



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tony Lind

PARAMETRISEN MALLINNUKSEN
KEHITTÄMINEN SÄHKÖMOOTTOREI-
DEN SUUNNITTELUSSA

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tony Lind
Opinnäytetyön nimi	Parametrisen mallinuksen kehittäminen sähkömoottoreiden suunnittelussa
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	34 +23 liitettä
Ohjaaja	Pasi Thomasson & Juha Hantula

Sähkömoottoreihin suunnitellaan jatkuvasti uusia komponentteja, tai muokataan olemassa olevia asiakkaiden tarpeiden mukaan. Opinnäytetyön aiheena oli parametrisen mallinuksen kehittäminen sähkömoottoreiden suunnittelussa. Opinnäytetyö suoritettiin ABB Motors and Generators–yksikön suunnitteluosastolle.

Päätavoitteena opinnäytetyölle oli optimoida suunnittelutyön tehokkuutta, lyhentämällä sähkömoottoreiden komponenttien suunnittelutyöhön kuluva aikaa. Sähkömoottoreiden akseli valittiin pääaiheeksi, koska uusia akseleita joudutaan suunnittelemaan jatkuvasti, sekä niiden työlään mallinnusvaiheen vuoksi. Suunnittelutyötä onnistuttiin lyhentämään automatisoimalla mallinnusvaihetta, tekemällä vakioakselien 3D-malleista parametrisia. Muita tavoitteita oli tutkia parametriselle mallinnukselle muita käyttökohteita ja tuoda esiin sen mahdollisuuksia suunnittelijoille. Vakio akselien valmistuskuvat tehtiin yhdenmuotoisiksi, koska niissä oli eroavaisuuksia, akselin suunnittelijasta riippuen. Tehdyt valmistuspiirustukset ja 3D-mallit tehtiin ABB:n uuden sisäisen suunnitteluohjeen mukaiseksi.

Opinnäytetyössä esitellään parametrisen mallinuksen teoriaa ja hyötyjä, sekä käytettävyyttä erilaisiin aiheisiin.

Tehdyt parametriset 3D-mallit antavat mekaniikkasuunnittelijoille monimuotoiset, mutta helposti muokattavissa olevat pohjat uuden akselin suunnittelua varten, sekä lyhentävät selkeästi mallinnusvaiheeseen vaadittua aikaa.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	10
1.1	Tavoitteet ja rajaus	11
1.2	ABB:stä lyhyesti	11
1.2.1	ABB Suomessa	12
1.2.2	Motors and Generators	12
2	PARAMETRINEN MALLINNUS	13
2.1	Siemens NX 10	13
2.2	Teamcenter	13
2.3	Lausekkeiden ominaisuudet	13
2.4	Lausekkeiden luonti	15
2.4.1	Lausekkeen rakenteen muodostus	15
2.5	Tuoteperheet (Part Families)	16
2.6	Parametrisen mallinnuksen hyödyt	18
2.7	Haasteet	18
2.8	Hyödynnettävyys sähkömoottoreiden suunnittelussa	19
3	SÄHKÖMOOTTOREIDEN AKSELEIDEN SUUNNITTELU	20
3.1	Sähkömoottori	20
3.2	Sähkömoottorin akseli	21
3.3	Akselin materiaalin valinta	21
3.4	Mittojen suunnittelu	23
3.5	Lujuuslaskenta	24
4	SÄHKÖMOOTTOREIDEN AKSELEIDEN PARAMETRISTEN MALLIEN LUONTI ABB:LLE	25
4.1	Akseleiden mallintaminen	25
4.2	Kiilaurien ja keskiöpörausten mallintaminen	26
4.3	Parametrien lausekkeiden luonti	27
4.4	Valmistuskuvien luonti	28

4.5	Testaus ja tarkistus	29
4.6	Yhteenveto	30
5	KEHITYSMAHDOLLISUUDET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	31
5.1	Kehitysmahdollisuudet	31
5.1.1	Laakereiden valinta listasta	31
5.1.2	N-pään parametrisyys.....	31
5.1.3	Ylimääräiset akseliolakkeet	31
5.1.4	Lujuuslaskenta.....	32
5.1.5	Parametristen mallien luonti kaikille vakioakseleille	32
5.2	Johtopäätökset.....	32
	LÄHTEET	33

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1 Vaasassa valmistettava pienjännitemoottori (BP 280 SM 2P)	12
Kuvio 2 Parametristen lausekkeiden luonnin vaiheet.....	15
Kuvio 3 Part Families-työkalua varten tehty taulukko	17
Kuvio 4 Edellisen kuvion Excel-taulukon avulla, mallinnetut pultit M10-M36..	17
Kuvio 5 Poikkileikatun moottorin komponentit	20
Kuvio 6 Sähkömoottoreiden akseleita. Oikealla D-pää, vasemmalla N-pää.....	21
Kuvio 7 Akselin profiili.....	26
Kuvio 8 Akselin profiilista luotu 3D-malli.....	26
Kuvio 9 Oikealla suljettu kiilaura ja vasemmalla avoin kiilaura.....	27
Kuvio 10 Akseleiden mitoitustyyli	29
Taulukko 1 Parametristen lausekkeiden luonnin vaiheet	15
Taulukko 2 Yleisimmin käytettyjä loogisia funktioita taulukoituna	16
Taulukko 3 Sähkömoottorin akselin materiaalivalinta prosessi	22
Taulukko 4 Yleisesti käytettyjä akseliteräksiä sähkömoottoreiden akseleissa....	23
Taulukko 5 Eri standardeja, jotka vaikuttavat akselin mittojen suunnitteluun....	23
Taulukko 6 Parametristen akselimallien luonnin vaiheet	25

LIITELUETTELO

LIITE 1. Parametristen mallien käyttöohje käyttäjille

LIITE 2. BP 280 SM 2 akselin valmistuskuva

LIITE 3. BP 280 SM 4 akselin valmistuskuva

LIITE 5. BP 280 ML 2 akselin valmistuskuva

LIITE 6. BP 280 ML 4 akselin valmistuskuva

LIITE 7. BP 315 ML 2 akselin valmistuskuva

LIITE 8. BP 315 ML 4 akselin valmistuskuva

LIITE 9. BP 315 SM 2 akselin valmistuskuva

LIITE 10. BP 315 SM 4 akselin valmistuskuva

LIITE 11. BP 315 LK 2 akselin valmistuskuva

LIITE 12. BP 315 LK 4 akselin valmistuskuva

LIITE 13. BP 355 SM 2 akselin valmistuskuva

LIITE 14. BP 355 SM 4 akselin valmistuskuva

LIITE 15. BP 355 ML 2 akselin valmistuskuva

LIITE 16. BP 355 ML 4 akselin valmistuskuva

LIITE 17. BP 355 LK 2 akselin valmistuskuva

LIITE 18. BP 355 LK 4 akselin valmistuskuva

LIITE 19. BP 400 L 4 akselin valmistuskuva

LIITE 20. BP 400 LK 2 akselin valmistuskuva

LIITE 21. BP 400 LK 4 akselin valmistuskuva

LIITE 22. BP 450 L 4 akselin valmistuskuva

LIITE 23. BP 450 L 4 akselin valmistuskuva (pääkotelo N-päässä)

LYHENTEET JA MERKINNÄT

2P	Kaksi napainen sähkömoottori (Two poles)
3D	Kolmiulotteinen (Three Dimensional)
4P	Neljä napainen moottori (Four poles)
ABB	Asea Brown Boveri
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design)
CAM	Tietokoneavusteinen valmistus (Computer-aided manufacturing)
CAE	Tietokoneavusteinen tekniikka (Computer-aided Engineering)
D-pää	Akselin D-pää (Drive end)
DWG	Yleisesti käytetty CAD piirustuksien tiedostomuoto
I-DEAS	3D-CAD – suunnitteluohjelmisto (Integrated Design Engineering and Analysis Software)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Commission)
ISO	Kansainvälinen standardisoimisorganisaatio (International Organization for Standardization)
N-pää	Akselin N-pää (Non-Drive end)
PLM	Tuotteen elinkaaren hallinta (Product Lifecycle Management)
VC	Varianttikoodi (Variant Code) (Käytetään ABB:llä sähkömoottoreiden suunnitteluun)

