

Pekka Hildén

Tärinäsimulointitestipenkki

Testipenkin testaus

Opinnäytetyö

Kevät 2018

SeAMK Tekniikka

Konetekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Seinäjoen ammattikorkeakoulu

Tutkinto-ohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Pekka Hildén

Työn nimi: Tärinäsimulointitestipenkki

Ohjaaja: Pasi Junell

Vuosi: 2018

Sivumäärä: 33

Tässä työssä selvitettiin tärinäsimulointitestipenkin toimivuutta. Testipenkillä on tarkoitus pystyä simuloimaan tärinäolosuhteita, joille kuorma-auton lämmönsäätölaitteen moottoriyksikön tuuletin altistuu. Testipenkin toimiperiaate perustuu pyöriviin epäkeskoihin ja jousiin.

Testiajoa varten mitattiin tärinäarvot liikkuvasta kuorma-autosta ja moottoriyksiköstä. Testipenkin tärinän kiihtyvyyssarvoja eri taajuuksilla verrattiin simuloitavista olosuhteista saatuihin arvoihin.

Vaikka testipenkillä saavutettiin halutut arvot, jatkuvien rakenteellisten muutosten vaikutuksesta testipenkin oma resonanssitaajuus ei pysy vakiona. Tästä syystä testipenkkiä ei voida ajaa tietyssä moodissa ja hallituilla kiihtyvyyssarvoilla sellaisilla aikaväleillä kuin simulointi vaatii.

Avainsanat: tärinämekaniikka, simulointi, testipenkki

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: Seinäjoki University of Applied Sciences

Degree programme: Mechanical Engineering

Author: Pekka Hildén

Title of thesis: Vibration simulation test bench

Supervisor: Pasi Junell

Year: 2018

Number of pages: 33

In this thesis the functionality of a vibration simulation test bench was tested. The purpose of the test bench is to simulate the vibrations experienced by a fan of a temperature control system of a truck. The principle of the test bench is based on rotating offset weights and springs.

Vibration values of a moving truck and a temperature control system were measured. The acceleration value results were then compared to the vibrations produced by the test bench at different frequencies.

Even though the expected results were achieved with the test bench simulation, due to constant structural changes in the machine, the resonant frequency of the test bench itself keeps changing. Therefore, the machine is incapable of running at a certain mode and with controlled acceleration values for such periods of time as required by the simulation.

Keywords: vibration, simulation, test bench

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet	8
1 JOHDANTO	9
2 TÄRINÄSIMULOINTITESTIPENKKI	10
2.1 Testipenkin esittely.....	10
2.2 Testipenkin toimiperiaate	11
2.2.1 Resonanssi ja massa.....	12
2.2.2 Herätteet	14
3 SIMULOINTISUUNNITELMA.....	16
3.1 FMS-mittalaitteisto	16
3.2 Vertailukohde	18
3.3 Moottoriyksikkö	19
4 TÄRINÄTULOKSIA	21
4.1 Lähestymissuunta	21
4.2 Lämpötilan vaikutus ominaistajuuteen	21
4.3 Alkuhiljaisuus	22
4.4 Vaakasuuntainen moottori	23
4.5 Pystysuuntainen moottori.....	24
4.6 Syvyysuuntainen moottori	25
4.7 Ominaistaajuuden muuttuminen.....	27
4.8 Johtopäätökset.....	28
5 ONGELMIA JA EPÄKOHTIA	29
5.1 Tuuletinlaatikoiden kiinnitysten tärinää vaimentava vaikutus	29
5.2 Pystysuuntaisen kiihtyvyyden puute.....	30
5.3 Ruuvikiinnitykset	31
5.4 Materiaalin muovautuminen ja väsyminen	32
5.5 Laakerien kesto.....	32

