



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Robert Sabel

# OMINAISTAAJUUSSIMULOINTIEN JA MIT- TAUSTULOSTEN VERTAILU JA KEHITYS

Tekniikka  
2022

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Robert Sabel
Opinnäytetyön nimi	Ominaisuustaajuussimulointien ja mittaustulosten vertailu ja kehitys
Vuosi	2022
Kieli	Suomi
Sivumäärä	39 + 4 liitettä
Ohjaajat	Jani Leppämäki

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa kahdesta erityyppisestä moottorista ominaisuustaajuussimulaatiomallit käyttäen NX-sovellusta. Simulaatiosta saatuja tuloksia verrattiin tehtaalla mitattuihin moottoreihin.

Mitattujen sekä simuloitujen moottoreiden malli oli BP280. Mitattujen moottoreiden tiedot löytyivät ABB:n sisäisestä tietokannasta. Työtä tehdessä käytetyt 3D-simulaatiomallit ovat mallinnettu ABB IEC LV Motorsin käyttämällä NX-CAD-ohjelmistolla, sekä siihen lisänä saatavalla FEM-Laskenta apuohjelmalla.

Työn teoriaosuudessa kerrotaan sähkömoottoreista yleistasolla, oikosulkumoottorin perusrakenne sekä sen toimintaperiaate, asennusasennot ja muita tarvittavia, sekä vaikuttavia tekijöitä kuten esimerkiksi sähkömoottorien molempien päiden laakerit. Työssä myös käsitellään siinä käytettyä FEM-laskentaa.

Simulaation valmistuttua näyttää se simulointitulokset. Ennen simulaation alkua valittiin kuinka monta taajuutta simulaatio suorittaa sekä laskee. Moottorin taajuuslaskelmien erona oli MLA2 moottorin parempi tulkinta. Lopullisena tuloksena voitiin päätellä kuinka eri laakerielementtityypit vaikuttavat simulaation lopputulokseen. Erona on esimerkiksi mittaustulosten ja eri elementtityyppien tuloksien ero.

## ABSTRACT

Author	Robert Sabel
Title	Comparison and Development of Specific Frequency Simulations and Measurement Results
Year	2022
Language	Finnish
Pages	39 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Jani Leppämäki

---

The purpose of this thesis was to build characteristic frequency simulation models for two different types of motors using an NX application. The results obtained from the Simulations were compared with the motors measured at the factory.

The model for the measured and simulated engines was BP280. The data for the measured engines can be found in ABB's internal database. The 3D-simulation models used in the thesis were modeled with the NX-CAD-software used by ABB IEC LV Motor-sin as well as with the optional FEM-Calculation utility.

The theoretical part of the thesis describes electric motors in general, the basic structure of a short-circuit motor and its operating principle, installation positions, and other necessary and influential factors such as bearings at both ends of electric motors. The thesis also deals with the FEM calculation used in it.

When the simulation is completed, it displays the simulation results. Before the start of the simulation, it was chosen how many frequencies the simulation performs and counts. The difference in the frequency calculations of the motor was a better interpretation of the MLA2 motor. As a result, simulations could deduce how the different types of bearing elements affect the result. The difference is, for example, the difference between the measurement results and the results of different element types.

---

Keywords    ABB, electric motor, characteristic frequency, and comparison of results

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Yritysesittely.....	9
1.2	ABB Suomessa.....	10
1.3	ABB-yksikkö.....	10
2	OPINNÄYTETYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET.....	12
2.1	Tausta.....	12
2.2	Rajaus.....	12
2.3	Tavoitteet.....	13
3	TEORIA.....	14
3.1	Sähkömoottorit.....	14
3.1.1	Oikosulkumoottori.....	14
3.1.2	Rakenne ja toimintaperiaate.....	15
3.1.3	Laakerit.....	16
3.1.4	Asennusasennot.....	18
3.2	Moottorin ominaistaajuus.....	20
3.3	FEM-laskenta.....	21
4	LÄHESTYMISTAPA SEKÄ TYÖN TOTEUTUS.....	22
4.1	Käytettävä data.....	22
4.2	Simulointimallien rakentaminen.....	24
4.3	FEM-vaihe.....	26
4.4	Simuloidut laakerit.....	28
4.5	Simuloidut kiinnityspultit.....	28
4.6	Simulaatiovaihe.....	29
5	SIMULAATIOIDEN TULOKSET.....	31
5.1	Moottori simulaatioiden ja mittausten vertailu tulokset.....	32

5.2 Työn lopputulos .....	32
6 TYÖN YHTEENVETO SEKÄ JATKOKEHITYS.....	34
6.1 Jatkokehitysideat .....	35
LÄHTEET .....	37
LIITTEET .....	39

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Standardi M3BP 280MLA 2 B3. ....	13
<b>Kuva 2.</b> Oikosulkumoottori M3BP 280SMB 4. /9/ .....	15
<b>Kuva 3.</b> ABB-oikosulkumoottorin räjäytyskuva sekä osaluettelo. /11/ .....	16
<b>Kuva 4.</b> Moottorin D-Pään laakeri moottorikoossa 160–250. /11/ .....	17
<b>Kuva 5.</b> Akseliin kohdistuva radiaali- ja aksiaalinen voima. /12/.....	18
<b>Kuva 6.</b> Kuvaus eri asennusasunnoista. /11/ .....	20
<b>Kuva 7.</b> Rakenteiden laskentaohjeet pienjännitemoottoreille. /15/ .....	22
<b>Kuva 8.</b> SKF SimPro- sovellus sekä laakerijäykkyydet. ....	23
<b>Kuva 9.</b> ABB Bearings -sovellus. /16/ .....	24
<b>Kuva 10.</b> Moottorin rakenne SAP-sovelluksessa. ....	25
<b>Kuva 11.</b> 3D-mallinnus moottorista. ....	26
<b>Kuva 12.</b> Verkotettu moottori. ....	27
<b>Kuva 13.</b> Moottori rautalankanäkymässä. ....	29
<b>Kuva 14.</b> Simulaation Displacement -kohta.....	32
<b>Kuva 15.</b> Simulaatiomallissa olevat liimauskohdat.....	35
<b>Kuva 16.</b> Simulaation lopputulos. ....	39

## **LIITELUETTELO**

Liitteet on poistettu julkisesta versiosta salassapitovelvollisuuden vuoksi.

**LIITE 1.** MLA2-ominaistaajuussimulointien ja mittaustulosten vertailu.

**LIITE 2.** SMC4-ominaistaajuussimulointien ja mittaustulosten vertailu.

**LIITE 3.** MLA2-jäykkälaakeri simulointien jatkokehitysidea ja mittaustulosten vertailu.

**LIITE 4.** Kuva 16. Simulaation lopputulos.

## LYHENTEET JA TERMIT

ABB	Asea Brown Boveri.
SKF	Svenska Kullagerfabriken.
FEM-laskenta	Tietokoneavusteinen lujuuslaskenta.
Kokoonpano	3D-malli, jossa monta eri osaa
BP/GP	ABB:n erilaisia moottorityyppejä.
NX	3D-suunniteluohjelmisto
Lajimerkki	Valmiiden 3D-osien tai kokoonpanojen koodi
D-End	Moottorin käyttöpää (Drive end)
N-End	Moottorin käyttöpään vastainen pää (Non-Drive end)
Displacement	Taajuuden muutoskohta simulaatiossa



## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Vaasan ABB:n IEC LV Motors -yksikölle. Opinnäytetyössä tutkittiin ABB:n moottoreiden ominaisuustaajuussimulaatiomallien rakentamista moottoreille M3BP 280MLA 2 ja M3BP 280SMC 4, sekä näistä malleista saatujen simulaatiotuloksien vertailua tehtaalla mitattujen moottoreiden tuloksiin. Näiden mittaustuloksien perusteella katsottiin mitä mallien simuloinnissa pystyisi mahdollisesti kehittämään, sekä parantamaan saatujen tulosten perusteella. Työssä myös käsiteltiin, mikä ero on kahdella simulaatiossa käytettävällä laakereiden simulointitavalla, sekä millä tavalla simuloitujen tulokset poikkeavat toisistaan.

Teoriaosiossa käydään läpi sähkömoottorin perusrakenteesta, asennusasetuksista, laakereista sekä simulaatiomallien rakentamisesta olevia peruskäsitteitä sekä menetelmiä. Osiossa myös käsitellään FEM-laskentaa, sekä NX:än FEM-osiossa tehtyjä laakereita ja kiinnityksiä.

