

STRESSTEST1000

Testikaapin mekaaninen suunnittelu

Ville-Pekka Saarela

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2012

Paperikoneteknologian koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



Author(s) SAARELA, Ville-Pekka	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 16042012
	Pages 57	Language Finnish
	Confidential <input type="checkbox"/> Until	Permission for web publication <input checked="" type="checkbox"/>
Title Stresstest 1000 – Mechanical engineering of a production test cabinet		
Degree Programme Paper Machine Technology		
Tutor(s) KALLINEN, Timo, SÄLLINEN, Pekka		
Assigned by Stresstech Oy		
<p>Abstract</p> <p>The object of the bachelor's thesis was to engineer, assemble and test a production test cabinet for Stresstech Oy. The test cabinet is meant to perform temperature and vibration tests to different types of testing equipment Stresstech Oy produces. The bachelor's thesis project started by defining the testing parameters for vibration and temperature. After they were set the method to reach these parameters was chosen. The temperature test is carried out by a heat blower and a heat cable. Vibration comes from an eccentric electric motor. The 3D-designing software and vibration mechanics were used in engineering.</p> <p>The test cabinet is mounted on top of a sturdy frame via four vibration springs. The vibration springs are chosen so that they isolate vibrations from the frame and from the surroundings. The control cabinet controls the test cabinet by itself or via a computer. Vibration can vary from 30-80 Hz and temperature can rise up to 60 °C from room temperature. Vibration force can be adjusted by changing the eccentricity of the motor. In future there is a possibility to add an external cooler to cool the test cabinet below room temperature and to generate fast temperature changes.</p>		
Keywords Stresstech Oy, vibration, production testing, test cabinet		
Miscellaneous		

Tekijä(t) SAARELA, Ville-Pekka Matias	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 16.04.2012
	Sivumäärä 57	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus () saakka	Verkkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi Stresstest 1000 – Testikaapin mekaaninen suunnittelu		
Koulutusohjelma Paperikoneteknologia		
Työn ohjaaja(t) KALLINEN Timo, SÄLLINEN Pekka		
Toimeksiantaja(t) Stresstech Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, kasata ja testata Stresstech Oy:lle tuotantotestauskaappi, jossa Stresstech Oy:n erityyppisille mittalaitteille suoritettaisiin lämpö- ja värinätestit. Opinnäytetyö aloitettiin määrittelemällä testausparametrit värinälle ja lämmölle, jonka jälkeen niille valittiin toteutustavat. Lämpötilatestauksen käytetään lämpöpuhallinta ja lattialämmityskaapelia, värinä synnytetään epäkeskomootorilla. Opinnäytetyössä käytettiin hyväksi 3D-mallinnusta suunnittelussa ja värähtelytekniikkaa värinän mitoittamisessa.</p> <p>Testikaappi suunniteltiin asennettavaksi värähtelyjousilla jykevän rungon päälle ja jouset suunniteltiin eristämään värinä mahdollisimman hyvin rungosta ja ympäristöstä. Testikaappia ohjataan ohjauskaapilla joko itsenäisesti tai tietokoneen kautta. Testikaappia pystytään tärisyttämään 30-80 Hz taajuudella ja lämpötilaa nostamaan 60 °C-asteeseen huoneenlämpötilasta. Testikaapin värinän voimakkuutta voidaan säätää muuttamalla epäkeskomootorin säätöjä. Testikaapissa on myös mahdollisuus lisätä jäähdytyslaite, jolloin pystytään testaamaan myös alle huoneenlämmön olevia lämpötiloja ja nopeita lämpötilan muutoksia.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Stresstech Oy, värähtely, tuotantotestaus, testikaappi		
Muut tiedot		

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	STRESSTECH OY	6
3	VÄRÄHTELYN PERUSTEET	8
3.1	Värähtelyyn liittyviä peruskäsitteitä	8
3.2	Ekvivalentti jousi	10
3.3	Vaimenematon ominaisvärähtely	10
3.4	Tasapainottamaton roottori	12
3.5	Levyvärähtelyt.....	16
4	TESTATTAVAT MITTALAITTEET	18
4.1	Barkhausenin kohina	18
4.2	Röntgendiffraktio	20
5	TESTIKAAPIN TESTAUSOMINAISUUDET	21
5.1	Testikaapin testien suunnittelu.....	21
5.2	Tärinä.....	23
5.2.1	Tärinän toteutus.....	23
5.2.2	Jousien mitoitus	24
5.2.3	Moottorin mitoitus.....	25

5.3	Lämmityksen suunnittelu	27
6	MEKAANINEN SUUNNITTELU SOLIDWORKSILLÄ.....	28
6.1	Mallinnuksen lähtökohdat.....	28
6.2	Testikaapin alaosa	29
6.3	Testikaapin yläosan runko	31
6.4	Hyllyt	33
6.5	Ovet.....	34
6.6	Kaapin seinien rakenne	35
6.7	Ohjauskaappi	36
7	TESTIKAAPIN KOKOONPANO	36
8	TESTIKAAPIN TESTAUS.....	40
9	POHDINTA.....	43
	LÄHTEET	47
	LIITTEET	48
	Liite 1. Värähtelyyn liittyvät laskut.....	48
	Liite 2. Työkuvat sidontaliinujen ja jousien kiinnityspalasta.....	54
	Liite 3. Testikaapin runko ennen maalausta ja epäkeskomoottori	56
	Liite 4. Valmis testikaappi.....	57

KUVIOT

KUVIO 1. Rollscan 300 BN -mittalaite	6
KUVIO 2. XSTRESS 3000 -keskusyksikkö ja G3-goniometri	7
KUVIO 3. Stresstech Groupin toimipisteet ja edustajat	8
KUVIO 4. Jousien kytkennät	10
KUVIO 5. Vaimenemattoman ominaisvärähtelyn laskentamalli.....	11
KUVIO 6. Epäkeskeisen pyörivän massan värähtelymalli.....	13
KUVIO 7. Vahvistuskerroin	14
KUVIO 8. Siirtyvyys	15
KUVIO 9. Yksi neliölaatan ominaisvärähtelytaajuus	16
KUVIO 10. Monirakeisen materiaalin alkeisalueista magnetoitumissuuntineen	18
KUVIO 11. Barkhausenin kohinan ja hystereesikäyrän muoto kovuuden ja jännityksen mukaan	19
KUVIO 12. Epäkeskomoottorin säätö.....	22
KUVIO 13. Testikaapin ominaistaajuus lisäpainon funktiona	25
KUVIO 14. Maksimiherätevoima pyörimisnopeuden funktiona eri epäkeskon säädöillä.....	26
KUVIO 15. Testikaapin värähtelyn amplitudi epäkeskon eri säädöillä taajuuden funktiona	27
KUVIO 16. Testikaapin alaosa.....	30
KUVIO 17. Pyörän, konejalan ja värähtelyjousen kiinnitys	31

KUVIO 18. Testikaapin yläosan runko	32
KUVIO 19. Hyllyjen rakenne	33
KUVIO 20. Testikaapin ovi	34
KUVIO 21. Räjätyskuva kaapin seinästä	35
KUVIO 22. Ohjauskaappi	36
KUVIO 23. Ohjaus- ja testikaappi	38
KUVIO 24. Katon jälkiasennetut tukipalkit	40
KUVIO 25. Lämmitystesti lämpöpuhaltimen kanssa ilman tuulettimia	42
KUVIO 26. Lämmitystesti lämpöpuhaltimen ja tuulettimien kanssa	42
KUVIO 27. Testikappale liittimien testaukseen	44

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Suorakaidelaatan taivutusvärähtelyn alin ominaistajuuskerroin.....	17
--	----

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja Stresstech Oy, halusi kehittää valmistamiensa mittalaitteiden tuotantotestausta, koska mittalaitteita oli palautunut korjattavaksi reklamaatioina. Mittalaitteissa oli ilmennyt lämpenemisestä johtuvia ongelmia sekä irronneita liittimiä. Mittalaitteet käyttötestataan ennen lähetystä asiakkaille mutta asiakkaalle päästyään ne eivät aina ole enää toimineet. Vikojen pääsyyiksi paljastuivat kuljetuksesta aiheutuva värinä ja mittalaitteiden lämpenemisongelmat.

Stresstech Oy tutki kaupallisia värinä- ja lämpötestausratkaisuja mutta ne kuitenkin osoittautuivat tarkoitukseen ylimitoitetuiksi ja kalliiksi. Tästä syntyi ajatus kehittää oma testikaappi mittalaitteille. Testikaappi päätettiin suunnitella ja valmistaa itse opinnäytetyönä. Stresstech Oy palkkasi testikaapin suunnittelua varten kaksi Jyväskylän ammattikorkeakoulun insinööriopiskelijaa, toisen suunnittelemaan mekaniikan ja toisen suunnittelemaan elektroniikan.

Testikaapin haluttiin tärisyttävän ja lämmittävän mittalaitteita, joten luonnollisesti kaapissa tuli olla kaksi testiä tätä varten. Värinätestillä pyritään simuloimaan kuljetuksesta aiheutuvaa värinää ja varmistamaan, että esimerkiksi liittimet on asennettu oikein ja kunnolla. Lämpötestillä varmistetaan, että mittalaitteen komponentit eivät ole viallisia, vaan kestävät lämpimiäkin olosuhteita. Testausaseman nimeksi tuli Stresstest1000.

Opinnäytetyöni sisältöön kuului testikaapin mekaaninen suunnittelu, testikaapin koonpano, ohjauskaapin rei'ityskuvat sekä Stresstest1000-testausaseman testaaminen. 3D-mallinnus ja työ kuvat tehtiin SolidWorks-ohjelmalla.

2 STRESSTECH OY

Stresstech Oy valmistaa Barkhausenin kohinaan (ks. kuvio 1) ja röntgendiffraktioon (ks. kuvio 2) perustuvia mittalaitteita. Molempiin laitteisiin tehdään asiakkaan tarpeisiin kustomoituja mittauspennkejä eli standeja. Standeja on täysin automaattisia, puoliautomaattisia ja manuaalisia. Lisäksi valmistetaan reiänporausmenetelmään perustuvia mittalaitteita.



KUVIO 1. Rollscan 300 BN -mittalaite (Stresstech 2012)

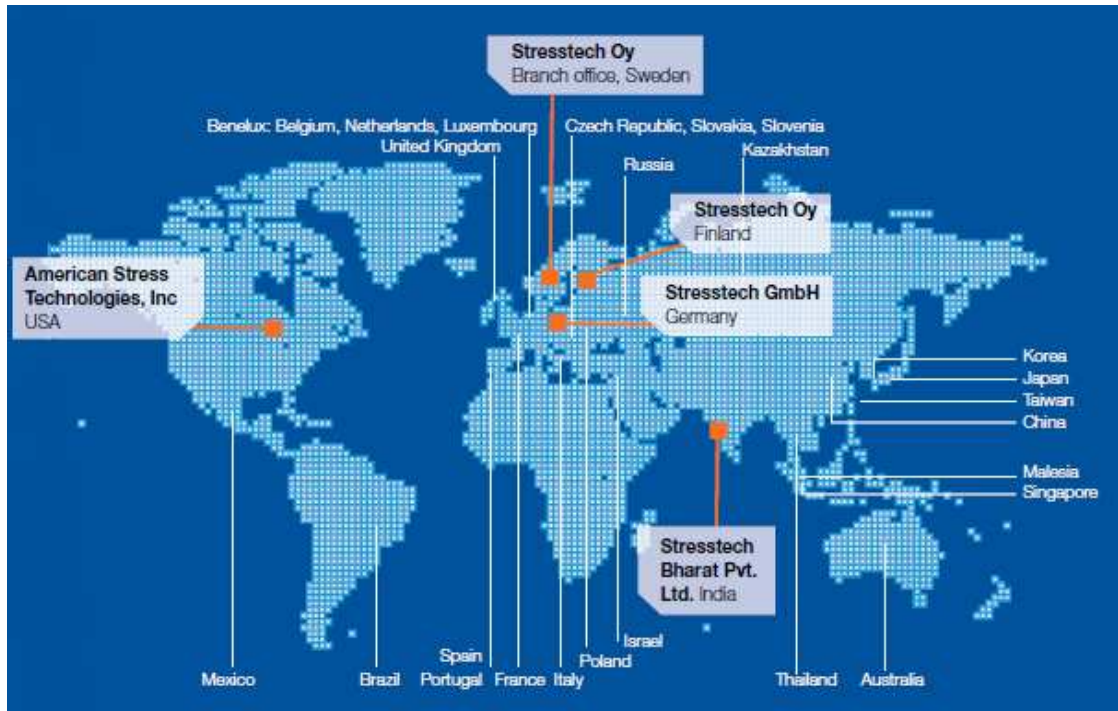
Barkhausenin kohina ja röntgendiffraktio ovat ainetta rikkomattomia menetelmiä, kun taas reiänporausmenetelmä lasketaan ainetta rikkovaksi menetelmäksi. Reiänporausmenetelmän vaikutus osan toimintaan voi olla häviävän pieni, joten sitä sanotaan semi-rikkovaksi menetelmäksi.



KUVIO 2. XSTRESS 3000 -keskusyksikkö ja G3-goniometri (Stresstech 2012)

Barkhausenin kohinalla tutkitaan magneettisia ominaisuuksia ja sitä kautta materiaalin vikoja ja jäännösjännitustasoja monista osista, kuten hammaspyöristä, laakereista, kampiakseleista ja nokka-akseleista. Röntgenlaitteet käyttävät röntgendiffraktiota mittaamaan jäännösjännityksiä ja jäännösausteniittia. Prism-laite perustuu reiänpoorausmenetelmään, jolla mitataan jäännösjännityksiä. Stresstech Oy:n mittalaitteita käyttävät mm. Audi, Boeing, Caterpillar, Cummins, Daimler, Ferrari, Ford, Moventas, SKF ja Volvo. (Stresstech Oy.)

Stresstech Oy on Stresstech Groupin emoyhtiö, ja siihen kuuluvat tytäryhtiöt Stresstech GmbH Saksassa ja American Stress Technologies Inc. Yhdysvalloissa. Stresstech Groupilla on edustajia ympäri maailmaa. American Stress Technologies Inc. perustettiin vuonna 1983. Vuonna 1984 perustettiin Stresstech Oy Vaajakoskelle ja Stresstech GmbH 1999 sekä vuonna 2010 Stresstech Bharat Pvt. Ltd Intiaan (ks. kuvio 3). (Stresstech Oy.)



KUVIO 3. Stresstech Groupin toimipisteet ja edustajat (Stresstech Oy 2012)

Stresstech Oy:ssä oli 2011 vuoden lopussa töissä 53. Tytäryhtiöissä vuonna 2011 työskenteli yhteensä 23 ihmistä. Konsernin liikevaihto vuonna 2010 oli 6,3 milj. €. Emoyhtiö Stresstech Oy:n liikevaihto vuodelta 2010 oli 4,5 milj. € ja arvio vuodelle 2011 5,5 milj. €. Henkilöstön määrä ja liikevaihto kasvaneet voimakkaasti viime vuosina. (Majaneva 2012.)

3 VÄRÄHTELYN PERUSTEET

3.1 Värähtelyyn liittyviä peruskäsitteitä

Värähtely on fysikaalisen systeemin liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä. Tyypillisiä esimerkkejä värähtelijästä ovat heiluri ja kitaran kieli.

Värähtelyä syntyy konetekniikassa pyörivien osien epätasapainon tai liikkuvien osien takia. Värähtelyä käytetään hyväksi esimerkiksi seuloissa ja tärinäkuljettimissa. Mo-

nesti värähtelyt ovat haitallisia värähtelyä aiheuttavalla koneelle, koneen ympäristölle tai niiden toiminnalle. Värähtelyt saattavat johtaa materiaalien väsymisvaurioihin. Koneissa värähtely voi aiheuttaa osien nopeaa kulumista ja liitoselimien löystymistä, josta saattaa seurata toimintahäiriöitä. (Lähtenmäki 2007.)

Värähtelyt pitäisi ottaa huomioon suunnittelussa varsinkin, jos suunniteltavassa asiassa tai suunniteltavan asian läheisyydessä esiintyy pyöriviä osia, ja välttää ominaisuuksia, jotka ovat lähellä mahdollisia herätetaajuuksia.

Värähtelevä systeemi koostuu yleensä potentiaalienergiaa varastoivasta osasta (jousi ja materiaalin kimmoisuus), liike-energiaa varastoivasta osasta (massat ja hitausmomentit) sekä vaimennusosista (vaimennin ja kitka). Vaimentimet muuttavat mekaanisen energian pääasiassa lämmöksi.

