

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Jari Elomaa

**SIMULOINTITOIMINTA PIENJÄNNITEKOJEIDEN SUUNNITTELUSSA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten  
Vaasassa 30.4.2010

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

DI Martti Taimisto

Työn tarkastaja

DI, KTM Maarit Vesapuisto

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Vaasan yliopiston teknillisessä tiedekunnassa osana sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Aiheen tarjosi ja työn mahdollisti ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikön tuotekehitys, jonka tiloissa, laitteilla ja ohjelmistolisensseillä työ toteutettiin.

Työn valvojana toimi professori Timo Vekara ja tarkastajana lehtori Maarit Vesapuisto. Työn ohjasi ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikön tuotekehityspäällikkö DI Martti Taimisto. Ohjausta ja apua tarjosivat myös muut tuotekehityksen suunnittelijat. Kiitän kaikkia osallisia saamastani tuesta ja asiantuntevista neuvoista.

Vaasassa 30.4.2010

Jari Elomaa

<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>		<b>sivu</b>
	ALKULAUSE	1
	SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
	TIIVISTELMÄ	5
	ABSTRACT	6
1	JOHDANTO	7
2	PIENJÄNNITEKOJEIDEN KÄYTTÖ JA TOIMINTA	9
	2.1 Yleistä pienjännitekojeista	9
	2.2 Pienjännitekojeissa esiintyvät simuloitavat ilmiöt	13
	2.2.1 Kytkimien mekaaninen toiminta	13
	2.2.2 Lämmönsiirto pienjännitekojeissa	14
	2.2.3 Kytkinlaitteiden sähkömagneettiset ilmiöt	15
	2.2.4 Katkaisuvalokaari kytkinlaitteissa	17
3	MALLINTAMINEN JA SIMULOINTI	22
	3.1 Mallintamisen ja simuloinnin vaiheet	22
	3.1.1 Simulointimallin rakentaminen	23
	3.1.2 Simulointi	24
	3.1.3 Simulointitulosten käsittely	26
	3.2 Numeerisia simulointimenetelmiä	27
	3.2.1 Differenssimenetelmä	27
	3.2.2 Elementtimenetelmä	29
	3.2.3 Tilavuusmenetelmä	29
	3.3 Tässä työssä käytetyt simulointiohjelmit	30
	3.3.1 Ansys <sup>®</sup> Multiphysics <sup>™</sup>	30
	3.3.2 Ansys <sup>®</sup> CFX <sup>®</sup>	33
4	SIMULOINTITOIMINTA PIENJÄNNITEKOJEIDEN TUOTEKEHITYKSESSÄ	36
	4.1 Simulointitoiminnan hyödyt ja haasteet pienjännitekojeiden tuotekehityksessä	37
	4.1.1 Simulointitoiminnan hyötyjä	37
	4.1.2 Simulointitoiminnan haasteita ja niiden ratkaisuja	38

4.1.3	Yhteenveto simulointitoiminnasta SWOT-analyysin avulla	45
4.2	Simulointitoiminnan yhtenäistäminen	46
4.2.1	Simulointitoiminnan menetelmä SISUQ8	47
4.2.2	Simulointitoiminnan menetelmä pienjännitekojeiden tuotekehitykseen	51
5	ESIMERKKEJÄ PIENJÄNNITEKOJEIDEN SIMULOINNEISTA	61
5.1	Kuusinapaisen kuormankytkimen vääntömekanismien simulointi	61
5.1.1	Ongelman määrittely	62
5.1.2	Ratkaisun suunnittelu	63
5.1.3	Mallintaminen ja simulointi	64
5.1.4	Tulosten laatiminen ja tulkinta	66
5.1.5	Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi	67
5.2	Veitsikoskettimia yhteen puristava sähkömagneettinen voima	68
5.2.1	Ongelman määrittely	68
5.2.2	Ratkaisun suunnittelu	68
5.2.3	Mallintaminen ja simulointi	70
5.2.4	Tulosten laatiminen ja tulkinta	72
5.2.5	Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi	74
5.3	Sulakevahdin asennussuunnan vaikutus jäähtymykseen	75
5.3.1	Ongelman määrittely	75
5.3.2	Ratkaisun suunnittelu	75
5.3.3	Mallintaminen ja simulointi	76
5.3.4	Tulosten laatiminen ja tulkinta	79
5.3.5	Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi	81
6	POHDINTAA JA TOIMENPITEITÄ SIMULOINTITOIMINNAN TEHOSTAMISEKSI	82
7	YHTEENVETO	84
	LÄHDELUETTELO	87

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<i>J</i>	Sähkövirran tiheys
<i>U</i>	Jännite
A	Ampeeri
GHz	Gigahertsi
Gt	Gigatavu
K	Kelvin
Mt	Megatavu
V	Voltti
W	Watti
°C	Celsius-aste

APDL	Ansys® Multiphysics™ -ohjelmistossa käytetty parametrinen simuloinninkuvauskieli. <i>Ansys Parametric Design Language</i> .
ATS	Automaattinen vaihtokytkin. <i>Automatic Transfer Switch</i> .
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu. <i>Computer Assisted Design</i> .
FEM	Elementtimenetelmä. <i>Finite Element Method</i> .
FVM	Tilavuusmenetelmä. <i>Finite Volume Method</i> .
MASI	Tekesin "Mallinnus- ja simulointi" -tutkimusohjelma.
PDM	Tuotetiedonhallinta. <i>Product Data Management</i> .
SISU	Tekesin MASI-ohjelman projekti "Simuloinnin ja suunnittelun uudet sovellustavat ja liiketoiminta"
SISUQ8	SISU-projektissa kehitetty simulointitoiminnan menetelmä.
SWOT-analyysi	Analyysimenetelmä, jossa tarkastellaan kohteen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. Myös nelikenttäanalyysi. <i>Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats</i> .

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Jari Elomaa	
<b>Diplomityön nimi:</b>	Simulointitoiminta pienjännitekojeiden suunnittelussa	
<b>Työn valvoja:</b>	Professori Timo Vekara	
<b>Työn ohjaaja:</b>	DI Martti Taimisto	
<b>Työn tarkastaja:</b>	DI, KTM Maarit Vesapuisto	
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri	
<b>Yksikkö:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan yksikkö	
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma	
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka	
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2004	
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2010	<b>Sivumäärä:</b> 90

---

**TIIVISTELMÄ:**

Pienjännitekojeiden, kuten kuormankytkinten ja kytkinvarokkeiden, suunnittelussa on otettava huomioon monia fysiikan osa-alueita, kuten mekaniikka, termodynamiikka ja sähkömagnetiikka. Tietotekniikan ja simulointiohjelmistojen kehitys on mahdollistanut simuloinnin käytön jokapäiväisessä tuotekehityksessä. Simuloimalla voidaan ennakoida kokonaisten laitteiden tai yksittäisten osien toimintaa ennen prototyyppien valmistusta ja mittauksia.

Tuotekehityksen simulointitoiminta koostuu mallintamisen ja simuloinnin lisäksi simuloitavan ongelman määrittelystä, dokumentoinnista ja arkistoinnista. Yhtenäiset tavat ja menetelmät tehostavat simulointitoimintaa ja helpottavat tulosten hyödyntämistä. Simulointitoiminnan yhtenäistämiseksi tässä työssä kehitettiin pienjännitekojeiden tuotekehitykseen soveltuva simulointitoiminnan menetelmä, jonka toimivuutta testattiin kolmella simulointiesimerkillä. Esimerkeissä testattiin myös työssä käytettyjen simulointiohjelmien soveltuvuutta pienjännitekojeiden suunnittelussa tarvittavien tapausten simulointiin.

Työn tuloksena valmistui uusi pienjännitekojeiden tuotekehitykseen räätälöity simulointitoiminnan menetelmä, jonka toimivuus todettiin kolmen simulointiesimerkin avulla. Esimerkkitapaukset osoittivat myös työssä käytettyjen simulointiohjelmien soveltuvan hyvin mekaniikan, sähkömagnetiikan ja lämmönsiirron simulointiin tavallisia tuotekehitysongelmia ratkaistaessa. Työn tuloksia käytetään ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikön tuotekehitysprosessin uudistamisessa.

---

**AVAINSANAT:** tuotekehitys, kuormankytkin, kytkinvaroke, pienjännitekoje, simulointi, simulointitoiminnan menetelmä

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

<b>Author:</b>	Jari Elomaa
<b>Topic of the Thesis:</b>	Simulation in the development of low voltage devices
<b>Supervisor:</b>	Professor Timo Vekara
<b>Instructor:</b>	M.Sc. (Eng.) Martti Taimisto
<b>Inspector:</b>	M.Sc. (Tech.), M.Sc. (Econ.) Maarit Vesapuisto
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Department:</b>	Department of Electrical Engineering and Energy Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2004
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2010

**Pages: 90**

---

**ABSTRACT:**

When designing low voltage devices, such as switch-disconnectors and switch-fuses, many physical aspects need to be considered. The most notable aspects are mechanics, thermodynamics and electromagnetics. Technological advancements in computer hardware and simulation software have enabled the use of simulation in everyday product development. Simulation can be used to predict the performance of an entire device or individual parts before manufacture and measurements of a prototype.

In addition to modelling and simulation, a product development simulation process consists of problem definition, documentation and archiving. Common and consistent practices and methods make the simulation process more efficient and help the utilisation of the results. In this thesis, an operational model for simulation was developed in order to create common and consistent practices and methods for the development of low voltage devices. Functionality of this operational model was tested with three simulation examples, which represent common design problems regarding low voltage devices. Also, the applicability of the simulation software for the development of low voltage devices was tested in the example simulations.

As a result, a new operational process for simulation was developed according to the needs of the development of low voltage devices. Functionality of this process was determined with three simulation cases, which also demonstrated the capabilities of the simulation software used in this thesis to solve common product development problems regarding mechanics, electromagnetics and heat transfer. These results will be used in improving the product development process of ABB Oy, Low Voltage Switches division.

---

**KEYWORDS:** research and development, switch-disconnector, switch-fuse, low voltage product, simulation, operational process for simulation

## 1 JOHDANTO

ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikössä valmistetaan ja kehitetään kuormankytkimiä ja kytkinvarokkeita, joita tässä työssä kutsutaan yhteisnimellä pienjännitekojeet. Pienjännitekojeiden tuotekehityksessä tulee vastaan ongelmia, jotka liittyvät muun muassa osien kestävyys, mekanismien toimintaan, lämmönsiirtoon, sähkömagneettisiin voimavaikutuksiin sekä sähkövirran johtumiseen, kytkemiseen ja katkaisuun. Tietotekniikan ja simulointiohjelmistojen kehitys on tehnyt simuloinnista jokapäiväiseen tuotekehitykseen soveltuvan työkalun. Tuotteiden suunnittelussa säästetään prototyyppi- ja laboratoriokustannuksissa, kun eri rakennevaihtoehtojen vaikutusta tuotteen toimintaan voidaan arvioida simuloimalla ennen fyysisen kappaleen valmistamista.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää Ansys<sup>®</sup> Multiphysics<sup>™</sup> ja Ansys<sup>®</sup> CFX<sup>®</sup>-ohjelmistojen soveltuvuutta pienjännitekojeiden mallintamiseen ja simulointiin sekä antaa ehdotus tuotekehityksessä sovellettavan simulointitoiminnan menetelmän rakenteeksi. Simulointiohjelmistojen soveltuvuus pienjännitekojeiden mallintamiseen ja simulointiin osoitetaan kolmen esimerkkitapauksen avulla. Esimerkkitapauksissa simuloidaan mekanismin toimintaa ja lujuuutta, sähkövirran indusoiman magneettikentän aiheuttamaa voimavaikutusta sekä elektroniikkalaitteen jäähtymistä luonnollisella konvektiolla. Simulointeihin käytetään Ansys Multiphysics 12.1 ja Ansys CFX 12.1-ohjelmistoja.

Simulointitoiminta koostuu mallintamisen ja simuloinnin, eli varsinaisen simulointiohjelmiston käytön, lisäksi simuloitavan ongelman määrittelystä, dokumentoinnista ja arkistoinnista. Simulointitoiminnan yhtenäistämiseksi tässä työssä kehitetään pienjännitekojeiden tuotekehitykseen soveltuva simulointitoiminnan menetelmä, joka antaa yhtenäiset tavat ja menetelmät simulointitoiminnan suorittamiselle. Menetelmän kehittämisessä otetaan huomioon pienjännitekojeiden suunnittelun ominaispiirteet eli tiedetään jo etukäteen, että simulointia käytetään tiettyjen fysikaalisten ilmiöiden simulointiin ja simulointitoiminta suoritetaan yksikön omassa tuotekehityksessä.

Tämä diplomityö koostuu kuudesta luvusta. Ensimmäisessä luvussa kerrotaan työn sisällöstä ja rakenteesta sekä johdatetaan työn aiheeseen. Toisessa luvussa esitellään

tavallisimpia pienjännitekojeita, niiden toimintaa sekä niissä esiintyviä fysikaalisia ilmiöitä ja niiden simuloinnilla saavutettavia hyötyjä. Kolmannessa luvussa esitellään mallintamisen ja simuloinnin vaiheet sekä yleisempiä simulointimenetelmiä ja työssä käytetyt simulointiohjelmit. Neljännessä luvussa pohditaan pienjännitekojeiden mallintamisen ja simuloinnin haasteita ja hyötyjä sekä tarjotaan ratkaisuja haasteiden voittamiseksi. Neljännen luvun lopuksi esitellään Tekesin Mallintaminen ja simulointi -tutkimusohjelmassa kehitetty simulointitoiminnan menetelmä ja kehitetään siitä paremmin pienjännitekojeiden tuotekehitykseen sopiva. Viidennessä luvussa sovelletaan neljännessä luvussa kehitettyä simulointitoiminnan menetelmää kolmen simulointiesimerkin ratkaisemiseen, joissa simuloidaan eräiden pienjännitekojeiden erilaisia fysikaalisia ilmiöitä. Esimerkeissä on tarkoitus esittää ja todentaa simuloinneissa käytettyjen ohjelmien soveltuvuutta kyseessä olevien ilmiöiden simulointiin sekä esitellä neljännen luvun lopussa kehitetyn simulointi-toiminnan menetelmän toimintaa. Kuudennessa luvussa pohditaan toimenpiteitä simulointitoiminnan tehostamiseksi. Lopuksi yhteenvedossa kerrataan lyhyesti tämän diplomityön keskeisimmät asiat.

Tämän diplomityön ohjaajana toimi ABB Oy:n Pienjännitekojeiden tuotekehityspäällikkö, ja työ tehtiin Pienjännitekojeiden tuotekehityksen simulointitoiminnan kehittämisen näkökulmasta. Pienjännitekojeet-yksikkö tuntee hyvin tuotteensa ja niihin liittyvät fysikaaliset ilmiöt, joten niitä käsitellään vain pintapuolisesti. Työn painopiste on simuloinnin soveltamiseen liittyvissä asioissa, joita ovat mallintaminen ja simulointi, simulointitoiminta ja simulointitoiminnan menetelmät sekä näiden soveltaminen pienjännitekojeiden tuotekehityksessä.

## 2 PIENJÄNNITEKOJEIDEN KÄYTTÖ JA TOIMINTA

ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikössä valmistettavia pienjännitekojeita ovat kuorman-  
kytkimet ja kytkinvarokkeet sekä niihin liittyvät elektroniikkatuotteet, kuten sulake-  
vahdit ja muut mittaus- ja ohjauslaitteet. Standardi SFS-EN 60947-1 määrittelee pien-  
jännitekojeiden, joita tässä työssä käsitellään, suurimmaksi käyttöjännitteeksi 1 000 V  
vaihtojännitteellä ja 1 500 V tasajännitteellä (SFS-EN 60947-1).

### 2.1 Yleistä pienjännitekojeista

Kuormankytkimet ja kytkinvarokkeet pystyvät sulkemaan, johtamaan ja katkaisemaan  
normaaleissa käyttötilanteissa esiintyviä virtoja, sekä johtamaan ja sulkemaan virran  
myös ylikuormitustilanteissa. Suurin ero kuormankytkimellä ja kytkinvarokkeella on,  
että kytkinvarokkeen yhdessä tai useammassa navassa on sarjaan kytkettävä varoke.  
(SFS-EN 60947-1.) Kuvassa 1 esitetään muutamia ABB Oy:n valmistamia kuorman-  
kytkimiä ja kytkinvarokkeita.



**Kuva 1.** ABB Oy:n valmistamia kuormankytkimiä vasemmalla ja kytkinvarokkeita oikealla (ABB Oy 2003).

Kuormankytkimiä ja kytkinvarokkeita käytetään muun muassa kuormanerottimina, moottoripiirin kytkiminä, kiskoerottimina, pääkytkiminä ja turvakytkiminä. Kuormankytkimellä ja kytkinvarokkeella voidaan erottaa laite luotettavasti verkosta, sillä ne tarjoavat luotettavan avausvälin ja täyttävät erottimelle asetetut vaatimukset. Kuorman-

kytkimet valmistetaan yleensä kolmi- tai nelinapaisina, nimellisvirraltaan 16 A:sta 3 150 A:iin ja nimellisjännitteeltään 1 000 V:n vaihtojännitteeseen ja 1 500 V:n tasajännitteeseen asti. Modulaarisen rakenteensa ansiosta myös kuusi- ja kahdeksannapaiset erikoisrakenteet sekä vaihto- ja ohituskytkinrakenteet ovat mahdollisia. (Kolmonen 1998: 2.)

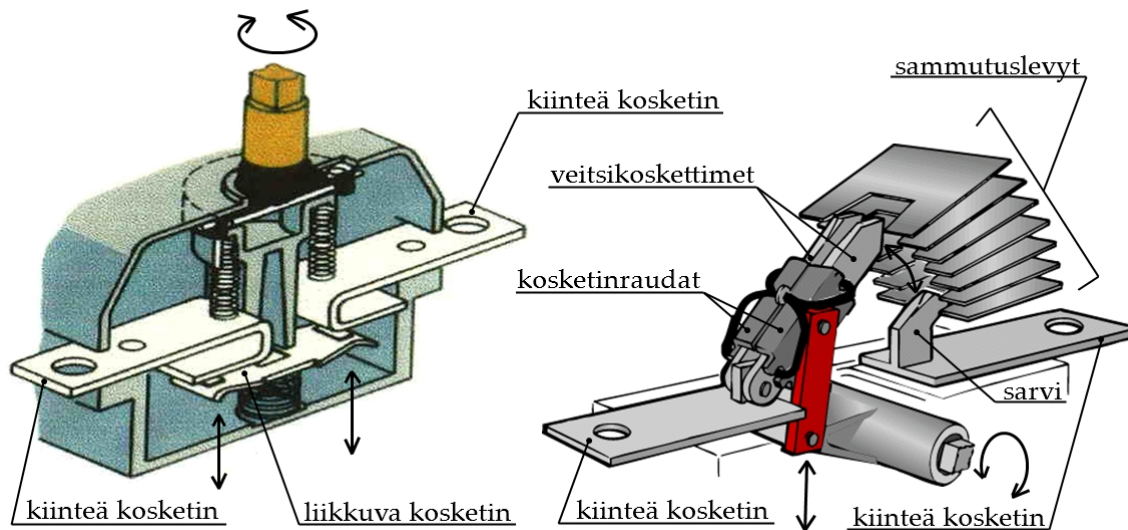
Kuormankytkimet ja kytkinvarokkeet voivat olla myös moottoriohjattuja, jolloin kytkintä ohjataan sähkömoottorilla. Moottoriohjaus mahdollistaa kytkimen etäohjauksen ja vaihtokytkimeen liitettynä esimerkiksi automaattisen sähkönsyötön vaihtamisen verkosta generaattorille sähkökatkon sattuessa. (ABB Oy 2009.) Kuvassa 2 esitetään automaattisesti varustettua moottoriohjattua vaihtokytkintä eli ATS-kytkintä.



**Kuva 2.** ATS-kytkin eli automaattinen moottoroitu vaihtokytkin (ABB Oy 2009).

Kytkimissä erottavina osina toimivat koskettimet. Kosketinrakenne koostuu paikallaan olevista kiinteistä koskettimista ja liikkuvista koskettimista. Kosketinrakenne on tyypiltään joko puskukosketin tai veitsikosketin. Puskukosketinrakenteessa liikkuva kosketin painetaan kiinteisiin koskettimiin. Veitsikosketinrakenteessa liikkuva kosketin muodostuu kahdesta veitsestä, jotka ovat toisesta päästä saranoitu kiinteään koskettimeen ja toinen pää toimii erottavana osana. Veitsikosketinrakenne voidaan

toteuttaa myös kahdella avausvälillä siten, että veitset liitetään pyörivään rullaan tai liikkuvat suoraviivaisesti ylös ja alas. Veitsikoskettimia käytetään nimellisvirraltaan yli 63 ampeerin kytkimissä, ja sitä pienemmillä virroilla käytetään puskukoskettimia. (Hautala 2006.) Kuva 3 esittää eräitä puskukosketin- ja veitsikosketinrakenteita.



**Kuva 3.** Vasemmalla puskukoskettimen rakenne ja oikealla veitsikoskettimen rakenne (Saarijärvi 1997; ABB Oy 2003).

Suurilla virroilla eräs puskukoskettimen ongelma on kosketuspinnossa muodostuvat hylkivät kosketinvoimat, jotka yrittävät erottaa koskettimia toisistaan. Puskukosketinta suljettaessa tapahtuu myös enemmän värähtelyjä ja lämpenemistä kuin veitsikoskettimella. Veitsikoskettimen kosketinvoima kasvaa virran kasvaessa, koska koskettimissa kulkevat virrat aiheuttavat ympärilleen magneettikentän, jonka vaikutuksesta koskettimien ympärillä olevat raudat puristavat koskettimia toisiinsa. Puristavaa kosketinvoimaa vahvistetaan myös jousilla. Veitsikoskettimen kontaktipinnat ovat itsestään puhdistuvia koskettimien laahaavan liikkeen ansiosta. (Hautala 2006.) Materiaalina veitsikoskettimissä käytetään kuparia, koska se on hyvä sähkön- ja lämmönjohde. Kun koskettimet vielä pinnoitetaan hopeaseoksella, ympäristöolosuhteiden kesto paranee ja ylimenovastus kosketinpinnossa pienenee. (Saarijärvi 1997.)

Veitsikoskettimen ohjaaminen on toteutettu siten, että käytetty ohjausnopeus ei vaikuta koskettimen liikkeen nopeuteen. Käyttäjä virittää vääntimellä jousimekanismin, joka ylittäessään kuolokohtansa liikuttaa kosketinta aina samalla voimalla riippumatta käyttäjän käyttämästä voimasta. Tällä mekanismilla estetään liian hidas koskettimen liike, joka aiheuttaisi kosketinpintojen sulamista ja hitsautumista. Veitsikoskettimen kiinteän koskettimen sarven muotoilulla on saatu virran kytkevä ja sammuttava pinta eri kohtaan sarvea kuin varsinaisen kuormavirran johtava pinta. Näin kytkennässä tapahtuva kontaktipintojen nokeentuminen ei kasvata kytkimen kosketusvastusta, koska koskettimien painuttua kokonaan kiinni kuormavirta kulkee puhtaiden kosketuspintojen eikä nokeentuneiden pintojen läpi. Edellisen sivun kuvasta 3 nähdään myös sarven ja koskettimien muotoilu. (Kolmonen 1998.)

Vaatimuksia kuormankytkimelle ja kytkinvarokkeelle asettavat esimerkiksi kansainväliset standardit IEC 60947-1 ja -3 sekä pohjoisamerikkalainen standardi UL98. Kansainväliset standardit IEC 60947-1 ja -3 ovat sisällöllisesti samoja kuin eurooppalaiset standardit EN 60947-1 ja -3, jotka on hyväksytty sellaisenaan myös suomalaisiksi standardeiksi SFS-EN 60947-1 ja -3. Oikosulun sulkemiskyvyn vaatimukset ovat kaikista ankarimmat, koska oikosulkuvirrat saattavat olla kymmeniä tai jopa satoja kiloampeereita, jolloin kytkimen tulee kestää aiheutuneet termiset, sähköiset ja dynaamiset rasitukset. (SFS-EN 60947-1; SFS-EN 60947-3; UL 98.)

Kuormankytkinten ja kytkinvarokkeiden lisäksi valmistetaan elektroniikkalaitteita, jotka mahdollistavat kytkinten älykkäät ohjaukset ja mittaukset sekä monipuoliset tietoliikenneyhteydet. Elektroniikkalaitteet mahdollistavat esimerkiksi automaattiset tai kauko-ohjatut kytkinten ohjaukset sekä kytkimien toiminnan tarkkailun etäältä tai keskitetysti valvomoista. Elektroniikkaa hyödyntäviin pienjännitetuotteisiin kuuluvat muun muassa automaattiset vaihtokytkimet, joita käytetään esimerkiksi sähkönsyötön vaihtamiseen verkosta generaattorille sähkökatkon sattuessa (ABB Oy 2009), tai sulakevahdit, jotka indikoivat kytkinvarokkeen sulakkeen toimintaa ja pystyvät estämään epätasapainoisen kuormituksen vaiheiden välillä katkaisemalla virtapiirin, kun yksi tai useampi sulake laukeaa (ABB Oy 2005).

## 2.2 Pienjännitekojeissa esiintyvät simuloitavat ilmiöt

Kuormankytkinten ja kytkinvarokkeiden toimintaan liittyvät tärkeimmät simuloitavat osa-alueet ovat mekaniikka, lämmönsiirto ja sähkömagnetismi sekä näitä kaikkia yhdistävät valokaari-ilmiöt. Myös kemialla on osansa kytkimien toiminnassa, esimerkiksi pintojen hapettumisen ja valokaaren palamisessa syntyvien palotuotteiden osalta. Monet simuloitavista ilmiöistä ovat kytkettyjä toisiinsa, kuten lämpötilan vaikutus resistanssiin tai sähkömagneettisten voimien vaikutus koskettimien liikkeeseen. Kytkettyjä ilmiöitä tulee simuloida samanaikaisesti, ja usein tämä tapahtuu parhaiten, kun simuloinnit pystytään yhdistämään saman ohjelman sisällä. Joissain tapauksissa eri ohjelmien simulointeja joudutaan yhdistämään toisiinsa välittäjäohjelman kautta.

### 2.2.1 Kytkimien mekaaninen toiminta

Kuormankytkimissä ja kytkinvarokkeissa käytetään monenlaisia mekanismeja pää- ja apukoskettimien ohjaamiseen, kytkinten lukitsemiseen sekä erikoisten kytkinrakenteiden, kuten moninapaisten tai vaihtokytkinten, toteuttamiseen. Mekanismien toimintaan vaikuttavat pääasialliset fysiikan osa-alueet ovat kappaleiden liikettä ja vuorovaikutusta kuvaava kinematiikka sekä kappaleiden kestävyyttä kuvaava lujuusoppi.

Kinematiikan simulointia voidaan hyödyntää suunniteltaessa mekanismin osien liikeratoja, nopeutta ja voimia. Liikeratojen tarkastelulla voidaan varmistaa osien mahtuminen koteloon ja toimiminen mekanismin osana. Mekanismin liikettä vastustavien voimien perusteella voidaan simuloida mekanismin liikkeen nopeutta, jousien toimintaa, osiin ja niveliin kohdistuvia voimia sekä mekanismin ohjaukseen tarvittavaa voimaa.

Liikkuvia koskettimia ohjaavan mekanismin kinemaattiseen simulointiin vaikuttavat myös koskettimiin kohdistuvat sähkömagneettiset voimat. Varsinkin veitsikoskettimia käytettäessä koskettimia toisiinsa puristavan sähkömagneettisen voiman takia tarvitaan suuremmilla virroilla suurempi ohjausvoima kytkimen avaamiseen kuin pienemmällä

virralla. Toisaalta puskukoskettimien tapauksessa suurempi virta aiheuttaa suuremman koskettimia hylkivän puskuvoiman kuin pienempi virta, jolloin kytkimen avaamiseen tarvitaan vähemmän voimaa. (Hautala 2006.)

Kappaleiden kovuus ja joustavuus vaikuttavat mekanismin toimintaan ja kytkimille asetettujen vaatimusten täyttämiseen. Ensinnäkin mekanismissa käytettyjen osien tulee kestävä koko kytkimen eliniän ajan. Osien kestävyuden simuloinnilla voidaan tunnistaa, mihin osiin ja mihin kohtaan tarvitaan vahvistamista ja toisaalta, mistä kohtaa osaa voidaan keventää. Toiseksi kytkimiltä vaaditaan luotettava asennonosoitus, jotta se voidaan hyväksyä myös erottimen vaatimukset täyttäväksi laitteeksi (SFS-EN 60947-3). Varsinkin moninapaisissa kytkimissä, jotka on valmistettu lisäämällä napoja tavanomaisen kolminapaisen kytkimen perään, lisänapojen mekanismille tuottama lisäkuorma saattaa vaikeuttaa luotettavan asennonosoituksen tuottamista.

Kolmas kytkinsuunnittelun alue, johon kappaleiden kovuus ja joustavuus vaikuttavat, on kytkinvärähtelyt. Suljettaessa kytkintä mekanismi painaa liikkuvia koskettimia kiinteisiin koskettimiin. Kytkeäntapahtumassa ilmenee kytkinvärähtelyjä, jotka riippuvat koskettimien nopeudesta ja voimasta sekä niissä tapahtuvista plastisista ja elastisista ilmiöistä. Koskettimien värähdellessä niiden välille syntyy pieniä valokaaria, jotka saattavat hitsata koskettimet kiinni toisiinsa. Simulointi auttaa selvittämään mekanismeihin ja materiaaleihin tehtyjen muutosten vaikutukset kytkinvärähtelyihin. Materiaalien lujuusominaisuudet vaihtelevat usein lämpötilan ja joskus myös kosteuden funktiona, mikä tulee ottaa mekaniikan simuloinneissa huomioon. (Hautala 2006.)

### 2.2.2 Lämmönsiirto pienjännitekojeissa

Johtavassa kappaleessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa lämpenemistä. Mitä suurempi virta, sitä enemmän lämpöä tuotetaan. Pienjännitekojeista lämpöä poistuu pääosin luonnollisella konvektiolla sekä johtimia ja rakenteita pitkin johtumalla, mutta osa lämmöstä siirtyy myös säteilemällä. Luonnollista konvektiota tapahtuu, kun ilma lämmitessään harvenee, nousee nosteen vaikutuksesta ylöspäin ja aiheuttaa näin ilmavirtauksen. Kotelon rakenteita ja virtausaukkoja voidaan optimoida simuloimalla lämmönsiirtoa, ja näin saada aikaan parempi jäähdytys, mikä kasvattaa laitteen elinikää.