### 1.1 Yritysesittely

ABB on yksi maailman johtavimmista sekä suurimmista teknologia, sekä sähkövoima yrityksistä. Heidän toimintansa koostuu muun muassa erilaisista sähköistys-tuotteista, robotiikasta, liikkeenohjauksesta, teollisuusautomaatiosta erilaisista sähköverkkoratkaisuista sekä meriteollisuudesta. ABB hyödyntää myös kaikkia teknologian mahdollisuuksia, jotta he voisivat nostaa suorituskykynsä uudelle tasolle. Yritys työllistää tällä hetkellä noin 105 000 työntekijää yli 100 maassa. /1/

ABB on toiminut energialiiketoiminnassa jo yli 120 vuotta sekä ollut edelläkävijä monissa innovaatioissa, jotka nykyään määrittelevät erilaisten teollisuuden ja yleishyödyllisten laitosten toimintaympäristöä. ABB:n teknologiaa käytetään miltei koko energia-arvoketjussa aina eri luonnonvarojen louhinnasta sekä niiden varojen jalostamisesta energiaksi. Yrityksen erittäin vahva ratkaisukeskeisyys auttaa

eri valmistajia parantamaan heidän tuottavuuttansa, tuotteiden laatua sekä työntekijöiden turvallisuutta. ABB on asentanut maailmanlaajuisesti jopa yli 190 000 robottia. /2/

Yhtiö perustettiin vuonna 1988, jolloin Ruotsalainen Asea sekä Sveitsiläinen Brown Boveri sulautuivat sähkötekniset toimintansa yhteen käyttäen tasalukuista 50:50-omistusperiaatetta. ABB on myös auttanut rakentamaan, kehittämään sekä ylläpitämään eri maiden infrastruktuuria kehittämällä sekä laajentamalla toimintaansa ympäri maailmaa aikojen saatossa. Yrityksellä on myös tärkeät suomalaiset juuret, jotka alkoivat jo vuonna 1889 eli noin 130 vuotta sitten. /3,4/

## **1.2 ABB Suomessa**

ABB toimii suomessa noin 20 eri paikkakunnalla mutta pääasiassa yrityksen tehdaskeskittymät ovat Vaasassa, Porvoossa, Helsingissä sekä Haminassa. Suomessa yritys on yksi suurimmista teollisuus työllistäjästä, joka tarjoaa töitä noin 5 000 hengelle. /5/

Esimerkkinä käyttäen Vaasassa ABB tuottaa erilaisia moottoreita, pienjänniteteotteita sähkön siirto ja jakelujärjestelmiä, voimantuotannon järjestelmiä sekä prosessiteollisuuden kokonaisprojekteja. Helsingissä taas valmistetaan pääasiassa moottoreita, generaattoreita, taajuusmuuttajia, robotteja, CPM-energianhallintajärjestelmiä ja paperikonekäyttöratkaisuja. Lisänä Helsingin Vuosaarella, Haminassa kehitetään Azipod®- ruoripotkurijärjestelmää. /5/

## **1.3 ABB-yksikkö**

ABB on yksi maailman johtavimmista moottorivalmistajista sekä toimii edelläkävijänä sähkömoottoriteknologian kehittäjänä. ABB:n IEC LV Motors -divisioona toimii Vaasassa sekä panostaa vahvasti moottoreidensa tutkimukseen sekä tuotekehitykseen. IEC LV Motors myös kehittää sekä valmistaa eri tarkoituksiin tulevia sekä räätälöityjä IEC-pienjännitemoottoreita useille teollisuuden aloille. /6/

IEC LV Motorsin Vaasan yksikkö vastaa pienjännitemoottoreiden suunnittelusta, tuotekehityksestä, sekä valmistuksesta erilaisiin vaativiin käyttöihin maailmanlaajuisesti. Vaasan yksikön asiantuntemuksella sekä kattavalla tuotevalikoimalla auttavat he eri teollisuus sekä muita asiakkaitaan parantamaan energiatehokkuuttaan sekä tuottavuuttaan. /6/

Vaasan tehtailla sekä konttoreissa työskentelee noin 600 korkeasti koulutettua ammattilaista, jotka suunnittelevat ja valmistavat erityyppisiä moottoreita kaikenlaisiin tehtäviin sekä vastaamaan asiakkaiden toiveita. /6/

## 2 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on rakentaa NX-ominaistaajuussimulaatiomalleja sekä vertailla niistä saatuja tuloksia keskenään sekä mittaustuloksiin. Työ on rajattu koskemaan BP/GP-moottoreita tällä hetkellä ainoastaan kokoluokassa 280. Opinnäytetyössä myös tutkitaan mistä mahdollinen simulointitulosten ero johtuu, kun simulaatio ajetaan kahdella erityyppisellä laakerimenetelmällä.

### 2.1 Tausta

Työn taustana on verrata moottoreiden mittaustuloksia tietokonesimulaatioiden kanssa sekä katsoa mitkä ovat suurimmat erot ja yhteneväisyydet tulosten välillä. Simulaatioiden ja moottoreiden mittaustuloksia verrataan keskenään ja katsotaan mitä mahdollisesti voitaisiin muuttaa tai parantaa, jotta tulokset olisivat vielä lähempänä toisiaan.

### 2.2 Rajaus

Työ rajautuu BP/GP-moottoreihin kokoluokassa 280. Työssä simuloidaan kaksi erityyppistä moottoria koossa BP280, joiden asennusasennot ovat B3 sekä B5. Lisäksi työssä simuloidaan yksi kehityskohde, jossa molempien päiden kilvet kiinnitetään jäykästi runkoon. Näille edellä mainituille moottoreille tehdään simulaatiomallit kahdella eri tavalla, joissa käytetään laakerina jäykkää kiinnitystä sekä jousielementtiä. Mallien erona ovat niille tehtävät kaksi erityyppistä laakerielementtiä, jotka tehdään NX:n FEM-laskentapuolella käyttäen elementtejä D- ja N-päässä. Erona malleissa on myös niiden asennusasennot. Toisessa moottorissa on jalallinen kiinnitys ja toisessa laipallinen.

Työn lopussa vertailtavat tulokset ovat mitattu aiemmin, joten uusia mittauksia kyseisille moottoreille ei tehdä. Näiden lisäksi työssä katsotaan hieman syvemmin miksi simulaatioiden laakerityyppien erot vaikuttavat mittaustuloksiin.

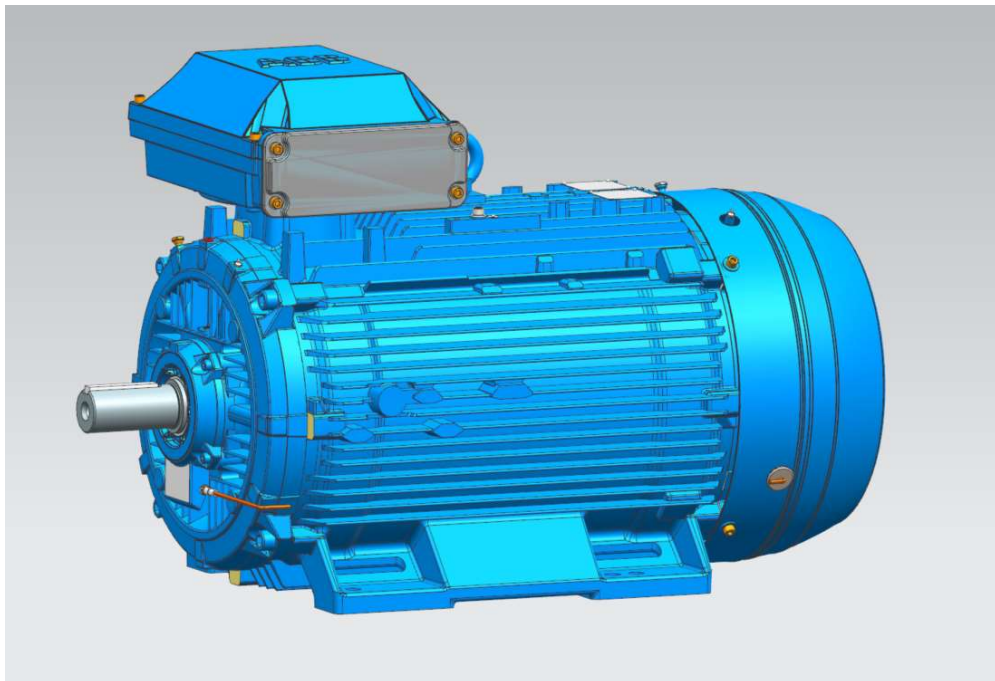
### 2.3 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda simulaatiomallit ABB:n moottoritehtaalla mitatuista moottoreista käyttäen NX-sovellusta. Mallit tehdään kahdelle samankokoiselle moottorille, joista toinen jalkakiinnitteinen ja toinen laippamoottori.

Työssä tutkittaville moottoreille on tehty jo mittaukset, joten opinnäytetyössä rakennetaan kokoonpano- ja simulaatiomallit NX:llä. Simulaatioita on kaksi eri mallia sekä niille tehtävät erilaiset laakerielementit. Työn tavoitteena on vertailla simulointi- ja mittaustuloksia sekä haetaan yhteneväisyydet ja missä kohtaa simulaatiota voisi tarkentaa tai mahdollisesti parantaa.

Moottorit, joiden tuloksia vertaillaan mittaustuloksiin ovat:

- M3BP 280MLA 2 B3, joka on jalallinen moottori.
- M3BP 280SMC 4 V1, joka on laipallinen moottori.



