



SÄHKÖMAGNEETTISEN LAAKEROINNIN SOVELTAMINEN TYHJÖTURBOJÄRJESTELMÄÄN

Juho Loippo

Opinnäytetyö
Marraskuu 2015
Sähkötekniikan
koulutusohjelma
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Älykkäät koneet

JUHO LOIPPO:

Sähkömagneettisen laakeroinnin soveltaminen tyhjöturbojärjestelmään

Opinnäytetyö 37 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Marraskuu 2015

Tässä opinnäytetyössä selvitetään sähkömagneettisen laakeroinnin käyttömahdollisuuksia Runtech Systems Oy:n tyhjöturboissa. Runtech ei ole tyytyväinen tämän hetken laakereihinsa, sillä niissä on liian lyhyt huoltoväli, mikä on vaikuttanut turbojen myyntiin. Lyhyt huoltoväli johtuu laakereiden suuresta kehänopeudesta, joka kuluttaa laakerit loppuun jo 1,5 vuodessa.

Opinnäytetyössä käydään läpi laakerijärjestelmän suunnitteluprosessi ja mitoitetaan sähkömagneettiset laakerit. Turbon sisäiset mitat sekä niihin liittyvät dokumentit on poistettu julkisesta raportista. Opinnäytetyössä tarkastellaan yritysten, Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja The Switchin tarjoamia ratkaisuja. The Switch valmistaa Runtechin käyttämät moottorit ja heidän kanssa tutkitaan itselevitoivan moottorin suunnittelun tarjoamia mahdollisuuksia.

Näitä verrataan toisiinsa painoarvotaulukolla ja niistä valitaan paras. Tämän hetken parhaan ratkaisun tarjoaa Foshan-Genesis Active Magnetic Bearings, joka on kiinalainen sähkömagneettisia laakereita valmistava yritys. Tulevaisuudessa on syytä harkita itselevitoivaan moottoriin siirtymistä.

Opinnäytetyössä selvitetään myös sähkömagneettisten laakereiden tulevaisuuden näkymiä ja niiden vaikutuksia Runtechiin niin markkinoilla kuin myös tulevaisuuden tekniikan kehityksessä. Sähkömagneettisia laakereita ei vielä hyödynnetä paljon turboissa yleisesti, mutta jotkut kilpailijoista ovat jo siirtyneet niihin, kuten esimerkiksi MAN Diesel & Turbo.

Tähän mennessä vähäinen käyttö on johtunut sähkömagneettisten laakereiden korkeasta hinnasta, mutta nykyään hinnat ovat laskeneet. Runtechin kannattaisi harkita sähkömagneettista laakerointia, koska on parempi olla edelläkävijä kuin siirtyä tähän tekniikkaan sitten kilpailijoiden jälkeen.

Asiasanat: sähkömagneettinen laakerointi, tyhjö, turbo, mitoitus, suunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Intelligent Machines

JUHO LOIPPO:

Application of Active Magnetic Bearings to Vacuum Compressor Systems

Bachelor's thesis 37 pages, appendices 2 pages
November 2015

This thesis examines the possibility of using active magnetic bearings in Runtech Systems Ltd's vacuum compressor systems. Runtech is not satisfied with its current bearings because they have too short maintenance intervals, which has affected sales of the vacuum systems. The short maintenance interval is a result of the high peripheral speed of the current bearings, which in turn wears out the bearings in just 18 months.

This thesis describes the steps of designing an active magnetic bearing system and measuring the physical dimensions for the bearings for the space provided. The inner dimensions of the turbo and documents related to it have been removed from the public thesis for confidentiality reasons.

The solutions offered by companies as well as solutions offered by the University of Technology of Lappeenranta are discussed in the thesis, along with the self-bearing motor by The Switch, which is the manufacturer of Runtech's motors.

These solutions are compared to each other and the best solution is selected using an importance table. The best solution at the moment is offered by Foshan-Genesis AMB, which is a Chinese company that manufactures active magnetic bearings, but in the future it is worthwhile to consider transitioning to a self-bearing motor.

Finally this thesis ponders upon the future of active magnetic bearings and how it will affect Runtech in the market as well as the future development of technology. Active magnetic bearings are not utilized very widely at the moment, but some of Runtech's competitors have already implemented them in their systems, for example MAN Diesel & Turbo.

To this day active magnetic bearing systems have not been used extensively because of their relatively high cost, but today the pricing has gone down. Runtech should consider using active magnetic bearings too, as it is far better to be at the forefront of technological development than to start using this technology only after the competitors have done so.

Key words: active magnetic bearing, vacuum, turbo, dimensioning, design

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TYÖN TAUSTA	7
2.1	Tietoa Runtech Systemsistä	7
2.2	Runtechin turbojärjestelmät	7
2.3	Nykyisten laakereiden haasteet	9
2.4	Työn motivaatio ja tavoite	10
3	SÄHKÖMAGNEETTINEN LAAKEROINTI.....	11
3.1	Sähkömagneettisesta laakeroinnista yleisesti	11
3.2	Laakerin suunnittelussa huomioitavaa	12
3.3	Magneettilaakerin mitoitusprosessi	14
3.4	Magneettilaakerin ohjauslogiikka	16
3.5	Magneettilaakerin ohjausmenetelmät	18
3.6	Optimointi ja simulointi	18
3.7	Sähkömagneettisen laakeroinnin tulevaisuus	19
3.8	Sähkömagneettisen laakerijärjestelmän suunnittelu paikallisesti	19
4	TUTKITUT VAIHTEHDOT LAAKEROINNIN TOTEUTTAMISEKSI	21
4.1	Yleinen katsaus	21
4.2	Kaupalliset laakerointiratkaisut	22
4.3	LUT:n tarjoama ratkaisu	23
4.4	Moottorin rakenteen muuttaminen.....	24
5	ERI TOTEUTUSVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU	26
5.1	Tarkasteltavat kriteerit	26
5.2	Tarkastelua painoarvotaulukolla	26
5.3	Arvojen läpikäyntiä.....	27
5.4	Käytännön toteutus	29
6	POHDINTA.....	31
	LÄHTEET.....	34
	LIITTEET	36
	Liite 1. Mitoitettujen laakerien kuvat	36

ERITYISSANASTO

μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
δ_0	Ilmarako roottorin ollessa keskitettynä
A	Yhden sähkömagneetin navan pinta-ala
N	Laakerin käämin kierrosluku
FG-AMB	Foshan-Genesis Active Magnetic Bearings
LUT	Lappeenranta's University of Technology, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto
i_0	Virta ajan hetkellä 0
i_x	Ohjausvirta
FEM	Finite element method, numeerinen tekniikka, jolla etsitään li- kiarvoa raja-arvo ongelmiin
Itselevitoiva moottori	Moottori, joka kykenee kannattelemaan akselia ja roottoria it- senäisesti, ilman erillisiä laakereita.

1 JOHDANTO

Tässä työssä käydään läpi sähkömagneettisen laakeroinnin etuja perinteiseen laakerointiin verrattuna ja selvitetään onko sellaista mahdollista hyödyntää Runtech Systems Oy:n tyhjöturbojärjestelmissä ja sen haasteiden ratkaisussa. Työssä tutkitaan myös, onko sähkömagneettisen laakerijärjestelmän hankkiminen ylipäättään kannattavaa, suhteessa nykyiseen laakerointiin. Sähkömagneettinen laakerointi on kalliimpaa kuin nykyinen laakerointi, joten sillä on saavutettava sille myöhemmin työssä määritetyt kriteerit.

Tämän lisäksi selvitetään sähkömagneettisen laakeroinnin tulevaisuuden näkymiä ja ovatko ne sellaisia, että Runtech voisi niitä hyödyntää. Samalla käydään läpi Runtechin historiaa ja sen tyhjöjärjestelmiä.

Työssä selitetään sähkömagneettisen laakerijärjestelmän suunnitteluprosessi, kuinka sillä voidaan ratkaista nykyisten laakerien ongelmia ja mitoitetaan Runtechin määrittämään tilaan laakerit. Näitä mittoja käytetään referenssinä laakerin valmistajia vertaillessa. Eri ratkaisuvaihtoehtoja vertaillaan painoarvotaulukossa painottaen Runtechin kriteerejä, jotka esitellään myöhemmin tässä työssä, niiden tärkeyden perusteella.

Lopuksi valitaan paras ratkaisu ja pohditaan miten sähkömagneettinen laakerointi vaikuttaa Runtechin asemaan markkinoilla ja kuinka tulevaisuudessa reagoida tekniikan kehitykseen laakeroinnin osalta. Pohdintaa on myös siitä, mitä olisi tämän työn osalta voinut tehdä toisin.

2 TYÖN TAUSTA

2.1 Tietoa Runtech Systemsistä

Runtech Systems Oy perustettiin vuonna 1997. Yhtiö aloitti toimintansa konsulttiyrityksenä paperiteollisuudelle, mutta alkoi pian valmistamaan ja myymään omia tuotteitaan. Runtech alkoi valmistamaan hiilikuidusta tuotteita, joilla poistetaan kosteutta paperimassasta. Runtech kasvoi ja alkoi laajentamaan toimintaansa ostaen pienempiä alan yrityksiä sekä perustamalla myös omia tytäryhtiöitä, kuten Runtech Energyn. Energyn toiminta keskittyi tuulivoimalatoiminnan ympärille, mutta käsitti myös yksityistalouksien energiatehokkuuden parantamiseen tarkoitettuja tuotteita kuten aurinkokeräimiä sekä lämminvesivaraajia (Loippo 2015).