Ilmavirran avulla voidaan myös tehostaa valokaaren sammumista jäähdyttämällä valo-kaarta tai ohjaamalla se sammutuslevyihin.

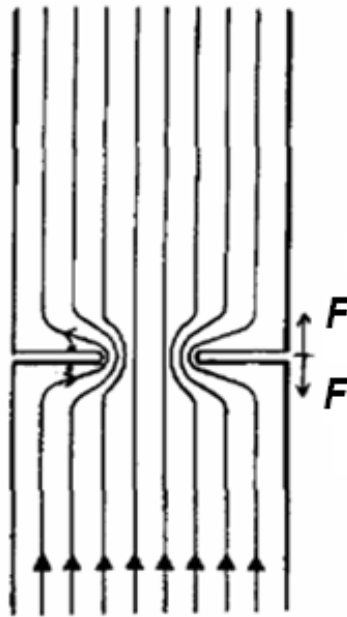
Pienjännitekojeissa käytetään myös elektroniikkalaitteita, joiden suunnittelussa jäähdytys on tärkeä osa-alue. Elektroniikkalaitteissa lämpöä tuottavista komponenteista lämpö siirtyy konvektiolla ilmavirtaan, säteilemällä ympäröiviin pintoihin sekä johtumalla piirilevyyn. Piirilevyllä olevat johdotukset sekä maadoitus- ja jännitetasot vaikuttavat piirilevyn lämmönjohtavuuteen siten, että lämmönjohtavuus on usein suurempi piirilevyn tason suunnassa kuin piirilevyn läpi. Suuritehoiset komponentit saattavat aiheuttaa lämpenemiä muissa komponenteissa, kun niihin siirtyy lämpöä ilmavirran mukana tai johtumalla piirilevyn kautta. Kappaleiden lämpeneminen aiheuttaa lämpölaajenemista, joka taas aiheuttaa rasituksia ja muodonmuutoksia. Lämpötila vaikuttaa usein myös materiaalien ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja sähkönjohtavuuteen. (Steinberg 1991.)

### 2.2.3 Kytkinlaitteiden sähkömagneettiset ilmiöt

Sähkömagneettiset simuloinnit kattavat sähkökenttien ja magneettikenttien vaikutukset kytkimen toimintaan. Kun kytkimen napojen välille tuotetaan potentiaaliero, eli jännite, ja suljetaan kytkin, virta kulkee kiinteästä koskettimesta toiseen liikkuvien koskettimien kautta. Virran suurus ja koskettimien geometria määräävät koskettimissa esiintyvän virrantiheyden, joka saattaa olla suurikin kiinteän ja liikkuvan koskettimen kontaktipinnoissa. Virrantiheyden jakaumaan vaikuttaa myös käyttöjännitteen taajuus. Mitä suurempi taajuus, sitä enemmän virta ahtautuu lähelle johtimen pintaa. Virrantiheyden kasvaessa kasvaa sähkövirran tuottama lämpöteho. (Holm 2000.)

Kosketinpintojen karheudesta johtuen kontakti ei ole koskaan täydellinen, vaan se koostuu kosketuspisteistä. Kosketuspisteiden muodostumiseen vaikuttavat koskettavien pintojen kovuus sekä kontaktipaine. Äärettömän kovien kappaleiden kohdatessa kosketuspisteitä olisi ainoastaan kolme, mutta pehmeämmillä kappaleilla kosketuspinnoissa tapahtuu kappaleiden kulumista ja muodonmuutoksia, jolloin pinnat pääsevät lähelle toisiaan ja voi syntyä uusia kosketuspintoja. Sähkövirta ahtautuu näiden kosketuspisteiden kautta, mikä aiheuttaa kontaktipintojen lämpenemistä ja kasvattaa

vastusta. Virran ahtautuminen kosketinpisteiden kautta aiheuttaa myös koskettimia hylkivän sähkömagneettisen voiman, joka muodostuu, kun pisteen ympärillä kulkevat vastakkaisuuntaiset sähkövirrat indusoivat magneettikentän. Ampéren voimalain mukaan vastakkaisuuntaiset sähkövirrat aiheuttavat toisiaan hylkivän voiman, jota koskettimien tapauksessa kutsutaan puskuvoimaksi. Kuva 4 esittää puskuvoiman muodostumista kosketuspisteen ympärille. (Holm 2000.)



**Kuva 4.** Virran ahtautumisesta aiheutuva puskuvoima (Shea, De Vault & Chien 1994).

Puskuvoima kasvaa sähkövirran kasvaessa. Suurilla virroilla, esimerkiksi oikosulun sattuessa, puskuvoima saattaa lennättää puskukoskettimet auki tai ainakin raottaa niitä sen verran, että koskettimien välissä palava valokaari hitsaa koskettimet toisiinsa. Veitsikosketinrakenteella puskuvoimasta ei ole haittaa, sillä liikkuvat koskettimet ovat molemmin puolin kiinteää kosketinta, jolloin toiseen veitseen kohdistuva puskuvoima vetää toista veistä kiinni kasvattaen kontaktipainetta. Lisäksi veitsikoskettimet muodostavat kaksi johdinta, joissa virta kulkee yhdensuuntaisesti, mikä aiheuttaa veto-voiman veitsien välille Ampéren voimalain mukaisesti. Veitsikoskettimien välistä veto-voimaa kasvatetaan vielä käyttämällä veitsien ympärillä kosketinrautoja, jotka keskittävät veitsien ympärille muodostuvaa magneettikenttää. Kaikki nämä sähkö-

magneettiset voimat kasvavat sähkövirran kasvaessa ja samalla kasvattavat veitsi-koskettimen ja kiinteän koskettimen välistä kontaktipainetta. (Kolmonen 1998.)

Sähkömagneettiset voimat vaikuttavat myös kytkimen ohjausmekanismin suunnitteluun, sillä kontaktipaineen kasvu kasvattaa myös koskettimien välistä kitkaa, joka vaikuttaa mekanismilta vaadittavaan voimaan tai momenttiin, joka tarvitaan kytkimen avaamiseksi. Mekanismien tarkoissa simuloinneissa pitäisi siis ottaa huomioon myös sähkömagneettisten voimien vaikutus. Sähkömagneettisia voimia voitaisiin hyödyntää myös valokaaren katkaisussa. Valokaaren sammumista voi olla mahdollista nopeuttaa käyttämällä kestopagneetteja tai muotoilemalla virtatietä siten, että virran aiheuttama magneettikenttä ohjaa valokaarta sammutuslevyihin.

Sähkökenttien simuloinnilla voidaan ennustaa läpilyöntien mahdollisuutta vertaamalla sähkökentän voimakkuutta materiaalin läpilyöntikestävyYTEEN. Läpilyönti voi tapahtua myös eristemateriaalin pintaa pitkin, kun riittävän suuri sähköinen, terminen tai mekaaninen rasitus aiheuttaa materiaalin pinnan hajoamista tai hiiltymistä luoden johtavan virtatien (SFS-EN 60947-1). Simuloinnilla voidaan arvioida lisäeristyksen tarvetta ja toimivuutta.

#### 2.2.4 Katkaisupalokaari kytkinlaitteissa

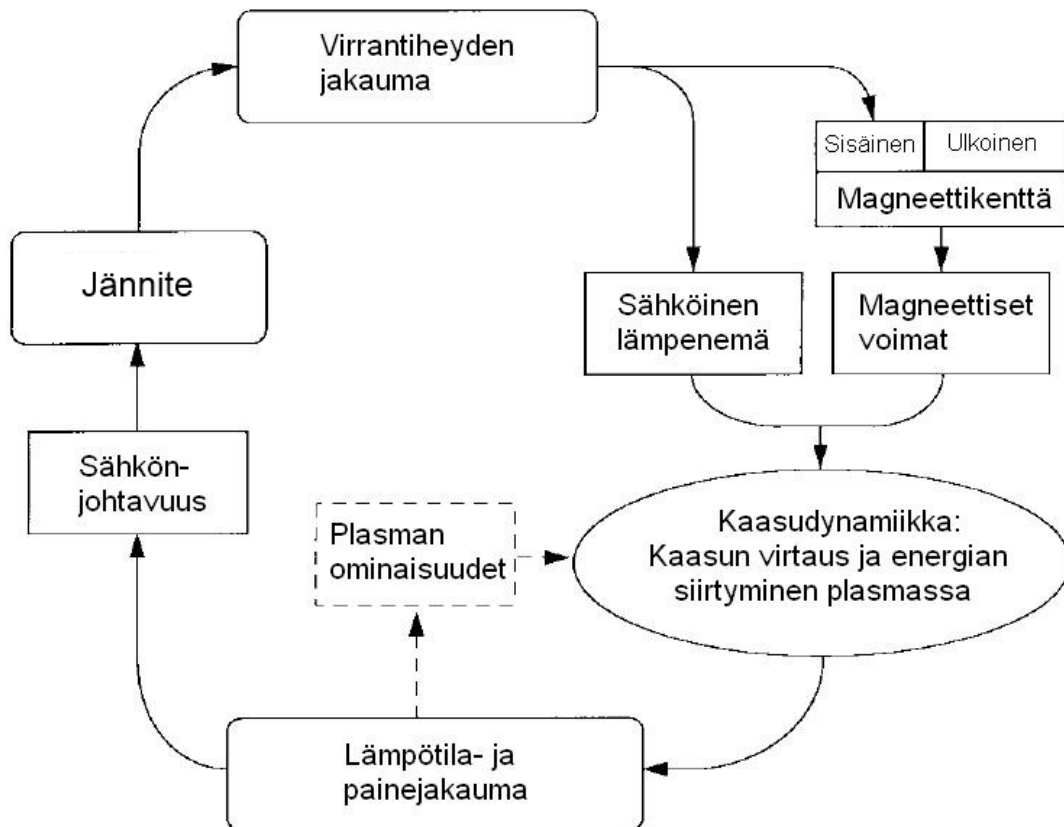
Valokaari on sähköpurkaus, joka syntyy kahden johtimen välisen jännitteen ylittäessä välissä olevan aineen läpilyöntilujuuden. Kytkimissä valokaari syntyy, kun koskettimien avautuessa kosketinpaine pienenee, minkä seurauksena kontaktin ylimenovastus kasvaa. Tämä aiheuttaa koskettimien lämpenemistä, jolloin erkanevien koskettimien viimeiset kosketuspisteet sulavat ja lopulta höyrystyvät. Läpilyönti tapahtuu, kun koskettimien välissä olevat metallihöyryn ja ilman molekyylit hajoavat atomeiksi ja edelleen ioneiksi. Ionisoituneessa kaasussa, eli plasmassa, varaukset pääsevät liikkumaan helpommin, koska molekyylin ja atomien rakenteet eivät enää rajoita niiden liikkumista. Varausten liikkuvuus nostaa kaasun sähköjohtavuutta ja aiheuttaa sähkövirran koskettimien välille. Valokaaren lämpötila on 7 000 – 25 000 K, ja se on korkeampi valokaaren keskellä kuin sen reunoilla. Valokaari on ylöspäin

kaareutuvan käyrän muotoinen, koska keskellä oleva kuuma ilma nousee nopeammin kuin reunalla oleva kylmempi ilma. (Kukkurainen 2008: 16–22.)

Valokaari pyritään sammuttamaan mahdollisimman nopeasti, ettei se ehdi vahingoittaa kytkintä paineellaan ja lämpövaikutuksillaan. Vaihtojännitteellä käytetään jännitteen luonnollista nolllakohtaa valokaaren sammuttamiseksi, mutta tällöinkin vaarana saattaa olla valokaaren uudelleensyttyminen. Tasajännitteellä ei jännitteen luonnollista nolllakohtaa ole ja valokaaren sammuttaminen on vaikeampaa kuin vaihtojännitteellä. Valokaaren sammuttaminen ja uudelleensyttymisen estäminen tapahtuu nostamalla valokaarijännitettä. Valokaarijännite nousee, kun energiaa siirretään pois valokaaresta. Valokaaren energiaa pienennetään esimerkiksi pidentämällä, jäädyttämällä tai katkomalla valokaarta. (Lindmayer 2003; Mutzke 2007.)

Tehokkain ja käytetyin tapa valokaarijännitteen kasvattamiseen on valokaaren katkominen metallisilla sammutuslevyillä. Sammutuslevyjen materiaalina käytetään useimmiten terästä, sillä teräksen ferromagneettinen ominaisuus auttaa houkuttelemaan ja pitämään valokaarta levyjen välissä. Valokaari johdetaan sitä kohtisuorassa oleviin sammutuslevyihin ulkoisen tai valokaaren itsensä aiheuttaman ilmavirran ja magneettikentän avulla. Kun valokaari pakotetaan kohti levyä, se käyristyy levyn ympärille. Valokaaren käyristyminen kasvattaa valokaaren pituutta, mikä taas kasvattaa valokaarijännitettä. Kun sammutuslevyn yli oleva jännite kasvaa tarpeeksi suureksi, virta alkaa kulkea levyn läpi ja sammutuslevyn molemmin puolin muodostuu valokaaren juuret. Juurien muodostuminen kasvattaa valokaarijännitettä entisestään riippuen sammutuslevyn materiaalista, virrasta ja juuren polariteetista, eli siitä onko juuri levyn sähköisesti positiivisella vai negatiivisella puolella. Virrantiheys on suurempi valokaaren juurissa kuin muualla valokaaresta. (Lindmayer 2003, Mutzke 2007.) Valokaaren katkaisemiseen vaikuttavat lisäksi koskettimien rakenne, avautumisnopeus sekä kytkimen kuormana olevan virtapiirin induktiivisuus. Kuorman induktanssi vastustaa virran muutosta ja siten hidastaa valokaaren sammumista. (Kukkurainen 2008: 16–22.)

Valokaari on fysikaalisesti monimutkainen ilmiö, jonka käyttäytymistä määrittelevät pääasiassa termodynamiikan, kaasudynamiikan ja sähkömagneetiikan lait. Kuva 5 esittää näiden fysikaalisten ilmiöiden kytkeytymistä toisiinsa. (Karetta & Lindmayer 1998.)

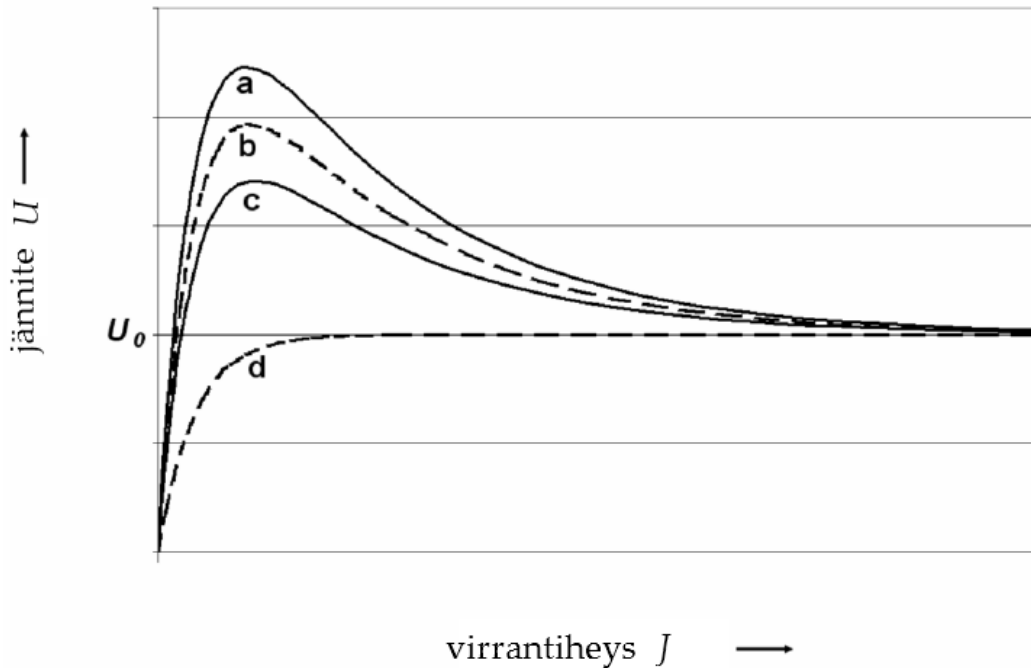


**Kuva 5.** Valokaaren vaikuttavat fysikaaliset ilmiöt (Karetta ym. 1998).

Valokaari muodostuu kolmesta osasta: kahdesta valokaaren juuresta sekä valokaari-patsaasta. Valokaari-patsaassa kulkee koskettimien välinen virta. Valokaaren juuret tuottavat varauksenkuljettajina toimivat elektronit ja ionit. Varauksenkuljettajista 99 % on elektroneja ja 1 % positiivisia ioneja. (Lindmayer 2003.)

Valokaaren simuloinnissa tulee ottaa huomioon kaikki kuvan 5 fysikaaliset ilmiöt sekä niiden kytkeytyminen toisiinsa, vaikkakin joitain ilmiöitä voidaan yksinkertaistaa. Lisäksi mallissa pitää huomioida myös valokaaren juurien syntyminen. Mutzke ym. (2007) ovat kehittäneet kokeellisten ja teoreettisten tutkimusten perusteella valokaaren simulointimallin. Mallia on yksinkertaistettu jättämällä muuttuvan magneettikentän

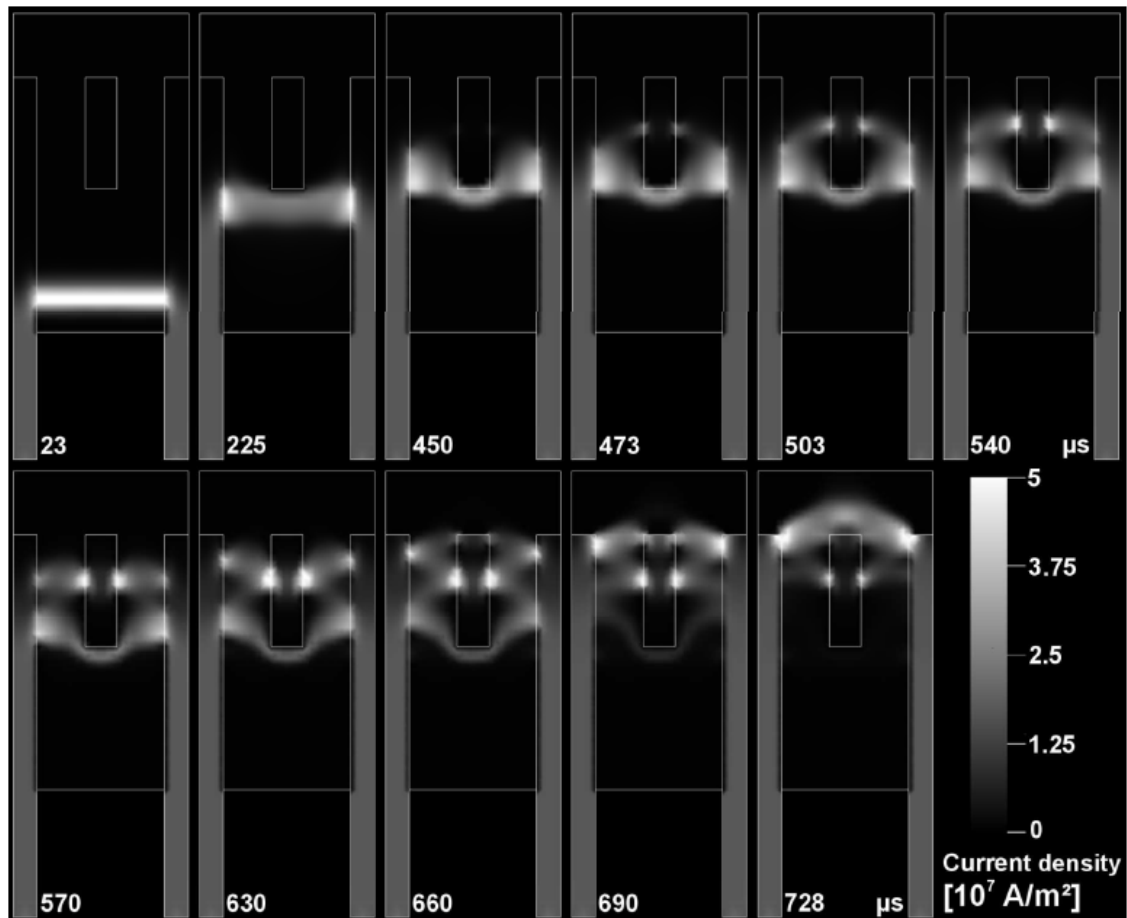
vaikutus huomiotta ja asettamalla sen arvo vakioksi sekä mallintamalla valokaaren juuret sammutuslevyn päällä olevalla ohuella kerroksella elementtejä, joiden resistanssi on epälineaarinen. Resistanssin epälineaarisuuden muotoina käytettiin kuvan 6 mukaisia käyriä. (Mutzke 2007.)



**Kuva 6.** Valokaaren juurien mallintamisessa käytettyjä epälineaarisen resistanssin muotoja (Mutzke 2007).

Kuvan 6 käyrät esittävät valokaaripatsaan ja valokaaren juuren välisen jännitteen ja virrantiheyden riippuvuutta, eli toisin sanoen patsaan ja juuren välistä epälineaarista resistanssia. Ennen kuin uusi valokaaren juuri voi muodostua, täytyy jännitteen nousta juuren syttymisjännitteen yli. Kuvan 6 käyrissä syttymisjännitettä kuvaavat käyrän alussa olevat lakipisteet a, b, c, d, joissa käyrä d kuvaa tilannetta, jossa syttymisjännitettä ei ole lainkaan.

Simuloinnissa käytetyssä geometriassa on vain yksi sammutuslevy kahden johtimen välissä. Kuva 7 esittää simuloimalla saatuja tuloksia virrantiheydestä valokaaren edetessä kohti sammutuslevyjä, kaareutuessa levyn ympärille ja uusien valokaarijuurien syntyessä. (Mutzke 2007.)



**Kuva 7.** Simuloinnin tuloksena saadut virrantiheydet valokaaren edetessä kohti sammutuslevyjä resistanssikäyrällä b (Mutzke 2007).

Mutzke ym. (2007) käyttivät simuloinneissaan Ansys CFX -virtauslaskentaohjelmaa sekä elementtimenetelmään perustuvaa Ansys Multiphysics -ohjelmaa, mikä osoittaa sen, että Ansysin tuotteet soveltuvat myös valokaari-ilmiöiden simulointiin. Tosin simulointimallin rakentamiseen tarvitaan hyvä käsitys valokaaren vaikuttavista tekijöistä ja simulointiohjelmien käytöstä. Valokaaren simulointia voitaneen hyödyntää pienjännitekojeiden tuotekehityksessä suunniteltaessa tehokkaampia ja nopeampia tapoja sammuttaa valokaari.

### 3 MALLINTAMINEN JA SIMULOINTI

Mallintamista ja simulointia käytetään apuna lähes kaikilla insinööri- ja luonnontieteiden aloilla. Simuloinnit auttavat ymmärtämään fysikaalisten ilmiöiden ja olemassa tai suunnitteilla olevien tuotteiden toimintaa ja niissä tapahtuvia vuorovaikutuksia. (Olin, Lahti, Valli, Hasari, Koistinen & Leppänen 2007.)

Tässä työssä mallintamisella tarkoitetaan ilmiötä, laitetta tai tilannetta kuvaavan matemaattisen mallin, eli simulointimallin, muodostamista, kun taas simuloinnilla tarkoitetaan matemaattisen mallin ratkaisemista simulointitulosten tuottamiseksi. Tässä luvussa kerrotaan mallintamisen ja simuloinnin eri vaiheista, numeerisista simulointimenetelmistä ja tässä työssä käytetyistä simulointiohjelmistoista.

#### 3.1 Mallintamisen ja simuloinnin vaiheet

Simulointiohjelmisto koostuu esikäsittelijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsittelijästä. Lisäksi ohjelma voi nykyään sisältää erilaisia optimointimahdollisuuksia. Simulointimallissa käytettävä geometria luodaan erillisessä CAD-ohjelmassa, eli tietokoneavusteisessa suunnitteluohjelmassa, tai simulointiohjelmiston esikäsittelijässä. Esikäsittelijän tärkein tehtävä on jakaa malli diskreetteihin osiin, eli verkottaa malli, ja asettaa mallille reunaehdot, joiden mukaan malli ratkaistaan. Ratkaisija laskee elementeille ratkaisut annettujen reunaehtojen mukaan. Jälkikäsittelijä ottaa vastaan laskentayksikön tulokset ja tarjoaa erilaisia vaihtoehtoja tulosten näyttämiseen, kuten värikarttoja, vektoreita, kenttäviivoja ja animaatioita. (Haario, Heiliö, Järvinen & Neittaanmäki 2001.)

Esi- ja jälkikäsittelijöitä on saatavilla myös erillisinä ohjelmina, jolloin ne voidaan yhdistää jonkin toisen simulointiohjelman ratkaisijaan. Tämä on hyödyllistä silloin, kun simulointiohjelman omat esi- tai jälkikäsittelyominaisuudet ovat puutteellisia. Varsinkin hyvä verkotuksen tekijä on tärkeä nopeiden ja tarkkojen simulointien kannalta. Mielenkiinnon kohteisiin optimoitu verkkomalli lyhentää simulointiaikaa huomattavasti, kun vain mielenkiinnon kohteissa käytetään tiheämpää verkkoa kuin muualla. Erillisen esi-

ja jälkikäsitteilyä käyttö mahdollistaa saman tutuksi tulleen käyttöliittymän käytön eri simulointiohjelmien kanssa. Näin ollen hyvää simulointiohjelmia ei tarvitse hylätä huonon käyttöliittymän takia eikä tarvitse opetella montaa käyttöliittymää useaa simulointiohjelmia käytettäessä. Erillistä esikäsitteilyä käytettäessä riittää, että se pystyy lukemaan käytetyn CAD-ohjelman mallitiedostoja. Käyttäjän ei siis tarvitse huolehtia simulointiohjelman ja CAD-ohjelman yhteensopivuuksista. (Haario ym. 2001.)

### 3.1.1 Simulointimallin rakentaminen

Simulointimallin rakentaminen, eli mallintaminen, tapahtuu esikäsitteilyvaiheessa. Aluksi luodaan mallin geometria tai tuodaan se ulkopuolisesta CAD-ohjelmasta joko tallennetun tiedoston tai dynaamisen linkin kautta. Dynaaminen linkki CAD-ohjelman ja simulointiohjelman välillä mahdollistaa kaksisuuntaisen kommunikoinnin, jolloin myös simulointiohjelma voi muuttaa mallia CAD-ohjelmassa. Dynaaminen linkki mahdollistaa geometrian muuttamisen ja optimoinnin parametrisesti.

Mallissa käytettävää geometriaa voidaan usein yksinkertaistaa kadottamatta simuloinnin tarkkuutta. Esimerkiksi lämmönjohtumista simuloitaessa ei pienillä kulmien pyöristyksillä tai viisteillä ole juurikaan merkitystä. Toisaalta simuloinnissa käytetyn geometrian, varsinkin koskettavien kappaleiden rajapinnassa, on oltava tarkempi kuin mitoituksia tai teknisiä piirustuksia varten luodut CAD-mallit usein ovat. Kappaleiden väliin jäävä parin mikrometrin rako saattaa moninkertaistaa laskenta-ajan, koska pienen raon mallintamiseksi tarvitaan todella tiheä verkotus. Toisinaan myös geometrian siirto CAD-ohjelmasta simulointiohjelmaan aiheuttaa virheitä geometriaan. Näiden seikkojen takia monet esikäsitteilyt tarjoavat automaattisia toimintoja geometrian korjaamiseen ja yksinkertaistamiseen.

Geometrian luomisen, tuomisen ja muokkaamisen jälkeen valitaan simuloinnissa käytettävät yhtälöt. Useimmissa ohjelmistoissa käytettävien yhtälöiden sijaan valitaan simuloitavat fysikaaliset ilmiöt, joiden perusteella ohjelma valitsee mahdollisimman sopivat oletusasetukset. Seuraavaksi asetetaan mallin materiaalimäärittelyt ja reunaehdot. Useimmat simulointiohjelmat tarjoavat materiaalikirjaston, jota voi

täydentää omilla materiaalmäärittäyksillään, kun taas toisissa ohjelmissa täytyy jokaiseen malliin määrittää materiaaliominaisuudet erikseen. Simulointimallissa tarvittavat materiaalin ominaisuudet riippuvat mallinnettavista ilmiöistä. Esimerkiksi sähköisiä ilmiöitä mallinnettaessa tarvitaan materiaalien sähkönjohtavuuksia, kun taas lämpösimuloinneissa tarvitaan lämmönjohtavuuksia. Riittää, että tietää simuloitavana olevaan ilmiöön liittyvät materiaalien ominaisuudet. Myös malliin määritettävät reunaehdot riippuvat simuloitavasta ilmiöstä. Lämpösimuloinneissa määritetään geometrian pisteille, pinnoille tai tilavuuksille esimerkiksi lämpötiloja, lämmönsiirtokertoimia tai lämpötehoja, kun taas vaikkapa lujuussimuloinneissa määritetään kappaleiden tukipisteitä ja kuormittavia voimia.

### 3.1.2 Simulointi

Simulointiohjelmiston ratkaisija laskee mallin tuloksen esikäsittelyssä määriteltyjen verkotuksen, reunaehtojen ja alkuarvojen perusteella. Simulointiohjelmistot sisältävät usein monia eri ratkaisijoita erilaisten mallien ratkaisemiseksi. Ratkaisijan valintaan vaikuttaa myös, millaista mallia yritetään ratkaista. Toiset ratkaisijat soveltuvat esimerkiksi epälineaaristen tai epäisotrooppisten mallien ratkaisuun paremmin kuin toiset. Varsinkin virtausmekaniikan malleihin on useita ratkaisijoita, joiden valinta riippuu virtauksen ominaisuuksista, kuten turbulenttisuudesta, tai aineen ominaisuuksista, kuten puristuvuudesta ja viskositeetistä. Ratkaisijoiden välillä on eroa myös nopeudessa ja muistinkäytössä. Jos työasemasta loppuu muisti kesken, voidaan valita vähemmän muistia käyttävä ratkaisija, mikä johtaa usein hitaampaan ratkaisumenetelmään. (Ansys 2009a.)