**Kuva 1.** Standardi M3BP 280MLA 2 B3.

### 3 TEORIA

#### 3.1 Sähkömoottorit

Sähkömoottori on laite, joka muuttaa sähköenergiaa liike energiaksi. Sähkömoottorin toiminnan periaatteena on magneetit, joita voidaan kytkeä päälle ja pois käyttäen sähköä. Moottorin rakenteessa on yleisesti aina kaksi pää osaa, jotka ovat akselin kanssa pyörivä roottori sekä paikallaan pysyvä staattori. Sähköinen magneettikenttä saadaan aikaan joko staattorissa tai roottorissa. Näiden vastaparina pystytään käyttämään joko toista sähkömagneettia tai kestopagneettia. /7/

Yleisenä sähkömoottorin mitoitusperiaatteena toimii jatkuvan käytön nimellismomentti. Moottori kestää hetkellisesti nimellismomenttia suurempaa kuormitusta. Moottoreiden rajoittavia tekijöitä ovat moottorin lämmönsietokyky sekä maksimimomentti. Näihin tekijöihin puolestaan vaikuttaa se, miten moottori on jäähdytetty. Ilmajäähdytys on moottoreissa yleensä melko yksinkertainen, mutta se ei toimi pienillä kierrosnopeuksilla yhtä hyvin kuin nestejäähdytys. /7/

##### 3.1.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on rakenteensa vuoksi erittäin käytetty sekä suosittu moottori. Erona muihin moottorityyppeihin, oikosulkumoottorissa ei ole erillisiä magnetointikämmityksiä, vaan yksinkertaiset staattori- sekä roottorikämmitykset. Moottori esitelty **kuvassa 1**. Yleisesti koneen tärkeimmät osat toiminnan kannalta ovat Staattorin sekä roottorin kämmitykset levypaketteineen. /8/

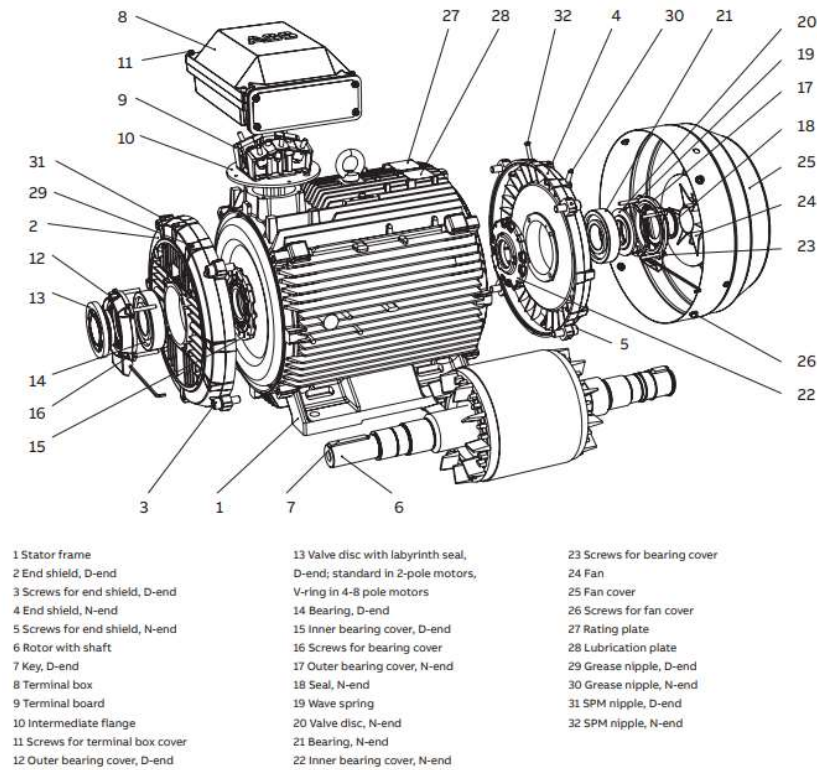


**Kuva 2.** Oikosulkumoottori M3BP 280SMB 4. /9/

Oikosulkumoottoreita myös suositetaan pienten huoltokustannuksien, korkean hyötysuhteen sekä kevyen rakenteensa vuoksi. Moottorien roottori ydin valmistetaan asettamalla se muottiin, jossa roottorin tangot ja päätyrenkaat valetaan yhdeksi kappaleeksi. Valussa käytetty metalli on alumiiniseos. /10/

### **3.1.2 Rakenne ja toimintaperiaate**

Oikosulkumoottori on yleinen käsite ja moottorityyppejä on paljon. Kuitenkin kaikki nämä moottorit koostuvat pääsääntöisesti samoista osista eli rungosta, staattorista, akselista sekä akselin ympärille puristetusta roottorista. Moottorin molempia päitä suojaa D- ja N-pään laakerikilvet sekä näiden kilpien sisällä olevat laakeroinnit. Moottoreiden kokoluokka määräytyy mittaamalla akselin keskikohdasta etäisyys moottorin jalan pohjaan. /8/



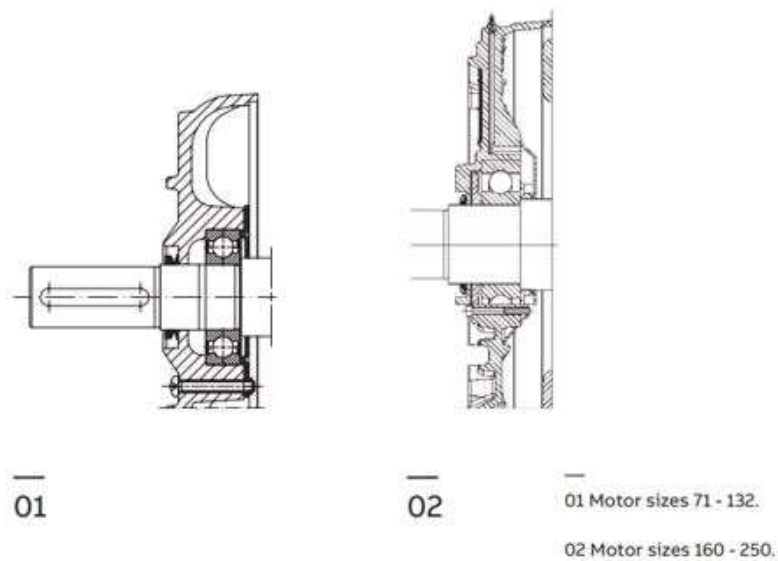
**Kuva 3.** ABB-oikosulkumoottorin räjäytyskuva sekä osaluettelo. /11/

Oikosulkumoottorin toimintaperiaatteena on se, että se toimii vaihtovirralla, joka toiminnallaan luo staattorin roottorin ympärille eräänlaisen pyörivän magneettikentän. Magneettikenttä aiheuttaa induktiolla roottorin käämeihin virran, jolloin roottori koittaa magneettisesti seurata pyörivää magneettivuota ja täten saa aikaan pyörimisliikkeen. Oikosulkumoottoria kutsutaan myös induktiomoottoriksi. Oikosulku moottoria kutsutaan oikosulkumoottoriksi, sillä sen roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään. Yksi nimitys tälle moottorille on myös epätahti-moottori. /7/

### 3.1.3 Laakerit

Yleisimmät laakerityypit ABB:n moottoreissa ovat C3-välykselliset urakuulalaakerit. Muita käytettäviä laakerityyppejä ovat esimerkiksi viistokuulalaakerit tai rulla-laakerit, jos moottorin käyttökohde tai sovellus niitä edellyttää. /11/

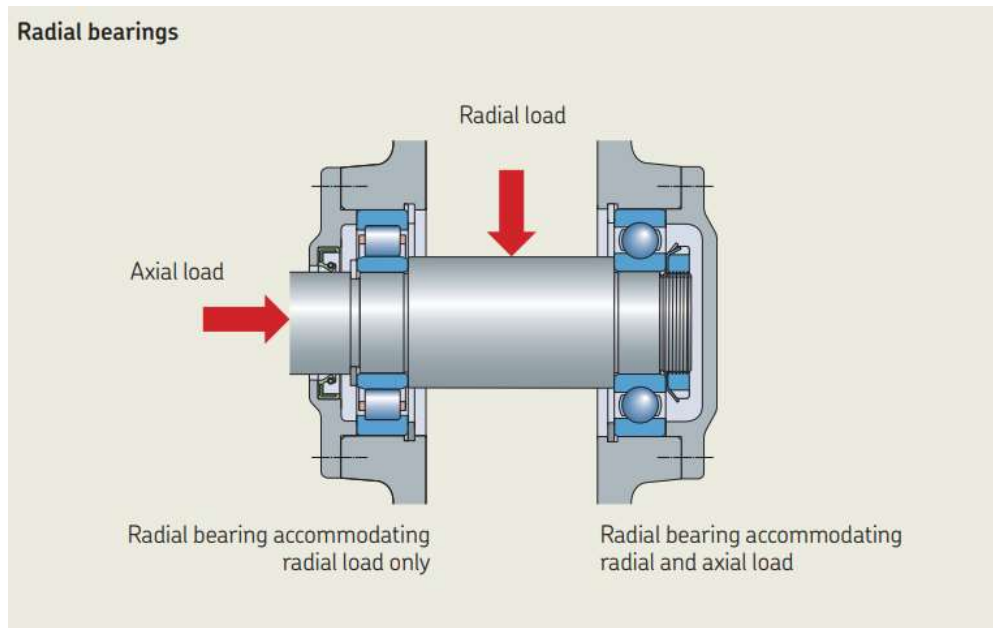




**Kuva 4.** Moottorin D-Pään laakeri moottorikoossa 160–250. /11/

Urakuulalaakereita käytetään useimmiten sen vuoksi, koska ne kestävät hyvin suuriakin pyörimisnopeuksia, radiaalisia sekä aksiaalisia kuormituksia sekä vaativat vähän huoltoa. Tämän vuoksi urakuulalaakerit ovat yksi yleisimmin käytetyistä laakerityypeistä maailmassa. Moottorit, joissa käyttökohteen vuoksi ne kohdistuvat suuremmille radiaalisille tai aksiaalisille voimille saattavat vaatia pienempiä huoltovälejä. /12/

lieriökuullalaakerin käytetään yleensä kohteissa, jossa akselille kohdistuu esimerkiksi radiaalista voimaa. Lieriökuullalaakerin kuormankantokyky johtuu sen kyvystä jakaa tämä kohdistuva voima suuremmalle pinta-alalle. /12/



