



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aapo Rinkineva

HIGH SPEED -MOOTTORIN OIKOSULKU-  
RENKAAN TUKIVANTEEN SUUNNITTELU  
VALUN SISÄÄN

ABB Oy

Tekniikka  
2021

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Aapo Rinkineva
Opinnäytetyön nimi	High speed -moottorin oikosulkurenkaan tukivanteen suunnittelu valun sisään
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	36 + 1 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala & Jouni Ikäheimo

---

Opinnäytetyö tehtiin Vaasan ABB:n Motors and Generators -yksikön tutkimus- ja tuotekehitysosastolle. Työn tarkoituksena oli suunnitella suurnopeusmoottorin oikosulkurenkaan tukivanteet alumiinivalun sisään ja tarkastella niihin kohdistuvia jännityksiä suurella kierrosnopeudella.

Työn materiaaleina ja lähteinä käytettiin ABB:n omia dokumentteja, Internet -artikkeleita sekä väitöskirjoja. Oikosulkurenkaan tukivanteet suunniteltiin alumiinivalun sisään siten, että alumiinivalu pääsee muodostamaan yhtenäisen oikosulkurenkaan. Tukirenkaat suunniteltiin Fusion 360-ohjelmistolla, jonka jälkeen piirustukset lähetettiin Veslatecille laseroitavaksi ja hitsattavaksi.

Simulointimallia tutkiessa voitiin havaita, että materiaaliin kohdistuvat jännitykset olivat sallituissa rajoissa, eivätkä ne ylittäneet maksimirasituksen rajaa. Rengaspakalle keskipakovoimien vaikutuksia simuloitiin 10 000 r/min nopeudella.

## ABSTRACT

Author	Aapo Rinkineva
Title	Design of the Support Rim of a Short-circuit Ring Inside Casting for a High-speed Motor
Year	2021
Language	Finnish
Pages	36 + 1 Appendix
Name of Supervisor	Marko Iskala & Jouni Ikäheimo

---

This thesis was made for ABB Motors and Generators, Vaasa R&D department. The purpose of the thesis was to design the support rims of a short-circuit ring inside the aluminium casting for a high-speed motor and study the stresses applied to them at a high rotational speed.

ABB's own documents, Internet articles, and doctoral theses were used as materials and sources for the thesis. The support rims of a short-circuit ring were designed inside the aluminium casting so that the aluminium cast can be accessed to form a uniform short-circuit ring. The support rims were designed with the Fusion 360 software, after which the drawings were sent to Veslatec for lasering and welding.

While studying the simulation model, it was found that the stresses on the material were within the allowable limits and did not exceed the maximum stress limit. The effects of centrifugal forces on the ring stack were simulated at 10 000 r/min.

---

Keywords	High speed motor, short-circuit ring, design and centrifugal force
----------	--

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO.....	10
1.1	Tavoitteet.....	10
1.2	Aineisto .....	10
1.3	Toimeksiantaja .....	11
1.3.1	ABB Oy Motors and Generators.....	11
1.3.2	ABB Oy Suomessa.....	11
2	SUURNOPEUSMOOTTORIN RAKENNE.....	13
2.1	Staattori .....	13
2.2	Uramäärä ja käämitys .....	13
2.3	Roottori .....	14
2.4	Suurnopeusmoottoreiden taajuusmuuttajakäyttö .....	15
2.5	Oikosulkurengas.....	16
3	MOOTTORIN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE.....	17
3.1	Roottorihäviöt.....	17
3.2	Staattorihäviöt .....	18
3.3	Hyötysuhde .....	19
4	TYÖN ETENEMINEN .....	20
4.1	Tiedon keräys .....	20
4.2	Tukivanteen suunnittelu valun sisään .....	20
4.3	Lopputulos .....	22
5	ELEMENTTIMENETELMÄN ANALYYSI .....	25
5.1	Keskipakovoima .....	25

5.2 Tulokset.....	25
6 TYÖN TARKASTELU .....	33
6.1 Johtopäätelmät.....	33
6.2 Kehitysideat .....	33
7 YHTEENVETO .....	34
LÄHTEET .....	35
LIITTEET .....	36

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Vaasan ABB:lla valmistettavia moottoreita. /1/ .....	12
<b>Kuva 2.</b> Rakenteeltaan yhtenäinen massiiviroottori. /3, s. 39/ .....	15
<b>Kuva 3.</b> Havainnekuva vaihteisto- ja taajuusmuuttajakäytön eroista /7, s. 13/ ..	15
<b>Kuva 4.</b> Oikosulkurengas roottorin päässä. ....	16
<b>Kuva 5.</b> Dynamolevy .....	16
<b>Kuva 6.</b> Moottorin häviöistä tehty kaavio. /3, s. 24/ .....	17
<b>Kuva 7.</b> 3D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat suorassa. ....	21
<b>Kuva 8.</b> 3D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat vinossa. ....	21
<b>Kuva 9.</b> 2D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat suorassa. ....	22
<b>Kuva 10.</b> 2D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat vinossa. ....	22
<b>Kuva 11.</b> Valmis hitsattu rengaspakka, kun puolat ovat suorassa. ....	23
<b>Kuva 12.</b> Valmis hitsattu rengaspakka, kun puolat ovat vinossa. ....	24
<b>Kuva 13.</b> Alumiiniin kohdistuvat jännitykset, edestäpäin. ....	26
<b>Kuva 14.</b> Alumiiniin kohdistuvat jännitykset, takaapäin. ....	27
<b>Kuva 15.</b> Rengaspakkaan kohdistuvat jännitykset, edestäpäin. ....	28
<b>Kuva 16.</b> Rengaspakkaan kohdistuvat jännitykset, takaapäin. ....	29
<b>Kuva 17.</b> Rengaspakka roottorin päässä. ....	30
<b>Kuva 18.</b> Pelkät alumiiniosat. ....	31
<b>Kuva 19.</b> Siirtymät, 10 000 r/min. ....	32

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABB	Asea Brown Boveri
ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
Fusion 360	Tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto
FEA	Finite Element Analysis (elementtimenetelmän analyysi)
MPa	Megapascal (paineen / jännityksen yksikkö)
2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
r/min	Kierrosta minuutissa
$m$	Vaiheiden määrä
$v_{slot}$	Aikaharmonisten yliaaltojen järjestysluku
$\eta$	Hyötysuhde
$v$	Tilaharmonisten yliaaltojen järjestysluku
$q_s$	Urien määrä
$P_{anto}$	Antoteho
$P_{Cu,r}$	Kuparihäviöt roottorissa
$P_{Cu,s}$	Kuparihäviöt staattorissa
$P_{exc}$	Hajahäviöt staattorissa
$P_{Fe,r}$	Rautahäviöt roottorissa
$P_{Fe,s}$	Rautahäviöt roottorissa
$P_{fr,bearings}$	Sähkömoottorin laakerihäviöt
$P_{fr,total}$	Kitka- ja kaasuhäviöt roottorissa
$P_{otto}$	Ottoteho

$P_{r,loss}$	Roottorihäviöt
$P_{s,loss}$	Stattorihäviöt
$Q_s$	Stattoriurien määrä



## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Maksimijännitys eri kierrosnopeuksilla.

# 1 JOHDANTO

Suurnopeusmoottoreilla tarkoitetaan moottoreita, jotka pyörivät verkkotaajuuden mahdollistamaa pyörimisnopeutta nopeammin, eli niiden pyörimisnopeus on suurempi kuin mitä 50/60 Hz verkkovirrasta on mahdollista saada irti. Suurnopeusmoottoreilla ja induktiomootoreilla on sama toimintaperiaate, mutta moottorit eroavat käytetyistä roottoreista. Suurnopeusmoottoreilla käytetyn massiiviroottorin sijasta induktiomootoreilla on käytössä häkkikäämiroottori. /6/

Tässä työssä suunnitellaan kaksi eri variaatiota oikosulkurenkaan tukivanteista ja tutkitaan niiden eroavaisuuksia sekä niihin vaikuttavia keskipakovoimia. Opinnäytetyö tehtiin Vaasan ABB:n Motors and Generators -yksikön tutkimus ja tuotekehitys osastolle.

## 1.1 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella kaksi eri versiota tukirenkaista, joissa toisessa tukivanteet ovat suorassa ja toisessa vinossa sekä tarkastella oikosulkurenkaan tukivanteiden vaikutuksia moottorin käyttäytymiseen. Tarkoituksena on helpottaa prosessia ja lisätä kustannustehokkuutta, koska jos idea toimisi, roottorin molempiin päihin tarvitsisi kuin vain lisätä rengaspakat valussa, valaa ja sorvata normaalisti. Suurilla pyörimisnopeuksilla keskipakovoima alkaa venyttämään alumiinia ulospäin ja tietyillä nopeuksilla oikosulkurengasta täytyy tukea terässpannalla, joka on rosterista. Rosterista tehdyn terässpannan tekeminen on hankalaa, koska pyöreän renkaan tekeminen mittatarkaksi on todella haastavaa: ensin pitäisi mankeloida, koneistaa ja vielä hitsata. Tämän vuoksi uutta valusysteemiä lähettään kehittämään.