Todellisen systeemin värähtelyjen tarkastelua varten pitää systeemistä muodostaa laskentamalli. Mallin pitää kuvata systeemin käyttäytymistä mahdollisimman tarkasti ottamalla huomioon sovelluksen vaatiman tarkkuuden ja käytettävissä olevat resurssit. Tietokoneohjelmilla pystytään mallintamaan monimutkaisiakin systeemejä tarkasti, kun taas käsinlaskettaessa on hyvä pysyä yksinkertaisissa malleissa. (Lähtenmäki 2007.)

Mekaanisen systeemin värähtelyt jaetaan ominaisvärähtelyihin ja pakkovärähtelyihin. Ominaisvärähtely syntyy, kun systeemiä poikkeutetaan tasapainoasemasta ja jätetään värähtelemään. Pakkovärähtely syntyy, kun systeemiin vaikuttaa ulkoisia kuormituksia, jotka ovat usein jaksollisia. Värähtely voi olla vaimennettua tai vaimentamatonta. Vaimentamaton värähtely jatkuu ikuisesti. (Mt.)

3.2 Ekvivalentti jousi

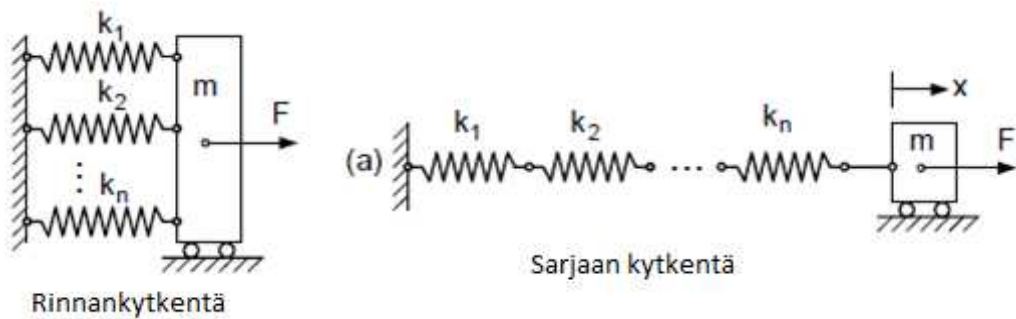
Sovelluksissa esiintyy usein useampi kuin yksi jousi, jotka joudutaan korvaamaan las-
kentamalla varten samanarvoisella ekvivalentilla jousella. Kaksi perustyyppiä ovat
rinnan- ja sarjaankytketyt jouset (ks. kuvio 4). Rinnankytkennässä ekvivalentti jousi-
vakio on

$$k_{ekv} = \sum_{i=1}^n k_i,$$

missä k_i on jousen i jousivakio.

Sarjaan kytkennän ekvivalentti jousivakio on

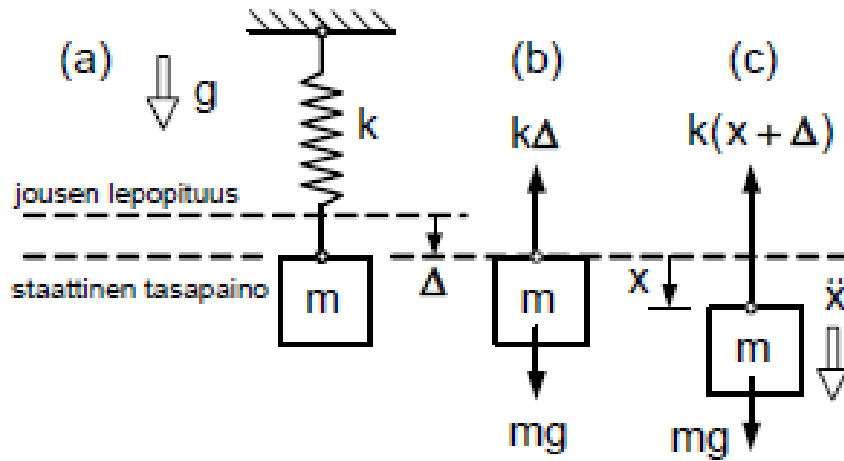
$$k_{ekv} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \right)^{-1}$$



KUVIO 4. Jousien kytkennät (Lähteenmäki 2007)

3.3 Vaimenematon ominaisvärähtely

Opinnäytetyön kannalta oleelliset peruskäsitteet esitellään seuraavaksi yksinkertai-
simmassa värähtelytapauksessa (ks. kuvio 5). Massa m on kiinni alustassa jousella,
jonka jousivakio on k , ja systeemin liikettä kuvataan koordinaatilla x .



KUVIO 5. Vaimenemattoman ominaisvärähtelyn laskentamalli (Lähteenmäki 2007)

Laskentamallista voidaan ratkaista liikeyhtälö muotoon

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

Ominaiskulmataajuuden määritelmä

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Värähtelyn liikeyhtälö on differentiaaliyhtälö, jonka ratkaisu on helposti johdettavissa

$$x(t) = C \sin(\omega t + \psi),$$

missä C on värähdysliikkeen amplitudi ja kulma ψ on vaihekulma. Nämä vakiot ovat ratkaistavissa paikan x_0 ja nopeuden \dot{x}_0 alkuehdoista. Amplitudi

$$C = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega}\right)^2}$$

ja vaihekulma

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{x_0 \omega}{\dot{x}_0} \right)$$

Värähtelyn peruskäsitteitä ovat myös ominaistajuus f

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

ja sen käänteisarvo ominaisvärähtelyaika

$$\tau = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Ominaistajuuden ja ominaiskulmataajuuden välillä on yhteys

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

3.4 Tasapainottamaton roottori

Harmonisesti vaihteleva pakkovoima voi esiintyä pyörivien koneenosien yhteydessä.

Pakkovärähtelyyn liittyy oleellisesti taajuussuhde

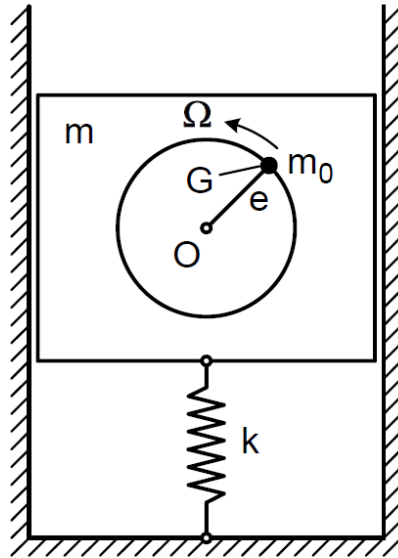
$$r = \frac{\Omega}{\omega},$$

missä Ω on herätteen eli pyörivän osan kulmanopeus.

Jos moottorin roottori ei ole täydellisesti tasapainotettu, on sen massakeskiöllä G epäkeskeisyys e akselin keskipisteeseen O nähden (ks. kuvio 6). Tästä aiheutuu säteen suuntainen pyörivä hitausvoima

$$F(t) = m_0 e \Omega^2 \sin(\Omega t),$$

missä m_0 on roottorin massa. Jos vaakaliike on estetty, on kyseessä yhden vapausasteen värähtely pystysuunnassa.



KUVIO 6. Epäkeskeisen pyörivän massan värähtelymalli (Lähteenmäki 2007)

Värähtelymallista voimme muodostaa liikeyhtälön

$$m\ddot{x} + kx = m_0 e \Omega^2 \sin(\Omega t)$$

Liikeyhtälön ratkaisusta saamme ratkaistua systeemin amplitudin

$$X = \frac{m_0 e \Omega^2}{m(\omega^2 - \Omega^2)}$$

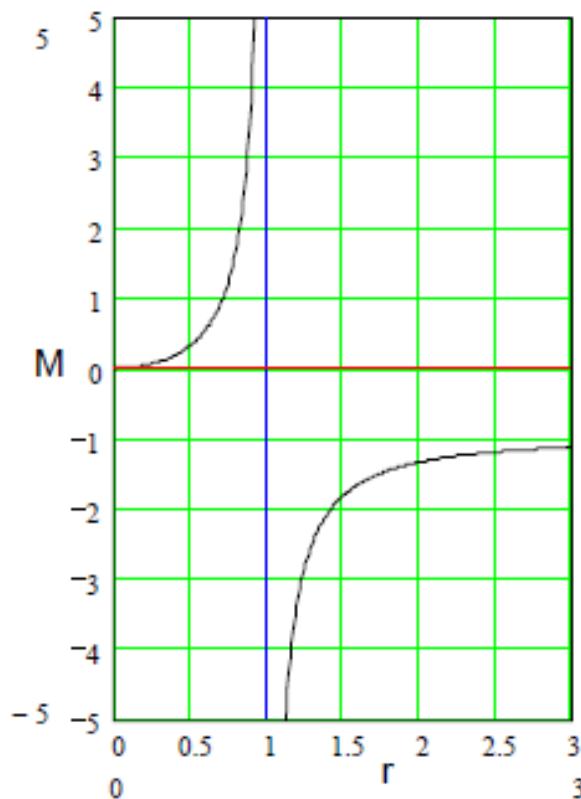
Kun moottorin pyörimistaajuus on suurempi kuin ominaistaajuus, amplitudi on negatiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että kaapin värähtely ja epäkeskeinen massa ovat eri vaiheissa.

Alustaan siirtyvän voiman maksimiarvo

$$F_A = kX$$

Herätteen vaikutusta värähtelyn amplitudiin voidaan kuvata dimensiottomalla suurella nimeltä vahvistuserroin (ks. kuvio 7). Vahvistuserroin M kuvaa systeemin käyttäytymistä eri taajuussuhteilla, käytännössä herätetaajuuden vaihteluihin.

$$M = \frac{mX}{m_0e} = \frac{r^2}{1 - r^2}$$



KUVIO 7. Vahvistuserroin (Lähtenmäki 2007)

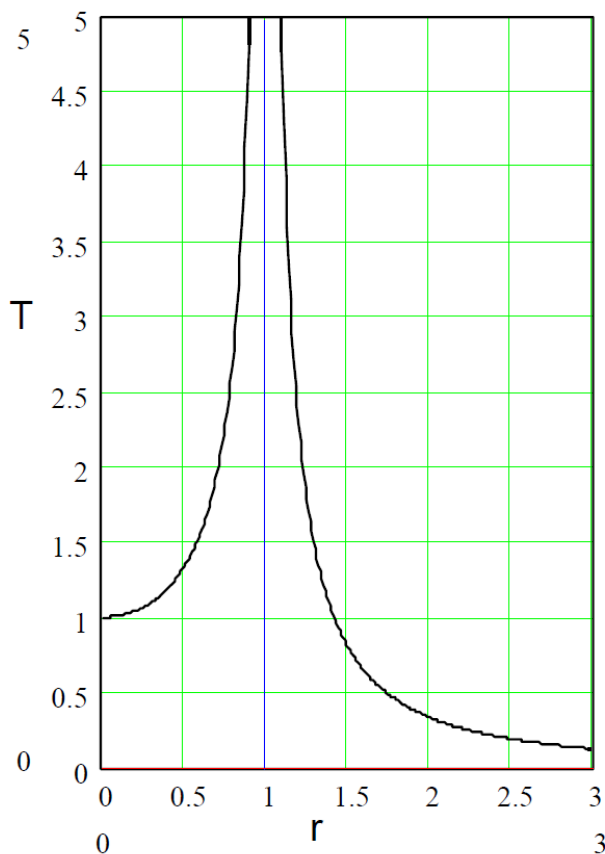
Vahvistuserroimen kuvaajasta nähdään, että pienillä herätetaajuuden arvoilla epätasapainon merkitys on pieni. Kun herätetaajuus on lähellä ominaistaajuutta, syntyy resonanssitilanne, jossa värähtelyn amplitudi lähestyy ääretöntä, mutta käytännössä sen estää systeemin vaimennus tai systeemin rikkoutuminen. Suurilla herätetaaju-

den arvoilla vahvistuserroin lähestyy arvoa -1 ja systeemin amplitudi arvoa -
(m_0/m)e.

Alustaan siirtyvää voimaa voidaan myös tarkastella siirtyvyyden (ks. kuvio 8) avulla. Siirtyvyys kuvaa alustaan siirtyvän maksimivoiman suhdetta herätevoimaan. Siirtyvyys

$$T = \frac{F_A}{F_0} = \dots = \frac{1}{1 - r^2},$$

missä F_A on alustaan siirtyvämaksimivoima ja F_0 on pakkovoiman amplitudi.



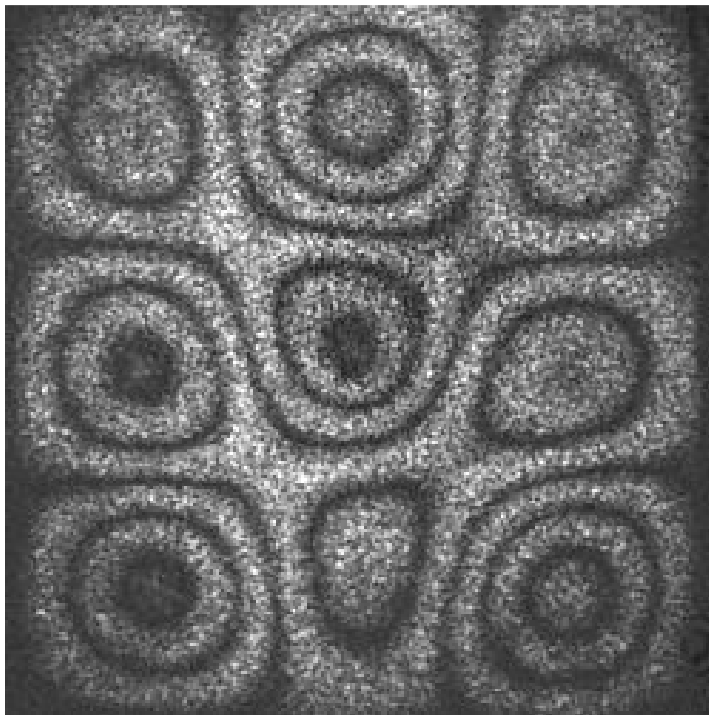
KUVIO 8. Siirtyvyys (Lähtenmäki 2007)

Kuviosta 8 ei kuitenkaan pidä ymmärtää, että taajuussuhteen kasvaessa alustaan siirtyvä voima lähestyisi nollaa. Itse asiassa alustaan siirtyvä voima lähestyy tiettyä

raja-arvoa pyörimisnopeuden kasvaessa ja toisaalta pakkovoiman amplitudi kasvaa pyörimisnopeuden toisessa potenssissa. (Lähteenmäki 2007)

3.5 Levyvärähtelyt

Opinnäytetyöhöni liittyi testikaapin rakenteen takia oleellisesti levyvärähtelyt. Levyjen resonointi, kun herätetaajuus on lähellä levyn ominaistaajuutta, ilmenee ennen kaikkea kovana meluna, mutta saattaa myös aiheuttaa vaurioita rakenteisiin. Levyllä on useita ominaistaajuuksia (esimerkkinä kuvio 9) ja niiden värähtely on erimuotoista. Alin ominaistaajuus on kuitenkin kriittisin, koska usein se aiheuttaa voimakkaimman resonoinnin.



