



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aatu-Oskari Rantala

AKTIIVIMATERIAALIN LAADUN VAI-
KUTUS OIKOSULKUMOOTTORIN
HYÖTYSUHTEESEEN

Tekniikka ja liikenne
2014

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Aatu-Oskari Rantala
Opinnäytetyön nimi	Aktiivimateriaalin laadun vaikutus oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	50 + 2 liitettä
Ohjaajat	Vesa Verkkonen ja Jari-Pekka Avantola

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulussa keväällä 2014. Opinnäytetyön tilaajana oli ABB Oy, Motors and Generators Vaasasta. Työssä tutkittiin oikosulkumoottorin aktiivimateriaalin laatua ja niiden vaikutusta moottorin hyötysuhteeseen.

Oikosulkumoottorin aktiivimateriaaleiksi luokitellaan kupari, alumiini ja sähkölevy. Materiaalien laadulla on suuri vaikutus moottorin häviöihin ja lämpenemään, jotka puolestaan vaikuttavat sen hyötysuhteeseen. Hyötysuhde pyritään pitämään mahdollisimman korkealla huolehtimalla materiaalien laadusta. Työn tavoitteena oli kartoittaa aktiivimateriaalien laadun tilanne ja löytää hyötysuhdetta heikentävät seikat.

Opinnäytetyössä onnistuttiin kartoittamaan aktiivimateriaalien laadun tilanne ja vaikutukset hyötysuhteeseen. Työssä havaittiin, että materiaalien laatu on vaaditulla tasolla ja tuotannon aikaiset ongelmat ovat tällä hetkellä suurin syy moottorin poikkeaviin arvoihin ja siksi siihen tulisi kiinnittää tulevaisuudessa huomiota entistä tarkemmin.

ABSTRACT

Author	Aatu-Oskari Rantala
Title	Quality of Active Material in Squirrel Cage Induction Motor and Its Effects on Efficiency
Year	2014
Language	Finnish
Pages	50 + 2 Appendices
Name of Supervisors	Vesa Verkkonen ja Jari-Pekka Avantola

This thesis was made for ABB Ltd, Motors and Generators from Vaasa. The purpose of the thesis was to investigate the quality of active material in squirrel cage induction motors and its effects on the efficiency.

The active materials of the squirrel cage induction motor are copper, aluminum and electrical steel. Material quality has huge effect on the motor losses and temperature rise which have an effect on the motor efficiency. High efficiency will be achieved by taking care of material quality. The purpose was to investigate the quality situation of materials and find factors which decrease the motor efficiency.

The quality situation of materials and its effects on the efficiency was determined successfully in the thesis. The quality of the materials was at the required level. The biggest reason for the anomalous performance characteristics of the motor is poor quality in the production process and it should be taken into account in the future.

Keywords active material, efficiency, squirrel cage induction motor, quality

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	10
1.1	Tavoitteet	10
1.2	Aiheen valinta	10
1.3	Tutkimuksen toteutus	10
2	ABB YRITYKSENÄ	11
2.1	ABB globaalina yrityksenä.....	11
2.1.1	Historia.....	11
2.2	ABB Suomessa	11
2.2.1	Historia.....	12
2.3	ABB Oy, Motors and Generators, Vaasa	12
3	OIKOSULKUMOOTTORIN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE	13
3.1	Moottorin rakenne	13
3.2	Moottorin toiminta	14
4	OIKOSULKUMOOTTORIN AKTIIVIMATERIAALIT.....	16
4.1	Alumiini.....	16
4.1.1	Alumiini moottorin aktiivimateriaalina	16
4.2	Kupari.....	17
4.2.1	Kupari moottorin aktiivimateriaalina.....	17
4.3	Sähkölevy	18
5	OIKOSULKUMOOTTORIN HÄVIÖIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT ...	20
5.1	Oikosulkumoottorin häviöiden jakautuminen	20
5.2	Pyörrevirtatehohäviöt	20
5.2.1	Hystereesihäviöt	21
5.3	Virtalämpöhäviöt	22
5.4	Mekaaniset häviöt	24
6	SÄHKÖMOOTTORIN HYÖTYSUHDELUOKAT	25
6.1	Moottorin IE-luokitus	25
6.2	Euroopan Eup-direktiivi	26
7	AKTIIVIMATERIAALIEN LAATUTARKASTELU	28

	5
7.1 Kuparilanka.....	28
7.1.1 Dimensioiden mittaus	28
7.1.2 Mandrel-testi.....	30
7.1.3 Peel-testi	33
7.1.4 Läpilyöntimittaus.....	34
7.1.5 Tarkastuksissa havaitut poikkeamat	35
7.2 Alumiini.....	37
7.2.1 Roottorivaluun käytettävän alumiiniseoksen vaatimukset.....	37
7.2.2 Alumiinin koostumuksen tutkiminen.....	38
7.2.3 Alumiinin sähkönjohtavuuden mittaus	38
7.2.4 Alumiinissa tuotannon aikana ilmenneet ongelmat.....	39
7.3 Sähkölevy	41
7.3.1 Sähkölevylle asetetut vaatimukset.....	41
7.3.2 Sähkölevyn laadun tutkiminen ja siinä ilmenneet ongelmat.....	42
7.3.3 Sähkölevyn tutkiminen Adept-laskentaohjelmalla	42
8 TULOSTEN ANALYSOINTI JA KEHITYSIDEAT.....	45
8.1 Materiaalien laadun tilanne.....	45
8.1.1 Kuparilanka	45
8.1.2 Alumiini	45
8.1.3 Sähkölevy	46
8.2 Materiaalin ja tuotannon laadun vaikutukset moottorin hyötysuhteeseen	46
8.3 Kehitysideoita laadun varmistamiseen.....	48
8.3.1 Materiaalitutkimusten raportointi ja arkistointi.....	49
8.3.2 Valmistustekniikan parantaminen	49
LÄHTEET.....	50
LIITTEET	

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne	14
Kuva 2. Staattorin napojen synnyttämä magneettivuo.....	15
Kuva 3. Alumiiniharkkoja.	17
Kuva 4. Käämivyyhtien asennus staattorirautaan.	18
Kuva 5. Roottorilevy.	19
Kuva 6. Oikosulkumoottorin häviöiden jakautuminen	20
Kuva 7. Hystereesisilmukka.	22
Kuva 8. Hyötysuhdeluokitusten vertailu tehon mukaan nelinapaisella oikosulkumoottorilla.	25
Kuva 9. Kuparilangan kiertäminen oman halkaisijansa ympäri Mandrel–testissä.	31
Kuva 10. Eristekerros on lähtenyt irtoamaan Mandrel–testissä.	32
Kuva 11. Eriste lähtenyt irtoamaan Mandrel-testissä. Vasemmalla lanka ennen kuumennusta ja oikealla kuumennuksen jälkeen.....	36
Kuva 12. Roottorin uriin jäänyt huokosia valamisen jälkeen.....	40
Kuva 13. Huokonen roottorin oikosulkurenkaassa.	40
Kuva 14. Moottorin häviöihin vaikuttavat suureet.	48
Taulukko 1. Sähkömoottoreille voimaan tulevat hyötysuhdevaatimukset.	26
Taulukko 2. Luokituksen piiriin kuuluvien sähkömoottoreiden ominaisuudet. ..	26
Taulukko 3. Eri kuparilankojen ominaisuuksia.....	28
Taulukko 4. Standardin IEC60851-2 määrittelemät vaatimukset kuparilangan paksuudelle.	30
Taulukko 5. Punnuksen koko ja langan kierrosmäärä eri lankapaksuuksille Peel testissä.	33
Taulukko 6. Läpilyöntimittauksen hyväksymisrajat eri kuparilangoille.	34
Taulukko 7. Kuparilangan testaukseen valitut lankatyypit.....	35
Taulukko 8. Kuparilangan testausraportin yhteenveto	36
Taulukko 9. Alumiinin sähkönjohtavuuden mittaustulokset	39
Taulukko 10. Eri sähkölevytyypit ja niiden standardien mukaiset vaatimukset. .	41

Taulukko 11. Moottorin suoritusarvot eri levytyypeillä.....	43
Taulukko 12. M600-50A levyn testaus Adept-ohjelmalla eri rautahäviöiden arvoilla.....	44

LIITELUETTELO**LIITE 1.** Alumiinin koostumuksen yhteenveto**LIITE 2.** M600-50A levytyypin yhteenveto

LYHENTEET JA KÄSITTEET

ABB	Asea Brown Boveri
BBC	Brown, Boveri & Cien
Eup	Energy-Using Products
IE	International Efficiency

SÄHKÖMOOTTORIN SUUREITA

A	Pinta-ala
b	Vuontiheys (T)
B_r	Jäännösmagnetismi
d_{nom}	Kuparilangan halkaisija
e	Jännite (V)
f	Taajuus (Hz)
H_c	Koersiivikenttä
H_{max}	Ulkoinen kenttä
I	Virta (A)
I_m	Magnetoimisvirta (A)
K	Vakio kuparilangalle
l	Pituus
M	Momentti (Nm)
N	Käämin kierrosluku
P	Pätöteho (W)
P_k	Virtalämpöhäviöt (W)
P_p	Pyörrevirtatehohäviö (W)
Q	Loisteho (var)
R	Resistanssi (Ω)
R_{KL}	Langan kierros määrä Peel-testissä
R_m	Magneettivastus (Ω)
U	Jännite (V)
μ	Permeabiliteetti (H/m)
v	Sauvan leikkausnopeus
ρ	Ominaisvastus (Ωm)
Φ	Magneettivuo (Wb)
φ	Jännitteen ja virran välinen kulma
γ	Aineen sähkönjohtavuus (S/m)

1 JOHDANTO

Tässä luvussa käsitellään tutkimustyön tavoitteita ja niiden toteuttamista.

1.1 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia oikosulkumoottorin aktiivimateriaalien laatua ja niiden vaikutusta moottorin suorituskykyyn. Oikosulkumoottorin aktiivimateriaaleiksi luokitellaan kupari, alumiini ja teräslevy. Tavoitteena on löytää moottorin hyötysuhdetta heikentävät seikat, jonka jälkeen voidaan pohtia mahdollisia parannuksia.

1.2 Aiheen valinta

Opinnäytetyön tilaaja on ABB Oy, Motors and Generators Vaasasta. Oikosulkumoottorin koestusarvoissa on ilmennyt ongelmia, mistä johtuen aihe on nostettu esille. Lisäksi standardien tiukennuksista johtuen moottorin häviöt pyritään minimoimaan.

1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksessa käytetään ABB:ltä ja Vaasan ammattikorkeakoululta saatua oppimateriaalia. Materiaalin laatua tutkitaan tekemällä mittauksia ja tarkastelemalla materiaalien laatutodistuksia. Arvoja verrataan määrättyihin standardeihin.

2 ABB YRITYKSENÄ

Tässä luvussa käydään läpi ABB Oy:n toimintaa ja historiaa.

2.1 ABB globaalina yrityksenä

ABB on automaatio- ja sähkövoimatekniikkaan keskittynyt sveitsiläinen yritys. Se työllistää noin 150 000 ihmistä noin 100 maassa. ABB:n liikevaihto vuonna 2012 oli 39,336 miljardia dollaria. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Zürichissa, Sveitsissä. ABB on listautunut pörssiin Zürichissa, Tukholmassa ja New Yorkissa. ABB on jaettu viiteen divisioonaan, jotka toimivat automaatio- ja sähkövoimatekniikan eri osa-alueilla. Yritys käyttää vuosittain noin miljardi dollaria tuotekehitykseen. /5/

2.1.1 Historia

ABB:n historia yltää jopa 120 vuoden päähän, mutta se perustettiin varsinaisesti vuonna 1988, kun ASEA ja BBC (Brown, Boveri & Cien) yhdistyivät samaksi yhtiöksi. Yhtiön liikevaihto oli 17 miljardia dollaria ja se työllisti 160 000 ihmistä. /2/

2.2 ABB Suomessa

Suomessa ABB:n palveluksessa työskentelee noin 5 500 henkilöä yli 30 paikkakunnalla. Yrityksen tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. Suomen ABB:n liikevaihto on noin 2,3 miljardia euroa ja tuotekehitykseen käytetään vuosittain noin 184 miljoonaa euroa. ABB on Suomen suurin teollisuuden kunnossapitäjä.

Helsingin Vuosaarella tuotetaan sähköistys- ja automaatoratkaisuja meriteollisuuteen sekä valmistetaan Azipod –ruoripotkurijärjestelmiä. Helsingin Pitäjämäen tehtaalla ABB valmistaa muun muassa moottoreita, generaattoreita ja taajuusmuuttajia. Vaasan tehtaalla valmistetaan muun muassa moottoreita, erikoismuuntajia ja kytkintuotteita. Porvoossa ABB valmistaa sähköasennustuotteita. /3/

2.2.1 Historia

Suomen ABB syntyi Strömberg -nimisestä pienyrityksestä, joka sijaitsi Helsingin Kampissa. Gottfrid Strömbergin vuonna 1889 perustama sähköliike valmisti dynamo- ja tasavirtageneraattoreita sekä sähkövalaistuslaitoksia. 1900-luvun alussa Suomen sähköntarve kasvoi ja Strömberg rakensi kaupunkisähkölaitoksia, sähköisti maaseutua ja tehtaita ympäri Suomea.