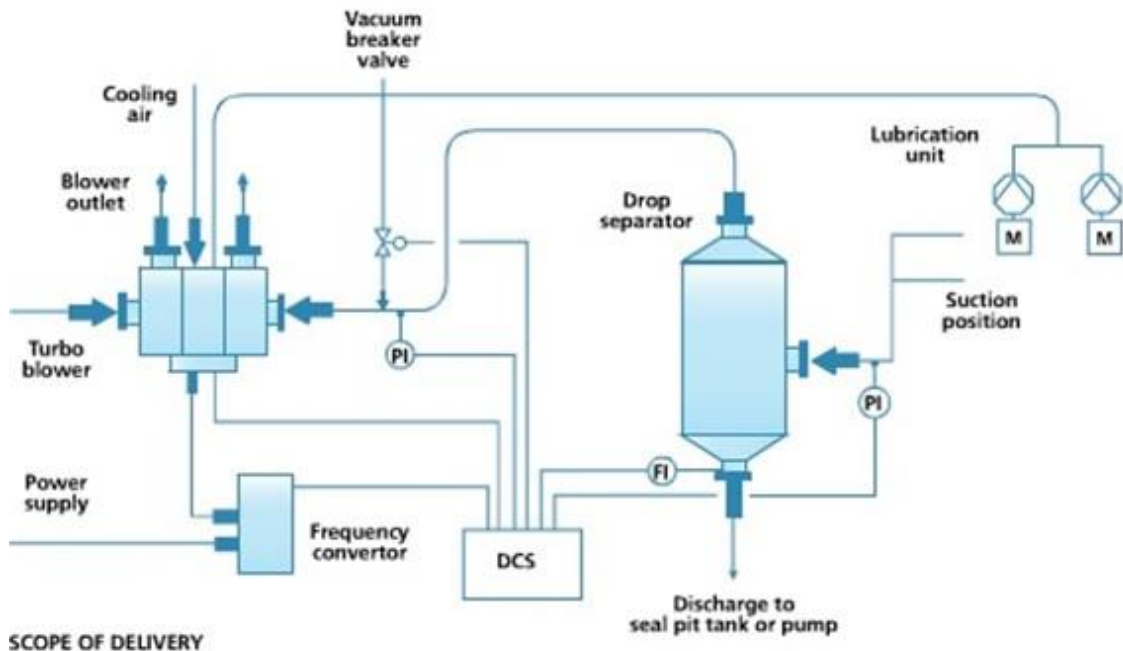
Runtechin suurin edistysaskel tapahtui kuitenkin kun konserni yhdistyi Ecopump Oy:n kanssa vuonna 2008. Samassa Runtech sai myös Ecopumpin turbotoiminnan, jonka ympärille tämä opinnäytetyö pohjautuu. Nykyisin Runtech työllistää suoraan 50 työntekijää ja välillisesti vielä enemmän kun Runtech kiireisimpinä aikoina ostaa sekä insinööriä että agenttipalveluita ulkopuolelta. Runtechin tuotteita löytyy ympäri maailmaa ja useilta teollisuuden alueilta. Yritys on kokenut vahvaa kasvua lamaa lukuun ottamatta, mutta edellisen vuoden aikana kehitys kääntyi jälleen kasvuun. Turbon uskotaan nousevan yrityksen tärkeimmäksi liiketoiminnan alueeksi (Loippo 2015).

Kuten aiemmin todettiin, Runtech sai turbotoiminnan Ecopump oy:ltä yritysten yhdistyessä. Ecopumpin pääasiallinen toiminta oli tyhjöturbojärjestelmien ympärillä, ja oli alansa teknologista kärkeä. Runtechin aikana turbon titaanisat juoksupyörät on korvattu hiilikuituisilla pyörillä sekä järjestelmiä standardisoitu, jolloin on saavutettu vahva asema markkinoilla.

2.2 Runtechin turbojärjestelmät

Perinteisesti tyhjöjärjestelmä, joka asiakkaalle asennetaan, sisältää turbon, öljyjäähdytys-/voitelukoneiston, vedenerottimen ja vesipumpun, jotka näkyvät kuvassa 1. Tällä järjestelmällä korvataan käytössä olevat järjestelmät, jolloin tärkeimpänä etuna saavutetaan

huomattavat energiansäästöt. Saavutettavat säästöt riippuvat asennettavien järjestelmien koosta ja määrästä suhteessa korvattaviin. Runtechin sivuilta löytyvistä case referensseistä nähdään energian säästön olevan 400 - 1500 kW luokkaa (Vacuum energy saving and optimization 2015).



Kuva 1. Tyhjöjärjestelmä (Runtech turbo edocker 2015, 11)

Yllä olevassa kuvassa on esitettyä Runtechin tyhjöjärjestelmä. Tyhjiö luodaan imemällä ilma vedenerottimen (drop separator) läpi, jossa ilmasta erotetaan ylimääräinen kosteus ja pienhiukkaset pakottamalla ilma virtaamaan suurella nopeudella erottimen sisällä olevan kennoston läpi. Tästä ilma suuntaa turbolle, jossa juoksupyörä pyörii suurella nopeudella puhaltaen ilman ulos.

Nopeus on riippuvainen luonnollisesti järjestelmän tarpeista, joita säädellään taajuusmuuntajan välityksellä sekä minkä kokoluokan turbosta on kyse. Isoimmat turbot pyörivät yli 10 000 rpm. Tällä saadaan aikaiseksi imuvoima, jolla päästään lähestulkoon täydelliseen tyhjiöön, joka on 5 kPa päässä absoluuttisesta tyhjiöstä (Karvinen 2015).

Runtech käyttää turboissaan The Switchin sähkömoottoreita. Yritys perustettiin vuonna 2006, ja sillä on Suomessa pääkonttori Vantaalla, sekä tehtaat Vaasassa että Lappeenrannassa. Yrityksen toiminta pyörii tuulivoiman sekä laivojen että teollisuuden moottorien

toimituksien ympärillä. Tässä työssä yritetään löytää sähkömagneettiset laakerit Runtechin isoimmille turboille, jotka käyttävät The Switchin 500 kW moottoreita. The Switch toimittaa myös pienempiä moottoreita Runtechille, mutta ne eivät liity tähän työhön.

Kuvassa 2 nähdään kuvankaappaus Runtechin sivuilta, jossa on nähtävissä miltä tyhjöjärjestelmä näyttää tehtaalle asennettuna. Järjestelmä on kookas, joten se vaatii paljon tilaa asennuskohteessa, jonka vuoksi vaikka järjestelmät ovatkin standardoitu, tarvitaan paljon projektihenkilökuntaa hoitamaan asennuksen suunnittelu ja asennus.



Kuva 2. Kuvassa edessä EP-500-700-S turbo. Kuvassa vasemmalla on vedenerotin (Runtech 2015)

2.3 Nykyisten laakereiden haasteet

Runtechin turbot kärsivät kilpailijoihin nähden lyhyestä huoltovälisestä, joka johtuu nykyisistä laakereista. Laakerit eivät kestä pyörimisen aiheuttamia kuormia 1,5 vuotta enempää, joka on tällä hetkellä aivan liian lyhyt aika. Kuormat syntyvät sekä aksiaalisesta että radiaalisesta rasituksesta. Laakerin kehänopeus on aivan äärirajoillaan, johtuen kovasta, yli 10 000 rpm kierrosnopeudesta ja isosta akselista (mitat salassa pidettävässä taustamateriaalissa). Laakerit altistuvat suurilla nopeuksilla noin 100 °C asteen lämmölle, aiheuttaen sen, että niitä tarvitsee koko ajan jäähdyttää öljyllä (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015).

2.4 Työn motivaatio ja tavoite

Runtechilla nykyisen laakeroinnin heikkoudet näkyvät myyntitilanteissa siten että kauppoja menee kilpailijoille pelkästään sen vuoksi että asiakkaat arvostavat kilpailijoiden tarjoamaa pidempää huoltoväliä, ja joissain tapauksissa täyttä huoltovapautta. Runtech mieluummin kilpailee laadulla kuin hinnalla, joten lähtökohtaisesti huoltoväliä halutaan pidentää vähintään 5 vuoteen, parhaimmillaan päästä huoltovapauteen.

Runtech haluaa korjata tämän epäkohdan sähkömagneettisten laakerien avulla. Sähkömagneettilaakerien etuna on että ne eivät kärsi perinteisten laakerien heikkouksista, johtuen levitaation tuomasta kitkattomuudesta. Ne ovat myös edullisia käyttää pidemmän päälle. Sähkömagneettilaakeri on myös yllättäen edullisempi käyttää kuin perinteinen laakeri, johtuen jäähtymisen tarpeettomuudesta.

Runtech aikoo kehittää turboistansa teknisesti parhaita kasvattamalla turbojen kierroslukua, vähentämällä huoltovälejä sekä vähentämällä asennettavan tavaran määrää. Samalla tavoitteena on mahdollistaa juoksupyörien pienentäminen. Tätä on tarkoitus lähteä tavoittelemaan magneettilaakerien avulla. Järjestelmälle asetetut kriteerit on tiukat. 20 000 € on absoluuttinen kipuraja, jota enempää ei sarjatuotettu järjestelmä saa maksaa. Tavoitteena hintaneuvotteluissa on pidemmän päälle saada järjestelmän hinta painettua alle 15 000 € (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015).

Taloudellisen rajoituksen lisäksi järjestelmällä on oltava hyvä kantokyky, sillä sen on kyettävä kannattelemaan 200 kg akselia. Kierrosluku tavoitteeksi on asetettu 15 000 rpm. Runtech myös haluaa että yksi laakerijärjestelmä soveltuu kaikille EP-500 turboille. Tämän lisäksi järjestelmän olisi hyvä olla mahdollisimman yksinkertainen asentaa ja huoltaa eikä se mielellään saa käyttää tehtaan automaation I/O-paikkoja, koska useilla tehtailla ne ovat ennestään vähissä. Lisäksi laakerien fyysisille mitoille on asetettu rajat salassa pidettävässä taustamateriaalissa.

3 SÄHKÖMAGNEETTINEN LAAKEROINTI

3.1 Sähkömagneettisesta laakeroinnista yleisesti

Sähkömagneettilaakereita on käytetty teollisuudessa jo noin 30 vuotta, mutta eivät ole tähän päivään mennessä saavuttaneet isoa markkinaosuutta johtuen lähinnä korkeasta hinnasta verrattuna perinteisiin laakereihin (Fleming D. 2010). Magneettilaakerien suurin kustannus tulee ohjauksesta, jonka kustannus pysyy lähes vakiona riippumatta laakerin käyttökohteesta. Tästä syystä useimpiin sovelluskohteisiin ei ole järkeä hankkia laakerointia, joka saattaa olla yhtä kallis kuin tuote itse. Kappaleessa 3.4 käydään läpi ohjausta tarkemmin.

