

Markus Rinta-Hoiska

SELVITYS RAUMAN PAPERITEHTAAN TAHTIMOOTTOREIDEN
KUNNONVALVONNAN KEHITTÄMISESTÄ

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2018

SELVITYS RAUMAN PAPERITEHTAAN TAHTIMOOTTOREIDEN KUNNONVALVONNAN KEHITTÄMISESTÄ

Rinta-Hoiska, Markus
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
tammikuu 2018
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 54
Liitteitä: 5

Asiasanat: tahtimoottori, kunnossapito, sähkömittaustekniikka, kunnonvalvonta

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää tahtimoottoreiden kunnonvalvontakeinoja, joita olisi mahdollista ottaa osaksi kunnonvalvontaohjelmaa Rauman paperitehtaalla.

Raporttiosuudessa käsitellään erilaisia kunnonvalvontamittauksia ja vierasmagnetoiduja tahtimoottoreita.

Lisäksi lähempään tarkasteluun otettiin TMP34-osastolta löytyvät vierasmagnetoidut tahtimoottorit, joiden roottoripiirin liitännässä esiintyy vakava ongelma. Roottorinapoja yhdistävissä liitännöissä syntyy aikaa myöten murtumaa ja tämä murtuma laajenee lopulta siihen pisteeseen, että liitäntä menee poikki. Liitännän poikki menemisen jälkeen moottoria ei voida magnetoida, jolloin kyseinen kone on toimintakyvytön ja se joudutaan lähettämään huollettavaksi. Tämä aiheuttaa kustannuksia muun muassa suunnittelemattoman seisakin ja tuotannonmenetyksen johdosta.

STUDY FOR IMPROVING CONDITION MONITORING OF SYNCHRONOUS MOTORS IN RAUMA PAPER MILL

Rinta-Hoiska, Markus

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in electrical engineering

January 2018

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 54

Appendices: 5

Keywords: synchronous motor, maintenance, electric measuring technology, condition monitoring

The purpose of the thesis was to find condition monitoring measurements of the synchronous motors that could be included into the condition monitoring program at Rauma paper mill.

The report section covers various condition monitoring measurements and separately excited synchronous motors.

In addition, a closer look was taken in rotor circuit connection of separately excited synchronous motors, in which occurs a severe problem. These motors are located in TMP34-department. In the course of time there develops a fracture in the connecting connections of the rotor circuit. Eventually this fracture expands to a point where the connection breaks. After the connection is broken, the motor can't be magnetized, in which case the motor is out of order and must be sent for service. This causes costs, including in unplanned downtime and loss of production.

SISÄLLYS

1	UPM OYJ, UPM PAPER ENA OY JA RAUMAN PAPERITEHDAS	5
2	KUNNONVALVONNAN SUUNNITTELU	6
3	TAHTIMOOTTORIT	9
3.1	Harjallinen tahtikone.....	12
3.2	Harjaton tahtimoottori.....	13
4	TAHTIMOOTTOREIDEN KUNNONVALVONTAMITTAUKSIA.....	14
4.1	Osittaispurkausmittaus	14
4.2	Mittasillat	17
4.2.1	Tasavirtasillat	18
4.2.2	Vaihtovirtasillat	19
4.3	Endoskoopkaus	21
4.4	Staattorivirran spektrimittaus.....	23
4.5	Toistoaalto/syöksyaaltomittaus.....	25
4.5.1	Mittausjärjestely ja mittauksen suorittaminen.....	26
4.6	Häviökerroinmittaus (tandelta, dissipation factor)	29
4.7	Akselijännitteiden ja laakerivirtojen mittaus	31
4.7.1	Tahtimoottorin roottorin napakierrossulku.....	32
4.7.2	Akselijännitteet tahtikoneilla.....	32
4.7.3	Arvojen mittaaminen	33
4.8	Värähtelymittaukset	35
4.8.1	Värähtelyn suureet, anturit ja mittayksiköt	37
4.8.2	Mittauspaikan valinta	40
4.8.3	Signaalinkäsittely	41
4.9	Eristysvastusmittaus ja polarisaatioindeksi.....	45
4.9.1	Eristysresistanssi.....	45
4.9.2	Polarisaatioindeksi.....	47
5	YHTEENVETO	49
	LÄHTEET.....	53
	LIITTEET	

1 UPM OYJ, UPM PAPER ENA OY JA RAUMAN PAPERITEHDAS

UPM Paper ENA (Eurooppa ja Pohjois-Amerikka) liiketoiminta-alue on maailman johtava graafisten papereiden valmistaja. Koko liiketoiminta-alueella työntekijöitä on noin 8000, 15 tehdasta, jotka sijaitsevat Euroopassa ja Yhdysvalloissa ja joiden tuotantokapasiteetti on 8,4 miljoonaa tonnia vuodessa. Liikevaihtoa kertyi vuodelle 2016 4 818 miljoonaa euroa, josta vertailukelpoista liikevoittoa oli 280 miljoonaa euroa. (UPM Biofore 2017)

Vuoden 2016 vuosikertomuksen mukaan koko UPM:n konsernin liikevaihto oli 9 812 miljoonaa euroa, joista vertailukelpoista liikevoittoa oli 1 143 miljoonaa euroa. (UPM vuosikertomus 2016, 4)

Rauman paperitehdas kuuluu UPM Paper ENA Oy – liiketoimintoon ja tehtaan paperintuotantokapasiteetti on 970 000 tonnia vuodessa 3 paperikoneella. Tehtaalla valmistettavat tuotteet ovat päällystetty (LWC) ja päällystämätön (SC) aikakauslehtipaperi. (UPM Oyj & UPM Biofore 2017)

Tehtaaseen kuuluu kolme paperikonelinjaa, revintämassaosasto, kaksilinjainen kuorimo, kaksi hiomoa, kuumahiertämö, vesilaitos ja biologinen jätevedenpuhdistamo. Lisäksi alueella toimii biovoimalaitos, joka tuottaa prosessihöyryä ja sähköä paperitehtaalle sekä sähköä ja kaukolämpöä Rauman kaupungille. Rauman tehtaalla työskentelee noin 560 henkilöä. (UPM Oyj 2017)

Raumalla valmistetun paperin loppukäyttökohteita ovat aikakauslehdet, myyntikuvat sekä erilaiset mainospainotuotteet. Lisäksi tehtaalla valmistetaan revintämassaa eli fluff-sellua hygienia- ja kattaustuotteiden raaka-aineeksi. (UPM Oyj 2017)

Vuosittain tehdas käyttää raaka-aineena paperinvalmistukseen yli 1,3 miljoonaa kuutiometriä kuusipuuta ja 165 000 tonnia sellua. (UPM Biofore 2017)

2 KUNNONVALVONNAN SUUNNITTELU

Kunnossapidon ensisijainen tehtävä nykyäskityksen mukaan on pitää laitteet jatkuvasti käyttökunnossa. Kunnossapitoon toki edelleenkin kuuluvat rikkoutuneiden laitteiden tai komponenttien korjaukset, mutta korjaustoiminta ei missään nimessä ole kunnossapidon päätarkoitus. Kunnossapito ei myöskään ole nykyäskityksen mukaan kustannus vaan tärkeä tuotannontekijä, jonka avulla pystytään varmistamaan kilpailukyky. (Mikkonen 2009, 25)

Yksi kunnossapitoon kuuluvista lajeista on kunnonvalvonta, jonka avulla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumis-, huolto-, ja korjausajankohdan määrittämiseksi. Kunnonvalvonnan toimenpiteitä ovat aistein sekä mittalaittein tapahtuvat tarkastukset ja valvonta sekä mittaustulosten analysointi. Kunnonvalvonta tuottaa lähtötietoja ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen suunnitteluun. (Mikkonen 2009, 97)

Koneiden ja laitteiden vikaantuvat komponentit, todennäköiset vikaantumismekanismat määrittävät ne kunnonvalvontatekniikat ja menetelmät ja valvottavat suureet joita kunnonvalvonnassa hyödynnetään. Todennäköiset vikaantumisnopeudet määrittävät miten ja millä aikataululla valvonta tulee toteuttaa. (Mikkonen & Kautto 2009, 162)

Kokonaisvaltainen kunnonvalvonta vaatii sen, että koneiden kuntoa valvotaan useilla eri tekniikoilla. Perinteisesti koneiden kuntoa valvotaan värähtelymittauksilla. Näiden lisäksi valvontatekniikoita ovat mm. visuaaliset tarkastukset, lämpötilan seuranta, öljyanalyysit, sähkötekniset kunnonvalvontamenetelmät yms. (Mikkonen & Kautto 2009, 162)

Mikäli laitoksella on ollut jo aiemmin kunnonvalvontatoimintaa, aloitetaan kunnonvalvonnan suunnittelu kartoittamalla nykyisen toiminnan laajuus ja kattavuus. Laitoksen kunnonvalvontaorganisaatio, toimintatavat ja käytössä olevat laitteet arvioidaan ja verrataan niitä asetettuihin tavoitteisiin. On arvioitava, voidaanko kunnonvalvonnalle asetetut tavoitteet saavuttaa kehittämällä olemassa olevaa toimintaa vai onko tarpeita laajemmalle kehitystyölle. (Mikkonen & Kautto 2009, 162)

Kunnonvalvontasuunnitelma määrittelee suoritettavat tarkastukset ja mittaukset. Suunnitelmaa tulee päivittää kokemusten karttuessa. Kunnonvalvonnan mittaussuunnitelma tulisi sisältää seuraavat kokonaisuudet:

- käytettävät valvontatekniikat, -menetelmät, -parametrit ja niiden raja-arvot
- mittausvälit
- käytettävät mittausjärjestelmät
- mittaustoiminnan käytännön järjestelyt
- mittausten dokumentointi, raportointi ja seuranta

Valvontasuunnitelmassa on määritelty mitkä koneet mitataan ja miten usein. Mikäli jotain konetta ei pystytä mittaamaan suunniteltuun aikaan, mitataan se seuraavaan mittauskierroksen aikana jos ei muuta ole sovittu. Mittauksien yhteydessä seurataan, jääkö joku kone jatkuvasti mittaamatta ja miksi näin käy. (Mikkonen & Kautto 2009, 162–163)

Jokaiselle laitteelle määritellään riittävä kunnonvalvonnan taso. Selvitetään, voidaanko kunnonvalvonta toteuttaa ennalta asetettujen tavoitteiden mukaisesti yksinkertaisilla tarkastuksilla ja mittauksilla vai pitääkö soveltaa tarkempaa valvontaa. (esimerkiksi värähtelymittauksissa kokonaistasovalvonnan lisäksi tunnusluku- ja spektrivalvontaa). (Mikkonen & Kautto 2009, 163)

Mikäli todennäköiset vikaantumismekanismit ovat sellaisia, että jokin tekniikka tai menetelmä ei yksinään sovellu laitteen ensisijaiseksi kunnonvalvontamenetelmäksi on arvioitava, voidaanko laitteen kunnonvalvontaa toteuttaa jollain toisella menetelmällä tai yhdistelmällä, jossa valvontaa täydennetään jollain toisella tekniikalla tai menetelmällä. (Mikkonen & Kautto 2009, 163)

Samalla, kun mittaustoimintaa harjoitetaan, on syytä tarkkailla sen laatua, määrää ja saavutettuja hyötyjä. Tarkkailu voi tapahtua esimerkiksi PSK 5709:n mukaisesti seuraamalla mittaustoimintaa arvioivia tunnuslukuja sekä laskemalla havaittujen konevikojen kokonaiskustannuksista, mikäli ne olisivat päässeet kehittymään vaurioon saakka. (Nohynek & Lumme, 32)

Kun yksittäisiä vikoja havaitaan, tulee ennalta havaitun vian ansioista havaitun saavutetun säästön suuruus arvioida. Tässä käytetään kaavaa

$$S = \Delta p + \Delta r + \Delta c$$

missä

S	on yksittäisen vian kustannussäästö	
Δp	on säästetyt tuotantomenetyskustannukset	
Δr	on säästetyt huolto- tai korjauskustannukset	
Δc	on säästetyt seurausvaikutuskustannukset	(Nohynek & Lumme, 33)

Samaa kaavaa hyödyntäen voidaan laskea mittaustoiminnan kannattavuus myös pitkällä aikavälillä, kun otetaan mukaan kaikki aikavälillä havaitut vikaantumiset ja lasketaan mittaustoiminnalla saavutetut säästöt. (Nohynek & Lumme, 33)

Mikäli mittaustoiminnalla havaitaan pääosa alkavista vioista, voidaan yllä mainittujen säästöjen lisäksi saada lisäsäästöjä mm. varaosavarastoa pienentämällä, korjaustyötuntien vähentymisellä, vakuutusmaksujen alentumisella sekä koneiden käytön hyötysuhteiden kasvulla. (Nohynek & Lumme, 33)

Konevikojen varhainen havaitseminen johtaa ennakoimattomien seisokkien vähentymiseen, mikä näkyy laitoksen käyttöasteen kasvuna. Käyttöaste lasketaan kaavasta:

$$A = \frac{T - DT}{T} * 100$$

missä

A	on käytettävyys	
T	on suunniteltu tuotantoaika	
DT	on toimintakyvyttömyysaika	(Nohynek & Lumme, 33)

Myös monet muut laitoksen tuotantoon liittyvistä tekijöistä vaikuttavat suoraan sen käyttöasteeseen. On erittäin vaikea arvioida tarkasti jonkin tietyn yksittäisen toimen vaikutusta koko tehtaan käyttöasteeseen. (Nohynek & Lumme, 33)

3 TAHTIMOOTTORIT

Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka pyörijä eli roottori, jota nimitetään myös napapyörijäksi, pyörii seisojan eli staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahdissa. Periaatteessa tahtikoneen staattorin rakenne on samanlainen kuin epätahtikoneessa, mutta roottorin rakenne on erilainen. Tahtikoneen roottori eli napapyörä on joko umpirakenteinen tai avo- eli varsinaparakenteinen. Umpinapapyörää käytetään nopeakäyntisissä tahtikoneissa ja avo- eli varsinaparaken-teista pyörää hitaissa tahtikoneissa. Hiomon ja TMP34-osaston tahtimoottorit ovat avonapaisia moottoreita. (Aura & Tonteri 1994, 344)

Tahtimoottorin avonapainen roottori ei muodosta yhtenäistä lieriöpintaa, kuten oikosulkumoottorin roottori, vaan navoitus aiheuttaa sekä rautaosan että oikosulkukäämi-tyksen rikkoutumisen. Myös tahtimoottorin ilmaväli on tahtikäytöstä aiheutuvien vaa-timusten takia suurempi kuin samankokoisen oikosulkumoottorin. Tahtimoottorin käyttö voimakoneena tulee erikoisesti kysymykseen silloin, kun koneiston tehon tarve on suuri ja syöttävä sähköverkko on riittävän vahvasti mitoitettu. (Aura & Tonteri 1994, 354)

Hiomossa, jossa tuotetaan hioketta kuorimossa kuorituista tukeista, on 6 kappaletta Strömbergin valmistamia harjallisia tahtimoottoreita ja 1 ABB:n valmistama harjaton tahtimoottori, jotka toimivat 6 kV:n jännitteellä. Moottoreiden napapariluku on 10, jolloin niiden pyörimisnopeus on 300 1/min. Näiden moottoreiden tehot ovat välillä 6,5–12 MW. Kuumahiertämössä, eli TMP34-osastolla jossa valmistetaan puuhak-keesta hierrettä, on raportin kirjoittamisen aikaan 12 kappaletta Siemensin ja ABB:n valmistamia harjattomia tahtimoottoreita. Nämä moottorit toimivat 10 kV:n jännit-teellä. Moottoreiden napapariluku on 2, jolloin pyörimisnopeus on 1500 1/min. Näiden moottoreiden tehot ovat välillä 8,5–20 MW.