Strömberg avasi uuden tehtaan Sörnäisiin vuonna 1898 ja Helsingin Pitäjämäkeen 1910-luvun lopulla. Vaasan tehtaot otettiin käyttöön vuonna 1944. Strömberg oli tuolloin yksi Suomen suurimmista teollisuusyrityksistä.

Asea ja BBC omistivat Strömbergin osakkeista vaihtelevia osuuksia. 1920-luvulla Strömbergillä oli edustussopimus Suomessa BBC:n valmistamissa tuotteissa. Vuonna 1983 Kymi Kymmene Oy osti Strömbergin osakkeet ja yhtiön nimeksi muutettiin Kymi-Strömberg Oy. Asea osti yhtiön neljä vuotta myöhemmin ja sen nimeksi tuli Strömberg Oy. Vuonna 1988 yhtiön nimeksi tuli ABB kun Asea ja BBC yhdistyivät samaksi yhtiöksi. /3/

2.3 ABB Oy, Motors and Generators, Vaasa

ABB:n moottori- ja generaattoriliiketoiminta työllistää maailmanlaajuisesti 15 000 henkeä 45 tehtaassa 13 maassa. Motors and Generators -yksikkö kuuluu ABB:n Discrete Automation and Motion -divisioonaan. Vaasan tehtaalla on erikoisvastuu räjähdysvaarallisten tilojen pienjännitemoottoreiden valmistuksessa. Lisäksi tehtaalla valmistetaan korkean hyötysuhteen IE3-luokan pienjännitemoottoreita. /4/

3 OIKOSULKUMOOTTORIN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE

Tässä luvussa käsitellään tavallisen oikosulkumoottorin rakennetta ja sen toimintaperiaatetta.

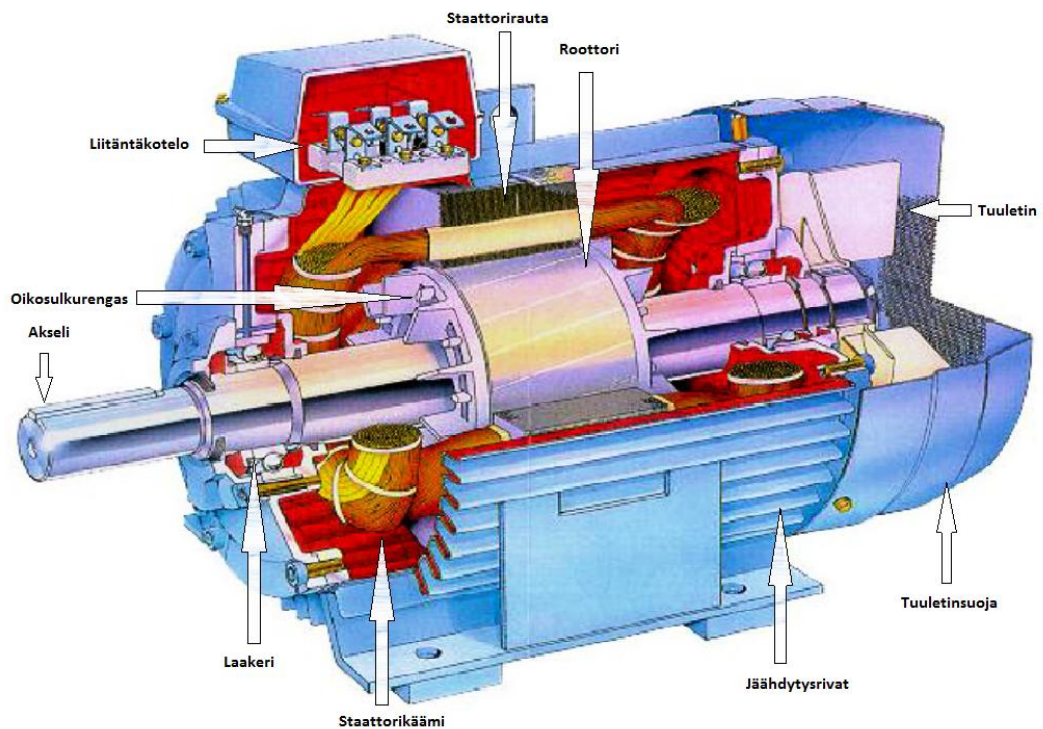
3.1 Moottorin rakenne

Oikosulkumoottorin magneetoiva osa on staattori, joka koostuu staattoriraudasta ja käämeistä. Staattorirauta ladotaan noin 0,5 mm paksuisista levyistä, joiden välissä on ohut eristekerros. Tällä rakenteella pystytään pienentämään pyörrevirtahäviöitä. Staattoriraudassa on käämitykselle tarvittavat urat, joihin staattorin käämit upotetaan. Käämimateriaalina käytetään yleisimmin kuparia. Raudan uraluku riippuu moottorin napapariluvusta. Jokaiselle vaiheelle ja magneetoivalle navalle on varattu yhtä monta uraa.

Moottorin pyörivä osa on roottori, jossa on sauvat ja levyistä ladottu magneettipiiri. Roottorissa käytettävä sauvamateriaali on alumiinia tai kuparia. Magneetoiva rautaosa ladotaan roottorilevyistä, jossa on häkkikäämitykselle tarvittavat urat. Roottorin uriin valetaan alumiinisauvat tai upotetaan kuparisauvat. Sauvat oikosuljetaan roottorin molemmista päistä oikosulkurenkailla.

Oikosulkumoottorissa on pyörivä akseli, joka on asennettu pyörivän roottorin keskelle. Akselin toisessa päässä on normaalisti tuuletin, joka viilentää moottorin runkoa. Runko on usein valurautaa, jossa on paljon ripoja, jotta jäähdytyspinta-ala olisi mahdollisimman suuri.

Staattorin ja roottorin välissä on ilmaväli, jonka kautta magnetointi tapahtuu. Roottorin akseli on kiinnitetty molemmista päistä laakereilla. Tämän yksinkertaisen rakenteen ansiosta oikosulkumoottori ei tarvitse paljon huoltoa ja se on pitkäikäinen. Kuvassa 1 sivulla 14 on esitetty oikosulkumoottorin rakennetta. /20/



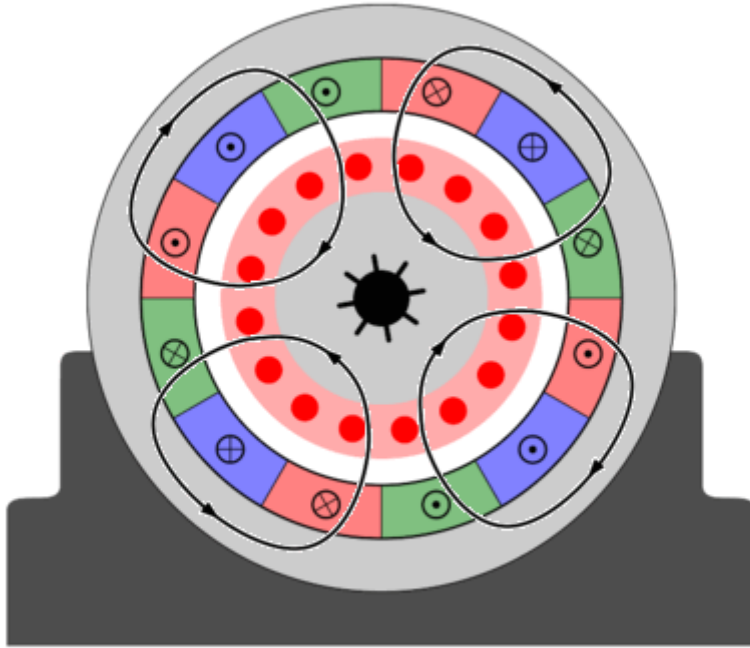
Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne

3.2 Moottorin toiminta

Staatroria syötetään normaalisti kolmella vaiheella. Staatrorin navan synnyttämä sulkeutuva magneettivuo kulkee staatrorin ja roottorin välisen ilmvälän kautta kaksi kertaa, jolloin roottoriin indusoituu jännite. Jännitteen syntymiseen tarvitaan vuo sekä sauvan leikkausnopeus vuohon nähden, kuten kaavasta 1 voidaan todeta. Moottori ottaa tarvittavan loisivirran verkosta, jotta se saa muodostettua magneetikentän. Oikosulkumoottorissa käämit on aseteltu 120° kulmaan toisiinsa nähden. Tällä asettelulla saadaan aikaan pyörivä magneetikenttä. Roottoriin indusoitunut virta ja pyörivä magneetikenttä saavat aikaan vääntömomentin. Roottori alkaa pyöriä kun sen vääntömomentti on suurempi kuin vastamomentti. Oikosulkumoottori luokitellaan epätahtikoneeksi, koska sen pyörivä osa, roottori, pyörii magneetikenttää hitaammin, jolloin syntyy jättämä. Ilman jättämää, ei syntyisi vääntömomenttia ja magneetikenttä roottoriin nähden pysyisi paikallaan. Kuvassa 2 sivulla 15 on havainnollistettu staatrorivuon aiheuttamaa pyörivää magneetikenttää. /20/ /13/ /6/

Roottoriin indusoitunut jännite:

$$\vec{e} = l\vec{v} \times \vec{b} \quad (1)$$



Kuva 2. Staattorin napojen synnyttämä magneettivuo /21/

4 OIKOSULKUMOOTTORIN AKTIIVIMATERIAALIT

Tässä luvussa käsitellään oikosulkumoottorin aktiivimateriaalien rakennetta ja sähköisiä ominaisuuksia.

4.1 Alumiini

Alumiini (Al) on hyvin kevyt metalli, koska sen tiheys on noin kolmanneksen raudan tiheydestä ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ja se on helposti muovailtavaa sekä kylmänä että kuumana. Eri alumiiniseoksilla vetolujuus vaihtelee 70 - 700 MPa. Sen vahvuus kasvaa matalassa lämpötilassa, mutta korkeassa lämpötilassa se heikentyy. Alumiini kestää hyvin neutraalissa ja miedosti hapekkaassa ympäristössä, koska se muodostaa itselleen oksidikerroksen korroosiosuojaksi. Erittäin emäksisissä olosuhteissa se ruostuu helposti. Alumiinilla on erinomainen sähkönjohtavuus ja siksi sitä käytetäänkin paljon sähköjohtimissa. /16/

4.1.1 Alumiini moottorin aktiivimateriaalina

Alumiinia käytetään oikosulkumoottorin roottorin häkkikääläilykseen. Sula alumiini valetaan roottorilevyjen läpi, jolloin alumiini muodostaa päihin oikosulku-
renkaat ja sauvat roottorin uriin. Alumiini toimitetaan moottoritehtaalte harkkoina. Kuvassa 3 sivulla 17 on tehtaalte saapuneita alumiiniharkkoja. Harkot sulatetaan induktio- tai upokasuunissa, jossa lämpötila on yli 800 °C. /8/



Kuva 3. Alumiiniharkkoja.

