

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Miikka Hakuli

RUORIPOTKURIMOOTTORIN LÄMPÖMALLINNUS
KOLMIULOTTEISELLA KENTÄNLASKENTA-OHJELMISTOLLA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa *21.2.2000*

Työn valvoja


Professori Tapani Jokinen

Työn ohjaaja


TkT Antero Arkkio

Tekijä:	Miikka Hakuli	
Työn nimi:	Ruoripotkurimoottorin lämpömallinnus kolmiulotteisella kentänlaskentaohjelmistolla	
Päivämäärä:	18.2.2000	Sivumäärä: 78
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikka	
Professuuri:	S-17 Sähkötekniikka (sähkömekaniikka)	
Työn valvoja:	Professori Tapani Jokinen	
Työn ohjaaja:	TkT Antero Arkkio	
<p>Tässä diplomityössä on tehty kolmiulotteiset lämpömallit ruoripotkurikäyttöön suunnitelluille oikosulkukoneelle ja kestopagnetoidulle tahtikoneelle. Erityisesti on keskitytty tilanteeseen, jossa koneen jäähditys perustuu lämmön johtumiseen podin kuoren läpi meriveteen. Oikosulkukoneelle on lisäksi tehty kaksiulotteista tilannetta kuvaava malli, jonka avulla tutkittiin podin kaulan vaikutusta sen kohdalla olevien vyyhtien lämpenemään. Kun kaulan alueen lämmönsiirtymiskertoimen arvoksi asetettiin neljäsosa muiden ulkopintojen kertoimen arvosta, kaulan alueen vyyhtien lämpenemä nousi 13% muiden vyyhtien lämpenemää korkeammaksi. Lähtöarvoina annettavat häviötehotiheydet saatiin kyseiselle koneelle tehdyistä sähkömagneettisista laskelmista. Reunaehtoina annettavat konvektiiviset lämmönsiirtymiskertoimet laskettiin kirjallisuudessa esiintyvistä yhtälöistä. Mallinnus- ja analysointityökaluina käytettiin I-DEAS Master Series™ –mekaniikkasuunnitteluohjelmistoa ja sen TMG Thermal Analysis™ –modulia. Vaikkakin ohjelmisto kaikkine piirteineen olikin hankalasti omaksuttava, osoittautui se kelpo työkaluksi sähkökoneiden lämpömallinnukseen.</p>		
Avainsanat:	I-DEAS, TMG, potkurikäyttö, lämpökenttä	

Author:	Miikka Hakuli
Name of the Thesis:	Three-dimensional thermal modeling of podded propulsion drive.
Date:	18.2.2000
	Number of pages: 78
Department:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S-17 Electrical Engineering (Electromechanics)
Supervisor:	Professor Tapani Jokinen
Instructor:	Dr Antero Arkkio
<p>In this thesis, three-dimensional thermal models were developed for analysing the steady-state temperatures of electrical machines designed for podded propulsion drive. The focus was in the structure, where the heat-transfer from the machine is based on conduction through the pod shell. For the induction machine, also a special model was made for analysing a two-dimensional temperature field. With this model, the influence of pod's neck to the temperature of coils underneath it could be observed. When the value of the heat-transfer coefficient from the neck-area was set as one fourth of the value of coefficient from other outer surfaces, the temperature rise of the coils underneath the neck was 13% higher than the temperature rise of other coils. Sources for thermal calculation, electrical power losses, were obtained from numerical analysis of electromagnetic field. Heat transfer coefficients for convection surfaces were calculated using the empirical equations from the literature. The modeling and analysing tools were I-DEAS Master Series™ and it's TMG Thermal Analysis™ - module. Despite of the difficulties in learning to use the program and all it's specific features, I-DEAS suited quite well for analysing thermal fields of electrical machines.</p>	
Keywords:	I-DEAS, TMG, podded drive, temperature field

Alkulause

Tämä diplomityö tehtiin Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolla sähkömekaniikan laboratoriossa 6.1999 – 2.2000 välisenä aikana. Työ tehtiin osana uuden kestopagnetoidun ruoripotkurimoottorin kehitysprojektia.

Työn kuluessa olen saanut ABB Industry Oy:n suunnalta arvokasta ohjausta sekä lukuisia hyödyllisiä ohjeita ja vinkkejä. Lämpimän kiitoksen ansaitsevat Eerik Kinnunen, Ville Voutilainen, Jan Westerlund sekä erityisesti Juhani Mantere, joka alusta alkaen uhrasi aikaansa sekä resurssejaan työhöni ja lukuisiin kohtaamiini ongelmiin.

Erytiskiitokset haluan antaa ohjaajalleni Antero Arkkiolle, joka on jo ennen tätä työtä ollut mitä ihmeellisimpien kysymyksieni kohteena. Hänellä on aina riittänyt aikaa, kärsivällisyyttä ja huumorintajua vastata kaikkiin näihin kysymyksiin.

Professori Tapani Jokista haluan kiittää hänen osoittamastaan luottamuksesta ja niistä mahdollisuuksista, joita hän on tarjonnut kesätöiden, osa-aikatöiden ja diplomityön tekemiseksi laboratoriossaan. Kiittäisin häntä myös kaikista näiden vuosien varrella käydyistä keskusteluistamme sekä saamistani lukuisista neuvoista ja ohjauksesta.

Lopuksi haluan kiittää kaikkia sähkömekaniikan laboratorion työntekijöitä loistavasta työilmapiiristä sekä siitä yhteishengestä, jonka turvin voitokkaasti ratkaistiin niin työhön liittyviä ongelmia kuin jalkapallo-otteluitakin.

Helsingissä, 21.2.2000:



Miikka Hakuli

Sisällysluettelo

ALKULAUSE	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	9
1.1 RUORIPOTKURIMOOTTORIN JÄÄHDYTYS	10
1.2 KÄYTETYT LASKENTATYÖKALUT.....	11
1.3 TYÖN TAVOITE	12
2 LÄMPÖLÄHTEET.....	13
2.1 VIRTALÄMPÖHÄVIÖT.....	13
2.2 RAUTAHÄVIÖT.....	14
2.3 TUULETUS- JA HANKAUSHÄVIÖT	15
3 LÄMMÖNSIIRTO	16
3.1 JOHTUMINEN	16
3.2 KONVEKTIO	16
3.3 LÄMMÖNSIIRTYMISKERTOIMIEN MÄÄRITTÄMINEN.....	19
3.4 SÄTEILY	23
4 LÄMPÖKENTÄN NUMEERINEN RATKAISU	25
4.1 LÄMPÖKENTÄN DIFFERENTIAALIYHTÄLÖ.....	25
4.2 NUMEERISET MENETELMÄT.....	26
Lämpöverkot.....	27
Elementtimenetelmä	28
Differenssi- ja kontrollitilavuusmenetelmä.....	29
5 LÄMPÖMALLIN LUOMINEN I-DEAS - OHJELMASSA	33
5.1 GEOMETRIAN MALLINNUS	34
5.2 TILAVUUSMALLIN VERKOTTAMINEN	35
Elementtiverkon luontimenetelmät ja geometriaperusteisuus.....	35
Materiaaliparametrien asettaminen	39
5.3 ALKUARVOT JA REUNA-EHDOT	40
5.4 TMG-RATKAISIJA JA JÄLKIPROSESSOINTI.....	42
6 RUORIPOTKURIMOOTTORIN LÄMPÖMALLINNUS	44
6.1 TILAVUUSMALLINNUS	44
Konegeometrian yksinkertaistukset	44
Kolmiulotteinen malli	45

	Kaksiulotteinen malli.....	50
6.2	ELEMENTTIVERKOTUS JA SIMULOINTIPARAMETRIT.....	52
	Elementtiverkotus.....	52
	Vyyhtimateriaalin redusointi.....	54
7	LÄMPÖLASKENNAT	57
7.1	OIKOSULKUKONE.....	57
	Kolmiulotteinen malli.....	57
	Kaksiulotteinen malli.....	65
7.2	KESTOMAGNETOITU TAHTIKONE.....	68
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	74
9	YHTEENVETO	76
10	LÄHTEET	77

Käytetyt symbolit ja lyhenteet

A	magneettikentän vektoripotentiaali
A	poikkipinta-ala
B	magneettivuon tiheys
b	ilmavälin pituus radiaalisuunnassa
C_g	sähkökoneen geometriasta määräytyvä kerroin
c	materiaalin ominaislämpökapasiteetti
D_i	staattorin ilmavälihalkaisija
d	paksuus
E	lämpöenergia
E_g	kappaleessa syntyvä lämpöenergia
E_{in}	kappaleeseen tuleva lämpöenergia
E_{out}	kappaleesta poistuva lämpöenergia
E_{st}	kappaleeseen varastoituva lämpöenergia
F_g	sähkökoneen geometriasta määräytyvä kerroin
f	taajuus
G	lämpökonduktanssi
h	konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin
I	virran tehollisarvo
J	virrantiheys
\mathbf{J}	virrantiheysvektori
K_H	materiaalille ominainen hystereesikerroin
K_E	materiaalille ominainen pyörrevirtakerroin
k	lämmönjohtavuus
l	johtimen pituus
l_1	podin päädyn suoran osan pituus
l_2	etäisyys staattorin päädyistä mallinnetun alueen etureunaan
L	karakteristinen mitta
N	Fourier –komponenttien lukumäärä Fourier’ <i>n</i> sarjassa
Nu	Nusseltin luku
P	teho
P_{FeH}	hystereesihäviöteho
P_{FeE}	pyörrevirtahäviöteho
P_{res}	resistiivinen teho
p_{add}	lisähäviötehotiheys
p_h	häviötehotiheys
Pr	Prandtin luku
Q	lämpövirta
q	lämpövirrantiheys
\mathbf{q}	lämpövirrantiheysvektori
r_p	podin säde
Re	Reynoldsin luku
t	aika
T	lämpötila
T_n	pinnan <i>n</i> lämpötila
Ta	Taylorin luku
v	ainevirtauksen nopeus
v_∞	ainevirtauksen nopeus rajakerroksen ulkopuolella
V	tilavuus
w	leveys

α	ominaisresistanssin lämpötilakerroin
δ_T	termisen rajakerroksen paksuus
ε_r	suhteellinen säteilyluku
ξ	tilavuuden skaalauskerroin
η	tuulettimen hyötysuhde
θ	lämpötilaero
λ	painofunktio
μ	kinemaattinen viskositeetti
ρ	tiheys
ρ_e	ominaisresistanssi
σ	Stefan-Boltzmanin vakio
τ	sähkölevyn paksuus
ϕ	sähköpotentiaali
ω	roottorin kulmataajuus

Alaviitat

75, 20	lämpötila celcius-asteissa
ag	ilmaväli (air-gap)
Cu	kupari
coil	vyyhtiin liittyvä suure
ins	eristeeseen liittyvä suure (insulation)
pod	podin kuoreen liittyvä suure
red	reduoitu arvo
r	roottori
s	staattori
x, y, z	kartesisen koordinaatiston akselit

1 Johdanto

Sähkömekaanisten tuotteiden suunnittelu on monitahoinen prosessi, jossa yhdistyy tuotteen sähkömagneettinen, mekaaninen sekä terminen suunnittelu. Näiden lisäksi tänä päivänä tuotekehitys- ja suunnitteluprosessiin kuuluu erottamattomasti myynniltä, markkinoinnilta sekä asiakkaalta saadut näkemykset ja palautteet. Termisellä mitoituksella vaikutetaan ratkaisevasti laitteen kokoon sekä elinikään. Sen lisäksi, että merkitys on suuri laitteen luotettavuuden ja suorituskyvyn kannalta, heijastuu sen vaikutukset myös yrityksen kannattavuuteen. Markkinoilla kovassa kilpailutilanteessa yhdeksi menestyksen avaimeksi nousee se, kuinka kalliit materiaalit saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti. Raja-arvon materiaalikustannuksissa säästämiseksi laitteen fyysistä kokoa pienentämällä asettaa rakenteiden lämpötilojen nousu. Laitteen koon pienentäminen johtaa nimittäin siinä syntyvien sähkömagneettisten häviöiden kasvuun, mikäli sen nimellisteho pidetään vakiona.

Niin termisen kuin muunkin suunnittelun apuna on jo pitkään käytetty mittausten ja prototyypin lisäksi numeerisia laskentamenetelmiä. Varsinkin isojen sähkökoneiden tapauksessa prototyypin valmistus on niin kallista ja aikaa vievää puuhaa, ettei siihen ole useinkaan mahdollista ryhtyä. Mittauksien avulla saatu informaatio on äärimmäisen tärkeitä. Paitsi että niiden avulla varmistutaan siitä, että kone täyttää asiakkaan sille asettamat vaatimukset, voidaan niistä saadulla informaatiolla tarkentaa laskentamenetelmien tarkkuutta. Toistaiseksi suunnittelun ja mitoituksen tukena olevat ohjelmistot on pääsääntöisesti tehty itse. Vaikka markkinoilla on jo pitkään ollut kaupallisia kentänlaskentaohjelmistoja, eivät ne ole saavuttaneet valmistajiensa tavoittelemaa suosiota. Syynä tähän on pääasiassa se, että itse tehdyt ohjelmat ovat vapaammin räätälöitävissä ja mukautettavissa kulloiseenkin tilanteeseen sopiviksi. Tilanteen muuttua, ja on osin jo muuttanutkin, kolmannen ulottuvuuden huomioinnon analyysissä. Tämän ansiosta ohjelmistot siirtyvät jo sellaiselle tasolle, ettei niiden tekemiseen itse ole järkevää, tai edes mahdollista ryhtyä. Epäilemättä ongelmaksi muodostuu tällöin se, kuinka yleiskäyttöön suunnitellut ohjelmat saadaan vastaamaan hyvin erityyppisten käyttäjien, asiakkaiden, erilaisia tarpeita?

1.1 Ruoripotkurimoottorin jäähdytys

Ruoripotkurijärjestelmässä potkurimoottori sijoitetaan laivan peräosan alla olevaan tilaan, podiin. Tämä kääntyy 360° pysty akselinsa ympäri, jolloin erillistä peräsintä laivan ohjaamiseksi ei tarvita. Uudella ratkaisulla saavutetaan useita etuja perinteiseen järjestelyyn verrattuna: Laivan parempi ohjattavuus, tilan ja energian säästö sekä parantuneet ääni- ja rungon värinäöminaisuudet.

Toistaiseksi ruoripotkurimoottorijärjestelmä on lyönyt itsensä läpi jäänmurtajissa ja loistoristeilijöissä. Käyttötarkoituksestaan johtuen ruoripotkurimoottoreilta vaaditaan suorituskyvyn lisäksi luotettavuutta sekä energiataloudellisuutta. Nämä seikat yhdistettynä koneen fyysisestä sijoituspaikasta syntyviin haasteisiin nostavat niin sähkömekaanisen, hydrodynaamisen kuin termisenkin suunnittelun vaatimukset aivan uudelle tasolle.

Ruoripotkurimoottorit ovat muiden hidaskäyntisten suuritehoisten käyttömoottoreiden tapaan tahtikoneita. Tällöin koneen staattorikäänitystä syötetään kolmivaiheverkosta ja koneen roottori luo magneettikentän ilmapäliin. Se, kuinka tämä magneettikenttä synnytetään, vaikuttaa oleellisesti koneen jäähdytysratkaisuun.

Perinteisesti magneettikenttä synnytetään siirtämällä tasavirtaa roottorissa olevaan magnetointikäänitykseen. Tällöin roottorissa syntyy resistiivisiä häviöitä, jotka nostavat roottorin lämpötilaa. Koska roottorin pyörimisliikkeen aikaansaama ilmankierto ei tässä tapauksessa yleensä riitä jäähdyttämään roottoria, ollaan turvauduttu moottoritilan pakkotuuletukseen. Tällöin jäähdyttävää ilmaa puhalletaan laivan peräosasta moottoritilaan podin kaulassa olevien ilmanakanavien kautta. Moottoritilassa ilma työntyy koneen päätyosista ilmapäliin jäähdyttäen vyyhdenpäitä sekä käänityksiä ja poistuu staattoripaketin radiaalisia ilmasolia pitkin takaisin kaulan ilmanakanaviin. Uotila on diplomityössään (1996) tutkinut eri jäähdytyskaasujen, virtausnopeuksien sekä paineiden vaikutuksia ruoripotkurimoottorin perinteisen jäähdytyksen tehokkuuteen.

Vaihtoehtoinen tapa magneettikentän synnyttämiseksi on sijoittaa roottoriin kestopagneetteja, mikä johtaa roottorissa syntyvän häviötehon oleelliseen putoamiseen. Mikäli tällöin kestopagneettien lämpötila saadaan pelkän roottorin pyörimisliikkeen synnyttämän jäähdytysvaikutuksen avulla pysymään turvallisella alueella, voidaan ulkoisesta tuuletuksesta mahdollisesti luopua. Tämä edellyttää tietenkin sitä, että myös staattori ja sen vyyhdet – etenkin vyyhdenpäiden alueella – saadaan jäähtymään

tarpeeksi tehokkaasti. Koska merivesi on ilmaan verrattuna varsin tehokas lämmönjohde, on varsin luonnollista ajatella ratkaisua, jossa staattorin jäähdytys perustuu lämmönjohtumiseen podin kuoren läpi meriveteen. Tällä jäähdytysratkaisulla saavutettaisiin ilmajäähdytykseen nähden mm. seuraavia etuja:

- Potkurin hydrodynaamisen hyötysuhteen parantuminen podin halkaisijan pienentyessä sekä kaulan kaventuessa.
- Tilan vapautuminen laivan peräosassa, erityisesti korkeussuunnassa, lämmönvaihtimien sekä tuuletusjärjestelmien käydessä tarpeettomiksi.
- Energian säästö ja rakenteen yksinkertaistuminen.

Jotta tehokkaasta lämmönjohtumisesta staattorista podin kuoreen voidaan varmistua, tulee liitosrajapinnasta saada mahdollisimman tiivis, ts. pintojen on oltava sileitä ja puristuspaineen kova. Tällä jäähdytysmenettelyllä ongelmaksi saattaa muodostua myös vyyhdenpäiden jäähdytys. Ilman ollessa huomattavasti rautaa huonompi lämmönjohde, ei lämmönsiirto vyyhdenpäistä päätytilan ilman kautta podin kuoreen ole ilman erityisjärjestelyjä välttämättä tarpeeksi tehokasta. Yksi ratkaisu voisi olla akseliin kiinnitettävät tuulettimet, jotka lisäisivät ilmankiertoa vyyhdenpääalueella.

1.2 Käytetyt laskentatyökalut

Tämän työn lämpömallit tehtiin ja analysoitiin SDRC:n (Structural Dynamics Research Corporation) I-DEAS Master Series 6m1™ -mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla Windows NT™ -ympäristössä. Ohjelmisto on verrattain laaja käsittäen koko tuotesuunnittelun 3D-mallinnuksesta simulointiin ja tulosten analysointiin. Käytettyyn ohjelmistolisenssiin sisältyi myös MAYA Heat Transfer Technologies™:n TMG Thermal Analysis™ –laskentamoduli, joka on suunniteltu nimenomaan lämmönsiirtymisongelmien mallinnukseen ja ratkaisuun (SDRC, 1999). Laskennat suoritettiin 450MHz:n Pentium III -suorittimella ja 384 megatavun keskusmuistilla varustetulla PC:llä. Lämpölaskentaan lähteiksi annettavat häviöt on mallista riippuen laskettu joko ABB Industry Oy:n analyttisillä ohjelmilla tai sähkömekaniikan laboratorion FCSMEK –elementtimenetelmäohjelmistolla.

1.3 Työn tavoite

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää ruoripotkurimoottorikäyttöön tarkoitetuille oikosulku- ja kestopagnetoiduille tahtikoneille kolmiulotteiset lämpömallit pysyvän tilan lämpökentän analysoimiseksi. Samalla nähdään, kuinka kaupallinen kentänlaskentaohjelmisto soveltuu sähkökoneiden lämpömallinnukseen PC-ympäristössä mallinnusominaisuuksiensa, laskentanopeutensa, toiminnan luotettavuutensa sekä mallin päivitettävyyden osalta. Mallinnuksessa pyritään soveltamaan sellaisia geometriaa yksinkertaistavia ratkaisuja, joiden avulla elementtien lukumäärä sekä ratkaisuun vaadittava aika saadaan alkuperäistä tilannetta oleellisesti muuttamatta minimoitua. Tämän työn puitteissa lämpömalleja ei pystytä hienosäätämään tarkoiksi mittaustietojen vähäisyydestä johtuen. Näin ollen joudutaan tyytymään sellaisten mallinnusmenetelmien löytämiseen, joilla geometrian kuvaaminen, reunaehtojen ja alkuarvojen asettaminen sekä suuntaa-antavan lämpökentän ratkaiseminen onnistuu nopeasti ja vaivattomasti.

2 Lämpölähteet

Sähkökone on energiamuunnin, joka muuttaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi tai päinvastoin. Prosessi ei ole ideaalinen, sillä hyötysuhteen määräämä osa koneeseen tulevasta energiasta päätyy häviöenergiaksi muuttuen lämmöksi koneen eri osissa. Häviöt jaetaan syntymekanisminsa perusteella kolmeen osaan: Virtalämpöhäviöt, rautahäviöt sekä tuuletus- ja hankaushäviöt. Tämän työn lämpömallien häviöt ovat peräisin ko. sähkökoneelle tehdyistä sähkömagneettisista laskelmista, jotka on tehty sähkömekaniikan laboratoriossa kehitetyllä FCSMEK-elementtimenetelmä-ohjelmistolla ja ABB Industry Oy:n analyttisillä ohjelmilla.

2.1 Virtalämpöhäviöt

Sähkövirta aiheuttaa johtimessa sen resistanssiin ja siinä kulkevan virran neliöön verrannolliset häviöt:

$$P_{\text{res}} = RI^2. \quad (2.1)$$

Johtimen tasavirtaresistanssi on puolestaan suoraan verrannollinen sen pituuteen l sekä ominaisresistanssiin ρ_e ja kääntäen verrannollinen sen poikkipinta-alaan A :

$$R = \frac{\rho_e l}{A}. \quad (2.2)$$

Koska vaihtovirralla johtimen resistanssi kasvaa virranahdosta johtuen, jaetaan staattorikäätymyksen johtimet useisiin osajohtimiin. Tällöin virranahdon merkitys jää sen verran vähäiseksi, että tasavirtaresistanssin käyttö häviöitä laskettaessa on hyväksyttävää. Sähkökoneissa johdinmateriaaleina käytettävien kuparin ja alumiinin ominaisresistanssit ovat voimakkaasti lämpötilariippuvia. Kuparin ominaisresistanssi lämpötilassa 20°C on $\rho_{e,20} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Muissa lämpötiloissa sen arvo saadaan yhtälöstä

$$\rho_e = \rho_{e,20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})], \quad (2.3)$$

missä α on ominaisresistanssin lämpötilakerroin, jonka arvo kuparin ja alumiinin tapauksessa on $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$.

Lämpöläskelmissä lähteinä toimivat häviötehot annetaan tilavuusyksikköä kohden. Edellä esitettyjen yhtälöiden pohjalta häviötehotiheydelle p_h voidaan kirjoittaa:

$$p_h = \frac{P}{V} = \frac{RI^2}{V} = \frac{\rho_e l I^2}{A^2 l} = \rho_e \left(\frac{I}{A}\right)^2 = \rho_e J^2$$

$$\Rightarrow p_h = J^2 \rho_{e,20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})], \quad (2.4)$$

missä J on virrantiheys (A/m^2) ja V johtimen tilavuus.

FCSMEK laskee kuparihäviöt erikseen kullekin vaiheelle ja laskee ne tämän jälkeen yhteen. Yhtälöksi saadaan:

$$P_{res}^s = \sum_{i=1}^m R_i I_i^2, \quad (2.5)$$

missä m on vaiheiden lukumäärä. Resistanssit $R_1..R_m$ annetaan ohjelmaan syöttötietoina. Oikosulkukoneen tapauksessa roottorin häkkikämmityksen resistiiviset häviöt lasketaan kaavalla

$$P_{res}^r = \int_V \mathbf{J} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} dV, \quad (2.6)$$

missä V on roottorisauvojen tilavuus roottorin levypaketin alueella ja

\mathbf{A} on magneettikentän vektoripotentiali,

\mathbf{J} on virrantiheysvektori.

2.2 Rautahäviöt

Vaihteleva magneettikenttä synnyttää häviöitä sähkökoneen magneettipiirin johtimissa – staattorin ja roottorin levysydämissä. Näitä häviöitä kutsutaan rautahäviöiksi ja ne koostuu hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Hystereesihäviöt syntyvät, kun raudan magnetointiin sitoutunut energia ei täysin vapaudu magnetoitaessa sitä vastakkaiseen suuntaan. Hystereesihäviöt ovat verrannollisia kentän taajuuteen f sekä magneettivuontiheyden huippuarvoon \hat{B} . Tämä on ymmärrettävää, sillä yhden jakson aikana syntyneet hystereesihäviöt tilavuutta kohti vastaavat raudan magnetoitumista kuvaavan hystereesisilmukan sisään jäävää pinta-alaa. Steinmetzin empirinen yhtälö antaa hystereesihäviöille (Del Toro, 1985)

$$P_{FeH} = V f K_H \hat{B}^n, \quad (2.7)$$

missä V on raudan tilavuus ja K_H materiaalikohtainen vakio. Eksponentti n vaihtelee materiaalista riippuen välillä 1.5...2.5.

Lenzin lain mukaisesti sähköisesti johtavaan materiaaliin syntyy vaihtelevan magneettikentän ansiosta virtoja, joiden synnyttämä kenttä pyrkii vastustamaan muutosta. Syntyviä virtoja kutsutaan pyörrevirroiksi ja niiden aiheuttamia häviöitä pyörrevirtahäviöiksi. Juuri näiden häviöiden minimoimiseksi sähkökoneet tehdään levyrakenteisina, jolloin ainakin aksiaalisuuntaisten virtojen syntyminen estetään. Hystereesihäviöistä poiketen pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia taajuuden toiseen potenssiin kaavan

$$P_{\text{FeE}} = K_{\text{E}} f^2 \hat{B}^2 \tau^2 V, \quad (2.8)$$

mukaisesti (Del Toro, 1985), missä K_{E} on materiaalista riippuva vakio ja τ sähkölevyn paksuus.