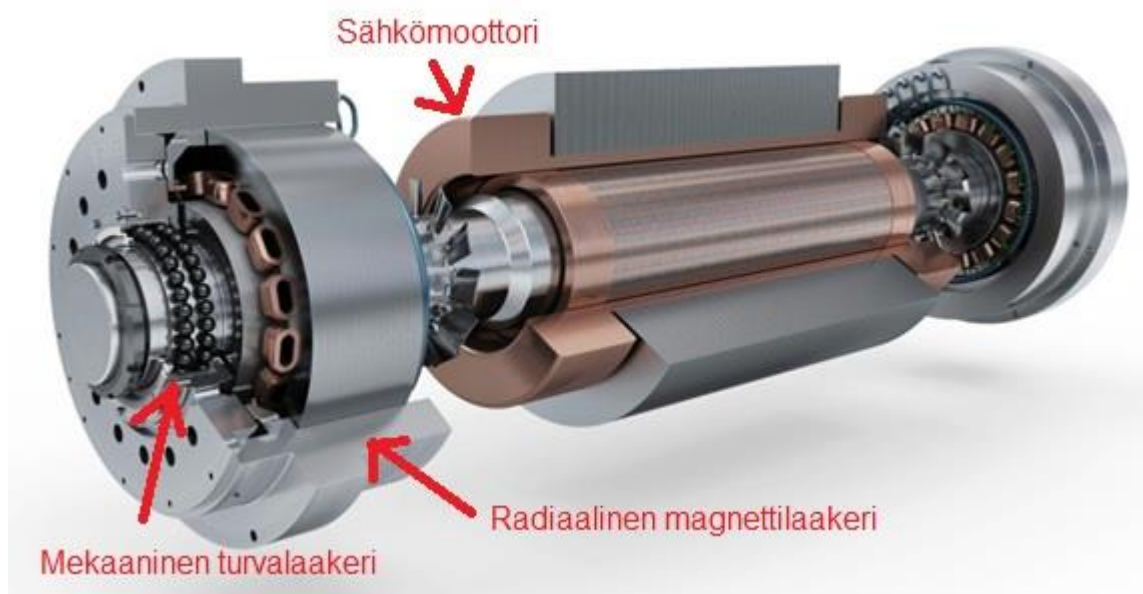
Sähkömagneettilaakereiden kallista hintaa selittää myös se, että niiden standardointi on ollut ja on edelleen vähäistä. ISO 14839 määrittelee sähkömagneettilaakereiden termistöä, antaa ohjelinjoja suunnitteluun ja käytön turvallisuuden valvontaan, mutta ei tarjoa sellaista pohjaa että nyt tai tulevaisuudessakaan voitaisi ostaa standardikokoisia sähkömagneettilaakereita jälleenmyyjältä. Laakerit siis suunnitellaan räätälöitynä tulevaisuudessakin käyttökohteeseensa.

Arvokkaammissa sovelluksissa kuten suurnopeuskoneissa taas suhteelliset kustannukset alkavat lähestyä hyväksyttävää tasoa. Tekniikan kehitys on myös luonnollisesti avannut mahdollisuuksia, kun laakerijärjestelmien hinta on pudonnut perässä. Tällä hetkellä turbojen kysynnän kasvaessa laakerijärjestelmän suhteellisen kustannuksen toivotaan pudonneen sen verran että tämä kehitysaskel on mahdollinen.

Magneettilaakerilla on monia hyviä puolia perinteiseen laakeriin verrattuna. Perinteisen laakerin heikkouksiin kuuluu rajoitettu kehänopeus, joka rajoittaa sovelluksille maksimaalisen kierrosluvun. Tämä on yksi haaste, joka vaivaa Runtechia tällä hetkellä. Magneettilaakereilla ei ole tätä ongelmaa. Sähkömagneettilaakereilla on mahdollista saavuttaa täydellinen huoltovapaus turbon oman elinkaaren ajaksi (Kim 2015).

Toinen hyvä puoli magneettilaakeroinnissa on se että koska kosketuspintaa akselin kanssa ei ole, ei synny myöskään kitkaa ja siitä seuraavaa lämpöenergiaa, jota tarvitsisi poistaa. Tämä johtaa siihen, että perinteisen laakerin jäähtytykseen käytetty öljykoneisto jää pois.

Tässä tulee Runtechin tapauksessa 10 000 € säästö (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015). Suurempi kierrosnopeus tarjoaa myös mahdollisuuden pienentää juoksupyöriä ja säilyttää samalla haluttu tyhjän taso. Juoksupyörä näkyy liitteessä 5, osana turbokonfiguraatioita. Alla olevassa kuvassa esitellään magneettilaakerin eri osat.



Kuva 3. Schaefflerin laakerijärjestelmä (Schaeffler 2015, muokattu)

3.2 Laakerin suunnittelussa huomioitavaa

Suunnittelussa on huomioitava useita eri asioita, jotta järjestelmä on stabiili, turvallinen ja ylipäättään toimiva. Tärkein asia, josta kaikki alkaa, on air gapin, eli ilmaraon suuruus. Ilmaraolla tarkoitetaan levitettävän kappaleen ja laakerin väliin jäävää rakoja. Vaadittu ilmaraon suuruus vaikuttaa suoraan laakerin teknisiin ominaisuuksiin sekä tietysti järjestelmän hintaan. Ilmarakoa määritettäessä on huomioitava laakerien ja moottorien keskeisyys, lämpölaajeneminen, värinä ja tärkeimpänä tarve pyöriä massakeskipisteensä ympärillä ja sitä kautta sietää epäbalanssia (Pyrhönen & Sopanen 2015).

Lämpölaajeneminen ei laakerin puolesta ole yleensä ongelma, sillä laakerin teho pysyy käytännössä koko ajan, alle 20 W. Teho pysyy pienenä, sillä sähkömagnetismissä oleellista on virran suuruus ja jännitteen ei tarvitse olla suuri. Näin ollen useimmat laakerit mitoitetaan käyttämään 10 - 15 ampeerin virtaa ja jännite säädetään olemaan alle yhden

voltin. Tästä ei synny lämpöhäviöitä, kun laakerin johtimet on mitoitettu riittävän kokoisiksi.

Keskeisyydestä on syytä huolehtia asennusvaiheessa huolella, sillä siitä syntyy turhaa rasitetta laakereille vaatien isompaa ilmarakoa ja sitä kautta suurempia kustannuksia. Isompi ilmarako vaatii, että joko käytetään suurempaa virtaa tai mitoitetaan laakeria isommaksi. Tämän voi tehdä, joko laakerien navan pinta-alaa kasvattamalla tai sitten lisätään käämeihin kierroksia. Suurempi virta tosin vaatii vahvempia johtimia, jolloin laakerikin luultavasti kasvaa. Isompi laakeri tarkoittaa taas kalliimpaa laakeria.

Epäbalanssi saa aikaan sen että akseli "huojuu" siten, että ilmarako on suurempi akselin yhdellä puolella ja pienempi vastakkaisella, joka on huomioitava mitoituksessa. Juoksupyörään tarttuu likaa ajan saatossa aiheuttaen pientä epätasapainoa. Järjestelmän olisi syytä pystyä sietämään sitä kuitenkin mahdollisimman pitkään, jotta tavoite huoltovapaasta turbosta saavutetaan.

Laakerijärjestelmää suunniteltaessa on kuitenkin aina varauduttava myös siihen, että joskus joudutaan virhetilaan. Tehtaalta voi katketa sähköt, jolloin on järjestelmässä syytä olla varavirtalähde, jolla voidaan järjestelmä ajaa turvallisesti alas. Toisaalta ei laakerijärjestelmän elektroniikasta tarvitse hajota kuin yhden komponentin ja sekä akseli että roottori putoaa alas saman tien. Näitä tilanteita varten on järjestelmässä oltava aina varalaakerit, jotka ottavat vastaan akselin kun se putoaa.

Putoamistilanteet täytyy myös ottaa huomioon ilmaraon mitoituksessa, sillä ilmaraon on oltava pienempi mekaanisen varalaakerin ja akselin välissä, kuin magneettilaakerin ja akselin välissä. Akseli ei saa pudota magneettilaakerin päälle, jotta se ei kärsi vaurioita. Koska Runtechin turbo tähtää huoltovapauteen, olisi varalaakeri syytä mitoitaa niin, että se kestää turbon elinkaaren aikana tapahtuvat alastulot. Näitä voidaan arvioida tapahtuvan 5 kertaa turbo noin 20 vuoden elinkaaren aikana.

Roottoridynamiikan ymmärtäminen on oleellinen osa laakerijärjestelmän suunnittelua. Tärkein asia, joka on syytä ymmärtää, on roottorin sekä akselin kriittinen taajuus. Pyörimisnopeuden kasvaessa pyrkii roottori sekä akseli joillakin nopeuksilla taipumaan kaarelle, joka tarkoittaa sitä, että laakerien sijoituspisteellä on väliä. Mikäli laakeri sijoitetaan siten, että se on kaareutuneen akselin ja lepotilassa olevan akselin välisen linjan

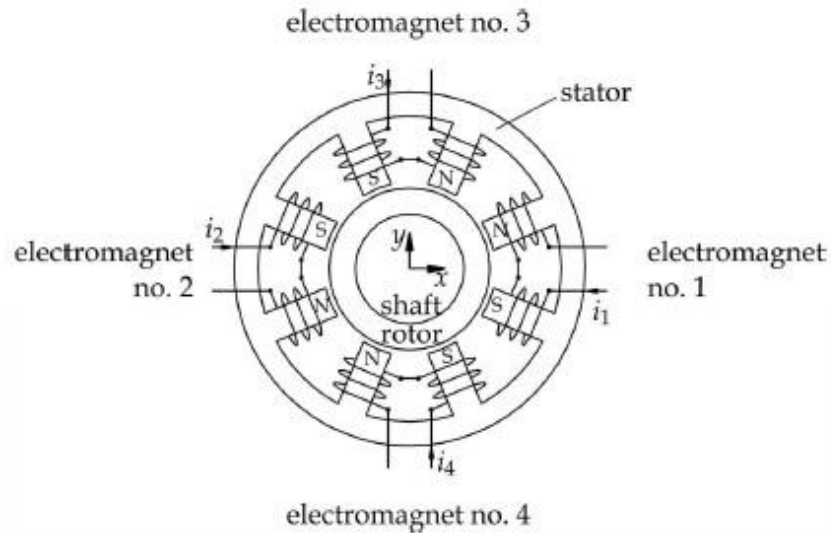
leikkauspisteessä, ei laakeri havaitse virhettä, vaikka akseli raapisikin muualla magneettilaakerin pintaa.

