



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ÖLJYKALVOVAIMENNEN LAAKERIPESÄN SUUNNITTELU

TEKIJÄ/T: Sami Karsikas

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	6
2.1	Kohdeyrityksen esittämä tarve ja sovelluskohde.....	11
2.2	Suunnittelun taustatiedot	12
3	KÄYTETTÄVÄN SUUNNITTELUMETODIIKAN KUVAUS.....	12
3.1	Järjestelmällisen tuotesuunnittelumetodin vaiheistus	13
3.2	Suunnittelun vaatimusten ja toiveiden kokoamisen periaatteet	14
3.3	Morfologisen luokituksen käyttäminen ideoinnissa	14
3.4	Arvoanalyysin käyttöperiaatteet	15
4	SUURNOPEUSMOOTTORIN SFD-LAAKERIPESÄN SUUNNITTELU	16
4.1	SFD-laakeripesän järjestelmällisen suunnittelun vaiheistus	16
4.2	SFD-laakeripesän suunnittelun vaatimukset ja alkuarvot	17
4.3	Toteutettavan SFD-laakeripesän valinta morfologista luokittelua ja arvoanalyysia käyttäen	21
4.4	Laakeripesältä vaadittavat mitta- ja geometriset toleranssit.....	26
4.5	SFD-laakeripesän pienoismallin 3D-mallinnus ja -tulostus	28
4.5.1	Mallinnuksen ja tulostusprosessin päävaiheet	28
4.5.2	Tulostettu laakeripesäkonstruktio.....	29
4.6	Toteutettavan SFD-laakeripesän dokumentaatio.....	32
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
5.1	Jatkotutkimusaiheet.....	34
6	YHTEENVETO.....	34
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	35

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Sami Karsikas	
Työn nimi Öljykalvovaimennetun laakeripesän suunnittelu	
Päiväys	12.01.2019
Sivumäärä/Liitteet	35
Ohjaaja(t) Mikko Nissinen, Akseli Pihlaja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Em Shaft Engineering Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli vertailla VDI2221:n mukaista järjestelmällistä tuotesuunnittelumetodia ja asiantuntijahaastattelua hyväksi käyttäen suurnopeusmoottoriin valitulle vierintälaakerille soveltuvia periaatteellisia SFD-laakeripesärakenteita (SFD=Squeeze film damper). Tässä opinnäytetyössä käytettiin arvoanalyysia, jonka perusteella valittiin toiminnoiltaan, suorituskyvyltään ja kustannuksiltaan sopivin rakenneratkaisu. Valitun periaatteellisen ratkaisun perusteella suunniteltiin SFD-laakerointia varten laakeripesän prototyyppi. Yhdestä laakeripesävaihtoehdosta tuotettiin myös pelkistetty 3D-tulostettu pienoismalli.</p> <p>Kirjallisuuslähteiden avulla koottiin tietoa erilaisista laakeripesän öljykalvovaimenninrakenteista. Tiedonhaun perusteella vaimenninratkaisut luokiteltiin passiivisiin ja aktiivisiin vaimentimiin ja näiden sisällä huomio kiinnitettiin erilaisiin keskitysrousitoteutuksiin. Toteutetun asiantuntijahaastattelun avulla täydennettiin suunniteltavan laakeripesäkonstruktion vaatimuslistan yksityiskohtia.</p> <p>Asiantuntijahaastattelun tuloksena havaittiin, että sekä vastekäyriä että kriittisten nopeuksien karttoja voidaan hyödyntää tehokkaina työkaluina laakeripesän yksityiskohtaisessa suunnittelussa. Varsinainen laakeripesärakenteiden ideointi toteutettiin VDI2221:n mukaisesti ja sen yhteydessä käytetyn morfologisen luokituksen perusteella tuotettiin yli 2000 keskitysrousiratkaisun toteutusvaihtoehtoa ja yli 2000 kappaletta laakeripesäkonstruktion toimintorakenteen täyttävää rakennevaihtoehtoa. Arvoanalyysin arviointikriteereinä käytettiin kokoonpantavuutta, rungon ja pesän valmistettavuutta sekä keskitysrousien säädettävyyttä. Vertailuista rakennevaihtoehdoista sopivimmaksi jatkokehitystä varten arvioitiin rakennevaihtoehto, jossa käytetään neljää lautasjoustaa pesän kehällä, ja jossa jousille on toteutettu säätömahdollisuus pidätinruuvien avulla.</p>	
Avainsanat SFD, öljykalvovaimennus	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Sami Karsikas			
Title of Thesis Design of an oil squeeze film damper for a bearing housing			
Date	12.01.2019	Pages/Appendices	35
Supervisor(s) Mikko Nissinen, Akseli Pihlaja			
Client Organisation /Partners Em Shaft Engineering Oy			
<p>Abstract</p> <p>The thesis aim was to compare squeeze film damped bearing housing constructions for selected roller bearings, which are suitable for high speed motor application. The comparison was made by utilizing systematic design approach according to VDI2221 and expert interviews. Value analysis was applied to select the best bearing housing construction based on functionality, performance and costs. The prototype of squeeze film damped bearing housing was designed based on the best found solution. One bearing housing construction was also 3D-printed as a simplified model.</p> <p>Literature references were utilized to collect information on different kinds of squeeze film damped bearing housing constructions. According to the literature search damping constructions were grouped in passive and active dampers. Among these constructions the attention was paid on different kinds of centering spring constructions. The requirement list designed on bearing housing construction was completed according to the expert interview results.</p> <p>The expert interviews showed that both force or displacement frequency curves and critical speed maps can be utilized as effective tools for detailed bearing housing design. The ideas for bearing housing constructions were produced according to VDI2221 and morfologic classification. Based on morfologic classification more than 2000 possible solutions of centering spring constructions and more than 2000 possible bearing housing constructions were produced which fulfill the functional requirements. The applied evaluation criteria in value analysis were assembly conditions of the construction, manufacturability of the body and housing and adjustability of the centering springs. The construction, which consists four plate springs around the housing hub and which has retaining screws for adjusting, was evaluated most suitable one for further development.</p>			
<p>Keywords</p> <p>SFD, squeeze film damper</p>			

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on vertailla VDI2221:n (Verein Deutscher Ingenieure) mukaista järjestelmällistä tuotesuunnittelumetodia (Pahl & Beitz 1990, 47) ja asiantuntijahaastattelua hyväksi käyttäen suurnopeusmoottoriin valitulle vierintälaakerille soveltuvia periaatteellisia SFD-laakeripesärakenteita (SFD=Squeeze film damper). Opinnäytetyössä käytetään arvoanalyysia, jonka perusteella valitaan suorituskyvyltään ja kustannuksiltaan sopivin rakenneratkaisu sovelluskohteeseen. Valitun periaatteellisen ratkaisun perusteella suunnitellaan SFD-laakerointia varten laakeripesän prototyyppi. Morfologisen luokittelun avulla pesäratkaisusta tuotetaan myös pelkistetty 3D-tulostettu pienoismalli.

Alla on esitty tämän opinnäytetyön etenemisen päävaiheet.



Tiedonhaun avulla haetaan vastausta kahteen kysymykseen:

- 1) Mitä etua laakeripesäratkaisuissa saavutetaan öljykalvovaimentimien käytöllä?
- 2) Millaisia rakennevaihtoehtoja laakeripesien öljykalvovaimennuksista on kehitetty?

Tiedonhaun avulla saadaan järjestelmällistä tuotesuunnittelumetodia varten luokitteluperusteita sekä öljykalvovaimennetun laakeripesän toimintorakenteelle että yksittäisille rakenneominaisuuksille.

Tämän projektin toimeksiantaja on EM Shaft Engineering Oy. EM Shaft Engineering Oy on suunnittelutoimisto Virolahdella, mikä suunnittelee yritysten tarpeisiin sopivia koneita ja laitteita. Kohdeyrityksen erityisosaamista ovat mm. suurnopeussovellusten suunnittelu- ja kehitystyö. Yritys tekee teollisuudelle lujuuslaskelmia, roottoridynamiikan ja laakerointiratkaisujen laskelmia, värähtelymittauksia ja -analysointia sekä 3D-suunnittelua nykyaikaisia ohjelmistoja käyttäen. Yrityksen toimitusjohtaja on Akseli Pihlaja, joka perusti yrityksen vuonna 2012.

Pyörivien koneiden suunnittelussa pyritään nykyään lisäämään niiden suorituskykyä ja stabiilisuutta erilaisissa teollisissa sovelluskohteissa. Suunnittelun avulla pyörivistä koneista halutaan tehdä myös vähemmän tilaa vieviä ja nykyistä energiatehokkaampia. Tällöin akseleiden ja roottoreiden suunnittelun keskeinen rooli korostuu. Tämän lisäksi avain elementti nykyaikaisessa suunnittelussa on suurnopeussovellusten kehittäminen. Näissä sovelluksissa roottorin ei-toivottujen värähtelyjen vaimentaminen on tärkeintä. Öljykalvovaimentimia käytetään tuottamaan ulkoista värähtelyjen vaimennusta normaalin roottorin vierintälaakeroinnin sisäisen vaimennuksen lisäksi. Yksinkertaisimmillaan öljykalvovaimennin koostuu öljyllä täytetystä rengasmaisesta kapeasta onkalosta, joka ympäröi vierintälaakerin ulkokehän kiinnittävää holkkia. Tämä holkki on pyörimätön ja se toimii vaimentimen akselina, jolla on mahdollisuus öljykalvon puristuessa liikkua säteittäisesti tasapainoasemaansa nähden. (Heidari ja Ashkooh 2016, 3321–3330)

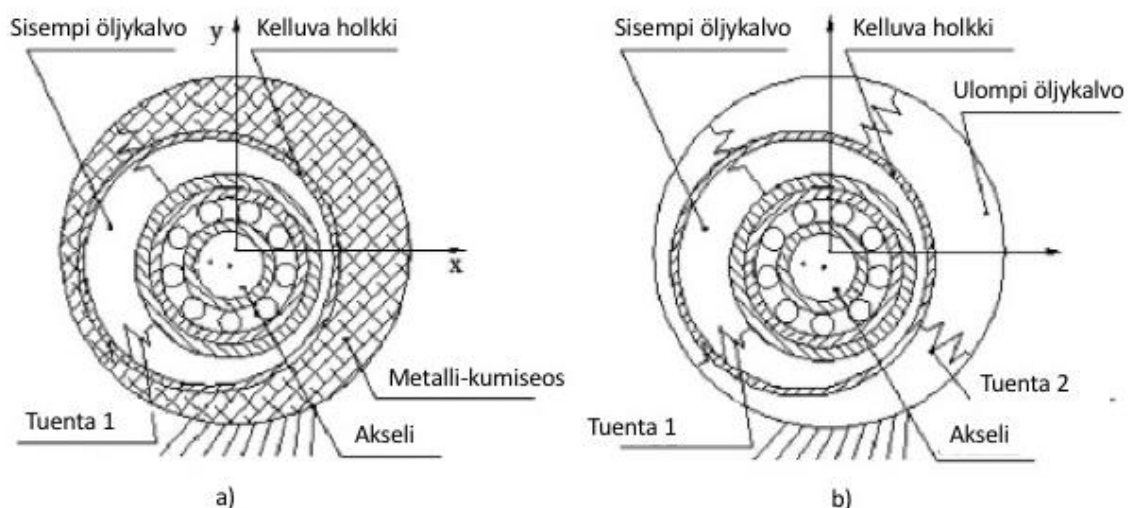
Pyörivien koneiden suunnittelun yksi päähaasteista on ei-toivottujen värähtelyjen esiintyminen (Heidari ja Ashkooh 2016, 3321). Öljykalvovaimentimia käytetään erityisesti vierintälaakereiden tuennassa poistamaan ja hallitsemaan käytönaikaisia värähtelyjä ja stabilisoimaan rakennetta. (Zhou, Feng, Luo, Ai ja Sun 2014, 200)

Eryityisesti suurnopeussovellusten käyttö on lisännyt koneiden värähtelyjen hallintaan liittyviä ongelmia. Öljykalvovaimentimia käytetään kohteissa, joissa värähtelyongelmia ei voida riittävän hyvin korjata perinteisillä kuula- tai liukulaakeriratkaisuilla. Yleensä perinteinen öljykalvovaimennin suunnitellaan ensimmäiseen kriittiseen pyörimisnopeuteen liittyvien värähtelyongelmien hallitsemiseen. (Heidari ja Safarpour 2016, 235)

Laakeripesien öljykalvovaimennin rakenteille on olemassa useita erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, joiden avulla pyritään parantamaan niiden vaimennusominaisuuksia.

