



Vili Salenius

# Sähkökoneiden vikaantumisen havainnointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
2.2.2012

Tekijä Otsikko	Vili Salenius Sähkökoneiden vikaantumisen havainnointi
Sivumäärä Aika	53 sivua 2.2.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaajat	Lehtori Jari Ijäs Luetettavuus Päällikkö Juha Sunio Tuotekehitysinsinööri Saku Aspelin
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin sähkömoottoreiden sekä sähkömoottoriohjauksien toimintaa. Näistä tärkeimpinä tutkimuskohteina olivat kolmivaiheinen oikosulkumoottori sekä sen moottoriohjaukset. Näiden lisäksi tutustuttiin myös sähkömoottorin historiaan.</p> <p>Työn varsinaisena pääkohteena tutkittiin oikosulkumoottoreiden vikamuotoja sekä niiden syitä ja seurauksia. Viat jakautuvat laakeri-, staattori- ja roottorivikoihin, joiden havaitsemiseksi kartoitettiin erilaisia mittaamenetelmiä. Työssä pyrittiin löytämään sellainen kenttäkäyttöön soveltuva mittaamenetelmä, jolla voitaisiin ennakoida jaksottaisessa käytössä olevien oikosulkumoottoreiden vikoja.</p> <p>Insinööriyön kokeellisessa osuudessa pyrittiin todistamaan teoriaosuudessa tutkittujen mittaamenetelmien toimivuutta staattorikäämityksen vaurioiden havaitsemisessa. Tämä toteutettiin mittaamalla neljää identtistä moottoria, joille tehtiin erilaisia staattorivaurioita (kierrosoikosulku, kierroslangan katkos, vyyhtioikosulku ja vaiheiden välinen oikosulku). Mittaamenetelminä käytettiin resistanssimittausta, eristysvastusmittausta sekä syöksyaaltotestausta. Näiden lisäksi suoritettiin tyhjäkäyntikoe, jossa moottoria tarkkailtiin aistinvaraisesti ja samanaikaisesti mitattiin tyhjäkäyntivirta.</p> <p>Kokeellisen osuuden tuloksena todettiin, että yksittäisillä mittaamenetelmillä ei havaita kaikkia staattorikäämityksen vaurioita. Kokeellisten mittausten tuloksena kuitenkin oli, että mittaamenetelmien (syöksyaaltotestaus ja resistanssimittaus) yhteiskäytöllä voidaan havaita staattorikäämityksen vauriot.</p>	
Avainsanat	Oikosulkumoottori, jaksottainen käyttö, vikaantuminen, havainnointi, laakeri, staattori, roottori

Author Title	Vili Salenius Electrical machinery failure detection
Number of Pages Date	53 pages 2 February 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Jari Ijäs, Senior Lecture Juha Sunio, Reliability Manager Saku Aspelin, Development Engineer
<p>The operations of electric motors and electric motor controllers were investigated in this thesis. Main research targets were the three-phase squirrel cage motor and motor controls. In addition, the history of electrical motors was reviewed.</p> <p>As the actual objective of this thesis, squirrel cage motor fault modes, their causes and consequences were investigated. Faults were divided into bearing, stator and rotor faults. A variety of methods to detect these faults were surveyed. The work aimed at finding a method of measurement, which could anticipate the faults of a squirrel cage motor in intermittent use.</p> <p>A variety of measurement methods to detect squirrel cage motor faults were investigated in the theoretical part of this thesis. The experimental part of this thesis was aimed to prove the feasibility of these measurement methods in detecting stator coil faults. This was done by measuring four identical motors, which had different stator faults (open coil connection, turn to turn, coil to coil and phase to phase short-circuit faults). Used methods of measuring were resistance measurement, insulation resistance measurement and surge tests. In addition to these a no-load test was carried out, in which the engine was under sensory monitoring, and the no-load current was measured simultaneously.</p> <p>The results showed that an individual measurement method will not detect all types of stator coil faults. Experimental measurements showed, that with the joint operation of measurement methods (surge test and the resistance measurement), all types of stator coil damage can be detected.</p>	
Keywords	Squirrel cage motor, intermittent use, failure, observation, bearing, stator, rotor

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

## Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	1
<b>2</b>	<b>Sähkömoottorit</b>	2
2.1	Sähkömoottorin historia	2
2.2	Moottorityypit	3
2.2.1	Vaihtosähkömoottorit	3
2.2.2	Tasasähkömoottorit	11
2.3	Epätahtimoottoreiden ohjausmenetelmät	12
2.3.1	Suorakäyttö	13
2.3.2	Tyristorikäyttö	14
2.3.3	Taajuusmuuttajakäyttö	16
<b>3</b>	<b>Sähkömoottoreiden vikaantuminen</b>	19
3.1	Laakeriviat	19
3.2	Staattoriviat	20
3.3	Roottoriviat	21
3.4	Ohjausjärjestelmien viat	22
<b>4</b>	<b>Vikojen havainnointimenetelmät</b>	22
4.1	Aistinvarainen havainnointi	22
4.2	Resistanssimittaus	23
4.3	Eristysvastusmittaus	24
4.4	Polarisaatioindeksi	27
4.5	Syöksyaaltomittaus	29
4.6	Värähtelymittaukset	31
4.7	Virtaspektrianalyysi	35
4.8	Lämpötilamittaukset	37
4.9	Kaupalliset laitteet	39

<b>5</b>	<b>Mittaukset</b>	40
5.1	Mitattavat moottorit	40
5.2	Resistanssimittaus	41
5.3	Eristysvastusmittaus	43
5.4	Syöksyaaltotestaus	44
5.5	Tyhjäkäyntivirtamittaus	49
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	50
	<b>Lähteet</b>	52

## 1 Johdanto

Sähkömoottorit ovat hyvin tärkeitä teollisuudessa. Niitä löytyy miltei jokaisesta tuotantolaitoksesta ja tuotannon kannalta hyvinkin kriittisistä paikoista. Sähkömoottoreiden vikaantuminen on usein vaikeasti ennakoitavissa, ja viat tulevat ilmi vasta silloin, kun sähkömoottori pysähtyy. Tämä on tuotannon kannalta huono asia, koska pienetkin suunnittelemattomat tuotantokatkokset saattavat maksaa tuotannon yritykselle todella paljon. Joissakin tuotantoprosesseissa katkos saattaa pilata koko tuotantoerän kelvottomaksi.

Tässä insinööriyössä tutkitaan mittausmenetelmiä, joilla voitaisiin ennakoida jaksottaisessa käytössä olevan kolmivaiheisen oikosulkumoottorin vikaantumista. Vikaantumisen ennakoinnin avulla pystyttäisiin ajoittamaan moottorin vaihto, korjaus tai huolto tuotannon kannalta sopivaan ajankohtaan. Haasteena on erityyppisten ja tehoisten sähkömoottoreiden määrä. Myös mittausten analysoinnin kannalta tarpeeksi pitkän näytteenottojakson saaminen jaksottaisessa käytössä olevista moottoreista on haasteellista. Tavoitteena on myös todistaa mittausmenetelmien toimivuus käytännönmittauksilla.

Työn alussa esitellään sähkömoottoreiden historiaa ja toimintaperiaatetta. Näiden lisäksi esitellään oikosulkumoottoreiden ohjausjärjestelmiä. Seuraavaksi keskitytään oikosulkumoottorin erilaisiin vikamuotoihin sekä niiden syihin ja seurauksiin. Sen jälkeen käydään läpi erilaisia olemassa olevia mittausmenetelmiä, joilla voidaan arvioida sähkömoottorin kuntoa. Lisäksi esitellään erilaisia kaupallisia mittalaitteita, joilla käsiteltäviä mittausmenetelmiä voidaan suorittaa.

Työn lopussa keskitytään käytännön mittauksiin aiemmin esiteltävillä mittausmenetelmillä. Käytännön mittauksissa tutkitaan useaa identtistä kolmivaiheista oikosulkumoottoria, joihin tehdään erilaisia vikoja. Näiden keinotekoisesti vioitettujen moottoreiden avulla selvitetään mittausmenetelmien kelpoisuutta vikojen havaitsemiseksi.

## 2 Sähkömoottorit

Perinteisesti, kun teollisuudessa on haluttu säädettäviä moottorikäyttöjä, vaihtoehtona on ollut liukurengas- tai tasasähkömoottori. Taajuusmuuttajien kehitys on mahdollistanut oikosulkumoottorin hyvän säädettävyyden, ja tästä johtuen taajuusmuuttajakäytöt ovat syrjäyttäneet liukurengas- ja tasasähkömoottorikäyttöjä.

Oikosulkumoottorin etuna on pieni huollon tarve verrattuna liukurengas- ja tasasähkömoottoriin. Oikosulkumoottorin valmistuksen yksinkertaisuuden ansiosta se on myös huomattavasti halvempi valmistaa kuin liukurengas- tai tasasähkömoottori. Oikosulkumoottorin valintaa tukevat siis sen halvemmat hankinta- ja huoltokustannukset.

Liukurengas- ja tasasähkömoottorin heikkous on liukurenkaat/kommutaattori ja hiilet, joilla muodostetaan sähköinen kontakti roottoriin. Liukurengas- ja tasasähkömoottori on lähetettävä ajoittain huoltoon puhdistettavaksi, koska hiilipöly kerääntyy staattoriin ja roottoriin. Suurina määrinä hiilipöly aiheuttaa käämityksessä läpilyöntiriskiä ja lämpöongelmia.

### 2.1 Sähkömoottorin historia

Sähkömoottoreiden historia ulottuu vuoteen 1821, jolloin englantilainen fyysikko Michael Faraday (1791–1867) osoitti, että sähköenergia voidaan muuttaa liikeenergiaksi sähkömagnetismin avulla. Faraday teki kokeen, jossa elohopea-astian keskelle oli sijoitettu kestopagneetti ja johdin. Kun johtimeen kytkettiin sähkövirta, se pyöri magneetin ympärille. Faraday havainnollisti kokeellaan tanskalaisen fyysikon Hans Christian Ørtedin havaintoja sähkövirran synnyttämästä magneettikentästä johtimen ympärille. Faradayn kojetta pidetään ensimmäisenä alkeellisena sähkömoottorina. [1.]

Vuonna 1823 unkarilainen Ányos Jedlik esitti ensimmäisen varsinaisen sähkömoottorin. Moottorin paikallaan pysyvät (staattori) ja liikkuvat osat (roottori) ovat sähkömagneettisia. Jedlikin moottori (kuva 1, ks. seur. s.) ja sen käyttöohjeet ovat Budapestissa käsi-työmuseossa. Moottori on täysin toimintakuntoinen vielä nykyäänkin. [2.]



Kuva 1. Jedlikin moottori vuodelta 1823

Englantilainen keksijä William Sturgeon teki ensimmäisen käyttökelpoisen tasavirralla toimivan moottorin vuonna 1832. Tuohon aikaan sähköä saatiin vain kemiallisista paristoista. Ne olivat hyvin kalliita ja monimutkaisia valmistaa sen aikaisilla menetelmillä. Tämän vuoksi sähkömoottorit eivät vielä yleistyneet. Vuonna 1873 belgialainen tiedemies Zénobe Gramme kehitti tehokkaan dynamon, jolloin tasavirtasähkömoottoreiden kaupalliset mahdollisuudet tajuttiin. Tämän tekniikan avulla voimalaitokset pystyivät tuottamaan sähköä, jolla taas pystyttiin pyörittämään tehtaiden koneita. [1; 3.]

Moottorien kehitys jatkui 1880-luvulla, jolloin amerikanserbialainen keksijä Nikola Teslan tekemät kokeet mahdollistivat vaihtovirtatekniikan keksimisen. Venäläinen Mikhail Dolivo-Dobrovolsky kehitti kolmivaihegeneraattorin ja kolmivaihemoottorin vuonna 1888 sekä oikosulkumoottorin vuonna 1891. Teslaa ja Dolivo-Dobrovolskyä voidaan pitää suurimpina nykyisin hyödynnettävien pyörivien sähkökoneiden keksijöinä. [4.]

## 2.2 Moottorityypit

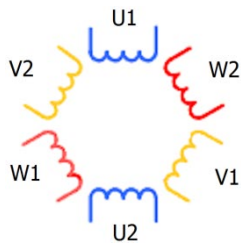
### 2.2.1 Vaihtosähkömoottorit

Vaihtosähkömoottorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: tahti- ja epätahtimoottoreihin. Nimensä mukaisesti tahtimoottorin akseli pyörii samassa tahdissa pyörivän magneettikentän kanssa, kun taas epätahtimoottorin akseli pyörii aina jättämän verran hitaammin, kuin pyörivä magneettikenttä. Tahtimoottorin ja epätahtimoottorin suurin rakenteellinen ero on roottorissa. Tahtimoottorin roottori synnyttää magneettikentän, joka seuraa tahdissa pyörivää magneettikenttää. Tahtimoottorin roottoriin synnytetään magneettikenttä joko kestopagneeteilla tai sähkömagneeteilla. Epätahtimoottorissa



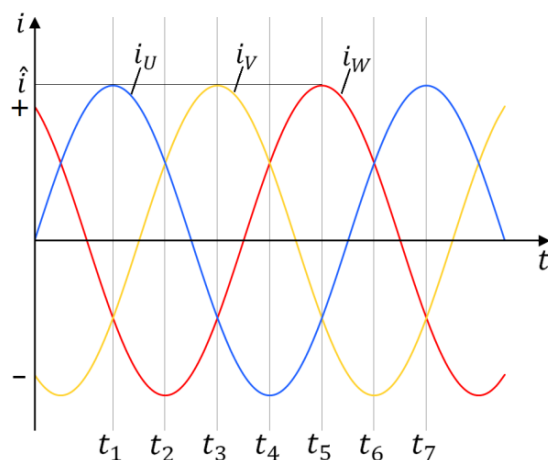
tämänlaisia ominaisuuksia ei ole, jolloin roottoriin magnetointienergia on otettava staattorin pyörivästä magneettikentästä. Magnetointienergian saamiseksi pyörivästä magneettikentästä täytyy epätahtimoottorissa olla jättämää, jotta roottoriin indusoituisi roottorin magnetointienergia.

Vaihtosähkömoottorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään. Kolmivaiheisissa moottoreissa pyörivä magneettikenttä syntyy symmetrisessä kolmivaihekäämityksessä, siinä vaikuttavan symmetrisen kolmivaiheisen vaihtovirran avulla. Magneettikentän syntymistä voidaan tarkastella kuvan 2 yksinkertaistusta vaihtosähkömoottorista, jonka napapariluku  $p$  on 1.



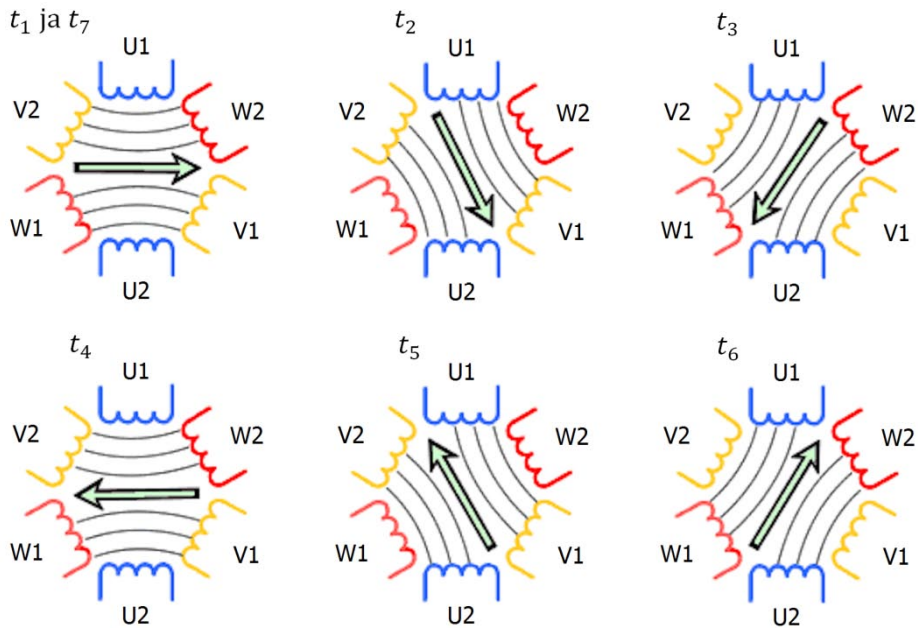
Kuva 2. Kolmivaiheinen käämitys

Yksinkertaistetussa moottorissa jokaisen vaihekäämin muodostaa yksi vyyhti, joka muodostuu useasta johdinkierroksesta. Nämä vyyhdet muodostavat yhdessä kolmivaihekäämityksen. Käämit on kytketty tähteen yhdistämällä vaihekäämien loppupäät  $U_2$ ,  $V_2$  ja  $W_2$ . Kun käämien alkupäät  $U_1$ ,  $V_1$  ja  $W_1$  yhdistetään symmetriseen kolmivaiheverkkoon, alkaa kolmivaihekäämityksen läpi kulkea kolmivaihevirta (kuva 3). [5, s. 119–120.]



Kuva 3. Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän vaihevirit

Seuraavassa kuvasarjassa (kuva 4) havainnollistetaan pyörivän magneettikentän syntymistä symmetrisessä kolmivaihekäämityksessä. Tämä syntyy siten, että kuvan 3 (ks. edell. s.) mukainen symmetrinen kolmivaiheinen virta syötetään kuvan 2 (ks. edell. s.) moottoriin. Kuvan 4 ajanhetket  $t_1-t_7$  on valittu siten, että jokaisten ajanhetken kohdalle osuu vaiheen U (L1), V (L2), tai W (L3) virran huippuarvo.