KUVIO 9. Yksi neliölaatan ominaisvärähtelytaajuus (Wikipedia 2012)

Suorakaidelaatan alin ominaiskulmataajuus (puoliaaltojen lukumäärä sekä vaakaa- että pystysuunnassa yksi) saadaan yhtälöstä

$$\omega_n = \frac{\lambda}{a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)'}}$$

missä E on materiaalin kimmokerroin, ρ on tiheys, ν on suppeumakerroin, h on laatan paksuus ja a on pidemmän sivun pituus sekä λ on tuennasta riippuva kerroin (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Suorakaidelaatan taivutusvärähtelyn alin ominaistajuuskerroin (Penala 1999, muokannut Matilainen 2010)

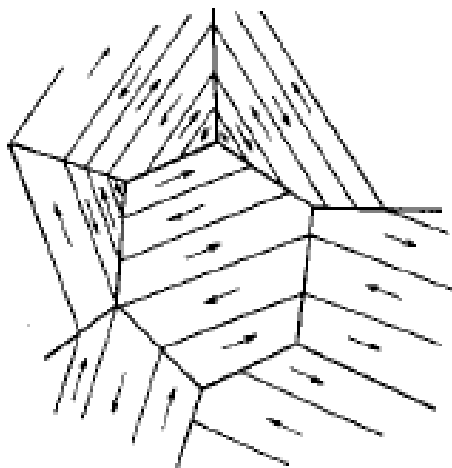
vapaa reuna		vapaasti tuettu		kiinnitetty								
1.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	3,463		0,4	22,35		0,4	22,58			
		2/3	8,946		2/3	22,31		2/3	23,02			
		1,0	13,490		1,0	22,27		1,0	24,02			
		1,5	20,130		1,5	22,21		1,5	26,73			
2,5	21,640	2,5	22,13	2,5	37,66							
2.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	2,692		0,4	3,986		0,4	11,45			
		2/3	4,481		2/3	4,985		2/3	14,26			
		1,0	6,648		1,0	6,942		1,0	19,74			
		1,5	9,850		1,5	11,22		1,5	32,08			
2,5	14,940	2,5	29,91	2,5	71,56							
3.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	3,511		0,4	10,13		0,4	11,75			
		2/3	3,502		2/3	10,67		2/3	15,58			
		1,0	3,492		1,0	11,68		1,0	23,65			
		1,5	3,477		1,5	13,71		1,5	42,53			
2,5	3,456	2,5	18,80	2,5	103,9							
4.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	1,320		0,4	10,19		0,4	16,85			
		2/3	2,234		2/3	10,98		2/3	19,95			
		1,0	3,369		1,0	12,69		1,0	27,06			
		1,5	5,026		1,5	16,82		1,5	44,89			
2,5	8,251	2,5	30,63	2,5	105,3							
5.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	9,760		0,4	22,54		0,4	12,13			
		2/3	9,698		2/3	22,86		2/3	17,37			
		1,0	9,631		1,0	23,46		1,0	28,95			
		1,5	9,558		1,5	24,78		1,5	56,35			
2,5	9,484	2,5	28,56	2,5	145,5							
6.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	15,38		0,4	15,65		0,4	23,44			
		2/3	15,34		2/3	16,07		2/3	25,86			
		1,0	15,29		1,0	16,87		1,0	31,83			
		1,5	15,22		1,5	18,54		1,5	48,17			
2,5	15,13	2,5	23,07	2,5	107,1							
7.		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ		a/b	λ
		0,4	3,854		0,4	15,70		0,4	23,65			
		2/3	4,425		2/3	16,29		2/3	27,01			
		1,0	5,364		1,0	17,52		1,0	35,99			
		1,5	6,931		1,5	21,04		1,5	60,77			
2,5	10,10	2,5	33,58	2,5	147,80							

4 TESTATTAVAT MITTALAITTEET

Opinnäytetyönä laaditussa testikaapissa oli tarkoitus kahta erilaista mittalaitetyyppiä, Barkhausen noise-mittalaitteita ja röntgenmittalaitteita. Testattavia Barkhausen noise-mittalaitteita on neljää eri tyyppiä, R220, R250, R300 (kuvio 1 s. 6) ja R350. Röntgenlaitteista on tarkoitus testata keskusyksikköä sekä goniometrejä G2 ja G3 (kuvio 2 s. 7).

4.1 Barkhausenin kohina

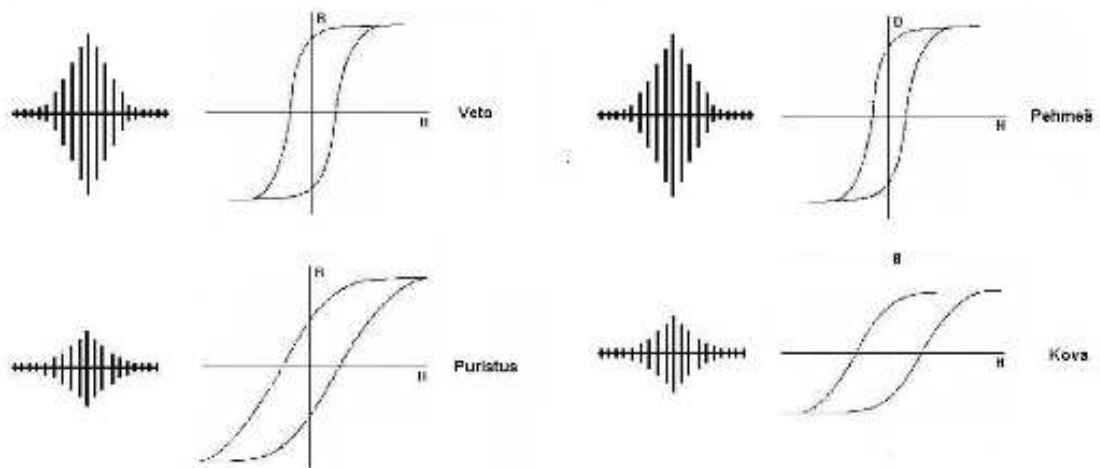
Barkhausenin kohinan löysi saksalainen fyysikko Heinrich Barkhausen vuonna 1919. Barkhausenin kohina perustuu ferromagneettisen (esim. rauta, useimmat teräkset ja koboltti) materiaalin magneettisten alkeisalueiden (ks. kuvio 10), domainien, muutoksiin vaihtuvasuuntaisessa magneettikentässä. Vierekkäisten domainien magneettinen momentti on vastakkaisuuntainen. Domainien välissä on alkioseinä, jota kutsutaan Bloch-valliksi. Magneettinen momentti vaihtaa suuntaansa alkioseinässä asteittain.



KUVIO 10. Monirakeisen materiaalin alkeisalueista magnetoitumissuuntineen (Suoknuuti 2006)

Alkeisalueet pyrkivät asettumaan siten, että seinän normaalin suuntainen magneettinen komponentti minimoituu, jolloin syntyy rakeesta toiseen jatkuvia vyöhykkeitä. Kunkin alkioseinämän kohdalla magneettisuuden suunta vaihtuu, ja kappaleen magneettisuus on resultanttisumma alkeisalueiden magneettisuudesta. (Suoknuuti 2006.)

Barkhausenin noise-mittalaite aiheuttaa kappaleeseen vaihtuvasuuntaisen magneettikentän, ja siitä indusoituu käämille jännite, josta saadaan luettua magneettivuon muutos. Jännitepulssit muodostavat hystereesisilmukan (ks. kuvio 11) ja ne summaamalla saadaan aikaseksi kohinasignaali, jota kutsutaan Barkhausenin kohinaksi. (Stresstech.)



KUVIO 11. Barkhausenin kohinan ja hystereesikäyrän muoto kovuuden ja jännityksen mukaan (Savolainen 2006)

Kovilla aineilla kohina on pientä ja pehmeillä aineilla suurta. Vetojännitys taas suurentaa kohinaa ja puristusjännitys pienentää sitä. Kohina vaimenee eksponentiaalisesti materiaalissa kulkeman matkan funktiona, mikä johtuu magneettikentästä syntyvistä pyörrevirroista. Käytännön sovelluksissa mittaussyvyys on 0,01...1,5 mm riippuen magnetoinnin taajuudesta sekä aineen johtavuudesta ja permeabiliteetistä. Kohinasta ei voi lukea absoluuttisia jännityksen tai lujuuden arvoja, koska kohina on dimensioton luku, joka riippuu vahvistuksesta ja magnetoinnista. Jännityksen ja ko-

vuuden muutokset taas pystytään havaitsemaan kohinan muutoksesta. Mittaustuloksia vääristää kappaleessa oleva mahdollinen jäännösmagnetismi. (Suoknuuti 2006.)

4.2 Röntgendiffraktio

Röntgendiffraktio on ilmiö, jossa monokromaattinen röntgensäteily heijastuu materiaalin kidetasoista vahvistaen säteilyä. Tätä ilmiötä kuvaa Braggin laki

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

missä d on hilatasojen etäisyys, θ on tulevan säteen ja diffraktoituvan hilatason välinen kulma, λ on röntgensäteen aallonpituus ja n on aallonpituuden moninkerta. Röntgensäteilyn aallonpituus on vakio, joka riippuu röntgenputken anodissa käytetystä metallista.

Isotrooppisessa kiteisessä materiaalissa kiteet ovat sattumanvaraisessa orientaatioissa toisiinsa nähden. Jännityksettömässä tilassa kiteen hilatasojen välinen etäisyys on materiaalikohtainen vakio. Kappaleessa vaikuttava jännitys muuttaa kidetasojen välisiä etäisyyksiä, mikä on havaittavissa heijastuvan säteen intensiteettiinkin siirtymisenä. (Suoknuuti 2006.)

Hilatasojen etäisyys d saadaan mittaamalla heijastuskulma θ , jossa heijastuvalla säteellä on maksimi. Veto ja puristus muuttavat niiden kohtisuoraa etäisyyttä d myötämän Δ :n verran. Vedon tai puristuksen myötämä Δ on verrannollinen kimmomoduuliin, ja Hooken lain mukaan normaalijännitys $\sigma = E \Delta$. (Röntgen-diffraktometri paljastaa jäännösjännitykset 1995.)

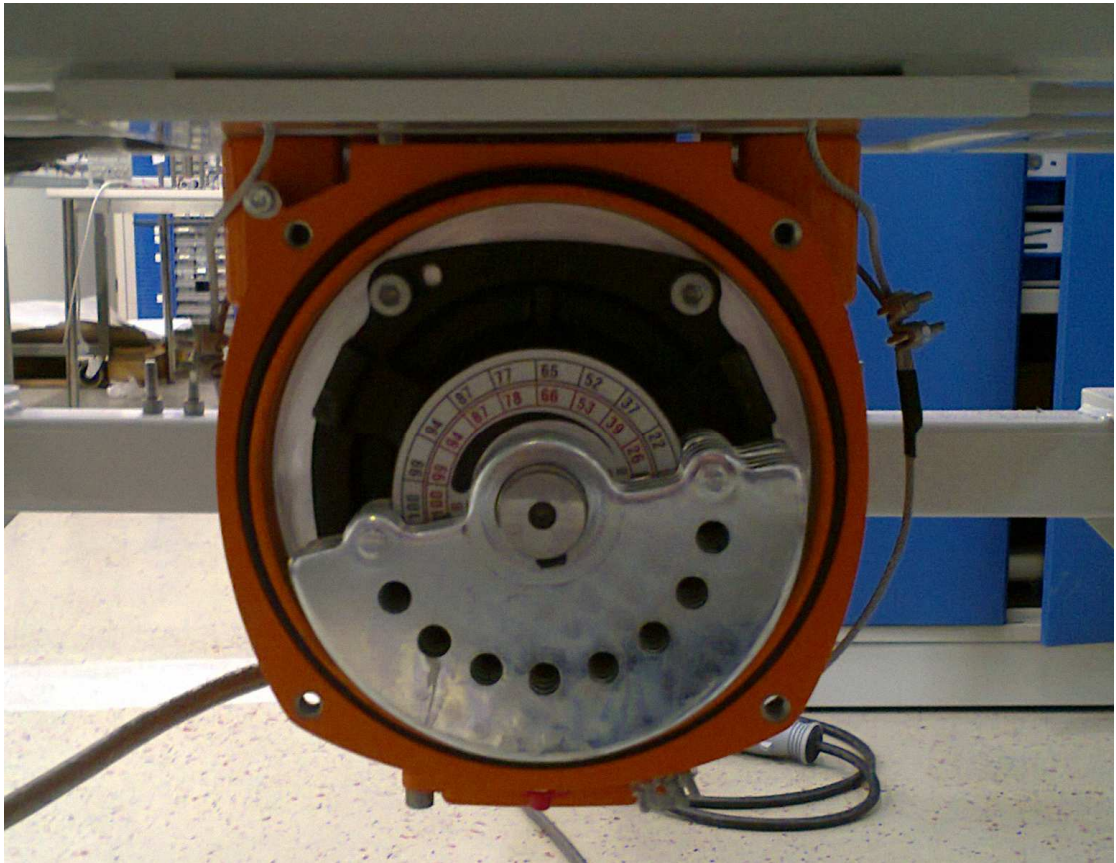
Röntgendiffraktiomenetelmä soveltuu vain pintajännitystilojen mittauksiin, koska röntgensäteily tunkeutuu metalleihin vain 10 - 30 μm syvyyteen. Tästä huolimatta mittaustapa soveltuu hyvin esimerkiksi väsymiskestävyyden tarkasteluun.

5 TESTIKAAPIN TESTAUSOMINAISUUDET

5.1 Testikaapin testien suunnittelu

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella testikaappi, jolla voidaan tärisyttää ja lämmittää mittalaitteita. Stresstech Oy oli tehnyt esiselvityksen tuotantotestausta varten ja sitä käytettiin suunnittelun pohjana. Esiselvityksessä oli suunniteltu 5 – 500 Hz taajuusalueesta ja 40 °C:n lämpötestistä. Taajuusalue ei kuitenkaan ole mahdollista toteuttaa epäkeskomoottorilla, koska sen suositeltu maksimi pyörimistaajuus on 50 Hz. Toisaalta esiselvityksessä tarkastellut värinätestit on suoritettu yksinkertaisessa värähtelylevyssä, eikä monimutkaisemmassa testikaapissa. Jälkimmäisessä tapauksessa epäkeskomoottorin herätevoima aiheuttaa todella monitaajuisia värähtelyä mittalaitteisiin, johtuen testikaapin osien itsenäisestä värähtelystä. Lämpötestin maksimi lämpötilaa päätettiin nostaa 50 °C:eseen, jotta mittalaitteita voidaan kuormittaa hiukan korkeammassa lämpötilassa kuin mitä esiselvityksessä esitettiin.

Kuviossa 12 on moottorin pääty, josta näkyy moottorin akselissa kiinni olevat painot, joilla säädetään värinän voimakkuutta. Painoja voi vapaasti liikuttaa ja epäkeskeisyyden prosenttiarvo luetaan asteikolta. Lukitus tapahtuu purevalla aluslevyllä ja mutterilla. Molemmat moottorin päädyt ovat identtiset.



KUVIO 12. Epäkeskomoottorin säätö

Lämpörasitustetesti on yksinkertainen: testattavat mittalaitteet käynnistetään ja kaapin sisälämpötila nostetaan noin 40 °C:eseen ja lämpötila pidetään tasaisena testin ajan. Lämpötila on varsin maltillinen, joten lämmitys hoidetaan lattialämmityskaapelilla. Myös mittalaitteet lämmittävät kaappia, joten seiniin kiinnitetetään tuuletin viilentämään sisäilmaa tarvittaessa. Kaapin sisälle asennetaan kaksi tuuletinta kierrättämään ilmaa ja siten tasaamaan lämpötilaeroja.

Tärinätestien on tarkoitus simuloida kuljetuksesta ja normaalista käyttöön liittyvästä siirtelystä aiheutuvia tärinöitä. Tuotantotestauksen esiselvityksen perusteella tarkoituksena on havaita mikäli jokin ruuvi, liitin tai muu kiinnike on huonosti asennettu. Tärinätestissä on oleellista testata mittalaitteita eri taajuuksilla maltillisella tärinän voimakkuudella. Tärinän pitää olla maltillista, koska liian suuri tärinä saattaa rikkoa toimiviakin komponentteja.

5.2 Tärinä

5.2.1 Tärinän toteutus

Epäkeskomoottori valittiin siten, että siinä on epäkeskeisyyden säätö. Moottorin pyörimisnopeutta ohjataan taajuusmuuntimella eli invertterillä. Epäkeskon säätöä tarvitaan, koska moottorin pyöriessä nopeampaa epäkeskeisestä pyörimisestä syntyvä voima kasvaa pyörimisnopeuden toisessa potenssissa. Laaja taajuusalue myös tarkoittaa sitä, että epäkeskomoottoria joutuu säätämään useammin sopivalle tärinän voimakkuudelle herätevoiman luonteesta johtuen. Tämän takia taajuusalueeksi valittiin 30–80 Hz.

Testikaapin tärinä haluttiin eristää ympäristöstä mahdollisimman hyvin, ja tämän takia testikaapin yläosa lepää alaosan päällä jousien varassa. Jousien ansiosta alustaan siirtyvä voima on vähäistä, kun systeemi viritetään oikein, ts. valitaan parametrit k ja m niin, että herätetaajuus on ominaistajuuden yläpuolella. Kaapin massan suhde moottorin epäkeskeisyyteen määrittää pitkälti sen, millaista värähtelyä moottorin pyöriminen aiheuttaa. Suuri kaapin massa suhteessa moottorin epäkeskeisyyteen yhdessä systeemin matalan ominaistajuuden kanssa johtaa värähtelyn pieneen liikkeeseen suunnitellulla taajuusalueella. Tällöin myös alustaan siirtyvät voimat ovat pieniä.

Jousien mitoituksessa oletettiin, että vaimennusta ei ole, mikä ei tietenkään pidä paikkaansa, mutta jousien vaimennus voidaan olettaa pieneksi. Vaimennusta ei otettu laskennassa huomioon, koska systeemin vaimennus tulee lähinnä jousien sisäisestä vaimennuksesta ja ilmanvastuksesta. Lisäksi vaimennuksen oikean arvon määrittäminen olisi ollut turhan työlästä saavutettavaan hyötyyn nähden. Pienenkin vaimennuksen vaikutus systeemiin täytyy kuitenkin huomioida. Vaimennus pienentää resonanssikohdan amplitudia mutta ei vaikuta paljoa amplitudiin suurilla pyörimisnopeuksilla. Toisaalta vaimennus kasvattaa alustaan siirtyvää voimaa suhteessa herä-

tevoimaan suurilla pyörimisnopeuksilla. Kaikki opinnäytetyössä tehdyt laskut ovat liitteessä 1.

