

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Lauri Kujala

**OIKOSULKUMOOTTORIN ALUMIINISEN STAATTORIKÄÄMITYKSEN  
KEHITTÄMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 25.5.2020

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

DI Tero Käsäkangas

Työn tarkastaja

Dosentti Jere Kolehmainen

## ALKULAUSE

Tämä diplomi-insinöörin tutkintoa varten tehty työ on aikaansaannokseni ABB oy:n Motors and Generators -yksikön tutkimus- ja tuotekehitysosastolle Vaasassa.

Kiitän erityisesti ohjaajaani DI Tero Käsäkangasta siitä tuesta ja positiivisesta kannustuksesta jota sain tämän mielenkiintoisen aiheen parissa. Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä Vaasan moottoritehtaan toimihenkilöitä ja työntekijöitä, jotka olivat mukana tässä projektissani ja edesauttoivat sen valmistumista jopa sen aikana kehittyneen koronaviruspandemian aikana. Suuret kiitokset myös professori Timo Vekaralle laadukkaasta valvonnasta työn aikana sekä dosentti Jere Kolehmaiselle työn tarkastuksesta.

Valmistuessani olen saanut työskennellä Vaasan ABB:llä yhtäjaksoisesti jo viisi vuotta. Olen kiitollinen tästä koulutuksen ja työkokemuksen kokonaisuudesta, jonka Vaasan yliopisto sekä ABB ovat yhteistoiminnallaan mahdollistaneet. Haluan kiittää myös perhettäni sekä minulle tärkeimpiä läheisiä, jotka omalta osaltaan ovat tukeneet ja tulevat jatkossakin tukemaan minua läpi elämän.

Vaasassa 25.5.2020

Lauri Kujala

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	10
2 OIKOSULKUMOOTTORI	13
2.1 Rakenne ja toiminta	13
2.1.1 Aktiivi- ja passiiviosat	14
2.1.2 Johdinmateriaalit	17
2.1.3 Sähkömagneettinen induktio	18
2.2 Häviöt ja hyötysuhde	21
2.2.1 Staattorihäviöt	22
2.2.2 Roottorihäviöt	27
2.2.3 Hyötysuhteen määrittäminen	30
2.2.4 Eurooppalaiset hyötysuhdenormit	31
2.3 Ympäristövaikutukset	32
2.3.1 Materiaalien alkuperä	32
2.3.2 Materiaalien tuotanto ja hiilijalanjälki	35
2.3.3 Materiaalien kierrätettävyys	40
2.3.4 Elinkaariarviointi	41
3 STAATTORIKÄÄMITYS ALUMIINIJOHTIMELLA	42
3.1 Symmetrinen kolmivaiheinen urakäämitys	42
3.2 Staattoriura ja sen eristeet	45

3.3	Alumiinikääminnän tuotekehitys Vaasassa	46
3.4	Uppokyllästetyn jatkoliitoksen lämpövanhennuskoe	47
3.5	Staattorikäämityksen materiaalikustannukset	54
4	STAATTORIN URAMUODON OPTIMOINTI	56
4.1	Optimoinnissa käytetyt laskentaohjelmat	56
4.2	Lähtötilanteen tunnistaminen	57
4.3	Optimoinnin toteutus	58
4.4	Valmistettavien prototyyppien sähköiset laskelmat	64
5	PROTOTYYPPIEN VALMISTUS JA TESTAUS	66
5.1	Prototyyppien valmistus	66
5.2	Prototyyppien valmistuksen havainnot	69
5.3	Prototyyppien testitulokset	72
5.3.1	Vakiorakenteinen prototyyppi	72
5.3.2	Optimoitu prototyyppi	73
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	75
6.1	Tulosten tarkastelu	75
6.1.1	Alumiinikäämityksen laadukkuus	78
6.1.2	Laskelmien ja testitulosten vertailu	80
6.1.3	Alumiinikäämityksen kannattavuus	81
6.2	Tulevaisuudennäkymät	81
7	YHTEENVETO	83
	LÄHDELUETTELO	86
	LIITTEET	91

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Kreikkalaiset symbolit*

$\eta$	hyötysuhde
$\sigma_c$	johdinmateriaalin johtavuus
$\Phi$	magneettivuo

*Muut symbolit*

$a$	rinnakkaisten käämilankojen määrä staattoriurassa
$B$	magneettivuon tiheys
$B_R$	remanenssivuon tiheys
$B_S$	kyllästysvuon tiheys
$d$	sähkölevyn paksuus
$E$	sähkökentän voimakkuus
$F$	kappaleeseen kohdistuva voima
$f$	taajuus
$f_r$	roottorivirran taajuus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$H_c$	koersitiivoima
$I$	sähkövirran voimakkuus
$I_0$	oikosulkumoottorin tyhjäkäyntivirta
$J$	virrantiheys materiaalissa
$k_\theta$	lämpötilan korjauskerroin
$l$	staattoripaketin pituus
$l_{av}$	käämikierroksen keskimääräinen pituus
$l_c$	käämijohtimen pituus

$N$	käämikierrosten lukumäärä
$n$	pyörimisnopeus
$n_s$	synkroninopeus
$p$	napapariluku
$P_{Cu,r}$	roottorin virtalämpöhäviöt
$P_{Cu,s}$	staattorin kuparihäviöt
$P_{exc}$	staattorin lisähäviöt
$P_{Fe}$	rautahäviöt
$P_{Fe,r}$	roottorin rautahäviöt
$P_{Fe,s}$	staattorin rautahäviöt
$P_{fr,tot}$	kitka- ja tuuletushäviöt
$P_{fw}$	korjatut kitka- ja tuuletushäviöt
$P_h$	hystereesihäviöt
$P_{in}$	ottoteho
$P_{LL}$	lisähäviöt
$P_{out}$	antoteho
$P_p$	pyörrevirtahäviöt
$P_s$	staattorihäviöt
$P_T$	kokonaishäviöt
$P_\delta$	ilmaväliteho
$R_{DC}$	resistanssi tasavirralla
$s$	jättämä
$S_c$	johtimen poikkipinta-ala
$t$	aika
$V$	tilavuus

$W$	kahden staattoriuran perifeerinen etäisyys
$W_h$	magnetointi- ja demagnetointisyklin energia

### *Lyhenteet*

3TG	konfliktimineraalien ryhmä (Tin, Tantalum, Tungsten, Gold)
ADEPT	Advanced Electrical Dimensioning Tool, ABB:n las- kentaohjelma sähkömoottoreille ja -generaattoreille
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
ICA	International Copper Association, kuparin kestäväää käyttöä edistävä kansainvälinen yhdistys
ICSG	International Copper Study Group, kuparia tuottavien ja käyt- tävien maiden hallitustenvälinen järjestö
IEA	International Energy Agency, kansainvälinen energiajärjestö
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
LCA	Life Cycle Analysis, elinkaariarviointi
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, ta- loudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Che- micals, Euroopan unionin asetus kemikaalirekisteröinnistä, ke- mikaalien arvioinnista, lupamenettelyistä sekä rajoituksista
RMI	Responsible Minerals Initiative, vastuullisen mineraalien han- kinnan toimintaa edistävä järjestö
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in elect- rical and electronic equipment, Euroopan unionin säännös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa
RSN	Responsible Sourcing Network, kaivostoiminnan ihmisoikeuk- sia puolustava järjestö
SX-EW	Solvent extraction and electrowinning, kaksivaiheinen hydro- metallurginen prosessi

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Lauri Kujala
<b>Diplomityön nimi:</b>	Oikosulkumoottorin alumiinisen staattorikäämityksen kehittäminen
<b>Valvoja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Ohjaaja:</b>	DI Tero Käsäkangas
<b>Tarkastaja:</b>	Dosentti Jere Kolehmainen
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Koulutusohjelma:</b>	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2014
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2020

**Sivumäärä: 105**

---

**TIIVISTELMÄ**

Tässä työssä on tutkittu yleisesti käytetyn kuparikäämityksen korvaamista edullisemmalla alumiinikäämityksellä hyötysuhdedirektiivien mukaisissa rajoissa oikosulkumoottorin kustannustehokkuuden parantamiseksi. Alumiinin noin 40 prosenttia huonompi sähkönjohtavuus kupariin verrattuna sekä alumiinin pinnalle muodostuva resistiivinen oksidikerros luovat alumiinisen staattorikäämityksen kehittämiseksi kuitenkin haasteelliset olosuhteet.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää ABB oy:n Motors and Generators -yksikölle mahdollisimman kustannus- ja energiatehokas alumiinikäämillinen ratkaisu. Työssä tutkittiin tarkemmin 45 kW:n kaksinapaista oikosulkumoottoria. Tutkimusongelmaa lähestyttiin julkaistujen tutkimusten, sähkömagneettisen teorian sekä simulointilaskelmien avulla. Työssä esitetään myös kuparin ja alumiinin ympäristövaikutuksia.

Tutkimusta varten valmistettiin kaksi alumiinikäämillistä prototyypimoottoria, joista ensimmäisen staattori tehtiin tuotannon vakiolla staattoriuralla ja käämilankamäärällä. Toisen prototyypin staattori valmistettiin tässä työssä laskennallisesti optimoidulla staattoriuralla, mikä mahdollisti suuremman käämilankamäärän urassa. Tällä pyrittiin kasvattamaan oikosulkumoottorin hyötysuhdetta vakioon rakenteeseen verrattuna. Lisäksi työssä tutkittiin uppokyllästettyjen käämivyöhtien sähköisten liitosten ikääntymistä lämpövanhennuskokeiden avulla. Tuloksena löydettiin prototyypimoottorien alumiinikäämityksille sopivat kytkentämenetelmät.

Työn tuloksena saavutettiin molemmilla prototyypimoottoreilla IE3-hyötysuhdeluokka, joista optimoidulla rakenteella hyötysuhde oli 0,28 prosenttiyksikköä parempi. Testitulosten ja työn muun tarkastelun perusteella voidaan todeta alumiinikäämityksen olevan tuotannollisesti täysin toteutettavissa. Myös alumiinikäämityksen oikosulkumoottorin välitöiden kustannusten todettiin olevan tässä tapauksessa noin 20 prosenttia pienemmät vakiorakenteeseen kuparikäämilliseen rakenteeseen verrattuna.

---

**AVAINSANAT:** Oikosulkumoottori, staattori, alumiini, käämi, hyötysuhde

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of Technology and Innovations**

<b>Author:</b>	Lauri Kujala
<b>Topic of the Thesis:</b>	Development of aluminum stator winding for induction motor
<b>Supervisor:</b>	Professor Timo Vekara
<b>Instructor:</b>	M.Sc. Tero Käsäkangas
<b>Evaluator:</b>	Docent Jere Kolehmainen
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Energy and Information Technology
<b>Major:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2014
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2020

**Pages: 105**

---

**ABSTRACT**

In this thesis the replacement of commonly used copper winding with a less expensive aluminum winding is investigated, within the limits of the efficiency directives to improve the cost-efficiency of the induction motor. However, the approximately 40 percentage lower electrical conductivity of aluminum compared to copper, as well as the resistive oxide layer formed on the surface of aluminum, create difficult conditions for the development of aluminum-wound stator.

The target of this thesis was to find the most cost-efficient and energy-efficient aluminum-wound stator solution for ABB Ltd Motors and Generators business unit. The 45 kW two-pole induction motor was studied in more detail. The research problem was approached by means of published studies, electromagnetic theory and simulation calculations. The work also presents the environmental effects of copper and aluminum.

Two prototype motors with aluminum windings were manufactured for this thesis. The stator of the first prototype was made with a standard stator slot and winding wires. The stator of the second prototype was manufactured with a stator slot computationally optimized in this work, which allowed larger winding volume in the slot. The aim of this was to increase the efficiency of the induction motor. In addition, aging of the electrical connections of impregnated windings was investigated by means of thermal aging tests. As a result, suitable coupling methods for aluminum-wound prototype motors were found.

As a result of the work, the IE3 efficiency class was achieved with both prototypes, of which the optimized design had 0,28 percentage points better efficiency. Based on the test results and other examination of the work, it is obvious to conclude that the aluminum winding is completely feasible to use in induction motor production. The direct costs of the aluminum-wound induction motor was also found to be about 20 percent lower in this case compared to standard copper-wound structure.

---

**KEYWORDS:** Induction motor, stator, aluminum, winding, efficiency

## 1 JOHDANTO

Perinteisten hyötysuhdevaatimusten lisäksi kustannustehokkaan tuotteen valmistus on yksi monista alueista, johon sähkömoottorien suunnittelussa keskitytään yhä enemmän. Sähkömoottorin staattori- ja roottoripakettien valmistuksessa yleisesti käytetyt aktiivimateriaalit eli kupari ja sähkölevy ovat tärkeässä roolissa sähkömoottorin valmistuskustannuksissa. Oikosulkumoottoreissa, joiden osuus kaikista maailman sähkömoottoreista on noin 90 %, kallein näistä materiaaleista kiloa kohden on kupari. Oikosulkumoottori ei kuitenkaan vaadi toimiakseen kuparilangalla käämittyä staattoria, vaan käämintämateriaalina voidaan käyttää myös muita materiaaleja, kuten alumiinia. On kuitenkin tärkeää, että käämimateriaalin vaihto ei huononna sähkömoottorin laatua tai energiatehokkuutta.

Taloudellisesta näkökulmasta hyötysuhdevaatimukset tulee täyttää mahdollisimman kustannustehokkaalla ratkaisulla, jossa sähkömoottorin rakenne ja täten myös hinta ovat suunnitellusti optimoitu kilpailukykyiseksi kokonaisuudeksi. Tässä työssä tutkittiin alumiinikäämityksen mahdollisuuksia pienjännitemoottorien kustannustehokkuuden parantamiseksi hyötysuhdedirektiivien mukaisissa rajoissa. Alumiinin hinta ja runsaus tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon kuparille. Alumiinin etuina kupariin verrattuna ovat alumiinin noin kolme kertaa edullisempi puhdas kilohinta, noin kolme kertaa pienempi tiheys sekä helpompi kierrätettävyys alhaisemman sulamispisteen ansiosta. Alumiinin käyttöön liittyvät haasteet staattorikäämityksessä kupariin verrattuna ovat alumiinin kaksi kolmasosaa pienempi johtavuus sekä alumiinijohtimen sähköisen kytkennän toteutus.

Alumiinin käyttö sähköjohtimen materiaalina ei ole uusi asia. Jo vuonna 1945 alumiinijohtimet hyväksyttiin sisätilojen johdotustarkoituksiin edellyttäen, että ne asennettiin oikein. Tämä ei kuitenkaan toteutunut kaikissa tapauksissa, sillä lähes kaikki ilmoitetut ongelmat koskivat johdinliitoksia, joissa asentajat eivät olleet noudattaneet asennusohjeita (Rius Rueda 2017: 24). Alumiinijohtimella tämä aiheuttaa liitosten oksidoitumista, lämpenemistä sekä mekaanista löystymistä. Oksidoitumisella tarkoitetaan alumiinin kemiallista reaktiota hapen kanssa, jossa alumiinin pinnalle syntyy eristeenä toimiva oksidikerros. Sähköisesti liitetyt kaksi eri metallia muodostavat myös galvaanisen parin, jossa vähemmän jalosta metallista tulee elektrolyyttisen tapahtuman anodi, jolloin se syöpyy.

Alumiini on oikein käytettynä hyvä johdinmateriaali sähkömoottorin käämitykseen. Alumiinia on käytettykin jo 1970-luvulla sähkömoottorien kääminnässä, ABB:n (ASEA Brown Boveri) edeltäjän ASEA:n (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) toimesta, mutta tuolloin jouduttiin vaihtamaan johdinmateriaali kupariin tiukentuneiden hyötysuhdevaatimusten takia (ABB 2019a: 1). Nykyään kuitenkin laskentatehokkuus ja -metodit ovat kehittyneet siihen pisteeseen, että sähkömoottorin ominaisuuksia voidaan optimoida varsin tarkasti haluttujen toleranssien sisäpuolelle. Huomioonotettavia tekijöitä alumiinikäämistä suunniteltaessa ovat johtavuus, liitännät sekä terminen lämpökapasiteetti.

Tutkimuksen tavoitteena on optimoida laskennallisesti yksittäinen sellainen tuotannollisesti mahdollinen energia- ja kustannustehokas käämitysratkaisu, jossa käytetään alumiinikäämistä. Prototyypin valmistetaan ja testataan ABB Motors and Generators -tuotantoyksikössä Vaasassa. Laskenta ja optimointi toteutetaan ABB:n omalla Adept-ohjelmistolla (Advanced Electrical Dimensioning Tool), joka on kehitetty sähkömoottorien ja -generaattorien suunnittelua varten. Se perustuu elementtimenetelmään (Finite Element Method, FEM), jolla voidaan tarkastella lukuisia laskutoimituksia siedettävässä ajassa. Optimoinnin tarkoituksena on havainnoida tekijät, jotka vaikuttavat alumiinisen staattori-käämityksen toimintaan ja muokata staattorin uramuotoa ja käämirakennetta siten, että lopputulos on mahdollisimman energia- ja kustannustehokas. Energiatehokkuuteen tiedetään tutkitusti vaikuttavan staattoriuran koko ja sen täyterroin sekä johtimen poikkipinta-ala (Iorgulescu 2016; Ayat, Wrobel, Baker & Drury 2017).

Jotta optimoidulle käämitysrakenteelle saadaan vertailukohde, tuotetaan myös toinen prototyyppi, jossa käämitysrakenne on toteutettu olemassa olevalla uramuodolla. Jo valmiina oleva uramuoto helpottaisi valmistusprosessia ja vähentäisi uuden moottorityypin valmistuskustannuksia. Kokonaisuudessaan tämä edistäisi niin ajallisesti kuin kustannuksellisesti tehokasta tuotantoa. Työhön sisältyvien alumiinikäämillisten moottorien valmistus aloitetaan vasta laskelmien valmistuttua, jolloin moottorien lopullinen rakenne on tiedossa. Valmistettavien prototyyppien tarkemmat tuotetiedot on esitetty liitteissä 1 ja 2. Myös moottorien valmistuksen vaiheita seurataan aineiston ja havaintojen keräämistä varten. Prototyypeille suoritetaan standardin IEC60034-2-1 (Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests) mukainen

hyötysuhdetesti, josta nähdään optimoinnin lopputulos ja tutkimuksesta saadaan täten luotua yhtenäinen kokonaisuus

Tämä työn jakautuu seitsemään osaan, joista ensimmäinen on tämä johdanto. Seuraavassa luvussa käsitellään oikosulkumoottorin rakennetta ja toimintaa, sekä alumiinijohtimen ominaisuuksia ja sen käytön vaikutuksia oikosulkumoottorissa. Lisäksi luvussa kaksi vertaillaan kuparin ja alumiinin ympäristövaikutuksia. Luvussa kolme käsitellään tarkemmin staattorin käämintämenetelmiä ja alumiinikääminnän vaikutusta sen toimintaan ja kustannuksiin. Tässä luvussa tuodaan esille myös tutkimuksen aikana esille nousseita lisätutkimuskohteita, joiden arveltiin vaikuttavan alumiinikäämintään. Neljännessä luvussa käsitellään optimoinnin menetelmiä, työkaluja ja tuloksia, joita on käytetty tämän tutkimuksen päätavoitteena olevan prototyypin valmistukseen. Viidennessä luvussa siirrytään prototyyppien valmistuksen aikaisiin vaiheisiin ja käydään läpi näille suoritettujen hyötysuhdetestien lopputulokset. Luvuissa 6 ja 7 käydään lopuksi läpi työn johtopäätökset sekä yhteenveto.

## 2 OIKOSULKUMOOTTORI

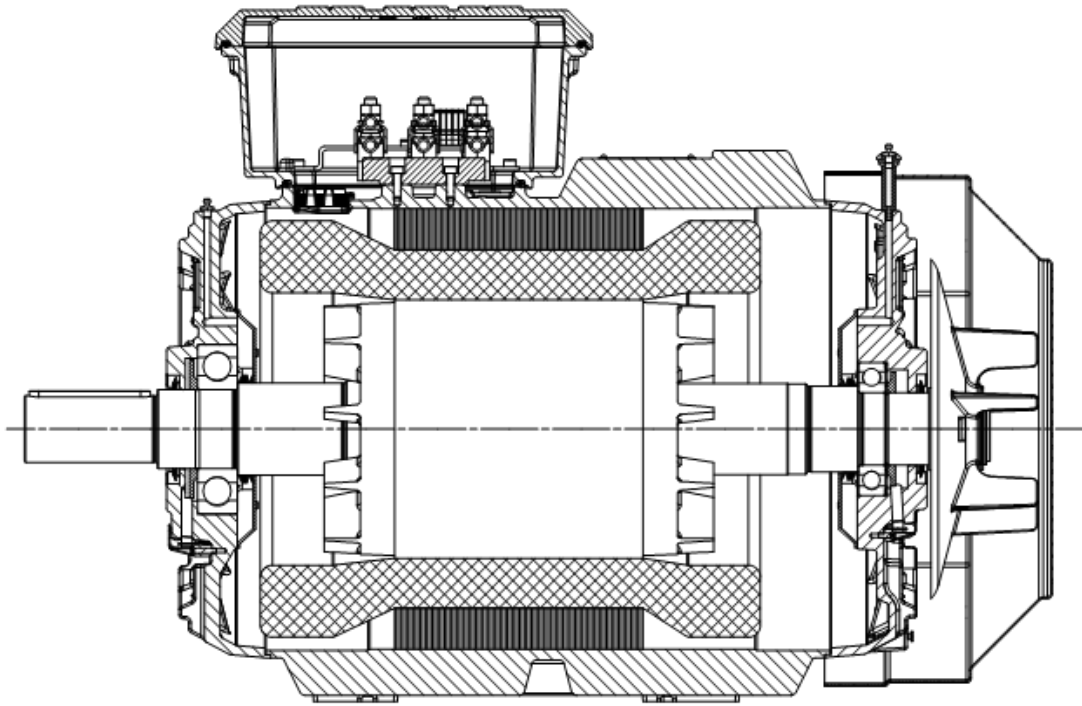
Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin toiminta perustuu käämitykseen johdetun vaihtovirran muodostamaan pyörivään magneettikenttään. Käämitys muodostuu useasta sähkömagneetista, jotka saadaan aikaiseksi kiertämällä eristettyä sähköjohtoa rautaisten sydänten ympärille. Staattorin lisäksi oikosulkumoottori vaatii myös toisen magnetisoituvan osan eli roottorin, joka pyörii moottorin napapari-luvusta  $p$ , syöttötaajuudesta  $f$  sekä moottorin suhteellisesta jättämästä  $s$  riippuvalla moottorin mekaanisella pyörimisnopeudella  $n$

$$n = 60 \cdot \frac{f(1-s)}{p}. \quad (1)$$

Tässä luvussa käydään tarkemmin läpi oikosulkumoottorin rakenne ja toiminta, sekä tarkastellaan sen ympäristövaikutuksia ja miten tähän voidaan vaikuttaa materiaalien valinnalla.

### 2.1 Rakenne ja toiminta

Pyörivän magneettikentän muodostuminen kolmivaiheisessa sähkömoottorissa edellyttää suunnitellusti rakennettua käämitystä sekä staattorissa että roottorissa. Staattorissa käämitys on toteutettu eristetyllä sähköjohtimella, jonka materiaalina tässä työssä käytetään kuparista poiketen alumiinia. Roottorin käämitys voidaan toteuttaa joko yhtäläisellä johdinten kääminnällä tai yleisemmällä painevalumenetelmällä. Tämän tutkielman painottuessa staattorin käämityksen optimointiin, tullaan oikosulkumoottorille yleisintä staattorin käämitämenetelmää käymään läpi alaluvussa 3.1. Myös oikosulkumoottorin mekaanisen rakenteen on oltava huippuunsa suunniteltu, jotta sähkömoottoria voidaan käyttää turvallisesti myös vaativissa olosuhteissa. Alumiinia on käytetty jo vuosikymmeniä myös runkomateriaalina ABB:n oikosulkumoottoreissa, mikä pienentää huomattavasti moottorin kokonaispainoa. Kuvassa 1 on esitettynä läpileikkaus tämän tutkimuksen kohteena olevan valurautarunkoisen M3BP 225SMA 2 -moottorin rakenteesta sivusta kuvattuna.

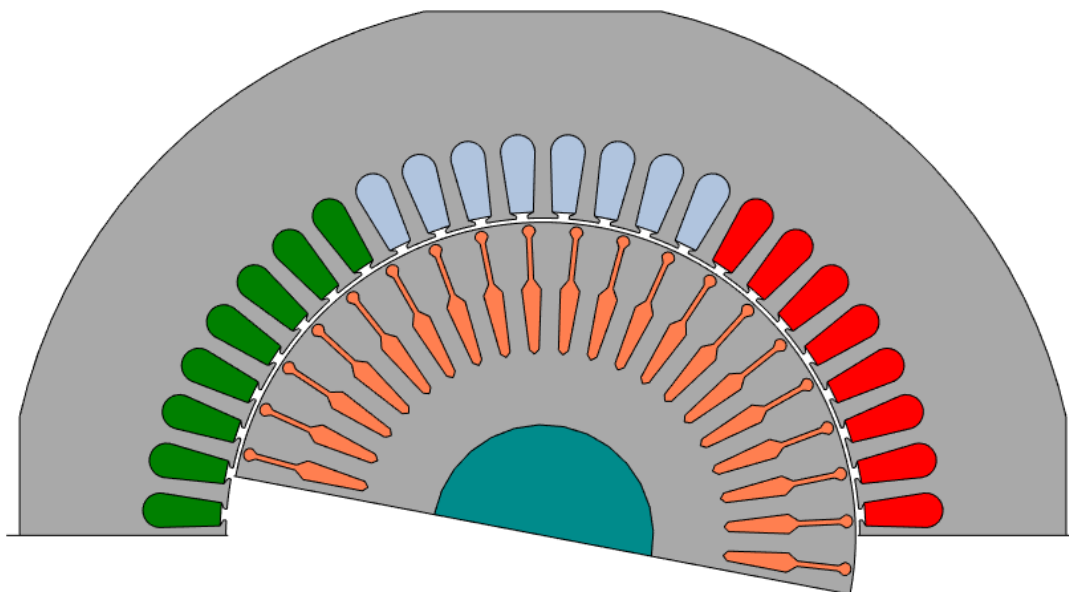


**Kuva 1.** Lämpileikkauskuva työssä tutkitun M3BP 225SMA -moottorin rakenteesta.

Yleisesti kenties ajatellaan, että sähköiset laitteet, joissa on käytetty alumiinijohdinta kuparijohtimen sijaan, ovat kooltaan suurempia. Vaikka tässäkin tapauksessa tulee alumiinijohdinten tilavuus olla suurempi kuin vastaavan kuparijohtimen yhtäläisen hyötysuhteen saavuttamiseksi, tulee moottorien ulkoisten mittojen kuitenkin olla samat. Tällä vältetään tuotteen muutoskustannukset ja helpotetaan tuotantoprosessia.

### 2.1.1 Aktiivi- ja passiiviosat

Sähkömoottorin aktiiviosiin kuuluvat staattori ja roottori. Niiden paketit valmistetaan laatomalla kuvan 2 mukaisia laminoituja sähkölevyjä päällekkäin. Akselin suuntaisesti ladotut sähkölevyt vastustavat akselin suuntaisesti kulkevia virtoja ja näin ollen vaimentavat pyörrevirtoja (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcová 2014: 189). Pinottu staattoripaketti puristetaan ja lukitaan mittaansa, jonka jälkeen se on valmis käämintään. Kääminnästä staattoriuriin asennetaan eristeet sekä käämivyhydit. Erilliset lisälaitteet, kuten lämmitysvastukset, asennetaan myös kääminnästä, ennen kuin staattoripaketti kyllästetään hartilla. Hartsi kovetetaan lämmittämällä staattoripaketti käämeineen erillisessä uunissa.

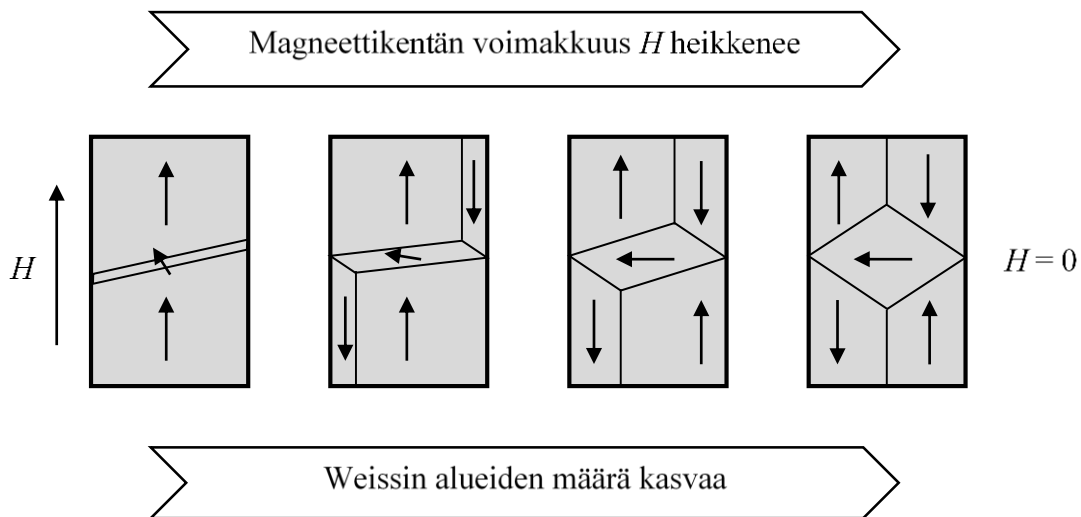


**Kuva 2.** Symmetrinen puolikas kaksinapaisen M3BP 225SMA -moottorin staattori- ja roottoripakettien sähkölevyistä.

Hartsikyllästys lisää staattorikäänityksen mekaanista lujuutta, lämmönjohtavuutta sekä kosteudensietoa. Roottoripaketin käänitys eli sauvat valmistetaan yleisimmin painevalamalla alumiini roottoriuriin. Paketin päihin muodostuu painevalun yhteydessä oikosulkurenkaat, jotka muodostavat yhdessä sauvojen kanssa sylinterinmuotoisen niin sanotun oravanpyörän eli häkkikäänityksen. Lopuksi roottoripaketin sisälle puristetaan akseli ja se sorvataan sekä tasapainotetaan.

Staattorin ja roottorin sähkölevyt on yleisimmin valmistettu seosaineksesta, joka sisältää rautaa ja piitä. Näistä rauta kuuluu ferromagneettisiin materiaaleihin. Puhtaisiin materiaaleihin verrattuna seosainesten resistiivisyys yleisesti kasvaa. Pii ja alumiini ovat resistiivisyyden kasvuun parhaiten vaikuttavimmat materiaalit kun niitä sekoitetaan raudan kanssa. Pii tekee seosmateriaalista kuitenkin helposti hyvin haurasta ja tästä syystä sen osuus seosmateriaalissa on suurimmillaan noin 6 prosenttia (Pyrhönen ym. 2014: 191). Resisttiivisyyden merkitys sähkölevyissä tuodaan esille myöhemmin sähkömoottorin hystereesi- ja lisähäviöitä määriteltäessä.

Tutustumalla ferromagneettisiin materiaaleihin saadaan tarkempi näkemys sähkölevyn toiminnasta magneettikentän vaikuttaessa siihen. Ferromagneettisissa materiaaleissa on kuvan 3 mukaisia alkeismagneetteja, jotka tunnetaan myös Weissin alueina (Pyrhönen ym. 2014: 186). Vaikka Weissin alueet ovat magneettisesti kyllästyneitä, ei kappale silti ole välttämättä magnetoitunut. Kappale sisältää useita Weissin alueita, joten erisuuntaisesti magnetoituneet Weissin alueet kumoavat kappaleen magnetoitumisen. Weissin alueita rajaavat Blochin seinämät, joiden paksuus vaihtelee muutaman sadan ja tuhannen atomivälin välillä (Pyrhönen ym. 2014: 186). Kun ferromagneettista materiaalia magnetoitetaan muuttuvalla magneettikentällä, syntyy Weissin alueiden välisestä kitkasta tutkimuksen kannalta tärkeitä lämpöhäviöitä.



**Kuva 3.** Weissin alueiden muodostuminen magneettikentän voimakkuuden mukaan.

Passiiviosat kuten sähkömoottorin runko, kilvet, laakerointiosat, tuuletin ja liitäntäkotelo ovat mekaanisesti tarpeellisia osia sähkömoottorin toimintaa ajatellen, mutta sähköisesti ne eivät vaikuta sähkömoottorin perustoimintaan. Eristetyillä laakereilla voidaan kuitenkin estää esimerkiksi taajuusmuuttajakäytössä syntyviä oikosulkumoottorin laakerivirtoja. Staattoriuraa suurennettaessa on myös huomioitava että liian ohut staattorin selkä voi aiheuttaa vuon tunkeutumisen staattorirunkoon ja täten aiheuttaa lisähäviöitä.

Alumiinijohtimen käyttö staattorin käämintämateriaalina ei vaikuta passiiviosien toimintaan tai valintaan. Passiiviosat halutaan myös pitää vakioina johdinmateriaalista riippumatta lisäkustannuksien välttämiseksi. Aktiiviosiinkaan alumiinijohtimen valinta ei suurensti vaikuta, mutta vaikuttavimpana tekijänä on alumiinin resistiivisyys. Alumiinin resistiivisyyden ollessa kuparia suurempi, tulee alumiinijohtimella käämityssä staattoriurassa olla suurempi volyyymi johtavaa materiaalia. Tästä johtuen staattoriuran muotoa ja kokoa tullaan optimoimaan tässä työssä sellaiseksi, että alumiinijohtimella käämitty moottori muuntaisi sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi yhtä hyvällä hyötysuhteella kuin kuparijohtimella käämitty vastaavan kokoluokan oikosulkumoottori.