1 JOHDANTO

ABB Motors and Generators valmistaa sähkömoottoreita ja -generaattoreita kaikenlaisiin sovelluksiin sopiviksi, jopa erittäin vaativiin olosuhteisiin asiakkaan tarpeiden mukaisesti /1/. Tämän vuoksi uusia komponentteja suunnitellaan jatkuvasti. Kompleksien komponenttien mallinnusvaihe on aikaa vievää. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia mahdollisia keinoja komponenttien mallinnukseen kuuluvan työajan lyhentämiseksi, parametrinen mallinnustyylin avulla. ABB Motor and Generators-yksikön suunnittelu- ja tuotekehitysosasto on käyttänyt hyväksi parametrissa mallinnusta, muun muassa moottoreiden mittakuvien valmistukseen, mikä on todettu hyvin tehokkaaksi, muttei uusien komponenttien suunnitteluun. Sähkömoottorit suunnitellaan asiakkaan tilaamien varianttikoodien mukaan, joista moottoriin mekaniikkaan vaikuttavia on noin 300 /3/. Yksi yleisimmistä muutoksesta, joka vaatii uuden osan suunnittelua, on akselin D-pään muutokset asiakkaan tarpeiden mukaan (VC070). Jos asiakkaalle sopivaa akselia ei ole vielä aikaisemmin valmistettu, täytyy uusi akseli suunnitella vaadittujen kriteerien mukaisesti. Eri asiakkailla on erilaisia vaatimuksia akseleille, riippuen käyttökohteista ja -ympäristöstä, minkä vuoksi uusien suunniteltavien akseleiden määrä on suuri. ABB:llä siirryttiin I-DEAS – suunnitteluohjelmistosta NX 10 – ohjelmistoon vuoden 2017 alussa. Siirron vuoksi vanhat I-DEAS 3D-mallit, jouduttiin ”migrata”, jotta niitä voitaisiin käyttää uudessa ohjelmistossa. Migraatiosta johtuen vanhojen komponenttien muokattavuus vaikeutui huomattavasti, sillä alkuperäinen luonnos puuttuu kokonaan. Huono muokattavuus korostuu etenkin akseleissa yksityiskohtien suuren määrän vuoksi. ”Migrattuihin” malleihin on myös muodostunut satunnaisia virheitä, kuten erilaisia fonttinvirheitä, sekä akselin valmistuskuvissa olevien kuvantojen puuttuminen. Jotta vanhojen mallien ongelmat voitaisiin korjata, täytyi luoda täysin uudet 3D-mallit ja valmistuskuvat. Malleihin luotiin myös parametrisia lausekkeita, sillä parametrinen mallinnuksen avulla NX10- ohjelmistossa on mahdollista mallintaa samantyyllisiä komponentteja tehokkaasti, erilaisten lausekkeiden avulla (Expressions) /2/. Tämän vuoksi parametrinen mallinnuksen hyödynnettävyyteen komponenttien suunnittelutyössä syvennyttiin opinnäytetyön muodossa.

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda pienjännite prosessimoottoreiden BP 280-BP 450 kokoluokkien vakioakseleista parametriset NX 10 3D-mallit ja päivittää vanhat valmistuskuvat uusien suunnitteluohjeiden mukaisiksi. Pää tavoitteena oli tehdä 3D-mallit ja valmistuskuvat helppokäyttöiseen ja nopeasti muokattavaan muotoon. Muita tavoitteita oli muun muassa tehdä valmistuskuvista yhdenmuotoisia ja selkeitä, sekä korjata vanhojen valmistuskuvien mahdolliset virheet ja puutteet.

1.2 ABB:stä lyhyesti

ABB on teknologiaan ja sen kehitykseen erikoistunut yritys, joka on yli 100-vuotisen historiansa aika keksinyt tai ollut edelläkävijä monissa sähkövoima- ja automaatioteknologioissa /4/. ABB työllistää kokonaisuudessaan noin 135 000 työntekijää yli 100 maassa /5/. Yritys on organisoitu neljään päädivisioonaan, jotka koostuvat eri teknologioihin keskittyvistä yksiköistä /6/:

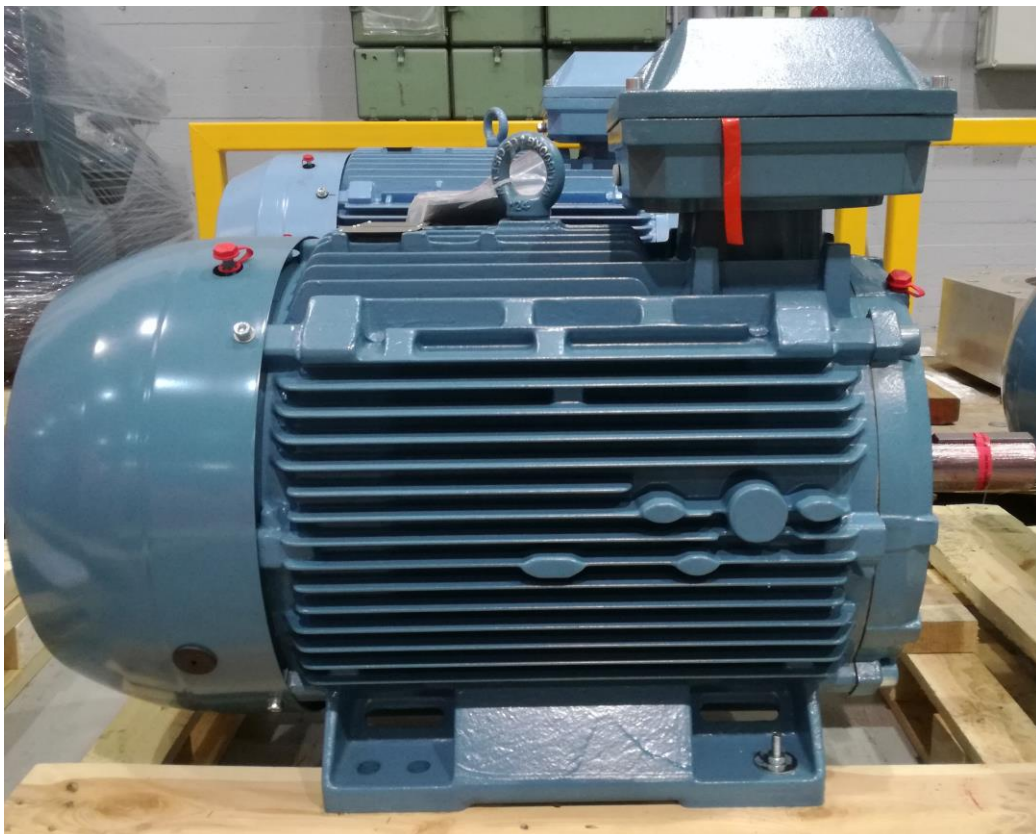
- **Electrification Products division**
Divisioona, joka on erikoistunut erilaisiin pien- ja keskijänniteasennuksiin, sekä -ratkaisuihin. Tuotteisiin kuuluu muun muassa aurinkovoima vaihtosuuntaajat, sekä sähköjakeluasemat /7/.
- **Robotics and Motion division**
Divisioona, joka erikoistuu automaatioon ja automaatiojärjestelmiin. Päätuoteperheinä ovat Sähkömoottorit ja – generaattorit, robotit ja taajuusmuuntajat /8/.
- **Industrial Automation division**
Divisioona, joka tarjoaa energiatehokkaita automaatiotratkaisuja teollisuuden eri osa-alueille, kuten metalli- ja öljyteollisuudelle /9/.
- **Power Grids division**
Divisioona keskittyy sähköverkostojen kehittämiseen ja sähkönsiirron automaation kehittämiseen. Divisioona tarjoaa myös ratkaisuja sähköverkostojen luontiin. Esimerkkinä tästä on tuulivoimalan sähköverkoston ratkaisut /10/.

1.2.1 ABB Suomessa

Suomessa ABB:llä on neljä tehdaskeskittymää, jotka sijaitsevat Haminassa, Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. Yhteensä ABB toimii noin 20 paikkakunnalla ja työllistää noin 5300 työntekijää /11/.

1.2.2 Motors and Generators

Motors and Generators-yksikkö on osa Robotics and Motion divisioonaa. Maailmanlaajuisesti ABB:n moottori- ja generaattoriliiketoiminta työllistää noin 14 000 henkilöä 36 tehtaassa ja 11 maassa, näistä noin 1500 työskentelee Suomessa. Yksikön tehtaas Suomessa sijaitsevat Vaasassa, joka keskittyy pienjännitemoottoreiden valmistukseen (Kuvio 1) ja tuotekehitys tehtäviin, sekä Helsingissä Pitäjänmäellä, jossa valmistaa ja kehittää korkeajännite- ja keskijännitemoottoreita, sekä dieselgeneraattoreita /12/.



Kuvio 1 Vaasassa valmistettava pienjännitemoottori (BP 280 SM 2P)

2 PARAMETRINEN MALLINNUS

Parametrinen mallinnus on ominaisuus, jota voidaan hyödyntää monissa CAD-ohjelmistoissa, jonka avulla komponentteja ja kokoonpanoja voidaan hallita ja muokata tehokkaasti. NX10:nessä tämä tapahtuu parametrien, sekä lausekkeiden (Expressions) avulla.

- Parametrit ovat malliin liittyviä muuttujia, jotka ovat käyttäjien luomia, tai ohjelmiston itse määrittämiä.
- Lausekkeet (Expressions), ovat aritmeettisia tai loogisia kaavoja, jotka määrittävät parametrien ominaisuuksia ja arvoja /13/.

2.1 Siemens NX 10

Siemens NX 10 on tässä opinnäytetyössä, käytetty käyttäjäystävällinen ja korkealaatuinen CAD/CAE/CAM ohjelmisto. NX 10:tä käytetään yleisesti komponenttien suunnitteluun, dokumentaation luontiin, erilaisiin simulaatioihin, analyyseihin, sekä CAM-työohjelmien luontiin työstökoneita varten /14/.