Kuva 4. Kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä ajanhetkillä  $t_1 - t_7$

Magneettikentän pyörimisnopeus (tahtinopeus) on syötettävän taajuuden ja moottorin N- ja S-napojen muodostamien napaparien lukumäärän suhde (yhtälö 1):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ r/min} , \text{ jossa} \quad (1)$$

$n_s$	tahtinopeus	[r/min]
$f$	taajuus	[Hz]
$p$	napapariluku	

Esim.  $n_s = \frac{60 \cdot 50}{1} \text{ r/min} = 3\,000 \text{ r/min}$

Epätahtimoottorissa roottori pyörii jättämän  $s$  verran hitaammin, kuin pyörivä magneetikenttä. Jättämä ilmoitetaan yleisesti suhteellisena jättämänä, joka esitetään yhtälössä 2:

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} \cdot 100 \% \text{ tai} \quad (2)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% , \text{ jossa}$$

$s$  suhteellinen jättämä

$n$  pyörimisnopeus [r/min]

$\Delta n = n_s - n$  jättämä [r/min]

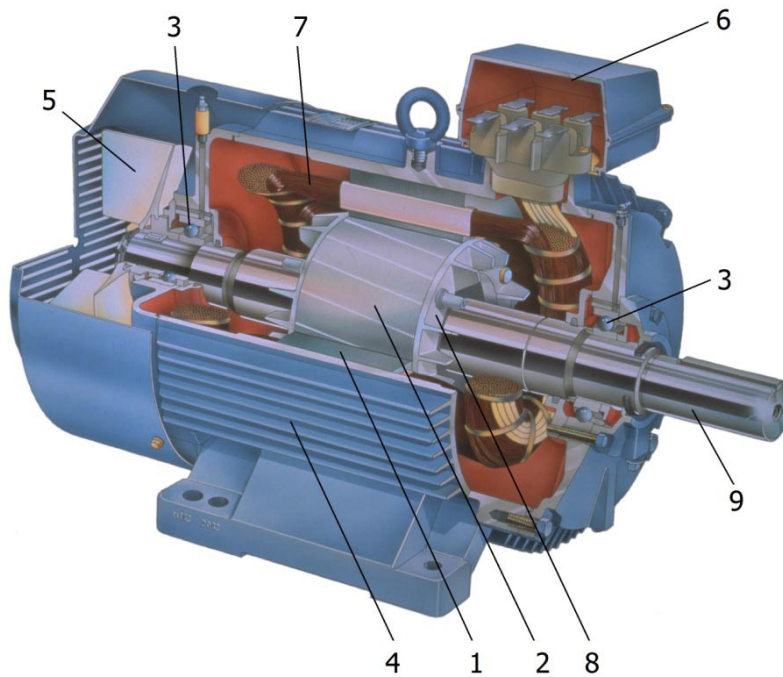
Esim. 
$$s = \frac{3\,000 - 2\,958}{3\,000} \cdot 100 \% = 1,4 \%$$

Suhteellinen jättämä on tyypillisesti luokkaa 2–5 %, riippuen moottorin koosta [6]. Epätahtimoottorin pyörimisnopeus voidaan laskea yhtälön 1 (ks. edell. s.) ja jättämän avulla (yhtälö 2) muodostettavasta yhtälöstä. Näistä muodostetaan epätahtimoottorin pyörimisnopeuden yhtälö 3:

$$n = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p} \text{ r/min} \quad (3)$$

Esim. 
$$n = (1 - 0,014) \cdot \frac{60 \cdot 50}{1} \text{ r/min} = 2\,958 \text{ r/min}$$

Oikosulkumoottori on teollisuuden yleisin moottorityyppi. Syynä sen yleisyyteen on sen vähäinen huollontarve ja korkea hyötysuhde. Se on myös edullinen sen yksinkertaisen rakenteen vuoksi. Oikosulkumoottorin tärkeimmät osat esitetään kuvassa 5 (ks. seur. s.).

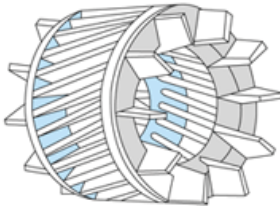


Kuva 5. Oikosulkumoottorin rakenne

Kuvassa 5 on esitetty oikosulkumoottorin rakenne. Rakenteen osat eritellään seuraavassa listassa:

1. staattori
2. roottori
3. laakerit
4. staattorin runko
5. roottorin akselille suoraan kiinnitetty tuuletin
6. liitinkotelo
7. staattorikäänitys
8. roottorikäänitys
9. akseli.

Oikosulkumoottorin roottorin käänitys on niin sanottu häkkikäänitys (kuva 6, ks. seur. s.), joka koostuu roottorin uriin sijoitetuista roottorisauvoista. Nämä sauvat ovat oikosuljettu molemmista päistä oikosulkurenkailla. Roottorin runko on tehty akselin ympärille kasatuista eristetyistä teräslamellilevyistä.



Kuva 6. Häkkikäimitys

Roottorin häkkikäimitys voidaan esimerkiksi tehdä joko kuparista, takomalla kuparitangot roottorin uriin tai työntämällä kuparitangot roottorin päästä roottorin uriin. Kuparitankojen molemmat päät oikosuljetaan toisiin kuparitankoihin. Tämä tehdään juottamalla kuparitankojen päät oikosulkurenkaiseen. Tehtaässä häkkikäimitys menetelmällä, jossa kuparitangot työnnetään roottorin uriin, kuparitangot liimataan epoksilla roottoriin sauvojen oikosulkemisen jälkeen. Epoksi tukkii myös kaikki roottorin kolot. Toisena vaihtoehtona on tehdä häkkikäimitys kaato- tai painevalamalla alumiini roottorin runkoon.

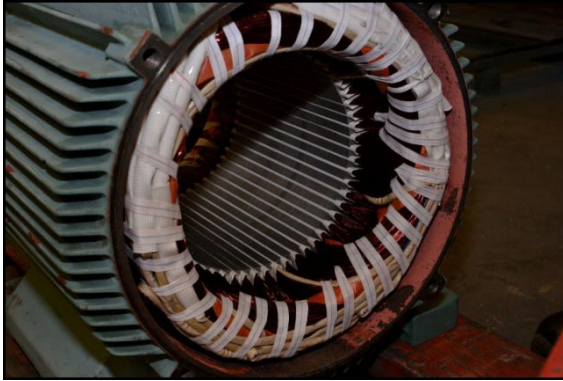
Häkkikäimityksen valmistuksen jälkeen roottorin halkaisija sorvataan oikeaksi. Suurin osa pienten oikosulkumoottoreiden roottoreista tehdään alumiinista painevalamalla. Menetelmä on tuotantotehokas ja edullinen. Painevalulla saadaan myös tasainen valmistuslaatu. Suurempien moottoreiden roottorit valmistetaan yleensä kuparista.

Staattori tehdään eristetyistä teräslamellilevyistä. Lamellilevyt niputetaan yhteen pakettiin. Staattori työnnetään lämmitettyyn staattorirunkoon. Staattorirungon jäähtyttyä se supistuu lämpötilan muutoksen vaikutuksesta, ja staattori kiinnittyy tiukasti staattorirunkoon. Staattorikäimitys voidaan tehdä esimerkiksi kuparilangasta. Tällöin Kuparilangasta tehdään vyyhdet, joihin tehdään useampia johdinkierroksia (kuva 7 vasemmalla). Vyyhdet asennetaan staattorin eristettyihin uriin (kuva 7 oikealla).



Kuva 7. Vyyhtien valmistus ja asennus

Kun vyyhdet on asennettu, niiden päät kytetään vaihejohtimiin siten, että vyyhdet muodostavat symmetrisen kolmivaihekäämityksen. Tämän jälkeen vaihejohtimien päät viedään liitinkoteloon, ja vyyhtien päät sidotaan yhteen tiukaksi nipuksi (kuva 8).



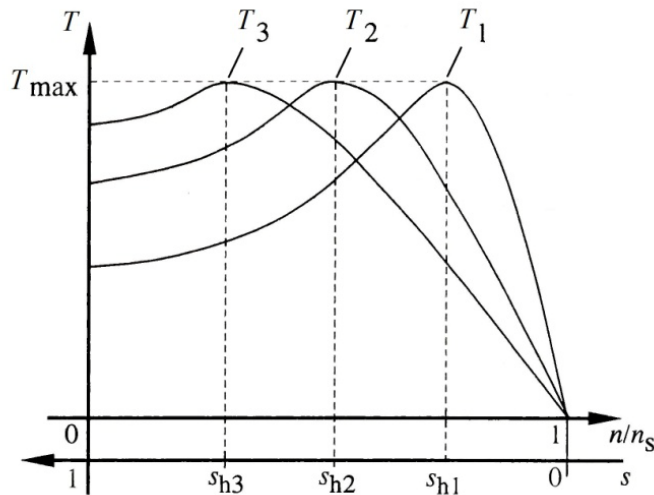
Kuva 8. Vyyhden päiden sidonta

Tämän jälkeen staattorin ja kolmivaihekäämityksen paketti liimataan yhteen. Liimauksessa käytetään lakkoja tai nykyisin yleistymässä olevia epoksi-materiaaleja. Liimauksen tarkoituksena on pitää käämitys paikoillaan. Käämityksen paikallaan pysyminen on tärkeää, ettei siihen pääsisi syntymään mekaanisia muodonmuutoksia, jotka voivat vioittaa käämityksen eristeitä.

Kun staattoriin kytetään jännite, staattorissa kolmivaihevirran synnyttämän pyörivän magneettivuon vuoviivat leikkaavat roottorisauvoja. Tällöin roottorisauvoihin induoituu lähdejännite, joka synnyttää roottorivirran. Roottorivirta aiheuttaa ympärilleen oman magneettikentän, joka leikatessaan staattorin magneettikenttää synnyttää sähkömoto-risen voiman ja roottori alkaa pyöriä. Koska energia syötetään roottoriin magneettiken-tän välityksellä ilman galvaanista yhteyttä, kutsutaan oikosulkumoottoria myös induk-tiomoottoriksi. Roottorin on pyörittävä epätahdissa tahtinopeuteen nähden, jotta staat-torin vuoviivat leikkaisivat roottorisauvoja. Tästä syystä oikosulkumoottorissa on aina jättämää.

Käynnissä olevaa moottoria kuormittaessa sen sähköistä momenttia vastustava me-kaaninen momentti kasvaa. Tämä aiheuttaa moottorin pyörimisnopeuden pienenemi-sen. Tästä johtuen staattorikentän ja roottorisauvojen leikkausnopeus kasvaa, jolloin roottoriin induoituva jännite ja virta kasvavat, jolloin moottorin sähköinen momentti kasvaa. Moottorin sähköinen momentti kasvaa, kunnes se tavoittaa kuormittavan mo-mentin. Mikäli kuormittava momentti on pienempi kuin moottorin maksimimomentti,

roottori jää pyörimään uudella hitaammalla nopeudella. Roottorin pyörimisnopeus on siis riippuvainen moottorin kuormitusmomentista. Kuvassa 9 esitetään moottorin momenttikäyriä, jotka havainnollistavat momentin ja pyörimisnopeuden välistä suhdetta. [6, s. 60.]



Kuva 9. Roottoriresistanssin vaikutus momenttiin

Roottorin rakenne vaikuttaa roottorin resistanssiin. Roottorin resistanssi määrää jättämän, jolla maksimimomentti syntyy. Mitä suurempi on roottorin resistanssi, sitä pienemmällä pyörimisnopeudella moottorin maksimimomentti saavutetaan. Pienemmällä roottoriresistanssilla saadaan pienempi pyörimisnopeuden vaihtelu kuormituksen momentin vaihdellessa. [5, s. 156.]

### Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori eroaa rakenteeltaan oikosulkumoottorista vain roottorin osalta. Siinä roottorikäänitys on eristetty kolmivaihekäänitys, jonka toiset päät on tuotu ulos moottorista liukurenkaiden ja harjojen välityksellä. Harjoihin liitetään vastuspaketit, joiden avulla roottoriresistanssia voidaan säätää. Tämä mahdollistaa huippumomentin siirron pienemmille kierrosalueille (kuva 9). Näin saadaan aikaan pienempi käynnistysvirta ja suurempi käynnistysmomentti.

Liukurengasmoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla roottoriresistanssia. Moottorin pyörimisnopeus hakeutuu aina jatkuvuustilaan, jossa moottorin ja kuorman vääntömomentit ovat yhtä suuret. Lisäämällä roottorin resistanssia siirretään tätä

jatkuvuustilaa pienemmille pyörimisnopeuden arvoille. Mitä suurempi on roottorin resistanssi, sitä alhaisempi on pyörimisnopeus, jolla jatkuvuustila saavutetaan. Tällä tavoin roottorin resistanssia muuttamalla voidaan säätää moottorin pyörimisnopeutta. [5, s. 198.]

### 2.2.2 Tasasähkömoottorit

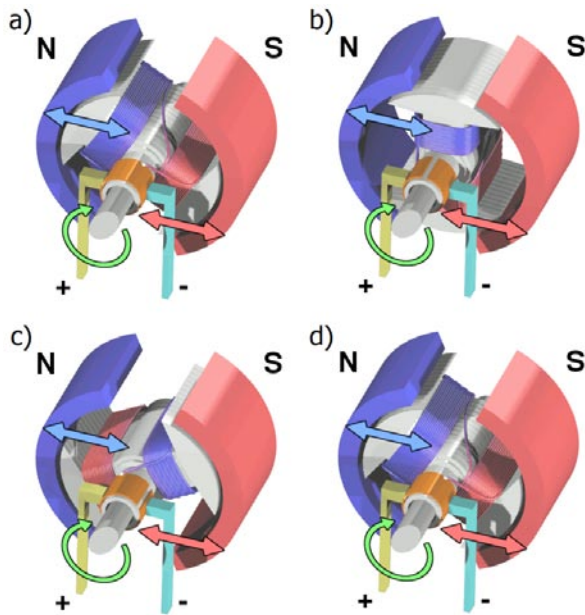
Perinteisesti teollisuuden säädetyissä sähkömoottorikäytöissä ovat toimineet tasasähköeli DC-moottorit. Tähän on vahvasti vaikuttanut se, että tasasähkömoottorin ohjaukseen tarvittava tekniikka on yksinkertaista tehoelektroniikkaa. Esimerkiksi vaihtosähköverkkoon kytkettynä tasasähkömoottorin säädettävään ohjaukseen tarvitaan vain yksinkertainen säädettävä tasasuuntaussilta. Säädettävän tasasuuntaussillan avulla pystytään muuttamaan tasasähkömoottorin syöttöjännitettä. Tasasähkömoottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta voidaan hallita syöttöjännitteen amplitudilla.

Toiminnallisesti tasasähkömoottorin suurin ero vaihtosähkömoottoriin on paikallaan pysyvä magneettikenttä. Tasasähkömoottorin staattorissa synnytetään magneettivuo (päävuo) sähkö- tai kestopagneeteilla ja sähköenergia muutetaan liike-energiaksi kommutaattorin ja hiilien avulla (kuva 10, ks. seur. s.). Kommutaattori vaihtaa akseliin tehdyn sähkömagneettiin (ankkurin) napaisuutta, jolloin magneettinen voimavaikutus pysyy yllä ja ankkuri pyörii. Kommutaattori toimii siis mekaanisena tasavaihtosuuntaajana. Kommutaattori on tehty toisistaan eristetyistä kuparikiloista ja on rakenteeltaan sylinterimäinen.

Ankkuri on tehty eristetyistä teräslamellilevyistä. Tällä teräslamellilevyrakenteella estetään pyörrevirtojen synnyttämiä pyörrevirtahäviöitä ankkurissa. Ankkuriin käänmitään ankkurikäänitys, jonka vyyhtien päädyt kytketään kommutaattoriin siten, että jokaiseen kommutaattorin liuskaan kytketään yhdenvyyhden alkupää ja toisen loppupää. [6, s. 35–43; 7, s. 38–39.]

Tasasähkömoottorin toiminta esitetään kuvasarjassa (kuva 10, ks. seur. s.) yksinkertaistetun tasasähkömoottorin avulla. Yksinkertaistetun tasasähkömoottorin päävuo synnytetään kestopagneeteilla, ja moottorin kommutaattorissa on vain kaksi liuskaa. [8.]





Kuva 10. Tasasähkömoottorin toimintaperiaate

Tasasähkömoottorin toimintaa kuvaavan kuvasarjan (kuva 10) tapahtumaketju kuvailaan seuraavassa listassa:

- a) Tasasähkömoottoriin kytketään tasavirta. Tasavirta synnyttää ankkurikäämeissä magneettikentän. Ankkurikäämitys on kytketty kommutaattoriin siten, että päävuon N-navan puoleiseen ankkurikäämiin muodostuu N-napa. Koska ankkurin magneettikenttä pyrkii kääntymään samansuuntaiseksi staattorin magneettikentän kanssa, alkaa ankkuri pyöriä.
- b) Ankkuri jatkaa pyörimistä.
- c) Ankkurin jatka pyörimistään, jolloin tapahtuu kommutointi.
- d) Kommutoinnin tapahtuessa ankkurin napaisuus vaihtuu, ja se jatkaa pyörimistä.

### 2.3 Epätahtimoottoreiden ohjausmenetelmät

Epätahtimoottorin erilaisilla ohjauksilla pyritään parantamaan sen toimintaa. Tällaisia ovat pyörimisnopeuden ja/tai momentin säätö. Näillä pyritään mm. parantamaan moottorin hyötysuhdetta ja käyttöaluetta. Ohjaus menetelmiä on useita, kuten esimerkiksi tyristoriohjaus tai taajuusmuuttajalla toteutettu ohjaus.

Joillakin näistä ohjausmenetelmistä voidaan muuttaa epätahtimoottorin pyörimisnopeutta. Tämän säätämisen mahdollistavat suureet, jotka voidaan päätellä esiteltävästä yhtälöstä 4, joka on muunnos yhtälöstä 3 (ks. s. 6).

