

Sami Koistinen

Sähkökäyttöisen Formula SAE -kilpa-auton moottoreiden suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

19.12.2013

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Sami Koistinen Sähkökäyttöisen Formula SAE -kilpa-auton moottoreiden suunnittelu ja valmistus 48 sivua + 1 liite 19.12.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja Kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Vesa Linja-aho, Metropolia-amk
<p>Metropolia Ammattikorkeakoulun Metropolia Motorsport Formula SAE -tiimi siirtyi FSAE Electric -sarjaan kilpailukauden 2011 jälkeen päättäen kymmenvuotisen uransa polttomoottorisarjassa. Tässä insinööriytyössä suunnitellaan ja valmistetaan tiimin ensimmäisen sähkökäyttöisen HPF013e-kilpa-auton moottorit. Raportti keskittyy moottoreiden mekaanisen rakenteen esittelyyn sekä valmistusteknisten ratkaisuiden esille tuomiseen.</p> <p>Moottoreiden suunnittelu suoritettiin ABB Oy:n ja Metropolia Motorsport ry:n välisenä yhteistyönä vuonna 2012. Sähköinen mitoitus tehtiin ABB:n toimesta ja mekaaninen suunnittelu oli tiimin vastuulla. Mekaanisessa suunnittelussa ja mitoituksessa käytettiin DSS CATIA -3D-mallinnusohjelmistoa. Tämän lisäksi työssä sovellettiin analyyttisiä laskentamenetelmiä. Merkittävään osaan moottoreiden toteutuksessa käytetyistä ratkaisuista ideoiden ja tiedon lähde on ollut sarjan kilpailutapahtumat.</p> <p>Suunnitelmien valmistuttua moottoreita valmistettiin yhteensä kolme kappaletta, joista ensimmäinen oli testikäyttöön tarkoitettu prototyyppi. Lopullisiin moottoreihin tehtäisiin suorituskykyä parantavia muutoksia testimoottorin perusteella, mutta kiireellisen aikataulun takia testausta ei suoritettu täydessä laajuudessa. Lopulliseen moottoriin tehtiin ainoastaan pieniä muutoksia.</p> <p>Lyhyeksi jääneellä testikaudella autoa vaivanneita tekniikkaongelmia ei saatu riittävän ajoissa korjattua, minkä vuoksi kilpailumenestys jäi heikoksi. Siitä huolimatta autoon valmistetut moottorit toimivat pääasiassa täydellisesti, vaikka täyttä potentiaalia ei koskaan saatu käyttöön ongelmien vuoksi.</p>	
Avainsanat	Formula SAE Electric, sähkömoottori, sähkömoottorin suunnittelu, sähkömoottorin valmistus

Author(s) Title	Sami Koistinen Designing and Manufacturing Electric Motors for Formula SAE Racecar
Number of Pages Date	48 pages + 1 appendix 19 December 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer, Metropolia UAS
<p>Helsinki Metropolia University of Applied Sciences Formula SAE team changed over to FSAE Electric series after the competition season 2011 ending the ten year career in the combustion series. In this graduate project motors for the teams' first electric racecar HPF013e are designed and manufactured. This thesis concentrates on showing the mechanical construction of the motors and bringing up the manufacturing solutions.</p> <p>Designing of the motors was carried out in cooperation with ABB Oy and Metropolia Motorsport ry in 2012. Electrical sizing was made by ABB and mechanical design by the team. In the mechanical design and sizing DSS CATIA 3D design software was utilized. Analytical calculation methods were also applied in the work. Source of ideas and information has been the series' competition events for the solutions applied in the implementations of the motors in significant proportion.</p> <p>After finishing the designs three motors were manufactured in total, from which the first one was a prototype intended for testing. Changes to improve performance would have been made based on the test results of the prototype but because of lack of time the tests were not carried out in full scale. Only minor changes were made to the final motor.</p> <p>During the short test season technical problems troubling the car could not be solved early enough, and therefore competition success was poor. In spite of that the motors manufactured for the car worked mostly perfectly even though full potential could not be gained because of the problems.</p>	
Keywords	Formula SAE Electric, electric motor, designing electric motor, manufacturing electric motor

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suunnittelu	2
2.1	Sähköinen mitoitus	3
2.1.1	Moottorin tyyppi	3
2.1.2	Lähtöarvot ja rajoitteet	3
2.1.3	Mitoituksen tulos	7
2.2	Mekaaninen suunnittelu	8
2.2.1	Akseli ja laakerointi	8
2.2.2	Roottori	9
2.2.3	Staattori ja käämitys	17
2.2.4	Runko	18
2.2.5	Nopeuden ja asennon takaisinkytkentä	21
2.2.6	Kytkentärasia	23
2.3	Jäähdytys	24
3	Valmistus ja kokoonpano	26
3.1	Moottorin akseli	26
3.2	Laminaatit	28
3.3	Tasapainotus	30
3.4	Staattori	32
3.5	Runko	34
4	Mittaukset	39
4.1	Staattiset mittaukset	39
4.2	Dynaamiset mittaukset	41
5	Yhteenveto ja jatkokehitys	43
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Moottorin lasketut tiedot	

Lyhenteet

SAE	Society of Automotive Engineers, yhdysvaltalainen autoalan standardisoimisjärjestö.
FSAE	Formula SAE, Korkeakoulujen välinen suunnittelukilpailu.
FS	Formula Student, Englannissa järjestettävä FSAE-kilpailu.
FSE	Formula Student Electric, Sähkökäyttöisten FSAE-kilpa-autojen sarja.
FSG	Formula Student Germany, Saksassa järjestettävä FSAE-kilpailu.
FSH	Formula Student Hungary, Unkarissa järjestettävä FSAE-kilpailu.
FSA	Formula Student Austria, Itävallassa järjestettävä FSAE-kilpailu.
POM	Polyoksimeteeni, muovi.
PTFE	Polytetrafluorieteeni, muovi.
NTC	Negative Temperature Coefficient, Negatiivinen lämpötilakerroin.
FEA	Finite Element Analysis, Äärellinen elementtianalyysi.
FEMM	Finite Element Method Magnetics, Magneettisten ongelmien ratkaisuun suunnattu äärellinen elementtimenetelmäohjelmisto.

1 Johdanto

Formula SAE on kansainvälinen korkeakoulujen välinen suunnittelukilpailu, jossa opiskelijavetoinen ryhmä suunnittelee ja valmistaa pienikokoisen, formula-tyyppisen kilpa-auton. Sarja syntyi Yhdysvalloissa 1970-luvun lopulla nimellä SAE Mini Indy, josta se kehittyi Formula SAE -sarjaksi.

Eurooppaan kilpasarja rantautui 2000-luvun vaihteessa Englantiin ja myöhemmin Saksaan. Tänä päivänä tapahtumia järjestetään vuosittain lähes maailmanlaajuisesti. Euroopassa suurimmat tapahtumat ovat Formula Student Englannissa sekä Formula Student Germany Saksassa. Edellä mainituissa osallistujamäärä on suuruusluokassa 100 tiimiä vuosittain.

Ensimmäinen FSE-kilpailu pidettiin FSG:n yhteydessä 2010. Ensimmäisen vuoden jälkeen sähkösarjan kilpailuja on järjestetty Englannin lisäksi pienempien kilpailuiden yhteydessä ympäri Eurooppaa sekä Yhdysvalloissa.

Kilpailut jakautuvat staattisiin ja dynaamisiin osioihin. Staattisissa osioissa tekniikan aloilta kerätty tuomariryhmä arvioi auton suunnittelussa ja toteutuksessa käytettyjä ratkaisuja. Dynaamisissa osioissa mitataan auton suorituskykyä kelloa vastaan erilaisilla kokeilla.

Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia perusti oman Formula SAE -tiimin vuonna 2002, joka toimii nykyisin Metropolia Ammattikorkeakoulun yhteydessä nimellä Metropolia Motorsport ry. Tiimi on perustamisvuodesta alkaen suunnitellut, rakentanut ja testannut lähes vuosittain Formula SAE -tyyppisiä kilpa-autoja, joilla on osallistuttu pääasiassa Euroopassa järjestettäviin kilpailuihin. Vuoden 2011 lopussa tiimi päätti uran polttomoottorisarjassa ja aloitti ensimmäisen sähkökäyttöisen kilpa-auton suunnittelemisen.

FSE-sarjaan siirtymisen myötä tiimi pyrki löytämään asiantuntevia yrityksiä tukemaan sähköistetyn voimalinjan toteutusta. Näistä ABB oli kiinnostunut avustamaan tiimiä voimanlähteen, sähkömoottorin suunnittelussa ja tarjosi käyttämiään materiaaleja valmistukseen.

Tässä insinööriyössä käydään läpi HPF013e-kilpa-autossa käytettyjen sähkömoottoreiden suunnittelun, valmistuksen sekä testaamisen vaiheet. Suunnittelutyö tapahtui Metropolia Motorsport ry:n sekä ABB:n Pitäjänmäen toimipisteen tuotekehitysyksikön välisenä yhteistyönä. Moottoreiden sähköinen mitoitus suoritettiin ABB:n toimesta yhdistyksen toiveiden mukaisesti, ja mekaaninen suunnittelu, valmistus, kokoonpano sekä testaaminen yhdistyksen toimesta.

Prosessi alkoi keväällä 2012 ja usean yhteistyöpalaverin sekä kymmenen kuukauden työpanoksen tuloksena voimalinjaan saatiin mitoitettua ominaisuuksiltaan käyttökohteeseen soveltuva moottori. Tässä vaiheessa ei toisaalta pystytty sanomaan, onko mitoitus onnistunut ja toisaalta saadaanko moottori mekaanisesti mahdolliseksi toteuttaa tiukan aikataulun puitteissa puhumattakaan siitä, kestäisikö se kilpa-autokäytössä. Hankkeen puoltavina tekijöinä pidettiin merkittävää rahallista säästöä, jonka lisäksi se sopii sarjan luonteeseen ja tarkoitukseen hyvin.

Suoritusarvojen todentamiseksi moottorista valmistettiin prototyyppi, mutta sitä pystyttiin aikataulun ja käytettävissä olevan laitteiston puitteissa testaamaan ainoastaan rajoitetulla akseliteholla. Autossa käytettyyn lopulliseen malliin tehtiin tämän vuoksi vain pieniä muutoksia. Nämä muutokset mainitaan suunnittelua ja valmistusta käsittelevien kappaleiden yhteydessä niiltä osin, kun asialla on merkitystä.

2 Suunnittelu

Työ alkoi huhtikuussa 2012 ja päättyi helmikuussa 2013, jolloin moottoreiden osavalmistus alkoi. Kymmenen kuukauden aikana moottorin mitoitus muuttui muutamaankin otteeseen, mutta peruskonsepti pysyi samana. Mitoitus määrittää suorituskyvyn lisäksi aktiivisten osien ulkomitat, käytännössä staattorin ulkohalkaisijan sekä paketin pituuden. Tästä syystä mekaaninen suunnittelu aloitettiin vasta, kun mitoitus oli täysin valmis.

Alkuvaiheessa päätettiin, että voimalinjaan sisällytetään kaksi erikseen käytettävää moottoria. Harkinnan alla oli myös suoraveto yhdellä tai kahdella moottorilla, mutta nämä hylättiin suureksi arvioidun massan vuoksi. Suoravedolla olisi saattanut olla myös huomattava vaikutus auton pitkäikäisyyteen painojakaumaan.

2.1 Sähköinen mitoitus

Moottorin mitoituksessa on lukematon määrä muuttujia, joista osa lukittiin ja osa määräytyi ulkoisten tekijöiden pohjalta. Muuttujien lukitseminen nopeutti koko prosessia. Lukittuja muuttujia olivat muun muassa moottorin tyyppi, linjajännite sekä aktiivinen massa.

2.1.1 Moottorin tyyppi

Tyypiksi valittiin kestmagnetoitu tahtimoottori uppomagneeteilla. Moottoriin valittiin napaluvuksi neljä ja kaksikerroksinen kokourakäämitys yhden uran lyhennetyllä vyyhdytyksellä. Tällä rakenteella vastajännitteen aaltomuoto saadaan hyvin puhtaaksi harmonisesta säröstä. Vyyhdin lyhentäminen pienentää käämityksen massaa ja resistanssia, mutta heikentää vääntömomenttia hieman. Upporakenteinen roottori suojaa magneetteja mekaaniselta vauriolta, jonka lisäksi erillistä tukipantaa ei tarvita. Kääntöpuolena osa magneetin vuosta hukkuu napaa tukevien siltojen saturoimiseen heikentäen suorituskykyä.[1; 2] Jäähdytystavaksi valittiin nestekiertojäähdytys erillisellä lämmönvaihtimella. Jäähdytysneste kiertää moottorin rungon vesitakissa staattorin ulkopinnan lähellä sähköpumpun voimalla.

2.1.2 Lähtöarvot ja rajoitteet

Mitoituksen lähtöarvoina käytettiin viimeisen polttomoottoriauton tiedonkeruusta saatua dataa eri kilpailuissa. Analysoimalla dataa pyrittiin määrittämään moottorin nimellinen nopeus sekä vaadittu momentti ja teho.

Akkupaketin kennotyyppi ja kytkentä oli tässä vaiheessa lukittu varasuunnitelmaa ajatellen. Mitoituksessa käytettiin akkupaketin nimellistä jännitettä, joka on 310 volttia. Tehollinen syöttöjännite lasketaan kaavalla

$$u_{\text{RMS}} = \frac{310}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 219 \text{ V}. \quad (1)$$

Moottoreiden massa pyrittiin pitämään kohtuudessa asettamalla ylärajat aktiivisten osien mitoille. Näistä massan ylärajaksi määrättiin 10 kg. Staattorin ulkomitta rajautui

mootoreille käytettävissä olevan tilan mukaan 200 mm:n ja paketin pituus laskettiin näistä kaavalla (3).

$$m = \rho * V = \rho * l * \pi * \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \quad (2)$$

Ratkaistaan l

$$l = \frac{m}{\rho * \pi * \left(\frac{D_s}{2}\right)^2} \quad (3)$$

l on paketin pituus,

D_s on staattorin halkaisija,

$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, teräksen tiheys ja

m on massa (kg).

Laskemalla pituudeksi saatiin noin 41 mm. Täytyy huomioida, että edellä mainittu aktiivinen massa ajatellaan ainoastaan paketille, johon on asennettu magneetit sekä jonka urat ovat täytetty johdemateriaalilla. Vyyhdin päiden aiheuttama massa ei kuulu tähän massaan ja sitä on käämityksen rakenteesta johtuen vaikea arvioida etukäteen.

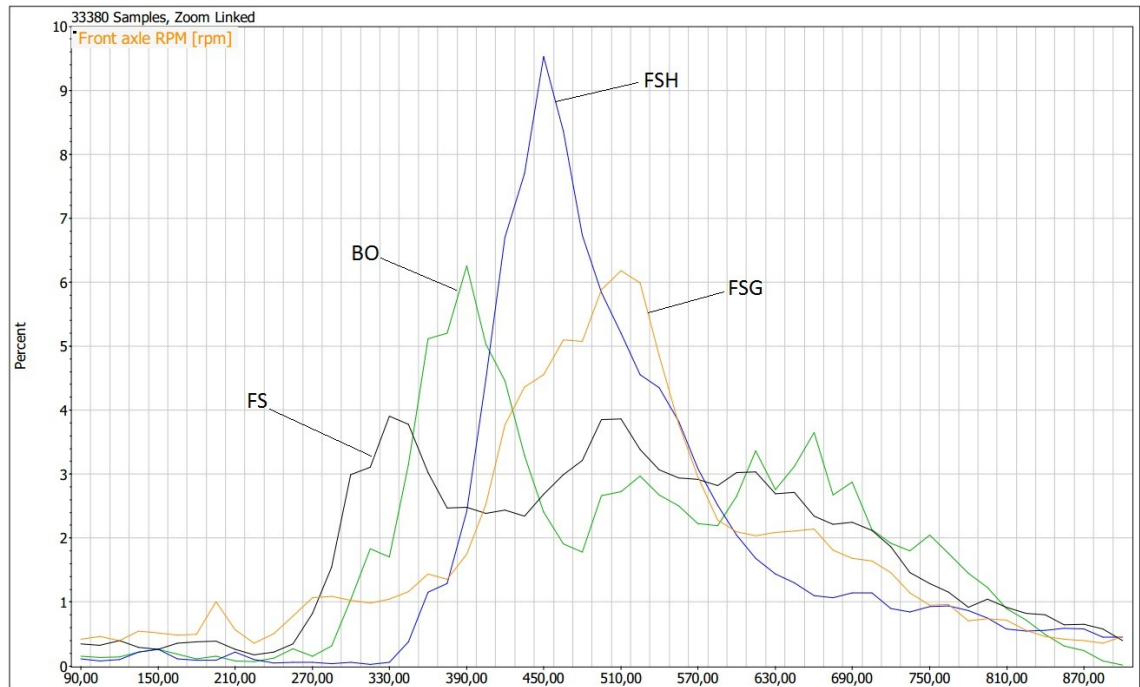
Datassa tarkasteltavat suureet olivat ajonopeus ja positiivinen pitkittäiskiihtyvyys. Ajonopeudesta laskettiin pyörän pyörintänopeus kaavalla 4. Pyörän nopeuksista tehtiin datan analysointiohjelmalla Motec i2 pro viivakuvaaja, joka esitetään kuvassa 1.

$$n = \frac{\frac{v}{\frac{3600 \text{ s}}{1000 \text{ m}}}}{2\pi r_d} * 60 \text{ s} \quad (4)$$

n on pyörän nopeus (1/60 s),

v on ajonopeus (km/h) ja

$r_d = 0,26 \text{ m}$, renkaan dynaaminen vierinsäde.



Kuva 1. Vuoden 2011 endurance-osion etuakselin pyörintänopeudet. Kuvaajan vaaka-akselilla on pyörintänopeus ja pystyakselilla nopeutta vastaava prosenttiosuus. Englannin (FS) kilpailussa nopeus ei painottunut yhtä voimakkaasti mahdollisesti määrän ajokelin vuoksi. Radan suurin sallittu keski- ja huippunopeus on määritelty sarjan säännöissä [3, s. 149], minkä vuoksi nopeuskäyrät ovat hyvin samankaltaisia.

Kuvaajan perusteella moottorin nimellinen nopeus lukittiin alueelle 450–500 RPM, joka on ajonopeutena 43-48 km/h. Alue on kaikissa vuoden 2011 kilpailuissa varsin aktiivinen pois lukien Baltic Open. Täytyy tosin huomioida, että Baltic Open ei ole virallinen kilpailu. Moottorin akselin nopeus riippuu saavutettavasta momentista sekä välityssuhteesta.

Vaadittavan tehon ja momentin arvioiminen oli hankalampaa, sillä auton redusoitu massa ei ollut vielä tiedossa. Arvioinnissa päätettiin käyttää viimeisen polttomoottoriauton redusoitua massaa. Massassa ei huomioida moottorin ja voimansiirron massoja, sillä ne riippuvat käytettävästä vaihteesta. Massan sekä tiedonkeruuseen tallennetun kiihtyvyyssanturin datan avulla lasketaan auton taka-akselilla vaikuttava momentti ja teho. Kiihtyvyyden perusteella lasketuissa arvoissa ei oteta huomioon muun muassa ajovastuksiin, voimansiirron hyötysuhteeseen ja pyörän luistoon kuluva tehoa, joten tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Lasketaan auton redusoitu massa m_r kaavalla

$$m_r = m_a + m_k + 4 * \frac{J_p}{r_d^2} \quad (5)$$

$m_a = 200$ kg, auton massa,

$m_k = 80$ kg, kuljettajan massa ajovarusteineen ja

$J_p \approx 0,315$ kg * m², 3D-mallista saatu pyörän hitausmomentti.