2.2 Teamcenter

Teamcenter on Siemens PLM Softwaren kehittämä, moderni PLM-ohjelmisto, jonka avulla voi hallita tuotteiden dataa, kuten 3D-malleja ja dokumentaatiota /15/. Teamcenteriä käytetään ABB:llä yleisesti datan säilytykseen, joita voidaan hakea tiedostoille annettujen lajimerkkien avulla. Opinnäytetyössä tehdyt mallit tallennettiin Teamcenteriin.

2.3 Lausekkeiden ominaisuudet

Lausekkeet voidaan nimetä Name-kentässä tarpeen mukaan, jotta ne ovat helposti ymmärrettävissä kaikille käyttäjille. Comment-kenttään voidaan lisätä selventäviä kommentteja lausekkeelle. Lausekkeiden avulla voidaan hallita muun muassa parametrin:

- pituutta
- pinta-alaa
- tilavuutta
- kulmaa

- lämpötilaa

Parametrien yksikkötyyppiä vaihdetaan riippuen mitä lausekkeella tahdotaan hallita. Yksikkötyypit sisältävät metrijärjestelmän, sekä brittiläisen yksikköjärjestelmän yksiköt. Lausekkeiden datatyyppejä on seitsemän, joidenka käyttö riippuu lausekkeen rakenteesta, sekä muokattavasta parametrissa /16/. Datatyypit ovat seuraavat:

- Number

Datatyypin, jonka parametrille voidaan määrittää suure, kuten pituus tai massa ja yksikkö, joka riippuu suureesta. Number-datatyypin käytetään komponenttien mittojen määrittämiseen, sekä erilaisten arvojen määrittämiseen simulointeja varten.

- String

Käytetään, kun halutaan määrittää parametrin olevan sana, tai kirjainyhdistelmä. Tätä voidaan käyttää muun muassa, kun halutaan nimetä alikokoonpanoja tai muotoja komponenteille.

- Boolean

Boolean datatyypin avulla voidaan määrittää onko lauseke tosi (true) vai epätosi (false). Voidaan käyttää, kun halutaan määrittää kuuluuko tietty ominaisuus komponenttiin tai kokoonpanoon.

- Integer

Integer datatyypin parametrin ovat kokonaislukuja, ilman yksikköä. Näitä käytetään pääsääntöisesti piirteiden määrän määrittämiseen, kuten reikien lukumäärään komponentissa.

- Point

Point datatyypin avulla määritetään parametrin sijainti koordinaatiston X, Y ja Z pisteiden avulla.

- Vector

Vector datatyypin avulla määritetään parametrin suunta I, J ja K koordinaatiston avulla.

- List

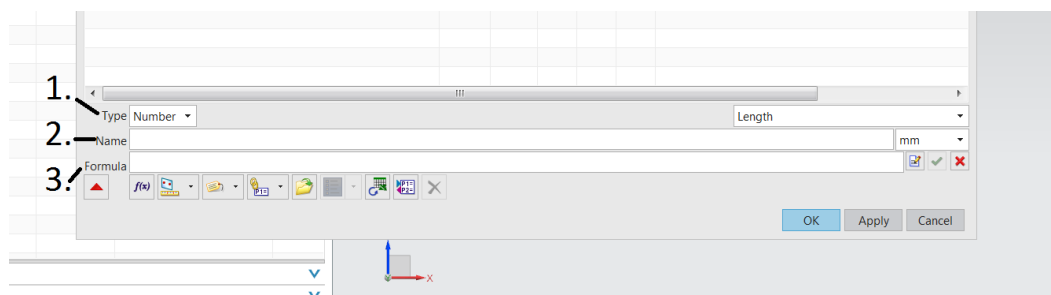
Jos yhdelle parametrille on monta erilaista mahdollista vaihtoehtoa, on suotavaa käyttää List-datatyyppeä, jonka avulla kaikki parametrit ovat mahdollista laittaa listaan. Listasta on helposti valittavissa tarvittava parametri.

2.4 Lausekkeiden luonti

Lausekkeet luodaan NX 10:nessä Expressions-työkalua käyttäen. Parametreja hallitsevien lausekkeiden luonti koostuu kolmeen vaiheeseen (Taulukko 1), (Kuvio 2). Käyttäessä Number-datatyyppeä, täytyy vielä määrittää käytetty suure ja yksikkö.

Vaihenumero	Vaihe	Selitys
1	Datatyypin valinta	Valitaan datatyyppi, käytettävän lausekerakenteen mukaisesti
2	Lausekkeen nimeäminen	Nimetään lauseke selvästi, jotta sitä käyttävät käyttäjät ymmärtävät, mihin lauseke vaikuttaa
3	Lausekkeen muodostus	Lausekkeen rakenteen muodostaminen

Taulukko 1 Parametristen lausekkeiden luonnin vaiheet



Kuvio 2 Parametristen lausekkeiden luonnin vaiheet

2.4.1 Lausekkeen rakenteen muodostus

Lausekkeen rakenne kirjoitetaan Formula-kenttään. Lausekkeet ovat matemaattisia laskutoimituksia, joihin voidaan lisätä erilaisia loogisia funktioita. NX 10 tukee monia eri matemaattisia funktioita, kuten plus- ja miinuslaskuja, potensseja, kerto- ja

jakolaskuja. Käytettäviä loogisia funktioita NX 10:nessä on noin 300, joista yleisimmin käytettyjä on eritelty seuraavaan taulukkoon (Taulukko 2).

Funktio	Selitys	Esimerkki	Esimerkin selitys
>	Suurempi kuin	If(Halkaisija>6) 5 else 4	Jos parametri Halkaisija on suurempi kuin 6, tulee lausekkeen arvoksi 5, muuten 4
<	Pienempi kuin	If(Pituus<120) 25 else 22	Jos parametri Pituus on pienempi kuin 120, tulee lausekkeen arvoksi 25, muuten 22
=	Yhtä suuri kuin	If("Keskiöporaus"="M20") 1 else 0	Jos parametri Keskiöporaus on yhtä suuri kuin M20, tulee lausekkeen arvoksi 1, muuten 0 (Huom. Käytetty String-data-tyyppiä, joten parametrit lainausmerkeissä)
&	Ja	If(Halkaisija=6&Pituus>120) 7 else if(Halkaisija=8&Pituus>160) 9 else 5	Jos Halkaisija=6 ja Pituus>120 tulee arvoksi 7, tai jos Halkaisija=8 ja Pituus>160 tulee arvoksi 9, muuten 5

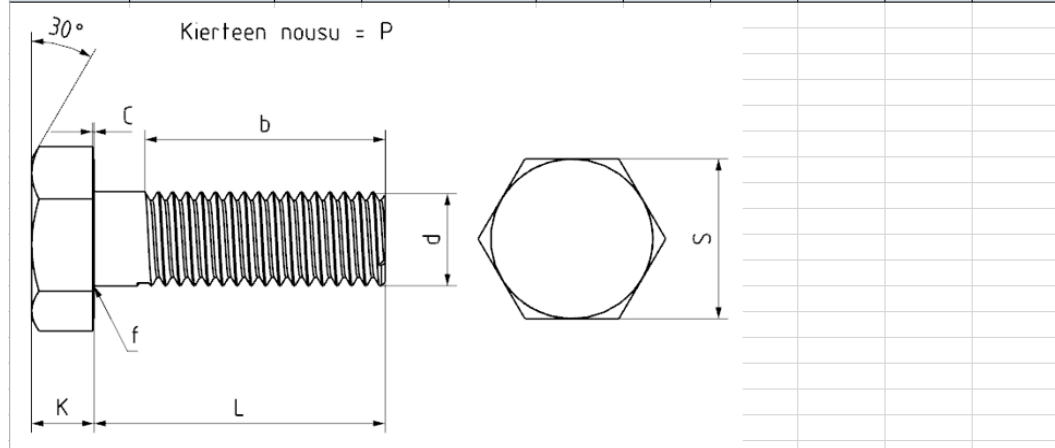
Taulukko 2 Yleisimmin käytettyjä loogisia funktioita taulukoituna

Lausekkeita voidaan jatkaa tarpeen mukaisesti Else if-funktion avulla, kunhan lauseke päätetään Else-funktiolla, kuten taulukon 2 viimeisessä esimerkissä. Muokattavuuden ja ylläpidon vuoksi ei ole suotavaa muodostaa liian pitkiä lausekkeita.