Tästä syystä roottoridynamiikka asettaa järjestelmälle kriittisiä kierrosnopeuksia, joiden ohi halutaan ajaa niin nopeasti kuin vain mahdollista kun ollaan ylikriittisissä nopeuksissa. Useimmiten halutaan pysyä alikriittisissä nopeuksissa. Tällöin vältetään nopeudet, jotka saattaisivat aiheuttaa värinää ja taipumista roottorissa tai akselissa. Kriittiseen taajuuteen ja sitä kautta roottorin sekä akselin jäykkyyteen, voidaan vaikuttaa niiden halkaisijaa kasvattamalla. Oltaessa kriittisen taajuuden määräämällä nopeusalueella tulee laakerit sijoittaa niin, että ne tukevat akselia ja estävät sen taipumisen ja pahimmassa tapauksessa hajoamisen.

3.3 Magneettilaakerin mitoitusprosessi

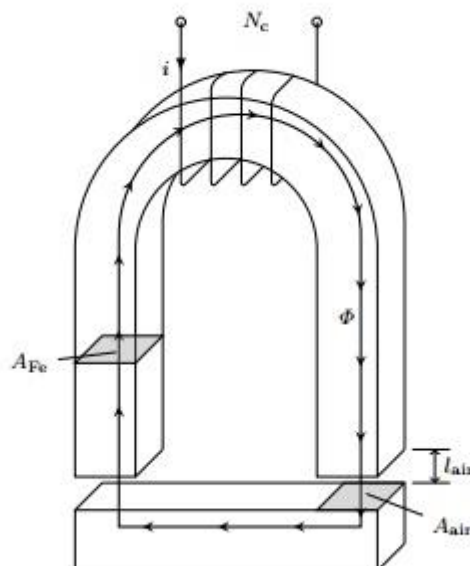
Sähkömagnetismissa johtimessa kulkeva virta luo ympärilleen magneettikentän, joka on kohtisuorassa virran suuntaan nähden. Magneettikentän voimakkuutta voidaan voimistaa kiertämällä johdin käämiksi ja asentamalla sille rautasydän. Tätä magneettikenttää voidaan hyödyntää sähkömagneettisissa laakereissa.

Alla näkyvässä kuvassa 4 on kuvattu laakerin rakenne. Siinä on tehty neljä sähkömagneettia siten, että kahden staattorin muodostaman sydämen ympärille on käännetty käämi, jolla on saatu aikaan pari, johon johdettaessa virtaa joka luo luotaantyöntävän magneettikentän. Vastakkaisiin sähkömagneetteihin johdetaan eri suuntiin virtaa, jolloin saadaan aikaan se, että magneettikenttä on suunnattu samaan suuntaan. Tällöin saadaan aikaiseksi voima, jolla voidaan kumota akseliin ja roottoriin kohdistuva painovoima sekä mahdolliset muut voimat, jotka järjestelmä voi kohdata, kuten epäbalanssin aiheuttamat voimat.



Kuva 4. Radiaalinen laakeri ja sen rakenne. (Juan ym. 2015, 28)

Sähkömagneettisenlaakerin mitoitus perustuu U-mallin sähkömagneettiin, joka näkyy alla olevassa kuvassa 5. Kun mallia vertaa kuvaan 4, huomataan että magneettiparit koostuvat käytännössä tämän mallisista magneeteista. Näiden magneettien synnyttämä magneettikentän voimakkuus on riippuvainen käämin kierrosluvusta, ilmaraosta, rautasydämen pinta-alasta, sekä siihen johdettavasta virrasta.



Kuva 5. Magneettilaakerointi perustuu U-mallin sähkömagneettiin. (Smirnov 2015, 28)

Sähkömagneettisenlaakerin mitoitus lähtee alla olevasta kaavasta 1. Alla olevalla kaavalla saadaan määritettyä napojen pinta-ala sekä käämien kierrosluvut. Näistä saadaan

lähtöarvot laakerin fyysiselle mitoitukselle. Sekä radiaalinen että aksiaalinen laakeri on taustamateriaalissa mitoitettu tähän työhön sopiviksi ja mitoitus on syytä suorittaa tapauskohtaisilla arvoilla. Kaavalla voidaan mitoittaa sekä radiaalinen että aksiaalinen laakeri (Juan ym. 2010, 29).

$$F_x = \frac{1}{4} \mu_0 A N^2 \cos(\pi/8) \left(\left(\frac{I_0 + i_x}{\delta_0 - x} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_x}{\delta_0 + x} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Kaavassa F_x kuvaa voimaa ja sen suuntaa. I_0 on virran suuruus hetkellä 0 ja i_x on ohjausvirran suuruus. x on virhe roottorin asemassa suhteessa sille asetettuun arvoon. Lähtökohtaisesti sähkömagneettisissa laakereissa käytetään 10 - 15 ampeerin virtaa, jotta voidaan käyttää 1,5 mm² kuparijohdinta (D1-2012, 217). Määritetään ilmaraon suuruudeksi 0,8 mm ja mitoitetaan laakerijärjestelmä kantamaan 1,5 kertaa akselin ja roottorin massan saadaan lähtökohdat mitoitukselle. Laakereita on yksi molemmissa päissä turboa eli yhden laakerin täytyy kantaa 0,75 kertaa ilmoitettu massa. Määritetään hätälaakerointi sellaiseksi että sille jää 0,5 mm rako. Magneettilaakeroinnilla päästään jopa 50 µm tarkkuuteen, joten ilmarakoja ei kannata määrittää tarpeettoman suuriksi, sillä isommasta ilma- raosta seuraa suurempi virrankulutus (Juan ym. 2010, 79).

Aksiaaliset laakerit mitoitetaan myös niin, että ne voivat pidätellä 1,5 kertaa vaaditun voiman. Tarkoittaen kun molemmissa päissä on yksi laakeri, että yksi laakeri pidättelee 0,75 kertaa ilmoitetun voiman. Akselinsuuntaiselle laakerille on määritetty myös sama 0,8 mm ilmarako sekä 0,5 mm rako hätälaakeroinnille ja esikiristysjousille.

Taustamateriaalissa on suoritettu laskut ja niiden pohjalta on mitoitettu sekä mallinnettu laakerit. Laskuista ja niiden pohjalta luotuja malleja on käytetty referenssinä kun on verrattu eri laakerin valmistajien ratkaisuja. Mitoitus on luottamuksellista tietoa eikä sitä käsitellä opinnäytetyössä yksityiskohtaisesti. Mitoitettujen laakereiden 3D-mallien kuvat on nähtävissä liitteessä 1.

3.4 Magneettilaakerin ohjauslogiikka

Kun laakerijärjestelmä on mitoitettu, täytyy seuraavaksi määrittää ohjaustekniikka. Järjestelmää voidaan ohjata usealla eri tavalla, mutta Runtechin kannalta paras ratkaisu on sellainen että se on mahdollisimman helppo ja yksinkertainen asentaa, käyttää sekä huoltaa (Karvinen 2015). Lisäksi toiveena oli, että järjestelmää liitettäessä tehtaan automaatioon tarvittaisiin mahdollisimman vähän I/O-paikkoja, sillä useimmilla asiakkailla, joille Runtech myy tuotteitaan, on lähtö- ja tulopaikat vähissä ja saattaa olla joillekin kynnyskysymys hankintapäätöstä tehdessä.

Edellä mainitut kriteerit rajaavat joitakin ratkaisuja pois. Esimerkiksi laitteen oman ohjauselektroniikan tarvetta olisi voinut minimoida merkittävästi siten, että ohjausta olisi siirretty tehtaan automaatiojärjestelmän esimerkiksi Siemensin SIMATIC STEP 7 tai Omronin ohjauslogiikan hoidettavaksi, jolloin Runtech olisi voinut toimittaa ohjauskoodin. Tämä kuitenkin vaatii sen verran tulo- ja lähtöpaikkoja, mm. kaikkien laakereiden napojen käämien vahvistimet että paikka-anturit, että tällainen ratkaisu ei ole kannattavaa.

Toinen vaihtoehto ohjaukselle olisi tehdä se taajuusmuuntimien ja ym. standardi logiikan avulla. Tämän menetelmän etuna tietysti olisi se, että pieniä eriä myydessä kustannukset pysyisivät edullisina, mutta se vaatisi suhteellisen kookkaan asennuksen ja useita komponentteja, joilla ohjaus tehdään. Näissä ratkaisussa eivät helppous ja yksinkertaisuus toteudu riittävän hyvin.

Kolmas vaihtoehto olisi toteuttaa tehoelektroniikasta kootulla ohjauksella. Tällöin tarvittava ohjaus voidaan suorittaa yhdellä piirilevyllä, joka on kokonsa puolesta pienin ratkaisu. Se voidaan sijoittaa turbon omaan ohjauskabinettiin, ja pienen kokonsa puolesta sen voi helposti asentaa. Mahdollisen vian sattuessa se voidaan vaihtaa kokonaisuudessaan, jolloin paikan päällä ei tarvitse alkaa suorittamaan sen suurempaa diagnostiikkaa, vaan se voidaan tehdä myöhemmin esimerkiksi Runtechin omissa tiloissa. Pitemmän päälle turbojen kysynnän kasvaessa yksittäisen piirilevynkin hinta painuu alaspäin tarjoten parhaan hinta/laatu-suhteen.

Mikä tahansa ohjausratkaisu valintaankin, on laakerijärjestelmän oltava mahdollisimman autonominen ja käyttäjän ohjaustarve tulisi olla vähäinen. Toivottava ratkaisu on tehdä laakereista itsestään tunnustelevat, tarkoittaen sitä että ohjausjärjestelmä kalibroii

niitä kaiken aikaa ja laakerit keskittävät itseään massakeskipisteen mukaan. Tämä tarjoaa ratkaisun jo edellä todettuun Runtechin kriteeriin epätasapainon hallinnasta, mutta mahdollistaa lisäksi sen että järjestelmä toimii heti käskystä ilman että sille tarvitsee antaa asetusarvoja. Näin järjestelmä on mahdollisimman yksinkertainen ja nopea asentaa. Tällä periaatteella yksi laakerijärjestelmä käy kaikkiin haluttuihin turbokonfiguraatioihin, jotka on määritelty taustamateriaalissa.

3.5 Magneettilaakerin ohjausmenetelmät

Kun ohjauslogiikka päätetty, on valittava sopivin ohjausmenetelmä. Ohjelmakoodilla ja sen arkkitehtuurilla on luonnollisesti vaikutus siihen, kuinka järjestelmä ohjaa laakereita. Eri menetelmät tarjoavat erilaisia etuja. Esimerkiksi interpoloiva ohjaus tarjoaa parasta reaktioaikaa virheisiin, siinä missä taas asetusarvon ja akselin aseman virhe on kohtalaisen suuri (Juan ym. 2010, 25).