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} r / \text{min} - \Delta n, \text{ jossa} \quad (4)$$

$n$	pyörimisnopeus	$[r / \text{min}]$
$f$	taajuus	$[\text{Hz}]$
$p$	napapariluku	
$\Delta n$	jättämä	$[r / \text{min}]$

Epätahtimoottorin nopeutta voidaan siis muuttaa yhtälön 4 mukaisesti muuttamalla joko taajuutta  $f$ , napaparilukua  $p$  tai jättämää  $\Delta n$ .

Epätahtimoottorin pyörimisnopeutta voidaan muuttaa myös muuttamalla jännitettä, vaikkei se olekaan yhtälössä 4. Jännitteen avulla nopeuden säätämistä voidaan käyttää kuitenkin vain sellaisilla epätahtimoottoreilla, joiden tahtinopeuden ja huippumomenttia vastaava pyörimisnopeuden ero on suuri. Jännitteen avulla nopeuden säätämistä voidaan siis käyttää vain liukurengasmootoreissa tai oikosulkumootoreissa, joissa on suuri roottoriresistanssi (ks. s. 10–11).

### 2.3.1 Suorakäyttö

Suorakäytöllä tarkoitetaan oikosulkumootoreiden käyttöä, joissa verkkosähkö syötetään moottoreille suoraan ja muuttamattomana kontaktorien avulla. Tällöin moottorin syöttöä ei pystytä säätämään mitenkään, jolloin moottorin pyörimisnopeus riippuu syöttävän verkon taajuudesta, moottorin napapariluvusta ja kuormituksesta.

Suorakäytöissä on olemassa erikoisvalmisteisia oikosulkumootoreita, joita kutsutaan napavaihtomoottoreiksi. Tällaisissa moottoreissa on kaksi tai useampi kolmivaihekäämitys, joissa napaparien lukumäärä on toisistaan poikkeava.

Napavaihtomoottoreita käytetään esimerkiksi nostureiden nostomoottoreissa. Tyypillisesti käytetään moottoreita, joissa on kaksi kolmivaihekäämitystä. Tällaisessa

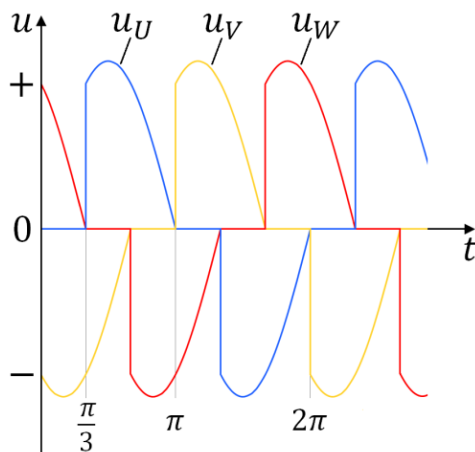
napavaihtomoottorissa on esimerkiksi toisessa käämityksessä 1 napapari ja toisessa napapareja on 6. Tällöin taakan nosto voidaan aloittaa hitaalla nopeudella, kun taakka on liikkeessä, vaihdetaan nopealle nopeudelle. Nostomoottorin pyörimisnopeus laske-  
taan yhtälön 4 (ks. edell. s.) mukaisesti napapareille 1 ja 6 jättämien ollessa  $200 \text{ r/min}$  ja  $100 \text{ r/min}$ :

$$n_1 = \frac{60 \cdot 50}{1} \text{ r/min} - 200 \text{ r/min} = 2800 \text{ r/min}$$

$$n_2 = \frac{60 \cdot 50}{6} \text{ r/min} - 100 \text{ r/min} = 400 \text{ r/min}$$

### 2.3.2 Tyristorikäyttö

Tyristorikäytöllä muutetaan oikosulkumoottoria syöttävän jännitteen tehollisarvoa. Tämä toteutetaan siten, että tyristorit katkovat vaihejännitteitä tietyllä ajanhetkellä (kuva 11). Tämän ajanhetken määrittää tyristorin liipaisukulma.



Kuva 11. Tyristoreilla katkottu siniaalto

Moottoria syöttävää jännitettä katkotaan kuvassa 11 tyristorin  $\frac{\pi}{3}$  radiaanin liipaisukul-  
malla. Katkotun vaihejännitteentehollisarvo saadaan laskettua seuraavaksi esitettävällä  
neliöllisenkeskiarvon yhtälöllä 5:

$$U_{rms} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\int_{\alpha}^T [\sin(t)]^2 dt} , \text{ jossa} \quad (5)$$

$U_{rms}$

jännitteen tehollisarvo

[V]

$\hat{u}$	jännitteen huippuarvo	[V]
$T$	jakson aika	[rad]
$\alpha$	liipaisukulma	[rad]
$t$	ajan hetkellisarvo	[rad]

Esim. Lasketaan kuvan 11 (ks. edell. s.) vaihejännitteentehollisarvo Suomen sähköverkon vaihejännitteen mukaisesta huippujännitteestä (yhtälö 6):

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_v, \text{ jossa} \quad (6)$$

$$U_v \quad \text{vaihejännite} \quad [V]$$

Jolloin  $\hat{u} = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} = 325 \text{ V}$

Tässä tapauksessa molemmat puolijaksot katkotaan samanlaisesti. Tämän vuoksi voidaan jännitteentehollisarvo laskea puolijakson perusteella ( $T \rightarrow \frac{T}{2}$ ) seuraavasti yhtälön 5 (ks. edell. sivu) mukaisesti:

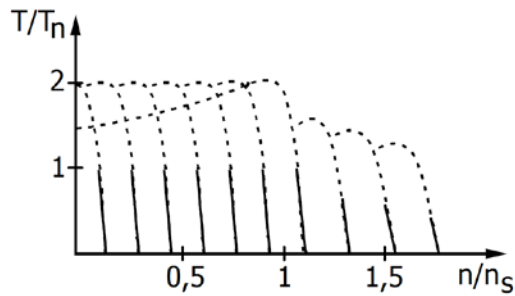
$$U_{rms} = \frac{325 \text{ V}}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} [\sin(t)]^2 dt} = 206 \text{ V}$$

Jännitteen säädöllä voidaan pienentää oikosulkumoottorin starttivirtaa, joka pienentää huomattavasti moottorin syöttökaapeleiden poikkipinta-alan vaatimusta. Jännitteen säädöllä voidaan myös parantaa liukurengasmoottorin roottorivastuksilla toteutettua käynnistystä sekä pyörimisnopeuden säätötarkkuutta.

Jänniteohjauksella toteutettu pyörimisnopeudenohjaus soveltuu parhaiten pienitehoisille oikosulkumoottoreille, joiden nimellinen jättämä on tyypillisesti suuri. Tällaisia ovat vastusroottorikoneet, joissa roottoriresistanssi on suuri. Tällöin moottorin tahtinopeuden ja huippumomenttia vastaavan pyörimisnopeuden ero on riittävän suuri jännitesäädön järkevälle toteutukselle. Tällaisia moottoreita käytetään esimerkiksi pienehköissä puhallinkäytöissä. [9.]

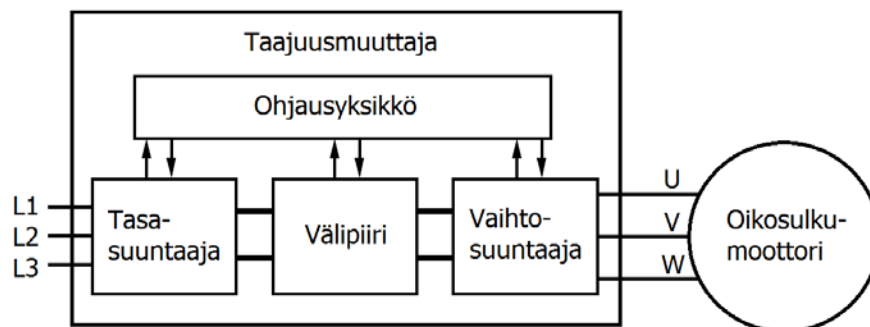
### 2.3.3 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttaja mahdollistaa oikosulkumoottorin syötön jännitteen ja taajuuden säädön portaattomasti. Näiden avulla pystytään säätämään moottorin pyörimisnopeus ja momentti halutun suuruisiksi (kuva 12).



Kuva 12. Oikosulkumoottorin momenttikäyriä taajuuden funktiona

Taajuusohjatuissa oikosulkumoottorikäytöissä käytetään välipiirillisiä taajuusmuuttajia. Tällaiset taajuusmuuttajat koostuvat seuraavaksi esitettävän kuvan 13 mukaisesti neljästä lohkokosta.



Kuva 13. Taajuusmuuttajan lohkokaavio

Näillä kullakin osalla on omanlaisensa tehtävä. Nämä esitetään seuraavassa listassa:

1. Tasasuuntaaja muuntaa verkon vaihtojännitteen tasajännitteeksi.
2. Välipiiri suodattaa tasasuuntaajan syöttämän sykkivän tasajännitteen LC-alipäästösuodattimella tai muuntaa sen tasavirraksi tasoituskuristimella.
3. Vaihtosuuntaaja muuttaa välipiirin tasajännitteen halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi.
4. Ohjausyksikkö huolehtii taajuusmuuttajan tarkoituksen mukaisesta toiminnasta. [10.]

Taajuusmuuttajat, joiden välipiiri on toteutettu pelkästään tasoituskuristimilla, kutsutaan tasavirtapiirilliseksi taajuusmuuttajiksi. Nämä toimivat virtalähteinä, joilla syötetään moottorille sellainen virta, että moottorin navoissa on halutun suuruinen jännite. Virran amplitudi säädetään tasasuuntaajassa tai tasavirtapiiriin kytketyllä tasavirtakatkajalla.

Taajuusmuuttajia, joiden välipiirissä on LC-alipäästösuodatin, nimitetään tasajännitevälipiirilliseksi taajuusmuuttajiksi. Tämantyyppisissä taajuusmuuttajissa moottorille syötettävän jännitteen amplitudia muutetaan, joko välipiirin jännitettä muuttamalla tai muuttamalla jännitteen pulssikuviota vaihtosuuntaajassa. Pulssikuviota muuntamista kutsutaan pulssileveysmoduloinniksi (PWM, *Pulse Width Modulation*).

PWM-taajuusmuuttaja on yleisimmin käytetty taajuusmuuttajatyyppejä. Tämä johtuu siitä, että se kuluttaa vähän loistehoa, ja sen säätönopeus on nopea suhteessa välipiirin jännitesäädöllä toteutettaviin taajuusmuuttajiin. [10.]

Taajuusmuuttajan ohjauksella pystytään vaikuttamaan moottorin pyörimisnopeuden ja momentin asetteluun. Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeutta säädetään muuttamalla taajuusmuuttajan lähtötaajuutta. Moottorin jännitettä säädetään taajuudenfunktiona siten, että jännitettä kasvatetaan lineaarisesti moottorin nimellistaajuudella saavutettavaan nimellijännitteeseen asti. Tämän jälkeen jännite pysyy vakiona. Moottorin pyörimisnopeus on jättämän verran pienempi kuin taajuusmuuttajan syöttämä tahtinopeus. Mikäli kuormitusmomentti on moottorin huippumomenttiin nähden suhteellisen pieni, jättämä voidaan arvioida nimellisen jättämän avulla seuraavissa yhtälöissä 7 ja 8 esitettävillä tavoilla:

$$\Delta n = \Delta n_n \cdot \frac{T_{mek}}{T_n}, \text{ kun } f \leq f_n \quad (7)$$

$$\Delta n = \Delta n_n \cdot \frac{T_{mek}}{T_n} \cdot \frac{f}{f_n}, \text{ kun } f \geq f_n, \text{ joissa} \quad (8)$$

$\Delta n$	jättämä	[r/min]
$\Delta n_n$	nimellijättämä	[r/min]
$T_{mek}$	kuormituksen momentti	[Nm]
$T_n$	nimellismomentti	[Nm]

$f$	syöttötaajuus	[Hz]
$f_n$	nimellistaajuus	[Hz]

Esim. 
$$\Delta n = 20 \text{ r/min} \cdot \frac{550 \text{ Nm}}{910 \text{ Nm}} \cdot \frac{70 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 16,9 \text{ r/min}$$

Skalaarisäätö on kuin skalaariohjaus, johon on lisätty nopeuden takaisinkytkentä. Tämä on toteutettu esimerkiksi takometrillä. Skalaarisäädön tuomat lisäykset moottorin ohjaukseen ovat huomattavat. Näitä ovat esimerkiksi momenttisäätö sekä nopeudenmittaus ja säätö. Momenttisäätöä aseteltaessa on otettava huomioon, että momenttia ei voida kasvattaa kuin enintään moottorin huippumomentin arvoon. Kippausvaaran takia on lisäksi varattava reserviä. Nyrkkisääntönä suurimmalle käytettävälle momentille voidaan pitää yhtälöstä 9 laskettavaa arvoa [10].

$$T = \frac{2}{3} \cdot T_{max} \text{ , jossa} \quad (9)$$

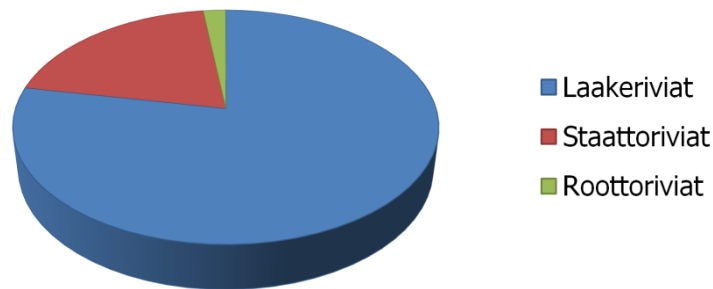
$T$	suurin sallittu vääntömomentti	[Nm]
$T_{max}$	huippumomentti	[Nm]

Taajuusmuuttajan avulla voidaan oikosulkumoottoria käyttää myös generaattorina. Tällaisia käyttökohteita on esimerkiksi nostureissa, kun taakkaa lasketaan alas, voidaan jarrutusenergia syöttää takaisin verkkoon.

Taajuusmuuttajalla voidaan parantaa hyötysuhdetta huomattavasti. Perinteisesti pumppukäytöissä nesteen virtaamisnopeutta on säädetty kuristimilla, jolloin pumpun moottori kuluttaa kokoajan suuren energian. Nykyään tällaisissa käytöissä käytetään taajuusmuuttajia, joiden avulla oikosulkumoottoria pystytään ohjaamaan ja pumpulla säädetään nesteen virtausnopeus. Tämän ansiosta pumpun moottorin energian tarve on pienentynyt huomattavasti

### 3 Sähkömoottoreiden vikaantuminen

Sähkömoottorin vikaantumisiin on erilaisia syitä. Oikosulkumoottorin viat jaotellaan laakeri-, staattori- ja roottorivikoihin. Moottoreiden vikaantumiset jakautuvat näiden kesken seuraavan kaavion mukaisesti (kuva 14) [11]:



Kuva 14. Vikojen jakautuminen

Tämän lisäksi käsitellään myös ohjausjärjestelmien vikoja sekä niiden vaikutusta sähkömoottorin vikaantumisiin. Laakerien mekaanisen kulumisen vuoksi, laakerit ovat pääasiassa ainoana huollon kohteena oikosulkumoottoreissa. (Ks. 3.1–3.4.)

#### 3.1 Laakeriviat

Laakerivikojen syntymisille on useita aiheuttajia, kuten lämpö, mekaaniset sekä voiteluun liittyvät ongelmat. Suurin osa sähkömoottoreiden laakeroinneista on toteutettu vierintälaakereilla. Tämän vuoksi tässä keskitytään vierintälaakereiden vikaantumisiin.

Vierintälaakerit kuluvat normaalissa käytössä, ja niiden vikaantumiset ovat tyypillisesti hitaasti kehittyviä. Laakereiden äkillisien hajoamisen syynä on yleensä voitelun puute tai asennusvirhe. Vika alkaa yleensä yhdestä pisteestä. Vian kehittyminen on aluksi hidasta, mutta vikaantuminen kiihtyy kunnes laakeri hajoaa.

Laakerin vikaantumisen alkusyyksi voi olla useita aiheuttajia kuten liiallinen kuormitus, värinä tai liian suuri pyörimisnopeus. Näiden lisäksi lika tai liian suuri käyttölämpötila vioittavat laakeria. Suurin laakereiden vikaantumislähde on voiteluun liittyvät ongelmat. Näitä ovat liiallinen tai vähäinen voitelu, sekä sopimaton voiteluaine. Liiallinen voitelu aiheuttaa laakerissa lämpenemistä, kun taas vähäinen voitelu aiheuttaa laakerin lämpenemistä, väsymistä, kulumista ja murtumia. Vakavin voiteluun liittyvä vian aiheuttaja



on sopimaton voiteluaine, joka edellä mainittujen vaurioiden lisäksi voi aiheuttaa korroosiota laakerissa. [12.]

### 3.2 Staattoriviat

Staattorin käämityksen vikaantuminen on tyypillisesti nopeasti kiihtyvä tapahtumaketju, joka tulee yleensä ilmi vasta siinä vaiheessa, kun moottori pysähtyy (käämitys palanut). Vikaantumisen alkusyytä voivat olla termiset, sähköiset, mekaaniset tai ympäristösyöt.

#### Sähköiset syyt

Sähköisiä vikoja aiheuttaa jännitetransientit, jotka rasittavat moottorin käämityksen eristeitä. Jännitetransienttien aiheuttajia ovat taajuusmuuttujan syöksyaallot, huono maadoitus, kontaktorien kytkentäpiikit ja salamointi. [13, s. 376–377.]