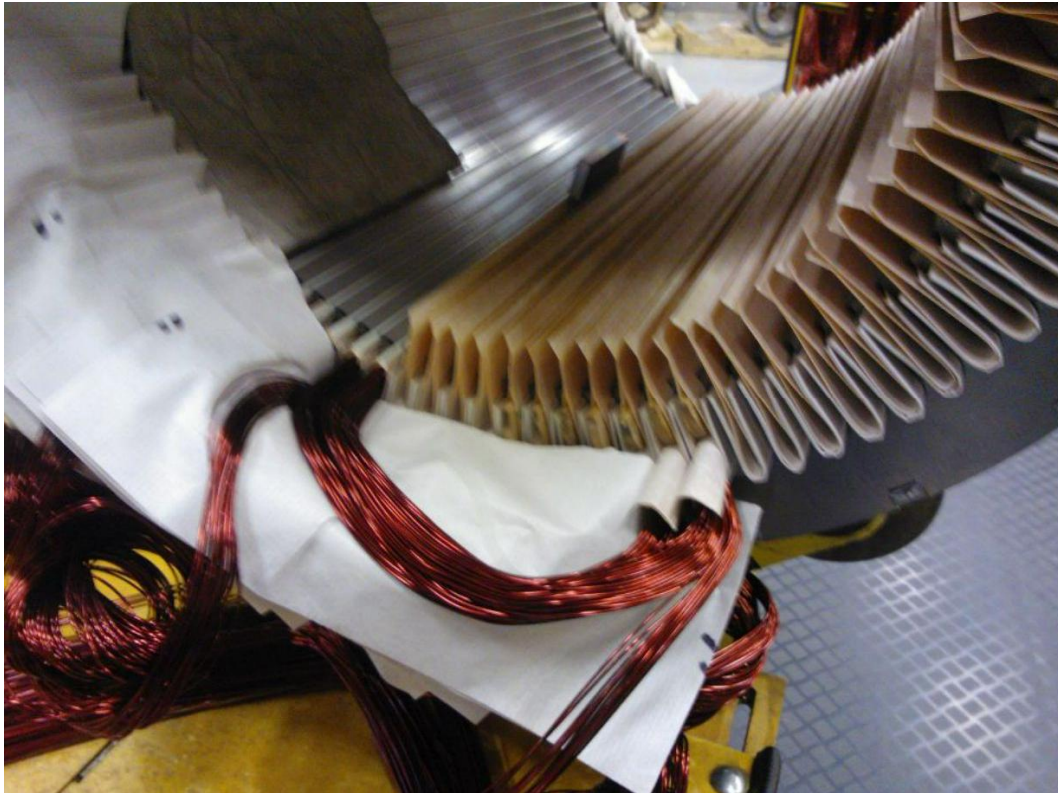
4.2 Kupari

Kupari (Cu) on punertava ja melko pehmeä metalli, joka luokitellaan raskasmetalliksi, koska sen tiheys on suhteellisen suuri ($8,96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Kupari on kemiallisesti kestävä materiaali, koska se muodostaa itselleen suojaavan kalvon. Tätä ilmiötä kutsutaan puhtaan kuparin patinoitumiseksi. Kuparilla on hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus ja siksi sitä käytetään sähkölaitteissa, elektroniikassa ja lämmönvaihtimissa. /14/

4.2.1 Kupari moottorin aktiivimateriaalina

Kuparista valmistetaan oikosulkumoottorin staattorikäänitys. Käämien valmistus aloitetaan kelaamalla oikean paksuisista kuparilangoista vyyhtejä. Käämilankojen paksuus ja kierrosmäärä määritellään sähköisestä laskelmasta, jotta moottoriin saadaan oikeat virta-arvot. Oikosulkumoottorissa käytettävässä kuparilangassa on

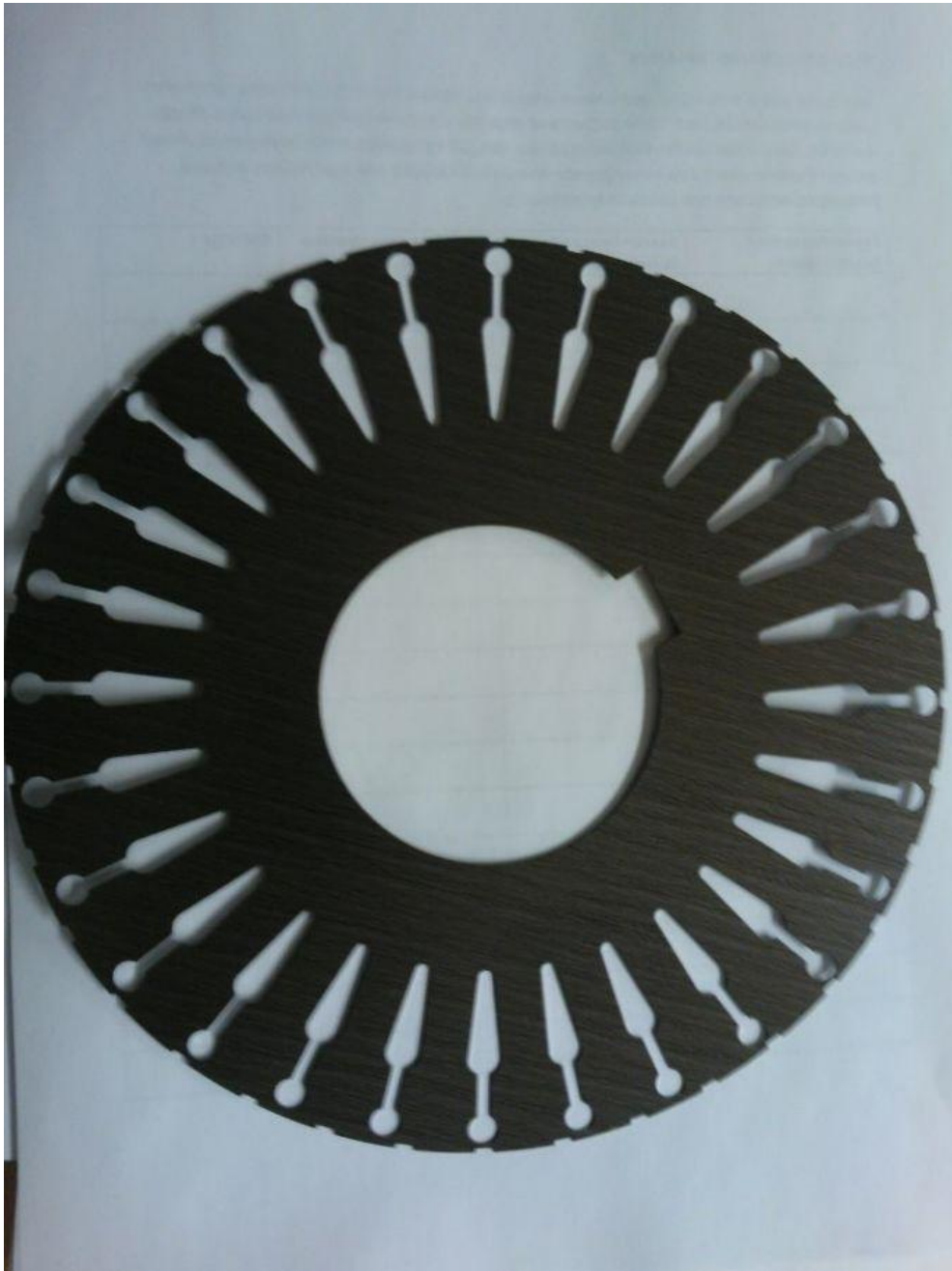
ohut lakka-eristekerros. Kuparivyyhdit asetellaan staattoriraudan hammasuriin. Urat eristetään eristepaperilla ja vyyhdit suljetaan uraan sulkutikulla. Kuvassa 4, on esitetty kääminnän työvaihe, jossa kuparivyyhti asetellaan staattoriraudan uraan. /9/



Kuva 4. Käämivyyhtien asennus staattorirautaan.

4.3 Sähkölevy

Sähkölevystä valmistetaan oikosulkumoottorin staattorin ja roottorin sydän. Sähkölevy on pääasiassa terästä, mutta se sisältää pieniä määriä kuparia, piitä, mangaania, fosforia ja alumiinia. Sähkölevyn häviöteho vaihtelee eri levytyyppien välillä. Normaalisti häviöt ovat 1,5 T ja 50 Hz arvoilla 2-10 W/kg välillä. Kuvassa 5 sivulla 19 on roottorilevy. Sähkölevyn laadulla ja määrällä on suuri vaikutus oikosulkumoottorin rautahäviöihin. ABB tarkastaa sähkölevyjen laatua kaksi kertaa vuodessa. /7/



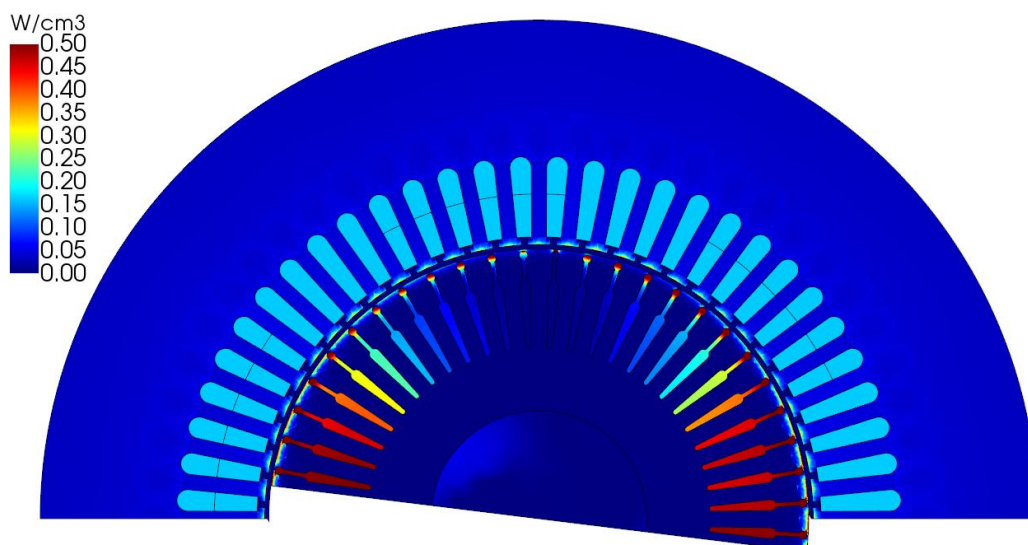
Kuva 5. Roottorilevy.

5 OIKOSULKUMOOTTORIN HÄVIÖIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä luvussa käsitellään niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat oikosulkumoottorin häviöihin ja miten niihin voidaan vaikuttaa aktiivimateriaalin laadulla.

5.1 Oikosulkumoottorin häviöiden jakautuminen

Kuvassa 6 on oikosulkumoottorin poikkileikkaus. Punaiset alueet kuvaavat alueita, joissa syntyvät suurimmat häviöt. Kuvasta voidaan huomata, että moottorissa suurin häviöalue on roottorisauvat. Tämän vuoksi johdinmateriaalin sähkönjohtavuudella on suuri merkitys moottorin hyötysuhteeseen. Toiseksi suurin häviöalue on staattorikäänitys. Myös staattoriraudassa syntyy häviöitä, kun muuttuva vuo kulkee sen lävitse. Ura-aukkojen kohdalla syntyy yliaaltohäviöitä, koska magneettikenttään tulee notkahdus, joka synnyttää yliaaltoja.



Kuva 6. Oikosulkumoottorin häviöiden jakautuminen

5.2 Pyörrevirtatehohäviöt

Pyörrevirtatehohäviöt syntyvät kun muuttuva magneettikenttä indusoi vuota kiertäviä virtoja moottorin rautaosiin. Kaavasta 2 voimme tarkastella, mitkä asiat vaikuttavat pyörrevirtatehohäviöiden suuruuteen.

Pyörrevirtatehohäviö:

$$P_p \sim \gamma f^2 A^2 \hat{b}^2 \quad (2)$$

Kaavassa 1 P_p on pyörrevirtatehohäviö, γ materiaalin johtavuus, f taajuus, A pinta-ala ja \hat{b} vuontiheys.

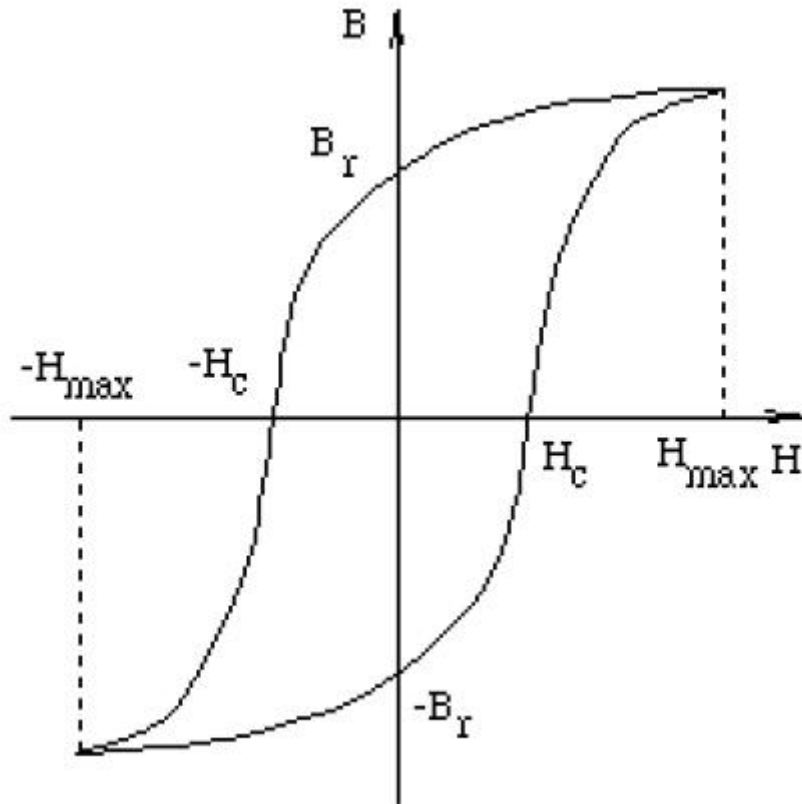
Materiaalin johtavuus γ vaikuttaa virran kulkuun, joten sähkölevyn johtavuuteen voidaan vaikuttaa erilaisilla seosaineilla. Taajuuteen f ei voida moottorin suunnittelussa vaikuttaa, koska sillä on suora vaikutus moottorin pyörimisnopeuteen n ja momenttiin M . Pyörrevirtatehohäviö pienenee oleellisesti taajuuden pienentyessä. Sähkölevyn pinta-alaan A voidaan vaikuttaa esimerkiksi levyn paksuutta muuttamalla, jotta pyörrevirtatehohäviö pienenee. Tällä hetkellä käytettävän levyn paksuus on noin 0,5 mm. Levyn liiallinen ohentaminen aiheuttaa kuitenkin valmistusteknisiä ongelmia. Vuon tiheyttä \hat{b} pienentämällä saadaan häviöitä pienennettyä, mutta tällöin moottorin koko kasvaa. Eri sähkölevyvalmistajat ilmoittavat ominaishäviöluvun W/kg tietyille vuontiheyden ja vaihtovirran taajuuden arvolle. /19/