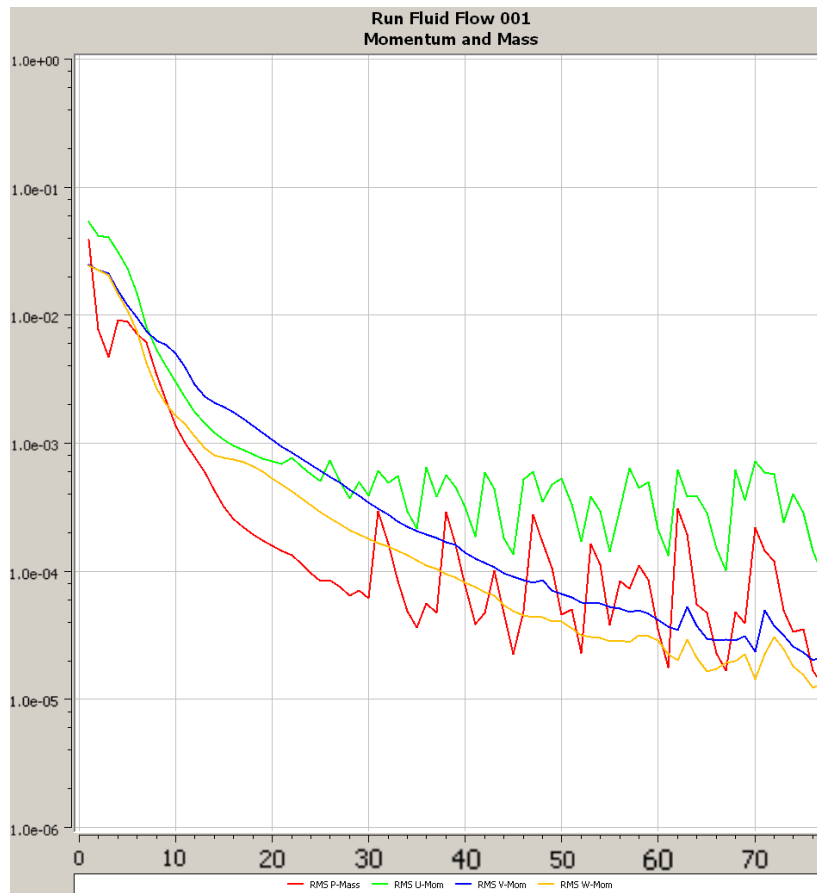
Esimerkiksi Ansys Multiphysicsin suora ratkaisija käyttää keskusmuistia noin 10 Gt tai 1 Gt jokaista miljoonaa ratkaistavaa vapausastetta, eli jokaisessa elementissä ratkaistavaa suureta, kohden riippuen siitä, käytetäänkö *in-core*- vai *out-of-core*-asetusta. *In-core*-asetuksella simulointimallista muodostettu matriisi tallennetaan ja ratkaistaan keskusmuistissa, kun taas *out-of-core*-asetuksella se tallennetaan kiintolevylle. Keskusmuisti on huomattavasti suorituskykyisempi kuin kiintolevy, eli *in-core*-asetuksella saavutetaan lyhyempi ratkaisuaika, mutta kulutetaan enemmän muistia kuin

*out-of-core*-asetuksella. Ansys Multiphysicsissä voidaan käyttää myös iteratiivista ratkaisijaa, joka käyttää keskusmuistia noin 1,5 Gt miljoonaa vapausastetta kohden. Iteratiivinen ratkaisija aloittaa ratkaisun alkuarvauksesta ja tarkentaa ratkaisua jokaisella iterointikierröksellä. Ratkaistava matriisi saattaa kuitenkin olla muodoltaan sellainen, ettei sitä pysty ratkaisemaan iteroimalla, minkä vuoksi suositellaan suoran ratkaisijan käyttämistä aina kun mahdollista. (Ansys 2009a.) Virtauslaskentaohjelma Ansys CFX käyttää keskusmuistia 400 Mt jokaista miljoonaa tetraedrielementtiä kohden. Ansys CFX pyrkii käyttämään kaiken saatavilla olevan muistin ratkaisun nopeuttamiseksi. (Ansys 2010.)

Simulointiohjelmiston tehokkaaseen käyttöön kuuluu sopivan ratkaisijan valitseminen kuhunkin ratkaistavaan ongelmaan. Monet ohjelmistot pyrkivät valitsemaan automaattisesti parhaan mahdollisen ratkaisijan simuloitavan mallin perusteella, mutta aina se ei kuitenkaan ole paras mahdollinen. Simulointiohjelmiston käyttäjän tulisi tietää eri ratkaisijoiden soveltuvuus oman mallinsa ratkaisemiseen.

Simulointimallin ratkaiseminen aloitetaan esikäsittelyssä annettujen alkuarvojen perusteella, ja tulosta tarkennetaan seuraavilla iterointikierröksillä. Iterointikierrosten edetessä mallin ratkaisu suppenee kohti oikeaa ratkaisua ja virhetermi pienenee. Ratkaisun suppenemista kutsutaan konvergoinniksi, jota voidaan seurata konvergointikäyristä ratkaisun edistyessä. Kuva 8 esittää erään Ansys CFX -ohjelmalla lasketun virtaussimuloinnin konvergointikäyriä.

Vain riittävälle tarkkuudelle konvergoitunutta ratkaisua voidaan pitää luotettavana. Ratkaisija jatkaa iterointeja niin kauan, kunnes määritelty virhetermin raja on saavutettu. Virhetermin rajaa muuttamalla voidaan vaikuttaa laskettavan ratkaisun tarkkuuteen. Alustavia simulointeja tehtäessä voi pienikin tarkkuus riittää hyödyllisten tulosten aikaansaamiseksi. Jos ratkaisu ei suppene lainkaan vaan hajaantuu, ratkaisija ei ole pystynyt ratkaisemaan mallia lainkaan.



**Kuva 8.** Erään virtaussimuloinnin konvergoitkäärät. Virhetermin suuruus y-akselilla ja  $x$ -akselilla iterointikierron.

### 3.1.3 Simulointitulosten käsittely

Simulointituloksia käsitellään jälkikäsittelijällä, joka tuottaa esityksiä ratkaisijan laskemasta simulointituloksesta. Tuloksista voidaan tehdä muun muassa taulukoita, kuvaajia, kuvia tai animaatioita. Useimmiten simulointituloksia tarkastellaan kuvista, joissa ratkaistut suuret on esitetty värikarttoina, isotrooppeina, vektoreina tai kenttäviivoina. Ajasta riippuvista tai parametrisista tuloksista voidaan tehdä animaatioita. (Haario ym. 2001.)

Useimmat simulointiohjelmit sisältävät oman jälkikäsittelijänsä, mutta jälkikäsittelijöitä on saatavilla myös erillisinä ohjelmistoina. Erilliset jälkikäsittelijät saattavat sisältää edistyneitä ominaisuuksia, joita simulointiohjelmiston omasta jälki-

käsittelijästä ei löydy, kuten visualisointien tarkempi hallinta, käyrien ja kuvaajien piirtäminen, uusien suureiden laskeminen tulosdatasta sekä erilaisia kuvankäsittely- ja animointiominaisuuksia. (Haario ym. 2001.)

### 3.2 Numeerisia simulointimenetelmiä

Simuloinnilla ratkaistavia fysikaalisia ilmiöitä mallinnetaan usein osittaisdifferentiaaliyhtälöillä. Kaikkia osittaisdifferentiaaliyhtälöitä ei voida ratkaista analyttisesti, joten niiden ratkaisussa käytetään numeerisia ratkaisumenetelmiä. (Shaw 1992.) Tässä luvussa esitellään kolme tavallisinta fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen käytettyä numeerista simulointimenetelmää: differenssimenetelmä, elementtimenetelmä ja tilavuusmenetelmä. Näitä menetelmiä on käytetty perustana simulointiohjelmistojen kehityksessä, mutta niiden toteutukset vaihtelevat ohjelmasta toiseen.

#### 3.2.1 Differenssimenetelmä

Differenssimenetelmässä analysoitava alue jaetaan tasavälisesti pisteisiin. Näissä pisteissä fysikaalista ilmiötä kuvaavien osittaisdifferentiaaliyhtälöiden osittaisderivaattoja approksimoidaan erotusosamäärillä. Yhtälö 1 esittää derivaatan laskemista erotusosamäärällä.

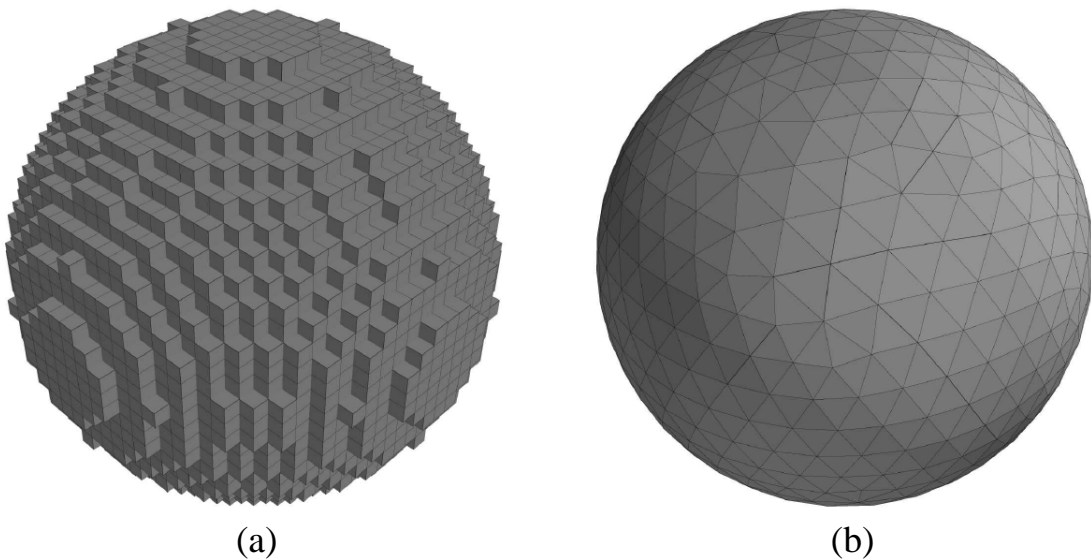
$$U'(x) \approx \frac{U(x+h) - U(x)}{h}. \quad (1)$$

Yhtälön 1 arvo lähestyy funktion  $U(x)$  derivaattaa  $U'(x)$ , kun  $h$  lähestyy nollaa. Kun annetaan  $h$ :lle jokin pieni äärellinen arvo, saadaan numeerinen approksimaatio funktion derivaatasta. Derivaatan approksimointi voidaan toteuttaa myös muilla tavoilla, esimerkiksi Taylorin sarjalla. (Shaw 1992.)

Osittaisdifferentiaaliyhtälöiden riippuvien muuttujien arvot saadaan laskettua, kun tiedetään yhden riippuvan muuttujan arvo ja kaikki sen derivaatat jonkin riippumattoman muuttujan suhteen eräällä annetulla riippumattoman muuttujan arvolla.

Simuloinneissa riippuvia muuttujia voisivat olla esimerkiksi paine tai lämpötila ja riippumattomia muuttujia paikka tai aika. Esimerkiksi laskenta-alueen reunoilla tiedetään aineen lämpötila, jolloin laskenta-alueen sisällä lämpötila lasketaan lämmönjohtumisen yhtälöiden derivaattojen approksimaatioiden avulla. (Shaw 1992.)

Elementti- ja tilavuusmenetelmiin verrattuna differenssimenetelmä on nopeampi laskea ja yksinkertaisempi ohjelmoida, mutta vaatii tasavälisen, säännöllisen karteesisen verkotuksen toimiakseen. Säännöllinen karteesinen verkotus rajoittaa geometrian mallinnusta varsinkin kaarevilla pinnoilla. Kuvassa 9 vertaillaan differenssimenetelmän vaatimaa tasavälistä karteesista verkotusta elementtimenetelmässä käytettävään rakenteettomaan tetraedriverkotukseen. (Shaw 1992.)



**Kuva 9.** Pallo diskreetoituna differenssimenetelmän vaatimalla karteesisella verkotuksella (a) ja elementtimenetelmässä käytetyllä rakenteettomalla tetraedriverkotuksella (b) (Boardman 2005).

Kuvasta 9 nähdään, miten elementtimenetelmässä käytetty rakenteeton tetraedriverkotus myötäilee kappaleen geometriaa paremmin kuin differenssimenetelmässä käytetty tasavälinen karteesinen verkotus.

### 3.2.2 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmästä käytetään lyhennettä FEM, joka tulee englannin kielen sanoista *finite element method* (äärellisten elementtien menetelmä). Tässä menetelmässä laskenta-alue jaetaan pienempiin osa-alueisiin, joita kutsutaan elementeiksi. Jokaisen elementin sisällä fysikaalista ilmiötä kuvaavia osittaisdifferentiaaliyhtälöitä approksimoidaan yksinkertaisemmalla funktiolla siten, että ne toteuttavat elementtien välisille rajapinnoille asetetut reunaehdot. Lopuksi elementeille johdetut yhtälöt kerätään yhteen yhtälömatriisiin ja ratkaistaan tuntemattomat muuttujat matriisilaskennan keinoilla. (Haataja, Heikonen, Leino, Rahola, Ruokolainen & Savolainen 2002: 242–303.)

Elementtimenetelmässä fysikaalisten ilmiöiden numeeriset approksimaatiot muodostetaan elementille, kun taas differenssi- ja tilavuusmenetelmässä ne muodostetaan solmupisteille. Lisäksi elementtimenetelmän verkotus on hyvin vapaasti muodostettavissa ja soveltuu hyvin myös monimutkaisten geometrioiden mallintamiseen, kuten kuvasta 9 nähdään. Toinen elementtimenetelmän hyvä puoli on sen yleisluonteisuus. Elementtimenetelmää käyttävään ohjelmistoon on helppo lisätä uudentyyppisiä elementtejä, jotka mahdollistavat erilaisten fysikaalisten ilmiöiden ja niiden yhdistelmien ratkaisemisen. Differenssi- tai tilavuusmenetelmää käyttäviin ohjelmistoihin joudutaan tekemään suurempia muutoksia, jos niihin lisätään uusia elementtityyppejä. (Shaw 1992.)

### 3.2.3 Tilavuusmenetelmä

Tilavuusmenetelmästä käytetään lyhennettä FVM, joka tulee englannin kielen sanoista *finite volume method* (äärellisten tilavuuksien menetelmä). Tilavuusmenetelmää on perinteisesti käytettyin menetelmä kaupallisissa virtauslaskentaohjelmissa. Aikaisemmin elementtimenetelmä ei täysin soveltunut virtauslaskennan ongelmiin, mutta nykyaikaisilla elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmistoilla pystytään niitäkin ratkaisemaan. (Shaw 1992.)

Tilavuusmenetelmä perustuu suurelta osin differenssimenetelmään, mutta ratkaisuala-alueen diskretointi on erilainen. Tilavuusmenetelmässä diskretointipisteiden lisäksi muodostetaan pisteiden väliin niiden rajapinnat. Pisteisiin muodostetaan fysikaalisia ilmiöitä kuvaavien yhtälöiden approksimaatiot, jotka koostuvat tilavuuselementtiin tulevasta voista ja lähdetermeistä. Tilavuuselementtien välisten vuotermien ansiosta voidaan käyttää epäsäännöllistä verkotusta, joka mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden tarkan mallintamisen, aivan kuten elementtimenetelmällä. (Shaw 1992.)

### 3.3 Tässä työssä käytetyt simulointiohjelmit

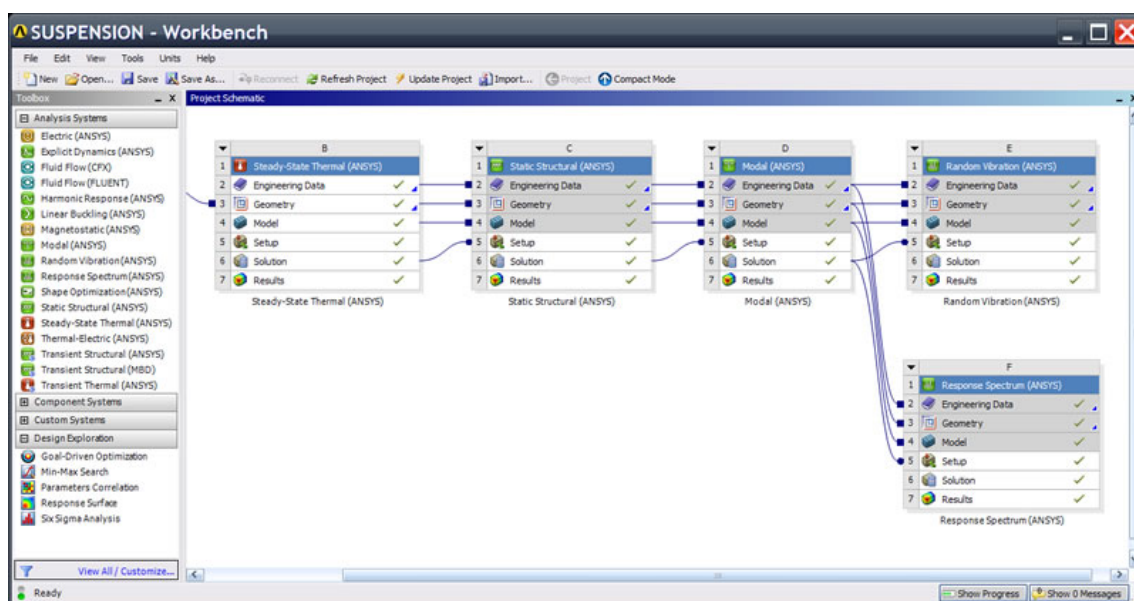
Tässä työssä käytetään pienjännitekojeissa esiintyvien fysikaalisten ilmiöiden simulointiin Ansys Multiphysics 12.1 ja Ansys CFX 12.1 simulointiohjelmiä. Nämä ohjelmat valittiin tähän työhön, koska ABB:n muillakin yksiköillä on jo käytössä Ansysin lisenssejä ja koska Heiskasen (2008) kandidaatin tutkielman tulosten perusteella Ansys Multiphysics on helppokäyttöinen ja soveltuu hyvin pienjännitekojeissa esiintyvien ilmiöiden simulointiin. Lisäksi se tarjoaa hyvät ominaisuudet geometrian tuontiin ja muokkaukseen sekä simulointien yhdistämiseen ja optimointiin. Virtausten ja lämmönsiirron simulointiin verrattiin Ansys<sup>®</sup> Fluent<sup>®</sup> ja Ansys CFX -ohjelmiä, minkä tuloksena päädyttiin CFX:ään helppokäyttöisyytensä ja tehokkaan ratkaisijansa ansiosta. Tässä luvussa esitellään näiden ohjelmien käyttöä ja toimintaa.

#### 3.3.1 Ansys<sup>®</sup> Multiphysics<sup>™</sup>

Ansys Inc. perustettiin vuonna 1970 Yhdysvalloissa. Ansysin tuotteita käytetään enimmäkseen rakenteiden ja virtausmekaniikan simulointiin, mutta yritysostojen myötä tuote- ja sovellustarjonta on laajentunut myös sähkömagneetiikan alueelle. Ohjelmit sisältävät ominaisuuksia lämmönsiirron, mekaniikan, virtauslaskennan ja sähkömagneetiikan laskentaan. Ansys on laajentanut osaamistaan ja tuotevalikoimaansa yritysostoilla, joihin lukeutuvat muun muassa virtausmekaniikan ohjelmistoja valmistavat CFX vuonna 2003 ja Fluent vuonna 2006 sekä elektroniikan ja sähkömekaniikan simulointiohjelmitoista tuottava Ansoft vuonna 2008. Yritysostoilla hankitut ohjelmit

ovat vielä omia itsenäisiä ohjelmiaan, mutta näiden ohjelmien ominaisuuksien yhdistyminen ja saumaton yhteistoiminta kehittyvät jatkuvasti.

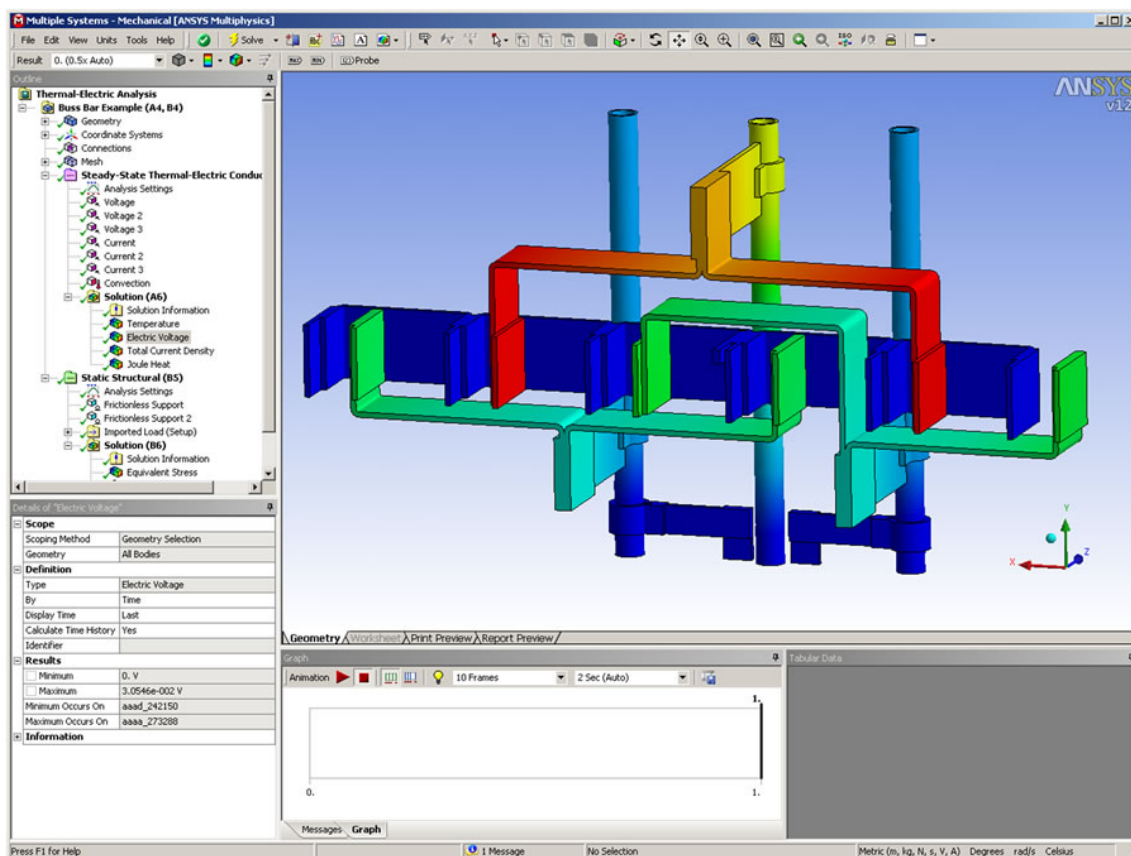
Ohjelmien yhteistoiminnan toteutukseen on kehitetty Workbench™-alusta, jolla hallitaan simulointien ja geometrioiden yhdistämistä sekä parametreja ja optimointia. Workbench-alustalla voidaan havainnollisesti yhdistää eri simulointien laskentaa toisiinsa, esimerkiksi rakenteiden ja virtausten yhteisvaikutusta tai lämpölaajenemisen vaikutusta rakenteiden rasitukseen. Kuva 10 esittää simulointiprojektia Workbench 2.0 -alustalla. Kuvasta nähdään, miten eri simulointeja on yhdistetty toisiinsa. Esimerkiksi lohkoista B ja C nähdään, että B-lohkon lämpösimuloinnin tulokset siirretään C-lohkon rakenneanalyysin lämpökuormaksi ja kummassakin simuloinnissa käytetään samoja materiaaleja, geometriaa ja verkotusta. (Ansys 2009b.)



**Kuva 10.** Ansys Workbench 2.0 -alusta (Ansys 2009b).

Mallintaminen ja simulointi tapahtuvat Ansys® Mechanical™ -käyttöliittymässä. Ansys Mechanical on graafinen käyttöliittymä, jossa asetetaan mallin reunaehdot ja materiaalit, verkotetaan geometria, ratkaistaan simulointi ja tarkastellaan tuloksia. Käyttöliittymä on helppokäyttöinen ja perustuu simulointimallin puurakenteeseen, jossa on omat haaransa geometrialle, verkotukselle, reunaehdoille ja ratkaisuille. Ohjelma tarjoaa valikoita ja vaihtoehtoja ruudulle sekä hiiren oikealla näppäimellä avattavaan

kontekstivalikkoon sen mukaan, missä vaiheessa simulointia ollaan. Kuva 11 esittää Ansys Mechanical -käyttöliittymää. (Ansys 2009b.)

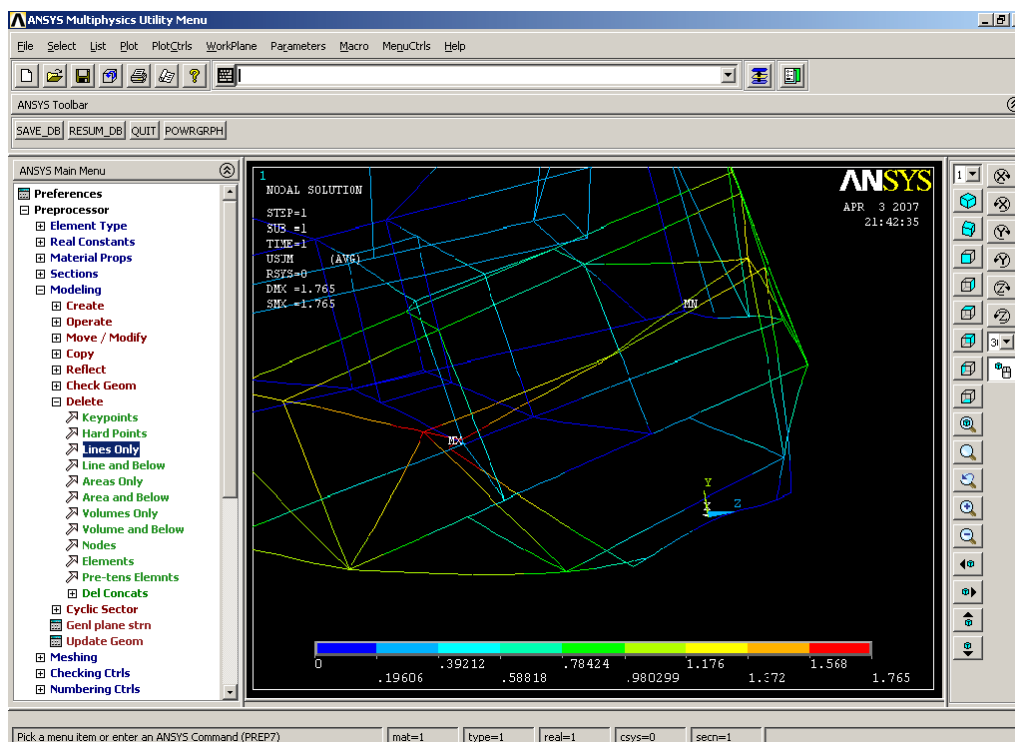


**Kuva 11.** Ansys Mechanical -käyttöliittymä (Ansys 2009b).

Tosiasiaa simuloinnit perustuvat APDL-simulointikielen (*Ansys Parametric Design Language*). Käyttäjän tehdessä simulointivalintoja käyttöliittymässä ohjelma luo taustalla APDL-kielistä simulointitiedostoa. APDL-tiedosto ratkaistaan käyttäjän valitsemalla ratkaisijalla, minkä jälkeen luodaan tulostiedosto, jonka tulkinta näytetään käyttöliittymässä. (Ansys 2009b.)

Ansys tarjoaa simulointiin myös vanhempaa Ansys<sup>®</sup> MAPDL<sup>™</sup> -käyttöliittymää. Ansys MAPDL:n käyttö on lähempänä APDL-kieltä, minkä ansiosta se on monipuolisempi, mutta paljon vaikeakäyttöisempi kuin Ansys Mechanical. Mechanicalin puolelta ei löydy läheskään kaikkia MAPDL:n ominaisuuksia, mutta jokaisen uuden version myötä niitä tuodaan lisää Mechanicaliin käytettäväksi. Mechanicalin käyttöä voidaan laajentaa

APDL-skripteillä, mutta näinkään ei saada kaikkia MAPDL:n ominaisuuksia käyttöön. Tämän työn tavoitteena on käyttää ohjelmistoja, jotka soveltuvat jokapäiväiseen tuotekehitystyöhön, joten Ansys MAPDL on jätetty vähemmälle huomiolle. Kuva 12 esittää Ansys MAPDL -käyttöliittymää. (Ansys 2009b.)



**Kuva 12.** Ansys MAPDL -käyttöliittymä (Ansys 2009b).

Tässä työssä Ansys Multiphysics -ohjelmaa käytetään lujuusanalyysiin, mekanismin kinemaattiseen tarkasteluun sekä sähkömagneettisten voimien laskemiseen.

### 3.3.2 Ansys<sup>®</sup> CFX<sup>®</sup>

Ansys CFX on tilavuusmenetelmään perustuva virtauslaskentaohjelma, jota käytetään neste- ja kaasuvirtausten simulointiin. Näihin simulointeihin liittyy usein myös virtausten aiheuttamat paineet ja lämmönsiirrot. Virtauslaskentaa käytetään muun muassa polttomoottoreiden, pumppujen, turbiinien ja lentokoneiden ilmanvastuksen mallintamiseen. Virtauslaskentaa käytetään paljon myös laitteiden lämpenemien ja

jäähtymisten simulointiin. Tässä työssä Ansys CFX:ää käytetään elektroniikkalaitteen jäähtymisen analysointiin. (Ansys 2009b.)

Ansys CFX:ssä geometrian tuonti ja mallin verkottaminen voidaan tehdä samoilla työkaluilla kuin Ansys Multiphysicsissä, mutta reunaehtojen ja materiaalien määrittäminen tapahtuu CFX-Pre-esikäsitteilyssä. Mallissa käytetyt fysikaaliset ominaisuudet valitaan kullekin kappaleelle erikseen. Kappaleille voidaan määrittää esimerkiksi materiaali, olo-muoto, lämmönsiirtotavat, laskennassa käytettävä turbulenssimalli, nosteen vaikutus, kappaleen liike ja monia muita ominaisuuksia. Kappaleille voidaan luoda myös reuna-ehtoja, alikappaleita ja pistemäisiä lähteitä. Reunaehto luotaessa valitaan ensin reuna-ehtoa määrittävät pinnat ja sen jälkeen valitaan reunaehdon tyypiksi joko sisääntulo, ulostulo, avoin aukko, seinä tai symmetriapinta. Reunaehdolle voidaan määrittää valitusta tyypistä riippuen erilaisia ominaisuuksia, kuten lämmönsiirtokertoimia sekä virtauksen tai lämmön lähteitä. Lähteet voidaan määrittää myös tilavuuksina alikappaleissa tai pistemäisinä. Kahden eri kappaleen kontakti voidaan määrittää rajapintaehdolla, joka automaattisesti luo reunaehdot rajapintaehdon määrittelymien mukaan. Monimutkaisten reunaehtojen määrittely onnistuu CFX:n omaan CEL-kieleen perustuvilla funktioilla, joilla voidaan esimerkiksi ohjata tehonlähdettä keskimääräisen virtausnopeuden tai minkä tahansa muun suureen mukaan. CEL-funktioita voidaan käyttää myös simulointitulosten jälkikäsitteilyssä. (Ansys 2009b.)