### 2.1.2 Johdinmateriaalit

Alumiini- ja kuparijohtimia on valmistettu useaan eri käyttötarkoitukseen ja niiden seosmateriaalien avulla johdinmateriaalin ominaisuuksia voidaan muokata. Seostamisella muutetaan aineen kemiallista koostumusta, joka tässä tapauksessa prototyypissä käytetylle alumiinijohtimelle tarkoittaa 99,7 prosentin alumiinipitoisuutta. Tarkat tuotetiedot prototyypissä käytetystä alumiinijohtimesta löytyy liitteestä 4. On tärkeää tietää käytettävän johtimen sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet, jotta laskelmien tulokset vastaisivat mahdollisimman tarkasti todellisuutta. Adeptiin määritetyt johdinmateriaalien ominaisuudet kuparille ja alumiinille on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Adept-laskentaohjelmaan määritetyt ominaisarvot kupari- ja alumiinijohtimille.

Materiaali	Sähkönjohtavuus (S/m)	Sähkönjohtavuuden lämpötilakerroin (K)	Massatiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Ominaislämpökapasiteetti (J/K·kg)	Lämmönjohtavuus (W/Km)	Kimokerroin (GPa)	Liukukerroin (GPa)	Lämpölaajenemiskerroin (1/K)
Cu	57·10 <sup>6</sup>	255	8910	380	393	119	45	1,7·10 <sup>-5</sup>
Al	32·10 <sup>6</sup>	250	2700	900	203	65	25	2,4·10 <sup>-5</sup>

*Sähkönjohtavuus* kuvastaa, miten materiaali johtaa sähkövirtaa. Alumiinin sähkönjohtavuus on vain noin 56 prosenttia kuparin arvosta, jonka takia tulisi alumiinijohdinta olla staattorikäimityksessä enemmän kuparikäimitykseen verrattuna, jotta saavutettaisiin yhtäläiset resistiiviset häviöt. Jo tässä vaiheessa voidaan huomata, että Adeptiin määritetty alumiinijohtimen sähkönjohtavuus eroaa johtimen valmistajan ilmoittamasta johtavuudesta  $35,5 \cdot 10^6$  (liite 4). Metalleilla sähkönjohtavuus pienenee lämpötilan kasvaessa. Tätä ominaisuutta kuvastaa *sähkönjohtavuuden lämpötilakerroin*. *Massatiheys* puolestaan kertoo, että alumiinijohtimella on vain 30 prosenttia siitä massasta, mitä kuparijohtimella on vastaavaa tilavuutta kohden. Tämän ansiosta voidaan alumiinikäymillä vähentää staattorikäimityksen painoa lähes samassa suhteessa, jolloin moottorin kokonaispaino voi pienentyä pien- ja keskisuurten sähkömoottorien kokoluokassa jopa useita kymmeniä kiloja.

Alumiinin suuremman *ominaislämpökapasiteetin* ansiosta alumiini pystyy luovuttamaan ja vastaanottamaan suuremman lämpöenergiämäärän lämpötilaeroa ja massaa kohden kuin kupari. Myös pienemmän *lämmönjohtavuutensa* takia alumiini johtaa huonommin lämpöä. Kuitenkin staattoriuran tilavuudessa alumiinin massa on paljon pienempi kuin kuparin, jolloin alumiini lämpenee herkemmin kuin kupari. Elastiset kertoimet kuvaavat materiaalin kykyä vastustaa sitä muokkaavia voimia. Tällaisia ovat materiaalin jäykkyyttä kuvaava *kimmokerroin* ja leikkausvoiman vastustuskykyä kuvaava *liukukerroin*. *Lämpölaajenemiskerroin* kuvaa aineen lämpölaajenemista lämpötilan muuttuessa. Alumiinin korkeampi lämpölaajenemiskerroin hankaloittaa kytkennän pysyvyyttä, sillä lämpötilojen muuttuessa alumiinin tilamuutokset ovat suuremmat kuin kuparilla. Tällöin huonosti liitetystä alumiinilankojen vyyhdistä voi ajan kuluessa jonkun johtimen kosketuspinta irrota ja näin ollen kytkentä huononee.

### 2.1.3 Sähkömagneettinen induktio

Työssä tutkittavan kolmivaiheisen oikosulkumoottorin toiminta perustuu staattorin johtimiin johdetun kolmivaihevirran tuottamaan pyörivään magneettikenttään, joka indusoi roottorin häkkikäimitykseen jännitteen Faradayn induktiolain (kaava 2) mukaisesti. Roottorin suljetussa häkkikäimityksessä indusoitunut jännite saa roottorissa aikaan root-

torivirran, joka muodostaa roottoriin magneettiset navat. Nämä puolestaan vuorovaikutuksessa muuttuvan magneettikentän kanssa pyrkivät seuraamaan magneettikentän liikettä ja saavat näin roottorin pyörimään. Oikosulkumoottorin rakenne on todettu varsin yksinkertaisesti toteutettavaksi ratkaisuksi, joka soveltuu kestävästi ja edullisesti moneen käyttökohteeseen. Tästä johtuen oikosulkumoottori onkin tunnetusti yleisin teollisuudessa käytettävä pyörivä sähkökone.

Faradayn induktiolain mukaan staattorin käämitykseen johdettu vaihtovirta saa siis aikaiseksi ajan  $t$  mukaan muuttuvan ilmvälin läpi kulkevan magneettivuon  $\Phi$ , joka synnyttää ympärilleen sitä kiertävän sähkökentän voimakkuuden  $E$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

missä  $\mathbf{B}$  on magneettivuon tiheys tasopinnan  $S$  eli ilmvälin läpi, jonka ympärysmitta on  $l$ . Negatiivinen merkki Faradayn induktiolaissa on erittäin tärkeä, sillä se kertoo Lenzin lain mukaisesti indusoituneen virran suunnan, joka vastustaa alkuperäistä muuttuvaa magneettikenttää, joka sen tuotti. Sähkökentänvoimakkuus voidaan kuvata potentiaalierona eli jännitteenä, joka suljetussa roottorin häkkikäämityksessä saa aikaiseksi edellä mainitun roottorivirran ja roottorin magnetoitumisen. Sähkömoottorien suunnittelussa oletetaan yleisesti magneettivuon tiheyden olevan kohtisuorassa tutkittavaan alaan suhteutettuna (Pyrhönen ym. 2014: 15). Tällöin magneettivuon ollessa pintaintegraali magneettivuon tiheydestä, voidaan magneettivuolle yksinkertaisimmillaan kirjoittaa

$$\Phi = \int B \cdot dS. \quad (3)$$

Magneettivuon tiheys  $\mathbf{B}$  muuttuu ajan mukaan, mutta myös sen keskiarvo muuttuu paikakohtaisesti ajasta riippumatta. Magneettivuon tiheyttä on tärkeää tutkia jo sähkömoottorin suunnitteluvaiheessa, sillä liian suuret magneettikentät aiheuttavat aktiivimateriaalien kyllästymistä. On myös hyvä havainnoida jo tässä vaiheessa, että staattoriurien muodot, joita työssä optimoidaan, vaikuttavat vuoviivojen kulkureitteihin sekä seuraavassa alaluvussa läpikäytävän hajavuon syntymiseen.

Arkkion (1987: 7) väitöskirjan mukaisesti sähkökoneen suunnittelu perustuu magneettikentän tuntemiseen moottorin sisällä. Sähkökoneen magneettiipiirin suunnittelu taas perustuu Pyrhösen ja muiden (2014: 12) mukaan Ampèren lakiin, joka kvasistaattisessa muodossaan

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = i(t) \quad (4)$$

kuvaa sitä, miten magneettikentän voimakkuuden  $\mathbf{H}$  viivaintegraali suljetun silmukan  $l$  yli on yhtä suuri kuin kokonaisvirta  $i$ , joka magneettikentän synnytti, missä  $\mathbf{J}$  on virrantiheys pinnalla  $S$ . Tämä pinta on yhden käämivyöhdin poikkipinta-ala, johon vaikuttavat käämin kierrosmäärä  $N$  sekä johtimen pinta-ala  $S_c$ . Kvasistaattisessa ilmiössä taajuus  $f$  on siirrosvirran kannalta tarpeeksi matala. Sähkökoneissa tämä vaatimus toteutuu, sillä merkittäviä siirrosvirtoja esiintyy käytännössä vasta radiotaajuuksilla (Aho 2007: 32).

Roottorisauvoihin indusoituu sähköisiä varauksia, jotka muodostavat roottorin magnetoivan roottorivirran. Magneetti- ja sähkökentän vaikutuksesta roottorisauvoihin kohdistuu Lorentzin voimalain mukaisesti suoran ja kiinteän johtimen tapauksessa voima

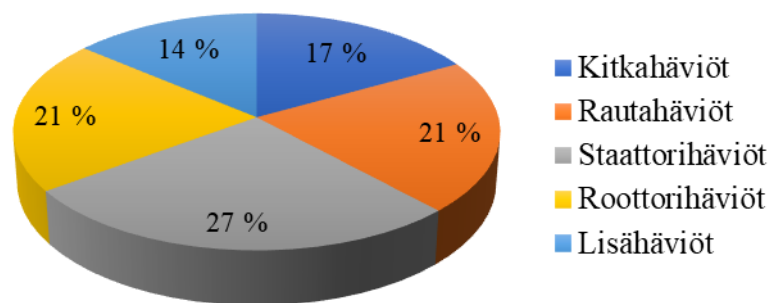
$$\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

missä  $\mathbf{l}$  on johtimen pituutta kuvaava vektori, jonka suunta on linjassa roottorisauvaa pitkin kulkevan sähkövirran  $I$  kanssa.

Staattorin johdinmateriaalin vaihto kuparista alumiiniin ei vaikuta sähkömagneettisen induktion syntyyn, vaan moottori tuottaa yhtäläisen vääntömomentin johdinmateriaalista riippumatta. Ilman staattoriuran optimointia ovat staattorin resistiiviset häviöt alumiinijohtimella toki huomattavasti suuremmat ja moottori lämpenee huomattavasti kuparijohdollista moottoria enemmän, kun moottoreita kuormitetaan yhtäläisellä nimellisteholla. Tällöin myös roottoriin vaikuttava ilmaväliteho on pienempi ja jättämä suurempi. Tästä johtuen sama uramuoto ei välttämättä sovellu sellaisenaan sekä kupari- ja alumiinilangalle, vaan optimointia tulee tehdä.

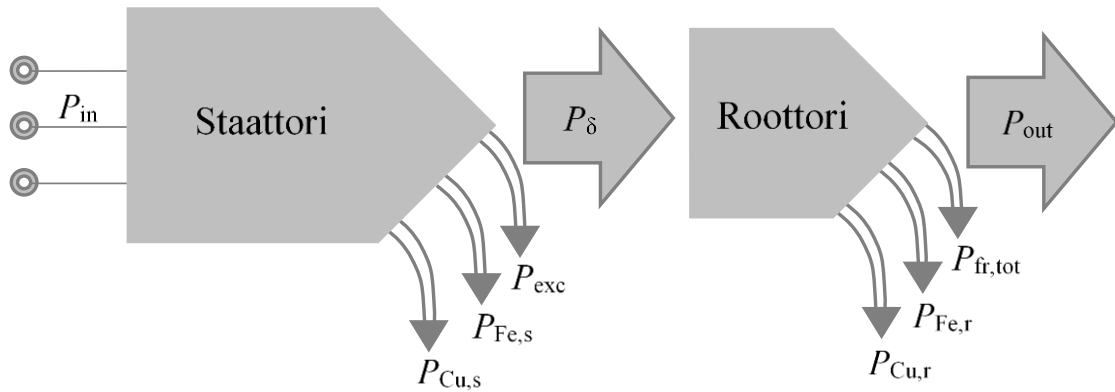
## 2.2 Häviöt ja hyötysuhde

Oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen vaikuttavat sen aktiivimateriaaleissa tapahtuvat sähköiset häviöt sekä mekaanisesti liikkuvissa osissa tapahtuvat mekaaniset häviöt. Kokonaihäviöt voidaan jakaa eri häviökokonaisuuksiin tarkastelutavasta riippuen. IEC60034-2-1 (IEC 2014a: 9–12) standardissa todetaan oikosulkumoottorin kokonaihäviöiden koostuvan jatkuvista häviöistä, kuormasta riippuvista häviöistä sekä lisähäviöistä. Näissä jatkuviin häviöihin luetaan kitka-, tuuletus- ja rautahäviöt, kuormasta riippuviin staattori- ja roottorikämeissä tapahtuvat häviöt sekä lisähäviöihin kuormitusvirrasta aiheutuvat harmoniset häviöt aktiivimateriaaleissa. Kuvassa 4 on esitetty esimerkki 45 kW:n oikosulkumoottorin häviöiden jakautumisesta kyseisillä häviöosuuksilla.



**Kuva 4.** Häviöjakauma IEC60034-2-1 standardin mukaisilla häviökokonaisuuksilla 2-napaiselle 45 kW:n oikosulkumoottorille, joka on testattu Vaasan ABB Motors and Generators -yksikössä vuonna 2019.

Kuvasta 4 voidaan todeta, että staattorissa tapahtuvat häviöt ovat merkittävin häviöosuus oikosulkumoottorissa. Edelleen voidaan todeta, että tunnetusti sekä staattorissa että roottorissa tapahtuvista rautahäviöistä suurin osa tapahtuu staattorissa. Staattorissa tapahtuvien häviöiden ollessa tämän tutkimuksen pääkohteena jaetaan työn selkeyttämiseksi häviöt staattorissa ja roottorissa tapahtuviin häviöihin kuvan 5 mukaisesti. Tällöin työn optimoinnin tarkoituksia voidaan tarkentaa juurikin staattorissa tapahtuvien häviöiden minimoimiseen alumiinikämmillä.



**Kuva 5.** Oikosulkumoottorin häviöjakauma (Aho 2007: 24). Kuvaa on muokattu.

Kuvan 5 mukaisesti erkaantuu moottoriin syötetystä ottotehosta  $P_{in}$  ensimmäisenä staattorissa tapahtuvat häviöt eli kuparihäviöt  $P_{Cu,s}$ , rautahäviöt  $P_{Fe,s}$  ja lisähäviöt  $P_{exc}$ . Staattorihäviöiden jälkeen kulkeutuu kuormitustilanteessa pyörivän oikosulkumoottorin magneettikentän ansiosta ilmaväliteho  $P_{\delta}$  ilmavälin kautta roottoriin. Kaavion lopuksi roottorin magnetoiduttua ja sähköisen energian muuttuessa mekaaniseksi voimaksi tapahtuu myös roottorissa virtalämpöhäviöitä  $P_{Cu,r}$ , rautahäviöitä  $P_{Fe,r}$ , sekä kitka- ja tuuletushäviöitä  $P_{fr,tot}$ . (Aho 2007: 24.)

### 2.2.1 Staattorihäviöt

Staattorissa tapahtuvat häviöt ovat kuvan 4 mukaisesti prosentuaalisesti suurin häviökokonaisuus oikosulkumoottorissa. Staattorihäviöt  $P_s$  muodostuvat kuvan 5 mukaisesti kolmesta elementistä

$$P_s = P_{Cu,s} + P_{Fe,s} + P_{exc}. \quad (6)$$

Näihin häviöihin vaikuttavat suunnitellusti rakennetussa oikosulkumoottorissa merkittävimmin staattorin johdin- ja laminointimateriaalit sekä niiden paksuus. Johtimessa nämä tekijät vaikuttavat sen resistiivisyyteen sekä virrantiheyteen nimellisvirralla. Laminoinnissa nämä taas vaikuttavat staattorissa syntyviin hystereesi-, pyörrevirta- ja hajahäviöihin.

### Staattorin kuparihäviöt $P_{Cu,s}$

Staattorin kuparihäviöitä, joita nyt alumiinikäämityksen tilanteessa kutsutaan staattorin resistiivisiksi häviöiksi, syntyy aina staattorikäämityksessä, kun johtimissa kulkee sähkövirta. Useissa tapauksissa resistiiviset häviöt luovat dominoivan häviökomponentin sähkökoneelle ja varsinkin silloin kun siirrytään kuparijohtimesta alumiinijohtimeen (Pyrhösen ym. 2014: 265). Alumiinin huonompi sähkönjohtavuus aiheuttaa staattorikäämitykselle suuremman resistiivisyyden, joka vastustaa virran kulkua johtimessa.

Tutkimuksessa käytetään pyörölankakäämiä, jonka tapauksessa voidaan staattorivirran ollessa sinimuotoista olettaa virranahdon merkityn vähäiseksi (Aura ja Tonteri 2002: 328). Tällöin staattorin resistiivisten häviöiden laskemisessa voidaan käyttää tasavirralla laskettua käämityksen resistanssia

$$R_{DC} = \frac{l_c}{\sigma_c \cdot a \cdot S_c}, \quad (7)$$

missä  $l_c$  on johtimen pituus käämissä,  $\sigma_c$  johdinmateriaalin johtavuus,  $a$  rinnakkaisien johtimien määrä ja  $S_c$  johtimen poikkipinta-ala. Täten staattorin resistiivisiksi häviöiksi saadaan

$$P_{Cu,s} = 3 \cdot R_{DC} \cdot I^2. \quad (8)$$

Myös Pyrhösen ym. (2014: 525) mukaan hyötysuhdetta määritettäessä resistiiviset häviöt lasketaan käyttämällä käämityksen tasavirtaresistanssia. Täten voimme todeta, että keinoja resistiivisten häviöiden vähentämiseksi alumiinikäämityksellä, ovat yhtälön (7) mukaisesti johtimen pituuden lyhentäminen tai paksuuden kasvattaminen, sekä rinnakkaisien johtimien määrän kasvattaminen.

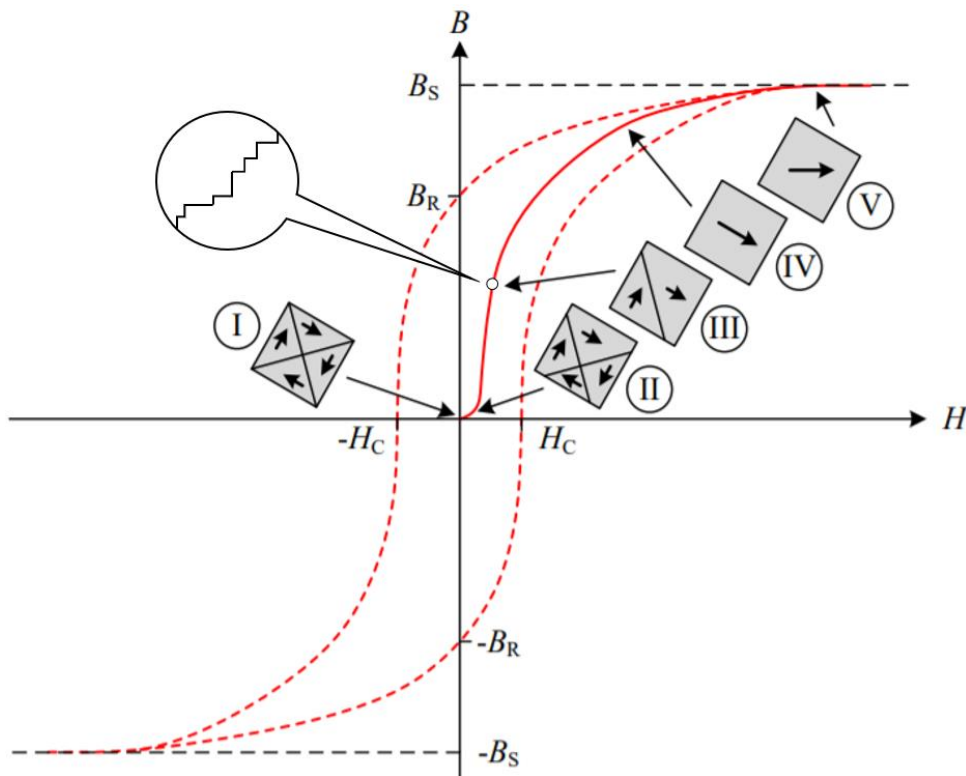
On kuitenkin edelleen huomioitava usean samassa staattoriurassa olevan yhdensuuntaisen johtimen vaikutus toisiinsa vaihtovirralla. Staattoriurassa on kymmeniä joskus jopa satoja johtimia, joissa kulkeva vaihtovirta luo ajan mukaan muuttuvan magneettikentän,

joka indusoi kiertovirran johtimen sisälle. Tätä virran keskittymää kutsutaan keskinäisvaikutukseksi. Tämä ilmentymä kasvattaa johtimen vastusta ja täten myös staattorin resistiivisiä häviöitä. (Huppunen 2004: 95).

#### Staattorin rautahäviöt $P_{Fe,s}$

Staattorin rautahäviöt koostuvat staattoriraudan hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä, jotka aiheutuvat muuttuvasta magneettivuosta. Näiden kahden häviötyypin osuudet rautahäviöistä ovat 50 Hz:n taajuudella vastaavasti noin 75 % ja 25 % (Pyrhönen ym. 2014: 200). Rautahäviöihin pystytään vaikuttamaan ferromagneettisten tai kestopagneettisten materiaalien valinnalla, sekä niiden työstämisen laadukkuudella.

Hystereesihäviö  $P_h$  aiheutuu ferromagneettisen materiaalin eli sähkölevyn Weissin alueiden magnetoitumisesta ja demagnetoitumisesta. Tätä magnetointiprosessia voidaan esittää kuvan 6 mukaisesti viidellä eri osalla.



**Kuva 6.** Sähkölevyn magnetoituminen hystereesisilmukan mukaan (Freitag 2017: 21). Kuvaa on muokattu.



kuva esitettyä energiaa määritettyä tilavuutta kohden  $w_h$ , saamme hystereesihäviöiksi tilavuudessa  $V$

$$P_h = f \cdot V \cdot w_h. \quad (10)$$

Sähkömekaanisten sovellusten suunnittelussa, jotkut arvokkaimmista tiedoista materiaalin magnetoitumisesta saadaan kyseisen materiaalin BH-käyrältä (Pyrhönen ym. 2014: 189). Työssä käytetyn sähkölevyn BH-käyrä löytyy liitteestä 3.

Magneettivuon jatkuva muuttuminen vaihtovirran takia aktiivimateriaaleissa indusoi jännitteitä johtavaan sydänmateriaaliin eli sähkölevyyn. Tästä syntyy pyörrevirtoja, jotka pyrkivät vastustamaan magneettivuon muutosta. Vastustavat virrat aiheuttavat magneettivuon muutoksissa häviöitä, jotka esiintyvät suurimmalta osin lämpönä. Tätä häviötä kutsutaan pyörrevirtahäviöiksi  $P_p$ . Pyörrevirtoja pystytään välttämään käyttämällä resistiivistä materiaalia laminaarisen sydämen rakentamiseen kiinteän sydämen sijasta. Kuitenkin ohut sähkölevykin mahdollistaa silti pyörrevirtojen syntymisen magneettivuon muuttuessa, mutta tätä voidaan minimoida kasvattamalla sähkölevyn resistanssia esimerkiksi alaluvussa 2.2.1 esitetyllä piillä. Pyrhönen ym. (2014: 198–200) ovat johtaneet pyörrevirtahäviöille yhtälön

$$P_p = \frac{V \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot \hat{B}^2}{6 \cdot \rho}, \quad (11)$$

missä  $V$  on materiaalin tilavuus,  $f$  taajuus,  $d$  sähkölevyn paksuus,  $\hat{B}$  magneettivuontiheyden huippuarvo ja  $\rho$  materiaalin resistiivisyys. Todellisuudessa suoritettujen testien piiteräksen pyörrevirtahäviöille ovat kuitenkin noin 50 prosenttia suuremmat kuin yhtälö 11 antaa tuloksena. Tämä johtuu piiteräksen kiteiden suuresta koosta. Yleisesti voidaankin sanoa, että kun kiteen suuruus materiaalissa kasvaa, niin myös pyörrevirtahäviöt materiaalissa kasvavat (Pyrhönen ym. 2014: 200).

### *Staattorin lisähäviöt $P_{exc}$*

Lisähäviöt ovat häviöitä, jotka kuormitusvirta ja sen spatiaaliset harmoniat aiheuttavat sähkömoottorin käämityksessä, sähkölevyissä, rungossa tai muissa osissa joita ei oteta huomioon resistiivisiä häviöitä ja rautahäviöitä laskettaessa (Pyrhönen ym. 2014: 526). Vaikka lisähäviökomponentti on asetettu kuvassa 5 staattorin häviöksi, tapahtuu lisähäviöitä koko sähkömoottorissa. Lisähäviöön vaikuttavia komponentteja on useita ja niiden voidaan sanoa määriytyvän eniten juurikin ei-toivuttujen harmonisten tekijöiden, hajoavun syntymisen, virranahdon esiintymisen sekä magneettivuon tiheyden epäsäännöllisen jakautumisen takia. Yksi komponentti on myös aktiivimateriaalien alaluvussa 2.1.1 esitetyn Blochin seinämien liike magneettivuon muutoksen johdosta. Toki myös tuotannon vaihtelussa syntyvät luonnolliset epäsymmetriat aiheuttavat moottorissa lisähäviöitä.

Lisähäviöt lasketaan, kun sähkömoottorin hyötysuhde määritetään IEC60034-2-1 standardin epäsuoraa menetelmää käyttäen. Tällöin lisähäviöt määritellään graafisesti lineaarista regressioanalyysia käyttäen. Lisähäviöt voidaan määrittää myös ilman testejä ja tunnetusti lisähäviöt ovat suuruudeltaan 0,3–2 prosenttia sähkömoottoriin syötetystä sähkötehosta. Joskus nämä voivat kylläkin nousta jopa viiteen prosenttiin (Pyrhönen ym. 2014: 527). Yleisesti lisähäviöiden tiedetään kasvavan suhteessa kuormituksen suuruuteen. Pyrhönen ym. (2014: 527) ovat määrittäneet koko sähkömoottorin lisähäviöiden olevan suhteellinen vaihevirran  $I_s$  neliön ja tyhjäkäyntivirran  $I_0$  neliön erotukseen kerrottuna 1,5 potenssiin korotetulla taajuudella yhtälön 12 mukaisesti

$$P_{LL} \sim (I_s^2 - I_0^2) \cdot f^{1,5}. \quad (12)$$

#### 2.2.2 Roottorihäviöt

Roottorihäviöiden voidaan kuvan 4 mukaisesti sanoa koostuvan roottorikäämityksissä tapahtuvista virtalämpöhäviöistä  $P_{Cu,r}$ , roottorin sähkölevyissä syntyvistä rautahäviöistä  $P_{Fe,r}$ , sekä laakerien, tuulettimen ja ilmvälissä olevan jäähdytysilman liikkeen aiheuttamista kitka- ja tuuletushäviöistä  $P_{fr,tot}$ . Myös roottorissa tapahtuu lisähäviöitä joita ei kui-

tenkaan edellä esitetysti lasketa mukaan näihin häviökokonaisuuksiin, vaan ne määritellään standardin mukaisesti koko sähkömoottorille erikseen. Kuvan 5 mukaisesti, kun sähkömoottoriin syötetystä sähkötehosta  $P_{in}$  vähennetään staattorissa aiheutuneet häviökomponentit  $P_s$ , saadaan tuloksena roottoriin vaikuttava ilmaväliteho  $P_\delta$

$$P_\delta = P_{in} - P_s. \quad (13)$$

#### *Roottorin virtalämpöhäviöt $P_{Cu,r}$*

Roottorin virtalämpöhäviöiden määrittelyssä ei voida käyttää roottorikäänityksessä kulkevaa virtaa, sillä sitä ei pystytä mittaamaan. Häviöt voidaan kuitenkin laskea edellä määritetyn ilmavälitehon ja oikosulkumoottorin jättämän  $s$  tulolla

$$P_{Cu,r} = P_\delta \cdot s, \quad (14)$$

missä jättämä kuvaa roottorin todellisen pyörimisnopeuden  $n_r$  ja tämän mahdollistavan magneettivuon pyörimisen eli sykroninopeuden  $n_s$  suhdetta

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}. \quad (15)$$

#### *Roottorin rautahäviöt $P_{Fe,r}$*

Roottorin rautahäviöt koostuvat yhtäläillä staattorissa tapahtuvien rautahäviöiden mukaisesti hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Edellä todetusti roottorissa tapahtuvat rautahäviöt ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin staattorissa tapahtuvat rautahäviöt. Tässä suurimpana vaikuttajana on roottorissa vaikuttavan taajuuden suuruus. Kuten edellä on jo todettu, ovat hystereesihäviöt verrannollisia taajuuteen ja pyörrevirtahäviöt taajuuden neliöön. Oikosulkumoottorin roottorisauvoissa johtuvan vaihtovirran taajuus  $f_r$  on tunnetusti moottoriin syötetyn vaihtovirran taajuuteen  $f$  ja moottorin jättämän  $s$  tulo

$$f_r = s \cdot f. \quad (16)$$

Kuvassa 4 esitetyn 45 kW:n moottorin häviöjakaumaan käytetystä testistä saadaan selville, että kyseisen moottorin jättämä on ollut 0,97 prosenttia. Tällöin roottorivirran taajuus on ollut kyseisellä moottorilla 0,485 Hz. Alhaisesta taajuudesta johtuen roottorissa syntyvät rautahäviöt ovat siis varsin pieniä. Jättämä ei kuitenkaan aina ole näin pieni ja varsinkin pienempiin oikosulkumoottoreihin siirryttäessä jättämä ja täten myös roottorin rautahäviöt kasvavat verrannollisesti nimellistehoon suhteutettuna.

Roottorissa tapahtuvat pyörrevirtahäviöt ovat suurimmillaan roottorin pinnalla. Tähän vaikuttaa oikosulkumoottorin ilmaväli, joka määrää roottoriin vaikuttavan magnetoimisvirran suuruuden. Ilmavälissä kulkevan magneettivuon tasainen jakautuminen edellyttää suunnitellusti valmistettua staattori- ja roottoriuraa, sillä staattorin avonainen ura mahdollistaa hajavuon muodostumisen. Staattorin uralla ja ilmavälillä onkin siis suuri vaikutus roottorissa syntyviin pyörrevirtahäviöihin. Liian suuri ilmaväli kasvattaa ilmavälitehoa vastustavaa ilmavälin reluktanssia, kun taas liian pieni ilmaväli mahdollistaa ei-haluttujen harmonisten häviötekijöiden vaikutuksen roottorin toimintaan.

#### *Kitka- ja tuuletushäviöt $P_{fr,tot}$*

Kitka- ja tuuletushäviöt johtuvat oikosulkumoottorissa mekaanisesti liikkuvien osien; laakerien, tuulettimen ja roottorin aiheuttamasta kitkasta sekä moottorin viilentämiseen tarkoitetun ilmamassan siirtämisessä aiheutuneesta tuuletushäviöstä. Laakereissa häviöt johtuvat pääosin laakereiden vierintävastuksen ja tiivisteiden hankauksen aiheuttamasta kitkasta. Myös erikoiset maadoitusrakenteet akselissa kasvattavat yleensä roottorin kitkahäviöitä. Tuuletin on aina suunniteltu riippuen moottorin pyörimisnopeudesta. Kaksinapainen oikosulkumoottori pyörii tuplasti nopeammin kuin nelinapainen, ja täten sen tuulettimen lavat on suunniteltu kyseiseen pyörimisnopeuteen tuuletushäviöiden minimoimiseksi. Myös oikosulkumoottorin roottorin oikosulkurenkaissa olevat tuuletusrimat aiheuttavat tuuletushäviöitä roottorin pyöriessä. IEC60034-2-1 (IEC 2014a: 25) standardi määrittää kitka- ja tuuletushäviöt graafisesti tyhjäkäyntitestissä mitattujen jatkuvien häviöiden ja tyhjäkäyntijännitteen avulla.

### 2.2.3 Hyötysuhteen määrittäminen

Sähkömoottorin hyötysuhde kuvaa sen ominaisuutta muuntaa sille syötetty sähköteho mekaaniseksi voimaksi (Aho 2007: 24). Kuten on jo todettu aikaisemmin, vaikuttavat siis sähkömoottorissa esiintyvät häviöt sähkömoottorin hyötysuhteeseen. Hyötysuhde voidaan määrittää joko suoralla tai epäsuoralla menetelmällä, joista jälkimmäistä käytetään ABB oy:n oikosulkumoottoreiden hyötysuhteen määrittämiseen. Kyseisessä menetelmässä häviöt määritetään IEC60034-2-1 standardiin pohjautuvien metodien mukaisesti.