## 1.2 Aineisto

Aineistona käytetään valmistajien asiantuntemusta, kirjallisuutta, verkosta löytyviä julkaisuja ja tutkimuksia.

### 1.3 Toimeksiantaja

ABB syntyi tammikuussa 1988, kun sveitsiläinen Brown Boveri ja ruotsalainen Asea yhdistivät toimintansa. Nykyään ABB on johtava teknologian edelläkävijä, jonka tarjonta kattaa niin sähköistystuotteet, sähköverkkoratkaisut ja teollisuusautomaation kuin liikkeenohjauksen ja robotit. /4/

#### 1.3.1 ABB Oy Motors and Generators

Motors and Generators -liiketoimintalinja Suomessa panostaa korkean hyötysuhteen moottoreiden ja generaattoreiden tuotekehitykseen ja tutkimukseen. Suomessa Motors and Generators -yksikkö kehittää ja valmistaa moottoreita ja generaattoreita kaikille teollisuuden aloille ja sovelluksiin maailmanlaajuisesti. Suomessa tehtaat sijaitsevat Vaasassa ja Helsingissä. Helsingin tehtaalla valmistetaan ja kehitetään muun muassa kestopagneettimoottoreita, korkeajännitemoottoreita ja dieselgeneraattoreita. Vaasan tehtaalla on vastuu yhtiön pienjännitemoottoreiden tuotekehityksestä ja valmistuksesta vaativiin käyttöihin **(Kuva 1.)**. /2/

#### 1.3.2 ABB Oy Suomessa

ABB toimii Suomessa noin 20 paikkakunnalla ja se on yksi suurimmista työnantajista työllistäen noin 5 000 henkilöä. Tehtaat sijaitsevat Vaasassa, Helsingissä, Haminaassa ja Porvoossa. /9/



**Kuva 1.** Vaasan ABB:lla valmistettavia moottoreita. /1/

## 2 SUURNOPEUSMOOTTORIN RAKENNE

Yleisesti suurnopeusmoottoreiden pyörimisnopeus on 10 000 r/min – 100 000 r/min, joten pyörimisnopeus on suurnopeusmoottoreissa merkittävästi perinteistä sähkömoottoria suurempi. Suurin osa teollisuudessa käytettävistä sähkömoottoreista on induktiomootoreita, joiden pyörimisnopeudet rajoittuvat moottorin napapariluvun ja verkon taajuuden mukaan, kun taas suurnopeusmoottoreiden pyörimisnopeutta pystytään muuttamaan taajuusmuuttajan syöttötaajuutta muuttamalla. /10, s. 5/ Suurnopeusmoottorit sopivat hyvin kompressori-, puhallin- ja pumppusovelluksiin, koska suurnopeusmoottoreilla päästään suuriin akseli-tehoihin, kun taas induktiomootoreilla saadaan suurempi vääntömomentti. /3, s. 33/

### 2.1 Staattori

Suurnopeusmoottori on paljon herkempi staattorikämmityksen yliaalloille ilmevässä kuin tavallinen induktiomootori. Yliaaltoja pystytään vähentämään urien lukumäärän lisäämisellä staattorissa. Roottorille vaikuttavasta magnetomotorisesta voimasta pyritään saamaan mahdollisimman sinimuotoista, jolloin pystytään parantamaan suurnopeusmoottorin suorituskykyä. /7, s. 19/

### 2.2 Uramäärä ja käämitys

Staattorin suunnittelussa pyritään minimoimaan aika- ja tilaharmoniset yliaallot. 5. ja 7. yliaallot saavat aikaan 6. harmonisen yliaaltovirran roottorin pinnalle aiheuttaen kuusinkertaisella taajuudella vaikuttavan vääntömomentin roottoriin, joka saa aikaan moottorin tärinää. 6. harmonisen yliaaltovirran synnyttämää vääntömomenttia saadaan vähennettyä muuttamalla urien määrää. Aikaharmonisten yliaaltojen järjestysluvut pystytään laskemaan yhtälöllä

$$v_{slot} = 1 + 2mq_s k_{slot} = 1 + \frac{Q_s}{p} k_s, \text{ jossa} \quad (1)$$

$m$  = vaiheiden lukumäärä

$q_s =$  urien lukumäärä

$Q_s =$  staattoriurien lukumäärä

$k_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3,$  jne.

Tilaharmonisten yliaaltojen järjestysluvut pystytään laskemaan yhtälöllä

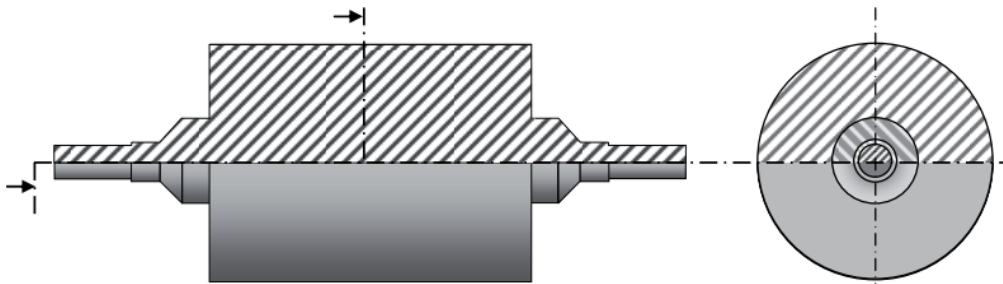
$$v = 2mk_s + 1, \text{ jossa} \quad (2)$$

$m =$  vaiheiden lukumäärä

$k_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3,$  jne. /3, s. 91-93/

### 2.3 Roottori

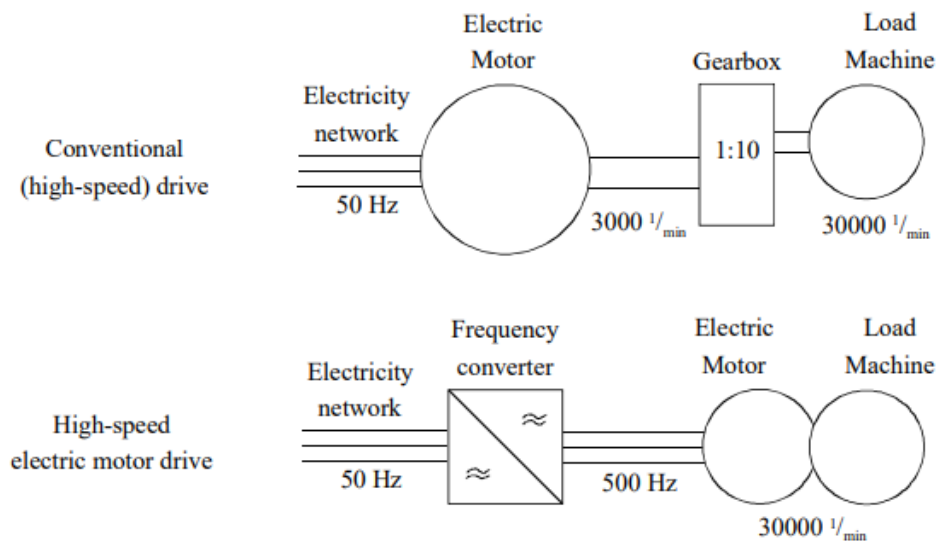
Roottorina voidaan käyttää sähkölevyistä valmistettua levyroottoria, tai rakenteeltaan yhtenäistä massiiviroottoria (**Kuva 2.**). Levyroottorin ohuen akselin johdosta se ei kestä suuria mekaanisia rasituksia, jolloin sitä ei yleensä käytetä suurilla pyörimisnopeuksilla. Massiiviroottori kestänee paljon paremmin suuria pyörimisnopeuksia, joten tyypillisesti suurnopeusmoottoreilla käytetään massiiviroottoria, kun taas levyroottorit sopivat hyvin induktiomoottoriin ja kestromagneettimoottoriin. Suurnopeusmoottorin pyörimisnopeuksilla roottoriin vaikuttavat merkittävät keskipakovoimat, jonka johdosta roottoriin kohdistuu huomattavia mekaanisia rasituksia ja värähtelyjä, jotka vaikuttavat roottorin suunnitteluun. Roottorin värähtelyjen johdosta laakerointiin vaikuttavat myös huomattavat merkittävät rasitukset. /8, s. 26/



