikatasosignaalin esiintyy pulseja säännöllisesti ulkokehän ohitustaajuutta vastaavalla aikavälillä koko signaalin pituudella. Kiihtyvyyden piikkiarvot aikatasosignaalin esiintymisellä ovat todella korkeita, jopa 20 G. Aikatasosignaalin Crest factor -arvo on 3,1 joka ei ole vielä hälyttävän korkealla tasolla.



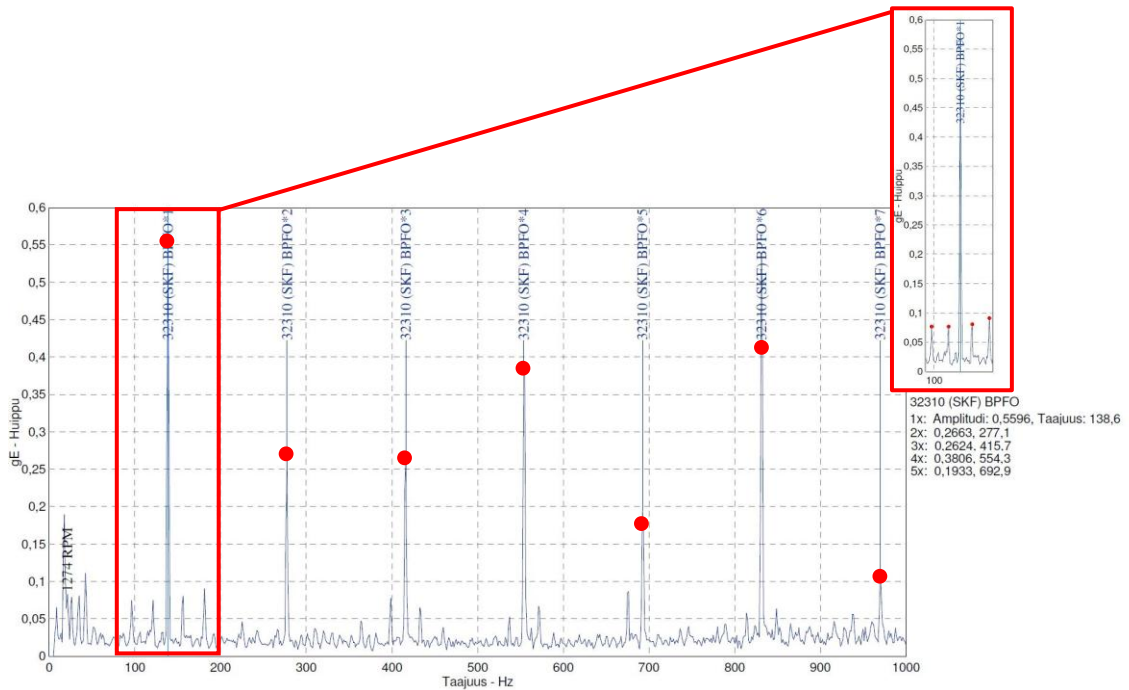
Kuva 34. PeakVue -spektri ja -aikataso hammasvaihteen ensiöakselin laakerilta.

PeakVue -spektrissä havaitaan laakerin pitimen taajuuden noin 7,5 Hz (FTF) moduloituneen laakerin ulkokehän ohitustaajuuteen. Moduloituminen ilmenee spektrissä laakerin pitimen ohitustaajuisina sivunauhoina ulkokehän ohitustaajuuden ja sen harmonisten taajuuksien ympärillä kuten kuvan 34 yläosassa on esitetty. Perinteisesti sisäkehän vauriossa sisäkehän ohitustaajuuteen moduloituu akselin pyörimistaajuus ja vierintäelimen vauriossa vierintäelimen ohitustaajuuteen pitimen ohitustaajuus. Laakerin ulkokehän ollessa staattinen sen vaurion diagnosoimisen yhteydessä ei kirjallisuudessa mainita tapahtuvan pitimen ohitustaajuuden moduloitumista.