Tahtimoottorit käynnistetään verkkoon oikosulkumoottorina. Mikäli suoraa käynnistystä ei voida käyttää, voidaan moottorin käynnistysvirtaa rajoittaa kaikilla niillä menetelmillä, joita käytetään oikosulkumoottorin käynnistysvirran rajoittamiseksi, esimerkiksi tähtikolmio-, muuntaja- ja kuristinkäynnistyksellä. (Aura & Tonteri 1994, 356)

Moottorin suurella ilmavälillä, roottorin epäsymmetrisyydellä ja napakäämillä on tietty vaikutus käynnistystapahtumaan. Oikosulkukäämityksen kehittämässä epätahtimomentissa M_e noin puolella pyörimisnopeudella esiintyvä ”satulakohta” on tyypillinen oikosulkumoottorin häkkikäämityksessä esiintyvä epätahtimomentti. Mikäli käynnistysajan aikana napakäämissä kulkisi magneetoimisvirta, aiheuttaisi se magneettivuollaan staattorikäämityksen kanssa käynnistystä jarruttavan momentin M_j , joka mahdollisesti estäisi moottorin käynnistymisen. Tästä syystä tasavirtamagnetointia ei tahtimoottoreissa saa aloittaa ennen kuin roottori on saavuttanut riittävän pyörimisnopeuden. Kun napakäämi suljetaan käynnistysajan ajaksi ulkoisen resistanssin kanssa, se synnyttää oman vääntömomenttinsa M_r , mikä auttaa käynnistymistä. Kokonaisvääntömomentti on $M = M_e + M_r$. (Aura & Tonteri 1994, 356)

Yleensä napakäämin johdinkierrosmäärä on suuri, joten epätahtikäytössä pyörivä staattorikenttä indusoi magnetointikäämiin hyvin suuren jännitteen, ellei magnetointikäämiä suljeta riittävän pienen resistanssin kautta. Avoimeksi jäänyt magnetointikäämi aiheuttaa tapaturmavaaran suuren indusoituneen jännitteen takia, mikä samalla voi vaurioittaa magnetointikäämiä. Sopiva käynnistysresistanssi on $R \leq 10 \times R_r$, jossa R_r = napakäämin oma resistanssi. (Aura & Tonteri 1994, 357)

Vasta silloin, kun roottori saavuttaa epätahtimomentilla M lähes tahtinopeuden n_s , kytketään tasavirta napakäämiin. Tällöin napakäämin magneettikentän ja staattorin pyörivän magneettikentän välille syntyy suunnaltaan vaihteleva vääntömomentti. Jos roottorin jättämä on riittävän pieni, pysyy tämä tahdistava vääntömomentti kyllin kauan samansuuntaisena ja roottori vetäytyy tahtiin pyörivän magneettikentän kanssa. (Aura & Tonteri 1994, 357–358)

Tahtikoneeseen on synnytetävä tasavirralla magneettikenttä eli päävuoto, joka roottorin mukana pyöriessään indusoi ankkurikäämiin tarvittavan päälähdējännitteen. Magne-toimismenetelmien perusteella jaetaan tahtikoneet harjallisiin ja harjattomiin tahtiko-neisiin. (Aura & Tonteri 1994, 348)

Tahtimoottoreita käytetään suuremmissa loistehon kompensointitarpeissa ylimagne-toituna moottoreina kompensoimaan induktiivista loistehoa. Tällöin tahtimoottoria ni-mitetään pyöriväksi vaihekompensoattoriksi tai dynaamiseksi kondensaattoriksi. Yli-magnetoitu tahtimoottori luovuttaa verkkoon induktiivista loistehoa, joten se itse ottaa verkosta kapasitiivista loistehoa toimien näin kondensaattorin tavoin. Tällä tavoin voi-daan kehittää tehtaan epätahtimoottoreille niiden tarvitsema induktiivinen loisteho, jolloin tätä loistehoa ei tarvitse ottaa yleisestä sähköverkosta. (Aura & Tonteri 1996, 239)

Opinnäytetyössä tahtimoottoreille kunnonvalvontamenetelmiä pohdittaessa oli yksi tärkeimpiä tavoitteita löytää mahdollinen kunnonvalvontamenetelmä roottoripiirin vialle. Tätä vikaa esiintyy eniten TMP34-osastolla olevissa Siemensin 8,5 MW tehoi-sissa harjattomissa tahtimoottoreissa.

20 käyttövuoden aikana on tultu siihen tilanteeseen, jossa moottorin magnetointi-generaattorin ja roottoreita yhdistävissä liitännöissä syntyy murtumia. Keskusteluiden perusteella vika on suunnittelu- ja rakennevirhe, jossa roottoripakat ovat jousitettuja ja nämä pakat pääsevät liikkumaan vertikaalissa suunnassa. Tämä liike aiheuttaa aikaa myöden murtuman kasvamiseen ja lopulta tilanteen, jossa liitoksen resistanssi kasvaa liian suureksi. Resistanssin kasvaessa liian suureksi magnetointigeneraattorin syöt-tämä virta aiheuttaa liitännän liiallisen lämpenemisen, jolloin tämä sulaa ja sulamisen yhteydessä syntyy myös valokaari. Liitännän poikki meneminen ja valokaaren jäljet on esitetty liitteen kuvassa 1.

Kun magnetointipiiri ei ole suljettu liitännän poikki menemisestä johtuen, ei moottori magnetoidu enää ja valvonta-automaatiikka sammuttaa moottorin uudelleenkäynnis-tyksessä.

Koska tähän vikaan ei ole vielä löydetty luotettavaa valvontakeinoja, oli moottorin viikaantuminen aina yllätys ja se aiheutti kyseisen moottorin tuotantolinjalle suunnittele-mattoman seisakin. Suunnittelematon seisakki ja moottorihuolto aiheuttavat aina tuotantotappioita ja kustannuksia. Myöskään moottorinvaihtoon ei aina voida varautua täysin. Moottorille pitäisi löytyä saman tehoinen korvaaja, moottorin vaihtoa varten täytyy tilata ulkopuolista työvoimaa ja omat työntekijät täytyy irrottaa muista töistä moottorin vaihtoon. Yhden moottorin huolto kestää noin 20 viikkoa. Ensin moottorihuolloissa ohuet liitännät korvattiin joustavammilla nk. ”perhosliitännöillä”. Tällä joustavuudella pyrittiin kompensoimaan roottoripakkojen liikettä. Kun tämä korjaus ei toiminut, vaihdettiin nämä joustavat liitännät jäykkiin ja paksumpiin liitännöihin. Tämän lisäksi pakat jäykistettiin, jolloin tästä murtumasta olisi mahdollista päästä eroon.

3.1 Harjallinen tahtikone

Harjallisessa tahtikoneessa tuodaan magnetoimisvirta I_r hiiliharjojen ja messingistä tai teräksestä tehtyjen liukurenkaiden avulla pyörivään roottorikäämiin. Näissä harjallisissa koneissa tahtikoneen eli pääkoneen magnetoimisteho on

$$P_r = U_r I_r,$$

jossa

U_r = magnetoimisjännite

I_r = magnetoimisvirta,

Pääkoneen magnetointi harjallisessa koneessa voidaan tuottaa joko tasasähkölähteestä tai vaihtosähkölähteestä. Tasasähkölähteenä voidaan käyttää tasasähkölähdettä tai magnetointigeneraattoria. Magnetoimisgeneraattoria käytettäessä magnetoinnin säätö tapahtuu magnetoimisgeneraattorin magnetoimisvirtaa I_m säätämällä, jolloin magnetointigeneraattorin jännite U_r muuttuu aiheuttaen pääkoneen magnetoimisvirran I_r säätymisen. (Aura & Tonteri 1994, 348)

Vaihtosähkölähdettä käytettäessä sähkö tulee säätäjän kautta, joka säätää ja tasasuuntaa magnetoimisvirran I_r sopivaan arvoon. Magnetoinnin teholähteenä voidaan tässä

tapauksessa käyttää joko ulkoista vaihtosähkölähdettä tai itse pääkonetta. (Aura & Tonteri 1994, 348)

3.2 Harjaton tahtimoottori

Harjattomassa tahtikoneessa on pääkoneen kanssa samalla akselilla erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori magnetointikoneena. Ulkonapakoneessa magneettinavat ovat seisojassa eli staattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, on pyörijässä eli roottorissa. Magnetoimisgeneraattorin kolmivaiheisessa roottorikäämityksessä kehittyvä vaihtojännite tasasuunnataan diodisillan avulla tasajännitteeksi U_r , joka vaikuttaa pääkoneen napa- eli magnetoimiskäämiin syöttäen siihen magnetoimisvirran I_r . (Aura & Tonteri 1994, 349–350)

Pääkoneen magnetoinnin säätö tapahtuu tässäkin magnetointigeneraattorin magnetoimisvirtaa I_m säätämällä. Magnetointigeneraattorin virta otetaan vaihtosähkölähteestä säätäjän välityksellä. (Aura & Tonteri 1994, 350)

4 TAHTIMOOTTOREIDEN KUNNONVALVONTAMITTAUKSIA

4.1 Osittaispurkausmittaus

Sähkökoneen eristyksen vanhetessa sen sisäiset osittaispurkaukset lisääntyvät. Osittaispurkaukset ovat pieniä sähköisiä purkauksia, joita syntyy enimmäkseen eristyksen vioissa. Esimerkiksi valmistusvirheiden tai ylikuumenemisen aiheuttama runkoeristyksen säröileminen lisää onteloita tai ilmataskuja, joissa tapahtuu purkauksia. Tiedetään, että osittaispurkauksia tapahtuu jo vuosia ennen vikaantumista. Monet vikaantumismekanismit, jotka määrittävät staattorin käämieristyksen käytännön eliniän, ovat seurausta osittaispurkauksista. Osittaispurkausmittaukset (PD-testit) ovat tehokas menetelmä suurjännitekoneiden (>3kV) staattoreiden käämieristyksen kunnonvalvonnassa. Osittaispurkausmittausten trendin seurannalla voidaan mahdollinen vikaantuminen ennakoida jo hyvissä ajoin ja suunnitella sen vaatimat huoltotoimenpiteet hyvissä ajoin. (Kokko 2009, 411)

Osittaispurkausmittauksilla voidaan tunnistaa seuraavat vanhenemis- ja vikaantumismekanismit: käämieristyksen terminen vaurioituminen (ylikuormitus), voimakkaiden kuormitusvaihteluiden aiheuttama käämieristyksen sidosten heikkeneminen, käämieristyksen kyllästysprosessin epäonnistuminen (ontelot ja säröt eristeessä), käämityksen löystyminen, sähköiset urapurkaukset ja käämin johtavan/puolijohtavan pinnan heikkeneminen ura-alueella, kääminpääalueen sähköinen vikaantuminen (lika ja vuodot), käämiuran ulostuloalueen kentänheikennyspinnan heikkeneminen (puolijohtavan pinnan eroosio) sekä riittämätön väli vaiheiden välillä (vaiheiden välisten tukipalojen irtoaminen). (Kokko 2009, 411)

Mittaus tehdään osittaispurkausanalyysaattorilla käyvällä koneella joko kiinteiden antureiden tai siirrettävien antureiden avulla. Asentamalla koneeseen kiinteät anturit voidaan mittaus suorittaa milloin tahansa koneen käydessä normaalisti. Mittauksesta saadaan raportit valmiin analysointiohjelmiston avulla. (Kokko 2009, 411)

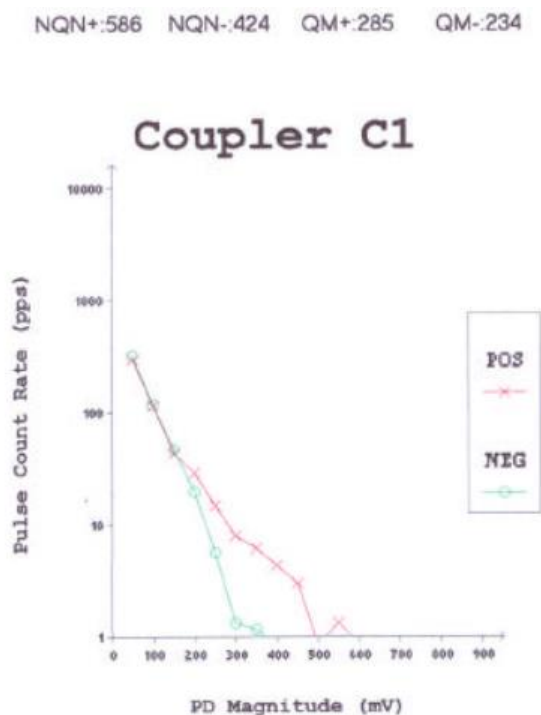
PD-mittaus voidaan tehdä myös siirrettävillä PD-antureilla silloin, kun halutaan välttää investointi kiinteisiin antureihin. Tällöin moottori pysäytetään ja asennetaan anturit tilapäisesti moottorin syöttökaapelin kytkentäkoteloon tai syöttökaapelin kytkentätilaan. Tämän jälkeen moottori käynnistetään ja sillä ajetaan normaalia kuormitustilannetta ja suoritetaan mittaukset. Poikkeustapauksessa voidaan mittaus tehdä myös tyhjäkäyväällä koneella, jos sitä ei ole mahdollista kuormittaa. (Kokko 2009, 411)

Yksi tapa luokitella PD-aktiivisuutta on mitata osittaispurkauksien lukumäärä, suuruus ja pulssin sijainti suhteessa syöttötaajuuden vaihekulmaan. Tätä menetelmää kutsutaan PD-pulssin vaiheanalyysiksi (PD Pulse Phase Analysis, PPA). PPA-menetelmä sisältää lisäkeinoja erottaa sähköinen kohina PD:sta ja lisäksi antaa lisämahdollisuutta tutkia staattorin käämieristysten todellista heikkenemisprosessia. (Kokko 2009, 412)