Koska perinteisen öljykalvovaimennetun (traditional squeeze film damper, TSFD tai SFD) laakeripesän jäykkyys- ja vaimennuskertoimet on asetettu roottorin normaalin käyttötilanteen värähtelytaajuuden mukaisesti, on mahdollista, että sähkömoottorin käynnistys- tai pysäytysvaiheessa värähtelyjen vaimennus ei ole paras mahdollinen. Jotta vaimennin toimisi paremmin myös kyseisten kuormitushuippujen kohdalla, on eräs mahdollisuus käyttää vaimenninta, jossa on joko metalli-kumiseoksella tuettu yhdellä kalvolla öljykalvovaimennettu kelluva holkki tai kelluvan holkin molemmin puolin olevat vaimentavat säteittäiset öljykalvot kuvan 1 mukaisesti. (Zhou ym. 2014, 200)

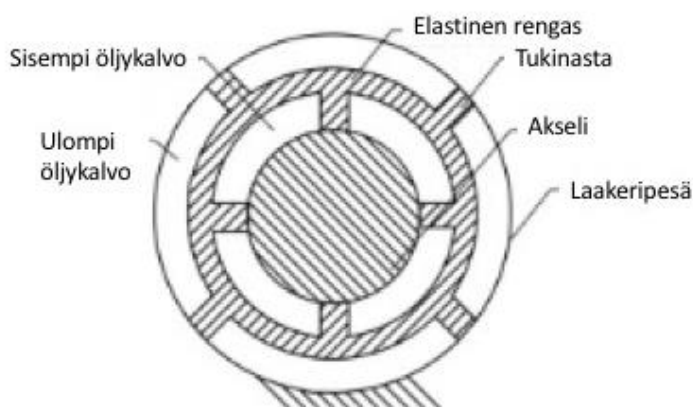
Näistä rakenteista käytetään nimityksiä floating ring squeeze film damper with a single layer oil film (FSFDS) ja floating ring squeeze film damper with a double layer oil film (FSFDD). Kumpikin rakenne toimii paremmin vaimentimena yllättävissä kuormitustilanteissa kuin perinteinen öljykalvovaimennin, mutta elastinen teräs-kumituenta aikaansaa paremmat vaimennusominaisuudet kuin kahdella öljykalvolla varustettu vaimennin. (Zhou ym. 2014, 200)



Kuva 1. Värähtelykuormitushuippujen vaimentamiseen suunniteltujen vaimenninrakenteiden periaatteelliset rakenteet: a) yhdellä öljykalvolla varustettu vaimennin ja b) kahdella öljykalvolla varustettu vaimennin. (Zhou ym. 2014, 201)

Elastisen välirenkaan käyttöä kahden öljykalvon välissä (elastic ring squeeze film damper, ERSFD) on perusteltu myös sen kyvyllä vaimentaa värähtelyjä tehokkaasti värähtelyjen amplitudin huippuarvojen kohdalla perustuen osittain elastisen renkaan joustavuuteen. Renkaan tuentatavasta riippuen tällaisen vaimentimen jäykkyyttä ja vaimennusta voidaan muunnella käyttökohteen vaatimuksia parhaiten vastaavaksi. (Zhang, Ding 2015, 315)

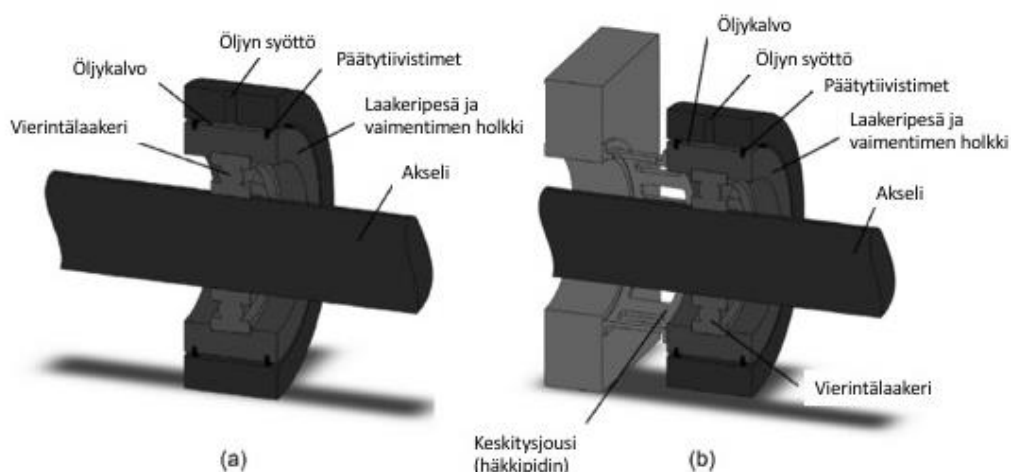
Kuvassa 2 on esitetty periaatteellinen ratkaisu elastisen tukirenkaan avulla toteutetusta öljykalvovaimentimesta.



Kuva 2. Elastisen tukirenkaan avulla toteutetun öljykalvovaimentimen periaatteellinen rakenne. (Zhang, Ding 2015, 315)

Pyörivien akseleiden tuennassa voidaan öljykalvovaimentimen yhteyteen liittää myös keskitysjoussi, jonka avulla laakeria tukeva holkki saadaan asettumaan keskeisesti laakeripesään myös silloin, kun öljykalvo ei vielä nosta holkkia oikealle symmetriselle välykselle pesään nähden. (Heidari ja Ashkooh 2016, 3322)

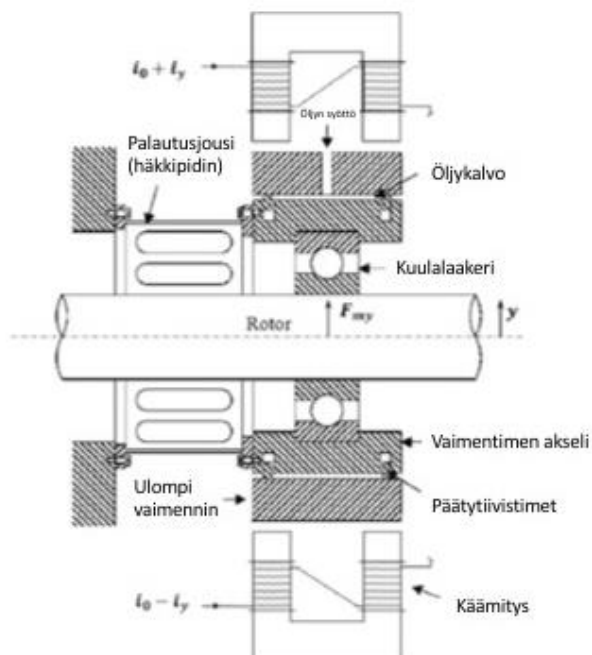
Kuvassa 3 esitetään periaatteelliset öljykalvovaimennin ratkaisut ilman keskitysjousta ja häkkipitimen avulla toteutetulla keskitysjouksella varustettuna.



Kuva 3. Kaksi öljykalvovaimennin rakennetta: a) ilman keskitysjousta ja b) keskitysjouksella varustettuna. (Heidari ja Ashkooh 2016, 3322)

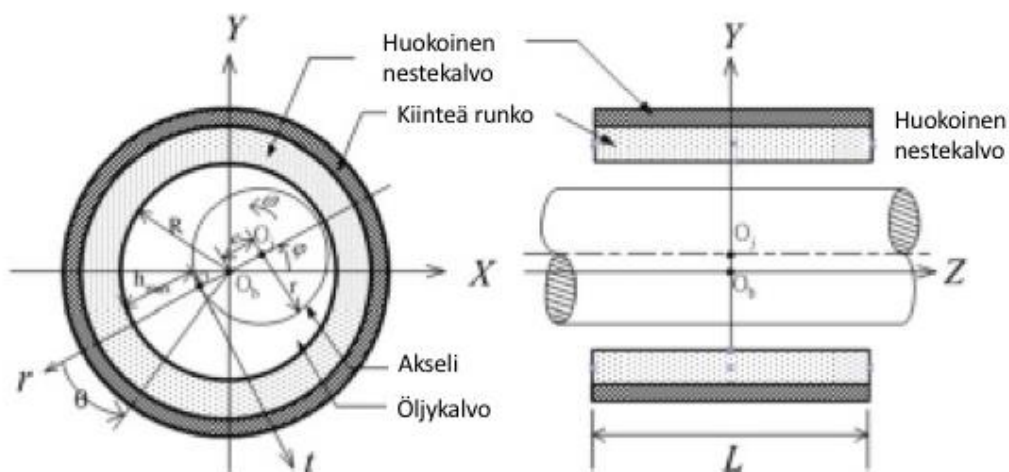
Koska monissa laitteissa, kuten sähkömoottorikäytöissä, kriittisiä värähtelymoodeja on useita, ovat passiiviset öljykalvovaimentimet monissa kuormitustilanteissa riittämättömiä. Monesti alhaista vaimennusta tarvitaan kriittisen pyörimisnopeuden yläpuolella tuentarakenteisiin välittyvien voimien vähentämiseksi, mutta toisaalta korkeaa vaimennusta tarvitaan, jotta kriittinen pyörimisnopeus voitaisiin ohittaa turvallisesti. Lisäksi eri värähtelymoodeille on erilaiset vaimennusparametrien optimiarvot. Perinteisissä öljykalvovaimentimissa vaimennus ei ole säädettävissä. Tämän vuoksi perinteisistä passiivisista öljykalvovaimentimista on kehitetty joko aktiivi- tai puoliaktiivivaimentimia, jotka perustuvat joko ominaisuuksiltaan säädettävän nesteen käyttöön öljyn sijasta, aktiivimagneettilaakereiden (active magnetic bearing, AMB) käyttöön tai näiden erilaisiin yhdistelmiin. Käyttämällä esimerkiksi magnetoreologisia nesteitä voidaan vaimennuksen säätäminen suorittaa reaaliajassa ja kehittää aktiivisia öljykalvovaimentimia (active squeeze film dampers, ASFD). (Heidari ja Safarpour 2016, 235-236)

Kuvassa 4 on esitetty periaatteellinen ratkaisu, jossa yhdistetään perinteinen öljykalvovaimennin ja vaimennuksen säädön mahdollistava magneettikentän toteutus.



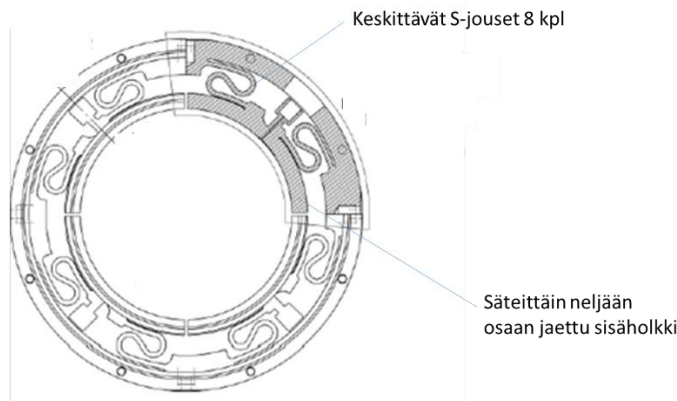
Kuva 4. Öljykalvovaimennin, jossa käämien avulla tuotetaan magneettikenttä, jota säätämällä vaimentimen vaimennuskerrointa voidaan säätää. (Heidari ja Safarpour 2016, 236-237)

Öljykalvovaimentimen rakennetta voidaan muunnella myös siten, että varsinaisen öljykalvon lisäksi seuraavaksi säteittäiseksi kerrokseksi ennen laakeripesän ulkokuorta tehdään huokoinen nestekalvo joustavaksi kehäksi (Porous Squeeze Film Damper, PSFD). Periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 5. Rakenne on siis eräänlainen välimuoto edellä esitetyistä ratkaisuista. Tällainen rakenne on todettu erittäin toimivaksi erityisesti suurnopeussovelluksissa. (Jian, Wan 2012, 798)



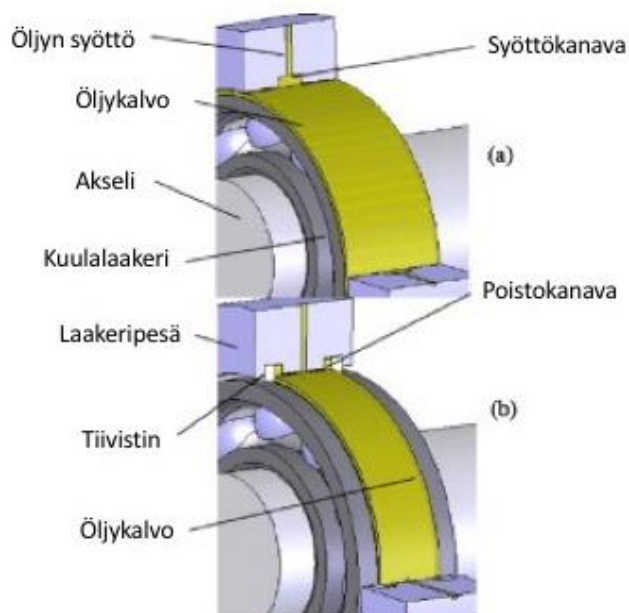
Kuva 5. Öljykalvovaimentimen periaatteellinen ratkaisu, jossa on hyödynnetty huokoista joustavaa materiaalikerrosta ennen laakeripesän ulkokuorta. (Jian, Wan 2012, 801)

Kaupallisesti saatavilla olevissa öljykalvovaimennukseen perustuvissa laakeripesissä on käytetty monenlaisia mekaanisia rakennneosia öljykalvon paksuuden ja siihen tarvittavan välyksen säätämiseksi ja asettamiseksi oikean suuruiseksi. Tyypillisesti käytetään esimerkiksi kuvan 6 mukaisia s-jousia holkin keskittämiseksi. Kuormituksen jakautumisen hallitsemiseksi tukiholkki voidaan jakaa myös haluttuun määrään säteittäisiä sektoreita kuvan 6 mukaisesti.



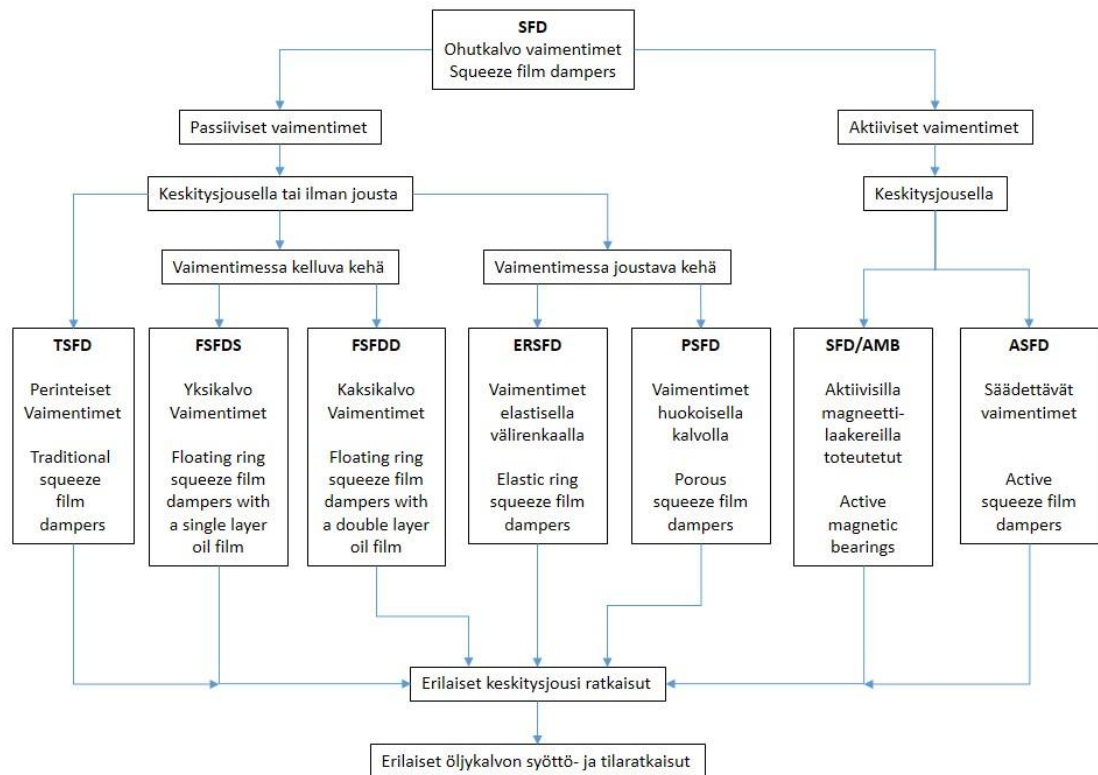
Kuva 6. Öljykalvovaimentimen eräs mekaaninen ratkaisu, jossa käytetään s-jousia ja sektoreihin jaettua sisäholkkiä. (yksinkertaistettu lähteestä Delgado 2015)

Myös öljyn syöttöön on esitetty monia erilaisia ratkaisuja, joissa on muunnelmia esimerkiksi öljytas-
kun muodosta ja koosta sekä öljyn syöttökanavien määrästä ja suunnasta. Kuvassa 7 on esitetty eräs vaihtoehto.