**Kuva 5.** Akseliin kohdistuva radiaali- ja aksiaalinen voima. /12/

Laakerit ja niiden käyttöikä riippuu useista eri tekijöistä. Vaikuttavina tekijöinä voi toimia esimerkiksi laakerikuormitus, moottorin nopeus, käyttölämpötila, laakerien puhtaus tai niissä käytettävän rasvan laatu. Laakereiden nimelliskäyttöikä määritellään yleensä tuntimäärissä. /12/

### 3.1.4 Asennusasennot





































Moottorin asennusasentoja on monia ja ne on määritelty IEC-standardissa. IEC-standardissa 60034–7 määritellään nämä asennusasennot sekä mitat. Yleisimmät asennusasennot ovat B3, jossa moottori asennetaan rungon jaloista kiinni. Asennusasennossa B5, moottorissa ei ole jalkoja vaan moottorin D-pään kilvessä on kiinnityslaippa. Näiden kahden asennusasennon yhdistelmä on B35, jossa moottori voidaan kiinnittää sekä jaloista, että laipasta. /11/

B3 eli jalkamoottori asennusasennossa moottori kiinnitetään kohteeseen rungon jaloista. Tämän rungon asennusasentoa pystytään hyödyntämään myös siten, että sitä voidaan käyttää B6-, B7-, B8-, V5- sekä V6-asennusasunnoissa, joissa moottori asennetaan kiinni tarvittavaan kohteeseen jaloista. Asunnoissa B6 ja B7 moottori

asennetaan seinään siten, että akseli on vaakasuorassa. B8-asennusasennossa moottori voidaan asentaa esimerkiksi kattoon kiinni. /11/

B5 eli laippamoottori asennusasennossa moottori kiinnitetään kohteeseen rungon D-päässä olevasta laakerikilven laipasta. Tätä asennusasettoa voidaan myös asentaa asentoihin V1- sekä V3, joissa moottori asennetaan kiinni vaakasuoraan tasoon laakerikilven laipasta, milloin akseli on pystysuorassa. /11/

B35 eli jalkalaippamoottori asennusasennossa moottori voidaan asentaa joko jaloista ja / tai D-pään laipallisesta laakerikilvestä. B35-kiinnityksellä varustelluissa moottoreissa on sama runko kuin B3-moottoreissa ja sama kiinnityslaippa kuin B5-runkoisissa moottoreissa. /11/

<b>Foot-mounted motor</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						A: foot-mounted, term. box top R: foot-mounted, term. box RHS L: foot-mounted, term. box LHS
IM B3 IM 1001	IM V5 IM 1011	IM V6 IM 1031	IM B6 IM 1051	IM B7 IM 1061	IM B8 IM 1071	
<b>Flange-mounted motor, large flange</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						B: flange mounted, large flange
IM B5 IM 3001	IM V1 IM 3011	IM V3 IM 3031	*) IM 3051	*) IM 3061	*) IM 3071	
<b>Flange-mounted motor, small flange</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						C: flange mounted, small flange
IM B14 IM 3601	IM V18 IM 3611	IM V19 IM 3631	*) IM 3651	*) IM 3661	*) IM 3671	
<b>Foot- and flange-mounted motor with feet, large flange</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						H: foot/flange-mounted, term. box top S: foot/flange-mounted, term. box RHS T: foot/flange-mounted, term. box LHS
IM B35 IM 2001	IM V15 IM 2011	IM V35 IM 2031	*) IM 2051	*) IM 2061	*) IM 2071	
<b>Foot- and flange-mounted motor with feet, small flange</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						J: foot/flange-mounted, small flange
IM B34 IM 2101	IM V17 IM 2111	IM 2131	IM 2151	IM 2161	IM 2171	
<b>Foot-mounted motor, shaft with free extensions</b>						
Code I / code II						<b>Product code pos. 12</b>
						
IM 1002	IM 1012	IM 1032	IM 1052	IM 1062	IM 1072	

\*) Not stated in IEC 60034-7.

Note: If the motor is mounted shaft upwards, take measures to prevent water or any other liquid from running down the shaft into the motor.

## Kuva 6. Kuvaus eri asennusasunnoista. /11/

Asiakas tilaa aina tarvitsemansa asennusasennot kauppa tehdessä. Asento ilmoitetaan aina tilausta tehdessä omalla koodilla. Nämä asennot sekä koodit löytyvät moottorikatalogista. /11/

### 3.2 Moottorin ominaistaajuus

Ominaistaajuudella kuvataan moottorin normaalia värähtelyä. Värähtelyä on myös toisenlaista, joka on haitaksi liikkuville tai pyöriville koneille sekä laitteille ja sitä kutsutaan resonanssiksi. Kun käynnissä olevalle moottorille kohdistuu jonkinlainen toistuva tai äkillinen voima saattaa se alkaa värähdellä. Tämä värähtely voi

aiheuttaa moottorissa erilaista tärinää, melua tai pahimmillaan vaurioita. Kaikilla moottoreilla on niille ominainen taajuus, jolla moottori pyrkii värähtelemään, sekä tällä taajuudella, jolla se värähtelee, on oma rakenteellinen muotonsa. Resonanssi syntyy, kun jonkinlainen kuormitus toistuu taajuudella, mikä vastaa moottorin rakenteen ominaisvärähtelytaajuutta. Yleensä alimmat mitatut ominaistaajuudet, jotka ovat lähellä moottorin ajotaajuuksia ovat kaikkein vaarallisimpia moottorille. /13/

Rakenteen jäykkyyteen yleisesti vaikuttaa sen geometria sekä sen massaan vaikuttaa sen materiaalit. Rakenteen geometria ja massa eivät kuitenkaan ole ainoat sen ominaistaajuuteen vaikuttavat asiat, vaan siihen myös vaikuttaa esimerkiksi veto-kuormitus tai puristuskuormitus. Taajuuksiin myös vaikuttaa rakenteen tuenta. /13/

### **3.3 FEM-laskenta**

FEM-laskenta, joka tulee sanoista Finite Element Method eli elementtimenetelmä on lujuuslaskenta tyyppi, joka perustuu lujuusoppiin. Lujuusoppi tarkastelee erilaisten kappaleiden mekaanista käyttäytymistä erilaisten kuormien tai voimien vaikuttaessa niihin. Näiden tutkimusten avulla voidaan selvittää sekä päätellä kestäkö valittu kappale tietynlaisen jännitystilan alla, sekä miten kappale mahdollisesti muuttuu sen aikana tai jännityksen loputtua. /14/


Tutkittavalle kappaleelle luodaan eräänlainen elementtiverkko, joka muodostuu pienistä joukoista kolmiulotteisia, tasomaisia tai janatyyppisistä elementeistä. Näillä elementeillä pyritään kuvaamaan testattavaa tai mallinnettavaa kappaletta mahdollisimman tarkasti, mutta usein elementtiverkko kuvaa todellista työstettävää kappaletta vain likimääräisesti. Tämä saattaa aiheuttaa lopullisessa laskennassa sekä tuloksissa virheitä, mutta tätä voidaan minimoida käyttämällä kolmiulotteisia sekä riittävän pieniä elementtejä esimerkiksi erilaisissa kaarevissa pinoissa. Kuitenkaan liian pieniä elementtejä ei saa laskettaessa käyttää, sillä tämä saattaa aiheuttaa liian kauan kestävän laskutoimituksen. /14/

## 4 LÄHESTYMISTAPA SEKÄ TYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla ominaisuustajuussimulaatiomallien tekoon sekä muihin työhön tarvittaviin aineistoihin sekä ohjelmistoihin. Työssä oli myös käytössä mitattujen moottoreiden raportit. Näiden aineistojen läpikäynti auttoi ymmärtämään tehtyjä vaiheita sekä mittauksia paremmin opinnäytetyötä tehdessä.

### 4.1 Käytettävä data

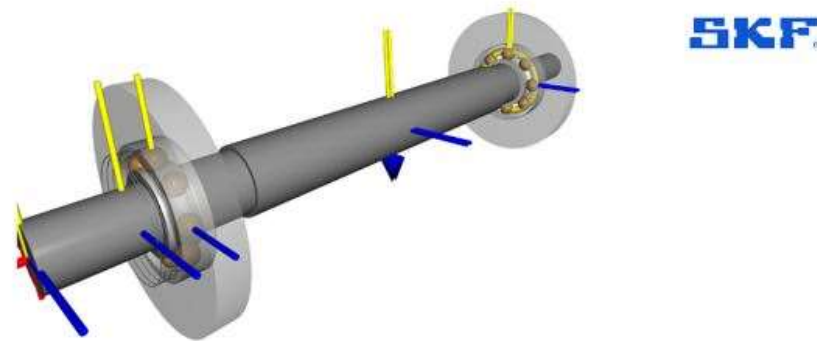
Työhön käytettävissä olevat tiedot simulaatioita varten löytyvät ABB:n omista tietokannoista sekä katalogeista. Simulaatiomallien rakentamista varten on ohje, jonka lajimerkki on 3GZC500900-17.