Kuva 35. Kuvan 34 mittaustuloksien laakerivaurion laakerin ulkokehän vierintärata (Moventas Gears).

Toisessa laakerivaurion tapauksessa havaittiin ulkokehän laakerivaurio verhoikäyrmittauksella (ks. Kuva 36). Laakerin vaihdon yhteydessä vaurio todettiin vuotovirran aiheuttamaksi ulkokehän fluting vauriojäljen perusteella, joka on esitetty kuvassa 37. Myös tässä tapauksessa havaittiin kiihtyvyysspektrissä todella korkea-amplitudinen taajuus, joka vastaa laakerin ulkokehän ohitustaajuutta. Ulkokehän ohitustaajuudella on koko spektrin taajuuskaistalla korkea-amplitudisia harmonisia taajuuksia. Harmonisten taajuuksien amplituditasot ovat keskimäärin noin puolet perustaajuuden amplitudista ja erottuvat todella selkeästi spektrin muiden taajuuksien amplitudeista. Verhokäyräspektrissä havaitaan laakerin pitimen ensimmäisen monikerran taajuuden noin 17,5 Hz (2xFTF) moduloituneen laakerin ulkokehän ohitustaajuuteen. Moduloituminen ilmenee kiihtyvyysspektrissä laakerin pitimen ohitustaajuuden ensimmäisen monikerran sivunauhoina ulkokehän ohitustaajuuden ja sen harmonisten taajuuksien ympärillä, kuten kuvan 36 yläosassa on havainnollistettu. Ensimmäisessä esitellyssä laakerivauriotapauksessa pitimen ohitustaajuus oli moduloituneena ulkokehän ohitustaajuuteen.



Kuva 36. Verhokäyrä kiihtyvyysspektri vaihteen ensiöakselin laakerilta.