6 LOPPUPÄÄTELMIÄ.....	33
LÄHTEET	34
LIITTEET	35

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Testipenkki.....	11
Kuva 2. Testipainot.	14
Kuva 3. Mittalaitteisto.....	17
Kuva 4. Moottorien sijoitus.....	23
Kuva 5. Tuuletinlaatikon kiinnitys.....	29
Kuvio 1. Kiihtyvyys, siirtymä ja liikenopeus harmonisessa tärinässä (Dow, s, [viitattu 8.4.2017]).	12
Kuvio 2. Ominais- ja erotaajuudet.....	13
Kuvio 3. Vaikuttavat voimat ja hertsit (Dow, S, [viitattu 8.4.2017]).	16
Kuvio 4. Esimerkki mittaustuloksesta.....	18
Kuvio 5. Kuorma-auton tärinä.	19
Kuvio 6. Alkuhiljaisuus.	22
Kuvio 7. Vaakasuuntainen moottori.	24
Kuvio 8. Pystysuuntainen moottori.....	25
Kuvio 9. Syvyysuuntainen moottori.	26
Kuvio 10. Syvyysuuntainen moottori pienillä painoilla.....	27
Kuvio 11. Ominaistaajuuden muutos.	28
Taulukko 1. Dieselmoottorin herätteet.	19

Taulukko 2. Kiihtyvyyssjakauma.....	31
-------------------------------------	----

Käytetyt termit ja lyhenteet

Moodi

Kun värähtelyn taajuus on lähellä rakenteen ominaisvärähtelytaajuutta, on kappale resonanssissa, mikä vahvistaa värähtelyn vaikutuksia. Moodi on värähtelyn tietty muoto, jonka syntymiseen tarvitaan tietty taajuus.

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena selvittää värähtelysimulointitestipenkin ajo-ominaisuuksia ja käyttökelpoisuutta Lumikko Technologies Oy:n moottoriyksikön tuulettimen värähtelysimulointiin.

Tässä työssä keskitytään mittaustuloksiin ja niiden analysointiin, koska vapaan kolmiakselisen värähtelyn laskeminen on uskomattoman työlästä ja monimutkaisten rakenteiden kohdalla usein epätarkkaa sekä Lumikko Technologies Oy:n kannalta turhaa. Tärkeintä on selvittää, millaisia voimia värähtelysimulointitestipenkillä voidaan kohdistaa testattavaan laitteeseen, ja kuinka hyvin sitä voidaan käyttää simuloimaan tuulettimien käyttöolosuhteita. Fysiikkaa ei kuitenkaan karsasteta, ja sen puolella käydään, kun se on tutkimuksen kannalta olennaista.

2 TÄRINÄSIMULOINTITESTIPENKKI

2.1 Testipenkin esittely

Tarkoitukseen rakennetun testipenkin tavoitteena on simuloida tärinää, jolle kuorma-auton lauhduttimen moottoriyksikön tuuletin altistuu. Käyttöolosuhteissa suoritettun mittauksen pohjalta tuulettimeen vaikuttavat tärinät syntyvät pääasiassa moottoriyksikön moottorista sekä tien epätasaisuuksista.

Testipenkin suunnittelun suurimmat vaikuttajat olivat kolmensuuntainen liikevapaus ja edullisuus. Tuuletin pitää pystyä altistamaan kolmessa suunnassa tärinälle. Tuulettimen on oltava kiinnitettävissä eri astekulmiin. Tärinän voimakkuuden pitää ylittää vähintään samalle tasolle, jolle tuuletin altistuu oikeissa olosuhteissa. Testipenkkiä on tarkoitus käyttää eri olosuhteissa, joille tuulettimet voivat käytössä altistua, kuten kylmässä, kuumassa ja kosteissa oloissa. Siten testipenkin pitää kestää lämpötiloja välillä -50 °C ja $+50\text{ °C}$ sekä roiskuvaa vettä. Vaatimukset testipenkin ominaisuuksille tulivat Lumikko Technologies Oy:ltä.

Suunnitteluvaiheessa harkittiin tärinän aiheuttamista aktuaattoreilla. Tuuletin sijoitettaisiin kehikkoon, jota kannattelisi jousien lisäksi kolme aktuaattoria, joita hallittaisiin ohjausyksiköllä. Ideasta luovuttiin korkean hinnan vuoksi, ja se korvattiin epäkeskoilla.