#### Lämpötila

Moottorin liialliselle lämpenemiselle on useita syitä, kuten lika, kolmivaihe-epäsymmetria ja liiallinen kuormitus. Moottorin lämpeneminen aiheuttaa käämien eristyksen termistä vanhenemista. Moottorin lämpenemän kasvu 10°C voi vaikuttaa alentaen moottorin käyttöikänsä jopa 50 % [14]. Ylikuumeneminen on siis merkittävä vikaantumisen kiihdyttäjä käämityksen käyttöiän kannalta.

Moottorin rungon päälle kertyvä lika heikentää moottorin rungon pinnalla tapahtuvaa konvektiota, jolloin jäähdytys heikkenee. Myös tuuletuksessa oleva häiriö, kuten tuuletin ilmanoton likaantuminen, vaikuttaa negatiivisesti moottorin rungon pinnalla tapahtuvaan konvektioon jäähdytysilman virtauksen heikentyessä. [15.]

Suuri moottorin lämpenemiseen vaikuttava tekijä on kolmivaihe-epäsymmetria. Oikosulkumoottori on hyvin herkkä jännite-epäsymmetrialle. Jos jännite-epäsymmetria  $dU$  on esimerkiksi 3,5 %, lämpötila voi nousta 25 % siinä vaihekkäämissä, jossa virta on suurin [14]. Myös liiallinen kuormitus lämmittää moottoria suunniteltua enemmän, kuten esimerkiksi käyttö väärällä toimintasuhteella.

## Mekaaniset syyt

Staattorikäämeihin kohdistuu kahdentyyppisiä voimia transienttitiilojen (esim. käynnistys, kuorman muutos), synnyttämät suuret voimat ja tasaisen käynnin synnyttämät pienemmät voimat. Jos vyyhden pää pääsee liikkuman voimien vaikutuksesta, se aiheuttaa eristysten kulumista. Paikallinen läpilyönti synnyttää kuumapisteen, jonka lämpövaikutuksesta vieressä olevat eristykset vaurioituvat ja vika laajenee. [13, s. 373.]

## Ympäristösyöt

Ympäristöolosuhteilla voi olla ratkaiseva merkitys sähkömoottorin kunnan kannalta. Jos sähkömoottorilla on pitkiä seisokkeja, ja ympäristössä on korkea ilmankosteus, voi siihen kerääntyä kosteutta. Sähkömoottoriin kerääntynyt kosteus heikentää staattorikäätymisen eristyskykyä. Myös ympäristön aiheuttama sähkömoottorin likaantuminen ja syövyttävät aineet voivat aiheuttaa staattorikäätymisen eristysten heikkenemistä. Staattorikäätymisen eristyskyvyn heikkeneminen saattaa aiheuttaa sähkömoottorissa maasulun, kierros-, vyyhti- tai vaiheoikosulun. Käyttämällä sähkömoottoria, jossa staattorikäätymisen eristys on heikentynyt, saattaa jokin näistä olevista tai syntyvistä oikosuluista aiheuttaa staattorikäätymisen tuhoutumisen. [13, s. 372–376.]

Yhteenvedona staattorin vikatekijöistä voidaan todeta, että moottorin puhtaudella ja oikeanlaisella käytöllä on suuri merkitys staattorin vikaantumisen ehkäisemisessä.

### 3.3 Roottoriviat

Tyypillinen oikosulkumoottorin roottorivika on roottorisauvan murtuminen. Tämä alkaa usein korkearesistiivisestä pisteestä tai rasituksen aiheuttamasta pienestä halkeamasta roottorisauvassa. Myös alumiinista valetun roottorin valuvirheestä johtuva ilmakupla roottorisauvassa saattaa olla heikko piste, josta vikaantuminen alkaa. Tämä vaurio kohta kuumenee, mikä pahentaa vauriota, kunnes roottorisauva on kokonaan poikki.

Katkennut roottorisauva aiheuttaa katkoksen häkkikäämin virtapiiriin, jolloin katkenneen roottorisauvan virta siirtyy tämän viereisille sauvoille, jolloin niiden virta kasvaa. Viereisten sauvojen kasvanut virta kasvattaa niiden lämpötilaa, joka lopulta aiheuttaa

myös niiden murtumisen sekä katkeamisen. Roottorisauvojen katkeamisen seurauksena oikosulkumoottorin momentti pienenee. Tämän seurauksena myös jättämä kasvaa, eli kierrosnopeus laskee. Roottorisauvojen katkeamiset havaitaan yleensä vasta siinä vaiheessa, kun oikosulkumoottorin momentti on pienentynyt huomattavasti. Tämä huomataan yleensä siten, että oikosulkumoottorin käynnistysmomentti on niin pieni, ettei moottori käynnisty. [13, s. 383–384.]

### 3.4 Ohjausjärjestelmien viat

Oikosulkumoottorin ohjausjärjestelmässä tapahtuva vika saattaa aiheuttaa moottorille vakavia vaurioita. Esimerkiksi jos moottorin syötöstä putoaa yksivaihe pois, syntyy huomattavan suuri jännite-epäsymmetria moottoriin. Tämä aiheuttaa suuren lämpenemisen moottorissa, ja vakavimmillaan se tuhoaa moottorin käyttökelvottomaksi.

Uudemmissa moottorikäytöissä tätä ongelmaa ei ole. Lämpöreleellä suojattu moottorisytötkatkaisee syötön hyvin nopeasti epäsymmetriasta johtuvan nopean virran kasvun vaikutuksesta. Useissa taajuusmuuttajissa ongelma on poistettu siten, että sekä tulo- ja lähtöjännitteessä on vaihevahdit, jotka valvovat, että vaihejärjestys on oikea, ja että jokainen vaihe on käytössä.

## 4 Vikojen havainnointimenetelmät

### 4.1 Aistinvarainen havainnointi

Ihmisen aisteilla pysytään havaitsemaan erilaisia moottorin vikaantumisia. Aiemmin moottoreiden kunnonvalvonta perustui pääasiassa aistinvaraisiin havainnointimenetelmiin. Näitä menetelmiä on esimerkiksi laakereiden kuunteleminen puukepin avulla, tunnustelemalla kädellä koneen lämpöä ja värähtelyä. Aistinvaraisen havainnoinnin laatu perustuu havainnointia tekevän ihmisen kokemukseen, koska ihminen vertaa havaitsemiaan asioita omiin aikaisempiin havaintoihin.

Nykyään aistienvaraisia havaintoja voidaan käyttää mittalaitteiden tukena. Kuulon perusteella pystytään havaitsemaan esimerkiksi koneen epätasainen käynti, tai jo pahasti vaurioituneiden laakereiden synnyttämä normaalista poikkeava ääni. Hajuaistin

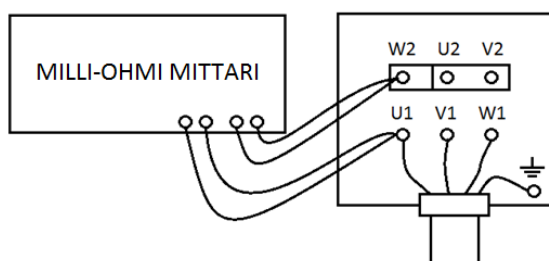
perusteella voidaan havaita kipinäointia (otsonin haju) tai ylikuumenevien eristeiden kitkerä haju.

Moottorin tuuletuksen toimivuutta voidaan arvioida esimerkiksi tuntoaistia apuna käyttäen. Tämä voidaan toteuttaa koittamalla kostutetulla kämmenselällä ilmanvirtausta, tai näköaistia hyödyntäen käyttämällä paperia tai lankaa ilmavirtauksen indikaattorina. Voidaan siis todeta, että vaikka mittalaitteet ovat tuoneet paljon edistystä kunnonvalvontaan, aistinvaraista havainnointia ei pidä aliarvioida kunnonvalvonnassa. [13, s. 417–427]

#### 4.2 Resistanssimittaus

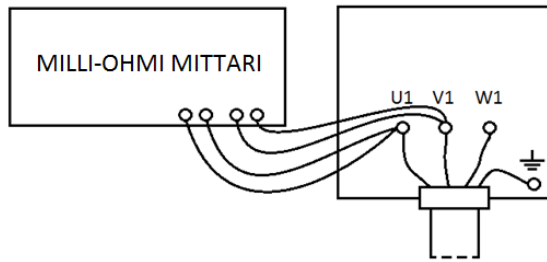
Resistanssimittauksesta saaduilla mittausarvoilla voidaan arvioida moottorin käämien ja niiden kytkentöjen kuntoa. Resistanssien aikaisemmilla mittauksilla tai mittaus lämpötilalla ei ole merkitystä, sillä käämien resistansseja verrataan keskenään. Ihanteellisessa tilanteessa kaikkien vaihekäämien resistanssit olisivat täysin identtiset. Käytännössä vaihekäämien resistansseissa esiintyy pientä hajontaa. Jos jonkin vaihekäämin resistanssi on huomattavasti suurempi suhteessa muihin, kyseisessä käämityksessä on katkos, tai huono liitos. Vastaavasti jos yhdessä vaiheessa resistanssi on pienempi, kyseisessä käämityksessä on luultavasti kierrosoikosulku tai vyyhtioikosulku.

Resistanssimittauksessa tulisi käyttää nelijohdinresistanssimittalaitetta, jotta saataisiin tarkempi mittaustulos. Käämien resistanssit mitataan standardin PSK 7705:n mukaisesti resistanssimittarilla tähtikytkentäisestä moottorista jokainen käämi erikseen, jolloin resistanssi mitataan tähtipisteen ja vaihekäämin syöttöpään väliltä (kuva 15). [16.]



Kuva 15. Y-kytkentä

Jos tähtipiste ei ole kytkentäkotelossa tai mitattaessa kolmiokytkentäistä moottoria, resistanssi mitataan kahden vaiheen väliltä (kuva 16, ks. seur. s.).



Kuva 16. Tähtipiste ei kotelossa tai D-kytkentä

Mitattujen resistanssien hajonta keskiarvosta saa olla maksimissaan  $\pm 3\%$  [17]. Tämä suurin sallitun hajonta keskiarvosta lasketaan seuraavalla yhtälöllä 10:

$$\Delta R_{max} = \pm \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \cdot 0,03, \text{ jossa} \quad (10)$$

$\Delta R_{max}$	suurin sallittu hajonta keskiarvosta	[ $\Omega$ ]
$R_1$	mittauksen 1 resistanssi	[ $\Omega$ ]
$R_2$	mittauksen 2 resistanssi	[ $\Omega$ ]
$R_3$	mittauksen 3 resistanssi	[ $\Omega$ ]

Esim. 
$$\Delta R_{max} = \pm \frac{10,35 \Omega + 10,60 \Omega + 10,36 \Omega}{3} \cdot 0,03 = \pm 10,437 \Omega \cdot 0,03 = \pm 0,313 \Omega$$

#### 4.3 Eristysvastusmittaus

Eristysresistanssimittauksessa mitataan moottorin sähköisten komponenttien eristyvyys moottorin rungosta. Mittaus suoritetaan eristysvastusmittarilla, joka synnyttää mittausjännitteen käämitykseen tyypillisesti 500–10 000 V:n tasajännite. Mittausjännite riippuu käämityksen nimellisjännitteestä. Kun käämiin kytketään jännite, sen eriste alkaa varautua ja eristyksen läpi alkaa kulkea vuotovirta. Vuotovirran suuruus määräytyy eristeen ominaisuuksien perusteella. Eristyksen varautumisen tasaantuessa jäljelle jää vain vuotovirtakomponentti. Eristysvastus määritellään Ohmin lain mukaisesti käämityksen virran ja jännitteen avulla (yhtälö 11). [18.]

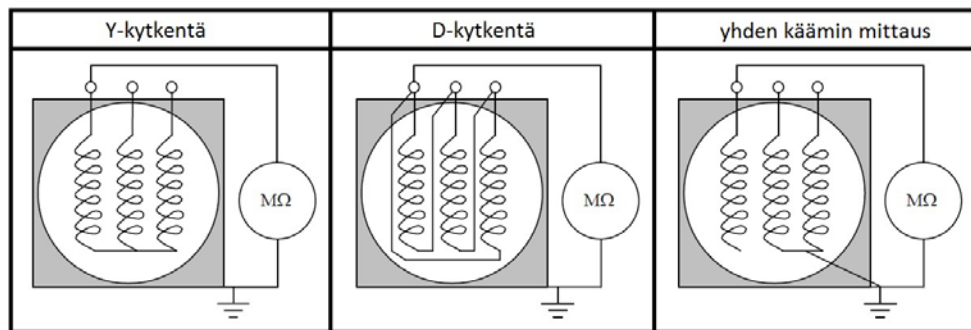
$$R_e = \frac{U}{I}, \text{ jossa} \quad (11)$$

$R_e$	eristysvastus	[M $\Omega$ ]
-------	---------------	---------------

$U$	mittausjännite	[V]
$I$	vuotovirta	[ $\mu A$ ]

Esim.  $R_e = \frac{1000 V}{200 \mu A} = 5 M\Omega$

Varautumisen aiheuttaman eristysvastuksen muutoksen johdosta eristysvastusta mitattaessa pitää määritellä aika mittauksen aloittamisesta, jolloin mittaustulos kirjataan. Mitattaessa moottorin käämien eristysvastusta, pitää moottorin syöttökaapelit irrottaa moottorista, jotta jännite syöttö ei vaikuttaisi mittaustulokseen. Mittauksen suorituspa esitetään kuvassa 17.



Kuva 17. Staattorin käämien kytkennät eristysresistanssin mittausta varten

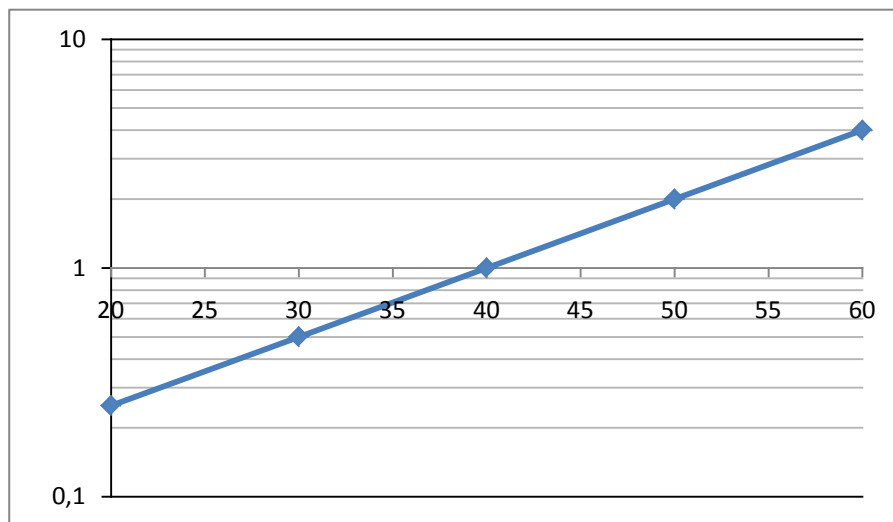
Mittausjännite määritellään käämityksen nimellisjännitteen mukaan. Ohjeellisesti voidaan käyttää IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) standardissa IEEE P43-2000 määritellyjä mittausjännitteitä (taulukko 1). Mittausjännitteen suuruuden asettelemisessa täytyy olla tarkka, sillä liian suuri mittausjännite saattaa vioittaa käämien eristeitä.

Taulukko 1. Eristysvastusmittausjännitteet

Käämin nimellisjännite/V	Mittausjännite/V
< 1 000	500
1 000–2 500	500–1 000
2 501–5 000	1 000–2 500
5 001–12 000	2 500–5 000
> 12 000	5 000–10 000

Eristysvastuksen mittausaika on standardin IEEE 43–42000:n asettama 60 s, jolloin eristysvastusmittauslukema kirjataan. Mittauksen jälkeen käämitykseen varautunut energia on purettava. Tämä tapahtuu joko mittarin sisäisellä toiminnalla tai maadoittamalla käämitys koneen runkoon.

Tarkisteltaessa mitattua eristysvastusarvoa on huomioitava, että eristysvastus on käänteisesti eksponentiaalinen lämpötilan suhteen. Tästä johtuen mitattaessa eristysresistanssia on myös mitattava käämityksen lämpötila. Eristysvastusraja-arvot ovat ilmoitettu lämpötilassa 40 °C, jolloin mitatut eristysvastusarvot täytyy redusoida tähän lämpötilaan. Eristysvastuksen redusointikertoimen määrittäminen esitetään kuvassa 18:



Kuva 18. Lämpötilan vaikutus eristysresistanssiin

Kuvassa 18 esitetään standardin IEEE 43:n mukaisesti eristysvastuksen korjauskertoimen käämin lämpötilan funktiona. Kuvaajasta saatavalla käämin eristysresistanssin korjauskertoimella saadaan laskettua 40 °C:ta vastaava eristysvastusarvo (yhtälö 12):

$$R_{e(40\text{ °C})} = R_{e(T)} \cdot K_T, \text{ jossa} \quad (12)$$

$R_{e(40\text{ °C})}$  eristysvastus 40 °C:ssa [MΩ]

$R_{e(T)}$  mitattu eristysvastus [MΩ]

$K_T$  redusointikerroin

Esim.  $R_{e(40\text{ °C})} = 5\text{ M}\Omega \cdot 0,34 = 1,7\text{ M}\Omega$

Näin ollen 50 asteen eristysvastusarvo täytyy olla vähintään kaksinkertainen sallittuun 40 asteen minimi eristysarvoon, eli käämityksen lämpötilan nousu 10 asteella kaksinkertaistaa eristysvastuksen.