Kuva 7. Öljyn syöttöön ja poistoon käytettävä eräs toteutustapa. (Delgado 2015)

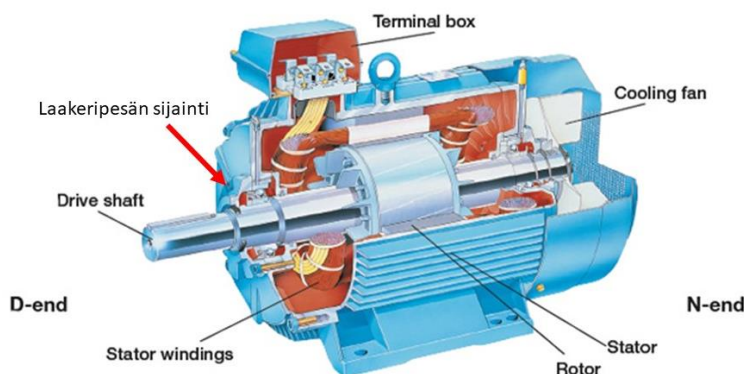
Yhteenvedona tehdyn tiedonhaun perusteella voidaan muodostaa kuvan 8 mukainen kaavio erilaisista öljykalvovaimentimien periaatteellisista ratkaisuista. Tämän kaavion antamia tietoja käytetään tässä päättötyössä hyväksi muodostettaessa suunniteltavan laakeripesäratkaisun toimintorakennetta ja sen toteuttamiseen tarvittavia mekaanisia ratkaisuja.



Kuva 8. Tiedonhaun pohjalta muodostettu kaavio erilaisista öljykalvovaimennin ratkaisuista.

2.1 Kohdeyrityksen esittämä tarve ja sovelluskohde

Erikoisumisprojekti 2:n jälkeen kävi ilmi, että kohdeyrityksellä on tarve kehittää kustannustehokkaampi laakeripesäratkaisu. Kuvassa 9 on esitetty eräs suurnopeusmoottorin rakenne, jossa on nuolella osoitettu laakeripesän sijainti.



Kuva 9. Tyypillinen suurnopeusmoottorin rakenne. Nuolella on osoitettu laakeripesän sijainti. (muokattu: Goldberg 2012)

2.2 Suunnittelun taustatiedot

Em Shaft Engineering Oy on erikoistunut suurnopeustekniikan ratkaisuihin, kuten suurnopeusmoottoreissa käytettäviin laakerointiratkaisuihin ja niiden suunnitteluun. Lisäksi se pyrkii tekemään ainutkertaisia prototyyppiratkaisuja, joita ei kaupallisesti ole saatavilla. Suurnopeussovelluksissa keskitytään erityisesti niiden pyörivien osien värähtelyjen vaimennukseen. Suurnopeussovelluksissa epätasapaino aiheuttaa suuria voimia tai kuormitushuippuja, jonka vuoksi laakerit ei kestä ilman värähtelyjä vaimentavia laakeripesiä.

3 KÄYTETTÄVÄN SUUNNITTELUMETODIIKAN KUVAUS

Kyseessä on toimeksiantajan asettama laakeripesäratkaisun kehittämistyö. Tässä opinnäytetyössä toteutetaan alla olevaa metodiikkaa.

Tässä pääluvussa esitellään suurnopeusmoottorin laakeripesäratkaisun suunnittelumetodiikka, joka koostuu VDI2221:n mukaisen järjestelmällisen suunnittelumetodin, siihen sisältyvän ratkaisuvaihtoehtojen morfologisen luokitteluperiaatteen ja arvoanalyysin soveltamisesta. Pahl & Beitz:n (1990, 571) antamia ohjeita soveltaen suunnittelun eri vaiheissa voidaan metodina käyttää taulukossa 1 kuvattuja keinoja.

Taulukko 1. Eri suunnitteluvaiheissa hyödynnettävät metodit/keinot

Metodi/keino	Suunnitteluvaihe			
	Tehtävänasettelun selvittäminen	Toimintorakenteen muodostaminen	Ratkaisuvaihtoehtojen yhdistäminen	Periaatteellisten ratkaisujen arviointi
Vaatimuslista	X			
Toimintokuvat		X		
Jäsentelykaaviot			X	
Arvoanalyysi				X

Asiantuntijahaastattelua hyödynnetään kolmeen päätarkoitukseen tukemaan kirjallisuudesta koottuja tuloksia:

- suunnittelun vaatimusten ja toiveiden kokoaminen
- tiedon kokoaminen SFD-laakeripesän osatoiminnoista ja niiden periaatteellisista ratkaisuvaihtoehdoista morfologista luokittelua varten
- kootaan tietoa vertailtavien SFD-laakeripesäratkaisujen vertailukriteereistä arvoanalyysiä varten.

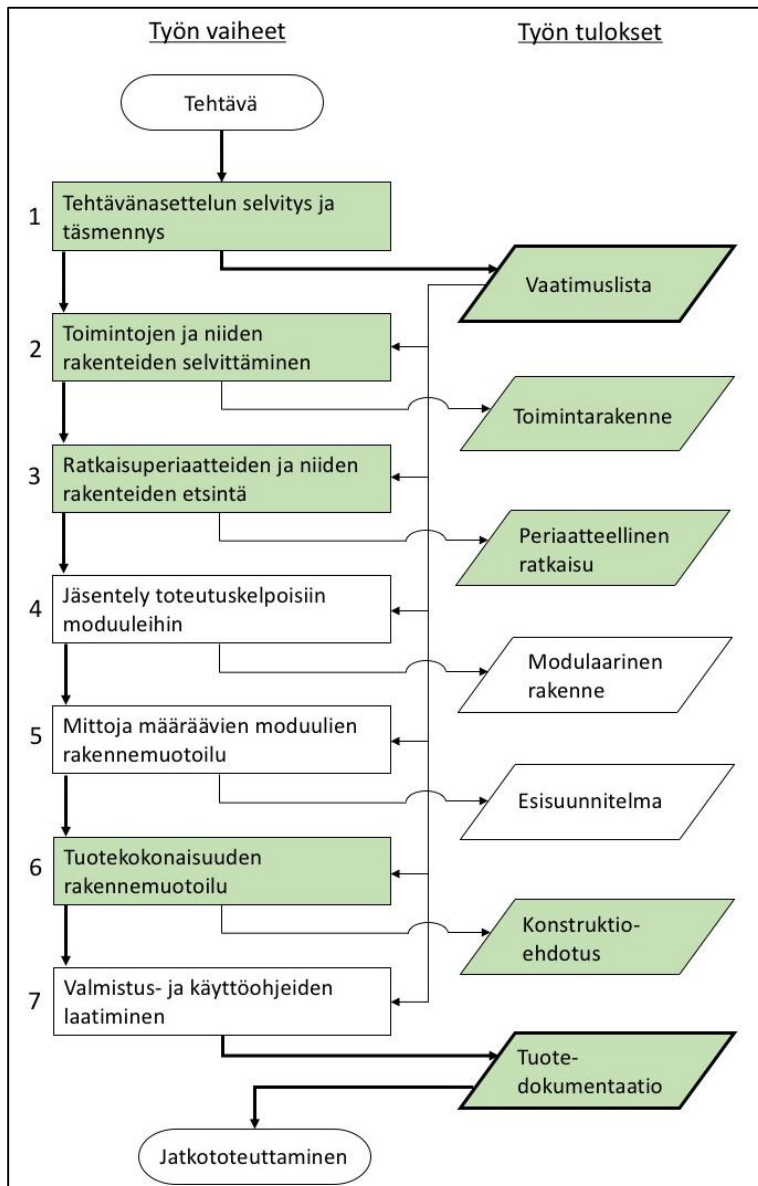
3.1 Järjestelmällisen tuotesuunnittelumetodin vaiheistus

Tässä suunnitteluprojektissa käytettävä järjestelmän tuotesuunnittelumetodi perustuu saksalaiseen koneensuunnittelun standardiin VDI2221. VDI 2221-standardi on järjestelmällinen lähestymistapa (menetelmä) tuotteiden ja teknisten järjestelmien suunnitteluun ja kehittämiseen.

http://www.vdi.eu/guidelines/vdi_2221-methodik_zum_entwickeln_und_konstruieren_technischer_systeme_und_produkte/

➔ http://www.vdi.eu/uploads/tx_vdirili/pdf/2564730.pdf (VDI2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-RICHTLINIEN, 1993)

Konstruoinnin työn kulku esitetään standardissa siten, että työvaiheiden lisäksi osoitetaan kulloinkin syntyvät työn välitulokset. Koska tässä suunnitteluprojektissa tiedetään ennalta SFD-laakeripesäraitkaisulta tavoiteltavat pää- ja sivutoiminnot sekä aiemmin esitettyjen lähteiden pohjalta useita tunnettuja rakenneratkaisuvaihtoehtoja, korostuvat tässä projektissa kuvaan 10 vihreällä merkityt standardin mukaiset työvaiheet.



Kuva 10. Laakeripesän suunnittelussa korostuvat työvaiheet osana VDI2221:n mukaista konstruoinnin työn kulkua.

Kuvan 10 mukaisesti tämän suunnitteluprojektin konkreettisina tuloksina syntyvät SFD-laakeripesälle vaatimuslista, toimintorakenne, periaatteellinen ratkaisu, konstruktioehdotus ja tuotedokumentaatio. Käytännön suunnittelutyö etenee tehtävän selvittelystä luonnosteluun ja edelleen laakeripesäratkaisun kehittelyyn ja viimeistelyyn. Pahl & Beitzin (1990, 51) mukaan tähän projektiin sisältyy kehittäelyvaiheen loppuun saakka jatkuva periaatteellinen optimointi, mutta lähteessä esitetyt viimeistelyvaiheeseen saakka jatkuvat valmistuksen optimointi ja rakennemuotoilun optimointi eivät sisälly tähän projektiin.

3.2 Suunnittelun vaatimusten ja toiveiden kokoamisen periaatteet

Pahl & Beitz (1990, 68) antavat vaatimuslistan kokoamista helpottavan asialistan, jonka avulla suunnittelun alkuvaiheessa kootaan suunnittelun ehdottomat vaatimukset ja mahdolliset toivomukset. Pahl & Beitz:a soveltaen tässä suunnitteluprojektissa vaatimuslistan kokoamisessa päähuomio tulisi kiinnittää mm. seuraaviin asiakohtiin:

- Geometria (suuruus, korkeus, leveys, tilantarve)
- Kinematiikka
- Voimat (suunta, suuruus, resonanssi)
- Energia (lämpötila)
- Valmistus (edullinen valmistustapa)
- Asennus (kokoonpano)
- Kunnossapito

Käytännössä on tarkoituksenmukaista koota suunnittelun vaatimukset ja toiveet neljän pääkohdan mukaan:

- käyttöolosuhteet
- kuormitustiedot
- geometriset vaatimukset ja
- muut suunnittelua ohjaavat vaatimukset.

Tässä opinnäytetyössä suunnittelun vaatimukset ja toiveet kootaan asiantuntijahaastattelun avulla.

3.3 Morfologisen luokituksen käyttäminen ideoinnissa


Pyrittäessä löytämään mahdollisimman monta toteuttamiskelpoista SFD-laakeripesäratkaisua, hyödynnetään tässä projektissa morfologista luokitusta (Pahl & Beitz 1990, 112) kahdella eri tavalla. Ensiksi ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmia haetaan hyödyntämällä erilaisia jäsentäviä tunnuslukuja morfologisen taulukon riveinä ja tuottamalla kutakin tunnuslukua vastaava ratkaisuvaihtoehto uuteen sarakkeeseen. Jäsentävä tunnusluku voi taulukon 2 mukaisesti olla esimerkiksi liittävän koneenosan muoto, sijainti, lukumäärä, koko tai materiaali (Pahl & Beitz 1990, 121). Tällainen tarkastelu sopii erinomaisesti esimerkiksi SFD-laakeripesän keskitys-jousivaihtoehtojen tuottamiseen ja vertailuun.

Taulukko 2. Ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmien tuottaminen jäsentäviä tunnuslukuja hyödyntäen.

Jäsentävä tunnusluku	Ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmat			
	V1	V2	V3	Vn
Muoto				
Sijainti				
Lukumäärä				
Koko				
Materiaali				

Toiseksi ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmia haetaan hyödyntämällä SFD-laakeripesän rakenteen osatoimintoja, jolloin morfologisen luokituksen kukin rivi vastaa yhtä osatoimintoa ja kukin sarake osatoiminnon vaatimukset täyttävää mahdollista ratkaisuvaihtoehtoa. Taulukon 3 mukaisesti osatoimintoja hyödyntämä morfologinen luokitus (Pahl & Beitz 1990, 92) sopii hyvin yhdistämään löydetyistä osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtoista suunnittelun vaatimukset parhaiten täyttävän kokonaisratkaisun.