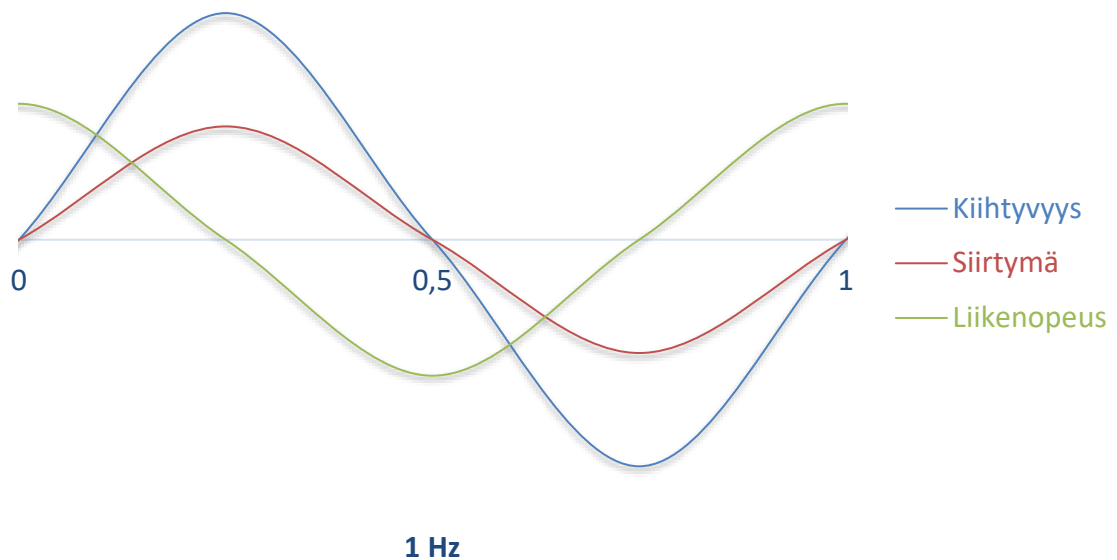
Testipenkki tuottaa tärinää kolmella epäkeskoakselilla joiden akselisuunnat poikkeavat toisistaan aina 90 astetta. Moottorit on kiinnitetty jousien varassa lepäävään, kahdelle tuulettimelle suunniteltuun sisäkehikkoon. Sisäkehikossa olevat tuuletinlaatikot ovat käännettävissä sivuttaisakselin ympäri ja lukitus on aina 10 asteen välein. Alkuperäinen toivomus oli kiinnittää moottorit ulkokehikkoon, jolloin ne eivät altistuisi tärinälle, mutta voimansiirrolle ei löytynyt kestävää ratkaisua. Testipenkki on ympäröity pleksilasilla turvallisuussyistä sekä olosuhdesimulointia ajatellen. Valmis testipenkki näkyy kuvassa 1. Testipenkin ohjausyksikön käyttöohjeet löytyvät liitteestä 1.



Kuva 1. Testipenkki.

2.2 Testipenkin toimiperiaate

Tärinä voidaan jakaa kolmeen tekijään: liikenopeuteen, kiihtyvyyteen ja siirtymään. Liikenopeus on kappaleen suhteellinen liikenopeus tasapainoasemaan nähden. Siirtymä on kappaleen suora etäisyys tasapainoasemasta, mutta ei sen kulkema matka tähän asemaan, mikä voi olla kaareva ja siten pidempi kuin siirtymä. Harmonisessa tärinässä amplitudi on kaksi kertaa siirtymä. Kiihtyvyys on nopeuden muutos tietyllä aikavälillä. (Scheffer & Girdhar 2004, 15.)**Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.**



Kuvio 1. Kiihtyvyyys, siirtymä ja liikenopeus harmonisessa värinässä (Dow, s, [viitattu 8.4.2017]).