2.5 Tuoteperheet (Part Families)

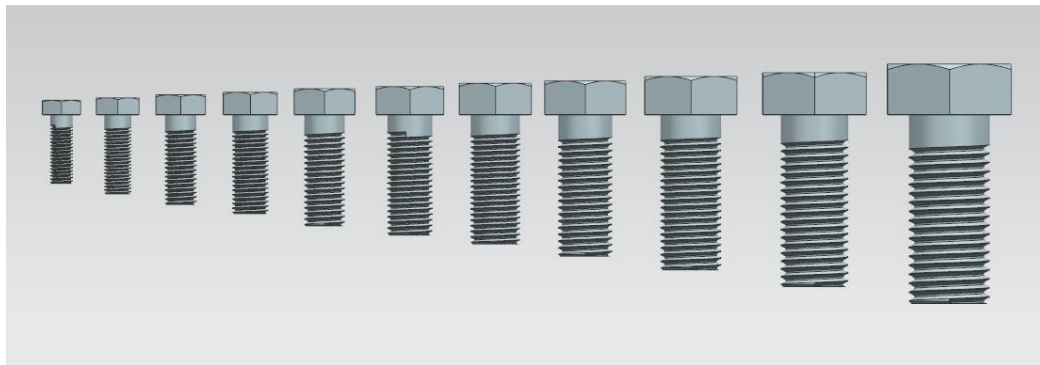
NX-ohjelmistoon on integroitu Part Families-työkalu, joka käyttää hyväksi parametrien lausekkeita. Annettujen parametrien ja lausekkeiden avulla voidaan mallintaa kokonaisia tuoteperheitä nopeasti. Tämän työkalun käyttäminen vaatii mallikappaleen, johon on määritetty kaikki muuttuvat parametrit ja nämä ovat kirjattu ulkoiseen Excel-tilukseen (Kuvio 3) /17/. Part Families-työkalua on tehokasta käyttää, kun komponentit ovat yksinkertaisia ja niitä täytyy mallintaa suuria määriä. Esimerkkinä M10-M36 pulttien mallintaminen kuvion 3 Excel-tiluksen avulla (Kuvio 4). Tätä työkalua ei käytetty opinnäytetyössä tehdyissä akselimalleissa, akselien suuren muuttuvien yksityiskohtien määrän vuoksi.

DB_PART_NO	OS_PART_NAME	d	P	K	C	f	S	L	b	d2
1	M10	10	1,5	6,4	0,15	0,4	17	30,5	26	8,15
2	M12	12	1,5	7,5	0,15	0,6	19	35,3	30	9,853
3	M14	14	2	8,8	0,15	0,6	22	40	34	11,546
4	M16	16	2	10	0,2	0,6	24	44	38	13,546
5	M18	18	2,5	11,5	0,2	0,6	27	49,5	42	14,933
6	M20	20	2,5	12,5	0,2	0,8	30	53,5	46	16,933
7	M22	22	2,5	14	0,2	0,8	32	57,5	50	18,933
8	M24	24	3	15	0,2	0,8	36	63	54	20,319
9	M27	27	3	17	0,2	1	41	69	60	23,319
10	M30	30	3,5	18,7	0,2	1	46	76,5	66	25,705
11	M36	36	4	22,5	0,2	1	55	84	72	31,093



Kuvio 3 Part Families-työkalua varten tehty taulukko

Kun Excel-tilukko on valmis, voidaan luoda komponenttien mallit (Create Family), jonka jälkeen niitä voidaan käyttää kokoonpanoissa.



Kuvio 4 Edellisen kuvion Excel-tilukon avulla, mallinnetut pultit M10-M36

2.6 Parametrisen mallinnuksen hyödyt

Kun perinteisellä suunnittelu menetelmällä tehtyä 3D-mallia tahdotaan muokata, täytyy suunnittelijan mennä alkuperäiseen luonnokseen (Sketch) ja muuttaa tarvittavia mittoja, sekä ominaisuuksia. Tähän vaadittu aika kasvaa aina riippuen mitä yksityiskohtaisempia, sekä monimutkaisempi komponentti tai kokoonpano on. Monimutkaisten komponenttien luonnoksien avaaminen on raskasta tietokoneiden prosessointikyvyllä ja hitaammilla tietokoneilla näiden avaus aiheuttaa viivettä. Parametrisella mallinnuksella alkuperäistä luonnosta ei tarvitse avata parametreja muuttaessa, vaan niitä voidaan hallita suunnittelijan muodostamilla lausekkeilla. Lausekkeilla on myös mahdollista muokata piirteiden ja mittojen riippuvuutta toisten parametrien suhteen, jolloin yhdellä parametrilla voidaan hallita useaa mittaa, sekä muotoa ja täten automatisoiden mallinnuksen eri vaiheita. Esimerkiksi tässä opinäytetyössä akselin kiilauran mitat noudattavat standardia SFS 2636 automaattisesti akselin D-pään halkaisijan mukaan, eikä suunnittelijan tarvitse mallintaa kiilauraa uudelleen akselin D-pään halkaisijan muuttuessa. Kun samoja parametreja ja lausekkeitä käytäviä malleja on monta, voidaan niitä hallita ulkoisella tietokannalla, esimerkiksi Excel – taulukolla. Ulkoista tietokantaa muokkaamalla voidaan päivittää kaikki mallit kerralla. Perinteisellä mallinnus tavalla luodut komponentit ja kokoonpanot joudutaan muokkaamaan yksitellen.

2.7 Haasteet

Sen mitä lausekkeilla on mahdollista automatisoida suunnitteluvaiheessa, on käytännössä rajatonta, mutta lausekkeiden monimutkaisuuden kasvaessa ylläpito, sekä muokattavuus ilman virheitä hankaloituu. Monimutkaisten lausekkeiden rakentaminen selkeäksi kaikille on tärkeää, etenkin lausekkeitä ylläpitävän suunnittelijan vaihtuessa toiseen. Jos mallissa käytettyjen parametrin määrä kasvaa suureksi, on suotavaa käyttää ulkoista tietokantaa, kuten Excel-taulukkoa niiden ylläpitämiseksi. Excel-taulukkoon on myös mahdollista kirjoittaa selventäviä lisäkommentteja lausekkeiden rakenteista.

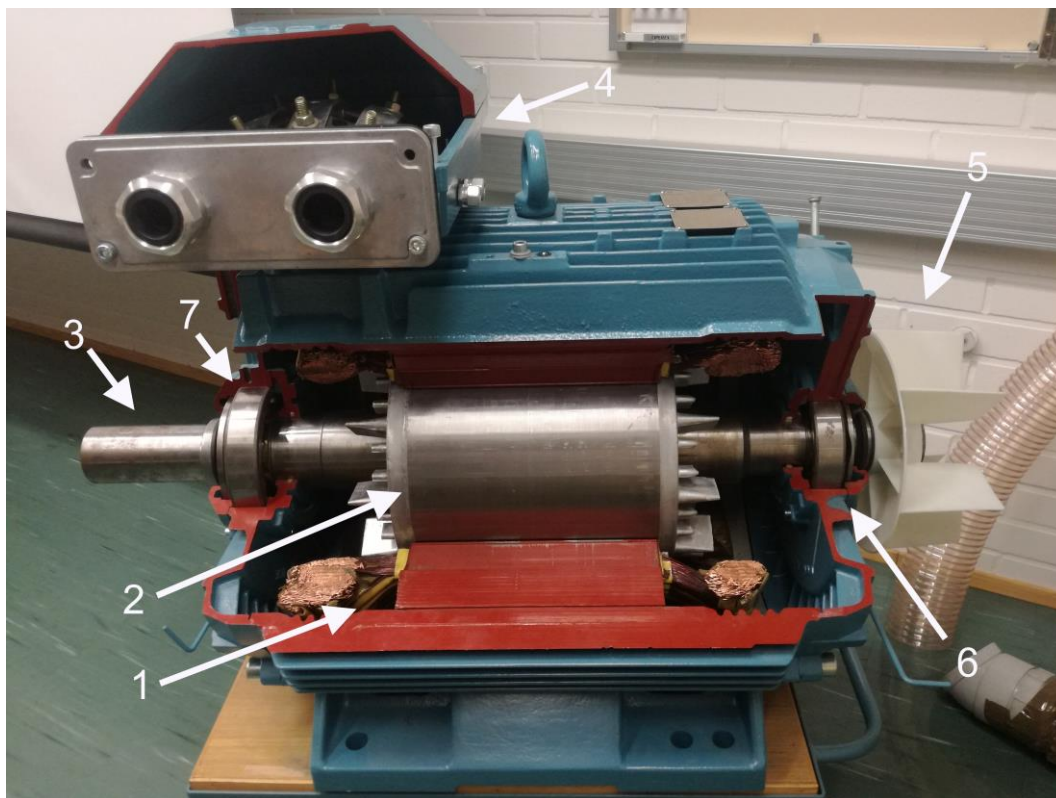
2.8 Hyödynnettävyys sähkömoottoreiden suunnittelussa

Kun sähkömoottoreiden komponentteja suunnitellaan, tehdään niistä ensin 3D-mallit, sekä mahdolliset mittakuvat. Parametrinen mallinnus on järkevää hyödyntää kaikissa sähkömoottoreiden komponenteissa, joidenka muutokset ovat yleisiä, samantyyllisiä ja joidenka muutosten laatu on ennalta tiedettävissä, kuten akseleissa, liitäntälaiipoissa ja tuuletinsuojissa. Parametrien hyödynnettävyys korostuu etenkin uusien tuoteperheiden suunnitteluvaiheessa, kun samantyyllisiä komponentteja joudutaan mallintamaan paljon. Huolella tehdyt parametriset 3D-mallit helpottavat suunnittelijoiden työtä pidemmällä tähtäimellä huomattavasti.