Osittaispurkausten suuruutta mitataan purkausten varauksen suuruudella (pC). Mittalaittejärjestelmien valmistajat ovat ottaneet käyttöön menetelmiä, joissa varauksen suuruutta mitataan millivolteina. Tällöin purkauksen varauksen suuruus pC vastaa tiettyä voimakkuutta millivolteina. (Kokko 2009, 412)

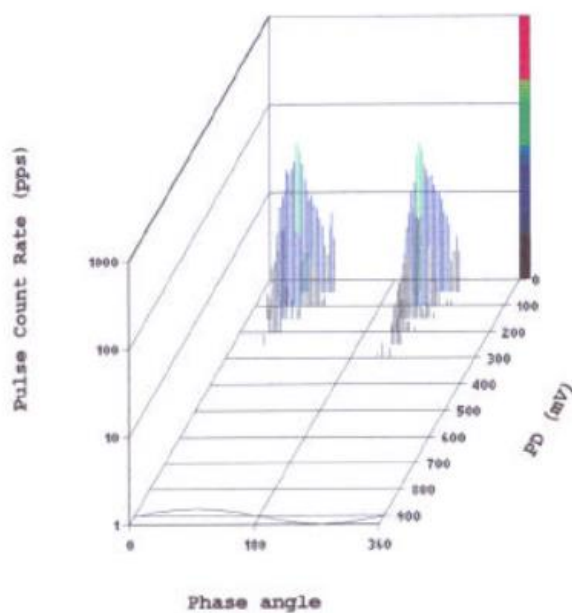
Pulssin korkeusanalyysiä varten mittausohjelmisto laskee automaattisesti kaksi erilaista arvoa molemmille vaihekulmille:

- Qm-arvo (peak magnitude) on pulssin voimakkuuden arvo sillä kohtaa käyrää, jossa pulssien esiintymistiheys on 10 pulssia/sekunti. Tämän lukeman perusteella voidaan arvioida purkauspulssien haitallisuutta. Qm-arvot lasketaan molemmille puolijaksoille erikseen (negatiiviselle puolijaksolle lasketaan Qm+ -arvo eli positiiviset pulssit ja positiiviselle puolijaksolle Qm- -arvo eli negatiiviset pulssit)
- NQN-arvo (normalized quantity number) kuvaa vaihekulmakäyrien alapuolelle jäävää osaa ja vastaa osittaispurkauksista syntyvää häviöenergiaa. Tämän lukeman perusteella voidaan arvioida koko käämityksen yleiskuntoa. Myös NQN-arvot annetaan molemmille puolijaksoille erikseen (NQN+ ja NQN- -arvot) (Kokko 2009, 412)



Kuva 1 Osittaispurkausten pulssinkorkeusanalyysi PPA (PSK 7709 2001, 5)

Yleisin tapa tulkita PD-aktiivisuutta on pulssin korkeusanalyysi (Pulse Height Analysis, PHA). PHA-tuloksessa positiiviset ja negatiiviset PD-pulssit tulkitaan huomioiden niiden suuruus ja lukumäärä. (Kokko 2009, 412)



Kuva 2 Osittaispurkausten pulssin vaiheanalyysi PHA (PSK 7709 2001, 6)

4.2 Mittasillat

Mittasilloja käytetään tahtimoottoreiden kunnonvalvonnassa esimerkiksi roottorikämmityksen vastusmittaukseen. Mittauksia voidaan suorittaa joko tasa- tai vaihtovirtasillalla.

Resistanssimittauksilla voidaan selvittää esimerkiksi roottorikämmityksen sähköinen kunto. Yksittäinen mittaus ei silti ole vielä riittävä kämmityksen kunnon toteamiseen, vaan mittauksia täytyy suorittaa useampi ja näitä tuloksia verrataan keskenään. Tällaisia vikoja, joita voidaan mittasilloilla mitata ja seurata, ovat mm. huonot liitokset, kämmien katkokset ja pienempien moottoreiden kyseessä ollessa myös kämmien kierrosten väliset oikosulut. (PSK 7705 2000, 1)

Resistanssimittauksissa tulee ottaa huomioon koneen lämpötila. Jos käyttöönottomittauspöytäkirjassa mittaukset ovat suoritettu tietyssä lämpötilassa ja kunnonvalvontamittaukset suoritetaan eri lämpötilassa, tämä lämpötila kompensoidaan kaavalla:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$

jossa

R_2	resistanssi lämpötilassa t_2	
R_1	resistanssi lämpötilassa t_1	
α	kerroin astetta kohden	(Valtanen 2013, 922)

4.2.1 Tasavirtasillat

Tasavirtailtojen perusmuoto on Wheatstonen silta. Mitattava vastus R_x on sillan yhtenä haarana ja kolmesta muusta vastuksesta ainakin yksi on säädettävä. (Halko, Launonen, Malinen & Välimaa 1997, 58)

Jännite-ero ΔU pisteiden B ja välillä on

$$\Delta U = U_B - U_A = \frac{R_x R_2 - R_1 R_3}{(R_1 + R_x)(R_2 + R_3)} * U$$

Mittauksessa silta tasapainotetaan eli asetellaan säätövastusten avulla galvanometri virrattomaksi, jolloin $\Delta U = 0$ ja $R_x R_2 = R_1 R_3$ (Halko ym. 1997, 58)

Tasapainossa olevassa mittasillassa vastakkaisten haarojen resistanssien tulot ovat yhtä suuret, jolloin

$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_1$$

Tehdasvalmisteisissa silloissa vastus R_x voidaan lukea säätönappien asennosta tai suoraan digitaalinäytöstä ilman laskutoimituksia. (Halko ym. 1997, 58)

Thomsonin tasavirtasillalla mitataan pieniä vastuksia ($\mu\Omega \dots \Omega$). Vastukset R_1, R_2, R_3, R_4 ovat tasapainovastuksia. Vastus R_N on normaalivastus, jonka suuruus on aseteltavissa ja jonka tulisi olla mittauksessa samaa suuruusluokkaa kuin mitattava vastuksen. (Halko ym. 1997, 58)

Thomsonin silta tasapainotetaan siten, että $R_1 = R_4$ ja $R_2 = R_3$ (tai että suhde $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} =$ vakio) ja pisteiden A ja B välinen jännite on nolla. Näistä ehdoista voidaan laskea tuntematon resistanssi R_x

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N = \frac{R_4}{R_3} R_N \quad (\text{Halko ym. 1997, 58})$$

4.2.2 Vaihtovirtasillat

Vaihtovirtasilloissa syöttävänä jännitteenä on vaihtojännite ja mitattavan kohteena on impedanssi, usein yksinkertainen komponentti kuten kela tai kondensaattori. Vähintään yhden sillan muista haaroista täytyy olla impedanssi, jotta silta voitaisiin tasapainottaa. Yleisesti Wheatstonen sillassa voidaan kaikki vastukset korvata impedansseilla, jolloin saadaan vaihtovirtasilta. (Halko ym. 1997, 58)

Sillan tasapainoehto on

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_3 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_4$$

Merkintä \underline{Z} tarkoittaa osoitinta, jonka pituus on Z ja vaihekulma ϕ . Osoitinlaskennan sääntöjen mukaisesti yhtälössä reaali-osien täytyy olla keskenään yhtä suuret ja imaginaariosien myös keskenään yhtä suuret. (Halko ym. 1997, 58)

Yhtälö jakaantuu siis kahdeksi yhtälöksi

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$$

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vaihtovirtasillassa täytyy olla kaksi erillistä säätöä sillan tasapainotusta varten. Vaihtovirtasilloja on monia erilaisia sen mukaan, millainen impedanssi on sijoitettu mihinkin haaraan. Sillat on nimetty keksijänsä mukaan (esim. Maxwellin, Wienin ja Scheringin silta), mutta tällä ei käytännön mittauksessa ole suurta merkitystä, sillä yleensä käytetään tehdasvalmisteista siltaa, jonka sisäinen kytkentä saattaa olla erilainen eri komponentteja mitatessa. (Halko ym. 1997, 59)

Käsitteellisen sillan tasapainotus tehdään kahdella säätimellä, joista toisen asennosta luetaan reaktanssisuure (L tai C) ja toisen asennosta häviösuure. Säädöt vaikuttavat toisiinsa, joten säätöä on jatkettava niin kauan, että yhteinen minimi on löytynyt. Minimien löytämiseksi voi olla tarpeellista säätää myös siltaa syöttävän oskillaattorin

amplitudia ja nollailmaisimen herkkyyttä. Nykyaikainen automaattisilta voi tehdä tasapainotuksen täysin automaattisesti ja näyttää tulokset digitaalisesti sekä lisäksi näyttää käytetäänkö sarja- vaiko rinnansijaiskytkentää. (Halko ym. 1997, 59)

4.3 Endoskooppaus

Ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä kutsutaan yleisnimellä NDT-menetelmät. Lyhenne NDT tulee englanninkielisistä sanoista ”Non Destructive Methods”. Ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä käytetään koneiden ja kunnonvalvonnan lisäksi myös laajalti materiaalin vastaanotossa ja laadun seurannassa. Kunnonvalvonnassa yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat endoskooppitarkastelu, ultraääniluotaus tai stroboskooppitarkastelu. (Miettinen, Leinonen, Riutta, Heinonen & Kokko 2009, 447)

Endoskooppi on laite, joka mahdollistaa kohteen visuaalisen tarkastuksen vaikeasti havaittavissa paikoissa kuten koneiden ja laitteiden sisäpuolisissa koteloidissa, putkissa tai ahtaissa paikoissa. Endoskoopit jaetaan kahteen ryhmään, kiinteäputkisiksi eli borooskooppeiksi sekä taipuisiksi endoskooppeiksi. Taipuisissa endoskooppeissa taipuisa putki voi olla joko kuituoptyinen tai taipuisan putken päässä on videokamera. Kiinteäputkisissa endoskooppeissa putken halkaisija vaihtelee välillä 2...20 mm. Sekä kiinteän että taipuisan putken pituus voi olla jopa kymmen metriä. Taipuisan putken etu on se, että sillä voidaan kulkea pitkin mutkittelevaa reittiä ja kuvauspäätä voi käännellä eri suuntiin. (Miettinen ym. 2009, 447)

Putkia on saatavilla monenlaisia erilaisilla ominaisuuksilla ja erilaisiin käyttökohteisiin. Tarpeen vaatiessa tutkittava kohde voidaan valaista endoskoopin omalla valolähteellä, joka on yleensä ns. kylmävalolähde. Joihinkin endoskooppeihin on saatavissa hiusmitta-asteikko esim. säröjen mittaamista varten. (Miettinen ym. 2009, 447)

Endoskooppaus perustuu otettujen kuvien tulkintaan, jolloin kameralla saatavien kuvien laatu nousee tärkeään asemaan, sillä huonosta kuvasta voidaan tehdä joko yli- tai alidiagnooseja kuvattun kohteen kunnosta. Tämä voi taas aiheuttaa pahimmissa tapauksissa turhia korjauksia tai koneen rikkoutumista, jolloin esimerkiksi moottori on poissa tuotannosta turhaan.

Opinnäytetyön aikana käytössä oli SKF:n valmistama endoskooppi mallia TKES 10A. Endoskoopilla otetut valokuvat olivat parhaimmillaankin keskinkertaisia, pääsääntöisesti huonolaatuisia, kuten liitteen 4 kuvasta on mahdollista havaita. Tarkennuksen puuttuessa, kameran oikealle etäisyydelle saaminen kuvattavasta pinnasta ahtaassa

paikassa oli erittäin hankalaa. Lisäksi valonlähde ei ollut paras mahdollinen, koska valon säädettävyys oli erikoinen, jolloin valokuvat ylivalottuivat helposti, tai valo oli riittämätön. Myöskin pienestä resoluutiosta johtuen kuvasta, joka oli tuotu tietokoneen ruudulle, oli vaikeuksia saada selvää. Endoskooppiyksikön näytössä kuva on tarkka, mutta näytön pienuudesta johtuen kuvasta oli vaikea nähdä, oliko otettu kuva minkä laatuinen.

4.4 Staattorivirran spektrimittaus

Sähkökoneen sisäiset muutokset ja vikatilanteet vaikuttavat roottorin virtoihin. Roottorin virrat moduloivat ilmavälin kautta staattorikäämityksen virtaan. Staattorivirta muodostuu syöttövirran perustaajuudesta, harmonisista taajuuksista sekä erilaisten muutos- ja vikatilanteiden aiheuttamista lisäkomponenteista. Staattorivirran mittausta ja analyysia voidaan näin ollen käyttää sähkömoottorin kunnonvalvontamenetelmänä. Menetelmästä käytetään englanninkielisessä kirjallisuudessa yleisesti nimitystä MCSA-tekniikka (Motor Current Signal Analysis). Mittaustapa on käytetty etenkin oikosulkumoottoreille, mutta tahtimoottoreille mittausta voidaan käyttää magneettipiirin muutoksen tutkimiseen, esimerkiksi roottorin epäkeskisen sijainnin vuoksi. (Kokko 2009, 386)

Kannettavilla mittalaitteilla staattorivirta mitataan erillisellä virtapihdillä joko suoraan moottorin syöttökaapelista tai virtamuuntajan toisiopiiristä. Virtapihti kytketään suoraan analysaattoriin. Sähköturvallisuussäännösten mukaan virtapihdin asettamiseen tarvitaan sähköalan ammattihenkilö. (Kokko 2009, 386)

Mittaustulosten analysoinnissa tarvitaan hyvää amplitudin mittausrésoluutiota, yleensä luokkaa 80–100 dB. Analysointia varten mittaussignaali muunnetaan tavallisesti taajuustasoon. Useimmiten muunnos tehdään FFT-muunnoksella (Fast Fourier Transform), joka soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa koneen kuormitus on vakio mittaajakson ajan. Tarvittava mittauseräytteen pituus ja mittausaika riippuu siitä, kuinka tarkka taajuuserottelu signaalista halutaan. Ennen mittausta valitaan haluttu taajuusalue ja tarvittava spektriviivojen lukumäärä.