Kaavalla 5 redusoiduksi massaksi laskettiin $m_r \approx 298,6$ kg. Voiman laskukaava

$$F = ma$$

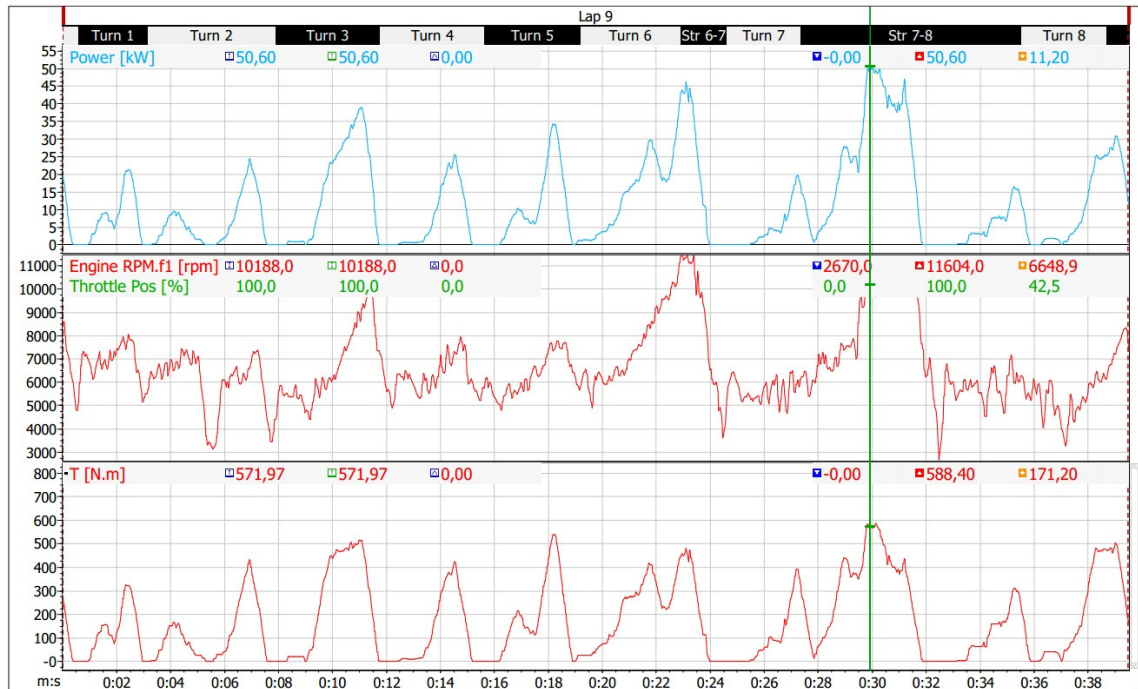
Sijoitetaan momentin laskukaavaan. Käytetään arvoja m_r ja r_d

$$M = Fr = m_r a r_d. \quad (6)$$

Kaavalla 6 laskettu momentti ja kaavalla 4 laskettu nopeus sijoitetaan tehon laskukaavaan. Nopeus muutetaan samalla kulmanopeudeksi

$$P = Mn = M \frac{n}{60_s} 2\pi. \quad (7)$$

Kaavalla 7 lasketusta tehosta, kaavalla 6 lasketusta väännöstä sekä polttomoottorin kierrosnopeudesta tehtiin analysointiohjelmalla yhden kierroksen mittainen kuvaaja, joka nähdään kuvassa 2.



Kuva 2. Laskennallinen teho ja vääntö ajan suhteen yhdeltä kierrokselta FSH endurance-osiossa. Keskimääräisen tehon ollessa 11,2 kW, huipputeho jää arvoon 50,6 kW (vihreä pystyviiva). Kierrosten väliset erot eivät olleet merkittäviä.

HPF011-auton moottorin dynamometrissa mitattu huipputeho oli noin 74 kW, ja laskennallinen arvo jää odotetusti tämän alle.

Edellä määritettyjä arvoja käytettiin pohjana varsinaisessa moottorin mitoituksessa. Moottorin nimelliseksi tehoksi asetettiin lopulta 8 kW ja tehon perusteeksi lämpötasapaino. Todellisuudessa pisin yhtäjaksoinen kuormitustila kestää endurance-osion verran, noin 23 minuuttia. Lämpötasapainon saavuttamiseen arveltiin kuluvan noin neljä tuntia, joten pisin mahdollinen kuormitustila on noin kahdeksasosa siitä. Maksimitehon tavoitteeksi asetettiin 25 kW.

2.1.3 Mitoituksen tulos

Prototyypimoottorin lasketut ominaisuudet löytyvät liitteestä 1. Liitteessä mainittu maksiminopeus on todellisuudessa 10 000 RPM ja nimellinen vääntömomentti 16,5 Nm. Staattorin ulkohalkaisijaksi tuli lopulta 193 mm sekä pakettin pituudeksi 45 mm. Kaavalla 2 laskettu massa oli edellä annetuilla arvoilla noin 10,2 kg. Nimellinen lämpötila asetettiin 120 °C arvoon.

2.2 Mekaaninen suunnittelu

Moottorin korkea käyttönopeus johti siihen, että yksiportaiset ketju- ja hihnavedot jouduttiin hylkäämään. Voimansiirto päätettiin toteuttaa kaksiportaisella suorahammasvälityksellä, jonka varma toiminta saavutetaan muun muassa akselien samansuuntaisuudella kuormituksessa. Tästä syystä mekaanisessa suunnittelussa keskeinen tekijä oli roottorin suuntaukseen vaikuttavien profiilien valmistuksen suunnittelu siten, että ne saadaan tehtyä samalla kiinnityksellä.

2.2.1 Akseli ja laakerointi

Akseli haluttiin pitää mahdollisimman lyhyenä taipumisen ja värähtelyn minimoimiseksi. Profiili suunniteltiin kahdella kiinnityksellä koneistettavaksi, jonka lisäksi aihion kiinnitysolake vaati yhden lisäkiinnityksen. Akselin ja roottorin välinen liitos toteutettiin kutitusliitoksella, jolloin akselin pintaan ei tarvinnut erillistä lukitus- tai kiinnitysprofiilia. Akselin takapäähän suunniteltiin sisäpuolinen olake nopeusanturin akselia varten. Ulostulopäähän päätettiin toteuttaa DIN 5480 -standardin mukainen hammasustus voimansiirron hammaspyörän kiinnitykseen. Materiaaliksi valittiin AISI H13 Premium -standardin mukainen Uddeholm Orvar Supreme, jonka käytöstä oli paljon aikaisempaa kokemusta. Käyttöön valittu nopeuden ja kulman tunnistin ei tuota reaktiomomenttia tai muita voimia tunnistimen roottoriin, joten akselin materiaaliksi valittiin Ruukki 6082 T6 -alumiini.

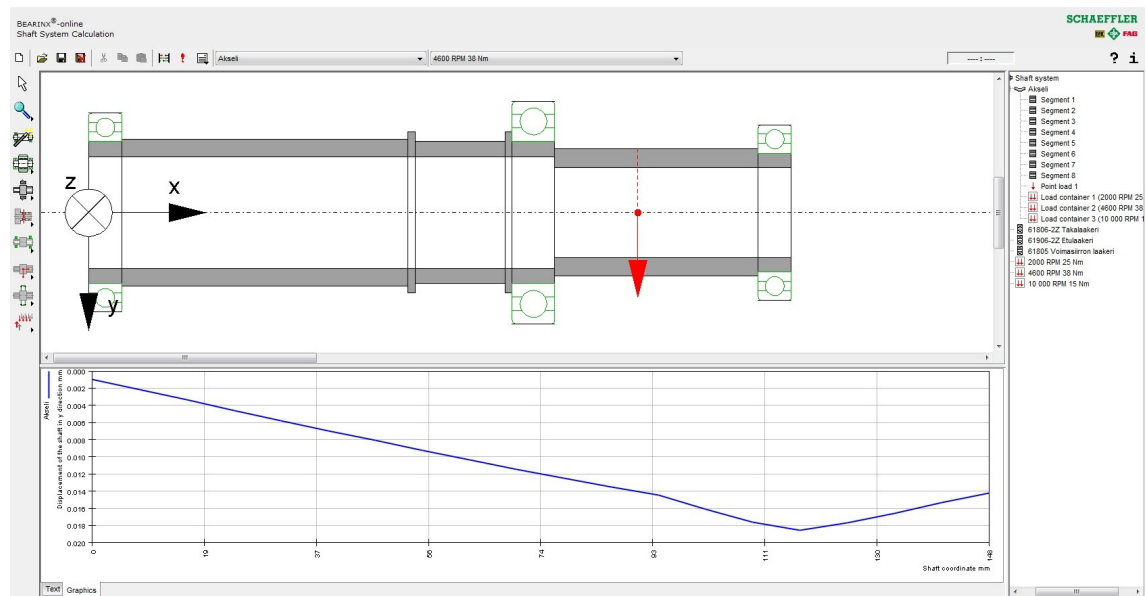
Laakerointi suunniteltiin Schaefflerin suunnitteluoppaan [4] ohjeistamana. Laakeroinnista haluttiin tehdä mahdollisimman yksinkertainen ja lyhyt. Moottorin tai voimansiirron toiminnasta ei periaatteessa synny aksiaalisia voimia, minkä vuoksi laakerointi päätettiin toteuttaa kokonaan urakuulalaakereilla. Esijännitys tuotettiin akselin takapäähän sijoitetulla aaltojousella. Valitun voimansiirtotavan toiminnan varmistamiseksi akselille päätettiin lisätä yksi tukilaakeri voimansiirron puolelle, joten kokonaisuudessa akselia tuetaan kolmesta pisteestä. Akselin taipuminen ja laakereiden käyttöikä tarkistettiin Schaefflerin Bearinx-ohjelmalla. Akselille valittiin seuraavat FAG:n laakerit

- Takalaakeri 61806 2Z
- Etulaakeri 61906 2Z
- Voimansiirron laakeri 61805.

Ohjelmassa moottorin laakereille asetettiin rasvavoitelu ja voimansiirron laakerille öljyvoitelu. Kuormitustiloja oli yhteensä kolme

- 2000 RPM 20 Nm, 25 % kokonaisajasta
- 4600 RPM 38 Nm, 50 % kokonaisajasta
- 10 000 RPM 15 Nm, 25 % kokonaisajasta.

Akselin ja laakeroinnin rakenne nähdään kuvassa 3.



Kuva 3. Kuvankaappaus Bearinx-ohjelmasta. Ylhäällä moottorin akseli laakereineen ja alapuolella akselin taipuma akselin x suhteen. Akselin suurin taipuma saavutetaan hammaspyörän kohdalla, jota punainen nuoli esittää. Suurin taipuma on noin 0,019 mm.

Vertailukohteeksi laakereiden mitoituksessa otettiin HPF011-auto, jolla ajettiin tiedonkeruusta saadun tiedon mukaan testi- ja kilpailukauden aikana yhteensä noin 25 tuntia. Mitoituksessa lyhin käyttöikä, 248 tuntia, saavutettiin voimansiirron laakerilla. Käyttöikä on lähes kymmenkertainen vertailukohteen ajoaikaan, joten laakerointia pidettiin onnistuneena.

2.2.2 Roottori

Akselin ja roottorin välinen kutistusliitos mitoitettiin DIN 7190 -standardin antamien ohjeiden mukaisesti [5, s. 342]. Mitoitus suoritettiin määrittämällä pienin mahdollinen pintapaine, jolla haluttu momentti saadaan välitettyä. Akseli on ontto ja laminaattipinoa

kevennetään, joten suurin sallittu pintapaine tarkistetaan myös. Määritetään ensin halkaisijasuurteet Q_A sekä Q_B , suhteellinen tehollinen ahdistus ξ sekä suurin sallittu jännitys akselille ja laminaattipinolle.

$$Q_A = \frac{D_F}{D_{Aa}}$$

$$Q_I = \frac{D_{Ii}}{D_F}$$

$$\xi = D_F * \left[\frac{1}{E_I} * \left(\frac{1+Q_I^2}{1-Q_A^2} - \nu_I \right) + \frac{1}{E_A} * \left(\frac{1+Q_A^2}{1-Q_I^2} + \nu_A \right) \right]$$

Laminaattipinon suurin sallittu puristusjännitys myötörajan suhteen lasketaan laminaattipinolle sekä akselille erikseen.

$$\sigma_{\text{permh}} = \frac{R_{eh}}{S_F}$$

$$\sigma_{\text{perms}} = \frac{R_{es}}{S_F}$$

Kuorman välitykseen vaadittava pintapaine ja suurin sallittu pintapaine myötörajan suhteen lasketaan laminaattipinolle sekä akselille erikseen.

$$p_{\text{min}} = \frac{\sqrt{F_a^2 + \frac{4M_i^2}{D_F^2}}}{\mu\pi D_F b} K_A$$

$$p_{\text{maxh}} = (1 - Q_A^2) * \frac{\sigma_{\text{permh}}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$p_{\text{maxs}} = (1 - Q_I^2) * \frac{\sigma_{\text{perms}}}{\sqrt{3}}$$

Kuorman välitykseen vaadittava ahdistus ja suurin sallittu ahdistus myötörajan suhteen lasketaan laminaattipinolle sekä akselille erikseen.

$$Z_{\text{min}} = p_{\text{min}} \xi \quad (10)$$

$$Z_{\text{max}} = p_{\text{max}} \xi \quad (11)$$

Toleranssia ei huomioida, sillä akselit sovitetaan roottoreihin tarvittaessa yksitellen.
Laskuissa käytetään arvoja

$D_F = 31$ mm, liitoksen päähalkaisija,

$D_{Aa} = 38$ mm, laminaattipinon halkaisija kevennyksen kohdalla,

$D_{li} = 23,5$ mm, akselin sisähalkaisija,

$E_I = E_A = 210000$ Mpa, kimmomoduuli,

$\nu_I = \nu_A = 0,3$ Poissonin suhde,

$R_{eh} = 325$ Mpa, laminaattimateriaalin myötöraja,

$R_{es} = 1280$ Mpa, akselimateriaalin myötöraja,

$S_F = 2$, varmuuskerroin myötörajalle,

$F_a = 0$ N, aksiaalinen kuormitus,

$M_t = 38$ Nm, moottorin maksimimomentti,

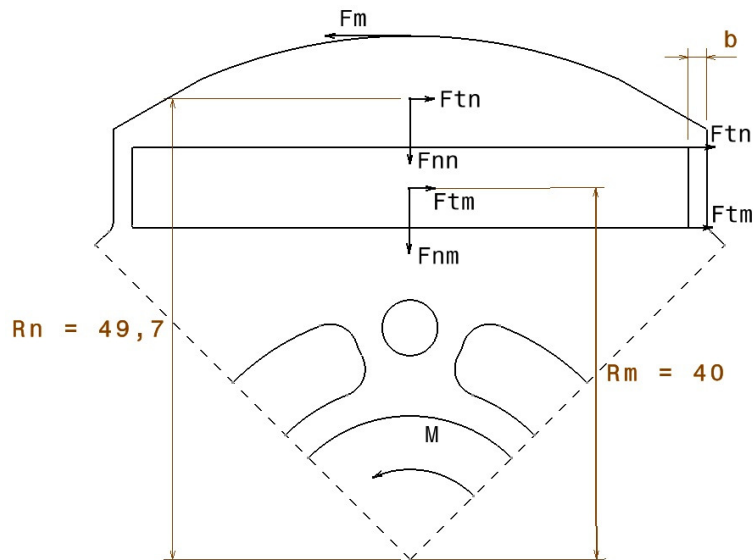
$\mu = 0,1$, liitoksen kitkakerroin,

$b = 45$ mm, kontaktipinnan leveys ja

$K_A = 2$, käyttökerroin.

Kaavalla 10 pienimmäksi mahdolliseksi ahdistukseksi saadaan $Z_{min} \approx 14,3$ μm . Suurin sallittu ahdistus Z_{max} lasketaan suurimmista pintapaineista p_{maxh} sekä p_{maxs} pienemmällä. Tulokseksi saadaan kaavalla 11 $Z_{max} \approx 51,1$ μm ja se saavutetaan kaavalla 9 laske-
tulla pintapaineella p_{maxh} . Liitos päätettiin toteuttaa pienimmällä mahdollisella ahdistuk-
sella.

Napakengän sillat mitoitettiin magneettiin ja kenkään kohdistuvien voimien perusteella, jotka aiheutuvat momentista sekä pyörimisliikkeestä. Rakenne on varmistettu Hysol 9514 -yksikomponenttiepoksiliimalla. Napaan kohdistuvia voimia havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Roottorin napa. F_m on momentista M aiheutuva magneettinen voima. Tangentiaaliset voimat F_{tm} ja F_{tn} aiheutuvat kulmakiihtyvyydestä. Normaalivoimat F_{nm} ja F_{nn} aiheutuvat pyörimisliikkeestä. R_m ja R_n ovat magneetin ja napakengän massakeskipisteiden etäisyydet pyörimisakselista. Sillan vahvuus on b .

Laskennassa käytetään seuraavia arvoja

$n_{RPM} = 10\,000$, maksiminopeus,

$M = 38\text{ Nm}$, maksimimomentti,

$J = 0,0051\text{ kgm}^2$, 3D-mallista saatu roottorin hitausmomentti,

$m_m = m_n = 0,178\text{ kg}$, magneetin sekä napakengän massa,

$l = 45\text{ m}$, paketin pituus,

$w = 60\text{ mm}$, magneetin leveys,

$D_r = 113$ mm, Roottorin halkaisija,

$p = 2$, Roottorin napaparien lukumäärä,

$k_{Fe} = 0,97$, paketin arvioitu täyttösuhde,

$\sigma = 325$ Mpa, laminaattimateriaalin myötöraja [1; 2],

$\sigma_p = 9,5$ MPa, epoksiliiman vetomurtolujuus [6],

$\sigma_s = 45$ MPa, epoksiliiman leikkausmurtolujuus [6] ja

$f_s = 2$, varmuuskerroin.

Magneetin ura pinnoitetaan epoksilla. Ensin tarkistetaan liimauksen kestävyys maksiminopeuden sekä maksimimomentin tapauksissa. Johdetaan normaalivoimalle kaava. Kulmanopeus

$$\omega = 2\pi \frac{n_{RPM}}{60}$$

Sijoitetaan kehänopeuden kaavaan

$$v = \omega r$$

Joka sijoitetaan normaalikiihtyvyyden kaavaan

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

Säteenä r käytetään arvoja R_m ja R_n . Massana m käytetään arvoja m_m ja m_n . Normaalikiihtyvyyden kaava sijoitetaan normaalivoiman kaavaan

$$F_n = a_n m f_s. \quad (12)$$

Kaavalla 12 maksiminopeudella normaalivoimiksi tulevat $F_{nm} = 7,8$ kN sekä $F_{nn} = 9,7$ kN. Liimasaumaan kestävyys johdetaan jännityksestä

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (13)$$

Pinta-ala A muodostuu paketin pituudesta l sekä magneetin leveydestä w

$$\sigma = \frac{F}{lw}$$

Ratkaistaan yhtälöstä voima F

$$F = \sigma lw. \quad (14)$$

Liimasauman pinta-ala on yhtä suuri magneetin molemmilla puolilla. Mikäli liima saadaan levitettyä koko alueelle magneetin molemmille puolille, kaavalla 14 laskettuna sauma kestää voiman $F \approx 24,9$ kN, joka on moninkertainen voimiin F_{nm} sekä F_{nn} nähden. Maksimimomentilla vapaaseen roottoriin kohdistuu kulmakiikkyvyys

$$\alpha = \frac{M}{J}$$

Jonka avulla lasketaan tangenciaalinen kiihtyvyys

$$a = \alpha r = \frac{M}{J} r.$$

Tangenciaalinen kiihtyvyys sijoitetaan voiman laskukaavaan. Tulos on tangenciaalinen voima. Säteenä r on jälleen arvot R_m ja R_n sekä massana m_m ja m_n

$$F_t = ma = m \frac{M}{J} r. \quad (15)$$

Kaavan 15 avulla ratkaistaan tangenciaalivoimat $F_{tm} \approx 26,5$ N sekä $F_{tn} \approx 33,0$ N. Roottorin pinnassa vaikuttaa magneettinen voima F_m , joka johdetaan väännön kaavasta

$$M = Fr.$$

Roottorin napalukumäärä on 2^*p , joten napaan kohdistuva voima jaetaan napojen määrällä. Momenttivarsi r on puolet roottorin halkaisijasta D_r

$$\frac{M}{2p} = F_m \frac{D_r}{2}$$

Ratkaistaan yhtälöstä voima F_m

$$F_m = \frac{2M}{2pD_r}. \quad (16)$$

Kaavalla 16 voimaksi saadaan $F_m \approx 168,1$ N. Tangentiaalinen resultanttivoima on silloin

$$F_r = F_m - F_{tm} - F_{tn}. \quad (17)$$

Kaavalla 17 resultanttivoimaksi saadaan $F_r \approx 108,6$ N.