	Document kind Technical File	Document number 3GZC500900-17	Revision M
Issued by PG IEC LV Motors	Author Rami Kalliokoski	Date 2022-03-09	Language EN
Division/Department R&D	Approver Pasi Viitanen	Distribution Internal	Pages 1(27) Status Valid

Structure Calculation Guideline for Standard Low Voltage Motors  
Frame Sizes 71-500

#### **Kuva 7.** Rakenteiden laskentaohjeet pienjännitemoottoreille. /15/

Muita käytettävissä olevia tietoja oli SKF SimPro Quick, joka on laakereiden simulointiohjelmisto. Sillä voidaan arvioida laakerijärjestelyä sekä laakereiden suorituskykyä annetuissa olosuhteissa. Tämän ohjelman perusanalyysin lisäksi sillä voidaan määrittää laakereiden kuormituksen, välyksien vaikutuksen jakautumisen sekä laakerin jäykkyyden. Yksi tämän sovelluksen tärkeimpiä kohtia oli laakerien jäykkyydet, jota tarvitsimme jousi elementti laakerin tekemiseen simulaatiomalleissa.



Bearing stiffness

Bearing	Elements	Bearing stiffness				
		1: X [1/m]	2: Y [1/m]	3: Z [1/m]	4: YZ [1/rad]	5: XZ [1/rad]
SKF_bearing_Dpää	1: Fx [N]	2.95E08	0	0	0	3.52E06
	2: Fy [N]	0	2.92E08	1.04E07	-3.49E06	0
	3: Fz [N]	0	1.04E07	2.45E07	-1.84E05	0
	4: Myz [Nm]	0	-3.49E06	-1.84E05	4.84E04	0
	5: Mxz [Nm]	3.52E06	0	0	0	4.89E04
SKF_bearing_Npää	1: Fx [N]	2.95E08	0	0	0	-3.52E06
	2: Fy [N]	0	2.92E08	-1.03E07	3.49E06	0
	3: Fz [N]	0	-1.03E07	2.45E07	-1.82E05	0
	4: Myz [Nm]	0	3.49E06	-1.82E05	4.85E04	0
	5: Mxz [Nm]	-3.52E06	0	0	0	4.89E04

**Kuva 8.** SKF SimPro- sovellus sekä laakerijäykkydet.

Yksi tärkeä työkalu mallien rakentamisvaiheessa oli ABB Bearings -sovellus. Sovelluksella voidaan laskea laakereiden nimellinen käyttöikä sekä akseliin kohdistuvat erilaiset kriittiset jännitykset erityyppisissä vakio moottoreissa. Bearings-sovellus myös sisältää suuren tietokannan akseleista, laakereista ja materiaaleista. Sovelluksessa avataan kattava valikko, josta valitaan mikä moottori on kyseessä. Kun moottori on löytynyt valikosta, tuodaan se ohjelman etusivulle automaattisesti painamalla ”import”-painiketta. Tämän jälkeen ohjelma antaa laakerille, sekä koonpanolle erilaisia tarvittavia tietoja kuten **kuvassa 8** kykenee näkemään. /16/

The screenshot displays the ABB Bearings software interface. The window title is "Bearings version 2.1.2.0 - Untitled". The menu bar includes "FILE", "HOME", "PRINT", and "ABOUT".

**Motor list:** A list containing "M3BP 280MLA 2".

**Motor specifications:**

Description	M3BP 280MLA 2
Power (kW)	132
Speed (r/min)	3000
Group	Not specified
Bearings type D-end	Ball bearings
Bearing D-end	6316
Generation code	G
Radial load direction	Side
Radial load (N)	0
Distance from shoulder (mm)	140
Axial load direction	Out
Axial load (N)	0
Bearing temperature °C	80
Mounting	IM1001, B3(foot)

Below the specifications are two diagrams: a cross-section of a bearing with a red arrow labeled  $F_r$  indicating radial load, and a 3D perspective view of the motor.

**Results:**

Results for: M3BP 280MLA 2  
 Product code: 3GBP281410-\*\*G  
 Reaction of support for bearings:  
 Radial load of the D-bearing ( $F_r$ ): 780 N  
 Axial load of the D-bearing ( $F_a$ ): 1000 N  
 Radial load of the N-bearing ( $F_r$ ): 780 N  
 Axial load of the N-bearing ( $F_a$ ): 1000 N  
 Calculated bearings lifetime L<sub>10h</sub>  
 - D-bearing: 1076000 h  
 - N-bearing: 1076000 h  
 Type of the bearings  
 - D-bearing: 6316/C3  
 - N-bearing: 6316/C3  
 Critical shaft stress:  
 Stress in the key slot(A): 13.5 N/mm<sup>2</sup>  
 Stress in the shaft extension shoulder(B): 13.5 N/mm<sup>2</sup>  
 Stress in the D-bearing shoulder(C): 7.3 N/mm<sup>2</sup>  
 Relubrication interval: 3200 h  
 Amount of grease: 35 g

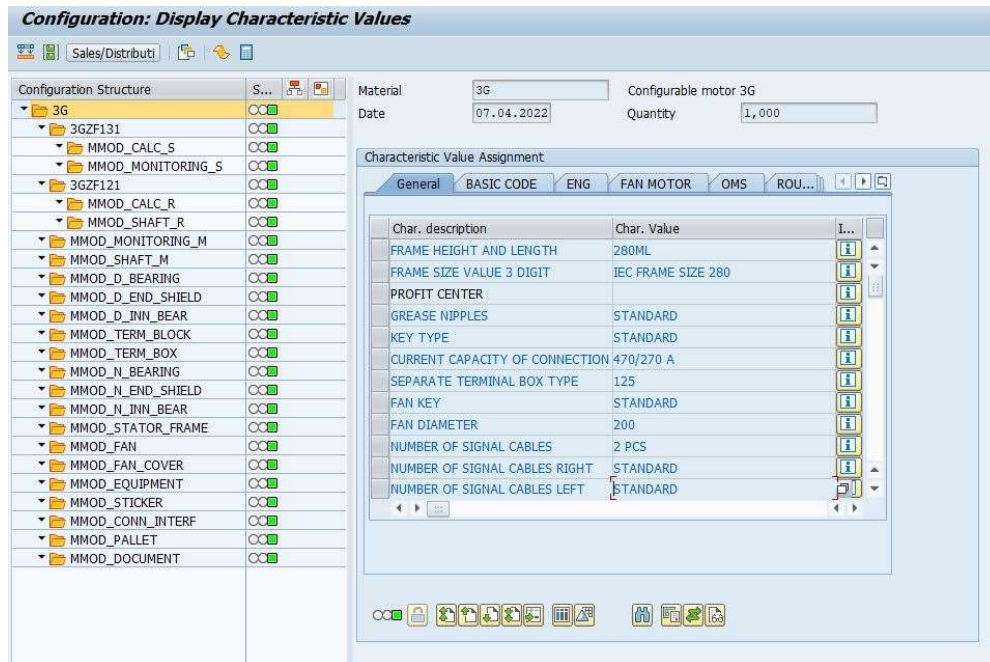
Buttons: "Import" (bottom left), "Goal seek" (blue bar), "Calculations" (blue bar).

Kuva 9. ABB Bearings -sovellus. /16/

#### 4.2 Simulointimallien rakentaminen

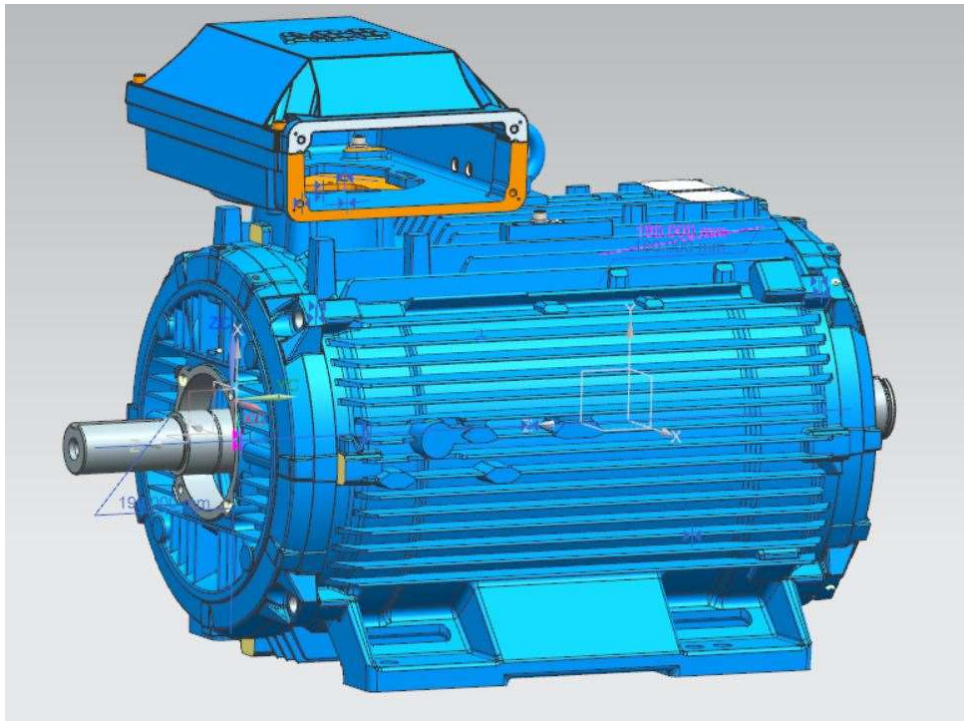
Mallien rakentaminen alkoi simuloimalla moottoriin tarvittavat osat SAP-järjestelmästä. Moottorin simuloimiseen tarvittavat tuotekoodit löytyvät moottorikatalogeista. Kun SAP oli simuloinut moottorille tarvittavat osat, valittiin sieltä osille kyseiset lajimerkit. Saadut osat avataan NX:ssä tehdystä uudessa kokoonpanossa. Kaikki simuloinnissa saadut osat lisätään kokoonpanoon, jonka jälkeen ne yhdistetään toisiinsa rajoituksilla.