Tarvittava mittausaika vakiotilanteessa saattaa olla jopa joitakin kymmeniä sekunteja, riippuen valitusta tarkkuudesta. Ongelmalliseksi tilanne muuttuu silloin, jos koneen kuormitus muuttuu nopeasti eikä riittävän pitkää tasaista näytejaksoa vakiotilanteessa saavuteta. Tällaisessa tapauksessa perinteinen FFT-analyysi (Fast Fourier Transform) ei enää riitä vaan tarvitaan erikoismenetelmiä. Yksi tällainen on esimerkiksi STFT (Short-Time Fourier Transform) ja Wavelet -muunnoksen yhdistelmä. (Kokko 2009, 387)

Suurilla kolmivaiheisilla suurjännitemoottoreilla staattorin ja roottorin välisen ilmävälin riittävän pieni epäkeskisyys varmistetaan huolellisella suunnittelulla, laatustandardeilla, laadukkaalla asennuksella ja käyttöönottomittauksilla. On epätavallista, että uudelle huolellisesti käyttöönotetulla moottorilla esiintyisi niin suurta epäkeskisyydestä, että sitä ei voida hyväksyä. (Kokko 2009, 391)

On kuitenkin mahdollista, että useita vuosia käytössä olleella moottorilla voi esiintyä jo niin suurta ilmävälin epäkeskisyyttä, että sitä ei voida enää hyväksyä. Epäkeskisyyttä on kahta tyyppiä, staattinen epäkeskisyys ja dynaaminen epäkeskisyys, mutta käytännössä nämä molemmat voivat esiintyä myös samanaikaisesti. Pahimmassa tapauksessa liian suuri ilmävälin epäkeskisyys voi johtaa roottorin ja staattorin pintojen väliseen hankaukseen. Sen seurauksena staattorin levypaketti ja suurjännitekäämitys voivat vaurioitua. Tämä voi johtaa kalliiseen korjaukseen (staattorin uudelleenkäämitys). (Kokko 2009, 391)

Epäkeskisyyden mittaamiseen virtaspektrianalyysaattorilla ja sen tulosten tulkitseminen vaatii taajuuskomponentin määrittämisen, eikä kirjallisuudesta löytynyt tahtimoottoreille sopivaa kaavaa, koska kaavoissa käytetään jättämää s , jota tahtimoottoreissa ei esiinny.

4.5 Toistoaalto/syöksyaaltomittaus

Toistoaalto/syöksyaaltomittaukseen käytetään pysähdyksissä olevan sähkökoneen staattori-, roottori- tai napakäämityksen kierroseristysten koestamiseen. (PSK 7706 2000, 1)

Sähkökoneiden pienjännitteisten käämitysten käämivauriot alkavat usein johdinkierrosten välisinä kierrosoikosulkuina. Kierrosoikosulun seurauksena itse vikapaikka ja vikaan osallistuvat johdinkierrokset lämpenevät voimakkaasti. Tämä johtaa tavallisesti kierrosoikosulun laajenemiseen muihin johdinkierroksiin. (PSK 7706 2000, 1)

Jos konetta ei tässä vaiheessa kytketä pois verkosta, vika laajenee ennen pitkää käämin ja koneen rungon väliseksi maasuluksi tai kahden vaiheen väliseksi vaihesuluksi. Tällöin kysymyksessä on yleensä jo varsin laaja käämivaurio, joka maasulun tapauksessa on lisäksi voinut vaurioittaa levypakettia (vaihtosähkökäämitykset). (PSK 7706 2000, 1)

Käämitysten eristysten kunnonseurannassa ja mahdollisten vikojen paikallistamisessa keskeisellä sijalla ovat erilaiset jännitekoestukset, joilla koestetaan erikseen pää- ja johdineristystä. Pääeristysten (ura- tai maaeristysten ja vaiheväliseristysten) koestus tehdään tavallisesti verkkotaajuisella vaihtojännitteellä tai matalataajuisella vaihtojännitteellä esimerkiksi 0,1 Hz. (PSK 7706 2000, 1)

Useimmissa käämirakenteissa kierros- ja johdineristysten koestukseen ei voida käyttää tasa- tai vaihtojännitettä sen vuoksi, että näillä ei pystytä aikaansaamaan jännitesitua eri kierrosten välille (pitkittäistä eli longitudinaalista jännitettä). (PSK 7706 2000, 1)

Sen sijaan on käytettävä sopivaa syöksyaaltoa, joka käämitykseen edetessään jakaantuu eri kierrosten välille ja aikaansaa tarkoituksenmukaisen jännitejaon. Syöksyaallon jyrkkyys pyritään tavallisesti valitsemaan siten, että jännitteen jakautuminen olisi mahdollisimman lineaarinen. Toistoaaltomittauksella juuri saadaan aikaan halutunlainen syöksyaalto käämitykseen. (PSK 7706 2000, 1)

4.5.1 Mittausjärjestely ja mittauksen suorittaminen

Toistoaltomittauksessa käytetään koestuslaitteita, jotka lähettävät käämitykseen syöksyaaltoa sopivalla esimerkiksi 50 Hz taajuudella. Syöksyaalto saadaan aikaan kytkemällä käämielementin alku- ja loppupään välille kondensaattori, joka yhdessä käämityksen induktanssin kanssa muodostaa häviöllisen LC-värähtelypiirin. Käämityksen yli vaikuttavan jännitteen amplitudi, taajuus ja vaimeneminen havainnoidaan toistoaltokoestuslaitteeseen liitetyn oskilloskoopin avulla. (PSK 7706 2000, 1)

Ennen koestusta suoritetaan eristysvastusmittaus. Tällä varmistetaan, ettei käämityksen ja rungon välillä ole eristysvikaa ja ettei käämitys ole kostunut. Kostunut käämitys on kuivattava. Likainen käämitys on syytä puhdistaa. Pesun jälkeen käämitys on kuivatettava huolellisesti. (PSK 7706 2000, 2)

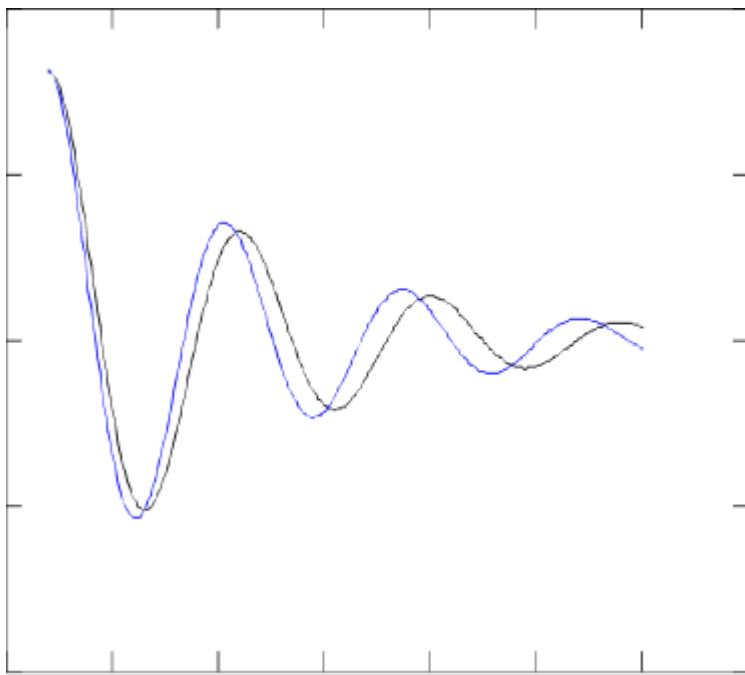
Koestuksessa käytettävä jännitetaso tai toistoallon maksimiamplitudi määräytyy koestettavan käämityksen nimellisjännitteen, rakenteen, iän ja kunnon perusteella. (PSK 7706 2000, 2)

Jos käämitykselle on määritelty tehtäväksi myös pääeristyksen jännitekoestus vaihtotai tasajännitteellä niin toistoaltokoestuksessa käytettävän jännitteen ei tulisi ylittää koestusjännitetasoa. Vertailuarvona käytetään jännitteiden maksimiamplitudeja. Tasajännitteellä tämä on suoraan tasajännitearvo. Rajoitus on seurausta siitä, että toistoaltokoestuksessa ei ole tarkoituksenmukaista rasittaa pääeristystä enempää kuin varsinaisessa pääeristyksen jännitekoestuksessa. (PSK 7706 2000, 2)

Koestettaessa jännite nostetaan tasaisesti koestusarvoon, jossa se pidetään 3...10 sekuntia ja lasketaan sitten tasaisesti nolleen ennen jännitteen poiskytkemistä. Jännitteen jakaantumiseen vaikuttavat useat tekijät, erityisesti toistoallon jyrkkyys. Likimääräisesti toistoallon voidaan kuitenkin olettaa jakaantuvan tasaisesti käämityksen sarjaan kytkettyjen kierrosten välillä. (PSK 7706 2000, 2)

Kunnossa olevan koneen käämielementtien värähtelyvasteet ovat yhteneviä, jolloin ne mittalaitteen näytöllä ovat päällekkäin. (PSK 7706 2000, 2)

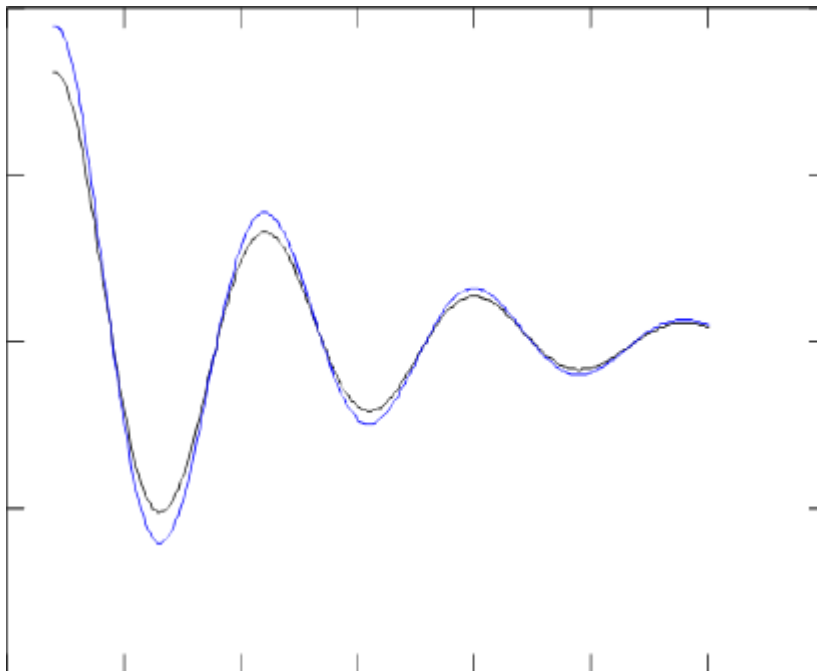
Alla oleva kuva esittää värähtelyvastetta tilanteessa, jossa kierroseristysvika on johtanut galvaaniseen vikaan kahden perättäisen johdinkierroksen välillä. (PSK 7706 2000, 3)



Kuva 3 Esimerkki värähtelyvasteesta, kun toisessa vyyhdessä on galvaaninen vika kahden kierroksen välillä (PSK 7706 2000, 3)

Tällaisessa tilanteessa käämitykseen on jo muodostunut oikosulkeutunut johdinsilmukka kierrossulun vaikutuksesta. Silmukassa kiertää voimakas vikavirta, joka jatkuessaan aikaansaa vaurion laajenemisen muihin johtimiin. Kyseisenlaisessa tilanteessa kone onkin otettava korjattavaksi välittömästi. (PSK 7706 2000, 3)

Kuvassa 4 on esitetty toistoaltokoestuksen värähtelyvaste silloin kun toisessa koestettavassa käämielementissä tapahtuu kierroseristuksen läpilyönti, joka ei kuitenkaan johda suoraan galvaaniseen oikosulkuun kierrosten välillä. (PKS 7706 2000, 3)



Kuva 4 Esimerkki värähtelyvasteesta, kun toisessa vyyhdessä tapahtuu kierroseristuksen läpilyönti, joka ei johda suoraan galvaaniseen vikaan (PKS 7706 2000, 3)

Kyseisessä tilanteessa käämitykseen ei ole vielä muodostunut oikosulkeutuvaa silmukkaa ja vika ei välttämättä laajene kovin nopeasti. Varmuutta tilanteen pysymisestä stabiilina ei kuitenkaan ole ja tällaisessakin tapauksessa on suositeltavaa ottaa kone välittömästi korjattavaksi. (PKS 7706 2000, 3)

On huomattava, että toistoaltokoestuksen tuloksen tulkitseminen ei kuitenkaan ole niin helppoa kuin edeltävissä idealisoiduissa tapauksissa. Esimerkiksi roottorin tyyppi ja asento häiritsevät mittausta. Tulkitseminen vaatii siis useimmiten myös kokemusperäistä tietoa. (PKS 7706 2000, 3)

Tätä mittausta on käytetty UPM TMP34-osaston tahtimoottoreiden roottorikäämityksen huollon yhteydessä ulkopuolisen yrityksen toimesta. Kunnonvalvontamittauksena tämä keino on toisen ulkopuolisen yrityksen mukaan harvinaisempi mittaustapa.