Verrataan arvoa F_r kaavalla 14 saatavaan liiman leikkausmurtovoimaan $F \approx 117,9$ kN. Leikkausmurtovoima on yli tuhatkertainen resultanttivoimaan nähden.

Teoriassa roottorin voisi tulosten perusteella toteuttaa ilman siltoja. Käytännössä irrallinen napakenkä olisi mahdotonta koota magneetin päälle, jonka lisäksi liiman halutaan ainoastaan varmistavan rakennetta. Täytyy myös huomioida, että laskuissa käytetyt liiman murtorajat koskevat teräs-teräskontakteja. Magneettimateriaali ei ole terästä, ja teräs-magneetti kontaktin rajat pitäisi ensin selvittää kokeellisesti.

Seuraavaksi lasketaan vaadittu sillan vahvuus maksiminopeuden tilanteessa. Liimauksen oletetaan kestävän kulmakiihtyvyydestä aiheutuva leikkausvoima. Sijoitetaan arvot F_{nm} ja F_{nn} kaavaan 14. Siltaan kohdistuva rasitus on puolet normaalivoimien summasta, minkä lisäksi laskussa huomioidaan varmuuskerroin f_s .

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{nm} + F_{nn}}{2A} f_s$$

Ratkaistaan yhtälöstä pinta-ala A , joka muodostuu sillan vahvuudesta b ja paketin pituudesta l . Laskussa huomioidaan arvioitu täyttösuhde k_{fe} .

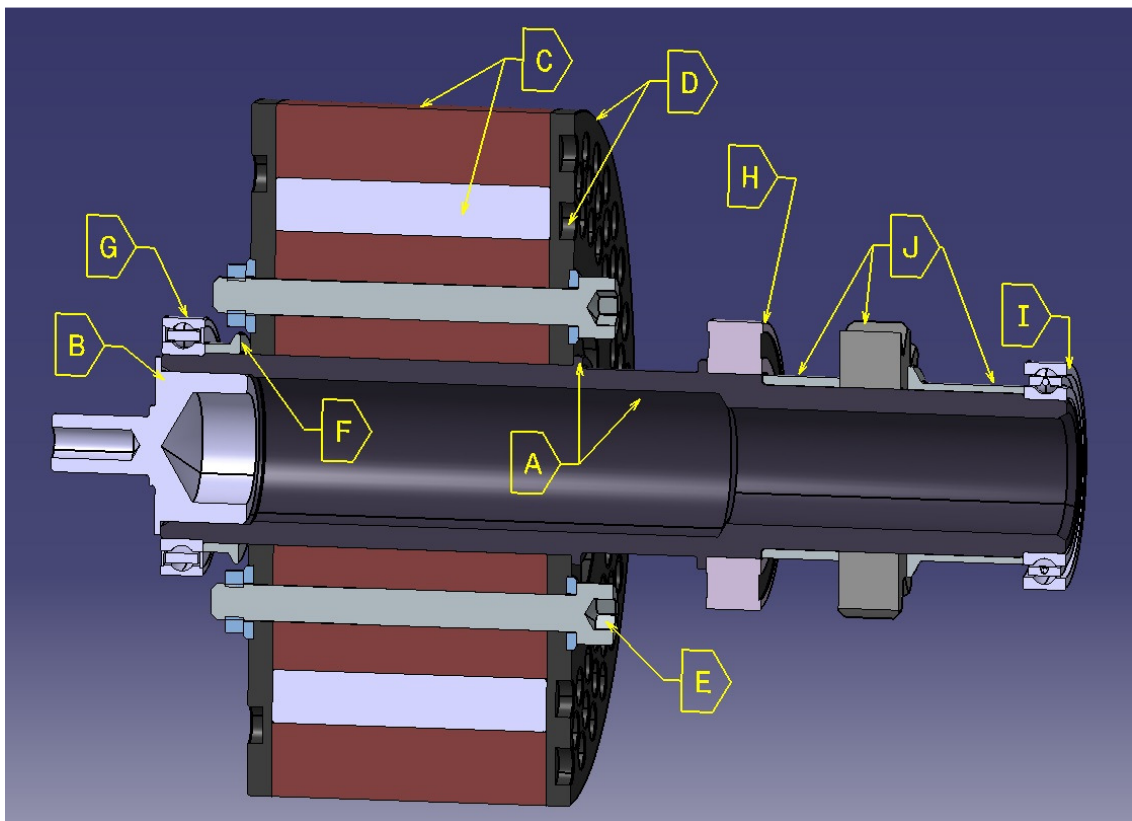
$$A = \frac{F_{nm} + F_{nn}}{2\sigma} f_s = blk_{Fe}$$

Ratkaistaan sillan vahvuus b

$$b = \frac{F_{nm} + F_{nn}}{2\sigma l k_{Fe}} f_s. \quad (18)$$

Sillan vahvuudeksi saatiin kaavalla 18 $b \approx 1,23$ mm. Tämän arveltiin olevan muun muassa valmistettavuuden sekä käsittelylujuuden kannalta liian vähän, jonka vuoksi sillan vahvuus nostettiin kahteen millimetriin. Tällöin varmuuskerroin kasvoi arvoon $f_s \approx 3,25$.

Roottorit kasataan laminaateista liimaamalla ja rakenne haluttiin varmistaa mekaanisesti. Tämän vuoksi päätyihin suunniteltiin pulteilla kiinnitettävät varmistuslevyt, joita käytetään hyväksi myös tasapainotuksen yhteydessä. Materiaaliksi harkittiin PTFE-muovia lisähäviöiden minimoimiseksi, mutta riittävän jäykkyyden saavuttamiseksi roottorin kokonaismitan arveltiin kasvavan liikaa. Materiaaliksi valittiin Ruukki 6082-T6 -alumiini. Koko roottorin kokoonpano esitetään halkaistuna kuvassa 5.

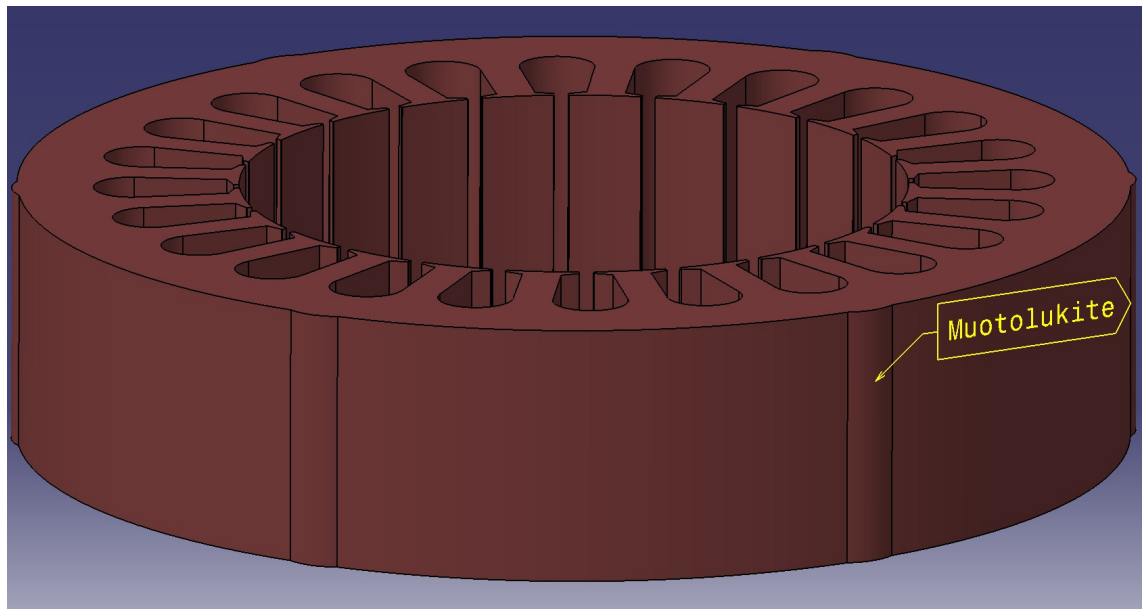


Kuva 5. Isometrinen halkileikkaus roottorin kokoonpanosta. Etupäätylevy (D) asennetaan moottorin akselille (A) laminaattipinon (C) kanssa kutistusliitoksella, oikea sijainti määrittyy olakkeen (A) avulla. Magneetit (C) asennetaan uriinsa ja takapäätylevy (D) asennetaan paikalleen. Rakenne varmistetaan kiinnikkeillä (E) päätylevyjen sekä laminaattipinon läpi olevalla reikäkehällä. Resolverin akseli (B) kiinnitetty moottorin akseliin kutistusliitoksella (G).

tistusliitoksella. Välyksen poisto toteutetaan holkin (F) sekä takapäätylevyn väliin tulevalla aaltojousella moottorissa, sekä hammaspyörän ja holkin (J) väliin tulevalla aaltojousella voimansiirrossa. Suurempaa kuormitusta kestävä moottorin etulaakerin (H) sekä voimansiirron laakerin (I) välissä oleva hammaspyörä on tuotu mahdollisimman lähelle moottorin päätylaakeria laakereiden kestoajan maksimoimiseksi. Takalaakeriksi (G) jouduttiin valitsemaan pienempi laakeri tilan puutteen vuoksi. Kevennysupotuksia päätylevyissä (D) käytetään tasapainotusmateriaalin kiinnitykseen.

2.2.3 Staattori ja käämitys

Staattorin suunnittelussa täytyi huomioida moottorin toiminnasta aiheutuva reaktiomomentti, joka pyrkii kiertämään staattoria roottoriin nähden päinvastaiseen suuntaan. Staattorin ulkopintaan päätettiin toteuttaa kiertymisen estävä muotolukitus, mikä esitellään kuvassa 6. Lukituksesta pyrittiin tekemään mahdollisimman pieni, jotta moottorin rungon sisempi osa saadaan mahdollisimman ohutseinäiseksi.



Kuva 6. Staattorin muotolukite. Ympyräkaaren muotoisia lukituskohtia on ulkopinnassa yhteensä kuusi.

Sähköisessä mitoituksessa alustavaksi vyyhtikierroksen keskimääräiseksi pituudeksi asetettiin $l_{av} = 500$ mm, jota pyrittiin pienentämään mahdollisimman paljon massan ja resistanssin minimoimiseksi. Käytännössä sopiva pituus selvitettiin rakentamalla staattorista tilamalli, johon sovitetaan erimittaisia vyyhtejä. Vyyhdit valmistettiin omatekoisella työkalulla, jossa pituutta pystyttiin säätämään helposti. Kokeellisesti vyyhdin mitaksi saatiin $l_{av} = 368$ mm. Tässä vaiheessa ainoastaan vyyhtien mitat oli selvitetty, mutta käämityn ja sidotun staattorin mittoja ei tiedetty. Staattorin kokonaisuudesta täytyi tietää

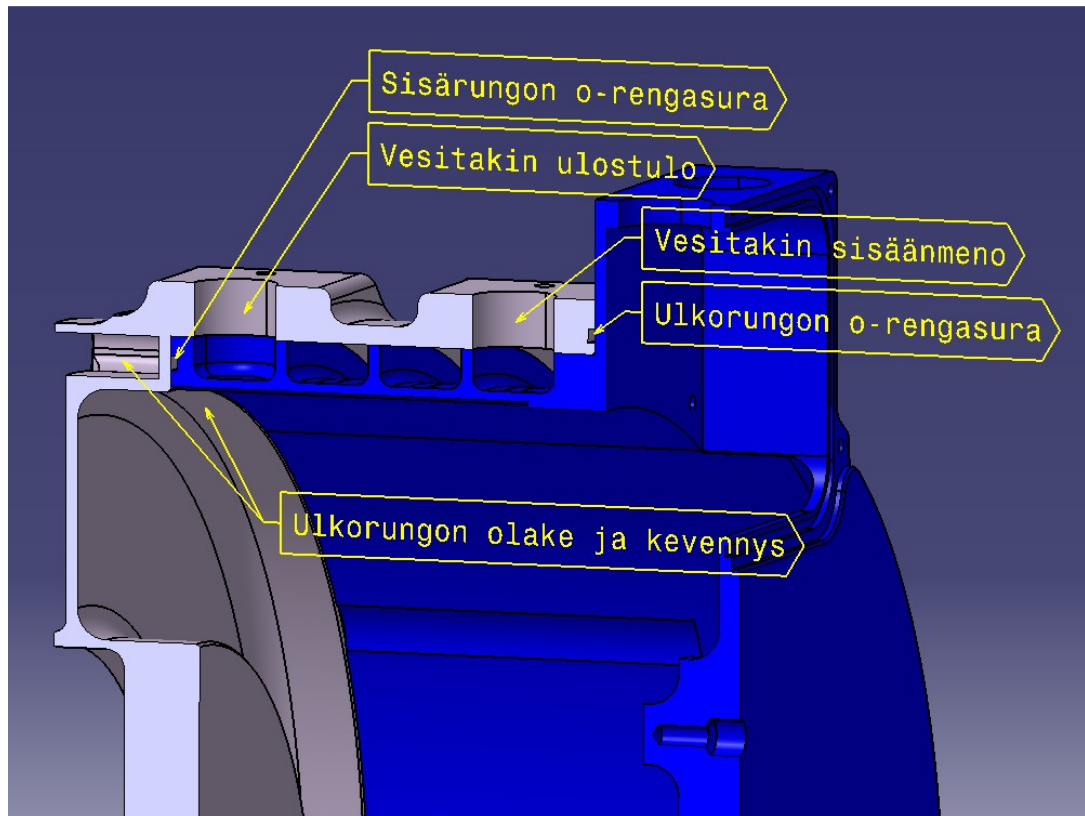
ennen rungon lopullisten mittojen asettamista. Tästä syystä prototyypimoottoria rakentaessa staattori käämittiin ja sidottiin ennen rungon lopullisten mittojen asettamista. Kokonaisuutena osoittautui 25 mm suuremmaksi kuin oli alun perin arvioitu, jonka lisäksi huomattiin, että valittu täyttösuhde on tarpeettoman alhainen. Rinnakkaisten lankojen luku kasvatettiin lopullista mallia varten yhdeksästä kymmeneen, jonka seurauksena täyttösuhde kasvoi arvosta 35,4 % arvoon 39,3 %.

2.2.4 Runko

Rungon suunnitteluun vaikutti eniten vesitakin toteuttaminen. Usean toteutustavan joukosta valittiin kaksiosainen runko, joka koostuu sisemmästä sekä ulommasta osasta, tai sisä- ja ulkorungosta. Rungon osat tuotetaan koneistamalla. Ruuvikierteen muotoinen vesitakki suljetaan runkojen väliin o-rengastiivistyksellä runkojen otsapinnoista. (kuva 7.) Runkojen lieriöpintoja ei tiivistetty vesitakin kohdalla, sillä tämän arveltiin vaikeuttavan moottorin kokoamista huomattavasti. Sen sijaan runkojen välinen rako toteutettiin mahdollisimman tarkalla liukusovitteella. Liian pieneksi arvioitun staattorin kokonaisuutena vuoksi sisärunkoa jouduttiin lyhentämään ja ulkorunkoon lisäämään korotusolake, sillä runkojen aihokappaleet oli hankittuna arvioitua mittaan perustuen. Tämän seurauksena vesitakki lyheni yhden kierroksen verran.

Sisärungosta haluttiin tehdä sellainen, että sitä voidaan käyttää autossa molemmilla puolilla. Toisin sanottuna sisärungosta ei tarvitsisi tehdä kahta eri versiota, joista toinen sopii vain oikealle ja toinen vasemmalle. Suunnittelemalla rungot yhden malliseksi vaadittavien aihoiden määrä vähenee ja ennen kaikkea työstöratojen suunnittelu helpottuu.

Pintojen seinämävahvuudet pyrittiin pitämään mahdollisimman pieninä painon säästöä ajatellen, toisaalta osien koneistettavuus piti pitää jatkuvasti mielessä. Tämän kokoisissa kappaleissa värähtely voi aiheuttaa suuria vaikeuksia koneistuksen aikana. Materiaaliksi valittiin ThyssenKrupp 7075 -alumiini pääasiassa korkean kovuuden ja lujuuden vuoksi. Kokemuspohjaisesti varsinkin suurien alumiinikappaleiden asennuksessa suuri kovuus ja lujuus ehkäisevät käsittelyssä tapahtuvia kolhuja ja vaurioita. Valitun materiaalin kovuus ja lujuus olivat valmistajan alumiinimateriaaleista suurimmat [7].

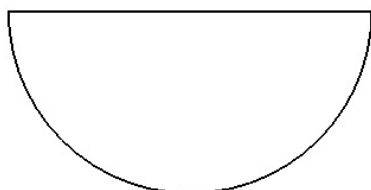


Kuva 7. Vesitakin rakennetta sekä rungon tiivistystä havainnollistava isometrinen halkileikkaus runko-osien kokoonpanosta. Laakeripesät kohdistetaan runkokappaleiden lieriöpinnoina, minkä vuoksi niiden välinen sovite tulee olla tarkka. O-rengasurat ovat mitoitettu tiivistevalmistajan ohjeen mukaan [8, s. 109].

Prototyypin vesitakki toteutettiin puoliympyrän profiililla, jolloin se voitaisiin koneistaa yhtenä urana pallopäisellä jyrsimellä. Lopulliseen malliin profiili muutettiin kantikkaaksi pienillä nurkkapyörityksillä, joka koneistetaan usealla sivuttaissiirrolla. Muutoksella vesitakin poikkipinta-ala kasvoi lähes kaksinkertaiseksi. (kuva 8.)

$$A_{\text{prototyyppi}} = 56,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{lopullinen}} = 90,7 \text{ mm}^2$$



Kuva 8. Vesitakin profiilin muutos.