FCSMEK:ssä rautahäviöt lasketaan aika-askel -menetelmän yhteydessä kaavoilla (Arkkio et al., 1992):

$$P_{\text{FeH}} = \int_{V_{\text{C}}} \left[\sum_{n=1}^N K_{\text{Hn}} (n\omega_s) B_n^2 \right] dV \quad (2.9)$$

$$P_{\text{FeE}} = \int_{V_{\text{C}}} \left[\sum_{n=1}^N K_{\text{En}} (n\omega_s)^2 B_n^2 \right] dV, \quad (2.10)$$

missä N on Fourier-komponenttien kokonaismäärä, K_{Hn} ja K_{En} n :nnen Fourier-komponentin hystereesi- ja pyörrevirtakertoimet ja ω_s syöttöjännitteen perustaajuus. Magneettikentän ratkaisussa FCSMEK ei ota huomioon rautahäviöitä. Nämä vaikuttavat kenttään vaimentamalla korkeataajuisia vuovaihteluita.

2.3 Tuuletus- ja hankaushäviöt

Sähkömagneettisten häviöiden lisäksi sähkökoneissa syntyy roottorin pyörimisestä sekä koneen tuuletuksesta aiheutuvia häviöitä. Mekaaninen kitka aiheuttaa häviöitä koneen laakereissa sekä liukurenkaiden hiiliharjoissa. Ilma puolestaan vastustaa roottorin ja sen kanssa samalla akselilla mahdollisesti olevien tuulettimien pyörimistä. Paitsi että ilman kitkan vaikutus nostaa sen lämpötilaa heikentäen jäähdytystehoa, toimii se myös lisäkuormana koneelle. Kuorman voittamiseksi kone ottaa enemmän virtaa, mikä taas johtaa resistiivisten häviöiden kasvuun.

3 Lämmönsiirto

Lämmönsiirrolla tarkoitetaan lämpötilaeron aikaansaamaa energian siirtymistä. Näin ollen aina kun väliaineessa esiintyy lämpötilaero, on seurauksena lämmönsiirto. Sähkökoneen eri rakenteissa syntyvät häviöt muuttuvat lämpöenergiaksi nostaen koneen lämpötilaa. Jotta koneen luotettavasta toiminnasta nyt ja tulevaisuudessa voidaan varmistua, on huolehdittava siitä, että lämpötilat pysyvät eristeluokkien sallimissa rajoissa. Lämpöenergia siirtyy koneesta ympäristöön johtumalla, konvektiolla sekä säteilemällä. Tuntemalla nämä ilmiöt voidaan koneen jäähtytys suunnitella siten, että kalliit materiaalit saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti ilman riskiä koneen eliniän lyhenemisestä.

3.1 Johtuminen

Lämmön johtuminen on väliaineessa tapahtuvaa lämmönsiirtoa, jonka aikaansaa lämpötilaero ja jonka välittäjänä toimii molekyylien ja atomien satunnainen värähtely. Ilmiötä kuvaa Fourierin lakina tunnettu yhtälö:

$$\mathbf{q} = -k\nabla T = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\mathbf{k}\right), \quad (3.1)$$

missä \mathbf{q} on lämpövirran tiheysvektori,

k on lämmönjohtavuus,

T on lämpötila.

Lämpövirrantiheys on vektorisuure ja se on aina tasalämpökäyrän normaalin suuntainen. Yhtälössä (3.1) oleva miinusmerkki kertoo lämpövirran tiheysvektorin osoittavan ja lämmön virtaavan aina matalamman lämpötilan suuntaan.

3.2 Konvektio

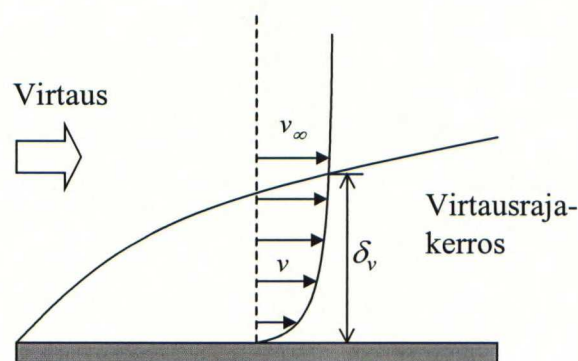
Konvektiivisella lämmönsiirrolla tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä kappaleen pinnan ja virtaavan kaasun tai nesteen välillä, kun näiden välillä on lämpötilaero. Ilmiötä kuvaa Newtonin jäähtymislaki:

$$q = h(T_s - T_\infty), \quad (3.2)$$

missä h on konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin,
 T_s on kappaleen pinnan lämpötila,
 T_∞ on liikkuvan nesteen tai kaasun lämpötila.

Konvektiivinen lämmönsiirto voidaan jakaa vapaaseen ja pakotettuun konvektioon sen mukaan, mikä on neste- tai kaasuvirtauksen syntymekanismi. Vapaassa konvektiossa virtaus syntyy, kun pinnan läheisyydessä oleva lämmennyt kaasu pyrkii ylöspäin kierrättäen samalla kylmempää ilmaa alempiin kerroksiin. Pakotetussa konvektiossa neste tai kaasu pakotetaan liikkeeseen ulkoisin keinoin tuulettimen, puhaltimen ym. avulla. Tämä on tilanne lähes poikkeuksetta myös sähkökoneiden tapauksessa, joiden jäähdytyskaasua kierrätetään joko koneen akselille kiinnitettyjen tuulettimien tai ulkoisten jäähdytysmekanismien toimesta.

Kappaleen pinnan läheisyydessä voidaan erottaa terminen rajakerros sekä virtausrajakerros (Incropera et al., 1985). Pinnan ja virtaavan aineen rajapinnassa virtausnopeus on pinnan ja virtaavan aineen molekyylien välisestä kitkasta johtuen nolla. Nämä rajapinnassa paikallaan pysyvät molekyylit hidastavat yläpuolellaan kulkevia molekyylejä, jotka taasen hidastavat seuraavan kerroksen molekyylejä. Hidastava vaikutus vaimenee pinnasta pois päin siirryttäessä, ja etäisyydellä $y=\delta_v$, missä δ_v on virtausrajakerroksen paksuus, saavutetaan vapaan virtauksen nopeus v_∞ (Kuva 3.1).



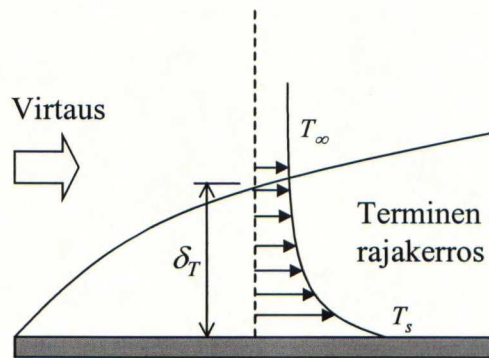
Kuva 3.1. Virtausrajakerros

Koska virtauksen ja kappaleen rajapinnassa virtausnopeus on nolla, siirtyy lämpö tämän kerroksen partikkeleihin yhtälön (3.1) mukaisesti johtumalla. Nämä molekyylit luovuttavat osan saamastaan lämpöenergiasta seuraavaan ainekerrokseen, jolloin pinnan läheisyyteen syntyy lämpögradientti. Etäisyydellä $y=\delta_T$ pinnasta saavutetaan virtaavan aineen vakio lämpötila-alue ja etäisyyttä pinnasta tähän alueeseen kutsutaan termiseksi

rajakerrokseksi (kuva 3.2). Pinnan ja virtaavan aineen rajapinnassa lämpövirrantiheydelle voidaan kirjoittaa

$$q = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_s - T_\infty) \Rightarrow h = -k \frac{\partial T / \partial y|_{y=0}}{T_s - T_\infty}. \quad (3.3)$$

Koska termisen rajakerroksen paksuus kasvaa kuljettaessa pintaa pitkin virtauksen suuntaan, pienenee lämpögradientin - ja siten myös lämmönsiirtymiskertoimen h - itseisarvo, sillä $T_s - T_\infty$ pysyy vakiona. Lämmönsiirtymiskerroin on siis hyvin paikallinen suure.



Kuva 3.2. Termisen rajakerros

Termisen rajakerroksen ja virtausrajakerroksen suhdetta kuvaa ainoastaan virtaavan aineen ominaisuuksista määräytyvä Prandtin luku. Sen saadessa arvon yksi, ovat rajakerrokset yhtä paksut. Prandtin luku määritellään kaavalla:

$$Pr = \frac{\mu c \rho}{k}, \quad (3.4)$$

missä μ on kinemaattinen viskositeetti.

c on virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti

ρ on virtaavan aineen tiheys

Konvektiivinen lämmönsiirto on voimakkaasti riippuvainen virtauksen luonteesta virtausrajakerroksessa. Virtaus voi olla joko laminaarista tai turbulenttia. Laminaarinen virtaus on pinnan suuntaista ja hyvin järjestynyttä, kun taas turbulentille virtaukselle on tyypillistä pyörteisyys, tietyn tyyppinen kaoottisuus sekä virtausnopeuden nopeat, paikalliset heilahtelut. Näiden tekijöiden ansiosta virtaavan aineen sekoittuminen on turbulentilla alueella hyvin voimakasta, mikä johtaa rajakerroksien kasvuun ja lämmönsiirron tehostumiseen. Virtauksen luonne vaihtelee paikallisesti. Esimerkiksi

Kuva 3.1 levyn tapauksessa muuttuu virtaus laminaarisesta turbulentiksi tietyllä etäisyydellä $x=x_c$ levyn alkupäästä. Virtauksen luonnetta kuvaa Reynoldsin luku Re :

$$Re = \frac{v_\infty L}{\mu}, \quad (3.5)$$

missä L on tarkasteltavan geometrian perusteella määräytyvä karakteristinen mitta. Esimerkiksi tasolevyn tapauksessa se on sen sivun pituus, jonka virtaus ohittaa. Reynoldsin luvulla on siis raja-arvo, jota pienemmillä arvoilla virtaus on laminaarista ja jonka yläpuolella se on turbulenttia. Tätä arvoa kutsutaan kriittiseksi Reynoldsin luvuksi ja tasolevyn tapauksessa sen arvo on $Re \approx 3 \cdot 10^5$.

3.3 Lämmönsiirtymiskertoimien määrittäminen

Edellä todettiin konvektiivisen lämmönsiirtymiskertoimen h olevan voimakkaasti paikallinen, termisen rajakerroksen paksuudesta riippuva suure. Tästä johtuen sen jakautuman laskeminen analyyttisesti edes yksinkertaisille virtausgeometrioille on erittäin vaativa tehtävä, etenkin jos virtaus on turbulenttia. Useimmissa tapauksissa joudutaankin tyytymään koko pintaa edustavaan, keskimääräiseen lämmönsiirtymiskertoimeen

Lämmönsiirtymiskerroin määritellään usein Nusseltin luvun Nu avulla. Nusseltin luku on dimensioton suure, joka kuvaa lämpögradienttia pinnan normaalin suuntaan. Se on suoraan verrannollinen lämmönsiirtymiskertoimen suuruuteen yhtälön

$$Nu = \frac{hL}{k}, \quad (3.6)$$

mukaisesti, missä k on virtaavan nesteen tai kaasun lämmönjohtavuus. Nusseltin luvun määrittämiseksi löytyy kirjallisuudesta eri virtausgeometrioita varten empiirisiä yhtälöitä, jotka pakotetulle konvektiolle esitetään usein muodossa:

$$Nu = CRe^m Pr^n. \quad (3.7)$$

Kertoimet C , m ja n ovat tietylle virtausgeometrialle ominaiset vakiot. Virtauksen luonteen yhtälössä (3.7) määrää Reynoldsin luku Re ja virtaavan aineen ominaisuudet huomioidaan Prandtin luvussa Pr . Koska lämmönsiirto tehostuu oleellisesti virtauksen muuttuessa laminaarisesta turbulentiksi, määritetään usein yhtälöt kummallekin tapaukselle. Se, kummasta yhtälöstä Reynoldsin luku kulloinkin lasketaan, riippuu Reynoldsin luvusta.

Lämmönsiirtymiskertoimen määrittäminen sähkökoneen konvektiopinnoille on varsin hankala tehtävä mutkikkaan geometrian sekä vaikeasti hahmotettavan virtauskentän johdosta. Se tarkkuus, jolla nämä kertoimet saadaan määritettyä, määrää kuitenkin hyvin pitkälti koko lämpölaskennan tarkkuuden, sillä epävarmuus muiden reunaehtojen ja alkuarvojen, kuten häviöiden ja materiaaliparametrien, suhteen on huomattavasti vähäisempää.

Sähkökoneen jäähtymisen kannalta on hyvin ratkaisevaa se, kuinka tehokkaasti staattorissa ja roottorissa syntyvä lämpöenergia saadaan siirrettyä ilmapäliin ja sieltä edelleen koneesta ja jäähdytystavasta riippuen staattoriin, roottoriin tai vyyhdennäälueille. Virtausta ja lämmönsiirtoa kahden sisäkkäisen sylinterin tapauksessa on tutkittu jo yli 70 vuotta (Saari,1996) ja saatuja tuloksia laajasti sovellettu sähkökoneisiin. Lämmönsiirron tehokkuuden sylinterien väliseen aineeseen määrää virtauskenttä, joka koostuu seuraavista virtauksista: Roottorin pyörimisestä aiheutuva tangentialinen virtaus, aksiaalinen virtaus sekä keskipakovoimien aiheuttamat Taylor-pyörteet. Se, mitkä näistä virtaustyypeistä ovat kulloinkin hallitsevassa asemassa, riippuu roottorin pyörimisnopeudesta, aksiaalisen tilavuusvirran määrästä sekä ilmapälin geometriasta. Taylor-pyörteet ovat ympyränomaisia nopeusvaihteluita, joita esiintyy, kun Taylorin luku ylittää arvon $1.7 \cdot 10^3$ (Gazley,1958). Luku määritellään kaavalla:

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 r_1 b^3}{\mu^2}, \quad (3.8)$$

missä r_1 on roottorin ulkohalkaisija,

b on ilmapälin pituus radiaalisuunnassa,

ω roottorin kulmanopeus.

Melko kattavan tutkimuksen aiheesta tehneet Becker et al. (1962) ovat jakaneet ongelman ilmapälivirtauksen luonteen perusteella kolmeen eri tapaukseen: Aksiaalinen virtaus roottorin ollessa paikallaan, sisemmän sylinterin pyöriminen aksiaalisen tilavuusvirran ollessa nolla sekä tilanne, jossa yhdistyy molemmat em. tapaukset. Tässä työssä mallinnettavat koneet kuuluvat keskimmäiseen kategoriaan, sillä näissä jäähdytys ei perustu ilman puhaltamiseen ilmapälin läpi. Kun ilman liikkeen synnyttää ainoastaan roottorin pyöriminen, on selvää, että lämmönsiirron tehokkuus on verrannollinen roottorin pyörimisnopeuteen. Taylorin luvun ollessa alle 1700, Nusseltin luku on $Nu=2$, virtaus on laminaarista, ja lämpö siirtyy ilmapälin yli johtumalla. Korkeimmilla

Taylorin luvun arvoilla virtaukseen syntyy Taylor-pyörteitä, joiden ansiosta Nusseltin luku kasvaa ja lämmönsiirto tehostuu. Tällöin Nusseltin luku saadaan kaavoista:

$$Nu = 0.128(Ta/F_g)^{0.367}, \quad 1700 < (Ta/F_g) < 10000 \quad (3.9)$$

$$Nu = 0.409(Ta/F_g)^{0.241}, \quad 10000 < (Ta/F_g) < 10^7, \quad (3.10)$$

missä F_g on koneen geometriasta riippuva kerroin, joka määräytyy yhtälöistä:

$$F_g = \frac{\pi^4}{1697 \left(1 - \frac{b}{2r_m}\right)^2 C_g} \quad (3.11)$$

$$C_g = \frac{0.00056 + 0.0571 \left(\frac{2r_m - 2.304b}{2r_m - b}\right)^2}{\left(\frac{2r_m - 2.304b}{2r_m - b}\right)}, \quad (3.12)$$

missä r_m on ilmavälin keskiarvosäde. Yllä esitetyt yhtälöt ovat empiirisiä, mutta niiden antamat tulokset vastaavat hyvällä tarkkuudella aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Näitä ovat tehneet mm. Bjorklund et al. (1959) sekä Gazley (1958). Yhtälöistä laskettaviin tuloksiin on kuitenkin suhtauduttava tietyllä varauksella, sillä mittaukset on tehty tasaisilla sylinteripinnoilla. Tällöin staattori- ja roottoriurituksen sekä levyrakenteisuuden vaikutukset jäävät huomiotta. Nämä vaikuttavat tilanteeseen kasvattamalla jäähdytyspinta-alaa ja lisäämällä virtauksen turbulenssia. Ura-aukkojen vaikutuksesta lämmönsiirto tehostuu noin 10%:lla (Gazley, 1958).

Napakenkäisen roottorin tapauksessa tilanne on haastavampi, sillä kirjallisuudesta ei löydy tutkimuksia, joiden pohjalta olisi yhtälöiden (3.9) ja (3.10) tapaan johdettu yhtälöitä Nusseltin luvun laskemiseksi tämän tyyppiselle roottorigeometrialle. Kirjoituksia, joissa yksittäisen roottorin lämmönsiirtymiskertoimet on mitattu, löytyy jonkin verran, mutta näiden tulosten soveltaminen yleisesti on arveluttavaa. Tässä työssä tyydyttiinkin myös napakenkäisten roottoreiden yhteydessä käyttämään yhtälöitä (3.9) ja (3.10). Tällöin roottorin ilmavälipinnoille saadaan ainakin suuntaa-antava arvo, jota puoleen tai toiseen muuttamalla havaitaan sen tarkkuuden todellinen merkitys kriittisten koneenosien lämpenemälle.

Lämmönsiirtymiskertoimen määrittäminen koneen staattori- ja roottoripäädyistä koneen vyyhdempään ilmatilaan ei ole helppo tehtävä. Virtaus vaihtelee paikallisesti hyvin

voimakkaasti ja siihen vaikuttaa pääty- ja vyyhdenpäägeometrian lisäksi roottorin pyörimisnopeus sekä ilmaa kierrättävien, roottorin akselille mahdollisesti kiinnitettyjen tuulettimien tai oikosulkurenkaaseen hitsattujen siivekkeiden ominaisuudet. Päätyosille määriteltiin lämmönsiirtymiskerroin kaavalla (Mellor et al., 1991):

$$h = 15.5(0.29v + 1), \quad (3.13)$$

jossa esiintyvä ilman nopeus v voidaan laskea yhtälöstä

$$v = r_m \omega \eta, \quad (3.14)$$

missä η on hyötysuhde, jolla tuulettimet tai roottorin siivekkeet kierrättävät ilmaa. On selvää, että määrittelemällä kertoimelle arvo, joka edustaa sekä roottori-, että staattoripäädyn lämmönsiirtymiskertoimia, yksinkertaistetaan tilannetta melkoisesti. Todellisuudessa kerroin on voimakkaasti paikallinen suure, kuten kohdassa 3.2 osoitettiin, jonka arvo vaihtelee huomattavasti jo yksittäisenkin pinnan alueella. Tässä vaiheessa ei ole kuitenkaan järkevää yrittää määrittää kerrointa erikseen jokaiselle pinnalle, varsinkin kun otetaan huomioon se tarkkuus, jolla tämä voitaisiin tehdä.

Vyyhdenpääpintojen lämmönsiirtymiskertoimien suuruuteen vaikuttaa suoraan virtauskenttään vaikuttavien tekijöiden, kuten roottorin pyörimisnopeuden ja tuuletusjärjestelyjen, ohella itse käämin rakenne. Tämä puolestaan riippuu koneen käämitystavasta ja jännitetasosta. Staattorin käämitystapa vaikuttaa siihen, kuinka ilma pääsee kiertämään vyyhdenpään rakenteissa. Esimerkiksi tasokäämitys aikaansaa melkein yhtenäisen, mutta epäsäännöllisen ja karkean pinnan, kun taas kaksikerroslimikäämitys sekä koneen korkea jännitetaso johtaa vyyhdenpääalueella käämityksen avoimempaan rakenteeseen (Pickering et al., 1997). Tässä työssä lämmönsiirtymiskertoimet vyyhdenpääpinnoilta päätyilmaan laskettiin kaavoilla (Koziej, 1989)

$$Nu = 3Re^{0.3} \quad (3.15)$$

$$Re = \frac{\pi n D_i L}{v}, \quad (3.16)$$

missä n on roottorin pyörimisnopeus,

D_i on staattorin vyyhdenpäähalkaisija

L on karakteristinen mitta, joka määritellään yhtälöstä

$$L = \frac{2(w_{\text{coil}} + d_{\text{coil}})}{\pi}, \quad (3.17)$$

missä w_{coil} on vyyhdensivun leveys ja d_{coil} vastaavasti vyyhdensivun korkeus. Lämmönsiirtymiskertoimien määrittäminen podin ulkopinnalta meriveteen sekä podin sisäpinnalta vyyhdenpään ilmatilaan perustui paremman tiedon puutteessa puhtaasti sopivan-tuntuisten arvojen valintaan. Kerroin ulkopinnalta meriveteen ei ole laskennan kannalta kriittinen, sillä se on joka tapauksessa tarpeeksi suuri. Sen sijaan podin sisäpinnalta ilmaan olevan kertoimen suuruudella, kuten simulointien tuloksista myöhemmin havaitaan, on hyvinkin ratkaiseva merkitys esimerkiksi vyyhden keskimääräisen lämpenemän suuruuteen. Täten lämmönsiirtymistä ilmasta näiden pintojen kautta meriveteen kannattaisi tutkia tarkemmin, esimerkiksi koneiden loppukoestusten yhteydessä tehtävien mittausten avulla.

3.4 Säteily

Lämpösäteily on energian siirtymistä sähkömagneettisten aaltojen välityksellä (Wagner, 1994). Säteilyn aallonpituus on välillä $\lambda=0.8\dots400\mu\text{m}$ ja sen spektristä löytyy taajuuskomponentteja koko tältä alueelta. Lainmukaisuuksiltaan se eroaa oleellisesti lämmön johtumisesta, jossa energia siirtyy molekyylien värähtelyn kautta, ja konvektiosta, jossa lämpö siirtyy liikkuvan aineen mukana. Kappaleeseen osuva säteily joko heijastuu siitä, imeytyy siihen tai menee sen läpi. Energian säilymisen perusteella:

$$\delta_s + \alpha_s + \gamma_s = 1, \quad (3.18)$$

missä γ_s on heijastunut osuus,

α_s on absorboitunut osuus,

τ_s on läpimennyt osuus.

Säteilynä siirtyvä lämpövirrantiheys määräytyy kaavasta (Jokinen, 1998)

$$q_s = \varepsilon_r \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (3.19)$$

missä ε_r on pintojen välinen suhteellinen säteilyluku

σ on Stefan-Boltzmanin vakio

T_1 on pinnan 1 lämpötila ja

T_2 pinnan 2 lämpötila.

Pintojen välinen säteilyluku ε_r riippuu pintojen laadusta ja niiden asemasta toisiinsa nähden. Mikäli kaikki pinnalta A_1 lähtevä säteily kohtaa pinnan A_2 , saadaan ε_r yhtälöstä

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left[\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right], \quad (3.20)$$

missä ε_1 on pinnan 1 suhteellinen säteilyluku ja vastaavasti

ε_2 pinnan 2 suhteellinen säteilyluku.

Säteilyn merkitys tämän työn lämpömalleissa on niin vähäinen, että se voidaan varsin hyvällä omallatunnolla jättää tarkastelun ulkopuolelle. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että lämpötilaerot sähkökoneen ja ympäristön sekä sähkökoneen sisällä olevien pintojen välillä ovat sen verran pieniä, ettei merkittäviä lämpövirrantiheyksiä pääse syntymään. Esimerkiksi yhtälön (3.2) mukainen säteilyn aiheuttama lämpövirrantiheys podin ulkopinnalta on alle prosentin luokkaa verrattuna lämpövirrantiheyteen, jonka konvektio podin pinnalta meriveteen aiheuttaa. Ilmavälin yli säteilemällä siirtyvän lämmön osuus on myös hyvin pieni. Roottorista staattoriin siirtyvän lämmön osuus on mittausten mukaan noin 2-4%:n luokkaa roottorissa syntyvistä häviöistä (Becker et al., 1962). Näin ollen säteilyn poisjättämistä suurempia virheitä aiheutuu varmasti jo konvektiivisten lämmönsiirtymiskertoimien määrittämiseen liittyvästä epävarmuudesta.

4 Lämpökentän numeerinen ratkaisu

4.1 Lämpökentän differentiaaliyhtälö

Lämpölaskennan tavoitteena on selvittää lämpötilajakauma kappaleessa paikan ja/tai ajan funktiona analyysin luonteesta riippuen. Kun lämpökenttä on ratkaistu, voidaan sen avulla laskea lämpövirrantiheyksiä kappaleen sisällä tai ulkopinnoilla Fourier'n johtumislain avulla (yhtälö 3.1). Tuloksia voidaan käyttää myös erilaisten stressianalyyysien suorittamiseen, lämpölaajenemisen vaikutusten tutkimiseen tai esimerkiksi eristemateriaalien ominaisuuksien optimoimiseen.

Lämpökentän differentiaaliyhtälön johto perustuu energian säilymiseen (Incropera et al., 1981). Kuvitellaan karteesisen koordinaatistoon suorakulmainen särmiö, jonka sivujen pituudet ovat dx , dy ja dz . Oletetaan, että kappaleeseen on syntynyt lämpögradientteja, jotka aikaansaavat lämpövirrat Q_x , Q_y ja Q_z . Lämpövirroille särmiön vastakkaisilla seinämillä voidaan Taylorin sarjan avulla kirjoittaa

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{dQ_x}{dx} dx \quad (4.1)$$

$$Q_{y+dy} = Q_y + \frac{dQ_y}{dy} dy \quad (4.2)$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + \frac{dQ_z}{dz} dz \quad (4.3)$$

Kappaleessa mahdollisesti olevat häviöenergiat muuttuvat lämmöksi tietyllä teholla. Tämä ilmaistaan termillä

$$\dot{E}_g = p_h dx dy dz, \quad (4.4)$$

missä p_h on häviötehotiheys. Kappaleen varastoiman lämpöenergian muutosta kuvaa yhtälö:

$$\dot{E}_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz, \quad (4.5)$$

missä c on materiaalin ominaislämpökapasiteetti,

ρ on kappaleen tiheys.