Taulukko 3. Ratkaisuvaihtoehtojen yhdistäminen osatoimintojen perusteella (Pahl& Beitz 1990, 130) laadittua morfologista luokitusta hyödyntäen.

Rakenne	Osatoiminto	Ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmat			
		V1	V2	V3	Vn
	OT1	X			
	OT2		X		
	OT3			X	
	OTn		X		
	Ratkaisu		*		
		$\Sigma = OT1(V1) + OT2(V2) + OT3(V3) \dots + OTn(Vn)$			

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi toteutettavan asiantuntijahaastattelun avulla kootaan tietoa SFD-laakeripesän osatoiminnoista ja niiden periaatteellisista ratkaisuvaihtoehtoista.

3.4 Arvoanalyysin käyttöperiaatteet

Jotta arvoanalyysia voitaisiin soveltaa, tarvitaan tutkittavan rakenteen tai laitteen toimintarakente, vaatimuslista ja vertailtavaksi otettavat ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmat. Keinot näiden tietojen kokoamiseksi järjestelmällisen suunnittelumetodiikan avulla on kuvattu edellä. Ensimmäinen vaihe arvoanalyysin toteuttamisessa on muodostaa painokertoimet kullekin toiminnalliselle vaatimukselle tai sitä vastaavalle osatoiminnolle. Painokertoimien määrittämisen tukena voi käyttää asiantuntijahaastatteluja, asiakaskyselyjä, tutkimustuloksia ja suunnittelijan kokemuseräistä tietoa.

Eräs mahdollinen tapa asettaa painokertoimet on yksinkertainen eri vaatimusten parivertailu. Toinen vaihe on arvostella ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmia kunkin osatoiminnon osalta esimerkiksi korkeakouluarvosanoihin 0-5 tai kouluarvosanoihin 0-10. Kolmas vaihe on osatoimintojen painoarvoilla painotetun ratkaisuvaihtoehtojen vertailutaulukon laatiminen. Käytännössä siis lasketaan osatoiminnoinnille kullekin ratkaisuvaihtoehdolle tulo, joka on painokerroin kertaa arvosana. (Meskanen, 11-15)

Hankalin vaihe arvoanalyysissä on arvioida kunkin osatoiminnon täyttämisen vaatimat suhteelliset kustannukset. Edellä laskettu painokertoimen ja arvosanan tulo kuvaa kussakin vaihtoehdossa toimintojen täyttämisen hyvyttä, mutta arvon laskeminen edellyttää suhdeluvun muodostamista jakamalla toimintojen täyttämisen hyvyys suhteellisilla kustannuksilla. Suhdelukuja vertailemalla voidaan eri ratkaisuvaihtoehtojen muunnelmia asettaa arvoanalyysin mukaan paremmuusjärjestykseen siten, että suurin arvo kuvastaa kustannustehokkainta ratkaisuvaihtoehtoa. (Meskanen, 11-15)

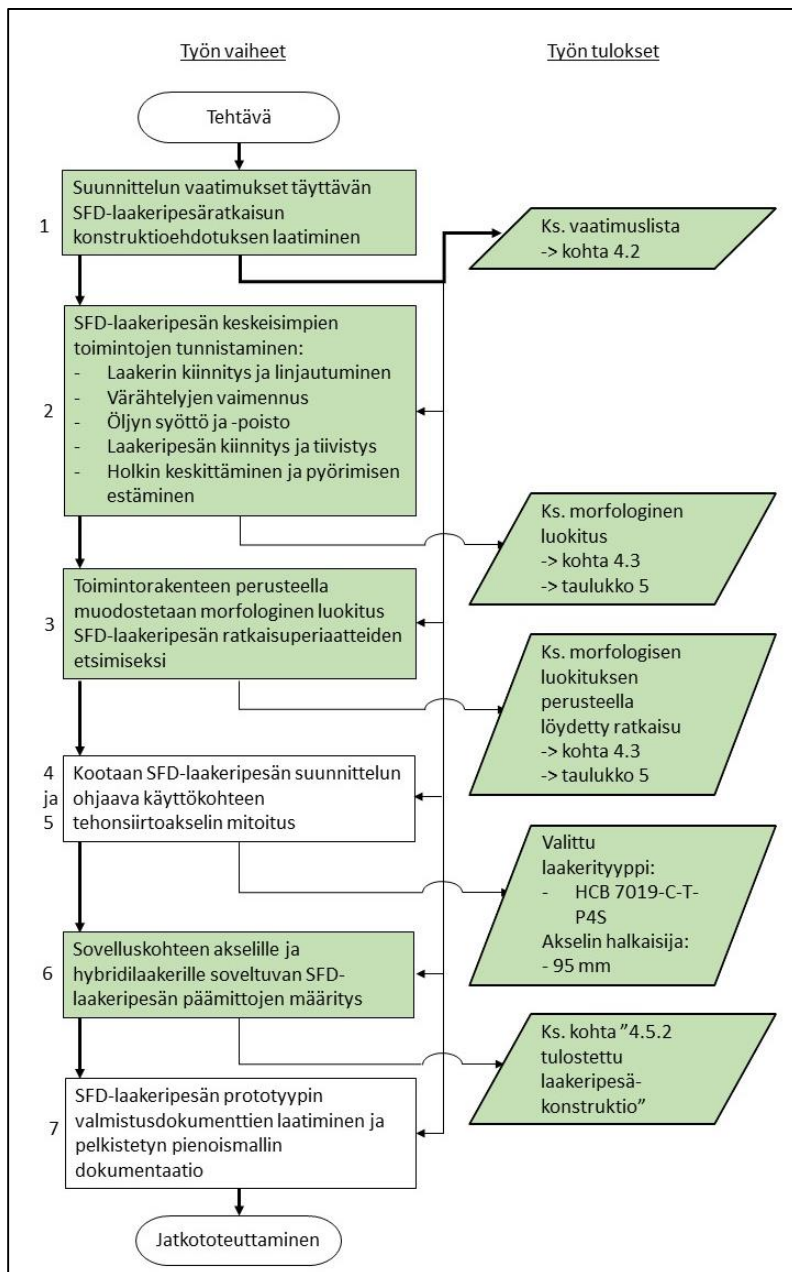
Kirjallisuuskatsauksen lisäksi toteutettavan asiantuntijahaastattelun avulla kootaan tietoa vertailtujen SFD-laakeripesäratkaisujen vertailukriteereistä arvoanalyysiä varten.

4 SUURNOPEUSMOOTTORIN SFD-LAAKERIPESÄN SUUNNITTELU

SFD-laakeripesäratkaisun löytämiseksi sovelletaan järjestelmällistä tuotesuunnittelua, joka sisältää SFD-laakeripesän vaatimusten ja alkuarvojen kokoamisen, ratkaisuvaihtoehtojen morfologisen luokittelun ja toteutettavan rakenneratkaisun valinnan arvoanalyysia käyttäen. Reunaehtoina hyödynnetään sovelluskohteeseen valitulle laakerille asetettuja mitta- ja geometrisia toleransseja ja lopputuloksena esitetään SFD-laakeripesän 3D-tulostettu pienoismalli sekä toteutettavan SFD-laakeripesän 3D-mallit.

4.1 SFD-laakeripesän järjestelmällisen suunnittelun vaiheistus

Kun sovelletaan järjestelmällisen tuotesuunnittelun vaiheistusta SFD-laakeripesän suunnitteluun, muodostuu konstruoinnin työnkulku kuvan 11 mukaisesti.



Kuva 11. Konstruoinnin työnkulku.

4.2 SFD-laakeripesän suunnittelun vaatimukset ja alkuarvot

Suunniteltavan SFD-laakeripesän yksityiskohtainen ja tarkennettu vaatimuslista koottiin hyödyntämällä kohdeyrityksen tietotaitoa laakerointiratkaisujen toteutuksesta ja suorittamalla asiantuntija-haastattelu. Asiantuntijahaastattelussa haastateltavana oli LUT-yliopiston Konedynamiikan professori Jussi Sopenen. Hänen erikoisosaamisalueeseensa kuuluvat mm. roottoridynamiikka, monikappaledynamiikka ja sähkökoneiden mekaaninen suunnittelu. Sopenen on kirjoittanut yli 80 referoitua julkaisua dynaamisten järjestelmien suunnittelusta ja simuloinnista.

Kohdeyhteyksen aiemmista kokemuksista koottiin seuraavat suunnittelua ohjaavat vaatimukset:

A) KÄYTTÖOLOSUHTEET

- Suunniteltavan suurnopeussovelluksen normaali toimintalämpötila on alle käytettävän öljyn kriittisen leikkautumislämpötilan (alle 80 °C), lämpölaajeneminen ja piteneminen tarkistetaan erikseen.
- Suurnopeussovelluksen käyttöolosuhteissa ei ole erityisvaatimuksia vesitiiveydelle tai korroosionkestävyydelle, vaan laakerin valmistajan normaali vaatimustaso riittää.

B) KUORMITUSTIEDOT

- Käytettävä laakerityyppi on hybridilaakeri HCB 7019-C-T-P4S, jonka dynaaminen kantakyky C_{dyn} on 81 kN, staattinen kantokyky C_{staat} on 52 kN ja pyörimisnopeusraja 13000 r/min. Näitä lukuarvoja käytetään suunnittelun lähtötietona.

C) GEOMETRISET VAATIMUKSET

- Laakeripesä suunnitellaan sisähalkaisijalle 95 mm, ulkohalkaisijalle 145 mm ja leveydelle 24 mm.
- Pesän mitta- ja geometrisen toleroinnin vaatimukset asetetaan laakerin valmistajan vaatimusten mukaisesti.

D) MUUT VAATIMUKSET

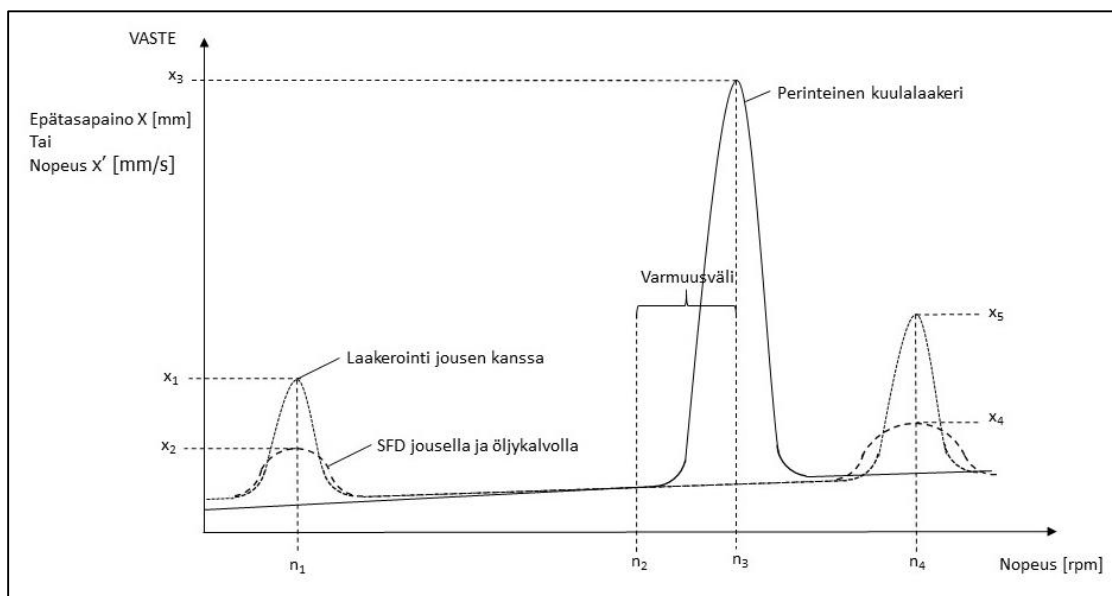
- Pesä suunnitellaan siten, että keskitys tapahtuu säädettävien jousien avulla.
- Laakeripesän suunnittelussa korostetaan osien valmistusystävällisyyttä ja kokoonpanon asennusystävällisyyttä.

Vaatimuslistan täydentämiseksi asiantuntijahaastattelussa käytettiin seuraavia kysymyksiä:

- Mitkä ovat tyypillisimpiä SFD-laakerointiratkaisun häiriötilanteita ja vauriotapauksia?
- Millaisia värähtelyjä suurnopeusmoottorin akselilla voi esiintyä (vääntö/taivutusvärähtelyt) ja kuinka tärkeässä asemassa värähtelyt ovat luotettavuusteknisessä mitoituksessa sekä SFD-laakeripesän toiminnan varmistamisessa?
- Kumpi on tärkeämmässä roolissa värähtelyjen hallinnassa: Pyörivän suurnopeusmoottorin tasapainotus vai SFD-laakeroinnin toteutus.
- Kuinka suuri merkitys pyörivien osien epäkeskeisyydestä johtuvilla kuormitushuipuilla voi olla kokonaismoituksen näkökulmasta?
- Kuinka yleisesti SFD-laakeroinneissa käytetään hybridilaakereita (joko keraamiset kuulat tai kehien keraaminen pinnoitus sähköisen eristyksen aikaansaamiseksi) ja tarvitaanko laakeripesältä erillinen sähköinen eristys?
- kuinka tyypillistä suurnopeusmoottorin suunnittelussa kohonneen toimintalämpötilan huomioonottaminen on?

Sopanen (22.01.2019) korostaa, että SFD-laakeripesän käyttäminen muuttaa roottoridynamiikkaa merkittävästi. Haastattelun aikana Sopanen esitti kuvan 12 avulla laakeripesäratkaisun suunnitte-

lussa keskisen vastekäyrän periaatteen. Tämän mukaan yksityiskohtainen suunnittelu vaatisi laskelmat eri laakerointiratkaisujen kriittisistä pyörimisnopeuksista, tarvittavasta jousivakiosta ja vaimenuksesta sekä näitä vastaavista vasteiden lukuarvoista (epätasapaino ja nopeus).