5.2.1 Hystereesihäviöt

Hystereesihäviöt P_h syntyvät kun vaihtovirran synnyttämä magneettikenttä kääntelee magneettidipoleita kentän taajuuden tahdissa. Atomien välinen kitka saa aikaan häviöitä. Häviöiden suuruus riippuu hystereesikäyrän pinta-alasta. Mitä leveämpi hystereesikäyrä on, sitä vaikeammin ja häviöllisemmin dipolit kääntyilevät. Käyrämuotoon vaikuttaa materiaali. Oikosulkumoottorissa sähkölevyn seosaineet vaikuttavat oleellisesti hystereesikäyrän muotoon. Häviön suuruuteen vaikuttaa se, kuinka monta kertaa hystereesikäyrä kierretään aikayksikköä kohden ja mikä on vuontiheys. Moottorikäytössä taajuuteen ja vuontiheyteen ei usein haluta puuttua, mutta sähkölevyn materiaalia voidaan kehittää paremmaksi, jotta käyrän pinta-ala saadaan pienemmäksi. /19/

Kuvassa 7, sivulla 22 on esitetty hystereesikäyrä, jossa H on ulkoinen magneettikenttä ja B magnetoituva metallikappale. B_r kuvaa metallikappaleen jäännösmagnetismia, joka syntyy kun ulkoinen kenttä H_{max} palautuu arvoon nolla. Jäännös-

magnetismi poistuu vastakkaisuuntaisen ulkoisen kentän H_c (koersiivikenttä) vaikutuksesta. /15/



Kuva 7. Hystereesisilmukka. /15/

5.3 Virtalämpöhäviöt

Virtalämpöhäviöt P_k ovat riippuvaisia virrasta I ja johtimen resistanssista R . Moottorin virtaa voidaan pienentää loistehon Q minimoinnilla. Oikosulkumoottorin pätötehoon P ei voida vaikuttaa, koska se on vakiovuokone. Vakiovuokoneessa pätövirta I_p on lähes verrannollinen moottorin momenttiin M .

Virtalämpöhäviöt:

$$P_k \sim I^2 R \quad (3)$$

Johtimen resistanssiin vaikuttaa materiaalin ominaisvastus ρ , johtimen pituus l ja johtimen pinta-ala A . Häviöitä voidaan pienentää huolehtimalla johdinaineen laadusta ja resistiivisyydestä. Vyyhden pituuteen ei voida juurikaan vaikuttaa, koska se on riippuvainen staattorin käämintäytylistä ja paketin pituudesta. Johtimen pinta-alaa suurentamalla sen resistanssi pienenee. Tämä kuitenkin johtaa siihen, että moottorin koko kasvaa, mikä ei ole usein toivottavaa. /19/

Johtimen resistanssi:

$$R = \rho l/A \quad (4)$$

Magneetti­piirissä pätee ohmin laki, jossa oleelliset suureet ovat käämin kierros­luku N , moottorin virta I , magneettivastus R_m ja magneettivuo ϕ .

Magneetti­piirin ohmin laki:

$$NI = R_m \phi \quad (5)$$

Moottorin magnetoimisvirta I_m on verrannollinen magneettivastukseen R_m . Magneettivastukseen vaikuttaa magneetti­piirin pituus l , permeabiliteetti μ ja raudan pinta-ala A . Permeabiliteetin ja raudan pinta-alan tulisi olla suuria, jotta magneettivastus jäisi mahdollisimman pieneksi. Raudan pinta-alaa on kuitenkin vaikea suurentaa, koska moottori pyritään suunnittelemaan mahdollisimman pieneksi. Permeabiliteettiin vaikuttaa oleellisesti ilmavälin pituus. Oikosulkumoottorin suunnittelussa staattorin ja roottorin väliin jäävän ilmavälin pituus pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi. Ilmavälin pituus vaikuttaa huomattavasti virtalämpöhäviöihin ja moottorin tyhjäkäyntivirtaan. /19/

Magneettivastus:

$$R_m = l/(\mu A) \quad (6)$$

5.4 Mekaaniset häviöt

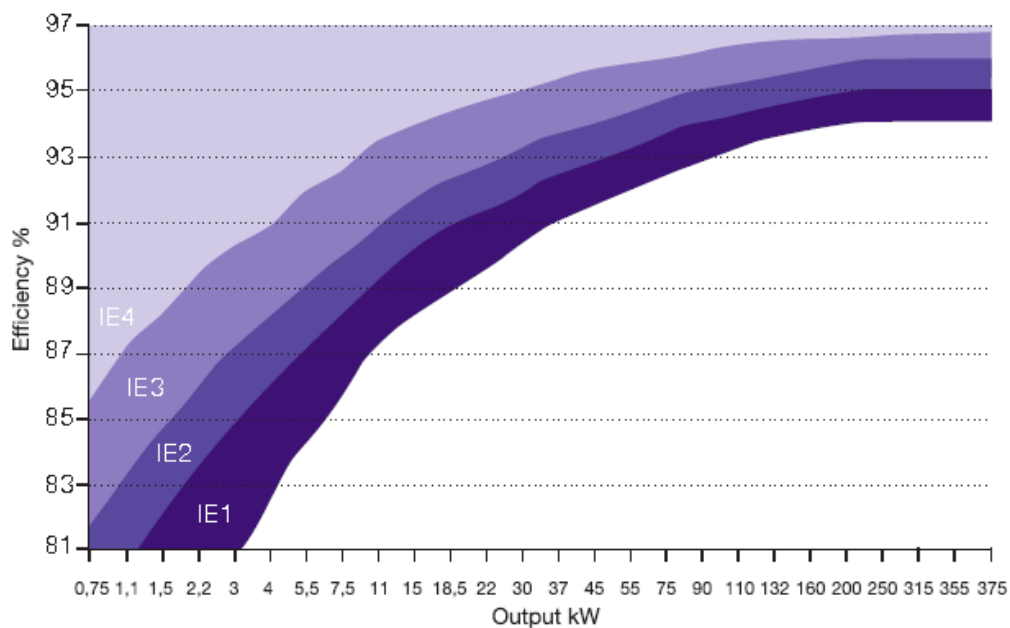
Oikosulkumoottorissa mekaanisia häviöitä aiheuttavat laakerit ja tuuletin. Laakeritka voidaan minimoida käyttämällä laadukkaita laakereita. Myös laakerien rasvauksen tulee olla kunnossa. Tuulettimen aiheuttamat häviöt riippuvat tuulettimen koosta ja muotoilusta. Jos moottorissa käytetään mahdollisimman laadukkaita johdinmateriaaleja, sen lämpenemä on pienempi ja tällöin myös tuulettimen kokoa voidaan pienentää. On myös käyttökohteita, joissa moottoria ajetaan taa juusmuuttajan ohjaamana hyvin matalalla nopeusalueella, ja suoraan akseliin asennettuna tuulettimen pyörimisnopeus on hyvin pieni. Tällöin suositellaan, että moottorissa olisi erillinen tuuletinmoottori, jotta lämpenemä ei kasvaisi liian suureksi. /19/

6 SÄHKÖMOOTTORIN HYÖTYSUHDELUOKAT

Tässä luvussa käsitellään sähkömoottoreille määrättyjä uusia hyötysuhdevaati-
muksia, jotka asettavat moottorivalmistajille haasteita tulevaisuudessa. Moottorin
hyötysuhteeseen vaikuttavat oleellisesti aktiivimateriaalien ja tuotannon laatu.

6.1 Moottorin IE-luokitus

Tällä hetkellä sähkömoottorit kuluttavat kaikesta tuotetusta sähköenergiasta noin
40 %. Päästöjen kasvua pyritään rajoittamaan lainsäädännöllisesti luomalla muun
muassa hyötysuhderajoituksia sähkömoottoreille. Uusi IE-luokitus määrittelee
moottorin hyötysuhdeluokan. Tällä hetkellä käytössä olevat luokitukset ovat IE1
(Standard efficiency), IE2 (High efficiency) ja IE3 (Premium efficiency). Myös
hyötysuhdeluokitus IE4 on suunnitteilla. Kuvassa 8 on vertailukäyrä eri hyö-
tysuhdeluokista tehon mukaan.



Kuva 8. Hyötysuhdeluokitusten vertailu tehon mukaan nelinapaisella oikosulku-
moottorilla. /11/

6.2 Euroopan Eup-direktiivi

Euroopan Eup (Energy-Using Products)–direktiivi määrittelee uusien hyötysuhdeluokkien vaatimukset ja käyttöönoton aikataulun, joka koskee kaikkia unionin jäsenmaita. Taulukossa 1 on esitetty Eup–direktiivin aikataulu. Luokitus koskee kaikkia pienjännitteisiä oikosulkumoottoreita. Taulukossa 2 on esitelty luokituksen piiriin kuuluvien moottoreiden määritelmät. /10,18/

Taulukko 1. Sähkömoottoreille voimaan tulevat hyötysuhdevaatimukset.

Lain voimaantuleminen (pvm)	Hyötysuhdeluokka
16.6.2011	IE2
1.1.2015	Tehoalueen 7,5 – 375 kW moottoreiden oltava IE3 luokkaa tai IE2 luokan moottori täytyy varustaa taajuusmuuttajalla.
1.1.2017	Tehoalueen 0,75 – 375 kW moottoreiden oltava IE3 luokkaa tai IE2 luokan moottori täytyy varustaa taajuusmuuttajalla.

Taulukko 2. Luokituksen piiriin kuuluvien sähkömoottoreiden ominaisuudet.

Nimellisjännite	Max. 1000 V
Nimellisteho	0,75 – 375 kW
Napaluku	2, 4 ja 6
Käyttötavat	Jatkuva käyttö (S1) ja lähes jatkuva käyttö (S3)

Tehonsyöttö	3-vaiheverkkosyöttö
--------------------	---------------------

7 AKTIIVIMATERIAALIEN LAATUTARKASTELU

Tässä luvussa käsitellään ABB Oy Motorsin suorittamia aktiivimateriaalin laatu- tarkastuksia ja niissä ilmenneitä ongelmia. Perehdymme myös siihen miten on- gelmat vaikuttavat moottorin hyötysuhteeseen.

7.1 Kuparilanka

Kuparilanka toimitetaan ABB:lle isoissa rullissa. Testaukseen valitaan eri paksui- sia lankoja jokaiselta toimittajalta. Mittaus tulee suorittaa kaksi kertaa vuodessa. Kuparilangat luokitellaan lämpöluokituksen mukaan. Lankojen eristemateriaalit ja niiden paksuus vaihtelevat. Joissain luokissa käytetään niin sanottua kaksikerrok- sista eristystä, jossa pohja- ja pintakerros ovat eri materiaalia. Taulukossa 3 on erilaisten kuparilankojen ominaisuuksia. Langan Grade-luokitus määrää eristeen läpilyöntilujuuden. Läpilyöntilujuuteen vaikutetaan pääasiassa eristekerroksen paksuudella. /10/

Taulukko 3. Eri kuparilankojen ominaisuuksia.

Lankatyyppi	Eristys	Lämpöluokka / °C	Päällystysmateriaali	
			Pohjakerros	Pintakerros
Kuparilanka Grade 3, a	Grade 3	200	Polyester-imidi	Polyamidi-imidi
Kuparilanka Polyimidi, a	FEP (Teflon) -pinnoitettua polyimidikalvoa	240	Polyimidi	-
Kuparilanka Grade 2	Polyesterilaminointi, Grade 2	155	Polyester-imidi	-
Kuparilanka Grade 2, a	Grade 2	200	Polyester-imidi	Polyamidi-imidi
Kuparilanka PI Emali, a	Polyimidiemalointi, Grade 2	240	Polyimidi	-
Kuparilanka PETP-PÄÄLL. Gr 1, a	Kaksikerroksinen grade 1 emali + Polyesterikalvo	200	Polyester-imidi	Polyamidi-imidi

7.1.1 Dimensioiden mittaus

Langan dimensioiden mittauksessa tutkitaan sen paksuutta eristekerroksen päältä ja alta. Dimensioiden mittaus on yksi tärkeimmistä testeistä, koska paksuuden vaihtelu vaikuttaa moottorin käämin virtalämpöhäviöihin. Lisäksi paksuuden vaihtelu voi vaikeuttaa käämien asentamista staattoriuraan. Jotta moottorin las- kelmalliset ja todelliset suoritusarvot olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan, tulee langan olla paksuudeltaan tasaista ja eristyksen täytyy olla kunnossa.