Energian säilymislaista seuraa, että kappaleeseen tuleva ja siinä syntyvä lämpöteho vastaavat sen varastoimaa ja siitä poistuvaa lämpötehoa:

$$\dot{E}_{\text{in}} + \dot{E}_g - \dot{E}_{\text{out}} = \dot{E}_{\text{st}}. \quad (4.6)$$

Sijoittamalla yhtälöön (4.6) yhtälöt (4.4) ja (4.5) energiatasetta kuvaavaksi yhtälöksi saadaan

$$Q_x + Q_y + Q_z + p_h dx dy dz - Q_{x+dx} - Q_{y+dy} - Q_{z+dz} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (4.7)$$

Yhtälön (3.1) mukaan lämpövirroille pätee:

$$Q_x = -k_x dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.8)$$

$$Q_y = -k_y dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4.9)$$

$$Q_z = -k_z dy dx \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.10)$$

Sijoittamalla lämpövirtojen lausekkeet (4.8)-(4.10) sekä yhtälöt (4.1)-(4.3) yhtälöön (4.7) saadaan lämpökentän differentiaaliyhtälöksi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + p_h = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4.11)$$

Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan ajan suhteen riippumattomia lämpökenttiä. Tällöin, olettamalla lisäksi lämmönjohtavuuden olevan vakio ja tarkastelusuunnasta riippumaton, lämpökentän differentiaaliyhtälö saadaan kirjoitettua yksinkertaisempaan muotoon:

$$k \nabla^2 T + p_h = 0. \quad (4.12)$$

4.2 Numeeriset menetelmät

Lämpökentän differentiaaliyhtälön (4.11) ratkaiseminen suljetussa muodossa onnistuu ainoastaan kaikkein yksinkertaisimmissa tapauksissa. Normaalisti kenttä lasketaan tietokoneella puhtaasti numeerisesti, approksimoimalla differentiaaliyhtälön ratkaisua ennalta määrätyissä laskentapisteissä. Approksimoinnilla tarkoitetaan sitä, että ratkaisuvaiheessa integroinnit korvataan summa-termeillä ja että lämpötila muuttuu laskentapisteiden välillä jonkin analyyttisen funktion mukaisesti, usein lineaarisesti. Seuraavaksi käsitellään hyvin yleisellä tasolla yleisimmät lämpökenttien numeerisessa ratkaisussa käytetyt menetelmät.

Lämpöverkot

Lämpöverkot on etenkin sähkösuunnittelijoiden keskuudessa varsin suosittu menetelmä lämmönsiirto-ongelmien analysointiin. Suosio perustuu käytettyyn virtapiiri-analogaan, jossa lämpökenttä kuvataan sähkövirtapiireistä tutuilla elementeillä - resistansseilla ja virtalähteillä. Verkon solmukohtien arvot voidaan laskea sähkövirtapiireistä tutuilla menetelmillä, sillä lämpövirtauskentässä pätee samat Kirchhoffin lait kuin sähkövirtauskentässä (Jokinen, 1998). Lämmönvirtauspiirin tärkeimmät suureet sekä niitä vastaavat suureet sähkövirtauskentässä on koottu taulukkoon 4.1.

Taulukko 4.1 Lämpöverkkojen virtapiirianalogia	
Lämmönvirtaus	Sähkövirtaus
Lämpövirta Q [W]	Sähkövirta I [A]
Lämpövirran tiheys q [W/m ²]	Sähkövirran tiheys J [A/m ²]
Lämpötila T [K]	Sähköpotentiaali V [V]
Lämpötilaero θ [K]	Jännite U [V]

Virtapiirianalogiasta seuraa, että myös lämmönvirtauksen resistanssi määritellään Ohmin lain mukaisesti. Taulukon 1 suureiden sekä Fourier'n lain avulla saadaan lämpöresistanssi johtumiselle (3.1)

$$R_j = \frac{\theta}{Q} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta T}{kA \Delta T / \Delta x} = \frac{\Delta x}{kA} = \frac{l}{kA}, \quad (4.13)$$

missä l on lämpöjohtimen pituus, A poikkipinta-ala ja k lämmönjohtavuus.

Samalla periaatteella saadaan resistanssit lämpövirrantiheydelle konvektiossa ja säteilyssä (yhtälöt (3.2) ja (3.19)):

$$R_k = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta T}{hA(T_s - T_\infty)} = \frac{1}{hA}, \quad (4.14)$$

$$R_s = \frac{\Delta T}{QA} = \frac{1}{h_s A}, \quad (4.15)$$

$$h_s = \frac{q_s}{\Delta T} = \frac{\varepsilon_r \delta (T_1^4 - T_2^4)}{\Delta T}, \quad (4.16)$$

missä h_s on säteilyn lämmönsiirtymiskerroin.

Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmää (finite element method eli FEM) alettiin 1950-luvulla käyttää kimmo- ja lujuusopin tehtävien ratkaisemiseen (Luomi, 1994). Siitä lähtien sen käyttö on jatkuvasti laajentunut muille fysiikan ja tekniikan alueille ja 1960-luvulta lähtien sitä on sovellettu myös termodynaamisten ongelmien ratkaisuun (Lewis et al., 1981). Sähkökoneen lämpökenttiä on elementtimenetelmällä laskettu pääsääntöisesti kaksiulotteisina, johtuen yksinkertaisesti siitä, että vasta viimeisen vuosikymmenen aikana ovat työasemien laskentateho ja käytettävät ohjelmistot saavuttaneet kolmiulotteisen kenttäratkaisun edellyttämän tason. Kenties urauurtavimman työn kolmiulotteisen elementtimenetelmän soveltamisesta sähkökoneen lämpökentän ratkaisuun on tehnyt Armor et al. (1976), jotka analysoivat sen avulla suurten turbiini-generaattoreiden staattorilevysydämien lämpökenttiä.

Elementtimenetelmässä tarkasteltava geometria jaetaan nimensä mukaisesti pieniin osiin, elementteihin. Periaatteena on, että elementit kattavat tarkasteltavan alueen kokonaan, mutta eivät mene päällekkäin. Mikäli alueessa on eri väliaineita, tulee näiden rajapintojen olla elementtien rajapinnoilla. Kunkin elementin alueella tarkasteltavaa suuretta approksimoidaan funktiolla, usein polynomilla, jonka asteen määrää käytetyn elementin asteluku. Yksinkertaisin kaksiulotteinen elementti on 1. asteen kolmioelementti, jonka solmupisteet sijaitsevat kolmion kärjissä. Ratkaistaessa lämpökenttää näillä elementeillä, approksimoidaan lämpötilaa T yhden elementin alueella funktiolla:

$$\begin{aligned} T &= a + bx + cy = N_1(x, y)T_1 + N_2(x, y)T_2 + \dots + N_n(x, y)T_n \\ \Rightarrow T &= \sum_{i=1}^n N_i(x, y)T_i \end{aligned} \quad (4.17)$$

missä T_i lämpötilan arvo elementin solmupisteessä,

$N_i(x, y)$ on solmun i muotofunktio,

n on elementin solmujen lukumäärä.

Muotofunktiot $N_i(x, y)$ määräytyvät elementin muodon sekä solmupisteiden sijainnin perusteella ja ne interpoloivat lämpötilan arvoa solmupisteiden välillä. Kun lämpökentän osittaisdifferentiaaliyhtälöä kerrotaan painofunktiolla λ ja integroidaan tarkasteltavan alueen Ω yli, saadaan ns. painotetun residuaalin yhtälö:

$$R = \int_{\Omega} \lambda [-\nabla \cdot (k \nabla T) - p_h] d\Omega = 0. \quad (4.18)$$

Ratkaistaessa painotetun residuaalin yhtälöä (4.18) elementtimenetelmällä, lämpötilan T paikalle sijoitetaan sen lineaarinen approksimaatio (4.17). Usein ratkaisuun käytetään Galerkinin menetelmää, jolloin painofunktioina v käytetään muotofunktioita N_i . Tällöin saadaan lineaarinen yhtälöryhmä

$$ST = f, \quad (4.19)$$

missä kerroinmatriisin S alkiot ovat

$$S_{ij} = \int_{\Omega} k (\nabla N_i) \cdot (\nabla N_j) d\Omega, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4.20)$$

ja lähdetermin f alkiot ovat

$$f_i = \int_{\Omega} p_h N_i d\Omega, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.21)$$

Jotta solmuarvojen lämpötilat T_i pystyttäisiin ratkaisemaan yhtälöryhmästä (4.19), täytyy tarkasteltavan alueen reunat määrittää. Tämä tehdään reunaehtoien avulla, joina lämpökentän tapauksessa kyseeseen tulevat tunnettu lämpötila $T = \bar{T}$, eli Dirichlet'n reunaehto, tai Cauchyn reunaehtona tunnettu lämpövirrantiheyden normaali-komponentti:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = q, \quad (4.22)$$

missä h on pinnan lämmönsiirtymiskerroin. Tästä saadaan konvektioreunaehto korvaamalla q termillä $q = hT_{\infty}$ (Lewis et al., 1981), missä T_{∞} on ympäristön lämpötila. Ratkaisun jälkeen lämpökenttää voidaan tarkastella esimerkiksi geometriaan piirrettyjen lämpötilan tasa-arvokäyrien tai yksittäisten solmulämpötilojen avulla.

Differenssi- ja kontrollitilavuusmenetelmä

Differenssimenetelmällä on vankat perinteet osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeerisessa ratkaisussa. Itse asiassa sen juuret ulottuvat pitkälle aikaan ennen tietokoneita, aina 1800-luvulle saakka (Luomi, 1994). Differenssimenetelmä perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälön derivaattojen approksimointiin Taylorin sarjan

$$y(x + \Delta x) = y(x) + \Delta x y'(x) + \frac{\Delta x^2}{2} y''(x) + \dots \quad (4.23)$$

ensimmäisten termien avulla. Tällöin yksiulotteisessa tapauksessa (kuva 4.1), missä $\Delta x = x_2 - x_1 = x_3 - x_2$ laskentapisteiden 1 ja 3 lämpötiloille voidaan kirjoittaa

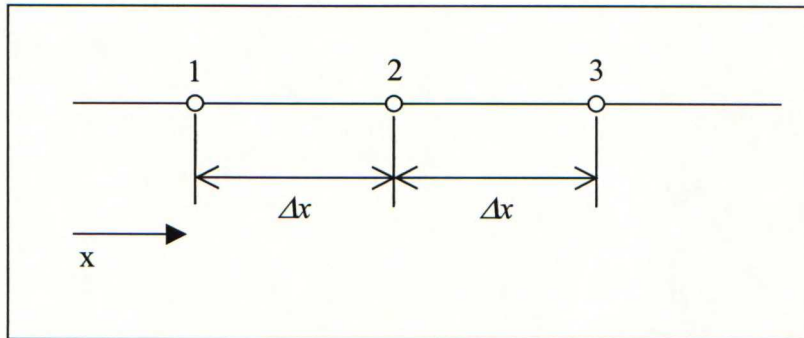
$$T_1 = T_2 - \Delta x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_2 + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_2 - \dots \quad (4.24)$$

$$T_3 = T_2 + \Delta x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_2 + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_2 + \dots \quad (4.25)$$

Näitä summaamalla ja vähentämällä saadaan lämpötilan derivaattoille pisteessä 2:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_2 = \frac{T_3 - T_1}{2\Delta x} \quad (4.26)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_2 = \frac{T_1 + T_3 - 2T_2}{(\Delta x)^2}. \quad (4.27)$$



Kuva 4.1 Laskentapisteitä yksiulotteisessa differenssiverkossa.

Mikäli malliin halutaan sisällyttää geometriassa syntyvät häviöt, joudutaan laskentapisteiden ympärille muodostamaan kuvitteellinen tilavuus, jonka yli lämpökentän differentiaaliyhtälöä integroidaan. Tällöin puhutaan kontrollitilavuudesta (control volume) ja kontrollitilavuusmenetelmästä (Patankar, 1980). Kuvan 4.2 yksiulotteisessa tapauksessa pisteen 2 ympärillä olevan kontrollitilavuuden reunat x -suunnassa ovat w ja e . Muissa suunnissa särmien pituudet ovat $\Delta y=1$, $\Delta z=1$. Integroitaessa pysyvän tilan lämpökentän differentiaaliyhtälöä tämän tilavuuden yli saadaan

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + p_h \right] dV = 0 \Rightarrow \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w + p_h \Delta x = 0 \quad (4.28)$$

$$\Rightarrow \frac{k_e(T_3 - T_2)}{\Delta x_{23}} - \frac{k_w(T_2 - T_1)}{\Delta x_{12}} + p_h \Delta x = 0, \quad (4.29)$$

missä k_e ja k_w ovat lämmönjohtavuudet rajapinnoilla w ja e . Yhtälö (4.29) kirjoitetaan yleensä muodossa

$$a_2 T_2 = a_1 T_1 + a_3 T_3 + b, \quad (4.30)$$

missä

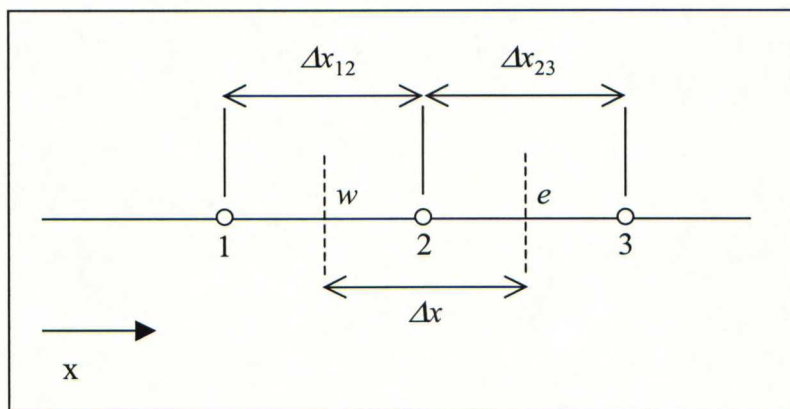
$$a_1 = \frac{k_w \Delta y \Delta z}{\Delta x_{12}}, \quad (4.31)$$

$$a_3 = \frac{k_e \Delta y \Delta z}{\Delta x_{23}}, \quad (4.32)$$

$$a_2 = a_1 + a_3 \text{ ja} \quad (4.33)$$

$$b = p_h \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (4.34)$$

Tutkittaessa termejä a_1 ja a_3 havaitaan, että ne ovat lämmönjohtumiselle kirjoitettujen resistanssien (yhtälö (4.13)) käänteisarvoja – lämpökonduktansseja. Näin kontrollitilavuusmenetelmä voidaan ajatella yksinkertaisesti lämpöverkkona, joka muodostuu solmupisteistä ja niitä yhdistävistä lämpökonduktansseista.



Kuva 4.2 Laskentapisteitä yksiulotteisessa kontrollitilavuusmenetelmässä.

Laskentaverkkoa muodostettaessa kannattaa huolehtia siitä, että kontrollitilavuuksien särmät yhtyvät tarkasteltavan alueen reunoihin. Tällöin esimerkiksi konvektion mallintaminen ei vaadi sen kummempia erityisjärjestelyjä. Konvektion tai vakiolämpövirrantiheyden mallintamiseksi reunapinnalle ajatellaan kontrollitilavuus, jonka paksuus on nolla. Tällöin kuvan 4.3 pisteelle B voidaan energian säilymislain perusteella kirjoittaa yhtälö:

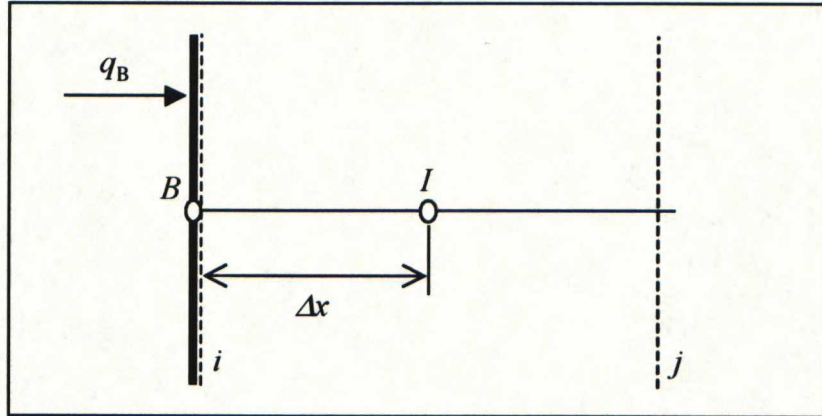
$$q_B = q_i \Rightarrow h(T_\infty - T_B) - \frac{k_i(T_B - T_I)}{\Delta x} = 0 \Rightarrow a_B T_B = a_I T_I + b, \quad (4.35)$$

missä

$$a_I = \frac{k_i}{\Delta x}, \quad (4.36)$$

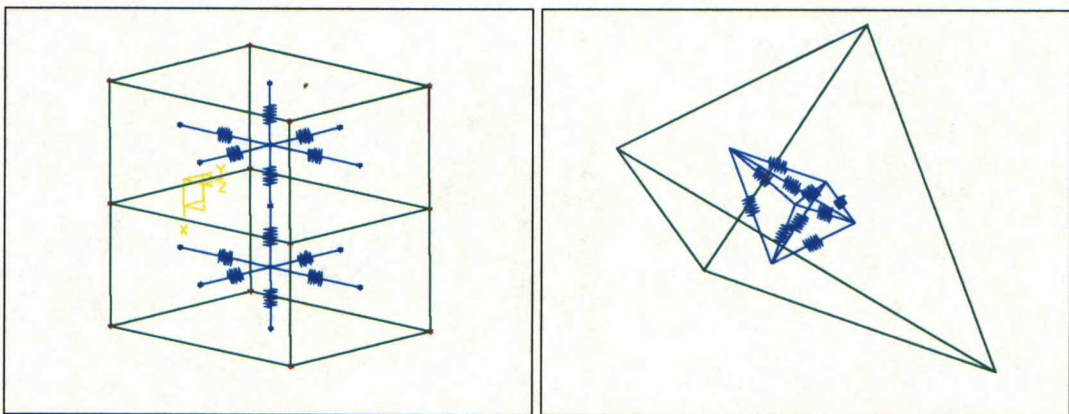
$$a_B = a_I + h, \quad (4.37)$$

$$b = hT_\infty. \quad (4.38)$$



Kuva 4.3 Konvektio-reunaehto kontrollitilavuusmenetelmässä.

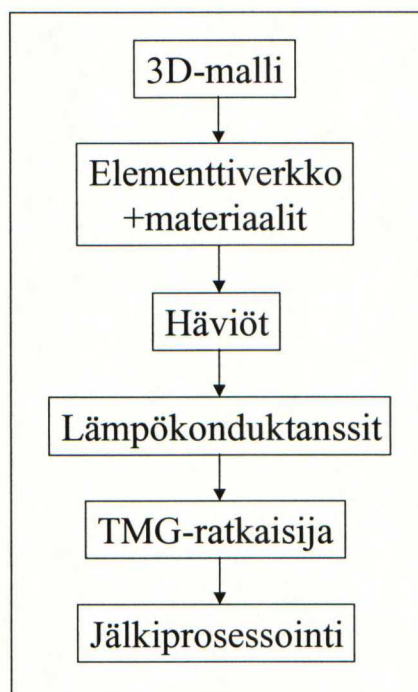
I-DEAS:n TMG-modulin lämpökentän ratkaisu perustuu kontrollitilavuusmenetelmään, jossa kontrollitilavuudet muodostetaan elementtiverkon avulla. Tällöin jokaisen elementin keskelle tulee yksittäinen laskentapiste, joka yhdistyy viereisten elementtien laskentapisteisiin lämpökonduktanssien välityksellä (kuva 4.4). Tässä menetelmässä elementin solmupisteitä käytetään siis ainoastaan elementin geometrian kuvaamiseen, ei laskentapisteinä, kuten elementtimenetelmässä.



Kuva 4.4 TMG:n heksaedri- ja tetraedrielementin sisään muodostamat konduktanssiverkot.

5 Lämpömallin luominen I-DEAS - ohjelmassa

Lämpökentän ratkaisu I-DEAS:ssa etenee pääpiirteissään kuvan 5.1 mukaisesti. Lämpömallin perustan muodostaa mallinnettavasta geometriasta tehty kolmiulotteinen tilavuusmalli, jonka pohjalta luodaan elementtiverkko ja määritetään materiaaliparametrit. Lämpölähteinä toimivat häviöt kohdistetaan elementteihin häviötehotiheyksinä joko vakioarvoisina tai lämpötilan funktiona. Konvektiiviset lämmönsiirtymiskertoimet sekä rajapintojen ylimenoresistanssit mallinnetaan lämpökonduktansseilla. Numeerisen ratkaisun jälkeen tulosten tarkastelu ja analysointi tapahtuu jälkiprosessointitilassa.



Kuva 5.1 Lämpökentän ratkaisun kulku I-DEAS:ssa

I-DEAS jakaantuu useisiin moduleihin (kuva 5.2), joista tämän työn puitteissa tarvittiin ainoastaan 'Simulation'-modulia. Tämä moduli jakaantuu edelleen useisiin toiminnallisiin lohkoihin: 'Master modeler':ssa kuvataan geometria, 'Boundary Conditions':ssa asetetaan häviöt, 'Meshing':ssä luodaan elementtiverkko, 'TMG Thermal Analysis':ssä asetetaan reunaehtopinnoille konduktanssit sekä suoritetaan simulointi ja 'Post Processing':ssä tarkastastellaan tuloksia.

Design	Master Modeler
Drafting	Master Assembly
Simulation	Boundary Conditions
Test	Meshing
Manufacturing	Model Solution
Management	Durability & Dynamics
Open Data/PCB	Optimization
	Post Processing
	Beam Sections
	Laminates
	Moldflow
	TMG Thermal Analysis
	Electro-System Cooling
	Vibro-Acoustics
	Relational Data Manager

Kuva 5.2 I-DEAS:n moduilit ja Simulation –modulin lohkot.

5.1 Geometrian mallinnus

Simuloinnin pohjana toimii kappaleesta 3D-mallinnuksella aikaansaatu tilavuusmalli. 3D-mallinnuksella tarkoitetaan tekniikkaa, jolla tietokoneelle kuvataan kolmiulotteinen geometrinen objekti (Ideal Engineering Oy, 1998). Saadusta objektista voidaan tämän jälkeen tulostaa rajattomasti kuvia, jossa kappale näkyy eri suunnista eli eri kuvantoina. Tilavuusmalli on kolmiulotteinen CAD-malli, johon on määritelty kappaleen särmät ja pinnat sekä tieto siitä, kummallako puolen pintaa on ainetta. Muita 3D-malleja ovat esimerkiksi rautalankamallit, joissa on määritelty vain särmät, ja pintamallit, joissa on määritelty särmät ja näiden väliset pinnat.

I-DEAS:ssa 3D-mallinnus tehdään piirremallimallinnuksena (feature based modeling), jossa mallinnettavan esineen muoto kuvataan piirteiden avulla. Tällaisia ovat mm. reikä, pyöristys, kuori. Piirremallinnuksen etuna on mallin muokattavuus ja ylläpidettävyys, sillä piirteitä on jälkeinpäin helppo muuttaa, lisätä tai poistaa. Mallin muuttelua helpottaa myös mittaohjautuvuus, joka tarkoittaa sitä, että mallin mittoja muutettaessa päivittyy koko geometria. Mitat voidaan asettaa seuraamaan toisiaan joko suoraan tai matemaattisten kaavojen mukaan.

Käytännössä osan (part) luominen aloitetaan tekemällä perusmuoto, johon myöhemmissä vaiheissa lisätään piirteitä. Sekä perusmuoto että piirteet tehdään yleensä luonnostelemalla työtasoon yksi tai useampi piirteen poikkileikkaus, joille tehtävistä operaatioista piirteen geometria syntyy. Tällaisia operaatioita ovat mm. pursotus ja pyöräytys. Luonnosteluvaiheessa ei mittoja tarvitse tietää – ne annetaan vasta ennen

operaation suorittamista. Piirteillä muokataan perusmuotoa esimerkiksi liittämällä niitä perusmuotoon, leikkaamalla niillä perusmuotoa tai jakamalla niillä perusmuodon tilavuutta osiin (partition). Työtaso voi olla mikä tahansa tasainen pinta avaruudessa, mutta yleensä käytetään suoraan sitä kappaleen tasopintaa, johon piirre halutaan lisätä.

5.2 Tilavuusmallin verkottaminen

Lämpökentän differentiaaliyhtälön ratkaisemiseksi tarvitaan elementtiverkko. Vaikka TMG ei varsinaisella elementtimenetelmällä laskeakaan, tarvitsee se verkkoa konduktanssiverkon muodostamiseksi. Elementtiverkko I-DEAS:ssa tehdään 'Simulation'-modulin 'Meshing'-lohkossa. Simulointia varten tilavuusmallille luodaan elementtimalli (finite-element model), joka on I-DEAS:n mallitiedostoon (model file) luotava erillinen komponentti sisältäen elementtiverkon määrittelyt, reunaehdot sekä simulointiryhmät (groups). Yhdellä tilavuusmallilla voi olla useita elementtimalleja.