Sisärungon suunnittelussa pieneksi mitoitettun staattorin muotolukitteen vaikutusta rungon sekä staattorin toimintaan tarkasteltiin seuraavaksi. Lukituksen erikoisen muodon vuoksi vaikutusta ei pyritty analysoimaan erityisen tarkasti. Staattorin muotolukituksen aiheutuva leikkausjännitys laskettiin kaavalla 15.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{An} = \frac{\frac{M}{D_s}}{An} = \frac{2M}{D_s An}$$

$M = 38 \text{ Nm}$, reaktiomomentti,

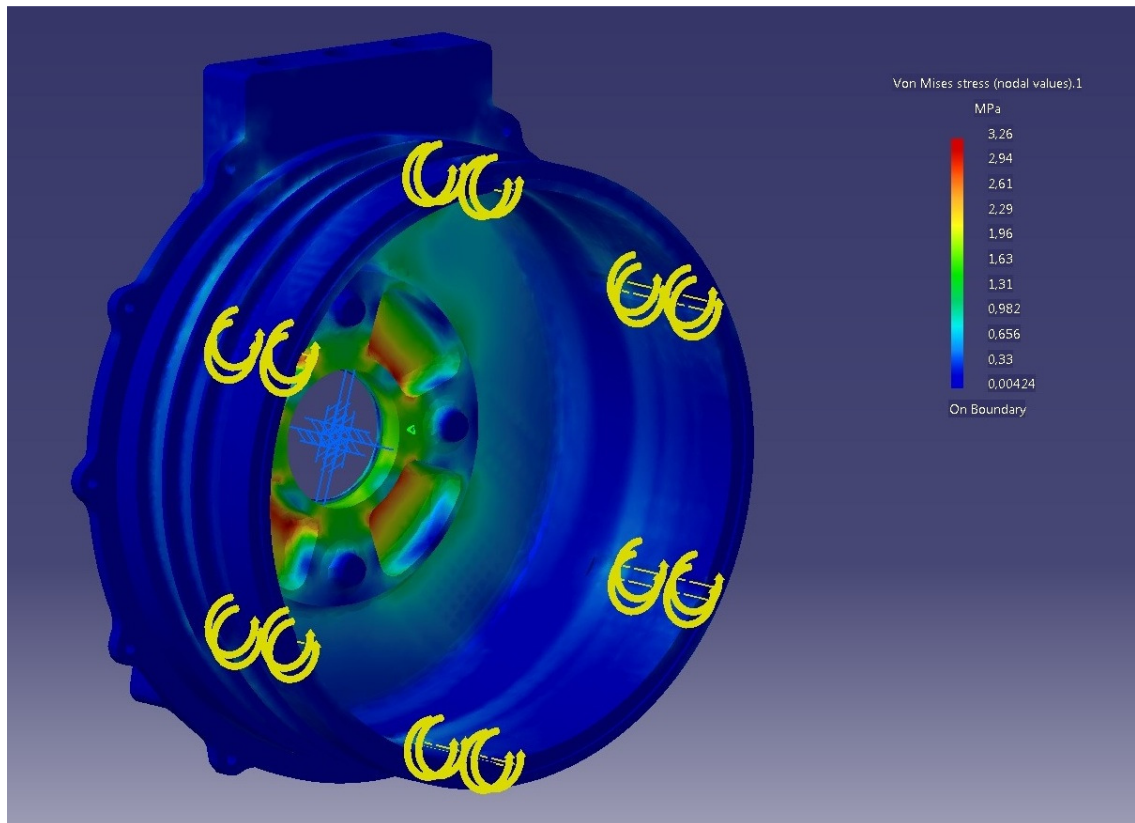
$D_s = 193 \text{ mm}$, staattorin halkaisija,

$A \approx 427,8 \text{ mm}^2$, muotolukitteen pinta-ala, saatu 3D-mallista ja

$n = 6$, lukitusmuotojen lukumäärä.

Kaavalla 15 leikkausjännitykseksi saatiin $\sigma \approx 0,15 \text{ Mpa}$. Arvon todettiin olevan liian pieni vaatiakseen tarkempaa tarkastelua.

Reaktiomomentin vaikutusta koko rungon muodonmuutoksiin tarkasteltiin FEA-mallin avulla kuvassa 9. Tuloksen perusteella kovan ja lujan 7075-alumiinin käyttö rungon materiaalina ei ole perusteltua.



Kuva 9. Reaktiomomentin vaikutus sisärunkoon. Runkoa pidetään paikallaan laakeripesästään ja reaktiomomentti vaikuttaa jokaiseen muotolukitukseen. Alle 4 MPa jännityksellä muodonmuutokset koko rungossa ovat merkityksettömiä.

2.2.5 Nopeuden ja asennon takaisinkytkentä

Moottorin käytöksi valittu laite toimitettiin inkrementti-, absoluutti- tai resolverirajapinnalla nopeuden ja asennon takaisinkytkentään. Resolverirajapinta valittiin laitevalmistajan suosituksesta ja tunnistimeksi Tamagawa Smartsyn -sarjasta malli TS2620N21E11. Moottoreiden käytöt saatiin ABB:a. Malliksi valittiin ACSM1-04-046A taajuusmuunnin speed and torque -ohjelmalla.

Resolveri on eräänlainen pyörivä muuntaja, joka koostuu kiinteästä staattorista sekä pyörivästä roottorista. Laitteen ensiö on mallista riippuen staattori- tai roottorikäämi, jota syötetään sinimuotoisella herätteellä. Toisiossa syntyvän vasteen amplitudi sekä muutosnopeus riippuvat roottorin kulmasta ja nopeudesta. (kuva 10.) Vaste luetaan taajuusmuuttajan resolverirajapinnalla ja analoginen jännite muutetaan digitaaliseen muotoon, josta roottorin nopeus ja suhteellinen kulma lasketaan. [9]



①出力信号 (+タイプ) Output signal (+ type)

$$E_{S1-S3} = K E_{R1-R2} \cdot \cos \theta$$

$$E_{S2-S4} = K E_{R1-R2} \cdot \sin \theta$$

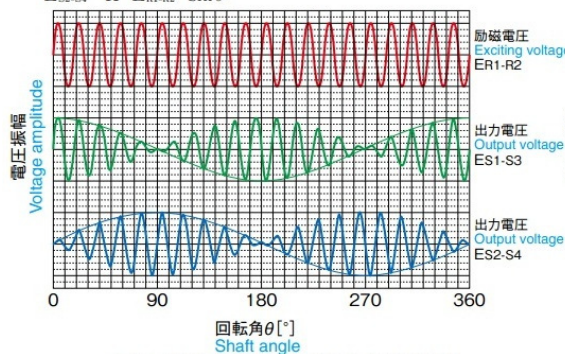


図2 励磁・出力電圧特性 (+タイプの場合)

Fig.2 Characteristics of excitation/output voltage (In case of +type)

②出力信号 (-タイプ) Output signal (-type)

$$E_{S1-S3} = K E_{R1-R2} \cdot \cos \theta$$

$$E_{S2-S4} = -K E_{R1-R2} \cdot \sin \theta$$

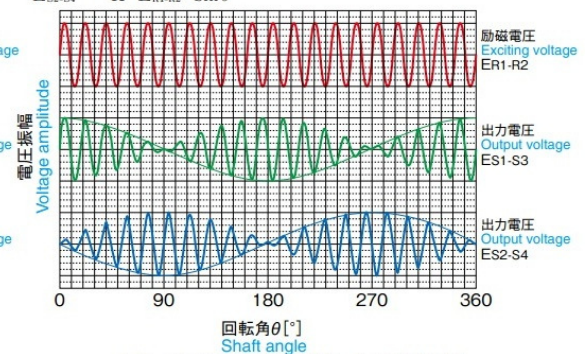


図3 励磁・出力電圧特性 (-タイプの場合)

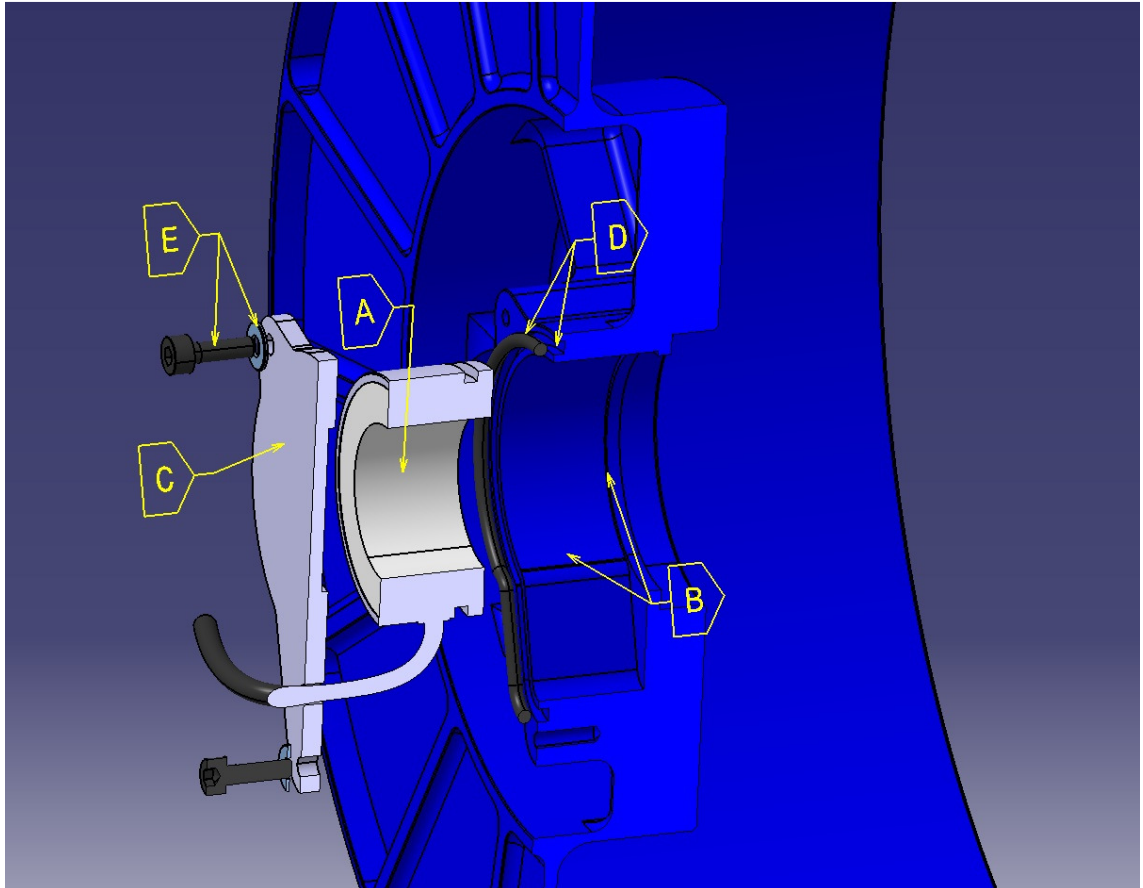
Fig.3 Characteristics of excitation/output voltage (In case of -type)

Kuva 10. Yläpuolella moottoriin valitun resolverin staattori sekä roottori. Alapuolella resolverin staattoriin syötettävä heräte sekä roottorissa syntyvät vasteet. Tunnistuksen suunta saadaan vaihdettua kytkemällä johtimet s2-s4 ristiin, kuten oikealla puolella on tehty. [10]

Valitun resolverin suurin sallittu käyttölämpötila on 155 °C, joka on suurempi kuin moottorille asetettu nimellinen lämpötila. Laiteelle luvataan myös korkea värinän- ja iskunkesto. [10]

Laite koostuu erillisestä roottorista sekä staattorista. Molempien kiinnitykseen tarkoitettujen, täysin sileät lieriöpinnat tekivät kiinnityksen suunnittelusta haasteellista. Moottorin roottorin asennon tunnistaminen edellyttää, että tunnistimen ja moottorin staattoreiden sekä roottoreiden suhteelliset asennot eivät muutu lainkaan tunnistusajon jälkeen. Mikäli näin pääsee käymään, taajuusmuunnin tunnistaa kulmavirheen ja pysäyttää moottorin tai jatkaa ilman takaisinkytkentää. [11, s. 39–40; s. 236]

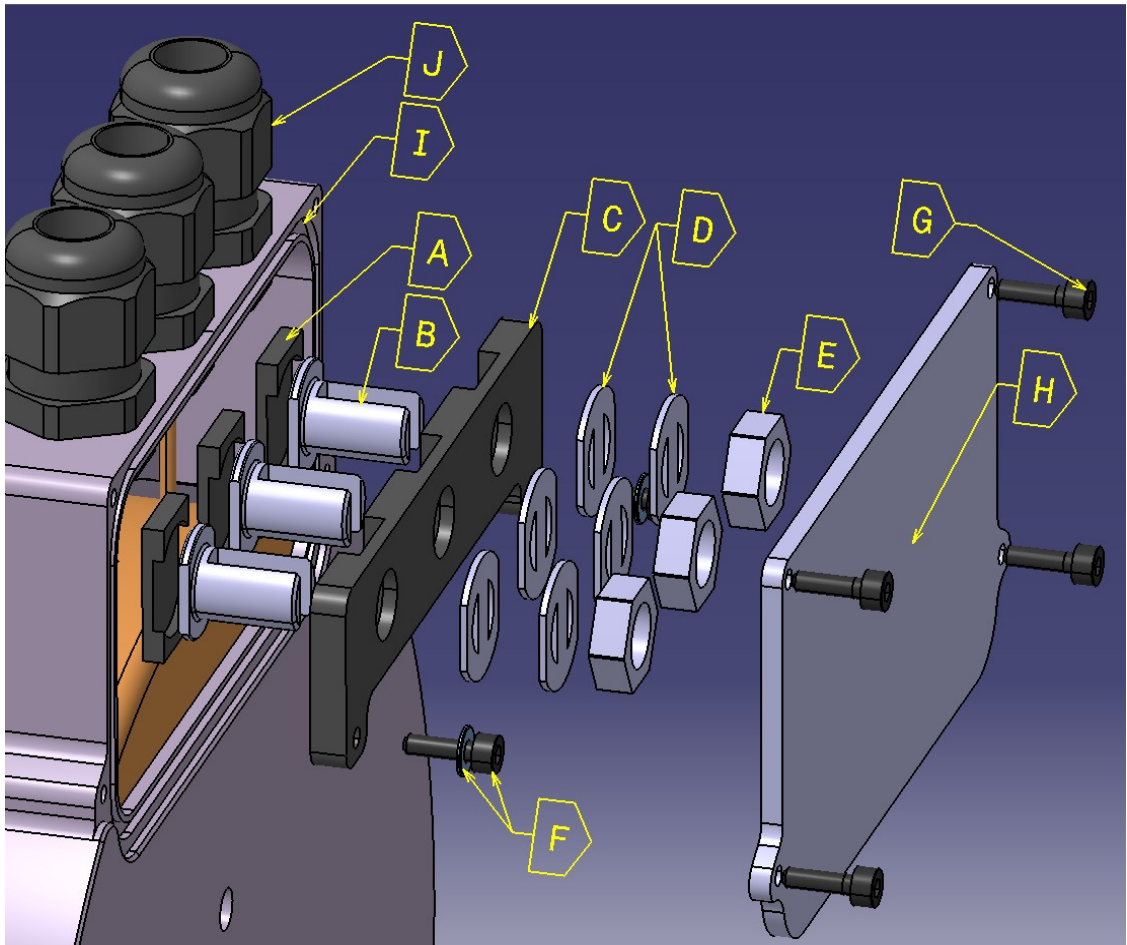
Resolverin roottori päätettiin kiinnittää moottorin akseliin aiemmin mainitulla alumiiniakselilla. Akselin sekä resolverin roottorin välillä on kutistusliitos, joka eliminoi suhteellisen liikkeen mahdollisuuden. Staattori päätettiin sovittaa ulkorunkoon liukusovitteella ja lukitus aksiaalisella puristuksella runkoa vasten. Puristus tuotetaan samalla likasuojana toimivalla alumiinikannella. (kuva 11.)



Kuva 11. Isometrinen halkileikkaus staattorin sekä ulkorungon kokoonpanosta. Resolverin staattori (A) liukuu sisängon pesään vastinolaketta vasten (B). Pesässä on alaspäin suunnattu helpotus resolverin kaapelia varten. Tiivistenauha (D) asetetaan uraan ja kansi (C) kiristetään paikalleen kiinnikkeillä (E).

2.2.6 Kytentärasia

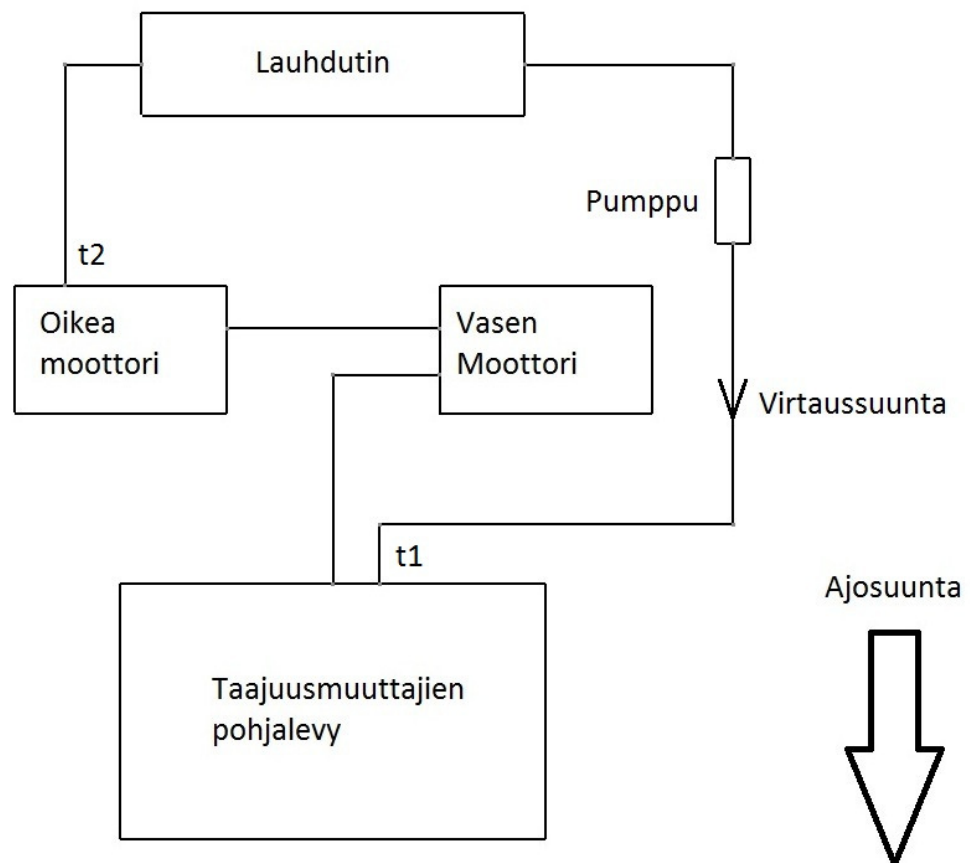
Moottori päätettiin toteuttaa kytkentärasialla, joka on yhtä osaa sisärungon kanssa. ETRA POM-C -muovista valmistettava kytkentäalusta eristää kytkentäpultit rungosta. Kytkentäpultit sekä mutterit valmistetaan Ruukki 6082-T6 -alumiinista. Kytkentärasian rakennetta havainnollistetaan kuvassa 12.



Kuva 12. Kytentärasian osista tehty räjäytyskuva. Kytentäpultti (B) kiristetään paikalleen muoviosien (A) ja (C) väliin kiinnikkeillä (F) sisärungon (I) kytentärasian pohjaan. Vaihekaapelit pujotetaan vedonpoistojen (J) läpi ja kiristetään pulttiin (B) mutterilla (E) aluslaattojen (D) väliin. Tiivistenauha (I) asetetaan paikalleen ja kansi (H) sulkee rasi- an kiinnikkeillä (G).

2.3 Jäähdytys

Käyttökohteessa moottoreita jäähdytetään vedellä kuvassa 13 esitetyn kaavion mukaan. Lisäaineiden käyttö jäähdytysnesteen seassa on kielletty [2, s. 58].



Kuva 13. HPF013e-auton jäähdytyskierto. Neste kierrätetään taajuusmuuttajien pohjalevyn kautta vasempaan moottoriin, josta edelleen oikeaan moottoriin ja takaisin lauhduttimeen. Nesteen lämpötilaa mitataan kohdissa t1 ja t2.