3 SÄHKÖMOOTTOREIDEN AKSELEIDEN SUUNNITTELU

3.1 Sähkömoottori

Sähkömoottori on sähkökone, joka muuttaa siihen syötetyn sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin toiminta perustuu magneettikentässä olevan virrallisen johtimen ja magneettikentän väliseen voimavaikutukseen. Kaikista sähkömoottoreista voidaan erotella perusosat: paikallaan pysyvä staattori ja pyörivä osa roottori, joka koostuu roottoripaketista ja akselista (Kuvio 5). Roottorin ja staattorin välillä on ilmarako, jotta roottori pääsee pyörimään vapaasti. Ilmarako pyritään pitämään mahdollisimman pienenä magneettikentän heikkenemisen minimoimiseksi. Roottori pysyy paikallaan sähkömoottorin laakereiden varassa /18/.

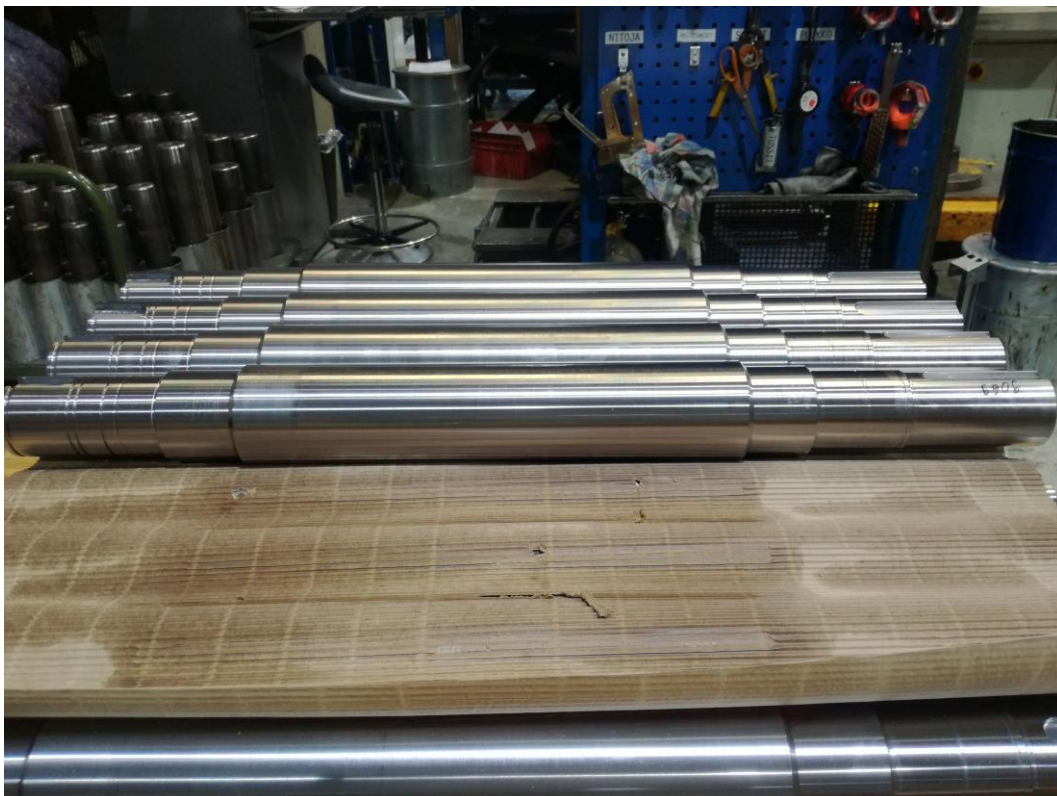


Kuvio 5 Poikkileikatun moottorin komponentit

1 Staattori, 2 Roottori, 3 Akseli, 4 Pääkotelo, 5 Tuuletin, 6 N-pään laakeri, 7 D-pään laakeri.

3.2 Sähkömoottorin akseli

Sähkömoottorin akseli on koneenelin, jonka tarkoitus on siirtää sähkömoottorin roottoriin muodostunut mekaaninen pyörimisvoima ulos moottorista. Moottorista ulostulevaa akselin osaa, johon voidaan liittää käyttökohde, sanotaan D-pääksi (Drive-end) ja toista päätä N-pääksi (Non drive-end) (Kuvio 6).



Kuvio 6 Sähkömoottoreiden akseleita. Oikealla D-pää, vasemmalla N-pää

3.3 Akselin materiaalin valinta

Sähkömoottoreiden akseleissa käytettävä materiaali, riippuu käyttökohteen vaatimuksista, sekä olosuhteista. Suunnitteluvaiheessa täytyy suunnittelijan kiinnittää huomiota materiaalin aineominaisuuksiin. Yleisimmät huomioon otettavat aineominaisuudet ovat lujuus, tiheys, eri lämpötilojen kesto, korroosio-ominaisuudet, hinta, muovattavuus, sekä pintaominaisuudet /19/. Akselit valmistetaan eri teräksistä, joidenka iskunkestävyys mitataan ISO 148-1:2016 standardin mukaisesti Charpy V – iskulujuuskokeella /20/. Kantavien teräsrakenteiden iskutkeys on oltava SFS EN 1090-1 standardin mukaisesti 27 joulea -20 °C:n lämpötilassa /21, 22/.

Akselimateriaalit ovat nimetty käytettyjen metallien, myötölujuuden, Charpy V-iskukokeessa käytetyn iskuenergian mukaan ja lämpötilan mukaan. Materiaalin valinta ei ole koskaan yksiselitteinen prosessi, vaan askelittain etenevä ongelmanratkaisu prosessi (Taulukko 3) /19/.

Askel	Selitys
Materiaalien vaatimuksien määrittäminen	Tuotteen käyttöympäristön ja käyttöolosuhteiden selvittäminen
Tärkeimpien materiaalien tarkastelu	Tarvittavien ominaisuuksien vertailu materiaalin perusominaisuuksiin
Päävaihtoehdon valinta	Käytetyn materiaalin valinta, vertaamalla tarvittavaa suorituskykyä, kustannuksia, valmistettavuutta ja saatavuutta
Soveltuvuuden selvittäminen erikoisolosuhteisiin	Erikoisolosuhteisiin sopivuuden määrittäminen testeillä, ellei näitä ole tutkittu aikaisemmin

Taulukko 3 Sähkömoottorin akselin materiaalivalinta prosessi

Yleisimmin käytetyt akselinteräkset sähkömoottoreissa ovat hitsattavan rakenneteräksen S355 variaatiot, nuorrutusteräkset ja ruostumattomat teräkset. Nuorrutusteräksiä käytetään, kun lujuuden, sitkeyden ja väsymislujuuden vaatimukset kasvavat. Ruostumattomia teräksiä käytetään erityisesti elintarviketeollisuudessa /19/. Yleisesti käytettyjä akseliteräksiä sähkömoottoreiden akseleissa on eritelty seuraavaan taulukkoon (Taulukko 4).

Materiaali	Aineominaisuudet
S355J2+N	Kuumavalssattu rakenneteräs, 27 joulen iskunkestävyys vähintään -20 °C:n lämpötilassa
S3355J4+N	Kuumavalssattu rakenneteräs, 27 joulen iskunkestävyys vähintään -40 °C:n lämpötilassa
S355J5+N	Kuumavalssattu rakenneteräs, 27 joulen iskunkestävyys vähintään -50 °C:n lämpötilassa
34CRNiMo6+QT	Karkaistu nuorrutusteräs, 27 joulen iskunkestävyys vähintään -20 °C:n lämpötilassa
X17CrNi16-2	Ruostumaton nuorrutusteräs, joka on magneettisesti johtava 27 joulen iskunkestävyys vähintään -20 °C:n lämpötilassa

Taulukko 4 Yleisesti käytettyjä akseliteräksiä sähkömoottoreiden akseleissa

3.4 Mittojen suunnittelu

Akselin päämitat muodostuvat eri standardien mukaan (Taulukko 5), sähkömoottorin roottorin ja rungon pituuden, laakeriväljen, mahdollisen tuulettimen, laakerien sisähalkaisijan ja roottorin sisähalkaisijan mukaan. D-pään mitat suunnitellaan käyttökohteen mukaisesti, paitsi vakio moottoreissa. Akselin mittoihin vaikuttaa myös erilaiset lisälaitteet, kuten pyörimisnopeuden mittarit (takometrit) ja erillispuhaltimet.