Kun reunaehdot ja muut määrittelyt on saatu tehtyä, valitaan vielä mallin aikaskaala, eli onko malli ajan suhteen muuttuva vai jatkuva. Jatkuvan tilan malleissa haetaan ratkaisuksi arvot, joihin malli vakiintuu tarpeeksi pitkän ajanjakson jälkeen, jolloin ratkaisuksi saadaan yksi tilanne. Ajan suhteen muuttuvassa mallissa ratkaistaan arvot käyttäjän valitsemalla aikavälillä ja saadaan ratkaisut jokaista laskettua aika-arvoa kohti. Tarvittaessa voidaan vielä säätää ratkaisijaan vaikuttavia määrittelyjä, joilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi muistin käyttöön ja suppenemiskriteereihin.

Kun kaikki edellä mainitut määrittelyt on tehty, voidaan aloittaa mallin ratkaisu CFX Solution Manager -ohjelmalla. Solution Managerissa valitaan vielä ratkaisuun käytettävien prosessoriytimien lukumäärä, säädetään mallin jakamisen parametreja ja valitaan, käytetäänkö alkuarvoina esikäsitteilyssä määritellyjä arvoja vai jotain edellistä

ratkaisua. Tämän jälkeen voidaan aloittaa mallin ratkaiseminen, jonka etenemistä voidaan seurata virhetermien suppenemiskäyristä ja ratkaisijan tekstisyötteistä. Jos suppenemiskäyrät hajaantuvat eikä ratkaisua vaikuta löytyvän, voidaan laskenta keskeyttää ja pohtia, onko vika mallin määrittelyssä vai ohjelman ominaisuuksissa. Laskemisen päätyttyä tekstisyötteestä voidaan lukea monista ratkaisuun liittyvistä asioista, kuten muistin ja prosessoritehon käytöstä, ratkaisun virhetermeistä, suureiden vaihteluväleistä sekä monista koko mallia kuvaavista suureista, kuten Reynoldsin luvusta. Simuloinnin onnistumista voidaan arvioida jo pelkästään tekstisyötteestä, josta nähdään suureiden suurimmat ja pienimmät arvot. Jos esimerkiksi lämpötilaksi saadaan satoja Celsius-asteita, kun odotettiin kymmeniä, voidaan epäillä mallin tai ratkaisijan soveltuvuutta kyseiseen tilanteeseen.

Ratkaisijan laskemaa ratkaisua tarkastellaan CFD-Post-ohjelmassa, jota voidaan käyttää muidenkin Ansysin virtauslaskentaohjelmien, kuten Fluentin<sup>®</sup>, Polyflow'n<sup>®</sup> ja Icepakin<sup>®</sup>, ratkaisuiden tarkasteluun. CFD-Postissa voidaan tarkastella tuloksia ja luoda muun muassa vektoreita, värikarttoja, virtaviivoja ja animaatioita. Tulokset voidaan koostaa automaattisesti raportiksi, jossa on esimerkiksi simuloinnissa käytetyt reunaehdot, materiaalmääriykset sekä kuvia käyttäjän valitsemista kohteista. Kuten aiemmin jo mainittiin, CFD-Postissa voi käyttää CEL-komentoja monimutkaisiin tulosten tarkasteluihin. Voidaan tarkastella esimerkiksi jonkin suureen keskiarvoa tai summaa tietyllä pinnalla tai jonkin suureen arvoa suhteessa toiseen suureeseen.

Myös Ansys CFX:n simuloinnit perustuvat tekstipohjaiseen CCL-simuloinnin kuvauskieleen, aivan kuten Ansys Multiphysicsin simuloinnit perustuvat APDL-kieleen. Jokaisen simulointikomponentin, kuten reunaehdon, pinnan, kappaleen ja käyttäjän luoman muuttujan CCL-kuvausta voidaan tarkastella ja muokata erikseen. Muuttujien ja reunaehtojen muokkaaminen on toisinaan nopeampaa CCL-kuvauksen kautta kuin käyttöliittymän valikoiden kautta, esimerkiksi silloin, kun mukana on paljon toistuvia rakenteita.

#### 4 SIMULOINTITOIMINTA PIENJÄNNITEKOJEIDEN TUOTEKEHITYKSESSÄ

Simulointitoiminta kattaa mallintamisen ja simuloinnin lisäksi niihin liittyviä toimintoja, kuten simuloitavan ongelman määrittelyn sekä simulointitulosten hyödyntämisen ja arkistoinnin. Järjestelmällisen ja yhtenäisen simulointitoiminnan uskotaan helpottavan simulointien mallintamista, hyödyntämistä, dokumentointia ja uudelleenkäyttöä sekä tehostavan toimijoiden yhteistyötä. Tässä työssä pienjännitekojeiden tuotekehityksen simulointitoiminnan yhtenäistämiseksi on kehitetty simulointitoiminnan menetelmä, joka esitellään luvussa 4.2.2.

Pienjännitekojeiden tuotekehitykseen kehitetty simulointitoiminnan menetelmä perustuu SISUQ8-menetelmään, jota kehitetään Tekesin "Mallinnus- ja simulointi"-tutkimusohjelman (MASI) "Simuloinnin ja suunnittelun uudet sovellustavat ja liiketoiminta"-projektissa (SISU). SISU-projektin toteutus alkoi keväällä 2006 ja sen tavoitteena on uusimpien simulointimenetelmien aiempaa laajempi hyödyntäminen suomalaisessa yhteiskunnassa suunnittelu- ja kehitystoiminnan tukena. Projekti on tämän työn kirjoittamisen hetkellä, huhtikuussa 2010, vielä käynnissä eikä sen loppuraporttia ole julkaistu (Tekes 2010). Projektin toteuttajia ovat VTT ja Metropolia Ammattikorkeakoulu sekä yli kymmenen teollisuusyritystä, joita ovat muun muassa Etteplan Oyj, Sweco Industry Oy, Pöyry Forest Industry Oy, Fortum Power and Heat Oy sekä Oy Metsä-Botnia Ab. SISU-projektissa on tutkittu simulointitoiminnan käytännön hyötyjä ja haasteita sekä pyritty kehittämään keinoja haasteiden selvittämiseksi. Projektissa tunnistettujen haasteiden selvittämiseen on kehitetty SISUQ8-simulointitoiminnan menetelmä. SISU-projektin painopiste on simulointipalveluja tuottavien yritysten ja asiakkaiden välisen yhteistyön tehostamisessa ja liiketoimintamallien kehittämisessä, joten sen tuloksia tulee tarkastella varauksella ja sovittaa pienjännitekojeiden tuotekehitykseen vain soveltuvin osin. (Leppävuori, Olin, Valli, Lahti, Hasari, Koistinen & Leppänen 2009.) Tämän takia tässä työssä on kehitetty oma simulointitoiminnan menetelmä, joka ottaa huomioon pienjännitekojeiden tuotekehityksen ominaispiirteet.

Luvussa 4.1 selvitetään SISUQ8-menetelmän kehittämiseen johtaneet simulointitoiminnan hyödyt ja haasteet lisättyä kirjoittajan omien kokemusten ja näkemysten mukaisilla pienjännitekojeiden tuotekehityksen kannalta olennaisilla hyödyillä ja haasteilla sekä haasteiden mahdollisilla ratkaisuilla. Luvussa 4.2 esitellään SISUQ8-menetelmä ja siitä tässä työssä kehitetty pienjännitekojeiden tuotekehitykseen soveltuva simulointitoiminnan menetelmä. Molemmat simulointitoiminnan menetelmät on tarpeen esitellä, jotta voidaan helposti palata takaisin menetelmän kehittämisessä, jos tässä työssä kehitetyssä menetelmässä havaitaan puutteita.

#### 4.1 Simulointitoiminnan hyödyt ja haasteet pienjännitekojeiden tuotekehityksessä

SISUQ8 -simulointitoiminnan menetelmä kehitettiin simulointitoiminnan hyötyjen maksimoimiseksi ja haasteiden ratkaisemiksi. Tässä luvussa esitellään SISU-projektissa tunnistetut simulointitoiminnan hyödyt ja haasteet lisättyä kirjoittajan omien kokemusten ja näkemysten mukaisilla pienjännitekojeiden tuotekehityksen kannalta olennaisilla hyödyillä ja haasteilla sekä näiden haasteiden mahdollisilla ratkaisuilla.

##### 4.1.1 Simulointitoiminnan hyötyjä

Simuloinnilla voidaan ennakoita ympäristö-, materiaali- tai osamuutosten vaikutuksia tuotteen toimintaan. Mallin eri parametreja voidaan muuttaa ja etsiä optimoitua ratkaisua eri toimintatilanteisiin. Simuloinnilla voidaan testata tuotetta, ennen kuin fyysistä prototyyppiä on edes olemassa. Prototyyppikierrosten vähentäminen nopeuttaa tuotekehitystä, kun ei tarvitse odottaa prototyyppien valmistumista ja toimitusta. Aikasäästöjä syntyy myös, kun voidaan simuloida laitteen osakokoonpanoja ilman, että koko laitetta on edes suunniteltu. Simuloinnilla säästetään kustannuksia, kunhan sitä käytetään soveltuvissa tapauksissa tarpeeksi usein ja tehokkaasti. Säästöjä syntyy etenkin prototyyppivalmistuksen ja laboratorion käytön vähenemisestä. (Leppävuori ym. 2009.)

Simuloinnilla voidaan tarkastella vaikeasti mitattavia ilmiöitä. Ilmiöiden visualisointi auttaa syy–seuraus-suhteiden selvittämistä ja ilmiöiden ymmärtämistä. Visualisoinnin kautta saatu uusi näkökulma ja vapaus muutella parametreja saattaa edistää uusien innovaatioiden keksimistä, sillä simulointi mahdollistaa erikoisetkin kokeilut, joita ei muuten tulisi tehtyä. Visualisoinnista saatuja kuvia ja animaatioita voidaan käyttää hyväksi myös tuotteiden markkinoinnissa ja tuotekoulutuksessa. (Leppävuori ym. 2009.) Lisäksi simuloinnin käyttö antaa yrityksen tuotekehityksestä nykyaikaisen ja innovatiivisen mielikuvan, joka saattaa houkutellessa uusia työntekijöitä sekä motivoida vanhoja.

#### 4.1.2 Simulointitoiminnan haasteita ja niiden ratkaisuja

SISU-projektissa havaittiin monia simulointitoimintaan liittyviä heikkouksia, uhkia ja karikoita. Useimmat haasteet liittyivät simuloinnin tuottajan ja tulosten hyödyntäjän tai simuloinnin tilaajan väliseen yhteistyöhön ja kommunikointiin. Simuloijan kannalta haasteet johtuvat usein siitä, että simuloijalla ei ole kaikkia tarvittavia tietoja simuloitavasta tuotteesta mallin toteuttamiseksi tai käsitystä tulosten käyttö-tarkoituksista. Tulosten hyödyntäjän ja simuloinnin tilaajan haasteita ovat kaiken oleellisen kertominen simulointitapausta määriteltäessä sekä simulointimallin ja -tulosten rajoitusten ymmärtäminen. Muita haasteita simulointitoiminnassa ovat muun muassa runsas erikoisosaamisen tarve, mallin tehokas hyödyntäminen ongelman ratkaisemiseen ja simulointitulosten oikeellisuuden varmistaminen. (Leppävuori ym. 2009.) SISU-projektissa löydettyjä simulointitoiminnan heikkouksia ja uhkia sekä prosessiin, malliin ja ihmisiin liittyviä karikoita on listattu taulukkoon 1.

**Taulukko 1.** Simulointitoiminnan heikkouksia ja uhkia sekä prosessiin, malliin ja ihmisiin liittyviä karikoita (Leppävuori ym. 2009: 17).

Heikkouksia ja uhkia	Prosessiin liittyviä karikoita
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mallien ja tulosten huono läpinäkyvyys</li> <li>• Ohjelmistojen kehittämisen, hankinnan ja ylläpidon kalleus sekä siitä seuraava lisenssimaksujen nopea nousu</li> <li>• Soveltajien ja hyödyntäjien kiinnostuksen katoaminen</li> <li>• Mallien piilevät virheet ja niiden poiston työläys</li> <li>• Mallinnuksen virheellisten tulosten seuraamusten laajuus</li> <li>• Resurssien hukkaaminen oman toiminnan kannalta epäolennaiseen</li> <li>• Rungas tarve erikoisosaamiseen</li> <li>• Usein raskas validointi</li> <li>• Vaikea tehdä hyvää ja yleispätevää samalla kertaa</li> <li>• Vaikeus valita monien mahdollisuuksien joukosta</li> <li>• Soveltamisen vaatiman parametriridatan vähäisyys</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epäselvät päämäärät</li> <li>• Asiakkaan informoinnin laiminlyöminen</li> <li>• Vertailuperustan puuttuminen</li> <li>• Epärealistiset odotukset</li> <li>• Lähtötietojen epävarmuus</li> <li>• Raportoinnin ja dokumentoinnin puutteet</li> <li>• Vähäinen vuorovaikutus asiakkaan kanssa</li> <li>• Projektin menestyksen puutteellinen myynti</li> <li>• Usein tapahtuvat muutokset rajauksissa (myös muut muutokset)</li> <li>• Liika luottamus simuloinnin tuloksiin</li> <li>• Projektin riittämätön arviointi sen ollessa käynnissä</li> <li>• Ajan kuluttaminen malliin eikä ongelmaan</li> <li>• Hankkeen jatkaminen liian pitkään</li> </ul>
Malliin liittyviä karikoita	Ihmisiin liittyviä karikoita
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mallin olettamuksien pätevyys</li> <li>• Aloitus liian monimutkaisella mallilla</li> <li>• Näkemys mallin toteutustavasta kadotetaan</li> <li>• Mallin niukka käyttö ongelman ratkaisuun</li> <li>• Ei ymmärretä mallin rajoja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiimityön puuttuminen</li> <li>• Avainpäättökentekijät eivät mukana projektissa</li> <li>• Asiakasta ei tunneta eikä kuunnella</li> <li>• Tarjotaan asiakkaalle vain muutamaa ratkaisuvaihtoehtoa</li> <li>• Pelätään puolustaa tarvittavia muutoksia</li> <li>• Ei tunneta yhteistä tavoitetta</li> </ul>

Monta taulukon 1 karikkoa vältetään, kun simulointitoiminta suoritetaan yrityksen omassa tuotekehityksessä, jossa simuloitava tuote ja siihen liittyvät ilmiöt tunnetaan hyvin. Lisäksi yhteistyö suunnittelijoiden ja simuloijien välillä on joustavaa, koska työskennellään samassa yksikössä, ja pyrkimyksenä onkin, että suunnittelija ja simuloija olisivat sama henkilö. Simulointeihin tarvittavan tiedon ja mittausdatan kerääminen on

helpompaa ja vaivattomampaa omassa tuotekehityksessä kuin ulkopuolisen simulointitoimiston suorittamana. Kun simuloinnit tehdään alusta alkaen omassa tuotekehityksessä, simuloija tietää, mistä simulointimalli koostuu, ja mallia tehdessä kehittyy tieto siitä, mitä ilmiöitä tulee ottaa huomioon. Myös riski liikesalaisuuksien paljastumisesta pienenee, kun simuloinnit suoritetaan omassa tuotekehityksessä. Lisäksi kaikki simulointitoiminnassa tuotettu data ja dokumentointi ovat automaattisesti oman tuotekehityksen hallinnassa. Toisaalta ulkopuolisella yrityksellä teetetyillä simuloinneilla on hyvätkin puolensa. Simulointiohjelmistojen käyttö on korkeammalla tasolla sekä tunnetaan ohjelmistojen rajat ja mahdollisuudet sekä mahdollisesti osataan tarvittaessa tehdä räätälöintejä simulointiohjelmistoon. Saman osaamisen hankkiminen omaan tuotekehitykseen onnistuu vain runsaalla koulutuksella tai onnistuneilla rekrytoinneilla.

Monta karikkoa ja haastetta jää vielä vaaraksi myös omassa tuotekehityksessä suoritettussa simulointitoiminnassa. Ensimmäinen haaste simulointitoiminnassa on kohteen valinta. Simuloinnin kohteeksi on hyödyllistä valita vain liiketoiminnallisesti kannattava kohde. Pitää olla visio siitä, miten ongelman ratkaisu auttaa liiketoiminnassa. Uhkana on simulointiresurssien hukkaaminen epäolennaiseen tai ongelmaan, joka olisi kannattavampi ratkaista muilla keinoilla. (Leppävuori ym. 2009.)

Suurin hyöty simulointitoiminnasta saadaan, kun sitä käytetään mahdollisimman aikaisin tuotekehitysprojektissa, koska aikaisessa vaiheessa tuotteisiin pystytään tekemään enemmän muutoksia ja edullisemmin kuin projektin edettyä pidemmälle. Simuloinnin käytön sisällyttäminen tuotekehitysprosessiin varmistaa simulointimahdollisuuksien pohtimisen projekteja suunniteltaessa. Projektien suunnittelijoiden tulee olla selvillä simuloinnin mahdollisuuksista, jotta simulointia voidaan hyödyntää tehokkaasti. (Leppävuori ym. 2009.)

Toisaalta on oltava selvillä myös simuloinnin rajoituksista. Simulointia rajoittavat ohjelmisto, käyttäjä, laitteisto ja määritetyt reunaehdot. Ohjelmistoilla on omat rajoituksensa, mitä niillä pystytään mallintamaan ja kuinka helposti. Monimutkaiset mallit vaativat edistyneempää ohjelmankäyttöä kuin yksinkertaiset mallit. Käyttäjää rajoittaa simulointiosaaminen, johon sisältyvät ohjelmiston käyttö ja tietämys

simuloitavasta ilmiöstä. Laitteisto antaa rajat mallin geometriselle ja fysikaaliselle monimutkaisuudelle sekä tarkkuudelle ja laskenta-ajoille. Mitä monimutkaisempi malli ja mitä tarkempia tuloksia halutaan, sitä tiheämmän verkotuksen malli vaatii. Mitä tiheämpi verkotus, sitä enemmän vaaditaan laitteistolta käyttömuistia. Laskenta-aikoja voidaan nopeuttaa parantamalla laitteiston suorituskykyä.

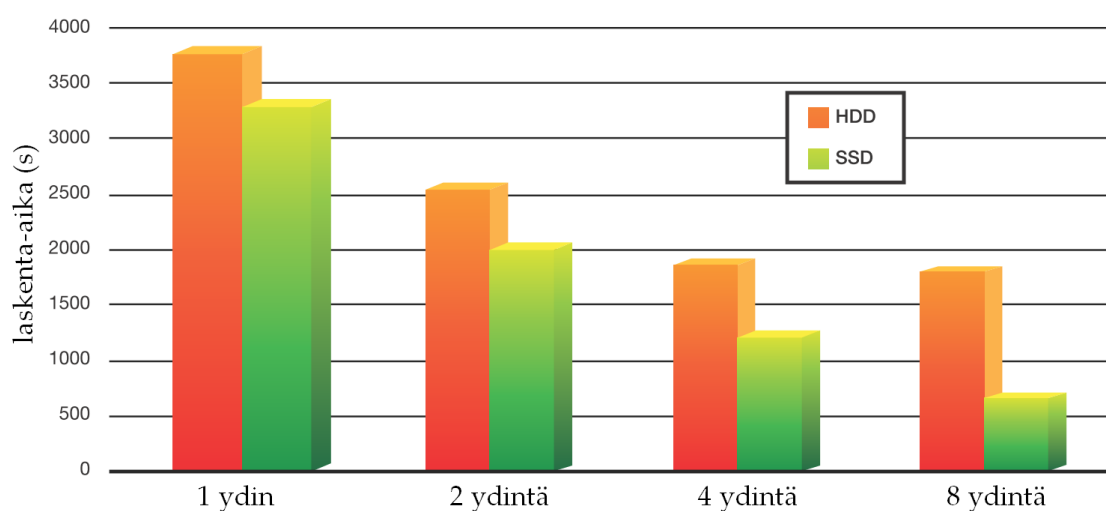
Pienet ja yksinkertaiset mallit ovat suurimmaksi osaksi riippuvaisia suorittimen suorituskyvystä, mutta suuremmilla malleilla käytössä oleva muistin määrä ja kovalevyn nopeus vaikuttavat enemmän. Suorituskyky on nopeaa, jos simulointimallista muodostettu matriisi mahtuu kokonaisuudessaan keskusmuistiin. 32-bittinen Windows<sup>®</sup>-käyttöjärjestelmä rajoittaa yhdelle ohjelmalle varatun muistimäärän 2 Gt:uun ja koko käytettävissä olevan muistimäärän 4 Gt:uun, joten suositeltavaa olisi käyttää 64-bittistä Windows-järjestelmää, jolla näitä rajoituksia ei ole. 32-bittisillä Linux<sup>®</sup>- ja Unix<sup>®</sup>-käyttöjärjestelmillä on mahdollista käyttää enemmän muistia kuin Windowsilla, mutta niilläkin suurten muistimäärien käyttö on tehokkaampaa 64-bittisillä järjestelmillä.

Jos matriisi ei mahdu kokonaisuudessaan keskusmuistiin, se tallennetaan ja ratkaistaan kiintolevyllä, joka on usein monta kertaluokkaa hitaampi kuin keskusmuisti. Kiintolevyn suorituskykyä voidaan parantaa käyttämällä nopeita kiintolevyjä kytkettynä RAID 0 -tilaan, jolloin levyjä käytetään rinnakkain hyödyntäen monen levyn luku- ja kirjoitusnopeutta samanaikaisesti. Kiintolevyn suorituskykyä voidaan huomattavasti parantaa myös käyttämällä perinteisten magneettiseen tallennukseen perustuvien levyjen sijaan flash-muistiin perustuvia SSD-kiintolevyjä. SSD-levyjen hakuajat voivat olla jopa sata kertaa pienempiä kuin perinteisten kiintolevyjen ja tiedonsiirtonopeudetkin voivat olla yli kolminkertaisia. Kytkemällä SSD-levyjä RAID 0 -tilaan saadaan vielä parempi suorituskyky kuin yhdellä levyllä on mahdollista.

Matriisin mahtuessa keskusmuistiin laskenta-aika riippuu suorittimen suorituskyvystä. Suorittimen nopeuden lisäksi simuloinneissa voidaan hyödyntää rinnakkaisia suorittimia tai suoritinryhmiä. Joillakin ohjelmilla rinnakkaisten ytimien hyödyntämiseen tarvitaan maksullisia lisälisenssejä sen mukaan, kuinka montaa ydintä halutaan käyttää. Ytimien määrän kaksinkertaistaminen ei kuitenkaan kaksinkertaista suorituskykyä, mutta

esimerkiksi Ansys Multiphysicsin ratkaisijoiden skaalautuvuus voi olla noin 80 % jopa sadoilla suoritusnopeuksilla.

Monilla ohjelmistoilla on mahdollisuus myös klusterikäyttöön, jolloin useaa verkkoon kytkettyä tietokonetta voidaan käyttää saman mallin ratkaisemiseen. Ratkaisusta ei automaattisesti tule nopeampaa käyttämällä useaa konetta, sillä useat ongelmat ovat vahvasti kytkettyjä ja tietokoneet joutuvat kommunikoimaan keskenään jatkuvasti, jolloin tietoliikenneyhteyden nopeus saattaa muuttua suorituskyvyn pullonkaulaksi. Useamman tietokoneen käyttö kuluttaa laskentaresursseja myös laskennan koordinoimiseen, eli siihen, että mitä tehtäviä eri tietokoneille annetaan ja miten tulokset kootaan. Kun suorituskykyä kasvatetaan ytimiä lisäämällä yhteen työasemaan, saattaa kiintolevyn nopeus muodostua pullonkaulaksi, jolloin tarvitaan edellä mainittuja kiintolevyn suorituskykyä parantavia toimenpiteitä. Kuvassa 13 verrataan erään simuloinnin laskenta-aikoja ratkaistaessa eri määrällä suoritusnopeuksia ja käyttämällä joko perinteistä HDD-kiintolevyä tai SSD-kiintolevyä. (Beisheim 2010; Heiskanen 2008: 29.)



**Kuva 13.** Erään simulointitapauksen laskenta-aikojen vertailu eri määrällä suoritusnopeuksia sekä perinteisellä HDD-levyllä että SSD-levyllä (Beisheim 2010).

Tarkkoja simulointeja varten tarvitaan tarkat reunaehdot, joita varten pitää ottaa huomioon mallin materiaalitiedot, kuormitukset ja ympäristön tekijät sekä mallin käyttäytyminen kappaleen rajapinnoilla. Useimmin simuloinnilla pyritään mallintamaan jotain ilmiötä mahdollisimman tarkasti ja saamaan simuloinneilla laboratoriomittauksia vastaavia tuloksia. Simulointitulosten täsmäämistä mittauksiin kutsutaan validoinniksi. Validoinnissa mallin reunaehdoja ja muita määrittäviä säädetään siten, että tulokset vastaavat mittauksia. Tähän tarvitaan kattavat mittaukset, joihin verrata simuloinnin tuloksia. Mittausten ja simulointien vertaaminen ei kuitenkaan ole ongelmattonta. Kun malli saadaan kerran vastaamaan mittauksia, mikään ei takaa, että lähtöarvoja muutettaessa malli olisi edelleen mittausten mukainen. Toinen ongelma on mittauksissa käytetyt mittalaitteet ja mittaolosuhteet. Mittauksissa kaikki mitattavaan arvoon vaikuttavat ilmiöt ilmenevät mittaustuloksista, mutta nuo kaikki ilmiöt eivät ole välttämättä tiedossa. Simuloitaessa taas tiedetään tarkalleen kaikki ilmiöt, jotka vaikuttavat tulokseen, mutta siinä ei koskaan ole aivan kaikkea. Täydellistä mallia on mahdoton rakentaa. (Cellier 1991.)

Absoluuttisen tarkkuuden tavoittelun sijaan kannattaa usein suorittaa vertailevia simulointeja. Tuloksen absoluuttisella tarkkuudella ei ole kovin suurta merkitystä vertailevissa simuloinneissa. Tärkeintä on, että vertailtavina olevissa malleissa ilmiöiden vuorovaikutusten suuruudet ovat samassa mittasuhteessa. Vertailevista simuloinneista saadaan selville osamuutoksen aiheuttama prosentuaalinen muutos simuloitavassa suureessa, esimerkiksi geometria- tai materiaalimuutoksen aiheuttama prosentuaalinen muutos osan kestävyyyteen tai lämpötilaan tietyllä kuormituksella. Kannattavaa olisi simuloida suunnitellun muutoksen vaikutuksia tuotteeseen ennen mahdollisen prototyypin valmistamista. Simulointi saattaa paljastaa suunnittelussa tapahtuneen virheen tai antaa jo ideoita jatkokehitystä varten. Vähintäänkin saadaan jo jonkinlainen arvio prototyypin toiminnasta ja osamuutosten vaikutuksista.

Simulointitulosten luotettavuutta voidaan parantaa simulointimallin verifiointilla, jolla varmistetaan mallin oikea toiminta. Verifiointin ensimmäinen askel on mallille olennaisten fysikaalisten ilmiöiden tunnistaminen ja niiden riittävän tarkka matemaattinen mallintaminen. Toisin sanoen tarkistetaan, ratkaiseeko ohjelmisto

tarkoituksenmukaiset asiaan liittyvät yhtälöt ja kuvaavatko nämä yhtälöt simuloitavia ilmiöitä riittävän tarkasti. Edellä mainitut ovat enimmäkseen simulointiohjelman kehittäjän vastuulla. Simulointimallin verifiointiin kuuluu myös herkkyysanalyysit mallin parametrien sekä verkon tiheyden suhteen. Herkkyysanalyysillä kokeillaan mallin stabiilisuutta, eli kuinka paljon parametrien pienet muutokset vaikuttavat koko mallin toimintaan. Verkotuksen verifiointi voidaan suorittaa esimerkiksi siten, että kokeillaan mallin ratkaisemista yhä tiheämmällä verkotuksella ja verrataan tuloksia toisiinsa. Kun verkon tiheys ei enää vaikuta simulointituloksiin, ei sen tiheämpää verkotusta tarvita. Verifioimattoman mallin käyttäminen saattaa johtaa epäluotettaviin ja epätarkkoihin simulointituloksiin. (Leppävuori ym. 2009.)

Kun luotettavat simulointitulokset on saatu laskettua, haasteeksi jäävät mallin hyödyntäminen sekä simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi uudelleenkäyttöä varten. Simulointitulosten hyödyntämisessä on monta valintaa tehtävänä: mitä suureita tarkastellaan, millaisia visualisointeja tarvitaan ja johdetaanko tuloksista muita suureita. Simulointiohjelmisto laskee ratkaisuksi useita suureita, joista tulisi tunnistaa ratkaistavan ongelman kannalta hyödyllisimmät. Suureita voidaan käyttää sellaisenaan tai osana muita laskutoimituksia. Esimerkiksi voidaan vertailla kahta eri lähtöarvoilla simuloitua tulosta tarkastelemalla niiden erotusta. Suureiden visualisoimiseksi on monia vaihtoehtoja, kuten kuvia, animaatioita, kuvaajia tai taulukoita. Haasteena on, miten hyödyntää simulointituloksia mahdollisimman tehokkaasti.

Simulointimallit ja -tulokset sekä koko simulointiprosessi tulee dokumentoida ja arkistoida mahdollista uudelleenkäyttöä varten. Täsmällinen ja kattava dokumentointi helpottaa simulointimallin sekä -tulosten uudelleenkäyttöä, kun tiedetään tarpeelliset asiat mallista, tuloksista ja niiden soveltamisesta. Dokumentoinnista tulee käydä ilmi, mihin tarkoitukseen malli on tehty, kuka mallin on tehnyt, milloin malli on tehty, mallin reunaehdot ja materiaalivalinnat sekä tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset. Dokumentoinnissa voi mainita myös mallintamisessa vastaan tulleita ongelmia ja mallin jatkokehitysehdotuksia.