Pennanen (2016) on diplomityössään tuonut selvästi esille, miten hyötysuhde mitataan ja määritetään standardin mukaisesti ABB oy:n Vaasan Motors and Generators -yksikössä. Työssä on tuotu esille myös testit ja niiden toteutusmenetelmät, jotka selventävät lopullisen hyötysuhteen määrittämistä. Tästä johtuen tälle työlle ei ole koettu tarpeelliseksi tuoda esille tarkkaa hyötysuhteen määrittämisen polkua. Esitän kuitenkin lyhyesti epäsuoran hyötysuhteen määrittämiseen käytetyt häviökokonaisuudet, joita tulemme käsittelemään prototyypin testituloksissa. IEC60034-2-1 standardi määrittää hyötysuhteen epäsuoralla menetelmällä moottorille ja generaattorille

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (17)$$

missä  $P_{1,\theta}$  on lämpötilakorjattu syöttöteho kuormitustestistä,  $P_2$  on ulostuloteho kuormitustestissä ja  $P_T$  on sähkökoneen kokonaishäviöt

$$P_T = P_{Fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL}, \quad (18)$$

missä  $P_{Fe}$  on rautahäviöt,  $P_{fw}$  on korjatut kitka- ja tuuletinhäviöt,  $P_{s\theta}$  on lämpötilakorjatut staattorihäviöt,  $P_{r\theta}$  on lämpötilakorjatut roottorihäviöt ja  $P_{LL}$  jäännöshäviöt (IEC 2014a: 28). Standardin mukaisesti staattorihäviöt lasketaan

$$P_{s\theta} = P_s \cdot k_\theta = 1,5 \cdot I^2 \cdot R \cdot k_\theta, \quad (19)$$

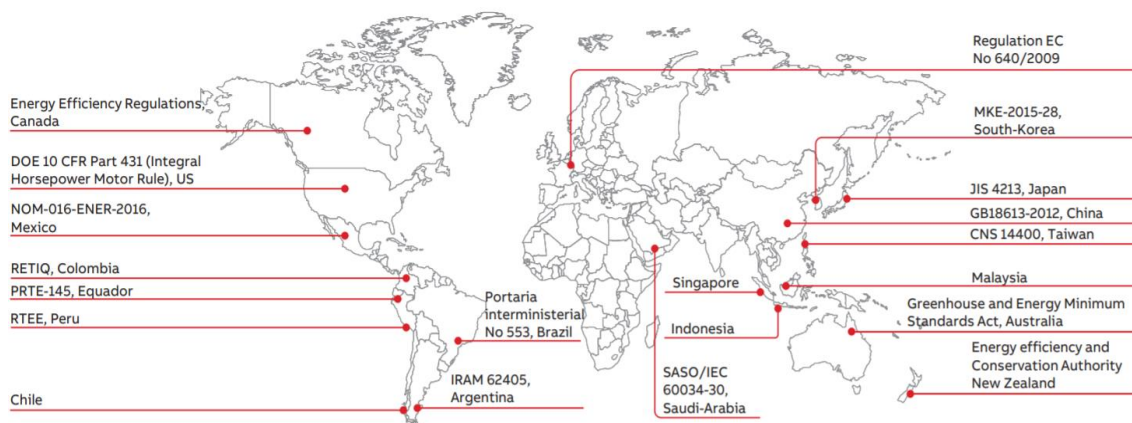
missä  $I$  ja  $R$  ovat kuormitustestissä mitatut virran voimakkuus ja vaiheresistanssien keskiarvo nimelliskuormalla ja  $k_0$  korjauskerroin.

#### 2.2.4 Eurooppalaiset hyötysuhdenormit

IEC60034-30-1 standardi (IEC 2014b: 13) määrittää neljä IE-hyötysuhdeluokkaa kaikille sinimuotoista jännitettä käyttäville yksinopeusmoottoreille. Tämän tutkimuksen tavoitteena on optimoida alumiinikämiä käyttäen sellainen tuotannollisesti mahdollinen ratkaisu, joka täyttää jopa IE4-hyötysuhdeluokan vaatimukset. Tuloksena löydettäisiin sellainen Zitzlerin (1999) mukainen Pareto-optimi ratkaisu, jossa mitään sähkömoottorin arvoa ei voida parantaa huonontamatta jotain muuta arvoa. Pareto-optimin tuloksen saavuttamiseen käytetään luvussa neljä läpi käytävää Adept-ohjelmiston Optimizer-työkalua.

Euroopan komissio on tuoreessa asetuksessaan (Komission asetus (EU) 2019/1781) määrittänyt sähkömoottorien ekologista suunnittelua koskevat vaatimukset. Tämän asetuksen liitteen 1 osissa 1 ja 3 määritetään aikataulut asetuksen voimaantuloon. Vuoden 2021 heinäkuun ensimmäisenä päivänä kumoutuu asetus (EY) N:o 640/2009 ja uutta asetusta 2019/1781 aloitetaan soveltamaan. Uuden asetuksen mukaisesti tulee kyseisenä päivänä IE3-hyötysuhdeluokka pakolliseksi 2, 4, 6 ja 8 napaisille 0,75 kW:n ja sitä suuremmille kolmivaiheisille sähkömoottoreille, jotka eivät ole *Ex eb increased safety* turvaluokan moottoreita. Samana päivänä poistuu myös nykyisen asetuksen mahdollisuus ajaa IE2 hyötysuhdeluokan moottoria taajuusmuuttajalla ja voimaan tulee taajuusmuuttajia koskeva hyötysuhdemääräys. Vuoden 2023 heinäkuun ensimmäisenä päivänä asettuu uuden asetuksen toinen vaihe voimaan, jolloin hyötysuhdevaatimukset tiukentuvat entisestään. Tällöin osalta 2, 4 ja 6 napaisilta 75–200 kW:n oikosulkumoottoreilta edellytetään jopa IE4-hyötysuhdeluokkaa.

Eurooppalaiset hyötysuhdenormit eivät kuitenkaan yksinään määrää sähkömoottorien hyötysuhteita, vaan on olemassa muitakin maakohtaisia ja alueellisia vähimmäisstandardeja kuvan 7 mukaisesti. Alumiinikäimityksellä pystyttäisiin saavuttamaan merkittävä markkina-asema maissa ja alueilla, joissa IE2- ja IE3-hyötysuhdeluokan kustannustehokkuuksilla sähkömoottoreilla on suuri kysyntä.



**Kuva 7.** Maailman energiatehokkuuden vähimmäisstandardit (ABB 2018: 4).

### 2.3 Ympäristövaikutukset

International Energy Agency (IEA) raportin (2017: 11) mukaan maailma olisi kuluttanut vuonna 2016 kaksitoista prosenttia enemmän energiaa ilman vuonna 2000 aloitettuja energiatehokkuuden parantamisia. Tämä vastaa kokonaisen Euroopan Unionin lisäämistä maailmanlaajuisille energiamarkkinoille. Saman raportin mukaan sähkömoottorisovellukset kattavat 53 prosenttia koko maailman sähkön kulutuksesta. Oikosulkumoottoreiden kattaessa 90 prosenttia kaikista sähkömoottoreista, voidaan oikosulkumoottoreiden ympäristövaikutusta pitää vaikuttavana tekijänä koko maailman energiankulutuksessa.

Ympäristöystävällisten markkinoiden kasvaessa on entistä tärkeämpää käyttää materiaaleja ja energiaa kestävästi ja tehokkaasti. Resurssitehokkailla valinnoilla pystymme kiinnittämään huomiota sähkömoottorien materiaali-, suunnittelu- ja tuotantoketjussa syntyviin häviöihin. Yksinkertaisesti kun vähentää resurssien käyttöä, saa kustannussäästöjä ja yrityksen kilpailukyky paranee. Samalla toiminta on ympäristöystävällisempää.

#### 2.3.1 Materiaalien alkuperä

Nykyään asiakkaat ovat laatu tietoisia ja halukkaita tietämään ostamansa tuotteen materiaalien alkuperän ja tuotteen valmistukseen kuluneen hiilijalanjäljen. Toki oikosulkumoot-

tori kuormittaa ilmastoa koko elinkaarensa ajan, mutta osalle asiakkaista voi tämä tuotteen materiaalien alkuperä ja laatu olla ratkaiseva asia. Laadun ollessa ABB oy:n kilpailuvaltti, tulisi sitä käyttää myös asiakassuhteiden muodostamiseen ja kehittämiseen. Tällainen asiakaslähtöinen ajattelutapa luo valmistusorganisaation ja asiakkaan välille kestävän suhteen, josta molemmat hyötyvät.

ABB oy:n velvollisuutena on varmistaa, että tuotteisiin käytetyt materiaalit eivät vaikuta ympäristön rappeutumiseen, johda konflikteihin tai muuten epäeettisesti käytä hyväksi maata, joka valmistaa niitä. ABB vaatii toimittajiltaan asianmukaista huolellisuutta materiaalien määräystenmukaiseen hankintaan seuraavin ohjeistuksin ABB (2019b):

- Noudata ABB:n luomia toimittajien ohjesääntöjä.
- Suorita tarvittavat toimenpiteet osoittaaksesi, että ABB:lle toimitetut konfliktimineraalit ovat peräisin konfliktittomista lähteistä.
- Jatka hakua tarvittaessa syvemmälle toimitusketjussa määrittääksesi mineraalien lähde.
- Varmista, ettei kukaan toimitusketjussa diskriminoi laillisia konfliktimateriaalien lähteitä.

Elementtien ryhmä; tina, tantaali, volframi ja kulta, muodostavat ns. konfliktimineraalien ryhmän, joka tunnetaan myös materiaalien englanninkielisten nimien lyhenteenä 3TG (tin, tantalum, tungsten, gold). ABB tukee organisaationa vastuullista mineraalien hankintaa sekä teollisuuden aloitteita työskentelemällä yhdessä toimittajiensa kanssa helpottaakseen konfliktivapaita materiaalihankintoja, jotka edistävät talouskasvua. Lisäksi ABB on Responsible Minerals Initiative -järjestön (RMI) jäsen ja noudattaa Organisation for Economic Co-operation and Development -organisaation (OECD) ohjeita konfliktimineraalien läpinäkyvyyden lisäämiseksi toimitusketjussaan. Responsible Sourcing Networkin (RSN) teettämä *Mining the Disclosures* on vuosittainen arvio yritysten toimin-

nasta konfliktimineraalien käsittelemiseksi, mukaan lukien riskienhallinta, ihmisoikeusvaikutukset ja raportoinnin laatu. ABB on sijoittunut vuoden 2019 arviossa teollisten tuotteiden valmistajien joukossa neljänneksi kuudellakymmenelläneljällä pisteellä sadasta (Responsible Sourcing Network 2019: 21).

Muita materiaalien määräystenmukaisuuteen liittyviä asetuksia, joita ABB oy:n tulee noudattaa ovat; *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* (REACH) sekä *Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment* (RoHS). Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1907/2006, joka on annettu parantamaan ihmisten ja eläinten terveyden sekä ympäristön suojelemista kemikaalien aiheuttamilta vaaroilta, edesauttaa ABB oy:n ympäristöystävällistä toimintaa. Euroopan Unionin RoHS-direktiivin tarkoituksena on rajoittaa vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Näiden myötä ABB onkin määrittänyt kiellettyjen ja rajoitettujen kemikaalien luettelon, joka auttaa organisaation insinöörejä ja toimittajia mukautumaan säännösten vaatimuksiin.

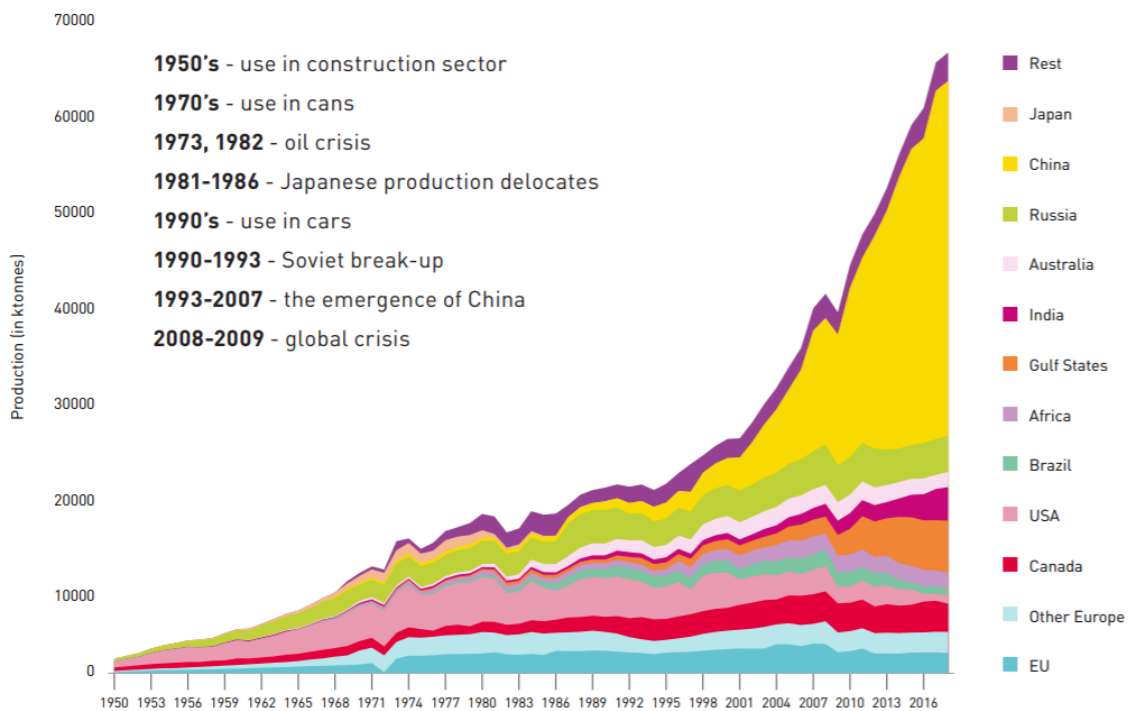
Tutkimuksessa käytetyn alumiinijohtimen sekä sitä vastaavan kuparijohtimen alkuperä selvitettiin tuotantoketjumme yhdeltä tärkeimmältä kuparijohtimen tuottajalta, LWW Group:ilta, joka on osa Liljedahl Group:ia. Vastauksena saatiin, että kuparijohtimen valmistukseen käytetty kupari tulee täysin kaivoksista jalostetusta malmista. LWW Group:iin kuuluva Dahréntråd, jolta suurin osa Vaasan moottoritehtaan omaan käämintään hankitusta kuparijohtimesta ostetaan, saa kuparijohtimien valmistuksessa käyttämänsä kuparin Bolidenin Aitik-kaivokselta Pohjois-Ruotsista. Vastaavasti alumiinijohtimen valmistukseen käytetty materiaali hankitaan täysin kaivostoiminnasta jalostetusta bauksiitista. Alumiinin alkuperä on LWW:n mukaan Hydro-yhtiön tuotantotehtaat Etelä-Norjassa. Mielenkiintoisena sivukommenttina liittyen kuparin ja alumiinin raakamateriaalin sekä kupari- ja alumiinijohtimen hintojen välillä selvisi, että alumiinijohtimen valmistukseen joudutaan käyttämään noin kolminkertainen aika kuparijohtimen valmistukseen verrattuna. Tästä johtuen alumiinijohtimen hinta on verrannollisesti suurempi kuin kuparijohtimen, kun tarkastellaan vastaavia raakamateriaalien hintoja.

### 2.3.2 Materiaalien tuotanto ja hiilijalanjälki

Työn keskittyessä energiatehokkaan materiaalin valintaan kuparin ja alumiinin kesken, on tarpeellista tuoda esille hiilijalanjälki, joka on syntynyt kuparin ja alumiinin tuotannossa. ABB on globaali yhtiö, joka valmistaa teollisuustuotteita ympäri maailmaa. On siis selvää, että eri tuotantotehtaat saavat materiaalinsa eri valmistajilta ja täten materiaalien alkuperä riippuu tuotteen tuotantopaikasta. Raskaiden metallien kuljettaminen pitkiä matkoja ei ole kannattavaa, jonka myötä nämä materiaalit yleensä tuodaan mahdollisimman läheltä. Globaalin toiminnan takia tuodaan työssä esille seuraavaksi globaalisti vertailtavia ja saatavilla olevia tietoja. Hiilijalanjäljen mittarina käytetään hiilidioksidiekvivalenttia (CO<sub>2</sub>-ekv), joka ilmaisee eri kasvihuonekaasujen GWP100-kertoimella yhteismitallistetun eli muunnetun ilmastoja lämmittävän voimakkuuden suhteutettuna hiilidioksidin. Esimerkiksi metaanin GWP100-kerroin on 21, eli metaanin lämmityskerroin on 21 kertaa hiilidioksidia suurempi. Näin saadaan se hiilidioksidipäästöjen taso, jolla olisi alkuperäisen kasvihuonekaasun vastaava lämmitysvaikutus. (Ympäristöministeriö 2003: 7, 64).

#### *Alumiinin tuotanto ja hiilijalanjälki*

Primäärialumiinia tuotetaan maailmanlaajuisesti louhimalla bauksiittimalmia, jalostamalla se Bayer-prosessilla alumiinioksidiksi ja pelkistämällä tämä yleisimmällä alumiinin valmistusmenetelmällä, Hall–Héroult-menetelmällä, noin 960 °C:n lämpötilassa sulaksi seokseksi. Kyseisessä menetelmässä liuokseen johdetaan 150–300 kA:n tasavirta alle 5 voltin jännitteellä, jolloin hiilianodit reagoivat alumiinioksidin kanssa synnyttäen sulaa alumiinia ja hiilidioksidia (Prasad 2000: 246). Kuvassa 8 on esitettyä primäärialumiinin tuotannon määriä maittain tai alueittain vuodesta 1950 vuoteen 2016. Tämän mukaan primäärialumiinia tuotetaan nykyään vuositasolla maailmanlaajuisesti jo yli 60 miljoonaa tonnia.



**Kuva 8.** Primäärialumiinin tuotannon historia (European Aluminium 2019: 14).

Sekundäärialumiini tuotetaan maailmanlaajuisesti kierrätetystä alumiiniromusta. Alumiini ei menetä ominaisuuksiaan, vaikka sitä kierrätettäisiinkin useaan kertaan. Tästä johtuen noin 75 prosenttia kaikesta koskaan tuotetusta alumiinista on tänä päivänä edelleen käytössä. Euroopassa kerätystä alumiiniromusta 90 prosenttia kierrätetään itse ja 10 prosenttia viedään Euroopan ulkopuolelle kierrätettäväksi. Vuonna 2017 tämän alumiiniromun kokonaismäärä oli noin 8,9 miljoonaa tonnia. (European Aluminium 2019: 26–28).

International Aluminium Institute (IAI) on kerännyt internetsivuilleen (IAI 2020) tilastotietoa maailman alumiinin tuotannosta. Taulukkoon 2 on koottu merkittävimmät luvut vuosina 2000 ja 2018 koko maailman, Kiinan, Amerikan ja Euroopan osalta vertailtavaksi. Tähdellä (\*) merkitty luku taulukossa on vuodelta 2003, sillä kyseistä lukua ei ollut saatavissa vuodelle 2000.

**Taulukko 2.** Maailmanlaajuinen alumiinin tuotanto vuonna 2000 ja 2018. (IAI 2020).

	<u>2000</u>				<u>2018</u>			
	Maailma	Kiina	Ame- rikka	Eu- rooppa	Maailma	Kiina	Ame- rikka	Eu- rooppa
Primäärialumiinin tuotanto (tuhatta tonnia)	24 657	2 794	8 208	7 490	64 336	36 485	4 938	7 782
Alumiinioksidin tuotanto (tuhatta tonnia)	52 583	6 112*	16 979	10 623	130 433	71 547	12 860	10 334
Primäärialumiinin tuotannossa käytetty sähköenergia (kWh/kg)	15,381	15,479	15,565	15,242	14,221	13,555	15,423	15,468
Primäärialumiinin sulatuksessa käytetty sähköenergia (GWh)	301 718	43 248	120 406	62 685	867 757	494 554	75 048	122 237
• Josta kivihiilen osuus	120 479	38 923	0	14 286	531 014	445 099	7 513	8 010
Metallurgisen alumiinioksidin tuotannossa käytetty energia (MJ/kg)	14,479	35,644	11,779	12,627	11,359	11,525	9,609	13,076
Metallurgisen alumiinioksidin tuotannossa käytetty polttoaine (TJ)	597 121	154 339	188 456	43 668	1 336 249	835 900	101 536	100 644
• Josta kivihiilen osuus	181 127	111 849	7 636	0	747 820	605 777	26 064	0

Taulukosta 2 nähdään, kuinka Kiinan osuus alumiinin tuotannosta on kasvanut räjähdysmäisesti kuvan 8 mukaisesti. Vaikka Kiina käyttääkin nykyään maailman keskiarvoa vähemmän sähköenergiaa primäärialumiinikilogramman tuotantoa kohden, on hälyttävää kuinka paljon Kiina käyttää yhä tänä päivänä kivihiiltä energian tuottamiseen. Kiina tuotti vuonna 2018 noin 57 prosenttia koko maailman primäärialumiinista. Tämän tuotannon sulatuksessa käytetty energia on kuitenkin katettu 90 prosenttisesti kivihiilellä. Tästä päästään primäärialumiinikilogramman tuotannossa syntyvään hiilijalanjälkeen.

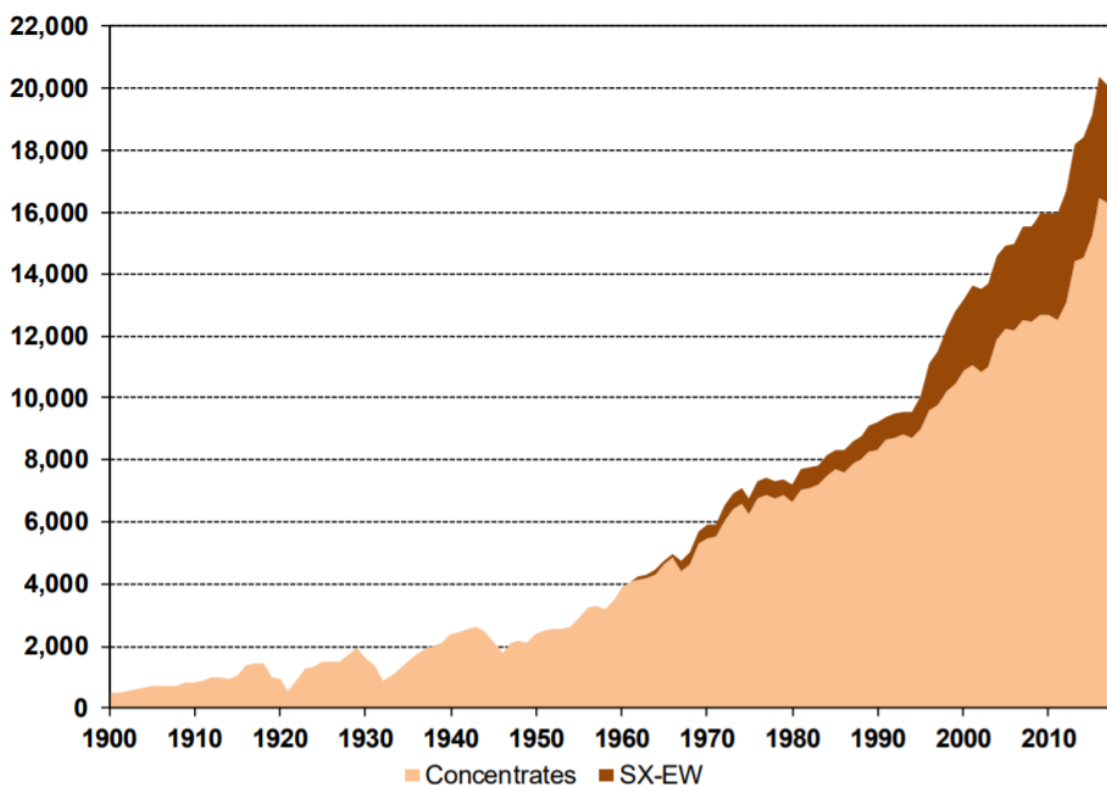
Maailmanlaajuinen keskiarvo yhden primäärialumiinikilogramman valmistuksessa syntyneelle hiilijalanjäljelle on tänä päivänä 18 kgCO<sub>2</sub>-ekv, kun vastaava luku Euroopassa on 7 kgCO<sub>2</sub>-ekv ja Kiinassa 20 kgCO<sub>2</sub>-ekv. Tämä luku muuttuu suuresti riippuen alu-

miinin sulatuksessa käytetyn sähköenergian alkuperästä, sillä primäärialumiinin tuotannon kustannuksista sähköenergian kustannukset kattavat jopa 40 prosenttia. (European Aluminium 2019: 9, 34). Tästä johtuen Kiinassa tuotetun primäärialumiinin hiilijalanjälki on ainakin vielä tänä päivänä moninkertainen muihin tuottajamaihin verrattuna. Alcoa, yksi maailman suurimmista alumiinin metallurgisista tuottajista, arvioi raportissaan (Alcoa 2018: 18), että Kiina tuottaa yli 65 prosenttia maailmanlaajuisesta alumiinin tuotannossa syntyneestä hiilijalanjäljestä.

Ekologisista vaihtoehtoista Alcoa mainitsee raportissaan (2018: 25), että sen uusiutuvalla energialla toimiva alumiinisulatin tuottaa alle 2,5 kgCO<sub>2</sub>-ekv tuotettua primäärialumiinikilogrammaa kohden. Uusiutuvan energian suosion kasvaessa ja fossiilisten polttoainneiden poistuessa voidaan todeta, että primäärialumiinin tuottamisessa syntyneen hiilijalanjäljen vähentämisessä on vielä suuria mahdollisuuksia. Tänä päivänä alumiinin ostajan on oltava kuitenkin tietoinen valinnoissaan, jos hän haluaa vähentää hiilijalanjälkeään.

#### *Kuparin tuotanto ja hiilijalanjälki*

Primäärikupari jalostetaan yleisimmin kaivostoiminnalla tuotetusta malmista. Louhittu malmi murskataan ja jauhetaan, ja se rikastetaan käyttämällä vaahdotusmenetelmää. Tämän jälkeen rikastettu malmi paahdetaan noin 500–700 °C:n asteen kuumuudessa rikin poistamiseksi ja malmin kuivaamiseksi. Sitten noin 50–70 prosentin kuparipitoisuuden omaava malmi sulatetaan noin 1200 °C asteen kuumuudessa nestemäisen kupari- ja rautasulfidin seokseksi. Tähän seokseen puhalletaan hapella rikastettua ilmaa, jolloin muodostuu kuparioksidia. Tällöin lopputuotteena saadaan puhdasta kuparia sekä rikkioksidia. Elektrolyyttisellä puhdistuksella tai rikastuksella tämä voidaan jalostaa 99,99 prosenttiseksi kupariksi. (International Copper Study Group, ICSG 2019: 9). SX-EW (Solvent extraction and electrowinning) on suosiota viime vuosikymmeninä kasvattanut kaksivaiheinen hydrometallurginen prosessi, jossa liuottimien ja sähköisen talteenoton avulla otetaan uuttonesteistä talteen puhdasta metallia. Nämä tuotantomenetelmät luovat primäärikuparin tuotannon kokonaisuuden, jonka historia esitetään kuvassa 9. Nykyään primäärikuparia tuotetaan vuositasolla jo yli 20 000 tuhatta tonnia.



**Kuva 9.** Primäärikuparin maailmanlaajuinen tuotantomäärä tuhansina tonneina (huom. desimaalierotin) vuosina 1900–2018 (ICSG 2019: 10).

International Copper Association (ICA) on internetsivuillaan (ICA 2020) koonnut kuparin tuotantoa koskevia indikaattoreita. Kyseiset tulokset ovat koottu kahdenkymmenen neljän maailmanlaajuisesti toimivan primäärikuparin tuottajan raportoinnin avulla. Sivuston mukaan kyseiset tuottajat kattavat 40–50 prosenttia maailman vuosittaisesta primäärikuparin valmistuksesta. Indikaattorien (ICA 2020) mukaan yhden primäärikuparikilogramman valmistus on vuonna 2017 kuluttanut noin 10,8 kWh energiaa ja tuottanut 4,2 kgCO<sub>2</sub>-ekv hiilidioksidipäästöjä.

Kuparin hiilijalanjälkeen vaikuttaa kaivostoiminnan muoto (maalainen tai avonainen kaivos) ja sen energialähteiden alkuperä. Uusiutuvan energian käyttömäärä suhteutettuna kokonaisuudessa käytettyyn energiaan on suuressa roolissa, kun tarkastellaan kuparin hiilijalanjälkeä. Kaivostoiminnassa käytetty sähköenergia ei kuitenkaan ole ainut ratkaiseva tekijä, kun tarkastellaan kokonaiskulutuksia. Määräävä tekijä hiilijalanjäljen syntyyn ovat myös polttoaineet, jotka ovat suuressa roolissa raakamateriaalien kuljetuksessa.

Lopuksi voidaan todeta, että maailmanlaajuisesti tarkasteltuna primäärialumiinin tuotanto tuottaa suuremman hiilijalanjäljen kuin primäärikuparin tuotanto kilogrammaa kohden. Vaikuttavin tekijä tähän on kuitenkin primäärialumiinin tuotannon sulatusvaihe, joka vaatii suuren määrän sähköenergiaa. Edellä mainitusti Kiina on merkittävin tekijä primäärialumiinin tuotannossa syntyvään hiilijalanjälkeen kivihiilen käyttömäärällään. Edellä todetusti uusiutuvalla energialla toimiva alumiinin valmistus voi kuitenkin tuottaa pienemmän hiilijalanjäljen kuin kupari.

### 2.3.3 Materiaalien kierrätettävyys

Alumiinia ja kuparia on kierrätetty viime vuosina kasvavassa määrin. Nämä metallit eivät menetä ominaisuuksiaan, vaikka niitä kierrätettäisiin useaan kertaan. Kierrätyksen avulla tuotettu kupari tai alumiini ei vain säästä arvokkaita luonnonvaroja, mutta vaatii myös huomattavasti vähemmän energiaa kuin maaperästä louhitusta raakalmista valmistettu metalli (UN Environment 2017: 85). International Copper Association (2017: 1), myöhemmin ICA, mukaan kierrätetyn kuparin valmistus vaatii vain 80–90 prosenttia siitä energiasta joka vaadittaisiin louhitusta materiaalista valmistetun kuparin valmistukseen. Maailmanlaajuisesti tällä säästetään noin 40 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä. Vastaavasti alumiinin uudelleensulatus tarvitsee vain 5 prosenttia siitä energiamäärästä, mikä tarvittiin primäärialumiinin valmistukseen (Teknologiateollisuus 2006: 37).

Soulierin, Glöserin, Goldmannin ja Terceron (2018) mukaan Euroopan kuparikysynnästä pystytään nykyään kattamaan jo 50 prosenttia kierrätetyllä kuparilla. Vastaavasti ICA:n (2017: 2) ja ICSG:n (2019: 52) raporttien mukaan 33–35 prosenttia koko maailman kuparikysynnästä on täytetty kierrätetyllä kuparilla. Alumiinin maailmanlaajuisesta tuotannosta on vuonna 2017 katettu IAI:n (2019) luoman internerpohjaisen työkalun mukaan 31,6 prosenttia kierrätetyllä alumiinilla.

Oikosulkumoottorin käyttöiän päättyessä valurauta, teräs, alumiini, kupari, ruostumaton teräs ja messinkiosat, jotka edustavat yli 98 prosenttia moottorin kokonaismateriaaleista, ovat täysin kierrätettäviä. Metallien lisäksi sähkömoottori sisältää pieniä määriä kumia ja muovia, jotka ovat yhtäläillä mahdollista kierrättää. (UN Environment 2017 : 85).

#### 2.3.4 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA) on menetelmä, jolla tuotteen elinkaaren aikaiset potentiaaliset ympäristövaikutukset arvioidaan (Dammert, Väänänen, Kuuva, Valkama & Kaipainen 2004: 27). Se auttaa niin kuluttajia kuin tuottajiakin ymmärtämään paremmin ympäristökuormitusten syntyä koko tuotteen tai palvelun elinkaaren aikana. Elinkaariarviointia voidaankin käyttää useaan eri tarkoitukseen. Yksi yleisimmin selvittävä asia on löytää ne tekijät, jotka ovat tuotteen elinkaaren aikana ympäristövaikutuksiltaan suurimmat (Möttönen 2013: 19).

Olivetin, Duanin ja Kirchainin (2013: 34) NEMA:lle teettämän tutkimushankkeen mukaan koko elinkaaren energiankulutuksesta oikosulkumoottorin käyttövaihe tuottaa 99,8 prosenttia päästöistä (tutkimuksen kohteena oli 25 hp:n 6-napainen NEMA-premium oikosulkumoottori 5000 h:n keskimääräisellä käyttöajalla ja 20 vuoden käyttöiällä). Myös Orlova, Rassölkin, Kallaste, Vaimann ja Belahcen (2016: 7) ovat tutkimusraportissaan todenneet oikosulkumoottorin käyttövaiheen olevan 97,9 prosenttisesti vastuussa moottorin koko elinkaaren ympäristövaikutuksista (tutkimuksen kohteena oli 10 kW:n IE1 oikosulkumoottori 3 000 h:n keskimääräisellä käyttöajalla ja 15 vuoden käyttöiällä). Möttönen (2013: 92) on ABB oy:lle tehdyn diplomityönsä johtopäätöksessä kuitenkin todennut 315-runkokoon ja 200 kW:n prosessimoottorin elinkaaren kokonaisympäristövaikutuksien olevan lähes yhtä suuret niin moottorin tuottamisen kuin käytönkin osalta. Tulokset ovat siis hyvinkin ristiriitaisia, mikä voi johtua käytettyjen laskentamenetelmien eroavaisuuksista tai syötettyjen tietojen määrästä ja varmuudesta. Toki mitä suurempi on moottori, sitä enemmän siihen on käytetty materiaaleja ja resursseja ja sitä parempi sen hyötysuhde keskimäärin on. Toisaalta nimellisteholtaan suurempi moottori käyttää enemmän sähköä ja näin kuormittaa ympäristöä enemmän.

Oikosulkumoottorin keskimääräisen käyttöiän ollessa yli 15 vuotta ja käyttöajan ollessa noin 5 000 tuntia vuodessa voidaan kuitenkin todeta edellä olevien raporttien tuloksista, että hyötysuhde on erittäin merkittävä tekijä sähkömoottorin elinkaari-vaikutuksille. Korkeamman hyötysuhteen tiedetään vaikuttavan positiivisesti myös moottorin käyttöikänsä.