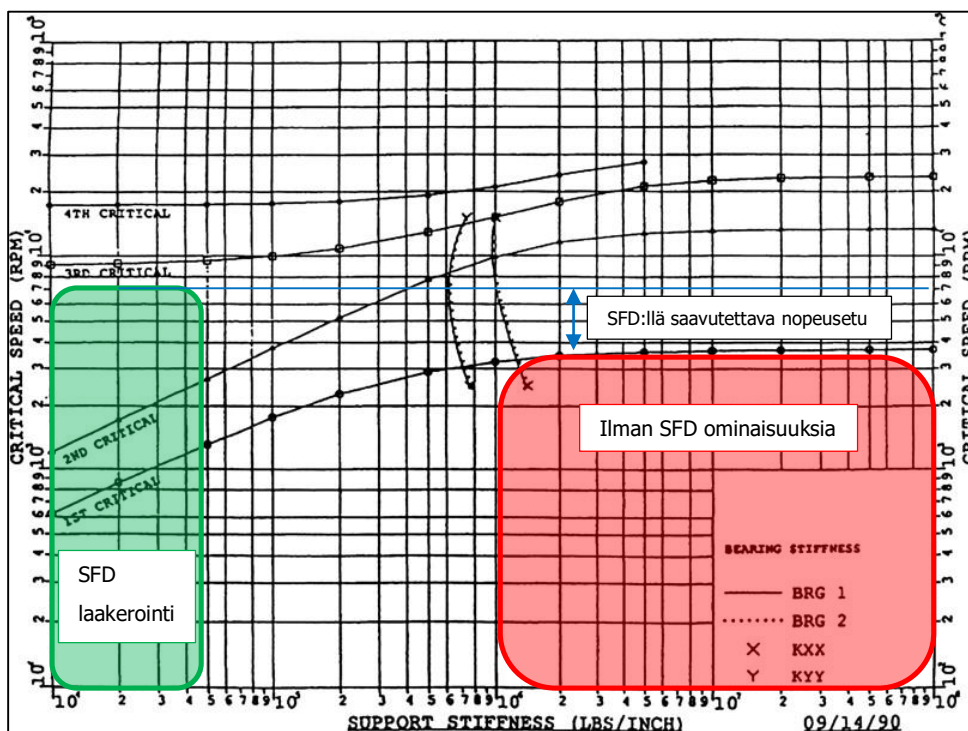
Kuva 12. Eri laakerointiratkaisujen vastekäyrät.

Haastattelun mukaan perinteistä kuulalaakeria käytettäessä maksimi pyörimisnopeudella n_3 esiintyy suuri kuormitushuippu, minkä vuoksi suunnittelussa sallituksi maksimi pyörimisnopeudeksi joudutaan asettamaan varmuusvälin verran pienempi pyörimisnopeus n_2 . Jos laakerointiratkaisun sisällytetään keskitysjouset, huipun terävyys säilyy ennallaan, mutta huippu on matalampi ja se esiintyy huomattavasti alemmilla pyörimisnopeuksilla, jolloin ko. kriittinen pyörimisnopeus on helppo ylittää nopeasti, koska tehoreserviä on käytettävissä. Jousitetulla laakerointiratkaisulla esiintyy kuitenkin toinen kriittinen pyöriisnopeus n_4 , mutta oikein suunniteltuna tämä nopeus on paljon suurempi kuin haluttu pyörimisnopeus. Jos laakerointiratkaisu toteutetaan SFD-laakerointiratkaisuna, jossa on sekä jousikeskitys että öljykalvovaimennus leikkautuvat sekä pyörimisnopeuden n_1 ja n_4 kuormitushuiput merkittävästi.

Jotta suunniteltava laakerien tuentaratkaisu olisi sellainen, että haluttuun kierrosnopeuteen voitaisiin ajaa turvallisesti, vaatisi se yksityiskohtaiset laskelmat ja tarkan mitoittamisen. Mutta koska tiedetään SFD-laakeroinnin madaltavan rakenteellista jäykkyyttä, voidaan kriittisten nopeuksien kartan (kuva 13) avulla olettaa, että SFD-laakeroinnilla saavutetaan selvä nopeusetu perinteiseen laakerointiin (ilman SFD ominaisuuksia) verrattuna.

Kriittisten nopeuksien kartta esittää roottorin akselin päissä olevien kahden yhtä jäykän tuen vaikutusta kriittiseen nopeuteen. Laakeripesän suunnittelussa rakenteen kokonaisjäykkyys vaikuttaa oleellisesti kriittisiin pyörimisnopeuksiin. Suunnittelussa huomioon otettavia rakenneyksityiskohtia ovat itse laakerin lisäksi laakerin tukiholkki, laakeripesä ja laakeriyksikkö sekä koneen runko ja perusta, jotka yhdessä vaikuttavat konstruktion kokonaisjäykkyyteen. (Y.Kaneko, R. Kawashita. 2017)

Kriittisten nopeuksien kartasta (kuva 13) voidaan myös havaita, että 1. ja 2. kriittisen nopeuden käyrät ovat kumpikin liki vaakasuoria, kun jäykkyys on saavuttanut reilun puolen välin x-akselilla eli jäykkyyden muuttaminen ylöspäin ei auta värähtelytilannetta 1. kriittisen nopeuden suhteen. Tällöin jo 1. pyörimisnopeus on niin suuri, että sen ohittaminen turvallisesti ei onnistu. SFD-laakerointi "pehmentää" (= alentaa) rakenteellista jäykkyyttä ja sen vuoksi kriittisten pyörimisnopeuksien 1. ja myös 2. käyrä kohdataan jo x-akselin alkupäässä, jolloin niillä on siis alhaisin lukuarvo ja ne voidaan ohittaa nopeasti. Tästä seuraa kuvassa 13 merkitty nopeusetu SFD-laakerin eduksi.



Kuva 13. Kriittisten nopeuksien kartta. SFD-laakeroinnilla saavutettava nopeusetu. (muokattu lähteestä: Y.Kaneko, R. Kawashita. 2017)

Nimenomaan SFD-laakerointiratkaisujen yhteydessä tyypillisimpänä häiriötilanteena Sopenen mainitsee ylikuormasta johtuvan niin kutsutun lock-up tilanteen, jonka voi myös aiheuttaa Sopen mukaan suurnopeussovelluksissa pyörivien osien epäkeskeisyydestä johtuva epätasapaino. Haastattelun yhteydessä kävi ilmi, että lock-up ilmiö tarkoittaa öljykalvoa varten tehdyn välyksen umpeutumista, johtuen liian suuresta kuormituksesta ja jousen kyvyttömyydestä keskittää laakeriholkkia. Kun öljykalvo näin häviää, holkki alkaa kiertää rungon sisäpintaa vasten ja myös vaimennus häviää. Vaatimuslistaa koottaessa on siten tärkeää tunnistaa maksimi kuormitustilanne, jolle laakeripesäratkaisu on suunniteltu. Epäkeskeisyydestä johtuva epätasapaino on otettava huomioon suurnopeusmoottorin kokonaissuunnittelussa, esimerkiksi roottorin tasapainotuksessa. Suunniteltavan laakeripesän vaatimustaan tämä ei aiheuta lisäyksiä.

Sopen (22.01.2019) mukaan käyttökohteeseen valitut keraamiset laakerit ovat riittävä suoja estämään haitallisia laakerivirtoja, koska myös SFD-laakeroinnin öljykalvo estää laakerivirtoja. Tämän vuoksi vaatimuslistaan ei ole tarve lisätä muita laakeripesän sähköiseen eristykseen liittyviä vaatimuksia.

Sopasen (22.01.2019) mukaan suurnopeuskoneen tehotehiys on suuri ja siksi yleensä laakeripesät lämpenevät. Tämän vuoksi lämpölaajeneminen tulisi ottaa suunnittelussa huomioon. Vaatimustilassa on tämän vuoksi tärkeää tietää, kuinka suuri lämpölaajenemisefekti on eri käyttöolosuhteissa. Tämä vaikuttaa edelleen laakeripesäratkaisun materiaalien ja käytettävien välysten valintaan.

4.3 Toteutettavan SFD-laakeripesän valinta morfologista luokittelua ja arvoanalyysia käyttäen

Morfologinen luokitus perustuu kirjallisuuskatsauksessa esitettyjen SFD-laakeripesäratkaisujen analysointiin. Morfologisen luokituksen täydentämiseksi asiantuntijahaastattelussa käytettiin seuraavia kysymyksiä:

- Kuinka tyypillisesti SFD-laakeroinneissa on olemassa tarve keskittävän jousivoiman säädölle?
- Kuinka yleistä on käyttää rheologista väliainetta laakeroinnin reaaliaikaisen vaimennuksen säätämiseksi?
- Voiko vaimentavan öljykalvon öljyä hyödyntää myös laakereiden voitelussa ja kuinka yleistä tämä on?
- Miten mahdollinen SFD-laakeripesäratkaisujen eri rakenneosien lämpölaajeneminen tulisi ottaa huomioon esimerkiksi öljytaskun suunnittelussa?


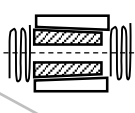







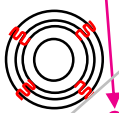
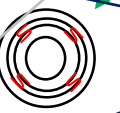
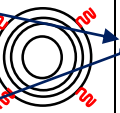
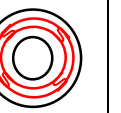



Sopasen (22.01.2019) näkemys SFD-laakeripesän keskittävän jousivoiman säädöstä lähtee siitä perusolettamuksesta, että toimiakseen oikein, SFD-laakeripesä tarvitsee aina keskittävän jousen. Jousivoimaa voi olla tarvetta säätää, jos jousi ei keskitä oikein. Tämän vuoksi on perusteltua tuottaa erillinen morfologinen luokittelu keskitys-jousiratkaisuille ja niiden säätömahdollisuuksille (ks. taulukko 4)

Taulukossa 5 on esitetty laakeripesän rakennevaihtoehdot toimintorakenteen perusteella laaditun morfologisen luokituksen avulla. Morfologista luokittelua laadittaessa yhtenä varioitavana tekijänä harkittiin öljyn korvaamista rheologisella väliaineella. Omassa vastauksessaan Sopanen (22.01.2019) viittasi tutkimustuloksiin joiden mukaan tällaisilla väliaineilla voidaan optimoida SFD-laakeriratkaisun toimintaa eri pyörimisnopeusalueilla.

Haastattelussa Sopanen (22.01.2019) käytti esimerkkinä keskitys-jousiratkaisusta lankasahattuja käärijousia. Tämä rakennevaihtoehto lisättiin haastattelun perusteella keskitys-jousia vertailevaan morfologiseen luokitteluun. Koska Sopanen (22.01.2019) piti mahdollisena hyödyntää SFD-laakeripesän öljykalvoa laakereiden voitelussa, jos voiteluöljy täyttää laakerivalmistajan vaatimukset, on morfologisessa luokittelussa hyvä ottaa huomioon myös tämä mahdollinen laakeripesän osatoiminto.

Sopasen (22.01.2019) mukaan SFD-laakerointiratkaisu ei itsessään tuota paljoa lämpöä, vaan lämpeneminen johtuu koneen häviöistä ja jäähtydyksestä. Tämän vuoksi morfologisessa luokittelussa huomio kiinnittyy eri rakennevaihtoehtojen avulla saavutettavaan öljytaskun kokoon ja muotoon, öljyn syöttöön ja poistumiseen, joilla varmistetaan laakerointiratkaisussa tarvittava paine ja virtaus-tekniset ominaisuudet.

Taulukko 4. Morfologinen luokittelu keskitysjouriratkaisuille ja niiden säätömahdollisuuksille. Lupavimmat keskitysjouriratkaisujen ominaisuuskombinaatiot on esitetty värinuoleilla.

Ominaisuus	Osa: Keskitysjouisi					
	Vaihtoehdot (tuotettujen teoreettisten kombinaatioiden lukumäärä: 2120, säteittäisiä 1800 ja aksiaalisia 320)					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Suunta	 säteittäinen	 aksaalinen				
Lukumäärä	1 kpl	2 kpl	4 kpl	8 kpl	n kpl	
Muoto	 s-jousi	 lautasjousi	 kierrejouisi	 aaltojouisi	 holkki	 kaarijousi
Sijainti	 navassa	 kehällä	 välissä	 ulkopuolella	 Osana kehän muotoa	
Materiaali	teräs	CuBe2	kumi	kumi-teräs		
Esikiristys, tuenta ja säätö	ei säätöä	 säteisruuvilla	 kehäruuvilla	 akselimutterilla		

Taulukko 5. Toimintorakenteen perusteella laaditut rakennevaihtoehdot.

Laakeripesän leikkauskuva	Toimintorakenne	Laakeripesä			
	Osatoiminto	Vaihtoehdot (tuotettujen teoreettisten kombinaatioiden lukumäärä, lukuunottamatta taulukon 4 keskitysrousikonstruktion variaatioita: 2048)			
	Kiinnittää pesän runkoon	Aksiaaliruuvit	Alusta kiinnitys		
	Syöttää öljyn (laakerille ja pesän väliin)	2 kanavaa reunolla	1 kanava reunalla	1 kanava keskellä	2 kanavaa pesän väliin ja 1 laakerille
	Vaimentaa värähtelyt (kalvo)	Rheologinen väliaine ->väliaineen viskositeetti säädetään magneettikentän avulla	Kartio	Suora	Ura
	Kiinnittää laakerin	2 pidätinrengasta	Olake + pidätinrengas	Sovite	Puristavat kannet
	Poistaa öljyn (laakerilta)				
	Tiivistää	O-renkaat	Päittäis		
	Keskittää holkin (ja vaimentaa värähtelyjä)	Ks. keskitysrousikon kaavio			
Estää pyörimisen	Tappi ulopinnan ja säholkin välillä	Tappi holkkien välissä			
Varmistaa laakerikoolien linjautumisen	<p>Riittävän leveä rakenne Symmetrisyys: - o-renkaat samalle etäisyydelle laakerin keskeltä - keskitysrousikon laakerin keskelle</p>				

Arvoanalyysin käytettävä kriteeristö perustuu kirjallisuuskatsauksessa esitettyjen SFD-laakeripesäratkaisujen analysointiin. Arvoanalyysin kriteeristön täydentämiseksi ja arvoanalyysin toteuttamiseksi asiantuntijahaastattelussa käytettiin seuraavia kysymyksiä:

- Onko SFD-laakeroinnin toteutuksen onnistumisella vaikutusta suurnopeusmoottorin suorituskykyyn?
- Eroaako SFD-laakeripesän asennus/huolto esim. öljyn syötön tai keskitysjoisten takia jotenkin ratkaisevasti tavallisista laakerointiratkaisuista?