Simulointitiedot malleineen ja dokumentteineen arkistoidaan siten, että ne ovat mahdollisimman helposti ja nopeasti uudelleenkäytettävissä. Monet PDM- eli tuote-

tiedonhallintaohjelmistot tarjoavat ominaisuuksia myös simulointitiedon hallintaan samalla tavoin kuin tuotteisiin liittyvien 3D-mallien ja osaluetteloidenkin hallintaan. Simulointitiedon tehokas uudelleenkäyttö nopeuttaa uusien mallien tekoa, kun voidaan käyttää vanhaa mallia ja sen dokumentointia lähtötietoina. Vanhojen mallien käytöllä saatetaan välttyä tekemästä samoja virheitä, joita on aiemmin tehty. Simulointitiedon kumuloituminen ja tehokas uudelleenkäyttö nopeuttaa simulointitoimintaa ja auttaa simulointiosaamisen omaksumisessa.

Liian laajat dokumentointi- ja arkistointivaatimukset saattavat hidastaa simulointitoimintaa ja nostaa simulointiprojektin aloittamisen kynnystä. Dokumentointivaatimukset tulee pitää keveinä, selkeinä ja yksiselitteisinä. Simulointitoiminnasta tulisi laatia yhtenäiset, selkeät ja yksiselitteiset ohjesäännöt, joista selviää simulointiprosessin kulku sekä dokumentointi- ja arkistointivaatimukset.

#### 4.1.3 Yhteenveto simulointitoiminnasta SWOT-analyysin avulla

SWOT-analyysissä, tarkastellaan simulointitoiminnan vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. Vahvuudet ja heikkoudet ovat toimijan omia ominaisuuksia, kun taas mahdollisuudet ja uhat liittyvät toimijan ympäristöön ja sidosryhmiin. (Olin ym. 2007: 10, 14–27; Leppävuori ym. 2009: 16–17.) Taulukkoon 2 on koottu pienjännitekojeiden tuotekehityksen simulointitoiminnan nelikenttäanalyysi. Tässä nelikenttäanalyysissä on sovellettu SISU-projektin tuloksia (Olin ym. 2007; Leppävuori ym. 2009.) sekä tämän työn lukuja 4.1.1 ja 4.1.2.

**Taulukko 2.** Nelikenttäanalyysi Pienjännitekojeiden simulointitoiminnasta.

<p><b>S – Vahvuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulointien toistettavuus ja uudelleenkäyttö</li> <li>• Voidaan saada tuloksia vaikeasti mitattavista ilmiöistä</li> <li>• Ilmiöiden visualisointi</li> <li>• Kustannussäästöt</li> <li>• Edistää kokeilunhalua</li> <li>• Motivoi työntekijöitä</li> </ul>	<p><b>W – Heikkoudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiaalidatan ja reunaehtojen hankkiminen</li> <li>• Raskas validointi ja verifiointi</li> <li>• Mallin mahdolliset piilevät virheet</li> <li>• Erikoisosaamisen tarve</li> <li>• Simulointilaitteiston hankinta, asennus, käyttö ja ylläpito</li> <li>• Simulointitoiminnan hinta (Laitteet, lisenssit, koulutus...)</li> </ul>
<p><b>O – Mahdollisuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uudet innovaatiot</li> <li>• Parantaa tuotteiden laatua</li> <li>• Nopeuttaa tuotekehitystä</li> <li>• Työasemien kehittyminen</li> <li>• Ohjelmistojen kehittyminen</li> <li>• Nostaa imagoa</li> </ul>	<p><b>T – Uhat</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lisenssimaksujen nousu</li> <li>• Väärä ohjelmistovalinta</li> <li>• Resurssien hukkaaminen epäolennaiseen</li> <li>• Virheellisten simulointitulosten vaikutukset</li> <li>• Vanhojen simulointimallien toiminta uusilla versioilla</li> <li>• Puutteellisen dokumentoinnin seuraukset</li> </ul>

#### 4.2 Simulointitoiminnan yhtenäistäminen

Tässä luvussa pohditaan, miten voidaan suorittaa simulointitoimintaa mahdollisimman tehokkaasti ongelman ratkaisun ja simulointitulosten hyödynnettävyyden kannalta. Aluksi kerrotaan SISU-projektissa kehitetystä SISUQ8-menetelmästä ja sen jälkeen esitellään tässä työssä kehitetty pienjännitekojeiden tuotekehitykseen soveltuva simulointitoiminnan menetelmä.

Yhtenäinen simulointitoiminnan menetelmä auttaa hahmottamaan simulointitoimintaa kokonaisuutena sekä yhdistämään eri toimijoita. Tähän tarpeeseen on kehitteillä SISU-tutkimusprojektissa SISUQ8-menetelmä. SISU-projektin painopiste on pienten ja keskisuurten yritysten simulointitoiminnassa sekä simulointipalveluja tarjoavissa yrityksissä, joten myös SISUQ8-menetelmä on niille suunnattu. (Leppävuori ym. 2009: 3.) Kuitenkin SISUQ8-menetelmä on hyvä lähtö-kohta kehitettäessä simulointitoiminnan menetelmää yrityksen sisäisen tuotekehityksen käyttöön, sillä siinä on otettu huomioon monia kaikenlaiseen simulointitoimintaan liittyviä asioita.

#### 4.2.1 Simulointitoiminnan menetelmä SISUQ8

SISUQ8-menetelmä on SISU-tutkimusprojektissa kehitetty yhtenäinen tapa suorittaa simulointitoimintaa. SISU-projektin tavoitteena on etenkin pk-yritysten simulointitoiminnan ja -menetelmien kehittäminen sekä uuden liiketoiminnan edellytysten luominen. Tämän työn kirjoittamisen aikana, huhtikuussa 2010, SISU-projekti on edelleen käynnissä ja SISUQ8-menetelmä vielä keskeneräinen (Tekes 2010), mutta hyviä tuloksia sen soveltamisesta on jo saatu. (Leppävuori ym. 2009.)

SISUQ8-menetelmän tarkoitus on auttaa simulointitoiminnan kokonaisuuden hahmottamisessa, uusien mahdollisuuksien näkemisessä ja pahimpien karikoiden välttämisessä. SISUQ8-menetelmä koostuu kahdeksasta simulointitoiminnan vaiheesta ja yhdestä perustavanlaatuisesta nollatason kysymyksestä. SISUQ8-menetelmän vaiheet on listattu taulukkoon 3. (Leppävuori ym. 2009.)

**Taulukko 3.** SISUQ8-menetelmän vaiheet (Leppävuori ym. 2009: 19).

	Vaiheet	Vaiheen lyhyt kuvaus
0	Vaikutus	Visio. Miten alla tarkemmin kuvatun ongelman ratkaisu auttaa liiketoiminnassa?
1	Ongelman määrittely	Strateginen tavoite. Ongelman määrittely.
2	Ratkaisu	Toiminnan tai ratkaisun suunnittelu, taktiikka. Projektisuunnitelma mallin laadintaan.
3	Konseptointi	Perusvalinnat valitulle taktiikalle. Laadittavan mallin sanallinen kuvaus.
4	Mallin tiedot	Tarvikkeet konseptin toteuttamiseksi. Mallin rajoitukset, tarvittava data, tulosteiden alustava suunnittelu jne.
5	Mallien rakentaminen	Konseptin mukaisen mallin käytännön laatiminen toimimaan kohdan 4 tarvikkeilla. Mallin rakentaminen, vertailut ja kelpoistus.
6	Mallien soveltaminen	Varsinainen toiminta ongelman ratkaisemiseksi kohdan 5 mallia soveltaen tai joissain tapauksessa palaaminen edellisiin kohtiin. Mallin soveltaminen kohdissa 1–3 kuvatun ongelman ratkaisemiseksi, simuloinnit.
7	Tulosten esittäminen	Tulosten esittäminen sidosryhmien ymmärtämässä muodossa. Ratkaisun (tulosten) dokumentointi ja esittäminen.
8	Elinkaari	Tarvitaanko mallia jatkossa? Mallin ylläpito ja kehittäminen jatkossa.

SISUQ8-menetelmän ensimmäiset kolme vaihetta (0–2) ja viimeiset kaksi vaihetta (7–8) voisivat soveltua minkä tahansa ratkaisumenetelmän, ei vain mallintamisen ja simuloinnin, vaiheiksi. Vaiheissa 3–6 määritellään ja toteutetaan itse mallintaminen ja simulointi. SISUQ8-menetelmän alku- ja loppuvaiheet ovat lähimpänä simulointitoiminnan asiakasta, toisin sanoen tulosten hyödyntäjää, kun taas menetelmän keskivaihe on lähempänä simuloinnin suorittajan aluetta. SISUQ8-menetelmän alku- ja loppuvaiheissa avoin ja sujuva kommunikointi tulosten hyödyntäjän ja simuloinnin suorittajan välillä on tärkeää oikeanlaisen mallin tekemiseksi ja haluttujen tulostietojen tuottamiseksi. (Leppävuori ym. 2009.)

SISUQ8-menetelmän alkuvaihe koostuu vaiheista 0–2, eli simulointitoiminnan vaikutuksesta, ongelman määrittelystä ja ratkaisun suunnittelusta. SISUQ8:n mukaan simulointitoiminnan perusajatuksena on nollatason kysymys: Miten simuloitavana olevan ongelman ratkaisu auttaa liiketoiminnassa? Tämän kysymyksen tarkoituksena on karsia kannattamattomat simuloinnit, jotka vain tuhlausivat resursseja. Simulointitoiminnan ensimmäinen varsinainen vaihe on ongelman määrittely, jossa kuvaillaan ratkaistavana oleva ongelma ja ratkaisulla saavutettava tavoite. Toisessa vaiheessa suunnitellaan ensimmäisessä vaiheessa määritetylle ongelmalle ratkaisua. Ratkaisu kuvaillaan yleisellä tasolla eikä oteta vielä kantaa siihen, millä ohjelmistoilla tai menetelmillä ratkaisu toteutetaan. (Leppävuori ym. 2009.)

Vaiheet 3–6 muodostavat SISUQ8-menetelmän keskivaiheet, jotka toteuttaa pääasiassa simuloinnin suorittaja. Kolmannessa vaiheessa suoritetaan simulointimallin konseptointi, eli tehdään perusvalinnat toisessa vaiheessa valitulle ongelmanratkaisulle sekä laaditaan mallin sanallinen kuvaus. Kolmannessa vaiheessa siis valitaan ratkaisumenetelmät ja käytettävät ohjelmistot. Neljännessä vaiheessa kootaan mallin tiedot, joita tarvitaan edellisessä vaiheessa kuvatun mallin ratkaisemiseksi sekä suunnitellaan, millaisia tulostietoja tarvitaan. Neljännessä vaiheessa määritetään myös mallin reunaehdot, jotka määräävät mallin sovellusalueen, ja kerätään mallissa tarvittavat materiaali- ja mittaustiedot. Viidennessä vaiheessa on vuorossa simulointimallin rakentaminen, jolloin simulointimalli mallinnetaan konseptointivaiheessa valitulla ohjelmistolla ja neljännen kohdan tietojen avulla. Neljännen vaiheen tiedot auttavat mallin rakentamisessa ja tarkkuuden kohdentamisessa kiinnostaviin kohtiin. Mallin rakentamiseen kuuluu myös mallin verifiointi ja validointi. Verifiointilla tarkoitetaan simulointimenetelmän tarkistamista, esimerkiksi mallin käyttäytymistä verkotuksen, materiaaliominaisuuksien tai muiden parametrien suhteen. Validoinnilla pyritään selvittämään, kuinka hyvin malli vastaa todellisuutta, esimerkiksi vertaamalla simuloinnin tuloksia mittaustuloksiin ja kokemuksiin mallia kuvaavista ilmiöistä. Kuudennessa kohdassa sovelletaan viidennessä kohdassa rakennettua mallia kohdissa 1–3 kuvatun ongelman ratkaisemiseen. Tässä vaiheessa tulkitaan lopullisia simulointituloksia ja tehdään niiden perusteella muutoksia tuotteeseen. Tarvittaessa voidaan suorittaa lisää simulointeja. (Leppävuori ym. 2009.)

SISUQ8-menetelmän loppuvaiheet, eli vaiheet seitsemän ja kahdeksan, muodostuvat tulosten esittämisestä ja dokumentoinnista sekä simulointitiedon arkistoinnista. Seitsemäs vaihe on tulosten esittäminen ja ratkaisun dokumentointi. Tulokset tulee esittää sidosryhmien ymmärtämässä muodossa. Tarvittavien simulointitulosten laatimisessa auttaa, jos simulointien suorittaja tietää, mihin tarkoitukseen tuloksia käytetään. Dokumentoinnin tulee sisältää koko simulointiprosessi ja kaikki SISUQ8-menetelmän vaiheet. Viimeisessä vaiheessa, kun simuloinnit on suoritettu sekä simuloinnin valmistelut ja tulokset dokumentoitu, pohditaan tarvetta mallin kehittämiseksi, arkistoinnille, ja uudelleenkäytölle. (Leppävuori ym. 2009.)

Lisäksi jokaisessa menetelmän vaiheessa pohditaan neljäntyyppistä kyseistä vaihetta koskevaa kysymystä. Kysymykset koskevat vaiheen määrittelyä, toteutustapaa, edistymistä ja toimivuutta. Taulukossa 4 on esitetty jokaisen vaiheen kohdalla pohdittavat kysymykset. (Leppävuori ym. 2009.)

**Taulukko 4.** SISUQ8-menetelmän jokaisessa vaiheessa pohdittavat kysymykset  
(Leppävuori ym. 2009: 20).

Miksi? Mitä? Milloin?	Miten?	Missä mennään?	Kuinka toimii?
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mitä oikeastaan ollaan tekemässä? Miksi juuri sitä?</li> <li>Mikä on kyseisen vaiheen tarkoitus tai tekemisen syy juuri tässä mallinuksessa?</li> <li>Vaiheessa tehtävän työn sisältö ja aikataulu?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Miten aiotaan toimia?</li> <li>Miten vaiheen sisältö toteutetaan konkreettisesti?</li> <li>Millainen rakenne tai toiminta vaaditaan vaiheen toteuttamiseksi?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikä on toiminnan vaihe verrattuna suunnitelmiin ja/tai muuhun aikatauluun?</li> <li>Kuinka valmis tai keskeneräinen vaihe on asetettujen vaatimusten suhteen?</li> <li>Mikä on vaiheen tila: alussa/ kesken/ valmis / jotain muuta?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kuinka vaihe toimii verrattuna tavoitteisiin?</li> <li>Mikä on vaiheen vaikutus hankkeen lopputulokseen saavuttamisen?</li> <li>Mikä on vaiheen toimivuus? Auttaako se saamaan aikaan halutun vaikutuksen?</li> <li>Toimivatko ehdotetut rakenteet ja toiminta toivotulla tavalla?</li> </ul>

SISUQ8-menetelmä kaikkine vaiheineen ja jokaisessa kohdassa pohdittavine kysymyksineen vaikuttaa järjestelmälliseltä ja kaiken kattavalta simulointitoiminnan menetelmältä. Eri vaiheiden väliset rajat eivät kuitenkaan vaikuta yksiselitteisiltä, mikä käy ilmi Leppävuoren ym. (2009: 25–60) raporttiin kootuista esimerkkitapauksista, joista monissa samoja tietoja toistetaan SISUQ8-menetelmän eri vaiheissa. Saman tiedon toistaminen hidastaa raportin kirjoittamista ja lukemista.

SISUQ8-menetelmän painopiste erillisen simulointitoimiston menetelmänä ja eri toimijoiden yhteistyön vahvistajana tulee vahvasti esille. Simulointitoiminnan yksi yleisimmistä haasteista on mallintajan ja asiakkaan välinen kommunikointi. (Leppävuori ym. 2009.) Tähän haasteeseen SISUQ8 vastaa tehokkaasti, mutta yrityksen sisäisen tuotekehityksen simulointitoiminnan menetelmäksi voisi riittää kevyempikin menetelmä. Yrityksen omassa tuotekehityksessä itse mallintajalla on jo runsaasti tietoa mallinnettavasta tuotteesta ja osaamista ottaa huomioon tuotteen simuloinnissa ja suunnittelussa tarvittavat tekijät. Lisäksi yhteistyö ja kommunikointi mallintajan ja muiden tuotekehitystiimin henkilöiden välillä on helpompaa ja luonnollisempaa kuin simulointitoimiston ja asiakkaan välillä saattaisi olla.

Seuraavassa luvussa on laadittu SISUQ8-menetelmän pohjalta uusi simulointitoiminnan menetelmä, jonka on tarkoitus soveltua paremmin yrityksen sisäisen tuotekehityksen simulointitoiminnan menetelmäksi kuin simulointipalveluja tarjoavien yritysten tarpeisiin kehitetty SISUQ8.

#### 4.2.2 Simulointitoiminnan menetelmä pienjännitekojeiden tuotekehitykseen

SISUQ8-menetelmä etenee pienin askelin kohti tuloksia. Menetelmän edetessä siirrytään yleisestä käsittelystä kohti teknisempää ja tarkempaa määrittelyä. SISUQ8-menetelmän moniportainen lähestymistapa saattaa toimia hyvin, kun kyseessä on ulkopuolisen simulointitoimiston tekemät simuloinnit jollekin toiselle. Kun simulointeja tehdään yrityksen omassa tuotekehityksessä, jossa tuote tunnetaan ja voidaan olettaa, että kaikilla on myös jonkin tasoinen tietämys simulointitoiminnasta, voidaan hiukan suoraviivaisemmalla toiminnalla päästä nopeammin tuloksiin. Lisäksi SISUQ8-menetelmän eri vaiheet vaikuttavat olevan osittain päällekkäisiä eikä ole täysin selvää,

mitkä asiat kuuluvat mihinkin vaiheeseen. Leppävuoren ym. (2009: 25–60) raportissa olevien esimerkkitapausten perusteella samat tiedot toistuvat SISUQ8-menetelmän eri kohdissa. Saman tiedon toistaminen hukkaa aikaa dokumentointia tehdessä ja luettaessa eikä anna mitään hyödyllistä lisäinformaatiota.

Seuraavaksi esitellään SISUQ8-menetelmästä yrityksen sisäisen tuotekehityksen simulointitoimintaan sovellettu menetelmä. Tässä uudessa menetelmässä vaiheiden määrää on vähennetty ja pyritty välttämään vaiheiden päällekkäisyyksiä. Uudessa menetelmässä on viisi vaihetta: Ongelman määrittely, ratkaisun suunnittelu, mallintaminen ja simulointi, tulosten laatiminen ja tulkinta sekä simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi. Menetelmän vaiheet on esitetty taulukossa 5, ja taulukon jälkeen esitellään tarkemmin jokaisen viiden vaiheen sisältö.

**Taulukko 5.** Pienjännitekojeiden tuotekehityksen simulointitoimintaan sovelletun menetelmän vaiheet.

	Vaiheet	Vaiheen lyhyt kuvaus
1	Ongelman määrittely	Ongelman määrittely. Ratkaisun vaikutukset. Ei oteta kantaa tekniseen toteutukseen.
2	Ratkaisun suunnittelu	Vanhan mallin hyväksikäyttö. Ratkaisumenetelmän valinta. Lähtödatan kerääminen. Tulosten suunnittelu.
3	Mallintaminen ja simulointi	Simulointi. Verifiointi ja validointi. Tulosdatan tuottaminen.
4	Tulosten laatiminen ja tulkinta	Tulosten laatiminen, analysointi ja soveltaminen.
5	Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi	Mallien, tulosten ja dokumentoinnin tallennus uudelleenkäyttöä varten.

*Vaihe 1: ongelman määrittely*

Ensimmäisessä vaiheessa määritetään ratkaistava ongelma ja ratkaisusta saatavat hyödyt. Lisäksi pohditaan, kannattaako juuri tätä simulointia toteuttaa vai voiko ongelman ratkaista tehokkaammin jollain muulla menetelmällä, ettei tuhjata simulointiresursseja epäolennaiseen. Ongelman määrittelyssä ei vielä oteta kantaa simuloinnin tekniseen toteutukseen vaan keskitytään määrittelemään ratkaistava ongelma selkeästi ja yksiselitteisesti. Ongelman määrittelyssä oleellista on, että sen pystyy tekemään tietämättä mitään ongelmaan käytettävästä ratkaisumenetelmästä. Tarkoituksena on, että samaa ongelman määrittelyä voidaan käyttää yhtä hyvin minkä tahansa ratkaisumenetelmän lähtökohtana. Jos jollain menetelmällä ei saada ratkaisua aikaiseksi, voidaan saada ongelman määrittelyä käyttäen toisen ratkaisumenetelmän lähtökohtana.

*Vaihe 2: ratkaisun suunnittelu*

Toinen vaihe simulointitoiminnan menetelmässä on ratkaisun suunnittelu, jossa pohditaan ensimmäisessä vaiheessa määritettyyn ongelmaan ratkaisua ja keinoja ratkaisun toimivuuden toteamiseksi. Tässä vaiheessa tämä menetelmä suuntautuu nimenomaan simulointitoiminnan menetelmäksi, jos simulointia päätetään käyttää ratkaisun toimivuuden toteamiseen tai jopa toimivan ratkaisun kehittämiseen. Ennen uuden simulointimallin tekemistä on hyvä selvittää, onko samaa tai samoja elementtejä sisältävää ongelmaa simuloitu aiemmin. Vanhoista simuloinneista voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi mallin geometriaa, verkotusta, reunaehtoja, materiaalmääriytyksiä, tulosten käsittelyä tai vaikka mallintamiseen käytettyjä periaatteita esimerkiksi tarvittavan tarkkuuden suhteen.

Jotta ratkaisun toimivuus voidaan todeta simuloinnilla, tarvitaan mallin rakentamiseksi monia taustatietoja. Ensimmäinen vaihe mallin suunnittelussa on mallinnettavien fyysikaalisten ilmiöiden valitseminen. Ilmiöiden valinta riippuu mallinnettavana olevasta ongelmasta sekä simuloinnilta vaadittavasta tarkkuudesta. Joitain fysiikan ilmiöitä voidaan jättää mallissa huomioimatta, jos niillä ei ole suurta vaikutusta ongelman ratkaisun kannalta. Mallinnettavista ilmiöistä riippuu, millaisia materiaalmääriytyksiä ja geometriaa mallissa tarvitaan. Esimerkiksi magneettikenttien ja ilmavirtausten

simuloinnissa tarvitaan myös ilmatilan geometria, ja mekaanisia rasituksia simuloitaessa ei välttämättä tarvita materiaalien sähköisiä tai termisiä ominaisuuksia. Mallinnettavien ilmiöiden valinta vaikuttaa myös käytettävän simulointiohjelman valintaan, esimerkiksi käytetäänkö elektroniikan jäähdytyksen simulointiin jotain yleiskäyttöistä virtaus-simulointiohjelmistoa kuten Ansys CFX tai Ansys Fluent vai Ansys Icepak -ohjelmaa, joka tarjoaa joitain helpottavia ominaisuuksia juuri elektroniikan jäähdytyksen simulointiin.

Kun mallissa vallitsevat fysiikan osa-alueet on valittu, määritellään kuinka suuri osa ongelmaan liittyvästä laitteesta mallinnetaan. Lujuussimuloinneissa voi riittää, että simuloidaan pelkästään yhteen osaan kohdistuvat rasitukset, kun taas toisissa malleissa voi olla tarpeellista mallintaa laitteen lisäksi myös laitteen ympäristöä.

Lisäksi vielä suunnitellaan mallissa käytettävät reunaehdot sekä listataan mallissa käytetyt materiaalit ja viitataan, mistä löytyy tarkat materiaalmääritykset. Simulointimallin reunaehdot ovat esimerkiksi lämpötilat, jännitteet tai mekaaniset kuormitukset. Reunaehdot suunniteltaessa pitää määritellä, miten kappaleiden väliset rajapinnat tulisi mallintaa esimerkiksi kiinni olevien koskettimien tapauksessa tai kappaleen ja ilman rajapinnassa. Rajapinnoissa kasvavat usein esimerkiksi sähköiset ja termiset vastukset, jotka usein mallinnetaan teoriaan, mittauksiin, kokemuksiin tai arvauksiin perustuvilla arvoilla.

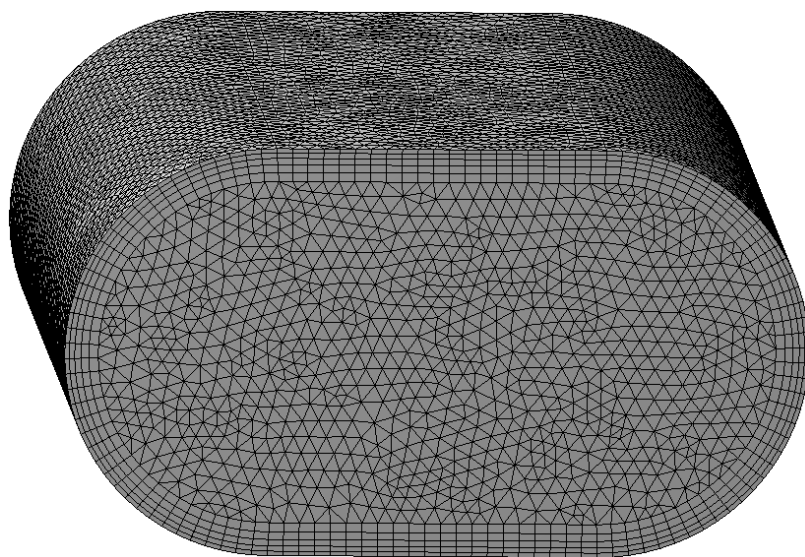
Simulointimallin kannalta on tärkeä tietää etukäteen, millaisia tuloksia simuloinnista halutaan. Kun tiedetään, mitkä suureet ja mikä geometrian kohta kiinnostaa, voidaan mallin tarkkuutta optimoida juuri mielenkiinnon kohteisiin. Mallia voidaan optimoida esimerkiksi tihentämällä verkotusta mielenkiinnon kohteissa ja keskittymällä vain oleellisten materiaaliparametrien ja reunaehtojen määrittämiseen. Keskittymällä mielenkiinnon kohteisiin ei tuhlaata aikaa mallintaessa ja simuloidessa turhia osia mallista.

### *Vaihe 3: mallintaminen ja simulointi*

Kolmannessa vaiheessa rakennetaan simulointimalli edellisen vaiheen tietojen perusteella ja ratkaistaan malli. Simulointimallin rakentaminen aloitetaan geometriasta.

Simulointimallissa voidaan käyttää PDM-järjestelmästä löytyviä osien tai kokoonpanojen geometriamalleja. Jos simulointiin soveltuvaa mallia ei löydy, luodaan täysin uusi geometria. PDM-järjestelmästä löytyviä geometriamalleja on joskus tarpeellista yksinkertaistaa tai korjata vastaamaan simuloinnissa tarvittavaa geometriaa. Esimerkiksi kotelossa olevat kohokuviot kannattaa usein jättää huomiotta, sillä ne vain lisäävät malliin tarvittavien elementtien määrää kuitenkin tarkentamatta simuloinnin tulosta. Geometriamalleja tai kokoonpanoja on joskus tarpeellista korjata esimerkiksi siten, että kontaktissa olevat osat todella koskettavat toisiaan eikä niiden välissä ole mikrometrinkään rakoa. Geometriaa valittaessa ja muokatessa täytyy pitää mielessä simuloitavat fysikaaliset ilmiöt, jotta ilmiölle olennaisia piirteitä ei poisteta mallista.

Seuraava askel mallin rakentamisessa on geometrian jakaminen diskreetteihin laskentayksiköihin eli mallin verkottaminen. Verkotuksen tiheys on kompromissi simuloinnin tarkkuuden ja laskenta-ajan sekä muistinkulutuksen välillä. Tiheämpi verkotus antaa tarkemmat simulointitulokset, mutta kasvattaa laskenta-aikaa ja muistinkäyttöä. Tiheä verkotus myös mallintaa geometrian tarkemmin kuin harvempi verkotus. Myös verkottamisessa pitää ottaa huomioon simuloitavat fysikaaliset ilmiöt. Varsinkin niiden ilmiöiden tapauksissa, joissa lähellä pintoja tapahtuvat asiat ovat tärkeitä, kuten virtaus-simuloinneissa, kannattaa käyttää verkotuksen rajakerroksia kuten kuvassa 14.



**Kuva 14.** Rajakerrokset verkotuksessa.

Verkotuksessa kannattaa huomioon simuloinnilla vaaditut tulokset. Tuloksien perusteella voidaan tihentää verkotusta tulosten kannalta kiinnostavimmasta paikasta.

Seuraavaksi tarvitaan kappaleiden materiaalmääritykset. Simulointiohjelmiin yleensä kuuluu materiaalikirjasto, jonne voi tallentaa materiaalmäärityksiä myöhempää käyttöä varten. Materiaalille määritetyt ominaisuudet kannattaa tarkistaa ennen kuin niitä käyttää mallissa, sillä aina ei kaikkia ominaisuuksia ole kunnolla määritetty, kuten esimerkiksi materiaalin ominaisuutta lämpötilan funktiona koko mallin lämpötilaskaalan osalta.

Reunaehdoilla määritetään mallin ympäristö, kuormitukset ja kappaleiden väliset vuorovaikutukset. Määritettävät reunaehdot riippuvat simuloitavista ilmiöistä. Lämpösimuloinneissa määritetään lämpötiloja, lämmönsiirtokertoimia ja lämmönlähteitä, kun taas mekaanisissa simuloinneissa määritetään tukipisteitä ja kuormituksia. Kappaleiden välille määritetään kontaktipintojen välisiä ominaisuuksia, kuten kitkakertoimia ja kosketusvastuksia. Reunaehdot voidaan määrittellä myös ajasta riippuviksi, kun halutaan mallintaa ajan mukaan muuttuvia tapauksia, esimerkiksi lämmönlähteen tehon muuttuessa elektroniikkakomponentin aktiivisuuden mukaan.