### 3 STAATTORIKÄÄMITYS ALUMIINIJOHTIMELLA

Sähkömoottorin staattori- ja roottoripakettien käämintä voidaan toteuttaa useammalla rakenteellisesti eroavalla menetelmällä, joka riippuu useimmiten moottorin kokoluokasta ja käyttötarkoituksesta. Myös uramuotojen muokkauksella voidaan vaikuttaa oikosulkumoottorin tuottamaan käynnistys- ja huippumomenttiin. Tässä luvussa käydään läpi kolmivaiheisen oikosulkumoottorin staattorin käämintämenetelmä sekä alumiinijohtimen mahdollinen vaikutus käämintärakenteeseen.

Oikosulkumoottoreita voidaan valmistaa joko kolmi- tai yksivaiheisina. Yksivaiheiset oikosulkumoottorit tarvitsevat toimiakseen käynnistysapukäämin, jonka kanssa on kytketty sarjaan joko yksi tai kaksi kondesaattoria riippuen halutusta käynnistysmomentin suuruudesta. Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin staattorikäämityksen ollessa käämitty symmetrisesti, syntyy koneen sisälle automaattisesti pyörivä magneettikenttä, kun syöttövirta on kolmivaiheista.

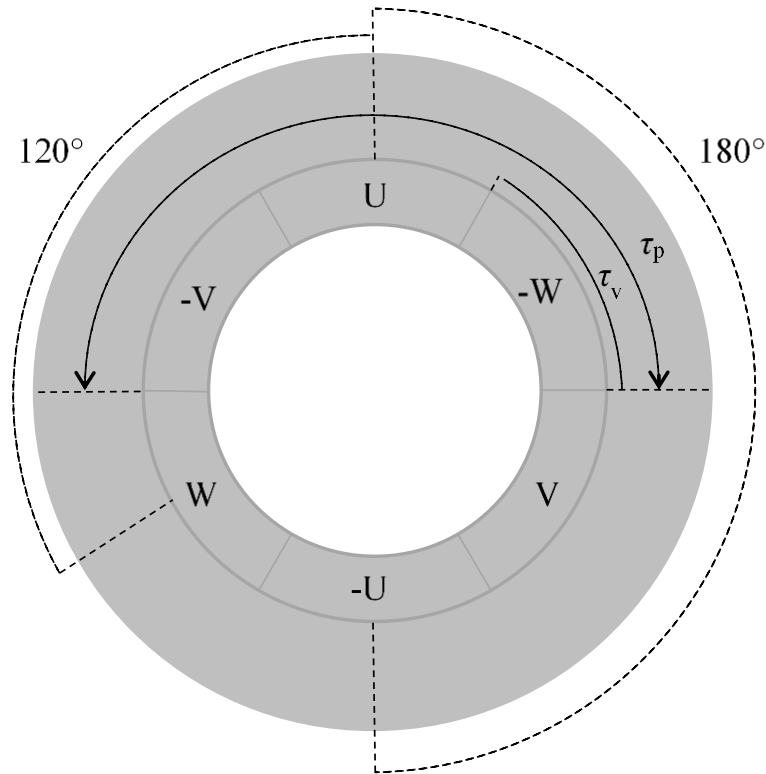
#### 3.1 Symmetrinen kolmivaiheinen urakäämitys

Oikosulkumoottorin ilmaväli jaetaan tasaisesti napaparien lukumäärän  $p$  mukaan, jotta saadaan määritettyä napakaaren pituus sekä sitä vastaava napajako  $\tau_p$ , joka voidaan määrittää metreinä yhtälöllä

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}, \quad (20)$$

missä  $D$  on staattorin sisähalkaisija metreinä. Tällöin yhden vaiheen osuus eli vyöhykejako on kuvan 10 mukaisesti

$$\tau_v = \frac{\tau_p}{m}. \quad (21)$$



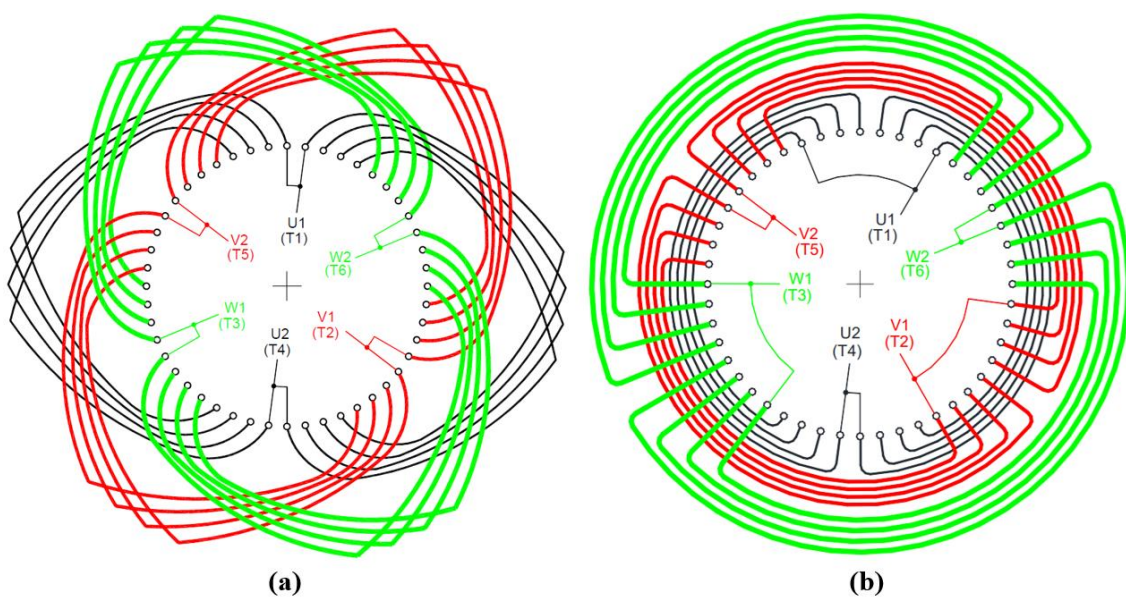
**Kuva 10.** Kaksinapaisen oikosulkumoottorin staattorikäänitys ja sen napajakoisuus.

Kuvan 10 mukaisesti U, V ja W vaiheet sijoittuvat 120 sähköasteen välein. Samaan napariin kuuluvat positiivinen ja negatiivinen vaihe asettuvat 180 sähköasteen välein ja vyöhykejakojen määrä on aina  $2pm$ . Uralukujen määrää suunniteltaessa yhden staattorin vyöhykejaon urien lukumäärä  $q_1$  (vastaavasti  $q_2$  staattorissa) lasketaan

$$q_1 = \frac{Q_1}{2pm}, \quad (22)$$

missä  $Q_1$  on urien kokonaismäärä staattorissa (vastaavasti  $Q_2$  roottorissa). Urien lukumäärä valitaan sellaiseksi, että kolmivaiheisen moottorin ilmavälissä syntyvät parittomat yliaallot vaimentuvat. Varsinkin 5. ja 7. yliaallolla on tapana aiheuttaa roottorin pintaan vaikuttavan 6. harmonisen yliaaltovirran, joka roottoriin indusoiduttuaan saa aikaan kuusinkertaisella taajuudella sykkivän momentin. Kyseisen yliaallon indusoitumista voidaan kuitenkin vaimentaa staattorin 5/6 lyhytjännekäämityksellä, jolloin staattorin uraluku tulee olla parillisesti jaollinen  $2pm$ :llä. Tällöin kaksinapaisen oikosulkumoottorin staattorin rakenteelle otollisimmat uralukumäärät ovat 12, 24, 36, 48, 60 jne. (Aho: 2007: 92–93).

Käämitykset jaetaan niiden muodon mukaan mm. limikäämityksiin ja tasokäämityksiin. Näistä limikäämitys on nykyään yleisempi, koska se vie pienemmän tilan, sen vyyhdit ovat kaikki samankokoisia ja ne tukevat hyvin toisiaan. Kuvassa 11 on esitettyjä nämä käämintämenetelmät. Käämitykset jaetaan staattorin uriin, joiden lukumäärää valitaan edellä esitetysti. Tässä työssä on tutkittu kaksinapaista oikosulkumoottoria, jonka limikäämityssä staattorissa on 48 uraa kuvan 11a mukaisesti.



**Kuva 11.** Työssä käytetty limikäämitys (a), sekä vaihtoehtoinen tasokäämitys (b). Molemmissa käämintämenetelmissä  $p=1$ ,  $Q_1=48$  ja  $q_1=8$ .

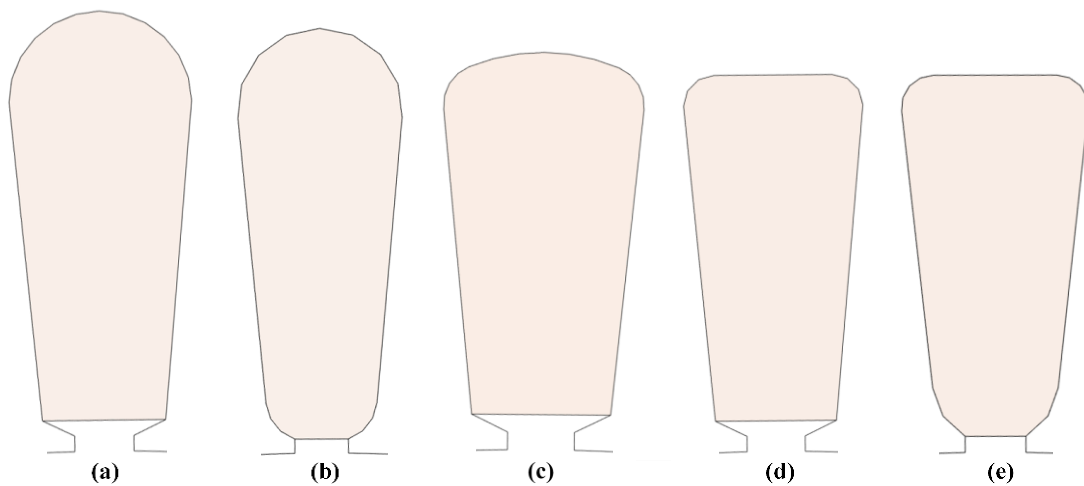
Käämin pituuden tarkka määrittely sähkökoneelle on varsin vaikea tehtävä. Urakäämityksen tapauksessa käämityksen pituuden määrittäminen vaikeutuu varsinkin jos eripituisia käämejä on käytetty moottorin valmistuksessa. Alustavat laskelmat voidaan kuitenkin toteuttaa käyttämällä empiriisiä yhtälöitä. Pyörölangalla urakäämitylle pienjännitemoottorille voidaan laskea käämityksen keskimääräiselle pituudelle  $l_{av}$  likimääräarvo

$$l_{av} \approx 2l + 2,4W + 0,1, \quad (23)$$

missä  $l$  on staattoripaketin pituus ja  $W$  käämikierroksen kahden uran perifeerinen etäisyys metreinä. (Pyrhönen ym. 2014: 265–266).

### 3.2 Staattoriura ja sen eristeet

Staattorin yleisin uramuoto on puolisoljettu, pohjalta puolipallomainen ura, joka tukee hyvin käämitystä. Tämän puolisoljetun uran etuna on parantunut magneettivuon kulku staattorin sähkölevyissä sekä oikosulkumoottorin ilmapälissä. Tässä työssä käytetään kyseistä uramuotoa, jota myöhemmin optimoidaan suuremmaksi staattorihäviöiden pienentämiseksi. Muita mahdollisia ja yleisiä staattorin uramuotoja on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12.** Oikosulkumoottorille mahdollisia puolisoljettuja uramuotoja: pohjalta puolipallomainen ura (a), pohjalta ja hampaasta puolipallomainen ura (b), pohjalta hieman pyörästetty ura (c), pohjalta suora ura (d) sekä pohjalta suora ura jonka hampaat ovat pyörästetty (e).

Kuvassa 12 esitetyistä uramuodoista on tässä työssä käytetty siis uraa (a). Pienemmissä kaksinapaisissa, 90–180 runkokoon moottoreissa, käytetään myös uramuotoja (c) ja (d), ja runkokoon 80 kaksinapaisissa moottoreissa käytetään yleisesti uraa (e). Kyseisillä uramuodoilla voidaan vaikuttaa staattorin luomaan pyörivään magneettikenttään, joka taas vaikuttaa oikosulkumoottorin synnyttämään vääntömomenttiin. Uramuodon valinnalla voidaan siis muokata moottorin käynnistys- ja huippumomenttia soveltuvaksi tietylle teholle tietyssä nopeudessa.

Uriin sijoitettavat käämijohtimet eristetään staattoripaketista uraeristeellä ja uran suuaukko suljetaan joko sulkuliuskalla tai urakiilalla. Näiden lisäksi vyyhdin päihin asennetaan vaihe-eristeet, jotka estävät vaiheiden välille syntyviä oikosulkuja. Eristeiltä vaaditaan mahdollisimman pientä sähköjohtavuutta ja suurta jännitekestoisuutta. Näillä ominaisuuksilla saavutetaan pienemmät häviöt ja estetään läpilyöntien syntyminen.

Alumiinijohtimen käyttö kuparijohtimen sijaan ei vaadi toimenpiteitä eristeitä ajatellen. Alumiinijohtimella voidaan käyttää täysin samaa uramuotoa ja täysin samoja eristeitä. Jäljelle jää vain alumiinijohtimella käytetty kytkentä ja alumiinin huonomman sähkönjohtavuuden aiheuttama optimointi.

### 3.3 Alumiinikäminnän tuotekehitys Vaasassa

Alumiinijohtimen tehokasta käyttöä staattorin johdinmateriaalina on tutkittu Vaasan Motors and Generators -yksikössä jo vuosia. Tutkinnan kohteina ovat olleet pienemmät, 132- ja 160-runkokoon sähkömoottorit. Prototyypin valmistuksella ja testauksella on pyritty löytämään kustannustehokkaampi ratkaisu, joka pienemmällä materiaalikulustuksella pystyy kuitenkin tuottamaan yhtäläisen hyötysuhteen kuin käytössä oleva tuote.

132-runkokoon oikosulkumoottorille 5,5 kW:n nimellisteholla toteutettiin vuonna 2018 Vaasan tutkimus- ja tuotekehitysosaston projektina yhtäläinen uramuodon optimointi kuin tässäkin työssä tehdään. Kyseisellä moottorilla staattoriuran suurennus ei täysin onnistunut, sillä staattorirauta kyllästyi ja moottorin tehokerroin romahti kymmenyksellä. Kyseisellä prototyypillä staattoriuran leveyttä kasvatettiin jopa 30 prosenttia ja korkeutta 25 prosenttia. Optimointiin toteutetuissa laskelmissa ei tehokerroin alentunut, vaikka todellisuudessa näin kävikin. Onkin siis muistettava, että Adept-laskelmissa käytettävien kaksiulotteisten FEM-laskelmien tulosten tarkkuus riippuu suuresti annetun vyyhdenpään reaktanssin tarkkuudesta, elementtiverkon ja laskelmissa käytetyn muotofunktion asteesta sekä annettujen BH-käyrien arvojen oikeellisuudesta. Laskennat eivät välttämättä siis aina pidä paikaansa ja täten uuden rakenteen optimoinnissa on tärkeää verrata laskentatulosten muutoksia siirryttäessä vanhasta rakenteesta uuteen.

Ojala (2019) tutki diplomityössään erilaisia alumiinijohtimelle suunniteltuja kaapelikenkiä ja jatkoliittimiä. Oleellista tässä työssä oli toteutettu lämpövanhenemiskoe, jossa tutkittiin alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen vaikutusta liitosresistanssiin ja näin ollen liitoksen sähkönjohtavuuteen (Ojala 2019: 10). Työssä tuotiin esille tärkeitä havaintoja erilaisten kaapelikenkien ja jatkoliittimien soveltuvuudesta alumiinijohtimelle. Ojala (2019: 57) on esimerkiksi huomauttanut, että alumiiniset kaapelikengät ovat kooltaan yleensä suurempia verrattuna kuparista valmistettuihin kaapelikenkiin. Liitinkoteloihin varattu tila on kuitenkin rajallinen ja täten suuremmat kaapelikengät ei välttämättä ole jokaiseen rakenteeseen soveltuva. Työssä ei kuitenkaan otettu huomioon, vaiuttaako käämille toteutettu hartsaus jatkoliitoksen sähkönjohtavuuteen. Täten päätettiin toteuttaa tässä työssä seuraavaksi alaluvussa 3.4 läpi käytävä lisätutkimus.

### 3.4 Uppokyllästetyn jatkoliitoksen lämpövanhennuskoe

Yleisesti kääminnässä on kaksi vaihtoehtoa; joko käämivyehdin johtimet tuodaan suoraan liitinkotelon liitinalustaan tai ne jatketaan kääminnässä jatkoliittimellä, jolloin myös liitoskohta joutuu hartsaukseen. Edellisissä tuotekehitysosaston valmistamissa alumiinikäämityissä prototyypeissä on käämivyehdit tuotu suoraan liitinalustaan. Täten työssä päätettiin toteuttaa lisätutkimus, jossa tutkittiin hartsatun jatkoliitoksen sähkönjohtavuutta lämpövanhennuskokeen aikana. Hartsattu jatkoliitos voisi luoda alumiinijohtimelle varsin suojatun liitoksen, johon ei ilma, lika tai kosteus pääsisi vaikuttamaan. Toisaalta hartsi voi vaikuttaa myös negatiivisesti sähköisen liitospinnan pysyvyyteen.

Tutkittavaksi kohteeksi valittiin Ounevan JHR-jatkoliitin, jota myös Ojala (2019) käytti työssään. Kyseistä jatkoliitintä käytetään kupari- ja alumiinijohtimien sekä käämien jatkamiseen. Se on valmistettu 99,9 prosenttisesti puhtaasta kuparista ja pinnoitettu elektrolyttisesti tinalla. Jatkoliittimen sisällä on tinapinnoitetusta messingistä valmistettu rasteriverkko, joka rikkoo alumiinijohtimen pinnalle syntyvän oksidikerroksen. Ojala (2019: 60) on todennut toteuttamiensa ikääntymistestien perusteella, että kyseinen jatkoliitin toimii hyvin ja resistanssin muutos käyttäytyi samalla tavalla kuten tuotannossa käytössä olevien kaapelikenkien ja jatkoholkkien resistanssit. Kyseiselle jatkoholkille on kuitenkin

Ojalan (2019: 51) mukaisesti huomioitava, että sen sisähalkaisija on rasteriverkon takia jonkin verran pienempi kuin tuotannossa normaalisti käytettävien jatkoliittimien. Tämän takia sen sisään ei mahdu vastaava määrä johdinlankoja kuin tuotannossa normaalisti käytettävään jatkoliittimeen. Kyseiset jatkoliittimet ovat esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Vakio- ja Ounevan JHR -jatkoliittimet ( $16 \text{ mm}^2$ ) vierekkäin.

Lisäksi tutkittavaksi kohteeksi todettiin yhden johtimen jatkoliitokseen käytettävä jatkoliitin. Kun tuotannossa käämivyyhtiä kelatessa johdinlanka pääsee loppumaan, otetaan käytetyn johdinkelan tilalle uusi kela ja jatketaan käämivyyhtiä siten, että jatkoliitos jää käämivyyhdin päähän. Kyseinen jatkoliitin on kuitenkin tinattua kuparia ja se on tarkoitettu vain kuparijohtimen jatkamiseen. Kyseistä kokoluokkaa ei ole saatavilla alumiinijohtimelle samalta toimittajalta eli Ounevalta, jolloin alumiinijohtimelle tarkoitettulle jatkoliittimelle tulisi löytää uusi toimittaja. Lisätutkimuksen kohteena olevat liitokset ovat esitettyinä kuvissa 14 ja 15.



**Kuva 14.** Yhden johtimen jatkoliitos alumiinijohtimella.



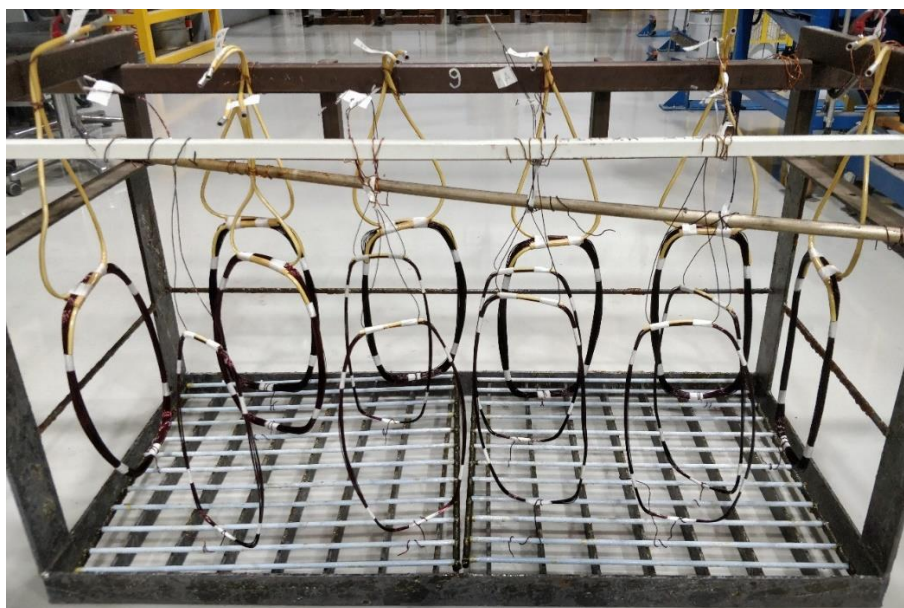
**Kuva 15.** Käämivyyhdin jatkoliitos, jossa vasemmalla puolella on alumiinijohdinta ja oikealla puolella kuparijohdinta. Jatkoliittimenä Ounevan JHR 16 -jatkoliitin.

Kääminnän tuotannossa vakioliitokset tehdään tämän lisätutkimuksen mukaisesti. Liitokset sijoitetaan vyyhdin päihin ja ne suojataan yleensä tuotannossa kaksinkertaisella eristyksellä. Tämä ei kuitenkaan estä hartsin imeytymistä liitokseen ja juuri tämän vaikutusta sähköiseen liitokseen tullaan tässä lisätutkimuksessa mittaamaan.

#### *Testausmenetelmä ja sen tulokset*

Testattavia kappaleita tehtiin kahdenlaisia; johdinvyyhti jatkoliitoksella ja johto jatkoliitoksella. Ensin mainitussa käytettiin Ounevan JHR-jatkoliitintä ja jälkimmäisessä tinnatusta kuparista valmistettua jatkoliitintä (vakio). Johdinvyyhdin jatkoliitoksia oli kussakin testikappaleessa kaksi kappaletta, yksi kummallekin ulostulolle. Kumpaakin testikappaletta valmistettiin tilastollisesti uskottavan tuloksen saamiseksi viisi kappaletta alumiinijohtimella ja kaksi kappaletta kuparijohtimella. Kuparijohtimilla tehtyjen testikappaleiden määrä oli pienempi siksi, että kyseisiä liitoksia tehdään kuparijohtimella tuotannossa päivittäin ja näiden liitosten uskottiin olevan laadukkaita hartsauksesta riippumatta.

Kaikille testikappaleille suoritettiin uppokyllästys samanaikaisesti samassa prosessissa. Uppokyllästyksen oletettiin siis olevan vastaavanlainen jokaisella suorituskerralla, sillä uppokyllästyksen tuotannon parametrit ovat jokaisella kerralla identtiset. Staattoripaketien uppokyllästyksessä liitinalustalle vietävät johtimet jäävät hartsialtaan pinnan yläpuolelle. Jatkoliitokset uppoutuvat kuitenkin hartsialtaaseen, jossa hartsi pääsee kulkeutumaan jatkoliitosten päällä olevan eristeen sisäpuolelle ja siten sähköiseen jatkoliitokseen asti. Kuvassa 16 on esitettyä testikappaleet häkissä, joka kiertää uppokyllästysprosessin.



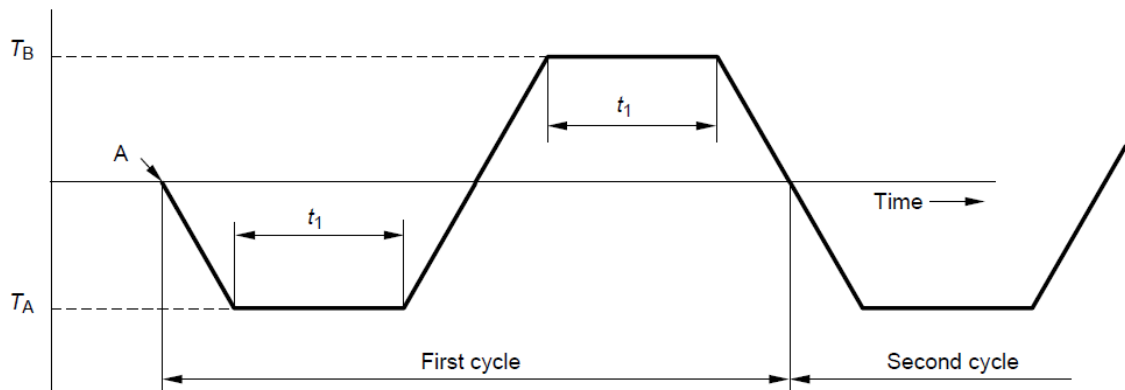
**Kuva 16.** Testikappaleet sidottuna kyllästysprosessin kiertävään häkkiin.

Hartsausmenetelmiä on useita, joista Vaasan tehtaan tuotannossa käytetään uppo- ja valutusmenetelmää. Alle 280-runkokoon moottoreiden staattoripaketit kyllästetään yleisesti uppokyllästyksellä, jota myös testikappaleiden kyllästyksessä käytettiin. Kyseisessä prosessissa kyllästettävät kappaleet sijoitetaan kuvan 16 mukaiseen häkkiin, joka kiertää automatisoidussa prosessissa esilämmityksessä, uppokyllästyksessä, hyytelöinnissä, kovetuksessa ja viilennyksessä. Tässä prosessissa kyllästettävä kappale käy kuumimmillaan 160 °C asteen kuumuudessa.

Hartsattujen jatkoliitosten testausta jatkettiin lämpövanhennuskokeella, jossa hartsatut vyyhdit sijoitettiin kuvan 17 mukaisesti Vaasan ABB oy:n tehtaan tuotannossa sijaitsevaan ARS-1100 sääkaappiin. Testikappaleille toteutettiin standardin IEC 60068-2-14 (Environmental testing – Part 2-14: Tests – Test N: Change of temperature) mukainen testi (Test Nb: Change of temperature with specified rate of change). Tämä testi määrittää komponenttien, laitteiden tai muiden esineiden kyvyn kestää ja toimia ympäristön lämpötilan muutoksen aikana. Standardin mukainen testisykli esitetään kuvassa 18 ja sen tarkemmat parametrit kyseisen kuvan jälkeisessä tekstissä.



**Kuva 17.** Testikappaleet sijoitettuna ARS-1100 sääkaappiin.



**Kuva 18.** IEC 60068-2-14 – Testi Nb testisykli. (IEC 2009: 15)

Testisyklin lähtötilanteessa A testikappaleiden lämpötila on ympäristön lämpötilassa (noin 23 °C astetta). Ensimmäinen siirtymä lämpötilaan  $T_A = 20$  °C asetettiin kestämään 15 minuuttia, jonka jälkeen pitoaika  $t_1$  tässä lämpötilassa asetettiin yhteen tuntiin. Tämän jälkeen siirtymä lämpötilaan  $T_B = 100$  °C toteutettiin 30 minuutissa, jonka jälkeen pitoaika kyseisessä lämpötilassa oli jälleen yksi tunti. Tämän jälkeen testisyklin siirtymät kestivät aina 30 minuuttia ja pitoaika yhden tunnin esitetyissä lämpötiloissa. Yksi testisykli kesti täten 3 tuntia. Syklejä toteutettiin 16 kertaa peräkkäin, jolloin lämpövanhen-

nuskokeen kokonaisaika oli 48 tuntia eli kaksi vuorokautta. Kahden vuorokauden testisyklejä suoritettiin kaksi kertaa, ja niiden välissä suoritettiin testikappaleiden vastusmittaukset. Kolmannelle ja neljännelle lämpövanhennuskokeelle  $T_B$  nostettiin 120 °C asteeseen, ja pitoajat laskettiin kolmeenkymmeneen minuuttiin. Tällöin yksi sykli kesti 2 tuntia ja syklejä toistettiin 24 kertaa, jolloin yhden lämpövanhennuskokeen kesto oli jälleen kaksi vuorokautta. Näitä tehtiin yhteensä kahdesti.

Edellä esitettyjen testikappaleiden vastusmittaukset ennen ja jälkeen uppokyllästysprosessin, sekä esitettyjen lämpövanhennuskokeiden jälkeen on esitettyinä taulukossa 3. Ensimmäisenä on johdinvyyhtien (A-testikappaleet) vastusmittaukset ja toisena yksittäisten johdinten jatkoliitosten (B-testikappaleet) vastusmittaukset. Resistanssit mitattiin Hioki 3540 HiTester -resistanssimittarilla. Vastusmittaukset pyrittiin aina suorittamaan mahdollisimman samassa lämpötilassa. Tämän takia mitatut resistanssit voivat vaihdella hieman ympäristön ja testikappaleen lämpötilan eroavaisuuksien takia. Tärkeintä on kuitenkin tutkia sähköisen kontaktin pysyvyyttä lämpövanhennuskokeen aikana.

**Taulukko 3.** Testikappaleiden vastusmittaukset milliohmeina.

Testi- kappale	Alku- tila	Hartsauk- sen jälkeen	1. lämpö- vanhen- nus	2. lämpö- vanhen- nus	3. lämpö- vanhen- nus	4. lämpö- vanhen- nus
A-Cu.1	6,21	6,21	6,21	6,21	6,19	6,22
A-Cu.2	6,03	6,03	6,03	6,03	6,01	6,04
A-Al.1	8,68	8,67	8,67	8,67	8,68	8,72
A-Al.2	8,80	8,78	8,78	8,78	8,79	8,82
A-Al.3	8,68	8,70	8,72	8,73	8,79	8,82
A-Al.4	8,73	8,75	8,78	8,79	8,86	8,88
A-Al.5	8,71	8,76	8,79	8,81	8,87	8,90
B-Cu.1	173,2	172,8	172,4	172,8	172,0	172,8
B-Cu.2	173,0	172,7	172,4	172,4	171,8	172,4
B-Al.1	278,1	279,4	283,6	285,1	342	336
B-Al.2	277,8	280,8	286,4	290,6	392	344
B-Al.3	277,4	282,6	293,2	300,5	408	341
B-Al.4	277,7	283,2	284,8	296,7	315	314
B-Al.5	278,5	279,5	286,0	297,6	357	335

Hartsauksen jälkeen johdinvyyhtien (A-testikappaleet) resistanssit pysyivät kuparilla täysin samana ja alumiinilla vaihtelevat hieman. Yksittäisen johtimen liitoksen (B-testikappaleet) tapauksessa kuparin resistanssi säilyi samana (pieneneminen voidaan olettaa johtuvan ympäristön lämpötilaeroista mittausten välillä), kun taas alumiinilla resistanssi kasvoi hartsauksen takia noin 0,4–2,0 %. Molemmissa tapauksissa sähköiset liitokset säilyivät, eikä mittavia resistanssin kasvuja havaittu. Hartsauksen jälkeisiä mittauksia tehtäessä yksi alumiinijohto katkesi sen päässä olevan jatkoliitoksen (josta resistanssit mitattiin) juuresta. Tämä kertoo, kuinka haurasta ja pehmeää materiaalia alumiini on, varsinkin kun tehdään yhden johtimen liitoksia, jossa johtimen paksuus oli tässä tapauksessa 1,12 mm.

Lämpövanhennuskokeiden jälkeisissä vastusmittauksissa ei kuparijohtimista valmistetuissa testikappaleissa havaittu resistanssin kasvua – jopa päinvastoin. Tämän voidaan olettaa kuitenkin johtuvan mittausten välisistä lämpötilaeroavaisuuksista. Voidaan siis todeta, että tuotannossa tällä hetkellä toteutettavat jatkoliitokset ovat laadukkaita.

Alumiinijohtimista valmistetuilla testikappaleilla tilanne oli kuitenkin toisenlainen. Kahdella ensimmäisellä A-testikappaleella resistanssi kasvoi alle puoli prosenttia, kun taas lopuilla resistanssi kasvoi 1,6–2,2 prosenttia. Tämä on linjassa myös Ojalan (2019: 58) mittaamalle noin 2,1 prosentin kasvulle lämpövanhennuskokeissa. Yhden johtimen jatkoliitoksilla vastuksen kasvu on merkittävä kolmannen lämpövanhennuksen jälkeen. Mittauksia tehtäessä huomattiin myös, että liitosta liikuteltaessa vastuksen arvo muuttui. Tästä voidaan päätellä, että kyseisissä testikappaleissa liitos on mahdollisesti löystynyt ja täten myös sähköinen liitos on heikentynyt huomattavasti.

Tuloksista voidaan päätellä, että Ounevan JHR-jatkoliitin soveltuu hyvin alumiini- ja kuparijohtimille tehtäviin sähkömoottorin käämitysten jatkoliitoksiin. Uppokyllästyksen tai lämpövanhennuksen ei nähdä huonontavan sähköistä liitosta merkittävästi. Kyseinen menetelmä vaikuttaa siis olevan turvallinen ja toimiva ratkaisu käytettäväksi alumiinikäämityksien jatkoliitoksissa. Yhden alumiinijohtimen jatkoliitos ei kuitenkaan ole tämän lisätutkimuksen mukaan suositeltavaa. Ensinnäkin alumiini johdin on niin pehmeää, että yhden johtimen jatkoliitoksessa johdin voi katketa pelkässä normaalissa tuotannon käsittelyssä. Toiseksi kyseinen liitos on altis sähköisen liitoksen heikentymiselle ikääntymisen myötä.