Sopasen (22.01.2019) mukaan SFD-laakeroinnin toteutumisen onnistumisella on suora vaikutus suurnopeusmoottorin suorituskykyyn. Oikein suunniteltu SFD-laakerointi mahdollistaa paremman suorituskyvyn ja pidemmän laakerin kestoian. Eräs mahdollisuus arvoanalyysissä on painottaa eri variaatioiden hyvyyttä näistä näkökulmista.

Sopasen (22.01.2019) mukaan periaatteessa SFD-laakeripesän asennus- ja huoltonäkökohdat tulee ottaa huomioon normaaliin tapaan suunnitteluvaiheessa. Haastattelussa kävi ilmi, että vertailussa voidaan käyttää kahta tärkeää kriteeriä:

- rakenneosien lukumäärä yhdistettynä niiden asennuksen helppouteen ja
- valitun jousiratkaisun keskitystarkkuus yhdessä säätömahdollisuuden kanssa

Arvoanalyysia ajatellen tuotetut eri rakennevaihtoehdot on asetettavissa paremmuusjärjestykseen rakenteen kokoonpantavuuden ja osien vaihdon helppouden näkökulmista.

Arvoanalyysin arviointikriteereinä käytetään seuraavia:

1. kokoonpantavuus (=KP)
2. rungon ja pesän valmistettavuus (=VA)
3. säädettävyys (=SÄ)

Arviointikriteereiden painokertoimet on laskettu taulukossa 6.

Taulukko 6. Arviointikriteereiden painokertoimet.

	KP	VA	SÄ	Painoluku	Prosentti- osuus	Painoker- roin
KP	KP	VA	SÄ	1	11,1 %	0,11
VA	VA	VA	SÄ	3	33,3 %	0,33
SÄ	SÄ	SÄ	SÄ	5	55,6 %	0,56

Taukossa 7 on laskettu painokertoimet huomioon ottaen kunkin vertailtavan rakennevaihtoehdon saamat pisteet käyttäen arvosana-skaalaa 1...10. Koska suunniteltavaan rakenteeseen ei haluta sisällyttää rheologisen väliaineen käytön tarvitsemaa vaikuttavan magneettikentän tuottamiseen, ohjaamiseen ja säätöön liittyvää elektroniikkaa, vertailtavat rakennevaihtoehdot haettiin muista erilaisista mekaanisista ratkaisuvaihtoehdoista.

Vertailtaviksi rakennevaihtoehdoiksi valittiin morfologista luokitusta hyväksi käyttäen seuraavat lupaaviksi arvioidut jousiratkaisuja koskevat rakennevaihtoehdot:

- rakennevaihtoehto 1: neljä kappaletta säteittäisiä s-jousia, jotka on toteutettu lankasahaamalla osana kehän muotoa, ei säädettävyyttä (taulukko 4, sininen nuoli)
- rakennevaihtoehto 2: kaksi kappaletta rinnakkaisia aaltojousia holkkien välissä, ei säädettävyyttä (taulukko 4, vihreä nuoli)
- rakennevaihtoehto 3: neljä kappaletta lautasjousia kehällä, joissa säätömahdollisuus pidätinruuvien avulla (taulukko 4, violetti nuoli)

Kaikissa kolmessa vertailtavassa rakennevaihtoehdossa perusrunkorakenne on morfologisen luokittelutaulukon 5 mukaisesti samanlainen siten, että rungon kiinnitys pesään, öljyn syöttö laakerille ja pesän väliin, laakerin kiinnitys, öljyn poisto, öljytaskun tiivistys ja laakerikoolien linjautumisen varmistus toteutetaan saman periaatteen mukaisesti (taulukko 5, musta nuoli). Vertailtavat rakennevaihtoehdot eroavat toisistaan värähtelyjä vaimentavan ja holkkia keskittävän jousiratkaisun osalta. Lisäksi holkin lukitustapa muuttuu eri vaihtoehdoissa.

Taulukko 7. Vertailtavien rakennevaihtoehtojen pisteet.

Arvoanalyysin kriteerit	Painokerroin p	Vertailtavat rakenteet					
		Rakennevaihtoehto 1		Rakennevaihtoehto 2		Rakennevaihtoehto 3	
		PISTEET		PISTEET		PISTEET	
		Arvosana A	pxA	Arvosana A	pxA	Arvosana A	pxA
1. Kokoonpantavuus	0,11	9	0,99	2	0,22	6	0,66
2. Rungon ja pesän valmistettavuus	0,33	1	0,33	7	2,31	6	1,98
3. Säädettävyyys	0,56	1	0,56	1	0,56	7	3,92
Σ	1		1,88		3,2		6,56
Suhteellinen kustannus		1,2		1		0,9	
Pisteen suhteellinen arvo		1,6		3,1		7,2	

Kokoonpantavuutta arvioitaessa kävi ilmi, että rakennevaihtoehdossa 1 on ensinnäkin vähän rakenneosia ja lisäksi osat on helppo asettaa paikalleen. Rakennevaihtoehdossa 2 kokoonpantavuutta vaikeuttaa kehän ympäri uriin asetettävien rinakkaisten jousien asennus. Rakennevaihtoehdossa 3 jousien säädettävyydestä johtuen rakenneosia on eniten, mutta ne on helppo asentaa säteen suunnassa peräkkäisinä työvaiheina.

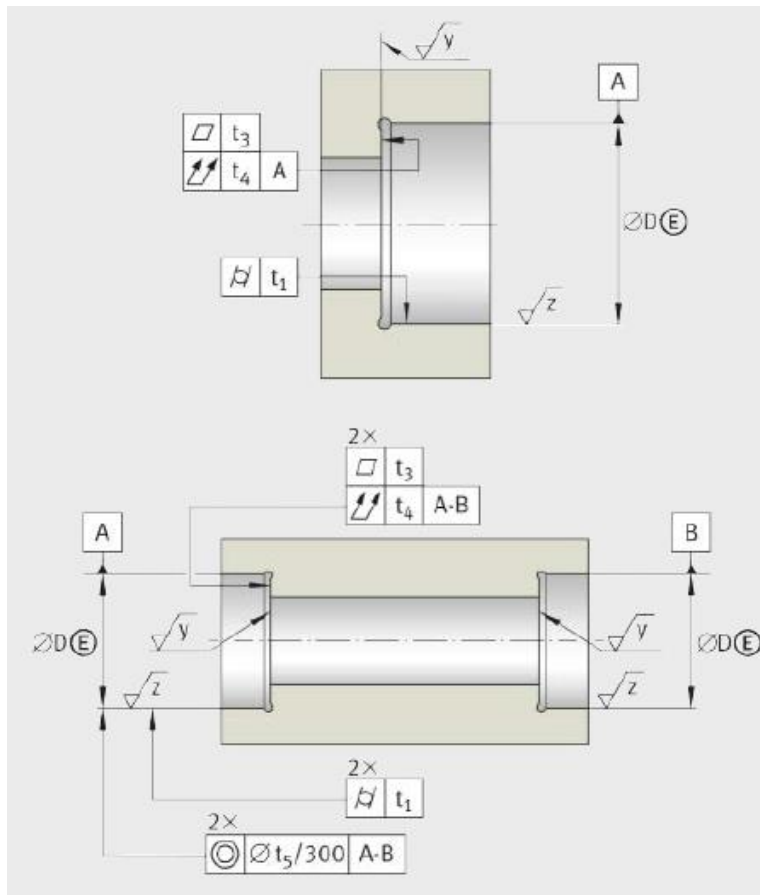
Rungon ja pesän valmistettavuutta arvioitaessa havaittiin, että rakennevaihtoehdossa 1 jousien valmistukseen liittyvä lankasahausvaihe on erillinen ja tarkkuutta vaativa valmistusvaihe. Rakennevaihtoehdossa 2 aaltojousta varten tarvittava kehän sisäpuoliset urat ovat valmistusta hidastava työvaihe. Rakennevaihtoehdossa 3 on monia jousien säätömekanismiin liittyviä yksityiskohtia ja myös kehälle tehtävät säteen geometriat vaativat tarkkuutta, mutta kaikki geometriat voidaan kuitenkin valmistaa nykyaikaisessa koneistuskeskuksessa.

Ainoastaan rakennevaihtoehdossa 3 on mahdollista suorittaa vaimennusjousien säätö kuormituksen ja nopeuden vastekäyrän vaatimalla tavalla. Rakennevaihtoehdoissa 1 ja 2 jousivakio määrää esiastetuksena laakeripesän ominaisuudet, koska säätömahdollisuutta ei ole.

Taulukossa 7 esitetyt suhteelliset kustannukset on arvioitu suuntaa antavasi siten, että rakennevaihtoehdon 1 lankasahaamalla toteutettavien keskitysrousien geometrian valmistus on kalliimpi valmistusvaihe, kuin rakennevaihtoehdon 2 aaltojousen uran sorvaus laakeripesän runkoon. Kolmannen rakennevaihtoehdon koneistusvaiheet voi toteuttaa perustyökaluilla koneistuskeskuksissa ja tarvittavat säätömekanismien osat ovat edullisempia kuin rakennevaihtoehdon 2 aaltojouset. Rakennevaihtoehdon 3 säätömekanismien rakenteesta johtuen sen kokoonpano on suuremmasta osien lukumäärästä huolimatta suhteellisen yksinkertaista verrattuna rakennevaihtoehdon 1. Tämän perusteella rakennevaihtoehdon 2 suhteelliseksi kustannukseksi asetettiin 1 ja rakennevaihtoehdon 1 kustannusten oletettiin olevan 20%:a suuremmat ja rakennevaihtoehdon 3 puolestaan 10%:a pienemmät. Näitä suhteellisia kustannuksia käyttäen on taulukkoon 7 laskettu kullekin rakennevaihtoehdolle pisteen suhteellinen arvo. Laaditusta arvoanalyysistä nähdään, että tärkein tekijä laadittavan laakeripesän valinnassa on säädettävyys. Näiden arvioiden perusteella rakennevaihtoehdo 3 osoittautui parhaimmaksi.

4.4 Laakeripesältä vaadittavat mita- ja geometriset toleranssit

Laakerivalmistaja vastaa vain laakerin mitoista ja toleransseista ja edellyttää sen vuoksi laakerin oikean kiinnityksen, tuennan ja vierintätarkkuuden varmistamiseksi laakeripesältä ja laakeroitavalta akselilta tarkkoja toleransseja. Laakeripesien, akselin ja laakerien sisäiset toleranssit yhdessä määrittävät pyörimisliikkeen kokonaistarkkuuden. Laakeripesän toleroitavia kohtia ovat kuvan 14 mukaan laakerisijat, niiden olakkeet sekä laakerisijojen keskinäinen sama-akselisuus. Lisäksi laakerisijoilta ja niiden olakkeilta vaaditaan hyvää pinnanlaatua.



Kuva 14. Laakeripesälle asetettavat toleranssi- ja pinnanlaatuvaatimukset (FAG, Super Precision Bearings, sivu 52).

Lieriömäisyydelle, tasomaisuudelle, aksiaaliheitolle ja sama-akselisuudelle käytetään ISO 1101:n mukaisia määritelmiä (Standardi ISO 1101:2017(en)) ja keskimääräiselle pinnankarheudelle DIN ISO 1302 mukaista määritelmää ja merkintöjä (Standardi DIN ISO 1302 Comparison of Surface Roughness Values). Laakerin valmistaja ilmoittaa laakerin ulkohalkaisijaan 145 mm sidottuna taulukon 8 mukaiset toleranssien ja pinnankarheuden vaatimusten lukuarvot.

Taulukko 8. Laakeripesän toleranssien ja pinnankarheuden vaatimusten lukuarvot (FAG, Super Precision Bearings, sivu 52)

Toleroitava ominaisuus	Lukuarvo
Pesän halkaisija D	Paikoittava laakeri -4 μm ... +8 μm
	Ohjaavalaakeri +5 μm ...+17 μm
Lieriömäisyys t_1	3.5 μm
Tasomaisuus t_2	3.5 μm
Aksiaaliheitto t_3	5 μm
Sama-akselisuus t_4	8 μm
Keskippinnankarheus Ra	0.8 μm

4.5 SFD-laakeripesän pienoismallin 3D-mallinnus ja -tulostus

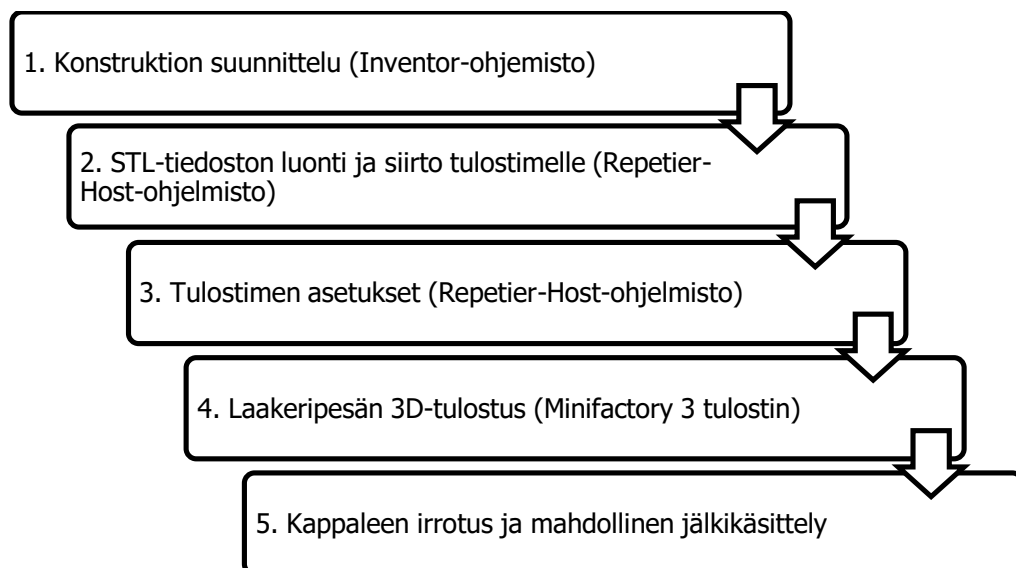
Jotta pienoismalli voitiin käytettävissä olevalla 3D-tulostimella tulostaa, siitä täytyi tehdä suunniteltua laakeripesäratkaisua ”karkeampi” versio. Tulostettavan laakeripesäkonstruktion keskitysjosiratkaisu valittiin morfologista luokittelua hyväksi käyttäen (taulukko 4, harmaa nuoli). Perusrunkorakenne pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena. 3D-tulostettavasta pienoismallista poistettiin kokonaan öljyn poistokanavat ja muut yksityiskohdat. Öljyn syöttöä varten tehtiin reikä laakeripesään.