Kun mallin geometria, verkotus, materiaalit ja reunaehdot on määritetty, on simulointimalli valmis ratkaistavaksi. Ennen ratkaisun aloittamista tarvitaan vielä muutamia määrittämiä. Ratkaisijalle pitää määrittää simuloitako jatkuvan ajan tilannetta vai muuttuva-aikaista tilannetta. Jatkuvan ajan simulointi antaa tulokseksi ratkaistavien suureiden arvot, kun riittävän pitkä aika on kulunut arvojen tasaantumiseksi. Muuttuva-aikaisessa simuloinnissa ratkaistaan suuret jokaisessa simulointiajan sisältämässä aika-askeleessa, jotka käyttäjä on määritellyt. Muuttuva-aikaisessa simuloinnissa tarvitaan siis vielä simulointiajan ja aika-askeleiden määritykset. Aika-askeleiden ei tarvitse olla tasavälein, vaan esimerkiksi tilanteessa, jossa simulointiajan alussa tapahtuu suuria muutoksia lyhyessä ajassa, voidaan käyttää lyhyempää aika-askelta ja harventaa sitä simulointiajan loppuosassa. Mitä useampia aika-askeleita käytetään sitä kauemmin simulointi kestää. Lisäksi ratkaisijalle pitää määrittellä konvergoitiehdot, eli ehdot simuloinnin lopettamiseksi. Yksi konvergoitiehdoista on sallittu virhetermin suuruus, eli laskenta lopetetaan, kun virhetermi on tarpeeksi pieni. Toinen konvergoitiehto on

iterointien määrä, jolle määritetään pienin ja suurin arvo. Eli laskentaa ei lopeteta ennen kuin iterointien pienin sallittu määrä on ylitetty ja lopetetaan, kun suurin sallittu määrä on saavutettu. Iterointien rajoittamisella estetään loputtomien simulointien tapahtumista, jos virhetermi ei saavutakaan tarpeeksi pientä arvoa. Ratkaisijalle voidaan vielä määrittää laskentaan käytettävien prosessoriytimien määrä tai käytetäänkö laskentaan muita verkkoon liitettyjä työasemia. Tapauksesta riippuen simulointi useammalla rinnakkaisella prosessoriytimellä nopeuttaa laskentaa. Myös simuloinnin jakaminen useammalle työasemalla nopeuttaa laskentaa, kunhan asemien välillä on tarpeeksi nopeat tietoliikenneyhteydet. Simuloinnin jakaminen useammalle työasemalle kannattaa vain suurissa simuloinneissa, sillä muuten ohjelma käyttää liikaa aikaa simulointien jakamiseen ja työasemien hallinnointiin suhteessa simulointiaikaan.

Luotettavien simulointitulosten tuottamiseksi on hyvä verifioida tulokset tekemällä herkkyysanalyysseja esimerkiksi verkotuksen ja aika-askeleen suhteen. Verkotuksen herkkyysanalyysi tehdään ratkaisemalla simulointi eri tiheyksisillä verkotuksilla ja tarkastelemalla verkotuksen vaikutusta tulosten suuruuteen. Jos tiheyden muutoksella ei ole vaikutusta tuloksiin, on simulointimallissa riittävän tiheä verkotus ja ainakin tältä osin tulokset ovat luotettavia. Herkkyysanalyysi aika-askeleen suhteen tapahtuu samalla periaatteella kuin verkotuksenkin suhteen. Ratkaistaan malli eri aika-askeleen arvoilla ja verrataan simulointituloksia. Jos aika-askeleen muutoksella ei ole vaikutusta tuloksiin, voidaan tuloksia pitää aika-askeleen suhteen luotettavina. Suurta absoluuttista tarkkuutta vaativat simuloinnit pitää validoida vertaamalla simuloinnin tuloksia mittaus-tuloksiin ja kokemuksiin simuloitavasta ilmiöstä. Jos tehdään vertailevia simulointeja, voidaan validointi jättää vähemmälle, sillä vertailevissa simuloinneissa tärkeää on vain vertailtavina olevien suureiden suhde toisiinsa eikä mittaustuloksiin.

Simulointimalli kannattaa rakentaa vaiheittain tarkemmaksi. Ensin tuodaan simulointi-ohjelmaan mallin geometria ja tarkistetaan tuonnin onnistuminen ja geometrian verkotus. Sen jälkeen lisätään joitain yksinkertaisia reunaehtoja ja katsotaan toimiiko malli edes näillä ehdoilla. Seuraavaksi voidaan tarkentaa mallia asettamalla tarkemmat reunaehdot ja tarvittaessa yhdistää eri fysiikkamalleja. Kun malli on saatu toimimaan kokonaisuutena, voidaan suorittaa optimointiajoja, joissa eri parametreja muuttamalla

haetaan mallille parasta mahdollista ratkaisua. Simulointimallin vaiheittainen rakentaminen auttaa huomaamaan mallissa esiintyvät virheet mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Reunaehtojen ja verkotuksen vaiheittainen tarkentaminen auttaa myös selvittämään työaseman kapasiteetin riittävyyttä mallin ratkaisemiseksi.

#### *Vaihe 4: tulosten laatiminen ja tulkinta*

Neljännessä vaiheessa tuotetaan simulointituloksia edellisessä vaiheessa lasketuista ratkaisuista sekä analysoidaan, tulkitaan ja sovelletaan niitä ensimmäisessä vaiheessa määritellyn ongelman ratkaisemiseksi. Simulointituloksia tuotetaan simulointiohjelman jälkikäsittelijässä, jossa on mahdollista tuottaa simuloinnin ratkaisusta kuvia, kuvaajia, taulukoita ja animaatioita. Simuloinnin ratkaisija laskee mallista tietyt suureet, mutta jälkikäsittelijässä voi niiden avulla laskea omia tuloksia, jos esimerkiksi haluaa verrata suureita toisiinsa laskemalla niiden erotuksen tai osamäärän. Tarjolla on myös monimutkaisempia laskutoimituksia, kuten integrointeja ja derivointeja sekä vektori-suureiden risti- ja pistetuloja.

Merkittävimmät simulointitulokset tallennetaan raporttiin varustettuna riittävällä määrällä tunnistetietoja. Lisäksi laaditaan sanallinen selitys tuloksista ja niiden vaikutuksesta ongelman ratkaisuun. Raportissa kommentoidaan tulosten luotettavuutta sekä kerrotaan mahdollisia parannuskeinoja luotettavuuden parantamiseksi.

#### *Vaihe 5: simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi*

Lopuksi simulointimallit ja -tulokset sekä simulointitoiminnan ohessa tuotetut tiedot ja dokumentit tallennetaan tietokantaan siten, että ne ovat helposti löydettävissä, käytettävissä ja päivitettävissä. Dokumentoinnista tulee selvittää koko simulointiprosessin kulku jokaisessa viidessä vaiheessa. Lisäksi tulee käydä ilmi, kuka mallin on tehnyt ja milloin se on tehty. Simulointidokumentit ja -mallit arkistoidaan PDM-järjestelmään siten, että ne ovat helposti löydettävissä, kun haetaan esimerkiksi tiettyyn tuotteeseen tai fysikaaliseen ilmiöön liittyviä simuloiteja. Simulointitietojen järjestelmällinen dokumentointi ja arkistointi helpottavat vanhojen mallien hyödyntämistä uusilla malleilla tehtäessä.

Ansystillä laaditut simuloinnit tallennetaan kaikkine tietoineen arkistoksi *Ansys archive* -muotoon ja tallennetaan PDM-järjestelmään. Simuloinnit arkistoidaan PDM-järjestelmässä omaan *simulations*-hakemistonsa, jotta ne olisi helppo ja nopea hakea varsinkin alkuvaiheessa, kun simuloiteja on vielä vähän. Hakemiston käytöllä estetään myös simulointien sekoittumista muun tuotetiedon sekaan. Tietokannassa simuloinnin yksilöivänä tunnisteena käytetään juoksevaa numerointia. Simuloinnin nimi, joka on sama kuin *Ansys archive* -tiedoston nimi, koostuu kolmesta osasta, jotka erotellaan alaviivalla: vakioteksti *SIM*, simuloitava ilmiö ja simuloitavan tuotteen lajimerkki. Simuloitava ilmiö ilmaistaan jollain seuraavista: mekaniikka *mech*, lämpö *therm*, sähkömagneetiikka *em*, virtaus *flow* tai monifysiikka *multi*. Lisäksi simulointien kuvailuun ja hakua helpottamaan käytetään *description*-kenttää, jossa annetaan lyhyt kuvaus simuloinnista, simulointiin käytettyjen osien lajimerkit ja käytetyn simulointiohjelman nimi ja versio. Päivämäärä ja tekijän nimi tallentuvat tietokantaan automaattisesti. Simuloiteja voidaan hakea silmäilemällä *simulations*-hakemistosta tai haku-toiminnon avulla, jolloin haku kohdistetaan *description*- tai nimikenttiin.

Yllä olevia vaiheita ei ole tarkoitus suorittaa yksi toisensa perään, vaan niissä voidaan edetä myös rinnakkain. Esimerkiksi simulointimallin rakentamista voidaan jo aloittaa, vaikkei kaikkia reunaehtoja tai materiaalimääryksiä olisikaan vielä tiedossa. Mallintaminen on usein iteroituva prosessi, jossa ensin karkealla mallilla arvioidaan simuloinnin toimintaa ja myöhemmin tarkennetaan mallia tarpeen mukaan. Myös dokumentointia voidaan aloittaa, vaikkeivät kaikki simuloinnit olisikaan vielä valmiita.

Tässä luvussa kuvatun simulointitoiminnan menetelmän tarkoitus on olla joustava ja tehokas menetelmä sekä yhtenäistää ja suoraviivaistaa tuotekehityksen simulointitoimintaa. Yhtenäinen toimintatapa ja dokumentointi nopeuttavat koko simulointitoimintaa sekä dokumenttien tulkitsemista ja hyödyntämistä. Taulukkoon 6 on koottu yhteenveto pienjännitekojeiden simulointitoiminnan menetelmän eri vaiheista ja vaiheissa suoritettavista toimista.

**Taulukko 6.** Yhteenveto pienjännitekojeiden simulointitoiminnan menetelmästä.

<b>1. Ongelman määrittely</b>	<b>2. Ratkaisun suunnittelu</b>	<b>3. Mallintaminen ja simulointi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ongelman määrittely selkeästi ja yksiselitteisesti</li> <li>• Ratkaisusta saatavien hyötyjen tunnistaminen</li> <li>• Kannattaako ratkaista simuloimalla vai jotenkin muuten?</li> <li>• Ei oteta kantaa ratkaisun tekniseen toteutukseen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Miten ratkaistaan?</li> <li>• Miten testataan ratkaisun toimivuus?</li> <li>• Voidaanko vanhaa ratkaisua hyödyntää?</li> <li>• Mallinnettavat ilmiöt</li> <li>• Mallin geometria</li> <li>• Mallin rajat, materiaalit ja reunaehdot</li> <li>• Tulosten suunnittelu</li> <li>• Simulointiohjelman valinta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometrian tuonti, luonti tai muokkaus</li> <li>• Geometrian verkottaminen</li> <li>• Materiaalimäärytykset</li> <li>• Reunaehtojen määrytykset</li> <li>• Ratkaisijan määrytykset</li> <li>• Mallin verifiointi</li> <li>• Mallin validointi</li> </ul>
<b>4. Tulosten laatiminen ja tulkinta</b>		<b>5. Dokumentointi ja arkistointi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tulosten jälkikäsitteily ja analysointi</li> <li>• Tulosten luotettavuuden arviointi</li> <li>• Ehdotuksia mallin kehittämiseksi</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulointiraportin luominen</li> <li>• Simulointitiedostojen ja -raporttien arkistointi tietokantaan</li> </ul>

## 5 ESIMERKKEJÄ PIENJÄNNITEKOJEIDEN SIMULOINNEISTA

Edellisessä luvussa kehitetyn simulointitoiminnan menetelmän toimivuutta ja työssä käytettyjen simulointiohjelmien soveltuvuutta pienjännitekojeiden simulointiin testataan kolmella simulointiesimerkillä. Ensimmäisessä esimerkissä mallinnetaan kuormankytkimen vääntömekanismin toimintaa ja tarkastellaan mekanismin erääseen osaan kohdistuvia rasituksia ja pyritään vahvistamaan sen rakennetta. Toisena selvitetään sähkövirran aiheuttamaa veitsikoskettimen kosketinrautoihin kohdistuvaa sähkömagneettista voimaa erilaisilla kosketinraudoilla. Viimeiseksi simuloidaan sulakevahdin jäähtymistä eri asennusasunnoissa. Esimerkkisimulointien kuvaukset koostuvat lyhyestä johdannosta sekä luvussa 4.2.2 kuvatun simulointitoiminnan menetelmän vaiheista.

### 5.1 Kuusinapaisen kuormankytkimen vääntömekanismin simulointi

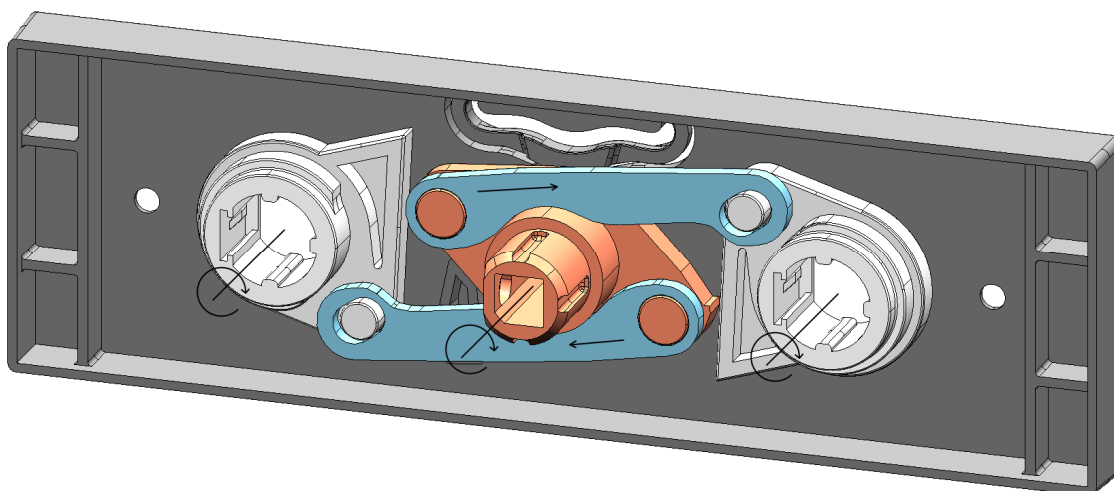
Kahdesta kolminapaisesta kuormankytkimestä saadaan yksi kuusinapainen kuormankytkin käyttämällä vääntömekanismin lisämoduulia, kuten kuvassa 15 esitetään. Lisämoduuli kääntää kahden kolminapaisen kuormankytkimen väännintä yhtäaikaisesti, jolloin kuusi napaa toimii samanaikaisesti. Vääntömekanismin keskellä olevan vääntövivun mekaanisessa kestossa on ollut satunnaisia ongelmia, jotka johtuvat osien ja materiaalien tuotannollisista vaihteluista. Simulointia on päätetty käyttää apuna suunniteltaessa uutta, kestävämpää vääntövipua.



**Kuva 15.** Kuusinapainen kuormankytkin, joka koostuu kahdesta vääntömekanismin avulla yhdistetystä kolmenapaisesta kytkimestä (ABB Oy 2003).

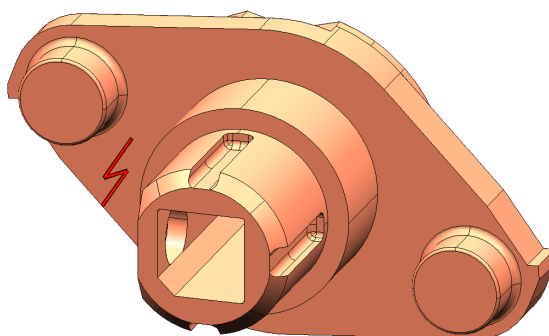
### 5.1.1 Ongelman määrittely

Kuusinapaisen kuormankytken vääntömekanismin keskimmäisen vääntövivun mekaanisessa kestossa on ollut tuotannollisista vaihteluista johtuvia ongelmia. Kuva 16 esittää vääntömekanismia ja sen toimintaa.



**Kuva 16.** Kuusinapaisen kuormankytken vääntömekanismin toiminta.

Kuvan 16 keskellä on vääntömekanismin vääntövipu, jonka kestossa on ollut ongelmia. Mekanismi toimii siten, että kun vääntövipua käännetään myötäpäivään, niin kuvassa sinisellä merkityt vääntövarret pyörittävät samanaikaisesti kahta vipua, jotka ohjaavat kahta kolminapaista kuormankytintä. Näin saadaan kaksi kolminapaista kuormankytintä toimimaan kuin yksi kuusinapainen kytkin. Keskellä olevan vääntövivun rasitukset muodostuvat vipua vääntävästä sekä vääntöliikettä vastustavista voimista.



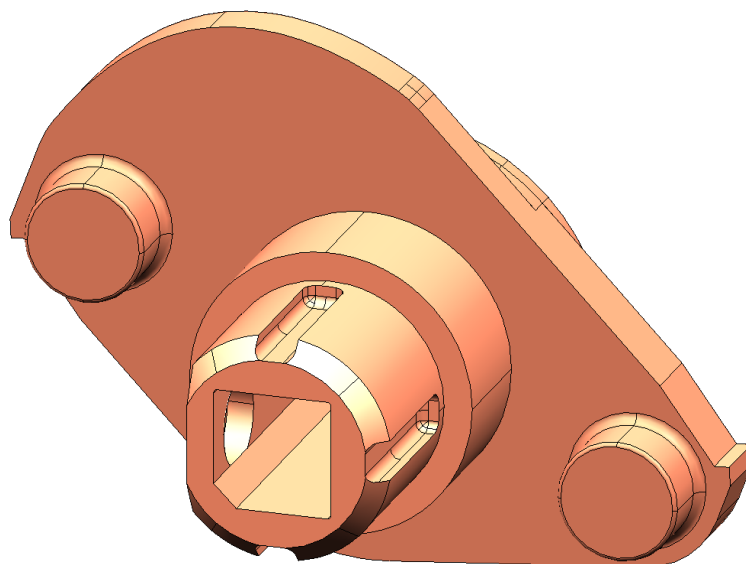
**Kuva 17.** Vääntövipu, jonka murtumiskohta on merkattu punaisella.

Vääntövivun on havaittu murtuvan kuvan 17 osoittamasta kohdasta. Mekanismin kotelo ja muut osat antavat rajoitteita osan geometrialle. Esimerkiksi osan paksuutta ei voi kasvattaa. Vääntövivun vahvistaminen täytyy toteuttaa siten, että se ei estä mekanismin toimintaa. Mekanismin vääntövarret ovat terästä sekä vääntövivut ja kotelo muovia.

### 5.1.2 Ratkaisun suunnittelu

Ratkaistaan ongelma suunnittelemalla vääntövivulle eri rakennevaihtoehtoja ja vertaamalla niiden kestävyksiä toisiinsa. Lisäksi varmistetaan vääntömekanismin oikea toiminta muutetun osan kanssa.

Vahvistetaan kappaletta lisäämällä murtumiskohdan vastakkaiselle reunalle materiaalia siten, että lisäyksen uloin kohta on noin kolme millimetriä alkuperäisestä. Kokeillaan myös kuuden millimetrin vahvistuksella. Kuva 18 esittää vahvistettua kappaletta.



**Kuva 18.** Murtumiskohdan vastakkaiselta reunalta 6 mm vahvistettu vääntövipu.

Toteutetaan rakennevaihtoehtojen vertailu simuloimalla vääntövivun staattista rasitusta normaalia toimintaa muistuttavassa kuormitustilanteessa. Lisäksi mallinnetaan vääntömekanismin toiminta jäykän kappaleen simulointina, ja varmistetaan mekanismin oikea

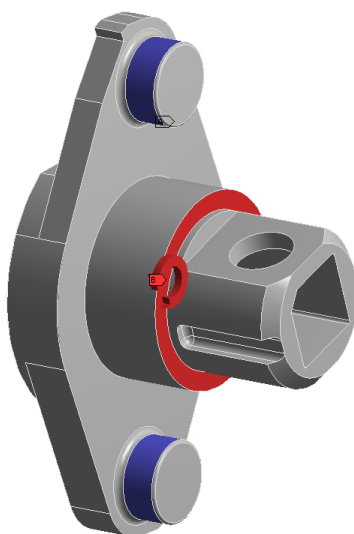
toiminta muutetun osan kanssa. Simuloinnit toteutetaan Ansys Multiphysics 12.1 -ohjelmistolla.

Ennen simuloiteja tarvitaan CAD-mallit vertailtavina olevista rakenteista sekä tietoja materiaalin ominaisuuksista ja osien kuormituksista. Simuloinnissa tarvittavat CAD-mallit haetaan PDM-järjestelmästä ja tarvittaessa suunnitellaan ja mallinnetaan puuttuvien tai uusien osien geometriat CAD-ohjelmistolla. Simuloinneissa tarvittavat CAD-mallit tuodaan Ansysiin STEP-formaatissa. Muoviosan materiaalitiedot löytyvät ABB:n materiaalinormeista ja ne tallennetaan Ansysin materiaalikirjastoon uudelleenkäyttöä varten.

Tulostietoina tarvitaan simuloitua maksimijännitykset sekä alkuperäisestä että suunnitteilla olevista osista alueelta, josta alkuperäinen osa murtui. Lisäksi pitää selvittää, mahtuuko uusi osa toimimaan mekanismeissa.

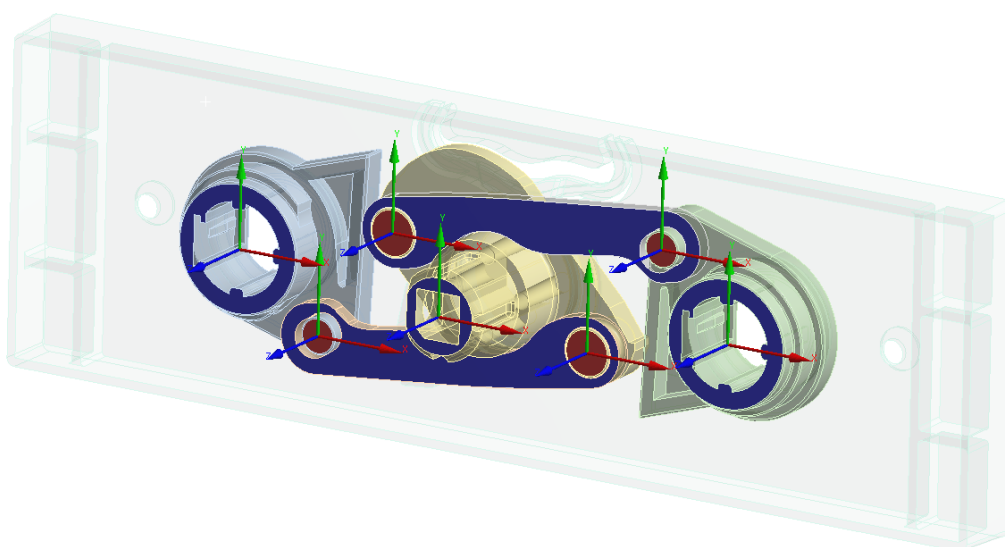
### 5.1.3 Mallintaminen ja simulointi

Mallinnettavana ovat siis alkuperäisen osan ja kahden vahvistetun osan jännitykset sekä koko mekanismin toiminta kotelossaan. Rakennevaihtoehto mallinnetaan erillisinä simulointitapauksina, joiden ulostulona tarkastellaan murtumisalueen suurinta jännitystä. Jokaisessa mallissa käytetään samoja materiaalmäärittäjiä sekä reunaehtoja, joissa määritellään vääntöivun ylä- ja alaosa kiinnitetyiksi ja keskiosaan 20 Nm vääntömomentti vastapäivään kuten kuvassa 19.



**Kuva 19.** Vääntövivun reunaehdot.

Mekanismin toiminta uuden osan kanssa varmistettiin suorittamalla mekanismin toiminnasta jäykän kappaleen simulointi. Mekanismin osat saadaan liikkumaan oikein asettamalla reunaehtoja, jotka sallivat ainoastaan pyörimisliikkeen  $z$ -akselin ympäri. Vääntövipujen pyörimiskoordinaatit sijaitsevat vipujen keskellä ja ovat paikoillaan, kun taas vipuvarsien koordinaatit sijaitsevat vääntövipujen nystyröiden keskipisteessä ja liikkuvat keskipisteiden mukana. Kuvasta 20 nähdään osille asetettujen reunaehtojen paikat ja koordinaatistojen suunnat.

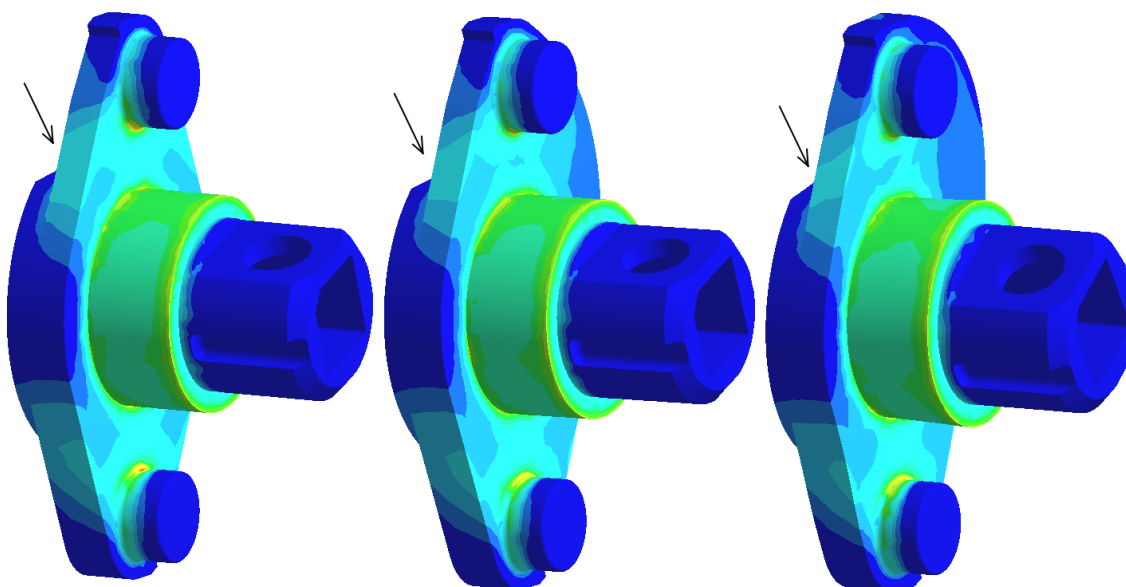


**Kuva 20.** Mekanismin simuloinnissa käytetyt reunaehdot.

Näillä reunaehdoilla saadaan mekanismin toimintaa kuvaava malli, kun asetetaan keskimmaiselle vääntövivulle vielä kuormitukseksi pyörimisliike  $z$ -akselin ympäri 90 astetta myötöpäivään.

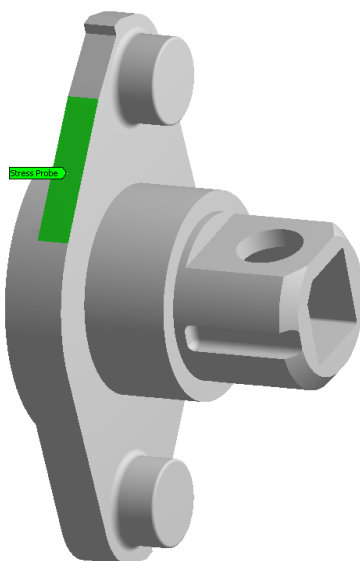
#### 5.1.4 Tulosten laatiminen ja tulkinta

Tuloksina tarkastellaan ensin vääntövivun eri parannusehdotusten staattisia jännityksiä ja verrataan niitä alkuperäiseen. Lisäksi verrataan murtumisalueen suurinta jännitystä alkuperäisen ja vahvistettujen kappaleiden kesken. Kuva 21 esittää vääntövivun eri parannusehdotusten staattisia jännityksiä.



**Kuva 21.** Vääntövivun jännitykset alkuperäisellä geometrialla sekä 3 mm:n ja 6 mm:n lisäyksellä murtumiskohdan vastakkaiselle puolelle. Nuoli osoittaa murtumiskohdan.

Kuvasta 21 nähdään, miten materiaalin lisääminen murtumiskohdan vastakkaiselle puolelle vähentää murtumisalueen jännityksiä. Jokaisessa mallissa laskettiin myös kuvan 22 osoittamalta alueelta, eli murtumisalueelta, suurin jännitys.



**Kuva 22.** Vertailujen jännitysarvojen laskenta-alue.

Murtumisalueen jännitysarvojen vertailun mukaan paras vaihtoehto on kuuden millimetrin materiaalin lisäys murtumiskohdan vastakkaiselle puolelle, jolloin laskennallisesti murtumisalueen suurin jännitysarvo on noin 16,5 % pienempi kuin alkuperäisellä osalla.

Mekanismin toimintaa vahvistetun osan kanssa tarkasteltiin jäykän kappaleen simuloinnilla. Mekanismin osien liikesimuloinnista nähdään, että uusi osa ei haittaa mekanismin toimintaa eikä osu kotelon seiniin.

Simuloinnin tulosten perusteella 6 mm:n vahvistuksella varustettu osa päätettiin ottaa käyttöön kuusinapaisen kuormankytkimen vääntömekanismissa. Käyttökokemusten perusteella uusi osa kestää paremmin kuin vanha, eikä osan hajoaminen ole enää ongelma.

#### 5.1.5 Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi

Simulointitulokset ja simulointitoiminnan vaiheet on kirjoitettu Word-dokumentiksi, ja simuloinnissa tuotettu data on tallennettu Ansys-archive muotoon. Molemmat tiedostot on tallennettu PDM-järjestelmään nimikkeen *SIM\_mech\_A123* alle.

## 5.2 Veitsikoskettimia yhteen puristava sähkömagneettinen voima

Veitsikoskettimia käytetään kuormankytkinten ja kytkinvarokkeiden liikkuvina koskettimina yli 63 ampeerin nimellisvirroilla. Veitsikoskettimet koostuvat kuparisista kosketinpaloista sekä niiden ympärillä olevista kosketinraudoista. Kosketinrautojen tehtävä on keskittää koskettimien ympärille muodostuvaa magneettikenttää, joka saa aikaan rautoja yhteen puristavan voiman. (Hautala 2006.)