4.6 Häviökerroinmittaus (tandelta, dissipation factor)

Eristyksen häviökertoimen $\tan\delta$ (dielectric dissipation factor) mittaaminen vaihtojännitteellä on yleisesti käytetty menetelmä suurjännitelaitteiden eristysrakenteiden kunnon arvioinnissa. $\tan\delta$ -mittaus soveltuu hyvin esimerkiksi läpivientieristimien, mittaumuuntajien, kaapelien, moottoreiden ja kondensaattorien kunnonvalvontaan. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2011, 186)

Suurjännitelaitteiden kapasitanssia ja häviökerrointa on perinteisesti mitattu Scheringin sillalla tai virtavertailijasillalla. Muitakin siltakytkentöjä käytetään. Siltamittauksessa mitattavaa laitetta verrataan tunnettuun referenssiin eli mittanormaaliin. Tavallisesti kapasitanssin mittanormaalina käytetään painekaasukondensaattoria ja häviökertoimen mittanormaalina normaalikondensaattorin ja sen kanssa sarjassa olevan vastuksen yhdistelmää. (Aro ym. 2011, 186)

Voltti-ampeeri-mittaukseen ja näytteistystekniikkaan perustuvia mittausjärjestelmiä käytetään myös yleisesti. Erityisesti kunnonvalvontaa varten kehitetyillä laitteilla voidaan mitata suuret taajuuden funktiona. Tavallisesti käytetty taajuusalue on 0,1 mHz–10 kHz. Tällöin puhutaan dielektrisestä vasteesta tai dielektrisestä spektroskopiasta taajuustasossa. Aikatason polarisaatiosuureista voidaan tietyin edellytyksin laskea vaste myös taajuustasossa ja päinvastoin. (Aro ym. 2011, 186)

$\tan\delta$ -mittaus suoritetaan yleensä jännitteen funktiona, jolloin jännite nostetaan ainakin laitteen suurimpaan käyttöjännitteeseen asti (joskus jopa lähelle koejännitettä). Kun $\tan\delta$ -mittauksen tuloksia tarkastellaan, kiinnitetään huomiota sekä $\tan\delta$ -arvon suuruuteen että sen kasvuun jännitettä nostettaessa. Jännitteen funktiona mitatun $\tan\delta$ -käyrän muotoa voidaan käyttää perustana eristyksen kunnon arvioinnille. Käytännössä terveellä eristyksellä $\tan\delta$ on likimain vakio jännitteen funktiona. Käyrän muodosta voi usein tehdä johtopäätöksiä myös niistä syistä, jotka aiheuttavat $\tan\delta$ -arvon nousun. (Aro ym. 2011, 190)

Kokemuksen mukaan $\tan\delta$ -käyrä voi joskus myös laskea jännitettä suurennettaessa. Syynä on useimmiten eristyksen puutteellinen impregnentointi tai eristyksessä on epäpuhtauksia. (Aro ym. 2011, 191)

Sellaisilla eristeillä, jotka eivät kestä osittaispurkauksia, on häviökulman jänniteriippuvuus hyvin pieni, ja häviökulman suuruus on tulosten tulkinnassa merkittävämpi. $\tan\delta$ -arvo sellaisenaan ilmaisee dielektristen häviöiden suhteellisen suuruuden. Liian suuri $\tan\delta$ ja dielektrinen häviöteho P_d saattavat johtaa eristeen kuumenemiseen ja jopa koko eristyksen termiseen läpilyöntiin. $\tan\delta$ -mittauksia suoritettaessa on muistettava, että eristyksen lämpötila vaikuttaa voimakkaasti saataviin tuloksiin. Lämpötilariippuvuus vaihtelee myös eristysrakenteen kunnon mukaan. Joissakin tapauksissa on perusteltua suorittaa mittauksia useissa eri lämpötiloissa. (Aro ym. 2011, 191)

Hyväksyttävä $\tan\delta$ -arvo on erilainen eri eristysrakenteilla, eri valmistajien laitteilla ja eri-ikäisillä laitteilla. Esimerkiksi hyväkuntoisen kondensaattorityyppisen virtamuuntajaeristyksen $\tan\delta$ -arvo saattaa vaihdella 0,2-0,5 %, kun taas vastaavalla ei-kondensaattorityyppisellä eristyksellä häviökerroin on 2-3 – kertainen. Epäpuhtaudet ja kosteus suurentavat kondensaattorityyppisen eristyksenkin $\tan\delta$ -arvon helposti muutaman prosentin suuruiseksi. Pienehkökin muutos $\tan\delta$ -arvossa saattaa kertoa eristyksessä syystä tai toisesta tapahtuneesta muutoksesta. Säännöllisesti suoritetuilla $\tan\delta$ -mittauksilla eristysten mahdollinen kostuminen tai vaurioituminen voidaan havaita hyvissä ajoin. (Aro ym. 2011, 191)

Häviökerroin mitataan tavallisesti käyttötaajuudella (50Hz). Kokemuksen mukaan tämä ei kuitenkaan aina ole herkin eristyksen muutosten indikaattori. Kun eristykseen vaikuttavan vaihtojännitteen taajuutta muutetaan, nopeudeltaan erilaisten polarisaatio-prosessien vaikutus näkyy muuttuneena häviökertoimena. (Aro ym. 2011, 191)

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \sigma / \varepsilon_0 \omega}{\varepsilon_r'(\omega)}$$

missä ε_r'' on kompleksisen suhteellisen permittiviteetin imaginaariosa ja ε_r' kapasitanssia edustava reaaliosa, σ on DC-johtavuus. Sekä kapasitanssi että häviöt riippuvat taajuudesta. Yhtälöstä saadaan sekä johtavuudesta että polarisaatioilmiöstä johtuvat häviöt. Johtavuushäviöt eivät kuitenkaan näy siltamittauksessa. Kapasitanssi ja häviökerroin taajuuden funktiona ovat eräs dielektrisen vasteen mittaustapa. (Aro ym. 2011, 191)

4.7 Akselijännitteiden ja laakerivirtojen mittauss

Laakerivikojen suhteellinen osuus pyörivien koneiden vioista on suuri, joten niiden ennaltaehkäisevät menetelmät ovat tärkeitä. Pyörivillä sähkökoneilla laakerivirrat aiheuttavat laakereiden ja tiivisteiden vaurioitumista. Laakerivirrat ovat seurausta laakerijännitteistä. Laakerijännite on laakerin voitelukalvon yli vaikuttava vierintäratojen välinen jännite, joka voi olla kapasitiivisesti varautunut tasajännite, pientaajuinen vaihtojännite, suurtaajuinen vaihtojännite tai näiden yhdistelmä. Kapasitiivisesti varautunut jännite voi olla pitkäaikainen staattinen tasajännite tai lyhytaikainen, vaihtuva jännitepulssi. (Kokko 2009, 404)

Akselijännitteet ovat akselin päiden välille indusoituneita jännitteitä. Akselijännite voi olla syöttötaajuinen vaihtojännite harmonisine taajuuksineen, tasajännite, suurtaajuinen jännitepulssi tai näiden yhdistelmä. Akselijännitteiden ja laakerivirtojen mittaaminen ja analysointi on yksi kehittyvä menetelmä laakerivaurioiden ennalta ehkäisevässä kunnossapidossa. (Kokko 2009, 405)

Tahtikoneilla erilaiset vikatapaukset, kuten roottorin staattinen ja dynaaminen epäkesisyys, roottorin kierrossulku, staattorin kyllästymisen, maadoitushiihen huono kunto tai magnetointipiirin epäsymmetria, aiheuttavat akselijännitteessä tiettyjen taajuuskomponenttien kasvua suhteessa muihin taajuuksiin. Nämä muutokset mitataan spektrianalysaattorilla. (Kokko 2009, 407–408)

Näin ollen tahtikoneella akselijännitteen mittaaminen ja mittausdiagnostiikka on myös hyödyllinen kunnonvalvontamenetelmä. Periodisesti tehtävissä mittauksissa seurataan vikakomponenttien trendiä ja voidaan tunnistaa mahdollisesti kehittymään lähtevä vikatyyppe. (Kokko 2009, 408)

4.7.1 Tahtimoottorin roottorin napakierrossulku

Tahtimoottorin napojen magnetointikääditys on tehty eristetyistä käämilangasta tai käämiliuskoista. Kierrossulku magnetointikäädityksessä aiheuttaa moottorin magneettikentän epäsymmetriaa, joka voi johtaa puolestaan kasvavaan värähtelyyn. Lisäksi napa, jossa kierrossulku on, voi lämmetä. (Kokko 2009, 384)

Napakäädityksen kierrossulku voidaan havaita käynninaikaisesti akselijännitteen taajuusanalyysillä. Seisokissa kierrossulku voidaan tunnistaa napakäädityksen impedanssimittauksella ja/tai toistoaalto mittauksella. (Kokko 2009, 384)

4.7.2 Akselijännitteet tahtikoneilla

Tahtikoneilla vaihekäämien keskinäinen epäsymmetria voi indusoida syöttötaajuisen jännitteen akselin päiden välille. Roottorin ilmavälin epäkeskisyys tai roottorikäädin kierrosoikosulku voi aiheuttaa magneettista epäsymmetriaa, joka aiheuttaa akselijännitteen syntymisen. Tahtikoneen roottoripiiriä syöttävän magnetointilaitteiston tehoelektroniikkavika voi aiheuttaa myös vaihtojännitteisen akselijännitteen. (Kokko 2009, 405)

Tahtikoneissa käytetään useimmiten liukulaakereita, joissa on vierintäpintojen välillä eristävä voitelukalvo. Voiteluaineen eristyskyky ja voitelukalvon paksuus vaikuttavat siihen, kuinka suuri akselijännite tarvitaan ennen kuin laakerin läpi rupeaa kulkemaan laakerivirtaa. (Kokko 2009, 405)

Tahtikoneissa voi kuitenkin olla myös muita laakereita, kuten vierintälaakereita tai painelaakereita. Laakerivirtaan tarvittava akselijännite voi tällaisissa tapauksissa olla huomattavastikin pienempi. (Kokko 2009, 405)

4.7.3 Arvojen mittaaminen

Koska sähkökoneen laakerit ovat rungon sisällä, niiden läpi kulkevan virran ja yli olevan jännitteen mittaaminen suoraan on hankalaa. Käyttöpaikalla olevasta sähkökoneesta ne on mitattava epäsuorasti. (PSK 7708 2000, 5)

Kun halutaan mitata akselin päiden välille indusoitunutta akselijännitettä (U_a), kytetään akselin toinen pää runkoon. Laakerijännite on tällöin puolet mitatusta jännitteestä, koska se on jakaantunut kummallekin laakerille puoliksi. Kun halutaan mitata akselin ja rungon välille kapasitiivisesti kytkeytynyttä laakerijännitettä, johdin akselilta runkoon poistetaan. (PSK 7708 2000, 5)

Koska laakerin impedanssin suuruus ja öljykalvon läpilyöntikestoisuus ovat monesta muuttajasta riippuvaisia ja voimakkaasti epälineaarisia, taso, jolla jännite romahtaa ei kerro laakerin läpi kulkevan virran suuruutta. Virran kulkiessa laakerin yli mitattu jännite kertoo jännitehäviön virrallisessa piirissä, mutta koska impedanssiarvo ei ole tiedossa, tämäkään mitattu arvo ei kerro virran suuruutta. Siksi luotettavaa riskianalyysii ei voi tehdä pelkän laakerijännitemittauksen perusteella. (PSK 7708 2000, 7)

Kiertovirta mitataan epäsuorasti niin, että oikosuljetaan koneen käyttöpään laakerirakenne ja mitataan oikosulkulenkin kulkeva virta. Oikosulkulenkin toinen pää kiinnitetään luotettavasti koneen runkoon ja toinen pää painetaan pyörivään akseliin. Virta mitataan lenkistä tarkoitukseen sopivalla virta-anturilla. (PSK 7708, 7)

Kiertovirran mittauksessa on monia virhemahdollisuuksia, kuten akselikontaktien ylimenovastukset ja mahdolliset rinnakkaiset virtatiet. Lisäksi mittaus on vaarallinen, koska se on tehtävä pyörivältä akselilta. Erityisesti on varmistettava, esimerkiksi stroboskoopilla tai pahvinpalalla, että kohdassa, johon akselikontakti on tarkoitus painaa, ei ole kiilaa. (PSK 7708 2000, 8)

Laakerivaurion aiheuttavat laakerin läpi kulkevat virtapulssit. Koska ennen pulssia laakerin yli vaikuttanut jännite määrää pulssin energian, voi laakerijännitteen haitallisuutta arvioida sen suuruuden perusteella. (PSK 7708 2000, 9)

Jännitemittaukset antavat kuitenkin luokittelukelpoista tietoa vain, jos laakerit eivät johda eli laakerirakenne on luotettavasti eristetty. Jos virta kulkee, mittaus kertoo laakerivirran aiheuttaman jännitehäviön laakerin impedanssissa. Laakerin impedanssi ei kuitenkaan ole vakio, vaan se riippuu useasta tekijästä, joista osa on satunnaisia. Tämän vuoksi johtavan laakeri yli mitatusta jännitteestä ei voida suoraan päätellä virran suuruutta. (PSK 7708 2000, 9)

Liukulaakereille ei kirjallisuuslähteissä ole mainittu raja-arvoja sinimuotoisille vaihtojännitteille, tasajännitteille, laakerivirroille tai vaihtojännitepulsseille.

Taulukko 1. Suoritettavat mittaukset kellovalle akselille (PSK 7708 2000, 9)

Moottorin nimellisteho kW	≤ 30	30...100	> 100
Kapasitiivinen jännite	X		
Indusoitunut jännite			(X)
Akselin maadoitusvirta			
Kiertovirta			X

(X) = ei voi käyttää yksin tilannearviossa

Taulukko 2. Suoritettavat mittaukset kytketylle akselille (PSK 7708 2000, 9)

Moottorin nimellisteho kW	≤ 30 kW	30...100	> 100
Kapasitiivinen jännite			
Indusoitunut jännite			(X)
Akselin maadoitusvirta	X	X	X
Kiertovirta			X

(X) = ei voi käyttää yksin tilannearviossa

4.8 Värähtelymittaukset

Mekaaninen värähtely (tärinä) määritellään siten, että se on rakenteen, koneen tai koneen osan liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä. Värähtely tarvitsee ylläpysyäkseen jatkuvasti suuntaansa tai suuruuttaan vaihtavan voiman, esimerkiksi akselin pyörimisliikkeestä, joten kappaleeseen kohdistuva vakiovoima, kuten lumikuorma katolla, ei pysty aiheuttamaan värähtelyä. Sen sijaan vakiokuorman äkillinen poistuma saattaa aiheuttaa lyhytaikaista, vaarallisiakin värähtelyongelmia. (Nohynek & Lumme, 40)

Värähtelymittauksia tehdään kunnonvalvontamielessä pääasiassa kahdesta eri syystä. Ensinnäkin, tulkitsemalla oikein pyörivistä koneista mitattavaa tärinää voidaan luotetavasti arvioida eri koneenosien kuntoa. Toiseksi, värähtelyjen vaikutukset koneisiin, rakenteisiin ja tuotantoprosesseihin ovat pääsääntöisesti haitallisia. Haitallisuus ilmenee mm:

- lisääntyneinä jännityksinä (rasitukset)
 - rakenteiden väsymismurtumina
 - liitosten löystymisenä
 - käyttöiän alenemisena
 - lopputuotteen laadun heikkenemisenä
 - käynnin epävarmuutena
 - energiahäviöinä
 - meluna ja muuna ergonomisena häittana
 - häiriönä muille koneille lähistöllä
- (Nohynek & Lumme, 40)

Kaikki pyörivät laitteet värähtelevät käydessään. Herätteiksi kutsutaan niitä voimia, jotka saavat laitteen rakenteen värähtelemään. Herätteinä toimivat erilaiset dynaamiset voimat, jotka voivat aiheutua laitteen normaalista toiminnasta, erilaisista valmistuksen tai asennuksen epätarkkuuksista sekä vikaantumisista. Tyypillisiä epätarkkuuksia ja vikoja, jotka toimivat värähtelyn herätteinä ovat esimerkiksi epätasapaino, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuudet ja virheet sekä kulumalla tai muuten vaurioituneet osat. (Aro ym. 2009, 224)

Värähtelyn mittauspaikka on yleensä kiinteässä osassa, esimerkiksi rungossa. Tavallisesti herätteen aiheuttaa liikkeessä oleva koneenosa kuten roottori, mäntä tai akseli, joista sitä ei yleensä suoraan voida mitata. (Aro ym. 2009, 224)