Mitta	Standardi	Viittaus
Kiilauran syvyys	SFS 2636	/19/
Kiilauran leveys	SFS 2636	/19/
Varmistusrenkaan uran leveys	DIN 471	/23/
Varmistusrenkaan uran syvyys	DIN 471	/23/
Keskiöporauksien mitat D-päässä	DIN 332	/24/
Keskiöporauksien mitat N-päässä	DIN 332	/24/
Akselin olakkeiden urien mitoitus	DIN 509	/24/
Mitta D-pään olakkeesta, ensimmäisen moottorijalan reiän keskipisteeseen	IEC 60072-1	/25/

Taulukko 5 Eri standardeja, jotka vaikuttavat akselin mittojen suunnitteluun

3.5 Lujuuslaskenta

Valmistettavalle akselille on suoritettava lujuuslaskenta DIN 743-1 ja DIN 743-2 mukaisesti, sillä akselilta edellytetään tietty käyttöikä, mikä riippuu käyttötarkoituksesta. Lujuuslaskennan avulla pyritään selvittämään akselin käyttöikä, sekä minimoimaan akseleiden suunnitteluvirheistä johtuvat vauriot. Laskettavia arvoja ovat muun muassa maksimi aksiaalinen kuorma, rasituksen varmuuskerroin ja akselin olakkeiden rasitukset /19, 26, 27/. Laskentaa voidaan nopeuttaa muun muassa Excel-taulukoiden avulla, joihin on määritetty laskettavat lausekkeet valmiiksi.

4 SÄHKÖMOOTTOREIDEN AKSELEIDEN PARAMETRISTEN MALLIEN LUONTI ABB:LLE

Ennen mallien luontia täytyi opetella ja hallita akseleiden suunnitteluun liittyvät standardit, sekä toleranssit, sillä osana opinnäytetyötä oli myös korjata mahdolliset virheet vakioakseleiden valmistuskuvissa. Uusien mallien täytyi myös noudattaa ABB:n sisäisiä suunnitteluohjeita. Mallien käytöstä täytyi tehdä yleinen ohje, koska parametrissa mallinnusta ei ole käytetty ABB:llä aikaisemmin uusien komponenttien suunnitteluun, eikä käsite ole tuttu kaikille mekaniikkasuunnittelijoille. Mallien luonti jakautui viiteen vaiheeseen (Taulukko 6).

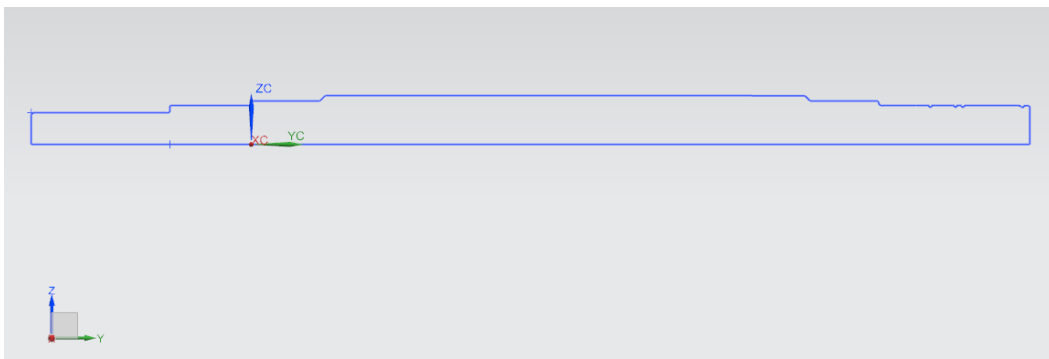
Vaihe	Vaiheen selitys
1	Akselin profiilin mallintaminen
2	Kiilaurien ja keskiöpörausten mallintaminen
3	Parametrien lausekkeiden luonti
4	Valmistuskuvien luonti
5	Parametrien toimivuuden testaus ja valmistuskuvien mittojen tarkastus

Taulukko 6 Parametrusten akselimallien luonnin vaiheet

4.1 Akseleiden mallintaminen

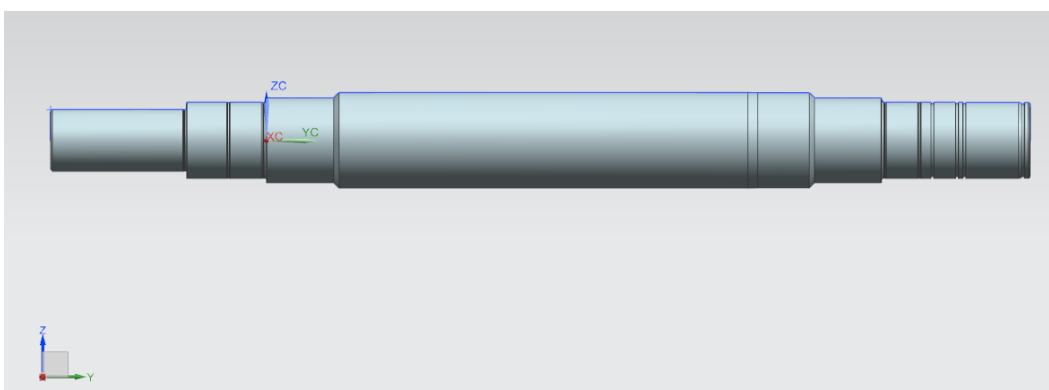
Ensimmäisenä täytyi selvittää olisiko mahdollista luoda yksi akseliprofiili, joka kattaisi kaikkien akselien profiilit parametrien muokattavuuden avulla, koska suunnittelijoiden on helpompi ottaa yksi malli pohjaksi uutta akselia varten, eikä etsiä jokaiselle runkokoolle omaa akselimallia. Akseliprofiili on akselin pohjaluonnos, josta luodaan 3D-malli (Kuvio 7). Akseliprofiilia käytetään myös akselin valmistuksessa sorvausohjelman työkierron tekoon. Yksi akselimalli sisälsi keskimäärin 800 parametria, joista akselityypistä riippuen 75–125 oli muuttuvia sähkömoottorin runko koon muuttuessa. Vakioakseleita runkokoilla BP280-BP450 on 22, joten parametreille olisi täytynyt määrittää lausekkeita 1650–2750 /28/. Lausekkeiden suuren määrän vuoksi, niitä olisi käytännössä mahdoton ylläpitää ja virheiden määrä kasvaisi. Suuri määrä parametreja hidastaisi mallien toimintaa ja niiden muokattavuus hankaloituisi huomattavasti. Akselien muotoja on myös useita ja valmistusku-

vien mitat ”särkyisivät” muodon muuttuessa. Tämän vuoksi jokaiselle vakio akselille tehtiin oma parametrinen malli ja valmistuskuva. Profiilien luonnokset täytyi mitoittaa ja rajoittaa geometrisesti täysin (Fully Constrained), jotta yksittäisen mitan muutos vaikuta muihin mittoihin.



Kuvio 7 Akselin profiili

Akseliprofiilin valmistuessa, siitä tehtiin 3D-malli Revolve-työkalua käyttäen (Kuvio 8).

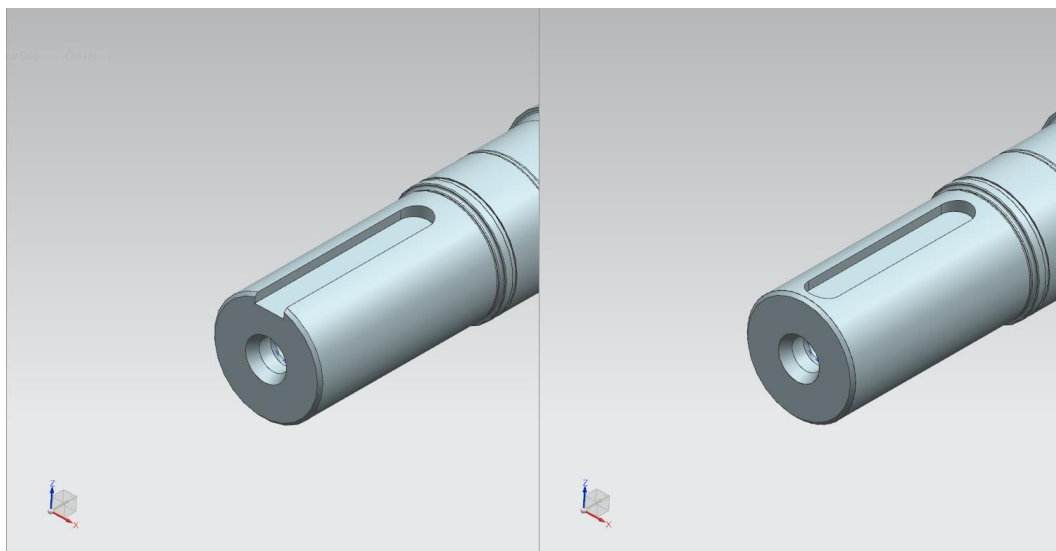


Kuvio 8 Akselin profiilista luotu 3D-malli

4.2 Kiilaurien ja keskiöporausten mallintaminen

Kiilaurat mallinnettiin aputasoon, joka oli rajoitettu (Constrain) Tangent-toiminnolla mallinnettavaan pintaan. Kiilaurien mitoitus tapahtui SFS 2636 standardi mu-

kaisesti. Malleihin luotiin kaksi eri kiilauratyyppeä: avoin kiilaura ja suljettu kiilaura (Kuvio 9). Molemmat kiilaurat mallinnettiin eri luonnoksiin (Sketch), parametrisuuden helpon muokattavuuden vuoksi.