### 5.2.1 Ongelman määrittely

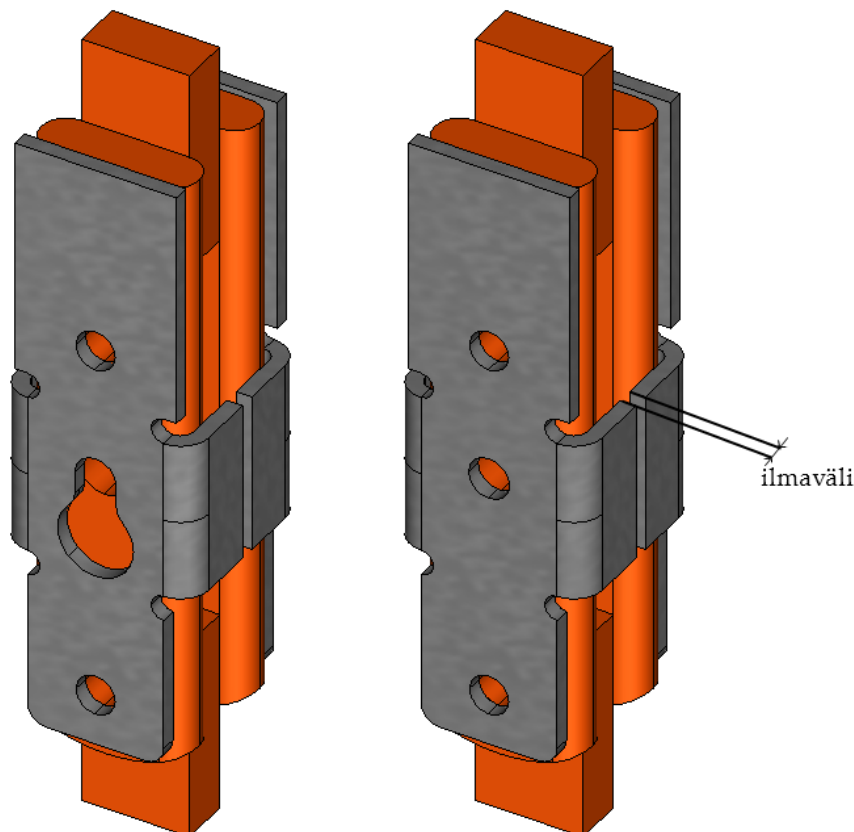
Tämän esimerkin tarkoituksena on selvittää veitsikoskettimen kosketinrautojen rakenteen vaikutusta rautoja puristavaan sähkömagneettiseen voimaan sekä demonstroida simulointiohjelman soveltuvuutta sähkömagneettisten voimien simulointiin. Esimerkkinä vertaillaan kosketinrautojen rakenneratkaisujen vaikutusta veitsikoskettimia yhteen puristavaan voimaan vaihtelemalla kosketinrautojen kärkien etäisyyttä toisiinsa ja vertaamalla magneettikentän aikaansaamaa voimavaikutusta. Kokeillaan myös kosketinraudassa olevien reikien ja magneettikentän muodon vaikutusta kosketinrautoihin kohdistuvaan voimaan.

Simuloidaan OT3150-kuormankytkimen yhden veitsikosketinparin yhteen puristavaa voimaa kytkimen nimellisvirralla. OT3150-kuormankytkimen nimellisvirta on 3 150 A, mutta yhdessä navassa käytetään kolmea veitsikosketinparia, joten yhdelle parille jää 1 050 A. Tulostietoina tarkastellaan magneettivuontiheyttä kosketinraudoissa sekä magneettikentän aiheuttamaa voimavaikutusta.

### 5.2.2 Ratkaisun suunnittelu

Haetaan koskettimien ja kosketinrautojen geometriat PDM-järjestelmästä ja muokataan kosketinraudoista uusia rakennevaihtoehtoja. Tarkastellaan ensin magneettivuon kulkureitin ja seuraavaksi kosketinrautojen ilmvälän vaikutusta sähkömagneettiseen voimaan. Magneettivuon kulkureittiin vaikuttaa kosketinrautojen keskellä oleva aukko, johon asetetaan tappi, jonka avulla veitsikosketinpaketti kootaan yhteen. Pienennetään

aukkoa, jolloin magneettivuolla on entistä esteettömämpi kulkureitti. Kosketinrautojen alkuperäinen ja muokattu geometria näkyy kuvassa 23.



**Kuva 23.** Vasemmalla alkuperäinen ja oikealla muokattu kosketinrauta.

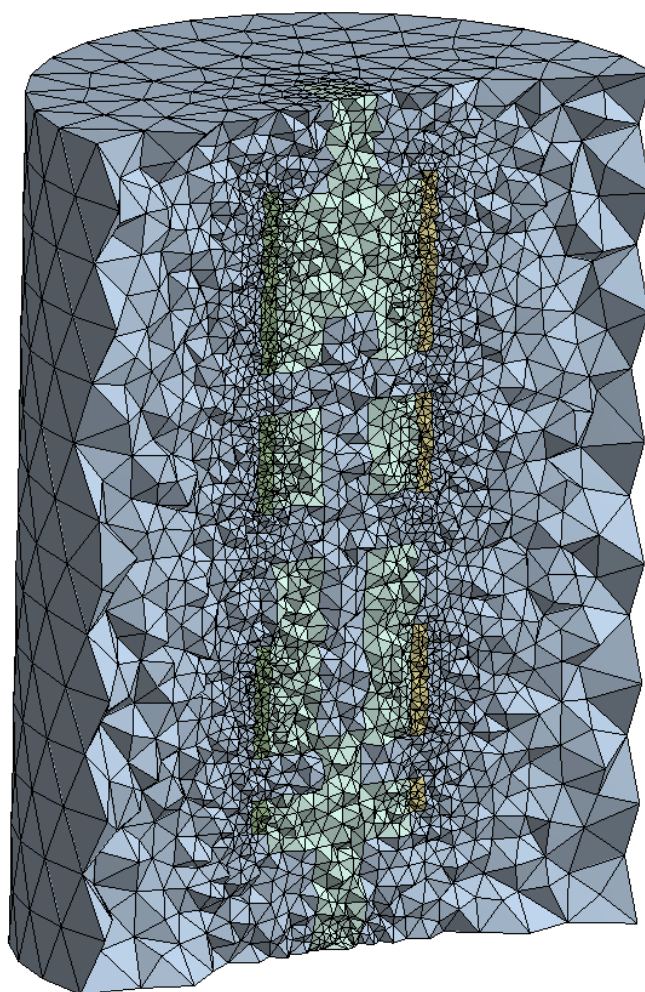
Seuraavaksi tarkastellaan kosketinrautojen ilmavälin vaikutusta sähkömagneettiseen voimaan. Alkuperäisessä rakenteessa rautojen kärkien ilmaväli on 2,5 mm. Muutetaan kosketinrautojen geometriaa ainoastaan kasvattamalla rautojen sivuja siten, että ilmaväliksi tulee 2,0 mm ja 1,5 mm. Näissä simuloinneissa tarkastellaan vain kosketinrautoihin kohdistuvaa kokonaisvoimaa, sillä magneettivuon kulkureitti on kaikissa sama riippumatta ilmavälin suuruudesta.

Simuloinnit toteutetaan Ansys Multiphysics 12.1 -ohjelmiston *magnetostatics*-moduulilla ja yksinkertaistetaan mallia käyttämällä tasavirtaa vaihtovirran sijaan. Käytetään koskettimien materiaalina kuparia ja kosketinrautojen materiaalina terästä. Tarkemmat materiaalmääritykset löytyvät ABB:n ostonormeista.

### 5.2.3 Mallintaminen ja simulointi

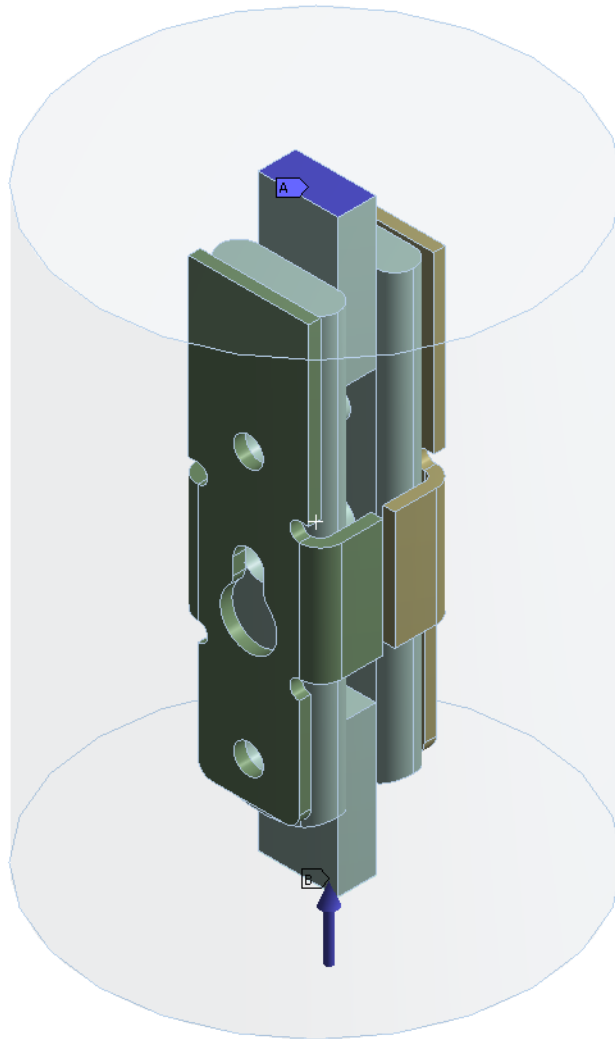
Haetaan veitsikoskettimen geometria PDM-järjestelmästä ja poistetaan ylimääräiset osat siten, että jäljelle jää vain koskettimet ja kosketinraudat. Viimeistellään geometria luomalla veitsikosketinpaketin ympärille sylinterin muotoinen ilmatila sekä veitsikoskettimien väliin laatikot kiinteiksi koskettimiksi. Käytetään STEP-formaattia geometriamallien siirtoon CAD- ja simulointiohjelman välillä.

Käytetään magneettikenttien simulointiin Ansys Multiphysicsin *magnetostatics*-moduulia ja approksimoidaan vaihtovirtaa samansuuruisella tasavirralla. Haetaan Ansysin materiaalikirjastosta kappaleille kuuluvat materiaalmääritykset. Muodostetaan mallin verkotus tiheäksi kosketinrautojen läheisyydessä ja harvaksi ilmatilan ulkoreunoilla. Kosketinrautojen kohdalla yhden elementin suurin sallittu sivun pituus on 1,25 mm, jolloin raudan paksuussuunnassa on aina vähintään kaksi elementtiä. Elementtien sivut saavat olla korkeintaan 2,5 mm koskettimissa ja 10 mm ilmatilan ulkoreunoilla. Lisäksi asetetaan, että elementtien koon vaihtuminen tapahtuu hitaasti, jolloin myös ilmatilan sekä koskettimien verkotus pysyy tiheänä kosketinrautojen läheisyydessä, mutta harvenee kauempana. Kuva 24 esittää simuloinnissa käytetyn verkotuksen poikkileikkausta.



**Kuva 24.** Poikkileikkaus simuloinneissa käytetystä verkotuksesta.

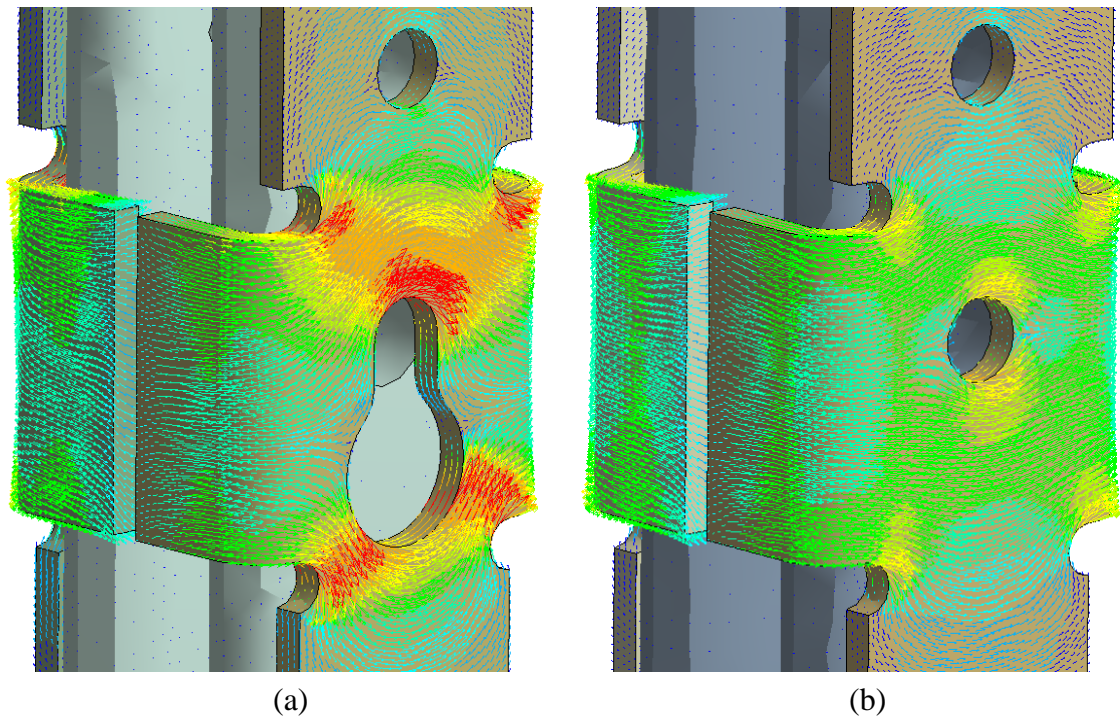
Simulointimalli edellyttää, että mallissa määritetään pintoja, joiden kanssa magneettikenttä voi olla yhdensuuntainen. Valitaan ilmatilaa kuvaavan sylinterin kaikki kolme ulkopintaa magneettikentän kanssa yhdensuuntaisiksi. Seuraavaksi asetetaan mallin sähköä johtavat kappaleet, joita ovat veitsikoskettimet sekä kiinteitä koskettimia kuvaavat laatikot. Todellisuudessa pieni osa virrasta saattaa kulkea kosketinrautoja pitkin, mutta tässä mallissa sitä ei oteta huomioon. Asetetaan virta kulkemaan alemmasta kiinteän koskettimen alapinnasta ylemmän koskettimen yläpintaan. Asetetaan siis alemmalle koskettimelle sisään tulevaksi sähkövirraksi 1 050 A ja ylemmälle koskettimelle jännitteeksi 0 V kuten kuvassa 25.



**Kuva 25.** Kosketinrautojen simuloinneissa käytetyt reunaehdot. Ylhäällä jännite on 0 V ja alhaalla sisään tuleva virta 1 050 A.

#### 5.2.4 Tulosten laatiminen ja tulkinta

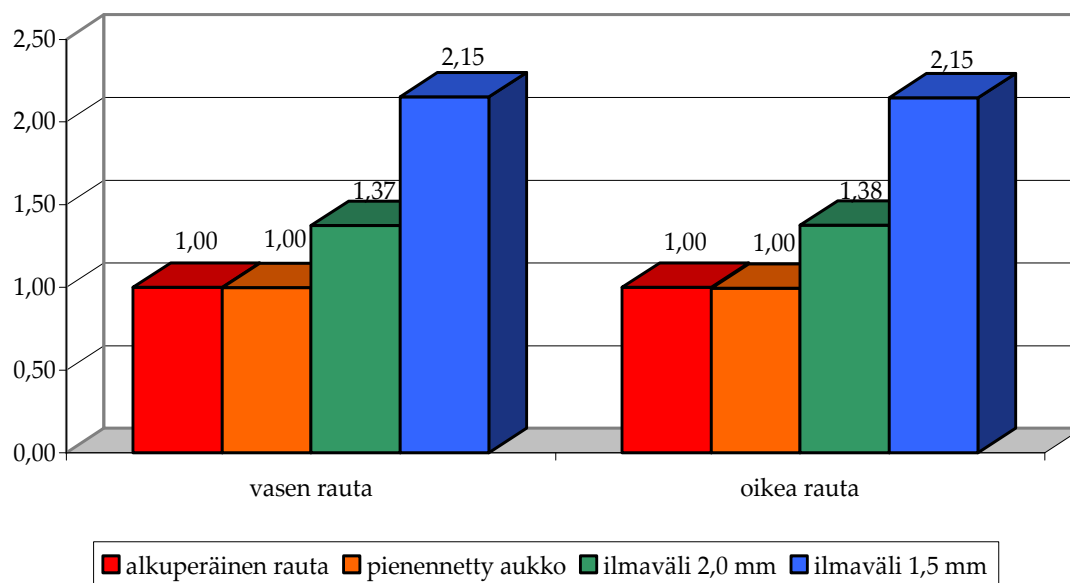
Tuloksina tarkastellaan jokaisessa tapauksessa kosketinrautoihin kohdistuvia kokonaisvoimia sekä kahdessa tapauksessa vertaillaan myös sähkövirran indusoimia magneettikenttiä. Tarkastellaan ensin magneettivuon tiheyden muuttumista, kun pienennetään kosketinraudan keskellä oleva aukkoa. Kuvasta 26 nähdään magneettivuon tiheys alkuperäisessä ja muokatussa kosketinraudassa.



**Kuva 26.** Magneettivuon alkuperäisessä (a) ja muokatussa (b) kosketinraudassa.

Kuvasta 26 nähdään kuinka aukon pienentäminen pienentää myös magneettivuon tiheyttä ja tarjoaa magneettivuolle aiempaa esteettömämmän kulkureitin. Simulointien perusteella sillä ei ole juuri mitään vaikutusta kosketinrautoja puristavaan kokonaisvoimaan. Kokonaisvoimissa ero on vain noin puoli prosenttia, joka voidaan lukea laskennan virhemarginaaliin.

Ilmavälin pienentäminen kasvatti magneettivuon tiheyttä sekä kosketinrautoja yhteen puristavaa kokonaisvoimaa huomattavasti. Kuvassa 27 esitetään kuhunkin kosketinrautaan vaikuttava kokonaisvoima kussakin rakennevaihtoehdossa suhteessa alkuperäisessä rakenteessa laskettuihin voimiin.



**Kuva 27.** Kosketinrautoihin vaikuttavat suhteelliset kokonaisvoimat eri rakenneratkaisuilla.

Kosketinrautoihin kohdistuvia kokonaisvoimia vertaamalla nähdään, ettei magneettivuon esteettömällä reitillä ole juurikaan vaikutusta. Ilmavälin pienenessä alkuperäisestä 2,5 mm:stä 2,0 mm:iin tai 1,5 mm:iin kosketinrautoja puristava voima kasvaa. Ilmavälin pienentäminen puolella millimetrillä kasvatti kokonaisvoimaa kolmanneksella, kun taas pienentäminen yhdellä millimetrillä kaksinkertaisti puristavan voiman. Tämä simulointiesimerkki osoittaa, että Ansys Multiphysics 12.1 soveltuu sähkömagneettisten voimien simulointiin ja erilaisten kosketinrautojen rakenneratkaisujen suunnitteluun.

### 5.2.5 Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi

Simulointitulokset ja simulointitoiminnan vaiheet on kirjoitettu Word-dokumentiksi, ja simuloinnissa tuotettu data on tallennettu Ansys-archive muotoon. Molemmat tiedostot on tallennettu PDM-järjestelmään nimikkeen *SIM\_em\_B456* alle.

### 5.3 Sulakevahdin asennussuunnan vaikutus jäähtymiseen

Sulakevahti on kytkinvarokkeeseen liitettävä lisälaitte, joka vahtii sulakkeita ja ilmoittaa niiden laukeamisesta led-valoilla sekä avautuvalla ja sulkeutuvalla apukoskettimella. Sulakevahdin avulla voidaan virtapiiri laukaista välittömästi, jos yksi tai useampi sulake on lauennut. Näin voidaan estää epäsymmetriset kuormitustilanteet sekä nollajohdon yli-kuormittuminen. (ABB Oy 2005: 2).

#### 5.3.1 Ongelman määrittely

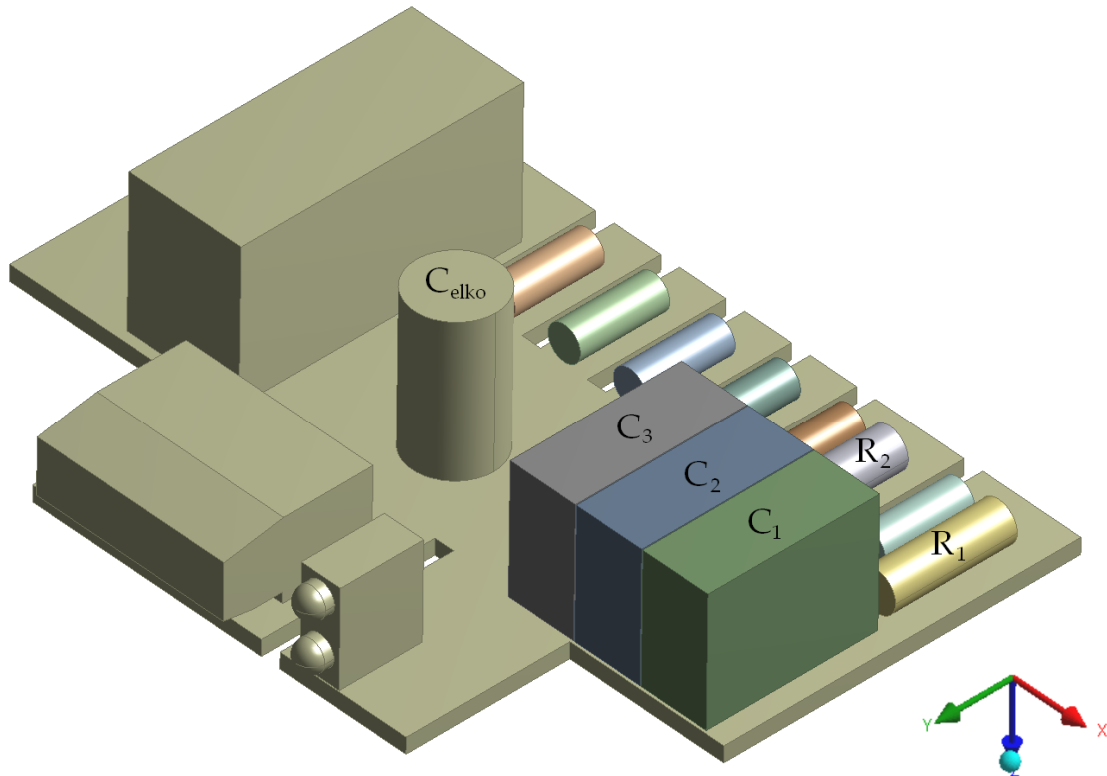
Sulakevahdin komponenttien jäähtyminen tapahtuu pääasiassa luonnollisella konvektiolla sekä johtumalla piirilevyä ja kotelon rakenteita pitkin. Kotelossa on pyritty ottamaan riittävä jäähtytys huomioon tarjoamalla ilmalle tarpeeksi tulo- ja lähtöaukkoja sekä kulkureitti kotelon sisällä. Simuloinnilla pyritään selvittämään ilmankierto kotelossa sekä piirilevyllä olevien komponenttien pintalämpötiloja, kun sulakevahti on asennettuna erilaisissa asennoissa.

#### 5.3.2 Ratkaisun suunnittelu

Haetaan kotelon, liittimien ja piirilevyn geometriat PDM-järjestelmästä ja tarvittaessa luodaan lisää geometrioita CAD-ohjelmalla. Ilmankierron mallintamiseksi tarvitaan myös koteloon jäävä ilmatila omana kappaleenaan. Simulointi toteutetaan jatkuvan tilan simulointina Ansys CFX 12.1 -ohjelmistolla.

Laitteen ympärillä olevan ilman ja kotelon ulkopinnan lämpötilaksi asetetaan 25 °C. Simuloidaan laitteen tuottamaa lämpöä pahimman tapauksen mukaan eli kolmessa piirilevyn laidalla sijaitsevassa kondensaattoressa,  $C_1-C_3$ , tuotetaan jokaisessa 3 W ja kahdessa isoimmassa vastuksessa,  $R_1-R_2$ , tuotetaan 0,3 W lämpötehoa. Muiden komponenttien lämmöntuotto jätetään huomioimatta. Piirilevyn geometria ja simuloinnissa käytettyjen komponenttien nimitykset esitetään kuvassa 28. Huomioimatta jätetään myös pienet aukot liittimien ja kaapelien läpivientien kohdalla eli koteloon tuleva ja siitä lähtevä ilma kulkee ainoastaan varsinaisten ilma-aukkojen

kautta. Lisäksi oletetaan syntyvä ilmavirtaus laminaariseksi. Sulakevahdin asennus-suunnan muuttumista simuloidaan vaihtamalla painovoiman suuntaa.



**Kuva 28.** Piirilevyn geometria ja simuloinnissa käytettyjen komponenttien nimitykset.

Tulostietoina tarkastellaan koteloon muodostuvaa ilmavirtaa sekä kuvassa 28 nimettyjen komponenttien keskimääräisiä pintalämpötiloja sulakevahdin eri asennus-suunnilla.

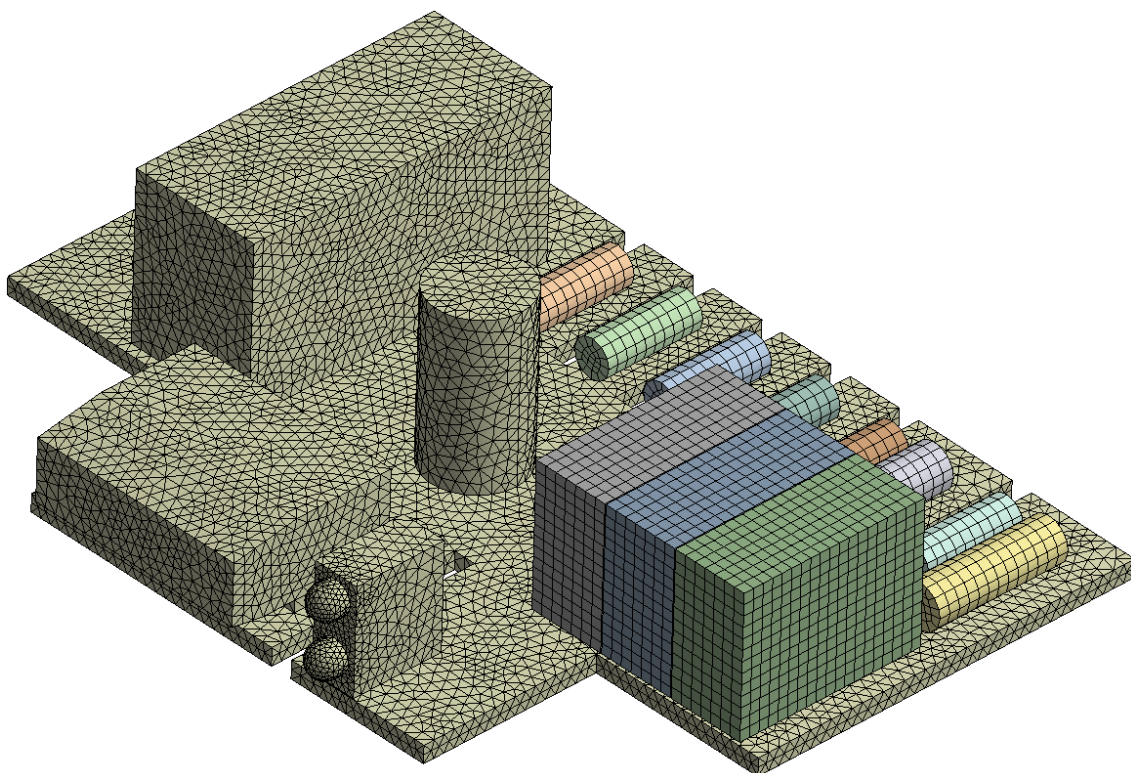
### 5.3.3 Mallintaminen ja simulointi

Haetaan PDM-järjestelmästä geometriamallit kotelolle sekä piirilevylle, jossa on mukana myös komponenttien geometria. Komponenttien geometriamallit ovat kuitenkin hiukan puutteellisia, sillä komponenttien jalkoja ei ole mallinnettu ollenkaan. Näin ollen simulointimallissa komponenteista piirilevyyen johtumalla tapahtuva lämmönsiirto on huomattavasti vähäisempää kuin todellisuudessa. Lisäksi piirilevy on mallinnettu yhtenä

kiinteänä kappaleena huomioimatta levyllä olevia johdotuksia, jotka edistäisivät lämmön jakautumista.

Ilmavirran mallintamiseksi tarvitaan kotelossa olevan tilan geometria omaksi kappaleekseen. Ilmatilan voi mallintaa helposti Ansys DesignModeler -ohjelman *Fill*-toiminnolla, jolle tarvitsee kertoa vain ilmatilaa reunustavat pinnat, eli ilma-aukkojen ulkoreunat, jolloin ohjelma luo kappaleen valittujen reunapintojen sisään automaattisesti.

Seuraavaksi määritetään mallin verkotus kappalekohtaisesti *Body Sizing* -toiminnolla, jolla määritetään elementin suurin sallittu koko. Piirilevyn verkotus toteutetaan siten, että levyn paksuuden suunnassa on vähintään kaksi elementtiä eli asetetaan elementin kooksi 1 mm. Samaa piirilevyn verkotuksen kokoa käytetään myös komponenttien verkotuksessa. Kuva 29 esittää piirilevylle ja komponenteille käytettyä verkotusta. Laskenta-ajan säästämiseksi valitaan ilmatilalle 2 mm:n ja kotelolle 3 mm:n verkotuskoko.



**Kuva 29.** Piirilevyn ja komponenttien verkotus.

Reunaehto- ja jälkikäsitellyssä tapahtuvaa tulosten tarkastelua voidaan helpottaa luomalla etukäteen nimettyjä valintoja. Nimetyksi valinnoiksi asetetaan kotelon ilma-aukot, ilmatilan ja muiden kappaleiden väliset rajapinnat sekä pinnat, joiden lämpötiloja halutaan tarkastella jälkikäsitellyssä.