**Kuva 2.** Rakenteeltaan yhtenäinen massiviroottori. /3, s. 39/

#### 2.4 Suurnopeusmoottoreiden taajuusmuuttajakäyttö

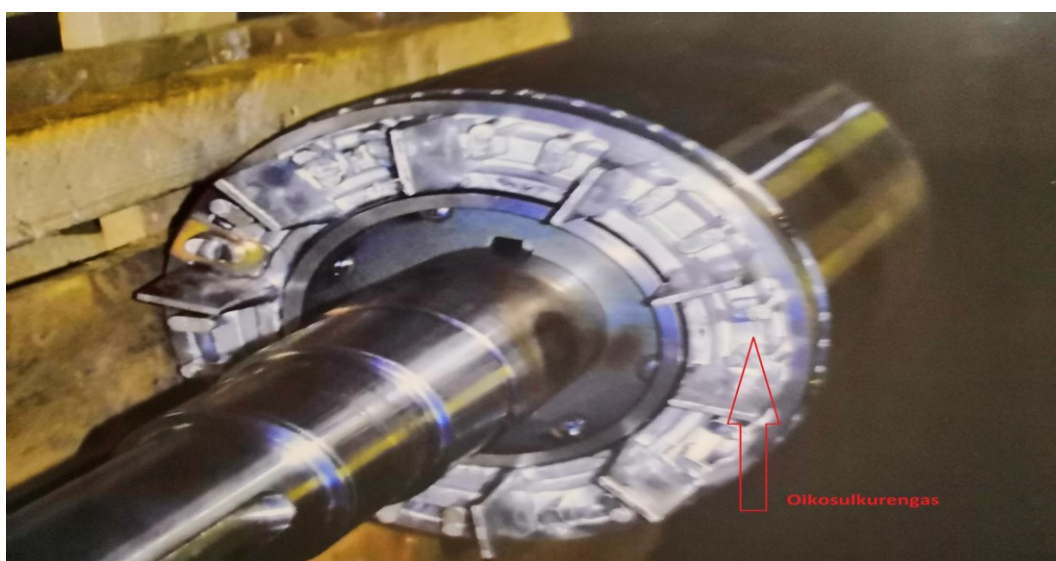
Toisin kuin perinteisellä induktiomotorilla, suurnopeuskäytöllä pyörevirtahäviöt kasvavat suuriksi suuren taajuuden johdosta ja taajuusmuuttajasta saatava virta ja jännite on sinimuotoista, joten se vaikuttaa merkittävästi suunnitteluun. /5, s. 94/ Suurilla pyörimisnopeuksilla vaihteisto saadaan poistettua (**Kuva 3.**). Taajuusmuuttajakäyttö ei tarvitse paljoa huoltoa ja se on kestävämpi vaihteistolliseen käyttöön verrattuna, mutta tuo paljon lisähäviöitä. /7, s. 11-13/



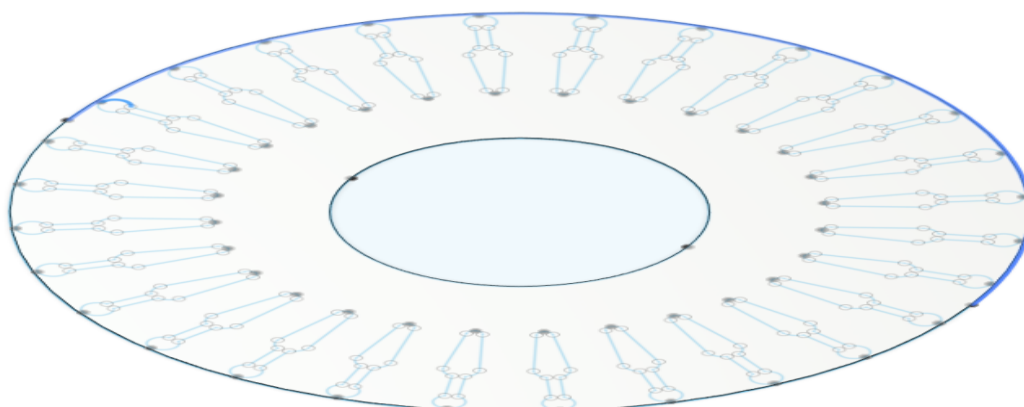
**Kuva 3.** Havainnekuva vaihteisto- ja taajuusmuuttajakäytön eroista /7, s. 13/

## 2.5 Oikosulkurengas

Roottorin molempiin päihin on asennettu oikosulkurenkaat (**Kuva 4.**). Roottori valmistetaan dynamolevyistä. Levyihin tehdään reiät johdinsauvoja varten (**Kuva 5.**), joita pitkin virta pääsee kulkemaan. Levyt pinotaan päällekkäin ja alumiinivalua pursotetaan levyjen välistä, jolloin lopputuloksena saadaan valetut oikosulkurenkaat roottorin päihin ja roottorissa kulkevat virrat pystytään yhdistämään yhtenäisellä virtapiirillä.



**Kuva 4.** Oikosulkurengas roottorin päässä.



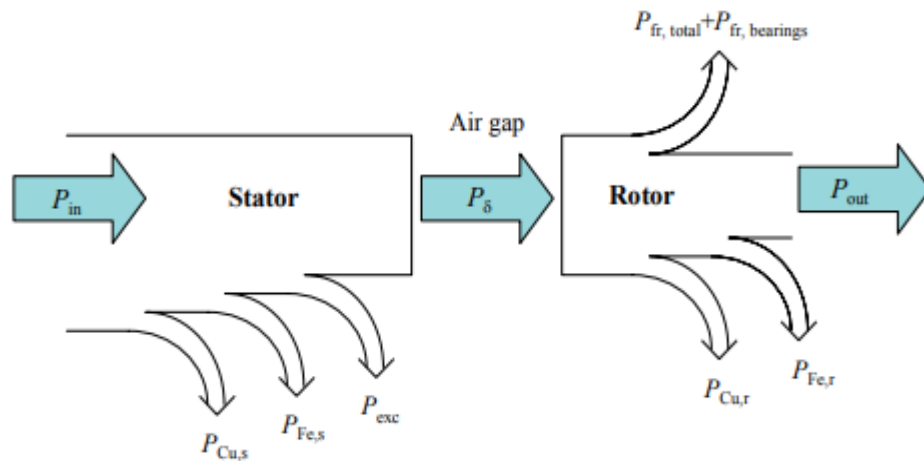
**Kuva 5.** Dynamolevy

Roottorin uriin valetaan alumiinisauvat.



### 3 MOOTTORIN HÄVIÖT JA HYÖTYSUHDE

Tässä luvussa kerrotaan sähkömoottorin häviöistä ja hyötysuhteesta. Häviöitä on kahden tyyppisiä, mekaaniset ja sähköiset häviöt. Kuvassa 6 nähdään moottorin erilaiset häviöt.



**Kuva 6.** Moottorin häviöistä tehty kaavio. /3, s. 24/

Staattorin aikaansaamia häviöitä ovat rautahäviöt  $P_{Fe,s}$ , kuparihäviöt  $P_{Cu,s}$  ja hajahäviöt  $P_{exc}$ , joihin staattori hävittää osan sisään menevästä ottotehosta  $P_{in}$ . Jäljelle jää vielä ilmaväliteho  $P_{\delta}$ , josta vähennetään roottorihäviöt. Roottorihäviöihin sisältyy rautahäviöt  $P_{Fe,r}$ , kuparihäviöt  $P_{Cu,r}$ , laakerihäviöt  $P_{fr, bearings}$  ja kaasusekä kitkahäviöt  $P_{fr, total}$ . Näiden häviöiden jälkeen jäljelle jää akseliteho  $P_{out}$ . /3, s. 24/ Luvuissa 4.1 ja 4.2 käsitellään näitä häviöitä erikseen.