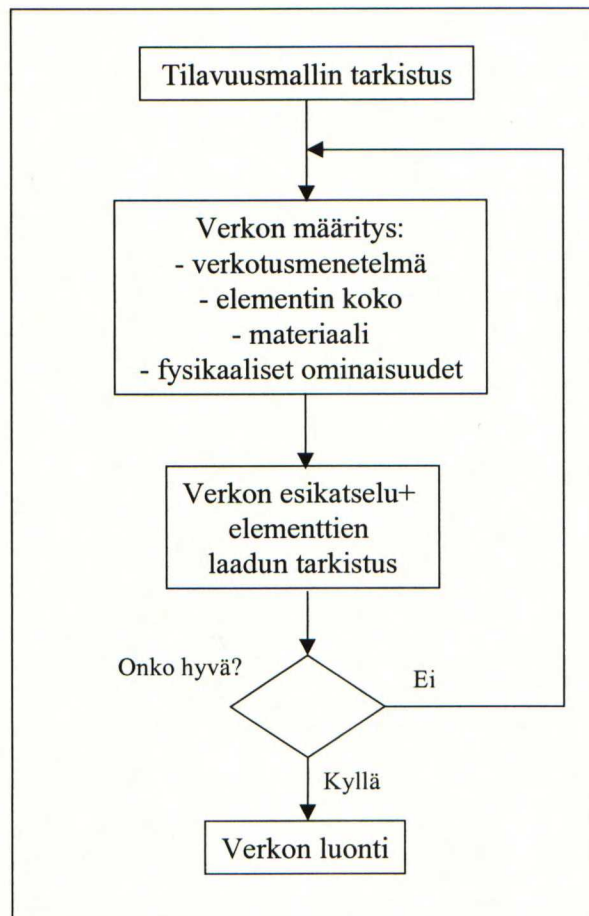
Elementtiverkon luontimenetelmät ja geometriaperusteisuus

Elementtiverkko voidaan luodaan joko suoraan, tilavuusmallin avulla tai tilavuusmalliin. Näistä ensimmäisellä tarkoitetaan niitä menetelmiä, joilla verkko luodaan määrittelemällä avaruuteen solmujen paikat ja näitä yhdistävät elementtien särmät. Luotaessa verkkoa tilavuusmallin avulla mallinnetaan ensin geometria, jota sitten käytetään apuna verkkoa rakennettaessa. Esimerkkinä tästä on kolmiulotteisen verkon luominen kaksiulotteista verkkoa pursottamalla. Tällöin tasopinnalle luotua 2D-verkkoa pursotetaan esimerkiksi pinnan normaalin suuntaan haluttu matka siten, että pursotettu matka jakaantuu haluttuun määrään elementtejä.

Suljettuihin tilavuuksiin ja pintoihin verkko voidaan luoda suoraan. Tällöin kullekin verkotettavalle tilavuudelle ja pinnalle annetaan erikseen verkon määrittelyt, joiden pohjalta verkko tehdään. Näihin määrittelyihin kuuluu: Elementin koko, tyyppi, fysikaaliset ominaisuudet sekä ko. verkon materiaaliparametrit. Paitsi että verkon luominen geometriaan on nopein ja helpoin tapa luoda verkko, on se lisäksi ainoa verkonluontimenetelmä, jolla verkosta saadaan geometriaperusteinen (geometry based) – geometriaan sidottu. Geometriaperusteisuus tarkoittaa sitä, että elementtiverkon ja reunaehtojen määrittelyt on sidottu geometriaan, minkä ansiosta ne päivittyvät geometrian muuttuessa. Päivittymisen ehtona on, että pinnat ja tilavuudet, joihin verkonosien määrittelyt on kohdistettu säilyvät, vaikka mitoiltaan ja muodoiltaan

muuttuisivatkin. Tässä työssä tehtävän lämpömallin tarkoitus on olla mahdollisimman mittaohjautuva. Tästä syystä jatkossa keskitytään ainoastaan niihin verkonluontimenetelmiin, joilla aikaansaatu verkko on geometriaperusteinen.

Geometriaperusteisen verkon tekeminen etenee kuvassa 5.3 esitetyn kaavion mukaisesti. Koska verkko luodaan tilavuusmalliin, kannattaa ennen verkottamista varmistua siitä, että malli on kunnossa. Ehjässä mallissa tilavuudet ovat suljettuja eikä siinä ole irrallisia särmiä ja pintoja. Geometrian tarkistamiseksi I-DEAS:sta löytyy lukuisia työkaluja, joista tämän työn puitteissa hyödylliseksi havaittiin ainakin toiminto 'Show free edges', joka näyttää geometriassa esiintyvät irralliset, mihinkään pintaan kuulumattomat särmit. Mallin tarkistaminen kannattaa, sillä monesti I-DEAS sallii viallisen geometrian verkottamisen hyvinkin pitkälle ennen ongelmien ilmaantumista. Ja kun ongelmia syntyy, ei I-DEAS välttämättä osaa paikallistaa niiden aiheuttajaa, vaan saattaa vain kylmästi ilmoittaa verkotuksen epäonnistuneen. Pahimmassa tapauksessa koko ohjelma ilman eri varoitusta "kaatuu".



Kuva 5.3 Elementtiverkotuksen kulku

Elementtiverkon määrittämiseksi geometriasta poimitaan verkotettavat pinnat tai tilavuudet. Työn helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi kannattaa käyttää simulointiryhmiä (simulation groups), joihin kerätään tilavuus- tai elementtimallin osia. Esimerkiksi vyyhdenpäätilavuudet, joihin tulee identtiset verkkomääritykset, häviöt sekä reunaehdot, kannattaa kerätä samaan ryhmään, jolloin ne joudutaan poimimaan mallista yksitellen ainoastaan kerran.

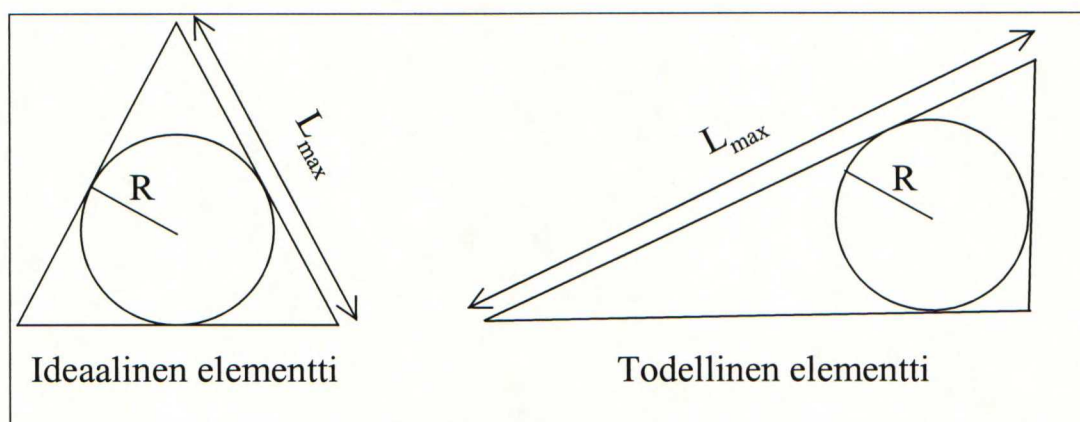
Verkkoa määritettäessä valitaan verkotusmenetelmä, elementin koko, materiaali sekä elementtien fysikaaliset ominaisuudet. Verkotusmenetelmiä on kaksi: Vapaa (free) ja ohjattu (mapped) verkotus. Edellisessä menetelmässä ohjelmiston annetaan luoda solmut vapaasti haluttuun tilavuuteen tai pintaan. Elementtitiheyteen voidaan vaikuttaa antamalla elementin särmän pituudelle ohjearvo, jota verkottaja pyrkii mahdollisuuksien mukaan noudattamaan. Vapaassa verkotuksessa tilavuudet verkotetaan ensimmäisen tai toisen asteen tetraedrielementeillä. Pintojen tapauksessa voidaan kolmioelementtien lisäksi käyttää nelikulmaisia elementtejä. Ei kuitenkaan niillä pinnoilla, jotka ovat jonkin tetraedrielementeillä verkotetun tilavuuden reunapintoja.

Ohjatussa verkotuksessa nimensä mukaisesti ohjataan verkotusprosessia määräämällä verkotettavan alueen reunasolmujen paikat. Nämä solmut toimivat ikään kuin kehyksenä verkotusalgoritmille, joka määrittelyjen pohjalta luo solmut ja elementit alueen sisälle. Tällä menetelmällä verkotettavan tilavuuden tulee olla vähintään viisi- ja enintään kuusisivuinen. Elementteinä käytetään heksaedri- tai kiilaelementtejä tilavuuden muodosta riippuen. Pintoja, kunhan ne eivät rajaa verkotettavaa tilavuutta, voidaan verkottaa myös kolmioelementeillä. Ohjattu verkotus on vapaaseen verkotukseen nähden huomattavasti työlämpi. Toisaalta sen avulla verkko saadaan luotua hallitusti, jolloin siitä yleensä tulee laadultaan parempi ja käyttäjän toiveiden mukainen. Usein säästetään myös elementtien lukumäärässä ja sen myötä ratkaisuaajassa.

Useissa tilanteissa ihanteellisin tapa luoda elementtiverkko olisi yhdistää kaksi em. menetelmää. Toisin sanoen verkottaa osa mallista ohjatusti ja osa vapaasti. Tämä ei kuitenkaan onnistu ongelmitta, sillä pintojen verkkomääritykset määräävät myös niiden sisään jäävän tilavuusverkon ominaisuudet. Näin ollen verkotettaessa kaksi vierekkäistä tilavuutta eri menetelmillä, muuttuu yhteisen rajapinnan määritykset viimeisimpänä verkotetun tilavuuden mukaisiksi. Ja kun ensimmäisenä verkotetun tilavuuden yhden pinnan määritykset muuttuvat, katoaa määritykset koko tästä tilavuudesta. Itse verkko ei

katoa, mutta geometriaperusteisuus kylläkin. Toinen eri verkotusmenetelmien käyttämisestä samassa mallissa aiheutuva ongelma on rajapinnalla olevat solmut, joita ei eri elementtityypeistä johtuen saada automaattisesti yhtymään. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on I-DEAS:ssa olemassa työkaluja, mutta rajapinnan läheisyydessä tuloksiin on suhtauduttava tavanomaista suuremmalla varauksella.

Ennen elementtiverkon luomista sitä voidaan esikatsella ja arvioida siihen tulevien elementtien laatua. Laadun arviointi perustuu siihen, että todellista elementtiä verrataan ideaaliseen elementtiin eri tavoin. Ideaalinen elementti, jota koordinaatistomuunnoksen avulla kuvataan todellisen elementin geometriaksi, on määritelty referenssi-koordinaatistossa. Lukuisista laatua kuvaavista mittareista tärkeimmät ovat elementtien vääristymää (distortion) ja venymää (stretch) kuvaavat luvut. Venymää arvioitaessa elementin sisälle piirretään mahdollisimman suuri ympyrä. Tämän ympyrän säteen ja elementin pisimmän särmän suhdetta verrataan ideaalisen elementin vastaavaan suhteeseen (kuva 5.4). Mitä enemmän todellisen elementin muoto poikkeaa ideaalisesta, sitä pienempi on venymää kuvaava luku. Luvun ollessa nolla, häviää kaksiulotteiselta elementiltä pinta-ala. Vastaavasti tilavuuselementti kutistuu tällöin kaksiulotteiseksi.



Kuva 5.4 Venymän laskentaperiaate

Elementin vääristymä kuvaa sitä, kuinka paljon elementin muoto poikkeaa ideaalisen elementin muodosta. Kaksiulotteisen elementin tapauksessa sen arvo lasketaan kaavalla

$$\text{vääristymä} = \frac{|\mathbf{J}|}{\text{elementin todellinen ala}} * \text{ref. elementin ala}, \quad (5.1)$$

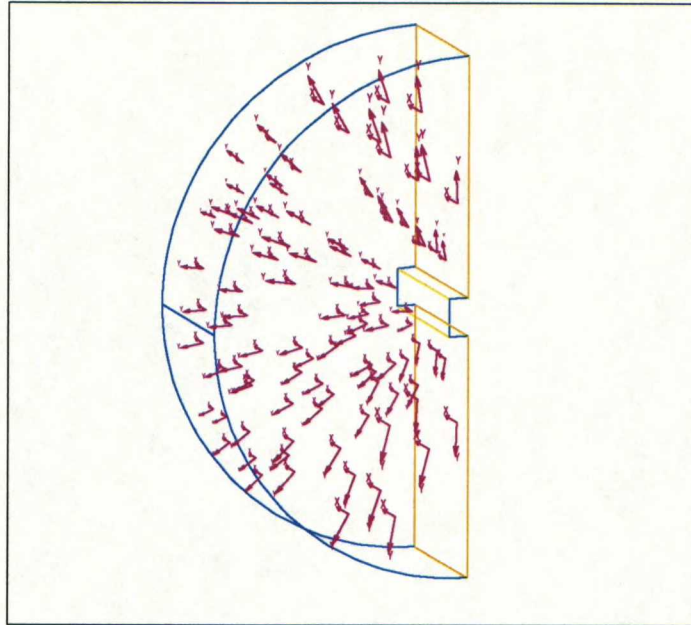
missä $|\mathbf{J}|$ on koordinaatistojen välisen kuvauksen Jacobin matriisin determinantti. Lineaaristen elementtien tapauksessa vääristymällä ei ole merkitystä, sillä se saa aina arvon yksi. Käytännössä sopivaksi raja-arvoiksi sekä vääristymälle että venymälle

havaittiin arvo 0.1. Mikäli tätä huonompia arvoja esiintyy, on syytä esimerkiksi paikallisesti kasvattaa elementtitiheyttä.

Materiaaliparametrien asettaminen

Kullekin elementille määritetään verkotusvaiheessa materiaaliparametrit. Tilavuutta tai pintaa verkotettaessa saavat kaikki siihen kuuluvat elementit automaattisesti yhdenmukaiset materiaalimäärytykset. Määritettäessä materiaalia, voidaan kullekin sen ominaisuudelle antaa numeroarvon lisäksi arvo 'Null', mikäli kyseistä ominaisuutta ei analyysissä tarvita. Koska tässä työssä keskitytään ainoastaan ajasta riippumattomien lämpökenttien ratkaisuun, ei materiaaleille tarvitse määrittää muita ominaisuuksia kuin nimi ja lämmönjohtavuudet. Jälkimmäinen on monikossa siksi, että isotrooppisten materiaalien lisäksi tarvitaan ortotrooppisia materiaaleja, joiden ominaisuudet riippuvat tarkastelusuunnasta. Näin on asian laita esimerkiksi homogenisoidun vyyhtimateriaalin kanssa. Sen lämmönjohtavuus radiaalisuunnassa on johdineristeistä johtuen huomattavasti aksiaali- ja kehän suuntaisia johtavuuksia huonompi.

Elementeille, jotka saavat ortotrooppiset materiaaliasetukset, täytyy määrittää materiaalin suuntavektorit (material orientation vector), sillä materiaalisuunnat eivät oletusarvoisesti seuraa malligeometrian pääkoordinaatistoa. Vektorit on helpointa määrittää karteesisen peruskoordinaatiston avulla, jolloin tehtäväksi jää ensisijaisen (primary) ja toissijaisen (secondary) akselin valinta. Kolmas akseli määräytyy automaattisesti näiden kahden perusteella. Akselit voidaan poimia joko geometriasta tai mallin pääkoordinaatistosta ja ne voidaan asettaa edustamaan mitä tahansa karteesisen koordinaatiston akselia. Ensisijaisen ja toissijaisen akselin määrittämiseen on lukuisia eri tapoja. Eräs hyödyllinen on menetelmä, jossa ensisijainen akseli asetetaan seuraamaan jonkin käyrän tangenttia. Tästä on hyötyä mm. vyyhdenpäässä, jossa kaksikerroskäämityksen uran ylemmän puoleinen johdinnippu yhdistyy alemmanpuoleiseen. Tällä alueella vyyhden aksiaalisuuntainen johtavuus on vyyhdenpään kaaren suuntainen, jolloin ensisijainen akseli voidaan määrittää kaaren tangentin suuntaiseksi (kuva 5.5).



Kuva 5.5 Materiaalin suuntavektorit vyyhdenpääalueella

Rakennettaessa lämpömallia TMG:llä, tarvitaan reunaehtojen mallintamiseksi kuorielementtejä (ks. 5.3 Alkuarvot ja reunaehdot). Koska niiden ei kuitenkaan haluta vaikuttavan simuloinnin tuloksiin, luodaan niitä silmällä pitäen materiaali, jonka kaikki ominaisuudet ovat tyyppiä 'Null'. Lisäksi kuorielementtejä varten kannattaa luoda uusi fyysisten ominaisuuksien taulukko (physical property set), jossa niiden paksuus määritellään nolllaksi.

5.3 Alkuarvot ja reunaehdot

Simuloinnin alkuarvoina annettavat häviötehotiheydet määritetään 'Boundary Condition' -lohkossa toiminnolla 'Heat generation'. Häviötehotiheydet kohdistetaan tilavuuselementteihin, ja ne määritetään joko vakioiksi tai lämpötilariippuviksi. Lämpötilariippuvuus voidaan antaa yhtälön tai taulukon muodossa. Mikäli simulointi tehdään TMG:ssä, tulee sieltä erikseen valita laskentaan mukaan se reunehtoryhmä (Boundary condition set), johon halutut häviöt on määritelty. Reunaehtoryhmä on nimensä mukaisesti kokoelma 'Boundary Conditions' -lohkossa malliin asetettuja reunaehtoja.

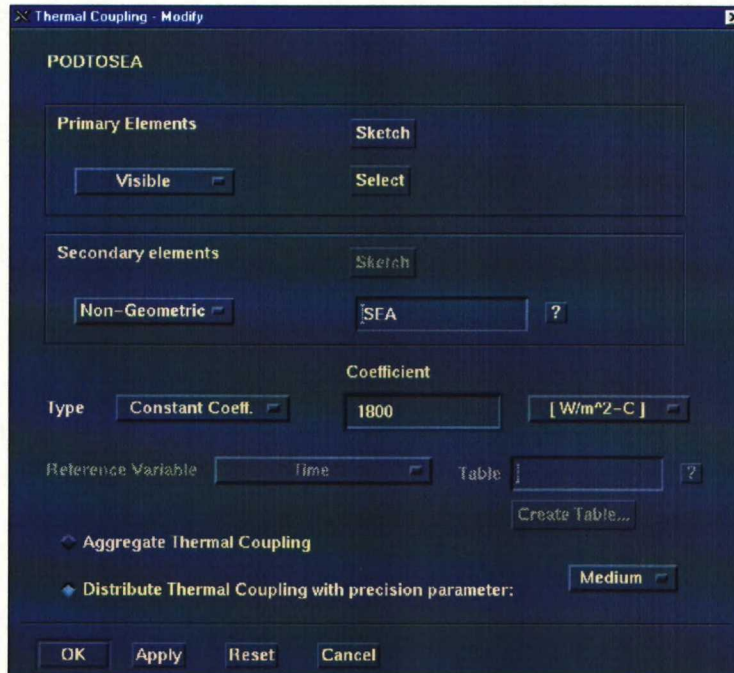
Lämpömallinnuksen reunaehtoja ovat konvektio, vakiolämpötila, vakio lämpövirrantiheys sekä adiabaattiset symmetriapinnat. Jälkimmäisiä ei tarvitse erikseen määritellä, sillä kaikki mallin ulkopinnat, joille ei erikseen määritetä muita reunaehtoja, ovat automaattisesti adiabaattisia. Muut reunaehdot voidaan mallintaa joko TMG:ssä tai

Boundary Condition –lohkossa. Tosin säteilyä sekä elementtien välistä konvektiota ei pystytä Boundary Condition –puolella mallintamaan. Seuraavaksi keskitytään reunaehtojen asettamiseen ainoastaan TMG:ssä.

Koska TMG käyttää kontrollitulavuusmenetelmää, jossa siis elementin keskelle muodostetaan yksittäinen laskentapiste, joudutaan reunaehtopinnat päällystämään kuorielementeillä (thin shell elements), jotta reunaehdot saadaan konduktanssimallissa oikeaan paikkaan. Itse reunaehdot kohdistetaan suoraan näihin kuorielementteihin. TMG:ssä on optio reunaehtojen kohdistamiselle kuorielementtien sijasta itse pinnalle, mikä periaatteessa onkin käytettävyyden sekä mallin päivitettävyyden kannalta loistava ominaisuus. Tässä kohtaa ohjelmassa on kuitenkin valmistajankin tunnustama virhe, joka kaataa ratkaisijan, jos hiemankin suuremmilla malleilla yritetään näin menetellä. Konvektion mallinnus mallin ulkopinnoilta kannattaa aloittaa geometriaan kuulumattoman elementin (non-geometric element) luomisella. Tälle ”virtuaali-elementille” annetaan vakiolämpötila, jonka jälkeen sen ja pinnan kuorielementtien välille luodaan lämpökonduktanssit. Tämä tapahtuu antamalla arvo pinnan lämmönsiirtymiskertoimelle h , jota ohjelma laskennan aikana kertoo kunkin kuorielementin pinta-alalla. Tällöinhän saadaan lämpöverkoista tutun konvektiivisen lämpöresistanssin käänteisarvo lämpökonduktanssi kaavan 5.2 mukaisesti

$$G = hA = \frac{1}{R} \quad (5.2)$$

Kuvassa 5.6 on esitetty valikko, jossa pinnan ja geometriaan kuulumattoman elementin ’SEA’ välille määritetään lämpökonduktanssi, jonka lämmönsiirtymiskertoimen arvo on $h=1800 \text{ W/m}^2\text{C}$. Konvektiopinnan kuorielementit valitaan kohdassa ’Primary Elements’ ja elementit, johon konvektio tapahtuu kohdassa ’Secondary elements’.



Kuva 5.6 Taulukko lämpökonduktanssin määrittämiseksi

Koska tässä työssä haluttiin mallintaa myös koneen sisällä oleva ilma, jonka lämpötilaa ei tiedetä, täytyy konvektio koneen sisäpinoilta tähän ilmaan määrittellä edellä esitetystä poikkeavalla tavalla. Tämä onnistuu asettamalla näiden pintojen kuorielementeille rajapintakonduktanssit (Interface), jolloin elementtejä, joihin lämpö siirtyy ei tarvitse kuvan 5.6 valikossa erikseen määrittellä. Käytännössä konduktanssi tulee rajapintaa vasten olevien elementtien laskentasolmujen väliin.

5.4 TMG-ratkaisija ja jälkiprosessointi

Kontrollitilavuusmenetelmästä johtuen TMG:llä on oma ratkaisijansa. Tälle löytyy lukuisia eri asetuksia koskien ratkaisumenetelmää, ratkaisun suppenemista sekä sitä, kuinka konduktanssiverkko luodaan elementtiverkon pohjalta. Näiden asetusten oletusarvoihin ei kuitenkaan ole ollut tarvetta puuttua. Ennen ratkaisijan käynnistämistä on syytä valita sekä ratkaisijan luomille tiedosoille hakemisto että laskennalta haluttavat tulokset. Valittavissa on mm. lämpötilat, lämpögradientit, lämpövirrat sekä malliin muodostettu konduktanssiverkko. Konduktanssiverkon tarkastelu onnistuu vain yksinkertaisimmilla malleilla konduktanssien valtavan määrän johdosta. Ennen simuloinnin aloittamista on myös syytä tallentaa mallitiedosto ja tuhota kaikki simulointiryhmät. Tämä siksi, että edellä esitetystä virheestä johtuen ratkaisija kaatuu, mikäli yhdessä tai useammassa simulointiryhmässä olevien elementtien lukumäärä on

suurempi kuin 3800. Kun malli on ratkaistu, kannattaa ensimmäiseksi ladata ennen ratkaisua talletettu mallitiedosto, jolloin simulointiryhmät saadaan jälleen käyttöön.

Ratkaisun jälkeen halutut tulokset on luettava koneen muistiin TMG:n kautta, ts. ne eivät automaattisesti näy jälkiprosessointilohkossa. Ratkaisuprosessin kuluessa TMG kirjoittaa tuloshakemistoon tekstitiedostoja, joista selviää ratkaisuvaiheet, maksimi- ja minimilämpötilat sekä koko mallista ympäristöön siirtyvä lämpövirta. Jälkiprosessointitilan useista tulosten tarkasteluun tarjotuista työkaluista hyödyllisimmiksi havaittiin lämpötilan tasa-arvokäyrästä (contour plot), lämpökoetin (probe) sekä xy-graafi, johon elementtien lämpötilat saadaan piirrettyä esimerkiksi niiden välisen etäisyyden funktiona. Tarvittaessa xy-graafin tulokset voidaan myös siirtää tekstitiedostoon, josta niiden analysointi esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmilla on varsin helppoa. Lämpökoetin on työkalu, jolla saadaan kursorin kohdalla oleva lämpötila-arvo näkyviin näytölle. Käytön edellytyksenä on tasalämpökäyrästä ottaminen joltain mallin leikkauspinnalta.

6 Ruoripotkurimoottorin lämpömallinnus

Tässä työssä tehtiin lämpömallit ruoripotkurikäyttöön suunnitelluille kestmagnetoidulle tahtikoneelle sekä oikosulkukoneelle. Yhteistä näillä koneilla on se, että kummankin jäähdytys perustuu lämmön johtumiseen podin kuoren läpi meriveteen. Oikosulkukoneelle tehtiin myös kaksiulotteista tilannetta kuvaava malli, jolla tutkittiin podin kaulan vaikutusta sen kohdalla sijaitsevien vyyhtien lämpenemään.. Lisäksi sen avulla nähdään, mikä merkitys aksiaalisuuntaisen lämpövirtauskomponentin puuttumisella on koneen eri rakenteiden lämpenemiin.

Ruoripotkurimoottoreiden lämpömallit on tehty edellisessä luvussa esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Seuraavassa käydään läpi sekä kaksi- että kolmiulotteista lämpökenttää kuvaavien mallien tilavuusmallinnus, niihin todellisuuteen nähden tehdyt yksinkertaistukset sekä niiden elementtiverkotus. Tämän jälkeen tarkastellaan erikseen kummallekin koneelle tehtyjä lämpöanalyysyjä ja niistä saatuja tuloksia.

6.1 Tilavuusmallinnus

Tarkastelun alla olevia ruoripotkurimoottoreita varten tehtiin kolme tilavuusmallia: Kaksi- ja kolmiulotteiset mallit oikosulkukoneelle ja kolmiulotteinen malli kestmagnetoidulle tahtikoneelle. Itse asiassa kaksiulotteista tilannetta kuvaava mallikin jouduttiin tekemään tilavuusmallina, sillä I-DEAS:ssa lämpökenttiä ei voida ratkaista kaksiulotteisina. Mallin ratkaisu vastaa kuitenkin kaksiulotteista tapausta, sillä lämpövirralle ei sallita aksiaalisuuntaista komponenttia. Koska kummallekin koneelle tehdyt kolmiulotteiset mallit ovat pääpiirteissään samanlaiset, esitetään niiden mallinnus yhdessä. Kaksiulotteinen malli poikkeaa edellisistä siinä määrin, että sen mallinnusvaiheet esitetään erikseen.