Yksinkertaisuuden nimissä kierrosta tehtiin yksihaarainen. Järjestelmä pystyttiin tarpeen tullen muuttamaan kaksi- tai useampihaaraiseksi, mikäli moottoreiden tai taajuusmuuttajien lämpötilarajat ylittyvät käytössä.

Jäähdytysjärjestelmä oli tarkoitus mitoittaa prototyypimoottorista saatavan testidatan perusteella. Riittävää testidataa ei koskaan saatu, joten järjestelmä mitoitettiin arvioidun häviöiden perusteella. Lämpötilaa mitattiin järjestelmästä arvioidun kylmimmän ja kuumimman pisteen kohdalla NTC-antureilla seuraavan auton kehitystä ajatellen.

Prototyypimoottorin käämeihin asennettiin yhteensä kolme NTC-anturia, joista kaksi vyyhden päihin ja yksi keskelle uraa. Tarkoituksena oli varmistaa vesitakin toiminta sekä tarkistaa mahdollinen lämpöepätasapaino käämityksessä. Runkoja ei ole tiivistetty vesitakin kohdalta, joten teoriassa osa nesteestä pääsee sisään menosta suoraan

ulostuloon. Magneettien lämpötila arvioitiin mittaamalla roottorin pintalämpötila infrapuna-anturilla. Lopullisessa moottorissa lämpötilaa mitattiin ainoastaan toisesta vyyhden päästä KTY-84 -anturilla.

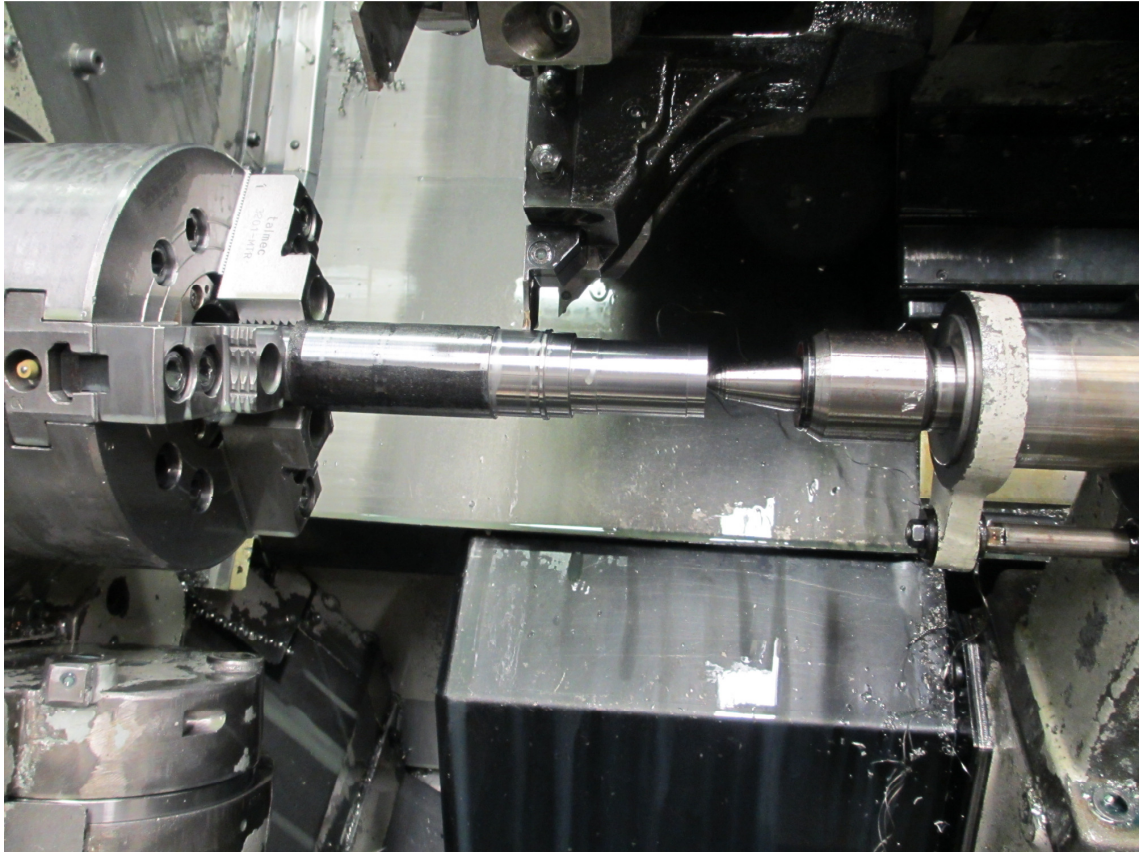
3 Valmistus ja kokoonpano

Suunnitelmien valmistuttua osien valmistaminen aloitettiin. Koneistukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun valmistustekniikan laboratoriossa. Kaikki osat saatiin valmistettua kahta lopullista moottoria varten neljässä kuukaudessa.

3.1 Moottorin akseli

Työ alkoi aihoiden sahaamisella sekä kiinnitysolakkeen sorvaamisella. Työkappaleen valmistelu olakkeella on kokemusperäisesti välttämätöntä käytetyn materiaalin sekä koneen kanssa, sillä leukojen puristus ei riitä kappaleen paikalla pitämiseen.

Akselissa ilmenee kulmikkaita muotoja kahdesta suunnasta tarkasteltuna, joten ulkomuoto sorvattiin valmiisiin aihioihin profiilisorvaukseen tarkoitetulla pistoterällä kärkipylkän kanssa. Tällä menetelmällä koko ulkomuoto saatiin tehtyä yhdellä kiinnityksellä. Valmistustekniikka esitetään kuvassa 14. Moottorin nopeuden ja kulman tunnistimen akselissa ilmenee samoin kulmikkaita muotoja kahdesta suunnasta tarkasteltuna, jonka lisäksi laitteen valmistaja ilmoittaa roottorin ja staattorin suurimmaksi sallituksi radiaalipoikkeamaksi 50 μm [9]. Mahdollisen radiaalipoikkeaman eliminoimiseksi tunnistimen akseli valmistetaan samalla menetelmällä pistoterällä.



Kuva 14. Keskeneräinen akseliihio Mazak SQT 10M -monitoimisovissa.

Valmiit aihiot porattiin ontoiksi ja lähetettiin Tasowheelille karkaisua, pyöröhiointaa sekä hammasjyrsintää varten voimansiirtokomponenttien aihoiden kanssa. Täysin valmis akseli ja voimansiirtoon valmistetut komponentit nähdään kuvassa 15.

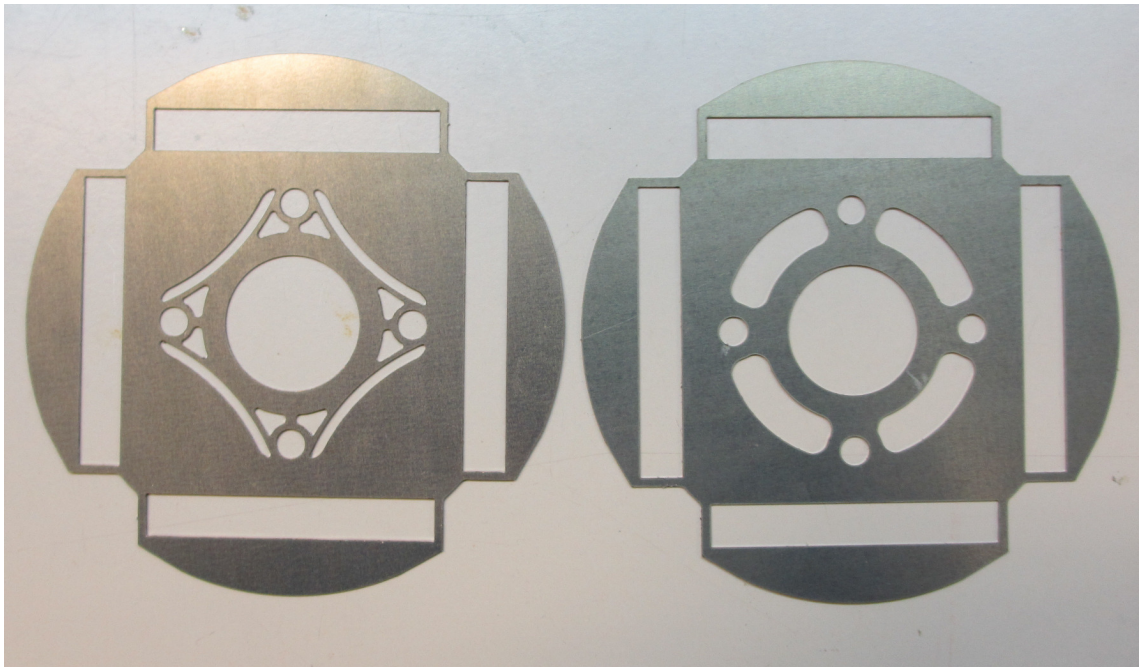


Kuva 15.

3.2 Laminaatit

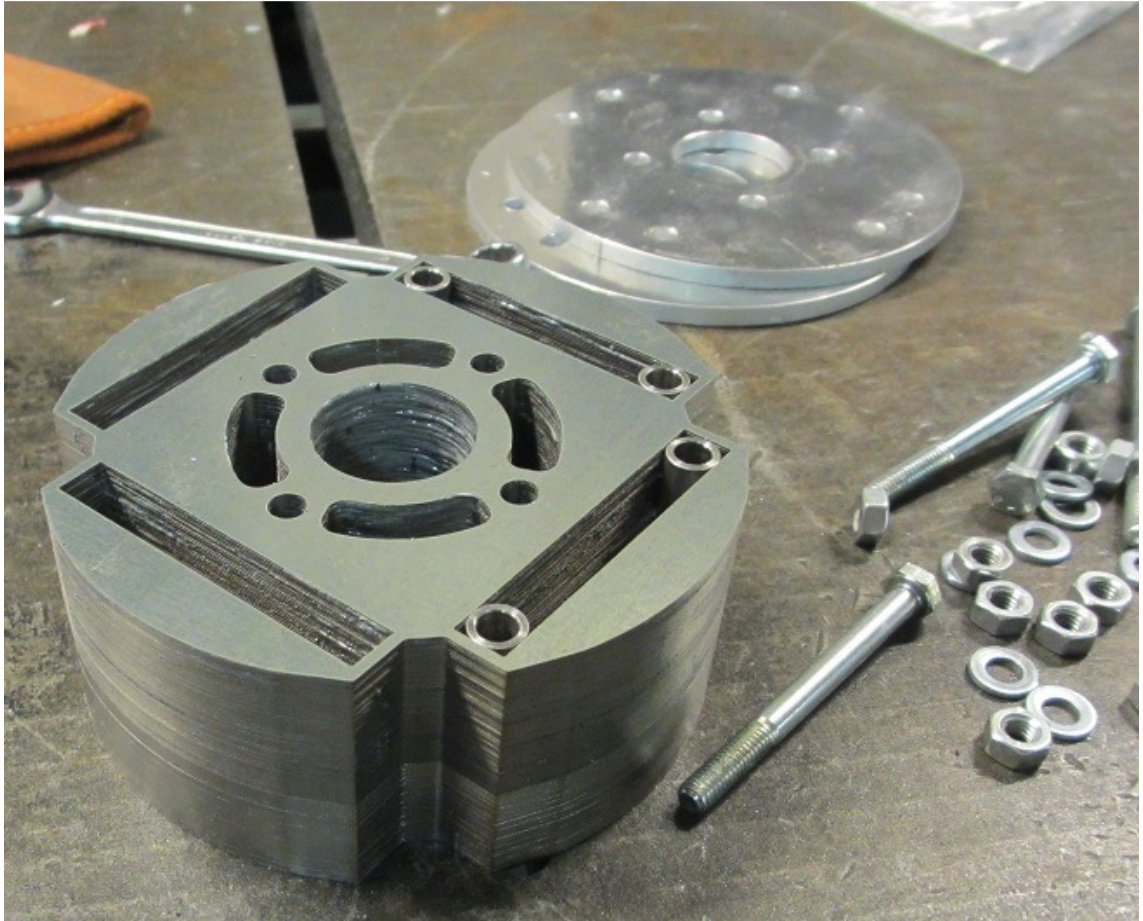
Laminaatit teetettiin Keravan Teräsmiehillä laserleikkuulla. Materiaaliksi valittiin sähkökoneisiin tarkoitettu pii-seosteinen ABB M400-50A. Pii-seosteisen teräksen laserleikkuusta ei ollut kummallakaan osapuolella kokemusta, jonka vuoksi leikkuureunan laatu aiheutti huolta.

Reunoissa esiintyi pursetta lopulta lähinnä jyrkissä mutkissa. Roottorin laminaatin kevennysprofiilia yksinkertaistettiin ja kasvatettiin lopullista moottoria varten. (kuva 16.) Samalla roottorin massa sekä hitausmomentti pienenevät hieman.



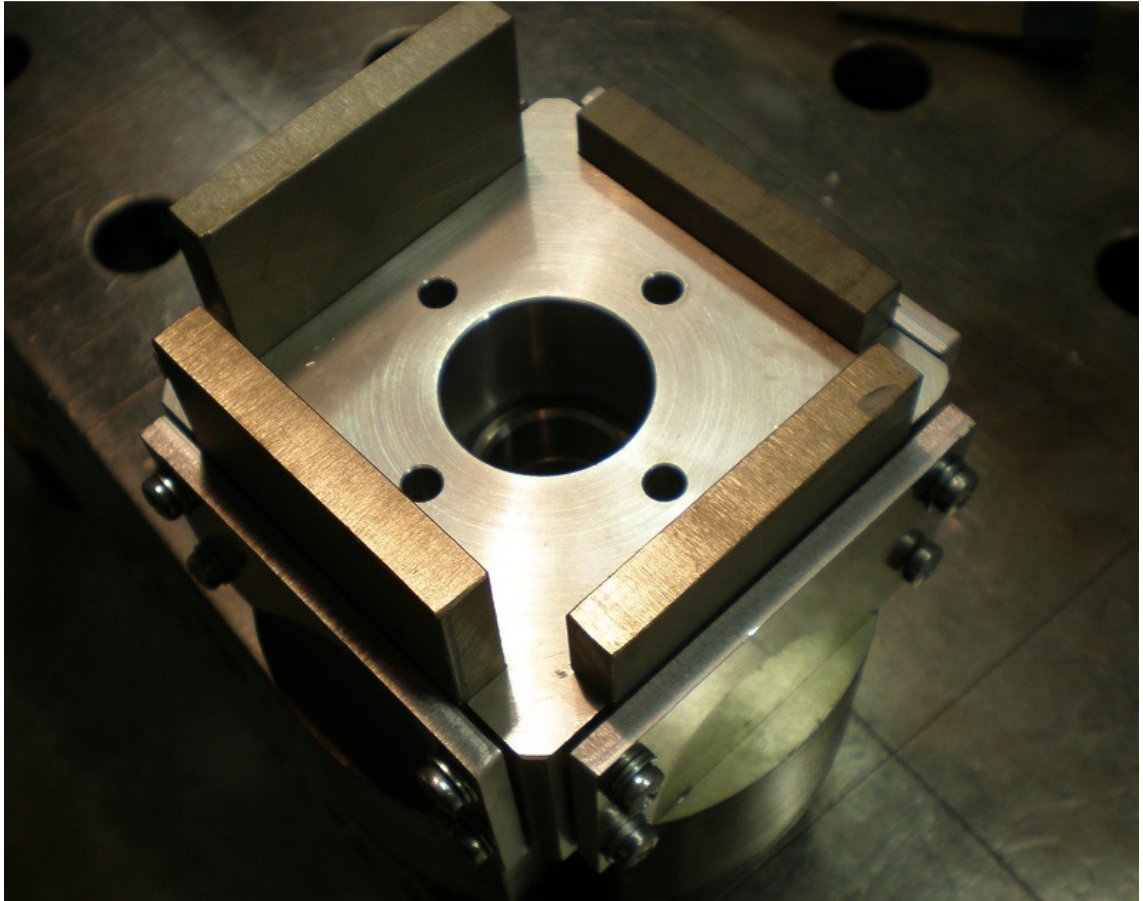
Kuva 16. Vasemmalla prototyypin laminaatti ja oikealla lopullinen. Kevennysprofiilin jyrkät mutkat poistettiin, jotta pursetta syntyisi vähemmän.

Staattori sekä roottori pinottiin laserleikatuista laminaateista liimaamalla. Työtä varten tehtiin sapluunat, joissa laminaatit saadaan kohdistettua oikein. Liimana käytettiin Hysol 9514 -yksikomponenttiepoksiliimaa. Aine on lämpökovetteista, joten rajoittamattoman käsittelyajan myötä liiman levityksessä laminaattien väliin päästiin lähes purseetomaan lopputulokseen. Roottorin liimauksen lopputulos esitellään kuvassa 17.



Kuva 17. Liimattu roottori ja sapluunan osat. Kohdistus toteutettiin magneettien uriin asetetuilla paketin pituisilla holkeilla. Paketti puristettiin kasaan taustalla näkyvillä alumiinilevyillä.

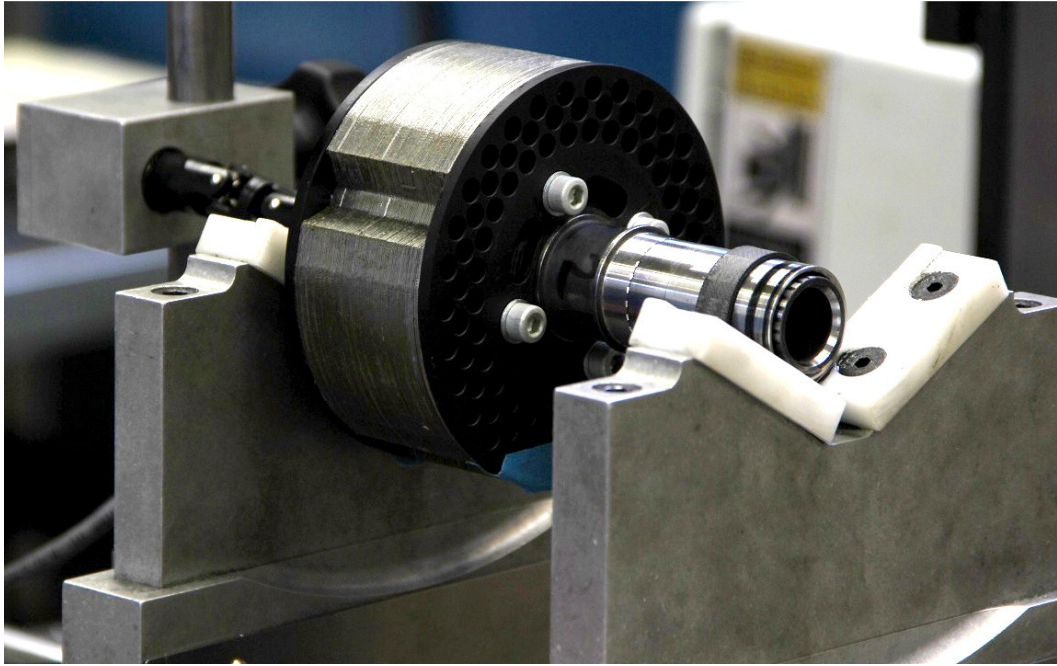
Liimatut roottorit piti viimeistellä kokoonpanoa varten. Purseen poiston jälkeen leikkuussa alimitaiseksi tehty akselin reikä sorvattiin määrämittaan. Sorvaamisen jälkeen akselit prässättiin paikalleen ja magneetit upotettiin uriinsa. Upottaminen käsin on magneettien voimakkuuden vuoksi täysin mahdotonta, joten työtä varten valmistettiin oma alumiininen työkalu. Työkalu sekä upotusprosessi esitetään kuvassa 18.