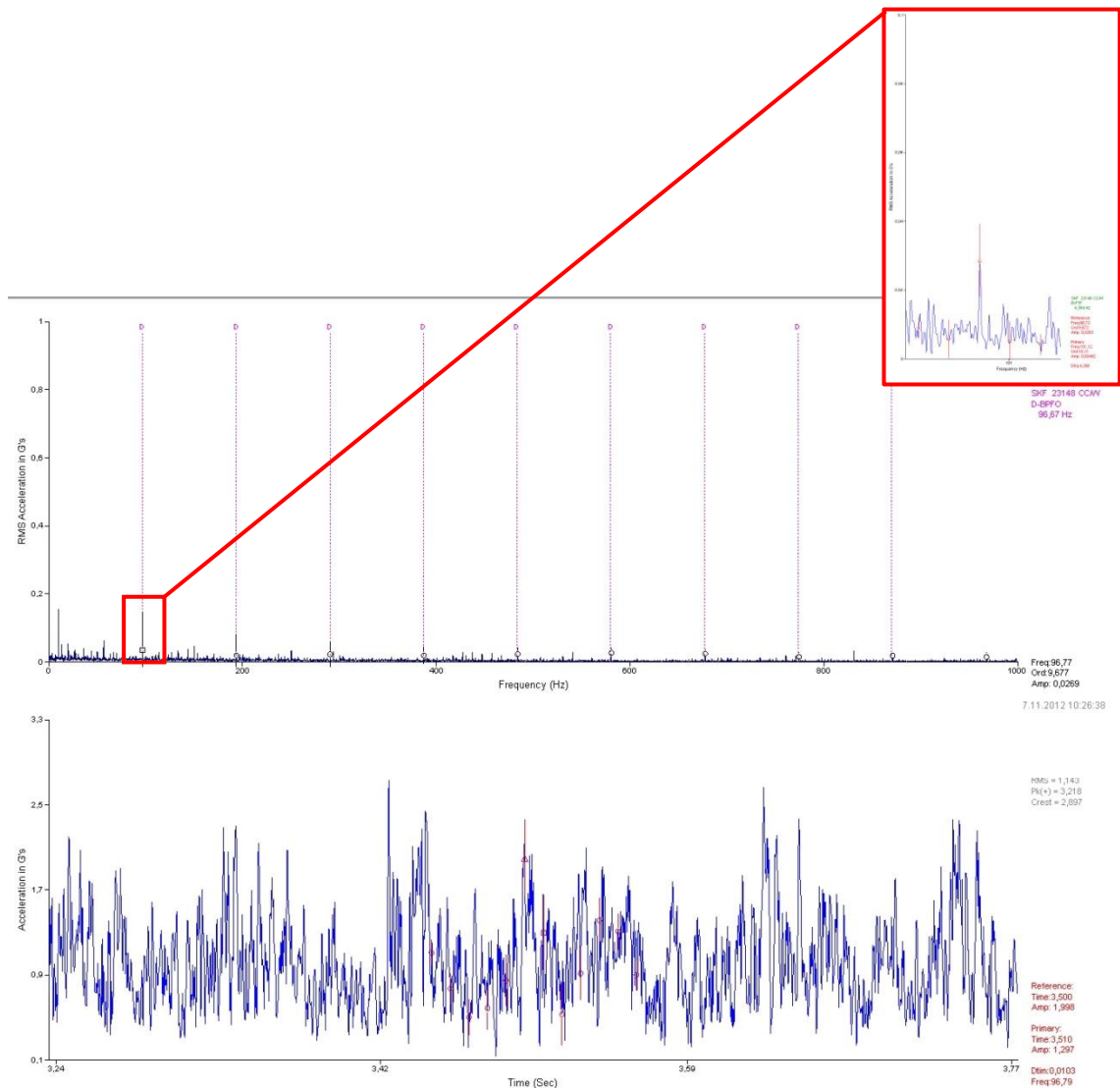
Fluting-vauriojäljet havaittiin laakerin ulkokehän kuormitusvyöhykkeellä selvästi visuaalisesti laakerin vaihdon yhteydessä. Vuotovirran vaurioittamaa aluetta oli laakerin ulkokehän piiristä noin kolmasosa. Vauriojäljessä on selvästi nähtävissä säännöllinen jaksollisuus, joka aiheuttaa säännöllisiä iskuja aikatasosignaalin ja näkyy spektrissä ohitustaajuutena sekä sen korkea-amplitudisina harmonisina taajuuksina koko taajuuskaistalla. Vaurioituneiden laakereiden pitimissä ei havaittu kummassakaan tapauksessa visuaalisesti merkkejä vaurioista. Pitimen ohitustaajuuden moduloituminen ulkokehän ohitustaajuuteen ei liity pitimen mekaaniseen vikaantumiseen.



Kuva 37. Kuvassa 36 esitettujen mittaustuloksien laakerin ulkokehä (Moventas Gears).

Viimeisenä laakerivaurio esimerkkinä käsitellään ulkokehän mekaanista vikaantumista, joka havaittiin värähtelymittauksien avulla. Laakerivaurion diagnosoitiin olevan ensiöakselin laakerin ulkokehällä. Laakerivaihdon yhteydessä ulkokehältä löytyi

useampia kohtia, joista laakerin ulkokehän pinta oli rikkoutunut (ks. Kuva 39). Kuvassa 38 on esitetty laakerista mitattu PeakVue -spektri, joka on skaalattu samalle amplitudiaskeikolle ja mitattu samalla taajuuskaistalla kuin Kuvassa 32 esitetty vuotovirran vikaannuttaneen laakerin spektri. Ulkokehän ohitustaajuus on havaittavissa PeakVue -spektrissä, mutta sen amplitudin taso ei juurikaan eroa muiden taajuuksien amplitudeista. Ulkokehän ohitustaajuudella havaitaan myös harmonisia taajuuskomponentteja. Mutta niiden amplitudit ovat matalia eivätkä ne erotu muiden taajuuksien amplitudeista selvästi.