### 3.5 Staattorikäämityksen materiaalikustannukset

Tässä työssä ei tuoda esille prototyyppien todellisia kustannuksia, vaan esitetään alumiinikäämityksellä laskennallisesti saavutettavat kustannussäästöt. Kun oikosulkumoottorin passiivi- ja aktiiviosat pidetään vakioina riippumatta johdinmateriaalista, voidaan kustannuksia tarkastella pelkästään staattorin osalta. Kyseisissä prototyypeissä käytetty sähkö-

levyjen materiaali M400-50A on sama kuin tuotannon vakiorakenteisessa oikosulkumoottorissa. Vaikka uramuodon ollessa suurempi on staattorin sähkölevyn määrä pienempi, kuuluu sähkölevyjen valmistuksessa kuitenkin yhtä paljon materiaalia – vain tuotetun romumateriaalin määrä muuttuu. Tällöin kustannuksen eroavaisuudet vakiossa kuparijohtimella käämityssä oikosulkumoottorissa ja vakiossa alumiinijohtimella käämityssä oikosulkumoottorissa voidaan keskittää kuparin ja alumiinin hintojen eroavaisuuteen. Edelleen, kuten alaluvussa 2.3.1 todettiin, kupari- ja alumiinijohdinten hinnat eivät kuitenkaan ole samassa suhteessa raakamateriaalien hintoihin.

Esitetään laskennallisiksi materiaalien kustannuksiksi seuraavaa. Raakamateriaalin hinta kuparille oli vuoden 2020 alussa noin 5,6 €/kg ja alumiinille 1,64 €/kg. Alumiinin kilohinta on siis noin 29,3 prosenttia kuparin kilohinnasta. Käämilangan hinnan tiedetään muuttuvan sen paksuuden mukaan. 1,25 mm paksuisen kupari- ja alumiinilangan kilohinnat selvitettiin, jotka tässä yhteydessä on jätetty kuitenkin ilmoittamatta. Prosentuaalisesti alumiinilangan kilohinta oli tässä tapauksessa kuitenkin noin 67,6 prosenttia kuparilangan kilohinnasta. Raakamateriaalin ja käämilangan kilohintojen prosentuaalisessa erossa on nähtävissä täten selkeä ero.

Adept-ohjelmiston mukaan työssä käytettävä vakiorakenteinen, IE4-hyötysuhdeluokan, kaksinapainen M3BP 225SMA -oikosulkumoottori sisältää 40,65 kilogrammaa kuparijohtinta. Kun tilalle vaihdetaan sama lankamäärä saman paksuista alumiinilankaa niin kyseisen alumiinikäämityksen paino on 12,32 kilogrammaa. Käämilankojen hintojen avulla saatiin selville, että kyseisellä vakiorakenteella alumiinikäämityksen hinta on noin 20 prosenttia kuparikäämityksen hinnasta. Huomiona toki, että alumiinikäämityksellä hyötysuhdeluokka on IE3, kun kuparikäämityksellä se on IE4. Korkeamman hyötysuhteen saavuttamiseksi tulee alumiinikäämityksen määrää kasvattaa staattoriurassa. Ainoastaan käämilangan hinnan vertailu ei kuitenkaan anna kokonaiskuvaa koko moottorin kustannuksista. Täten oikosulkumoottorien välittömiä kustannuksia tullaan vertailemaan työn johtopäätöksissä.

## 4 STAATTORIN URAMUODON OPTIMOINTI

Alumiinijohtimen huonompaa sähkönjohtavuutta on mahdollista kompensoida kasvattamalla sen poikkipinta-alaa tai rinnakkaisten johdinten määrää staattoriurassa. Tämän toteuttamiseksi voidaan staattorin uramuotoa kasvattaa tietyissä rajoissa siten, että staattoriuraan mahtuu enemmän johdinmateriaalia. Tässä luvussa tutkitaan staattorin uramuodon optimointia käyttäen Adeptin Optimizer-työkalua. Tarkoituksena on optimoida olemassa olevaa ja vertailukohteena testattua uramuotoa suuremmaksi siten, että optimoidulla uramuodolla saavutettaisiin tutkittavalle prototyypille parempi hyötysuhde.

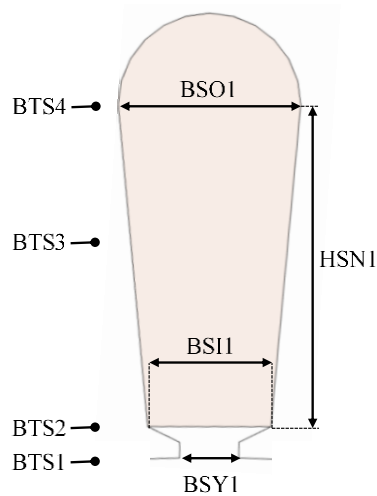
### 4.1 Optimoinnissa käytetyt laskentaohjelmat

Optimizer-työkalu perustuu monitavoitteelliseen optimointialgoritmiin SPEA2 (Zitler 1999; Zitler, Laumanns ja Thiele 2001). Tällöin tapauksissa, joissa on useita tavoitteita, käyttäjän ei tarvitse luoda painoitusarvoa kullekkin tavoitteelle erikseen. Onnistuneena tuloksena käyttäjä saa Pareto-optimaalisen tulosten rintaman, jossa kukin tulos on yhtä hyvä annettujen tavoitteiden tilassa. Annetuista ratkaisuksista käyttäjä saa valikoida lopullisen valinnan, jolla on halutut tavoitteet.

Optimointi voidaan toteuttaa käyttäen Adeptin eri laskentamenetelmiä. Optimizerin toiminnalle on kuitenkin tärkeää, että tuloksena saadaan sellaisia luettavia tuloksia, jotka täsmäävät Optimizer-työkaluun syötettyihin raja-arvoihin ja tavoitteisiin. Käytettävänä laskentamenetelminä toimivat joko analyttisiin yhtälöihin perustuva S113-laskija tai elementtimenetelmään perustuva FCSmek-aliohjelma. Analyttisiä menetelmiä käyttävä laskentatyökalu soveltuu parhaiten tunnettujen ja testattujen sähkömoottorirakenteiden laskemiseen, sillä se perustuu sähkömagneettisiin perusyhtälöihin. Laskennan tuloksia tarkennetaan ennestään samalla rakenteella testattujen tulosten perusteella. Elementtime-netelmään perustuva FCSmek-aliohjelma taas soveltuu hyvin myös tuntemattomien rakenteiden laskentaan. Tästä johtuen kyseistä aliohjelmaa tullaan myös tämän työn optimoinnissa soveltamaan.

## 4.2 Lähtötilanteen tunnistaminen

Uramuodon optimoinnin ei odoteta vaikuttavan merkittävästi roottorin synnyttämään käynnistys- tai huippumomenttiin eikä staattorikäämityksen synnyttämään käynnistysvirtaan. Sen tiedetään kuitenkin vaikuttavan staattoriuraa ympäröivässä staattoriraudassa esiintyviin vuontiheyksiin. Kuvassa 19 on esitettyä työssä tutkittu uramuoto sekä tulevaisuudessa laskelmissa läpikäytäviä vuontiheyden laskentapisteitä.



**Kuva 19.** Työssä tutkittava staattorin uramuoto ja sen ympäristössä tutkittavat suureet.

Staattorin uramuodon optimoinnin merkittävin tarkoitus on luoda sitä ympäröivälle rautasydämelle mahdollisimman tehokas magneettivuon etenemisreitti. Uran leveyden kasvattaminen pienentää staattorin hammasta ja täten kasvattaa sen vuontiheyden suuruutta. Myös uran korkeuden kasvattaminen suurentaa staattorin selän vuontiheyden suuruutta. Liian suuri vuontiheys sähkölevyissä aiheuttaa raudan kyllästymistä. Tämän takia optimoinnissa tullaan asettamaan kyseiset vuontiheydet laskennan raja-arvoiksi. Näin pyritään pitämään vuontiheydet staattorin sähkölevyissä maltillisena, jolloin myöskään tehokerroin ei pääsisi alenemaan odottamattomasti. Adept laskee vuontiheydelle staattorin hampaassa neljä arvoa BTS1–BTS4 kuvan 19 mukaisesti. Vuontiheyksiä pystytään tutkimaan tarkemmin FCSmek-laskennalla, jolloin vuontiheys on määritetty jokaiselle elementtiverkon osalle erikseen.

FCSmek-aliohjelman laskentaprofiilia muokkaamalla voidaan vaikuttaa laskennan nopeuteen ja tarkkuuteen. Optimointi on täten jaettu kahteen osaan, jossa aluksi tarkastellaan karkealla laskentaprofiililla Optimizer-työkalua hyväksi käyttäen Pareto-optimeja vaihtoehtoja ja tämän jälkeen lasketaan tarkemmalla profiililla tulokset kullekin valitulle yksilölle. Tätä ennen esitetään vielä lyhyesti vakiorakenteisen moottorin laskennan tulos.

Staattoriura on esitetysti kuvan 19 mukainen. Työssä ei tuoda esille tarkkoja uran mittoja, sillä näiden nähtiin olevan ABB oy:n sisäistä informaatiota. Täten on taulukossa 4 esitetynä vakiouramuodolla valmistetun alumiinikäämillisen uramuodon mitat suhdelukuina, jossa työssä vakiona muutenkin pysyvä BSY1:n arvo on asetettu perusarvoksi. Suhdeluvut on tässä työssä esitetty kolmen desimaalin tarkkuudella. Myös prototyypin laskennalliset arvot on samassa taulukossa esitettyinä. Todettakoon myös, että kuparijohtimella samalla rakenteella saavutettaisiin laskennallisesti 95,2 prosentin hyötysuhde. Myös täyterrointa on tärkeää tarkkailla, sillä liian alhainen täyterroin huonontaa hyötysuhdetta ja liian suuri täyterroin voi olla mahdotonta toteuttaa. Tässä rakenteessa tavoiteltu täyterroin on noin 0,66.

**Taulukko 4.** Vakiorakenteisen prototyypin lähtöarvot ja laskennalliset arvot.

BSY1	BSI1	BSO1	HSN1	Hyötysuhde (%)	Teho-kerroin	BTS4 (T)	BTS3 (T)	BTS2 (T)	Täyterroin
1	2,079	3,079	5,434	94,422	0,8915	1,452	1,284	1,105	0,6616

#### 4.3 Optimoinnin toteutus

Pareto-optimin uramuodon löytämiseen käytetyssä Optimizer-työkalussa käyttäjän on mahdollista syöttää optimoitavat suureet, laskenta-aluetta rajaavat rajoitteet sekä tuloksissa toivotut tavoitteet. Optimoitaviksi suureiksi valittiin uramuodon leveyttä ja korkeutta määrittävät BSI1, BSO1 sekä HSN1. Staattoriuran avauma BSY1 pidettiin vakiona, sillä sen muokkaaminen johtaisi ilmevälin mahdolliseen muokkaamiseen ja täten

roottorin muokkaamiseen. Laskennan rajoitteiksi valittiin staattorin hampaissa vaikuttavat vuontiheyden arvot BTS4 ja BTS2. Laskennan tavoitteiksi asetettiin sekä hyötysuhteen että tehokertoimen maksimointi. Tällöin optimoinnin tuloksen saataisiin sellainen pareto-optimi rintama, josta voidaan valita maksimaalinen hyötysuhde ilman liian suuria vuontiheyksien kasvuja. Kuvassa 20 on esitettyä Optimizer-työkalun näkymä.

**Variables** 3003 combinations

Dataname	Type	Unit	Value	Min	Max	Step
BSI1	Linear	mm				0,1
BSO1	Linear	mm				0,1
HSN1	Linear	mm				0,1

---

**Limits**

Dataname	Unit	Value	Min	Max
BTS4	T	1,456029	1,3	1,6
BTS2	T	1,203855	1,1	1,6

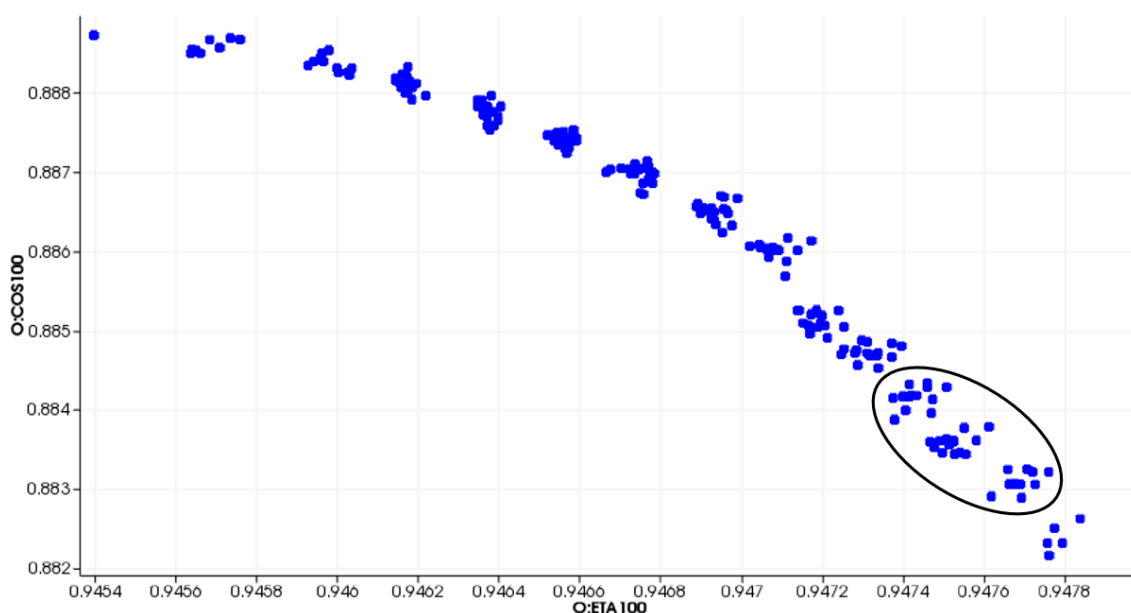
---

**Objectives**

Dataname	Target
ETA100	Maximized
COS100	Maximized

**Kuva 20.** Optimizer-työkalun näkymä suureiden, rajoitteiden ja tavoitteiden määrittelyä varten ensimmäisellä optimointikerralla. Kuvasta on piilotettu uran tarkemmat mitat.

Kuvan 20 ylimmässä osiossa näkyy optimoitavien suureiden määrittäminen. Tässä osiossa asetetaan kyseisille suureille minimi- ja maksimiarvot sekä askel jonka suuruudella suureet muuttuvat. Keskimmäisessä osiossa on asetettu laskentaa rajoittavat rajoitteet, jossa vuontiheyksien maksimiarvoiksi on asetettu 1,6 T. Alimmassa osiossa on toteutettavan optimoinnin tavoitteet. Kyseisellä optimoinnilla saatiin tuloksena kuvan 21 mukainen pareto-optimi rintama.



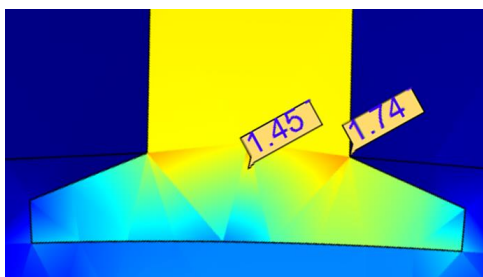
**Kuva 21.** Optimoinnin tuloksena saatu pareto-optimi rintama, jossa pystyakselilla on tehokerroin ja vaaka-akselilla hyötysuhde.

Kuvasta 25 on ympyröitynä alue, jota lähdettiin tutkimaan tarkemmin. Kyseisellä alueella uskottiin hyötysuhteen kasvattamisen olevan mahdollista ilman vuontiheyksien liian suurta kasvamista. Taulukossa 5 on esitettyä vakiorakenteisen ja yhden optimoidun tuloksen laskennan vertailut.

**Taulukko 5.** Vakiorakenteisen ja ensimmäisen optimoidun rakenteen tulosten vertailu tarkemmalla FCSmek laskentaprofiililla.

Ra- kenne	BSI1	BSO1	HSN1	Hyöty- suhde (%)	Teho- ker- roin	BTS4 (T)	BTS2 (T)	BTS2, max (T)	Vuon- tiheys ST:n selässä
Vakio	2,079	3,079	5,434	94,49	0,894	1,512	1,136	1,49	1,49
Opti- moitu	2,500	3,316	6,316	94,83	0,885	1,597	1,45	1,74	1,63

Taulukosta 5 nähdään, kuinka hyötysuhdetta on saatu kasvatettua vuontiheyden ja täten tehokertoimen kustannuksella. Tuloksista kuitenkin havaittiin, että laskennan antama vuontiheys ei ole staattorin hampaassa esiintyvä maksimiarvo kuvan 22 mukaisesti.



**Kuva 22.** Vuontiheydet ensimmäisen optimoidun staattorin hampaassa.

Kyseinen vuontiheyden maksimiarvo on liian suuri ja sen uskottiin mahdollisesti aiheuttavan staattorihampaan kyllästymistä. Tästä johtuen BSI1:n arvoa lähdettiin pienentämään manuaalisesti niin paljon, että vuontiheyden arvot olivat suotuisimmat. Tuloksena saatiin, että BSI1:n suhdeluku täytyy pudottaa arvosta 2,5 alle arvon 2,395, jotta vuontiheydet eivät aiheuta kyllästymisen vaaraa. Tämän perusteella suoritettiin uusi optimointi tarkemmalla rajauksella kuvan 23 mukaisesti.

**Variables** 1331 combinations

Dataname	Type	Unit	Value	Min	Max	Step
BSI1	Linear	mm				0,01
BSO1	Linear	mm				0,01
HSN1	Linear	mm				0,01

**Limits**

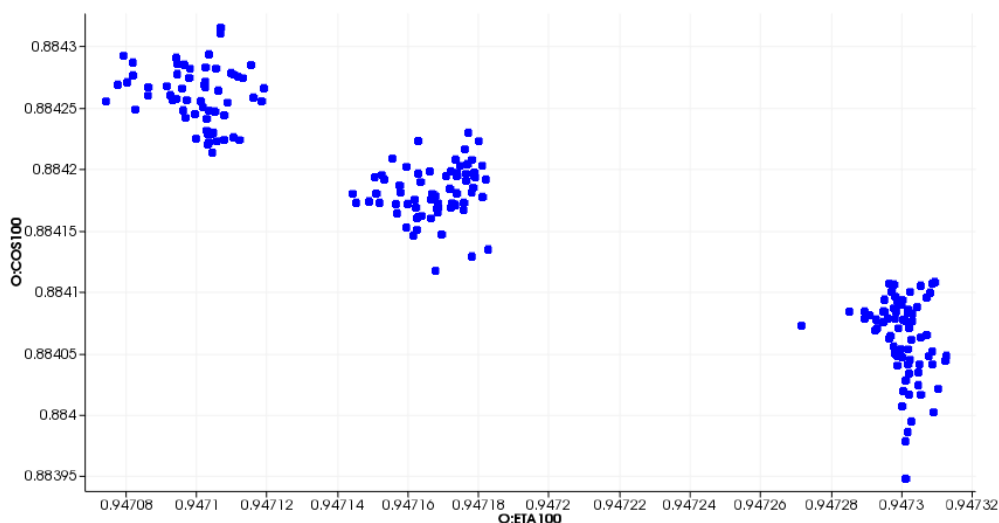
Dataname	Unit	Value	Min	Max
BTS4	T	1,538123	1,4	1,6
BTS2	T	1,443636	1,3	1,45

**Objectives**

Dataname	Target
ETA100	Maximized
COS100	Maximized

**Kuva 23.** Optimizer-työkaluun syötetyt arvot toisella optimointikerralla.

Nyt kuvan 23 mukaisesti askel määritettiin 0,01 mm:n tarkkuudelle ja BTS2 maksimi-arvo pienennettiin 1,45 teslaan. Tuloksena saatiin kuvan 24 mukaisesti kolme tulosten rypästä.



**Kuva 24.** Toisen optimointikerran tulos, jossa pystyakselilla tehokerroin ja vaaka-akselilla hyötysuhde.

Tällä kertaa tuloksena ei saatu tulosten rintamaa, vaan kolme erillistä tulosten kasaamaa. Tuloksista lähdettiin tutkimaan tarkemmin parhaimman hyötysuhteen omaavaa rypästä ja tästä tarkemmin vielä kyseisen rypään ylimpiä arvoja, joissa oli laskennallisesti myös parhaimmat tehokertoimet. Kyseisistä tuloksista optimaalisin oli taulukossa 6 esitetty optimoitu vaihtoehto.

**Taulukko 6.** Vakiorakenteen ja toisen optimoidun rakenteen tulosten vertailu tarkemalla FCSmek laskentaprofiililla.

Ra- kenne	BSI1	BSO1	HSN1	Hyöty- suhde (%)	Teho- ker- roin	BTS4 (T)	BTS2 (T)	BTS2, max (T)	Vuonti- heys ST:n selässä
Vakio	2,079	3,079	5,434	94,49	0,894	1,512	1,136	1,49	1,49
Opti- moitu	2,376	3,289	6,295	94,78	0,887	1,590	1,343	1,64	1,56

Ensimmäiseen optimoituun rakenteeseen verrattuna taulukossa 6 esitetty toinen optimoitu rakenne sisältää pienemmän staattoriuran ja täten myös pienemmät vuontiheydet staattorin hampaassa. BTS2:n maksimiarvo pieneni teslan kymmenyksellä optimoitujen rakenteiden välillä, samalla kun hyötysuhde pieneni 0,05 prosenttiyksikköä ja tehokerroin kasvoi 0,002:lla. Kyseinen optimoitu rakenne valittiin selväksi ehdokkaaksi optimoidun prototyypin valmistusta varten.

Hyötysuhdetta pystytään kuitenkin edellä todetusti kasvattamaan myös käämilangan paksumutta kasvattamalla. Tästä johtuen optimoituun prototyyppiin haluttiin sisällyttää vakiota rakennetta paksumpaa käämilankaa sekä mahdollisimman hyvä täytekerroin. Optimizer-työkalulla päästiin siis lähelle lopullista prototyyppiä, mutta manuaalisella hienosäädöllä siitä on saatavissa vieläkin parempi.

#### *Optimaalisen uramuodon hienosäätö*

Vakiorakenteella valmistettu prototyyppi sisälsi yhteensä kahdeksan 1,18 mm:n ja 1,25 mm:n paksuista käämilankaa. Näitä kierrettiin neljatoista kertaa yhteen staattoriuraan, jolloin yhdessä staattoriurassa oli 112 käämilankaa ja sen täytekerroin oli 0,6616. Optimoidussa rakenteessa haluttiin käyttää paksumman käämilangan mahdollistavaa käämityksen pienempää resistiivisyyttä. Täten optimoitu rakenne toteutettiin käyttäen 1,25 mm:n ja 1,32 mm:n paksuista käämilankaa.

Havaittiin että hyvän ja valmistuksellisesti mahdollisen täytekerroimen saamiseksi tulee optimoinnilla saavutettua staattoriuraa hieman muokata. Kun edellä optimoituun staattoriuraan valittiin yhteensä yhdeksän 1,25 mm:n ja 1,32 mm:n lankaa ja sama kierrosluku kuin vakiorakenteisella prototyypillä, saatiin uran täytekerroimeksi 0,6697. Täytekerrointa haluttiin hieman pienentää ja täten staattoriuraa tuli hieman suurentaa. Manuaalisella laskennalla määritettiin staattoriuralle uudet mitat, jossa BSI1 kasvoi suhdelukuun 2,384, BSO1 suhdelukuun 3,305 ja HSN1 suhdelukuun 6,311. Tällöin täytekerroin pieneni arvoon 0,6646. Nyt staattoriuran leveyttä kasvatettiin enintään 15 prosenttia ja korkeutta 16 prosenttia vakiouraan verrattuna. Nämä arvot ovat jopa puolet pienempiä kuin alaluvussa 3.3 esitetyt 132-runkokoon staattoriuralle esitetyt arvot.

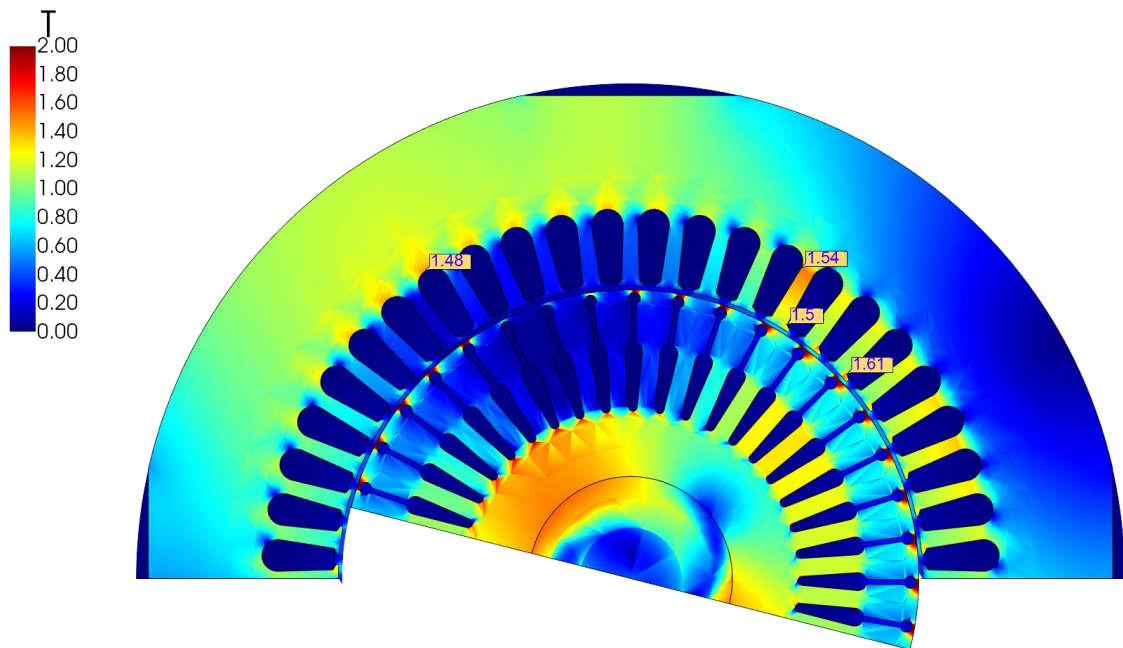
#### 4.4 Valmistettavien prototyyppien sähköiset laskelmat

Toteutettaessa sähköisiä laskelmia Adeptilla, voidaan laskennan tuloksena saatuja arvoja verrata vastaavalla laskelmalla testattuihin arvoihin. Tämä antaa todenmukaisemman tuloksen, jolloin laskelmat ovat mahdollisimman lähellä todellista tulosta. Täten taulukossa 7 on esitettyinä vielä valmistettavien prototyyppien laskettuja arvoja, jotka on vertailtu testattuun kuparikäämittyyn oikosulkumoottoriin. Näitä tuloksia voidaan verrata työn lopussa tarkasteltaviin todellisiin testattuihin arvoihin.

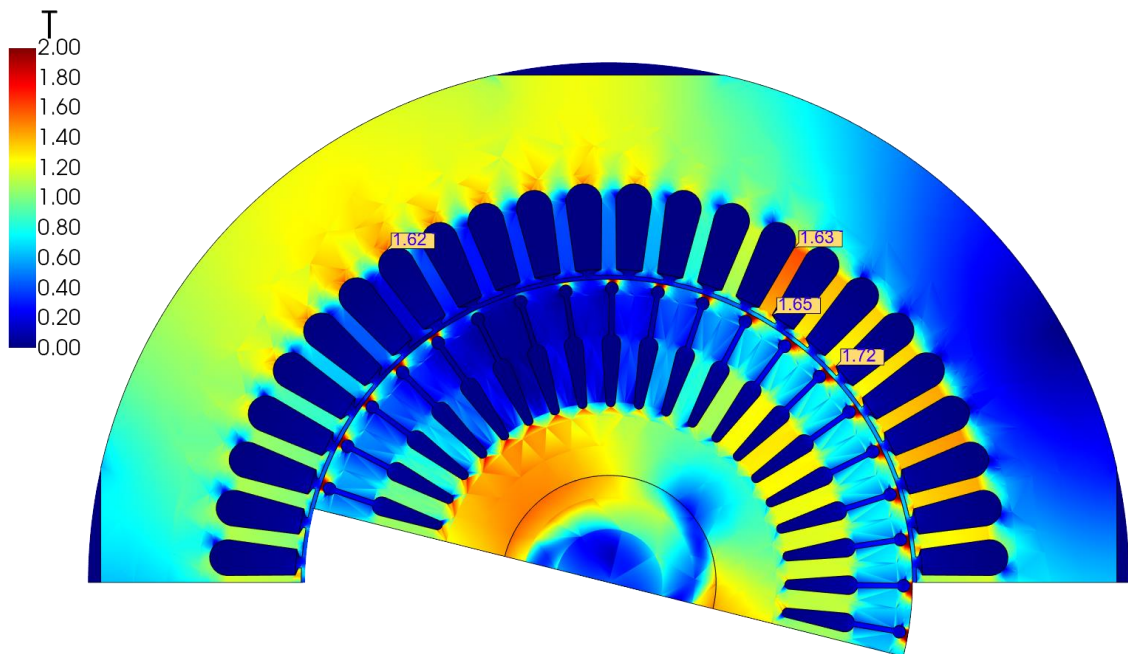
**Taulukko 7.** Prototyyppien sähköiset laskelmat, jossa syöttöjännite on 400 V kolmiossa ja syöttötaajuus 50 hertsiä.

Rakenne	Nopeus (rpm)	Hyötysuhde (%)	Tehokerroin	Is/In	Ts/Tn	Tmax/Tn	Nimellisvirta (A)	Lämpenemä (K)
Vakio	2970	94,55	0,881	7,7	3,2	3,4	77,9	61
Optimoitu	2970	95,04	0,872	7,9	3,3	3,5	78,2	52

Taulukossa 7 esitetyistä arvoista nähdään, kuinka hyötysuhdetta on saatu kasvatettua lähes puoli prosenttiyksikköä. Huomiona mainittakoon, että kyseisen moottorityypin IE4-hyötysuhderaja on 95,0 %. Täten optimoidulla rakenteella on mahdollisuus saavuttaa IE4-hyötysuhdeluokka. Samalla kuitenkin tehokerroin on pienentynyt noin prosentilla vakio-rakenteiseen verrattuna. Optimoidulla rakenteella voidaan odottaa olevan myös lähes kymmenen kelviniä pienempi lämpenemä. Laskennoissa todellista lämpenemää on kuitenkin vaikea arvioida. Laskelmista saadaan selville myös, kuinka vuontiheydet kasvoivat prototyyppien välillä. Tämä on esitettyinä kuvissa 25 ja 26. Kuvista näkyy selvästi myös vakion ja optimoidun staattoriuran suuruuksien erot.



**Kuva 25.** Vakiorakenteisessa M3BP 225SMA 2 -oikosulkumoottorin staattorissa esiintyvät laskennalliset vuontiheyden maksimiarvot alumiinikäimityksellä.



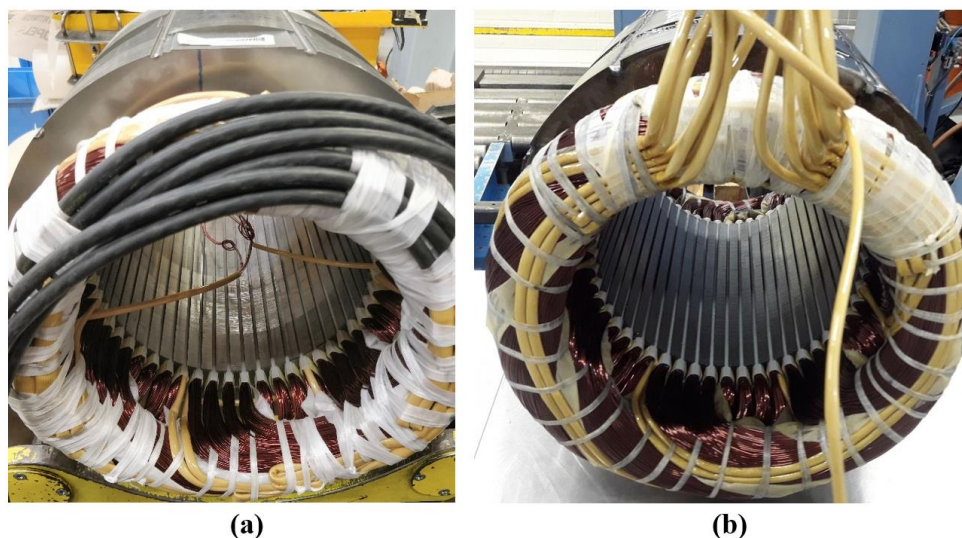
**Kuva 26.** Optimoidussa M3BP 225SMA 2 -oikosulkumoottorin staattorissa esiintyvät laskennalliset vuontiheyden maksimiarvot alumiinikäimityksellä.

## 5 PROTOTYYPPIEN VALMISTUS JA TESTAUS

Kaksi prototyyppiä valmistettiin ABB oy Motors and Generators -liiketoimintayksikön Vaasan toimipisteellä tässä työssä esitetyillä rakenteilla. Vakiorakenteen omaavan prototyypin staattorin valmistukseen käytettiin varastosta saatavilla olevaa vakiostaattoripakettia. Optimoidulla staattoriuralla valmistettuun prototyyppiin staattorilevyt valmistettiin erikseen laserleikattuina, jonka jälkeen yksittäisistä sähkölevyistä puristettiin staattoripaketti omassa tuotannossa. Molempien prototyyppien valmistus kääminnystä loppuputaukseen suoritettiin toimenpitein, jotka tässä luvussa esitetään.