Kuva 18. Roottorin päälle asetettava alumiininen magneetin asennustyökalu. Ensin magneetit kiristetään työkalun uriin alumiinilevyillä ja ruuveilla ja työkalu kiinnitetään roottoriin ruuveilla. Magneetit vapautetaan yksitellen kuvassa alla olevan roottorin uriin. Magneettinen voima vetää magneetin osan matkasta, ja loppumatka pakotetaan käsin.

3.3 Tasapainotus

Roottoreiden tasapainotus suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun valmistustekniikan laboratoriossa manuaalijärsimessä. Käytössä ollut laitteisto oli tarkoitettu kampiakselien tasapainotukseen, mutta soveltui hyvin myös sähkömoottorin roottorin tasapainotukseen. Tasapainotuslaite koostuu kahdesta värähtelyantureilla varustetusta olkatuesta ja hihnakäytöstä. Roottorin nopeus tunnustetaan akselin päästä erillisellä anturilla. Olkatukien mittaama värähtely ja nopeustieto tuodaan tietokoneeseen kytkettyyn keskusyksikköön, missä epätasapaino määritetään laskemalla. Tulokset nähdään tietokoneeseen asennetusta käyttöliittymästä. Olkatuet, tasapainotettava roottori sekä nopeusanturi nähdään kuvassa 19. Hihnakäyttö ja keskusyksikkö eivät ole näkyvissä.



Kuva 19. Roottori tuettiin roottorin etupuolella voimansiirron laakeriolakkeesta, sillä olkatukia ei saatu säädettyä lähemmäs toisiaan.

Tasapainotus suoritettiin ISO 1940 -standardia myötäillen. Tavoitteeksi asetettiin laatu-
luokitus G6.3, jonka saavuttaminen osoittautui aikataulun puitteissa mahdottomaksi.
Roottorit saatiin tasapainotettua luokitukseen G16, joka sopii standardissa esitetävän
kuvaajan antamiin rajoihin [12, s.12]. Lasketaan sallittu jäännösepätasapaino tasoissa
A sekä B laatuluokituksille G6.3 sekä G16 erikseen. Sallittu epätasapaino

$$U_{\text{per}} = \frac{1000e_{\text{per}}\Omega m}{\Omega}$$

Sijoitetaan erikseen sallittujen epätasapainojen yhtälöihin tasoissa U_{perA} ja U_{perB} . Kul-
manopeus Ω lasketaan

$$\Omega = \frac{\pi n}{30} \quad (19)$$

$$U_{\text{per A}} = \frac{U_{\text{per}LB}}{L} \quad (20)$$

$$U_{\text{per B}} = \frac{U_{\text{per}LA}}{L} \quad (21)$$

Laskennassa käytetään alkuarvoja

$m = 3,2$ kg, roottorin massa,

$n = 10\ 000$ RPM, suurin käyttönopeus,

$\Omega = 1047,2$ rad/s, kaavalla 19 laskettu kulmanopeus,

$L_A = 37,5$ mm, tason A etäisyys roottorin massakeskipisteestä,

$L_B = 50,0$ mm, tason B etäisyys roottorin massakeskipisteestä ja

$L = 87,5$ mm, tasojen A ja B välinen etäisyys.

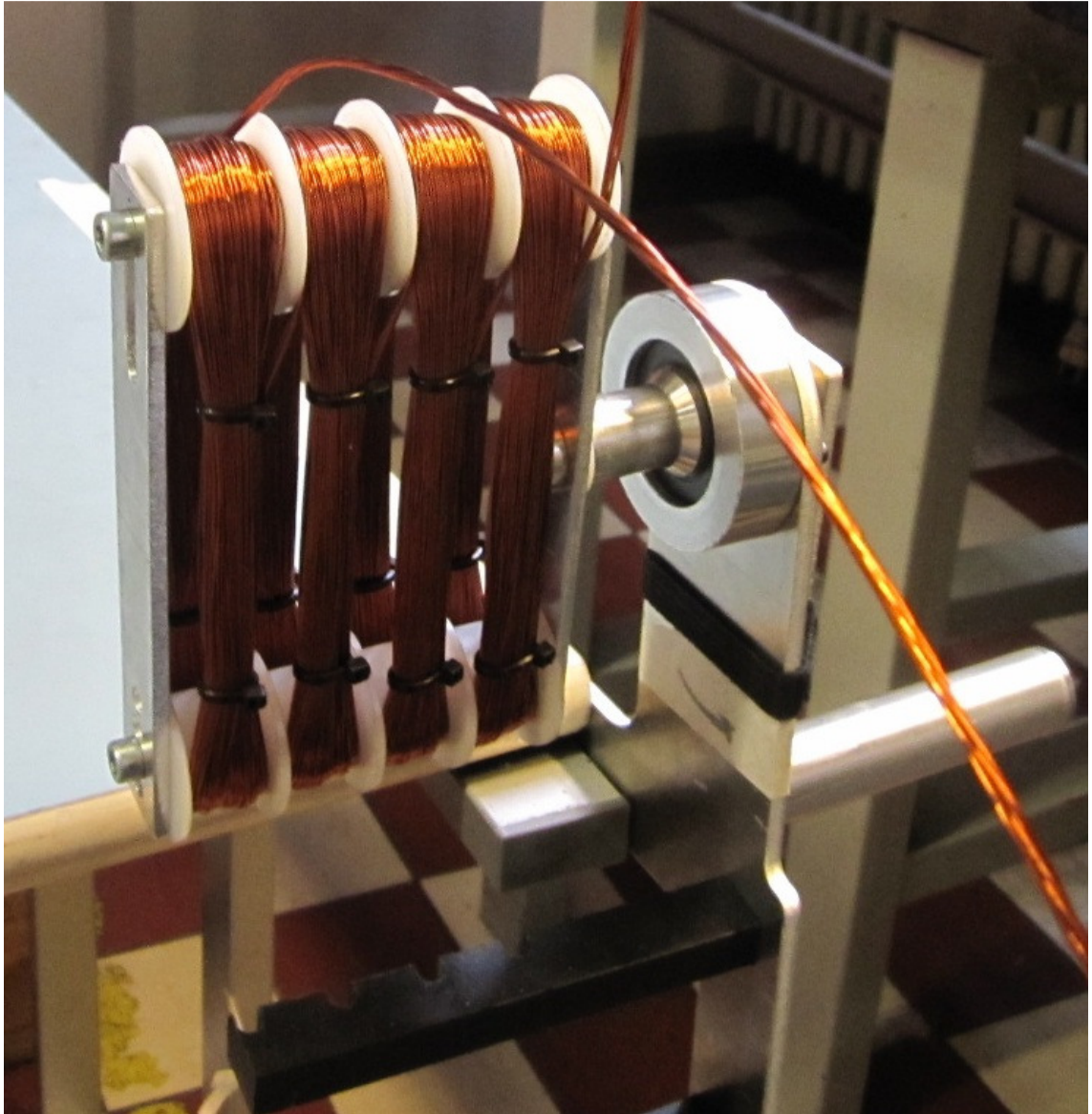
Kaavoilla 20 sekä 21 lasketut sallitut epätasapainot sekä tasapainotuksen tulokset esitellään taulukossa 1.

Taulukko 1. Arvoista nähdään, että kaikki kolme roottoria sijoittuvat G16-luokitukseen. Roottorin kaksi B-tasolla oleva epätasapaino ylittää sallitun rajan niukasti.

ISO-luokka	U_{perA} (g * mm)	U_{perB} (g * mm)
G6.3	11	8,3
G16	27,9	21
Roottori	U_{perA} (g * mm)	U_{perB} (g * mm)
1	13,8	19,3
2	24,1	22,5
3	23,1	13,7

3.4 Staattori

Vyyhtien valmistukseen rakennettiin käsikäyttöinen työkalu, jolla saadaan tehtyä puoli vaihetta kerrallaan (kuva 20). Rinnakkaiset langat syötetään työkaluun muovisia ohju-reita pitkin kuparilla täytetystä rullasta. Lankojen kireys ylläpidettiin jarruttamalla rullaa pienellä sähkömoottorilla. Vyyhditys tapahtuu kahden uritetun muovirullan välissä, joiden välinen etäisyys lukitaan kahdella alumiinilevyllä. Rakenne kytkeytyy käsikäyttöiseen kampeen laitteen runkoon laakeroidulla akselilla. Urat pyrittiin täyttämään tasaisesti, jotta vyyhtien kokonaispituuksissa sekä resistansseissa olisi mahdollisimman vähän poikkeavuuksia. Kierrokset laskettiin nollattavalla laskurilla, joka ei näy kuvassa.



Kuva 20. Työkalu ja valmis puolikas vaihe. Valmis vyyhti varmistettiin nippusiteillä, jotka poistetaan asennuksen jälkeen.

Vyyhdit asennettiin liima- ja leikkuupurseesta siistittyihin staattoreihin vaihe kerrallaan, jonka vuoksi päiden sitominen hankaloitui (kuva 21). Eri tavalla asennettuina päiden sitominen olisi ollut helpompaa, mutta oikean järjestyksen hallitseminen hankalampaa kokemattomalle. Ennen vyyhtien asentamista lopullisen moottorin sisärungot koneistettiin, jotta staattoreita voidaan sovittaa niihin.



Kuva 21. Prototyypin sidottu staattori. Ristiin kulkevat vyyhdenpäät vaikeuttivat sitomista.

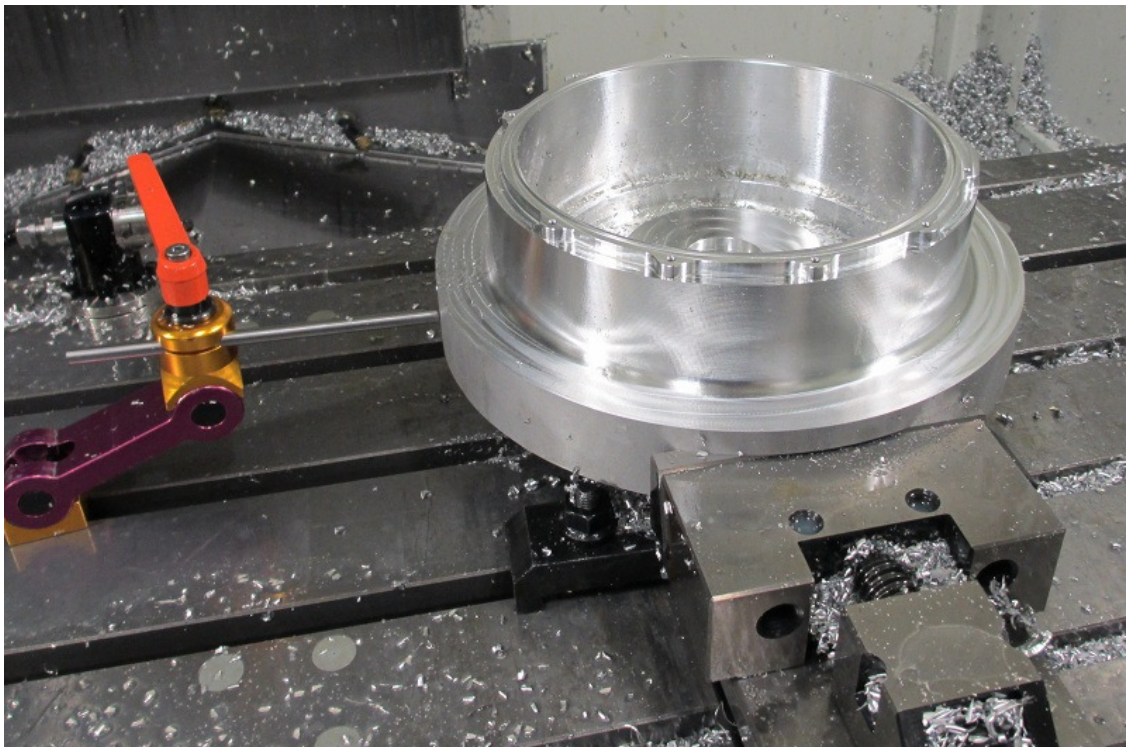
3.5 Runko

Rungon profiili valmistettiin kokonaan jyrsimällä. Laakeripesät sekä resolverin staattorin pesä viimeisteltiin avartamalla. Rouhinnan suorittamista harkittiin sorvaamalla, mutta tämän ei arveltu nopeuttavan suoritusta käytettävissä olevalla kalustolla siinä määrin, että se olisi kannattanut. Alun perin molemmat runko-osat oli tarkoitus koneistaa kolmella kiinnityksellä, mutta ulkorungon koneistuksessa ilmennyt ongelma pakotti kiinnitysten lisäämistä yhdellä.

Ulkorungon sisäpinta jyrsittiin mittoihin ensimmäisellä kiinnityksellä ja mittatarkkuus tarkistettiin kappaleen ollessa koneen puristimeen kiinnitettynä. Tarkistusmittaus tehtiin, kun kappale oli irrotettu puristimesta. Tarkistusmittauksessa huomattiin, että kappale oli kokenut voimakkaan muodonmuutoksen ympyräprofiilista soikioksi irrotuksen yhteydessä. Soikiomaisuus mitattiin ja merkittiin kappaleen sisälieriöpintaan syyn selvittämiseksi. Huomattiin, että soikiomaisen kappaleen suurin mitta oli puristussuunnan

mukainen ja pienin mitta kohtisuorassa puristussuuntaan nähden. Tämän perusteella pääteltiin, että kappaleen puristaminen oli yksinkertaisesti aiheuttanut riittävän suuren jännityksen materiaalissa, minkä seurauksena muoto muuttui. Rungon aihion kiinnitystapa nähdään kuvasta 22. Päätelmä varmistettiin kiinnittämällä kappale uudelleen puristimeen ja toteamalla, että puristaminen muutti kappaleen takaisin ympyrämuotoon.

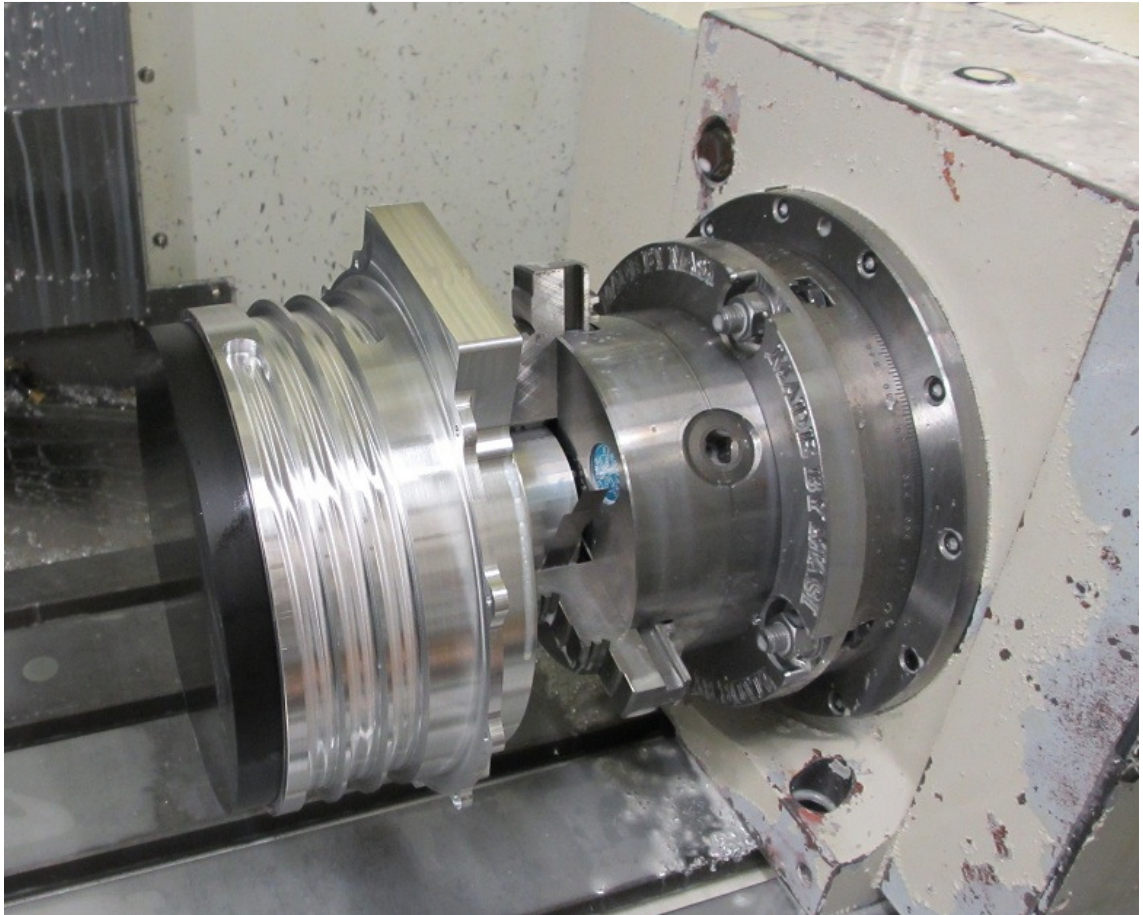
Muodonmuutos oli ongelma, johon täytyi löytää ratkaisu. Runkojen välisen sovitteen pitää olla tarkka, jotta akseli kohdistuu voimansiirtoon hyvin. Ulkorungon laakeripesässä ei mitattu vastaavaa soikiomaisuutta, joten sisäpinta päätettiin viimeistellä kiinnittämällä kappale laakeripesästään erilliseen sapluunaan. Sisärunkojen valmistusta ei onneksi ollut ehditty aloittaa, joten sovitteen päähalkaisijaa kasvatettiin 0,3 mm. Edellä mainitulla tavalla soikiomaisuus saatiin eliminoitua kokonaan ja ulkorunkojen valmistus onnistui.



Kuva 22. Ulkorungon aihio Quaser MV154 P -työstökoneessa puristimessa.

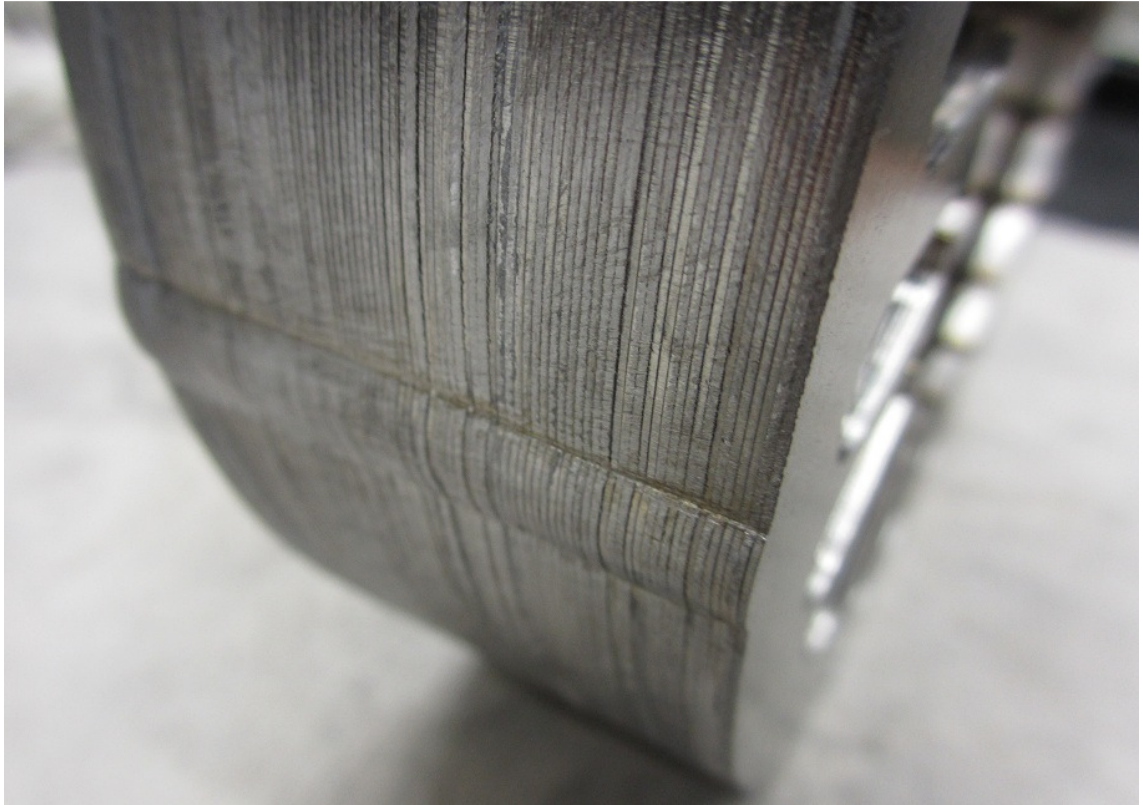
Sisärungon koneistuksessa samaa ongelmaa ei ollut, sillä lieriöpinnat suunniteltiin alun perin viimeisteltäväksi erillisessä sapluunassa. Kohdistusreiät ja kiinnityskierteet voi-

mansiirtoon sisältävä etupinta koneistettiin ensin, minkä jälkeen aihio kiinnitettiin sapluunaan niitä hyödyntäen. Lieriöpinnassa oleva vesitakin ura tehtiin työstökoneeseen saatavalla neljännellä akselilla omassa sapluunassa (kuva 23). Runko oli tuettu työn ajan kutistusliitoksella staattorin avaumaan asennetulla muovikiekolla. Muovikiekolla värinä saatiin eliminoitua lähes kokonaan.