Sähkömagneettisten laakerien kohdalla aseman virheen suuruus mitataan yleensä mikrometreissä, jolloin niiden merkitys on suhteellisen pieni, jos toleranssit ovat suuria. Sumean logiikan piiri tarjoaa kuitenkin pienimmän virheen akselin asemassa, joten mikäli ratkaisuissa ei ole kustannusten puolesta suurta eroa, on se Runtechille paras vaihtoehto. Vaikka sumea logiikka tarjoaa hitaamman reaktioajan kuin esimerkiksi interpoloiva ei sillä Runtechin näkökulmasta ole väliä. Tällä ei ole väliä koska ero reaktioajoissa on vain millisekuntien luokkaa (Juan ym. 2010, 25).

3.6 Optimointi ja simulointi

Tässä vaiheessa on saavutettu laakerijärjestelmä, joka kykenee levitaatioon, mutta ei ole vielä optimoitu. Järjestelmän hienosäätö tapahtuu siten että roottorista ja akselista luodaan mahdollisimman tarkka matemaattinen malli FEM-ohjelmistolla, jolla voidaan hakea likiarvoa raja-arvo ongelmiin. Menetelmällä jaetaan mallinnettava kappale useisiin pieniin osiin, jotta sen käyttäytymistä voidaan mallintaa kun se altistetaan erilaisille voimille. Tällaisia analyysejä käytetään mm. kun mallinnetaan autojen törmäystestejä.

Kun se on tehty, siirretään malli Matlabin Simulink ohjelmistoon, jossa simuloidaan ja mallinnetaan magneettivuon käyttäytyminen mahdollisimman tarkasti. Tietysti mitä tarkempi matemaattinen malli sitä enemmän vaaditaan laskentatehoa, joten toleranssin merkitys on suuri.

Simuloinnilla saavutetaan sekä ohjaukoodin optimointi että voidaan laakerin fyysisiä mittoja viilata paremmaksi. Ohjelmien lisenssit ovat kuitenkin kalliita, joten ei ole järkevää hankkia niitä, mikäli ei ole niille jatkuvaa tarvetta. Optimointi tuo kuitenkin 10-15 % säästöt tarvittavien komponenttien osalta sekä tuo suunnilleen saman verran säästöjä parannetun tehokkuuden myötä pitkässä juoksussa (Juan ym. 2010, 35).

3.7 Sähkömagneettisen laakeroinnin tulevaisuus

Sähkömagneettiset laakerijärjestelmät ovat työläitä ja haastavia kehittää, jonka vuoksi ne eivät ole nousseet kuitenkaan suurempaan suosioon markkinoilla. Tulevaisuudessa niitä saattaa näkyä enemmän, mutta tulevaisuuden suuntaus on useiden asiantuntijoiden mielestä se, että sähkömagnetismia aletaan hyödyntää enemmän jo moottorin tasolla. Nykyään jo pystytään esimerkiksi vektoriohjauksella luomaan laakerittomia moottoreita. Moottorin ohjaukseen lisätään siis momentin lisäksi levitaation tuova komponentti (Kurronen 2015).

Kuten aiemmin jo todettiin, ei levitaation luominen edellytä kovin suurta tehoa, ja isoissa moottoreissa tehohäviö momentin suhteen on käytännössä merkityksetön. Laakeriton moottori edellyttää useimmissa tapauksissa käytännössä pieniä muutoksia käämityksiin, paikka-anturoinnin lisäämistä ja ohjaukoodin muokkausta. Tulevaisuudessa magneetti-laakeroinnin sijasta saattaa olla siis järkevämpi siirtyä laakerittomaan moottoriin.

3.8 Sähkömagneettisen laakerijärjestelmän suunnittelu paikallisesti

Sähkömagneettisen laakerijärjestelmän suunnittelu on kuitenkin haastavaa, mikä selittää myös järjestelmän korkeaa hintaa. Järjestelmän suunnittelu vaatii kattavaa osaamista koneen suunnittelusta, sähkötekniikasta, elektroniikasta sekä säätötekniikasta. Tämän li-

säksi järjestelmän suunnittelu vaatii aikaa. Ammatilaiselta menee suunnitteluun, asentamiseen ja loppukäyttäjän kouluttamiseen noin vuoden työ (Amherd 2015). Tästä syystä tämän opinnäytetyön tarkoituksena ei ole suunnitella itse järjestelmää. Kaikkien alojen kattavan osaamisen kerääminen sekä suunnittelutyö veisivät liikaa aikaa.

4 TUTKITUT VAIHTEHDOT LAAKEROINNIN TOTEUTTAMISEKSI

4.1 Yleinen katsaus

Runtechille on tämän työn aikana löytynyt kolme käytännön vaihtoehtoa, joista valita, mikäli halutaan vaihtaa nykyisestä laakeroinnista. Ensimmäisenä on paras kaupallinen ratkaisu, toinen LUT:n tarjoama ratkaisu ja kolmas on vaihtoehtoisesti magneettilaakeroinnin sijaan lähteä moottoritoimittajan kanssa kehittämään laakeritonta moottoria. Tietysti kaupallisia vaihtoehtoja ja varmasti myös LUT:n sekä The Switchin tapaisia ratkaisuja on enemmänkin tarjolla, mutta tässä työssä on karsittu niitä pois annettujen kriteerien avulla.

Muita kaupallisia vaihtoehtoja ei esitellä tarkemmin sen vuoksi että ei ole mieltä käydä läpi samanlaisista ratkaisuista kuin paras. LUT:n ja Switchin tapauksessa ei ole tutkittu muita samankaltaisia ratkaisuja, koska pääpaino tässä työssä oli kuitenkin enemmän kaupallisella puolella ja LUT:n sekä Switchin tarjoamat vaihtoehdot edustavat riittävän hyvin yliopiston, että moottorin valmistajan kanssa yhteistyössä tehtävää ratkaisumallia.

Kullakin näistä vaihtoehdoista on omat etunsa ja heikkoutensa. Ratkaisuvaihtoehtoihin sekä niiden ominaisuuksiin paneudutaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Ratkaisuvaihtoehtoja vertaillaan painoarvotaulukossa, jossa vertailtavina arvoina on ratkaisun hinta, Runtechin tarve sitoa resursseja kehitykseen, asennuksen ja käytön helppous sekä kuinka hyvin Runtechin tekniset kriteerit, jotka on esitetty kappaleessa 2.5, täyttyvät ratkaisussa. Painoarvotaulukko esitetään kappaleessa 5.2 ja siinä käydään myös tarkemmin läpi, millaiset painoarvot kullekin kriteerille asetetaan.

Yritysten ratkaisuksista yleisesti voidaan sanoa että teknisiä eroja ei juuri ollut, johtuen paljon tietysti siitä, että kriteereillä ja toivomuksilla ohjattiin ratkaisuja haluttuun suuntaan. Suurimmat erot olivat ohjauksen toteutuksessa, jossa yrityksillä oli hieman enemmän liikkumavaraa kuin itse laakerien fyysisissä mitoissa. Runtechilla oli tähän luonnollisesti omat toivomuksensa, ks. kappale 3.4, mutta mitään ei vielä täysin suljettu pois.

Runtech toivoo, että sen ei liiaksi tarvitsisi panostaa laakerijärjestelmän kehitykseen, ainakaan ennen kuin siihen on päätetty sitoutua, jotta ei tulisi tehtyä turhaa työtä, mikäli järjestelmä osoittautuisi liian kalliiksi tai teknisesti toteutuskelvottomaksi. Varsinkin LUT:n ratkaisu edellyttäisi Runtechilta tiivistä yhteistyötä sekä Switchin kanssa että LUT:n kanssa. Yritysratkaisuissa taas tarve on pienempi. Asennuksen ja käytön helppous on seurausta pitkälti ohjausratkaisusta. Pieni ohjausyksikkö on luonnollisesti helpompi vaihtoehto kuin sähkökaapillinen taajuusmuuntimia ja muita komponentteja. Aiemmin jo suljettiin pois tehtaan omaa automaatiota hyödyntävät ratkaisut.

4.2 Kaupalliset laakerointiratkaisut

Hinnan puolesta vaihtelut olivat yllättävän suuria. Esimerkiksi SKF, joka on ruotsalainen laakerien valmistaja, totesi että alle 20 000 euron hintatavoite sarjatuotetulle järjestelmälle on mahdotonta ja että tällainen järjestelmä maksaisi useita kertoja niin paljon kuin Runtech on valmis sijoittamaan. Toisaalta kiinalainen FG-AMB, joka on magneettilaakereihin erikoistunut yritys ja sveitsiläinen Mecos totesivat pystyvän tarjoamaan järjestelmän 20 000 tai alle, alkuinvestointien jälkeen. Mecos tosin paljastui myöhemmin MAN Diesel & Turbon omistamaksi yhtiöksi, joka on Runtechin suurimpia kilpailijoita, jonka vuoksi yhteistyö heidän kanssaan ei onnistunut (Aarnio 2015; Amherd 2015; Kim 2015).

Vertailu yritysten välillä suoritettiin samoilla kriteereillä kuin eri toteutusvaihtoehtojen vertailu kappaleessa 5. Koska yritysten teknisten ratkaisujen erot olivat pieniä, suurimmaksi ratkaisevaksi tekijäksi muodostui hinta. Tästä johtuen yritysten välinen vertailu erillisellä taulukolla ja kappaleella on jätetty tekemättä. Hinnan ollessa tärkein kriteeri, ei ole syytä tarkastella yrityksiä, jotka eivät ole lähelläkään Runtechin tavoitetta, vaikka muuten täyttäisivät tekniset vaatimukset.

Yritysten tarjoamista ratkaisuista parhaaksi osoittautui siis Kiinalainen FG-AMB (FOSHAN GENESIS AMB TECH CO). He pystyvät tarjoamaan tarvittavat tekniset ominaisuudet, ks. kappale 2.4, ollen sekä hinnan että sitoutumattomuutensa puolesta ainoa yritys, joka sopii kaikkiin Runtechin kriteereihin. Laakerijärjestelmä, joka sisältää 2 akselinsuuntaista laakeria, 2 säteensuuntaista laakeria sekä paikka-anturoinnin ja ohjaimen

maksavat 20 000 USD kappaleelta vuositulauksen ollessa 50 kappaletta. Tämän lisäksi Runtechille tulee maksettavaksi 100 000 \$ kehityskustannuksia.