#### 3.1 Roottorihäviöt

Roottorihäviöt koostuvat hystereesihäviöistä  $P_{hyst,r}$ , pyörrevirtahäviöistä  $P_{surf,r}$ , vääntömomentin tuottamiseen liittyvistä häviöistä  $P_{fund,r}$  sekä kaasuja ja kitkahäviöistä.  $P_{fr, total}$ . Nämä häviöt summaamalla saadaan laskettua roottorin kokonaishäviöt  $P_{r,loss}$  seuraavalla kaavalla:

$$P_{r,loss} = P_{fund,r} + P_{surf,r} + P_{hyst,r} + P_{fr, total}, \text{ jossa} \quad (3)$$

$P_{fund,r}$  = vääntömomentin tuottamiseen liittyvät häviöt

$P_{surf,r}$  = pyörrevirtahäviöt

$P_{hyst,r}$  = hystereesihäviöt

$P_{fr, total}$  = kaasu- ja kitkahäviöt

### 3.2 Staattorihäviöt

Kuten aiemmin todettiin, ilmavälin tehon suuruus riippuu staattorin aikaansaamista häviöistä. Kun tiedetään staattorin aikaansaamat häviöt, pystytään laskemaan ilmavälin tehon suuruus alla olevan kaavan mukaan:

$$P_{\delta} = P_{in} + P_{s,loss}, \text{ jossa} \quad (4)$$

$P_{in}$  = ottoteho

$P_{s,loss}$  = staattorihäviöt /3, s. 25/

Staattorin kokonaishäviöt pystytään laskemaan summaamalla rauta-, kupari- ja hajahäviöt yhteen seuraavan kaavan mukaan:

$$P_{s,loss} = P_{Cu,s} + P_{Fe,s} + P_{exc}, \text{ jossa} \quad (5)$$

$P_{Cu,s}$  = staattorin kuparihäviöt

$P_{Fe,s}$  = staattorin rautahäviöt

$P_{exc}$  = hajahäviöt

50 Hz:n sähkömoottoreille suunniteltavat staattorit eivät sovellu hyvin suurnopeuskoneilla käytettäväksi suuren taajuuden takia, sillä pyörrevirtahäviöt kasvavat liian suuriksi. Pyörrevirtahäviöihin pystytään vaikuttamaan staattorilevyn paksuudella. Mitä ohuempi staattorilevy on, sitä paremmin se ehkäisee pyörrevirtahäviöitä. /5, s. 94/

### 3.3 Hyötysuhde

Hyötysuhde tarkoittaa sitä, kuinka hyvin moottori kykenee hyödyntämään sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin hyötysuhde saadaan laskettua jakamalla mekaaninen teho pätöteholla seuraavan kaavan mukaan:

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} = \frac{P_{in} - (P_{r,loss} + P_{s,loss})}{P_{in}}, \text{ jossa} \quad (6)$$

$P_{anto}$  = antoteho

$P_{otto}$  = ottoteho

$P_{in}$  = syötetty pätöteho

$P_{r,loss}$  = roottorihäviöt

$P_{s,loss}$  = staattorihäviöt

## 4 TYÖN ETENEMINEN

Tässä luvussa kerrotaan suunnitteluprosessista. Suunnittelu koostuu kahden eri tukirenkaan piirtämisestä.

### 4.1 Tiedon keräys

Suunniteltuja tukirenkaita oli tarkoituksena kokeilla moottorissa M3JP 200, kaksinaavaisessa roottorissa, jossa akselin halkaisija on 70 mm. Tämän perusteella saatiin tukirenkaiden mitat.

Tukirenkaiden mitat ovat:

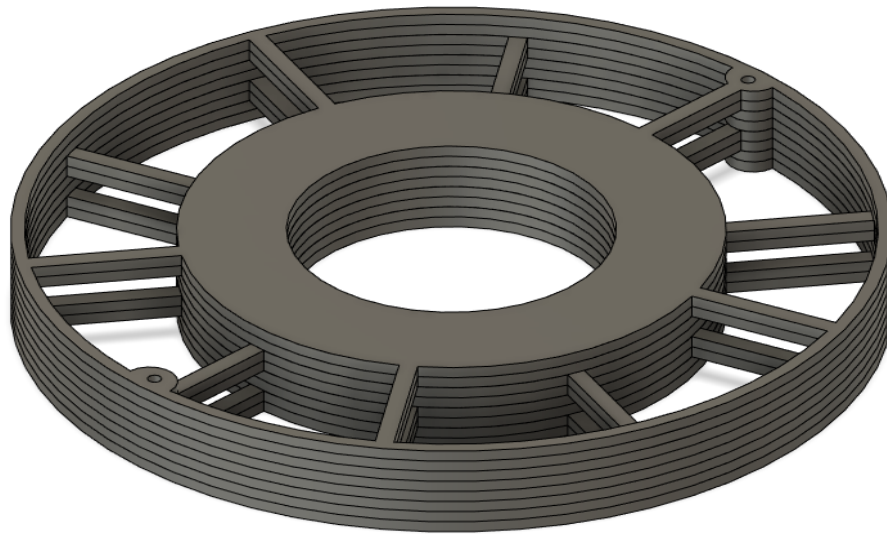
- Tukirenkaan sisähalkaisija = 70,1; ulkohalkaisija = 190,0; leveys = 3,0
- Tukirenkaan puolan leveys = 3,0

### 4.2 Tukivanteen suunnittelu valun sisään

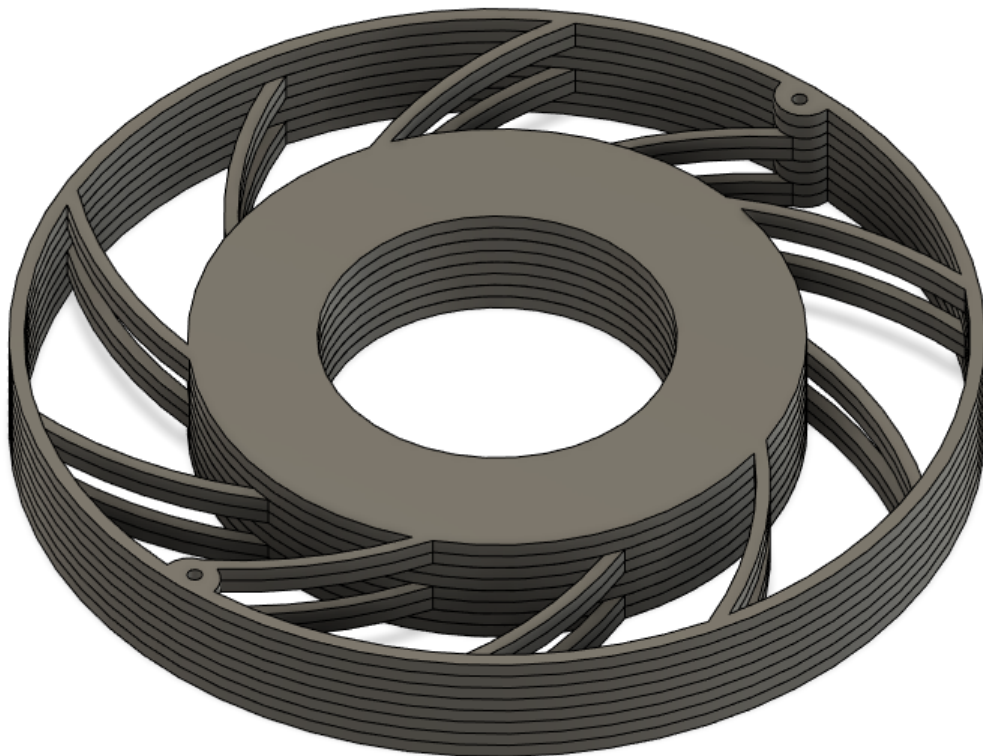
Tukirenkaiden puolat suunniteltiin siten, että sula alumiinivalu pääsee puolien välistä muodostamaan yhtenäisen oikosulkurenkaan. Aukon sisäreunan säde tulee olla oikosulkurenkaan sisäsäde ja siitä akselin reikää kohti levyn pitää olla umpinaista, eli käytännössä puolat eivät saa ulottua liian lähelle akselin reikää, jotta sula alumiini ei pääsisi pursuamaan muotin reunan ohi.

Tukirenkaiden päihin suunniteltiin halkaisijaltaan 3 mm:n paksuiset kohdistusreiät, joiden tarkoituksena on pitää tukirenkaat tiiviisti yhdessä, jotta ne eivät pääsisi liikahtelemaan hitsauksen aikana. Kohdistusreikiä suunnitellessa täytyi ottaa huomioon myös ulkokehän paksuus. Ulkokehän täytyy olla yhtä paksu joka paikasta, joten myös kohdistusreikien ympäriltä ulkokehän on oltava 3 mm. Jos ulkokehän paksuus jäisi jostakin kohtaa vajaaksi, niin silloin siihen kohtaan kohdistuisi suurempi rasitus kuin muihin kohtiin, jolloin pahimmassa tapauksessa tukirengas voisi haljeta kyseisestä kohtaa. Kuvissa 7-10 esitetään suunnitellut tukirenkaat.