5.2.2 Jousien mitoitus

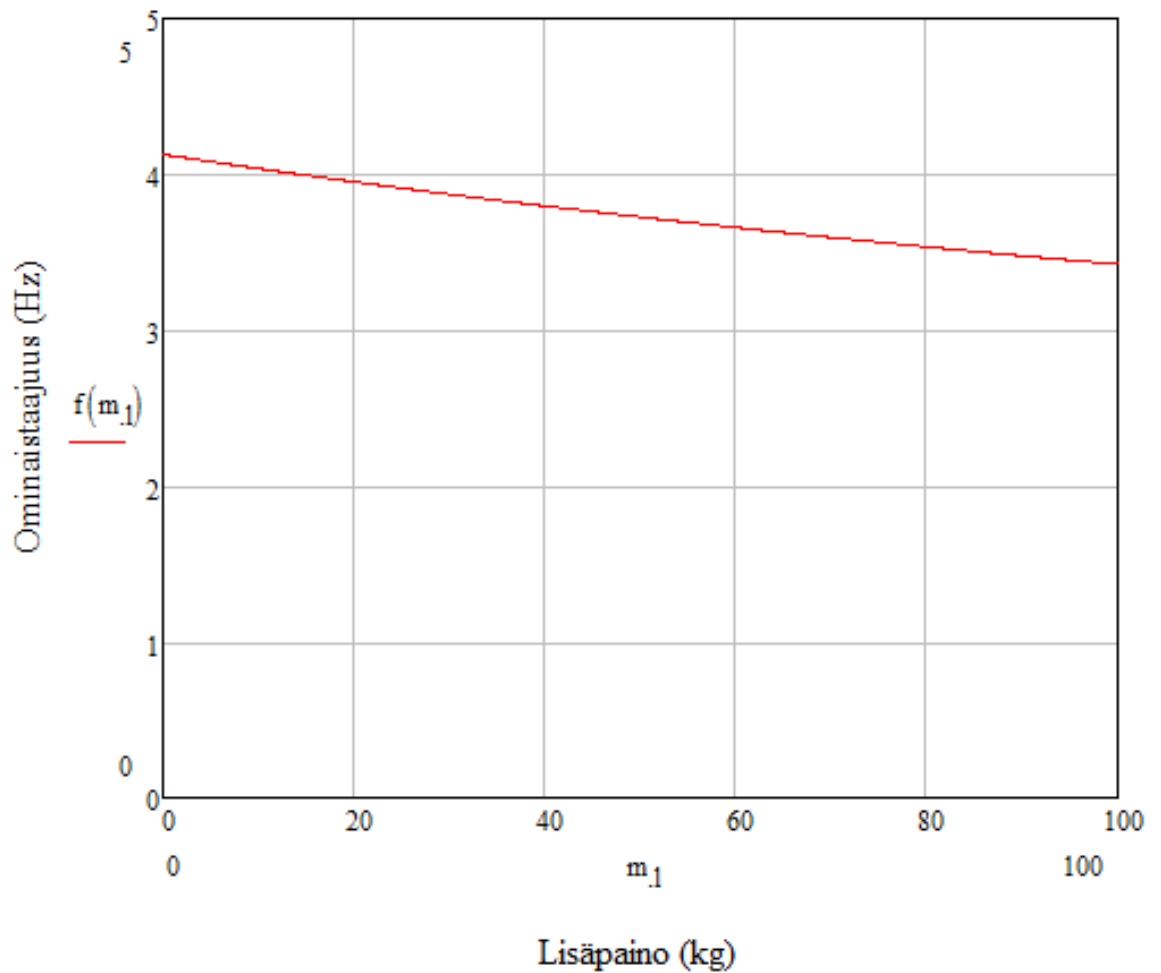
Tärinäkaapista muodostettiin yksinkertaistettu malli (ks. kuvio 5 s. 11), jossa massa-jousi-systeemiin vaikuttaa heräte, tässä tapauksessa pyörivä epäkeskeinen massa. Laskentamalli on siinä mielessä virheellinen, että värähtelysuuntaa ei ole rajoitettu, kuten mallissa. Laskentamalli täytyy kuitenkin tehdä käytäntöä varten eikä toisin päin. Laskentamallin tapaukseen olisi päästy käyttämällä kahta epäkeskomoottoria, jotka pyörivät vastakkaisiin suuntiin, jolloin herätteen vaakakomponentit kumoavat toisensa. Joka tapauksessa tätä mallia pystyttiin käyttämään kohtuullisen tarkasti jousien ja moottorin mitoituksessa.

Värähtelyn amplitudia ja siirtyvyyttä (ks. kuvio 8 s. 15) lähemmin tarkastellessa huomataan, että kun herätteen taajuus kasvaa, amplitudi lähestyy raja-arvoa m_0e/m . Siirtyvyyden kuvaajasta nähdään, että siirtyvyys pysyy lähes vakiona, kun r kasvaa resonanssikohtan oikealla puolella, vaikka herätevoima kasvaa suuremmaksi koko ajan. Toisaalta resonanssikohtan vasemmalla puolella amplitudi ja alustaan siirtyvä voima muuttuvat, nopeasti mikä tekee värähtelystä vaikeamman hallita. Näiden syiden takia päätettiin jouset mitoittaa siten, että ominaistaajuus on reilusti käyttötaajuuksien alapuolella.

Ensimmäiseksi valittiin ominaistaajuudeksi 5 Hz, ja koska kaapin painon suuruusluokka oli jo tiedossa, pystyttiin tälle taajuudella laskemaan jousivakio, mihin värähtelyjousilla pitäisi päästä. Kaapin yläosa päätettiin kiinnittää alustaan neljällä rinnan kytkeytyllä jousella. Tarkoitus oli löytää värähtelyjousi, jossa jousivakio olisi lähellä laskennallista arvoa mutta ei suurempi, koska suuremmalla jousivakiolla ominaistaajuus kasvaisi.

Odotetusti valitut jouset ovat kohtalaisen järeitä, koska pelkkä kaappi ilman testattavia mittalaitteita painaa yli 200 kg. Seuraavaksi tarkasteltiin jousien staattista kestoaa,

sallittua maksimikuormaa ja -venymää ja sitä, miten ominaistajuus muuttuu, kun testikaappiin laitetaan lisää massaa (ks. kuvio 13).



KUVIO 13. Testikaapin ominaistaajuus lisäpainon funktiona

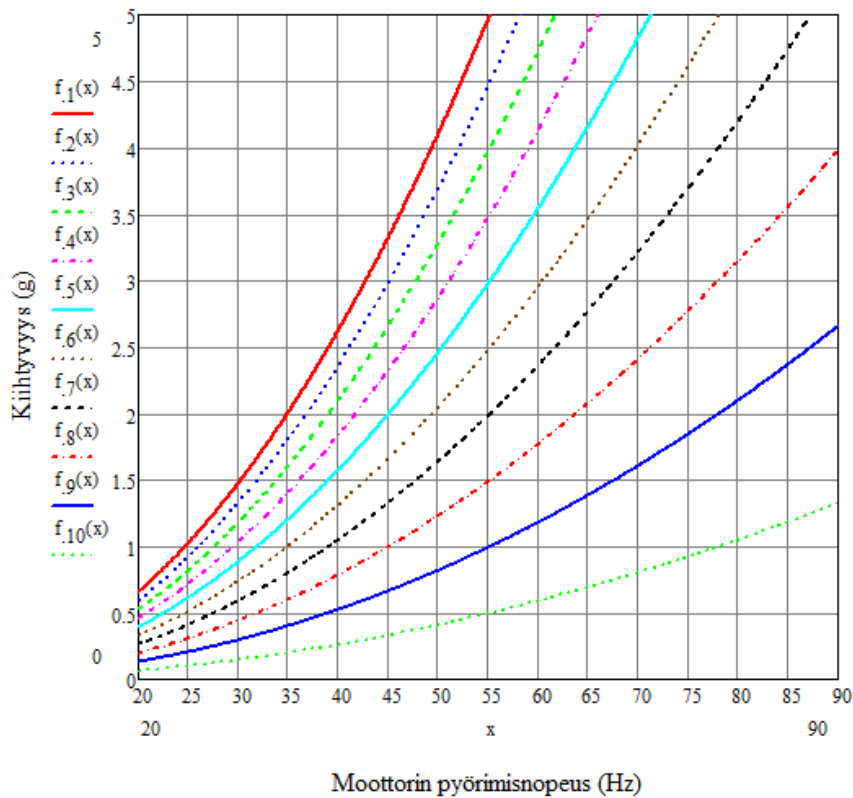
5.2.3 Moottorin mitoitus

Moottorin mitoituksessa piti ottaa huomioon, että saadaan tarpeeksi voimakas värinä koko käyttötaajuusalueelle. Tätä varten piirsin kuvaajan (ks. kuvio 14) maksimi herätevoimasta eri epäkeskomoottorin säädöillä. Paras vaihtoehto tarkoitukseen oli

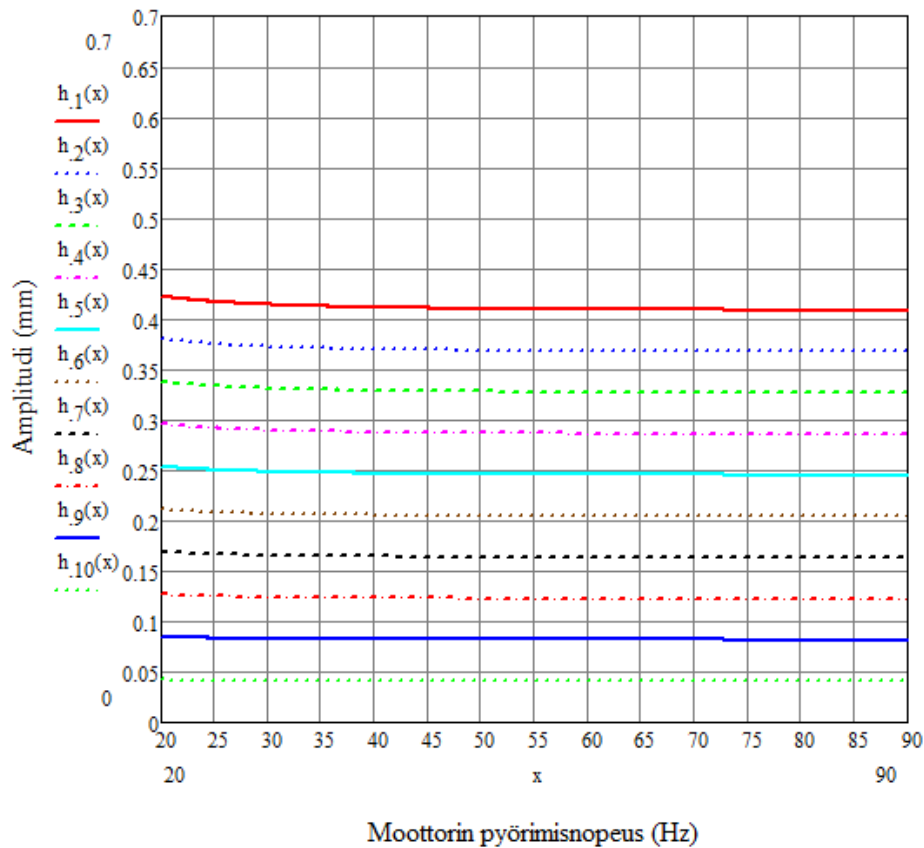
moottori 110 kgmm epäkeskeisyydellä. Herätevoiman amplitudi skaalattuna putoamiskiihtyvyyteen on

$$a = \frac{EF_{max}}{W} = \frac{Em_0e(2\pi f)^2}{mg},$$

missä E on epäkeskon säätö välillä 0,1 – 1, f pyörimistaajuus hertseinä, m on värähtelävän osan massa ja g putoamiskiihtyvyys. Kuvioissa 14 ja 15 yhtenäinen punainen viiva tarkoittaa 100 %:n epäkeskon säätöä ja tiheä pisteinen vihreä pisteiviiva 10 %:n säätöä ja muut viivat siltä väliltä 10 % välein.



KUVIO 14. Maksimiherätevoima pyörimisnopeuden funktiona eri epäkeskon säädöillä



KUVIO 15. Testikaapin värähtelyn amplitudi epäkeskon eri säadoillä taajuuden funktiona

Värähtelyn amplitudista nähdään, että alustaan siirtyvä voima pysyy lähes koko käyttöalueella. Liitteessä 1 on tarkasteltu siirtyvää voimaa tarkemmin, mutta käyttöalueella se on noin 70 N. Tämä tarkoittaa sitä, että jouset kestävät myös dynaamisen rasituksen.

5.3 Lämmityksen suunnittelu

Testikaapin lämmitystä varten kaapin sisäseinämille kiinnitettiin lattialämmityskaapeleita, jota ohjataan lämpötila-antureiden avulla. Testattavat mittalaitteet ovat lämpötestin aikana päällä, joten ne tuottavat myös lämpöä kaappiin. Jotta lämpötila saataisiin leviämään mahdollisimman tasaisesti kaapin sisälle, sijoitettiin testikaappiin kaksi tuuletinta sekoittamaan ilmaa. Lisäksi seinissä on yhteensä kahdeksan tuuletinta vii-

lennystä varten. Kaappiin lisättiin tulevaisuutta varten optio jäähdytyskoneen putkia varten.

Lämpökaapelin mitoitusta varten olisi hyvä laskea karkea arvio lämmitystehosta, mutta käytännössä sen mallintaminen olisi hyvin monimutkaista. Lämmityskaapeli lämmittää sitä ympäröivän ilman lisäksi kaapelin kiinnikkeitä ja kaapin rungoa johtamalla ja säteilemällä. Lämmennyt ilma taas nousee ylöspäin. Kaiken kaikkiaan tämä perustuu monimutkaisiin fysiikan ilmiöihin, joten mitoittamisessa tyydyttiin sivistyneeseen arvioon ja pyrittiin laittamaan tehokkain lämmityskaapeli, jonka järkevästi saatiin asennettua testikaapin seinille.

Lattialämmityskaapeleiden teho on n. 10...25 W/m. Yhdelle seinälle menee arviolta noin 8 m kaapelia, mutta on kätevää hoitaa lämmitys yhdellä kaapelilla. Sopiva pituus olisi noin 20 m, jolloin lämmitysteho jää noin 500 W:n tuntumaan. Lämmityskaapelin toimivuutta päätettiin kuitenkin kokeilla ja testikaappiin asennettiin 425 W:n kaapeli. Lämmityskaapeli on hyvä levittää seinille mahdollisimman tasaisesti, joilloin kaappikin lämpenee tasaisesti.

Varasuunnitelmana oli asentaa tarvittaessa suuritehoinen lämpöpuhallin kaapin nopeampaa lämmitystä varten. Mittalaitteet tuottavat noin 70 W lämpöä päällä ollessaan, joten lämpötilan noustessa kaappia pitää jäähdyttää, jos halutaan pysyä kohde-
lämpötilassa.