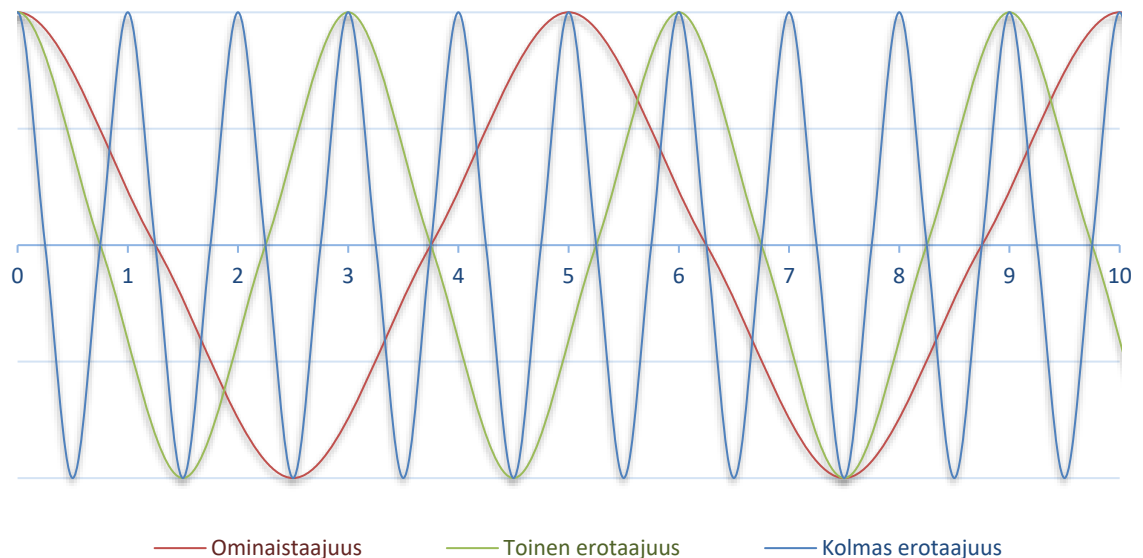
Siirtymän ääriasennossa liikenopeus on nolla (katso Kuvio 1 yllä). Liikenopeuden maksimiarvo saavutetaan siirtymän nollakohdassa. Nopeus noudattaa kosinikäyrää. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 69.)

Tässä värinäsimuoinnissa ollaan lähinnä kiinnostuneita kiihtyvyydestä, jonka SI-yksikkö on m/s^2 . Kun puhutaan suuresta, haitallisesta kiihtyvyydestä, puhutaan yleensä G-voimista. 1 G on putoamiskiihtyvyyden maan pinnalla ja on noin $9,81 \text{ m/s}^2$. Joten esimerkiksi 2 G on $2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 19,62 \text{ m/s}^2$. Värinän aikana kiihtyvyyden saavuttaa huippunsa liikenopeuden ollessa 0 m/s . (Scheffer & Girdhar 2004, 20.)