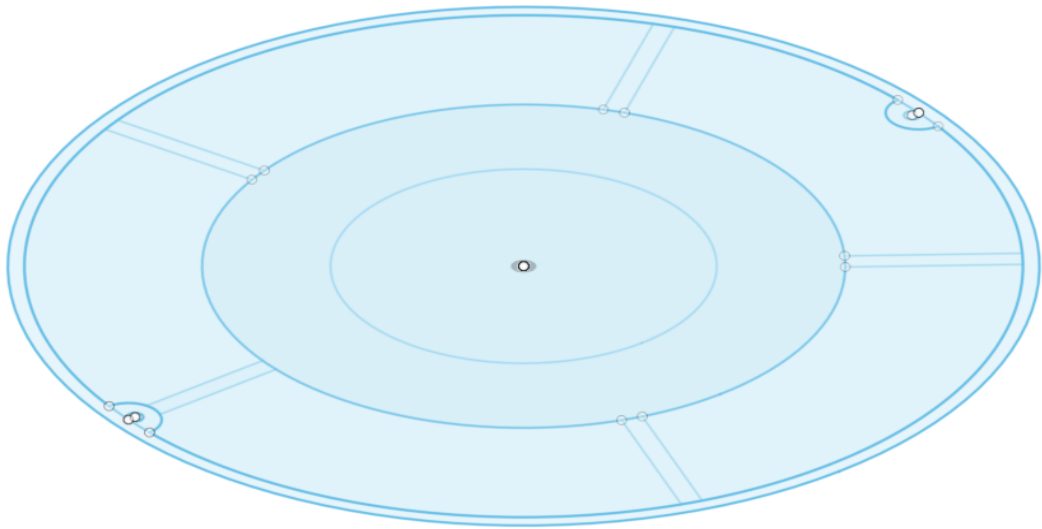
Tukirenkaat suunniteltiin Fusion 360-ohjelmistolla.



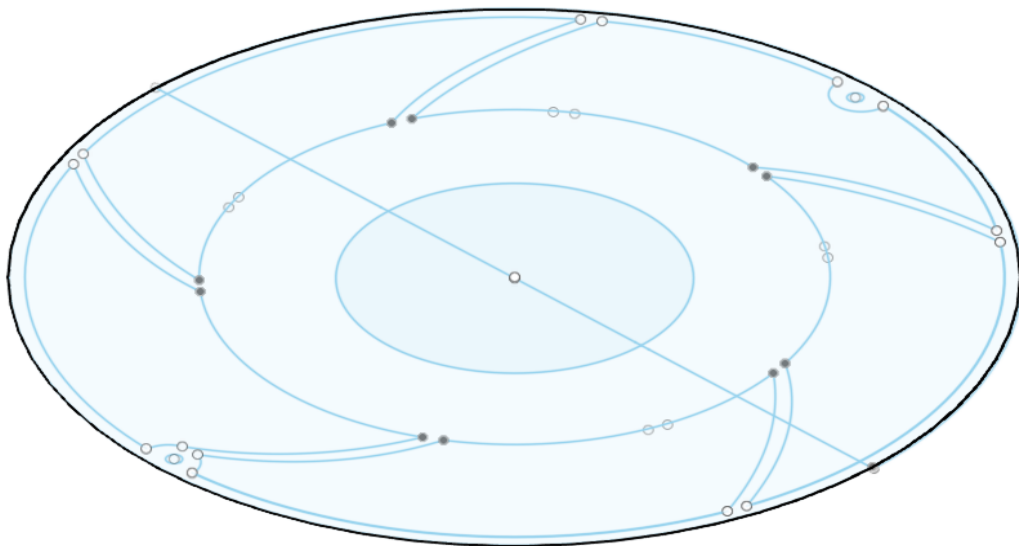
**Kuva 7.** 3D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat suorassa.



**Kuva 8.** 3D-kuva tukirenkaista, kun puolat ovat vinossa.



**Kuva 9.** 2D-kuva tukirenkaasta, kun puolat ovat suorassa.



**Kuva 10.** 2D-kuva tukirenkaasta, kun puolat ovat vinossa.

### 4.3 Lopputulos

Tukirenkaiden suunnittelun jälkeen kuvat lähetettiin Veslatecille, joka on lasertuotantoon erikoistunut teknologiayritys. Renkaat valmistettiin käyttäen laserleikkausta, koska sillä saadaan paras mahdollinen mittatarkkuus.

Kun tukirenkaat olivat laserleikattu, yksittäiset 3 mm:n paksuiset tukirenkaat ka-  
sattiin päällekkäin siten, että kaksi rengasta tulee aina saman suuntaisesti ja seu-  
raavat kaksi tukirengasta 180 asteen kulmassa. Näitä tukirenkaita tulee yhteensä  
kahdeksan kappaletta yhteen rengaspakkaan, jotka lopuksi hitsataan yhteen  
**(Kuva 11)**. Täten sulaa alumiinivalu pääsee puolien välistä, muodostaen yhtenäisen  
oikosulkurenkaan.

Tukirenkaat valmistettiin ruostumattomasta teräksestä, koska ruostumaton teräs  
on ei-magneettista materiaalia ja omaa hyvät mekaaniset ominaisuudet, kestäen  
erityisen hyvin keskipakovoimien vaikutuksia. Minkään roottoriuran ei pitäisi peit-  
tyä kokonaan puolien ollessa vinossa **(Kuva 12.)**. Jos puola on suora, se osuu väis-  
tämättä jonkin roottoriuran kohdalle, jolloin puola tukkii uran ja ura putoaa koko-  
naan pelistä pois. Tällöin sähkö ei kulje, joka aiheuttaa epäsymmetriaa ja värinää  
roottorissa.



**Kuva 11.** Valmis hitsattu rengaspakka, kun puolat ovat suorassa.



**Kuva 12.** Valmis hitsattu rengaspakka, kun puolat ovat vinossa.



## 5 ELEMENTTIMENETELMÄN ANALYYSI

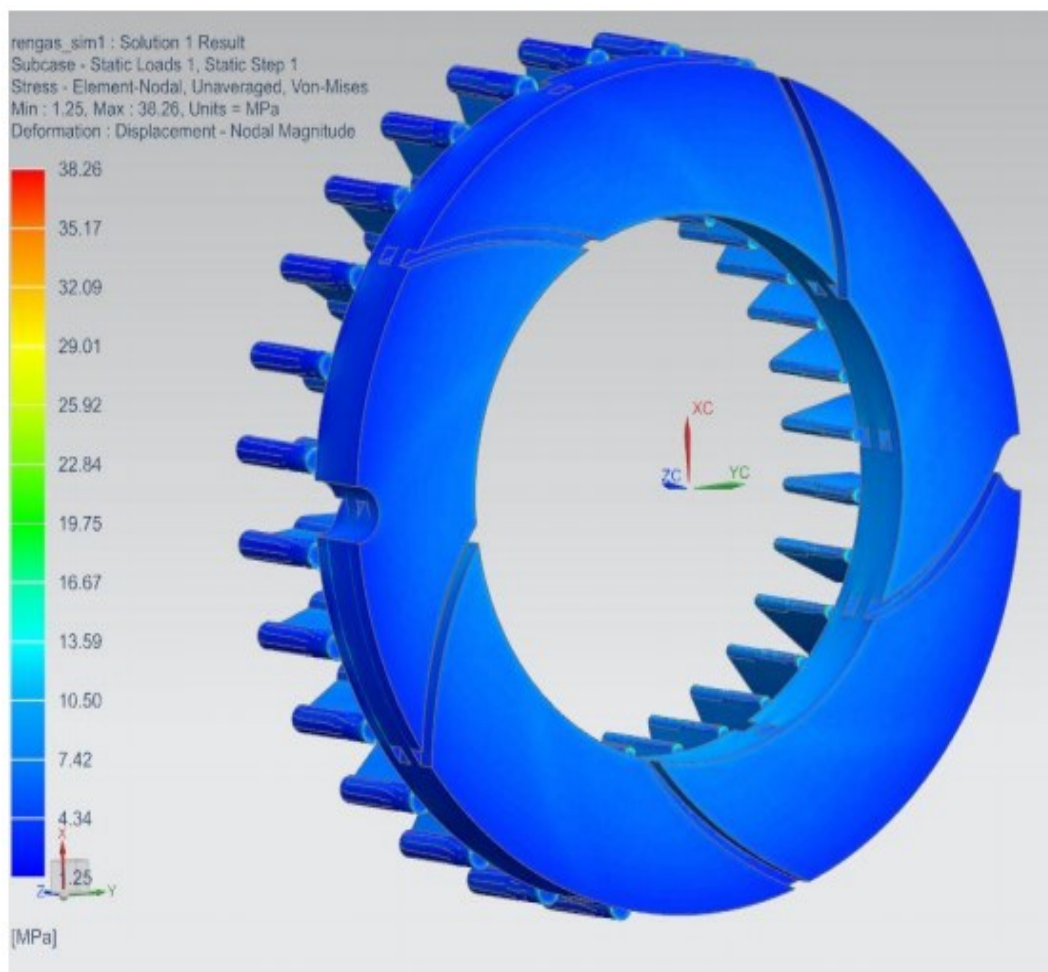
Elementtimenetelmän analyysistä käytetään lyhennettä FEA, joka tarkoittaa las-kentaa elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmän analyysin avulla saadaan tietää, kestäkö materiaali ja rakenne tietyn jännityksen ilman muodonmuutok-sien ja vaurioiden syntymistä.