Kuparilangan paksuutta mitataan mikrometrillä. Ensin lankaa leikataan noin 35 cm pituinen pala ja se suoristetaan huolellisesti. Tämän jälkeen valitaan kolme mittauspistettä, joiden etäisyys toisistaan on noin 10 cm. Tämän jälkeen jokaisesta merkitystä kohdasta otetaan kolme mittausta pyörittämällä mikrometriä 120° välein. Mittauspisteet ovat tällöin 0°, 120° ja 240°.

Kun mittaukset on suoritettu, poltetaan eristekerros pois langan päältä kaasupolttimella. Mittauspisteet pyritään tämän jälkeen merkitsemään samaan kohtaan. Langan täytyy antaa jäähtyä kädenlämpöiseksi polttamisen jälkeen. Tämän jälkeen suoritetaan mittaus uudelleen.

Mitattuja tuloksia verrataan standardin IEC60851-2 taulukkoarvoihin. Taulukossa 4, sivulla 30 on standardin määräämät arvot eri paksuisille kuparilangoille. Pak-suudet vaihtelevat myös eristeluokituksen mukaan. /12/

Taulukko 4. Standardin IEC60851-2 määrittelemät vaatimukset kuparilangan paksuudelle. /12/

Nominal conductor diameter mm	Conductor tolerance ± mm	Minimum Increase due to the Insulation mm			Maximum overall diameter mm		
		Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 1	Grade 2	Grade 3
0,018		0,002	0,004	0,006	0,022	0,024	0,026
0,020		0,002	0,004	0,007	0,024	0,027	0,030
0,022		0,002	0,005	0,008	0,027	0,030	0,033
0,025		0,003	0,005	0,008	0,031	0,034	0,037
0,028		0,003	0,006	0,009	0,034	0,038	0,042
0,032		0,003	0,007	0,010	0,039	0,043	0,047
0,036		0,004	0,008	0,011	0,044	0,049	0,053
0,040		0,004	0,008	0,012	0,049	0,054	0,058
0,045		0,005	0,009	0,013	0,055	0,061	0,066
0,050		0,005	0,010	0,014	0,060	0,066	0,072
0,056		0,006	0,011	0,015	0,067	0,074	0,081
0,063		0,006	0,012	0,017	0,076	0,083	0,090
0,071	0,003	0,007	0,012	0,018	0,084	0,091	0,098
0,080	0,003	0,007	0,014	0,020	0,094	0,101	0,108
0,090	0,003	0,008	0,015	0,022	0,105	0,113	0,120
0,100	0,003	0,008	0,016	0,023	0,117	0,125	0,132
0,112	0,003	0,009	0,017	0,026	0,130	0,139	0,147
0,125	0,003	0,010	0,019	0,028	0,144	0,154	0,163
0,140	0,003	0,011	0,021	0,030	0,160	0,171	0,181
0,160	0,003	0,012	0,023	0,033	0,182	0,194	0,205
0,180	0,003	0,013	0,025	0,036	0,204	0,217	0,229
0,200	0,003	0,014	0,027	0,039	0,226	0,239	0,252
0,224	0,003	0,015	0,029	0,043	0,252	0,266	0,280
0,250	0,004	0,017	0,032	0,048	0,281	0,297	0,312
0,280	0,004	0,018	0,033	0,050	0,312	0,329	0,345
0,315	0,004	0,019	0,035	0,053	0,349	0,367	0,384
0,355	0,004	0,020	0,038	0,057	0,392	0,411	0,428
0,400	0,005	0,021	0,040	0,060	0,439	0,459	0,478
0,450	0,005	0,022	0,042	0,064	0,491	0,513	0,533
0,500	0,005	0,024	0,045	0,067	0,544	0,566	0,587
0,560	0,006	0,025	0,047	0,071	0,606	0,630	0,653
0,630	0,006	0,027	0,050	0,075	0,679	0,704	0,728
0,710	0,007	0,028	0,053	0,080	0,762	0,789	0,814
0,800	0,008	0,030	0,056	0,085	0,855	0,884	0,911
0,900	0,009	0,032	0,060	0,090	0,959	0,989	1,018
1,000	0,010	0,034	0,063	0,095	1,062	1,094	1,124
1,120	0,011	0,034	0,065	0,098	1,184	1,217	1,248
1,250	0,013	0,035	0,067	0,100	1,316	1,349	1,381
1,400	0,014	0,036	0,069	0,103	1,468	1,502	1,535
1,600	0,016	0,038	0,071	0,107	1,670	1,706	1,740
1,800	0,018	0,039	0,073	0,110	1,872	1,909	1,944
2,000	0,020	0,040	0,075	0,113	2,074	2,112	2,148
2,240	0,022	0,041	0,077	0,116	2,316	2,355	2,392
2,500	0,025	0,042	0,079	0,119	2,578	2,618	2,656
2,800	0,028	0,043	0,081	0,123	2,880	2,922	2,961
3,150	0,032	0,045	0,084	0,127	3,233	3,276	3,316
3,550	0,036	0,046	0,086	0,130	3,635	3,679	3,721
4,000	0,040	0,047	0,089	0,134	4,088	4,133	4,176
4,500	0,045	0,049	0,092	0,138	4,591	4,637	4,681
5,000	0,050	0,050	0,094	0,142	5,093	5,141	5,186

For intermediate nominal conductor diameters, the minimum increase figure corresponding to the next larger nominal conductor diameter shall be taken.

NOTE 1 Minimum overall diameter up to and inclusive of 0,060 mm is calculated from the maximum resistance value for each corresponding diameter of Table 3, then adding the minimum increase due to the insulation.

NOTE 2 The dimensions of intermediate nominal conductor diameters for R 40 series are given in Annex A.

7.1.2 Mandrel-testi

Mandrel-testissä tarkastellaan emalin pysyvyyttä kuparin pinnalla. Testi perustuu standardiin IEC60851-3. Testissä lankaa kierretään oman halkaisijansa ympäri 10

kierrosta, joiden tulee olla tiiviisti kiinni toisissaan. Tämän jälkeen langan pinnoitetta tutkitaan silmämääräisesti ja tarkemmin mikroskoopilla. Eristekerroksen tulisi pysyä ehjänä kiertämisen jälkeen. Tämä testi sopii alle 2,5 mm paksuisille langoille. Kuvassa 9 on kuparilankaa kierretty oman halkaisijansa ympäri.



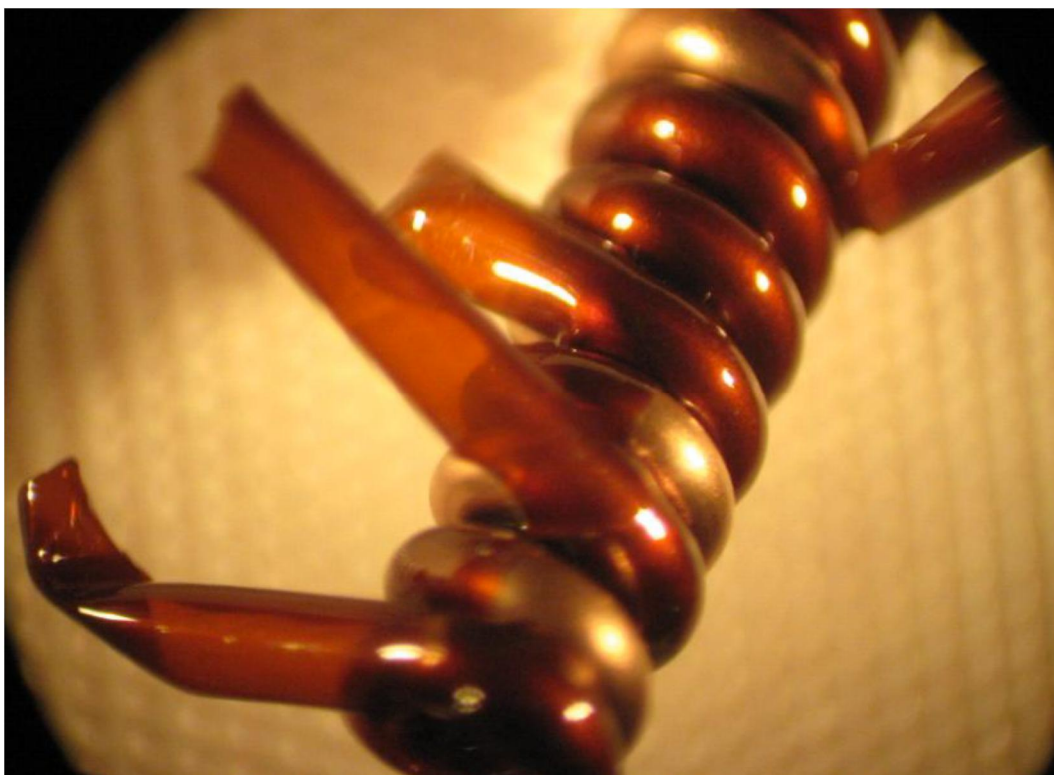
Kuva 9. Kuparilangan kiertäminen oman halkaisijansa ympäri Mandrel-testissä.

/12/

Mandrel-testin yhteydessä lankoja myös kuumennetaan uunissa. Lankojen kuumentamista ei määrätä standardissa IEC60851-3, mutta se on todettu hyväksi keinoksi ABB:llä valita parhaat kuparilangat moottorin käämityksen valmistukseen. Normaali kuumentamistestin lämpötila on 200 °C ja kesto aika 48 tuntia. Kuumentaminen voidaan suorittaa ennen tai jälkeen langan kiertämistä. Jos ensimmäisen

kuumentamisen aikana ei saada aikaan poikkeamia eristekerroksen pinnalla, voidaan testi suorittaa uudelleen korkeammassa lämpötilassa. Tällöin myös kuumentamisaikaa lyhennetään. Yleensä poikkeamia saadaan aikaan silloin, kun kuumentaminen suoritetaan ennen langan kiertämistä.

Huonolaatuisessa langassa eristekerros alkaa hilseillä pois Mandrel-testin aikana. Siksi onkin tärkeää, että eristekerroksen pysyvyyttä tarkastellaan huolellisesti ja tarpeeksi usein, jotta vältetään poikkeamilta. Jos eristekerroksessa on vikoja, se saattaa aiheuttaa kierrossulkuja käämin sisällä. Kuvassa 10 on Mandrel-testissä havaittu huonolaatuinen lankaerä. Eriste on lähtenyt irtoamaan kuparin pinnalta, kun sitä on lähdetty kiertämään kuumentamisen jälkeen. Hyvälaatuisessa langassa vain sen väri muuttuu kuumentamisen jälkeen, mutta eristekerros ei lähdä hilseilemään. /12/



Kuva 10. Eristekerros on lähtenyt irtoamaan Mandrel-testissä. /12/

7.1.3 Peel-testi

Peel-testissä tutkitaan emalin pysyvyyttä kuparilangoissa, joiden halkaisija on 1 mm tai sitä suurempi. Tässä testissä kuparilankaa kierretään pituussuunnassa ja samalla siihen kohdistetaan veto, jotta lanka pysyisi suorana kiertämisen aikana. Testi perustuu standardeihin IEC60851-3 ja IEC60317-0-1. Lankaa leikataan 50 cm pala ja se asetetaan koneeseen, joka suorittaa Peel-testin. Lankoja voidaan kuumentaa uunissa, kuten Mandrel-testissä.