2.2.1 Resonanssi ja massa

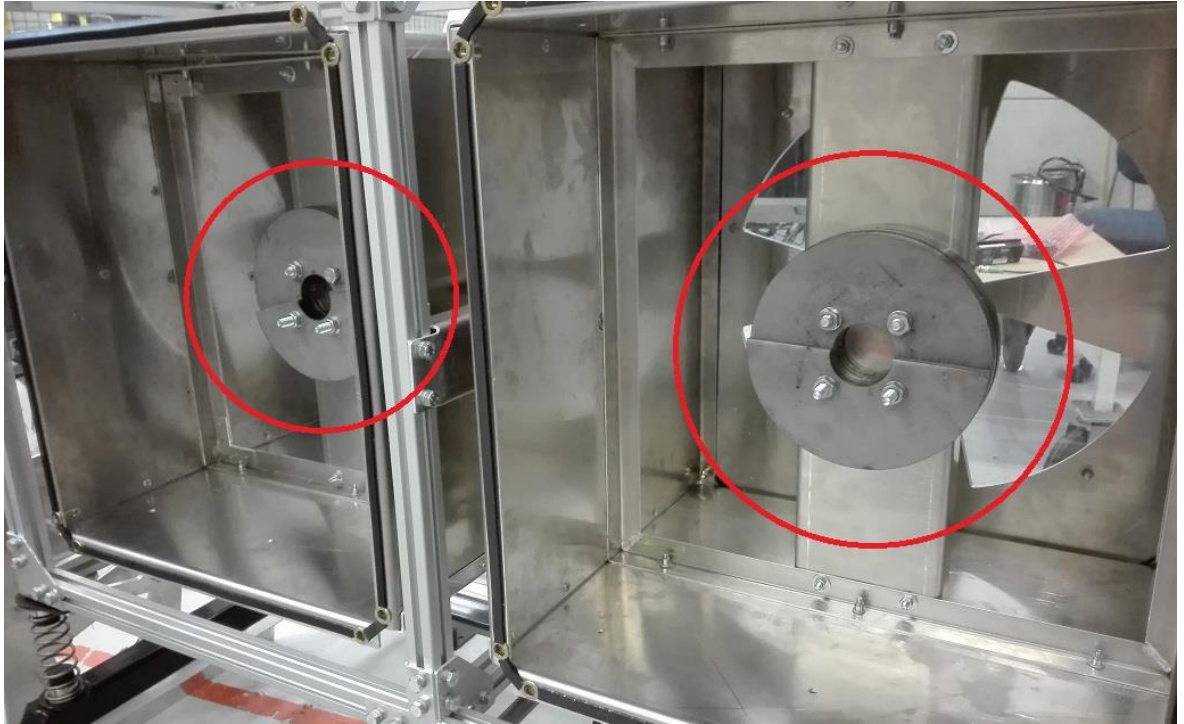
Resonanssi on kappaleen tai toisiinsa kiinnitettyjen kappaleiden yhteinen ominaistajuus. Kaikilla rakenteilla on omat ominaistajuutensa ja tarpeeksi kova iskuheräte saa rakenteen värähtelemään hetkellisesti tällä taajuudella. Ominaisuus ei aiheuta värähtelyä, vaan vahvistaa sitä, jos värähtelyn taajuus ja rakenteen omi-

naistaajuus ovat tarpeeksi lähellä toisiaan. Jos värähtelytaajuutta nostetaan tarpeeksi, tulee vastaan uusia resonanssitaajuuksia. Erottaajuuksilla osa värähtelytaajuuden maksimiarvoista osuu kohdalleen rakenteen ominaistaajuuden maksimiarvojen kanssa (katso Kuvio 2). (Dow, S, [viitattu 8.4.2017].)



Kuvio 2. Ominais- ja erottaajuudet.

Testipenkin epäkeskojen pyöriessä lähellä testipenkin ominaistaajuutta syntyy värähtelyjä vahvistava vaikutus. Testipenkin ominaistaajuus kuitenkin muuttuu rakenteen massan mukaan. Tästä johtuen mittatulokset eivät enää päde eripainoisten tuulettimien kohdalla. Koska erillinen tuuletin painaa alle 10 kg, on ratkaisuksi valittu lisäpainojen lisääminen, kunnes molempien kiinnitettyjen kappaleiden massa testipenkissä on kumpikin 10 kg (katso Kuva 2). Tällä pyritään pitämään testipenkin resonanssitaajuus samana testauksen ja käytön aikana. Massan lisääminen laskee rakenteen ominaistaajuutta.



Kuva 2. Testipainot.