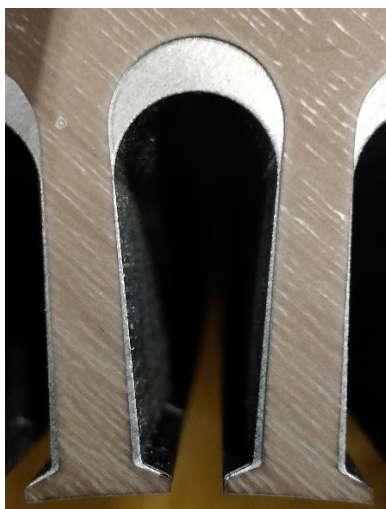
### 5.1 Prototyyppien valmistus

Prototyypit etenivät tavanomaisesti tuotantolinjan vaiheet; käämintä, hartsaus, runkoonpuristus, liitettä, kokoonpano, rutiinikoestus, maalaus, loppukokoonpano sekä tyyppitestausta. Näistä tärkeimmät tuotannon vaiheet alumiinikäämitykselle ovat viisi ensimmäistä, sillä näissä alumiinijohdin on herkimmillään valmistuksessa syntyville virheille. Vakiorakenteisella prototyypillä tuotiin liitinalustalle kuparikaapelit, jotka oli liitetty Ounevan JHR-jatkoliittimiä käyttäen alumiinikäämitykseen kuvan 27a mukaisesti. Optimoidulla prototyypillä alumiinikäämivyyhdit tuotiin suoraan liitinalustalle kuvan 27b mukaisesti.



**Kuva 27.** Vakio (a) ja optimoitu (b) staattoripaketit D-päästä kuvattuna.

Kuvassa 28 on esitettyä vielä vakiorakenteisen ja optimoidun uran erot todellisuudessa. Optimoitu ura on selvästi korkeampi kuin vakioura. Tämä johtuu siitä, että optimoidulla uralla sekä uran korkeutta, että puolipallomaisen uran pohjan sädettä kasvatettiin. Näiden yhteisvaikutuksena optimoidun uran pohja on selvästi alkuperäistä uraa suurempi. Staattorin hampaassa ei kuitenkaan ole kovinkaan suurta muutosta silmämääräisesti.



**Kuva 28.** Vakion ja optimoidun staattoriuran erot todellisuudessa.

Optimoidulla uralla käämilankaa on enemmän niin staattorin urassa kuin vyyhdenpäässäkin kun staattoripaketin pituus pidetään vakiona. Tämä kasvattaa täten staattorin ja sen käämilangan sisältämää pinta-alaa, johon hartsi pääsee tarttumaan. Staattoriurassa vaikuttavan käämi-vyyhdin poikkipinta-alan, vyyhdenpään pituuden sekä hartsijäämän kasvut ovat havaittavissa taulukossa 8 esitetyistä prosenttimuutoksista, joissa vakiorakenne on asetettu alkuperäiseksi arvoksi. Tässäkin tapauksessa tieto nähtiin ABB oy:n sisäisenä.

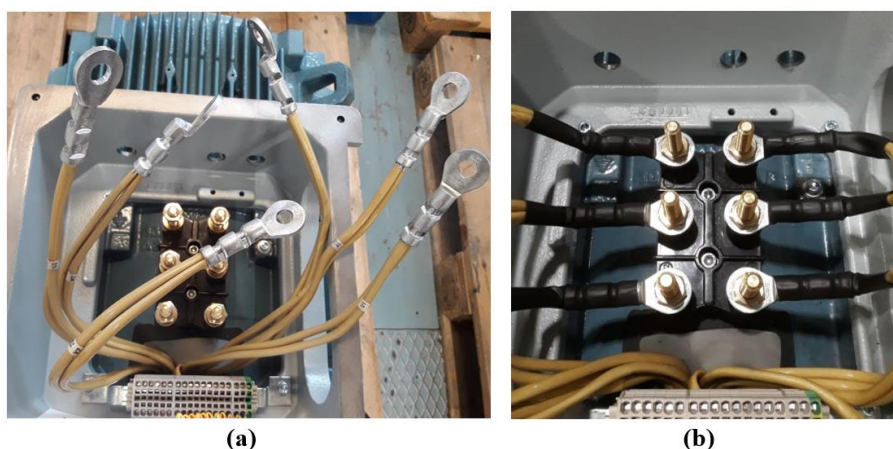
**Taulukko 8.** Vakion ja optimoidun staattoripaketin arvoja.

Rakenne	Kokonaispaino (%)	Hartsijäämä (%)	D-pään vyyhdenpää (%)	N-pään vyyhdenpää (%)	Käämin poikkipinta-ala urassa (%)	Vaihevastus (mΩ)
Vakio	100	100	100	100	100	128,4
Optimoitu	98,037	250	100	110,869	128,5	101,6

Prototyypien painot ovat lähes samat, vaikka niissä olevan käämilangan massa on eri. Käämien erot havaitaan hyvin vaiheiden keskimääräisestä vaihevastuksesta. Optimoidulla uralla saatiin pienennettyä vaihevastuksen arvoa noin viidenneksellä vakiosta. Vaihevastuksen pienentyminen tässä tapauksessa johtuu yhtälön (7) mukaisesti (sivu 23) johtimen poikkipinta-alan sekä rinnakkaisten johtimien määrän kasvattamisesta. Tämä johtaa suoraan staattorihäviöiden pienentymiseen, mikä olikin optimoinnin tarkoituksena. Havaintona voidaan myös esittää, että IE4-hyötysuhdeluokan kuparikäämityksellä vaihevastuksen arvo olisi noin  $80 \text{ m}\Omega$ .

Prototyyppihin asennettiin lämpötilan mittausta varten PT100-lämpötila-anturit niin staattorikäämiin kuin D- ja N-pään laakerikilpiin. Staattoripaketit puristettiin samanlaisiin valurautaisiin runkoihin. Prototyypeissä käytettiin samaa roottoria, samoja laakereita ja laakerikilpiä sekä muuten samoja passiiviosia joita pystyttiin hyödyntämään molempien prototyyppien valmistuksessa. Tämä osakseen vaikuttaa testituloksiin siten, että näiden osien voidaan nähdä vaikuttaneen molempiin prototyyppihin yhtäläisesti.

Kuvassa 29a on esitettyä optimoituun prototyyppimoottoriin asennetut alumiiniset kaapelikengät. Alumiinisten kaapelikengien ollessa suuret ne päädyttiin vielä eristämään kuumapuhaltimella kutistettavalla eristeellä kuvan 29b mukaisiksi. Tällä varmistettiin prototyyppimoottorin turvallinen toiminta, vaikka joku kaapelikengistä pääsisikin löys-  
tymään ja siten kääntymään liitinalustalla.



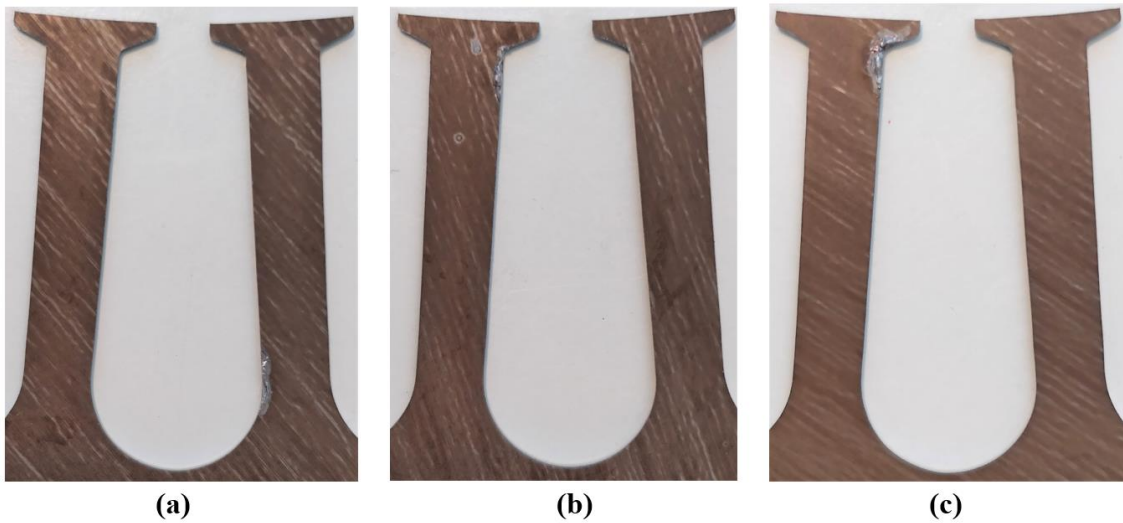
**Kuva 29.** Alumiinikäämiin puristetut alumiiniset kaapelikegät (a) sekä niiden turvallisen asennus (b).

## 5.2 Prototyyppien valmistuksen havainnot

Prototyyppien valmistuksessa kohdattiin onnistumisen ohella myös hankaluuksia sekä tulevaisuudessa mahdollisten jatkotutkimusten kannalta tärkeitä aiheita. Alumiini tuottaa johtavuutensa ja kytkettävyytensä takia omia haasteitaan, mutta tämän ohella prototyyppien valmistus herätti uusia askarruttavia tekijöitä joita tässä alaluvussa käsitellään.

Ensimmäinen prototyyppien valmistuksessa kohdattu haaste esiintyi kun alumiinivyyhtiä käämittiin vakiorakenteiseen staattoriin. Kaksinapaisen staattorin käämintä on siinä mielessä hankalampaa kuin esimerkiksi kuusinapaisen, että kaksinapaisessa staattorissa käämivyyhti sijoitetaan kahteen staattoriuraan 180 sähköasteen päähän toisistaan kuvien 10 ja 11 mukaisesti (sivut 43 ja 44). Tästä johtuen käämivyyhti on kelattuna leveämpi kuin staattoripaketti ja täten käämivyyhti tulee puristaa kasaan ennen sen asentamista staattoriuraan. Tässä vaarana kuitenkin on, että asennettaessa käämivyyhti osuu staattorirautaan ja rikkoo käämilangan eristeenä toimivan emalipinnan. Näin tapahtui ensimmäisen prototyypin valmistuksessa ja yksi käämivyyhti jouduttiin kelaamaan uudestaan välttääksemme mahdolliset oikosulut käämivyyhdissä. Harjaantuneen käämijän mukaan alumiinilangan emalipinta tuntui pehmemmältä ja herkemmältä kuin kuparijohtimella. Käämilangan valmistajan mukaan kyseisillä johtimilla on kuitenkin täysin yhtä paksut ja samasta materiaalista valmistetut emalipinnat. Kyseinen prototyyppi saatiin kuitenkin käämittyä varsin hyväksi yksilöksi. Sen valmistuksessa jouduttiin kuitenkin olemaan erityisen varovaisia, jonka takia sen käämintään kului normaalia valmistusta kauemmin aikaa.

Toinen merkittävä havainto tehtiin laserleikattujen sähkölevyjen saavuttua, sillä sähkölevyissä oli havaittavissa laserleikkauksen aiheuttamia purseita (katso kuva 30). Nämä purseet vaikuttavat mahdollisesti negatiivisesti laserleikatuista sähkölevyistä valmistetun staattorin sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Olikin erikoista, että vain yhdestä sähkölevystä löytyi kolme tällaista purseita. Kun tässä tapauksessa noin 580 kappaletta tällaisia 0,5 mm:n paksuisia sähkölevyjä puristetaan yhteen ja niistä valmistetaan staattori, voi pelkästään yhdessä staattorissa olla tällaisia purseita helposti yli tuhat kappaletta. Yhdessä nämä mahdollisesti vaikeuttavat magneettivuon kulkua staattorin hampaassa ja aiheuttavat täten rautahäviöitä ja lisähäviöitä normaalia enemmän.



**Kuva 30.** Laserleikatun sähkölevyn kolmessa eri urassa (a, b ja c) havaitut purseet.

Purseiden syy selvitettiin sähkölevyjen valmistajalta ja niiden todettiin johtuvan laserin osumasta piikkipöydän kuparilamelliin, jolla leikattava materiaali lepää. Tällöin laser osuu leikattavaan materiaaliin sekä sen alla olevaan piikkiin samaan aikaan. Piikeissä on palanutta materiaalia edellisistä leikkauksista, joka palaa kiinni leikattavan sähkölevyn pintaan. Kuvassa 31 on esitettyä leikkauspöydän kuparilamellit sivusta kuvattuna. Näistä joka toinen asennetaan peilikuvana.



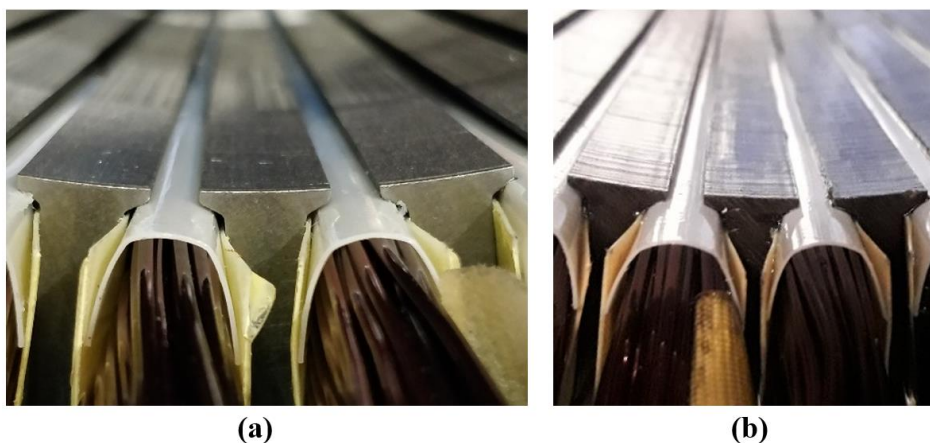
**Kuva 31.** Laserpöydän kuparilamellit sivusta kuvattuna (Peltomäki 2020).

Kuvassa 32 on esitettyä tilanne, jossa tummanharmaat pystyviivat ovat kuparilamelleja ja niissä olevat pallot ovat piikkien huippuja. Tässä piikki osuu juuri leikkausviivan kohdalle staattorin hampaassa, jolloin staattorilevyyn syntyy kuvan 30c mukainen purse. Purseen suuruus riippuu siitä, kuinka suurelta alueelta laser osuu kuparilamellin piikkiin ja lennättää siitä materiaalia sähkölevyyn.



**Kuva 32.** Staattorilevyn laserleikkaus kuparilamellien päällä (Peltomäki 2020).

Kolmantena havaintona pohdittiin meistillä sekä laserilla työstettyjen sähkölevyjen toleranssien vaikutusta staattorin sisähalkaisijan sekä urien tasaisuuteen ja näiden vaikutusta staattorissa syntyviin häviöihin. Meistillä työstettyjen staattorilevyjen sisähalkaisijan toleranssi on sen työkortin mukaan  $\pm 0,05$  mm. Urat ovat kuitenkin standardin ISO286-2 määrittämän J8-toleranssin mukaisia, jolloin tutkimuksen vakiouralla toleranssi vaihtelee  $-0,008$  mm:n ja  $+0,02$  mm:n välillä riippuen toleroitavasta mitasta. Laserleikatuilla sähkölevyillä toleranssi on Peltomäen (2020) mukaan  $\pm 0,05-0,02$  mm. Täten laserleikatuista sähkölevyistä valmistetun staattoripaketin pinnan tulisi olla vähintään samanlaatuinen kuin meistillä valmistetuista staattorilevyistä puristetun staattoripaketin. Kuvassa 33 on kuitenkin optimoidun staattorin sisähalkaisijassa havaittavissa jopa silmämääräisesti enemmän epätasaisuutta kuin vakiostaattoripaketissa. Tämä voi toki johtua myös pakettien valmistusmenetelmien ja niiden työstötarkkuuden eroavaisuuksista.



**Kuva 33.** Vakion (a) ja optimoidun (b) staattoripaketin sisäosa lähempää.

Toinen ja kolmas havainto voivat vaikuttaa oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen ja teho-  
kertoimeen negatiivisesti. Laadukkaalla valmistuksella nämä haittatekijät ovat kuitenkin  
mahdollisesti vältettävissä. Tämän varmaksi toteaminen vaatii kuitenkin jatkotutkimusta.

### 5.3 Prototyypin testitulokset

Kahdelle alumiinisilla staattorikäimityksillä varustetulle prototyyppimoottorille suoritettiin standardin IEC60034-2-1 mukaiset hyötysuhdetestit, joidenka tuloksia tässä alalu-  
vussa käsitellään. Molempien moottorien testauksissa käytettiin samaa roottoria ja muu-  
ten yhtäläisiä rakenteita, jonka myötä testituloksien eroavaisuudet voidaan täysin olettaa  
johtuvan staattorien ja niiden käämitysten eroavaisuuksista. Todetaan vielä, että kyseisen  
teholuokan oikosulkumoottorin IE3-hyötysuhteraja on 94,0 % ja IE4-hyötysuhteraja  
95,0 %.

#### 5.3.1 Vakiorakenteinen prototyyppi

Ensimmäisenä testattiin moottori, jonka kuparikäämitys oli korvattu yhtäläisellä alumii-  
nikäämityksellä ja joka oli kytketty JHR-jatkoliittimillä liitinalustalle tuleviin kuparikaa-  
peleihin. Kyseiselle prototyyppille suoritettiin hyötysuhdetestit 45 kW:n sekä 52 kW:n te-  
hoilla (tehokerroin 1,15). Testien tärkeimmät tulokset ovat esitettyinä taulukossa 9.

**Taulukko 9.** Vakiorakenteisen prototyypin ensimmäiset testitulokset, kun syöttöjännite oli 400 V kolmiossa ja taajuus 50 Hz.

Teho (kW)	Virta (A)	$P_{fw}$ (W)	$P_{Fe}$ (W)	$P_{s0}$ (W)	$P_{r0}$ (W)	$P_{LL}$ (W)	$P_T$ (W)	$P_{out}$ (kW)	$P_{in}$ (kW)	$\eta$ (%)	$\cos\phi$	$n$ (rpm)	$\Delta t$ (K)
45	77,9	736	372	967	481	352	2909	44,91	47,82	93,92	0,885	2967	59,5
52	90,2	731	369	1370	706	489	3665	51,85	55,52	93,40	0,888	2962	74,4

Taulukossa 9 esitetyistä tuloksista havaitaan, että moottorin jatkuvat häviöt eli kitka-,  
tuuletus- ja rautahäviöt pysyivät lähes samoina kuormituksesta riippumatta. Kuitenkin

kuormasta riippuvat staattori- ja roottorihäviöt sekä lisähäviöt muuttuivat kuormasta riippuen. Viimeisessä sarakkeessa oleva moottorin lämpenemä  $\Delta t$  kertoo, että kyseistä protomoottoria on turvallista kuormittaa 52 kW:n teholla, kun ympäristön lämpötila olisi 40 °C. Tällöin moottori pysyy edelleen B-luokan lämpenemässä (maksimi lämpötila 130 °C). 45 kW:n teholla hyötysuhde jäi 0,08 prosenttiyksikön päähän IE3-hyötysuhde-luokan rajasta (94 %). Vaikka tämä onkin hyötysuhdetoleranssien sisäpuolella, haluttiin prototyypillä kuitenkin ylittää kyseinen hyötysuhderaja. Tästä johtuen prototyyppiä muokattiin siten, että siitä otettiin laakereita hankaavat tiivisteet pois ja suoritettiin testi uudestaan laakereiden vajaalla rasvauksella. Nyt tuloksena saatiin taulukon 10 mukaiset tulokset.

**Taulukko 10.** Vakiorakenteisen prototyypin toiset testitulokset, kun syöttöjännite oli 400 V kolmiossa ja taajuus 50 Hz.

Teho (kW)	Virta (A)	$P_{fw}$ (W)	$P_{Fe}$ (W)	$P_{s0}$ (W)	$P_{r0}$ (W)	$P_{LL}$ (W)	$P_T$ (W)	$P_{out}$ (kW)	$P_{in}$ (kW)	$\eta$ (%)	$\cos\varphi$	$n$ (rpm)	$\Delta t$ (K)
45	77,6	541	357	943	469	385	2695	44,91	47,60	94,34	0,885	2972	53,6

Nyt kokonaishäviöitä saatiin pienennettyä noin 214 W:lla, jolloin hyötysuhdetta saatiin nostettua jopa selvästi yli IE3-hyötysuhderajan. Hankaavien tiivisteiden poiston nähdään vaikuttaneen myös moottorin jättämään ja täten moottorin pyörimisnopeuteen. Myös lämpenemässä nähdään noin kuuden asteen pienentyminen. Vakiorakenteisen prototyypin tarkemmat testitulokset 45 kW:n nimellisteholla on esitettyä liitteessä 5.

### 5.3.2 Optimoitu prototyyppi

Kun vakiorakenteiseen prototyyppiin oltiin tyytyväisiä, se purettiin ja siitä otettiin optimoituun prototyyppiin tarvittavat mekaaniset osat. Optimoitu prototyyppi valmistettiin heti ilman laakereita hankaavia tiivisteitä, jolloin optimoidun prototyypin testitulokset ovat verrattavissa taulukossa 10 esitettyyn vakiorakenteisen prototyypin testituloksiin. Optimoidun rakenteen tärkeimmät testitulokset ovat esitettyä taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Optimoidun prototyypin ensimmäiset testitulokset, kun syöttöjännite oli 400 V kolmiossa ja taajuus 50 Hz.

Teho (kW)	Virta (A)	$P_{Iw}$ (W)	$P_{Fe}$ (W)	$P_{s0}$ (W)	$P_{r0}$ (W)	$P_{LL}$ (W)	$P_T$ (W)	$P_{out}$ (kW)	$P_{in}$ (kW)	$\eta$ (%)	$\cos\varphi$	$n$ (rpm)	$\Delta t$ (K)
45	78,8	450	569	777	472	290	2559	45,02	47,58	94,62	0,871	2973	56,3
56	98,1	445	561	1307	848	547	3708	55,8	59,5	93,77	0,875	2955	82,6

Optimoidulla rakenteella huomataan, että sen tuuletus- ja kitkahäviöt ovat alentuneet nyt noin 90 wattia, vaikka näiden häviöiden pitäisi pysyä molemmilla prototyypeillä lähes samana. Rautahäviöiden nähdään kasvaneen 212 wattia ja staattorihäviöiden vähentyneen 166 wattia. Optimoinnin tavoitteena oli kuitenkin pienentää staattorihäviöitä enemmän kuin kasvattaa rautahäviöitä. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa tapahtunut. Roottorihäviöt ovat pysyneet prototyypeillä lähes samana, kuten oli oletuksenakin. Lisähäviöissä nähdään kuitenkin 95 watin pienentyminen. Kokonaisuudessaan optimoinnilla saatiin näiden testitulosten perusteella vähennettyä moottorin kokonaishäviöitä noin 136 wattia. Tämän johdosta hyötysuhde kasvoi 94,62 prosenttiin. Tehokerroin kuitenkin pieni vakiorakenteiseen prototyyppiin verrattuna noin 1,6 prosenttia. Optimoidulla rakenteella myös lämpenemä oli lähes kolme astetta korkeampi, vaikka oletuksena oli että se olisi ollut viileämpi vakiorakenteiseen verrattuna. Optimoidun prototyypin tarkemmat testitulokset 45 kW:n nimellisteholla on esitettyä liitteessä 6.

Testitulosten perusteella voidaan todeta optimoinnin onnistuneen, vaikka valitettavasti jäätikin IE4-hyötysuhterajan alapuolelle. Tulosten perusteella on selvää, että alumiinikäämityksellä pystytään saavuttamaan tämän päivän hyötysuhdedirektiivit jopa vakiorakenteella. On kuitenkin edelleen pohdittava, että onko alumiinikäämityksellä mahdollisuus syrjäyttää kuparikäämitys vain joissain rakenteissa ja että onko se niin tuotannollisesti kuin taloudellisestikin kannattavaa.

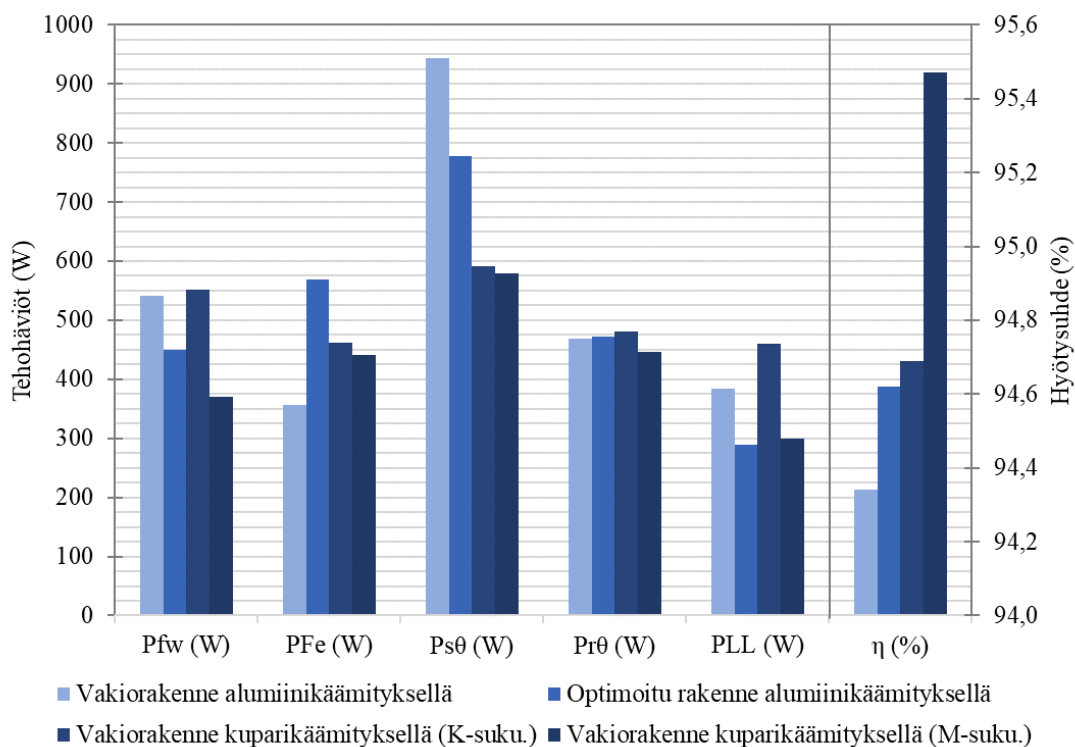
## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tarkastella alumiinikäämityksen soveltuvuutta oikosulkumoottorin staattoriin ja kehittää sen energiatehokkuutta optimoinnin avulla. Optimoinnin lähtökohdaksi oli suurentaa staattoriuraa siten, että se mahdollistaisi alumiinikäämitykselle pienemmät resistiiviset häviöt ja täten kasvattaisi oikosulkumoottorin hyötysuhdetta. Samalla tämän odotettiin kuitenkin kasvattavan moottorin rautahäviöitä sekä mahdollisesti myös lisähäviöitä. Tutkimusta varten testattiin aluksi alumiinijohtimen kytkennän laadukkuus lämpövanhennuskokeiden avulla, jonka jälkeen valmistettiin kaksi alumiinikäämillistä prototyypimoottoria. Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan työn tuloksia ja näistä tehtäviä johtopäätöksiä.

### 6.1 Tulosten tarkastelu

Työssä tutkittiin tarkimmin oikosulkumoottorin häviöitä sekä niiden vaikutusta oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen. Alumiinikäämityksen todettiin jo teorian perusteella tuottavan suuremmat resistiiviset häviöt kuparikäämitykseen verrattuna. Ojalan (2019) diplomityön mukaisesti myös alumiinijohtimen pinnalle muodostuvan resistiivisen oksidikerroksen odotettiin vaikuttavan alumiinijohtimen kytkennän laadukkuuteen. Alumiinikäämityksellä uskottiin kuitenkin olevan mahdollista tuottaa optimoidulla rakenteella yhtä hyvä hyötysuhde kuin vakiorakenteisella kuparikäämityksellä. Samanaikaisesti alumiinikäämityksen uskottiin pienentävän oikosulkumoottorin materiaalikustannuksia ja täten parantavan sen kustannustehokkuutta.

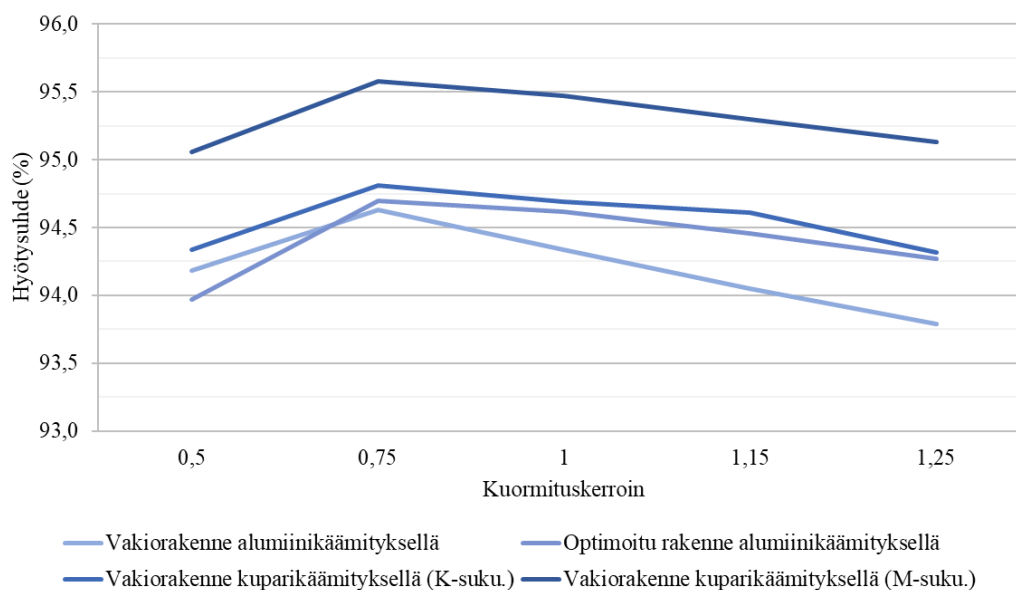
Alaluvussa 3.4 toteutettujen lämpövanhennuskokeiden sekä Ojalan (2019) tutkimuksen avulla valittiin kaksi alumiinikäämityksen kytkentämenetelmää, jotka todettiin valmistetuille prototyypimoottoreille sopiviksi. Prototyyppien valmistus ja siitä esille nousseet havainnot esitettiin alaluvuissa 5.1 ja 5.2. Kuvassa 34 on esitetty näiden kahden alumiinikäämillisen prototyypimoottorin sekä vertailuksi kahden vakiorakenteisen kuparikäämillisen oikosulkumoottorin testatut häviöt ja hyötysuhteet. Kuvassa esitetyt häviöt ovat yhtälön 18 (sivu 30) mukaisia.



**Kuva 34.** Vakiorakenteisen ja optimoidun alumiinikäälämillisen prototyypin sekä kahden kuparikäälämillisen oikosulkumoottorin testatut häviöt ja hyötysuhteet. Kuparikäälämittä K-sukupolvi vastaa ABB oy tuoteluottelon mukaista IE3-rakennetta ja vastaavasti M-sukupolvi IE4-rakennetta.

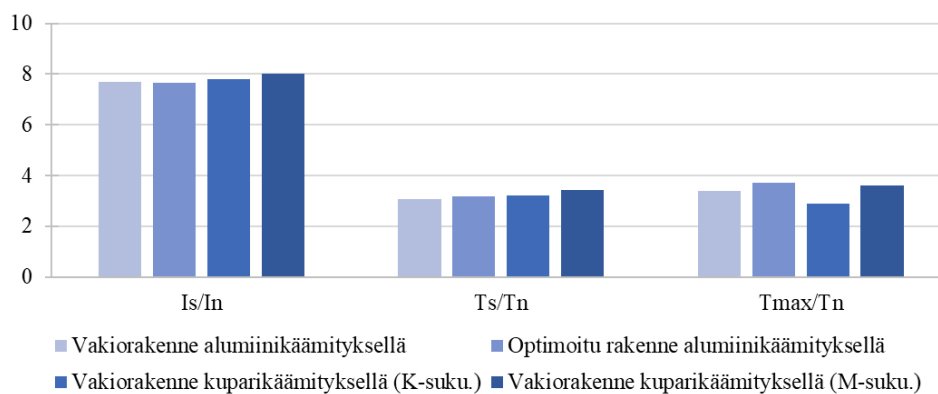
Kuvasta nähdään, kuinka alumiinikäälämillisen prototyypimoottorin rauta- ja staattorihäviöitä saatiin tasoitettua optimoidulla rakenteella. Vakiorakenteella näiden häviöiden ero oli 586 W, kun optimoidulla uralla se oli vain 208 W. On kuitenkin huomioitava, että rautahäviöt kasvoivat enemmän (212 W) kuin staattorihäviöt pienenisvät (166 W). Täten optimoidulla uralla saavutettiin vakiorakennetta korkeampi hyötysuhde vain siksi, että sen kitka- ja tuuletushäviöt sekä lisähäviöt olivat syystä tai toisesta vakiorakennetta pienemmät. Täten kun molempien prototyypimoottorien kitka- ja tuuletushäviöt asetetaan niiden testitulosten keskiarvoon eli 495,5 wattiin niin vakiorakenteiselle prototyypille saadaan hyötysuhteeksi 94,43 % ja optimoidulle 94,53 %. Prototyypimoottorien todettiin täyttävän IE3-hyötysuhdeluokan kriteerit myös 440 V:n ja 60 Hz:n käytössä. Kokonaisuudessaan todettiin vakiorakenteisella prototyypimoottorilla päästävän jopa lähes kuparikäälämillisen K-sukupolven tuloksiin. Mielenkiintoista on myös havaita, että vakiorakenteella alumiinikäälämyksen oikosulkumoottorin rautahäviöt olivat jopa 84 wattia pienemmät kuin vastaavasti kuparikäälämyllä moottorilla.