Muiden yritysten tarjoamat ratkaisut olivat joko liian kalliita tai teknisesti riittämättömiä. Eräät yritykset myös totesivat suoralta kädeltä, että eivät ota uusia sähkömagneettilaakeri projekteja kehitettäväksi (mm. Calnetix, joka erikoistuu suurnopeuslaakereiden valmistukseen) (Shenoy 2015). Jotkut tarjosivat tilalle kestoplaneeteilla tehtyjä ratkaisuja (esimerkiksi Apexmagnetic, joka on yhdysvaltalainen alan yritys) (Bowers 2015), mutta niillä ei pysytä hallitsemaan epäbalanssia, eikä pystytä tekemään kaikille turbomalleille yhtä ja samaa laakerijärjestelmää. Myös jonkin verran oli yrityksiä, jotka eivät vastanneet yhteydenottoihin.

4.3 LUT:n tarjoama ratkaisu

Toinen vaihtoehto Runtechille lähestyä magneettilaakerointia on LUT:n (Lappeenrantaan teknisen yliopiston) tarjoama lähestymistapa. He ovat tutkineet sähkömagneettisia laakereita jo vuosia, ja ovat aiemminkin toimineet Ecopumpin ja muiden yritysten kanssa kehitysyhteistyössä. Heidän tarjoaman ratkaisumallin etuina olisivat pienimmät kustannukset ja tarkempi ymmärrys laakereista ja ohjauksesta, mutta se edellyttäisi tiiviimpää osallistumista laakerin kehittämiseen. Kehitystyö olisi minimissäänkin vuoden mittainen projekti, todennäköisesti lähempänä kahta. Osat pitäisi kuitenkin teetättää jossain ja logiikka tulisi olemaan monimutkaisempi asentaa ja käyttää (Pyrhönen 2015; Söpanen 2015).

Logiikka olisi toteutettu taajuusmuuntimilla ja muulla standardilogiikalla, johon tosin tämän hetken esitettyyn laitteistoon oli avattu takaportteja hilaohjauksiin. Tämä on taas vastoin Runtechin toivetta välttää liiallista sitoutumista kehitystyöhön ja laitteiston tarvetta olla helppo käyttää ja asentaa. Kun laitteisto olisi suunniteltu, se teetetäisiin The Switchillä tai jollain muulla toimittajalla. Koska kyseessä olisi yliopiston kanssa tehtävä tuotekehitysprojekti, olisi siihen mahdollisuus hakea Tekesiltä tukea, rahoituksen muodossa.

Professorit Olli Pyrhönen ja Jussi Söpanen esittelivät kehittämäänsä laakeria. Laakeri on suunniteltu Rotatekin vanhaan sähkömoottoriin, jonka he ovat saaneet lahjoituksena. The

Switch tunnettiin ennen fuusioitumista Vertecon ja Youtilityn kanssa Rotatek nimellä ja kyseistä sähkömoottorimallia on myös käytetty ensimmäisissä Runtechin turboissa. Pyrhönen ja Sopanen johtavat LUT:n sähkömagneettilaakerien tutkimusta, ja olisivat yhteistyön toteutuessa yliopiston kontaktit ja suunnittelijat.

4.4 Moottorin rakenteen muuttaminen

Kolmas vaihtoehtoinen tapa korjata laakeroinnin ongelmia olisi erillisen laakeroinnin sijasta pyytää The Switchiä kehittämään Runtechille laakeriton moottori. Laakerittomassa moottorissa ei nimensä mukaan ole tarvetta erilliselle laakeroinnille (häätälaakeria lukuun ottamatta), vaan moottori hoitaa itse kuorman levitoinnin. Tämä on alan kirjallisuuden ja tutkijoiden mukaan tulevaisuudessa kasvava tapa valmistaa suurnopeuskoneita (Pyrhönen 2015; Sopanen 2015; Kurronen 2015).

Kuvatun ratkaisun etuina on edelleen pienentynyt tarve muille komponenteille. Moottori saadaan hoitamaan sekä aksiaalinen että radiaalinen kuorma, ja koska oleellista lämpenemistä ei tapahdu, ei tarvita oikeastaan moottorin lisäksi muuta kuin häätälaakerointi, mikäli akseli syystä tai toisesta putoaa.

Tällaisella ratkaisulla on paljon hyviä puolia, mutta siihen sisältyy myös paljon haasteita. Aikataulullisesti The Switchiltä kestäisi minimissään 1,5 vuotta valmistaa tällainen moottori, koska se sisältää paljon myös haasteita. Moottoriin tarvitsee esimerkiksi lisätä ohjauskäämitys levitaatiota varten moottorikäämitysten lisäksi. Lisäksi tarvitaan luonnollisesti paikka-anturointi (Kurronen 2015).

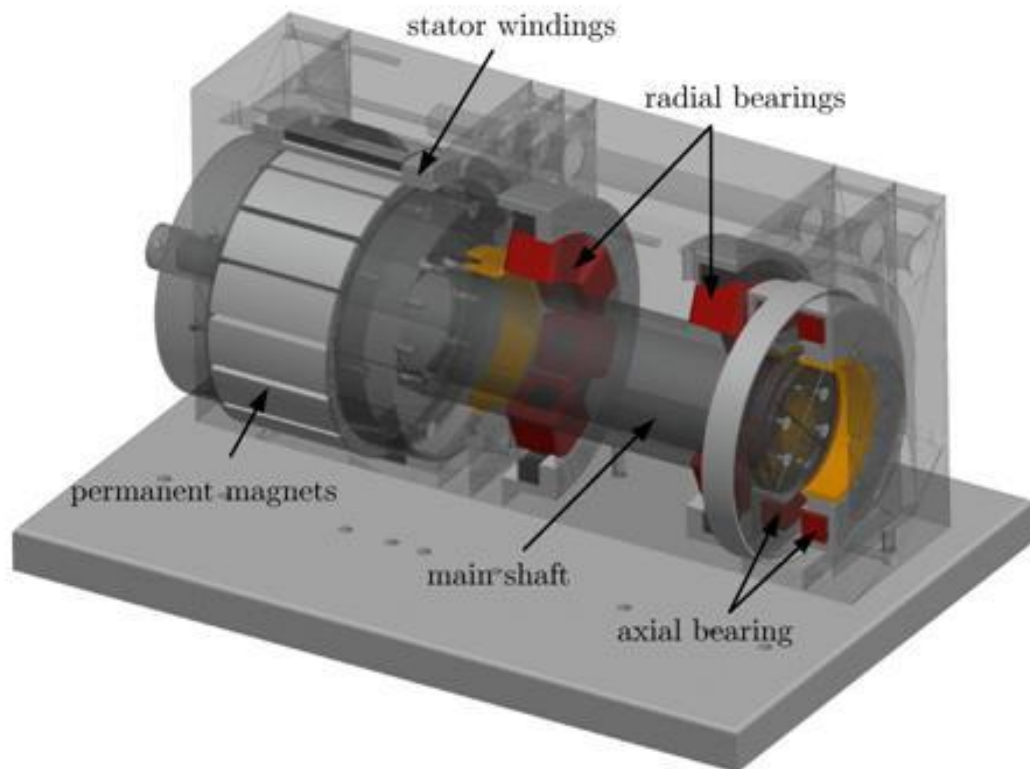
Moottoria täytyy tällöin myös kasvattaa, jotta vältetään syntyviä häiriöitä. Luotettavuus sekä keskityksen tarkkuus kärsii, jos käämityksiä yritetään laittaa sisäkkäin. Moottorin osalta tietysti Runtechin puolelta vaadittaisiin myös todennäköisesti myös akselin halkaisijan kasvattamista, jotta se pysyy riittävän jäykkänä, eikä aiheuta ongelmia suurella kierrosnopeudella pyöriessään.

Kuvattu ratkaisutapa on kuitenkin tällä hetkellä vielä liian kallis. Sarjatuotettu moottori olisi kalliimpi kuin erillinen magneettilaakerointi, vaikkakin Runtechin kannalta turbon

rakenne yksinkertaistuisikin. Tämän lisäksi Runtech joutuisi maksamaan moottorin kehityskustannukset, jotka ovat Switchin mukaan 200 000 - 400 000 €, joka on tämän hetken turbojen myynnin puolesta erittäin kallista (Kurronen 2015).

Switchin mukaan kuitenkin tulevaisuudessa seuraavan 10 vuoden aikana hinnat tulevat alaspäin sekä Runtechin puolesta turbojen myynnin odotetaan kasvavan sellaisiin mittoihin, että tähän on syytä palata ajoittain ja aloittaa uudelleen keskustelut moottorin kehittämisestä. Switch tutkii myös kuitenkin koko ajan uusia tapoja parantaa sekä laakerointia että moottoreitaan myös magneettilaakeroinnin suuntaan, joten heiltä voidaan helposti seurata tekniikan kehitystä ja päättää koska kyseinen moottori on Runtechille ajankohtainen (Kurronen 2015).

Alla olevassa kuvassa näkyy Albertan yliopiston kehittämä itselevitoiva moottori, joka vastaa hyvin paljon erillisellä magneettilaakeroinnilla tehtyä ratkaisua. Se on siis yksinkertaisin tapa tehdä itselevitoiva moottori, mahdollistaen moottorien valmistamisen standardisoituna helposti ja nopealla kehitystahdilla. Tämä on luonnollinen välietappi matkalla tutkijoiden tulevaisuuden visioon, jossa moottoreista tulee lopulta kompakteja ja sisäkkäisten käämien tarkkuuden ongelmat ratkaistaan.



Kuva 7. Itselevitoiva moottori (University of Alberta 2015)

5 ERI TOTEUTUSVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU

5.1 Tarkasteltavat kriteerit

Runtechin kannalta oleellisia asioita, joita tarkastellaan, ovat järjestelmän hinta, teknisten kriteerien täytyminen, valmistumisaika, tarve osallistua kehitykseen sekä asennuksen ja käytön helppous (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015). Näitä kriteereitä tarkastellaan painoarvotaulukolla, jossa annetaan painoarvot kriteerin tärkeyden mukaan, jotta saadaan mahdollisimman objektiivinen näkökulma ratkaisun valintaan. Perusteet painoituksille ja eri ratkaisuille annetuille arvoille on annettu kohdassa 5.2.