2.2.2 Herätteet

Heräte on voima, joka aiheuttaa kappaleen siirtymän. Heräte voi olla harmoninen, jaksollinen tai jaksoton tai impulssiheräte. Kappale pyrkii aloittamaan värähtelyn aina ominaisvärähtelyllä, jonka määrittelee kappaleen ominaistaajuus. Kun herätettä jatketaan, vaimenee ominaisvärähtely pois ja korvautuu herätteen määrämällä pakkovärähtelyllä. Tätä siirtymävaihetta kutsutaan *transientiksi vaiheeksi*. Kun ominaisvärähtely on kokonaan korvautunut pakkovärähtelyllä, on kappale *vakio-tilassa*. (Pennala, s. 21)

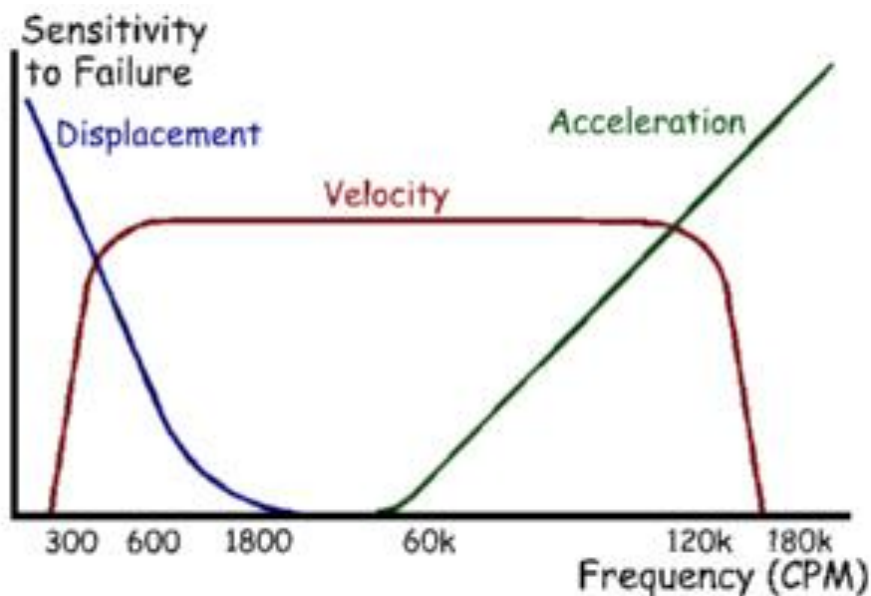
Yksittäisten epäkeskojen aiheuttamat herätteet ovat pyöriä massapäkeskisyyksien aiheuttamia jaksollisia, harmonisia herätteitä. Jaksollisten herätteiden yhdistelmä voi myös olla harmoninen, jos niiden taajuudet ovat samat. Jos herätteiden taajuudet poikkeavat toisistaan vain hiukan, on kyseessä huojunta, jossa taajuudet vuoron perään vahvistavat ja heikentävät toisiaan. Kahden eritaajuisen jaksollisen värähtelyn summa ei ole koskaan harmoninen. Koska kahden tai jopa kolmen eritaajuisen epäkeskon aiheuttama herätteen funktio toistuu tietyllä aikavälillä, on heräte aina jaksollinen. (Pennala 1000, 23.)

Jaksottoman herätteen simulointi vaatii epäkeskojen taajuuksien automatisoitua ja satunnaista muuttumista, mikä ei testipenkin nykyisellä manuaalisella ohjausjärjestelmällä onnistu käytännöllisyyden rajoissa.

Impulssiherätteiden simulointi ei testipenkillä ole mahdollista. Testipenkkiin suunnitellusta iskumekanismista luovuttiin toistaiseksi, kun sisäkehikon liikevaraa ei osattu arvioida vaaditulla tarkkuudella. Vaarana oli, että sisäkehikko liikkeessään iskisi itseään toistuvasti liian lähelle tuotua mekanismia vasten aiheuttaen vahinkoa joko omalle rakenteelleen tai iskumekanismille.