Vianmääritys värähtelymittausten avulla perustuu yleensä herätteiden ja erityisesti niiden muutosten selvittämiseen. Voimakkaan värähtelyn syynä saattaa olla koneen suuri liikkuvuus jollakin herätevoimataajuudella, vaikka voimat sinänsä ovat pieniä. Suureen liikkuvuuteen voi olla syynä koneen osan tai sen tukirakenteen liiallinen joustavuus tai keveys. Usein on kyseessä ominaistajuudesta johtuva resonanssi-ilmiö. Ominaisajuudet ilmenevät paikallisina huippuina liikkuvuus- eli mobiliteettikäyrässä. (Aro ym. 2009, 224)

Värähtelysignaalia voidaan mittauslaitteissa ja ohjelmistoissa käsitellä eri tavoin, jolloin siitä saadaan esille erilaisia ilmiöitä. Yksinkertaisessa tapauksessa värähtelystä muodostetaan kokonaistehoarvo, joka antaa kuvan värähtelyn voimakkuudesta. Eri vikojen erottamiseksi toisistaan tarvitaan kuitenkin yleensä aikataso- tai taajuusanalyysiä. (Nohynek & Lumme, 114)

Taajuusanalyysi suoritetaan nykyään FFT-laskennan avulla, jonka tuloksena saadaan värähtelyn amplitudi esitetyksi taajuustasossa kunkin spektriviivan kohdalla. (Nohynek & Lumme, 114)

Taajuusanalyysissä keskitytään yleensä tarkastelemaan amplitudeja eri taajuuksilla ja eri mittaussuunnissa. Yksi ainoa oire ei riitä ilmaisemaan kaikkia koneen mahdollisia vikatyyppejä. Oireiden valinta onkin erittäin tärkeä vaihe kunnonvalvonnan suunnittelussa. Ohjeita oireiden valitsemiseksi on annettu muun muassa standardissa PSK 5707. Oireen kehitystä seuraamalla voidaan useissa tapauksissa seurata vian kehittymistä (Nohynek & Lumme, 115)

Jos mittaustiedoista löytyy oireita, pyritään ne tulkitsemaan sääntöjen avulla ja näin saadaan diagnoosi eli vianmääritys. Näitä sääntöjä on dokumentoitu esimerkiksi PSK:n standardiin 5707. (Nohynek & Lumme, 115)

Tuntemalla kone ja suoritettut mittaukset, voidaan mittaustuloksista oireanalyysin perusteella määrittää vika ja sen vakavuusaste. Diagnosointiin on nykyään saatavissa joko avusteisia tai automaattisia tietojärjestelmiä. (Nohynek & Lumme, 115)

4.8.1 Värähtelyn suureet, anturit ja mittayksiköt

Koneiden värähtelyä voidaan mitata kolmena eri suureena: siirtymänä (poikkeamana), nopeutena ja kiihtyvyytenä. Värähtelysuureita voidaan derivoida ja integroida, jolloin saadaan muutettua yksi näistä mittaussuureista toiseksi, esimerkiksi kiihtyvyyssignaali nopeussignaaliksi, ja samoin voidaan saada aikaan myös kokonaan uusia suureita, kuten kiihtyvyyden derivaatat. (Nohynek & Lumme, 45)

Värähtelyn mittaus siirtymänä ilmaisee kohteen sijainnin suhteessa vertailupisteeseen. Värähtelyn mittaus nopeutena ilmaisee kappaleen kulkeman siirtymän tietyn ajanhetken kuluessa. Värähtelyn mittaus kiihtyvyytenä ilmaisee kappaleen nopeuden muutosta tietyn ajanhetken kuluessa. (Nohynek & Lumme, 45)

Kullekin mittaussuureelle on omat anturinsa, jotka poikkeavat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteiltaan toisistaan selvästi. (Nohynek & Lumme, 45)

Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate on yksinkertainen, vaikka sen rakenne on monimutkainen. Keskeinen komponentti on pietsosähköinen kide, jonka kiinnityselementit kiinnittävät anturikuoreen, ja jonka päälle tai sivulle on asennettu massa. Kun anturi on kiinnitetty kohteeseen, liikkuu anturi yhtenevästi mittaushetkensä kanssa. Hitausvoimien vaikutuksesta pietsosähköiseen kiteeseen liittyvä massa hetkellisesti joko puristaa tai venyttää kidettä, johon syntyy anturin kiihtyvyyteen verrannollinen, jatkuvasti suuruuttaan ja etumerkkiään (+, -) vaihtava varaus. Tämä jatkuvasti muuttuva varaus johdetaan anturin sisäiseen tai ulkoiseen varausvahvistimeen, jossa se muunnetaan jatkuvasti muuttuvaksi jännitteeksi, jolloin muodostuu anturista saatava mittaussignaali. (Nohynek & Lumme, 46)

Kiihtyvyysanturit kiinnitetään mitattavaan kohteeseen yleisimmin magneeteilla, ruuveilla tai käsin painamalla. Joissakin kohteissa voidaan kiinnitystapana käyttää mehiläisvahaa. Kiihtyvyysanturin mittausalue on tyypillisesti 2 Hz – 14 000 Hz, mutta kiinnitystapa ja anturin ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti ylä- ja alarajataajuuksiin. Jos anturi kiinnitetään kohteeseen painamalla se siihen käsin, on lineaarisen mittauksen ylärajataajuus noin 600 Hz. Magneettikiinnityksellä ylin käytettävä taajuus riippuen pinnan tasaisuudesta ja magneetin voimakkuudesta välillä 800 Hz – 4 000 Hz. Sopivalla anturilla ja riittävän kireällä ruuvikiinnityksellä voidaan mitata taajuuksia jopa yli 20 000 Hz. Kiihtyvyyden yksikkönä käytetään m/s^2 tai g ($9,8 \text{ m/s}^2$). (Nohynek & Lumme, 46)

Kiihtyvyysanturi on nykyään ylivoimaisesti eniten käytetty anturi värähtelymittauksissa. Tämä johtuu ennen kaikkea sen monipuolisuudesta, eli sillä voidaan mitata sekä matalia että korkeita taajuuksia, sekä sen edullisesta hinnasta. Koska mittalaitteen elektroniikalla pystytään kiihtyvyyssignaali integroimaan nopeudeksi, voidaan samaa anturia käyttää sekä koneiden matalataajuisien, akselin pyörimisestä johtuvien vikojen havaitsemiseen, että korkeataajuisien, esimerkiksi vierintälaakereiden vikojen havaitsemiseen. (Nohynek & Lumme, 47)

Nopeusanturi on tyypillisesti kooltaan hieman isompi kuin kiihtyvyysanturi. Nopeusanturin kuoren sisällä on käämi ja sen sisällä anturin päätyihin jousilla kiinnitetty magneettinen massa. Kun anturi on kiinnitetty mittauspisteeseensä ja rakenne värähtelee, seuraa jousitettu massa viiveellä anturikuoren liikkeitä. Magneettinen massa aiheuttaa anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, joka voidaan johtaa anturin ulkopuolelle mittaussignaaliksi. Tätä signaalia ei tarvitse muuntaa, jos nopeus on haluttu mittaussuure. (Nohynek & Lumme, 47–48)

Nopeusanturit kiinnitetään yleensä ruuveilla tai magneeteilla mitattavaan kohteeseen. Nopeusanturin mittausalue on parhaimmillaan noin 5 Hz – 2 000 Hz, mutta alarajataajuuteen vaikuttaa anturin sisäinen resonanssi. Lisäksi nopeusanturi on herkkä sekä sähkömagneettisille kentille että lämpötilan vaihteluille. Myös anturin suuntaisuus vaikuttaa nopeusanturin toimintaan, ja monesti nopeusanturille ilmoitetaankin, mitaataanko sillä pysty- vai vaakasuunnassa. (Nohynek & Lumme, 48)

Nopeusanturin käyttö oli ennen paljon yleisempää kuin nykyään. Kehitykseen on vaikuttanut erityisesti se, että kiihtyvyyssignaali pystytään mittalaitteissa muuttamaan (integroimaan) helposti nopeussignaaliksi. Integroimiseen tarvittava elektronikka voidaan rakentaa myös suoraan anturin sisälle, ja tällaisia kiihtyvyyssmittaukseen perustuvia nopeusantureita onkin useimmilla anturivalmistajilla tarjottavana. (Nohynek & Lumme, 48)

Siirtymäanturi on tyypillisesti pyörrevirta-anturi, jolla mitataan lähellä, tyypillisesti noin 2 mm päästä kiinnityskohdan ja mitattavan kohteen keskinäistä suhteellista liikettä. Tavallisin sovellus on anturin liukulaakeroitujen koneiden kunnonvalvonnassa, jolloin anturit on kiinnitetty koneen laakerikuoreen ja ne mittaavat akselivärähtelyä. (Nohynek & Lumme, 49)

Anturilla pystytään mittaamaan akselin värähtelyn lisäksi pinnanmuodon muutoksia (paperikoneiden puristintelat), asemaa (rajoittimet), akselin ratakäyriä ja sitä voidaan käyttää linjaustilan ja liukulaakerin kunnonvalvonnassa. (Nohynek & Lumme, 49)

Suhteellinen mittaus voi antaa huomattavan erilaisia mittaustuloksia saman akselin eri laakereissa. Jos mittauspinta ja kiinnityskohta värähtelevät lähes samassa vaiheessa, ei suhteellinen etäisyys niiden välillä muutu ja mittaus osoittaa pientä värähtelyä. Jos mittauspinta ja kiinnityskohta värähtelevät vastakkaisessa vaiheessa, osoittaa mittaus erittäin voimakasta värähtelyä. Näin samansuuruinen akselin värähtely voi saada kaksi täysin erilaista mittaustulosta laakereissa.

Mitattavan värähtelysuureen tulisi olla sellainen, että se on riittävän herkkä havaitsemaan koneen kunnon muutoksen aiheuttamat värähtelyt. Mikäli mitattavasta kohteesta voidaan olettaa tulevan värähtelyä sekä matalilla että korkeilla kierroksilla, voidaan mittauksen luotettavuutta eri vikojen löytymisen suhteen parantaa käyttämällä eri mitaussuureita samassa paikassa (nopeutta, siirtymää, kiihtyvyyttä). (Nohynek & Lumme, 50)

4.8.2 Mittauspaikan valinta

Mittauspaikan valinta on eräs niistä perusmäärittelyistä, jotka oleellisesti vaikuttavat siihen, voidaanko mittauksilla saada riittävästi tietoa koneen kunnosta vai ei. Tätä asiaa on käsitelty standardissa PSK 5702. (Nohynek & Lumme, 53)

Minimimäärä mittauspisteitä on yksi kunkin laakerin kohdalla. Tällöin tästä pisteestä tulee tehdä mittaus, jolla pystytään arvioimaan sekä laakerin että muiden kone-elinten kuntoa. (Nohynek & Lumme, 53)

Kunnonvalvontamittauksissa olisi pyrittävä siihen, että koneista tehdään mittaukset kunkin laakerin kohdalla kolmeen keskenään kohtisuoraan suuntaan (vaakaan, pystyyn ja akselin suuntaan). Näin sen takia, että jotkut viat näkyvät aina selvimmin tietyissä mittaussuunnissa, ja vertailemalla tärinän suuruutta eri mittaussuunnissa voidaan tarkemmin arvioida koneessa oleva vikaantuminen. (Nohynek & Lumme, 53)

Yksittäinen mittauspaikka valitaan siten, että värähtelylähde ja mittausanturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Koska värähtely menettää osan energiasaatan rajapinnoissa, tulee mittauspaikka valita siten, että värähtelylähteen ja anturin väliin jää mahdollisimman vähän rajapintoja. (Nohynek & Lumme, 53)

Tavallisesta sähkömoottorista tulee siten tehtäväksi kolme mittausta kummankin laakerin kohdalla, eli yhteensä kuusi mittausta, samoin kuin tavallisesta kaksilaakerisesta puhaltimesta. (Nohynek & Lumme, 53)

Akseleista värähtely siirtyy laakerien kautta koneen runkoon, joten mittauspaikat on tarkoituksenmukaista valita laakerointikohdista. Myös laakerivikojen aiheuttamat värähtelyt ovat voimakkaimpia laakerista mitattuna. (Nohynek & Lumme, 54)

Mittauspisteet tulee merkitä siten, että mittaukset tehdään aina samasta paikasta samalla tavalla. On merkintätapa mikä tahansa, on hyvä luoda tuotantolaitoksen sisäinen käytäntö siitä, missä kohdassa tietyn tyyppisillä koneilla on mittauspisteet. Kun mittaus tapahtuu aina samasta paikasta, poistetaan esimerkiksi rajapintojen aiheuttaman värähtelyenergian pienenemisen, joka taas antaisi vääriä tuloksia. (Nohynek & Lumme, 54)

4.8.3 Signaalinkäsittely

Kun kunnonvalvonnassa värähtelymittauksia suoritetaan, on mittausjärjestelmän asetusten oltava kunnossa anturista mittauksen tulkintavaiheeseen saakka. Näillä asetuksilla muokataan anturilta tulevaa signaalia ja varmistetaan, että kiinnostuksen kohteena oleva tieto saadaan näkyviin sellaisessa muodossa, jossa sitä on helppo analysoida. Jotta anturilla saadaan mitattua haluttuja asioita, tulee ennen mittausta tarkastella anturin kannalta seuraavia asioita:

- Värähtelytyyppi, eli mitataanko jaksollista, satunnaista vai transienttia värähtelyä
- Signaali/kohinasuhde, joka kertoo kyvystä erottaa samanaikaisesti voimakkaita ja heikkoja signaaleja.
- Anturin herkkyys, joka ilmoittaa kuinka suuri volttimäärä mittaussignaaliissa kuvaa mitattua tärinää.
- Signaalin vahvistus, mittaussignaali tulee erittäin heikkona varauksena anturin mitattakiteeltä, jolloin tätä signaalia on vahvistettava.
- mekaaninen vaimennin, mikäli mittauksessa halutaan rajata anturin voimakas korkeataajuinen värähtely pois signaali/kohinasuhteen parantamiseksi.