Käämityksen turvalliseksi eristysvastusarvoksi lämpötilassa 40 °C, suositellaan standardin IEEE 43:n mukaan yhtälöstä 13 laskettavaa arvoa. Eristysvastuksen minimiarvo määräytyy siten, että vuotovirta ei saa ylittää 1 mA:a.

$$R_e > 1 M\Omega + U_n/kV \cdot 1 M\Omega, \text{ jossa} \quad (13)$$

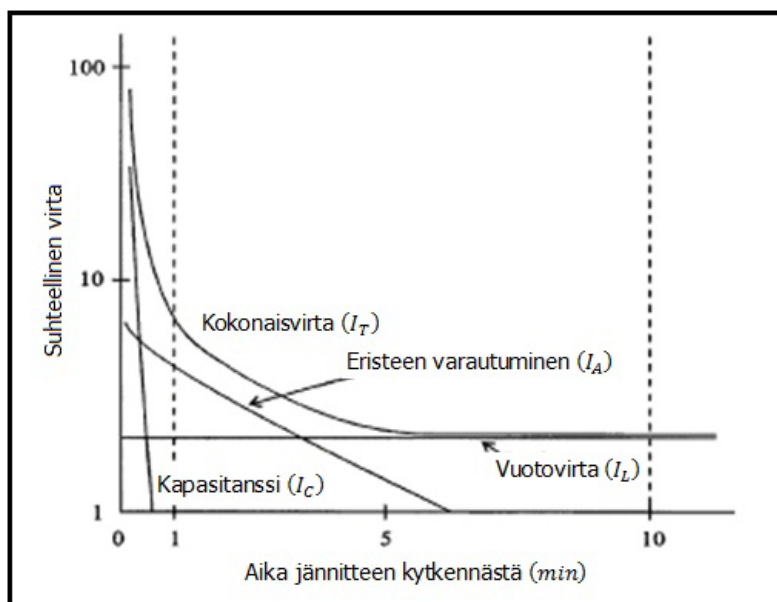
$U_n$  moottorin nimellisjännite [kV]

Esim.  $R_e > 1 M\Omega + 0,4 kV/kV \cdot 1 M\Omega$

$$R_e > 1,4 M\Omega$$

#### 4.4 Polarisatioindeksi

Polarisaatioindeksiä käytetään tutkittaessa moottorin eristyksen likaisuutta ja kosteutta silloin, kun eristysvastusmittaus on ollut alhainen. Polarisatioindeksi perustuu käämin varautumisen aiheuttamaan muutokseen eristysvastusarvossa (kuva 19).



Kuva 19. Polarisatioindeksin määrittäminen



Vanhanaikaisten eristeiden varautuminen voi kestää useita tunteja, mutta tyypillisesti kohtuullisen vakaa eristysvastusarvo saadaan 10–15 minuutin kuluessa. Modernit kalvopäällysteiset lanka- sekä epoksihartsi- tai polyesterieristetyt staattorikäämit voivat saavuttaa tasaantuneen eristysvastusarvon alle 4 minuutissa. Jos käämit on märkä tai likainen, alhainen tasaantunut eristysmittausarvo saavutetaan jopa minuutissa. [18.]

Polarisaatioindeksi on kahtena eri ajanhetkenä otettujen eristysvastusarvojen suhde (yhtälö 14). Tämä laskenta on määritelty standardissa IEEE 43–2000.

$$PI = \frac{R_{e(600s)}}{R_{e(60s)}}, \text{ jossa} \quad (14)$$

$PI$	polarisaatioindeksi	
$R_{e(600s)}$	eristysvastus ajanhetkellä 600 s	[ $\Omega$ ]
$R_{e(60s)}$	eristysvastus ajanhetkellä 60 s	[ $\Omega$ ]

Esim.  $PI = \frac{5 M\Omega}{2,6 M\Omega} = 1,9$

Jos polarisaatioindeksi on alhainen, vuotovirran suhde eristeen varautumisen virtaan on suuri, jolloin eriste on likainen tai kostea. Taulukossa 2 esitetään standardin IEC 60085-01: 1984 suositellut polarisaatioindeksin minimiarvot.

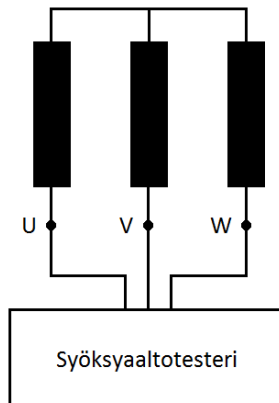
Taulukko 2. Polarisaatioindeksin minimiarvot

Käämin eriste-luokka	Minimi PI
A	1,5
B	2,0
F	2,0
H	2,0

Huomioitavaa on, että jos eristysvastus on yli 5 000  $M\Omega$  @ 40 °C, polarisaatioindeksin mittaustuloksella ei ole merkitystä.

#### 4.5 Syöksyaaltomittaus

Syöksyaaltomittausta käytetään moottorin käämityksen kunnan analysoimiseen. Syöksyaaltomittauksessa syötetään samanaikaisesti kahdelle moottorikäämille korkeataajuisen jännitepulssi, joita tarkastellaan oskilloskooppikuvasta. Kahden tarkasteltavan käämin aaltomuodot pitäisi olla identtiset (päällekkäin) käämien eristyksien ollessa ehjät.



Kuva 20. Mittauskytkentä

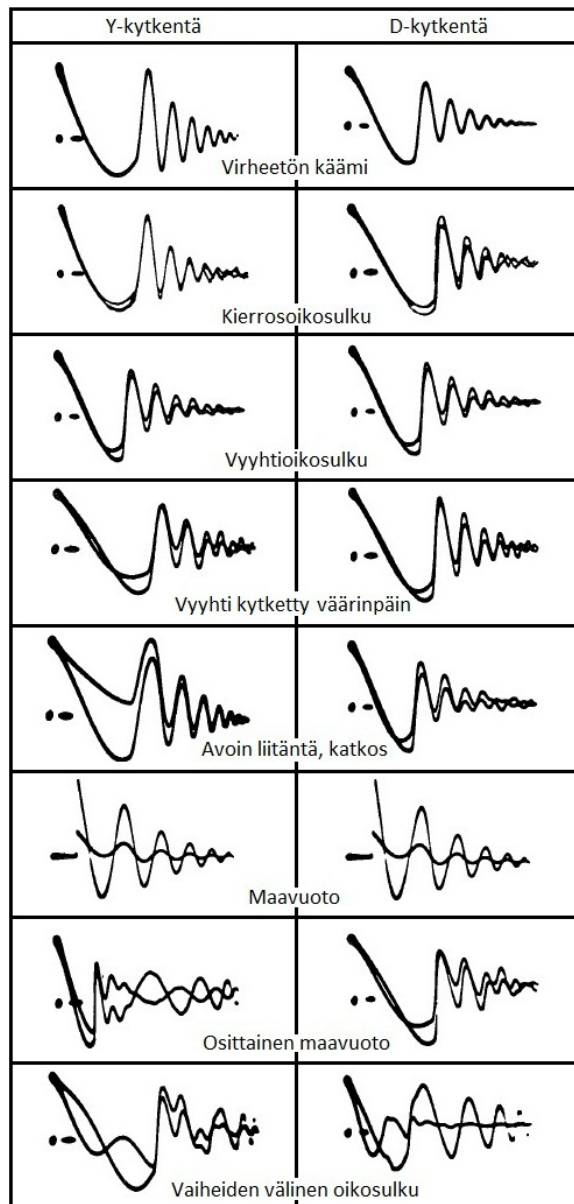
Mittaus tehdään kuvan 20 mukaisesti. Mittalaite testaa jokaisen vaihekäämin toisten vaihekäämien kanssa. Syöksyaaltotestauksen maksimijänniteamplitudin määrittelyyn sovelletaan standardissa PSK 7706 esitettyjä ohjeellisia arvoja, jotka esitetään taulukossa 3:

Taulukko 3. Ohjeelliset syöksyaallon maksimi jännite amplitudit

Käämin nimellis-jännite/V	Syöksyaallon maksimi amplitudi/V
Uusi tai vastaava käämitys	
< 1 000	< 2 500
1 000–15 000	$< 1,9 \cdot U_n + 1 \text{ kV}$
Pidempään käytössä ollut käämitys, tyypillisesti 3–10 vuotta	
< 1 000	< 2 000
1 000–15 000	$< 1,7 \cdot U_n + 1 \text{ kV}$
10 vuotta vanhemmille käämityksille sopiva koestusjännite harkittava erikseen	

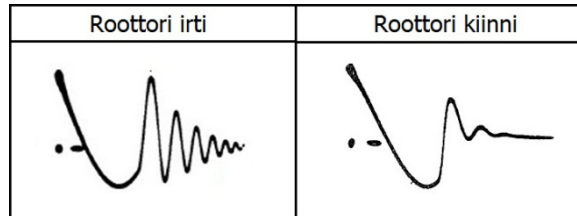
Ennen syöksyaaltotestausta on suoritettava eristysvastusmittaus (ks. s. 24–27). Tällä menettelyllä varmistetaan, ettei koneen ja käämityksen välillä ole eristysvikaa, ja ettei kone ole kostea tai liian likainen. Syöksyaaltotestissä jännite nostetaan tasaisesti koestusjännitteeseen, jossa se pidetään 3–10 sekuntia. Tämän jälkeen jännite lasketaan tasaisesti nolleen ennen jännitteen pois kytkemistä. [16.]

Käämissä oleva eristysvika muuttaa käämiin värähtelyvastetta, jolloin se eroaa verrattavana olevan vaihekäämin värähtelyvasteesta. Erilaiset viat käämityksessä aiheuttavat erilaisen muutoksen värähtelyvasteessa. Käämityksessä oleva vika voidaan tunnistaa kuvassa 21 esiteltävien aaltokuvioiden perusteella.



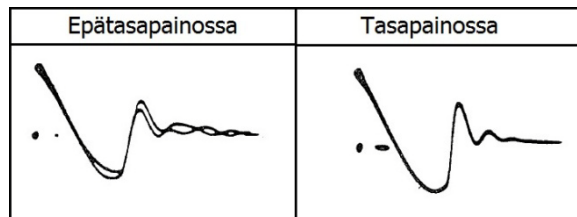
Kuva 21. Tyypillisten käämivikojen käyrämuodot

Syöksyaaltotestaus on huomattavasti helpompi toteuttaa puretuilla moottoreilla, joissa roottori on irrotettu moottorista. Staattoriin syötettävä korkeataajuinen jännitepulssi yhdistyy hyvin voimakkaasti roottoriin, joka aiheuttaa oskilloskoopin näyttämä aaltokuvion nopean vaimenemisen. Tilanne esitetään kuvassa 22:



Kuva 22. Roottorin aiheuttama vaimeneminen

Mittausta hankaloittava tekijä on myös roottorin asennon vaikutus roottorin häkkikäämin ja staattorikäätymyksen tasapainoon. Jos staattori ja roottori eivät ole tasapainossa toisiinsa nähden (kuva 23), mitatut aaltokuviot eivät ole täysin päällekkäin. Tilanne voidaan korjata kääntämällä roottoria, kunnes oskilloskooppiin tulee tasapainoinen aaltokuvio seuraavasti:



Kuva 23. Roottorin asennon vaikutus tasapainoon

Syöksyaaltotestausta tehdessä liukurengasmoottorille on staattoria mitattaessa poistettava harjat ja oikosuljettava liukurenkaat. Vastaavasti roottorikäätettä mitattaessa on oikosuljettava staattorikäätimet.

#### 4.6 Värähtelymittaukset

Värähtelyn avulla tunnistetaan sekä mekaanisia että sähköisiä vikoja. Yksinkertaisimmillaan vika voidaan määritellä värähtelyn kokonaisamplitudin tai sen periodisen muutoksen avulla. Tällä menetelmällä havaittavia vikoja on esimerkiksi pitkälle edennyt laakerivaurio tai sähkömoottorin löystynyt kiinnitys. Tällä menetelmällä ei kuitenkaan voida havaita alkavia vikoja.

Värähtelymittauksessa saatavalle mittaustalalle voidaan tehdä analyysi. Tämän värähtelyanalyysin avulla pystytään havaitsemaan esimerkiksi roottorivaurioita, mutta tarkimmin ja luotettavammin värähdysanalyysi soveltuu laakereiden kunnonvalvontaan. Vaurioiden aiheuttamat mekaaniset pulssit kasvattavat vialle tyypillisiä värähtelyn taajuuskomponentteja. Värähtelyn tarkemman analyysin toteuttamiseksi on mittaussignaali muutettava aikatasosta taajuustasoon, koska aikatasossa ei pystytä erittelemään kaikkia erilaisia taajuuskomponentteja. Muutos aikatasosta taajuustasoon tehdään FFT-muunnoksella (*Fast Fourier Transformation*). [19; 20.]

Värähtely mitataan värähtelyanturilla, jonka signaali tallennetaan tiedonkeruulaitteeseen (kuva 24). Mittausaika määräytyy taajuusalueen ja spektriviivojen lukumäärän sekä valitun tarkkuuden mukaisesti. Tämä mittausaika saattaa olla jopa kymmeniä sekunteja. Tämä voi muodostua ongelmaksi mitattaessa jaksottaisessa käytössä olevia moottoreita.



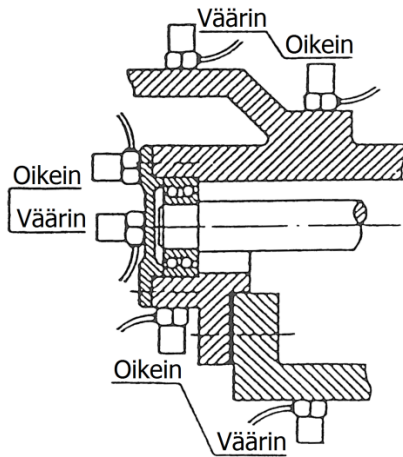
Kuva 24. Kannettava tiedonkeruulaite

Mittaustiedot analysoidaan joko tiedonkeruulaitteella tai tietokoneella. Mittauspisteiden paikka, mittaussuunta ja määrä suunnitellaan moottorikohtaisesti. Nämä mittaukset pyritään yhdenmukaistamaan siten, että samantyyppisten moottoreiden mittauspisteet ovat helposti tunnistettavissa.

Värähtelymittausantureita on monenlaisia. Näitä ovat esimerkiksi siirtymäanturit, nopeusanturit, kiihtyvyyssanturit ja laseranturit. Näistä yleisimmin kunnonvalvonnassa käytetty anturityyppi on kiihtyvyyssanturit. Niiden vahvuuksia muihin värähtelyantureihin verrattuna on pienikokoisuus sekä se, että niissä ei ole liikkuvia osia. Kiihtyvyyssanturit kattavat myös laajan taajuusalueen, ja ne ovat epäherkkiä ympäristöolosuhteille.

Koneen erilaiset viat värähtelevät tiettyihin suuntiin voimakkaammin. Tästä syystä suositeltavaa kunnonvalvonnan kannalta olisi, että koneiden värähtelymittaus tehtäisiin kunkin laakerin kohdalta kolmeen kohtisuoraan suuntaan (pystyyn, vaakaan ja akselin suuntaan). Normaalisti sähkömoottorista tulee siten suoritettavaksi kolme mittausta kummankin laakerin kohdalta eli yhteensä kuusi mittausta. Aina tämä ei ole kuitenkaan mahdollista tilan ahtaudesta ja/tai työturvallisuudesta johtuen. [21.]

Mittauspisteet tulee valita huolella siten, että mittausanturi on mahdollisimman lähellä värähtelylähdettä. On myös huomioitava, että anturin ja värähtelylähteen väliin jää mahdollisimman vähän rajapintoja, koska ne vaimentavat värähtelyä. kuvassa 25 esitetään värähtelymittauspisteitä. [22.]



Kuva 25. Anturin kiinnitykset

Vaurioiden värähtelyt näkyvät erilaisilla vikataajuuksilla. Vierintälaakerin komponenttien teoreettiset vikataajuudet voidaan laskea seuraavien standardissa PSK 5707 esitettävien yhtälöiden (yhtälöt 15–18) avulla. Huomioitavaa on, että yhtälöt pätevät vain, jos ulkokehä pysyy paikoillaan, ja sisäkehä pyörii.

$$\text{ulkokehän vikataajuus: } f_u = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \cdot n \quad (15)$$

$$\text{sisäkehän vikataajuus: } f_s = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) \cdot n \quad (16)$$

$$\text{vierintäelimen vikataajuus: } f_v = \frac{D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right] \cdot n \quad (17)$$

$$\text{pitimen vikataajuus: } f_p = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \cdot n \quad (18)$$

, joissa	$f_u$	ulkokehän vikataajuus	[Hz]
	$f_s$	sisäkehän vikataajuus	[Hz]
	$f_v$	vierintäelimen vikataajuus	[Hz]
	$f_p$	pitimen vikataajuus	[Hz]
	$N$	vierintäelinten lukumäärä	
	$d$	vierintäelimen halkaisija	[mm]
	$D$	laakerin vierintähalkaisija	[mm]
	$\beta$	vierintäelimen kosketuskulma	[°]
	$n$	akselin pyörintänopeus	[Hz]

$$\text{Esim. } f_u = \frac{10}{2} \left( 1 - \frac{6,74 \text{ mm}}{36,00 \text{ mm}} \cos 0^\circ \right) \cdot 49,3 \text{ Hz} = 200,3 \text{ Hz}$$

Laakerivalmistajat ovat myös taulukoineet edustamiensa laakereiden vikataajuudet. Jos laakerin geometriaa ei tunneta, eikä vikataajuuksia ole tiedossa, voidaan olettaa edellä mainittujen vikataajuuksien olevan yhtälöiden 19–21 luokkaa. Tämä voidaan tehdä vain olettaen, että mitattava laakeri noudattaa tavallista laakerigeometriaa.

$$\text{ulkokehän vikataajuus: } f_u = 0,4 \cdot nN \quad (19)$$

$$\text{sisäkehän vikataajuus: } f_s = 0,6 \cdot nN \quad (20)$$

$$\text{pitimen vikataajuus: } f_p = 0,4 \cdot n \quad (21)$$

$$\text{Esim. } f_u = 0,4 \cdot 10 \cdot 49,3 \text{ Hz} = 197,2 \text{ Hz}$$

Mikäli vierintäelinten lukumäärää ei myöskään tunneta, voidaan arvata sen olevan yhdeksästä yhteentoista. [13; s. 313.]