Kierrosmäärä R_{KL} riippuu eristämättömän langan paksuudesta d_{nom} ja se voidaan määrittää kaavan 7 avulla. K on vakio (110 mm), joka on määrätty polyesteri ja polyesteri-imidi-pinnoitteisille langoille.

$$R_{KL} = \frac{K}{d_{nom}} \quad (7)$$

Jotta lankaan saadaan tarvittava veto, valitaan sopivan kokoinen punnus. Punnuksen koko ja langan kierrosmäärä eri lankapaksuuksille on esitetty taulukossa 5, jotka on määritelty standardissa IEC60851-3. /12/

Taulukko 5. Punnuksen koko ja langan kierrosmäärä eri lankapaksuuksille Peel testissä. /12/

<i>Langan Halkaisija (mm)</i>	<i>Punnus (N)</i>	<i>Kierrosmäärä</i>
1,50	40	73
1,40	25	78
1,32	25	83
1,25	25	88
1,18	25	93
1,12	25	98

7.1.4 Lämpilyöntimittaus

Lämpilyöntimittauksessa testataan kuparilangan pinnoitteen eristyskykyä. Testi perustuu standardiin IEC60851-5. Kuparilangasta leikataan noin 60 cm pätkä, johon merkitään 5 mittauspistettä. Tämän jälkeen lankaan asennetaan hauenleuka ja jännitettä nostetaan testikoneessa niin kauan että virta alkaa kulkea eristeen läpi. Hyväksymiseen vaaditaan, että mittauksista 4/5 täyttää virtarajan. Taulukossa 6 on esitetty standardin vaatimukset eri kuparilangoille. Lämpilyöntimittaus voidaan suorittaa myös Peel-testin jälkeen, jos halutaan vertailla eri kuparilankojen kestävyyttä. /12/

Taulukko 6. Lämpilyöntimittauksen hyväksymisrajat eri kuparilangoille. /12/

Nominal conductor diameter mm	Minimum breakdown voltage (r.m.s. value) V					
	Grade 1 and grade 1B		Grade 2 and grade 2B		Grade 3	
	Room temperature	Elevated temperature	Room temperature	Elevated temperature	Room temperature	Elevated temperature
0,112	1 300	1 000	2 700	2 000	3 900	2 900
0,125	1 500	1 100	2 800	2 100	4 100	3 100
0,140	1 600	1 200	3 000	2 300	4 200	3 200
0,160	1 700	1 300	3 200	2 400	4 400	3 300
0,180	1 700	1 300	3 300	2 500	4 700	3 500
0,200	1 800	1 400	3 500	2 600	5 100	3 800
0,224	1 900	1 400	3 700	2 800	5 200	3 900
0,250	2 100	1 600	3 900	2 900	5 500	4 100
0,280	2 200	1 700	4 000	3 000	5 800	4 400
0,315	2 200	1 700	4 100	3 100	6 100	4 600
0,355	2 300	1 700	4 300	3 200	6 400	4 800
0,400	2 300	1 700	4 400	3 300	6 600	5 000
0,450	2 300	1 700	4 400	3 300	6 800	5 100
0,500	2 400	1 800	4 600	3 500	7 000	5 300
0,560	2 500	1 900	4 600	3 500	7 100	5 300
0,630	2 600	2 000	4 800	3 600	7 100	5 300
0,710	2 600	2 000	4 800	3 600	7 200	5 400
0,800	2 600	2 000	4 900	3 700	7 400	5 600
0,900	2 700	2 000	5 000	3 800	7 600	5 700
1,000 up to and including 2,500	2 700	2 000	5 000	3 800	7 600	5 700

For intermediate nominal conductor diameters, the figure of the next larger nominal conductor diameter shall be taken.

7.1.5 Tarkastuksissa havaitut poikkeamat

ABB:llä suoritettiin tammikuussa 2014 kuparilangalle vastaanottotarkastus. Tarkastukseen valittiin toimittajan A grade 2 tyyppin kuparilanka (paksuudet 0,90 – 1,50 mm). Taulukossa 7 on eritelty testaukseen valittujen lankojen ominaisuuksia.

Taulukko 7. Kuparilangan testaukseen valitut lankatyypit.

Wire no	Diameter (mm)	Manufacturer	Type	Short name in result tables	Grade	Patch no.
1	0.90	A	X	0.90:1	2	71688-01
2	0.90	A	X	0.90:2	2	89113-01
3	1.06	A	X	1.06:1	2	86415-01
4	1.06	A	X	1.06:2	2	93258-01
5	1.12	A	X	1.12:1	2	92618-01
6	1.12	A	X	1.12:2	2	93964-01
7	1.18	A	X	1.18:1	2	92602-01
8	1.18	A	X	1.18:2	2	94201-01
9	1.25	A	X	1.25:1	2	94622-01
10	1.25	A	X	1.25:2	2	27620-01
11	1.32	A	X	1.32:1	2	94882-01
12	1.32	A	X	1.32:2	2	96273-01
13	1.40	A	X	1.40:1	2	90153-01
14	1.40	A	X	1.40:2	2	94814-01
15	1.50	A	X	1.50:1	2	96475-01
16	1.50	A	X	1.50:2	2	96444-01

Tutkinnassa 0,90 mm paksuinen lanka ei läpäissyt Mandrel-testiä, koska eristekerros lähti irtomaan kuparin pinnalta, kun sitä lähdettiin kiertämään halkaisijansa ympäri. Kuumennuksen jälkeen erot saatiin vielä paremmin näkyviin ja eristeen halkeilu oli selkeästi nähtävissä. Kuvassa 11 sivulla 36 on näkymää eristeen halkeilusta ennen ja jälkeen kuumennuksen.

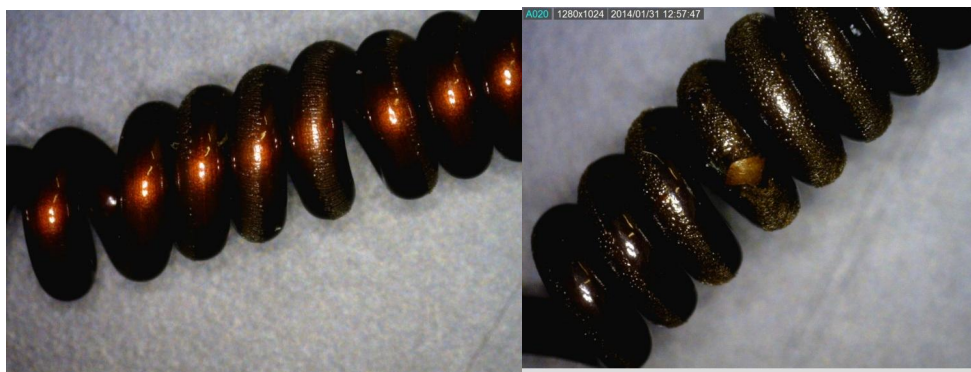
Taulukossa 8, sivulla 36 on yhteenveto lankojen testauksista. Kaikki muut läpäisivät kuormitustestin 0,90 mm paksuista lankaa lukuun ottamatta. Suuressa osassa langoista eristekerroksen paksuus jäi vajaaksi, mutta ne kuitenkin läpäisivät läpilyöntitestauksen, joten tässä tapauksessa eristekerroksen paksuudella ei ole suurta merkitystä. Tilanteissa, joissa moottorin lämpenemä nousee riittävän suureksi ja

eristekerros alkaa reagoimaan kuumuuteen, voi eristekerroksen paksuudella olla ratkaiseva merkitys.

Taulukko 8. Kuparilangan testausraportin yhteenveto

Wires	1	2	3	4	5	6	7	8
	0.90:1	0.90:2	1.06:1	1.06:2	1.12:1	1.12:2	1.18:1	1.18:2
Dimen-sions	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Mandrel	NOT PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Break-down voltage	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Result	NOT PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D

Wires	9	10	11	12	13	14	15	16
	1.25:1	1.25:2	1.32:1	1.32:2	1.40:1	1.40:2	1.50:1	1.50:2
Dimen-sions	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Mandrel	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Break-down voltage	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D
Result	PASSED	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D	PASSE D



Kuva 11. Eriste lähtenyt irtoamaan Mandrel-testissä. Vasemmalla lanka ennen kuumennusta ja oikealla kuumennuksen jälkeen.

7.2 Alumiini

Jokaisen toimittajan alumiinin laatu tarkastetaan ABB:llä kaksi kertaa vuodessa. Alumiinista lähetetään näyte materiaalin pitoisuuksien tutkimista varten. Saatuja mittaustuloksia vertaillaan määrättyyn standardiin. Laatu voidaan tutkia myös alumiinin kiderakenteen tarkastelulla heti roottorin valamisen jälkeen. Kiderakenteetarkastuksessa roottorin siivestä leikataan pala pois heti valamisen jälkeen ja näyte lähetetään tutkittavaksi materiaalilaboratorioon. Alumiinin sähköisiä ominaisuuksia voidaan tutkia mittaamalla sähkönjohtavuus joko valmiista roottorista tai alumiiniharkosta. /7/

7.2.1 Roottorivaluun käytettävän alumiiniseoksen vaatimukset

ABB:llä roottorin valmistukseen käytettävä alumiini on 99,5 % puhdasta, joten siihen ei ole lisätty juuri lainkaan muita seosaineita. Alumiiniharkon tulee olla neutseellistä (uudelleen sulattamatonta) metallia. Seosaineiden määrä on vähäinen, koska ne heikentävät alumiinin sähkön- ja lämmönjohtavuuskykyä. Yleensä alumiiniin lisätään muita seosaineita, joilla pyritään parantamaan alumiinin koostumusta ja helpottamaan valamista. Tämä ei kuitenkaan yleensä sovi sähköjohteisiin, vaan alumiinin tulee olla lähes puhdasta. Alumiiniseoksen koostumus on määritelty ABB:n standardissa 3GZF175830-1.

Pii (Si) on tärkein alumiinin seostamiseen käytetty alkuaine. Yleensä piin osuus seoksessa on 7-12 %, koska sillä pyritään laskemaan seoksen sulamispistettä. Lisäksi se parantaa sulan juoksevuuutta ja antaa alumiinille kovuutta. ABB:n käyttämässä alumiinissa piin osuus on kuitenkin noin 0,05 %.

Rauta (Fe) lisää alumiiniseoksen korroosioriskiä, jos sen pitoisuus on suuri. Rautaa lisätään alumiiniseokseen yleensä 1,2 %, koska se estää alumiiniseosta tarttumasta muottipesän pintaan valamisen aikana. ABB:n käyttämän alumiiniseoksen rautapitoisuus on vain noin 0,1 %.

Seos sisältää myös muita epäpuhtauksia, kuten titaania (Ti), vanadiinia (V), kromia (Cr) ja mangaania (Mn). Näiden aineiden yhteen laskettu pitoisuus saa mak-

simissaan olla 0,025 %. Kaikkien epäpuhtauksien summa saa olla maksimissaan 0,5 %. Raudan ja piin suhde (Fe/Si) tulee olla vähintään 2. /17/

7.2.2 Alumiinin koostumuksen tutkiminen

Kesällä 2013 kaikki toimittajilta saadut materiaalitodistukset kirjattiin Excel:iin ja vertailtiin alumiinin ainepitoisuuksia. Todistuksista voidaan todeta, että seoksen alumiinipitoisuus on standardien määräämän 99,5 % yläpuolella. Ainoana poikkeamana havaittiin, että raudan ja piin suhde jää suuressa osassa alle arvon 2 (64,96 % eristä). Raudan ja piin määrä ABB:n alumiiniseoksessa on kuitenkin hyvin vähäinen, joten sen vaikutus sähköisiin ominaisuuksiin on lähes mitätön. Tämä ei myöskään vaikuta huomattavasti alumiinin valettavuuteen. Jos poikkeama on suuri, se voi aiheuttaa pieniä halkeamia valussa. Liitteessä 1 on luetteloituna toimittajien alumiinin ainepitoisuudet toimituserän mukaan.

Alumiinista lähetetään myös kaksi kertaa vuodessa näytepalat ulkopuoliseen tutkimuslaboratorioon. Laboratorio suorittaa mittaukset alumiiniseoksen ainepitoisuuksista. Mittauksissa ei ole havaittu suuria eroja, kun niitä on verrattu toimittajan materiaalitodistuksiin. Taulukossa 9 sivulla 39 on vertailtu eri toimittajien alumiinin pitoisuuksia. Kaikkien toimittajien alumiini oli yli 99,5 % puhdasta, mutta raudan ja piin suhteessa oli suuria vaihteluita.

7.2.3 Alumiinin sähkönjohtavuuden mittaus

ABB:n standardissa 3GZF175830-1 on alumiinin sähkönjohtavuudelle määrätty arvoksi vähintään 34 MS/m ($m/\Omega mm^2$). Jos sähkönjohtavuus ei ole vaaditulla tasolla, se vaikuttaa moottorin roottorivastukseen ja tätä kautta jättämään. Sähkönjohtavuus voidaan mitata suoraan alumiiniharkosta tai valmiista roottorista.