(Nohynek & Lumme, 62)

Kokonaistasoa mittaavissa mittalaitteissa anturilta tulevaa signaalia käsitellään siten, että mittalaite ilmoittaa värähtelyn yhdellä tunnusluvulla. Tämä luku lasketaan halutulla tavalla riippuen käytettävästä mittaussuureesta. (Nohynek & Lumme, 63)

Aikatasomittauksessa nähdään anturilta tuleva signaali juuri sellaisena, millaiseksi se esikäsittelyn jälkeen on muutettu. Mikäli esimerkiksi mitataan koneen laakerin tärinää siirtymänä, nähdään aikatasosta se, missä laakerin pinta sijaitsee fyysisesti eri ajanhetkinä kyseisessä mittaussuunnassa. Aikatason pituuden määrää käytetty näytepisteiden lukumäärä (1024, 2048,...) ja ylärajataajuus. Mitä enemmän on näytteessä pisteitä, sitä parempi on aikataso. Mitä korkeampi ylärajataajuus on, sitä lyhempi on aikataso. (Nohynek & Lumme, 66)

Spektrin laskenta perustuu matemaattisten Fourier-sarjojen hyväksikäyttöön. Fourier-sarjoilla voidaan minkä tahansa signaalin osoittaa olevan eri amplitudisten ja taajuuksisten sinimuotoisten harmonisten signaalien summa. (Nohynek & Lumme, 68)

FFT eli Fast Fourier Transformation on laskenta-algoritmi, jolla tämä muunnos aikatasosta taajuustasoon (eli spektriiksi) saadaan suoritettua erittäin nopeasti. FFT laskennassa hyödynnetään spektrimuunnoksessa tarvittavan muutosmatriisin alamatriisien säännönmukaisuuksia, jotka huomioiden voidaan tarvittavaa laskentamäärää huomattavasti vähentää. (Nohynek & Lumme, 69)

Spektrin muodostuksessa on paljon erilaisia asetuksia, joilla voidaan vaikuttaa lopputulokseen:

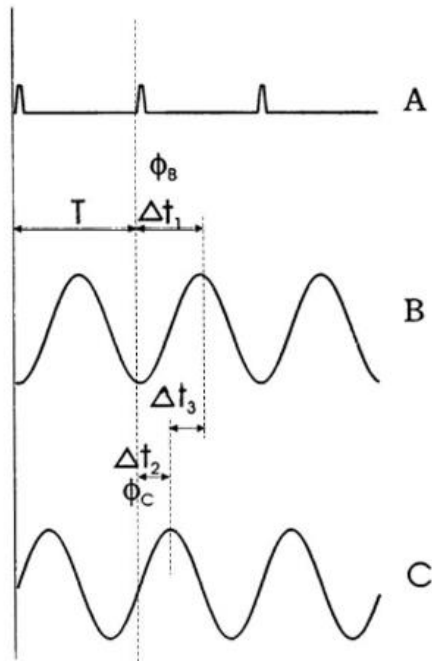
- Spektriviivat, spektrin taajuuserotuskyky eli kuinka lähellä toisiaan sijaitsevat taajuudet voidaan erottaa. Spektriviivojen lukumäärä ja mittausten ylärajataajuus yhdessä määräävät spektrin erotuskyvyn.
- Keskiarvostustapa, on lopullinen spektri, joka saadaan tulokseksi, lasketaan useamman näytteen perusteella muodostettujen spektrien keskiarvona. Keskiarvostustapoja on: normaali, tahdistettu, huipunpito ja negatiivinen
- Painotus, spektrilaskennan yhteydessä tulee aina määrittää, millaista aikatasonäytteen muokkaustapaa käytetään. Käytössä on monia painotusfunktioita, joita ovat: Hanning ja suorakaide.
- Liipaisu, mittaustapa voidaan määrittää alkavaksi vasta, kun liipaisuehto täyttyy. Liipaisu voi olla sisäinen tai ulkoinen. (Nohynek & Lumme, 69–73)

Vaihekulman mittaus antaa tiedon siitä, missä kohtaa mittauspisteen pyörimistaajuuden värinän tai sen monikerran huippu on akselilla olevaan liipaisumerkkiin verrattuna. Tässä mittauksessa mittalaitteeseen tulee kaksi signaalia, koneen värähtely (yleensä suodatettu kapeakaistainen pyörimistaajuuden värähtely) sekä takometrilta tulevat liipaisuut. Mittalaite vertaa värähtelysignaalin huippukohdan aikaeroa takopulssin ja suhteuttaa tämän ajan kahden takopulssin väliseen aikaan, joka on sama kuin akselin yhden kierroksen kesto aika. Tästä suhteesta saadaan laskettua suodatetun värähtelyn vaihekulma. (Nohynek & Lumme, 73)

Signaalin B vaihekulma liipaisuun nähden $\Phi_B = \frac{\Delta t_1}{T} \times 360^\circ$

Signaalin C vaihekulma liipaisuun nähden $\Phi_C = \frac{\Delta t_2}{T} \times 360^\circ$

Signaalien B ja C välinen vaihe-ero $\Phi_C - \Phi_B = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ$ (Nohynek & Lumme, 73)



Kuva 5 Vaihe-ero ja vaihekulma (PSK 5701 2017, 14)

Verhokäyräanalyysi (envelope-analyysi) on menetelmä, jossa mitattua signaalia käsittelemällä saadaan korostettua konevioletta johtuvaa osuutta värinästä. Tätä mittaustapaa käytetään erityisesti silloin, kun värähtely on moduloitu ja viat ovat vaikeasti havaittavissa muilla mittausmenetelmillä. Menetelmä on osoittanut luotettavuutensa erityisesti hitaasti pyörivien koneiden vierintälaakereiden vikojen selvityksessä. (Nohynek & Lumme, 74)

Verhokäyrämittauksen edellytyksenä on, että rakenteessa on tutkittavien nk. vikataajuuksien lisäksi jokin kantotaajuus. Tällaisena kantotaajuutena voi toimia esim. ryntötaajuus, rakenteen resonanssitaajuus, laakerin resonanssitaajuus, moottoreissa sähköverkon taajuus ja joissain tapauksissa anturin oma resonanssitaajuus. Käytännössä rakenteessa on aina olemassa jokin kantotaajuus, jonka avulla voidaan tutkia vikataajuuksia. Verhokäyrämittauksessa signaalin käsittely tapahtuu seuraavasti:

1. Esivahvistus: Mitattua signaalia vahvistetaan tarvittaessa. Koska tällä menetelmällä valvotaan yleensä hitaasti pyöriviä koneita, ovat mitattavat värinätaasot monesti heikkoja.
2. Ylipäästösuodatus: Signaali ylipäästösuodatetaan, jotta värinätaajuudet, joita ei haluta analysoida, saadaan pois. Päästökaistan alarajataajuus valitaan tapauskohtaisesti tyypillisesti 500 Hz – 5000 Hz.

3. Jälkivahvistus: Ylipäästösuodatuksen jälkeen signaalin taso on yleensä erittäin heikko, joten se pitää vahvistaa. Vahvistuskertoimet voivat olla välillä 10 – 100.
4. Demodulaatio: Aikatasosignaalista erotetaan kantotaajuus tasasuuntaamalla signaali ja alipäästämällä nk. verhokäyrä. Tätä verhokäyrää voidaan nyt tutkia aikatasossa tai siitä voidaan muodostaa spektri, jossa vikataajuudet näkyvät selvästi. (Nohynek & Lumme, 74)

Värähtelyvalvonnan perustana on se, että mittauskohteesta saadaan eri mittauskerroilla keskenään vertailukelpoisia tuloksia, jotka myös kertovat riittävän hyvin koneen kunnossa tapahtuneet muutokset. Tämä saadaan aikaan muodostamalla värähtelysignaalista erilaisia tunnuslukuja ja seuraamalla niiden kehittymistä, tarkkailemalla spektrien eri taajuuksien amplitudeissa tapahtuvia muutoksia ja tekemällä vertailua eri aikoina mitattujen aikatasojen välillä. (Nohynek & Lumme, 80)

4.9 Eristysvastusmittaus ja polarisaatioindeksi

4.9.1 Eristysresistanssi

Kostuminen ja vakavat eristysvauriot voidaan havaita eristysresistanssin mittauksella. Muutaman kilovoltin tasajännitteellä tehtävä mittaus on nopea suorittaa, eikä vaadi kalliita apuvälineitä. Eristysresistanssin mittauksella ei kuitenkaan havaita esimerkiksi osittaispurkauksia, eikä tuloksista voi tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä eristyksen kunnosta. (Aro ym. 2011, 184)

Eristysresistanssin mittauksissa käytetään tavallisesti 1 min kuluttua saatavaa arvoa, ja mittauksia tehdään etenkin pyörivillä sähkökoneilla. (Aro ym. 2011, 184)

Eristysvastusmittauksessa käämitykseen kytketään tavallisesti 500...5000 V:n tasajännite käämityksen nimellisjännitteestä riippuen, jolloin käämityksen eristys alkaa varautua ja eristyksen läpi alkaa kulkea eristyksen ominaisuuksista riippuva vuotovirta. Eristyksen varautumisen tasaannuttua jäljelle jää vain vuotovirtakomponentti. Eristysvastus määritellään käämityksen koestuksessa ottaman kokonaisvirran ja mitausjännitteen avulla:

$$R_e = U/I$$

Eristyksen varautumisesta seuraa, että eristysvastusarvo muuttuu mittauksen kuluessa varsin voimakkaasti, erityisesti mittauksen alussa. Eristysvastusmittausta suoritettaessa onkin määriteltävä myös aika mittauksen aloittamisesta, jolloin eristysvastuslukema pitää ottaa. (PSK 7704 2000, 1)

Mittausta suoritettaessa koneen voimakkaapelit on irrotettava, jotta saatava eristysvastus on itse käämityksen eristysvastus eikä pidä sisällään kaapeloinnin ja katkaisijan tai kontaktorin eristysvastuksia. Joissain tilanteissa voidaan kuitenkin nimenomaan haluta sisällyttää koneen syöttöpiiri mittaukseen, jolloin kaapelointia ei irroteta. (PSK 7704 2000, 1)

Mittausjännite valitaan käämityksen nimellisjännitteen mukaan. Mittausjännitettä valittaessa on huomioitava, että liian korkea mittausjännite saattaa vaurioittaa käämitystä. Ohjeellisesti voidaan käyttää seuraavia jännitteitä:

$U_n, < 1000 \text{ V}$	Mittausjännite 500...1000 V
$U_n, 1000 - 6600 \text{ V}$	Mittausjännite 1000 V
$U_n, 6600 - 15000 \text{ V}$	Mittausjännite 1000...5000 V (PSK 7704 2000, 2)

Mittausjännitettä pidetään kytkettynä koko mittauksen ajan. (PSK 7704 2000, 2)

Suurjännitekäämitysten eristysvastukset ovat tyypillisesti selvästi korkeampia kuin pienjännitekäämitysten. (PSK 7704 2000, 2)

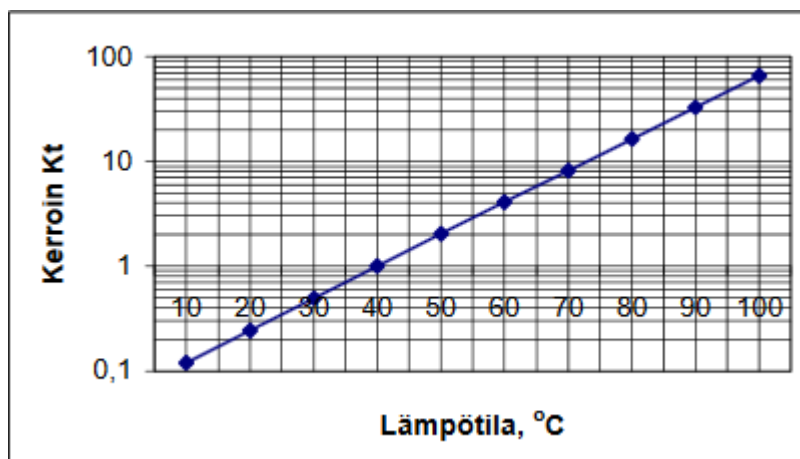
Käämityksen eristysvastuksen hyväksyttävän minimiarvon määrittelemiseen vaikuttavat koneen ikä, nimellisjännite sekä eristys- ja käämitysrakenne. Hyväksyttävää minimiarvoa määriteltäessä on lisäksi otettava huomioon, että eristysvastusarvo voi olla hyvinkin alhainen ilman, että se varsinaisesti vaarantaisi koneen käynnistämistä. Turvallisen käynnistyvyyden rajaksi suositellaan standardin IEEE 43 mukaan 40 °C:ssa:

$$Re > 1 \text{ M}\Omega + \frac{U_n}{kV} \times \text{M}\Omega$$

Kyseinen minimiarvo tarkoittaa, että vuotovirta ei saa ylittää 1 mA arvoa. (PSK 7704 2000, 2)

Eristysvastus riippuu voimakkaasti käämityksen lämpötilasta. Jotta eri lämpötiloissa suoritettut mittaukset olisivat keskenään vertailukelpoisia, ne on redusoitava samaan lämpötilaan. Tämä tapahtuu standardin IEEE 43 mukaan 40 °C lämpötilaan seuraavasti:

$Re(40 \text{ °C}) = Re(T) \times Kt$, missä kerroin Kt saadaan kuvasta:



Kuva 6 Eristysvastusarvon redusointikertoimen Kt lämpötilariippuvuus (PSK 7704 2000, 2)

Kuvaajaa tarkasteltaessa voidaan havaita, että lämpötilan lasku 10 °C asteella kaksinkertaistaa eristysvastusarvon ja vastaavasti 10 °C nousu puolittaa eristysvastusarvon. (PSK 7704 2000, 2)

Eristysvastus voi pudota hyvinkin alas esimerkiksi pintaeristysvälien likaantumisen seurauksena, jolloin eristysvastus on palautettavissa normaaliksi eristysvälien huolellisella puhdistuksella. Eristysvastusarvoja arvioitaessa on tärkeää verrata saatuja lukemia aiemmin suoritettujen mittausten tuloksiin. Näin voidaan usein päätellä esimerkiksi oikea puhdistusajankohta. (PSK 7704 2000, 2)

4.9.2 Polarisatioindeksi

Eristysresistanssin mittaamisessa tasajännitteellä aiheuttaa ongelmia eristyksen varautumisen ja nopea virran muutos askelmaisen jännitemuutoksen yhteydessä. (Aro ym. 2011, 184)

Myös eristyksen lämpötila mittaushetkellä vaikuttaa voimakkaasti saatavaan tulokseen. Edellä mainittujen ongelmien ratkaisemiseksi on kehitetty polarisatioindeksin mittaaminen. Polarisaatioindeksillä tarkoitetaan suhdelukua, joka saadaan, kun eristysresistanssin mittauksessa 10 min kuluttua jännitteen kytkemisestä saatava arvo jaetaan 1

min kuluttua saadulla arvolla. Polarisaatioindeksi on tunteettomampi lämpötilan vaikutuksille. Myös polarisaatioindeksiä käytetään lähinnä pyörivien sähkökoneiden kunnonvalvonnassa. (Aro ym. 2011, 184)

Eristyksen rakenteesta ja kunnosta riippuen kosteus saattaa vaikuttaa hyvinkin voimakkaasti eristysvastusarvoon. Erittäin vanhoissa suurjännite-eristyksissä, joiden valmistuksessa ei ole käytetty tyhjiöpainekyllästystekniikkaa, polarisaatioindeksi indikoi varsin herkästi eristyksen kostumista. Kuivan, vanhan eristyksen polarisaatioindeksi on tyypillisesti suurempi kuin 2. Jos arvo on pienempi kuin 1,5 niin eristys on todennäköisesti kostunut. Tyhjiökyllästystekniikalla tehdyn suurjännite-eristyksen eristysvastus ja polarisaatioindeksi saattavat olla varsin korkeat kosteudesta huolimatta. Tämä johtuu siitä, että kosteus ei pääse tunkeutumaan tiiviiseen eristykseen. Tällaisessa eristyksessä kosteus voi heikentää eristysvastusarvoa merkittävästi vain pintaeristysvälien kautta. (PSK 7704 2000, 2)

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli hyvin mielenkiintoinen kokonaisuudessaan. Kunnossapito ja kunnonvalvonta ovat itsessään erittäin laaja alue ja siksi hyvin vaikea aihe opettaa ja haastava oppia, joten opinnäytetyön aikana on opittu erittäin paljon uutta ja myös virkistettyä muistia monilta eri alueilta.