6 MEKAANINEN SUUNNITTELU SOLIDWORKSILLÄ

6.1 Mallinnuksen lähtökohdat

Stresstech Oy:n testausaseman esiselvityksen perusteella testikaapilla piti pystyä testaamaan kolmea BN-mittalaitetta samanaikaisesti. Ennen projektin aloitusta oli selvitetty alustavat mitat, mutta ne käytiin vielä uudestaan läpi mittaamalla mittalait-

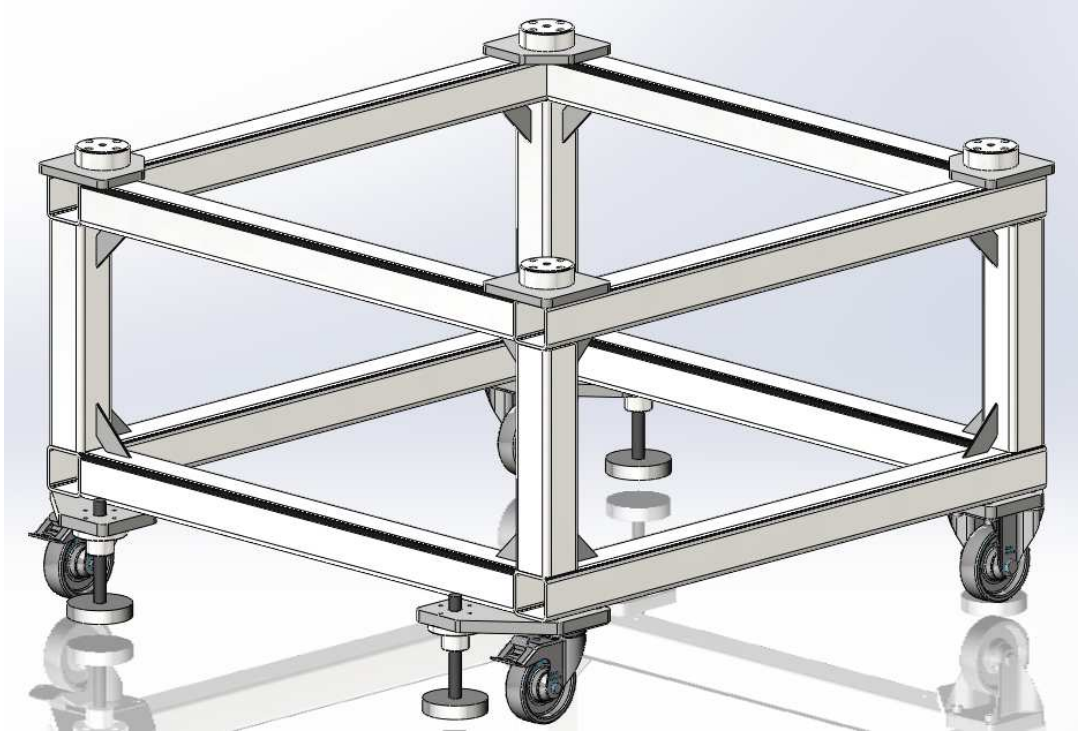
teet ja sovittamalla mittalaitteiden 3D-malleja alustavan kaappimallin sisälle. Röntgenlaitteiston testaaminen kuitenkin vaatii suuremman tilan kuin kolmen BN-mittalaitteen vaatima tila. Tämän takia testikaapin kokoa hiukan kasvatettiin, alkupe-
räisistä mitoista vain korkeutta muutettiin. Muutoksen takia testikaapissa pystytään testaamaan neljää BN-mittalaitetta tai röntgenkeskusuksikköä ja goniometriä. Testikaapin piti myös olla helposti liikuteltavissa. Mahdollisia testaushäiriöitä varten testikaapin ovista piti nähdä läpi ja hyllyjen piti olla liikuteltavat.

Mekaaniseen suunnitteluun Stresstech Oy:ssä käytetään SolidWorks 3D-mallinnusohjelmistoa. SolidWorks oli minulle uusi tuttavuus, mutta onneksi se on hyvin samankaltainen CATIA:n kanssa, joten perusominaisuudet opin nopeasti. Erilaiset lujuustekniset laskut, esimerkiksi pulttiliitosten tarkastelu, hitsausseamujen mitoitus jätettiin tekemättä ja testikaapin eri osat ja liitokset suunniteltiin reilusti varman puolelle, koska optimoinnille ei ollut tarvetta ja saavutettu hyöty ei olisi ollut ajan käytön kannalta järkevää. Testikaapista ei kuitenkaan haluttu tehdä liian raskasta, vaan pyrittiin suunnittelemaan rakenteet kevyiksi mutta jäykiksi.

Opinnäytetyön osat valmistettiin suurimmaksi osin eri alihankkijoilla. Kaikki levyosat tilattiin alihankkijalta samoin kuin runkojen hitsaus ja maalaus. Koneistusta vaativat osat, kuten mm. jousien kiinnityspalat, hyllyjen liukupalat ja konejalkojen kiinnityspalat, tehtiin Stresstechin omassa konepajassa. Lämmityskaapeli, salvat ja muut ns. rautakauppatavarat ostettiin kaupasta. Kokoamistyön tein itse.

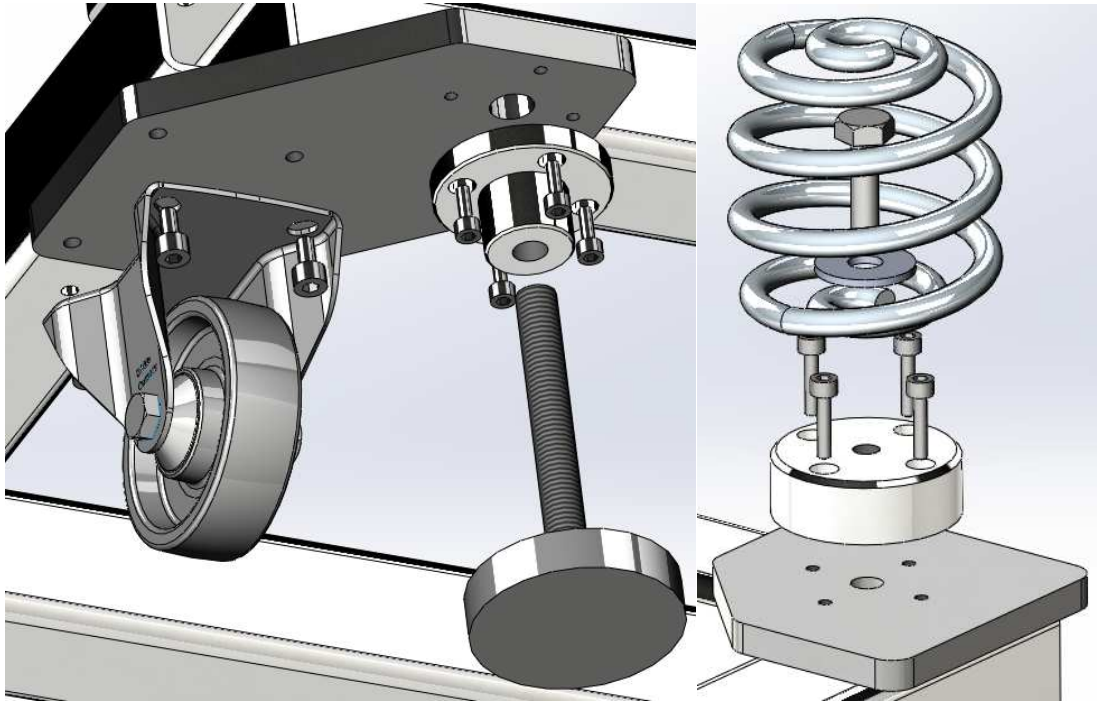
6.2 Testikaapin alaosa

Testikaapin alaosa (ks. kuvio 16) päätettiin rakentaa 60 mm x 60 mm x 4 mm:n neliöputkipalkeista hitsaamalla. Palkkien väliin hitsattiin myös tukipaloja. Tukipalojen paikka ei tosin ole optimaalinen, paras paikka niille ei olisi ollut keskellä vaan palkkien reunalla, jolloin palkin seinä ottaisi kuorman vastaan tukevammasta suunnasta.



KUVIO 16. Testikaapin alaosa

Konejalan ja pyörän kiinnitystä (ks. kuvio 17) varten hitsattiin rungon pohjaan 16 mm:n teräslevy. Konejalkaa varten sorvattiin kiinnityskappale, joka liitettiin levyyn pulttiliitoksella. Kiinnityskappaleella saadaan rasitus jaettava pidemmälle kierteen matkalle ilman, että koko levyä tarvitsisi paksuntaa. Konejaloissa on kumipohjat vai-
mentamassa tärinää.



KUVIO 17. Pyörän, konejalan ja värähtelyjousen kiinnitys

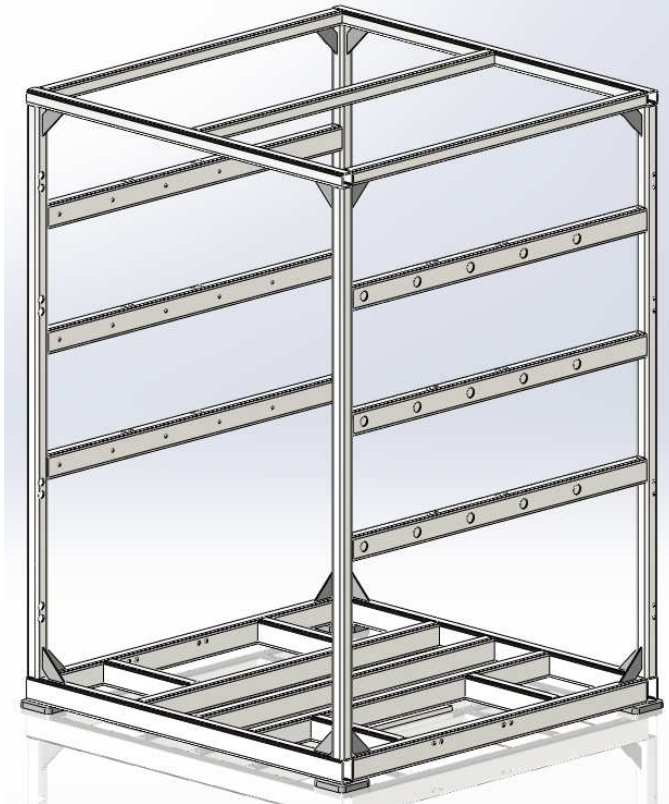
Värähtelyjousi kiinnitetään pultilla kiinnityspalaan, joka on pulteilla kiinni runkoon hitsatussa levyssä. Testikaappia voidaan liikutella renkailla, mutta testauksen ajaksi se nostetaan konejalkojen varaan paikalla pysymisen varmistamiseksi.

6.3 Testikaapin yläosan runko

Testikaapin yläosasta (ks. kuvio 18) päätettiin tehdä hitsattu rakenne siitäkin huolimatta, että hyllyjen käytettävyys voi vaarantua, jos hyllyjen palkit eivät osu täysin kohdakkain. Hitsatut rakenteet elävät hiukan hitsauksen aikana, mistä syystä pystypalkit eivät ole täysin suorassa. Tämä kuitenkin pyrittiin ottamaan huomioon hyllyjen kiskomekanismia suunnitellessa.

Pohjaan hitsatun moottorin kiinnityslevyyn lisättiin vielä tukipalat estämään ns. vetelemistä, joka aiheuttaisi kiinnityslevyn vääntymistä. Tämä haluttiin estää, koska moottori pitää asentaa mahdollisimman tasaiselle alustalle. Tukipalat toisaalta estivät alkuperäisen suunnitelman mukaisen pulttiliitoksen estäen mutterin kiristämisen

asennettaessa. Tätä varten koneistettiin mutterit nuorrutusteräksestä, mitkä hitsattiin levyyn kiinni. Tämä muutos helpotti moottorin asentamista paikoilleen, mutta aiheutti lisää työtä koneistajille.



KUVIO 18. Testikaapin yläosan runko

Kaapin pohja on rakenteen kriittisin osa, koska värinämoottori rasittaa sitä eniten. Pohjaan valittiin 50 mm x 30 mm x 3 mm:n putkipalkkia, myöskin hyllyjen palkit tehtiin tästä kookkoommasta putkipalkista. Muut palkit tehtiin 30 mm x 30 mm x 3 mm:n putkipalkista.

Jousien kiinnitystä varten hitsattiin vastaavanlaiset levyt rungon pohjaan, kuin mitä käytettiin alaosan rungossa. Alaosan rungossa ne tosin ovat hiukan suuremmat, jotta jouset saadaan asennettua kohtisuoraan.

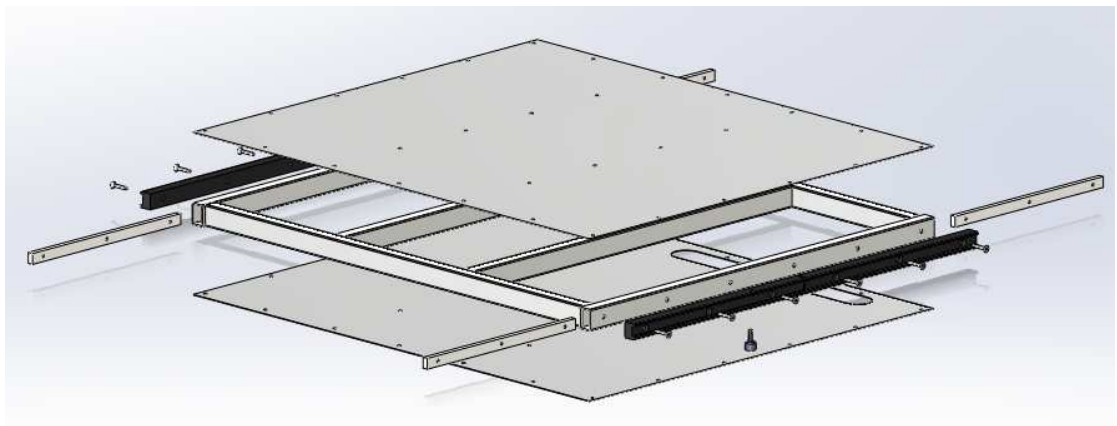
Palkkeihin porattiin ennen hitsausta monenlaisia kiinnitysreikiä mm. hyllyjen kiskoille, kuormaliinojen kiinnityspaloille, ovien saranoille ja ennen maalaamista käytettävi-

en pesunesteiden poistoa varten. Reikien poraus olisi onnistunut myös hitsauksen jälkeen, mutta se olisi ollut hankalampaa, aikaa vievää ja jossain kohtaa melkein mahdotonta.

Ennen runkojen jauhemaalausta osat pestiin maalaamossa. Hitsausaumojen ja reikien läpi saattaa pesussa päästä nestettä ja pesureiät porattiin estämään nesteen jääminen palkkien sisälle.

6.4 Hyllyt

Hyllyistä (ks. kuvio 19) piti saada tukevat, jotta värähtelyt välittyisivät mittalaitteisiin ilman turhaa vaimennusta mutta niiden pitäisi olla myös kevyet liikuttaa. Hitsatulla 30 mm x 20 mm x 1,5 mm:n putkipalkkirungolla saatiin tukevuutta ohuellakin seinämän vahvuudella ja oikealla rakenteen valinnalla. Ylä- ja alapuolelle niitattiin 1 mm:n teräslevyt. Alapuolen levyssä on vetoaukot.



KUVIO 19. Hyllyjen rakenne

Hyllyt voidaan ottaa pois kaapista ja ne liukuvat 3 mm teräskiskossa muovipalojen varassa. Muovipalat ovat pulteilla kiinni hyllyssä ja vastakappaleena toimii kiinnityslatta. Yhdessä muovipalassa on sormiruuvi hyllykiskon uraa varten. Uralla estetään hyllyjen ulosvetäminen ja työntäminen liian kauaksi vahingossa. Hyllyt pysyvät tässä paikallaan, kun mittalaitteet kiinnitetään runkoon kiinni sidontaliinoilla.

6.5 Ovet

Testikaappiin suunniteltiin läpinäkyvät etu- ja takaovi (ks. kuvio 20), jotka ovat identtiset. Oven runko on hitsattu putkipalkkirakenne, jossa sisempi kehä on matalampaa putkea. Tämän sisennyksen ansiosta sisäpuolen polykarbonaattilevy uppoaa oven sisälle eikä lisää oven paksuutta. Vaakaputket keskellä lisäävät rakenteen jäykkyyttä.

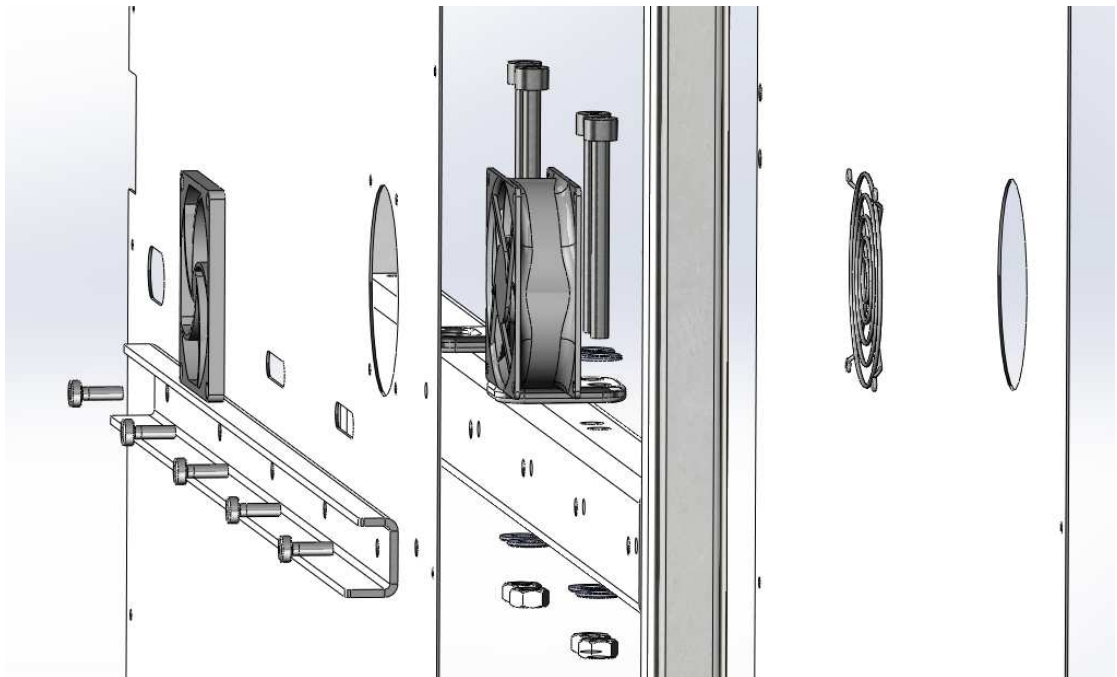


KUVIO 20. Testikaapin ovi

Ovien läpinäkyvyys toteutettiin polykarbonaattilevyllä eli pleksillä. Pleksi laitettiin rungon molemmin puolin, jotta väliin jäävä ilma toimisi eristeenä eikä oviin tarvitsisi tehdä erillistä eristystä. Pleksi kiinnitettiin runkoon liimalla ja leveäkantaisilla popniiteilla minimoimaan asennuksessa helposti syntyvät halkeamiset.