Syksyllä 2013 ABB:llä alumiinille suoritettiin sähkönjohtavuuden mittauksia eri valupisteissä. Taulukossa 9 sivulla 39 on mittauksista saatuja tuloksia. Vasemmalta on laboratoriosta saadut mittaustulokset ja oikealla tehtaalla mitatut arvot. Tau-

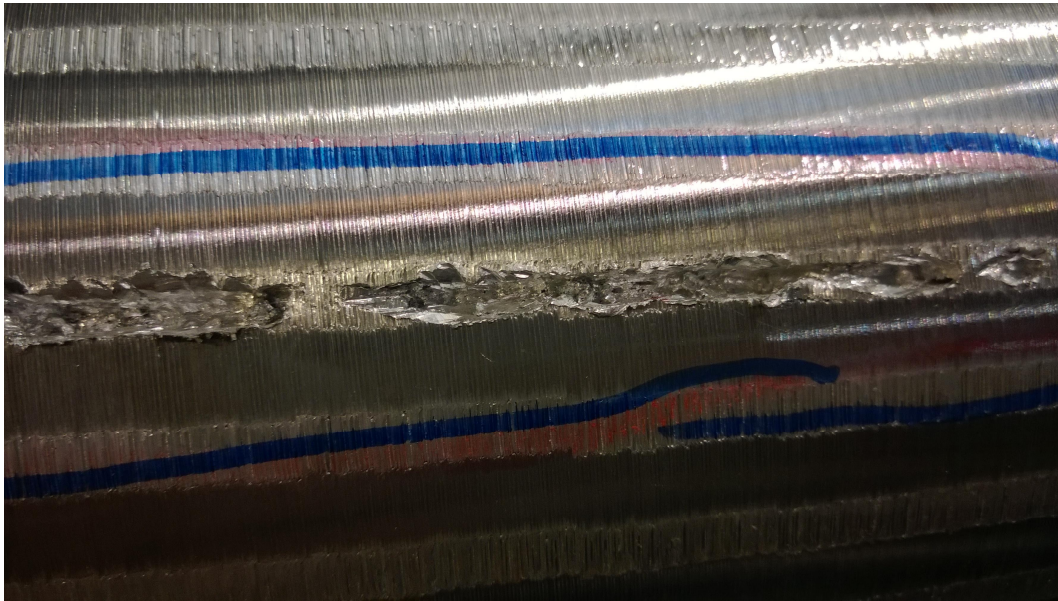
lukosta voimme huomata, että alumiinin sähkönjohtavuus täyttää vaaditun rajan ja materiaalia voidaan käyttää roottorin valamiseen. Sähkönjohtavuutta on mitattu myös valmiista roottoreista. Testiin valittiin 20 samanlaista roottoria, joissa kaikissa alumiinin sähkönjohtavuus täytti vaaditun rajan.

Taulukko 9. Alumiinin sähkönjohtavuuden mittaustulokset

Al sähkönjohtavuusmittaukset										
Toimitaja	Al sähkönjohtavuusmittaukset					Pistokokeet tehtaalla				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Al Sähkönjohtavuus										
1	35,54	34,65	34,79	35,38	34,38	35,15	34,26	34,37	35,12	36,39
2	35,24	34,58	34,37	35,73	33,68	34,49	34,59	34,56	34,33	37,08
3	35,29	34,13	34,49	35,05	33,34	34,32	34,05	34,54	35,09	36,7
4	35,51	34,16	34,52	35,35	33,38	35,31	34,11	34,42	34,38	36,33
5	35,32	34,42	34,21	35,38	33,48	35,04	34,1	34,47	34,86	36,41
max	35,54	34,65	34,79	35,73	34,38	35,31	34,59	34,56	35,12	37,08
ka.	35,38	34,39	34,48	35,38	33,65	34,86	34,22	34,47	34,76	36,58
Fe/Si	2,02	1,99	5,23	3,45						
Fe	0,117	0,151	0,23	0,176						
Si	0,058	0,076	0,044	0,051						
Al	99,81	99,74	99,71	99,77						
Kovuus /Vickers	18	19,2	19,8	19,9						
	18,7	19,5	18,9	21,2						

7.2.4 Alumiinissa tuotannon aikana ilmenneet ongelmat

Puhtaan alumiinin valamisen on teknisesti hyvin hankalaa ja se on huomattu myös roottorin valuissa. Sulan lämpötila täytyy olla oikea ja valukoneen säätöjen tulee olla kohdallaan. Suurimmaksi ongelmaksi alumiinivalussa on havaittu sen huokoisuus. Huokokset syntyvät kun sulaan liuennut vety kertyy kaasuhuokosiksi valun sekaan jähmettymisen aikana. Vety liukenee sulaan kun alumiinisula reagoi kosteuden kanssa. Huokoisuus aiheuttaa ongelmia roottorin tasapainotuksessa. Tämä kuitenkin voidaan korjata tasapainottamalla roottori. Jos huokosia kertyy paljon roottorin sauvoihin se aiheuttaa virtalämpöhäviöitä, koska johtimen pinta-ala jää vajaaksi, jolloin virtatiheys kasvaa. Kuvassa 12 sivulla 40 on roottori, jonka uraan on jäänyt huokosia valamisen jälkeen. Kuvassa 13 sivulla 40 on huokonen jäänyt roottorin oikosulkurenkaaseen valamisen jälkeen.



Kuva 12. Roottorin uriin jäänyt huokosia valamisen jälkeen.



Kuva 13. Huokonen roottorin oikosulkurenkaassa.

7.3 Sähkölevy

Sähkölevyille suoritetaan Epstein–testi, jossa testataan levyn magneettisia ominaisuuksia. Testissä levyistä leikataan liuskoja ja niitä ladotaan päällekkäin. Epstein–testissä levyn häviöt mitataan levyn valssaussuuntaan ja poikittain valssaussuuntaan nähden. Oikosulkumoottorissa käytetään dynamolevyä, jossa kiderakennetta ei ole suunnattu tiettyyn suuntaan. Kidesuunnattua levyä käytetään pääasiassa muuntajissa, koska niissä ei ole pyörivää magneettikenttää, kuten sähkömoottorissa.

7.3.1 Sähkölevylle asetetut vaatimukset

ABB:llä on käytössä tällä hetkellä 4 erilaista levytyyppiä. Näistä yleisimmin käytössä on M600-50A–levy. Levylle on määrätty tiettyjä mekaanisia vaatimuksia, koska niillä on suuri vaikutus sen työstettävyyteen. Levyntyöstökoneiden asetukset ovat hyvin tarkkoja ja levyn laadun vaihtelulla voi olla suuri vaikutus niiden toimintaan. Rautahäviöille on määrätty tietty yläraja 1,5 T ja 50 Hz arvolla. Sähkölevyn lämmönjohtavuudelle on myös määrätty tietyt rajat. Tyypillisesti lämmönjohtavuus eri levytyypeillä on 20 – 35 W/mK. Taulukossa 10 on luetteloina ABB:n tärkeimpiä vaatimuksia sähkölevylle.

M600-50A–levytyyppiä käytetään tavallisesti IE2–hyötysuhdeluokan moottoreissa. Muita vähemmän häviöllisiä laatuja käytetään, kun halutaan pienentää rautahäviöitä ja sitä kautta moottorin hyötysuhdetta. Lisäksi levytyyppi valitaan moottorin syöttötaajuuden mukaan, koska sillä on suuri vaikutus pyörrevirtatehohäviöihin. Pienemmän rautahäviön omaavilla levylaaduilla on myös huonompi lämmönjohtavuus. Lisäksi ne ovat usein kalliimpia ja vaikeampia työstää kovuudesta johtuen.

Taulukko 10. Eri sähkölevytyypit ja niiden standardien mukaiset vaatimukset.

Levytyyppi	Paksuus mm	Eristepaksuus μm	Eristysvastus Ωcm^2	Mytöraja Re / N/mm ²	Murtolujuus Rm / N/mm ²	Re / Rm	Venyä %	Kovuus HV5	Rautahäviö W/kg 1,5 T / 50Hz
M270-50A	0,5 1 - 2		≥ 5	450±50	≥ 540	$\geq 0,65$	>20	-200	$\leq 2,7$
M350-50A	0,5 1 - 2		≥ 5	310±20	≥ 400	$\geq 0,65$	>20	-160	$\leq 3,5$
M400-50A	0,5 1 - 2		≥ 5	300±20	≥ 400	$\geq 0,65$	>20	130 - 180	≤ 4
M600-50A	0,5 1 - 2		≥ 5	280±20	≥ 370	$\geq 0,65$	25 - 35	120 - 150	$\leq 6,0$

7.3.2 Sähkölevyn laadun tutkiminen ja siinä ilmenneet ongelmat

Otimme käsittelyyn yleisimmin käytettävän levytyypin M600-50A. Tutkimme levytoimittajilta saatuja materiaalitodistuksia ja kirjasimme ne Excel-taulukkoon. Liitteessä 2 on taulukoituna sähkölevyn mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet toimituserän mukaan. Tutkimuksesta havaitsimme, että levyn kovuus oli useassa toimituserässä liian korkea. Standardissa kyseiselle levytyypille on HV5 asteikolla määrätty ylärajaksi 150. Levyn kovuus vaikuttaa levyntyöstökoneen työkalujen kulumiseen. Tähän asiaan on kuitenkin kiinnitetty tehtaalla huomiota ja koneiden teriä huolletaan useammin. Jos työkalut ovat kuluneita, leikkauksen reunaan jää jäystettä. Jäystettä on mahdoton poistaa kokonaan, mutta sen korkeutta voidaan pienentää, huolehtimalla työkalujen kunnosta.

Sähköisten ominaisuuksien tutkimisessa selvisi, että levyn rautahäviö vaihtelee 4,7 – 5,65 W/kg välillä. Häviöiden keskiarvo oli 5,18 W/kg. Levyn maksimihäviöksi on standardissa määrätty 6,0 W/kg. Sähköiset ominaisuudet täyttivät standardien määräämät rajat.

Sähkölevylle on suoritettu mittauksia kaksi kertaa vuodessa ABB AB:n Corporate Research-yksikössä Västeråsissa. Mittausraporteissa ei ole havaittu suuria poikkeamia rautahäviöissä. Ainoaksi poikkeamaksi havaittiin levyn M600-50A liian alhainen eristysvastus. Huono eristysvastus johtuu käytössä olevasta eristeestä X, jonka eristysvastus ei riitä ABB:n standardien määräämään $5 \Omega/\text{cm}^2$ alarajaan. Laboratoriossa mitattu arvo oli noin $4 \Omega/\text{cm}^2$. Tilalle ei ole vielä löydetty parempaa eristemateriaalia, koska muut testatut eristemateriaalit ovat aiheuttaneet ongelmia levyntyöstökoneissa.

7.3.3 Sähkölevyn tutkiminen Adept-laskentaohjelmalla

Päätimme tutkia sähkölevyn rautahäviöiden vaikutusta oikosulkumoottorin suoritusarvoihin. Suoritimme mittaukset Adept-laskentaohjelmalla, joka on tarkoitettu moottorin arvojen laskemiseen. Muutimme ohjelmassa sähkölevyn ominaisuuksia ja vertailimme saatuja tuloksia keskenään.

Ensimmäisessä testissä muutimme moottorin levytyyppiä, koska eri levyillä mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet vaihtelevat. Taulukossa 11 on moottorin laskennalliset arvot eri levytyypeillä. Kun levyn rautahäviö pienenee, moottorin tyhjäkäyntiteho ja häviöteho tippuvat. Samalla myös staattorin ja roottorin lämpenemä jää pienemmäksi. Nimellisvirta ja hyötysuhde nousevat, kun taas tehokerroin laskee.

Virran nousu johtuu magnetoimisvirran I_m kasvusta. Magnetoimisvirran kasvuun puolestaan vaikuttaa se, että magnetoimisvastus R_m kasvaa. Magnetoimisvastuksen kasvuun vaikuttaa vähähäviöllisemmän levylaadun alhaisempi permeabiliteetti μ . Verkosta otettu loisteho Q kasvaa, johtuen magnetoimisvirran noususta. Virran nousu lisää käämin virtalämpöhäviöitä P_k . Kun verrataan levyjä M600-50A ja M270-50A, verkosta otettu loisteho on noin 2 kvar suurempi, kun käytetään M270-50A levytyyppiä. Loisteho voidaan laskea kaavalla 8.

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \sin \varphi \quad (8)$$

Moottorin verkosta ottama pätöteho pienenee, koska häviöt ovat pienemmät. Verkosta otettu pätöteho voidaan laskea kaavalla 9. Kun verrataan levyjä M600-50A ja M270-50A, verkosta otettu pätöteho on noin 650 W pienempi, kun käytetään M270-50A levytyyppiä. Tämä teholuku pätee myös, kun vertaillaan näiden kahden levytyypin häviötehoa keskenään taulukossa.

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (9)$$

Taulukko 11. Moottorin suoritusarvot eri levytyypeillä.

Moottorityyppi: M3BP 315SMA 4, 110 kW, 400VD 50Hz				Kuormitus 50% nimellisestä			Kuormitus 100% nimellisestä			Läpötilan nousu / K	
Levytyyppi	Nimellisvirta I/A	Tyhjäkäyntiteho / kW	Häviöteho / kW	Hyötysuhde %	Virta I/A	cosφ	Hyötysuhde %	Virta I/A	cosφ	Staatordi	Roottori
M600-50A	196,9	2,41	6,03	94,09	115,8	0,73	94,74	196,9	0,85	59,3	78,5
M400-50A	197,1	2,07	5,69	94,63	116,5	0,72	95,02	197,1	0,85	56,8	76,7
M270-50A	199,8	1,71	5,35	95,18	120,9	0,69	95,3	199,8	0,83	54,5	75,1

Seuraavassa testissä tutkimme, miten M600-50A-levyn rautahäviön vaihtelu vaikuttaa moottorin hyötysuhteeseen. Liitteessä 2 on kirjattu toimittajalta saatujen

materiaalitodistuksien arvoja. Arvoista huomasimme, että levyn rautahäviössä on hajontaa.