Laakerivaurioiden lisäksi värähtelymittauksilla voidaan havaita staattorivikoihin liittyen käämityksen kiinnityksen löystyminen. Käämityksen kiinnityksen vioittuessa sähkömagneettisten voimien vaikutuksesta käämit voivat liikkua. Liikkeen vaikutuksesta syntyy värähtelyä, joka voidaan mitata. Käämityksen liikkeen aiheuttama vikataajuus voidaan laskea yhtälön 22 avulla. [20.]

$$f_{käämi} = n \cdot N_{rs} (\pm 2f) , \text{ jossa} \quad (22)$$

$f_{käämi}$	käämityksen kiinnityksen vikataajuus	[Hz]
$N_{rs}$	roottorisauvojen lukumäärä	
$f$	syöttö taajuus	[Hz]

#### 4.7 Virtaspektrianalyysi

Oikosulkumoottorin staattorivirrasta tehtävällä virtaspektrianalyysillä voidaan tunnistaa erilaisia moottorivaurioita. Tunnistettavia vaurioita ovat roottorisauvavauriot, roottorin epäkeskeisyys ja pitkälle edenneet laakerivauriot.

Mittaus suoritetaan mittaamalla virta yhdestä moottoria syöttävästä vaihejohdosta virtapihdillä. Koska moottorien syötöt on toteutettu kaapeleilla, virta on mitattava joko moottorin liitinrasialla tai tavallisimmin syöttökeskuksen moottorilähdöstä. Virtasignaalin spektri tallennetaan analysaattoriin. Mittausaika määräytyy taajuusalueen ja spektriviivojen lukumäärän sekä valitun tarkkuuden mukaisesti. Tämä mittausaika saattaa olla jopa kymmeniä sekunteja. Tämä voi muodostua ongelmaksi mitattaessa jaksottaisessa käytössä olevia moottoreita.

Moottoria on kuormitettava mittauksen yhteydessä vähintään n. 50 % nimellisestä kuormasta, jotta jättämä olisi tarpeeksi suuri luotettavan mittaustuloksen saamiseksi. Jättämän selvittämiseksi on moottorin pyörimisnopeus mitattava tarkasti virtaspektrimitauksen yhteydessä. [13, s. 386–388.]

Vauriot synnyttävät erilaisia taajuuskomponentteja, joiden amplitudi kasvaa vaurion pahentuessa. Parhaiten tunnistettava vaurio virtaspektrianalyysin avulla ovat roottorivauriot. Oikosulkumoottorin jättämästä johtuen tuottaa roottorisauvavika kasvua



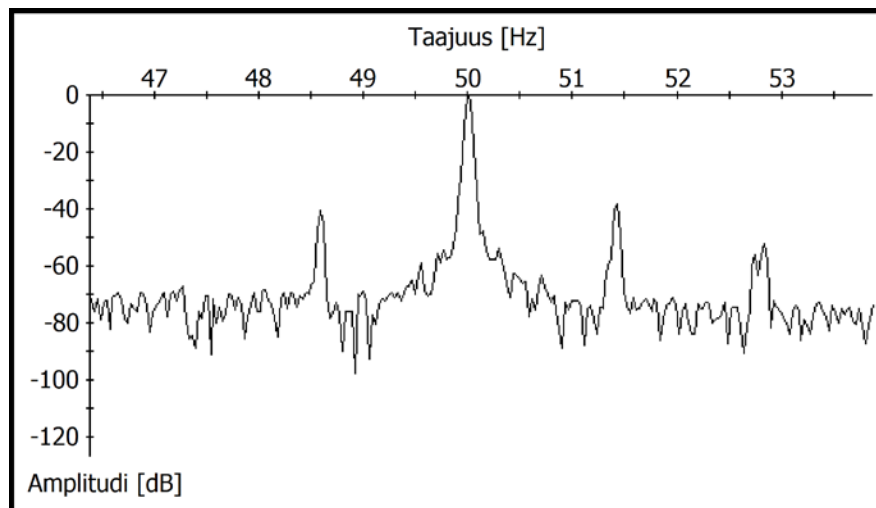
staattorivirtaan taajuuksille, joiden laskenta esitetään standardin PSK 7707:n mukaisesti yhtälössä 23:

$$f_{sb} = f \pm 2sf, \text{ jossa} \quad (23)$$

$f_{sb}$	roottorivaurion vikataajuus	[Hz]
$f$	verkon taajuus	[Hz]
$s$	suhteellinen jättämä	

Esim.  $f_{sb} = 50 \text{ Hz} + 2 \cdot 0,014 \cdot 50 \text{ Hz} = 61,4 \text{ Hz}$ , ja  
 $f_{sb} = 50 \text{ Hz} - 2 \cdot 0,014 \cdot 50 \text{ Hz} = 58,6 \text{ Hz}$

Virtaspektrimittausta tehdessä on myös pyörimisnopeus mitattava tarkasti, jotta sivunauhataajuudet voitaisiin laskea. Moottoria on kuormitettava mittauksen aikana vähintään n. 50 % riittävän jättämän saavuttamiseksi [13, s. 388]. Tämä sen vuoksi, että sivunauhat erottuisivat perustaajuudesta. Esimerkissä yhtälön 23 mukaisesti lasketut sivunauhataajuudet näkyvät seuraavaksi esiteltävässä virtaspektrissä (kuva 26):



Kuva 26. Staattorin virtaspektri

Vasemmanpuoleisen sivunauhan aiheuttaa roottorin vaurio, kun taas oikeanpuoleisen sivunauhan aiheuttaa viasta johtuva roottorin pyörimisnopeuden vaihtelu. Mittaus tulos voidaan analysoida taulukon 4 (ks. seur. s.) mukaan, jossa arvioidaan roottorin kuntoa sivunauhan ja perustaajuuden amplitudien suhteellisilla eroilla. [13, s. 389.]

Taulukko 4. Oikosulkumoottorin roottorin kunnan arviointi virtaspektrimittauksella

Amplitudiero	Roottorin kunto
> 60 dB	Hyvä kunto
50–60 dB	Roottorisauvoissa ylimenovastusta
40–50 dB	Roottorisauvoissa ja/tai päätyrenkaassa murtumia
30–40 dB	Roottorisauvoja katkennut ja/tai päätyrengas katkennut
< 30 dB	Vakava vaurio

#### 4.8 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittauksilla voidaan havaita erilaisia vaurioita oikosulkumoottorissa. Näitä ovat esimerkiksi laakeri- ja staattorivauriot. Lämpötilamittauksella havaittavat laakerivauriot tosin näkyvät vasta siinä vaiheessa, kun laakeri on jo vakavasti vioittunut. Tämän takia ei laakerin vaihdon ajankohtaa voida suunnitella, vaan laakeri pitää vaihtaa mahdollisimman pian.

Lämpötilamittauksiin on useita menetelmiä, jolla kullakin on omat vahvuutensa. Näitä menetelmiä ovat muun muassa lämpötila-antureihin perustuvat menetelmät. Tällaisissa menetelmissä käytettävänä olevia antureita ovat vastuslämpötila-anturit, termistorit ja termoelementit. Lämpötila-antureihin perustuvat lämpötilamittaukset tarvitsevat kosketuksen mitattavaan kohteeseen.

Näiden menetelmien lisäksi lämpötilan mittaukseen käytetään myös infrapunamittaria sekä lämpökameraa. Näillä lämpötilan mittaus voidaan toteuttaa koskematta mittauskohteeseen.

##### Antureihin perustuva lämpötilan mittaus

Koska moottorit ovat herkkiä yllämmölle, niissä käytetään jatkuvaa lämpötilan valvontaa, etenkin suurissa ja arvokkaissa moottoreissa. Tällaisissa sovelluksissa käytetään yleisesti vastuslämpötila-antureita niiden helpon luettavuuden vuoksi. Yleisimpiä käytössä olevia vastuslämpötila-antureita ovat PT100 ja PT1000, joiden resistanssi muuttuu hyvin lineaarisesti lämpötilan funktiona. Tämän vuoksi lämpötila on helposti tulkittavissa niiden avulla.

Yleisesti moottoreissa on käytössä termokytkin, joka katkaisee virtapiirinsä, kun se lämpiää omaan nimellispisteeseensä. Tämä virtapiiri ohjaa moottorin syöttöä siten, että kun termokytkin avautuu, katkeaa moottorin syöttöjännite, jolloin moottori pysähtyy. Termokytkimellä toteutettu moottorin ylikuumentumisen suojausmenetelmä on yleinen sen yksinkertaisen rakenteen edullisuuden vuoksi.

#### Lämpökamera ja infrapunamittari

Lämpökamera ja infrapunamittari, ovat molemmat kosketuksettomaan lämmönmittaukseen soveltuvia mittalaitteita joiden toiminta perustuu kohteesta lähtevän lämpösäteilyn (infrapunasäteilyn) mittaamiseen. Tämän lämpösäteilyn aallonpituus ja -voimakkuus on riippuvainen säteilyä lähettävän kappaleen lämpötilasta. [23.]

Kappaleen lähettämä lämpösäteily muodostuu emittoituneesta, heijastuneesta ja läpäisseestä/johtuneesta lämpösäteilystä. Kappaleen lähettämän eli emittoiman säteilyenergian osuutta kokonaissäteilyenergiasta ilmaistaan emissiivisyytenä, joka on desimaaliluku nollan ja ykkösen väliltä. Mitä suurempi emissiivisyys on, sitä suurempi osuus on kappaleen emittoiman säteilyenergian osuus kokonaissäteilyenergiasta. Seuraavassa taulukossa 5 on esimerkkinä muutamia emissiivisyyksilukuja:

Taulukko 5. Emissiivisyystaulukko

<b>Materiaali</b>	<b>Erittely</b>	<b>Lämpötila/°C</b>	<b>Emissiivisyys</b>
Alumiini	eloksoitu	100	0,67
Valurauta	puhdas pinta	100	0,64
teräs	kiillotettu	100	0,07
lakka	valkoinen	100	0,92

Infrapunälämpömittari ja lämpökamera eroavat toisistaan siinä, että infrapunälämpömittari mittaa näkökenttensä alueen lämpötilojen keskiarvoa, kun taas lämpökamera mittaa resoluutionsa määrän lämpötila-arvoja koko näkökenttensä alalta. Tämän vuoksi lämpökameralla on helppo havaita lämpötila eroja, jolloin vaurion synnyttämä kuuma-piste näkyy selvästi moottorista.

#### 4.9 Kaupalliset laitteet

Sähkömoottorin kuntoa mittaavia laitteita on monen tasoisia ja hintaisia. Laitteet ovat tyypillisesti yhdistelmälaitteita, joilla voidaan suorittaa erilaisia mittauksia. Seuraavaksi esitellään muutama kaupallinen yhdistelmämittalaite, jolla moottorin kuntoa pystytään analysoimaan (taulukko 6). Esiteltävillä mittalaitteilla tehtävät mittaukset suoritetaan moottorin ollessa poiskytkettynä käytöstä. Näitä mittareita kutsutaan sen vuoksi *off-line*-mittareiksi.

Taulukko 6. Esimerkkejä yhdistelmämittalaitteista

	<b>Subsee Motor Tester PRO 33 Industrial</b>	<b>ALL-TEST IV PRO 2000 Motor Circuit Analyzer</b>	<b>Baker AWA-Advance Winding Analyzer AWAIV-4</b>
<b>Resitanssi</b>	0,01–999 $\Omega \pm 1\%$ maksimi resoluutio: 0,01 $m\Omega$	0,001–999 $\Omega \pm 1\%$	0,001–100 $\Omega$
<b>Induktanssi</b>	–	0,001–9,999 $H \pm 1\%$	–
<b>Kapasitanssi</b>	2–2000 $\eta F \pm 5\%$	0,01–200 $\mu F \pm 1\%$	–
<b>Eristysvastus</b>	0–500 $M\Omega @ 500 V$ 0–999 $M\Omega @ 1000 V$ 0–100 $M\Omega \pm 3\%$ muilla arvoilla $\pm 5\%$	0–99 $M\Omega @ 500 V$ 0–99 $M\Omega @ 1000 V$ $\pm 1\%$	0–50 000 $M\Omega$ @ 0–4 250 $V \pm 10\%$
<b>Syöksyaalto</b>	–	–	0–4 250 $V$
<b>Käyttö energia</b>	akku	akku	verkkovirta
<b>Koko</b>	126 x 218 x 51 $mm$	122 x 252 x 50 $mm$	381 x 203 x 203 $mm$
<b>Paino</b>	0,7 $kg$	0,75 $kg$	8,16 $kg$
<b>Hinta</b>	5 000 €	8 000 €	18 000 €

Taulukon 5 jokaisen yhdistelmämittalaitteen valmistajan mukaan mittalaitteensa kykenee havaitsemaan staattorivauriot. Näissä vertailussa olevissa mittalaitteissa käytetään staattorin kunnan arvioimiseksi resistanssi- ja eristysvastusmittausta. Näiden mittausmenetelmien lisäksi Bakerin mittalaite käyttää syöksyaaltoa, kun taas Subsee ja ALL-TEST käyttävät omia kehittämiään mittausmenetelmiä staattorivaurioiden havaitsemiseen. Näiden staattorivaurioiden havaitsemisen lisäksi mittarit Subsee ja ALL-TEST pysyvät valmistajiensa mukaan löytämään myös roottorivauriot. [24; 25; 26.]

Vertailemalla taulukon 5 mittalaitteita, voidaan tehdä johtopäätös, jonka mukaan Subsee ja ALL-TEST sopivat parhaiten verrattavista laitteista kenttämittauksiin. Tämä sen

vuoksi, että ne ovat pienikokoisia, kevyitä ja akuilla toimivia. Tämän ansiosta niiden vieminen hankaliin mittauskohteisiin ja siirtäminen mittauspisteestä toiseen on helppoa.

## 5 Mittaukset

### 5.1 Mitattavat moottorit

Mittaukset tehtiin pienehköille kolmivaiheisille oikosulkumoottoreille, jotka ovat kytketty tähteen. Näiden tähteen kytketyiden oikosulkumoottoreiden kilpiarvot esitetään taulukossa 7:

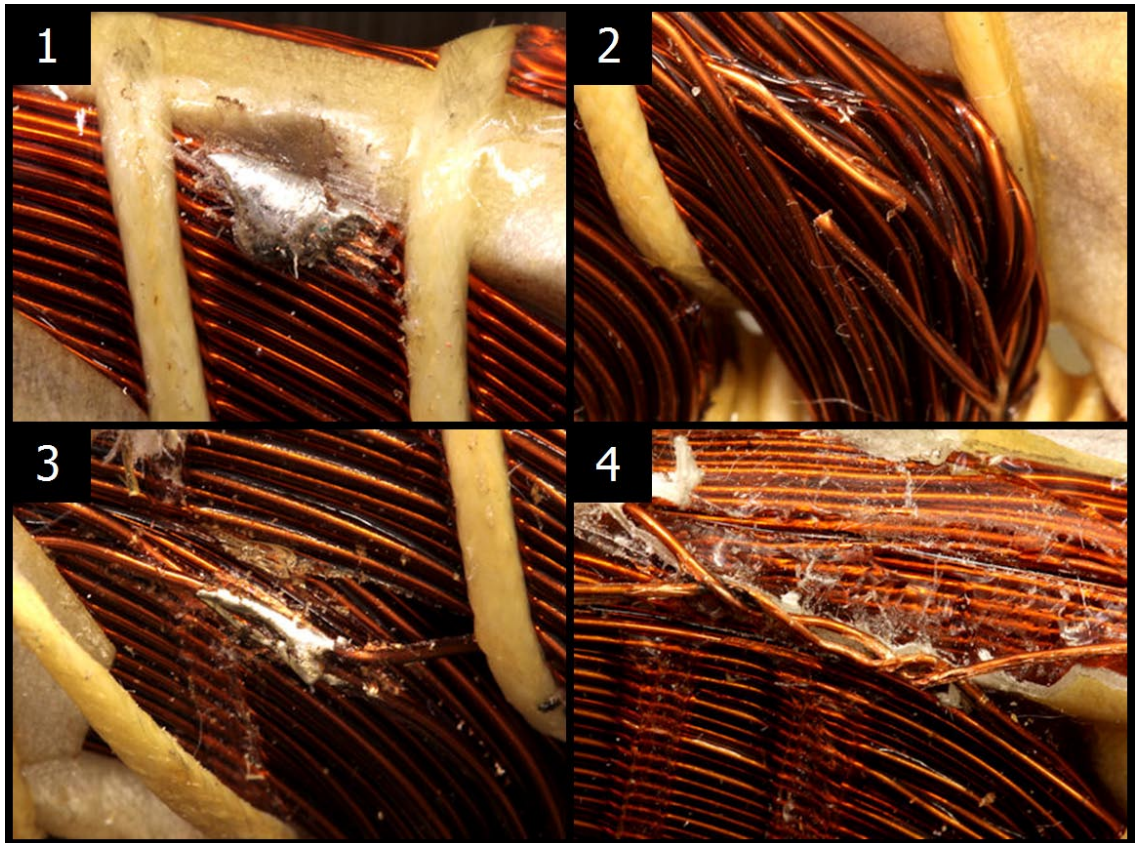
Taulukko 7. Mitattavien moottoreiden kilpiarvot

$U_n$	380–415 V
$I_n$	2,1 A
$I_0$	1,3 A
$f$	80 Hz
$n$	4 560 r/min
$P_n$	0,65 kW
$\cos\varphi$	0,71

Neljälle oikosulkumoottorille tehtiin käämien resistanssi- ja käämityksen eristysvastusmittaukset. Näiden lisäksi moottoreille suoritettiin syöksyaaltotestaus. Kukin oikosulkumoottori mitattiin ehjänä, minkä jälkeen jokaiseen niistä tehtiin jokin vaurio. Tehdyt vauriot esitetään seuraavassa listassa:

- moottoriin 1 kierrosoikosulku
- moottoriin 2 kierroslangan katkos
- moottoriin 3 vyyhtioikosulku
- moottoriin 4 vaiheiden välinen oikosulku.