Konegeometrian yksinkertaistukset

Tilavuusmalleja on todellisuuteen nähden yksinkertaistettu mallintamisen ja verkottamisen helpottamiseksi sekä elementtien lukumäärän minimoimiseksi. Koska reunaehtoina annettavia lämmönsiirtymiskertoimia ei kuitenkaan saada tarkasti määritettyä, ei konegeometrioiden tarkka mallinnus tuo analyysiin sen vaatimaa työtä vastaavaa lisäarvoa. Tarkastelun ulkopuolelle jätettyjä yksityiskohtia olivat mm. staattorihampaiden kynnet, käämityksen tuentarenkaat sekä laakerit. Myöskään

akseleita ei mallinnettu, sillä niiden kautta kulkevan lämpövirran osuutta on varsin hankala pukea reunaehdoksi. Oikosulkukoneen tapauksessa ei oikosulkurenkaan tarkkaa muotoa kaikkine yksityiskohtineen lähdetty tavoittelemaan. Näin ollen esimerkiksi renkaaseen hitsattavat tuuletussiivekkeet jätettiin mallintamatta. Kestomagneetikoneen mallista tarkastelun ulkopuolelle jätettiin mm. roottorisauvat sekä urakiilat. Jälkimmäisiä käytetäänkin ainoastaan staattoripaketin päätyosissa, jolloin niiden vaikutus lämpökenttään on mitätön.

Kuten tilavuusmallien kuvista myöhemmin nähdään, on vyyhdenpäägeometriaa yksinkertaistettu sijoittamalla koko vyyhti samaan uraan ja mallintamalla vyyhdenpää suoraksi. Tämä on perusteltua, sillä kaikilla vyyhdenpääpinnoilla joudutaan kuitenkin käyttämään samaa keskimääräistä arvoa lämmönsiirtymiskertoimelle. Vyyhtien mallinnuksessa on toki huolehdittava siitä, että vyyhden tilavuus ja vyyhdenpään keskipituus vastaavat todellisuutta. Vyyhdenpään todellisen geometrian mallinnukseen kannattaa mielestäni ryhtyä vasta siinä vaiheessa, kun lämmönsiirtymiskertoimien jakautuminen näillä pinnoilla voidaan kuvata tarkemmin.

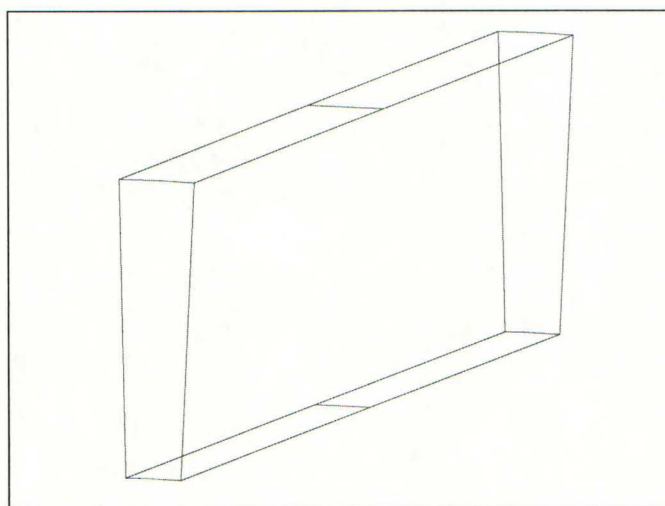
Yksittäisiä kuparijohtimia johdineristeineen ei erikseen mallinnettu vaan koko vyyhdensivu redusoitiin yhdeksi materiaaliksi. Tämä tehtiin yksinkertaisesti siitä syystä, että muuhun geometriaan nähden ohuet rakenteet vaatisivat hyvin paljon elementtejä, etenkin jos niiden taso haluttaisiin pitää edes kohtuullisena. Samasta syystä ei uraeristeitä vyyhtien välissä olevaa eristekerrosta lukuunottamatta mallinnettu tilavuuksiksi. Niiden muodostama lämpöresistanssi huomioitiin staattoripaketin ja vyyhden väliselle rajapinnalle asetetuilla lämpökonduktansseilla, joiden suuruus määräytyy eristeen paksuuden ja lämmönjohtavuuden perusteella.

Kolmiulotteinen malli

Ruoripotkurimoottorista mallinnettava geometria käsittää staattorin, roottorin, podin kuoren sekä jäädyttävän ilman ilmapälissä ja vyyhdenpääalueella. Koneista mallinnetaan pienin mahdollinen symmetria-alue, jolla aksiaalisuunnassa tarkoitetaan mallin ulottumista vyyhdenpääilmatilan etureunasta staattoripaketin puoleenväliin ja radiaalisuunnassa akselin keskipisteestä podin kuoren ulkoreunaan. Napakenkäisen roottorin tapauksessa pienin symmetria-alue kehän suunnassa on puolen navan suuruinen. Häkkikäämityksellä varustettua oikosulkumoottoria mallinnettaessa pienin

symmetria-alue kehän suunnassa ulottuu staattorihampaan keskeltä seuraavan uran keskelle. Tällöin roottorin uraluku tulee redusoida staattorin uralukua vastaavaksi.

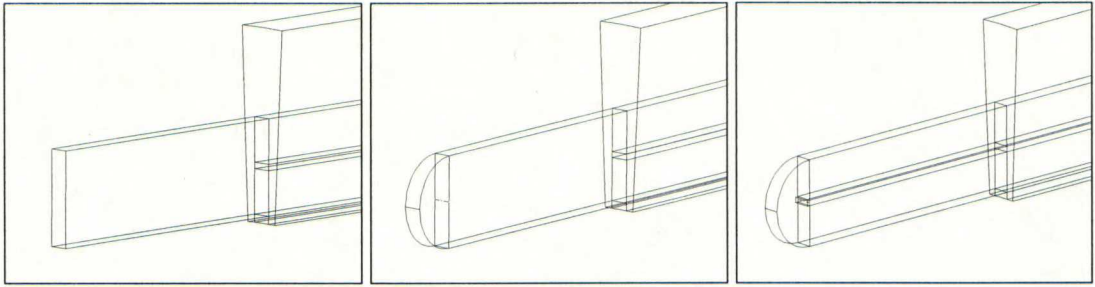
Kummankin konetyypin tapauksessa staattorin mallinnus aloitetaan tekemällä perusmuoto (kuva 6.1). Radiaalisuunnassa se käsittää matkan ilmavälistä staattoriselän ulkopintaan ja kehän suunnassa $360/Q$ -astetta, missä Q on staattorin uraluku. Aksiaalisuunnassa lohko on puolen staattoripaketin pituinen.



Kuva 6.1 Staattorin perusmuoto

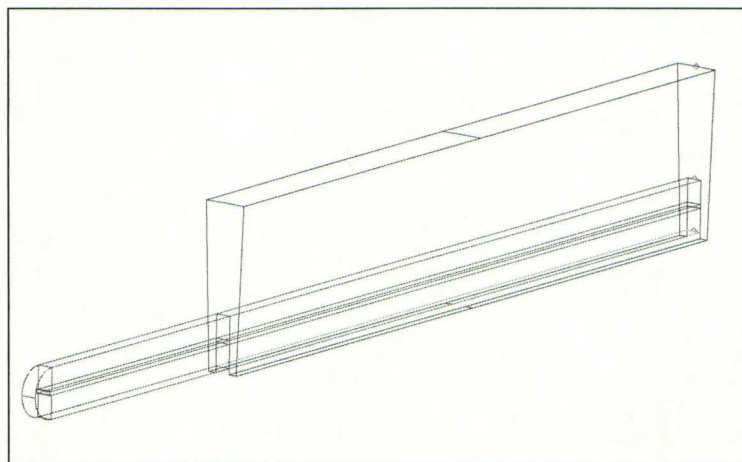
Perusmuotoon mallinnetaan staattoriura piirtämällä sen poikkileikkaus vyyhdenpäpuoleiseen päätyyn ja pursottamalla sitä aksiaalisuunnassa perusmuodon läpi siten, että se jakaa perusmuodon kahteen tilavuuteen (partition). Samalla periaatteella ositetaan tilavuus vyyhdensivujen väliin jäävälle eristekerrokselle ja tilanteesta riippuen joko leikataan (cut) tilavuus ura-aukolle tai ositetaan tilavuus urakiilalle.

Vyyhdenpää mallinnetaan pursottamalla (extrude) ensin tämän suoran osan profiili perusmuodon päädyistä (kuva 6.2). Pursotusmitta lasketaan siten, että johtimen puolen kierroksen pituus – ja siten myös vyyhden tilavuus ja pinta-ala – tulee todellisuutta vastaavaksi. Vyyhdenpään pyöreä pääty tehdään pyöräytyspursottamalla (revolve) edellisessä vaiheessa pursottamalla saadun palikan päätyä 180° . Tämän jälkeen ositetaan tilavuus vyyhdenpääalueella vyyhdensivujen väliin jäävälle ilmalle piirtämällä ensin tämän poikkileikkaus vyyhdenpään sivupintaan ja pursottamalla tätä pinnan normaalin suuntaan vyyhdensivun leveyden verran. Näiden toimenpiteiden jälkeen staattorin tilavuusmalli on saatu kuvan 6.3 mukaiseksi.



Kuva 6.2 Vyyhdenpään mallinnus: Suoran osan pursotus, päädyn pyöräytyspursotus sekä ilmatilan osiointi.

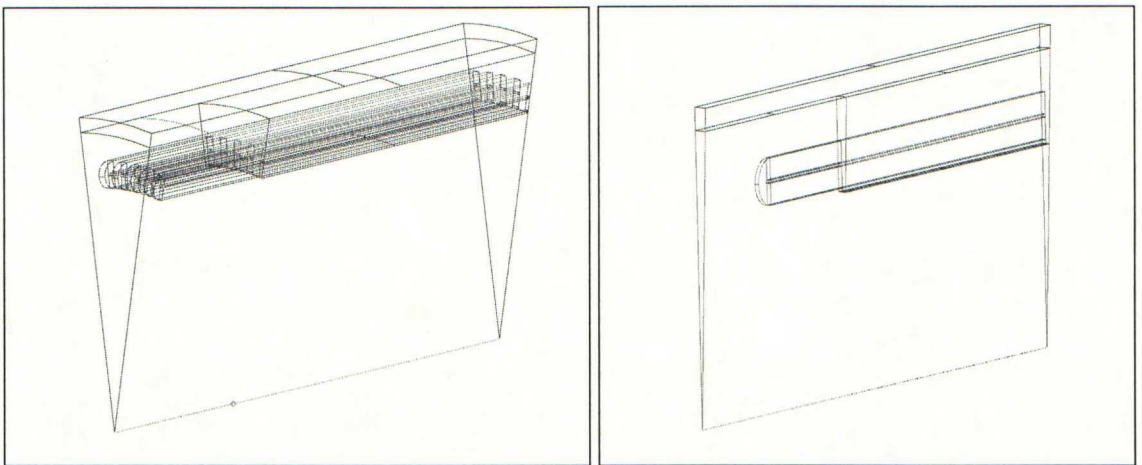
Seuraava vaihe staattorin mallinnuksessa on kuvan 6.3 geometrian monistaminen (pattern) kehän suunnassa niin monta kertaa, että vaadittu symmetria-kulma täyttyy. Tällöin $2p$ -napaisen avonaparoottorilla varustetun koneen tapauksessa kulman suuruudeksi saadaan $2\pi/4p$ - radiaania, joka täytetään monistamalla kuvan 6.3 $2\pi/Q$ -radiaania kattavaa staattorilohkoa $Q/4p$ -kappaletta. Tarpeen vaatiessa jakolaskun $Q/4p$ tulos pyöristetään seuraavaan kokonaislukuun, sillä monistettavien määrän tulee olla kokonaisluku. Mikäli näin joudutaan tekemään, saadaan kehäkulma halutuksi yksinkertaisesti leikkaamalla ylimääräinen viipale pois. Oikosulkukoneen tapauksessa pienin symmetria-alue kehän suunnassa saadaan yksinkertaisesti leikkaamalla kuvan 6.3 geometriasta puolet pois.



Kuva 6.3 Valmis yhden uran käsittävä staattorimalli

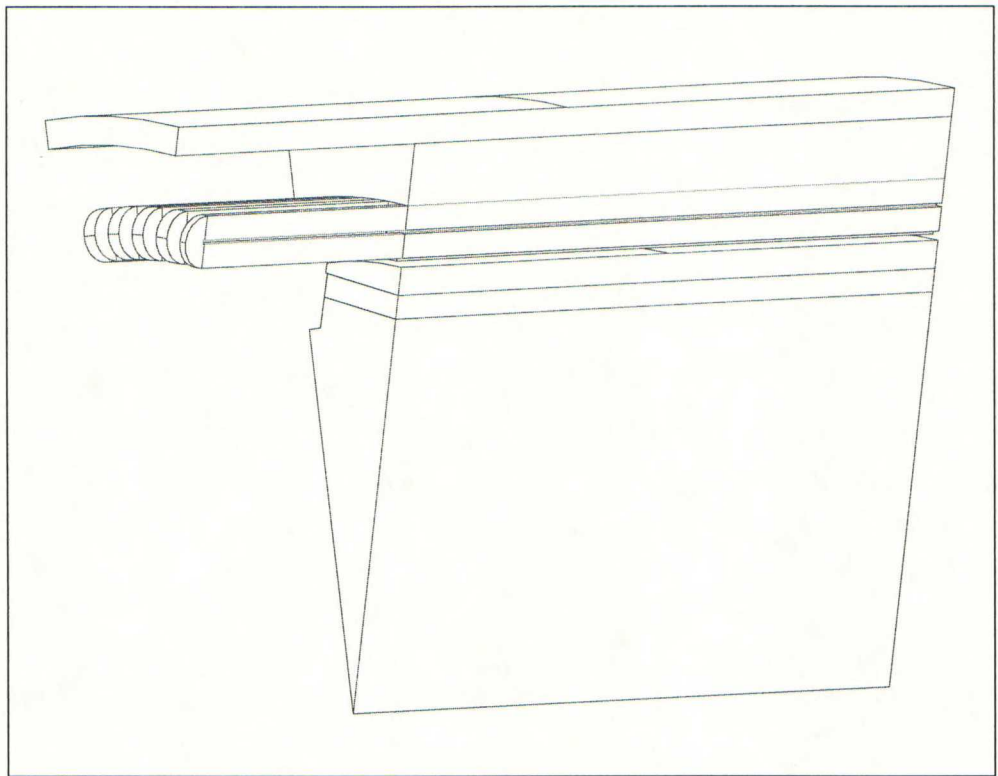
Viimeinen vaihe staattorin mallinnuksessa on staattorihampaiden osioiminen omiksi tilavuuksiksi. Näin on tehtävä, mikäli hampaisiin halutaa sijoittaa erisuuruiset häviöt kuin staattoriselän alueelle. Osioiminen tehdään luonnostelemalla viivat staattoriurien yläkulmien väliin ja pursottamalla näitä staattorin levysydämen läpi.

Ilmatilan mallintamiseksi staattorirakenteet liitetään kiilan muotoiseen sylinterilohkoon (kuva 6.4), jonka säde saadaan lisäämällä staattorin ulkosäteeseen podin kuoren paksuus. Itse asiassa staattoria ei liitetä, vaan sillä jaetaan kiilan tilavuus pienempiin osatilavuuksiin. Staattori saadaan kiilan sisälle oikeaan paikkaan asemointiehtojen (relations) avulla. Vaatimalla, että kummankin kappaleen keskipisteet yhtenevät, saadaan kappaleet radiaalisuunnassa oikein ja ulkopintojen väliin jää tilavuus podin kuorelle. Aksiaalisuunnassa staattori saadaan oikeaan paikkaan määräämällä kiilan ja staattorigeometrian päädyt samaan tasoon. Kun vielä tässä tasossa määrätään kappaleiden reunasärmien välinen kulma nollassi, siirtyy staattori kiilan sisälle toivottuun paikkaan.

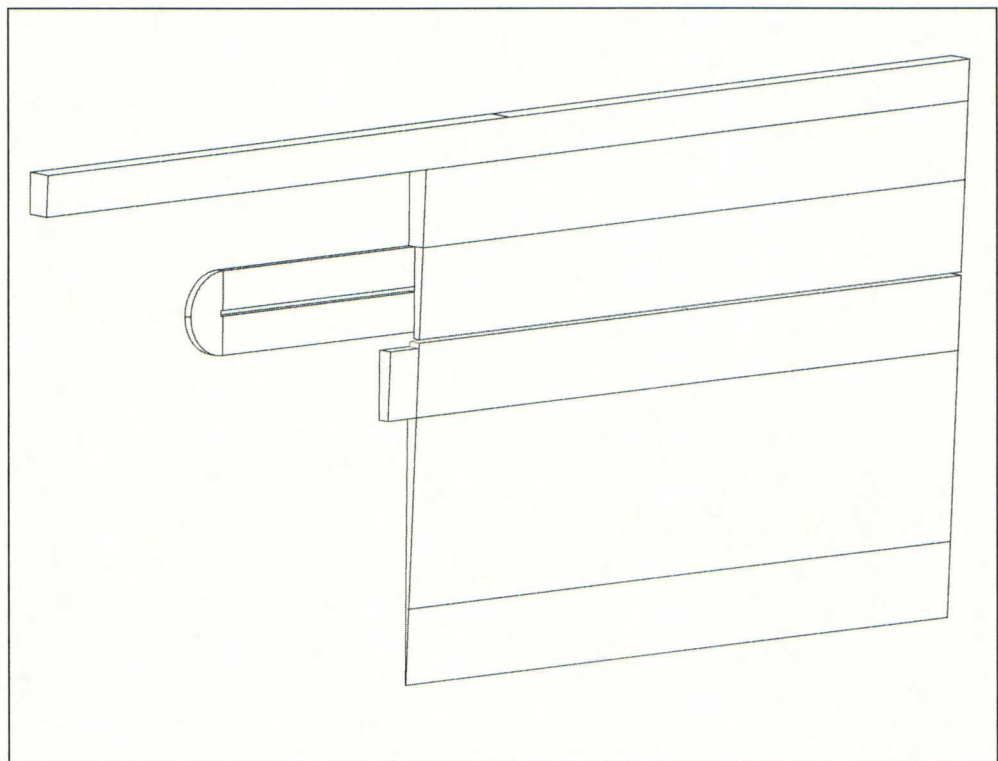


Kuva 6.4 Staattori, podin kuori sekä ilmatila kestomagneetti- ja oikosulkukoneen tilavuusmalleissa.

Roottoreiden mallinnus aloitetaan siirtämällä työtaso staattoripaketin vyyhdenpääpuoleiseen pätyyn ja piirtämällä tähän tasoon roottorin poikkileikkaus. Poikkileikkauksella osioidaan kiilasta tilavuus roottorille pursottamalla sitä aksiaalisuunnassa työtasosta kiilan staattoripaketin puolittavaan pätyyn (ks. kuvat 6.5 ja 6.6). Tämän jälkeen roottorista osioidaan kestomagneetikoneen tapauksessa tilavuus kestomagneetille ja oikosulkukoneen tapauksessa tilavuus roottorisauvalle. Oikosulkukoneen roottoriin mallinnettiin lisäksi oikosulkurengas. Koska kestomagneetikoneen roottorin pätyyn ei lisätty piirteitä, voidaan roottorin poikkileikkausta pursottaa myös kiilan pätyyn saakka. Tällöin ilmatilavuus saadaan osioitua pienempiin tilavuuksiin, mikä helpottaa myöhemmin elementtiverkotusta.



Kuva 6.5 Kestomagnettikoneen tilavuusmalli ilman kiilan reunaviivoja.

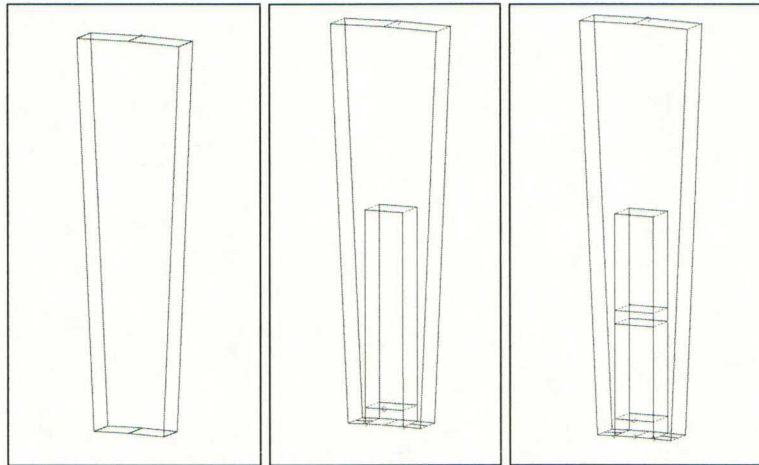


Kuva 6.6 Oikosulkukoneen tilavuusmalli ilman kiilan reunaviivoja.

Kaksiulotteinen malli

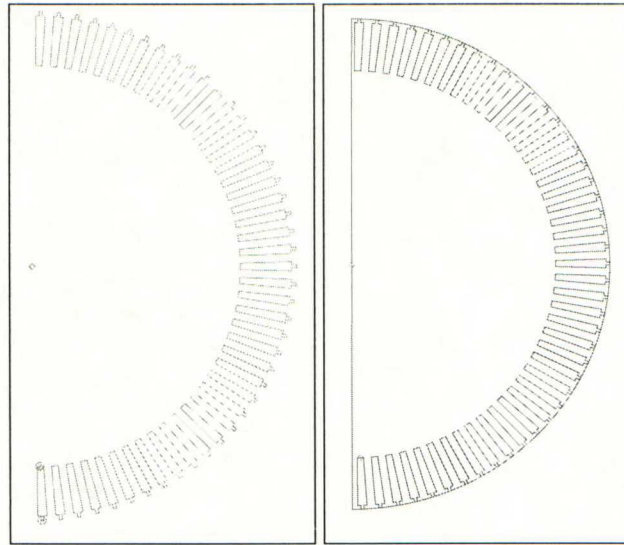
Tässä yhteydessä on syytä todeta, että nimi 'kaksiulotteinen malli' juontaa juurensa sen kuvaamasta tilanteesta, ei sen fyysisestä rakenteesta. Fyysisesti kaksiulotteisia lämpömalleja ei I-DEAS:ssa eikä TMG:ssä pystytä ratkaisemaan. Tästä syystä mallit on tehtävä tilavuusmalleina. Reunaehdoilla varmistutaan siitä, että saatava ratkaisu on kaksiulotteinen.

Tilavuusmalli rakentuu neljästä eri osasta (part): Staattori, roottoriurat, roottori sekä valmis malli. Perusideana on se, että ensin mallinnetaan staattori ja roottori omiksi osiksi, jonka jälkeen ne "istutetaan" puolisyylinterin muotoiseen aihioon. Staattorin mallinnuksessa noudatettiin samoja periaatteita kuin kolmiulotteisessa tapauksessa: Yhden urajaan käsittävää valmista geometriaa monistetaan kehän suunnassa niin monta kertaa, että haluttu kehäkulma staattoria saadaan aikaiseksi. Yhden urajaan mallinnus on esitetty kuvassa 6.7. Valmiista perusmuodosta on osoitettu tilavuudet uralle, urakiilalle, vyyhdensivuille ja näiden väliselle eristeelle. Perusmuodon aksiaalisuuntaisella pursotuspituudella ei käytännössä ole merkitystä, kunhan se ei ole nolla.



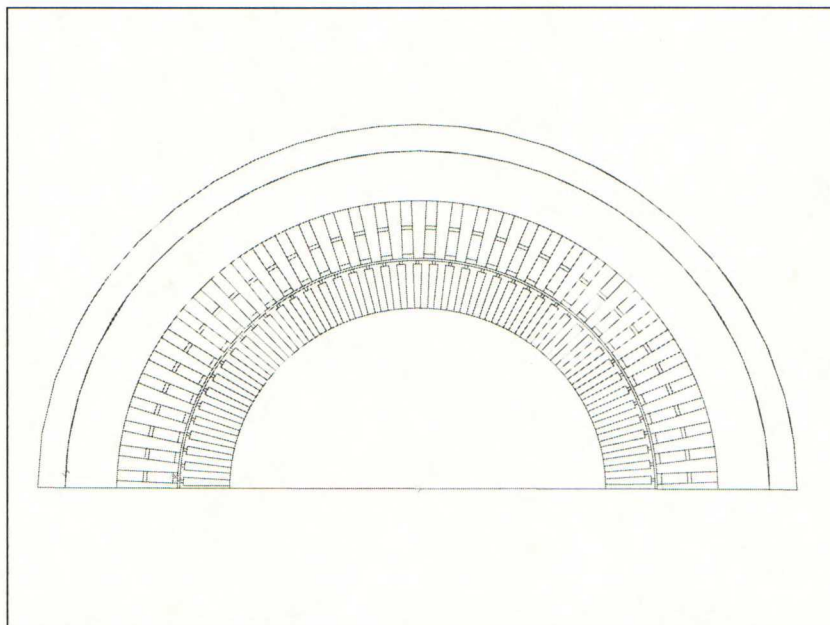
Kuva 6.7 Staattorin tilavuusmallinnus urajaan osalta.

Roottorigeometriasta mallinnettiin ensin urat, joilla seuraavassa vaiheessa osoitettiin roottorin levysydämen tilavuutta (kuva 6.8). Urat saatiin oikeaan paikkaan levysydämessä asemointiehtojen avulla. Vaadittiin, että kappaleiden keskipisteet ja päätytasot yhtenevät ja määrättiin arvo reunimmaisen uran ja levysydänlohkon reunan väliselle kulmalle.



Kuva 6.8 Roottorin mallinnus

Valmiilla staattorilla ja roottorilla osioitiin puolisyylinterin muotoisesta lohkosta tilavuudet näille rakenteille. Puolisyylinterin säde on staattorin ulkosäteen ja podin paksuuden summa. Kun vielä staattorihampaat ja roottorisauvat osioidaan omiksi tilavuuksiksi saadaan malli kuvan 6.3 kaltaiseksi. Kyseessä on siis yksi osa, jossa on tilavuudet staattori- ja roottorirakenteille, podin kuorelle sekä ilmavälille. Kaulan mallintamiseksi podin ulkopinta jaettiin kahteen osaan (split surface) arvioidusta kaulan alkamiskohdasta. Saadut pinnat verkotetaan erikseen, jolloin niiden kuorielementteihin voidaan kohdistaa eri lämmönsiirtymiskertoimet.



Kuva 6.9 Kaksiulotteisen tapauksen tilavuusmalli.