Kuvio 9 Oikealla suljettu kiilaura ja vasemmalla avoin kiilaura

Käytettävä kierteellinen keskiöporaus D-päässä, vaihtelee D-pään halkaisijan mukaan DIN 332 standardin mukaisesti /19/. Keskiöporaus mallinnettiin Hole-työkalua käyttäen. Keskiöporauksen päämuoto ei muutu koon muuttuessa, täten täytyi vain tehdä yksi poraus, jonka mittoja voidaan hallita parametrien lausekkeiden avulla. N-pään keskiöporaus pysyy vakiona akselikoosta riippumatta (paitsi BP450 runko koko, jossa on kierteellinen keskiöporaus). Koska akselin N-pään keskiöporaus ei muutu, kuin yhdessä koko luokassa, tälle ei luotu samanlaisia parametreja, kuin D-päähän.

4.3 Parametrien lausekkeiden luonti

Ennen lausekkeiden luontia on tärkeää tietää, missä suunnittelun vaiheessa niitä on järkevää hyödyntää. Lausekkeet täytyy myös nimetä järkevästi, jotta jokainen suunnittelija ymmärtää mihin lausekkeiden muutokset vaikuttavat. Tässä opinnäyte työssä luotiin akselisiin luotiin kuusi parametria, jota suunnittelija kykenee vapaasti muuttamaan, sekä 16 parametria, jotka ovat lukittuja. Osa parametreista on

lukittu, koska niiden mitoitukset tulee standardeista, joita suunnittelijoiden tulisi noudattaa. Standardien rajatapauksissa, mitat eivät ole aina, kuten suunnittelija tahtoo, jonka vuoksi lukitus poistaa, mittojen muokattavuutta varten. Parametrien lausekkeet ovat nimettyinä standardien ja ABB:n omien katalogien käyttämien mittojen nimitysten mukaisesti.

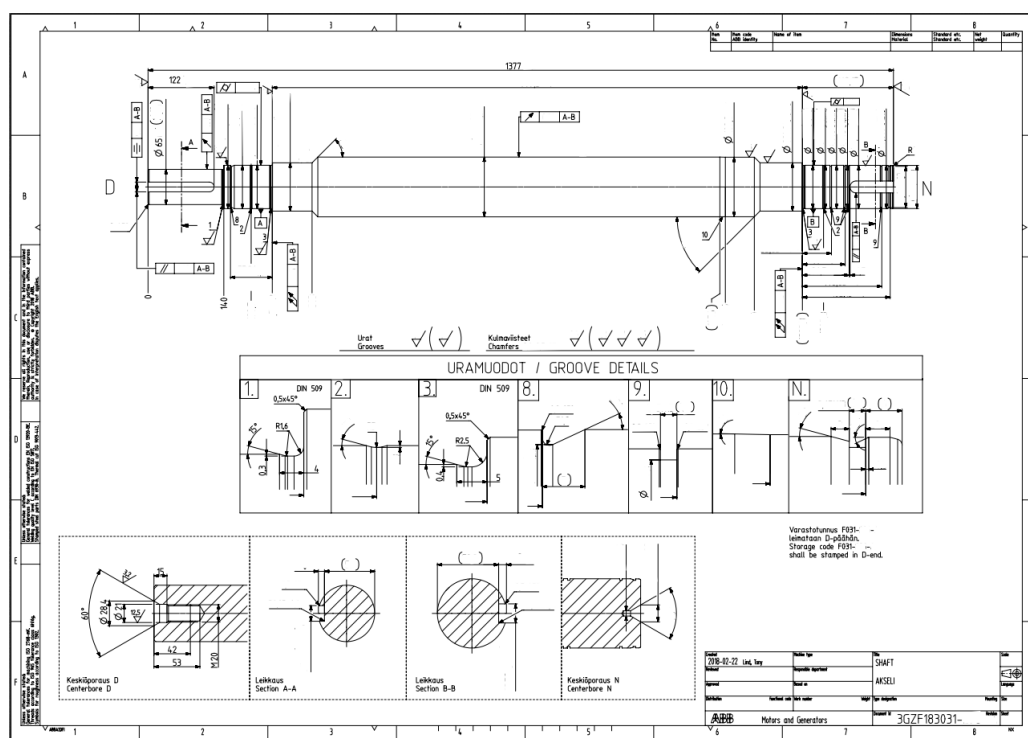
Parametrin nimi	Parametrin selitys	Yksikkö	Datatyyppi	Parametrin tila
Centerbore	Määrittää D-pään keskiöporauksen koon	-	String	Vapaasti muokattava
D	Määrittää D-pään akselihalkaisijan	mm	Number	Vapaasti muokattava
E	Määrittää D-pään akselipituuden	mm	Number	Vapaasti muokattava
Keyway type	Määrittää kiilaura tyypin	-	String	Vapaasti muokattava
Keyway Length	Määrittää kiilauran pituuden	mm	Number	Vapaasti muokattava
Length From Dend To Beginning Of Closed Keyway	Määrittää mitan D-päästä suljetun kiilauran alkuun	mm	Number	Vapaasti muokattava
Centerbore dimensions (11 parametria kansiossa)	Määrittää keskiöporauksen mitat annetun Centerbore-parametrin ja DIN 332 standardin mukaan	mm	Number	Parametrit ovat lukittuja
DIN 509 (kolme parametria kansiossa)	Määrittää D-päässä olevan DIN 509 viisteen mitat akselinhalkaisijan mukaan	mm	Number	Parametrit ovat lukittuja
Keyway depth	Määrittää kiilauran syvyyden SFS 2636 standardin mukaisesti	mm	Number	Parametri on lukittu
Keyway width	Määrittää kiilauran leveyden SFS 2636 standardin mukaisesti	mm	Number	Parametri on lukittu

Taulukko 7 3D-malleihin luodut parametrit

4.4 Valmistuskuvien luonti

Valmistuskuvien luonnissa käytettiin pohjana alkuperäisiä kuvia, jotka muokattiin noudattamaan ABB:n uusia mitoitushojeita. Mittakuvat on tallennettu erillisinä DWG-tiedostoina Teamcenteriin. Paperikokona on käytetty A2 kokoa, fonttikokona 3,5mm ja mittayksikkönä millimetriä. Fonttikoon ollessa 3,5 tulisi mittojen

etäisyys olla 8-10mm. Mittojen etäisyys toisistaan on pidetty samana, elleivät erityiset syyt ole pakottaneet siitä poikkeamaan, kuten akselin N-päässä, jossa on lukuisia mitattavia ulottuvuuksia lähekkäin. Kuvantojen ympärille on jätetty avoin vyöhyke pintamerkkejä ja pintaan tulevia viitteitä varten. Mitat ovat kuitenkin sijoitettu mahdollisimman lähelle mitattavaa ulottuvuutta /29/. Mitoitus on tapahtunut avoimen ketjumitoituksen periaatteen mukaan, jotta selviää mihin valmistus epätarkkuudet saavat kasaantua ja, etteivät epätarkkuudet vaikuta akselin toiminta-vaatimuksiin. Akselin olakkeiden etäisyys toisistaan on mitoitettu yhdensuuntaisena perusviivamitoituksena, jonka nolllapiste on D-pään alussa. Seuraavassa valmistuspiirustuksessa on esitelty mitoitustyyliä (Kuvio 10). Piirustuksesta on piilotettu mitat salassapito velvollisuuden vuoksi.



Kuvio 10 Akseleiden mitoitustyyli

4.5 Testaus ja tarkistus

Mallien parametrien lausekkeiden toimivuus testattiin jokaisen parametrien ääriarvoilla, jotta niiden toimivuudesta pystyi varmistua. Luonnoksen (Sketch) kaikki ra-

joitukset ja mitoitus tarkastettiin, jotta yhdenkään mitan muutos ei särkisi luonnosta, tai muokkaisi sen päämuotoa. Valmistuspiirustukset tarkastettiin vertaamalla niitä olemassa oleviin valmistuskuviin, sekä ABB:n omiin ohjeisiin. Mahdolliset virheet korjattiin löytyessä.