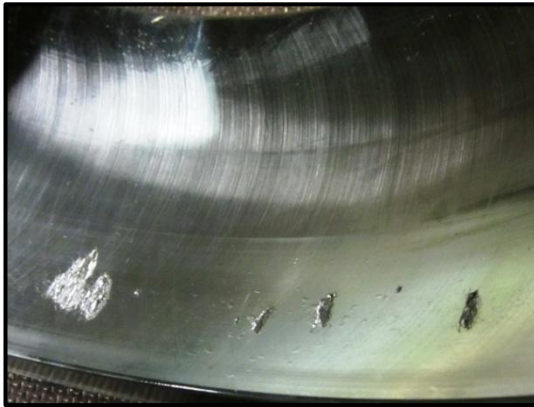


Kuva 38. PeakVue -spektri ja -aikataso hammasvaihteen ensiöakselin mekaanisesta laakerivauriosta.

PeakVue -spektrien amplituditasoja ei voi vertailla suoraan keskenään eri mittapisteiden tai mittauskohteiden välillä kuten perinteisesti nopeusspektrien amplitudeja tehollisarvoja vertaillaan. Mittaustulokset kuvissa 34 ja 38 on esitetty samalla amplitudiskaalauksella. Amplitudien suuruuksia ei voi verrata eri

mittauskohteiden välillä toisiinsa. Kiihtyvyyssarvot vuotovirran aiheuttamassa ulkokehän vikaantumisessa ovat todella korkeita ulkokehän ohitustaajuudella sekä sen harmonisilla taajuuskomponenteilla verrattuna spektrissä esiintyviin muiden taajuuksien amplituditasoihin.

Mekaanisessa ulkokehän vaurion tapauksessa ei havaittu tapahtuneen laakerin pitimen tai sen monikerran modulaatiota ulkokehän ohitustaajuuteen. Aikatasosignaalisista ohitustaajuutta on vaikea erottaa eikä siinä esiinny säännöllisiä pulsseja ohitustaajuutta vastaavalla aikaerolla. Laakeri purettiin ja tarkastettiin laakerin vaihdon yhteydessä, jolloin ulkokehällä havaittiin useampia vauriokohtia. Vaurioituneet kohdat eivät ole syntyneet säännöllisesti kuten vuotovirran aiheuttamassa fluting – vaurion tapauksessa. Flutingin aiheuttamia vauriojälkiä havaittiin ulkokehällä satoja, kun mekaanisen vaurion tapauksessa niitä oli vain viisi.



Kuva 39. Kuvassa 38 esitettyjen mittaustuloksien laakerin ulkokehä (Möventas Gears).

Tämän tutkimuksen perusteella vauriotyyppien (mekaaninen ja sähkövirta) aiheuttamalla laakerin pintojen vaurioittamistavalla on suora vaikutus aikatasosignaalisissa esiintyvien pulssien määrään sekä niiden taajuuteen. FFT-laskennalla aikatasosignaalisista muodostettaessa spektri, siinä esiintyvien pulssien määrä sekä niiden amplitudiin suuruus vaikuttavat suoraan spektriin syntyvän taajuuden amplitudiin sekä harmonisten määrään ja amplitudiin suuruuteen. Tässä työssä käsitellyissä vuotovirran aiheuttamissa ulkokehän vaurio esimerkkitapauksissa havaittiin ulkokehän ohitustaajuuteen moduloituneen laakerin pitimen ohitustaajuuden tai sen toisen harmonisen. Tämä ilmiö ei ole tyypillinen ulkokehän vaurioitumisen yhteydessä eikä ulkokehän ohitustaajuuteen liitty mekaanisen vaurion tapauksissa modulaatiota.