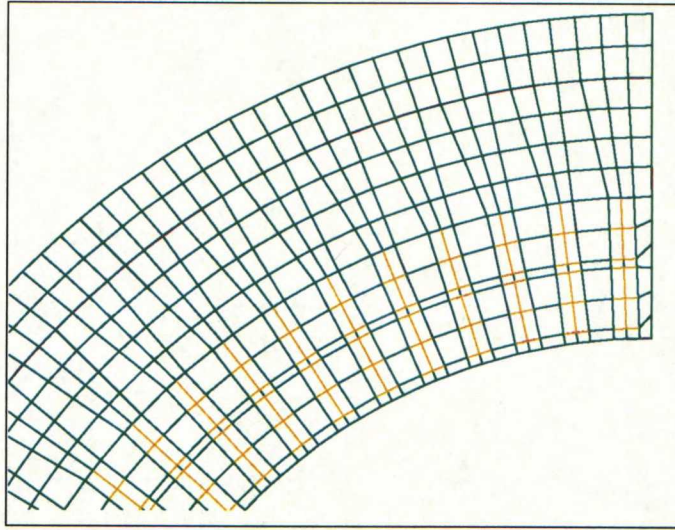
Vaihtoehtoinen mallinnustapa olisi ollut koko konegeometrian kuvaaminen yhden urajaon osalta ja tämän rakenteen monistaminen kehän suunnassa. Tällöin roottorin uraluku joudutaan redusoimaan staattorin uralukua vastaavaksi, millä ei tosin lämpökentän kannalta ole suurtakaan merkitystä, kunhan huolehditaan roottorihäviöiden säilymisestä vakiona muutoksessa. Toisaalta läpikäydyn mallinnustavan eduksi voidaan laskea juuri se, että sen avulla voidaan toisistaan riippumatta tutkia eri staattori- ja roottorirakenteiden vaikutusta lämpökenttään.

6.2 Elementtiverkotus ja simulointiparametrit

Elementtiverkotus

Kolmiulotteista tilannetta kuvaavat tilavuusmallit verkotettiin vapaalla verkotuksella lineaarisilla tetraedrielementeillä. Reunaehtojen mallintamiseksi vyyhdenpääpinnat, staattorin ja roottorin ilmaväli- ja päätypinnat, podin ulko- ja sisäpinnat sekä staattoriurien sisäpinnat verkotettiin lineaarisilla kolmioelementeillä, joiden paksuudeksi asetettiin nolla. Periaatteessa mallit olisi voitu verkottaa myös ohjatusti. Tällöin ongelmaksi kuitenkin muodostuu vyyhdenpääalueen ilmatilavuus, jonka osioiminen ohjatun verkotuksen edellyttämiin viisi- tai kuusisivuisiin tilavuuksiin osottautui turhankin haasteelliseksi tehtäväksi. Ennen verkotusta samaan ryhmään kuuluvat geometrian osat koottiin simulaatio-ryhmiin, jolloin verkotusprosessi voidaan suorittaa kaikille ryhmän jäsenille samanaikaisesti. Verkotuksen jälkeen kuhunkin reunaehtopintaan kuuluvat kuorielementit kerättiin simulaatio-ryhmiin. Tämä helpottaa lämpökonduktanssien asettamista TMG:ssä, sillä ohjelmavirheestä johtuen kohduktanssit joudutaan pintojen sijasta kohdistamaan suoraan itse pinnan elementteihin.

Kaksiulotteista tilannetta kuvaava malli verkotettiin ohjatusti. Tilavuuselementteinä käytettiin lineaarisia heksaedrielementtejä, jotka reunaehtopinnoilla päällystettiin suorakaide-elementeillä. Kuvassa 6.10 on esitetty elementtiverkkoa staattorin osalta. Kuvassa vyyhtielementit on esitetty punaisella. Aksiaalisuunnassa elementtien lukumäärä on yksi.



Kuva 6.10 Kaksiulotteisen mallin elementtiverkkoa staattorissa.

Ohjattu verkotus on ainakin tässä tapauksessa varsin työläs verkotustapa. Koska verkotettavan tilavuuden tulee olla vähintään viisi- ja enintään kuusisivuinen, joudutaan tilavuuden reunapintoja yhdistelemään ehdon toteutumiseksi. Näin esimerkiksi kuvan 6.10 staattoriselän verkotusvaiheessa täytyy kaikki hampaan ja uran staattoriselkää vasten olevat pinnat poimia mallista yhdistämistä varten. Ja koska pinnat on poimittava yksitellen, kysyy prosessi aikaa ja kärsivällisyyttä. Vaikeutensa verkon suunnitteluun tuo myös se tosiseikka, että verkotettavan tilavuuden vastakkaisille pinnoille on aina tultava sama määrä solmuja. Tämä heijastuu erityisesti ilmaväliin, sillä staattorin ja roottorin ilmavälipinnoille on lähes mahdotonta saada järkevästi samaa määrää solmuja, etenkin kun staattorin ja roottorin uraluvut poikkeavat toisistaan. Ongelma kierrettiin siten, että ilmavälin vastakkaisilla puolilla olevien kuorielementtien väliin määriteltiin konduktanssit, joilla kuvattiin ilman vaikutus ja joiden ansiosta ilmaväli tilavuuden verkotukselta vältyttiin. Konduktanssille saadaan arvo kaavasta:

$$G_{ag} = \frac{1}{R_{ag}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{ag,s} A_{ag}} + \frac{1}{h_{ag,r} A_{ag}} \right)} = \frac{h_{ag,r} h_{ag,s}}{h_{ag,s} + h_{ag,r}} A_{ag}, \quad (6.1)$$

missä $h_{ag,r}$ on lämmönsiirtymiskerroin roottorista ilmaväliin,
 $h_{ag,s}$ on lämmönsiirtymiskerroin staattorista ilmaväliin,
 A_{ag} on ilmaväli pinnan pinta-ala.

Määriteltäessä konduktanssia TMG:ssä, yhtälöstä (6.1) annetaan ainoastaan pinta-alan A_{ag} kertoimena oleva termi. Pinta-alan TMG laskee kuorielementtien alojen avulla itse.

Vyyhtimateriaalin redusointi

Vyyhden redusointi homogeeniseksi materiaaliksi perustuu tarkasteltavan alueen yli olevan lämpögradientin ja siitä poistuvan lämpövirran säilymiseen. Näiden vaatimusten toteuttamiseksi täytyy lämmönjohtavuuksille kussakin tarkastelusuunnassa laskea uudet arvot. Redusoidulle lämmönjohtavuudelle kuvan 6.11 y-suunnassa voidaan kirjoittaa:

$$Q_y = \frac{\Delta T_y}{R_y A} = \frac{\Delta T_y}{R_{\text{red},y} A} \Rightarrow \frac{\Delta T_y}{A \left[\frac{\sum d_{\text{ins}}}{k_{\text{ins}}} + \frac{\sum d_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}}} \right]} = \frac{\Delta T_y}{A \left[\frac{\sum d_{\text{ins}} + \sum d_{\text{Cu}}}{k_{\text{red},y}} \right]}$$

$$\Rightarrow k_{\text{red},y} = \frac{\sum d_{\text{ins}} + \sum d_{\text{Cu}}}{\frac{\sum d_{\text{ins}}}{k_{\text{ins}}} + \frac{\sum d_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}}}}, \quad (6.2)$$

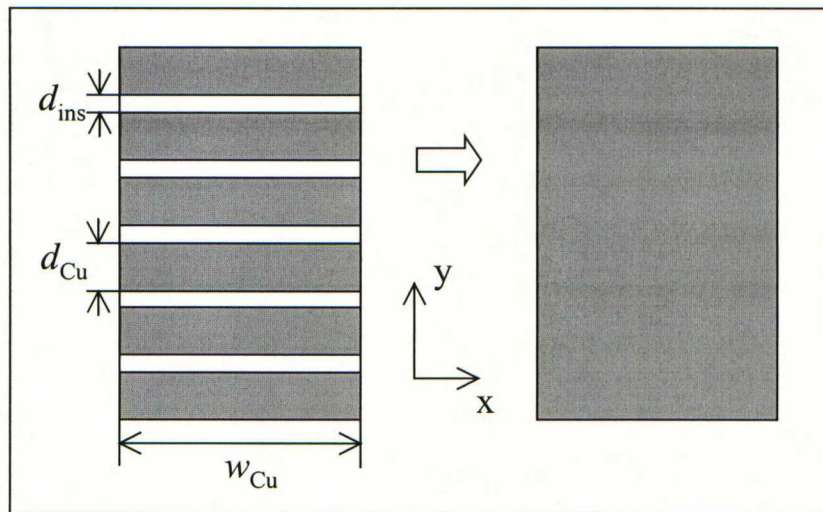
missä $k_{\text{red},y}$ on redusoitu lämmönjohtavuus y-suunnassa,

k_{ins} on eristeen lämmönjohtavuus,

k_{Cu} on kuparijohtimen lämmönjohtavuus,

R_y on alkuperäisen vyyhdensivun lämpöresistanssi y-suunnassa,

$R_{\text{red},y}$ on redusoidun vyyhdensivun lämpöresistanssi y-suunnassa.



Kuva 6.11 Vyyhtimateriaalin redusointi.

Alkuperäisessä johdinnipussa x-suuntainen lämpövirta koostuu kuparissa ja eristeissä kulkevista lämpövirran komponenteista. Näiden summa tulee olla yhtä suuri kuin homogeenisesta vyyhdistä ko. suuntaan poistuva lämpövirta:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{red},x} = Q_{\text{ins},x} + Q_{\text{Cu},x} &\Rightarrow \frac{\Delta T_x}{\frac{w_{\text{Cu}}}{k_{\text{red},x} (\sum d_{\text{ins}} + \sum d_{\text{Cu}}) l}} = \frac{\Delta T_x}{\frac{w_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}} (\sum d_{\text{Cu}}) l}} + \frac{\Delta T_x}{\frac{w_{\text{Cu}}}{k_{\text{ins}} (\sum d_{\text{ins}}) l}} \\
\Rightarrow k_{\text{red},x} &= \frac{k_{\text{Cu}} \sum d_{\text{Cu}} + k_{\text{ins}} \sum d_{\text{ins}}}{\sum d_{\text{Cu}} + \sum d_{\text{ins}}}, \quad (6.3)
\end{aligned}$$

missä l on vyyhden pituus aksiaalisuunnassa. Yhtälöstä (6.2) lasketaan redusoitu lämmönjohtavuus myös z-suunnalle.

Koska uraeristeiden muodostama lämpöresistanssi uran ja vyyhden välissä korvattiin uran pinnalle asetetuilla rajapintakonduktansseilla, joudutaan vapautunut tilavuus ”täyttämään” homogenisoidulla vyyhtimateriaalilla. Jotta tilanne säilyisi termisesti ennallaan, redusoidaan vyyhtimateriaalin lämmönjohtavuudet kasvanutta tilavuutta vastaaviksi. Redusointiperiaateen mukaan vyyhdensivun reunan ja keskikohdan välisen lämpöresistanssin tulee säilyä jokaiseen suuntaan vakiona. Tilannetta havainnollistaa kuva 6.12. Lämmönjohtavuudelle y-suunnassa voidaan täten kirjoittaa:

$$\begin{aligned}
R_{y,\text{red}} = R_y &\Rightarrow \frac{\frac{1}{2} (d_{\text{coil}} + d_{\text{ins},y})}{k_{y,\text{red}} (w_{\text{coil}} + 2d_{\text{ins},x}) l} = \frac{\frac{1}{2} d_{\text{coil}}}{w_{\text{coil}} l k_y} \\
\Rightarrow k_{y,\text{red}} &= \frac{w_{\text{coil}} (d_{\text{coil}} + d_{\text{ins},y})}{h_{\text{coil}} (w_{\text{coil}} + 2d_{\text{ins},x})} k_y, \quad (6.4)
\end{aligned}$$

missä d_{coil} on vyyhdensivun korkeus,

w_{coil} on vyyhdensivun leveys,

$k_{y,\text{red}}$ on redusoitu lämmönjohtavuus y-suunnassa,

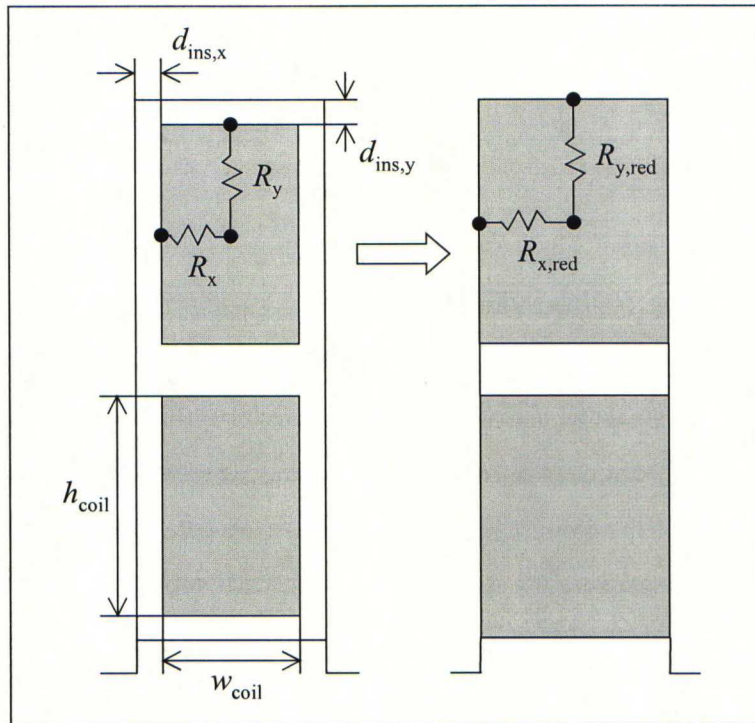
k_y homogenisoidun vyyhtimateriaalin lämmönjohtavuus y-suunnassa,

d_{ins} on uraeristeen paksuus.

Vastaavalla periaatteella kirjoitetaan redusoidut lämmönjohtavuudet x- ja z-suunnille:

$$\begin{aligned}
R_{x,\text{red}} = R_x &\Rightarrow \frac{\frac{1}{2} (w_{\text{coil}} + 2d_{\text{ins},x})}{k_{x,\text{red}} (d_{\text{coil}} + d_{\text{ins},y}) l} = \frac{\frac{1}{2} w_{\text{coil}}}{d_{\text{coil}} l k_x} \\
\Rightarrow k_{x,\text{red}} &= \frac{d_{\text{coil}} (w_{\text{coil}} + 2d_{\text{ins},x})}{w_{\text{coil}} (d_{\text{coil}} + d_{\text{ins},y})} k_x. \quad (6.5)
\end{aligned}$$

$$k_{z,\text{red}} = \frac{d_{\text{coil}} w_{\text{coil}}}{(d_{\text{coil}} + d_{\text{ins},y})(w_{\text{coil}} + 2d_{\text{ins},x})} k_z. \quad (6.6)$$



Kuva 6.12 Uraeristeiden redusointi.

7 Lämpölaskennat

7.1 Oikosulkukone

Ruoripotkurikäytössä olevalle oikosulkukoneelle tehtiin sekä kolmiulotteista että kaksiulotteista tilannetta kuvaavat tilavuusmallit. Kummallakin mallilla laskettiin ns. perustilanne, eli jatkuvan tilan lämpökenttä koneen nimellisasteessa. Kolmiulotteisella mallilla tehtiin lisäksi lämmönsiirtymiskertoimien herkkyyksianalyysi, jolla tutkittiin, kuinka herkästi vyyhden ja roottorikuparin lämpötilat reagoivat eri pintojen lämmönsiirtymiskertoimien muutoksiin. Kaksiulotteisella mallilla haluttiin tutkia podin kaulan vaikutusta sen kohdalla olevien vyyhtien lämpötilaan. Lisäksi sen avulla nähtäisiin, mikä merkitys on aksiaalisen lämpövirtakomponentin puuttumisella. Tällöinhän kaiken mallista poistuvan häviötehon on poistuttava mereen radiaalisesti staattorin kautta.

Kolmiulotteinen malli

Lämpömalleihin materiaaliparametreina annettavat lämmönjohtavuudet on ko. oikosulkukoneen tapauksessa koottu taulukkoon 6.1. Näistä kuparin, sähkölevyn sekä eristeen lämmönjohtavuudet ovat suoraan materiaalitietoutta sisältävistä taulukoista. Podin kuoren tapauksessa käytettiin raudan lämmönjohtavuutta. Podin sisällä olevan ilman ajateltiin roottorin ja akselille asennettujen tuulettimien pyörimisen ansiosta sekoittuvan niin tehokkaasti, ettei siihen synny lämpögradientteja. Tämän mallintamiseksi ilman lämmönjohtavuudelle annettiin ”ääretön” arvo.

Materiaali	k (radiaali)	k (kehä)	k (aksaali)
Kupari	385	385	385
Sähkölevy	30	30	0.7
Eriste	0.25	0.25	0.25
Pod-kuori	72	72	72
Vyyhti	3.93	428.3	298.6
Ilma	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

Vyyhden lämmönjohtavuudet eri tarkastelusuunnissa laskettiin edellä esitettyjen periaatteiden mukaisesti kahdessa vaiheessa siten, että ensin vyyhtimateriaalit homogenisoitiin yhdeksi ortotrooppiseksi materiaaliksi yhtälöiden (6.2) ja (6.3) avulla. Tämän jälkeen saadun materiaalin lämmönjohtavuudet redusoidtiin vyyhden kasvanutta tilavuutta vastaaviksi yhtälöillä (6.4)-(6.6).

Malliin asetettavat häviöt on esitetty taulukossa 6.2. Sarakeessa 'tilavuus' on sen tilavuuden arvo, jossa ko. häviöenergia syntyy. Kuparihäviöiden kohdalla kyseessä on kuparin tilavuus, joka on laskettu kuparin tiheyden ja painon avulla.

Taulukko 6.2 Oikosulkukoneen häviöt, T=75 (celcius)			
	Häviöt [W]	Tilavuus [m ³]	Häviötehotiheys [W/m ³]
St. kuparihäviöt	12310	0.054	228390
Rt. kupari	9850	0.04	238830
St. rautahäviöt	3152	0.198	15927
St. lisähäviöt	4070	0.054	75510

Koska kuparihäviöt ovat voimakkaasti lämpötilariippuvia, tarvitaan niille yhtälön (2.4) mukaiset lausekkeet, joissa häviötehotiheys esitetään lämpötilan funktiona. Virrantiheydelle voidaan taulukon 6.2 häviötehotiheyksien sekä yhtälön (2.4) avulla kirjoittaa:

$$p_{Cu,75} = J_{Cu}^2 \rho_{75} \Rightarrow J_{Cu} = \sqrt{\frac{p_{Cu,75}}{\rho_{75}}} = \sqrt{\frac{p_{Cu,75}}{\rho_{20}[1 + \alpha(75 - 20)^\circ\text{C}]}} \quad (6.7)$$

missä $p_{Cu,75}$ on kuparihäviötehotiheys lämpötilassa $T=75^\circ\text{C}$. Nyt kuparihäviöille voidaan yhtälön (2.4) tapaan kirjoittaa

$$p_{Cu} = \xi J_{Cu}^2 \rho_{e,20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})] + p_{add} \quad (6.8)$$

missä ξ on lasketun ja mallinnetun tilavuuden erosta johtuva skaalauskerroin, p_{add} on lämpötilasta riippumaton häviötehotiheyden lisätermi.

Skaalauskerroimella ξ huolehditaan häviötehon pysymisestä oikean suuruisena siinä tapauksessa, että mallinnetun geometrian tilavuus poikkeaa lasketusta. Tämä on tilanne mallinnettujen vyyhtien kanssa. Koska mallissa staattorin kuparihäviöt sijoitetaan kuparijohtimien sijasta koko vyyhden alueelle, joudutaan häviötehotiheyttä pienentämään mallinnetun ja lasketun tilavuuden suhteessa. Tällöin kerroin saadaan kaavasta:

$$P_{Cu} = p_{Cu} V_{Cu} = p_{coil} V_{coil} \Rightarrow p_{coil} = \frac{P_{Cu} V_{Cu}}{V_{coil}} = p_{Cu} \xi \Rightarrow \xi = \frac{V_{Cu}}{V_{coil}} \quad (6.9)$$

missä V_{Cu} on laskettu staattorikuparin tilavuus,

V_{coil} on mallinnettujen vyyhtien tilavuus,

p_{coil} on mallinnettuihin vyyhteihin kohdistettava häviötehotiheys.

Häviötehotiheyden lisätermiä p_{add} tarvitaan lähinnä staattorin lisähäviöiden mallintamiseen. Näiden häviöiden suuruudeksi määritellään sähkökonetta koskevissa standardeissa 0.5% koneen nimellistehosta. Vaikka ne todellisuudessa syntyvätkin eri puolella konetta, lisättiin ne staattorin kuparihäviöihin 'offset'-arvona.

Kaksiulotteista tilannetta kuvaavan mallin tapauksessa staattorin ja roottorin kuparihäviöt redusoidtiin kokonaisuudessaan staattorin ja roottorin levysydämien alueelle.

Oikosulkukoneen lämpömalleissa käytetyt lämmönsiirtymiskertoimet on listattu taulukkoon 6.3. Kertoimet staattorin ja roottorin ilmapinnoille laskettiin yhtälöstä (3.10) Taylorin luvun ollessa $Ta > 10000$.

Taulukko 6.3 Oikosulkukone-mallin lämmönsiirtymiskertoimet		
mistä	mihin	h [W/m ² K]
Ilmavälipinnat	Ilmaväli-ilma	51
Vyyhdenpääpinnat	Päätyilma	49
St. paketin pääty	Päätyilma	40
Rt. paketin pääty	Päätyilma	40
Podin sisäpinta	Päätyilma	40
Podin ulkopinta	Meri	1800
Mallin päätypinta	Meri	142
Uraeristeet		250

Vyyhdenpääpintojen tapauksessa Nusseltin ja Reynoldsin luvut laskettiin kaavoista (3.15) ja (3.16). Lämmönsiirtymiskertoimet staattorin ja roottorin päätyosille sekä podin sisäpinnalle laskettiin yhtälöstä (3.13). Virtausnopeus v laskettiin yhtälöstä (3.14), jossa olevalle hyötysuhteelle annettiin arvoksi $\eta = 0.5$. Podin ulkopinnalta mereen olevalle lämmönsiirtymiskertoimelle käytettiin arvoa $h = 1800$ W/m²K. Uraeristeitä vastaava lämmönsiirtymiskerroin saadaan eristekerroksen paksuuden ja johtavuuden avulla:

$$G_{ins} = \frac{k_{ins} A}{d_{ins}} = h_{ins} A \Rightarrow h_{ins} = \frac{k_{ins}}{d_{ins}}. \quad (6.10)$$

Lämmönsiirtymiskertoimella mallin päädyistä mereen pyrittiin ottamaan huomioon se osuus lämpövirrasta, joka siirtyy podin päätyosista mereen mallinnetun kehäkulman alueelta. Idea on siinä, että mallin päädyn lämmönsiirtymiskertoimen arvoa kasvatetaan mallin päädyn pinta-alan ja mallin ulkopuolelle jäävän pinta-alan suhteessa siten, että lämpökonduktanssi säilyy samana. Mallin päädyn pinta-alan A_1 ja mallin ulkopuolelle jäävän pinta-alan A_2 suhteelle voidaan tilannetta hieman yksinkertaistaen kirjoittaa (ks. kuva 6.13):

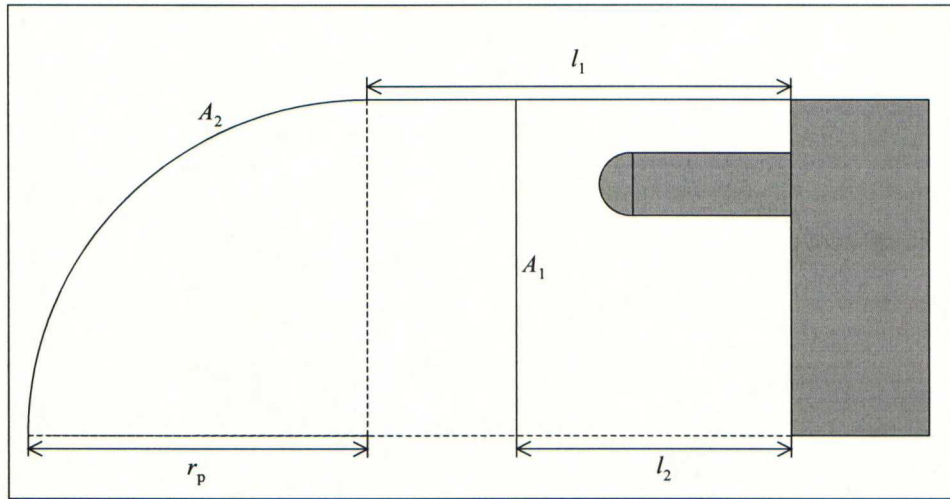
$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{1}{2}\theta r_p^2}{r_p\theta[(l_1 - l_2) + r_p]} = \frac{r_p}{2(l_1 - l_2 + r_p)}, \quad (6.11)$$

missä θ on mallinnetun geometrian kehäkulma,

r_p on podin säde,

l_1 on podin päädyn suoran osan pituus,

l_2 on etäisyys staattorin päädyistä mallinnetun alueen etureunaan.



Kuva 6.13 Mallin ja podin päätygeometriat.

Tämän jälkeen lämmönsiirtymiskertoin mallin päätypinnalta mereen h_1 saadaan yhtälöistä:

$$h_2 A_2 = h_1 A_1 \Rightarrow h_1 = h_2 \frac{A_2}{A_1}, \quad (6.12)$$

$$h_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{ap}} + \frac{1}{h_{ps}} + \frac{d_{pod}}{k_{pod}} \right)}, \quad (6.13)$$

missä h_{ap} on lämmönsiirtymiskerroin podin päätyilmasta podiin,

h_{ps} on lämmönsiirtymiskerroin podin ulkokuorelta mereen,

d_{pod} on podin kuoren paksuus,

k_{pod} on podin kuoren lämmönjohtavuus.