### 5.1 Keskipakovoima

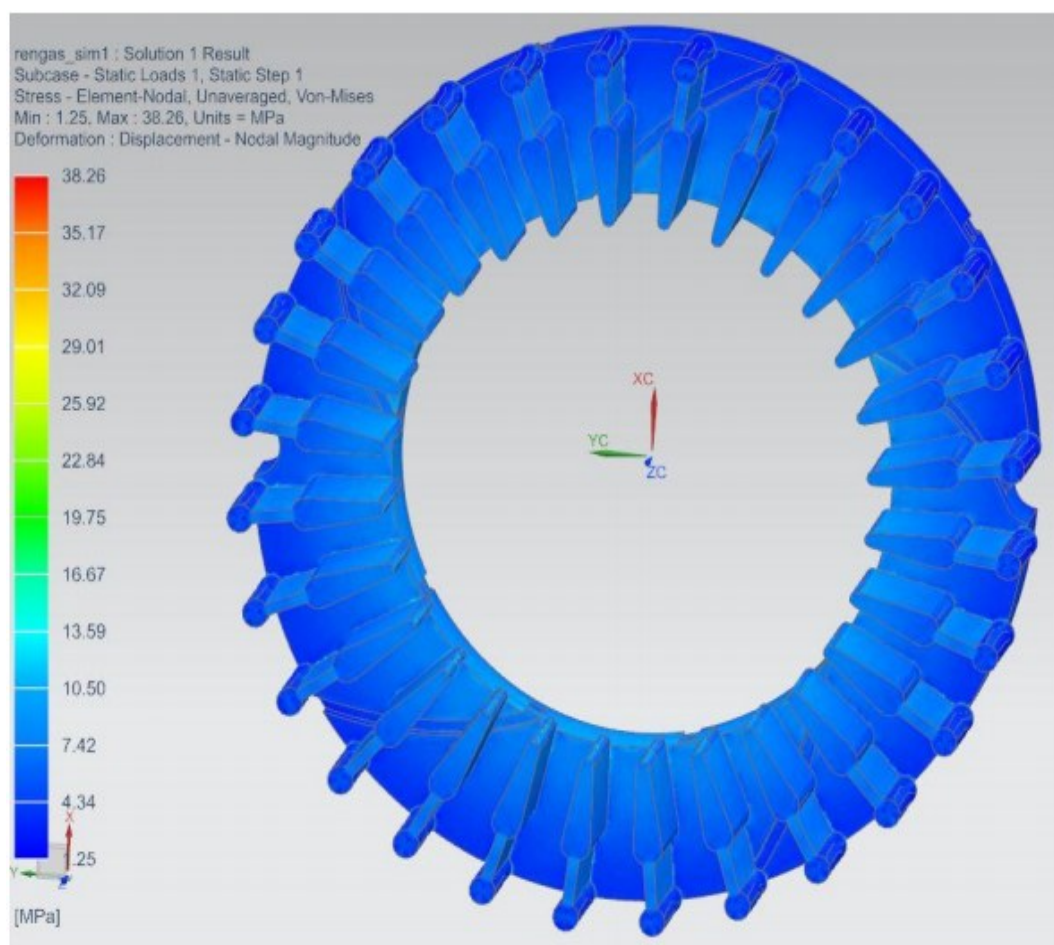
Voimaa, joka vetää materiaalia ulospäin pyörivän osan keskipisteestä, kutsutaan keskipakovoimaksi. Keskihakuvoima on voima, joka vaikuttaa pyörivän osan keski-pistettä kohti ja pyrkii pitämään tukirengaspakan ympyräradalla. Tukirengaspa-kassa esiintyy jännitysvoimia, jotka synnyttävät tarvittavan keskihakuvoiman.

### 5.2 Tulokset

Keskipakovoimien vaikutuksia simuloitiin vinojen puolien rengaspakalle 10 000 r/min nopeudella. Suorien puolien rengaspakan tarkastelu jätettiin kokonaan pois ajan puutteen takia. Tässä osassa tarkastellaan alumiiniin kohdistuvia jännityksiä **(Kuva 14.)**, tukirenkasiin kohdistuvia jännityksiä **(Kuva 16.)** ja rakenteen siirtymiä **(Kuva 19.)**.