3D-tulostettavalla laakeripesäkonstruktiolla pyritään havainnollistamaan seuraavia asioita:

- Laakeripesäkonstruktion eri osien keskinäinen sijainti
- Laakeripesäkonstruktion eri osien asennuksen reunaehdot ja asennussuunnat
- Laakeripesäkonstruktion geometrian ja eri yksityiskohtien havainnollistaminen todellista metallista koneistettua rakennetta varten
- Laakeripesäkonstruktiossa tarvittavien toleroitavien kohteiden tunnistaminen
- Vaimennuksessa tarvittavan öljykalvotaskun ja öljykanaviston sijainti
- Keskitysjosien toiminta ja säätömahdollisuus

4.5.1 Mallinnuksen ja tulostusprosessin päävaiheet











Laakeripesän mallinnus- ja 3D-tulostusprosessi sisälsi kuvan 15 mukaiset viisi päävaihetta. Tärkein vaihe suunnittelutyössä oli vaihe 1, jossa sovellettiin 3D-suunnittelusääntöjä laakeripesärakenteen mallinnukseen. Laakeripesäkonstruktion geometria mallinnettiin Invector-ohjelmistolla. 3D-tulostuksen ohjaukseen sekä varsinaiseen tulostukseen käytettiin Repetier Host-ohjelmisto. Käytetty tulostin oli FDM:n (Fused Deposition Modelling) periaatteella toimiva Minifactory 3-tulostin. Havainnollisuuden lisäämiseksi laakeripesäkonstruktion runko-osa ja sisäpuolinen holkki tulostettiin erivärisistä PLA muoveista. Käytetyn filamenttilangan paksuus oli 1.75 mm.



Kuva 15. Laakeripesän mallinnus- ja 3D-tulostusprosessin päävaiheet

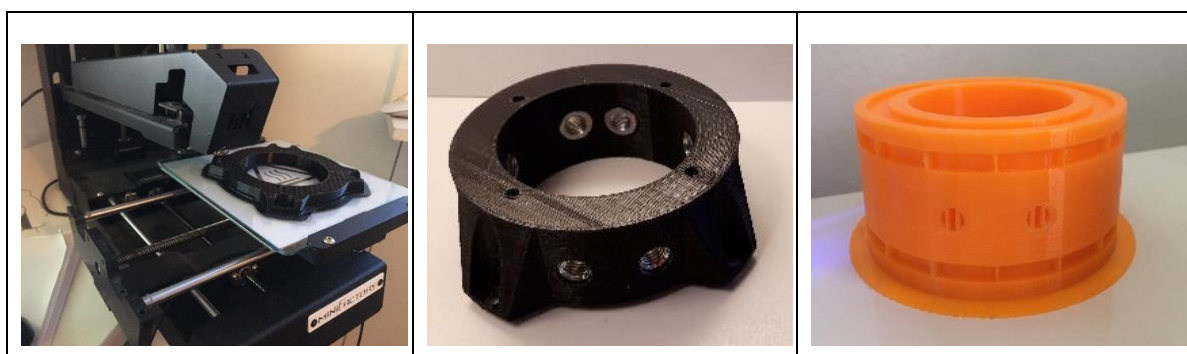
Laakeripesäkonstruktion suunnittelussa (vaihe 1) sovellettiin 3D-kappaleiden suunnittelusääntöjä minimi materiaalipaksuuksille, reikien koolle ja tarvittaville välyksille eri osien kesken (Robin Brockotter), jotta kappaleen virheetön ja riittävän mittatarkka tulostus voitaisiin varmistaa mahdollisimman lyhyessä tulostusajassa. Taulukossa 9 on esitetty suunnittelun yhteydessä sovelletut suunnittelu-säännöt ja niitä koskevat mittarajoitukset käytetylle tulostusprosessille.

Taulukko 9. Suunnittelusääntöjen soveltaminen laakeripesän suunnitteluun. (sovellettu lähde: Robin Brockotter, Key design considerations for 3D Printing)

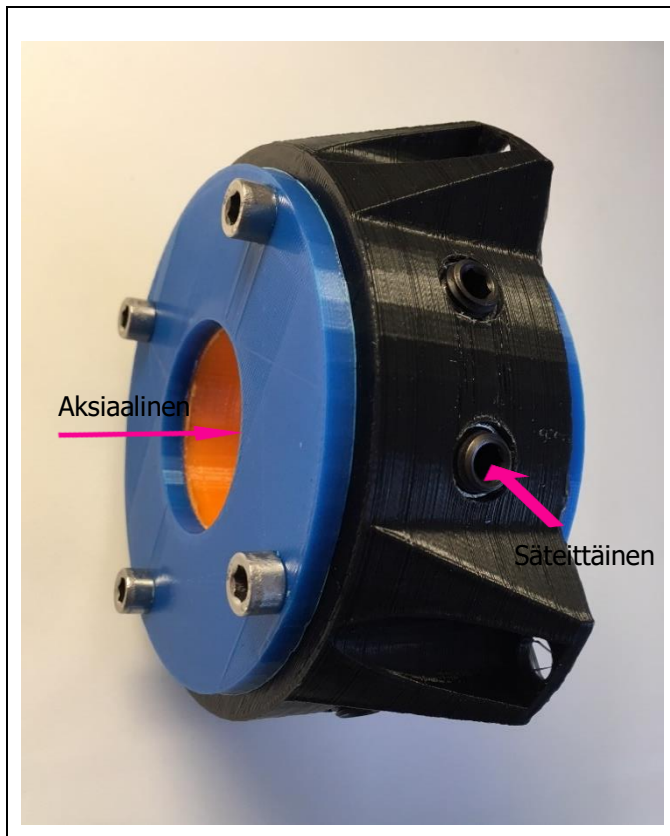
Sääntö	Tuetun pystyseinämän minimikoko	Tuke mattoman pystyseinämän minimi-	Riippuvien muotojen (overhangs) tulostus	Eritasoputosten minimikoko tulostus-suunnassa	Vierekkäisten vaakaseinämien minimikoko	Reikien minimi koko	Tarvittava välys liikkuvien osien välillä	Pienin tulostettava pystygeometria, joka ei sula malliin tai luhistu	Pienin sallittu tulostettavan tapin halkaisija	Saavutettava oleva toleranssi
										
Raja-arvo käytettävälle tulostusprosessille (FDM)	0.8 mm	0.8 mm	45°	Leveys × korkeus 0.6 mm × 0.2 mm	10 mm	D=2 mm	0.5 mm	2 mm	3 mm	0.5% (alaraja ±0.5 mm)
Sovelta minen laakeripesäkonstrukti ossa	isoimpien reikien tukiseinämät	isoimpien reikien tukiseinämät	molemmat holkit	N/A	N/A	öljyn syötöreikä	laakeripesäholkkien välinen rako	N/A	N/A	laakeripesäholkkien välinen rako

4.5.2 Tulostettu laakeripesäkonstruktio

Laakeripesäkonstruktion kokonais tulostusaika oli n. 23 tuntia. Tulostuksessa käytettiin 40%:n täyttöä. Kuvat 16...20 havainnollistavat 3D-mallin tulostusvaiheita ja mallin avulla saatuja tuloksia.



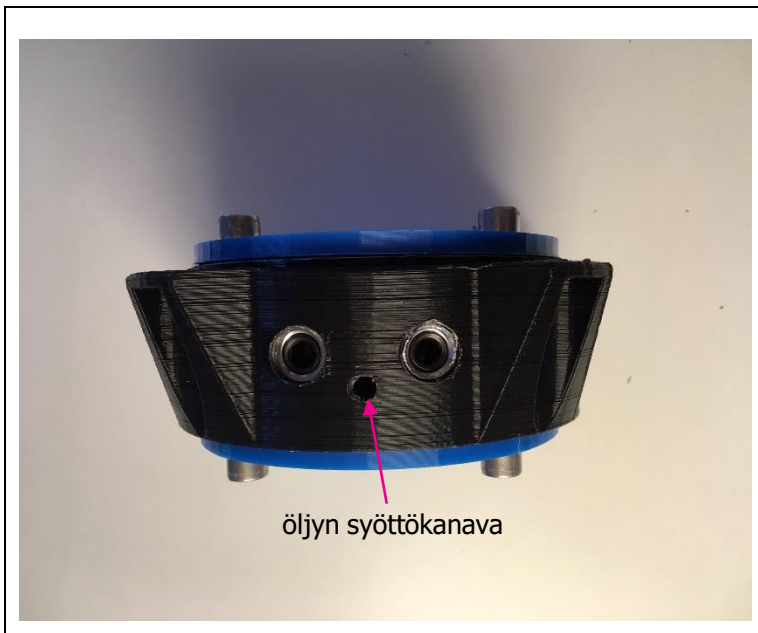
Kuva 16. Laakeripesäkonstruktion 3D-tulostuksen eteneminen vaiheittain.



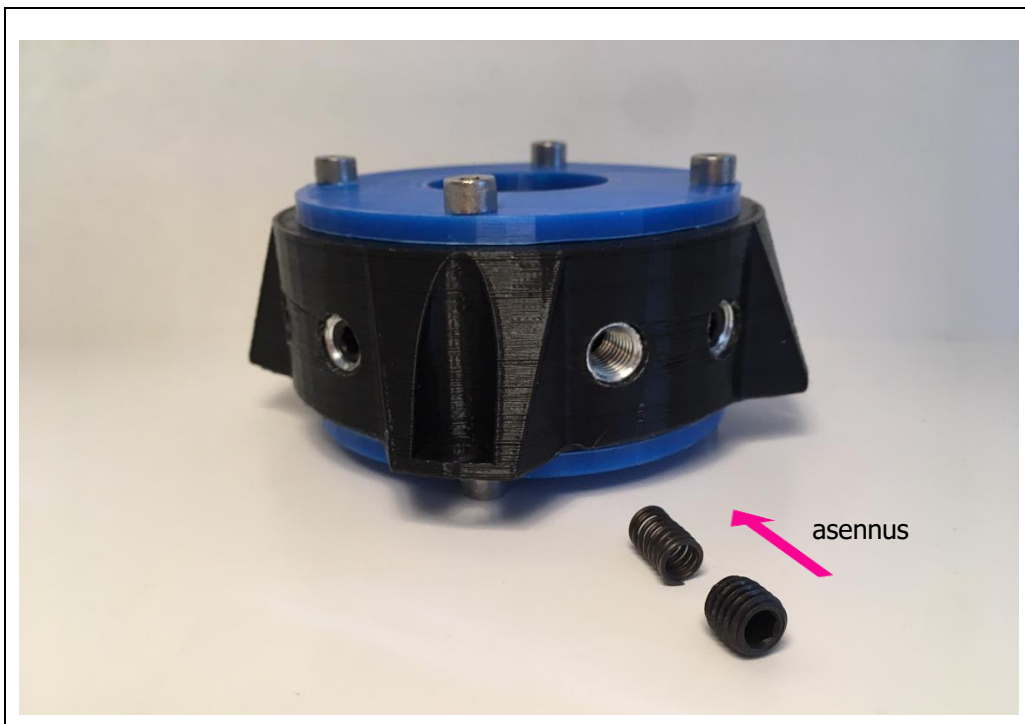
Kuva 17. Laakeripesäkonstruktion asennuksessa on kaksi suuntaa (nuolet): holkkiosa, kannet ja laakeri asennetaan aksiaalisuunnassa ja keskitysjouset sekä niiden säätöruuvit lukitustappeineen säteensuunnassa.



Kuva 18. Laakeripesäkonstruktion räjäytyskuvasta on nähtävissä eri osien geometriat ja eri yksityiskohdat todellisen metallisen koneistettavan rakenteen valmistuksen suunnittelua varten.



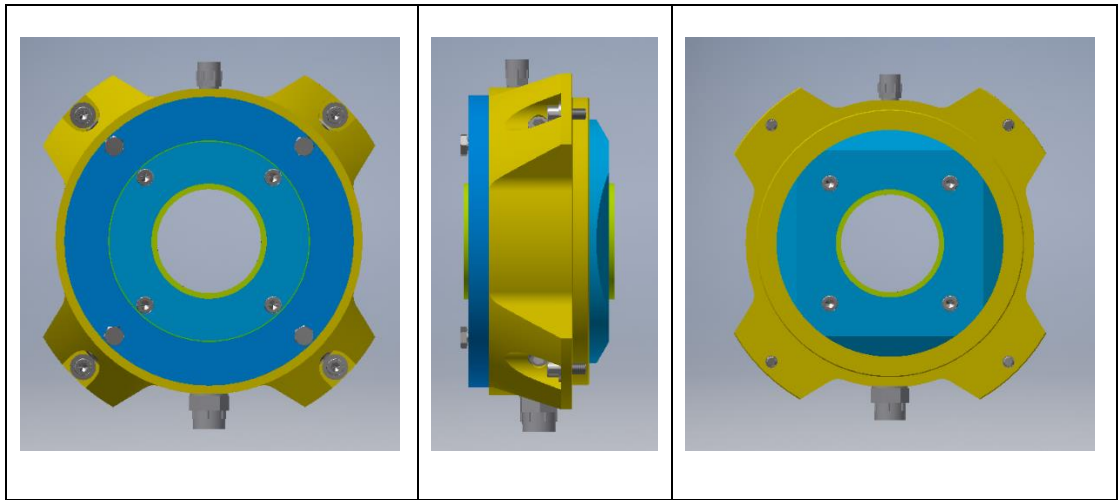
Kuva 19. Vaimennuksessa tarvittavan öljykalvon öljynsyöttö toteutetaan kanavistoa pitkin konstruktion runko-osan (musta) ja holkkiosan (oranssi) välille.