**Kuva 10.** Moottorin rakenne SAP-sovelluksessa.

NX:ssä luotuun uuteen kokoonpanoon siirrettiin Sapista saatu runko, D-pään kilpi, N-pään kilpi, päälliitäntäkotelo, sekä akseli. Kokoonpanoon liitettiin myös staattori, joka mallinnettiin oikean painoiseksi sekä mittaiseksi. Näitä kokoonpanoja tein kaksi kappaletta, joista toinen moottori oli asennusasennolla B3 eli jalallinen moottori ja toinen puolestaan B5 eli laipallinen moottori.



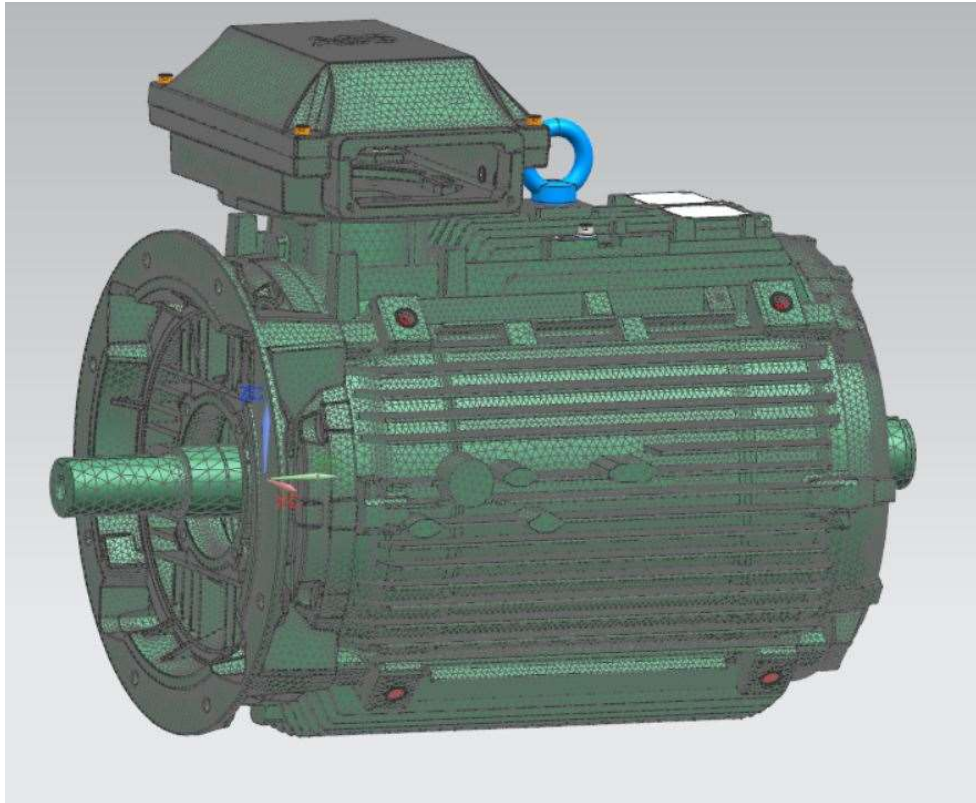
**Kuva 11.** 3D-mallinnus moottorista.

### 4.3 FEM-vaihe

Kun kokoonpano oli valmis kullekin moottorille, alkoi seuraavaksi moottorin niin sanottu verkotus. Simuloinnin alkuvaiheessa täytyi tehdä moottorista uusi kokoonpano FEM-Laskentaa varten. Kokoonpanosta luodaan myös toinen kokoonpano, niin sanottu "idealisoitu malli", johon voidaan tehdä muokkauksia verkotusta varten. Idealisoidussa katsotaan myös, että kaikilla kokoonpanossa olevilla osilla on omat oikeat materiaalit sekä painot.

Kun kaikille osille on annettu materiaalit, tehdään moottorille verkkomalli. Verkotettavat osat valitaan yksitellen sekä verkotukselle valitaan sopivat arvot. Arvoja näille osille pystyy nopeasti selvittämään automaattisesti tietokoneen antamalla arvoilla tai niitä voi myös itse antaa. Verkotuksen tiheys tulisi valita siten, että ohjelma ei laskisi turhaan suuria määriä dataa, mutta kuitenkin niin että tulokset ovat riittävän tarkat.

Tässä työssä on käytetty niin sanottua pyramidi elementtiä, sillä se soveltuu hyvin kolmiulotteisiin moottorisimulaatioihin. Tämän tyyppin elementtiverkko sopii myös sen takia tämän tyyppisiin simulaatioihin, sillä on kyky voida muotoilla se erilaisiin monimutkaisiin muotoihin. NX:n oma CTETRA10 on useimmiten käytössä oleva elementti, koska se täyttää kaikki vaatimukset simulaation verkottamisessa.



**Kuva 12.** Verkotettu moottori.

Mallien verkotusten jälkeen kaikki moottorin osat tulee kiinnittää toisiinsa käyttäen jäykkiä elementtejä. Näillä kiinnitetyt osat ovat ikään kuin pultattu toisiinsa kiinni. Kun kaikki osat olivat kiinni, piti akselille rakentaa mallissa keinotekoiset laakerit. Simulaatiomallissa on kaksi laakerielementtityyppiä. Ensimmäisessä elementtityypissä laakeri kiinnitetään molempien päiden laakerikilvistä akselin keski-kohtaan. Tätä tyyppiä käytetään nykyään, koska tulokset simulaatioissa ovat tämän avulla tarkemmat. Toisessa laakerityypissä akseli kiinnitetään myös miltei sa-

malla tavalla molemmista moottorin päistä kiinni mutta akselille tehdään sen keskikohtaan apupisteet noin millimetrin päähän, joiden välille luodaan joustava kiinnitys. Joustava kiinnitys antaa akselille vapauden liikkua eri suuntiin.

#### **4.4 Simuloidut laakerit**

Työhön ei mallinnusvaiheessa lisätä erityisiä mallinnettuja laakereita, vaan laakerit luodaan FEM-laskenta puolella. Laakerit tehdään lisäämällä moottorin molempiin päihin joko jousi elementit tai jäykät elementit. Nämä laakerit lisätään antamalla elementeille oikeat jäykkyydet. Näitä keinotekoisia laakereita oli työssä kahta eri tyyppiä.

Ensimmäinen laakerielementtityyppi on nykyään käytössä oleva jäykkäelementti. Tässä tyyppissä laakeri sijoitetaan molempiin päihin tukemaan kilpiä sekä akselia. Jäykkälaakeri pyrkii kuvaamaan normaalia laakerin toimintaa kummassakin päässä sille annetuilla arvoilla, sekä sillä saa usein mittaustuloksia lähempänä olevia simulaatiotuloksia.

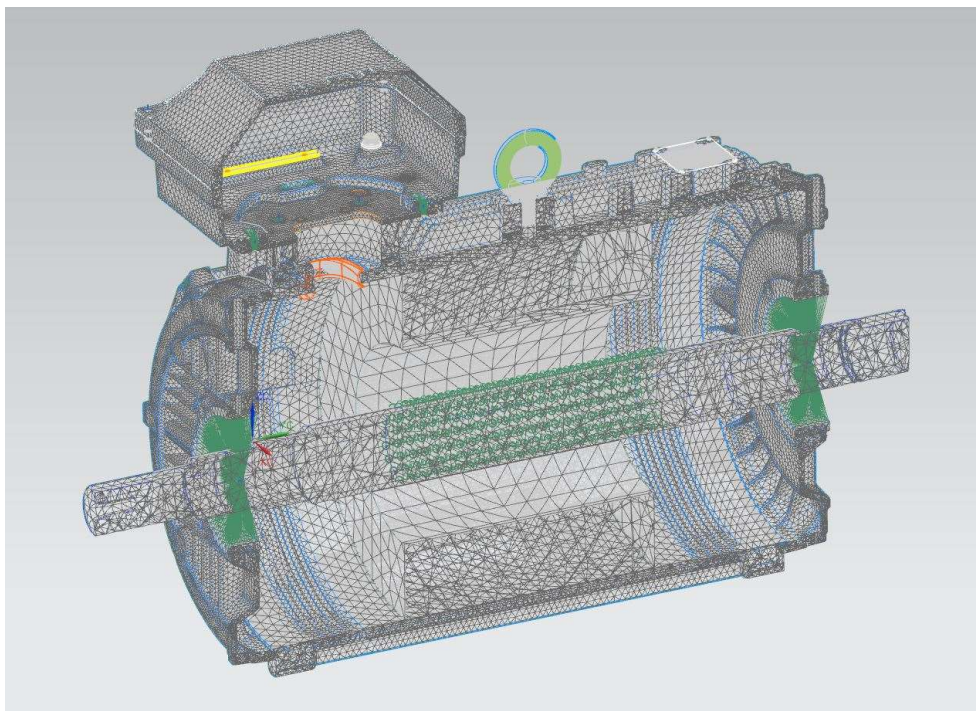
Toinen laakerielementtityyppi, jolla simulaatioita tehtiin, on nollajousi laakeri. Nollajousi sitoo akselin sekä kilvet kokoonpanoon kiinni pyrkii kuvaamaan normaalin laakerin toimintaa. Tähän laakerityyppiin simulaatiossa asetetaan jousielementti kahden pisteen välille. Tämä simulointimenetelmä kuitenkin voi antaa epäselvempiä tuloksia kuin jäykkälaakeri, jonka vuoksi jäykkää laakerityyppiä suositetaan simulaatiossa enemmän.