Kuva 23. Valmis vesitakin ura. Kytentärasian vedonpoiston reiät tehtiin samalla kiinnityksellä.

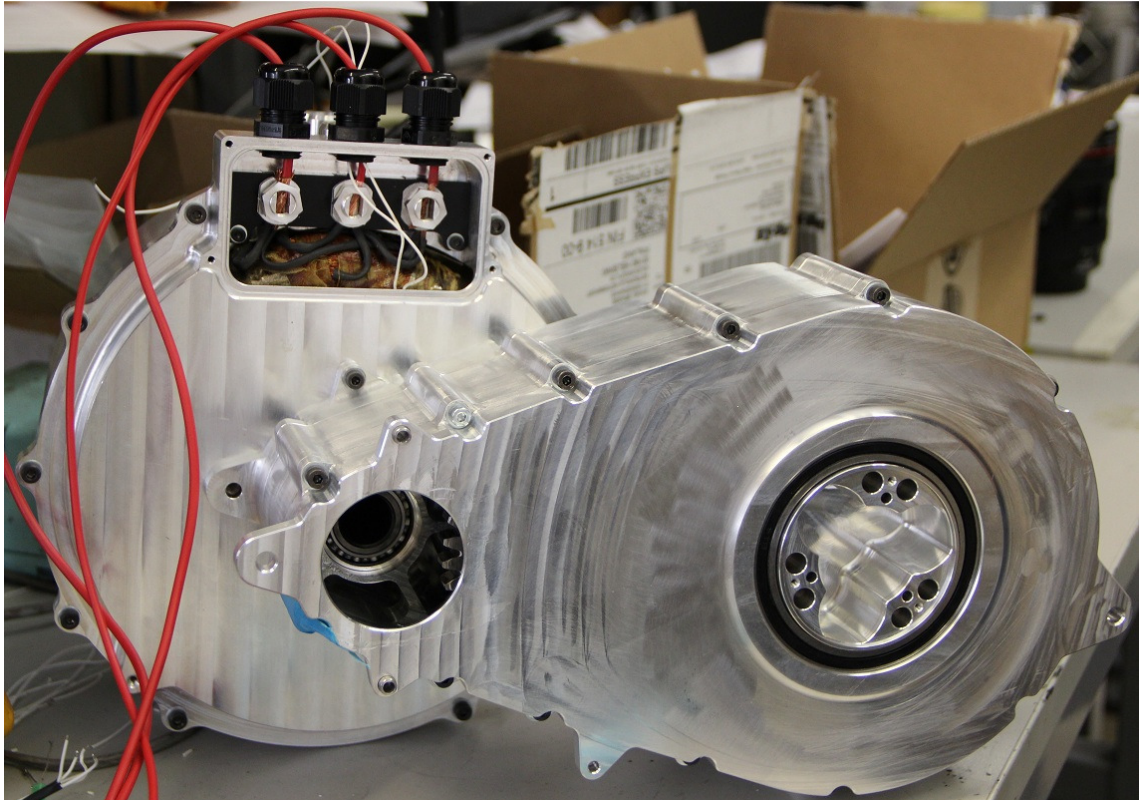
Sisärunkojen valmistuttua staattoreita sovitettiin niihin ja huomattiin, että tavoiteltua liukusovitetta ei saavutettu. Syyksi osoittautui staattorin epätasainen ulkopinta, jota ei saatu tasoitettua riittävästi käsin hiomalla ja viilaamalla. Pinnan epätasaisuudet nähdään hyvin kuvasta 24. Suurimmat epätasaisuudet poistettiin ja paketti päätettiin asentaa runkoon pienellä lämpösovitteella. Lämpösovitaminen aiheutti samalla sisärungon ulkopinnan turpoamisen, minkä vuoksi runkojen välinen liukusovite siirtyi ahdistuksen puolelle hankaloittaen kokoonpanoa.



Kuva 24.

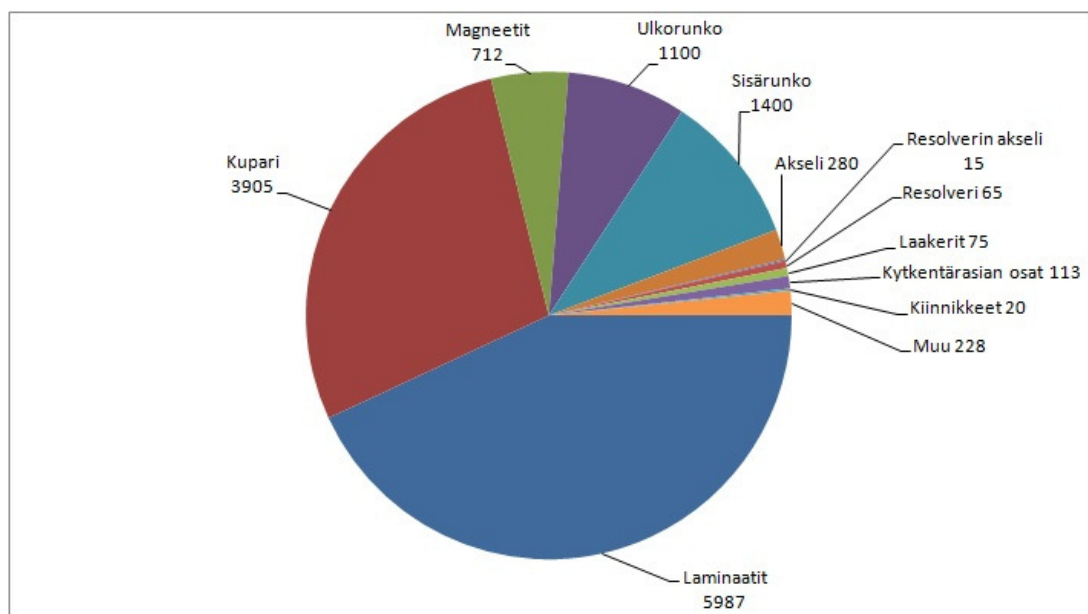
Staattorin ja rungon välisen lämpösovitteen aiheuttamien haasteiden lisäksi kahden lopullisen moottorin käämitykset epäonnistuivat tuntemattomasta syystä ja jouduttiin purkamaan. Autoon tarvittiin kuitenkin kaksi moottoria, joten yhden moottorin käämitys teetettiin ulkopuolisessa yrityksessä. Jäljelle jääneen omavalmisteisen staattorin eristysvastus koestettiin 1000 voltin jännitteellä ja eristysvastus oli noin 1000 Megaohmia.

Roottorin magneettien voimakkuuden takia roottorit laskettiin valmiisiin sisärunkoihin sähkökäyttöisellä nosturilla. Sisärungon laakeripesä vietiin lievästi ahdistuksen puolel-
le, sillä moottorin lämpiämisestä johtuen alumiininen laakeripesä laajenee laakerin teräksistä ulkokoolia voimakkaammin. Ahdistuksella pyrittiin estämään voimansiirron voiteluöljyn karkaaminen moottorin sisälle lämpötilan kasvaessa. Ennen autoon asentamista valmiita moottoreita koekäytettiin voimansiirron kanssa (kuva 25).



Kuva 25.

Mootoreiden osien valmistuttua ne punnittiin. Viimeinen punnitus tehtiin valmiille mootoreille. Painojakauma eri osille nähdään kuvasta 26.



Kuva 26. Moottorin osien massat grammoina. Kokonaismassan on 13900 g ja aktiiviset osat kattavat tästä 76 %.

Alkuperäinen arvio kokonaismassalle oli 12 500 g, joten moottorista tuli hieman ylipainoinen siihen nähden. Vyyhden päiden massaa ei huomioitu alkuperäisessä aktiivisen massan arviossa. Kuparin massan jakautumista uraan ja vyyhden päähän tarkastellaan keskimääräisen kokonaismittan l_{av} sekä staattorin pituuden l_{st} avulla.

$$m_u = \frac{2l_{st}}{l_{av}} m_{Cu} \approx 955 \text{ g} \quad (22)$$

$$m_v = \frac{l_{av}}{2l_{st}} m_{Cu} \approx 2950 \text{ g} \quad (23)$$

Kaavalla 23 laskettu vyyhden päähän sijoittuva massa m_v on siis kolminkertainen kaavalla 22 laskettuun uraan sijoittuvaan kupariin m_u nähden. Toisaalta moottorin toteutunut aktiivinen massa vastaa hyvin alkuperäistä arviota, joka oli 10,2 kg. Kuvasta 26 voidaan laskea, että toteutunut aktiivinen massa on noin 10600 g.

4 Mittaukset

4.1 Staattiset mittaukset

Prototyypimoottorin staattorin resistanssi mitattiin vaiheesta vaiheeseen kiinteäksi tehdyn tähtipisteen kautta erisuuruissa lämpötiloissa viilentämällä sekä lämmittämällä käämitystä nestekierron avulla. Mittaukset suoritettiin, kun kaikki kolme anturia näyttivät samaa lukemaa. Mitattuja arvoja verrattiin laskettuihin arvoihin, jotka saatiin vyyhden valmistuksessa käytetyn työkalun mitoista. Mittauksella pyrittiin löytämään vyyhtien valmistuksessa syntyneitä virheitä, joita voi olla muun muassa väärä kierroslukumäärä N sekä liian kireäksi tehdyssä vyyhdissä johtimen poikkipinta-alan laskeminen venymisen takia. Kiinteäksi tehdyn tähtipisteen sekä rinnakkaisten haarojen lukumäärän ollessa $a = 2$, yksittäisten vyyhtien resistansseja ei tunneta.

Vaiheesta vaiheeseen resistanssi lasketaan yhden vyyhtikierroksen keskipituudesta $l_{av} = 368 \text{ mm}$. Kuparin johtavuus

$$\sigma_{Cu} = \frac{\sigma_{Cu20C}}{1 + \theta \alpha_{Cu}}$$

Sijoitetaan resistanssin yhtälöön. Viilenetyn sekä lämmitetyn staattorin lämpötilan kasvut θ_1 ja θ_2 lasketaan erikseen. Kuparin johtavuus lasketaan näissä lämpötiloissa.

$$\theta_1 = (8,8 - 20)^\circ\text{C} = -11,2^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = (47,7 - 20)^\circ\text{C} = 27,7^\circ\text{C}$$

Kuparin johtavuus 20°C lämpötilassa on $\sigma_{\text{Cu}20\text{C}} = 58 \text{ MS}$ [13] ja kuparin johtavuuden lämpötilakerroin $\alpha_{\text{Cu}} = 3,81 \text{ mK}^{-1}$. Kuparin johtavuus lasketaan

$$\sigma_{\text{Cu}} = \frac{\sigma_{\text{Cu}20\text{C}}}{1 + \theta \alpha_{\text{Cu}}}. \quad (24)$$

Vaihejohtimen poikkipinta-ala S_{cs} lasketaan

$$S_{\text{cs}} = z_p a \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2. \quad (25)$$

Resistanssi lasketaan

$$R = \frac{l}{\sigma_{\text{Cu}} A} = \frac{N l_{\text{av}}}{\sigma_{\text{Cu}} a S_{\text{cs}}} 2. \quad (26)$$

Jossa rinnakkaisten johtimien lukumäärä $z_p = 9$ ja johteen nimellinen halkaisija $D = 0,5 \text{ mm}$ [13]. Rinnakkaisten haarojen lukumäärä $a = 2$ ja sarjaan kytkettyjen kierrosten lukumäärä $N = 100$. Sijoittamalla kaavat 24 ja 25 kaavaan 26 laskennalliset resistanssit saadaan ratkaistua. Tulokset esitetään taulukossa 2 mittausarvojen kanssa.

Taulukko 2.

$t^\circ\text{C}$	8,8	47,7
a-b mΩ	347	405
a-c mΩ	336	393
b-c mΩ	341	403
ka mΩ	341	400
laskettu mΩ	344	397

Lopullisen mallin resistanssit mitattiin ainoastaan yhdessä lämpötilassa ajan puutteen vuoksi. Lasketun ja mitatun keskiarvon ollessa hyvin lähellä toisiaan, yhden rinnakkai-

sen langan z_p lisäyksen vaikutus tarkistettiin laskemalla kaavoilla 24, 25 ja 26. Tulokset esitellään taulukossa 3. Taulukossa esitetty täyttösuhde lasketaan

$$k_f = \frac{S_{cs} z_Q}{Aa} 100 \%. \quad (27)$$

Urassa olevien johtimien lukumäärä $z_Q = 50$ ja uran poikkipinta-ala $A = 250 \text{ mm}^2$. Virtatiheys J lasketaan kaavalla 28. Nimellinen virta on 22,3 A.

$$J = \frac{I}{S_{cs}} \quad (28)$$

Taulukko 3. Johtimen poikkipinta-alan S_{cs} sekä täyttösuhteen k_f kasvaessa nimellinen virtatiheys J sekä resistanssi R laskevat.

z_p	9	10	
S_{cs}	3.53	3.93	mm^2
J	6.31	5.68	Arms/mm^2
k_f	35.4	39.3	%
$R_{47,7}$	397	357	mOhm

4.2 Dynaamiset mittaukset

Nimellistä tehoa tai muita suoritusarvoja ei päästy koskaan mittaamaan. Prototyypistä mitattiin ainoastaan vastajännite sekä rajoitettu nimellisteho lämmitysajolla. Mittaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Sähkökonelaboratoriossa.

Käytössä oli oheinen laitteisto

- Prototyypimoottori
- ACSM1-04-046A-4-taajuusmuunnin speed and torque -ohjelmalla
- Unimotor-servokäyttö
- Fluke 192b Scopemeter -oskilloskooppi

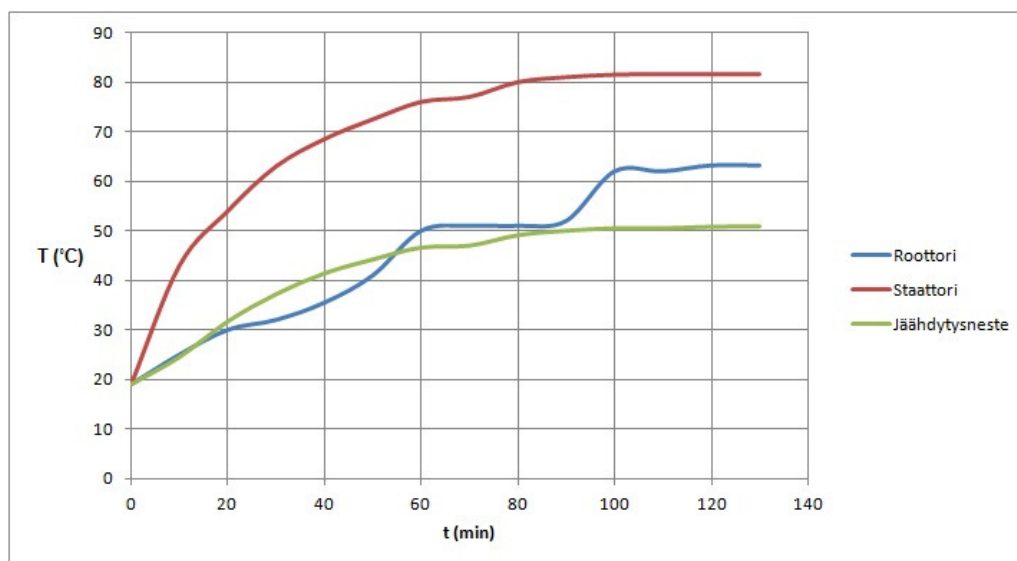
Servokäytön maksiminopeus oli 3000 RPM ja vastajännite mitattiin tällä nopeudella. Moottori oli kuitenkin mitoitettu 4600 RPM nimelliselle nopeudelle, joten vastajännite

3000 RPM nopeudella täytyi laskea. Vastajännite oli mitoitettu 215 V suuruiseksi 20 °C:n roottorin lämpötilassa.

$$u = \frac{3000}{4600} * 215 \text{ V} \approx 140 \text{ V}$$

Mitattu vastajännite oli 143 V roottorin lämpötilan ollessa 25 °C, joten siltä osin mitoitus oli onnistunut.

Lämmitysajo suoritettiin vesikierron kanssa. Käytössä olleen pumpun syöttöjännite säädettiin siten, että virtausnopeus vastaisi suurin piirtein autoon valitun pumpun tuottoa. Lämmönvaihdinta ei ehditty sovittaa osaksi kiertoa, joten nestettä kierrätettiin muovisen vesiastian kautta. Kierrossa käytetyn nesteen määrä arvioitiin samansuuruiseksi, mitä autossa tulnaisiin käyttämään. Lämpötasapaino saavutettiin noin 130 minuutin ajon jälkeen. Roottorin lämpötila jäi odotuksien vastaisesti varsin maltilliseen lämpötilaan. Lämmitysajon kuvaaja esitellään kuvassa 27.



Kuva 27. Roottorin pintalämpötila mitattiin käsin n. 10 minuutin välein, joten mitta-arvoissa näkyy huomattavia heittoa. Ympäristön lämpötila oli ajossa 19 °C.

Moottorin nopeus oli lämmitysajossa 3000 RPM, vääntömomentti 10,3 Nm ja teho n. 3,2 kW. Vääntö oli rajoitettu noin kolmasosaan, sillä taajuusmuunninta syötettiin verkovirrasta 16 A sulakkeen takaa. Taajuusmuuttajan mitaama virta oli ajon alussa 15,5 A ja laski loppua kohden arvoon 13,5 A, tehollisen syöttöjännitteen ollessa 219 V. Tehokerrointa ei mitattu, joten tehollista virtaa ja hyötysuhdetta ei tiedetä.