Kuvassa 35 on esitettyä samaisten moottorien hyötysuhteen muutos kuormituksen funktiona. Kuvasta voidaan havaita, kuinka alumiinikäänitys ja varsinkin optimoitu prototyyppi käyttäytyy kuormituksen muuttuessa melko identtisesti kuparikäänitykseen verrattuna.



**Kuva 35.** Hyötysuhteen muutos kuormituksen funktiona eri rakenteilla.

Alustavasti ei käynnistysvirtojen tai -momenttien eikä huippumomenttien odotettu muuttuvan suuresti, vaikka käänimateriaalia tai uramuotoa muutettiin. Kuvassa 36 on esitettyä samojen rakenteiden kyseiset arvot. Ainoastaan huippumomentissa on havaittavissa pientä eroavaisuutta rakenteiden välillä, mutta muuten ovat arvot melko samoja.



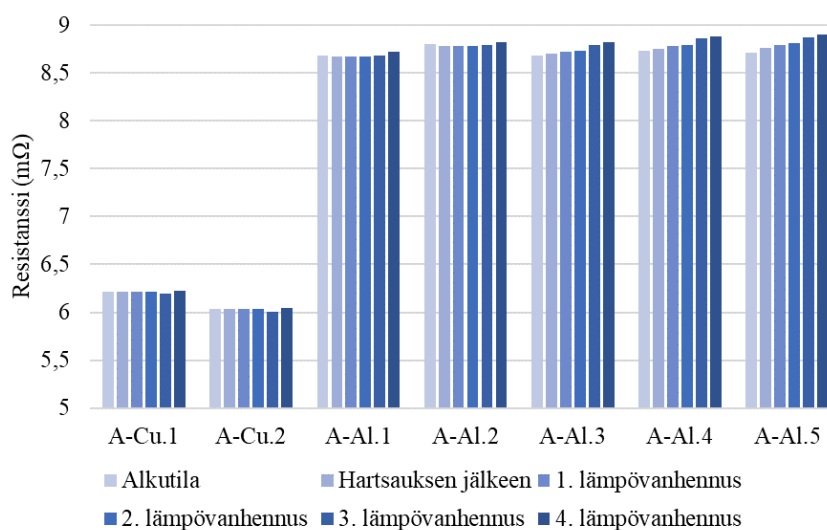
**Kuva 36.** Käynnistysvirrat ja -momentit sekä huippumomentit eri rakenteilla.

Lopputuloksena voidaan tässä työssä optimoidun alumiinikäämillisen prototyypimootorin vastaavan suorituskyvyiltään lähes ABB:n tuotekatalogin mukaista K-sukupolven rakennetta. Suurimpana erona näillä on kuitenkin lämpenemä, joka optimoidulla prototyypillä oli 56,3 °C ja vastaavasti kuparikäämillisellä K-sukupolven rakenteella 44,1 °C. Alumiinin pienemmän tiheyden takia optimoidun prototyypin kokonaispaino oli noin 8 prosenttia pienempi K-sukupolven rakenteeseen verrattuna. Vastaavasti pelkkiä staattoireita verrattaessa optimoidun prototyypin paino oli jopa 20 prosenttia kevyempi.

### 6.1.1 Alumiinikäämityksen laadukkuus

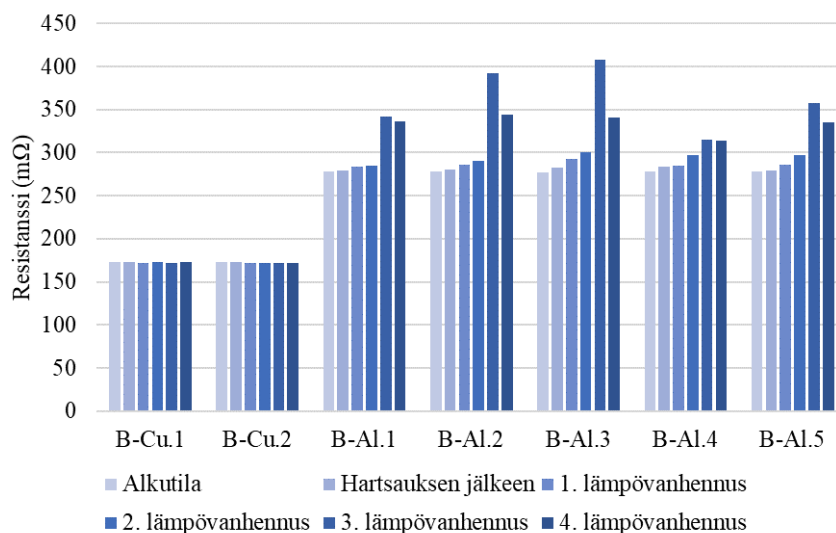
Alumiinin käyttöön sähköisenä johtimena ja oikosulkumootorin käämimateriaalina liitettiin tutkimuksen alkuvaiheessa epäroivia mielipiteitä ja oletuksia. Turvallisten ja laadukkaiden prototyyppien takaamiseksi toteutettiin alaluvussa 3.4 lämpövanhennuskoe uppo-kyllästetyille kupari- ja alumiinivyyhdille.

Kuvassa 37 on esitettyinä useasta johtimesta koostuvien vyyhtien vastusmittaukset lämpövanhennuskokeen aikana. Alumiinivyyhtien kytkennässä käytettiin samaa jatkoliitintä (Ounevan JHR) kuin vakiorakenteisella prototyypilläkin. Tuloksena saatiin kuparivyyhdille melko vakio vastusarvo. Alumiinivyyhdillä vastusarvo kasvoi 1,6–2,2 prosenttia, jonka todettiin olevan linjassa Ojalan (2019: 58) mittaamalle noin 2,1 prosentin kasvulle.



**Kuva 37.** Lämpövanhennuskokeen tulokset (johdinvyyhti jatkoliitoksella).

Myös yhden johdon jatkoliitosten lämpövanhentamisen todettiin olevan tarpeellinen, sillä vastaavaa ei oltu ennen testattu. Kupari- ja alumiinijohdon jatkoliittimenä käytettiin tinnatusta kuparista valmistettua jatkoliitintä. Tämän ei oletettu soveltuvan alumiinisen johdotuksen jatkamiseen. Kuvassa 38 on esitetty kyseisen lämpövanhennuskokeen tulokset.



**Kuva 38.** Lämpövanhennuskokeen tulokset (johto jatkoliitoksella).

Jälleen jatkoliitoksissa joissa oli käytetty kuparijohdinta, pysyi vastusarvo lähes samana. Alumiinijohtimen tapauksessa vastusarvo kasvoi merkittävästi kuitenkin kolmannen ja neljännen lämpövanhennuksen jälkeen. Alumiinijohtimen tapauksessa vastusarvo heittäli suuresti kun liitoskohtaa liikutti. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että alumiinijohtimen tapauksessa laadukas sähköinen kontakti katosi kolmannen lämpövanhennuksen jälkeen, eikä täten tinnatusta kuparista valmistettua jatkoliitintä tule käyttää alumiinijohtimelle. Yleisesti todettiin myös, että alumiinijohtimen ollessa paljon pehmeämpää materiaalia kuin kupari ei yhden johdotuksen jatkoliitos ole alumiinijohtimelle turvallista toteuttaa. Lämpölaajenemisen ja jatkoliitoksen toimintaan muuten vaikuttavat tekijät, kuten värinä voivat aiheuttaa yhden alumiinijohtimen jatkoliitoksessa johdotuksen katkeamisen.

Työssä toteutetun lisätutkimuksen avulla voitiin tehdä johtopäätös prototyypimoottorien valmistukseen käytettävistä turvallisista ja laadukkaista kytkentämenetelmistä. On kuitenkin huomioitava, että tässä työssä käytettyjä jatkoliittimiä tai kaapelikenkiä ei ole tällä hetkellä saatavilla kaikille ABB oy:n tuotekatalogin kokoluokan oikosulkumoottoreille.

### 6.1.2 Laskelmien ja testitulosten vertailu

Prototyypimoottorien valmistuksen ja testauksen perustuessa tässä tutkielmassa tehtyihin laskelmiin on perusteltua myös läpikäydä kuinka hyvin ne täsmäsivät lopullisiin testituloksiin. Täten on taulukkoon 12 koottu sivun 64 taulukossa 7 esitetyt lasketut arvot sekä vastaavat testitulosten arvot 45 kW:n nimellistehoilla.

**Taulukko 12.** Prototyyppien sähköiset laskelmat sekä testitulokset, jossa syöttöjännite on 400 voltia kolmiossa ja syöttötaajuus 50 hertsiä.

Rakenne	Nopeus (rpm)	Hyötysuhde (%)	Tehokerroin	Is/In	Ts/Tn	Tmax/Tn	Nimellisvirta (A)	Lämpenemä (K)
Vakio (laskettu)	2970	94,55	0,881	7,7	3,2	3,4	77,9	61
Vakio (testattu)	2972	94,34	0,885	7,69	3,07	3,4	77,62	53,6
Optimoitu (laskettu)	2970	95,04	0,872	7,9	3,3	3,5	78,2	52
Optimoitu (testattu)	2973	94,62	0,871	7,67	3,16	3,71	78,77	56,3

Laskelmien voidaan todeta olleen vähintäänkin IEC-standardien mukaisten toleranssien sisäpuolella. Suurinta heittoa on havaittavissa molempien prototyyppien lämpenemissä sekä optimoidun rakenteen hyötysuhteessa ja huippumomentissa. Lämpenemien laskennan oletettiin olevan haastavaa, mutta alustavasti odotettiin kuitenkin optimoidun rakenteen lämpenemän olevan pienempi vakioon verrattuna. Hyötysuhteen laskennassa oli tulosten perusteella liian optimistisia. Optimoidun uran nähdään vaikuttaneen huippumomenttiin myös oletettua enemmän.

Alaluvussa 4.3 toteutetun optimoinnin raja-arvoiksi asetettiin vuontiheyden arvot staattorin hampaassa, jottei tehokerroin pääsisi yllättäen pienentymään. Testitulosten perusteella voidaan todeta tämän menetelmän onnistuneen täydellisesti. Tehokerroin säilyi laskelmien perusteella oletetussa arvossa. Täten optimoidun staattorirakenteen voidaan todeta olevan sähkömagneettisesti tehokas ratkaisu, jossa staattorirauta ei pääse kyllästymään.

Tuloksista kuitenkin nähdään, että tehokertoimen pienentyminen kasvattaa moottorin nimellisvirtaa. Tämän voidaan todeta olleen osatekijänä lämpenemän kasvussa prototyypin välillä, sillä suurempi virta-arvo lämmittää käämitystä enemmän.

### 6.1.3 Alumiinikäämityksen kannattavuus

Yhtenä työn tavoitteena oli saavuttaa olemassa olevaa oikosulkumoottorirakennetta kustannustehokkaampi ratkaisu käyttäen alumiinikäämitystä. Alaluvussa 3.5 käsiteltiin jo lyhyesti pelkästään kupari- ja alumiinijohdinten mahdollisia kustannusten eroavaisuuksia. Tämä ei kuitenkaan kertonut alumiinikäämillisen staattorin todellista kustannustehokkuutta. Täten selvitettiin tässä työssä valmistetun vakiorakenteisen prototyypimoottorin sekä ABB oy:n tuotekatalogin vakiorakenteisen kuparikäämillisen K-sukupolven koko oikosulkumoottorien sekä tarkemmin myös staattorien välittömät kustannukset. Tässä yhteydessä tulokset on esitetty kuitenkin vain prosentuaalisesti. Testitulosten perusteella todettiin vakiorakenteisella alumiinikäämityksellä päästävän lähes K-sukupolven tuloksiin ja täten nämä rakenteet voidaan nähdä kilpailijoina.

Pelkästään staattorien osalta on välittömien kustannusten ero näkyvä. Näissä kilpailevissa rakenteissa on identtiset staattoripaketit, jonka myötä niiden kustannus on myös sama. Kun myös staattoripaketteihin käytetty työmäärä ja sen kustannukset määritetään samaksi, saadaan alumiinikäämityn staattorin välittömiksi kustannuksiksi jopa 30 prosenttia pienempi arvo. Näiden kilpailevien rakenteiden muut välittömät kustannukset koko oikosulkumoottorin osilta ovat melko samat. Tästä johtuen tässä työssä valmistetun vakiorakenteisen prototyypin välittömät kustannukset ovat jopa 20 prosenttia pienemmät kuin ABB oy:n tuotekatalogin mukaisen K-sukupolven välittömät kustannukset.

## 6.2 Tulevaisuudennäkymät

Työn tulosten perusteella voidaan alumiinikäämityksellä nähdä olevan ilmeisen positiiviset mahdollisuudet tulevaisuuden staattorikäämityksissä. Alumiinikäämitys mahdollistaa kevyempien ja kustannustehokkaampien sähkömoottorien valmistuksen, jossa sen

huonompi resistiivisyys kupariin verrattuna ei kuitenkaan ole näkyvä. On silti vielä tarkemmin tutkittava, millainen vaikutus alumiinikäämityksen usean vuoden todellisella jatkuvalla käytöllä on sen toimintaan ja laadukkuuteen. Vaikka nyt tuloksena saatiin hyötysuhteiltaan korkealuokkaiset tulokset on kuitenkin selvää, että alumiinikäämitys ja sen kytkennät vanhentuvat nopeammin kuin vastaava kuparikäämitysrakenne.

Yhtenä johtavana sähkömoottorien valmistajana ABB oy:n on tarkkaan tutkittava alumiinikäämityksen mahdolliset vaikutukset sen toimintaan. Uusi tuote sisältää aina uusia ja tuntemattomia kuluja, joita tässä tilanteessa tulisi tunnistaa. Tällaisia tutkimuksen aikana esille tulleita tekijöitä olivat esimerkiksi ostajan mahdolliset ennakkoluulot alumiinikäämityksestä, varastotilojen riittävyys uudelle käämijohtimelle, varastoarvojen mahdollinen kasvu uuden materiaalin johdosta sekä tilaus-, tuotanto- ja testausjärjestelmien soveltuvuudet kahdelle eri käämintämateriaalille.

Alumiinikäämityksen hyötysuhteen kehittämiseksi voitaisiin tutkia myös muita keinoja, kuin pelkästään olemassa olevan staattoriuran suurentamista. Yksi tällainen keino jota tässä työssä ei tutkittu on maksimaalisen täytekerroimen saavuttaminen. Staattoriuraa ei siis välttämättä ole pakko suurentaa käämijohtimen volyymin kasvattamiseksi, vaan pelkästään täytekerrointa kasvattamalla saadaan käämivyyhdin osuutta urassa kasvatettua. Esimerkiksi esipuristetuilla käämityksillä on pystytty saavuttamaan jopa yli 75 prosentin täytekerroin (Widmer, Martin & Mecrow 2015), kun tässä tutkimuksessa se säilyi alle 67 prosenttina. Tämän menetelmän soveltaminen puolisuuljetuille staattoriurille on kuitenkin mahdotonta nykyisillä rakenteilla. Tätä varten tulisi kehittää täysin uusi rakenne, jonka suunnittelussa ja valmistuksessa syntyisi taas uusia lisäkustannuksia.

Myös kokonaan uuden johdinmateriaalin käyttäminen voisi olla mahdollista. Tulevaisuudessa kiertotalouden kehittyessä voitaisiin puhtaan kuparin tai alumiinin sijasta käyttää johdinmateriaalina esimerkiksi epäpuhdasta kuparia, jonka sähkönjohtavuus ja kustannus olisi kuparin ja alumiinin välimaastossa. Tällaista johdinmateriaalia ei tutkimuksen aikana ollut saatavilla, mutta kenties tulevaisuudessa tämäkin voisi olla mahdollista.

## 7 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin alumiinijohtimen soveltuvuutta oikosulkumoottorin staattorikäimitykseen sen kustannustehokkuuden parantamiseksi. Alustavasti alumiinikäimityksen vaikutukset oikosulkumoottorin toimintaan tiedettiin. Haasteina nähtiin alumiinin huonompi sähkönjohtavuus kupariin verrattuna sekä alumiinijohtimen sähköisen kytkennän toteutus. Täten työssä päädyttiin tutkimaan jo olemassa olevaa rakennetta sekä sen kehittämismahdollisuuksia. Myös alumiinikäimityksen kytkennän toteutusta ja sen ikääntymistä tutkittiin työssä valmistettavia prototyypimoottoreita varten. Vaikka hyötysuhdevaatimusten tiedettiin yleisesti kiristyvät eri puolilla maailmaa alaluvun 2.2.4 mukaisesti, odotettiin alumiinikäimityksen täyttävän tarvittavat hyötysuhdedirektiivit olemassa olevaa kuparikäämirakennetta kustannustehokkaammin.

Aluksi työn teoriaosuudessa esiteltiin oikosulkumoottorin rakennetta ja toimintaa sekä alumiinikäimityksen mahdollisia vaikutuksia näihin. Tärkeintä tässä vaiheessa oli tutkia alumiinin huonomman sähkönjohtavuuden vaikutuksia oikosulkumoottorin tuottamiin häviöihin ja tämän vaikutusta oikosulkumoottorin lopulliseen hyötysuhteeseen. Tästä johtuen työssä esiteltiin tarkemmin oikosulkumoottorin häviöt ja näiden perusteella laskettava hyötysuhde. Teorian perusteella oli pääteltävissä että alumiinijohtimen huonompi sähkönjohtavuus kasvattaa staattorihäviöitä, mutta toisaalta rinnakkaisten käämijohtimien sekä johtimen poikkipinta-alan kasvattamisella pystyttäisiin vastaavasti pienentämään staattorihäviöitä. Optimoinnissa toteutettavan staattoriuran kasvattamisen todettiin kasvattavan vuontiheyden arvoa uran ympärillä, jonka myötä vuontiheydet asetettiinkin työssä toteutetun optimoinnin raja-arvoiksi.

Työssä tutkittiin sähkömagneettisen teorian ohella myös yhtä nykypäivän tärkeää markinatekijää eli ympäristövaikutuksia. Yhteistyössä yhden käämilankavalmistajan avulla selvitettiin ABB oy:n Motor and Generators -liiketoimintayksikölle toimitettujen käämilankojen metallien alkuperä. Myös kansainvälisten järjestöjen (European Aluminium, IAI, ICSG sekä ICA) tuottaman datan perusteella kerättiin tähän työhön niin kansainvälisiä kuin paikallisiakin lukuja kuparin ja alumiinin tuotantoon ja siinä syntyneeseen hii-

lijalanjälkeen liittyen. Tulosten perusteella todettiin primäärialumiinin tuotannon kuluttavan enemmän energiaa sen tuotantomenetelmästä johtuen. Ekvivalenttisen hiilidioksidipäästön todettiin riippuvan suuresti metallin tuotannossa käytettävästä energiasta. Kiinan suuren hiilivoiman takia alumiinin ekvivalenttiselle hiilidioksidipäästölle annettiin useampi tulos. Työssä selvitetyn alumiinin alkuperän perusteella voidaan työssä käytetyn alumiinijohtimen hiilijalanjäljen todeta olleen keskitasoa selvästi alhaisempi.

Työssä tuotetulla lisätutkimuksella pyrittiin varmistamaan valmistettujen prototyypimoottorien turvallinen ja laadukas toiminta. Lisätutkimus antoi vastauksen useaan kysymykseen ja täten lisäsi tämän tutkimuksen tärkeyttä. Ensinnäkin tuotannossa toteutettavien jatkoliitosten todettiin lisätutkimuksen perusteella olevan laadukkaita ja toimivia. Toiseksi pelkän uppokyllästyksen ei nähty vaikuttavan kupari- tai alumiinikäämin kytkennän sähköiseen toimintaan suuresti. Kuitenkin yhden alumiinijohtimen jatkoliitoksen todettiin olevan hyvin heikko ulkoisten tekijöiden vaikuttaessa siihen. Lisätutkimuksen päätelmänä saatiin lämpövanhennuskokeen tuloksena Ojalan (2019) diplomityöhön täsmäävä tulos. Täten alumiinikäämityksen jatkoliitoksen toteuttamisen nähtiin olevan turvallisesti ja laadukkaasti mahdollista myös valmistettaville prototyypimoottoreille.

Prototyypimoottorien suunnittelu eteni suunnitellusti ja laskelmissa nähtiin odotettuja muutoksia. Laskennassa olennaisiksi arvoiksi todettiin staattorin vuontiheydet, joiden muutoksia seurattiinkin hyvin tarkkaan. Tällä pyrittiin välttämään staattoriraudan kyllästymistä ja siten tehokertoimen yllättävää pienentymistä. Prototyypimoottorien valmistuksen aikana kerättiin työhön havaintoja, jotka mahdollisesti vaikuttavat alumiinikäämityksen sekä yleisemmin laserleikatuista sähkölevyistä valmistetun staattorin toimintaan. Näillä havainnolla luotiin tutkimukselle lisäarvoa sekä kehitettiin mahdollisia lisätutkimusaiheita työn aihealueen ympärillä.

Tutkimuksen tuloksena saatiin kaksi korkealuokkaisen hyötysuhteen omaavaa oikosulkumoottoria, joista optimoidulla rakenteella saatiin testituloksena 0,28 prosenttiyksikköä parempi hyötysuhde. Kuitenkin kitka- ja tuuletushäviöiden tasaamisen jälkeen eroa jäi jäljelle vain noin 0,1 prosenttiyksikköä. Tämän perusteella ei staattoriuran optimoinnilla

nähty olevan merkittävää mahdollisuutta hyötysuhteen parantamisessa. Kuitenkin vakiorakenteisella alumiinikäämityllä staattorilla nähtiin olevan jopa 30 prosenttia pienemmät välittömät kustannukset kuparikäämilliseen vakiorakenteeseen verrattuna. Koko oikosulkumoottorin tasolla tämä merkitsi noin 20 prosenttia pienempiä välittömiä kustannuksia alumiinikäämitylle oikosulkumoottorille. Tämä lopputulos antaa selvän näkymän alumiinikäämityksen kustannustehokkuuden luomista mahdollisuuksista.

Tutkimus antoi tuloksen kuitenkin vain yhdelle moottorityypille, eikä tämän perusteella voida vielä tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä alumiinikäämityksen soveltuvuudesta tai uramuodon optimoinnista kaikille moottorityypeille napapariluvusta ja nimellistehosta riippuen. Mitään selvää estettä alumiinin käyttämiselle staattorikäämityksen materiaalina ei tutkimuksessa ilmennyt. Tämä työ tuotti kuitenkin tärkeää tutkimustulosta, jota ABB oy ja sen Vaasan tutkimus- ja tuotekehitysosasto voivat käyttää suunnitellessaan mahdollisesti tulevaisuuden alumiinikäämillisiä moottorirakenteita.

## LÄHDELUETTELO

- ABB (2018). Low voltage process performance motors EN 06-2018. Tuoteluettelo. ABB oy. 146 s.
- ABB (2019a). Summary of initial findings on aluminum winding. Sisäinen tutkimusraportti. Julkaisematon. ABB oy. 9 s.
- ABB (2019b). Material Compliance. Sisäinen internetsivusto. ABB oy.
- Aho, Tuomo (2007). Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments. Väitöskirja, LUT. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, No 292. Lappeenranta. 147 s. ISBN 978-952-214-498-0.
- Alcoa (2018). *Sustainability Report 2018*. [Yhtiöraportti]. Pittsburgh, PA. [ 3.12.2019].  
Saatavissa: <https://www.alcoa.com/sustainability/en/default.asp>
- Arkkio, Antero (1987). Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations. Väitöskirja, TKK. *Acta Polytechnica Scandinavica*, Electrical Engineering Series no. 59. Helsinki. 97 s. ISBN 951-666-250-1.
- Aura, Lauri & Antti J. Tonteri (2002). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteita*. 3.–4. Painos. Helsinki. WSOY. 448 s. ISBN 951-0-21385-3.
- Ayat, S., R. Wrobel, J. Baker & D. Drury (2017). A comparative study between aluminum and copper windings for a modular-wound IPM electric machine. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMCD)*. Miami, FL. 8 s.
- Dammert, T., A. Väänänen, M. Kuuva, J. Valkama & J. Kaipainen (2004). *Ympäristökyvykset ja elinkaariajattelu: lähestymistapoja sähkö- ja elektroniikkateollisuudelle*. Helsinki: Teknologiainfo Teknova oy. 75 s. ISBN 951-817-840-2.

- European Aluminium (2019). *Vision 2050 – European Aluminium’s Contribution to the EU’s Mid-Century Low-Carbon Roadmap*. [Tutkimusraportti]. Brussels, Belgium. [28.11.2019]. Saatavissa: [https://www.european-aluminium.eu/media/2545/sample\\_vision-2050-low-carbon-strategy\\_20190401.pdf](https://www.european-aluminium.eu/media/2545/sample_vision-2050-low-carbon-strategy_20190401.pdf)
- Freitag, Christian (2017). *Magnetic Properties of Electrical Steel, Power Transformer Core Losses and Core Design Concepts*. Väitöskirja. Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, Germany. 156 s.
- Hupponen, Jussi (2004). High-speed solid-rotor induction machine – Electromagnetic calculation and design. Väitöskirja, LUT. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, No 197. Lappeenranta. 168 s. ISBN 951-764-981-9.
- IAI (2019). Global Aluminium Cycle 2017 [online]. [10.12.2019] Saatavissa: <http://www.world-aluminium.org/statistics/massflow/>
- IAI (2020). World Aluminium [online]. [29.1.2020] Saatavissa: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>
- ICA (2017). *Copper Recycling*. [Tutkimusraportti]. New York, NY, USA. [13.11.2019]. 3 s. Saatavissa: <https://www.copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/03/ica-copper-recycling-201712-A4-HR2.pdf>
- ICA (2020). ICA Indicators [online]. [28.1.2020] Saatavissa: <https://www.sustainable-copper.org/ica-indicators/>
- ICSG (2019). *The World Copper Factbook 2019*. [Tutkimusraportti]. Lisbon, Portugal. [10.12.2019]. 67 s. Saatavissa: <https://www.icsg.org/>
- IEA (2017). *Energy Efficiency 2017*. *IEA Publications*. France. 143 s. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2017>

- IEC (2009). *IEC 60068-2-14 Environmental testing – Part 2-14: Tests – Test N: Change of temperature*. 42 s.
- IEC (2014a). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for dermining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. 190 s.
- IEC (2014b). *IEC 60034-30-1 Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. 54 s.
- Iorgulescu, Mariana (2016). Study of Single Phase Induction Motor with Aluminium Versus Copper Winding. *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. Craiova, Romania. 5 s.
- Komission asetus (EU) 2019/1781 ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamisesta sähkömoottoreille ja taajuusmuuttajille. 2125/1.10.2019
- Möttönen, Nora (2013). *Eräiden valurautaisten oikosulkumoottorien elinkaariarviointi*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 137 s.
- Ojala, Mikko (2019). *Alumiinikäämityksisen oikosulkumoottorin sähköiset liitokset*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 91 s.
- Olivetti, E., H. Duan & R. Kirchain (2013). *Exploration of Carbon Footprint of Electrical Products*. Massachusetts Institute of Technology: Materials Systems Laboratory. 69 s.
- Orlova, S., A. Rassölkin, A. Kallaste, T. Vaimann & A. Belahcen (2016). *Lifecycle Analysis of Different Motors from the Standpoint of Environmental Impact*. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 6(2016): 37–46.

- Peltomäki, Vesa (2020). M400-50A statorilevyn laserleikkaus. Sähköpostiviesti Lauri Kujalalle 3.4.2020.
- Pennanen, Matias (2016). *Erään oikosulkumoottorin hyötysuhteen mittaustarkkuus*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 85 s.
- Prasad, Shiva (2000). Studies on the Hall-Heroult aluminum electrowinning process. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 11(3). Campina Grande, Brazil. s. 245–251.
- Pyrhönen, J., T. Jokinen & V. Hrabovcová (2014). *Design of Rotating Electrical Machines*. 2. painos. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. 584 s. ISBN 978-1-118-58157-5.
- Responsible Sourcing Network (2019). *Mining the Disclosures 2019*. [Projektiraportti]. Berkeley, CA. [20.11.2019]. 38 s. Saatavissa: <https://www.sourcingnetwork.org/mining-the-disclosures-2019>
- Rius Rueda, Armand (2017). A novel optimization methodology of modular wiring harnesses in modern vehicles: Weight reduction and safe operation. Väitöskirja. *Polytechnic University of Catalonia*. 214 s.
- Soulier, M., S. Glöser-Ghahoud, D. Goldmann & L. A. Tercero Espinoza (2018). Dynamic analysis of European copper flows. *Resources, Conservation & Recycling* 129. s. 143–152.
- Teknologiateollisuus (2006). *Raaka-ainekäsikirja 5 – Alumiinit*. 2. uudistettu painos. Helsinki: Teknologiatieto Teknova oy. 247 s. ISBN 951-817-918-2.

- UN Environment (2017). *Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Electric Motors and Motor Systems*. [Tutkimusraportti]. Paris, France. [9.12.2019]. Saatavissa: <https://www.united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/09/U4E-Motor-Guide-201709-Final.pdf>
- Widmer, J. D., R. Martin & B. C. Mecrow (2015). Pre-Compressed and Stranded Aluminium Motor Windings for Traction Motors. *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. Idaho, USA. 7s.
- Ympäristöministeriö (2003). *Kioto pöytäkirjan toimeenpanon säännöt*. Helsinki: Edita Publishing oy. 78 s. ISBN 952-11-1320-0
- Zitzler, Eckart (1999). *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Väitöskirja. *Swiss Federal Institute of Technology Zürich*, No. 13398. 134 s.
- Zitzler, E., M. Laumanns & L. Thiele (2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. TIK-Report 103, *Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich*. 21 s.

## LIITTEET

**Liite 1.** Vakiorakenteisen prototyypin tuotetiedot sekä lasketut arvot.

<b>ABB Oy</b> Motors & Generators	<b>PERFORMANCE DATA OF MOTOR</b>	
--------------------------------------	----------------------------------	---

## Driven Motor:

Motor type code	M3BP 225SMA 2			
Motor product code	3GBP221210-ADM			
Motor type	Squirrel cage Motor			
Mounting designation	IM 1001			
Protected by enclosure	IP 55			
Method of cooling	IC 411			
Insulation	Class F			
Standards	IEC			
International efficiency classification (IEC 60034-30)	IE3			
Ambient temperature, max.	40 °C			
Altitude, max.	1000 m.a.s.l.			
Duty type	S1			
Temp. rise	Class B			
Connection of stator winding	Delta			
Rated output	45 kW			
Voltage	400 V			
Frequency	50 Hz			
Speed	2970 r/min			
Current	77,9 A			
Relat. starting current	7,7			
Relat. starting torque	3,2			
Relat. maximum torque	3,4			
Relat. minimum torque	3,0			
No load current	17,5 A			
Rated torque	144,6 Nm			
Load characteristics	Load %	Current A	Efficiency %	Power Factor
	100	77,9	94,55	0,881

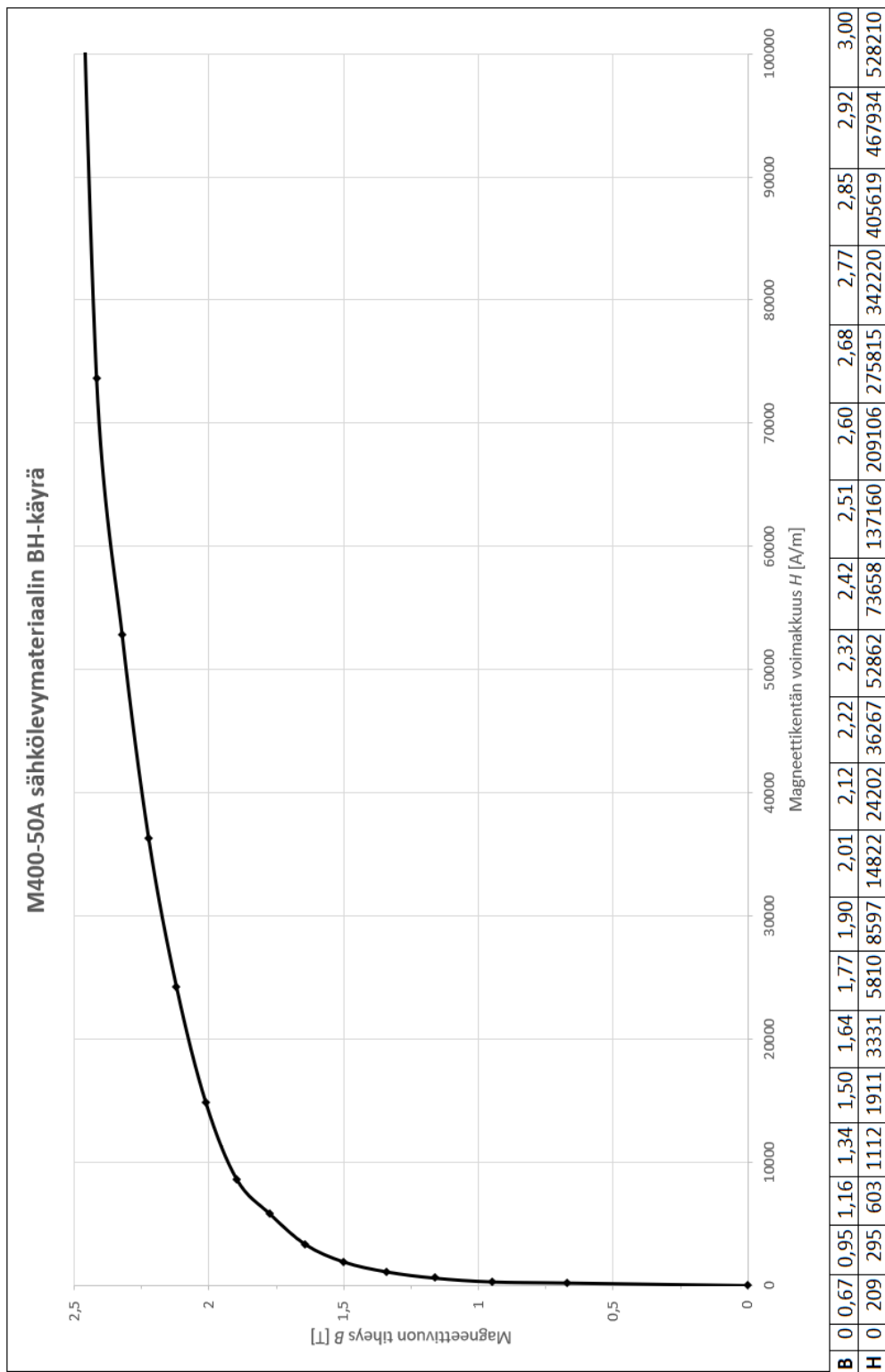
**Liite 2.** Optimoidun prototyypin tuotetiedot sekä lasketut arvot.