Kolmiulotteisella mallilla laskettu oikosulkukoneen nimellispisteen lämpökenttä on esitetty kuvassa 6.14. Meriveden lämpötilaksi asetettiin 10°C . Koska häviötehotiheyksien syöttämisessä I-DEAS:een lämpötilan funktiona esiintyi

käsittämättömiä ongelmia, jouduttiin häviöt iteroimaan käsin. Iteroinnin vaiheet on esitetty taulukossa 6.4, johon on listattu kultakin kierrokselta vyyhdenpään keskimääräinen lämpötila T_{ce} , vyyhden urassa olevan osuuden keskimääräinen lämpötila T_{cis} sekä roottorikuparin keskiarvolämpötila $T_{r,Cu}$. Koko vyyhden keskiarvolämpötila $T_{coil,ave}$ on vyyhdenpään ja vyyhden urassa olevan osuuden lämpötilojen tilavuuksilla painotettu keskiarvo. Taulukosta havaitaan, ettei iterointikierroksia tarvita järkevä tarkkuuden saavuttamiseksi kuin muutama. Kolmannen iteraatiokierroksen jälkeen vyyhden keskimääräinen lämpötila on $T_{coil,ave}=55.4^{\circ}\text{C}$ ja roottorikuparin $T_{r,Cu}=163.5^{\circ}\text{C}$. Ilman lämpötila asettui arvoon $T=68.1^{\circ}\text{C}$. Ratkaisuaika TMG:ssä oli noin yhdeksän minuuttia.

Iteraatiokierros	T_{ce}	T_{cis}	$T_{r,Cu}$	$T_{coil,ave}$	P [W]
1	74.0	48.9	166.5	56.1	31818.2
2	73.0	48.5	164.0	55.5	31435.2
3	72.8	48.4	163.5	55.4	31334.4

Vyyhden nimellispisteen lämpökenttä on esitetty kuvassa 6.15. Kuvan väriasteikko on skaalattu vyyhden maksimilämpötilan $T=75.8^{\circ}\text{C}$ ja minimilämpötilan $T=35.7^{\circ}\text{C}$ mukaan. Tasa-arvokäyristä havaitaan lämpövirran olevan vyyhdenpäässä lähes täysin aksiaalisuuntaista ja kääntyvän radiaalisuuntaiseksi vasta staattoripaketin puoltaväliä lähestyttäessä. Lisäksi kuvasta voidaan todeta vyyhdensivujen välisen eristeen merkitys: Alemman vyyhdensivun lämpötila on staattoripaketin keskiosissa noin 10°C korkeampi kuin ylempään vyyhdensivun.

Oikosulkukoneen lämpenemiä verrattiin ABB:n lämpöverkko-ohjelmalla laskettuihin arvoihin sekä mittaustuloksiin. Taulukkoon 6.5 on koottu edellä lasketun perustilanteen lämpenemät, lämpöverkoilla lasketut lämpenemät sekä mittauksesta saatu staattorikuparin lämpenemä. Lämpöverkko on tehty suljetulle, ilmajäähdytteiselle oikosulkukoneelle. Sillä pyrittiin kuitenkin analysoimaan vedenalainen tilanne asettamalla jäähdytysilman määrä niin suureksi, että kokonaislämpöresistanssi koneen ulkokuorelta ympäristöön tuli suurin piirtein yhtä suureksi kuin podin tapauksessa. Lämpöverkko laskettiin kahdella eri ulkokuoren ja ympäristön välisellä lämpöresistanssilla. Tapaus 'Lämpöverkko 1' vastaa tilannetta, jossa konvektiivisen lämpöresistanssin kaavaan (4.15) sijoitettiin koko podin arvioitu ulkopinta-ala. 'Lämpöverkko 2':n tapauksessa ko. lämpöresistanssi on puolestaan hyvin lähellä resistanssia, joka saadaan kun otetaan huomioon ainoastaan podin pinta-ala

staattoripakettia ympäröivältä osuudelta. Kummassakin tapauksessa resistanssin laskemiseen käytettiin lämmönsiirtymiskertoimen arvoa $h=1800 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	$\Delta T_{\text{coil,ave}}$	$\Delta T_{\text{r,Cu}}$
3D TMG-analyysi	45.4	153.5
Lämpöverkko 1	42.7	84.0
Lämpöverkko 2	49.8	95.4
Mittaus	59.0	-

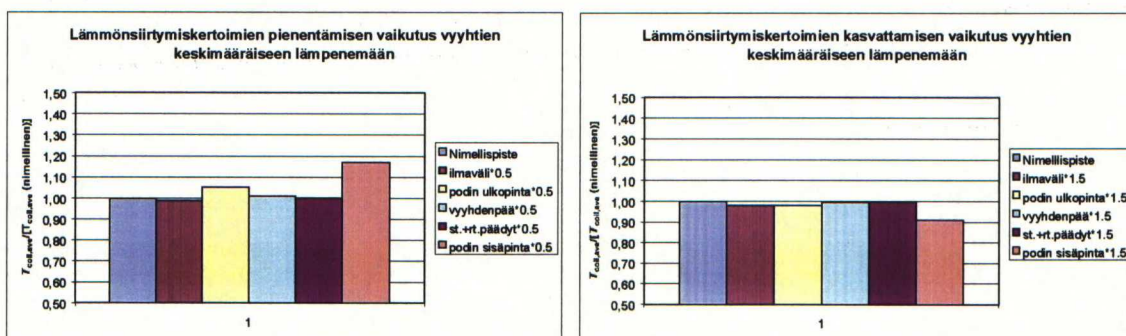
Taulukosta 6.5 nähdään, että lasketut staattorikuparin lämpenemät ovat melko lähellä toisiaan, mutta ovat järjestäen pienempiä kuin mittauksella saatu lämpenemä. Syynä tähän on luultavasti se, että vyyhdet, joista lämpenemät mitattiin, sijaittivat melko lähellä podin kaulaa. Tämän alueen vyyhtien lämpötila on keskimääräistä korkeampi, sillä kaulan alueelta ei lämpövirralla ole yhtä esteetöntä kulkua mereen kuin muualta.

Lämpöverkoilla lasketut vyyhden lämpenemät vastasivat melko hyvällä tarkkuudella kolmiulotteisen mallin antamia tuloksia. Sen sijaan roottorikuparin lämpenemä poikkeaa huomattavasti lämpöverkkojen antamista arvoista. Selitystä tähän voidaan hakea kolmiulotteisen mallin yksinkertaistetusta roottorin päätygeometriasta sekä roottoripintojen lämmönsiirtymiskertoimien epätarkkuudesta. Roottorin päätygeometriaa yksinkertaistettiin mm. jättämällä oikosulkurenkaaseen hitsattavat tuuletussiivekkeet mallintamatta. Siivekkeet tehostavat ilmankiertoa ja kasvattavat roottorin jäähdytyspinta-alaa merkittävästi. Lämmönsiirtymiskertoimet ilmapälipinnoilla laskettiin tasaisille sylinteripinnoille johdetuilla yhtälöillä, ottamatta huomioon urien ja levyrakenteisuuden aiheuttamaa pinta-alan lisäystä. Näiden vaikutus itse lämmönsiirtymiskertoimen suuruuteen ei välttämättä ole suuri, mutta kuten seuraavassa nähdään, vaikuttaa kertoimen muutokset merkittävästi roottorin lämpenemään.

Kolmiulotteisen mallin avulla tehdyllä lämmönsiirtymiskertoimien herkkyyksianalyysillä haluttiin selvittää, kuinka herkästi vyyhden keskimääräinen lämpötila reagoi eri pintojen lämmönsiirtymiskertoimien muutoksiin. Laskentojen välissä muutettiin ainoastaan yhtä kerrointa kerrallaan siten, että kukin kerroin sai arvokseen ensin 50% ja sitten 150% perustilanteen arvostaan. Laskennat on koottu taulukkoon 6.6, jonka 1. sarakkeessa on alkuperäiseen tilanteeseen nähden tehty lämmönsiirtymiskertoimen muutos.

Analyysissä häviötehotiheydet pidettiin vakioina. Sarake 'Muutos (%)' kertoo vyyhden keskimääräisen lämpötilan muutoksen perustilanteeseen nähden. Havainnollisuuden vuoksi muutokset koottiin myös pylväsdiagrammeiksi kuvaan 6.16.

	T_{ce}	T_{cis}	$T_{r,Cu}$	T_{air}	$T_{coil,ave}$	Muutos (%)
perustilanne	72.8	48.4	163.5	68.1	55.4	0.0
ilmaväli*0.5	73.7	47.3	238.0	85.7	54.9	-0.9
ilmaväli*1.5	71.8	47.3	163.0	63.0	54.3	-1.9
pod-meri*0.5	75.1	51.7	165.0	70.8	58.4	5.4
pod-meri*1.5	71.8	47.3	163.0	67.1	54.3	-1.9
vyyhdenpää*0.5	74.5	48.6	163.0	67.5	56.0	1.1
vyyhdenpää*1.5	71.9	48.3	164.0	68.2	55.1	-0.6
st+rt päädyt*0.5	72.9	48.5	170.0	69.4	55.5	0.2
st+rt päädyt*1.5	72.7	48.4	159.0	67.1	55.4	-0.1
pod-ilma*0.5	90.1	54.6	188.0	98.1	64.8	16.9
pod-ilma*1.5	63.5	45.1	151.0	53.7	50.4	-9.1



Kuva 6.16 Lämmönsiirtymiskertoimien muutosten vaikutus vyyhtien keskimääräiseen lämpenemään.

Herkkyyksianalyysistä nähdään, että vyyhden keskimääräisen lämpenemän kannalta merkittävimmät lämmönsiirtymiskertoimet ovat kerroin podin sisäpinnalta podin kuoreen sekä kerroin podin ulkopinnalta mereen. Edellinen oli ainoa, jonka muutoksen vaikutus vyyhden lämpenemään oli 10%:n luokkaa. Sen sijaan kertoimien muutosten vaikutus roottorikuparin lämpötilaan oli merkittävämpi. Esimerkiksi pod-päätyilma – kertoimen puolittaminen nosti roottorikuparin lämpötilaa 15%:lla ja ilmavälikertoimen

puolittaminen jopa 46%:lla. Hieman yllättävää tuloksissa oli kuitenkin se, ettei koneen päätygeometrian eikä vyyhdenpään kertoimien muutokset vaikuttaneet vyyhden keskimääräiseen lämpenemään juuri lainkaan.

Kaksiulotteinen malli

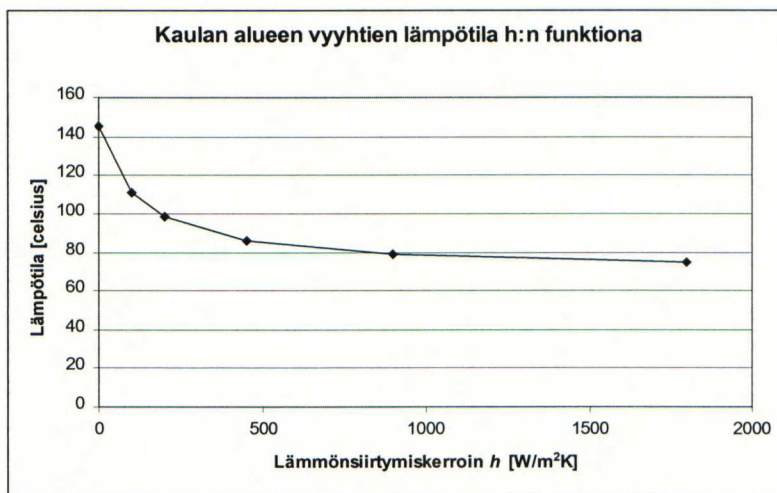
Kaksiulotteisella mallilla tutkittiin podin kaulan vaikutusta vyyhtien lämpenemään. Analyysissä tarkasteltiin vyyhtien lämpötiloissa tapahtuvia muutoksia, kun kaulan alueen lämmönsiirtymiskerrointa pienennettiin asteittain perustilanteen arvosta lähelle nolaa. Perustilanteessa kerroin kaulan alueelta mereen oli $h=1800 \text{ W/m}^2\text{K}$, eli sama kuin muuallakin. Mallissa kaikki häviöt redusoitiin staattorin ja roottorin levypakettien alueelle. Häviötehotiheydet (taulukko 6.7) laskettiin kolmiulotteisen mallin perustilanteen keskimääräisissä lämpötiloissa ja ne pidettiin vakioina laskentojen välissä.

	Häviöt [W]	Tilavuus [m ³]	Häviötehotiheys [W/m ³]
St. kuparihäviöt	12310	0.051	366545 (55 celcius)
Rt. kupari	9850	0.037	339738 (160 celsius)
St. rautahäviöt	3152	0.198	15927
St. lisähäviöt	4070	0.054	79034

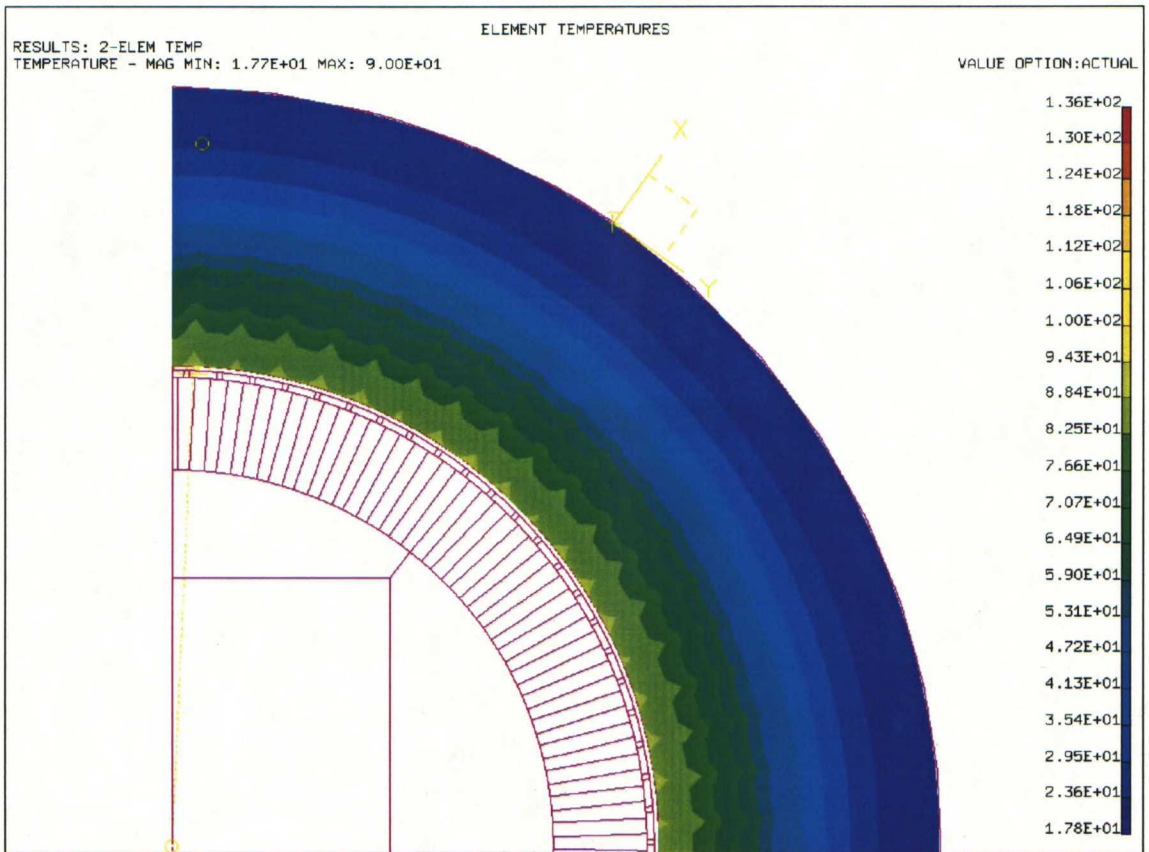
Kaksiulotteisen mallin lämpökenttä laskettiin kuudella eri kaulan lämmönsiirtymiskertoimen arvolla. Tulokset on koottu taulukkoon 6.8, josta on luettavissa kaikkien vyyhtien keskimääräinen lämpötila $T_{\text{coil,ave}}$, kaulan kohdalla olevien vyyhtien keskimääräinen lämpötila sekä keskimääräinen roottorikuparin lämpötila $T_{\text{r,Cu,ave}}$. Kaulan alueen vyyhtien lämpötilan nousu kaulan lämmönsiirtymiskertoimen funktiona on esitetty kuvassa 6.17. Tuloksista nähdään, että kaulan lämmönsiirtymiskertoimen pudotessa neljäsosaan alkuperäisestä arvostaan, nousee kaulan alueen vyyhtien lämpötila noin 13%:a. Kuvan 6.17 käyrästä havaitaan, ettei lämmönsiirtymiskertoimen vaihtelu välillä $450 < h < 1800 \text{ W/m}^2\text{K}$ aiheuta merkittäviä muutoksia kaulan alueen vyyhtien lämpötilaan. Sen sijaan lämmönsiirtymiskertoimen painuessa alueelle $h < 450 \text{ W/m}^2\text{K}$, alkaa ko. vyyhtien lämpötila kasvaa merkittävästi ja alueella $h < 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ alkaa riski eristeiden vahingoittumisesta olla jo todellinen.

Taulukko 6.8 Podin kaulan vaikutus sen kohdalla olevien vyyhtien lämpötilaan.			
h (kaula) [W/m ² K]	$T_{\text{coil,ave}}$	$T_{\text{coil,ave}}$ (kaula)	$T_{\text{r,Cu,ave}}$
1800	74.7	74.8	298
900	75.9	79.0	299
450	77.8	86.1	301
200	81.1	98.5	305
100	84.5	111.0	308
1	93.4	145.0	317

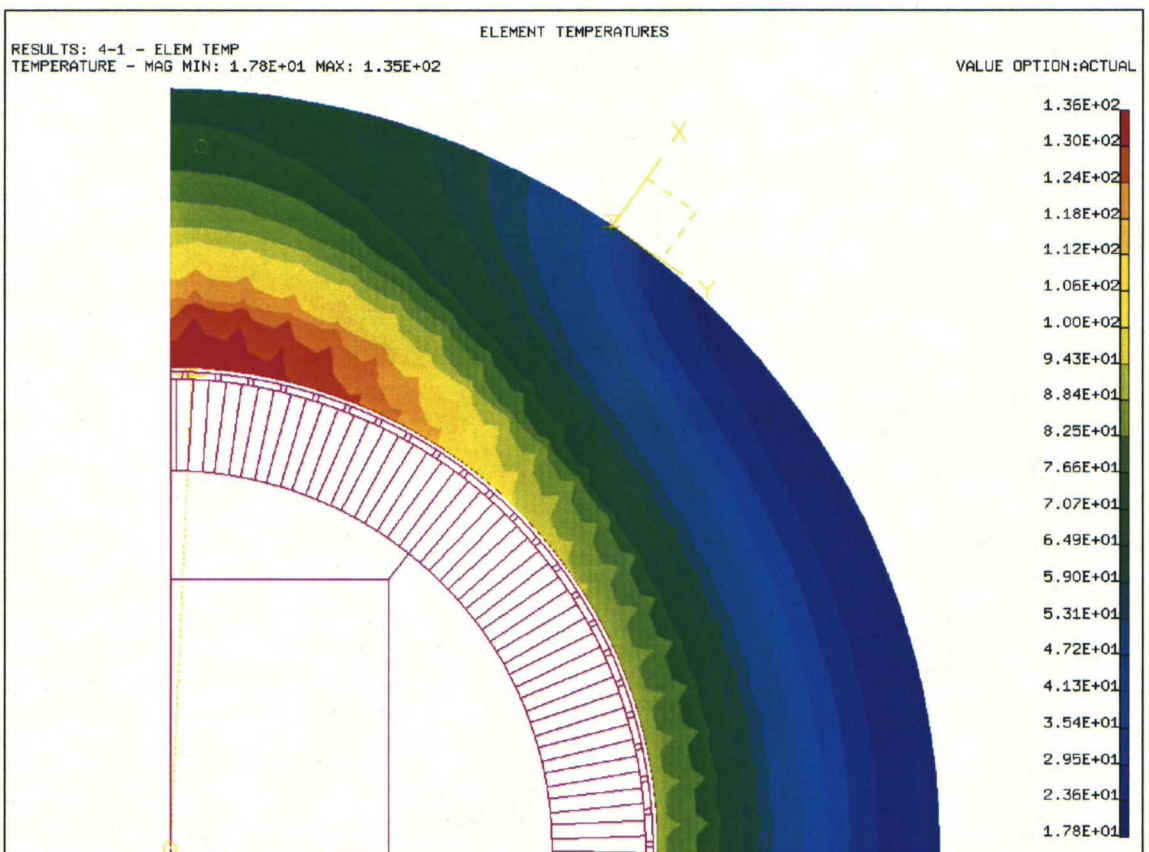
Podin kaula-alueen heikomman lämmönsiirtokyvyn vaikutus staattorin lämpökenttään on selkeästi havaittavissa kuvista 6.18 ja 6.19. Edellisessä on staattorin lämpökenttä perustilanteessa, jossa lämmönsiirtymiskertoimen arvo kaulan alueella on $h=1800$ W/m²K. Jälkimmäisessä kerroin kaulan alueelta on $h=100$ W/m²K. Tällöin kaulan kohdalla olevien vyyhtien keskimääräinen lämpötila on noin 25°C kaikkien vyyhtien keskimääräistä lämpötilaa korkeampi. Kuvasta 6.18 havaitaan kaksi- ja kolmiulotteisen lämpöanalyysin erot: Kaksiulotteisessa tapauksessa vyyhtien keskimääräinen lämpötila on 74.7°C, eli noin 20°C korkeampi kuin kolmiulotteisessa tapauksessa. Tämä osoittaa selvästi, mikä merkitys koneen päätyosilla lämpövirran poistumistienä on koneen jäähtymiselle.



Kuva 6.17 Podin kaulan alueen vyyhtien keskimääräinen lämpötila kaulan lämmönsiirtymiskertoimen h funktiona.



Kuva 6.18 Staattorin lämpökenttä perustilanteessa.



Kuva 6.19 St. lämpökenttä, kun kaulan alueelta lämmönsiirtymiskerroin $h=100 \text{ W/m}^2\text{K}$.

7.2 Kestomagneetoitu tahtikone

Kestomagneetikoneen kolmiulotteinen lämpökenttä laskettiin koneen nimellispisteessä. Tämän lisäksi mallilla suoritettiin oikosulkukonemallin tapaan lämmönsiirtymiskertoimien herkkyysanalyysi. Kaksiulotteista mallia ei tälle koneelle tehty. Koska kummankin tarkastellun konetyypin jäähdytys perustuu lämmönjohtumiseen podin kuoren läpi mereen, voidaan hyvällä syyllä uskoa kaulan vaikuttavan staattorin lämpökenttään ja kaulan alueen vyyhtien lämpenemään samoin kuin oikosulkukoneen tapauksessa. Kestomagneetikoneen mallilla tehtiin kuitenkin tarkastelu, jossa podin ulkopinnan lämmönsiirtymiskerrointa alennettiin asteittain perustilan arvosta lähelle nollaa. Kuten myöhemmin nähdään, tulokset noudattavat samoja linjoja oikosulkukoneen kaula-analyysin kanssa.

Kestomagneetikoneen lämpömallin lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 6.9. Vyyhden ja kestomagneetin lämmönjohtavuuksia lukuunottamatta arvot ovat samat kuin oikosulkukoneen tapauksessa.

Materiaali	k (radiaali)	k (kehä)	k (aksiaali)
Kupari	385	385	385
Sähkölevy	30	30	0.7
Eriste	0.25	0.25	0.25
Pod-kuori	72	72	72
Vyyhti	2.42	395.8	286
Kestomagneetti	8.5	8.5	8.5
Ilma	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

Nimellispisteen häviöt on laskettu FCSMEK:llä ja ne on koottu taulukkoon 6.10. Staattorihäviöiden tapauksessa tilavuus V on laskettu kuparin tilavuus ja V_{red} on mallinnettujen vyyhtien tilavuus. Tällöin parametri $p_{h,\text{red}}$ on kuparin häviötehotiheys redusoituna mallinnettujen vyyhtien tilavuuteen.

	Häviöt [W]	V [m ³]	V_{red} [m ³]	$p_{h,\text{red}}$ [W/m ³]
St. kuparihäviöt	46695	0.117	0.160	346760
St. rauta (selkä)	5297	0.359	0.359	14745
St. rauta (hampaat)	2828	0.161	0.161	17547
Kestomagneetti	5824	0.083	0.083	70232

Mallin reunaehtopinnoille asetettavat konvektiokertoimet sekä uraeristeitä kuvaava rajapintakonduktanssi on esitetty taulukossa 6.11. Staattorin ja roottorin ilmvälipinnoille kerroin laskettiin yhtälöstä (3.10) Taylorin luvun ollessa $Ta=1.19 \cdot 10^5$.