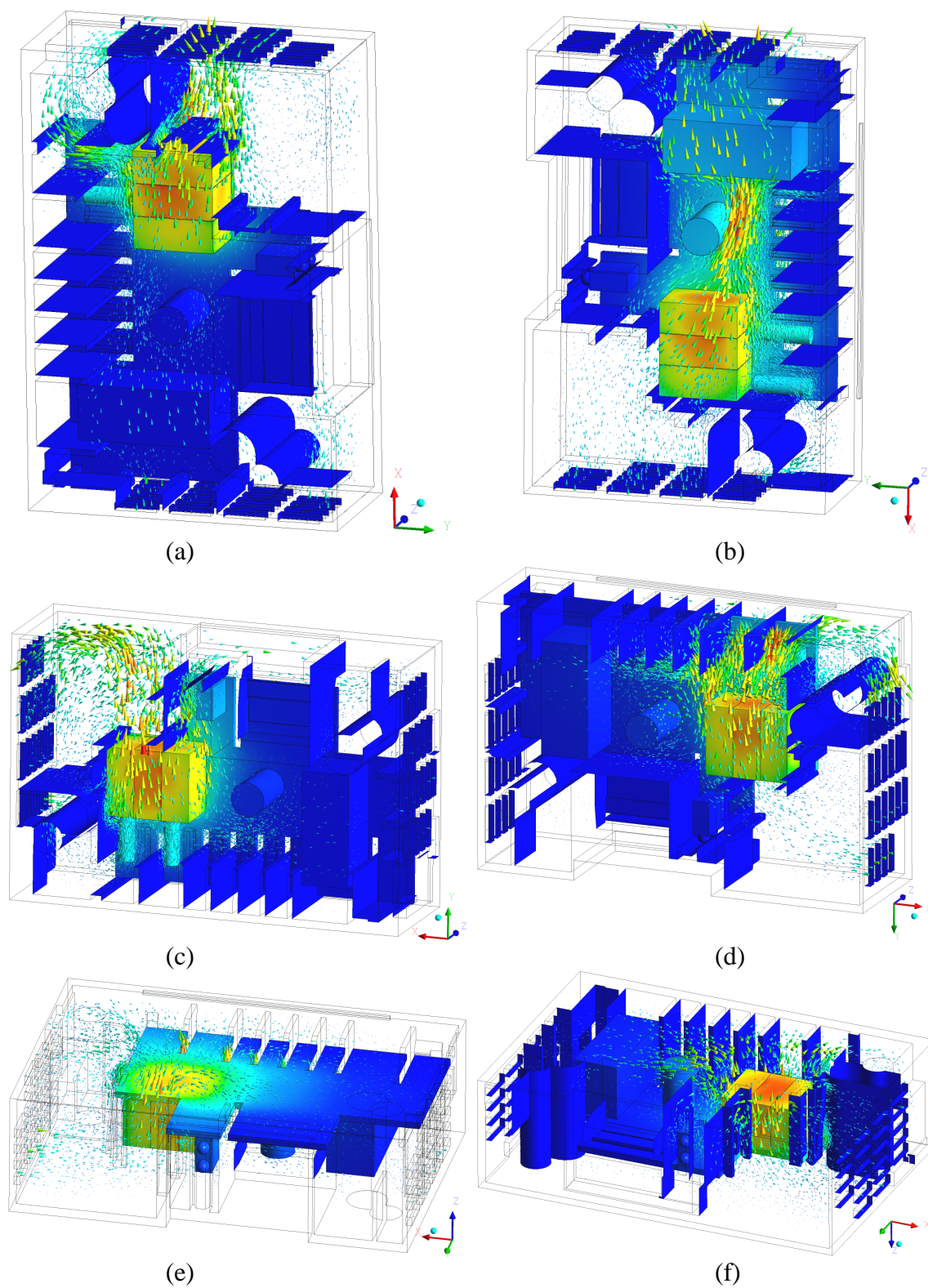
Reunaehto- ja materiaalien määrittäminen tapahtuu CFX-Pre -ohjelmalla. Aluksi määritetään mallissa käytettävät materiaalit, joita ovat lasikuituvahvistettu muovi sulakevahdin ja komponenttien kotelossa, FR4-materiaali piirilevyllä sekä ilman ideaalikaasumalli ilmatilassa. Seuraavaksi määritetään kappaleiden ominaisuudet asettamalla kiinteät kappaleet kiinteiksi ja ilmatila kaasuksi. Lisäksi kiinteille kappaleille asetetaan lämmönsiirto päälle ja ilmatilalle noste, jonka määrittämiseen tarvitaan ilman referenssitiheys sekä painovoiman suuruus ja suunta. Ilman referenssitiheydeksi määritetään  $1,185 \text{ kg/m}^3$ , joka vastaa ilman tiheyttä  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa, sekä painovoiman suuruudeksi  $9,81 \text{ m/s}^2$  ja sen suunta sulakevahdin asennussuunnan mukaan. Lämmönsiirto kappaleiden välillä toteutetaan rajapintareunaehdoilla, joissa määritetään rajapinnan muodostavat pinnat kummastakin kappaleesta ja asetetaan lämmönsiirto päälle. Lämpöteho voidaan määrittää kappaleille vain tilavuusyksikköä kohden. Asetettava arvo saadaan, kun kappaleelle haluttu kokonaisteho jaetaan komponentin tilavuudella. Tällä tavoin asetetaan kondensaattoreiden,  $C_1-C_3$ , lämpötehoksi  $3 \text{ W}$  ja kahdelle isoimmalle vastukselle,  $R_1-R_2$ ,  $0,3 \text{ W}$ . Reunaehdoiksi määritetään vielä kotelon ulkoreuna vakiolämpötilaan  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja kotelon ilma-aukot avoimiksi reunoiksi. Seuraavaksi määritetään analyysityypiksi jatkuvantilan analyysi eli haetaan arvoja, joihin malli vakiintuu riittävän pitkän ajanjakson kuluttua. Lisäksi voidaan määrittää simuloinnin alkuarvot, jotka saattavat nopeuttaa ratkaisun saamista. Asetetaan alkuarvoina kaikkien kappaleiden lämpötilaksi  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja ilmavirtauksen nopeudeksi  $0,1 \text{ m/s}$ . Nyt malli on valmis ratkaistavaksi.

Malli koostui  $147\,000$  solmusta ja  $656\,000$  elementistä. Ensimmäisen simulointimallin, jossa asennussuunta oli kuvan 30a mukainen, ratkaisuun yhdellä prosessoriytimellä kului noin  $42$  minuuttia ja muistin kulutus oli alle  $500 \text{ Mt}$ . Simuloinnissa käytetyn työaseman kokoonpanoon kuului  $2,33 \text{ GHz}$ :n Intel® Core™ 2 Duo -prosessori ja  $3 \text{ Gt}$  DDR2-keskusmuistia. Muistin kulutus viittaa siihen, että mallissa olisi voinut käyttää

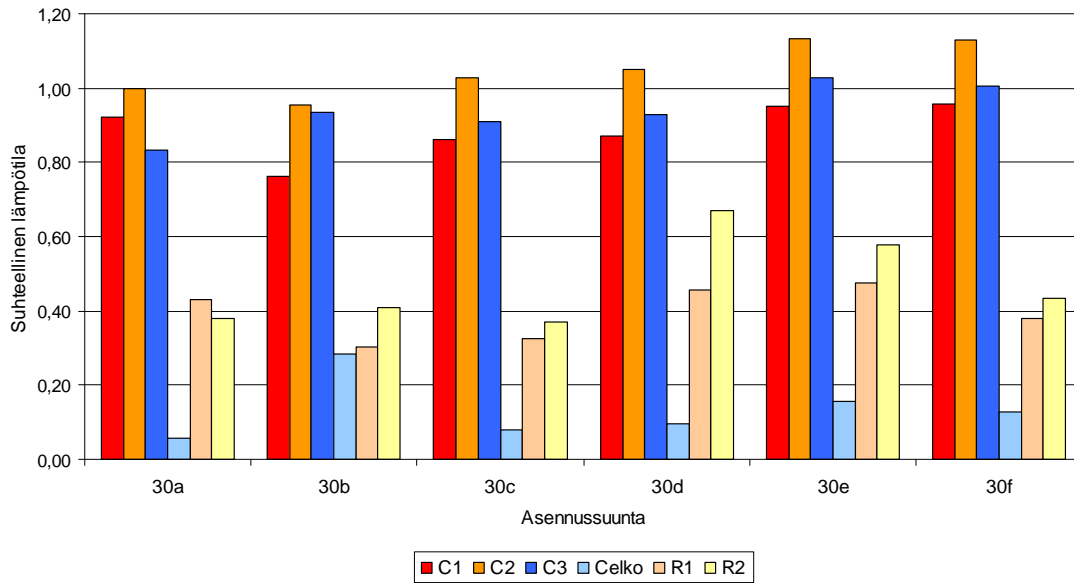
tiheämpääkin verkotusta mahdollisesti tarkempien tulosten saamiseksi, mutta laskenta-aika olisi vastaavasti kasvanut. Tärkeä havainto kuitenkin on, että Ansys CFX käyttää muistia säästeliäästi, mikä mahdollistaa monimutkaistenkin mallien ratkaisun suhteellisen pienellä keskusmuistin määrällä.

#### 5.3.4 Tulosten laatiminen ja tulkinta

Tuloksina tarkastellaan koteloon muodostuvaa ilmavirtaa sekä komponenttien keskimääräisiä pintalämpötiloja sulakevahdin eri asennussuunnilla. Kuva 30 esittää lämpenevien komponenttien pintalämpötiloja sekä niiden aiheuttamaa ilmavirtaa laitteen eri asennussuunnilla. Pintojen väri esittää pintalämpötilaa sekä nuolien koko ja väri ilmavirran nopeutta. Kuvista nähdään miten lämpötehoa tuottavat komponentit lämmittävät ympärillään olevaa ilmaa, joka nousee nosteen vaikutuksesta ylöspäin ja lämmittää kotelon sisäseiniä ja laitteen muita komponentteja. Asennussuunnalla on suuri vaikutus ilman virtaukseen, ja paras jäähdytys saadaan aikaiseksi, kun kotelon ilma-aukot ovat kohtisuorassa painovoimaan nähden ja eniten lämpiävät komponentit ovat lähimpänä ilmavirran ulostuloaukkoa. Näin lämmennyt ilma ei kulje komponenttien vierestä vaan mahdollisimman nopeasti ulos kotelosta. Kuva 31 esittää eri komponenttien keskimääräisiä pintalämpötiloja eri asennussuunnilla verrattuna kondensaattorin C<sub>3</sub> lämpötilaan kuvan 31a mukaisessa asennussuunnassa.



**Kuva 30.** Komponenttien pintalämpötilat ja ilman virtaus eri asennussuunnilla. Asennussuunta (a) vastaa laitteen yleisintä asennussuuntaa.



**Kuva 31.** Komponenttien keskimääräiset pintalämpötilat eri asennussuunnilla.

Simulointitulosten perusteella paras keskimääräinen jäähdytys saadaan aikaiseksi kuvan 31a asennussuunnalla ja elektrolyyttikondensaattori  $C_{\text{elko}}$ :n kannalta huonoin on kuvan 31b asennussuunta. Suurimman lämpötehon tuottavien kondensaattoreiden  $C_1$ – $C_3$  kannalta paras asennussuunta olisi kuvan 31b ja huonoin kuvan 31f mukainen.

Simuloinnista saadut lämpötilalukemat ovat aivan liian suuria ollakseen todellisia, mutta tällaisenaan malli kelpaa kuitenkin kotelon ilmankierron analysointiin ja suhteellisten lämpötilaerojen tarkasteluun. Mallia voidaan parantaa ottamalla huomioon lämpösäteily sekä käyttämällä tarkempaa geometriaa, joka huomioisi komponenttien jalat, piirilevyn johdotukset sekä kaapeliaukkojen ja liittimien ympärille olevat pienet ilma-aukot. Tarkempia tuloksia ilmavirran osalta voitaisiin saada laajentamalla mallia kotelon ulkopuolelle, eli ottamalla paremmin huomioon sulakevahdin aito asennusympäristö.

### 5.3.5 Simulointitiedon dokumentointi ja arkistointi

Simulointitulokset ja simulointitoiminnan vaiheet on kirjoitettu Word-dokumentiksi, ja simuloinnissa tuotettu data on tallennettu Ansys-archive muotoon. Molemmat tiedostot on tallennettu PDM-järjestelmään nimikkeeseen *SIM\_flow\_C789* alle.

## 6 POHDINTAA JA TOIMENPITEITÄ SIMULOINTITOIMINNAN TEHOSTAMISEKSI

Tässä työssä on tutkittu simulointitoimintaa tuotekehityksen osana ja esitetty toimia simulointitoiminnan tehostamiseksi. Edellisissä luvuissa esitettyjen asioiden lisäksi onnistunut simulointitoiminta tarvitsee toimivan ja modernin tietotekniikka-infrastruktuurin sekä simulointitoiminnan huomioimisen yrityksen tuotekehitysprosessissa. Kun simulointitoiminnan mahdollisuudet otetaan huomioon jo tuotekehitysprojekteja suunniteltaessa, ei jää ratkaisematta simuloinnilla helposti selvitettävät ongelmat ja on suurempi todennäköisyys, että simulointia hyödynnetään sopivissa tilanteissa.

Simulointityöasemien tulisi olla mahdollisimman tehokkaita, sillä simuloinnit käyttävät hyödykseen tehokkaankin työaseman resurssit. Mitä suorituskykyisempää tietotekniikkaa käytetään sitä suurempia, monimutkaisempia, tarkempia ja nopeampia simuloinnit voivat olla. Tietotekniikan kehitystä tulee seurata jatkuvasti ja tarpeen vaatiessa tehdä suorituskykyä lisääviä investointeja.

Myös simulointiohjelmistojen kehittymistä tulee seurata jatkuvasti. Ohjelmistot kehittyvät ominaisuuksiltaan, toiminnoiltaan ja suorituskyvyiltään. Simulointiohjelmistojen soveltuvuuden selvittämistä pienjännitekojeissa ilmenevien fysikaalisten ilmiöiden simulointiin tulee jatkaa tekemällä lisää esimerkkisimulointeja ja dokumentoimalla eri simulointityyppien vaatimat toimenpiteet. Välillä kannattaa koekäyttää muita kuin jo hankittuja simulointiohjelmiä varsinkin, jos on tullut vastaan simulointitapauksia, joita ei hankituilla ohjelmilla pysty ratkaisemaan. On tarkasti selvitettävä, mitä simulointiohjelmiä ja niiden lisenssejä tarvitaan tehokkaaseen ja toimivaan simulointitoimintaan.

Simulointitoimintaa voidaan edistää jatkotoimilla, kuten kouluttamalla tuotekehityksen henkilökuntaa, luomalla tarkempia sisäisiä ohjeita simuloinnin käytöstä, tutkimalla ohjelmistojen hyödynnettävissä olevia ominaisuuksia sekä tekemällä ja arkistoimalla lisää simulointeja. Henkilökunnan kouluttaminen ja tiedottaminen simuloinnin mahdollisuuksista ja rajoituksista auttaa tuomaan esiin simuloinnilla ratkaistavissa

olevia ongelmia. Luomalla tarkkoja ohjeita simuloinnista, esimerkiksi videotiedostojen avulla, yhtenäistetään toimintatapoja ja helpotetaan simuloinnin käyttöönottoa. Simulointiohjelmistoissa on paljon erilaisia käyttäjää helpottavia ja simulointien onnistumista parantavia ominaisuuksia, mutta aina niitä ei ole helppo ottaa käyttöön. Ohjelmiston käyttöä voi opetella käymällä kursseilla tai opiskelemalla itse manuaalien, apudiedostojen ja nettimateriaalien avulla. Simulointien tekeminen ja kerääminen arkistoon edistää simulointitoimintaa, sillä vanhoja simuloiteja voidaan käyttää uusien mallien lähtötietoina tai opiskelumateriaaleina.

Eräs jatkoselvitys voisi olla simulointiohjelmistojen ja muiden ohjelmien yhteiskäytön tehostaminen. Tähän selvitykseen voisi kuulua CAD-ohjelman ja simulointiohjelmiston yhteiskäytön selvittäminen sekä erillisen esi- tai jälkikäsitteijän käytöstä koituvat hyödyt ja haitat. CAD-ohjelman ja simulointiohjelmiston tehokas yhteiskäyttö saattaa nopeuttaa geometrian siirtoa ohjelmasta toiseen ja mahdollistaa geometrian optimoinnin parametrisilla simuloinneilla. Erillisellä jälkikäsitteijällä voi olla mahdollista simulointilaskelmista tai niiden yhdistelmistä saada aikaiseksi sellaisia tuloksia, joita ei pelkällä simulointiohjelman omalla jälkikäsitteijällä saa.

Mallintamisen ja simuloinnin soveltamisesta teollisuudessa tehdään jatkuvasti uutta tutkimusta, kuten tämänkin työn lähteenä käytetty Tekesin MASI-tutkimusohjelma. Simulointialan tutkimuksia, kuten MASI-ohjelman projekteja kannattaa seurata ja selvittää voisiko niiden tuloksia soveltaa omaan simulointitoimintaan.

## 7 YHTEENVETO

ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikössä valmistettavien pienjännitekojeiden, eli kuormankytkinten ja kytkinvarokkeiden, tuotekehityksessä voidaan käyttää apuna simulointiohjelmistoja. Simuloitavia osa-alueita, joita pienjännitekojeiden kehittämisessä esiintyy, ovat rakenteiden mekaniikka, sähkömagneettiset ilmiöt, valokaari-ilmiöt sekä lämpenemät ja jäähtytys. Simuloinnin käytöllä voidaan säästää prototyypin tekemisestä sekä mittaus- ja testauslaboratorion käytöstä aiheutuvia kuluja. Lisäksi simulointi saattaa laajentaa tuotekehittäjien näkemystä tuotteen toiminnasta ja siihen liittyvistä fysikaalisista ilmiöistä.

Simulointitoimintaan kuuluu paljon muutakin kuin varsinainen simulointiohjelmiston käyttö, kuten esimerkiksi ongelman määrittely, simuloinnin suunnittelu ja ratkaisun dokumentointi. Simulointitoiminnan tehostamiseksi ja haasteiden selvittämiseksi tässä työssä on kehitetty uusi simulointitoiminnan menetelmä, jonka on tarkoitus luoda yhtenäiset toimintatavat ja periaatteet simulointien toteuttamiseksi. Tämä uusi simulointitoiminnan menetelmä on kehitetty Tekesin Mallinnus ja simulointi -tutkimusohjelmassa kehitetyn SISUQ8-menetelmän pohjalta, mutta on hiukan selkeämpi ja suoraviivaisempi kuin edeltäjänsä. Tämä uusi menetelmä on laadittu mahdollisimman joustavaksi, mutta kuitenkin siten, että se sisältää kaikki tarpeelliset vaiheet, jotta kaikki oleellinen tulee huomioitua ja dokumentoitua. Menetelmään kuuluu viisi vaihetta: ongelman määrittely, ratkaisun suunnittelu, mallintaminen ja simulointi, tulosten laatiminen ja analysointi sekä simulointitapauksen dokumentointi ja arkistointi. Simulointitoiminnan menetelmää voi käyttää myös simulointitapauksen dokumentoinnin rakenteena. Esimerkkitapausten perusteella menetelmä on selkeä käytännöllinen ja tarpeeksi kattava, mutta sen lopullinen toimivuus pienjännitekojeiden tuotekehityksessä voidaan todeta vasta laajempien käytännön kokeilujen avulla. Menetelmä tulee varmasti käyttökokemusten perusteella tarkentumaan ja kehittymään, jotta se vastaa entistä paremmin pienjännitekojeiden tuotekehityksen vaatimuksiin. Simulointitoiminnan menetelmä on kehitetty varsinaisesti pienjännitekojeiden tuotekehityksen näkökulmasta, mutta se saattaa soveltua myös muidenkin

tuotekehitysyksiköiden menetelmäksi sellaisenaan tai pienin muutoksin, kunhan otetaan kyseessä olevan tuotteen ja yksikön tuotekehitysprosessin ominaispiirteet huomioon.

Diplomityön lopuksi tehtyjen simulointiesimerkkien perusteella Ansys Multiphysics ja Ansys CFX soveltuvat pienjännitekojeissa tarvittavien mekaanisten, termisten ja sähkömagneettisten ilmiöiden simulointiin. Ensimmäisessä esimerkissä simuloitiin kuusi-napaisen kuormankytkimen vääntömekanismin vääntövivun mekaanisia rasituksia, koska alkuperäinen vääntövipu ei kestänyt vaatimusten mukaisesti. Simuloimalla tarkasteltiin osaan suunniteltujen rakennemuutosten vaikutusta rasituksiin. Simulointitulosten perusteella vahvistettu rakenne on noin 16,5 % alkuperäistä osaa kestävämpi. Tulosta tukevat kokemukset vahvistetun osan käyttöönnotosta. Esimerkki osoittaa, että simuloimalla Ansys Multiphysicsillä voidaan nopeasti arvioida rakennemuutosten vaikutusta osan kestävyteen.

Toisessa esimerkissä simuloitiin veitsikoskettimia yhteen puristavaa sähkömagneettista voimaa erilaisilla kosketinrautojen rakenteilla. Yhdessä rakenteessa oli muokattu kosketinraudan kiinnitysreikien muotoa, jotta magneettivuolla olisi esteettömämpi kulkureitti, ja kahdessa muussa rakenteessa oli pienennetty rautojen välistä ilmaväliä. Simulointitulosten perusteella magneettivuon kulkureitillä ei ole vaikutusta yhteen puristavaan voimaan. Ilmavälin pienentäminen 2,5 mm:stä puolella millimetrillä kasvatti kokonaisvoimaa kolmanneksella, kun taas pienentäminen yhdellä millimetrillä kaksinkertaisti puristavan voiman. Simulointiesimerkki osoittaa, että Ansys Multiphysics soveltuu hyvin myös sähkömagneettisten voimien simulointiin.

Kolmannessa esimerkissä simuloitiin Ansys CFX:llä sulakevahdin jäähtymistä eri asennusasennoissa. Jäähtyminen tapahtui ilman luonnollisella konvektiolla ja johtumalla rakenteita pitkin. Simulointimalli rakennettiin siten, että kotelon ilma-aukot määritettiin avoimiksi ja vakiolämpöisiksi, ja komponentteihin määritettiin vakio lämpöteho. Tässä simulointitapauksessa ongelmaksi osoittautui riittävän tarkan geometrian mallintaminen piirilevyn johdotusten sekä siinä olevien komponenttien osalta. Huolimatta saatujen lämpötilojen epätarkkuudesta voidaan simulointituloksista tarkastella ilman virtausta ja sen kautta leviävää lämpöä. Lämmönsiirron ja virtausten mallintamiseen tarvitaan enemmän ja monimutkaisempia määrittämiä kuin mekaanisten

rasitusten tai sähkömagneettisten ilmiöiden tapauksessa, joten jäähtymisen simulointi ei ole aivan yhtä nopeaa kuin mekaanisten ja sähkömagneettisten ilmiöiden simulointi.

Toimenpiteinä simulointitoiminnan tehostamiseksi suositellaan simulointiohjelmistojen, tietotekniikan ja simulointitoiminnan tutkimuksen kehityksen seuraamista ja omalta kannalta hyödyllisten kehitystulosten soveltamista omaan simulointitoimintaan. Lisäksi tuotekehityksen henkilökunnalle tulee selvittää simuloinnin mahdollisuudet ja rajoitukset, jotta huomattaisiin simuloinnilla ratkaistavat ongelmat paremmin odottamatta kuitenkaan liikoja. Myös simulointiohjelmistojen yhteiskäyttöä muiden ohjelmien kanssa tulee selvittää ja tehostaa. Simulointitiedon kerryttäminen ja kertyneen tiedon hyödyntäminen nopeuttaa uusien simulointien tekoa, kun vanhoista simuloinneista nähdään, mitä voidaan simuloida ja miten selvittää mallintamisen ongelmia.

Työn tuloksia käytetään uudistettaessa ABB Oy:n Pienjännitekojeet-yksikön tuotekehitysprosessia. Uudessa tuotekehitysprosessissa on tarkoitus huomioida entistä paremmin simuloinnin tuomat mahdollisuudet tuotekehitysprojektien eri vaiheissa.

## LÄHDELUETTELO

- ABB Oy, Low Voltage Products (2009). *Switches, Automatic Transfer Switches* [online]. Vaasa: KATANN Document Factory Oy [siteerattu 20.1.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot209.nsf/0/01498fe021f05df6c1257662003ead73/\\$File/1SCC303001B0201.pdf](http://abblibrary.abb.com/global/scot/scot209.nsf/0/01498fe021f05df6c1257662003ead73/$File/1SCC303001B0201.pdf)>.
- ABB Oy, Pienjännitekojeet (2003). *Kuormankytkimet, SwitchLine*. Vaasa. Waasa Graphics Oy. Esite OT\_OETL1 FI 03\_09.
- ABB Oy, Pienjännitekojeet (2005). *Sulakevahti, OFM ja OFS* [online]. Vaasa: Waasa Graphics Oy [siteerattu 20.1.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d7841de0e6b88ac465257115002fd0c2/\\$File/1SCC314002C0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/d7841de0e6b88ac465257115002fd0c2/$File/1SCC314002C0201.pdf)>.
- Ansys (2009a). *Performance Guide*. Release 12.0 April 2009. Ansys Multiphysics -ohjelman ohjetiedosto.
- Ansys (2009b). *Welcome to ANSYS, Inc. - Corporate Homepage* [online] [siteerattu 10.11.2009]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.Ansys.com>>.
- Ansys (2010). *Ansys CFX - Features* [online]. [siteerattu 24.03.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.Ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx/features.asp>>.
- Beisheim, Jeff (2010). Boosting Memory Capacity with SSDs [online]. *Ansys Advantage*, 2010 [siteerattu 24.3.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.Ansys.com/magazine/issues/vol4-iss1-2010/ssd.pdf>>.
- Boardman, Richard (2005). Computer simulation studies of magnetic nanostructures [online]. Väitöskirja. Faculty of Engineering, Science and Mathematics. University of Southampton, United Kingdom [Siteerattu: 3.3.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.soton.ac.uk/~rpb/thesis.pdf>>
- Cellier, François E. (1991). *Continuous System Modeling*. New York etc.: Springer-Verlag. 755 s. ISBN 0-387-97502-0.
- Haario, Heikki, Matti Heiliö, Jari Järvinen & Pekka Neittaanmäki (2001). *Matemaattiset menetelmät suomalaisten yritysten t&k-toiminnassa* [online]. Tekes. Teknologia katsaus 104/2001 [siteerattu 1.10.2009]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://www.tekes.fi/fi/document/43373/matemaattiset\\_menetelmat\\_pdf](http://www.tekes.fi/fi/document/43373/matemaattiset_menetelmat_pdf)>.

- Haataja, Juha, Jussi Heikonen, Yrjö Leino, Jussi Rahola, Juha Ruokolainen & Ville Savolainen (2002). *Numeeriset menetelmät käytännössä* [online]. Helsinki: CSC – Tieteellinen laskenta Oy [siteerattu 17.12.2009]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.csc.fi/csc/julkaisut/opaat>> ISBN 952-9821-81-6.
- Hautala, Jukka (2006). *Veitsikoskettimen sulkeminen oikosulkua vastaan*. Diplomityö. Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Vaasan yliopisto. 88 s.
- Heiskanen, Jari (2008). *Veitsikoskettimen sähkömagneettisten voimien simulointi: Simulointiohjelman hankinta*. Kandidaatintutkielma. Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Vaasan yliopisto. 52 s.
- Holm, Ragnar (2000). *Electric Contacts: Theory and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer. 4. painos. 482 s. ISBN 3-540-03875-2
- Kareta, Frank & Manfred Lindmayer (1998). Simulation of the gasdynamic electromagnetic processes in low voltage switching arcs. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – Part A*. Vol. 21 No. 1. March 1998. Sivut 96–103.
- Kolmonen, Rainer (1998). *Kytöimen kosketinrakenteiden tutkiminen*. Insinööritö. Sähkövoimatekniikan linja. Vaasan teknillinen oppilaitos. 81 s.
- Kukkurainen, Martti (2008). *PTC-kuormanerotuksen kehittäminen ja koestus*. Insinööritö. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Vaasan ammattikorkeakoulu. 50 s.
- Leppävuori, Juha, Markus Olin, Asko Valli, Seppo Lahti, Heikki Hasari, Ari Koistinen & Seppo Leppänen (2009). *SISU – Simuloinnin ja suunnittelun uudet sovellustavat ja liiketoiminta: Hyödyn elementit ja käyttöönoton prosessit: SISUQ8* [online]. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu [siteerattu 4.9.2009]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://www.metropolia.fi/fileadmin/user\\_upload/Julkaisutoiminta/METROPOLIA\\_sarjaD\\_tyopaperit.pdf](http://www.metropolia.fi/fileadmin/user_upload/Julkaisutoiminta/METROPOLIA_sarjaD_tyopaperit.pdf)>. ISBN 978-952-5797-03-9. ISSN 1797-8203.
- Lindmayer, Manfred, Erik Marzahn, Alexandra Mutzke, Matthias Springstubbe (2003). Low-voltage Switching arcs – experiments and modeling. *XVth Symposium on Physics of Switching Arc*, Brno, Tšekki, syyskuu 2003. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.htee.tu-bs.de/forschung/veroeffentlichungen/LindmayerBrno2003.pdf>>

- Mutzke, Alexandra, Thomas Rüther, Michael Kurrat, Manfred Lindmayer, Ernst-Dieter Wilkening (2007). Modeling the arc splitting process in low-voltage arc chutes. *53<sup>rd</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Pittsburgh, 2007. Sivut 175–182.
- Olin, Markus, Seppo Lahti, Asko Valli, Heikki Hasari, Ari Koistinen & Seppo Leppänen (2007). *SISU – Simuloinnin ja suunnittelun uudet sovellustavat ja liiketoiminta: Projektin tavoitteet ja simulointiesimerkkien yhteenveto* [online]. Helsinki: VTT [siteerattu 4.9.2009]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2405.pdf>> ISBN 978-951-38-6955-7.
- Saarijärvi, Eeva-Liisa (1997). *Ympäristötekijöiden vaikutus pienjännitekytkinlaitteiden lämpenemiin*. Insinööriyö. Sähkövoimatekniikan linja. Vaasan teknillinen oppilaitos. 68 s.
- SFS-EN 60947-1 (1998). *Pienjännitekytkinlaitteet. Osa 1: Yleiset vaatimukset*.
- SFS-EN 60947-3 (1999). *Pienjännitekytkinlaitteet. Osa 3: Kytkimet, erottimet kytkinerottimet ja varokekytkinyhdistelmät*.
- Shaw, Christopher T. (1992). *Using Computational Fluid Dynamics*. New York: Prentice Hall. 125 s. ISBN 0-139-28714-0.
- Shea, John J., Birch De Vault & Yun-Ko Chien (1994). Blow-open forces on double-break contacts. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – Part A*. Vol. 17, No. 1. March 1994. Sivut 32–38.
- Steinberg, Dave S. (1991). *Cooling Techniques for Electronic Equipment*. New York: John Wiley & Sons. 2. painos. 483 s. ISBN 0-471-52451-4.
- Tekes (2010). *MASI - Mallinnus ja simulointi 2005-2009 – MASIT18* [online] [siteerattu 9.4.2010]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/MASI/fi/MASIT18.html>>.
- UL 98 (2004). *UL Standard for Safety for Enclosed and Dead-Front Switches, UL 98*. Thirteenth Edition, Dated February 25, 2004.