#### **4.5 Simuloidut kiinnityspultit**

Työssä ei myöskään käytetty valmiiksi mallinnettuja pultteja vaan pultit lisättiin FEM-puolella käyttäen jäykkiä 1D-elementtejä. Näillä elementeillä kiinnitettiin esimerkiksi molemmat D- ja N-pään kilvet, päällitöntäkotelo ja itse kokoonpano kiinni. Kokoonpanoa ei kiinnitetä FEM-laskennassa mihinkään konkreettiseen vaan moottorin kiinnityskohdille, jotka ovat moottorin jaloissa tai kiinnityslaipassa. Kokoonpano on kiinnitetty rungon ja kiinnityslaipan rei'istä joustavalla elementillä.

Kaikki pulttiliitokset tehtiin RBE2-elementeillä. RBE2-elementti eli jäykkä runkoelementti on tehokas työkalu eri komponenttien tai saman komponentin eri solmujen jäykkään yhdistämiseen. Kiinnitys toimii yhdistämällä 1D-elementillä pultin reiän keskipiste pultin kannen alla olevaan pintaan. Tämän jälkeen keskipiste yhdistetään vastakkaisen komponentin pultinreiän sisäpintaan käyttäen 1D-elementtiä.

#### 4.6 Simulaatiovaihe



**Kuva 13.** Moottori rautalankanäkymässä.

Kun kaikki nämä vaiheet olivat valmiina, voitiin aloittaa itse simulaatiot. Simulaatioita varten luodaan vielä yksi malli, jossa voidaan luoda simulointiasetuksia ja rajoitteita osien välille. Simulaatiomallien rakentamisen jälkeen ajettiin ensimmäinen testi. Mallien ajoissa voi mennä kymmenestä minuutista jopa tuntiin saakka. Näiden kyseisten moottorien simuloinneissa kului aikaa noin kymmenen minuuttia simulaatiota kohden. (Katso **LIITE 4**. Kuva 16).

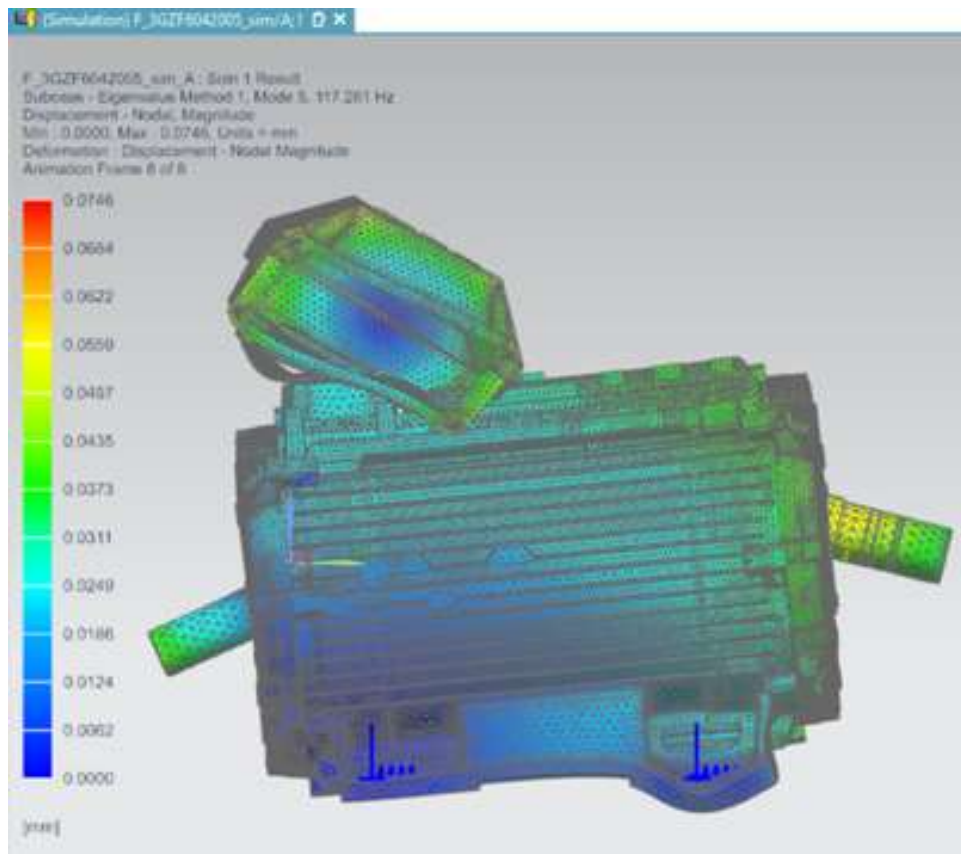
Valmiiksi ajetun simulaation tulokset antavat suuntaa, miten moottori tulee käyttäytymään, kun sitä ajetaan tietyllä nopeudella. Liian suuri värähtely moottorissa alkaa vaikuttamaan laakereiden, sekä muiden osien elinikään. Simulaatiota tehdessä päätimme ottaa ainoastaan viisi ensimmäistä moottorin alinta ominaistajuutta sekä näiden muodonmuutos tulokset.

## 5 SIMULAATIOIDEN TULOKSET

Pääliitäntäkotelon ei tule yleensä mittauksiin mukaan, mittauksissa käytettävät anturit laitetaan yleensä esimerkiksi moottorin jalkoihin tai muuhun määriteltyyn kohtaan moottoria. IEC-standardi ei aseta pääliitäntäkotelolle tärinävaatimuksia. Tästä syystä vaatimukset eivät koske pääliitäntäkotelon mittausta samalla lailla kuin runkoa ja muita moottorin pääosia.

Simulaatioiden valmistuttua NX:stä voidaan lukea simulointitulokset. Ennen simulaation alkua valittiin kuinka monta taajuutta simulaatio suorittaa sekä laskee. Mallin SMC4 simulaatioihin valittiin viisi taajuutta, kun taas mallin MLA2 valittiin 11 taajuutta. Näiden moottorin taajuuslaskelmien erona oli MLA2-moottorin parempi tulkinta. Simulaatio antaa myös jokaiselle taajuudelle nimen mode 1, mode 2, mode 3 ja niin edelleen. Näiden moodien alta löytyy kuusi eri simulointitulosta, joista tässä tapauksessa tärkein on Displacement -kohta.

Displacement näyttää simulaatiossa eri taajuuden muodonmuutoksen. Muutos näkyy asteikkoina simulaation reunassa. Simulaatiosta voidaan nähdä moottorin värähtelystä aiheutuva rungon sekä muiden osien muodon muutos animaationa.



**Kuva 14.** Simulaation Displacement -kohta.

### 5.1 Moottori simulaatioiden ja mittausten vertailu tulokset

Työstä saadut mittaus, sekä vertailutulokset ovat salattu opinnäytetyön julkisessa versiossa. Tulokset voidaan nähdä ABB:n tietokannasta, jotka ovat liitteinä 1–3.

### 5.2 Työn lopputulos

Tämän opinnäytetyön lopullisena tuloksena voitiin päätellä kuinka eri laakerielementtityypit vaikuttavat simulaation lopputulokseen. Lopputuloksista voidaan myös päätellä miten paljon tehtaalla mitattujen moottoreiden, sekä simuloitujen moottoreiden välillä on eroa. Erona näiden tulosten välillä on esimerkiksi mittaus- tulosten ja eri elementtilaakerityyppien tuloksien ero. Myös kokeilulla, jossa moottorin molempien päätyjen kilvet sekä päällitöntäkotelo liimattiin kiinni toisiinsa, tuloksissa oli eroavaisuuksia verrattuna aiempiin simulaatioihin.



Työn lopputulos oli onnistunut, sillä siitä voitiin huomata simulaatioissa sekä mitatuissa moottoreissa olevat eroavaisuudet, sekä yhteneväisyydet. Osassa tuloksista oli suuriakin eroja taajuuksien välillä, sekä osassa niissä näkyi vain pääliitännäkoteloon vaikuttavia tuloksia, jota ei mittauksissa normaalisti huomioida. Työssä saatiin sellaisia tuloksia mitä haettiin ja työn kaikki annetut tehtävät saatiin toteutettua sovituksessa aikataulussa. Työssä myös löydettiin muutama potentiaalinen jatkokehityskohta, joita ABB:n tuotekehitys tulee jatkossa mahdollisesti tutkimaan ja viemään eteenpäin. Ensimmäisestä kehityskohdasta, jossa osat liimataan kiinni, simuloitiin ja siitä saadut tulokset otettiin talteen. Tästä saadut tulokset näyttivät myös hyvin, millä tavalla tämän tyyppinen muutos vaikuttaa simulointituloksiin.