5.3 Öljyanalyysin mahdollisuudet

Vuotovirran aiheuttama kipinätyöstö laakerikomponenttien sekä hammastuksien välillä aikaansaa sähköpurkauksen oikeissa olosuhteissa öljykalvon läpi. Purkauksessa lämpötila kohoaa hetkellisesti yli metallin sulamispisteen, jolloin myös öljy palaa paikallisesti. Perinteisistä öljyanalyysimenetelmistä on kerrottu kappaleessa 3.2.1. Niillä pyritään löytämään mekaanisen vaurion irrottamia partikkeleita sekä todentamaan öljyn kunto ja vaihtoajankohta. Niiden avulla ei pystytä todentamaan vuotovirtavaurioita. Vuotovirran ei ole todettu vaikuttavan öljyn lisäaineiden toimivuuteen suoranaisesti. Mutta pinnoista irronneilla partikkeleilla on suuri pinta-ala, joten ne voivat vähentää lisäaineistuksen toimivuutta pintojen välisissä kosketustilanteissa (Posa & Ranta 2003). Teollisuudessa tarkkaillaan öljynsuodattimia. Niihin kertyneiden partikkeleiden perusteella pyritään diagnosoimaan mahdollinen vikaantuminen. Vuotovirtatapauksessa öljynsuodattimesta voi löytyä mustaa pikimäistä massaa. Uuden hammasvaihteen käyttöönoton jälkeinen öljynsuodattimen tukkeutuminen pikimäisestä massasta on todennäköisesti indikaatio vuotovirtatapauksesta. Muita vuotovirtaan liittyviä aistinvaraisia havaintoja öljyssä voi olla palanut haju sekä tummentunut väri. Näistä molemmat liittyvät kuitenkin moneen muuhunkin ongelmaan etenkin pidemmän aikaa käytössä olleen öljyn tapauksessa.

Voiteluöljyn valmistajat tai öljyjen analysointipalveluita tarjoavat yritykset eivät ole julkaisseet tai yleisesti tiedottaneet tutkineensa sähkövirran vaikutusta voiteluöljyn parametreihin. Tämän työn esimerkkitapauksissa ei öljyanalyysiä voitu käyttää, koska kohteiden vaihteet oli liitetty kiertovoitelujärjestelmään, jonka suuresta öljyvoitelutilavuudesta on mahdotonta erotella yksittäisen vaihteen partikkeleita. Teoreettisesti vuotovirtavaurioiden tapauksissa voiteluöljyn sähkönjohtokyky voi huonontua, jolloin sen kapasitanssi laskee ja läpilyöntikestoisuus heikkenee. Tällöin vuotovirta oikosulkeutuu pintojen välillä pienemmällä potentiaalierolla. Sähköpurkauksien aikaansaama öljyn paikallinen palaminen hapettaa öljyä, jolloin sen hapetus- ja TAN-arvo saattavat muuttua. Metallin sulamisen yhteydessä öljyn sekaan vapautuu palamisen sivutuotteina hiiltä ja kaasuja, kuten kevyitä hiilivetyjä. Kaasujen analysoiminen öljynäytteestä on haasteellista, koska kaasut saattavat liueta öljystä ja hävitä näytteestä ellei analyysiä suoriteta riittävän nopeasti. Öljynäytteestä tulisi analysoida hiilipitoisuus, hapettuminen sekä mahdollisesti kaasupitoisuudet ja verrata näitä suureita uuden vastaavan öljyn arvoihin. Esimerkkitaapauksena toimivassa kohteessa tulee todeta vuotovirtakuormitus mittauksella, jotta varmistutaan että pintojen välillä tapahtuu sähköpurkauksia ja tiedetään kuinka suuri virta vaikuttaa öljyn laatuun ja parametreihin.

6 YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin hammasvaihteissa havaittuja vuotovirtatapauksia, jotka olivat vaurioittaneet vaihteiston hammastuksia tai laakerointia. Tavoitteena oli löytää kunnonvalvonnan diagnosointimenetelmä, jonka perusteella pystyttäisiin vaurion todentamisen yhteydessä osoittamaan vaurion juurisyyksi sähkövirta. Vuotovirran aiheuttamien vaurioiden on havaittu yleistyvän prosessiteollisuuden laitoksissa. Se aiheuttaa loppukäyttäjille suuria kustannuksia, koska ongelman vakavuutta ei heti tiedosteta eikä sen poistamiseksi tehdä oikeaoppisia toimenpiteitä. Tässä työssä esitellyssä esimerkkitapauksessa vaihteen huolloista, asennuksista ja mittauksista tuli noin 20 000 € kustannuksia ennen kuin juurisyy saatiin selville ja poistettua. Esimerkkitaapauksen hammasvaihte oli yksiportainen ja pienitehoinen hammasvaihte, useampiportaisen ja suurempitehoisen vaihteen tapauksessa huoltokustannukset helposti moninkertaistuvat. Riittävän aikainen indikaatio vuotovirrasta antaisi aikaa tehdä tarvittavat toimenpiteet, ettei vaurio pääse uusiutumaan ennen kuin hammasvaihte huolletaan tai vaihdetaan varavaihteeseen.