Moottoreihin tehdyt staattorivauriot esitellään kuvasarjassa (kuva 27, ks. seur. s.). Kuvat on numeroitu moottorikohtaisesti edellä mainitun listan mukaisesti. Vioitetuille moottoreille tehtiin samat mittaukset kuin ehjille moottoreille.



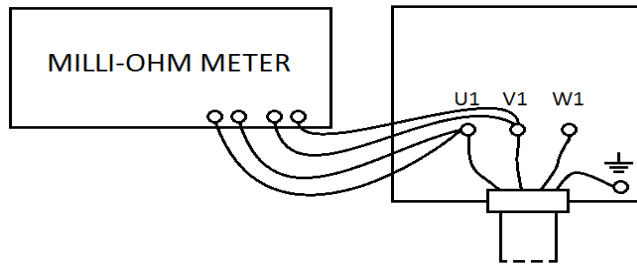
Kuva 27. Moottoreihin tehdyt staattorivauriot

Tehtyjen mittausten lisäksi oikosulkumoottoreita käytettiin tyhjäkäynnillä ja niiden tyhjäkäyntivirratt mitattiin. Tyhjäkäytön aikana moottoreiden kuntoa arvioitiin myös aistinvaraisesti. Vertailun vuoksi tyhjäkäyntikoe ja -virtamittaus tehtiin myös ehjälle samantyyppiselle moottorille kuin vioitetut moottorit.

## 5.2 Resistanssimittaus

Resistanssimittauksissa mitattiin moottoreiden 1–4 käämien resistanssit. Resistanssimittaus suoritettiin nelijohdinmittalaitteella GW GOM-801G standardin PSK 7705 mukaisesti.

Mitattavat moottorit ovat kytketty tähteen, jossa tähtipiste ei ole tuotu liittokoteloon. Tällöin kolmivaihe käämityksessä mitattiin käämien resistanssit vaiheiden väliltä (kuva 28, ks. seur. s.).



Kuva 28. Resistanssin mittaus

Mittaustulokset kirjattiin taulukkoon 8. Mittaustuloksista laskettiin jokaisen mitattun moottorin vaiheresistanssin suurin sallittu hajonta vaiheresistanssien keskiarvosta. Nä-mä laskettiin yhtälön 10 mukaisesti (ks. s. 24).

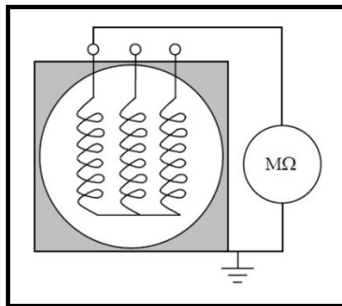
Taulukko 8. Moottorien staattorikäämien resistanssit

Moottori	Staattori	Resistanssi/ $\Omega$ (ehjä)	Resistanssi/ $\Omega$ (rikottu)
1	U-V	11,93	11,83
	U-W	11,88	11,79
	V-W	11,88	11,78
	keskiarvo	11,90	11,80
	Suurin sallittu hajonta $\pm 3\%$	0,36	0,35
	Suurin hajonta	0,05	0,03
2	U-V	11,80	16,80
	U-W	11,81	16,82
	V-W	11,80	12,03
	keskiarvo	11,80	15,22
	Suurin sallittu hajonta $\pm 3\%$	0,35	0,46
	Suurin hajonta	0,01	3,19
3	U-V	11,91	11,00
	U-W	11,90	11,00
	V-W	11,91	12,03
	keskiarvo	11,91	11,34
	Suurin sallittu hajonta $\pm 3\%$	0,36	0,34
	Suurin hajonta	0,01	0,69
4	U-V	11,88	12,03
	U-W	11,89	12,05
	V-W	11,91	12,06
	keskiarvo	11,89	12,05
	Suurin sallittu hajonta $\pm 3\%$	0,36	0,36
	Suurin hajonta	0,02	0,02

Taulukossa 8 (ks. edell. s.) on merkitty punaisella ne resistanssiarvot, jotka ylittävät sallitun hajonnan. Moottoreiden käämien resistanssimittausten perusteella havaitaan viat vioitetuista moottoreista 2 ja 3. Resistanssimittauksella ei havaittu moottorin 1 kierrosoikosulkua eikä moottorin 4 vaiheiden välistä oikosulkua.

### 5.3 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksessa mitattiin moottoreiden 1–4 käämien eristävyys rungosta (kuva 29). Eristysvastusmittaus suoritettiin eristysvastusmittarilla NORMA UNILAP ISO X standardin PSK 7704 mukaisesti. Moottoreita mittaavan eristysvastusmittarin synnyttämänä koestusjännitteenä käytettiin arvoa 1 000 V:a.



Kuva 29. Eristysvastuksen mittaus

Moottoreiden käämityksien eristysvastusarvot kirjattiin seuraavaksi esitettävään taulukoon 9:

Taulukko 9. Moottoreiden eristysvastusarvot

Moottori	Eristysvastus (ehjä)	Eristysvastus (rikottu)
1	> 29,99 GΩ	> 29,99 GΩ
2	> 29,99 GΩ	> 29,99 GΩ
3	> 29,99 GΩ	> 29,99 GΩ
4	> 29,99 GΩ	> 29,99 GΩ

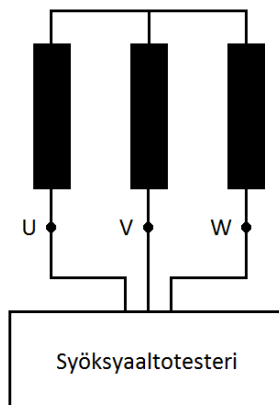
Mitattavien moottoreiden eristysvastusten suurien arvojen vuoksi niille ei tarvinnut tehdä redusointia lämpötila-arvoon 40 °C. Tuloksista voidaan päätellä, ettei yhdessäkään



moottorissa ole maasulkua tai muita eristysongelmia. Eristysvastusmittauksilla ei havaittu yhdessäkään moottorissa tehtyjä vaurioita, ei edes voitetuissa. Tämä johtuu siitä, että tehdyt vauriot eivät synnyttäneet kontaktia käämityksen ja rungon välille.

#### 5.4 Syöksyaaltotestaus

Syöksyaaltotestaus tehtiin moottoreille 1–4 käämien kunnon arvioimiseksi. Nämä testaukset suoritettiin syöksyaaltotesterillä SCHLEICH MTC 4 standardin PSK 7706 mukaisesti (kuva 29). Moottoreiden suurin testijännite aseteltiin syöksyaaltotesteriin arvolle 1 020 V:a.

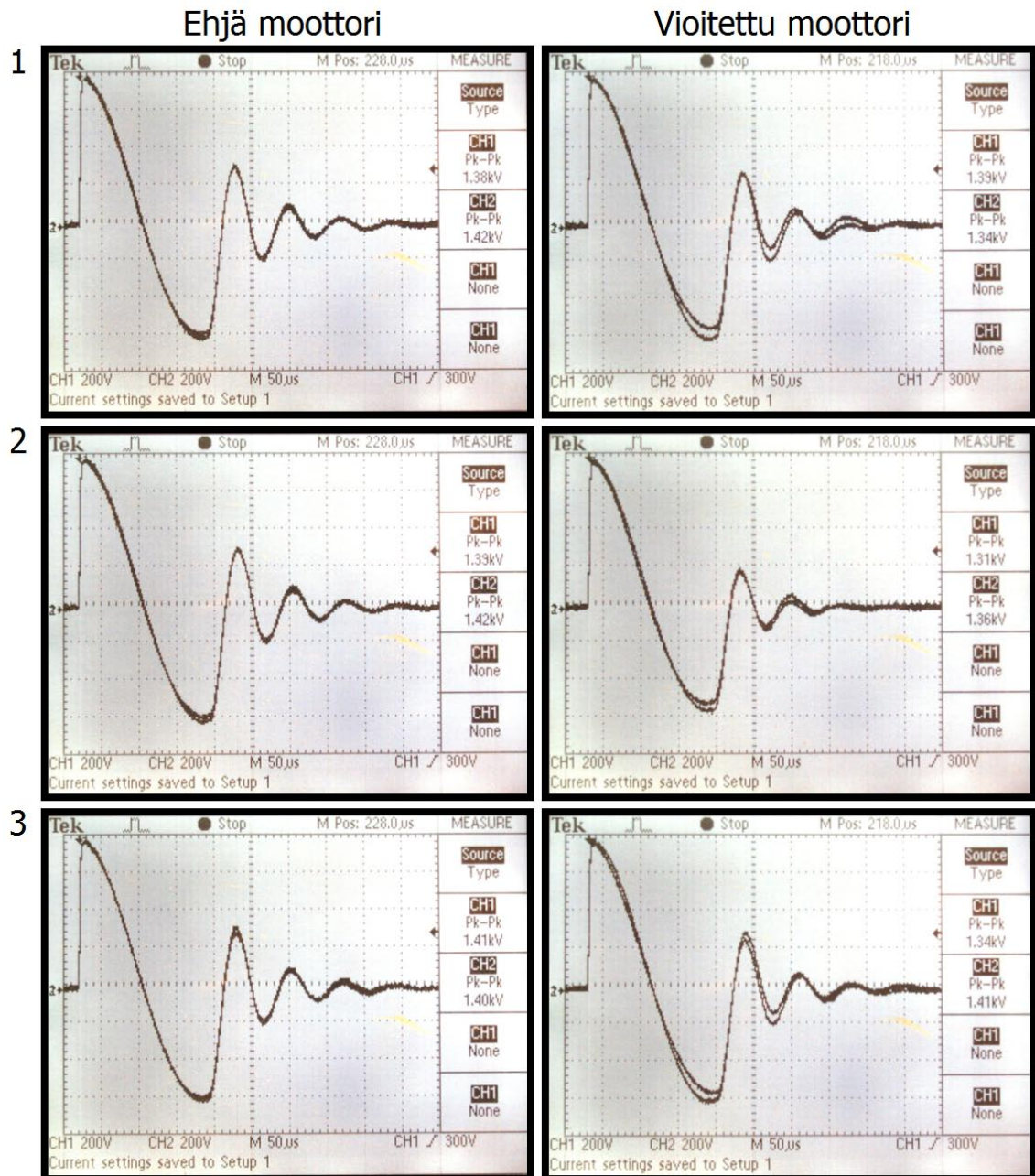


Kuva 30. Syöksyaaltotestaus

Syöksyaaltotestit suoritettiin syöttämällä syöksyaallot taulukon 10 mukaisesti. Tämän taulukon mukaisesti suoritettujen syöksyaaltotestien syöksyaaltotestikuvat esitetään kuvasarjoina moottorikohtaisesti (kuvat 31–34). Tämä siten, että kuvasarjoissa vasemmanpuoleiset kuvat ovat moottoreista ennen vioittamista ja oikeanpuoleiset kuvat moottoreista vioittamisen jälkeen. Näiden lisäksi kuvien vasempaan reunaan on sijoitettu numerot, jotka kertovat taulukon 10 mukaisesti miten kunkin kuvan tapauksessa vaihekäämejä testataan.

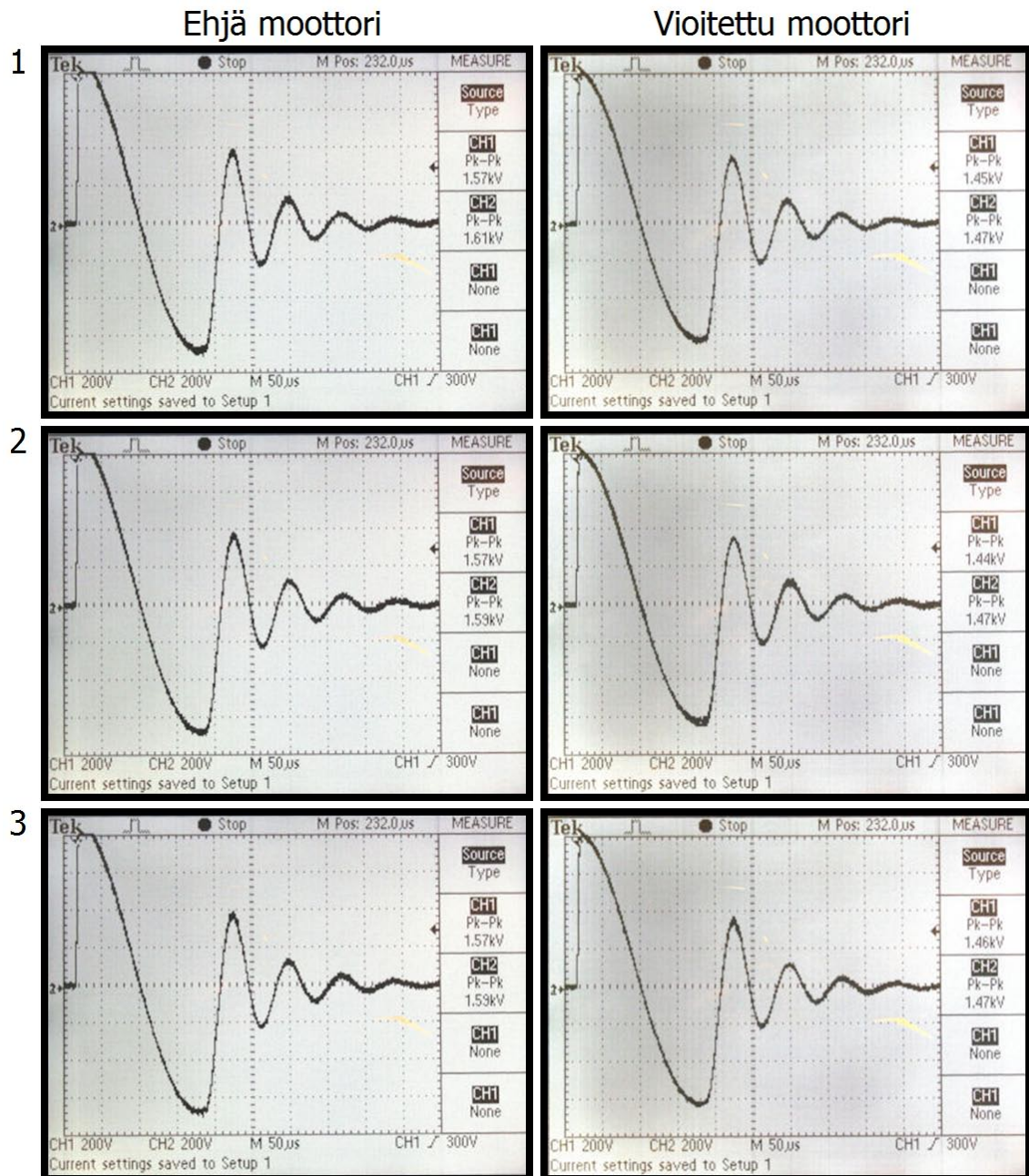
Taulukko 10. Vaihekäämien testikaavio

Testi	U	V	W
1	CH1	CH2	GND
2	CH2	GND	CH1
3	GND	CH1	CH2



Kuva 31. Moottorin 1 syöksyaaltotestit

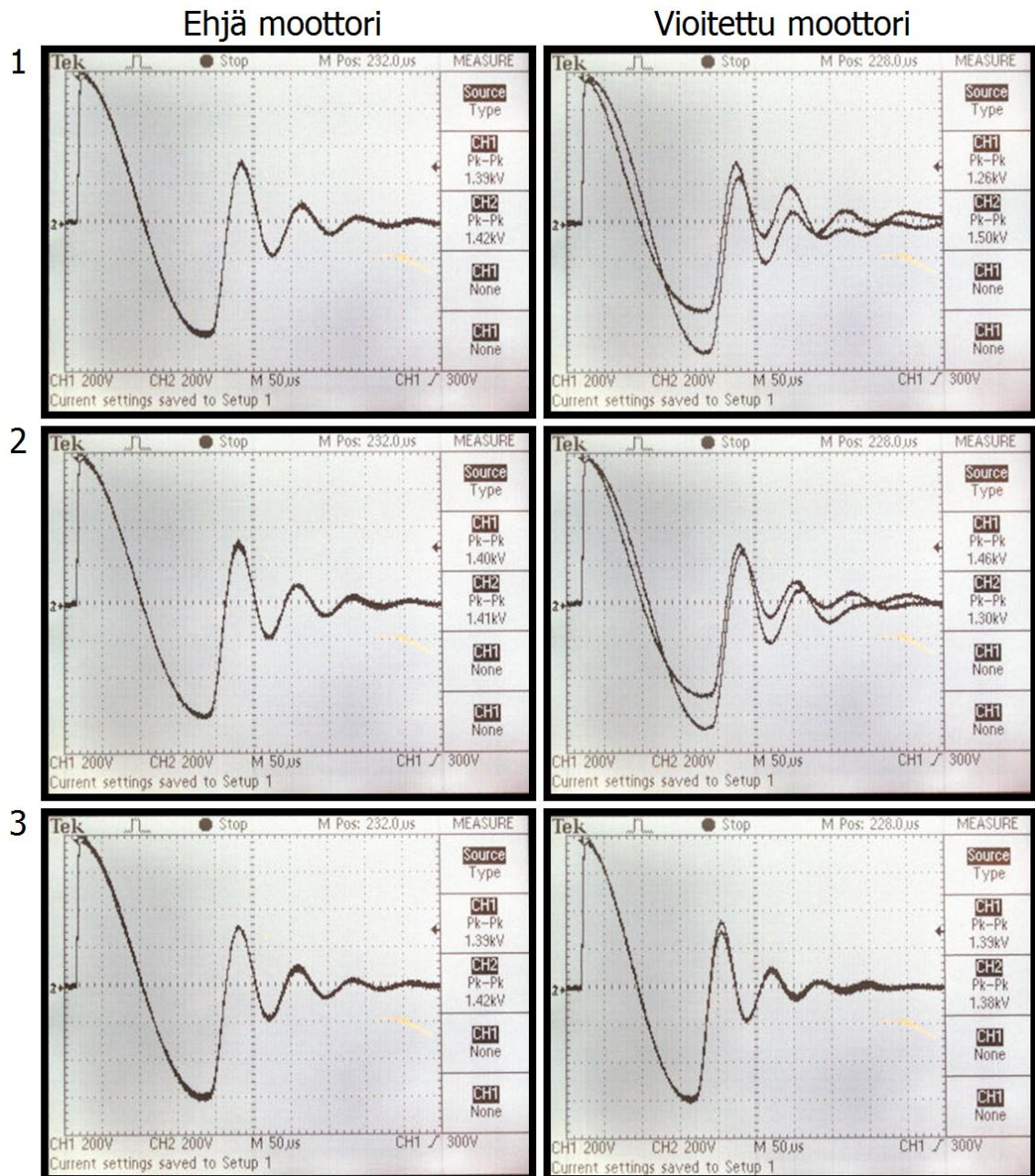
Moottorin 1 kuvasarjassa (kuva 31) havaitaan selvästi vian (kierrosoikosulku) aiheuttama epäsymmetrisyys aaltokuvioissa. Vertaamalla kuvasarjan kuvia kuvaan 21 (ks. s. 30) voidaan todeta vian olevan kierrosoikosulku. Kuvasarjasta voidaan päätellä, että kierrosoikosulku on vaihekäämissä V, koska siinä aaltokuviot ovat melkein symmetriset. Tämä voidaan todeta sen perusteella, että testissä 2 vaihekäämi V toimii yhteisenä paluujohtimena (taulukko 10, ks. edell. s.). Tämän vuoksi vika vaikuttaa molempiin syötettäviin syöksyaaltoihin, jolloin aaltokuviot ovat symmetriset.