<b>ABB Oy</b> Motors & Generators	<b>PERFORMANCE DATA OF MOTOR</b>	
--------------------------------------	----------------------------------	---

## Driven Motor:

Motor type code Motor product code Motor type Mounting designation Protected by enclosure Method of cooling Insulation Standards International efficiency classification (IEC 60034-30) Ambient temperature, max. Altitude, max.	M3BP 225SMA 2 3GBP221210-ADM Squirrel cage Motor IM 1001 IP 55 IC 411 Class F IEC IE4  40 °C 1000 m.a.s.l.								
Duty type Temp. rise Connection of stator winding Rated output Voltage Frequency Speed Current	S1 Class B Delta 45 kW 400 V 50 Hz 2970 r/min 78,2 A								
Relat. starting current Relat. starting torque Relat. maximum torque No load current Rated torque	7,9 3,3 3,5 19,9 A 144,6 Nm								
Load characteristics	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Load %</th> <th style="width: 20%;">Current A</th> <th style="width: 20%;">Efficiency %</th> <th style="width: 30%;">Power Factor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">78,2</td> <td style="text-align: center;">95,04</td> <td style="text-align: center;">0,872</td> </tr> </tbody> </table>	Load %	Current A	Efficiency %	Power Factor	100	78,2	95,04	0,872
Load %	Current A	Efficiency %	Power Factor						
100	78,2	95,04	0,872						

Liite 3. Käytetyn sähkölevymateriaalin M400-50A BH-käyrä.



Kuva 39. Käytetyn sähkölevymateriaalin M400-50A BH-käyrä.

**Liite 4.** Työssä käytetyn alumiinijohtimen tuotetiedot.

PRODUCT INFORMATION

# DAMID 200 AL

Round enamelled winding wire of aluminium, heat resistant, class 200

**Product name:**

Damid 200 AL - Gr 2

**Specifications:**

IEC 60317-25

**UL approval:**

Approved: Damid 200

UL-file no: E101843

**Class: 200**Temperature index  $\geq 200^{\circ}\text{C}$ Heat shock:  $\geq 220^{\circ}\text{C}$ **Conductor material:**

EN 1715 - EN AW1370 [Al 99.7]

**Insulation:**

Basecoat: THEIC-modified polyester or polyesterimide

Overcoat: Polyamide-imide

**Properties:**

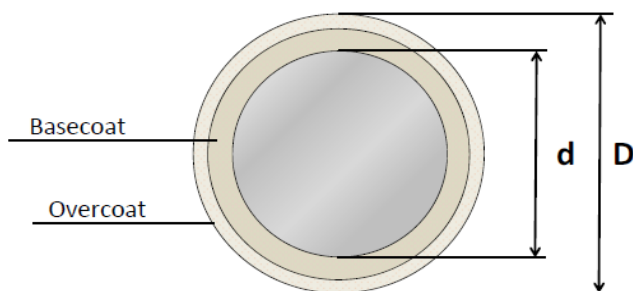
- High heat resistance
- Suitable in lightweight designs
- Very good resistance to transformer oils
- Very good resistance to typical solvent
- Freon resistant

**Field of application:**

- Lightweight designs
- Electric motors
- Oil-cooled transformers
- Dry-insulated transformers
- Welding transformers

**Dimension range:**Damid 200 AL - Gr 2:  $0,315 \leq \varnothing \leq 6,000$ **Standard packaging:** $0,315 \leq \varnothing < 0,900$  A250/400 $0,900 \leq \varnothing \leq 6,000$  A400/630**Shelf life:**

10 years, under normal ambient conditions



D - d = Increase

## DAMID 200 AL

Round enamelled conductor of aluminium, heat resistant, class 200

### Properties for DAMID 200 AL


Main characteristics	Test method	Property values	Test values for a Damid 200 AL sample (2,00 mm, Gr2)
<b>Thermal properties</b>			
Heat shock	IEC 60851 - 6.3	≥ 220°C	≥ 220°C
Cut-through	IEC 60851 - 6.4	≥ 320°C	OK at 340°C
Temperature index	IEC 60172	≥ 200°C <sup>1)</sup>	≥ 200°C <sup>1)</sup>
<b>Electrical properties</b>			
Conductor resistance	IEC 60851 - 5.3	0,02817 Ωmm <sup>2</sup> /m	0,02817 Ωmm <sup>2</sup> /m
Conductivity	1/R	> 35,5 m/(Ωmm <sup>2</sup> )	> 35,5 m/(Ωmm <sup>2</sup> )
Breakdown voltage	IEC 60851 - 5.4	IEC 60317-0-3 <sup>2)</sup>	9,0
<b>Mechanical properties</b>			
Elongation	IEC 60851-3.3	IEC 60317-0-3 <sup>2)</sup>	25%
Flexibility	IEC 60851-3.5	Mandrel wind. <sup>3)</sup>	3 x Ø
		Stretching <sup>4)</sup>	min 15 %
Adherence	IEC 60851-3.5	Jerktest <sup>5)</sup>	No loss of adhesion
		Peeltest <sup>6)</sup>	min. 110 <sup>7)</sup>
1. According to supplier certificate 2. Values depend on dimension 3. Up to an including 1,60 mm 4. Over 1,60 mm 5. Up to and including 1,00 mm 6. Over 1,00 mm (internal LWW standard) 7. Revolutions x nominal dimension			Values above are for information only. All values noted are typical and can vary between lots and dimensions.

The technical data included is up to date at the time of printing.  
LWW reserves the right to make any amendments deemed necessary

Ed.A(4)



## Liite 5. Vakiorakenteisen prototyypin testitulokset.

ABB Motors		3-Phase Induction Motor				Calculations			
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>		Work Nr. <b>1786000-1</b>							
Power <b>44.91 kW</b>	Duty <b>S1</b>	Speed <b>2972.0 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>					
Voltage <b>400 V</b>	Connection <b>D</b>	Torque <b>144.3 Nm</b>		Ambient <b>40</b>					
Current <b>77.62 A</b>	Frequency <b>50.0 Hz</b>	Direction 	IP <b>55</b>	Insul. Class <b>F</b>		Temp. Class <b>B</b>			
Approved by:		Tested as <b>Motor</b>		Rotor Bar Material <b>Al</b>					
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency			
$I_0$	18.65 A	$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - PC_u}{P_{0N}}$	<sup>1.0</sup> IEC Tested		<sup>1.0</sup> IEC Calculated		<sup>1.0</sup>
$\cos\phi_0$	0.0754	1.10	1.159	1.044	$U_1$	400.1 V	400.1 V		
$P_0$	973.9 W	1.00	1.000	0.948	$I_1$	77.62 A	77.62 A		
$Z_0$	12.383 $\Omega$	0.95	0.938	0.909	$I_2$	0.0 A	0.0 A		
$n_0$	2998.0 rpm	0.90	0.876	0.879	$P_{fw}$	541.0 W	540.9 W		
$I_k$	449.0 A	0.80	0.766	0.833	$P_{Fe}$	356.5 W	356.5 W		
$\cos\phi_k$	0.3895	0.60	0.562	0.731	$P_s$	940.2 W	942.7 W		
$Z_k$	0.5143 $\Omega$	0.50	0.472	0.678	$P_r$	468.2 W	469.4 W		
$R_k$	0.2004 $\Omega$	0.40	0.384	0.640	$P_L$	385.1 W	385.1 W		
$X_k$	0.4737 $\Omega$	0.30	0.322	0.611	$P_T$	2690.9 W	2694.6 W		
$P_k$	3554 W	0.20	0.315	0.580	$P_{out}$	44.91 kW	44.91 kW		
$R_{1v}$ (20°C)	42.22 m $\Omega$				$P_{in}$	47.60 kW	47.60 kW		
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$				$\eta$	94.35 %	94.34 %		
					$\cos\phi$	0.885	0.885		
	$\Delta$	$Y$			$s$	1.011 %	1.014 %		
$T_N$	144.6 Nm	144.6 Nm	144.6 Nm		$n$	2972.07 rpm	2971.99 rpm		
$T_L/T_N$	0.00	0.00	0.00		Temperature Rises				
$T_u/T_N$	0.00	0.00	0.00		$\Delta\theta_{Cu10}$	54.9 K	54.9 K		
$T_B/T_N$	0.00	0.00	0.00		$\Delta\theta_{Cu1}$	53.6 K	53.6 K		
$I_a$	0.0 A	0.0 A	0.0 A		$\Delta\theta_{DW}$	66.1 K	0.0 K		
$I_a/I_N$	0.00	0.00			$\Delta\theta$	0.0 K	0.0 K		
$I_a/I_k$	0.00	0.00			$\Delta\theta_R$	59.8 K	0.0 K		
Short-Circuit Test					$\Delta\theta_F$	22.6 K	0.0 K		
$I/I_N$	1.50	1.00	0.80	0.50	0.00	0.00	$\Delta\theta_{DB}$	33.4 K	0.0 K
$I_k/I_k$	1.0941	1.0000	0.9443	0.8123	0.0000	0.0000	$U_{amb}$	24.2 °C	0.0 °C


Accepted -

Test Place TP2

MotLab 12.1 Build 0

Printed: 06/04/2020

C 2

ABB Motors			3-Phase Induction Motor				Calculations			
Calculated Values			Nr. 3G1F2006653911		Ver: E					
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>						Work Nr. <b>1786000-1</b>				
Power <b>33.64 kW</b>		Duty <b>S1</b>			Speed <b>2975.0 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>			
Voltage <b>400 V</b>		Connection <b>D</b>			Torque <b>108.0 Nm</b>		Ambient <b>40</b>			
Current <b>59.07 A</b>		Frequency <b>50.0 Hz</b>		Direction 		IP <b>55</b>		Insul. Class <b>F</b> Temp. Class <b>B</b>		
Approved by:				Tested as <b>Motor</b>			Rotor Bar Material <b>Al</b>			
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency				
$I_0$	18.65 A		$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - P_{Cu}}{P_{0N}}$	<sup>1.0</sup> IEC Tested		<sup>1.0</sup> IEC Calculated		<sup>1.0</sup>
$\cos\phi_0$	0.0754		1.10	1.159	1.044	$U_1$	400.4 V	400.4 V		
$P_0$	973.9 W		1.00	1.000	0.948	$I_1$	59.07 A	59.07 A		
$Z_0$	12.383 $\Omega$		0.95	0.938	0.909	$I_2$	0.0 A	0.0 A		
$n_0$	2998.0 rpm		0.90	0.876	0.879	$P_{fw}$	544.8 W	544.8 W		
$I_k$	419.1 A		0.80	0.766	0.833	$P_{Fe}$	360.1 W	360.1 W		
$\cos\phi_k$	0.3675		0.60	0.562	0.731	$P_s$	535.4 W	536.8 W		
$Z_k$	0.5143 $\Omega$		0.50	0.472	0.678	$P_r$	251.8 W	252.5 W		
$R_k$	0.2004 $\Omega$		0.40	0.384	0.640	$P_L$	215.7 W	215.7 W		
$X_k$	0.4737 $\Omega$		0.30	0.322	0.611	$P_T$	1907.9 W	1909.9 W		
$P_k$	2119 W		0.20	0.315	0.580	$P_{out}$	33.64 kW	33.64 kW		
$R_{1v}$ (20°C)	42.22 m $\Omega$					$P_{in}$	35.55 kW	35.55 kW		
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$					$\eta$	94.63 %	94.63 %		
						$\cos\phi$	0.868	0.868		
$\Delta$			$Y$			$s$	0.727 %	0.729 %		
						$n$	2975.03 rpm	2974.97 rpm		
						$\Delta\theta_{Cu10}$				
						$\Delta\theta_{Cu1}$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta_R$				
Short-Circuit Test						$\Delta\theta_F$				
$I/I_N$	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	$\Delta\theta$				
$I_k/I_k$	0.9334	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	$U_{amb}$				

PRINTED FROM

F5W-7201001

Load  
0.75


Accepted -

Test Place TP2

MotLab 12.1 Build 0 Printed: 06/04/2020

C 3

Load  
0.50

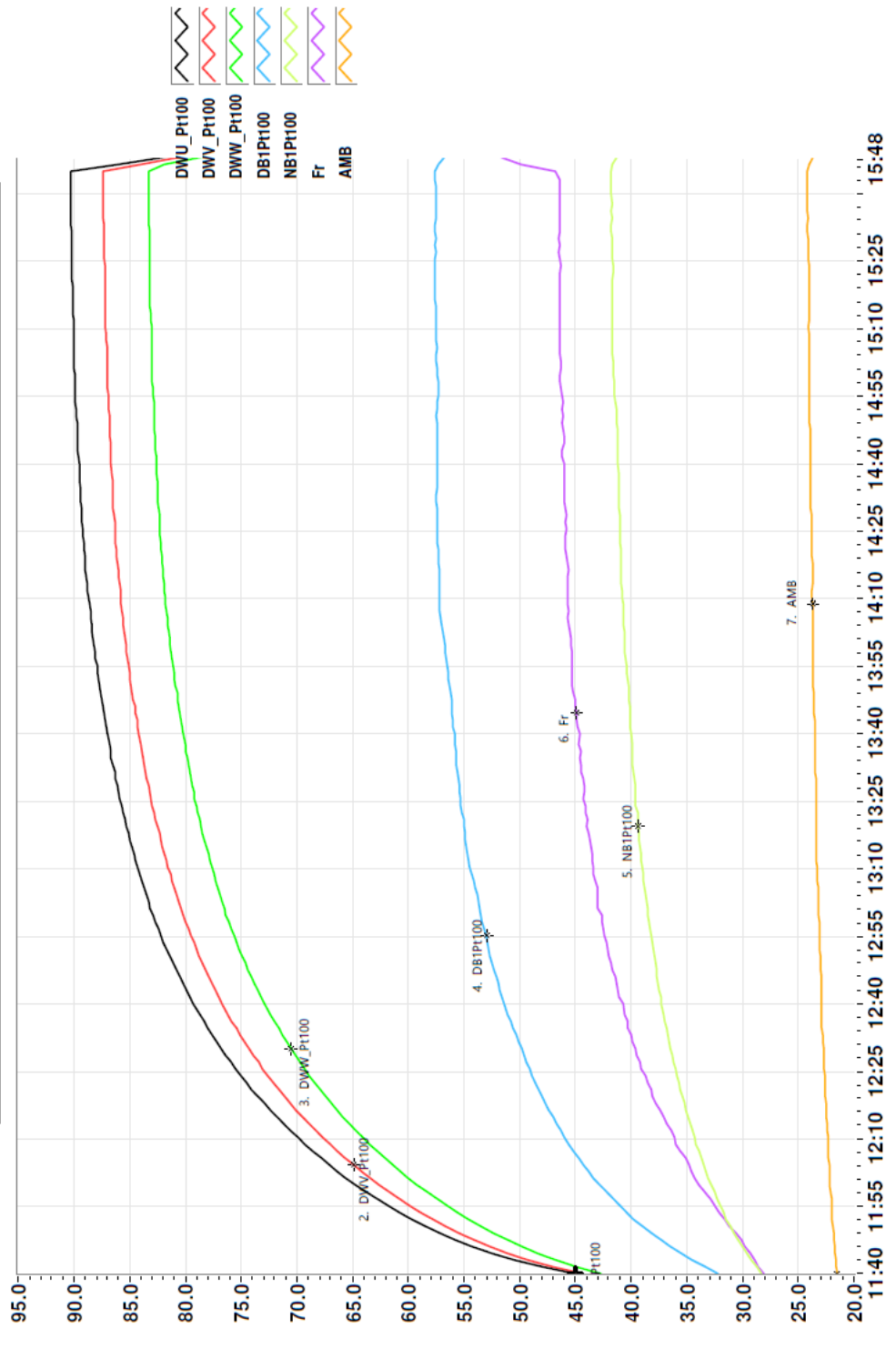
ABB Motors			3-Phase Induction Motor				Calculations			
Calculated Values			Nr. 3G1F2006653911		Ver: E					
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>						Work Nr. <b>1786000-1</b>				
Power <b>22.47 kW</b>		Duty <b>S1</b>			Speed <b>2985.3 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>			
Voltage <b>400 V</b>		Connection <b>D</b>			Torque <b>71.9 Nm</b>		Ambient <b>40</b>			
Current <b>42.07 A</b>		Frequency <b>50.0 Hz</b>		Direction 		IP <b>55</b>		Insul. Class <b>F</b> Temp. Class <b>B</b>		
Approved by:				Tested as <b>Motor</b>			Rotor Bar Material <b>Al</b>			
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency				
$I_0$	18.65 A		$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - PC_{Cu}}{P_{0N}}$	<sup>1.0</sup> IEC Tested		<sup>1.0</sup> IEC Calculated		<sup>1.0</sup>
$\cos\phi_0$	0.0754		1.10	1.159	1.044	$U_1$	400.4 V	400.4 V		
$P_0$	973.9 W		1.00	1.000	0.948	$I_1$	42.07 A	42.07 A		
$Z_0$	12.383 $\Omega$		0.95	0.938	0.909	$I_2$	0.0 A	0.0 A		
$n_0$	2998.0 rpm		0.90	0.876	0.879	$P_{fw}$	548.3 W	548.3 W		
$I_k$	364.7 A		0.80	0.766	0.833	$P_{Fe}$	362.9 W	362.9 W		
$\cos\phi_k$	0.3283		0.60	0.562	0.731	$P_s$	270.9 W	271.6 W		
$Z_k$	0.5510 $\Omega$		0.50	0.472	0.678	$P_r$	109.7 W	110.0 W		
$R_k$	0.2025 $\Omega$		0.40	0.384	0.640	$P_L$	95.7 W	95.7 W		
$X_k$	0.5125 $\Omega$		0.30	0.322	0.611	$P_T$	1387.6 W	1388.6 W		
$P_k$	917.2 W		0.20	0.315	0.580	$P_{out}$	22.47 kW	22.47 kW		
$R_{1v}$ (20°C)	42.22 m $\Omega$					$P_{in}$	23.86 kW	23.86 kW		
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$					$\eta$	94.18 %	94.18 %		
						$\cos\phi$	0.818	0.818		
$\Delta$			$Y$			$s$	0.472 %	0.474 %		
						$n$	2985.33 rpm	2985.29 rpm		
						$\Delta\theta_{Cu10}$				
						$\Delta\theta_{Cu1}$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta_R$				
<b>Short-Circuit Test</b>						$\Delta\theta_F$				
$I/I_N$	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	$\Delta\theta$				
$I_k/I_k$	0.8123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	$U_{amb}$				

PRINTED FROM P:\W-7251551




Type M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001  
Motor Nr 3G1F2006653911 Ver: E  
Power 45.00kW  
Calc. No 3GZF021022-1011 Work No 1786000-1 Date 06/04/2020  
Voltage 400V Frequency 50.0Hz Duty type S1

### Temperature Chart



## Liite 6. Optimoidun prototyypin testitulokset.

ABB Motors		3-Phase Induction Motor			Calculations	
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>		Work Nr. <b>1786000-1</b>				
Power <b>45.02 kW</b>	Duty <b>S1</b>	Speed <b>2972.9 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>		
Voltage <b>400 V</b>	Connection <b>D</b>	Torque <b>144.6 Nm</b>		Ambient <b>40</b>		
Current <b>78.77 A</b>	Frequency <b>50.0 Hz</b>	Direction 	IP <b>55</b>	Insul. Class <b>F</b>	Temp. Class <b>B</b>	
Approved by:		Tested as <b>Motor</b>		Rotor Bar Material <b>Al</b>		
Motor Parameters		No-Load Test			Efficiency	
$I_0$	21.13 A	$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - PCu}{P_{0N}}$	<sup>1.0</sup> IEC Tested	<sup>1.0</sup> IEC Calculated
$\cos\phi_0$	0.0755	1.10	1.216	1.101	$U_1$ 400.7 V	400.7 V
$P_0$	1104 W	1.00	1.000	0.948	$I_1$ 78.77 A	78.77 A
$Z_0$	10.931 $\Omega$	0.95	0.926	0.889	$I_2$ 0.0 A	0.0 A
$n_0$	2998.0 rpm	0.90	0.860	0.836	$P_{fw}$ 450.3 W	450.1 W
$I_k$	448.9 A	0.80	0.739	0.750	$P_{Fe}$ 569.4 W	569.4 W
$\cos\phi_k$	0.3601	0.60	0.530	0.624	$P_s$ 768.4 W	777.0 W
$Z_k$	0.5145 $\Omega$	0.50	0.441	0.563	$P_r$ 467.3 W	472.5 W
$R_k$	0.1853 $\Omega$	0.40	0.350	0.508	$P_L$ 290.0 W	290.0 W
$X_k$	0.4800 $\Omega$	0.30	0.284	0.472	$P_T$ 2545.5 W	2559.1 W
$P_k$	3280 W	0.20	0.253	0.427	$P_{out}$ 45.02 kW	45.02 kW
$R_{1v}$ (20°C)	33.58 m $\Omega$				$P_{in}$ 47.56 kW	47.58 kW
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$				$\eta$ 94.65 %	94.62 %
					$\cos\phi$ 0.870	0.871
	$\Delta$	$Y$	$.56U_n$		$s$ 1.011 %	1.022 %
$T_N$	144.6 Nm	144.6 Nm	144.6 Nm		$n$ 2973.29 rpm	2972.95 rpm
$T_L/T_N$	3.16	0.00	0.91	Temperature Rises		
$T_u/T_N$	2.82	0.00	0.81	$\Delta\theta_{Cu10}$ 57.1 K	57.1 K	
$T_B/T_N$	3.71	0.00	1.07	$\Delta\theta_{Cu1}$ 56.3 K	56.3 K	
$I_a$	590.0 A	0.0 A	A	$\Delta\theta_{DW}$ 63.2 K	0.0 K	
$I_w/I_N$	7.67	0.00		$\Delta\theta$ 0.0 K	0.0 K	
$I_w/I_k$	1.31	0.00		$\Delta\theta_R$ 66.9 K	0.0 K	
Short-Circuit Test				$\Delta\theta_F$ 26.4 K	0.0 K	
$V/I_N$	1.50	1.00	0.80	0.50	0.00	0.00
$k'/I_k$	1.0944	1.0000	0.9437	0.8120	0.0000	0.0000
				$U_{amb}$ 21.6 °C	0.0 °C	


Accepted -

Test Place TP2

MotLab 12.1 Build 0 Printed: 17/04/2020

C 2

Load  
0.75

ABB Motors			3-Phase Induction Motor				Calculations			
Calculated Values			Nr. 3G1F2006653911		Ver. F					
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>						Work Nr. <b>1786000-1</b>				
Power <b>33.81 kW</b>		Duty <b>S1</b>			Speed <b>2983.3 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>			
Voltage <b>400 V</b>		Connection <b>D</b>			Torque <b>108.2 Nm</b>		Ambient <b>40</b>			
Current <b>60.63 A</b>		Frequency <b>50.0 Hz</b>		Direction  IP <b>55</b>		Insul. Class <b>F</b> Temp. Class <b>B</b>				
Approved by:				Tested as <b>Motor</b>		Rotor Bar Material <b>Al</b>				
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency				
$I_0$	21.13 A		$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - PC_{U_0}}{P_{0N}}$	<sup>1.0</sup> IEC Tested		<sup>1.0</sup> IEC Calculated		<sup>1.0</sup>
$\cos\phi_0$	0.0755		1.10	1.216	1.101	$U_1$	400.3 V	400.3 V		
$P_0$	1104 W		1.00	1.000	0.948	$I_1$	60.63 A	60.63 A		
$Z_0$	10.931 $\Omega$		0.95	0.926	0.889	$I_2$	0.0 A	0.0 A		
$n_0$	2998.0 rpm		0.90	0.860	0.836	$P_{fw}$	453.6 W	453.5 W		
$I_k$	421.7 A		0.80	0.739	0.750	$P_{Fe}$	572.0 W	572.0 W		
$\cos\phi_k$	0.3418		0.60	0.530	0.624	$P_s$	447.3 W	452.3 W		
$Z_k$	0.5145 $\Omega$		0.50	0.441	0.563	$P_r$	250.0 W	252.8 W		
$R_k$	0.1853 $\Omega$		0.40	0.350	0.508	$P_L$	162.8 W	162.8 W		
$X_k$	0.4800 $\Omega$		0.30	0.284	0.472	$P_T$	1885.7 W	1893.4 W		
$P_k$	2066 W		0.20	0.253	0.427	$P_{out}$	33.81 kW	33.81 kW		
$R_{1v}$ (20°C)	33.58 m $\Omega$					$P_{in}$	35.69 kW	35.70 kW		
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$					$\eta$	94.72 %	94.70 %		
						$\cos\phi$	0.849	0.849		
	$\Delta$	$Y$			.56Un	$s$	0.721 %	0.729 %		
						$n$	2983.51 rpm	2983.26 rpm		
						$\Delta\theta_{Cu10}$				
						$\Delta\theta_{Cu1}$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta$				
						$\Delta\theta_R$				
Short-Circuit Test						$\Delta\theta_F$				
$I/I_N$	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	$\Delta\theta$				
$I_k/I_k$	0.9394	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	$U_{amb}$				

Accepted -


Test Place TP2

MotLab 12.1 Build 0

Printed: 17/04/2020

C 3

Load  
0.50

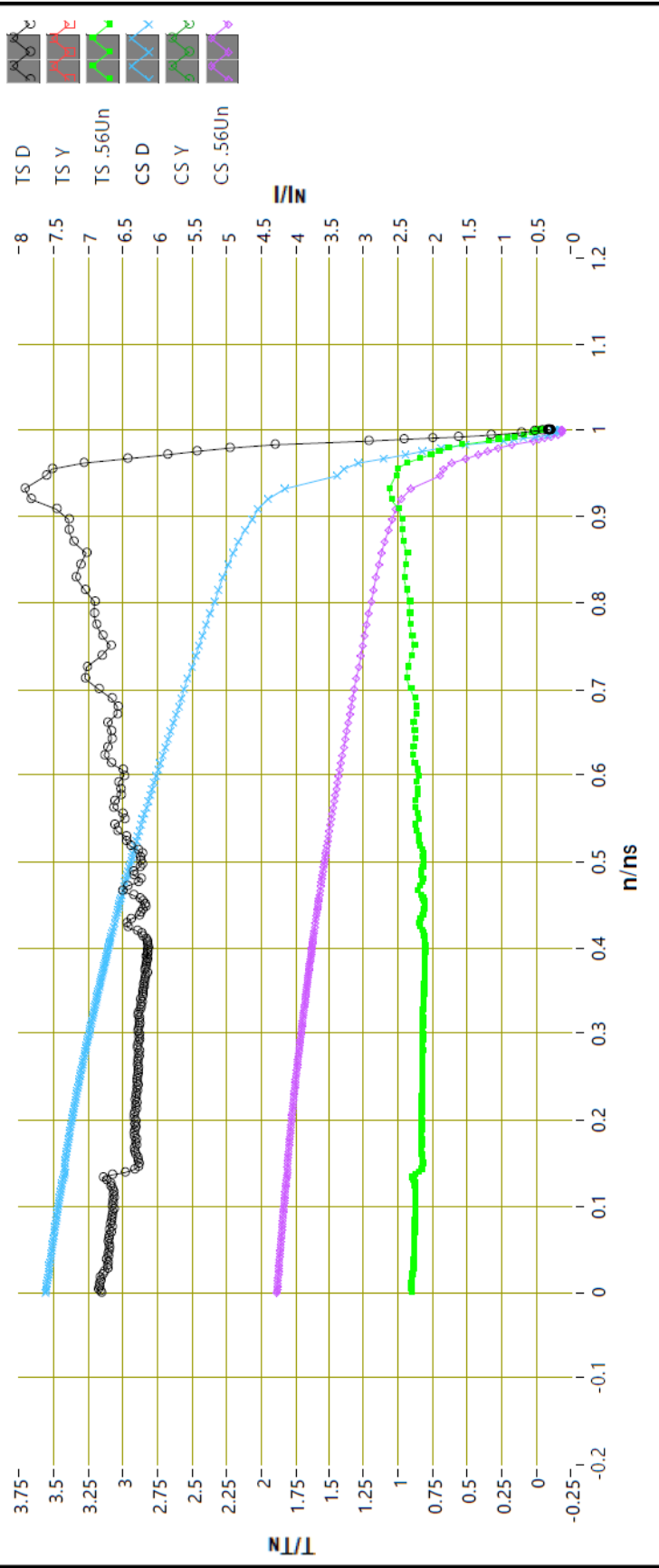
ABB Motors			3-Phase Induction Motor				Calculations		
Calculated Values			Nr. 3G1F2006653911			Ver: F			
Type <b>M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001</b>						Work Nr. <b>1786000-1</b>			
Power <b>22.62 kW</b>		Duty <b>S1</b>		Speed <b>2990.1 rpm</b>		Calculation Nr. <b>3GZF021022-1011</b>			
Voltage <b>400 V</b>		Connection <b>D</b>		Torque <b>72.2 Nm</b>		Ambient <b>40</b>			
Current <b>43.89 A</b>		Frequency <b>50.0 Hz</b>		Direction  IP <b>55</b>		Insul. Class <b>F</b> Temp. Class <b>B</b>			
Approved by:				Tested as <b>Motor</b>		Rotor Bar Material <b>Al</b>			
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency			
$I_0$	21.13 A		$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - P_{Cu}}{P_{0N}}$	$\overset{1.0}{IEC}$ Tested		$\overset{1.0}{IEC}$ Calculated	
$\cos\phi_0$	0.0755		1.10	1.216	1.101	$U_1$	400.2 V	400.2 V	
$P_0$	1104 W		1.00	1.000	0.948	$I_1$	43.89 A	43.89 A	
$Z_0$	10.931 $\Omega$		0.95	0.926	0.889	$I_2$	0.0 A	0.0 A	
$n_0$	2998.0 rpm		0.90	0.860	0.836	$P_{fw}$	456.4 W	456.4 W	
$I_k$	364.5 A		0.80	0.739	0.750	$P_{Fe}$	576.0 W	576.0 W	
$\cos\phi_k$	0.3045		0.60	0.530	0.624	$P_s$	232.6 W	235.2 W	
$Z_k$	0.5477 $\Omega$		0.50	0.441	0.563	$P_r$	109.2 W	110.4 W	
$R_k$	0.1872 $\Omega$		0.40	0.350	0.508	$P_L$	72.6 W	72.6 W	
$X_k$	0.5147 $\Omega$		0.30	0.284	0.472	$P_T$	1446.9 W	1450.6 W	
$P_k$	856.9 W		0.20	0.253	0.427	$P_{out}$	22.62 kW	22.62 kW	
$R_{1v}$ (20°C)	33.58 m $\Omega$					$P_{in}$	24.07 kW	24.07 kW	
$R_{2v}$ (20°C)	0.00 m $\Omega$					$\eta$	93.99 %	93.97 %	
						$\cos\phi$	0.791	0.791	
	$\Delta$	$Y$			.56U <sub>n</sub>	$s$	0.469 %	0.475 %	
						$n$	2990.21 rpm	2990.05 rpm	
						$\Delta\theta_{Cu10}$			
						$\Delta\theta_{Cu1}$			
						$\Delta\theta$			
						$\Delta\theta$			
						$\Delta\theta_R$			
Short-Circuit Test						$\Delta\theta_F$			
$I/I_N$	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	$\Delta\theta$			
$I_k/I_k$	0.8120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	$U_{amb}$			

PRINTED FROM P1W-7251551

Torque-Speed Curve			▲ Cold Motor			Starting Performance Test						Measured by HaRa		Date 16/04/2020							
Date 16/04/2020			Measured by <b>HaRa</b>			Connection		ΣU/3, V		COSφ		ΣI/3, A		TL, Nm		PL, kW		IA/IN		TL/TN	
Δ	Umeas.avg., V	Ucorrect., V	TL/TN	TU/TN	TB/TN	Δ	Cold	225.2	0.434	332.2	123.6	56.2						7.67	2.94		
Y						Y	Hot														
.56Un	221.8	400.0	3.16	2.82	3.71		Cold														
	221.8	224.0	0.91	0.81	1.07		Hot														

IN = 76.900 TN = 144.65

Torque-Speed Curve / Current-Speed Curve



Test Place TP2  
 Mollab 12.1 Build 0 Printed: 17/04/2020 PAGE G 1  
 Nr. 3G1F2006653911  
 (Temperature at stoppage)  
 Crop Beginning End  
 08:56 13:39

Type M3BP 225SMA 2 IMB3/IM1001  
 Motor Nr 3G1F2006653911 Ver: F  
 Calc. No 3GZF021022-1011 Work No 1786000-1 Date 17/04/2020  
 Power 45.00KW Voltage 400V Frequency 50.0HZ Duty type S1

### Temperature Chart