Työn yhteydessä suoritettujen värähtelymittauksien analysoinnin ja vertailun yhteydessä havaittiin yhtäläisyyksiä vuotovirran aiheuttamissa laakerin ulkokehän vauriotapauksissa. Työssä esitellyissä tapauksissa molemmissa havaittiin PeakVue -mittauksissa muuhun värähtelyyn nähden erittäin korkea-amplitudinen ulkokehän ohitustaajuus sekä sen monikertoja. Lisäksi ohitustaajuuteen oli moduloitunut pitimen ohitustaajuus tai sen monikerran taajuuskomponentti. Kyseistä ilmiötä ei pidetä tyypillisesti ulkokehän vikaantumiseen liittyvänä. Tämän tuloksen johdosta diplomityössä päästiin sen tavoitteisiin eli löydettiin mahdollinen kunnonvalvontamenetelmä, jolla hammasvaihteen vaurio voidaan analysoida sähkövirran aiheuttamaksi. Havaittu ilmiö vaatii lisää tutkimustyötä ennen kuin sitä voidaan pitää luotettavana indikaationa vuotovirran aiheuttamasta ulkokehän vauriosta.

Öljyanalyysiä ei pystytty käyttämään tämän työn yhteydessä, mutta sitä käsiteltiin teoreettisesti sekä analysointiin sen mahdollisuuksia vuotovirran todentamiseksi. Sähkövirran vaikutusta voiteluöljyyn tulisi tutkia syvällisemmin sekä todentaa öljyanalyysin toimivuus käytännön kokeilla. Öljyanalyysin perusteella voitaisiin vuotovirta todentaa ennen kuin se vikaannuttaa hammasvaihteen komponentteja mekaanisesti käyttökelvottomiksi. Öljyanalyysi ei ota kantaa mikä komponentti hammasvaihteesta on vikaantumassa, mutta antaisi toimiessaan signaalin vuotovirtakuormituksesta. Värähtelymittauksilla on vaikeaa todentaa vuotovirran aiheuttama hammastusvaurio. Öljyanalyysillä pystyttäisiin hammasvaurion juurisyy identifioimaan sähkövirraksi ilman visuaalista tarkastusta tai vaativimmissa tapauksissa tarvittavaa elektronimikroskooppikuvausta joka vaatii koepalan hammastukselta.

Käyttöjen uusintaprojekteissa, joissa sekä sähkökäytöt että hammasvaihteet uusitaan tai päivitetään samanaikaisesti, on suositeltavaa hammasvaihteen valmistajan puolesta suorittaa vuotovirta- ja värähtelymittaukset automaattisesti heti käyttöönottovaiheessa. Mittauksien kustannukset eivät ole huomattavat suuremmissa projekteissa ja niiden avulla saadaan koko voimansiirtoketjun käyttövarmuus ja laskennallinen elinikä varmistettua. Käyttöönottomittauksilla näytetään asiakkaalle vaihdevalmistajan halu palvella asiakasta koko vaihteen elinkaaren aikana eikä rajoituta ainoastaan vaihdetointajaksi sekä samalla varmistetaan koko voimansiirtoketjun toimivuus luotettavasti.

LÄHTEET

ABB. Bearing currents in AC drives. 2003. ABB Technical information. Presentation. 28 p.

Ahola, J. ja Keski-Säntti, J. Kirjallisuusselvitys koneenosien käynninvalvonnan ja vika-diagnostiikan menetelmistä, moottorit. 2004. VTT. Esitelmä. 76 s.