4.6 Yhteenveto

Ennen tehtyjä NX10-parametrisia akselimalleja, uudet akselit joko piirrettiin alusta lähtien uudelleen tai käytettiin I-DEAS sovelluksesta ”migrattuja” malleja pohjana. Uuden akselin mallintaminen ja valmistuspiirustuksen mitoitus alusta lähtien, ilman mitään lähtöpohjaa kestää noin 7-9 tuntia, riippuen mallien yksityiskohtien määrästä ja suunnittelijan työnopeudesta. I-DEAS-mallien muokattavuus on huonoa ja valmistuskuviin on muodostunut lukuisia fonttivirheitä. I-DEAS-mallien muokkaaminen hyväksyttävään muotoon kestää yleensä noin 2-7 tuntia riippuen, kuinka ehjiä mallit ovat ja muokattavien kohtien määrästä. Tehtyjen parametrisien mallien ansiosta mekaniikkasuunnittelijoilla on aina helposti muokattavat, hyvät mallit, joita he voivat ottaa pohjaksi uutta suunniteltavaa akselia varten. Parametrisien mallien avulla uuden akselin mallinnus kestää noin 10 minuuttista kolmeen tuntiin, mikä on huomattava parannus työn tehokkuuden kannalta. Uudet mallit ovat myös pyritty tekemään virheettömiksi, jolloin niistä tehtyjen uusien akseleiden revisioiden tarve pienenee. Parametrisia malleja käyttämällä, verrattuna, että suunnittelija ottaisi I-DEAS-mallin pohjaksi, voidaan säästää työaikaa, jopa yli neljä tunti jokaista uutta akselia kohti. BP 280-BP 450 moottoreille piirrettään uusia akseleita tai revisioidaan vanhoja akseleita noin 100 kappaletta vuodessa, eli työaikaa mahdollistaa säästää jopa 400 tuntia vuositasolla /28/.

5 KEHITYSMÄHDOLLISUUDET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Kehitysmahdollisuudet

Tehtyjen akselimallien parametrien lausekkeet käsittelevät vain D-pään yleisimpiä muutoksia, mutta akseleita räätälöidään asiakkaiden tarpeiden mukaisesti ja niihin voi tulla paljon muitakin muutoksia. Mahdollisia kehitysmahdollisuuksia on lueteltuina seuraavissa alaotsikoissa.

5.1.1 Laakereiden valinta listasta

Akselille voitaisiin valita listasta haluttu laakeri, jolloin akselin laakeriolakkeet muokkautuisivat laakereiden mittoja vastaavaksi. Tällöin suunnittelijan ei tarvitsisi tutkia laakerikatalogeja löytääkseen haluttujen laakereiden mittoja ja mallintaa nämä akseliin. Listassa olisi vain kyseiselle akselille sopivat yleisimmät laakerit, ylläpidettävyyden vuoksi.

5.1.2 N-pään parametrisyys

On tapauksia, kun akseli on kaksipäinen, eli akseli tulee ulos moottorin molemmista päistä. Akselin N-pää voitaisiin tehdä parametriseksi kattamaan tämän variaation. Akseleihin liitetään usein myös lisälaitteita, kuten jarruja, sekä pyörimisnopeudenmittareita (takometrejä), jonka vuoksi malleihin voisi liittää parametriset lausekkeet muokkaamaan akselia, haluttujen lisälaitteiden mittojen mukaiseksi.

5.1.3 Ylimääräiset akseliolakkeet

Joskus akseleihin tarvitaan ylimääräisiä akseliolakkeita asiakkaan vaatimuksien mukaisesti. Esimerkiksi moottoreita joita liitetään erilaisiin pumppuihin. Parametrien lausekkeiden avulla, suunnittelija voisi määritellä ylimääräisten olakkeiden pitiudet ja halkaisijat, jonka jälkeen mallinnus tapahtuisi automaattisesti.

5.1.4 Lujuuslaskenta

Lujuuslaskentaan tarvittavat muuttujat akselimalleissa, voisi syöttää automaattisesti lujuuslaskentaan sopivaan Excel-taulukkoon, jolloin lujuuslaskenta voitaisiin suorittaa ilman, että joutuisi avaamaan NX 10:ntä tai valmistuskuvaa.

5.1.5 Parametristen mallien luonti kaikille vakioakseleille

Tehdyt mallit kattavat vain BP 280-BP 450 vakio akselit. ABB:llä on kuitenkin lukuisia muita vakio akseleita, joihin voisi käyttää samaa periaatetta suunnittelutyön tehokkuuden optimoimiseksi.

5.2 Johtopäätökset

Opinnäytetyössä käytiin läpi parametrinen mallinnuksen teoriaa ja hyödynnettävyyttä eri käyttökohteisiin, jotta lukija saisi kokonaisvaltaisen ymmärryksen parametrinen mallinnuksen mahdollisuuksista.

Opinnäytetyössä käsiteltiin myös sähkömoottoreiden rakennetta, sekä niiden akselien suunnitteluun vaadittua teoriaa ja standardeja.

Opinnäytetyössä tehtyjen valmistuspiirustuksien laadun parantamiseen hyödynnettiin asiantuntijoiden mielipiteitä. Valmistuspiirustuksien selkeälukuisuuteen parantamiseksi valmistajille, kävin akseli valmistus yrityksessä Maxell vierailulla. Yritys vierailun avulla sain paremman käsityksen akselien valmistustekniikasta, sekä miltä akselivalmistajat haluavat valmistuspiirustuksien näyttävän. Parametristen mallien avulla voidaan säästää suunnittelutyöhön kuluva työaika huomattavasti ja ne tuovat esiin käyttömahdollisuuksia muihin kohteisiin suunnittelijoille ABB:llä. Eli opinnäytetyöllä päästiin haluttuihin tavoitteisiin.

LÄHTEET

- /1/ Moottorit ja Generaattorit. ABB. Viitattu 20.4.2018.
<http://new.abb.com/motors-generators/fi>
- /2/ Expressions. Siemens. Viitattu 20.4.2018.
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_help#uid:index_modeling:expressions_exp_ov
- /3/ Low voltage Process performance motors. Catalog. 2016. ABB. 9AKK105944 EN 03-2016.
- /4/ Teknologia. ABB. Viitattu 20.4.2018.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/teknologia>
- /5/ About ABB. ABB. Viitattu 20.4.2018.
<http://new.abb.com/about>
- /6/ Who we are – Group structure. ABB. Viitattu 20.4.2018.
<http://new.abb.com/about/abb-in-brief/group-structure>
- /7/ Electrification Products division. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/about/our-businesses/electrification-products-division>
- /8/ Robotics and Motion division. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/about/our-businesses/robotics-and-motion-division>
- /9/ Industrial Automation division. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/about/our-businesses/industrial-automation-division>
- /10/ Power Grids division. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/about/our-businesses/power-grids-division>
- /11/ ABB Suomessa. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- /12/ ABB Oy, Motors and Generators. ABB. Viitattu 21.4.2018.
<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/yksikot/motors-and-generators>
- /13/ Expressions. Siemens. Viitattu 22.5.2018
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10.0.3/nx_help/#uid:index_modeling:expressions_exp_ov
- /14/ Teamcenter. Siemens. Viitattu 20.5.2018
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/teamcenter/>
- /15/ NX Übersichtsbrochüre. Siemens. Viitattu 22.5.2018
https://www.plm.automation.siemens.com/de/products/nx/12/index.shtml#lightview%26url=/de_de/Images/4639_tcm73-

[1423.pdf%26title=NX%20%C3%9Cbersichtsbrosch%C3%BCre%26description=Die%20Neugestaltung%20der%20digitalen%20Produktentwicklung%26docType=pdf](#)

/16/ Expressions dialog box. Siemens. Viitattu 22.5.2018
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10.0.3/nx_help/#goto:modeling:exp_dialog

/17/ Part families. Siemens. Viitattu 22.5.2018
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10.0.3/nx_help/#goto:modeling:prtfam_ov

/18/ Leena Korpinen. Sähkökoneet. Osa 1. Viitattu 20.5.2018
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

/19/ T. Björk, P. Hautala, K.Huhtala. Koneenosien suunnittelu. Kuudes painos 2014.

/20/ ISO 148-1:2016. ISO. Viitattu 26.4.2018
<https://www.iso.org/standard/63802.html>

/21/ Saari H. 2014. Kantavien teräsrakenteiden CE-merkintä.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79728/Saari_Henri.pdf?sequence=1&isAllowed=y

/22/ Charpy-V –iskulujuuskoe. Viitattu 26.4.2018.
<http://nfgab.se/fi/tekniikka-ja-laatu/laadunvarmistus/laboratorio/charpy-v-iskulujuuskoe/>

/23/ Katalog Segerjevih Obrovkov DIN 471-472. Tehimpex. Viitattu 26.4.2018.
http://www.tehimpex.si/pdf/katalog_segerjevih_obrockov_din_471_472.pdf

/24/ Axes. Tandwiel. Viitattu 26.4.2018
<http://www.tandwiel.info/en/common-mechanical-engineering/axes/>

/25/ IEC 60072-1:1991 Dimensions and output series for rotating electrical machines. Part 1: Frame numbers 56 to 400.

/26/ DIN 743-1:2012 Calculation of load capacity of shafts and axles. Part 1: General.

/27/ DIN 743-2:2012 Calculation of load capacity of shafts and axles. Part 2: Theoretical stress concentration factors and fatigue notch factors.

/28/ Lotus Notes. ABB:n sisäinen tietokanta.

/29/ Aimo Pere. Koneenpiirustus 1. 1988

LIITE 1

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 2

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 3

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 4

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 5

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 6

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 7

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 8

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 9

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 10

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 11

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 12

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 13

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 14

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 15

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 16

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 17

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 18

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 19

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 20

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 21

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 22

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)

LIITE 23

(Liite on poistettu julkisesta versiosta salassapidossa velvollisuuden vuoksi)