6.6 Kaapin seinien rakenne

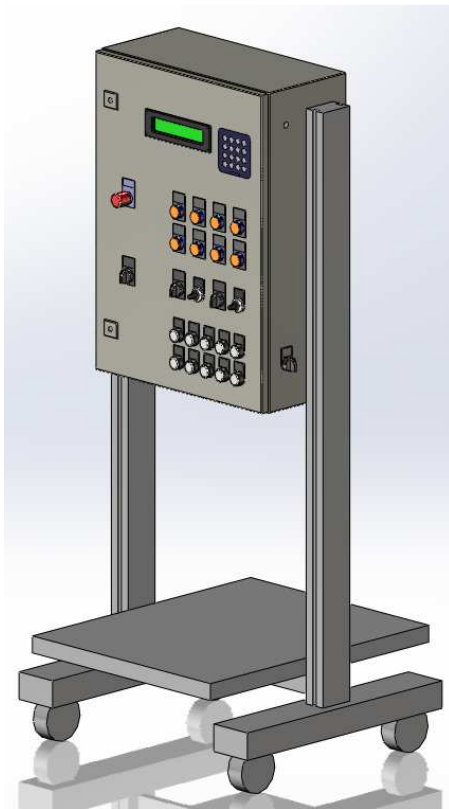
Yläosan seinät (ks. kuvio 21) toteutettiin 1 mm teräslevyllä ja niiden reiät ja muodot laserleikattiin alihankkijalla. Levyjen kiinnitys tapahtuu vetoniiteillä ja ruuveilla. Sisäseinät sekä ylä- että alapelti kiinnitetään vetoniiteillä. Ulkoseinät kiinnitettiin itsepo-raavilla ruuveilla kiinni, jotta ne saadaan helpommin irroitettua, jos esimerkiksi joku tuulettimista hajoaa.



KUVIO 21. Räjätyskuva kaapin seinästä

6.7 Ohjauskaappi

Testikaapin ominaisuuksia ohjaamaan tarvittiin ohjauskaappi (ks. kuvio 22), joka oli myös opinnäytetyön aiheena samaan aikaan. Elektroniikka sijoitettiin sähkökaappiin, johon tehtiin rei'itys-kuva läpivienneille, painonapeille, LCD-näytölle ja näppäimistöille. Testikaappia voidaan ohjata pelkällä ohjauskaapilla mutta myös tietokoneella ohjauskaapin kautta. Sähkökaappi asennettiin liikuteltavaan standiin.



KUVIO 22. Ohjauskaappi

7 TESTIKAAPIN KOKOONPANO

Opinnäytetyöhön sisältyi myös kaapin kokoonpano. Luonnollisesti kokoonpanoon kiinnitettiin huomiota jo suunnitteluvaiheessa, mutta pieniä vastoinkäymisiä tulee aina, eikä kaikkea mahdollista voi ottaa huomioon. Suurimmat ongelmat syntyivät

liian tiukoista toleransseista suhteessa hitsauksen toleransseihin. Käytännössä runko ei ollut täysin suorakulmainen särmiö, kun taas laserilla leikatut pellit olivat hyvinkin täsmällisiä. Vaikka tämä otettiin huomioon suunnitteleamalla pelteihin pelivaraa täytyi peltejä hiukan sovitella ja muutamaa reikää vähän muokata, jotta ne osuisivat kohdakkain rungon reikien kanssa.

Kasaaminen aloitettiin kiinnittämällä kaapin sisäpellit runkoon kiinni. Kiinnitys tehtiin popniiteillä ja väliin laitettiin myös silikonimassaa vaimentamaan hiukan peltien värähtelyjä. Pelteihin oli laserilla työstetty popniitin kokoiset reiät, mutta runkoon porattiin reiät vasta kasaamisvaiheessa. Jos reiät olisi porattu alihankkijalla ennen hitaamista, ne eivät olisi osuneet kohdakkain peltien reikien kanssa. Sisäpeltien päälle kiinnitettiin hyllyjen kiskot pulttiliitoksella.

Hyllyjen toimivuus haluttiin todeta heti alkuvaiheessa, jotta mahdolliset korjaustoimenpiteet voisi tehdä. Hyllyjen runkoon kiinnitettiin pellit vastaavalla tavalla kuin kaapin runkoonkin. Runkoon kiinnitettiin myös liukupalat pulttiliitoksella ja hyllyjä kokeiltiin runkoon. Ensimmäisellä yrityksellä hyllyt eivät mahtuneet kiskoihin, koska runko olikin hitsauksesta johtuen noin 5 mm kapeampi kuin mitä suunniteltu ja siihen oli varattu vain 3 mm. Hyllyt saatiin mahtumaan ja toimimaan, kun liukupaloista työstettiin 2 mm pois per pala. Korjauksen jälkeen hyllyt toimivat jopa paremmin kuin mitä odotettiin, muovi liukui todella hyvin maalattua metallipintaa vasten raskaammallakin kuormalla.

Tässä vaiheessa epäkeskomoottorin säätöä varten tarvittavat avaimet saapuivat ja moottoria uskallettiin kokeilla pienillä epäkeskoasetuksilla. Jouset kiinnitettiin runkoon ja kaappi nostettiin alarungon päälle. Riskien minimoimiseksi moottorin epäkesko säädettiin minimille ja moottori nostettiin paikoilleen. Koekäynnistys sujui hienosti, mutta tärinä oli odotetusti vaimeaa minimiasetuksilla ja säätöä laitettiin isommalle. Suuremmilla asetuksilla tärinä ei ollut mahdollisuuksien suurta, mutta tärinän taajuus aiheutti resonanssia osassa pelleistä, mikä taas ilmeni meluna. Tärinä myös ir-

roitti liukupalojen pultit, mikä aiheutti hyllyjen jumiumisen kiskojen pultteja vasten.

Liika into siis kostautui, koska hyllyt olivat vasta testausvaiheessa, eikä pultteja oltu vielä liimattu kiinni. Toisaalta tästä ongelmatilanteesta parannettiin kiskojen rakennetta senkaamalla reiät estämään vastaava tilanne tulevaisuudessa. Testissä kuitenkin selvisi, että moottorin ja jousien mitoitus oli onnistunut, vaikka tärisytettävä massa oli noin puolet lopullisesta.



KUVIO 23. Ohjaus- ja testikaappi

Seuraava askel oli lämmityskaapelin asentaminen tasaisesti mutkittelevaan S-kuvioon kaapin seinille. Lämmityskaapelissa oli 425 W lämmitystehoa ja pituutta 20 m. Alun perin mitoitettuna seinille sai mahtumaan noin 16 m kaapelia ilman kaapelin taivuttamista liian jyrkästi. Lisäämällä yksi mutka lisää seinille ja pohjaan saatiin koko kaapeli käytettyä. Kaapelia testattiin asentamisen jälkeen ja kaapeli lämpeni reiluun 50 °C-asteeseen, mikä vaikutti riittävän lähtötavoitteisiin. Tässä vaiheessa ei vielä voitu arvioida miten kaapeli lämmittää valmista kaappia, koska seiniä ei ollut vielä eristetty ja ovet puuttuivat.

Tuulettimia jouduttiin odottamaan yllättävän kauan, mikä aiheutti kokoonpanon pyssäytymisen, koska lämpöeristeet oli helpointa asentaa ulkopeltien kanssa samaan aikaan tasaisen puristuksen saamiseksi. Lämpöeristeinä päädyttiin käyttämään ns. sauna-Satua, koska sitä on helposti saatavilla ja sitä on helppo käsitellä. Sauna-Satua sai noin neliömetrin levyinä, sitä oli myös helppo leikata mattopuukolla. Lämpöeristeet kiinnitettiin liimalla sisäpeltiin kiinni, ja koska eriste oli 30 mm paksua, kuin myös rungon putkipalkkikin, seinistä saatiin jämäkkä rakenne kun eriste yhdessä liiman kanssa hiukan ahdistaa peltejä. Lämpöeriste pyrittiin levittämään tasaisesti siten, että lämpökaapelin alla olisi aina eristettä. Ulkopellit kiinnitettiin muista pelleistä poiketen poraruuveille, jolloin ne olisi helpompi irrottaa tarvittaessa, esimerkiksi jonkun tuulettimen rikkoutuessa.

Ovien kasaamisessa piti olla erityisen varovainen, koska pleksiä poratessa on riskinä muovin lohkeaminen, mutta suuremmilta lohkeamisilta vältyttiin. Ovien kahvat kiinnitettiin pulttiliitoksella rungon sisälle hitsattuun kiinnityslattaan. Ovet päätettiin kiinnittää runkoon neljällä saranalla per ovi, jotta kuormat jakautuisivat useammalle saranalle ja ovi ei myöskään heiluisi niin paljoa saranoiden välyksistä johtuen. Runkoon asennettiin tiivistenauhaa eristämään lämpöä ja vaimentamaan oven tärähtelyä oven ollessa kiinni. Ovet lukitaan säädettävällä salvalla, joka on asennettu runkoon kiinni ruuviliitoksella.

8 TESTIKAAPIN TESTAUS

Testikaapille suoritettiin huolelliset testaukset ennen kuin mittalaitteita uskallettiin laittaa testiin. Erityistä huolta aiheutti miten pellit ja pleksit resonoisivat ja aiheuttaisivat melua. Myös kaapin lämmittäminen ja mittalaitteiden kiinnitys olivat korkealla testattavien asioiden listassa.

Tärymoottoria testattiin jo testikaapin kasauksen alkuvaiheessa, kun jouset olivat paikallaan ja epäkeskomoottoria pystyttiin säätämään. Kaapin liike oli hyvä mutta huolestumista aiheutti peltien resonointi, varsinkin katon pellissä. Katon pellin resonointia saatiin parannettua asentamalla katolle kaksi tukipalkkia (kuvio 24), jolloin pellin ominaistaajuus kasvoi ja melu resonanssilanteessa pieneni. Sivupelleissä samanlaista huolta ei ollut, koska niiden rakenne on huomattavasti paksumpi välissä olevan eristeen takia. Pohjan levyssä ominaistaajuudet ovat huomattavasti korkeampia, koska tiukka pohjapalkitus pienentää värähtelevää pinta-alaa ja levyn ominaistaajuus riippuu levyn sivujen pituuksista ja reunojen tuennasta.



KUVIO 24. Katon jälkiasennetut tukipalkit

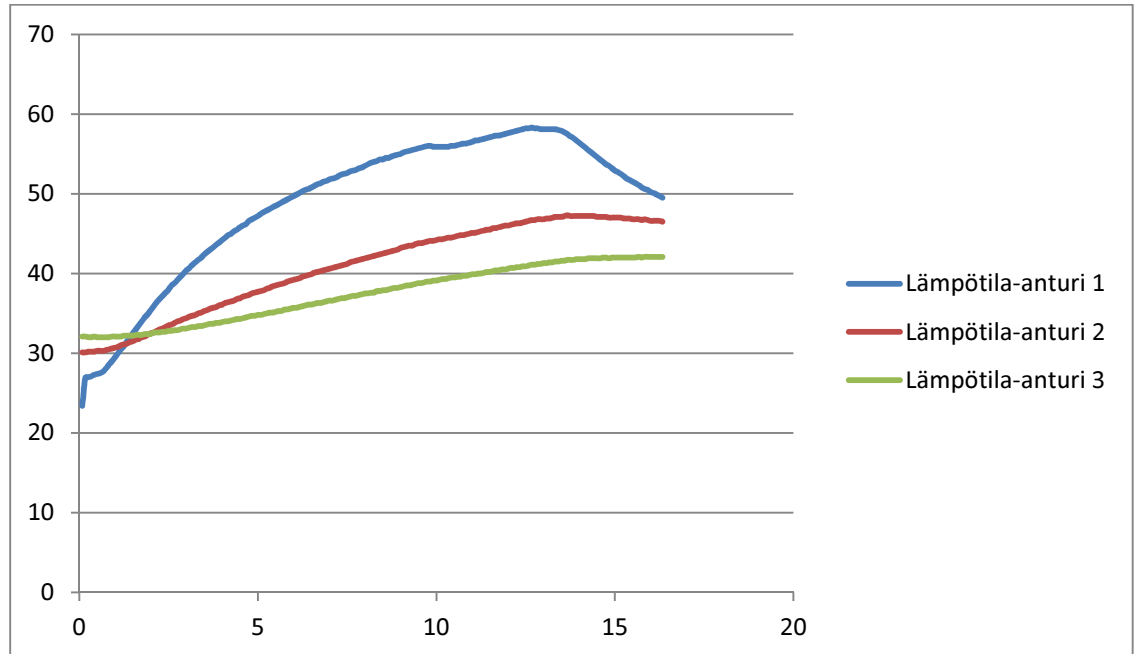
Tärinän testauksen aikana hyllyt olivat tyhjinä, joten ne eivät pysyneet pelkällä sormiruuville paikallaan. Testauksen ajaksi olisi kaivannut mekaanista lukitusta, koska sormiruuvi ei ollut sitä varten suunniteltu ja oli siihen riittämätön. Sidontaliinakiinnitystä testatessa ilmeni, että hyllyjen pelti on niin liukasta, että pellin päälle tarvitsee laittaa jotain estämään ylimääräistä liukumista. Hyllyille päätettiin laittaa kumimattoa lisäämään kitkaan ja suojaamaan mittalaitteita ja hyllyjä naarmuilta.

Kiihtyvyyssanturi mittasi vain z-akselin eli ylös-alas-suuntaisen kiihtyvyyden. Kiihtyvyyssanturin mittaama kiihtyvyys oli hyvin kohinaista, minkä näki jo kaapin tärinästä. Aluksi kiihtyvyydet vaikuttivat vaikealta uskoa ja syytä haettiin anturin kiinnityksestä ja sen paikasta, mikä osalta selittääkin kohinaa, koska kiinnitys ei ole absoluuttisen jäykkä, vaan tärisee myös itse. Suurin syy kuitenkin on se, että testikaapin eri osat värähtelevät eritaajuuksilla ja nämä värähtelyt välittyvät kiihtyvyyssanturille. Testikaapin värähtelyä ei myöskään ole rajoitettu yhdelle akselille vaan se voi täristä jokaisen akselin suuntaan. Kiihtyvyyssanturi mittasi kaunista sini-aaltoa kun kaappi laitettiin värähtelemään käsin poikkeuttamalla sitä z-akselilla, joten anturi toimi kuten piti.

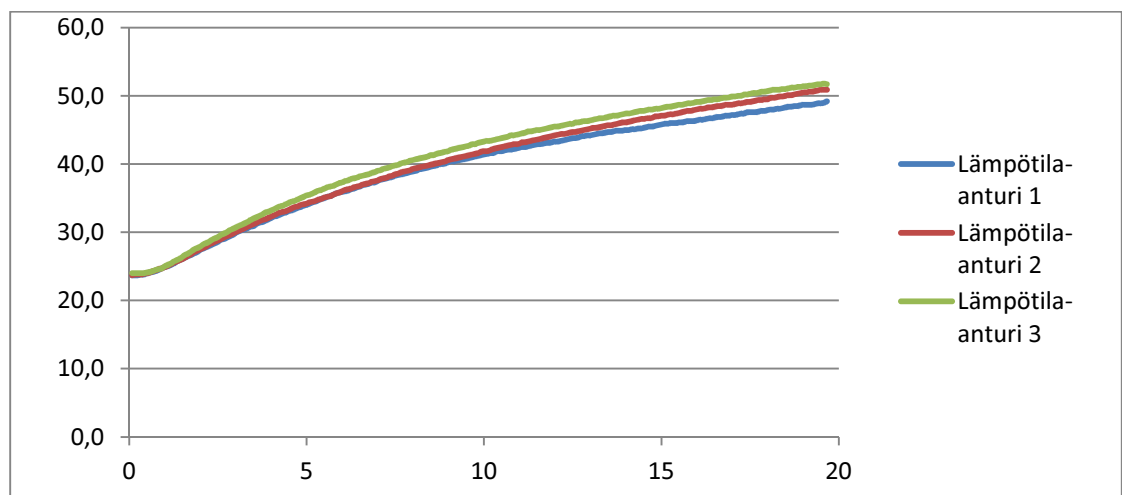
Lämmityskaapelin lämmitysteho osottautui pettymykseksi kun kaapin sisälämpötilan nostaminen huoneenlämmöstä ilman sisätuulettimia 40 °C:een kesti noin puolitoista tuntia. Tätä kuitenkin parannettiin lisäeristyksellä katossa. Myös sisäilman sekoittamiseen tarkoitetuilla tuulettimilla oli iso vaikutus lämmön siirtymiseen kaapelista ilmaan ja lopulta päästiin 40 °C:een huoneenlämmöstä noin tunnissa. Kaapin runko varasi lämpöä runsaasti, joten kun kaappi kerran lämmitettiin niin se myös pysyi suhteellisen hyvin lämpimänä.