Ahola, J. Taajuusmuuttajaohjattujen sähkömoottorikäyttöjen laakerivirrat ja niiden mit-taaminen. 28.9. 2011. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luentomonis-te. 37 s.

Errath, R. ja Hoppler, R. 2007. Motor bearings. Global cement magazine, 10/2007, pp. 2-7.

Erkkilä, I. 1999. Laakerivirta ja sen minimoiminen säädettyjen vaihtovirtakäyttöjen moottoreissa. Automaatio 1999, Helsingin messukeskus, 14-16.9.1999. s. 314-319.

Higgins, L.R., Mobley, R.K. ja Wikoff, D.J. 2008. Maintenance engineering handbook. The McGraw-Hill Companies Inc. 1244 p.

Iisakkala, J. 2002. Laakerivirrat. Sähkökonepäivät, 25-26.4.2002. ABB. s. 1-12.

ISO4406. 1999. Hydraulic fluid power, fluids, method for coding the level of contami-nation by solid particles. International organization for standardization. p 7.

Järviö, J., Parantainen, T., Piispa, T. ja Åstrom, T. 2007. Kunnossapito. 4. uudistettu painos. Helsinki, Kunnossapitoyhdistys ry. 283 s.

Kivioja, S., Kivivuori, S. ja Salonen, P. 2007. Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. 6.painos. Helsinki, Otatieto. 346 s.

Laitonen, J. Vuotovirrat hammasvaihteissa. 17.11.2006. Moventas Gears Oy. Sisäinen esitys. 50 s.

Miettinen, J. Monitorointi ja diagnostiikka. 2010. Tampere, Tampereen teknillinen yli-opisto. Luentomoniste. 149 s.

Miettinen, J. Konedynamiikan mittaukset. 2010. Tampere, Tampereen teknillinen yli-opisto. Luentomoniste. 117 s.

Mobius institute. Vibration training course book. 15.2.2012. Mobius insitute. Vibration analyst ISO category 2 coursematerial. 205 p.

Niilivuo, T. 2003. Hammasvaihdetöiden ohjeistus ja kehittäminen. Insinööri. Jyväskylä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, konetekniikan koulutusohjelma. 115 s.

Nohynek, P. ja Lumme, V. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Helsinki, Kunnossapitoyhdistys ry. 146 s.

Peltola, V. Taajuusmuuttajaperäiset vuotovirrat vaihteistossa. Diplomityö. Tampere 2006. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. 86 s.

Posa, J, Ranta, V. 2003. Hallitsematon kipinätyöstö. Metallitekniikka, 8/2003. s. 26–28.

PSK 7708. 2004. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja –virran mittaaminen. Helsinki, PSK Standardisointiyhdistys ry. 13 s.

Parikka, R. ja Vidqvist, V. 2004. Kaupalliset anturit ja mittauslaitteet öljyjen kunnonvalvontaan. Fluidi klinikka, 9, s. 1-9.

Randall, R.B. 2011. Vibration-based condition monitoring. 1. painos. Australia, University of New South Wales. 309 p.

Ranta, V. Information about bearing and gear damages caused by electrical leakage currents. 17.4.2003. Metso Drives. Sisäinen muistio. 14 s.

Reeves, T. PeakVue data collection techniques for the RBM analyst. 1999. Knoxville, Computational Systems, Inc. Esitelmä. 15 p.

Rockwell Automation. 2002. Inverter-driven induction motors shaft and bearing current solutions. Rockwell Automation. 45 p.

SFS-EN 13306. 2001. Maintenance terminology. Helsinki, Suomenstandardisointiliitto SFS. 56 s.

Särkimäki, V. Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors. Tohtorin väitöskirja. Lappeenranta 2009. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 118 p.

Technical guide no.5. 2000. Bearing currents in modern AC drive systems. Helsinki 2000, ABB. 23 s.

Tervola, J. 2006. Invertteri on vaaraksi hampaille. Metallitekniikka, 10/2006. s.18–21.

Vas, P. 1993. Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines. New York, Oxford university press. 309 p.