Muutimme Adept-ohjelmaan levyn häviön arvoa ja vertailimme sen jälkeen laskennasta saatuja arvoja. Teimme laskelman kolmella eri häviön arvolla. Taulukosta 12 voimme havaita, että hyötysuhde pienenee, kun levyn rautahäviöt kasvavat. Hyötysuhteessa on 0,64 % vaihtelu suurimman ja pienimmän arvon välillä. Levyn rautahäviöiden vaihtelu voi muuttaa moottorin suoritusarvoja oletetusta. Moottorin mitoittamisen kannalta on tärkeää, että levyn laatu on tasaista, jotta vältetään poikkeamilta.

Taulukko 12. M600-50A levyn testaus Adept-ohjelmalla eri rautahäviöiden arvoilla.

Moottorityyppi: M3BP 315MLA 4, 400 kW, 400VD 50Hz, Levityyppi 600-50A				Kuormitus 50% nimellisestä			Kuormitus 100% nimellisestä			Läpötilan nousu / K	
Levyn häviö W/kg	Nimellisvirta I/A	Työskäyntiteho / kW	Häviöteho / kW	Hyötysuhde %	Virta I/A	cosφ	Hyötysuhde %	Virta I/A	cosφ	Staattoni	Roottori
4,73	690	5,31	14,61	96,24	390	0,772	96,48	690	0,867	75,4	128,7
5,5	690,7	5,83	15,13	96	390	0,773	96,36	690,7	0,868	77,3	130,4
6,5	691	6,11	15,41	95,88	390,9	0,773	96,29	691	0,868	78,6	131,5

8 TULOSTEN ANALYSOINTI JA KEHITYSIDEAT

Tässä luvussa käsittelemme tutkimuksista saatuja tuloksia ja niiden vaikutuksia oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen. Lisäksi pohdimme, miten tuotannon ja materiaalin laadun seuranta voidaan parantaa.

8.1 Materiaalien laadun tilanne

Työssä suoritettiin aktiivimateriaaleille laadun kartoitus. Kartoittamisen jälkeen pääsimme käsitykseen siitä, vastaako toimittajilta ostettu materiaali ABB:n standardeja ja mihin asioihin tulisi jatkossa kiinnittää huomiota.

8.1.1 Kuparilanka

Kuparilangalle tehdyistä testeistä voidaan todeta, että sen laadussa ei ole suuria puutteita. Käämin virtalämpöhäviöiden kannalta tärkeintä on langan halkaisija ja mittauksissa ei ole havaittu poikkeamia dimensioiden mitoissa. Eristekerroksen paksuudessa oli havaittavissa poikkeamia ja joissain testeissä eristekerroksen paksuus jäi vajaaksi. Nämä langat läpäisivät kuitenkin läpilyöntimittauksen, joten tässä tapauksessa eristekerroksen paksuudella ei ole suurta merkitystä.

Testausraporteissa havaittiin yksittäisiä hylkäämisiä Mandrel-testissä. Hylkäämiset kohdistuvat pääasiassa alle 1,0 mm paksuisiin lankoihin. Eristekerroksen pysyvyyden tarkkailuun olisi syytä jatkossa kiinnittää entistä tarkemmin huomiota. Mandrel-testin suorittaminen on nopea toimenpide, joten yksittäisten pistokokeiden lisääminen olisi suotavaa. Usein poikkeamat saadaan näkyviin vasta kuumentamisen jälkeen, jota ei ole määritelty IEC-standardissa. Tällä tavalla voidaan kuitenkin vertailla eri kuparilankojen kestävyyttä ääritilanteissa.

8.1.2 Alumiini

Alumiinin koostumuksen tutkinnassa ilmeni poikkeavuuksia raudan ja piin suhteessa. Tämä voi aiheuttaa hiushalkeamia valun pinnalla, mutta toistaiseksi niissä ei ole havaittu poikkeamia. Piin ja raudan suhdetta tulisi kuitenkin seurata jatkossa, jotta halkeamilta vältyttäisiin. Halkeamat vaikuttavat alumiinin sähkönjohta-

vuuteen ja roottorin kestävyysnopeudessa. Muiden epäpuhtauksien määrä oli sallituissa rajoissa. Alumiinin laatua tutkittiin myös sähköjohtavuuden mittauksella. Sähköjohtavuus oli jokaisessa mittauksessa vaaditun 34 MS/m minimirajan yläpuolella.

8.1.3 Sähkölevy

Rautahäviöiden vertailusta ilmeni, että levyn häviöissä oli hajontaa. Levyn häviöt jäivät kuitenkin alle määrätyn maksimiarvon. Hajonta johtuu levyn koostumuksesta, koska eri seosaineet vaikuttavat magnetoimishäviöiden suuruuteen. Jatkossa tulisi kiinnittää huomiota levyn laadun tasaisuuteen, koska pienetkin eroavaisuudet vaikuttavat moottorin häviöihin, kuten kappaleen 7.3.3 Adept-ohjelman testauksessa todettiin.

Myös levyn kovuudessa havaittiin poikkeamia. Levyn kovuutta tulisi seurata, jotta osattaisiin ennakoida työkalujen huolto ja välttyttäisiin korkeasta jäysteestä. Jäysteen korkeus vaikuttaa rautasydämen levyjen määrään, koska levyjä ladottaessa jäyste jää levyn väliin. Levyjen määrä vaikuttaa raudan pinta-alaan ja sitä kautta moottorin magnetoimisvirtaan. Jäystettä voidaan pienentää myös levyn lämpökäsittelyllä, mutta tämä on valmistusteknisesti haastavaa, koska levyjen määrä tehtaalla on suuri ja se lisää kustannuksia huomattavasti.

8.2 Materiaalin ja tuotannon laadun vaikutukset moottorin hyötysuhteeseen

Kuvassa 14, sivulla 48 on yhteenveto moottorin hyötysuhteeseen vaikuttavista häviöistä ja siitä, miten aktiivimateriaalin laatu vaikuttaa näiden suuruuteen. Kuvassa ei ole käsitelty laakereista ja tuulettimesta syntyviä mekaanisia häviöitä. Mekaanisia häviöitä voidaan pienentää huolehtimalla laakerien kunnosta. Tuuletin koko voidaan pienentää, jos muut häviöt jäävät vähäiseksi, koska niillä on suora vaikutus moottorin lämpenemään ja tuuletuksen tarpeeseen.

Alumiinin osalta tulee huolehtia sen johtavuudesta ja pinta-alasta. Tällöin materiaalin resistanssi jää alhaisemmaksi ja virtalämpötehohäviöt ovat pienemmät. Pin-

ta-ala on riippuvainen valun huokoisuudesta. Huokoisuus on tällä hetkellä suurin ongelma roottorin valmistuksessa ja sen ehkäisemiseen tulisi käyttää aikaa ja resursseja.

Staattorin käämeissä syntyviin virtalämpöhäviöihin vaikuttaa käämin resistanssi. Resistanssia voidaan pienentää huolehtimalla kuparilangan johtavuudesta ja sen pinta-alasta. Käämin virtaan vaikuttaa osittain magnetoimisvirta, joka on vakiovuokoneella likimain tyhjäkäyntivirta. Moottorin magnetoimisvirtaan vaikuttaa magneettivastus R_m . Magneettivastukseen vaikuttaa magneettipiirissä raudan pinta-ala ja sen permeabiliteetti. Raudan pinta-alan ja permeabiliteetin tulisi olla mahdollisimman suuria. Tällä hetkellä jäyste vaikuttaa levyjen määrään magneettipiirissä ja sitä kautta raudan pinta-alaan. Sähkölevyn permeabiliteetti on puolestaan riippuvainen sen seosaineista. Mitä pienemmät ovat sähkölevyn magnetoimishäviöt, sitä pienemmäksi jää myös sen permeabiliteetti ja tällöin myös magneettivastus kasvaa. Adept-ohjelman testeistä huomasimme kuitenkin, että vähähäviöllisempi levylaatu kasvattaa moottorin hyötysuhdetta, joten levyn magnetoimishäviöillä on suurempi vaikutus. Magnetoimishäviöihin vaikuttavat moottorin pyörrevirtatehohäviöt ja hystereesihäviöt. Pyörrevirtatehohäviöihin vaikuttaa myös taajuus, vuontiheys ja raudan pinta-ala.

8.3.1 Materiaalitutkimusten raportointi ja arkistointi

Tällä hetkellä materiaaleille tehtävien testauksien arkistoinnissa on suuria puutteita. Usein testausraportit jäävät yhden ihmisen tietokoneelle arkistoon, jolloin laatu- ja tuotekehitysosastolla ei ole pääsyä tietoihin.

Materiaalien testauksista tulisi laatia kattava raportti ja ne tulisi arkistoida ABB:n tietokantaan. Tällä tavalla tieto on jokaisen löydettävissä ja jokainen osasto on tietoinen materiaalin sen hetkisestä laadusta. Opinnäytetyötä tehtäessä raportointien löytäminen oli erittäin vaikeaa ja aikaa vievää. Raportit olivat pääasiassa puutteellisia ja niitä oli vaikea jäljittää tiettyyn toimituserään.

8.3.2 Valmistustekniikan parantaminen

Tuotannon aikaiset ongelmat tulisi pystyä ehkäisemään ajoissa. Jäysteen ehkäisyyn tulisi puuttua entistä herkemmin, koska sen tuomat ongelmat aiheuttavat tällä hetkellä suuria kustannuksia.

Alumiinin huokoisuuden ehkäisyyn tulisi jatkossa panostaa entistä tarkemmin. Tällä hetkellä huokoisuus aiheuttaa ongelmia roottorin valmistuksessa. Rottorin valmistus tulee kalliiksi ja akselit tehdään usein mittatilaustyönä, joten huokoisuuden tutkiminen pitäisi pystyä suorittamaan ennen akselin puristusvaihetta. Jos huokoisuus todetaan vasta akselin puristamisen jälkeen, joudutaan koko roottori romuttamaan.

LÄHTEET

- /1/ ABB Oy 2014, ABB Suomessa. Viitattu 30.1.2014.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- /2/ ABB Oy 2014, ABB:n historiaa Aseasta ja BBC:stä lähtien. Viitattu 30.1.2014. <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/asea-ja-bbc>
- /3/ ABB Oy 2014, Juhlavuoden 2014 erikoisnumero, Teema, Saunasta maailmalle (sivu 11). Viitattu 30.1.2014.
[http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot378.nsf/veritydisplay/d8750960f584ea4dc1257c32002e6002/\\$file/teema%203_2013.pdf](http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot378.nsf/veritydisplay/d8750960f584ea4dc1257c32002e6002/$file/teema%203_2013.pdf)
- /4/ ABB Oy 2014, Motors and Generators, Energia- ja tuotantotehokkuutta yli 100 vuoden ajan. Viitattu 30.1.2014.
<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105408A8219&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>
- /5/ ABB Oy 2014, Who we are – ABB in brief. Viitattu 30.1.2014.
<http://new.abb.com/about/abb-in-brief>
- /6/ ABB Oy Motors, Oikosulkumoottorin laskentaohje 18.03.2002.
- /7/ ABB Oy Motors, Motors ohjeet/Aktiiviosien materiaalien vastaanottotarkastus.
- /9/ ABB Oy Motors, Motors ohjeet/Kelausohje ja Kääminnän työohje.
- /10/ ABB Oy, Artikkelit: Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Viitattu 19.2.2014.
<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.aspx>
- /11/ ABB Oy, Motors and Generators, Low voltage process performance motors according to EU MEPS. Viitattu 3.4.2014.
<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- /12/ ABB Oy, Lankatestausohje. 5.7.2012.
- /13/ Aarniovuori, L. 2005, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö: Sähkösimulaattori ja sen suorituskyky. Viitattu 30.1.2014.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/29947/TMP.objres.227.pdf?sequence=1>
- /14/ Metallcenter, Tietoa kuparista 2014. Viitattu 3.2.2014.
<http://www.metallcenter.fi/Kupari.aspx>

- /15/ Physics.Aalto.fi, Ferromagnetismi, kappale 34.2.1. Viitattu 10.2.2014.
<http://physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/Teoria/tyo34.pdf>
- /16/ Sapa: Buildingsystem 2014, Alumiinin pikakurssi. Viitattu 30.1.2014.
<http://www.sapagroup.com/fi/company-sites/sapa-building-system-ab/sapa-rakennusjarjestelmat/me/varfor-aluminium/egenskaper/>
- /17/ ValuAtlas, CAE DS 2006 – Painevaluseokset. Viitattu 3.4.2014.
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf
- /18/ VEM motors Finland Oy, Pikaopas, EU:n uusi lainsäädäntö. Viitattu 19.2.2014. http://www.vem.fi/userData/vem/downloads/vem-motors-fi/esitteet/pikaopas_moottoreiden_hyotysuhteet_2.pdf
- /19/ Verkkonen, V. Haastattelu 3.2.2014.
- /20/ Verkkonen, V. Vaasan ammattikorkeakoulu, Sähkömoottorikäytöt, Epätahtikoneet 2010.
- /21/ Wikipedia 2013, Oikosulkumoottori. Viitattu 30.1.2014.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Oikosulkumoottori>