5 Yhteenveto ja jatkokehitys

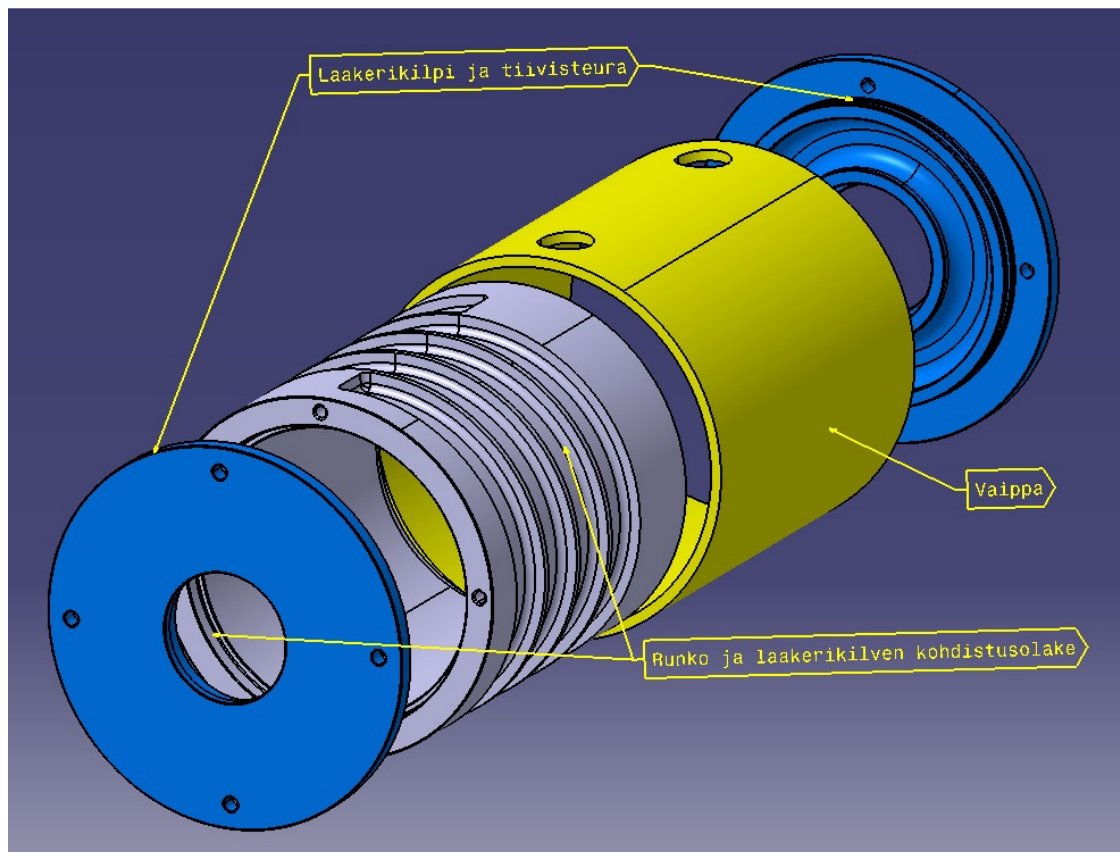
Työssä esiteltiin HPF13e-kilpa-auton moottoreiden suunnittelun sekä valmistuksen vaiheet. Puutteellisista testiarvoista huolimatta autoon päätettiin valmistaa omat moottorit. Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului prototyypin lisäksi yhteensä kolme moottoria, mutta aikataulusyistä moottoreita valmistettiin ainoastaan kaksi. HPF013e-kilpa-autolla ajettiin ensi kertaa heinäkuussa 2013 ja sillä osallistuttiin Baltic Open -kilpailuun Suomessa, Formula Student Hungary -kilpailuun Unkarissa sekä Formula Student Austria -kilpailuun Itävallassa samana vuonna elokuussa. Erilaisten tekniikkaongelmien vuoksi auton testaaminen jäi lyhyeksi ja suorituskyvyn säätämisen sijaan autoa korjattiin jatkuvasti. Ongelmien vuoksi Unkarissa osallistuttiin ainoastaan kilpailun staattisiin osioihin. Itävallan kilpailuun ongelmat saatiin korjattua, mutta siinä vaiheessa oli jo liian myöhäistä. Kaikesta huolimatta autoon valmistetut moottorit toimivat lähes täydellisesti ja kaiken opitun pohjalta uuden moottorin kehitystyön aloittamiseen on hyvä pohja.

Käyttökohteessaan moottoreiden lämpötilat nousivat endurance-osion mittaisissa testiajoissa korkeintaan 70–80 °C lämpötilaan, mikä varmistettiin taajuusmuuttajan reaaliaikaisista parametreista heti ajon päätyttyä. Vasemmanpuoleisen moottorin lämpötila oli odotetusti oikeanpuoleista moottoria matalampi johtuen jäähdytysjärjestelmän rakenteesta. Tarkkoja moottoreiden tai jäähdytysnesteen lämpötiloja ei tiedetä, sillä auton tiedonkeruujärjestelmää ei koskaan käytetty testi- tai kilpailukauden aikana. Reaaliaikaisista lämpötiloista voidaan kuitenkin päätellä, että 16 kW nimellinen akseliteho riittää tämän kokoiseen autoon hyvin.

Moottoreihin valittujen rakenneratkaisujen mielekkyyttä, onnistuneisuutta sekä toimivuutta puntaroitiin kaiken aikaa kehitystä ja oppimista ajatellen. Lopputuloksen perusteella kaikki ratkaisut onnistuivat ja toimivat, mutta osa näistä osoittautui hankalaksi tai kannattamattomaksi toteuttaa.

Kaksiosainen runkorakenne oli vesitakin tiivistyksen kannalta varsin yksinkertainen ja toimiva. Moottorin kokoonpanon kannalta kaksiosaisuus oli toisaalta haittaava tekijä muun muassa roottorin paikalleen laskemisessa. Runkojen välinen tahaton ahdistusovite hankaloitti myös kokoonpanoa. Kiinteän sisärungon päädyn vuoksi staattorit on pakko käärittää ennen asennusta. Kokoonpanon helpottamiseksi runkorakenne voitaisiin muuttaa neliosaiseksi, missä laakerit asennetaan ensin moottorin akselille ja erillisiin laakerikilpiin sen jälkeen, kun roottori on laskettu staattoriin. Staattorin laminaatit

asennettaisiin runkoon lämpösovitteella ilman liimaa ja käämitys tehtäisiin vasta tämän jälkeen. Moottorin tiivistys toteutettaisiin laakerikilven lieriöpinnasta o-rengastiivistimillä. Vesitakin päälle tehtäisiin esimerkiksi alumiiniputkesta vaippa, johon nesteen tulo- ja lähtöliittimet hitsataan kiinni. Vesitakki suljettaisiin vaipan ja rungon välistä sopivalla tiivistemassalla. Kehitysmallin perusrakennetta havainnollistetaan kuvassa 28. Kuvasta puuttuu edellä mainitut vesiliitokset sekä vaipan tiivistys. Aktiiviset osat ja moottorin akseli on jätetty myös pois. Moottorin ulkohalkaisijaa on pienennetty, sillä tämä on kehityksen toivottu suunta massan pienentämäksi. Oleellisin puuttuva rakenne on kytkentärasia, joka mahdollisesti jätettäisiin kokonaan pois. Painojakoa esittävästä kuvasta 26 nähtiin, että kytkentärasian osat itsessään ovat kohtuullisen painoiset ja osien valmistaminen ei ollut kovin vaikeaa. Kytkentärasian suurin ongelma oli autossa vaikeasti saavutettava sijainti.



Kuva 28.

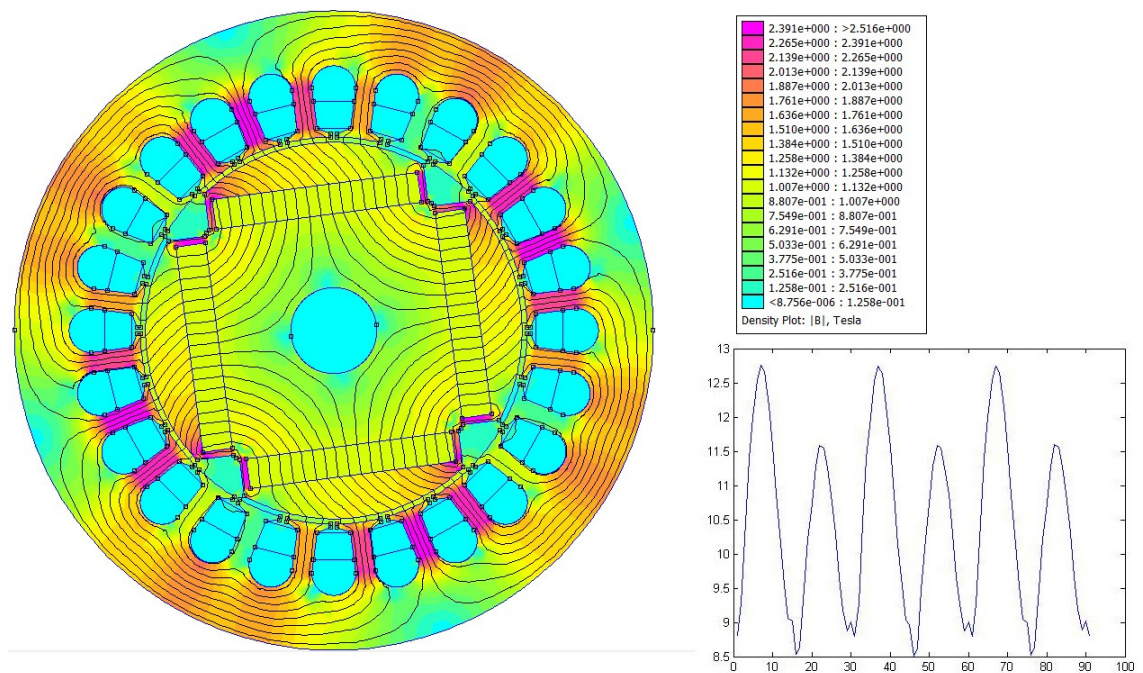
Runkokappaleiden koneistaminen oli yksinkertainen toimenpide, sillä oikeaan geometriaan sekä riittävään mittatarkkuuteen päästiin koneistamalla kappaleet sapluunoissa sarjatyönä. Toisaalta työstöaika sekä materiaalihukka olivat suuret, sillä rungot työstet-

tiin umpiaineesta. Hukkaprosentti oli noin 90. Runkojen valmistamista harkittiin valamalla, mutta tämän arveltiin olevan liian kallista teetettynä, minkä lisäksi valetut kappaleet joutuisi joka tapauksessa viimeistelemään koneistamalla. Kokonaan koneistettuihin kappaleisiin aihiot saatiin sponsoroituna ja työ tehtiin itse, joten rahalliset kustannukset koostuivat työhön tarvittavista työkaluista. Rungon materiaaliksi valittu 7075-alumiini osoittautui nopeasti ja voimakkaasti hapettuvaksi pelkällä vedellä toteutetussa jäähdytysjärjestelmässä. Vesitakkiin muodostuneen oksidikerroksen ei kuitenkaan havaittu aiheuttavan jäähdytysongelmia. Runkojen pinnoittaminen anodisoimalla olisi saattanut poistaa ongelman, mutta tähän ei aika riittänyt. Kehitystä ajatellen rungon materiaaliksi voitaisiin valita esimerkiksi 6082-alumiini, joka ei hapetu yhtä voimakkaasti.

Suurimmaksi ongelmaksi huomattiin, että moottoriin 2Z-tiivisteellä valittu etulaakeri pääsi vuotamaan voimansiirrosta käytetyn voiteluöljyn moottoreiden sisään. Ongelma ratkaistiin vaihtamalla tilalle 2RSR-tiivistetty laakeri. Tämän jälkeen tosin moottorin nopeus rajoittui laakerin asettamaan 8100 RPM nopeuteen, joka vastaa ajonopeutta n. 83 km/h. Nopeusraja yritettiin ylittää, jonka seurauksena tiivistys alkoi vuotaa uudelleen. Tässä vaiheessa testikausi oli jo päättynyt ja voimansiirron tarvitsi kestää enintään 50 kilometriä ajoa, joten asialle ei tehty sen enempää toimenpiteitä. Kehityskohteena moottorin akselin halkaisijaa täytyy pienentää jäykkyyden kustannuksella, mikäli moottorin suunnittelee yhtä korkealle käyttönopeudelle. Pienentämällä akselin halkaisijaa myös laakeri ja sen tiivistyshalkaisija pienenevät, minkä seurauksena nopeusraja kasvaa. Esimerkiksi korvaamalla moottorissa etulaakerina käytetty 61906-2RSR-laakeri sisähalkaisijaltaan viisi millimetriä pienemmällä 61905-2RSR-laakerilla nopeusraja nousee 11 000 RPM arvoon.

Tämän työn jälkeisiin toimenpiteisiin kuuluu edellä mainittujen puuttuvien mittaustulosten hankkiminen. Mittaukset suoritetaan kahden käytetyn moottorin avulla siten, että toinen moottori tuottaa väännön ja toinen toimii kuormageneraattorina. Momenttia mitataan moottoreiden akseleiden väliin tulevalla momenttianturilla. Tuloksien perusteella aloitetaan uuden moottorimallin kehitystyö. Kehitystyössä yksi mahdollisuus on käyttää projektin aikana aloitettua moottorin suunnittelutyökalua, joka perustuu osittain analyytisiin laskumenetelmiin ja osittain väännön laskentaan FEA:n avulla. Työkalu perustuu Matlab-skriptiin, joka käyttää FEMM:ä. FEMM on magneettisten ongelmien ratkaisuun tarkoitettu ilmainen 2D-FEA-ohjelma, jolla voidaan myös ratkaista sähköstaattisia ongelmia sekä lämpö- ja sähkövirtaongelmia. Työkalun toimivuutta on testattu antamalla sille tässä työssä käsitellyn moottorin lähtöarvot. Työkalu laskee moottorin aktiivisten

osien geometrian lähtöarvojen perusteella analyttisillä laskuilla kohtuullisella tarkkuudella. Laskennan jälkeen geometriasta luodaan viivamalli FEMM:ä. Viivamalliin määritetään materiaalit ja laskenta aloitetaan. Laskenta tapahtuu for-loopissa, jossa roottorin asentoa sekä vaihevirtoja muutetaan askeltaen. Jokaisen laskun tulos tallennetaan jälkitarkastelua varten. Kuvassa 29 nähdään moottorista tehty FEMM-malli sekä Matla-biin tallennettu vääntökuvaaja. Vääntö on keskimäärin noin 10 Nm, joka on vähemmän kuin mitoituksessa saatu arvo. Työkalu on vielä kehitysasteella, joten tulosta voidaan pitää hyvänä alkuna.




Kuva 29. Vasemmalla FEMM-malli ja alaoikealla vääntökuvaaja. Vääntökuvaajan vaakakselilla on roottorin kulma ja pystyakselilla roottorin vääntömomentti.

Lähteet

- 1 Lepa, Erko. 2012. Sähkömoottorin mitoittaja, ABB Oy, Helsinki. Keskustelu. 30.5.2012.
- 2 Keitamo, Jori. 2012. Sähkömoottorin mitoittaja, ABB Oy, Helsinki. Keskustelu. 30.5.2012.
- 3 Formula SAE -säännöt. 2013. Verkkodokumentti. SAE International. <<http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf>> 2013. Luettu 1.1.2013.
- 4 Bearing Design Principles. 2013. Verkkodokumentti. Schaeffler Group. <<http://medias.ina.de/medias/en!hp.tg/>>. Luettu 1.1.2013.
- 5 Automotive Handbook. 2007. Robert Bosch GmbH. 7th edition. Plochingen: Robert Bosch GmbH.
- 6 Technical Data Sheet Hysol 9514. 2012. Verkkodokumentti. Loctite. <http://tds.henkel.com/tds5/search.asp?t=9514&submit2=Search&Q_PROP7=0&Q_PROP18=0&Q_PROP22=0>. Luettu 1.1.2013.
- 7 Alumiinit. 2013. Verkkodokumentti. ThyssenKrupp Aerospace Finland Oy. <<http://www.thyssenkrupp.fi/alumiinit/alumiinit/alumiinit>>. Luettu 1.1.2013.
- 8 O-ring gland design. 2013. Verkkodokumentti. Eriks. <<http://o-ring.info/en/technical%20manual/ERIKS%20-%20Technical%20Manual%20-%20O-Ring%20Gland%20Design%20Information.pdf>> 2013. Luettu 1.1.2013.
- 9 Resolver system structure. 2013. Verkkodokumentti. Tamagawa Seiki Co Ltd. <<http://www.tamagawa-seiki.com/english/lvdt/pdf-resolver.pdf>> 2013. Luettu 1.1.2013.
- 10 Brushless resolvers based on a novel automatic winding method. 2013. Verkkodokumentti. Tamagawa Seiki Co Ltd. <<http://www.tamagawa-seiki.com/pdf/download/1507N14EJ.pdf>> 2013. Luettu 1.1.2013.
- 11 ACSM1-04 Firmware manual speed and torque control program. 2012. Verkkodokumentti. ABB Oy. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/12175da0832b2259c1257aca0048565e/\\$file/UMFI180x1_en.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/12175da0832b2259c1257aca0048565e/$file/UMFI180x1_en.pdf)> 2012. Luettu 1.1.2013.
- 12 SFS-ISO 1940-1. Mechanical vibration. Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state. 2003. Sveitsi: International Organization for Standardization.

- 13 Product information Dasol 180. 2013. Verkkodokumentti. Liljedahl.
<<http://www.lww.se/wp-content/uploads/2013/05/DASOL-180-solderable.pdf>>
2013. Luettu 1.1.2013.

Moottorin lasketut tiedot

ABB Oy Motors and Generators		Classifying code or document type STUDENT FORMULA PERMANENT MAGNET MOTOR CALCULATED DATA				
Department/Author PGD100 / Erko Lepa	Date of issue 2012-08-16	Lang. En	Rev. date 2012-08-16	Our ref. Metropolia		
Customer ref.	Saving ident		Rev./Changed by A / Erko Lepa		Pages 1/1	

Machine type code	PMM 4P
Machine type	Permanent Magnet Synchronous Motor
Protected by enclosure	IP 54
Method of cooling	IC 7A1W7
Insulation / Temp. rise	Class F / Class F
Standards	IEC
Supply	Frequency converter
Duty type	S1
Connection of stator winding	Star
Rated output	8.0 kW
Nominal voltage (calculated ACrms)	222.4 V
Back EMF (nominal speed and temperature)	201.2 V
Back EMF (max.op. speed and 20 °C temp.)	290 V
Nominal frequency	153.3 Hz
Nominal speed	4600 rpm
Maximum operating speed	6000 rpm
Minimum operating speed	0 rpm
Nominal current	22.3 A
Power factor	0.989 (underexcited)
Efficiency	91.0 %
Torque on shaft	16.5 kNm
Phase resistance at 20 °C R1PH20	0.178 Ohm
Synchronous direct axes inductance Ld	3.084 mH
Synchronous quadrant axes inductance Lq	5.926 mH
Stray inductance Lo	0.305 mH
Direction of rotation	Bidirectional
Inertia of rotor	Not calculated kgm ²
Rotor weight	2.81 kg
Total weight of generator	Approximately 12.5 kg
Bearings	Antifriction

DC bank information:
360 V open circuit with 100% full load
318 V nominal voltage
258 V minimum voltage
Nominal current 40A
Capacitance of the DC bank 20Ah

Note 1: All machine data is subject to tolerances in accordance with IEC.
Note 2: Power of fan motors is not taken into account to efficiency calculations
Note 3: The values given are not guaranteed. Tolerance for efficiency is -10% accordingly to IEC 60034-1

Rev.	Date	Prepared by	Division/ Department	Description
A	2012-08-16	E. Lepa	DMMG/PGD100	Original data

ABB Oy

Electrical Machines	Visiting Address Strömbergintie 1 B HELSINKI	Postal Address P.O.Box 186 FIN-00381 HELSINKI Finland	Telephone +358 10 22 11	Telefax +358 10 222 2021
---------------------	--	--	----------------------------	-----------------------------