Nopeampaa lämmitystä varten päätettiin hankkia 1200 W:n lämpöpuhallin. Syy miksi lämpöpuhallinta ei valittu alkuperäiseen suunnitelmaan oli se, että sillä olisi vaikeampi ohjata kaapin lämpötilaa ja sillä on suurempi riski vioittua tärinästä kuin yksinkertaisella lämmityskaapelilla. Lämpöpuhallin lämmitti kaapin nopeasti jopa yli 50 °C:een, mutta lämpö jakautui kaappiin epätasaisesti (kuvio 25). Lämpötilan tasaamiseksi, ilman sekoittamiseen tarkoitettujen tuulettimien kiinnitettiin lämpöpuhalltimeen ja

tuulettimet suunnattiin siten, että lämpötila oli suurinpiirtein sama korkeudesta riippumatta (kuvio 26). Lämmitystestikuvaajissa x-asteikko kuvaa kulunutta aikaa minuutteina ja y-akseli lämpötilaa. Lämpötestia varten on tärkeää, että jokainen mittalaite olisi suurinpiirtein halutussa lämpötilassa.



KUVIO 25. Lämmitystesti lämpöpuhaltimen kanssa ilman tuulettimia

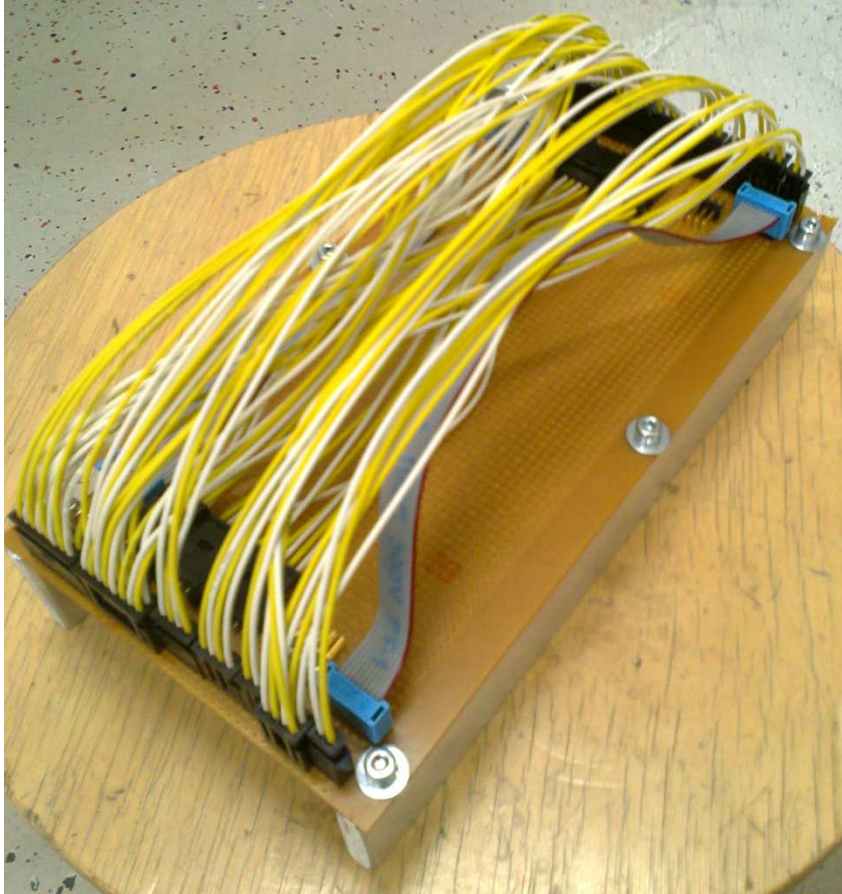


KUVIO 26. Lämmitystesti lämpöpuhaltimen ja tuulettimien kanssa

Testikaapissa oli kiihtyvyyssanturi ja kolme lämpötila-anturia, ohjauskaapissa oli myös lämpötila-anturi mittaamassa ohjauskaapin lämpötilaa. Ohjauskaappi ohjasi lämmitimiä päälle/pois periaatteella kolmen kaapissa olevan lämpötila-anturin arvon keskiarvon perusteella. Ohjauskaappi tallentaa anturien mittausarvoja 5 s välein. Tämän ansiosta saatiin hyvää dataa kaapin lämpenemisestä, viilenemisestä ja tärinästä.

9 POHDINTA

Testikaapissa testattiin testikappaletta (kuvio 27) mihin oli asennettu erilaisia mittalaitteissa käytettäviä liittimiä. Testissä huonosti kiinni olevia liittimiä saatiin irrotettua tärinällä ilman, että hyvin kiinniolevat irtosivat tai tärinän voimakkuus olisi ollut suurempaa, kuin mittalaitteet joutuvat kestämään normaalissa kuljetuksessa. Myös mittalaitteen runkoa testattiin, jotta saataisiin selville irtoavat huonosti kiristetyt ruuvit tärinässä. Molempien testien onnistuminen oli helpotus projektiin osallistuneille ja osoitus tärinätestin toimivuudesta tuotantotestaukseen. Tuotantotestaus aloitetaan, kun saadaan testattua perusteellisesti, mitkä parametrit soveltuvat parhaiten tärinätestiin. Tätä kirjoittaessa testit jatkuvat testikappaleilla.



KUVIO 27. Testikappale liittimien testaukseen

Opinnäytetyössä painotettiin värähtelytekniikkaa, koska sen oikea toteutus testikaapissa on toinen oleellinen osa tuotantotestausta. Värähtelytekniikkaan perehtyminen auttoi valitsemaan oikeanlaiset jouset ja moottorin. Lämpötesti toisaalta on yksinkertainen toteuttaa lisäämällä sopiva lämmitysteho ja varmistamalla tasainen lämmön leviäminen, kaapissa ja jos lämmitysteho ei riitä, sitä voidaan helposti lisätä. Jos taas lämpö esimerkiksi kasaantuu kaapin yläosaan, täytyy ilma saada kiertämään ylhäältä alaspäin, mikä onnistuu tuulettimilla. Värähtelyn kannalta väärin jousien tai moottorin valitseminen olisi mahdollisesti tehnyt kaapista vaikeasti hallittavan tai pahimmassa tapauksessa jopa täysin sopimattoman mittalaitteiden testaamiseen.

Testikaapin testauksessa selvisi, että vaikka laskentamalli ei aivan vastannut todellisuutta, kiihtyvyyssanturin tulokset olivat hyvin lähellä laskettuja arvoja. Tämä lisäsi

varmuutta, että moottori ja jouset oli valittu oikein suhteessa värähtelevään masinaan.

Lämpötestiä varten valittu lattianlämmityskaapeli osoittautui tehottomaksi lämmitämään kaappia. Lämmitystehoa koetettiin varovasti verrata kaapin sisällä olevan ilman lämmittämiseen vaadittuun energiaan mutta lämmityskaapelin tehosta vain murto-osa nosti suoraan ilman lämpötilaa. Suurin osa lämpöenergiasta johtui runkoon, hyllyihin ja kaapin ulkopuolelle eristyksestä huolimatta. Kaapin lämmittämisen huoneenlämmöstä n. 40 °C:een oli tarkoitus onnistua alle puolessa tunnissa. Käytännössä se kesti noin tunnin verran ja testikaapin lämpötila oli lähellä tasapainoasemaa. Tasapainoasemassa lämpöä karkaa kaapista ulos samalla vauhdilla kuin mitä kaapeli lämmitti ilmaa. Tästä selvitettiin toteuttamalla varasuunnitelma eli lämpöpuhallin, jolla lämpötila nousi noin 15 minuutissa 40 °C:een ja nousi maksimissaan yli 50 °C:een. Tehokkaampaa lämmityskaapelia ei harkittu, koska teho olisi pitänyt olla kolminkertainen, mikä olisi lisännyt kaapelin pituutta samassa suhteessa. Näistä syistä tehokkaampi kaapeli ei olisi ollut asentamisen kannalta järkevää tai edes mahdollista.

Testikaapin mekaaninen toteutus onnistui hyvin mutta jälkeinpäin muutama parannusehdotus on tullut mieleen. Kasaamisen aikana kiskojen kiinnitystä parannettiin senkaamalla ruuvien reiät. Hyllyjä varten tehty ura teräskiskossa olisi kannattanut tehdä yläpuolelle. Tällöin sormiruuvia olisi helpompi käyttää. Sormiruuvin sijainti hyllyn alapuolelle hankaloittaa sen löytämistä alahyllyjen tapauksessa. Myöskin tuulettimien metalliset sormisuoja-ot olisi voinut jättää pois, jos ulkopeltiin olisi tehty suojakuvio valmiiksi. Ovien lukitukseen päätettiin myös lisätä kaksi salpaa lisää per puoli, koska se vähensi huomattavasti oven värähtelystä syntyvää melua.

Teräs- ja pleksilevyjen resonointi tärinässä oli odotettavissa rakenteen takia, mutta sitä olisi voinut ehkäistä suunnittelemalla pienempiä värähtelypinta-aloja kriittisiin kohtiin, pääasiassa oviin ja kattoon. Katon värähteleviä pinta-aloja pienennettiin lisäämällä kaksi putkipalkkia katon päälle, jolloin meteli väheni huomattavasti. Oviin

olisi ollut vaikeaa tehdä vastaavaa ratkaisua jälkikäteen mutta toisaalta meteli ei ole niin voimakasta kuin katon resonoinnissa. Oviin kiinnitetyt lisäsalvat vähentivät meteliä huomattavasti.

Testikaappi saatiin toimimaan halutulla tavalla pienten loppusilausten jälkeen, vaikka epäkeskon säädettävyys olikin vaikeampaa, kuin moottorin ohjekirjassa annettiin ymmärtää. Kaiken kaikkiaan tärinä- ja lämpötilatestit täyttävät niille asetetut parametrit, joten testattavien mittalaitteiden toimintavarmuuden pitäisi parantua kunhan testikaappi saadaan otettua käyttöön tuotantotestauksessa.

LÄHTEET

Barkhausenin ilmiö. 1994. Metallitekniikka 12, s. 62 - 63.

Lähteenmäki, M. 2007. Värähtelymekaniikka-kurssin luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.2.2012.

http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/vmek_ark.htm

Majaneva, M. 2012. Stresstech Oy:n talouspäällikko. Haastattelu 18.1.2012.

Matilainen, J. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja, Lujuustekniset näkökohdat. Teknologiainfo Teknova.

Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtely. Helsinki: Otatieto.

Products. n.d. Stresstech Oy:n kotisivut. Viitattu 6.3.2012. <http://www.stresstech.fi>, products.

Röntgen-diffraktometri paljastaa jäännösännitykset. 1995. Metallitekniikka 9, 62 - 63.

Savolainen, S. 2006. R&R -testin kehittäminen Barkhausenin kohina -laitteistojen lopputestausta varten. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne, kone- ja tuotantotekniikankoulutusohjelma.

Stresstech Oy. n.d. Esite Stresstech Groupin palveluista. Viitattu 6.3.2012. <http://www.stresstech.fi>, about us, brochure.

Suoknuuti, J. 2006. Stresstech Oy. Jännitysten mittaus (pintajännitykset). Raportti.

Vibration of plates. n.d. Artikkel. Wikipedia. Viitattu 10.3.2012. http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration_of_plates.

LIITTEET

Liite 1. Värähtelyyn liittyvät laskut

Jousien mitoitus:

Tärykaapin käyttötaajuudet 30-50 Hz, mitoitetaan ominaiskulmataajuus tämän alle.

$$f_m := 5 \text{ Hz}$$

$$\omega_m := 2 \cdot \pi \cdot f_m = 31.416 \frac{1}{\text{s}}$$

Kaapin massa

$$m_k := 220 \text{ kg}$$

Mittalaitteiden massa

$$m_m := 50 \text{ kg}$$

Kaappi + mittalaitteet

$$m_{\text{kok}} := m_k + m_m$$

Jousi-massa systeemin ominaiskulmataajuus

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Tästä saadaan ratkaistua jousivakio

$$k_m := \omega_m^2 \cdot m_{\text{kok}} = 2.665 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Kaappi värähtelee neljän jousen varassa

$$k_{m1} := \frac{k_m}{4} = 66.62 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Pyritään valitsemaan jousi siten, että jousivakio olisi mahdollisimman lähellä edellä saatua arvoa: mutta pienempi, jolloin ominaistajuus laskee - Lesjöfors värähtelyjousi 8628

$$k_j := 37 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Suurin sallittu jousivoima

$$F_n := 1620 \text{ N}$$

Kaapin paino

$$W_{\text{kaappi}} := m_{\text{kok}} \cdot g = 2.648 \times 10^3 \text{ N}$$

Staattinen kesto

$$4 \cdot F_n - W_{\text{kaappi}} = 3.832 \times 10^3 \text{ N}$$

OK

Puristuma

$$x_s := \frac{W_{\text{kaappi}}}{4 \cdot k_j} = 17.891 \text{ mm}$$

Jousen maksimipuristuma 56mm OK

Lasketaan maksimikuoma jousille

$$\frac{4 \cdot F_n}{g} = 660.776 \text{ kg}$$

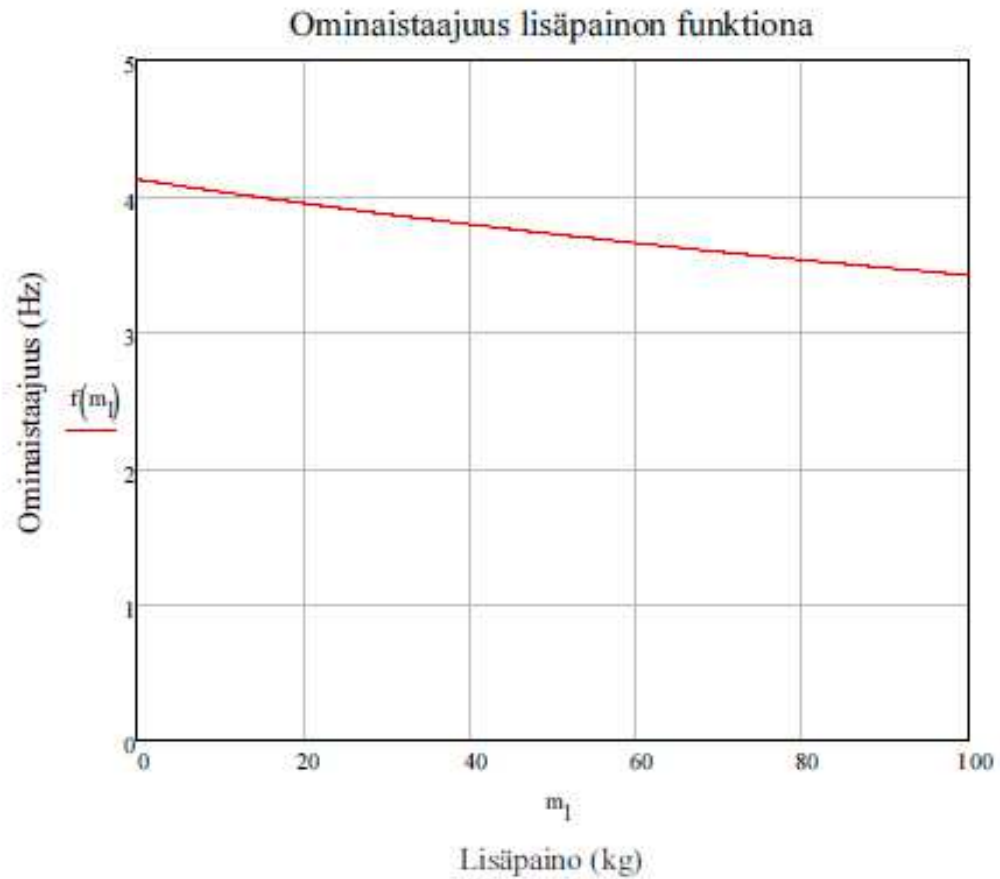
Todellinen ominaiskulmataajuus

$$\omega_{\text{tod}} := \sqrt{\frac{4 \cdot k_j}{m_{\text{kok}}}} = 23.413 \frac{1}{\text{s}}$$

$$f_{\text{tod}} := \frac{\omega_{\text{tod}}}{2 \cdot \pi} = 3.726 \text{ Hz}$$

Käytännössä ominaiskulmataajuus muuttuu testattavien mittalaitteiden mukaan

$$f(m_l) := \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot k_j}{(m_k + m_l)}}}{2 \cdot \pi}$$