Kuva 32. Moottorin 2 syöksyaaltotestit

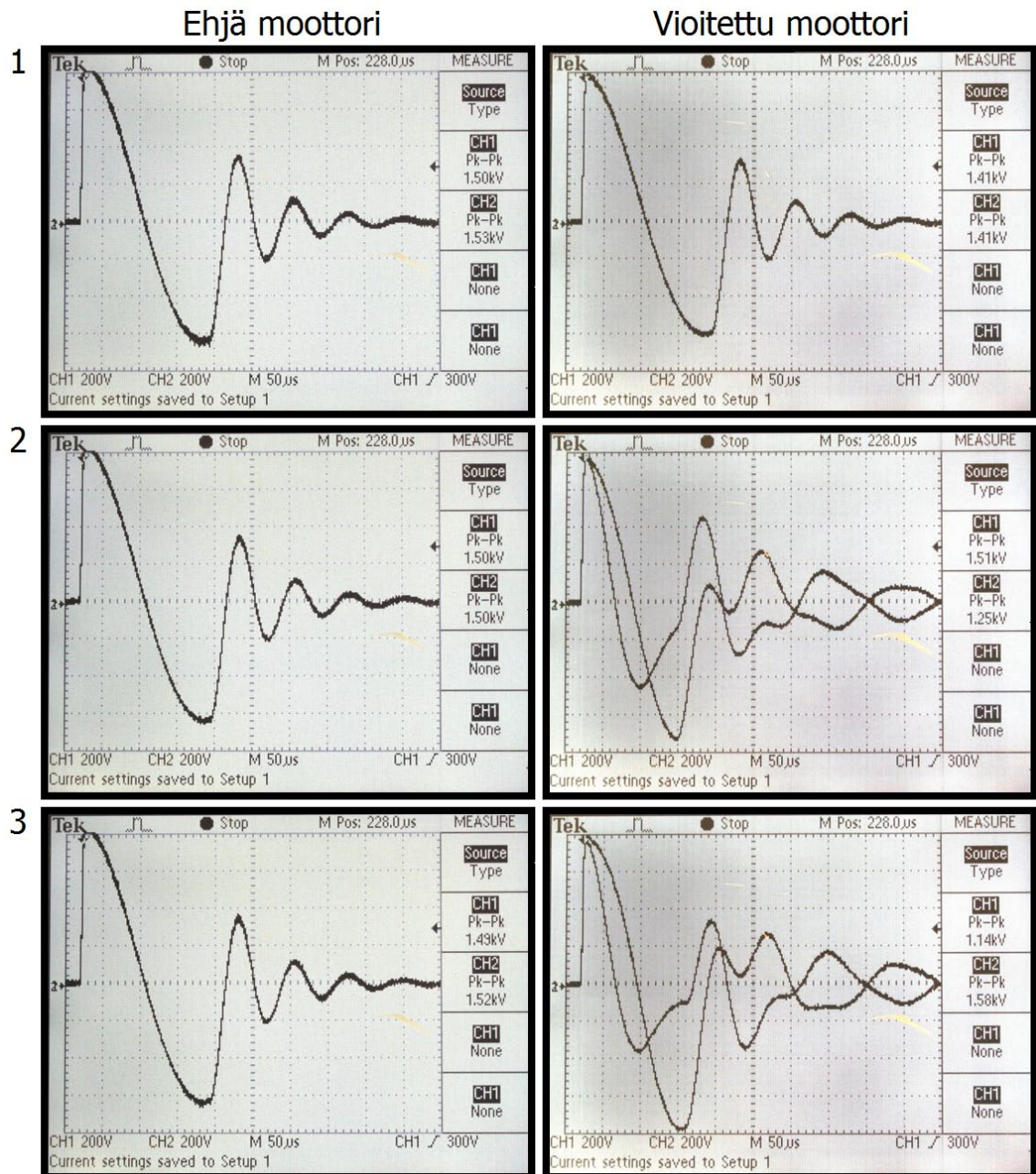
Moottorin 2 kuvasarjassa (kuva 32) ei havaita vikaa käämityksessä. Tämä johtuu siitä, ettei tehty vika (kierroslangan katkos) vaikuta vioitetun vaihekäämin induktanssiin riittävästi. Tämän johdosta se ei myöskään vaikuta syöksyaallon käyttäytymiseen käämityksessä, jolloin vika ei näy aaltokuviossa.





Kuva 33. Moottorin 3 syöksyaaltotestit

Moottorin 3 kuvasarjassa (kuva 33) havaitaan selvästi vian (vyyhtioikosulku) aiheuttama epäsymmetrisyys aaltokuvioissa. Vertaamalla kuvasarjan kuvia kuvaan 21 (ks. s. 30) voidaan todeta vian olevan vyyhtioikosulku. Koska testissä 3 voitettun moottorin aaltokuva on symmetrinen, voidaan päätellä vyyhtioikosulun olevan vaihekäämissä U. Koska testissä 3 vaihe U toimii paluujohtimena, vaikuttaa vika molempiin syötettäviin syöksyaaltoihin, jolloin ehjien vaihekäämien V ja W aaltokuviot ovat symmetriset.



Kuva 34. Moottorin 4 syöksyaaltotestit

Vioitetun moottorin 4 mittauksien 2 ja 3 aaltokuviot (kuva 34) säröytyvät reilusti vian (vaiheiden välinen oikosulku) vaikutuksesta. Tämän perusteella havaitaan selvästi, että vioitetussa moottorissa on vaurio. Näiden aaltokuvien perusteella ei kuitenkaan pystytä määrittämään tarkasti, että mikä vaurio on kyseessä. Aaltokuvioiden perusteella voidaan kuitenkin todeta, että staattorikäimityksen vaurio on vakava.

## 5.5 Tyhjäkäyntivirtamittaus

Tyhjäkäyntivirtamittaukset tehtiin moottoreille 1–4 moottorin kunnan arvioimiseksi. Nämä mittaukset suoritettiin yleismittarilla HIOKI 3230, johon liitettiin virtapihti Tektronix A621, joka antaa muuntosuhteen mukaista jännitettä mittarille. Tällä yhdistelmällä mitattiin vaihevirratt siten, että virtapihti asetettiin mitattavan vaihejohtimen ympärille, ja jännite luettiin mittarin näytöltä. Tämän jälkeen mittaustulosten jännitteet muutettiin virtapihdin muuntosuhteenmukaisesti todellisiksi virroiksi.

Mittauksessa käytettävät moottorit on suunniteltu taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Tämän vuoksi moottoreille tehtiin mittaus järjestelyt, jossa 100 Hz:n taajuista vaihtovirtaa syötti taajuusmuuttaja. Taulukossa 11 esitetään mittaustulokset ja niistä lasketut moottoreiden vaihevirtojen keskiarvo ja suurin sallittu hajonta vaihevirtojen keskiarvosta, joka on 5 % [17]. Näiden lisäksi taulukkoon 11 on laskettu myös moottoreiden vaihevirtojen suurin hajonta keskiarvosta.

Taulukko 11. Moottoreiden tyhjäkäyntivirratt

	Vaihe U	Vaihe V	Vaihe W	Keskiarvo	Suurin sallittu hajonta ±5%	Suurin hajonta
	Virta/mA					
<b>Vertailumoottori</b>	673	672	674	673	34	1
<b>Moottori 1</b>	678	677	687	681	34	6
<b>Moottori 2</b>	645	675	710	677	34	33
<b>Moottori 3</b>	2 254	924	1 743	1 640	82	716
<b>Moottori 4</b>	2 740	2 420	872	2 011	101	1 139

Taulukossa 11 on merkitty punaisella ne vaihevirratt, jotka ylittävät sallitun hajonnan. Tämän perusteella voidaan havaita vioitetuiden moottoreiden 3 ja 4 vauriot.

Tyhjäkäynnin aikana moottoreiden kuntoa arvioitiin myös aistinvaraisesti. Moottoreissa 1 ja 2 ei havaittu mitään normaalista poikkeavaa, kun taas moottori 3 ja 4 piti normaalista poikkeavaa ääntä. Tämän lisäksi moottorissa 4 havaittiin myös vaurioon viittaava epätasainen käynti.

Virran mittauksella ja aistinvaraisella havainnoinnilla pystyttiin siis havaitsemaan vain moottoreiden 3 ja 4 vauriot. Tällöin moottorin 1 kierrosoikosulku sekä moottorin 2 kierroslangan katkos, eivät tulleet ilmi virtamittauksen eivätkä aistinvaraisen havainnoinnin avulla.

## 6 Yhteenveto

Oikosulkumoottoreita on käytössä lähes kaikissa teollisuuden prosesseissa. Tämän vuoksi moottoreiden vikaantumisen johtuvat suunnittelemattomat tuotantokatkokset ovat vakava ongelma.

Oikosulkumoottoreiden vikaantumisiin on useampia syitä. Suurimpana vikakohtana ovat moottoreiden laakerit, joiden vaurioiden syynä ovat yleisesti epäpuhtaus ja voiteluun liittyvät ongelmat. Epäpuhtaus aiheuttaa ongelmia myös moottorin jäähdytyksessä, jonka vuoksi staattorikäämitykseen kohdistuu suuremmat termiset rasitukset kuin normaalitilanteessa. Ongelmia voitaisiin vähentää riittävällä huollolla, jossa huolehdittaisiin moottorin siisteydestä sekä laakereiden voitelusta.

Oikosulkumoottoreiden jaksottaisen käytön vuoksi tarpeeksi pitkän näytteenoton saaminen staattorin virtaspektrianalyysiä varten voi olla ongelmallista. Tämän vuoksi kokeellisissa mittauksissa keskityttiin *off-line*-mittauksiin, jolloin jaksottaisella käytöllä ei ollut merkitystä mittausten suorittamisen kannalta.

Kokeellisilla mittauksilla todistettiin teoriaosuudessa syöksyaaltotestauksen ja resistanssimittauksen tehokkuus käytettävänä mittausmenetelminä käämityksen vaurioiden havaitsemiseksi. Kokeessa moottoreihin tehdyt vauriot ovat kuitenkin hyvin ilmeisiä. Käytössä syntyvien todellisten vikojen havaitseminen on varmastikin haasteellisempaa.

Tehtyjen arviointien perusteella vertailussa olleet yhdistelmälaitteet soveltuvat hyvin oikosulkumoottoreiden staattorikäämityksen kunnan arvioimiseen kenttäolosuhteissa. Tämä pitää kuitenkin tarkistaa tekemällä koemittauksia vioittuneista moottoreista kyseisillä mittalaitteilla.

Koska oikosulkumoottorin staattorikäämityksen vauriot kehittyvät nopeasti, on hyvin vaikeata arvioida kauanko käämitys kestää vaurion havaitsemisesta sen lopulliseen rikkoutumiseen. Tällöin käämityksen kestoikää ei myöskään pystytä arvioimaan kovin tarkasti. Näiltä osin tässä työssä ei päästy täysin alkuperäiseen tavoitteeseen, joka oli sellaisen mittausmenetelmän löytäminen, jonka avulla voidaan ennakoida moottoreiden staattorin sekä roottorin vikaantuminen.

Laakerivaurioiden osuus oikosulkumoottoreiden vauriosta on hyvin suuri. Tämän vuoksi olisi syytä keskittyä värähtelymittauksien suorittamiseen oikosulkumoottoreista. Näiden värähtelymittauksien avulla pystyttäisiin havaitsemaan laakerivauriot riittävän ajoissa, jolloin laakereiden vaihtoajankohta pystyttäisiin suunnittelemaan tuotannon kannalta järkevään ajankohtaan. Tässä työssä ei kuitenkaan tutkittu värähtelymittauksia riittävän tarkasti, jonka vuoksi värähtelymittauksista täytyisi tehdä lisätutkimuksia, johon sisältyisi kokeellisia mittauksia.



## Lähteet

- 1 Kuka keksi sähkömoottorin?. 2009. Verkkodokumentti. Historia.  
<<http://historianet.fi/tiede/koneet/kuka-keksi-sahkomoottorin>> Luettu 15.12.2011.
- 2 Ányos Jedlik. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos\\_Jedlik](http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos_Jedlik)> Päivitetty 4.12.2011. Luettu 15.12.2011.
- 3 William Sturgeon. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Sturgeon](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Sturgeon)> Päivitetty 10.12.2011. Luettu 15.12.2011.
- 4 Mikhail Dolivo-Dobrovolsky. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail\\_Dolivo-Dobrovolsky](http://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail_Dolivo-Dobrovolsky)> Päivitetty 28.4.2011. Luettu 15.12.2011.
- 5 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 6 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja Sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
- 7 Kördel, Lennart & Johnsson Jörgen. 2004. Moottorinohjaus. Iisalmi: IS-VET.
- 8 Brushed DC electric motor. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed\\_DC\\_electric\\_motor?uselang=fi](http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor?uselang=fi)>. Päivitetty 30.11.2011. Luettu 2.1.2012.
- 9 Kärnä, Juhani & Saransaari, Pertti. 1978. Tehoelektroniikka, tasa- ja vaihtovirtakoneiden tyristorikäytöt. Espoo: Otakustantamo.
- 10 TTT-käsikirja. 2000. Sähkömoottorikäytöt. Helsinki: ABB
- 11 Kemppinen, Kai. 2011. Huoltopäällikkö, Konecranes Service Oy, Imatra. Haastattelu 22.11.2011.
- 12 FAG. 2003. Rolling Bearing Damage. FAG Kugelfischer AG, Business Unit Industrial Bearings and Services. Schweinfurt. Saksa. Publ. No. WL 82 102/2 EA.
- 13 Mikkonen, Henry. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-Media Oy.
- 14 Bethel, Noah P. 2007. Fault Zone Analysis: Six Part Series on Identifying Motor Defects. Tamba, Yhdysvallat: PdMA Corporation
- 15 Suvanto, Kari. 2005. Tekniikan Fysiikka 1. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 16 PSK-käsikirja 5. Kunnanvalvonnan Sähköiset Menetelmät. 2007. Pyörivät epätahtikoneet. Helsinki: PSK Standardisointi.

- 17 VOM 600 15J. Kappalekoestuksen yleisohje. 2007. Hyvinkää: Konecranes.
- 18 IEEE Std 43–2000. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. 2000. New Yourk, Yhdysvallat: The Institute of Electrical and Electronics Engineering.
- 19 Lindh, Tuomo & Partanen, Jarmo. 1999. Sähkökäyttöjen Mittaavan Kunnonvalvonnan Menetelmiä. Tutkimusraportti. Lappeenranta: LTTK Sähkötekniikka.
- 20 Halme, Jari & Parikka, Risto. 2005. AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Tutkimusraportti BTUO43-051348. Espoo: VTT.
- 21 Nohynek, Petri & Lumme, Veli Erkki. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Rajamäki: KP-Media Oy.
- 22 PSK-käsikirja 3. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 2007. Helsinki: PSK Standardisointi
- 23 Aspelin, Saku. 2011. Sähkökomponenttien lämpökuvaus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 24 Subsee Motor Tester PRO 33 Industrial. Verkkodokumentti.  
<<http://subsee.se/wp-content/uploads/2011/05/Subsee-MT33-Ind-Infosheet-eng.pdf>>. Luettu 26.1.2012.
- 25 ALL-TEST IV PRO 2000. Verkkodokumentti.  
<[http://www.scandos.com/pdf/Scandos\\_All-Test\\_IV\\_Pro\\_2000.pdf](http://www.scandos.com/pdf/Scandos_All-Test_IV_Pro_2000.pdf)>. Luettu 13.12.2011
- 26 Baker AWA-Advanced Winding Analyzer. Verkkodokumentti.  
<<http://www.skf.com/files/690463.pdf>>. Luettu 19.12.201