5.2 Tarkastelua painoarvotaulukolla

Taulukon 1 esittämässä painoarvotaulukossa on vertailtu eri ratkaisumalleja. Hintaa arvioidaan siten, että parhaan tuloksen sai osumalla 10 - 15 000 € tavoitehaarukkaan. Osumalla 20 000 € kipurajaan ja sen alle sai hieman heikomman tuloksen. Huomattava pisteen vähennys tehtiin, mikäli ei päästy lähellekään kipurajaa.

Taulukko 1. Painoarvotaulukko vaihtoehtoista

Vertailtava arvo	Painoarvo	FG-AMB	LUT	Itselevitoiva moottori
Hinta	35 %	30	35	15
Teknisten kriteerien täytyminen	25 %	25	20	20
Valmistumisaika	10 %	10	5	0
Tarve osallistua kehitykseen	10 %	10	5	2
Asennuksen/käytön helppous	20 %	15	10	20
Yhteensä	100 %	90	75	57

Teknisten kriteerien täyttymisessä arvioidaan teknisten vaatimusten (epätasapainon sietoa, saavutettavia kierrosnopeuksia, mahdollista muutostarvetta turbon rakenteeseen) täyttymistä. Paras tulos saadaan kaikkien vaatimusten täyttymisellä, ja pientä vähennystä

tehtiin, mikäli muutoksia olisi tehtävä turboon ehtojen täyttämiseksi tai jotain toivotuista kriteereistä ei täysin saavutettu.

Valmistumisaika pisteettiin siten että alle 1 vuoden valmistumisajasta sai parhaat pisteet ja 1-1,5 vuotta sai puolet pisteistä ja 0 pistettä mikäli valmistuminen veisi 1,5 vuotta tai enemmän. Tarvetta osallistua kehitykseen arvioitiin kuinka paljon resursseja menisi Runtechilta kehitysprosessin aikana. Parhaat pisteet saivat ne, joilla Runtechin ei ole tarvetta osallistua kehitykseen tai se on vähäinen. Puolet pisteistä sai, mikäli Runtechin pitäisi osallistua kohtalaisesti ja 0 pistettä tarkoittaisi että Runtechin pitäisi osallistua kehitystyöhön paljon (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015).

Asennuksen ja käytön helppoudella arvioitiin yhdessä sitä kuinka paljon Runtechilta menee resursseja asentaa ja kouluttaa loppukäyttäjät. Parhaat pisteet saivat, ne joilla asennustyö ei vie yhtään tai juurikaan enempää aikaa kuin nykyisellä laakeroinnilla eli koko tyhjäjärjestelmä pitää edelleen pystyä liittämään tehtaan järjestelmään yhden päivän seisokin aikana ja mikäli koulutus voitaisiin pitää lyhyenä ja yksinkertaisena enintään 3 päivän pakettina. Pisteitä vähennettiin, mikäli asennuksessa ja käytössä on käytettävä enemmän aikaa (Karvinen 2015).

5.3 Arvojen läpikäyntiä

Hintavertailua voidaan purkaa siten, että LUT:n puolelta opinnäytetyössä mukana olleet henkilöt arvioivat kustannusten olevan toivotun 10 - 15 000 € luokkaa, FG-AMB kertoi järjestelmän maksavan 20 000 \$ ja The Switchin kanssa käytyjen keskustelujen perusteella moottorin hinnan nousuksi voidaan arvioida olevan yli 40 000 €. Tämän lisäksi huomioitavaa hinnan suhteen on, että FG-AMB mukaan kehityskustannukset ovat 100 000 \$. Switchin kehityskulut olisivat 200 – 400 000 €. LUT:n edustajat eivät lähteneet kehityskuluja arvioimaan, mutta huomauttivat mahdollisista Tekes-tuista, mitä yliopiston ja yrityksen välisistä kehitysprojeekteista on mahdollisesti saatavissa (Pyrhönen 2015; Kim 2015; Kurronen 2015).

Edellä mainittuja kehityskuluja ei ole sisällytetty vertailuun, koska työn aiheena oli ver-rata sarjatuotetun järjestelmän hintaa. Kehityskulut on toki katettu nopeasti kun ensimmäisen 50 turbon osalta esimerkiksi FG-AMB:n 100 000 € kehityskustannukset tarkoittavat noin 2000 €/turbo. Huomioitavaa on myös, että pitkissä projekteissa syntyy usein

huomaamatta pieniä kuluja (työaikaa, matkustusta ja muuta), jotka aiheuttavat sen, että todelliset kustannukset saattavat olla esimerkiksi LUT:n tapauksessa enemmän kuin alun perin on ajateltu.

Kriteerien täyttymistä arvioitiin puhtaasti siten että kuinka paljon Runtechin teknisistä kriteereistä pystyttäisiin täyttämään. FG-AMB pystyy täyttämään kaikki kriteerit. LUT:n kohdalla ohjausratkaisu ei ole Runtechin näkökulmasta paras, joten siitä vähennettiin 5 pistettä. Moottorin suunnittelussa taas vähennettiin 5 pistettä, siitä että todennäköisesti turbon rakennetta pitäisi hieman muuttaa, jotta saataisiin muut kriteerit täytettyä. Muutoksia olisi moottorin koon kasvamisen myötä tarvittava lisätila moottorille, sekä luultavasti tarve kasvattaa moottorin ja akselin halkaisijaa (Kurronen 2015).

Valmistumisaika on pienemmällä painoarvolla tässä vertailussa, koska Runtech ei tavoittele lyhyen tähtäimen ratkaisua, vaan nimenomaan pidemmän aikavälin tuomaa edistysaskelta. Valmistumisaika ei kuitenkaan ole täysin merkityksetön ja sen vuoksi nopeammissa ratkaisuissa nähdään lisäarvoa, joka on pisteytetty yllä kuvatun mukaisesti. FG-AMB kertoi kehitystyön vievän noin 6 kk (Simon Kim 2015), LUT:n edustajat arvioivat hieman yli vuoden menevän kehitystyöhön (Pyrhönen & Sopanen 2015) ja moottorin kehitys olisi Switchin mukaan vähintään 2 vuoden mittainen projekti (Kurronen 2015).

Runtech toiveena oli, että sen ei tarvitsisi liikaa osallistua ratkaisun kehittämiseen, koska halutaan enemmänkin keskittyä oman yrityksen toimintaan. Tässä tietysti kannattaa joustaa, jos ratkaisu todetaan sen arvoiseksi. Tähän on kuitenkin laitettu pieni painoarvo, koska se ei ole yrityksen kannalta oleellisin asia.

Heikoimmat pisteet tästä kohtaa saa Switchin kanssa moottorin suunnittelu, johtuen siitä että tämä ratkaisu on eniten Runtechille räätälöity. LUT:n kanssa laakerijärjestelmän kehittäminen niin ikään edellyttää tiiviimpää yhteistyötä, joskaan ei niin paljoa kuin The Switchin itselevitoivan moottorin kanssa. FG-AMB kanssa ei juuri osallistumista vaadita.

Asennuksen ja käytön helppous on yksi oleellinen kriteeri, sillä asennus ei saa viedä liikaa aikaa, jotta se voidaan viedä läpi seisakin aikana ongelmitta. Runtechin mielestä ei ole järkevää, että asiakkaan henkilökuntaa tarvitsee liikaa kouluttaa järjestelmän käyttöön. Ideaalisesti järjestelmä olisi sellainen, että siihen ei tarvitse kuin laittaa virta päälle, ja se

hoitaisi itsenäisesti loput. Tällöin koulutuskin olisi yksinkertainen ja normaalikäytössä ei tarvitsisi siihen asiakkaan juuri koskea (Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015).

Tästä kohdasta parhaat pisteet saa itselevitoiva moottori, sillä siinä kaikki olisi integroituna niin että erillisen laakerin tuomaa asennus ja koulutustarvetta ei ole. Toiseksi parhaat pisteet saa FG-AMB. Ratkaisu ei menetä pisteitä siitä, että siltä puuttuisi jotain, vaan koska moottori vie laakeroinnin seuraavalle asteelle, niin sen vuoksi laakerointi saa hieinan heikommat pisteet. Heikoimmat pisteet saa LUT:n tarjoama ratkaisu, koska heidän ratkaisunsa ei ole niin helppokäyttöinen tai helppo asentaa kuin kaksi muuta ovat.

Painoarvotaulukon mukaan paras ratkaisu on FG-AMB. Toisena on LUT ja kolmantena itselevitoivan moottorin suunnittelu The Switchin kanssa. Taulukkoa tarkasteltaessa voidaan todeta, että LUT ja FG-AMB ovat yhtä hyviä ratkaisuja, mikäli tarkasteltaisiin vain hintaa ja täytettyjä kriteerejä. Ero tulee kun tarkastellaan muita taulukon kriteerejä. Niissä FG-AMB on LUT:n ratkaisua selkeästi parempi, mutta koska painoarvo näissä kohdissa ei ole suuri, ei ero lopputuloksessa ole niin merkittävä

Itselevitoivan moottorin suunnittelu ratkaisuna ei kokonaisuudessaan saanut kovin hyviä pisteitä. Jos tarkasteltaisiin pelkästään teknisiä ominaisuuksia sekä asennuksen ja käytön näkökulmaa, olisi tämä ratkaisu vähintään yhtä hyvä, ellei parempikin, mikäli oltaisiin valmiina pieniin muutoksiin turbon rakenteessa. Hinnan ollessa kuitenkin tärkein kriteeri ei se pärjää kokonaisvertailussa, sen ollessa kallein ratkaisu.

Mikäli ratkaisun hinta olisi ollut lähempänä FG-AMB:n ja LUT:n hinnoittelua, olisi se ollut luultavasti selkeästi paras ratkaisu pitkällä aikavälillä tarkasteltuna. The Switch ennustaa että tulevaisuudessa tämä tulee kuitenkin taloudellisesti järkevämmäksi vaihtoehdoksi, jolloin se voi hyvinkin nousta parhaaksi vaihtoehdoksi.

5.4 Käytännön toteutus

Edellisten kappaleiden näkökulmista tarkasteltuna FG-AMB tarjoaa tällä hetkellä parhaan kokonaisuuden. Suositeltava vaihtoehto Runtechille on siis FG-AMB, sillä se tarjoaa lähimmän vastaavuuden Runtechin asettamille toiveille ja kriteereille. On kuitenkin

huomioitavaa, että itselevitoivaa moottoria kannattaa tarkastella uudestaan parin vuoden välein ja seurata milloin se on mahdollisesti ajankohtainen.