Moottorin mitoitusta

Moottorin epäkeskeisyys

$$m_e := 110 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

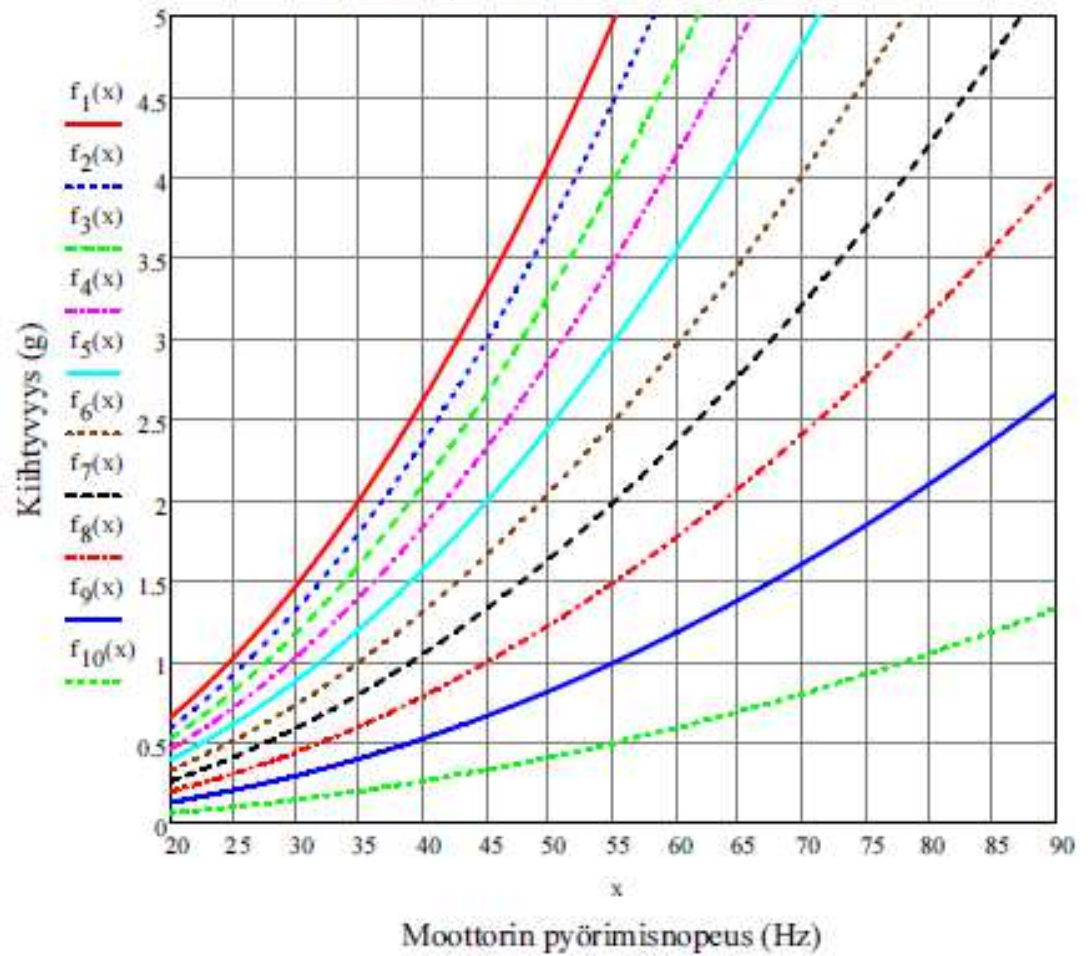
Pakkovoiman amplitudi

$$f_1(x) := \frac{m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_4(x) := \frac{0.7m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_7(x) := \frac{0.4m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_{10}(x) := \frac{0.1m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g}$$

$$f_2(x) := \frac{0.9m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_5(x) := \frac{0.6m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_8(x) := \frac{0.3m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g}$$

$$f_3(x) := \frac{0.8m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_6(x) := \frac{0.5m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g} \quad f_9(x) := \frac{0.2m_e \cdot (2\pi x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot g}$$

Värähtelyn voimakkuus 50 kg laitteilla



Värähtelyn amplitudi

$$h_1(x) := \left| \frac{1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right| \quad h_5(x) := \left| \frac{0.6 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right|$$

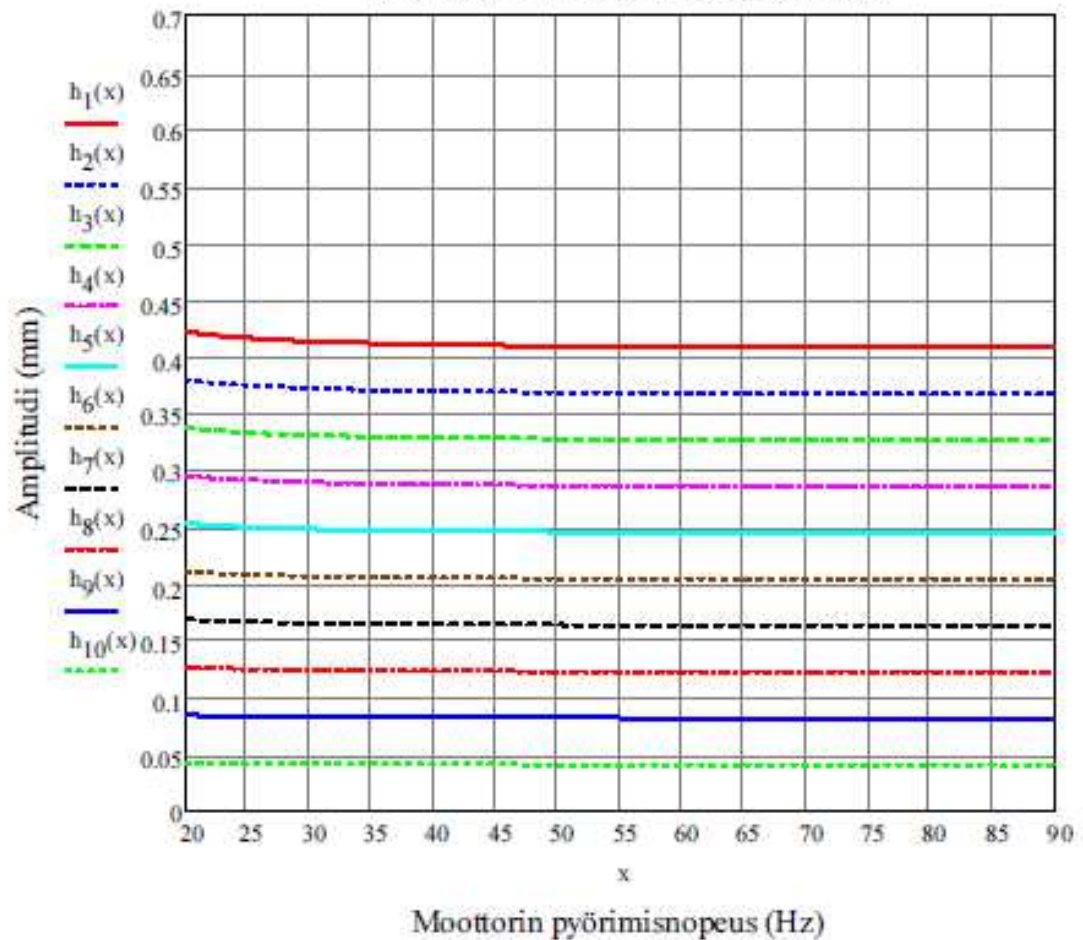
$$h_2(x) := \left| \frac{0.9 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right| \quad h_6(x) := \left| \frac{0.5 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right|$$

$$h_3(x) := \left| \frac{0.8 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right| \quad h_7(x) := \left| \frac{0.4 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right|$$

$$h_4(x) := \left| \frac{0.7 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right| \quad h_8(x) := \left| \frac{0.3 \cdot 1000m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2\pi \cdot x)^2]} \right|$$

$$h_{10}(x) := \left| \frac{0.1 \cdot 1000 m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2 \pi \cdot x)^2]} \right| \quad h_9(x) := \left| \frac{0.2 \cdot 1000 m_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot x)^2}{m_{\text{kok}} \cdot [\omega_{\text{tod}}^2 - (2 \pi \cdot x)^2]} \right|$$

Värähtelyn amplitudi 50 kg laitteilla



Tarkastellaan seuraavaksi värähtelystä alustaan siirtyvä voimaa

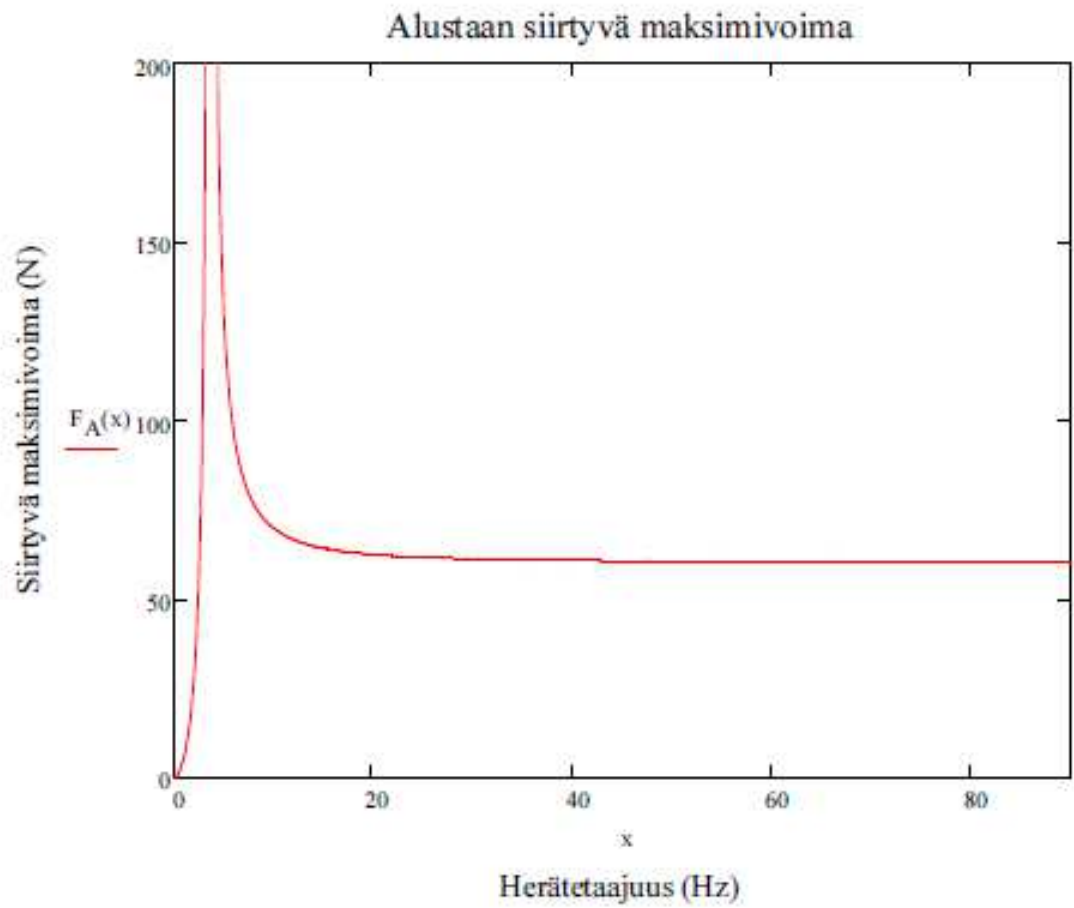
Taajuusalue

$$x_{\min} := 30 \text{ Hz} \cdot 2\pi = 188.496 \frac{1}{\text{s}}$$

$$x_{\max} := 80 \text{ Hz} \cdot 2\pi = 502.655 \frac{1}{\text{s}}$$

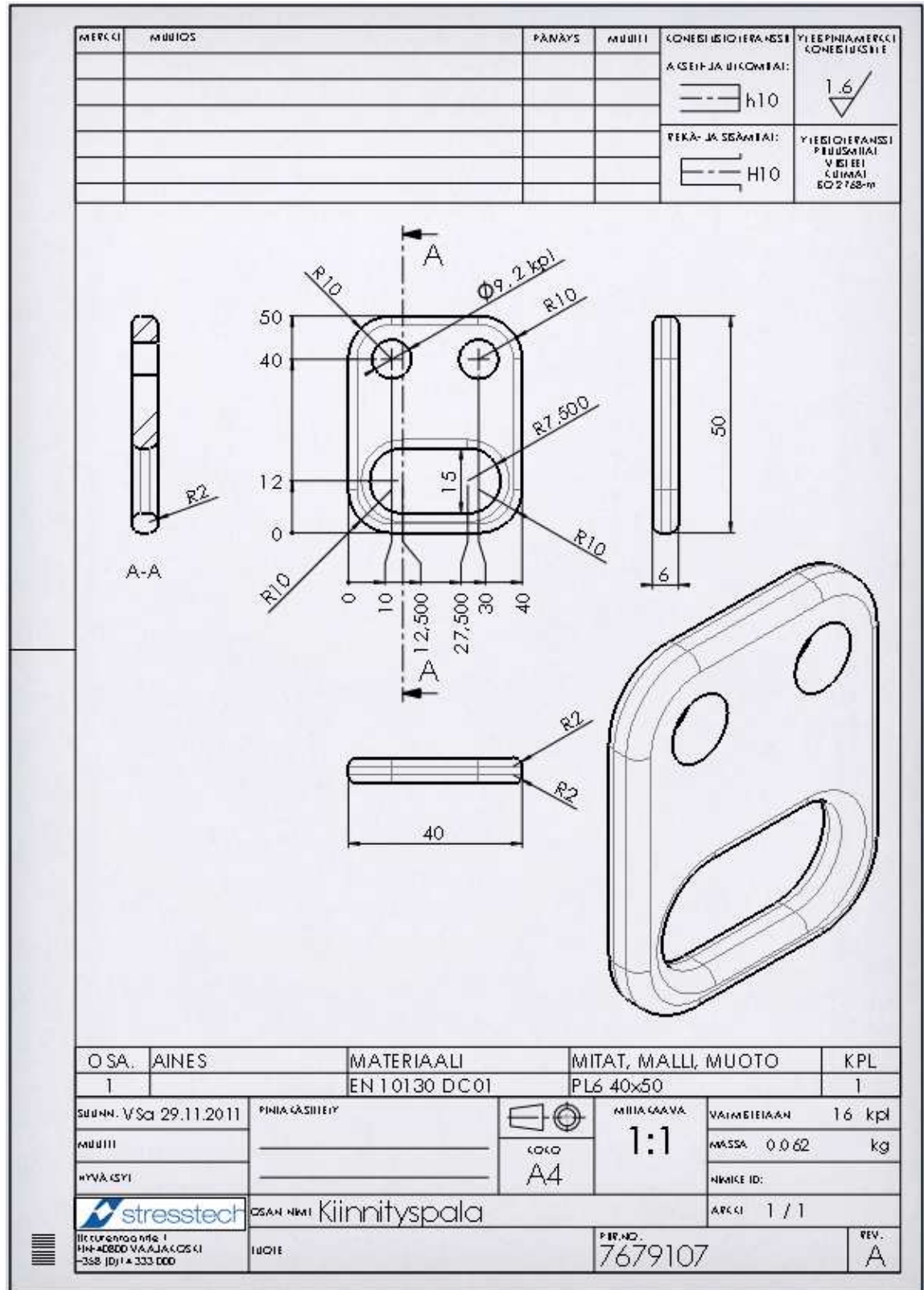
Alustaan siirtyvä maksimivoima pyörimistaajuuden funktiona

$$F_A(x) := \left| \frac{m_e \cdot (2\pi x)^2}{1 - \left(\frac{2\pi x}{\omega_{\text{tod}}} \right)^2} \right|$$



Huomaamme, että käyttöalueella alustaan siirtyvä voima näyttäisi pysyvän vakiona. Näin onkin kun emme ota vaimennusta huomioon.

Liite 2. Työkuvat sidontaliinujen ja jousien kiinnityspalasta



Liite 3. Testikaapin runko ennen maalausta ja epäkeskomootori



Liite 4. Valmis testikaappi