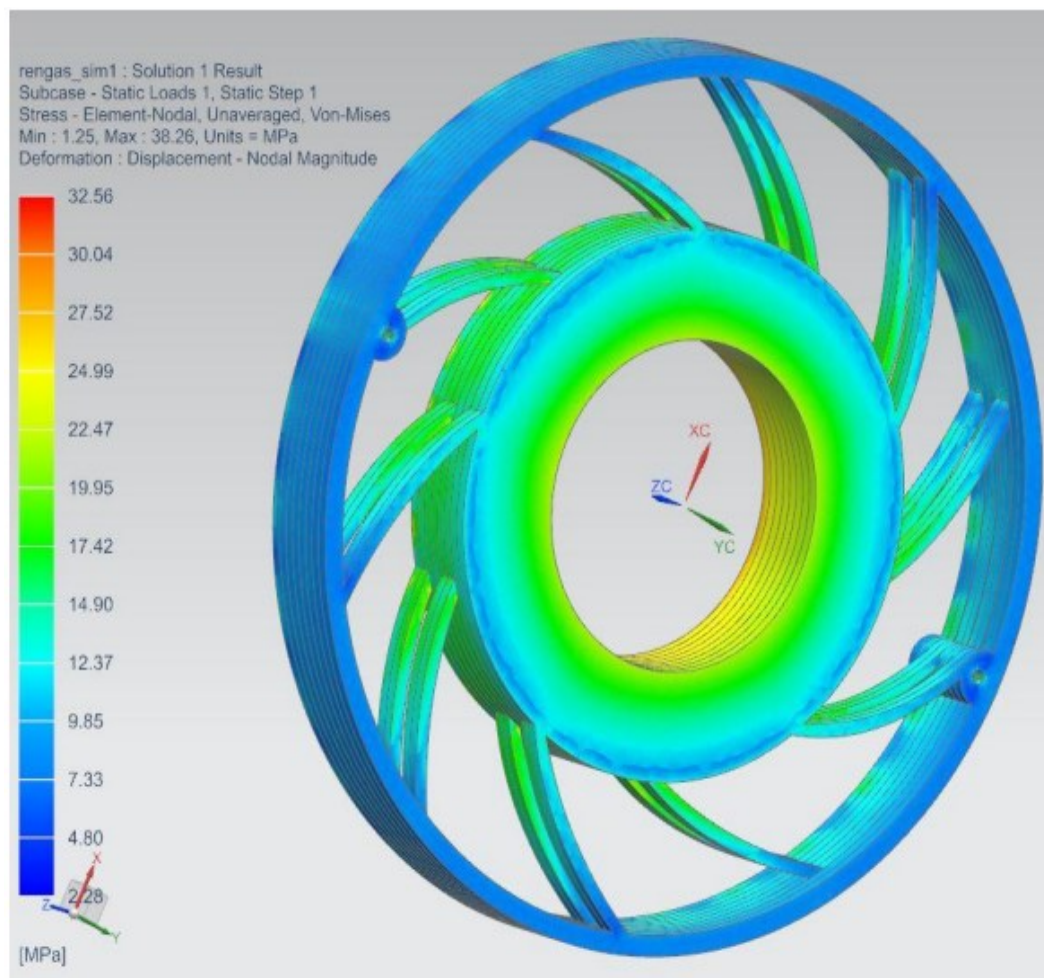


**Kuva 13.** Alumiiniin kohdistuvat jännitykset, edestäpäin.

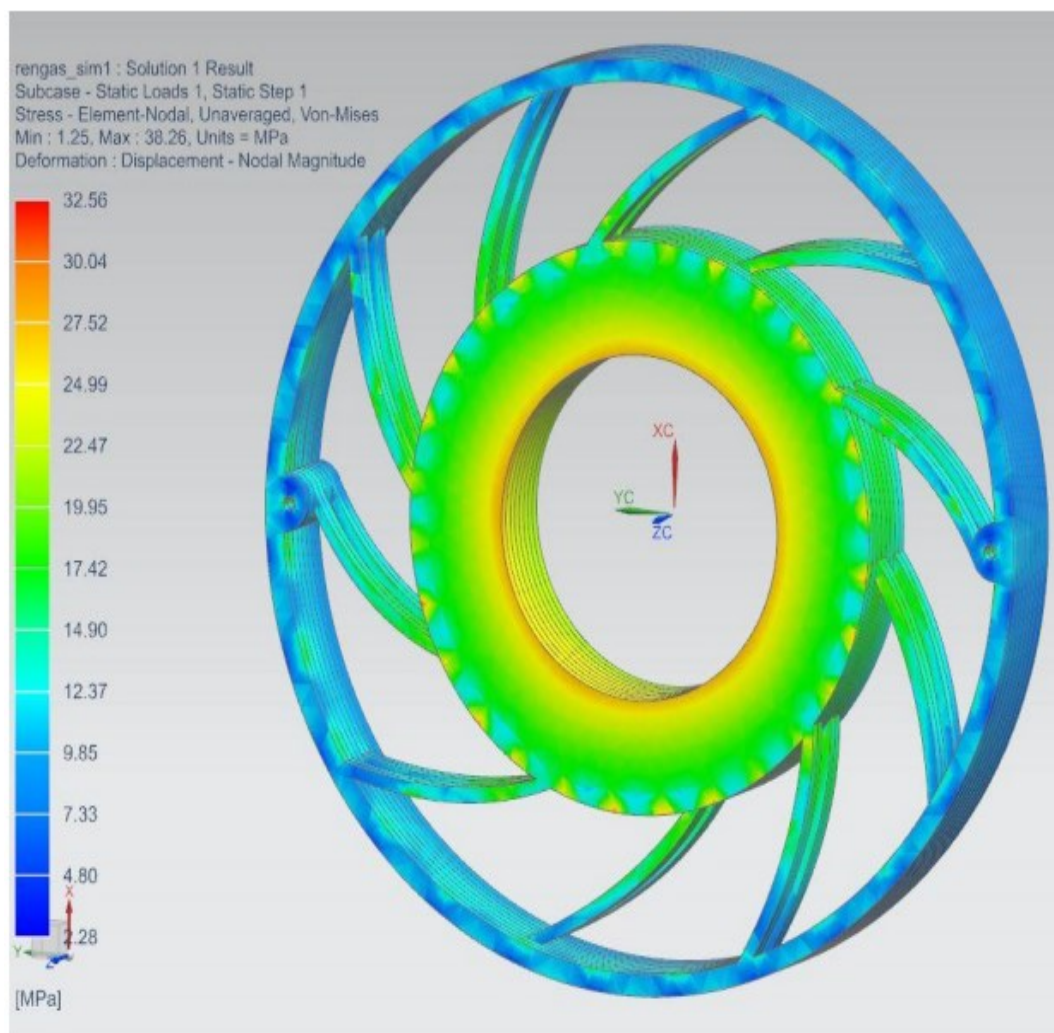


**Kuva 14.** Alumiiniin kohdistuvat jännitykset, takaapäin.

Alumiiniin kohdistuvat jännitykset ovat erittäin pieniä 10 000 r/min pyörimisnopeudella. Simuloinnin perusteella alumiini kestäisi paljon suurempiakin pyörimisnopeuksia, ennen kuin materiaali antaisi periksi ja tulisi pysyviä muodonmuutoksia. Hyväksyttävä jännitys alumiinille on alle 38.3 MPa.

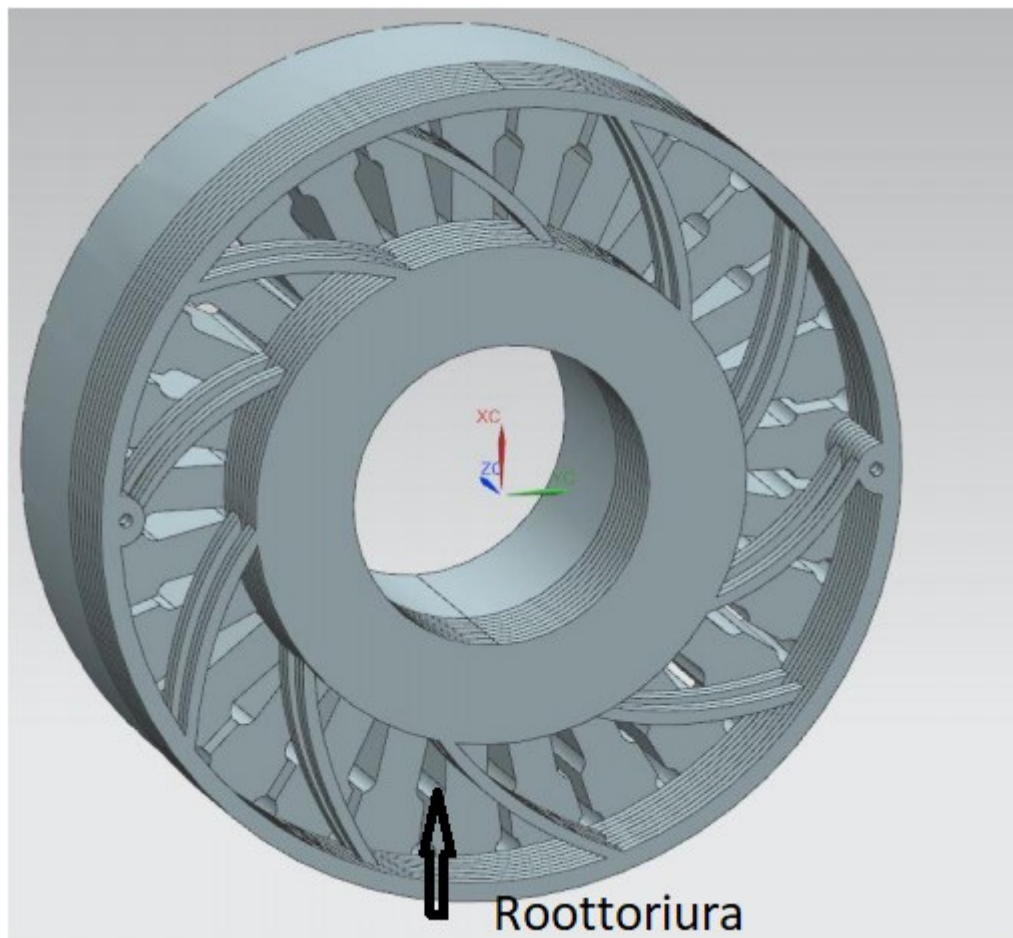


**Kuva 15.** Rengaspakkaan kohdistuvat jännitykset, edestäpäin.



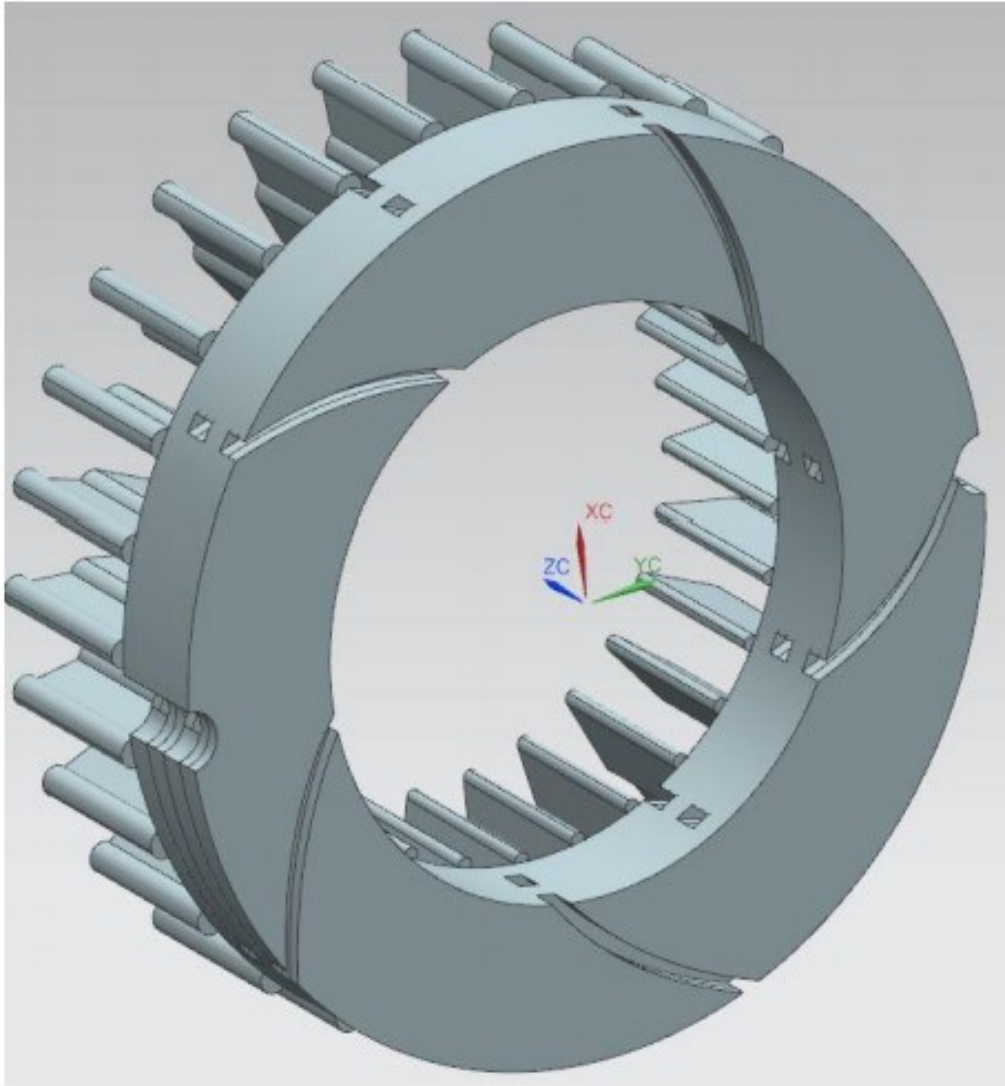
**Kuva 16.** Rengaspakkaan kohdistuvat jännitykset, takaapäin.