Kunnonvalvonta on yksi suuri tekijä kunnossapidossa ja koneiden käyttöasteessa. Se on oikein suoritettuna erittäin taloudellinen ja tehokas laiterikkojen ehkäisijä ja tuotannon pysyvyyden varmistaja. Toisaalta, väärin suoritettuna, kuten laiminlyönneillä, turhan useilla mittauksilla ja joissain tapauksissa huonoilla välineillä vaikutus on vastakkainen. Tämän takia kunnonvalvonta tulisi suunnitella siten, että suoritettavat kunnonvalvontatekniikat ovat kustannustehokkaita ja hyödyllisiä, jolloin tuleviin vikoihin voidaan reagoida tarpeellisella tavalla.

Rauman paperitehtaan tahtimoottorit olivat haastavia työskentelykohteita, koska tahtimoottoreille ei ole esimerkiksi määritelty omia standardeja kunnonvalvontaan, kuten PSK Standardisointiyhdisty ry on tehnyt oikosulkumoottoreille. Tämä toi oman lisähaasteensa kirjallisuuslähteitä käytettäessä. Vaikka PSK:n standardiryhmän 77 ovat tarkoitettu epätahtikoneille, toisissa kirjalähteissä tahtimoottoreiden kunnonvalvonnassa mainitut keinot ja tavat ovat hyvin samankaltaisia verrattuna näihin standardeihin. Näissä ei välttämättä käsitellä esimerkiksi mittaustulosten raja-arvoja, tai tarkemmin mittauskytKentöjä. Tämä tukisi standardien sovellettavuutta jossain määrin. Koska varmuutta standardien sovellettavuudesta ei ole, tulee näihin standardeihin suhtautua varauksella tahtimoottoreiden kunnonvalvontamenetelmiä pohdittaessa.

Olemassa olevaan kunnonvalvontaohjelmaan olisi suositeltavaa ottaa mukaan värähtelymittaukset. Tämä mittaustapa on toimiva perusmittaus, jolla saadaan perustietoa moottoreiden kunnosta. Värähtelymittauksilla seurataan värähtelyiden taajuuksia ja amplitudeja, jotka ilmaisevat pääsääntöisesti vian tyyppin ja vakavuuden. Esimerkiksi PSK:n standardista 5707 löytyy erilaisia vikatyyppejä eri taajuuskomponenteille ja niiden värähtelysuunnille.

Värähtelymittaukset oikein ja tarpeeksi usein suoritettuna antavat ensikäden tietoa, jos vikaa alkaa syntyään moottorissa. Kun värähtelymittaustuloksia käsitellään ja tulosten käsittelyn kokemus karttuu, voidaan tämän tiedon pohjalta saada selville, mikä vika on kyseessä ja miettiä mahdollista tarkempaa mittausta, joka voidaan teettää esimerkiksi ulkopuolisella yrityksellä, jos tiedetään, että kyseinen vika on hyvin harvinainen tai mittauslaitteiston hankinta omaksi ja mittaajan mahdollinen koulutus on kallista.

Toinen toimiva mittaus voisi olla osittaispurkausten online-mittaus. Tätä mittausta löytyy TMP34:n moottorista J31. Osittaispurkausmittaus vaatii yhden pysäytyksen, jolloin kiinteät mitta-anturit asennetaan kytkentäkaappiin ja johdotetaan syöttökaapeleihin. Anturien signaalikaapelointi voidaan tuoda esimerkiksi kytkentäkaapin kylkeen. Kun mittausajankohta tulee, analysaattori kytketään tuotuihin kaapeleihin ja mittaus suoritetaan koneen ollessa käynnissä. Tällä saadaan tietoa staattorin eristyksen kunnosta. TMP34-osaston tahtimoottorit ovat 90-luvun puolivälin jälkeen valmistettuja, jolloin tämän aikakauden, sekä uudempien moottoreiden eristysten valmistuksessa on käytetty tyhjiökyllästystekniikkaa. Tämä tekee eristeistä pitkäikäisiä, mutta aikaa myöden nämäkin voivat heikentyä. Osittaispurkausmittausten yksi käyttöönottamista jarruttava tekijä on alkuinvestoinnin hinta, mutta mitta-antureiden ja mittareiden hintojen ja asennuskustannusten tietojen puutteen vuoksi en ota siihen kantaa.

Aiemmin mainitun liitännän murtumiseen ja poikki menemiseen liittyvään ongelmaan ei löytynyt täysin luotettavaa seurantakeinoja. TMP34:n 8,5 MW moottoreille on määritetty järjestys, jossa ne lähtevät huoltoon ja tavoitteena oli, että tätä järjestystä olisi muutettu, jos jokin vianseurantakeino olisi löydetty. Tätä vian kehittymistä voi mitata resistanssimittauksella ja kuvata endoskoopilla, mutta näihin liittyy ongelmia, mitkä tulivat ilmi työn aikana.

Ulkopuolinen yritys kävi 30.5.2017 – 1.6.2017 endoskooppaamassa TMP34:n Siemensin valmistamat tahtimoottorit. 8,5 MW moottoreista kuvattiin nämä liitännät tarkemmin, sillä tämän tehoisilla moottoreilla liitântävika on ilmennyt useimmiten. Muut Siemensin moottorit endoskoopattiin yleiskunnon tarkastelua varten. Näistä 8,5 MW tehoisista moottoreista otettujen kuvien pohjalta yritys toimitti raportin, jonka mukaan R2-moottorin liitännässä on vakavaa murtumaa ja tällä moottorin liitännällä olisi riski

rikkoontua missä tahansa käynnistyksessä tai jopa normaalin käynnin aikana. R3-moottorissa oli tehty havainto roottoripakan liikkeestä ja mahdollisesta murtumasta. Lisäksi J41 ja R1 moottoreista tehtiin havaintoja, jotka kertovat roottoripakan liikkeestä, mutta murtumia ei ollut havaittavissa. Raportin mukaan J13, R4 ja R6 moottoreista ei tehty kriittisiä havaintoja. Tämän raportin pohjalta R2-moottori otettiin pois tuotannolta ja siirrettiin varamoottoriksi odottamaan edellisen moottorin huollon valmistumista.

Juhannusviikolla 2017 edellä mainittu yritys kävi millohmimittaamassa TMP34:n 8,5 MW tehoiset moottorit. Näistä mittauksista toimitettiin raportti, mutta raportissa olevien tulosten perusteella vikaa ei havaittu missään moottorissa.

Näistä 8,5 MW moottorien ristiriitaisista tuloksista endoskooppauksen ja vastusmittauksen välillä kertoo mittaustapojen ongelmallisuuden.

Endoskooppauksessa saatujen kuvien laatu on todella tärkeässä osassa. Jos kuvat ovat heikkolaatuisia, esimerkiksi huonosta tarkkuudesta tai valotuksesta johtuen, on kuvista vaikea tehdä tulkintoja. Lisäksi silmämääräisesti on mahdoton havaita korkea-resistanssiset liitokset. Myöskin kuvia tulkittaessa eri henkilöt voivat tulla eri tuloksiin ja tästä syystä kuvien perusteella voidaan saada suuntaa-antavia tuloksia, mutta pelkästään kuvien perusteella on aika riskialtista tehdä lopullisia päätöksiä.

Vastusmittauksen ongelmia ovat mm. murtumisen laajuuden vaikutus tuloksiin. Eli kuinka paljon liitännän täytyy murtua, että mittauksissa alkaa näkyä muutoksia. Väli mitatessa saatujen arvojen muuttumisella ja liitännän lopulliselle hajoamiselle on mahdoton määrittää. Optimaalinen tilanne mittausten kannalta olisi se, että vastusarvot alkaisivat muuttua lähes heti, kun murtumaa alkaa syntyä. Kuitenkin murtuman kehittymisnopeuden tiedon puutteen vuoksi on erittäin vaikeaa arvioida aikaväliä, kuinka usein mittauksia tulisi suorittaa.

Endoskooppaus ja vastusmittaus vaativat moottorin seisakin. Ajallisesti yhden moottorin endoskooppaus vie enemmän aikaa kuin vastusmittaus. Ensin moottori sammutetaan, moottorin syöttö katkaistaan katkaisija erottamalla ja työmaadoitetaan. Tämän

jälkeen moottorin jännitteettömyys todetaan jännitteenkoettimella syöttökaapeleista. Tämän jälkeen voidaan moottorin luukut avata ja mennä moottorin sisään.

Endoskooppaukseen tarvittava aika riippuu monesta tekijästä. Näihin vaikuttavat mm. käytettävä kalusto, kuvattavien kohteiden määrä ja niihin pääsy. Jos mukana on 2 henkilöä, voi toinen henkilö avustaa kuvaamisessa mm. kameraputken asettelulla, jolloin toinen henkilö voi käyttää kamerapäätetä. Juuri sammutettu moottori on hyvin lämmin pitkän aikaa. Tämä tekee työympäristöstä epämiellyttävän, mikä voi lisätä kuvaamiseen tarvittavaa aikaa. Aiemmin mainittua liitääntä endoskoopatessa, tulee jokaisen roottorinavan liitääntä kuvata ylä- ja alapuolelta. Roottorin asennosta riippuen jokin näistä liitännöistä voi olla hankalasti saavutettava.

Vastusmittaus on endoskooppaukseen verrattuna nopeampi suorittaa, sillä mitattavia kohteita on yleensä vähemmän kuin endoskoopattavia kohteita. Kun mitataan esimerkiksi aiemmin mainittua roottoripiirin liitääntä, tämä mittaus vaatii vain mittapäiden painamista tasaussillan jälkeisiin + - ja – -johtimiin.

Muitakin NDT-menetelmiä tämän liitännän murtuman tutkimiseen olisi, kuten tunkeumanestemenetelmä ja ultraääniluotaus. Tunkeumanestemenetelmällä havaitaan pienetkin halkeamat, mutta vian suuruutta ei voi määrittää tarkasti. Ultraääniluotauksessa ongelmia tuottavat materiaalien erilaiset tiheydet ja tuloksien vaikea tulkinta.

LÄHTEET

Mikkonen, H., Miettinen, J., Leinonen P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P., Komonen, K., Lumme V. E., Kautto, J., Heinonen, K., Lakka, S. & Mäkeläinen, R. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Toim. H. Mikkonen. Helsinki: KP-Media Oy, 25–36

Mikkonen, H., Miettinen, J., Leinonen P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P., Komonen, K., Lumme V. E., Kautto, J., Heinonen, K., Lakka, S. & Mäkeläinen, R. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Toim. H. Mikkonen. Helsinki: KP-Media Oy, 369–416

Mikkonen, H., Miettinen, J., Leinonen P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P., Komonen, K., Lumme V. E., Kautto, J., Heinonen, K., Lakka, S. & Mäkeläinen, R. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Toim. H. Mikkonen. Helsinki: KP-Media Oy, 417–482

Aura, L. & Tonteri, A. 1994. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki: WSOY

Aro M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen K. & Palva V. 2011. Suurjännitetekniikka. 3. muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto.

Silvonen, K. 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria, 4. painos. Helsinki: Otatieto.

Silvonen, K. 2007. Sähkötekniikka ja elektroniikka, 4. painos. Helsinki: Otatieto.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet, Tampere: Tammertekniikka.

Hietalahti L. 2012. Säädettyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Tammertekniikka.

Halko P., Launonen H., Malinen R. & Välimaa T. 1997. Sähkömittaustekniikka, 4. painos. Helsinki: Edita [8]

Nohynek, P. & Lumme, V.E., n.d., Rajamäki: KP-Media, 2. täydennetty painos.

Aura L. & Tonteri A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, Helsinki: WSOY. [10]

PSK-käsikirja 5 Kunnanvalvonnan sähköiset menetelmät, PSK Standardisointi, 2002 2. painos [11]

UPM Oyj www-sivut. 2017. Viitattu 27.11.2017. <http://www.upm.fi/Pages/default.aspx>

UPM vuosikertomus vuodelta 2016. Viitattu 27.11.2007. http://assets.upm.com/Investors/2017/Reports%20and%20Presentations%202017/UPM_AR16_FIN_web_170228.pdf

UPM Bioforen www-sivut. 2017. Viitattu 27.11.2017. <https://www.upmbiofore.fi/upm-fi/rauman-jattilainen/>

PSK 5701, Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2017, 8. painos. Viitattu 11.12.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi/lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5701-8p.pdf>

PSK 7705, Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Impedanssimittaukset. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2000. Viitattu 27.11.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi/lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma77/Psk7705.pdf>

PSK 7704, Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Eristysvastusmittaus. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2000. Viitattu 27.11.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi/lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma77/Psk7704.pdf>

PSK 7706, Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Toisto-aaltomittaus. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2000. Viitattu 27.11.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi/lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma77/Psk7706.pdf>

PSK 7709, Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Ositaispurkausmittaus. PSK Standardisointiyhdistys ry, 2001. Viitattu 27.11.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi/lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma77/Psk7709.pdf>

Valtanen, E., 2013. Tekniikan taulukkokirja. 20. painos, Genesis-Kirjat

ABB Oy, UPM Rauma 8.5 MW refiner motor inspections. 30.5–1.6 2017, 2017.

LIITE 1



TMP34:n tahtimoottori J12, jossa liitäntä on mennyt poikki ja valokaari aiheuttanut mustumista



TMP 34:n J12 moottorin ehjä liitântä



Aiempi roottorin liitännän korjaustapa joustavalla liitoksella. Liitännän mustien osien pitäisi olla kiinni toisissaan.



SKF TKES 10A -endoskoopilla otettu kuva TMP34:n tahtimoottorin ehjästä liitännästä.



R2:n murtunut navan liitântä, kuva otettu liitännän alapuolelta. (ABB, 2017)