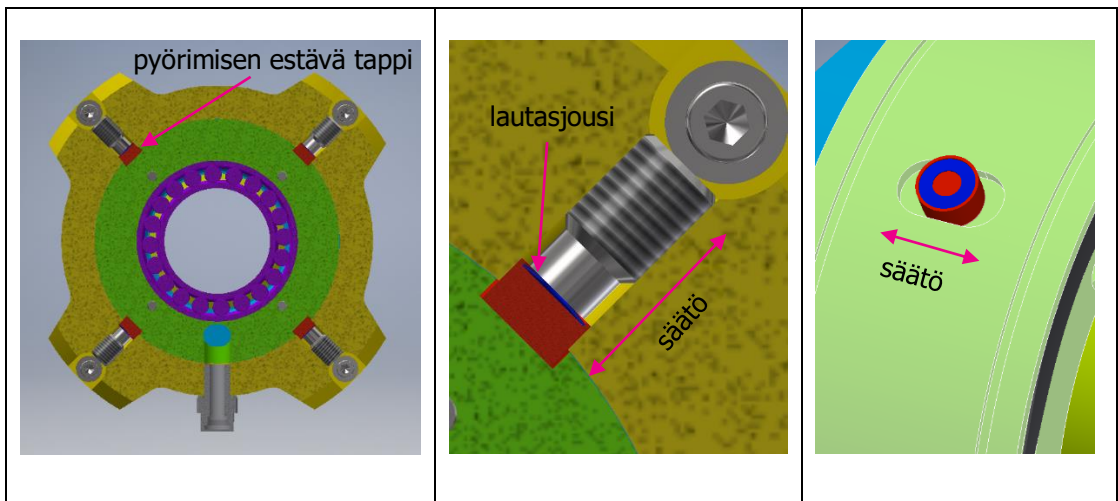
Kuva 20. Keskitysjouset sijoitetaan runko-osaan säteittäisesti ja säätö voidaan toteuttaa kiertetyttyjen reikien sisälle tulevien pidätinruuvien avulla. Reikien kierteytys on toteutettu reikiin asennetuilla kierreholkeilla. Kierreholkit on tehty M10 lyöntimuttereista.

4.6 Toteutettavan SFD-laakeripesän dokumentaatio

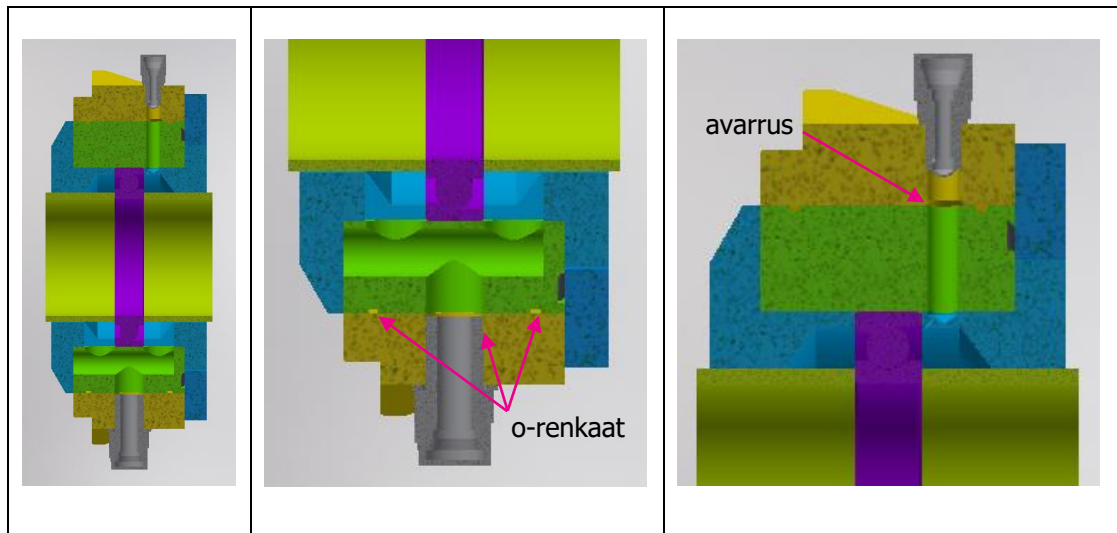
Tulostetun 3D-pienoismallin pohjalta laadittiin todellisia mittoja vastaavan laakeripesäkonstruktion 3D-mallit Inventor-ohjelmalla. Rakeenteellisesti merkittävin ero pienoismallin ja todellisen mallin välillä on jousityypin vaihtaminen kierrejousesta lautasjousiin. Lisäksi jousien lukumäärä on todellisessa mallissa pudonnut kahdeksasta neljään. Myöskin öljytasku ja öljykanavistot on mallinnettu todenmukaisemmin. Todelliseen malliin on myös lisätty akselin pituussuuntainen säätömahdollisuus. Luonnollisesti odellisen mallin mitat on skaalattu mittakaavasuhteen mukaisesti (2:1). Kuvissa 21-23 on esitetty suunnitellun laakeripesäkonstruktion 3D-malli yksityiskohtineen.



Kuva 21. Toteutettavan laakeripesäkonstruktion kuvannot edestä, sivulta ja takaa.



Kuva 22. Toteutettavassa laakeripesäkonstruktiossa on neljä kappaletta lautasjousia kehällä. Pidätinruuvien avulla jousituksen voimakkuutta voidaan säädellä.



Kuva 23. Toteutettavassa laakeripesäkonstruktiossa öljyn syöttö holkkien väliin ja laakerille on toteutettu yhdellä öljykanavalla. Jotta öljy kulkeutuisi myös holkkiosan ja runko-osan väliin, on sitä varten tehty avarrus runko-osaan. Laakerilta poistettavan öljyn poistokanava on toteutettu mahdollisimman valmistusystävällisesti.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Toteutetun laakeripesäkonstruktion suunnittelutehtävän ratkaisun johtopäätöksenä esitetään neljä keskeistä asiakohtaa:

1. Öljykalvovaimentimista on tarjolla useita erilaisia rakennevaihtoehtoja, jotka eroavat toisistaan esimerkiksi keskitys-jousiratkaisun, vaimentimen kehän toteutuksen, käytettävän vaimenninväliaineen tai öljykalvon syöttö- ja tilaratkaisujen osalta. Tarjolla on myös monia kaupallisesti saatavia vaihtoehtoja. Pyrittäessä alentamaan valmistus- ja kokoonpanokustannuksia samalla kun mahdollistetaan vaimentimen säädettävyys, voivat uudet suunnitellut laakeripesäkonstruktiot osoittautua suorituskyvyltään ja kustannuksiltaan kilpailukyiseksi.
2. VDI2221:n mukainen järjestelmällinen suunnittelumetodi yhdistettynä morfologiseen luokitteluun ja arvoanalyysiin soveltuu hyvin asetetun suunnittelutehtävän kaltaisten rakennevaihtoehtojen tuottamiseen ja vertailuun. Toteutetulla arvoanalyysillä saatiin esimerkiksi arvio siitä, mikä on suorituskyvyltään kustannustehokkain laakeripesäkonstruktion rakennevaihtoehto.
3. Keskeinen öljykalvovaimentimen toiminnan ymmärtämisen lähtökohta on laakerointiratkaisua ja sen kuormitustilanteita kuvaava vastekäyrä. Vastekäyrän avulla voidaan määrittää keskitys-jousilta ja vaimentavalta öljykalvolta vaadittavat jousivakio ja vaimennuskerroin.
4. Laakeripesän 3D-tulostetulla prototyypillä on mahdollista havainnollistaa vaimenninöljyn virtaukseen ja vaimenninkalvon taskun toteutukseen liittyviä ilmiöitä ja laskelmia. Tehty prototyyppi havainnollistaa erityisen hyvin keskitys-jousien säätömekanismien toimintaa ja siihen tarvittavien osien asennusta sekä laakeripesän rungon ja holkin valmistettavuutta.

5.1 Jatkotutkimusaiheet

Tämän opinnäytetyöprojektin jälkeen voidaan suorittaa värähtelymittauksia hyödyntäen 3D-tulostettua laakeripesäkonstruktiota. Laakeripesän suunnittelua voidaan jatkaa muodostamalla laakerointiratkaisun liikeyhtälöt ja määrittämällä tarvittava vaimennuskerroin sekä jousivakio halutulle vastekäyrälle. Edellisten lisäksi jatkotutkimusaiheena voisi olla laakeripesäkonstruktion eri tiivistysratkaisujen vertailu ja valinta.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli vertailla VDI2221:n mukaista järjestelmällistä tuotesuunnittelu-metodia ja asiantuntijahaastattelua hyväksi käyttäen suurnopeusmoottoriin valitulle vierintälaakerille soveltuvia periaatteellisia SFD-laakeripesärakenteita (SFD=Squeeze film damper). Tässä opinnäytetyössä käytettiin arvoanalyysia, jonka perusteella valittiin toiminnoiltaan, suorituskyvyltään ja kustannuksiltaan sopivin rakenneratkaisu sovelluskohteeseen. Valitun periaatteellisen ratkaisun perusteella suunniteltiin SFD-laakerointia varten laakeripesän prototyyppi. Morfologista luokitusta hyödyntäen tuotettiin myös pelkistetty 3D-tulostettu pienoismalli laakeripesäkonstruktiosta.

Kirjallisuuslähteiden avulla koottiin tietoa erilaisista laakeripesän öljykalvovaimenninrakenteista. Tiedonhaun perusteella vaimenninratkaisut luokiteltiin passiivisiin ja aktiivisiin vaimentimiin ja näiden sisällä huomio kiinnitettiin erilaisiin keskitys-jousitoteutuksiin. Sovelluskohteen vaatimusten ja tiedonhaun avulla löydetyt teorian yhteensovittamiseksi toteutettiin asiantuntijahaastattelu, jonka avulla täydennettiin suunniteltavan laakeripesäkonstruktion vaatimuslistan yksityiskohtia. Tärkein tulos asiantuntijahaastattelusta oli öljykalvovaimennetun laakeripesäkonstruktion suunnittelussa käytettävän vastekäyrän merkityksen ymmärtäminen. Laakeripesäkonstruktion yksityiskohtaisessa suunnittelussa voidaan apuna käyttää myös kriittisten nopeuksien karttaa (tuennan jäykkyys-kriittinen nopeus-käyrästä).

Varsinainen laakeripesärakenteiden ideointi toteutettiin VDI2221:n mukaisesti ja sen yhteydessä käytetyn morfologisen luokituksen perusteella tuotettiin yli 2000 keskitys-jousiratkaisun toteutusvaihtoehtoa ja yli 2000 kappaletta laakeripesäkonstruktion toimintorakenteen täyttävää rakennevaihtoehtoa. Esikarsinnan jälkeen vertailtujen laakeripesäkonstruktioiden arvostelussa käytettiin arvoanalyysin arviointikriteereinä kokoonpantavuutta, rungon ja pesän valmistettavuutta sekä keskitys-jousien säädettävyyttä. Vertailluista rakennevaihtoehdoista sopivimmaksi jatkokehitystä varten arviointiin rakennevaihtoehto, jossa käytetään neljää lautasjousia pesän kehällä, ja jossa jousille on toteutettu säätömahdollisuus pidätinruuvien avulla.

Toteutettavaa laakeripesäkonstruktiota varten koottiin laakeripesältä vaadittavat mita- ja geometriset toleranssit lukuarvoineen laakerivalmistajien antamien ohjeiden ja suositusten mukaisesti. Tehdyn suunnittelutyön jatkotutkimusaiheena nousi esille ensisijaisesti laakerointiratkaisun liikeyhtälöiden muodostaminen ja vaimennuskertoimen sekä jousivakion laskeminen todellista kuormitusta vastaavalle vastekäyrälle.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Pahl G. Ja Beitz W., Koneensuunnitteluoppi, s. 47, 1990

Hamidreza Heidari , Mohammadreza Ashkooh, "The influence of asymmetry in centralizing spring of squeeze film damper on stability and bifurcation of rigid rotor response", Alexandria Engineering Journal (2016) 55, sivut 3321–3330

Hai Lun Zhou, Guo Quan Feng, Gui Huo Luo, Yan Ting Ai , Dan Sun, "The dynamic characteristics of a rotor supported on ball bearings with different floating ring squeeze film dampers" , Mechanism and Machine Theory 80 (2014), sivut 200–213

H.R. Heidari, P. Safarpour, "Design and modeling of a novel active squeeze film damper", Mechanism and Machine Theory 105 (2016), sivut 235–243

Wei Zhang, Qian Ding, "Elastic ring deformation and pedestal contact status analysis of elastic ring squeeze film damper", Journal of Sound and Vibration 346 (2015), sivut 314–327

Chang Jian, Cai Wan, "Bifurcation and chaos analysis of the porous squeeze film damper mounted gear-bearing system", Computers & Mathematics with Applications, Volume 64, Issue 5, September 2012, sivut 798-812

Adolfo Delgado, Luis San Andrés, "A Model for Improved Prediction of Force Coefficients in Grooved Squeeze Film Dampers and Oil Seal Rings" Journal of Tribology, Volume 132, Issue 3, doi:10.1115/1.4001459, Saatavissa: <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468541>

Adolfo Delgado, "Experimental Identification of Dynamic Force Coefficients for a 110 MM Compliantly Damped Hybrid Gas Bearing" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Volume 137, Issue 7, Paper No: GTP-14-1526; doi: 10.1115/1.4029203 Saatavissa: <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1980717>

Lee H. Goldberg 2012. EV Drive Electronics Evolve to Support Rare Earth-Free Motor Technologies. [Viitattu: 2018-11-11] Saatavissa: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/sep/ev-drive-electronics-evolve-to-support-rare-earth-free-motor-technologies>

Seija Meskanen, Suunnittelijan perusopas, ValuAtlas, sivut 11-15

FAG, Super Precision Bearings, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2016, New edition, sivu 52

Standardi ISO 1101:2017(en) Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out

Robin Brockotter, Key design considerations for 3D Printing. [Viitattu: 2018-11-11] Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing>

Y. Kaneko, R. Kawashita 2017, in Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants. [Viitattu: 2019-01-04] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/critical-speed-map>

Sopanen, Jussi 22.01.2019. Konedynamiikan professori. [Haastattelu.] Lappeenranta: Lappeenranta teknillinen yliopisto.