Mallien yhteisenä tekijänä oli toisistaan niiden samantyyppinen muutos pääliitännäkotelossa. simulaatiossa näkyi myös molempien mallien esimerkiksi akseliin kohdistuva muutos, sekä kokoonpanon samankaltainen muutos. Osassa tuloksista moottoreiden taajuudet simulaatiossa olivat todella lähellä toisiaan sekä mitattua moottoria.

Eroavaisuutena simulointituloksissa verrattuna mitattuun moottoriin näkyi simulaatioiden erilaisesta muutoksesta. Erona myös tuloksissa oli niiden eri suuntiin kohdistuva voima simulaatiossa. Eroavaisuutena oli myös niiden taajuudet osassa tuloksia.

## 6 TYÖN YHTEENVETO SEKÄ JATKOKEHITYS

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada mitatuista moottoreista ja niihin verrattavista simulaatioista tuloksia, joista voidaan tulkita, miten moottori käyttäytyy mitauksissa ja miten simulaatioissa. Opinnäytetyössä myös suoritettiin, sekä saavutettiin kaikki annetut tavoitteet ja toiveet, joista sovittiin ja puhuttiin työn alkuvaiheessa. Työtä kuitenkin hieman helpotti se, että olin työskennellyt moottorin kokoonpanojen sekä osien kanssa ennemmin.

Työn tarkoituksena ei ole hienosäätää eikä saada simulaatioita täydellisiksi tai valmiiksi vaan katsoa miten moottori reagoi ja sen mukaan alkaa säätämään ja keksimään ideoita, miten saatuja tuloksia parantaisi tai valmiita tekniikoita parantelisi. Joten tarkoituksena oli tarkastella tuloksia ja tutkia miten moottori reagoi, sekä mitä eroa eri simulaatioilla olisi. Työn lopussa kokeiltiin liimata kehitysmielessä moottorin molempien päiden kilvet, sekä sen pääliitännäskotelo kiinni ja katsoa miten tulokset muuttuvat. Työstä saadut tulokset esitellään ABB:n henkilökunnalle kesän 2022 aikana.

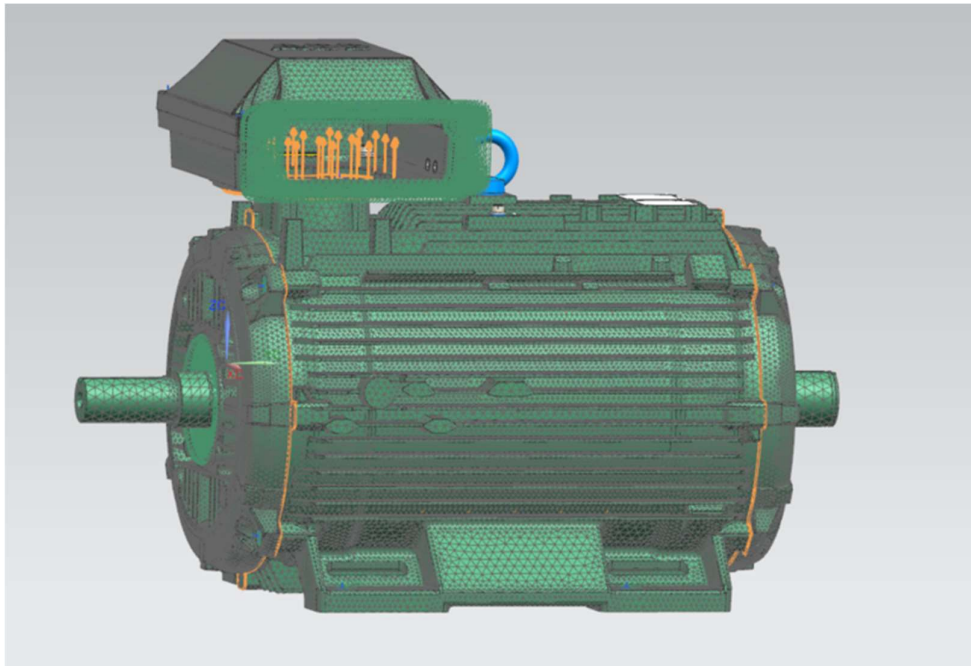
Simulaatioissa on käytetty eri sovelluksia sekä tietokantoja, joiden avulla simulaatiomallit ovat rakennettu. Malleissa on huomioitu erilaiset vaikuttavat tekijät, esimerkiksi osien painot ja materiaalit. Käytetyt sovellukset sekä tietokannat olivat selkeitä sekä helppoja itse harjoiteltaviksi.

Opinnäytetyö ei ollut missään nimessä helppo, sillä sen työmäärä oli suuri erittäin lyhyen ajan sisään. FEM-laskenta tai moottoreiden simulointi ei ollut minulle ennestään tuttua missään määrin vaan työtä tehdessä opettelin niitä tekemään. Työtä tehtiin paikan päällä sekä etänä ja yleensä työhön liittyvät palaverit hoidettiin etänä. Kollegoilta sekä työnohjaajalta ABB:ltä sai kuitenkin erittäin hyvin sekä nopeasti apua sitä tarvittaessa. Annetussa aikataulussa kuitenkin pysyttiin hyvin.

## 6.1 Jatkokehitysideat

Yhtenä kehitysideana mallinnuksien sekä simulaatioiden valmistumisen jälkeen oli tehdä simulaatiomallissa moottorin D- ja N-pään kilpien sekä pääliitântäkotelon ja sen runkoon kiinnittävän välilaipan liimaaminen. Liimaamisella tässä tarkoitetaan osien kiinnittämistä toisiinsa siten että ne eivät pääse liikkumaan toisiinsa nähden.

Tämä tapa voisi mahdollisesti antaa erilaisia tai tarkempia tuloksia. Näiden osien liimaaminen myös pyrkii kuvaamaan tarkemmin oikean moottorin rakennetta. Oikeassa moottorissa kilvissä on ohjauskoneistukset, joiden vaikutusta tällä pyritään simuloimaan.



**Kuva 15.** Simulaatiomallissa olevat liimauskohdat.

Toisena jatkokehitysideana voisi olla simulaatioissa muutos, jossa pääliitântäkotelon voisi korvata massapisteellä. Pääliitântäkotelon tämän tyyppinen muutos voisi toimia paremmin sen takia, että simulaatioissa osassa tuloksista pääliitântäkotelon osuus on suuri verrattuna siihen, että sitä ei normaalisti huomioida mittauksissa.

Simulaatioissa pääliitännäkotelon muodonmuutokset ovat huomattavia ja saattavat viedä liikaa tulosten tulkinnan huomiota. Simulaatioissa myös osa taajuuksista antaa tuloksen pelkästään pääliitännäkotelolle, joka saattaa hämätä mitattujen sekä simuloitujen tulosten vertailua ja tarkastelua. Näissä tuloksissa taajuudet saattavat olla samat mitatussa ja simulaatiossa mutta simulaation näyttämä muutos vaikuttaa vain pääliitännäkoteloon.

## LÄHTEET

- /1/ ABB. About ABB. Viitattu 14.3.2022. <https://global.abb/group/en/about>
- /2/ Galco. ABB Profile | ABB Company history and products. Viitattu 22.3.2022. <https://www.galco.com/comp/includes/mfg/abb.htm>
- /3/ ABB. ABB historia. Viitattu 14.3.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia>
- /4/ ABB. Suomalaiset juuret: Strömbergin jalanjäljillä vuodesta 1889. Viitattu 14.3.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>
- /5/ ABB. ABB Suomessa. Viitattu 14.3.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- /6/ ABB. ABB Oy, IEC LV Motors. Viitattu 28.3.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/iec-lv-motors>
- /7/ Motiva. Sähkömoottorityypit. 2020. Viitattu 22.3.2022. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/valitse-auto-viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit>
- /8/ Korpinen, L. Sähkökoneet. Viitattu 22.3.2022. [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)
- /9/ ABB. Detailed information for: 3GBP282220-BDK. Viitattu 22.3.2022. <https://new.abb.com/products/3GBP282220-BDK/3gbp282220-bdk>
- /10/ Bright Hub Engineering. Construction of squirrel cage induction motor explained. Viitattu 22.3.2022. <https://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/43723-how-are-squirrel-cage-induction-motors-constructed/>
- /11/ ABB. 2022. Low voltage process performance motors catalog. Viitattu 22.3.2022
- /12/ SKF. Rolling bearings. Viitattu 29.3.2022. [https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000\\_1-EN\\_tcm\\_12-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf)
- /13/CADWORKS. Staattinen laskenta ei aina riitä - varaudu resonanssiin. Viitattu 15.05.2022. <https://cadworks.fi/fi/articles/staattinen-laskenta-ei-aina-riita-varaudu-resonans>
- /14/ Vertex. FEA-laskennan teoriaa. Viitattu 25.04.2022. <https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa>

/15/ ABB. Structure Calculation Guideline for Standard Low Voltage Motors. Viitattu 29.3.2022.

/16/ ABB. ABB Bearings. Viitattu 11.05.2022

## **LIITTEET**

(Liitteet on poistettu julkisesta versiosta salassapitovelvollisuuden vuoksi)

### **LIITE 1.**

MLA2-ominaistaajuussimulointien ja mittaustulosten vertailu.

### **LIITE 2.**

SMC4-ominaistaajuussimulointien ja mittaustulosten vertailu.

### **LIITE 3.**

MLA2-jäykkälaakeri simulointien jatkokehitysidea ja mittaustulosten vertailu.

### **LIITE 4.**

**Kuva 16.** Simulaation lopputulos.