Seuraavaksi, jos Runtech päättää lähteä etenemään sähkömagneettisenlaakeroinnin kanssa, on vuorossa sopimuksen laatiminen FG-AMB:n kanssa. Todennäköisesti mikäli asiassa edetään nopeasti, niin ensimmäinen asennusvalmis laakerijärjestelmä olisi valmiina noin 8 kuukauden kuluttua.

6 POHDINTA

Sähkömagneettinen laakerointi on selvästi teknisesti ylivoimainen ratkaisu verrattuna minkään perinteisempään laakerointiin. Pitkä käyttöikä, olematon huoltotarve, suurempi kierrosnopeus ja muut hyvät ominaisuudet puhuvat puolestaan. Hinta on merkittävin syy minkä vuoksi sähkömagneettisia laakereita ei tänä päivänä käytetä enempää. Useimmissa suurnopeuskoneissa magneettilaakerien hinnat alkavat olemaan jo sitä luokkaa, että ei ole oikeastaan järkeä pidättäytyä niiden käytöstä.

Näkisin tilanteen olevan yllä kuvatun kaltainen sekä Runtechilla että monilla muillakin alan yrityksillä. Sähkömagneettiset laakerit tulevat yleistymään tulevaisuudessa ja Runtechin kilpailijoista esimerkiksi MAN Diesel & Turbo käyttää jo niitä (MAN 2015). Uskoisin että Runtechin kannattaa tämän suhteen olla mieluummin edelläkävijä kuin odottaa, että enemmistö kilpailusta siirtyy niihin. Runtechin siirtyminen sähkömagneettisiin laakereihin toisi sille etulyöntiaseman markkinoilla. Vastaavia laakerijärjestelmiä ei vielä juuri löydy kilpailijoilta, ja jos Runtechilla olisi sekä laakerijärjestelmä ja alansa parhaat juoksupyörät, olisi se teknisesti kiistaton ykkönen.

Turbon myyntihinta tulisi nousemaan, mutta uskoisin useimpien asiakkaiden mieluummin maksavan hieman enemmän, koska laatu on paras myyntivaltti, joka yrityksellä voi olla. Laakerijärjestelmä kertoisi asiakkaalle tämän hankkivan tekniikan terävintä kärkeä olevan tyhjöturbon, ja kun turbon voidaan mainostaa olevan käytännössä huoltovapaa, on vaikea kuvitella kenenkään kilpailijan pystyvän väittämään samaa.

Asiakkaan näkökulmasta kertainvestointi laadultaan parempaan järjestelmään maksaa itsensä takaisin pidemmän päälle kun Runtechin muutenkin energiaa säästävät turbojärjestelmät olisivat vieläkin tehokkaampia. Yksi laakeri kuluttaa tehoa 20 W, joka on nykyisten laakerien öljyjäähdyttimien tehoon verrattuna vähäinen. Pienellä teholla saavutetaan myös tarkka keskitys akselille. Keskiertojärjestelmä pystyy 15 μm tarkkuuteen parhaimpien pystyvän alle 5 μm tarkkuuteen (Pyrhönen & Sopanen 2015).

Teknisesti parempaa ratkaisua ei pysty tällä hetkellä tarjoamaan mikään muu kuin itselevitoiva moottori, ja sekään ei teknisesti ole merkittävästi edistyneempi. Jos sähkömagneettista laakerointia voi kuvata huomisen teknologiana, niin itselevitoiva moottori on sitten ylihuomisen tekniikka. Magneettilaakereita on vaikea suunnitella sellaiseksi, että

niitä voisi kuvitella voitavan tulevaisuudessa ostaa jälleenmyyjän varastosta suoraan standardikokoisina, mutta itselevitoivia moottoreita teoriassa voisi.

Kun laakerointi integroidaan moottoriin, voidaan ne mitoittaa toimimaan standardiakselille. Tämä mahdollistaa sen, että tulevaisuudessa voitaisiin koneen suunnittelu aloittaa rakentaen kone moottorin ja akselin ympärille. Tätä täytyy kuitenkin jonkin aikaa odottaa, sillä tällaisen bisneksen toiminnan aloittaminen vaatisi kuitenkin niin paljon aikaa ja rahaa, että uusilla yrityksillä ei ole resursseja sitä aloittaa. Perinteisten laakereiden valmistajilla ei ole taloudellisia intressejä alkaa syömään omaa markkinaansa, varaosien myynnin ollessa merkittävä tulonlähde heille. Nykyisten magneettilaakereita valmistavien yritysten on siis onnistuttava keräämään resurssit tämän toiminnan aloittamiseksi, jotta itselevitoiva moottori voi yleistyä.

Uskoisin tämän työn antavan hyvän kuvan sähkömagneettisen laakeroinnin tämän hetken tilasta sekä etuineen että haasteineen. Työn avulla pitäisi saada käsitys siitä, kuinka monimutkainen tällainen järjestelmä vielä on, mutta antavan kuitenkin riittävän perusymmärryksen siitä mitä odottaa mikäli lukija haluaa omaan koneeseensa sähkömagneettisen laakeroinnin.

Yrity maailman realiteetit rajoittavat useimmiten teknisiä ratkaisuja, kun teknisten parannusten on oltava perusteltavissa rahassa mitattuna. Jos näin ei olisi, olisin todennäköisesti unohtanut tämän työn alussa sähkömagneettisen laakeroinnin kokonaan ja keskittynyt Switchin kanssa moottorin kehittämiseen. Ymmärrän alan professorien kiinnostuksen aiheita kohtaan, koska siinä on tavoitteena eräänlainen tekniikan huippu. Ei ole enää teknisesti parannettavaa, vaan eteenpäin mennäkseen täytyy kehittää joku aivan uusi tapa hoidtaa laakerointi.

Tämä työ oli kuitenkin suhteellisen suoraviivainen, eikä oikeastaan ollut mitään, miten olisi voinut toisin toimimalla saavuttaa parempia tai erilaisia tuloksia. Useiden yritysten ja LUT:n kanssa olin yhteydessä heti työn alusta lähtien ja siinä sivussa tein omat magneettilaakerien mitoitus- ja 3D-mallinnukset ja perehdyin aiheeseen syvemmin. Yrityskontaktien kanssa ei juuri voi toimintaa nopeuttaa, koska heidän täytyy suorittaa omat analyysinsä, jotta voivat antaa hinnan puolesta arviot mihin uskaltavat sitoutua.

Ainut mitä olisin tehnyt toisin, olisin aloittanut työn kirjoittamisen huomattavasti aiemmin, pelkkien muistiinpanojen keräämisen sijaan. Nyt työ tuli kirjoitettua todella tiiviillä aikataululla, sen sijaan että aiemmin olisi kirjoittanut vähän kerrallaan, ei olisi tullut niin pitkiä päiviä työn loppuvaiheessa. Olisin tietty myös toivonut, että olisi päästy käytännössä toteuttamaan laakerointi prototyyppiin, mutta toisaalta ymmärrän että kehityskustannusten ollessa niin suuria kun tätä työtä tehdessä on ilmennyt, niin ei yksittäisen proton valmistaminen ole järkevää.

LÄHTEET

Aarnio, A. Application Engineer, SKF. VS: Runtech Systems Oy. Sähköpostiviesti. antti.aarnio@skf.com. Luettu 10.3.2015

Alexander Smirnov 2012. AMB SYSTEM FOR HIGH-SPEED MOTORS USING AUTOMATIC COMMISSIONING. Väitöskirja. Luettu 30.4.2015. <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/86770/isbn9789522653635.pdf?sequence=1>

Amherd, R. Sales manager, Mecos. Magnetic bearings. Sähköpostiviesti. reto.amherd@mecos.com . Luettu 26.2.2015

Bowers, R. Apexmagnetic contact. We can only offer passive magnetic bearings at this time. Sähköpostiviesti. rbowers@apexmagnetic.com. Luettu 1.3.2015

David P. Fleming Magnetic Bearings – State of art. Luettu 30.4.2015
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19910016099.pdf>

D1-2012. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 20. painos. Espoo: STUL ry

Grochmal T.R, Forbrich C.P. 2015. Self Bearing Motor. Luettu 30.4.2015
<http://www.ancl.ualberta.ca/en/Research/Projects/SelfBearingMotor.aspx> Luettu 30.4.15

ISO 14839:2012. Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. Standardi. Luettu 30.4.2015. <http://www.magneticbearings.org/technology-2/standards/>

Juan S., Wee L., Bostjan P., Gorazd Š., Jozef R., Drago D., Emdadul H., Takeshi M., Quang-Dich N., Satoshi U., Valerie L., Guy L. & Hitoshi O. 2010. Magnetic bearings, Theory and applications. Luettu 30.4.2015

Karvinen, J. Tyhjiöjärjestelmien tekninen johtaja, Runtech Systems. Turbon magneetti-laakeroinnin tavoitteet. Sähköpostiviesti. juha.karvinen@runtech.fi. Luettu 29.1.2015.

Kim, S. FG-AMB contact. Price of AMB system. Sähköpostiviesti. simonkim@fgamb.com. Luettu 11.4.2015

Kurronen, P. Product manager, The Switch. Itselevitoivan moottorin suunnittelu. Sähköpostiviesti. panu.kurronen@theswitch.com. Luettu 22.3.2015

Loippo, K. Hallituksen puheenjohtaja, Runtech Systems 2015. Haastattelu 29.1.2015. Haastattelija Loippo, J. Kolho

MAN Diesel & Turbo. Magnetic bearing technology, luettu 30.4.2015.
<http://www.mandieselturbo.com/web/viewers/news/tem-plate04.aspx?aid=18760&sid=1183>

Opinnäytetyön aloituspalaverin muistio 2015

Pyrhönen, O. professori. 2015. Magneettilaakerointi. Esitys 10.2.2015. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Runtech Systems Oy. Turbo edocker, luettu 30.4.15
http://www.runtech.fi/Turbo_edocker/

Runtech Systems Oy. Vacuum energy saving and optimization, Luettu 30.4.2015
<http://www.runtech.fi/index.php/en/runeco-vacuum-system-energy-saving-and-optimization#ep500-700-s-turbo>

Shenoy, P. Director of Engineering. Unable to take on any new AMB projects. Sähköpostiviesti. contact@calnetix.com 3.3.2015.

Sopanen, J. professori. 2015. Magneettilaakerointi. Esitys 10.2.2015. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

LIITTEET

Liite 1. Mitoitettujen laakerien kuvat

1(2)