Tukirengaspakan jännitykset pysyvät sallituissa rajoissa. Huomioitavaa kuvassa on sisäkehän suurempi jännitys, johtuen siitä, että se on lähempänä pyörivän liikerradan keskipistettä. Hyväksyttävä tukirenkaiseen kohdistuva jännitys on 32.56 MPa.

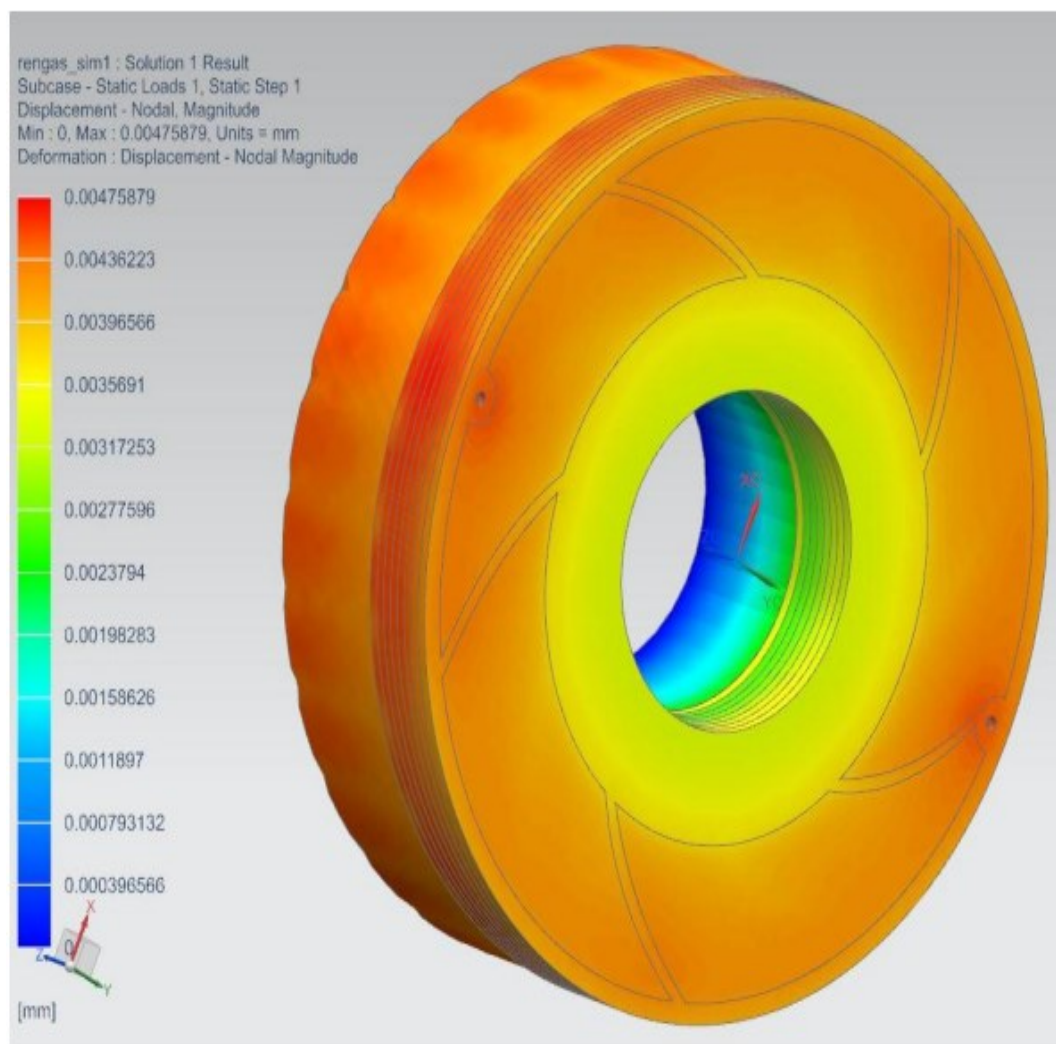


**Kuva 17.** Rengaspakka roottorin päässä.

Simulointikuvasta nähdään kuinka vinot puolat eivät kokonaan peitä roottoriuria, toisin kuin suorilla puolilla tulisi tapahtumaan, joka aiheuttaisi epäsymmetriaa ja värinää roottorissa.



**Kuva 18.** Pelkät alumiiniosat.



**Kuva 19.** Siirtymät, 10 000 r/min.

Maksimaalinen siirtymä kyseisellä pyörimisnopeudella on 0.00476 mm. Siirtymät aiheuttavat rasiusta ja kulumista materiaalille. Simulointikuvaa tarkastellessa tukirengaspakan ulkokehällä on suurin siirtymä, mikä johtuu mitä luultavammin hitsausaumoista.



## 6 TYÖN TARKASTELU

### 6.1 Johtopäätelmät

Elementtimenetelmällä pystyttiin tarkastelemaan hyvin keskipakovoiman aikaansaamia jännityksiä 10 000 r/min nopeudella. Alumiiniin kohdistuvat jännitykset jäivät erittäin alhaisiksi ja tukirengaspakan jännityksetkin pysyivät sallituissa rajoissa. Siirtymiä tarkastellessa 10 000 r/min nopeudella huomioitavaa oli tukirengaspakan ulkokehän siirtymä, joka luultavasti johtui hitsausaumoista.

### 6.2 Kehitysideat

Jatkossa voisi kokeilla tukirenkaiden erilaisia puolien kokoa, kulmaa, tai lukumäärää ja tutkia onko niillä mitään vaikutusta mm. keskipakovoiman vaikutuksiin. Lisäksi voitaisiin kokeilla laittaa roottorin molempiin päihin yksittäisiä tukirenkaita esimerkiksi kahdeksan kappaleen verran hitsatun rengaspakan sijasta. Tällöin nähtäisiin kuinka paljon se vaikuttaa esimerkiksi sähköisiin arvoihin, että tukirenkaan puolat ovat epäjärjestyksessä, eivätkä järjestyksessä. Tällöin säästettäisiin vieläkin enemmän kustannuksissa, jos idea toimisi.

## 7 YHTEENVETO

Työ oli todella mielenkiintoinen ja opettavainen, vaikka uuden piirto-ohjelmiston opettelu alusta olikin aluksi hieman haastavaa. Tarkoituksena olisi myös ollut teettää muutama prototyypiroottori, jossa näitä suunniteltuja rengaspakkoja olisi ollut tarkoitus kokeilla, mutta ajan puutteen takia se jäi tekemättä. Työn tavoitteeseen kuitenkin päästiin ja saatiin suunniteltua oikosulkurenkkaalle tukirengaspakka ja todettua elementtimenetelmän simuloinneilla, että alumiiniin ja tukirengaspakkaan kohdistuvat jännitykset ja rakenteen siirtymät pysyvät sallituissa rajoissa, eikä materiaali anna periksi suurella pyörimisnopeudella.

## LÄHTEET

- /1/ ABB Oy, IEC Low voltage motors. Viitattu 12.2.2021  
<https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors>
- /2/ ABB Oy, Motors and Generators. Viitattu 28.1.2021  
<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/motors-and-generators>
- /3/ Aho, T. 2007. Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments. Viitattu 17.3.2021 <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/31124/TMP.objres.771.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- /4/ Historia. ABB. Viitattu 28.1.2021  
<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia>
- /5/ Huppunen, J. High-speed solid-rotor induction machine – Electromagnetic calculation and design. Viitattu 25.3.2021 <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/36551>
- /6/ Käsäkangas, T. 2012. Oikosulkurenkään pituuden vaikutus suurnopeusmoottorin suoritusarvoihin. Viitattu 23.5.2021 <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/2275>
- /7/ Lähteenmäki, J. 2002. Design and voltage supply of high-speed induction machines. Viitattu 20.3.2021 <http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn951226224X/>
- /8/ Saari, E. 2012. Suurnopeus-turbokoneroottoreiden termodynaaminen ja mekaaninen mallinnus sekä rakenneanalyysi. Viitattu 20.3.2021 <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/86219>
- /9/ Suomessa. ABB. Viitattu 28.1.2021 <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- /10/ Vesala, J. 2010. Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mallintaminen. Viitattu 15.3.2021 <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/20564/vesala.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

## LIITTEET

### LIITE 1

Maksimijännitys eri kierrosnopeuksilla.