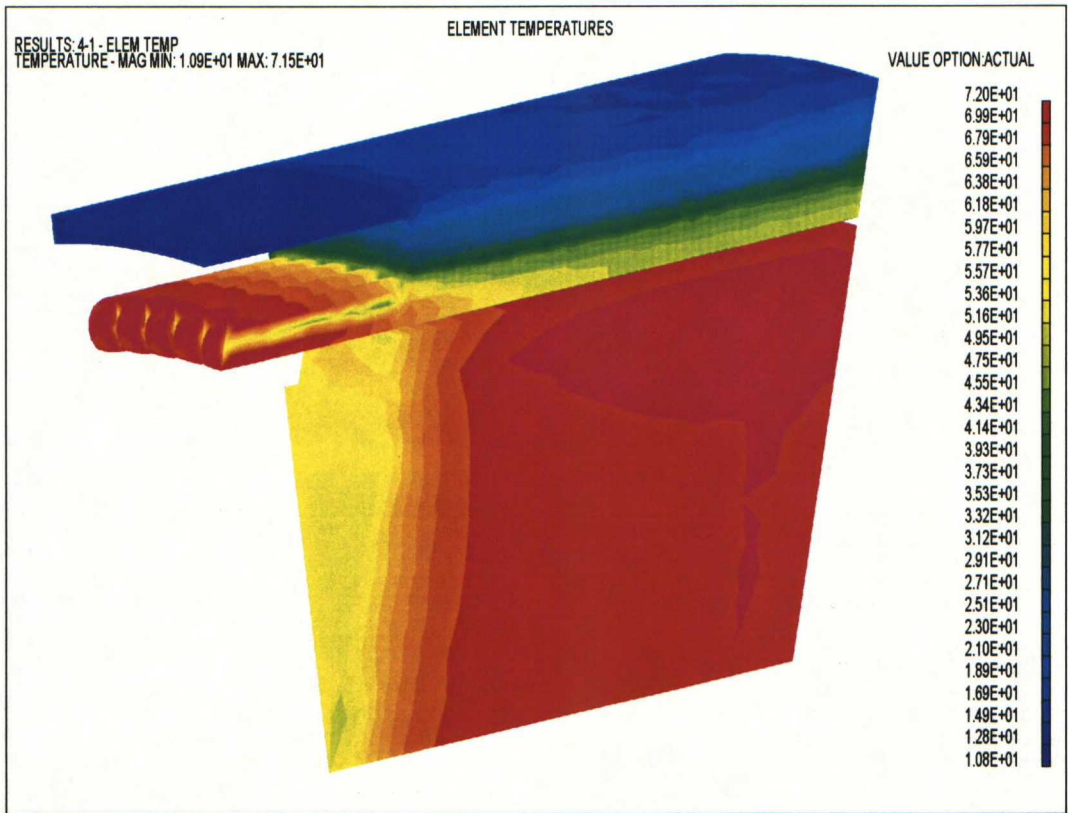
Yhtälöihin (3.11) ja (3.12) säteeksi r_m sijoitettiin etäisyys roottorin keskipisteestä napakengän kärkeen. Vyyhdenpääpintojen kerroin laskettiin yhtälöistä (3.15) ja (3.16) olettamalla, että ilmannoisuus on puolet siitä kehänopeudesta, joka saadaan kun roottorin kulmanopeutta kerrotaan staattorin vyyhdenpääsäteellä.

mistä	mihin	h [W/m ² K]
Ilmavälipinnat	Ilmaväli-ilma	40
Vyyhdenpääpinnat	Päätyilma	50
St. paketin pääty	Päätyilma	41
Rt. paketin pääty	Päätyilma	41
Podin sisäpinta	Päätyilma	41
Podin ulkopinta	Meri	1800
Mallin päätypinta	Meri	171
Uraeristeet		250

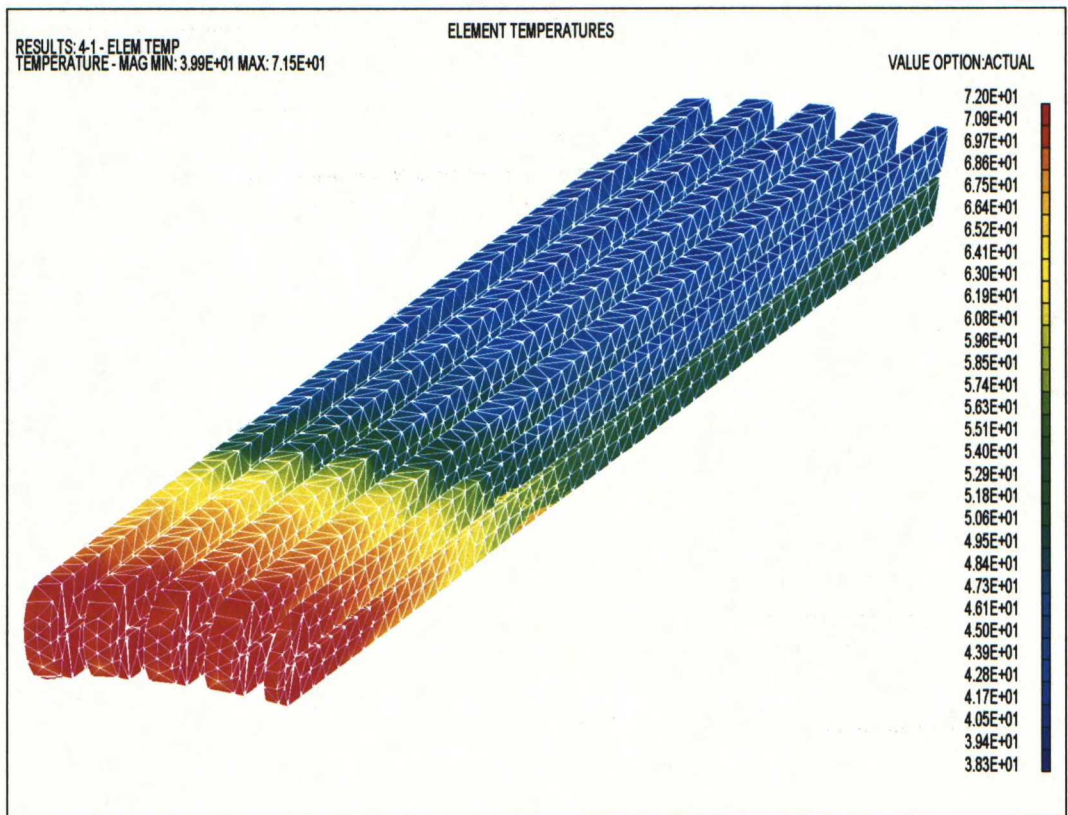
Lämmönsiirtymiskerroin staattorin ja roottorin päätypinnoille sekä podin sisäpinnalle laskettiin oikosulkukonemallin tapaan yhtälöstä (3.14). Virtausnopeuden yhtälössä (3.15) säteenä r_m oli roottorin ulkosäde ja tuulettimen hyötysuhteena käytettiin arvoa $\eta=0.5$. Lämmönsiirtymiskerroin mallin kiilanmuotoisesta päätypinnasta mereen laskettiin yhtälöstä (6.13) olettamalla, että suhde l_1/r_p (kuva 6.13) on sama kuin oikosulkukoneen podin tapauksessa.

Nimellispisteen iterointi on esitetty taulukossa 6.12 ja lämpökenttä kuvassa 6.20. Vyyhtien nimellispisteen lämpökenttä on kuvassa 6.21. Koska vyyhdenpäiden ja vyyhden urassa olevien osuuksien lämpenemät poikkeavat selkeästi toisistaan, kohdistettiin niihin toisesta kierroksesta lähtien erisuuruiset, ensimmäisen kierroksen lämpötilojen avulla lasketut häviötehotiheydet. Kolmannen kierroksen jälkeen vyyhtien keskimääräinen lämpötila oli $T_{coil,ave}=55.8^{\circ}\text{C}$ ja kestopagneetin lämpötila $T_{PM}=69.2^{\circ}\text{C}$ meriveden lämpötilan ollessa 10°C . Mallin ratkaisuaika oli noin 23 minuuttia.

Iteraatiokierros	$\rho_{h,ce}$	$\rho_{h,cis}$	T_{ce}	T_{cis}	$T_{coil,ave}$
1	307900	307900	70.2	53.2	58.1
2	303341	286163	68.5	51.0	56.1
3	301624	283940	68.2	50.7	55.8



Kuva 6.20 Kestomagneettikoneen lämpökenttä nimellispiisteessä.



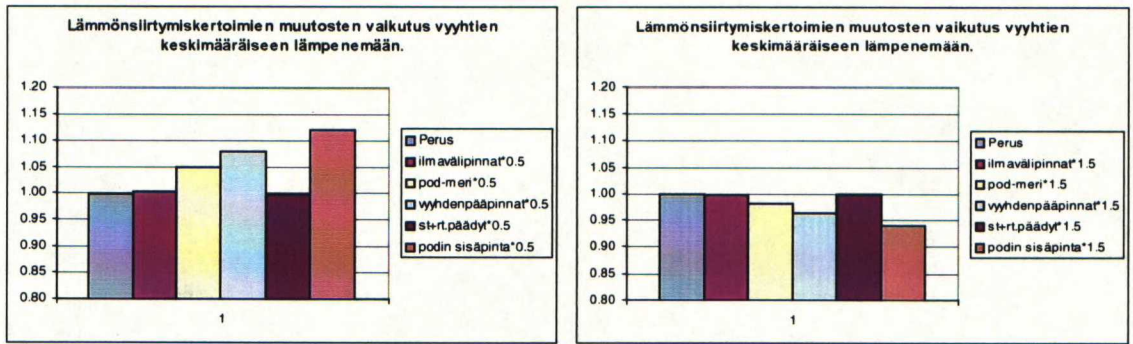
Kuva 6.21 Kestomagneettikoneen vyyhtien lämpökenttä nimellispiisteessä.

Nimellispisteen kenttäkuvista havaitaan kestromagneetikoneen lämpökentän olevan hyvin samankaltainen oikosulkukoneen lämpökentän kanssa., tosin roottorin lämpenemät ovat odotetusti huomattavasti alhaisemmat pienemmistä roottorihäviöistä johtuen. Vyyhdenpäiden alueella lämpenemät ovat korkeimpia ja lämpövirta on aksiaalisuuntaista. Staattoripaketin puoliväliä lähestyttäessä lämpövirtaus kääntyy radiaalisuuntaiseksi.

Kestomagneetikoneen kolmiulotteisella mallilla tehdyn lämmönsiirtymiskertoimien herkkyysanalyysin tulokset on koottu taulukkoon 6.13. Analyysi tehtiin oikosulkukoneen herkkyysanalyysin tapaan muuttamalla yhtä lämmönsiirtymiskerrointa kerrallaan pitäen häviöt perustilanteen arvoissaan. Vyyhden keskimääräiset lämpenemät perustilanteeseen nähden on esitetty kuvassa 6.22. Vastaavat pylväsdiagrammit piirrettiin myös kestromagneetille ja ne on esitetty kuvassa 6.23.

Taulukko 6.13 Kestomagneetikoneen lämmönsiirtymiskertoimien herkkyysanalyysi							
$h:n$ muutos	T_{ce}	T_{cis}	T_{PM}	T_{air}	$T_{coil,ave}$	Muutos ($T_{coil,ave}$) [%]	Muutos (T_{PM}) [%]
perustilanne	68.2	50.7	69.2	44.8	55.8	0.0	0.0
ilmaväli*0.5	68.0	51.0	89.5	44.5	55.9	0.3	29.3
ilmaväli*1.5	68.2	50.6	62.2	45.1	55.7	-0.1	-10.1
pod-meri*0.5	70.1	53.8	70.7	46.7	58.5	4.9	2.2
pod-meri*1.5	67.4	49.6	64.3	44.2	54.7	-1.8	-7.1
vyyhdenpää*0.5	80.3	52.0	66.9	42.6	60.2	7.9	-3.3
vyyhdenpää*1.5	62.8	50.1	70.2	45.9	53.8	-3.6	1.4
st+rt päädyt*0.5	68.2	50.7	69.6	44.9	55.8	0.0	0.6
st+rt päädyt*1.5	68.1	50.7	69.0	44.8	55.7	-0.1	-0.3
pod-ilma*0.5	81.0	54.9	85.4	36.7	62.4	12.0	23.4
pod-ilma*1.5	61.8	48.6	61.1	36.7	52.4	-6.0	-11.7

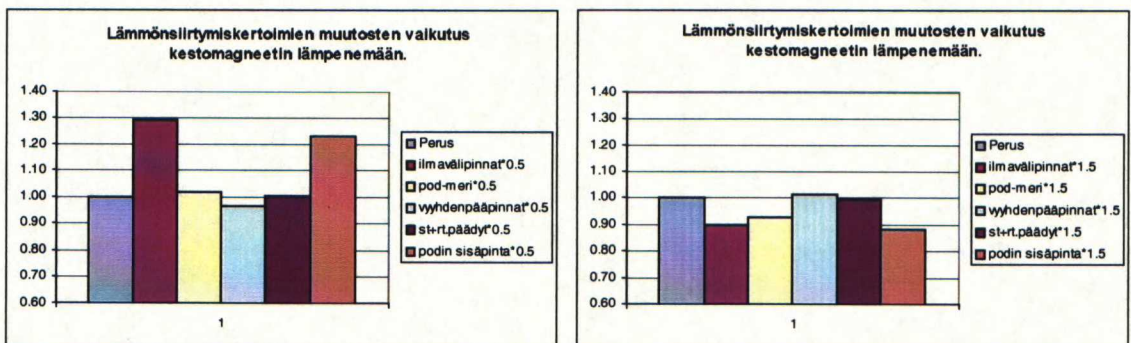
Herkkyysanalyysin perusteella voidaan todeta, että vyyhden lämpenemän kannalta merkittävimmät kertoimet ovat kerroin podin sisäpinnasta päätyilmaan, kerroin vyyhdenpäistä päätyilmaan sekä kerroin podin ulkopinnalta mereen. Vyyhden lämpenemän kannalta muiden kertoimien tarkkuuden merkitys on vähäinen.



Kuva 6.22 Lämmönsiirtymiskertoimien muutosten vaikutus vyyhtien lämpenemään.

Oikosulkumoottorin tapauksessa roottorin lämpenemä oli hyvin herkkä ilmvälikerroimen muutoksille. Kuvan 6.23 mukaan tämä pätee myös kestopagneetikoneelle. Ilmvälikerroimen puolittamisen ansiosta kestopagneetin lämpötila nousee perustilanteeseen nähden liki 30%. Toinen merkittävä kerroin on tässäkin tapauksessa kerroin podin sisäilmasta podin pintaan.

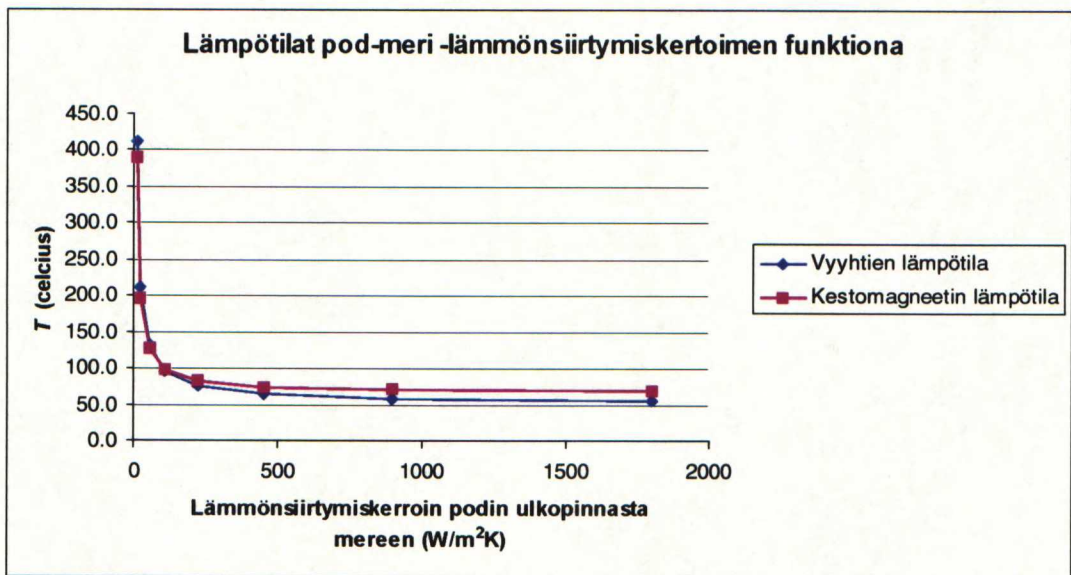
Diagrammeista nähdään myös vyyhdenpääkerroimien vaikutus roottorin lämpenemään. Kerroimen kasvattaminen, jolloin lämpö pääsee siirtymään tehokkaammin vyyhdenpäistä päätyilmaan, nostaa kestopagneetin lämpötilaa. Kerroimen pienentämisellä on puolestaan päinvastainen vaikutus. Oikosulkukoneen tapauksessa lämpövirta siirtyi roottorin kautta vyyhdenpäihin nostaen niiden lämpötilaa. Nyt tilanne on siis päinvastainen vyyhdenpäiden lämmittäessä roottoria.



Kuva 6.23 Lämmönsiirtymiskertoimien muutosten vaikutus kestopagneetin lämpenemään.

Kuvassa 6.24 on esitetty vyyhtien keskimääräinen lämpötila sekä kestopagneetin lämpötila podin ulkopinnan lämmönsiirtymiskertoimen funktiona. Käyristä nähdään, että lämpötilat nousevat merkittävästi lämmönsiirtymiskertoimen siirtyessä alueelle

$h < 200 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sen sijaan alueella $h > 450 \text{ W/m}^2\text{K}$ ei vyyhtien eikä kestopagneetin lämpötiloissa tapahdu enään merkittäviä muutoksia.



Kuva 6.24 Vyyhtien ja kestopagneetin lämpötilat pod-meri – lämmönsiirtymiskertoimen funktiona.

8 Johtopäätökset

Tämän työn lämpömalleista saatujen tulosten oikeellisuutta on mittaustietojen vähäisyydestä johtuen vaikea arvioida. Oikosulkukoneen lämpökenttä laskettiin myös lämpöverkolla, joka oli tehty suljetulle ilmajäähdytteiselle koneelle. Tavoitteena oli mallintaa vedenalainen tilanne ja vertailla saatuja lämpenemiä I-DEAS:lla laskettuihin arvoihin. Staattoripuolella tulokset näyttivätkin lupaavilta, mutta roottoripuolella I-DEAS:lla lasketut lämpenemät olivat huomattavasti lämpöverkoilla laskettuja korkeampia. Virhetekijöitä on monia: Mallinnuksen yksinkertaistuksista johtuva jäähdytyspinta-alan pientyminen todellisuuteen nähden, lämmönsiirtymiskertoimien epätarkkuus sekä lämpöverkosta laskettujen lämpenemien epätarkkuus. Myöskään akselia lämmönsiirtotienä roottorin ja meriveden välillä ei huomioitu.

Lämmönsiirtymiskertoimien määrittäminen konvektiopinnoille on hyvin vaikea tehtävä. Herkkyyksianalyysi antoi viitteitä siitä, mitkä ovat ne kertoimet, joihin on syytä kiinnittää huomiota, mikäli tarkkuutta halutaan parantaa. Tärkeimmiksi lämmönsiirtymiskertoimiksi nousivat kerroin podin sisäilmasta podin kuoreen, kerroin roottorin pinnalta ilmapäliin, kerroin vyyhdenpäistä päätyilmaan sekä tietenkin kerroin podin ulkopinnalta mereen. Lukuunottamatta viimeistä, on näiden kertoimien selvittäminen laskemalla käytännössä mahdotonta. Kirjallisuudessa esiintyviin yhtälöihin on tässä yhteydessä suhtauduttava varauksella, sillä fyysisenä sijoituspaikkana podi poikkeaa melkoisesti niistä ympäristöistä, joissa koneita on yleensä mitattu ja joiden pohjalta yhtälöt on johdettu.

Työn tavoitteena oli kehittää lämpömallit ruoripotkurimoottorikäyttöön tarkoitetuille oikosulku- ja kestopromagneetoiduille tahtikoneille. Tässä mielestäni onnistuttiin, muttei ehkä joka suhteessa halutulla tavalla. Kompromisseja jouduttiin tekemään sekä ohjelmasta aiheutuneiden ongelmien sekä ajan puutteen takia. I-DEAS-ohjelma kaikessa hienoudessaan aiheuttaa käyttäjälleen, ainakin alkuvaiheessa, paljon päänsärkyä. Rutkasti ihmeellisiä yksityiskohtia, täysin selittämättömiä ongelmatilanteita, sekä suoranaisia ohjelmointivirheitä, joiden ansiosta aikaa ja energiaa tuhlaantuu ja joiden takia jopa mallinnukselle asetettuja tavoitteita joudutaan korjaamaan. Näin kävi muun muassa mallin päivitettävyyden kanssa. Tavoitteena oli saada malleista mahdollisimman yleiskäyttöiset, jolloin mallien päivittämiseksi olisi

riittänyt ainoastaan uuden koneen parametrien syöttäminen. Tätä ei lukuisista yrityksistä huolimatta saatu toimimaan kunnolla.

Kysymykseen siitä, tuoko I-DEAS:n tyyppinen kaupallinen kolmiulotteinen mallinnus- ja simulointityökalu lisäarvoa sähkökoneiden lämpömallinnukseen vastaisin, että riippuu tilanteesta; mitä analyysiltä haetaan ja mitkä ovat sen lähtöarvot? Jos halutaan keskimääräisiä lämpenemiä eikä lämmönsiirtymiskertoimien paikallisesta jakautumasta ole tarkkaa tietoa, saadaan hyvin tehdyillä lämpöverkoilla varmasti yhtä tarkkoja tuloksia – ja luultavasti nopeammin – kuin kolmiulotteisella I-DEAS:lla. Jos sen sijaan mittausten avulla ollaan selvitetty paikallisia lämmönsiirtymiskertoimia ja halutaan tutkia esimerkiksi vyyhdenpäiden kuumia pisteitä on selvää, että tällöin lämpöverkoista ei ole kilpailijaksi kolmiulotteiselle kenttäratkaisulle. On hyvä muistaa, että kolmiulotteisenkin ratkaisun tarkkuus on parhaimmillaankin vain yhtä hyvä kuin se tarkkuus, jolla sen lähtöarvot ja reunaehdot on määritelty.

I-DEAS ei ole helppo työkalu. Sen käytön omaksuminen on aikaa ja kärsivällisyyttä vievä prosessi, etenkin jos aiempaa kokemusta kolmiulotteisesta mallinnuksesta ei ole. Näin ollen en usko, että I-DEAS:sta on ainakaan tänä päivänä joka paikan ja joka suunnittelijan, etenkin joka myyjän, työkaluksi. Sellaiseen käyttöön mittausten avulla viritetyt lämpöverkot ovat omiaan. Lopputulos voisikin olla se, että sekä lämpöverkkoihin että kolmiulotteiseen kenttäratkaisuun perustuvilla ohjelmilla on käyttöä tulevaisuudessa. Suunnittelijan arviointikyvyn varaanhan jää viime kädessä se, millä menetelmin hän kulloisessakin tilanteessa näkee parhaaksi arvioida suunnittelemaan ratkaisuja.

9 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tehtiin I-DEAS Master Series –ohjelmistolla kolmiulotteiset tilavuusmallit ruoripotkurikäyttöön suunnitelluille oikosulku- ja kestmagnetoidulle tahtikoneelle. Elementtiverkotuksen jälkeen mallit ratkaistiin TMG Thermal Analysis -lämmönsiirtomodulissa.

Työn alussa perehdyttiin lämmönsiirron ja häviöiden syntymekanismeihin sekä siihen, mitä ne merkitsevät ja miten ne ovat mallinnettavissa sähkökoneen tapauksessa. Lämpökentälle johdettiin differentiaaliyhtälö, jonka jälkeen tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin sen numeeriseen ratkaisuun laajimmin käytettyjä menetelmiä.

Kummallekin konetyypille tehtiin kolmiulotteiset lämpömallit. Koneista mallinnettiin pienin mahdollinen symmetria-alue, jonka lisäksi mallinnettiin ilma vyyhdenpääalueella sekä ilmapälissä. Ilman johtavuuden asetettamisella äärettömäksi pyrittiin kuvaamaan roottorin pyörimisliikkeen aiheuttamaa ilman tehokasta sekoittumista. Kolmiulotteisilla malleilla koneiden lämpökenttä laskettiin niiden nimellispisteissä. Tämän lisäksi kolmiulotteisilla malleilla tehtiin lämmönsiirtymiskertoimien herkkyyshanalyysit. Näillä selvitettiin, mikä merkitys eri lämmönsiirtymiskertoimien tarkkuudella on kriittisten koneenosien – vyyhtien ja kestmagneettien – lämpenemään.

Oikosulkukoneelle tehtiin lisäksi kaksiulotteista tilannetta kuvaava malli, jolle ei siis sallittu aksiaalista lämpövirtausta. Kaksiulotteisella mallilla tutkittiin podin kaulan vaikutusta staattorin lämpökenttään ja sen kohdalla olevien vyyhtien lämpenemään. Kun lämmönsiirtymiskertoimen arvoksi kaulan alueelta laitettiin neljäsosa siitä arvosta, joka oli podin ulkopinnalta mereen, nousi kaulan alueen vyyhtien keskimääräinen lämpenemä 13% muiden vyyhtien keskimääräistä lämpenemää korkeammaksi.

Lämpömalleihin reunaehtoina asetettavat konvektiiviset lämmönsiirtymiskertoimet laskettiin kirjallisuudessa esiintyvien yhtälöiden avulla. Koneiden nimellispisteen häviöt saatiin ko. koneille tehdyistä sähkömagneettisista laskelmista. Kaiken kaikkiaan I-DEAS ja TMG osoittautuivat muutamista ikävistä ominaisuuksistaan huolimatta kelvollisiksi työkaluiksi sähkökoneen lämpökenttien analysointiin.

10 Lähteet

Arkkio A, Niemenmaa A., *Estimation of losses in cage induction motors using finite element techniques*. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines. 15–17 September 1992, Manchester, UK, Vol. 2, s. 366–370.

Becker K.M., Kaye J. 1962. *Measurements of Diabatic Flow in an Annulus With an Inner Rotating Cylinder*. Journal of Heat Transfer, May, s. 97-105.

Bjorklund I.S., Kays W.M. 1959. *Heat Transfer Between Concentric Rotating Cylinders*. Journal of Heat Transfer, August, s. 175-186.

Del Toro, V. 1985. *Electric Machines and Power Systems*. New Jersey. Prentice-Hall, 708 s.

Incropera, F.P., DeWitt, D.P. 1981. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2. p. New York. John Wiley & Sons, 802 s.

Jokinen, T. 1998. Tuotekehitys, luentomateriaali.

Koziej, E. 1989. *Cooling and Heating of Electrical Machines*. Postgraduate Course, Helsinki, 104 s.

Lewis R.W., Morgan K., Zienkiewicz O.C. 1981. *Numerical Methods in Heat Transfer*. Bristol, U.K. John Wiley & Sons Ltd, 536 s.

Luomi, J. 1994. *Sähkömekaniikan numeeriset menetelmät*. Otaniemi, TKK, 164 s.

Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R. 1991. *Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design*. IEE Proceedings-B, Vol. 138, No. 5, September 1991, s. 205-218.

Patankar S.V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, 197 s.

Saari, J. 1996. *Friction losses and heat transfer in high-speed electrical machines*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Report 50, Espoo, 34 s.

Saari, J. 1998. *Thermal Analysis of High-Speed Induction Machines*. Espoo, Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 90, 73 s.

SDRC, Product Catalog – I-DEAS Application Products – I-DEAS TMG™,
<http://www.sdrc.com/pub/catalog/ideas/appl-prod/tmg> 3.11.1999.

Pickering S.J., Lampard D., Hay N., Roylance T.F. 1997. *Heat Transfer In a High Voltage, Through-Ventilated 4-pole Induction Motor*. 8th International Conference on Electrical Machines and Drives. University of Nottingham, U.K., 1-3 September 1997, s. 11-15.

Uotila, H. 1996. *Laivan sähköisen potkurimoottorin jäähdytys*. Diplomityö TKK, 54 s.

Wagner, W. 1994. *Lämmönsiirto*. Helsinki. Painatuskeskus Oy, 210 s.