3 SIMULOINTISUUNNITELMA

Värähtely rikkoo laitteistoja pääasiassa kolmella tavalla, jotka ovat sidonnaisia värähtelyn taajuuteen (katso Kuvio 3). Alle 5 Hz:n värähtelyssä suurin tekijä on siirtymä. Kappale vääntyy edes takaisin, kunnes se antaa periksi. Välillä 5–2000 Hz jatkuva pitkäaikainen edestakainen liike aiheuttaa materiaalin väsymistä. Tätä rasi- tusta mitataan yleensä liikenopeudella. 2000 Hz:stä eteenpäin suurin vaikuttaja on kiihtyvyys. Kappaleen suunnanmuutos tuhansia kertoja sekunnissa altistaa kappaleen suurille veto- ja iskuvoimille, joiden seurauksena kappaleen rakenne pettää. Yhden voiman vaikutus ei sulje pois muita, esim. kappale voi pettää sekä väsymisen että G-voimien tähden. (Dow, S, [viitattu 8.4.2017])



Kuvio 3. Vaikuttavat voimat ja hertsit (Dow, S, [viitattu 8.4.2017]).

3.1 FMS-mittalaitteisto

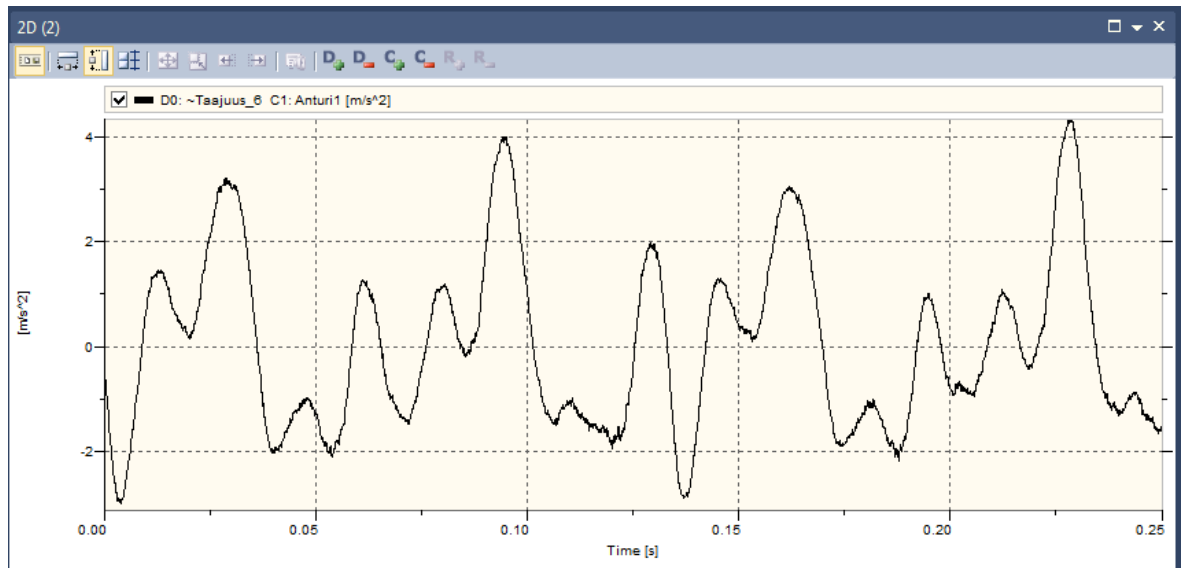
Mittaukseen käytettiin FMS Internationalin mittalaitteistoa ja ohjelmistoa (kuvassa 3). Kahta yksisuuntaista kiihtyvyyssanturia kalibroidessa havaittiin toisen mahdollisesti vahingoittuneen, mikä aiheutti liian suuren taustakohinan. Tästä syystä mit- taukset jouduttiin tekemään yhtä anturia käyttäen. Ideaalitalanteessa olisi ollut 3 an- turia tai yksi kolmisuuntainen anturi.



Kuva 3. Mittalaitteisto.

Testauksen aikana havaittiin, että anturin altistuttua jatkuvalle kovien G-voimien tärinälle ($50+n$ G), anturin taustakohina kasvoi mittauksia haittaavalle tasolle. Anturin piti antaa ”levätä” vuorokausi, jotta kohinasta päästiin eroon.

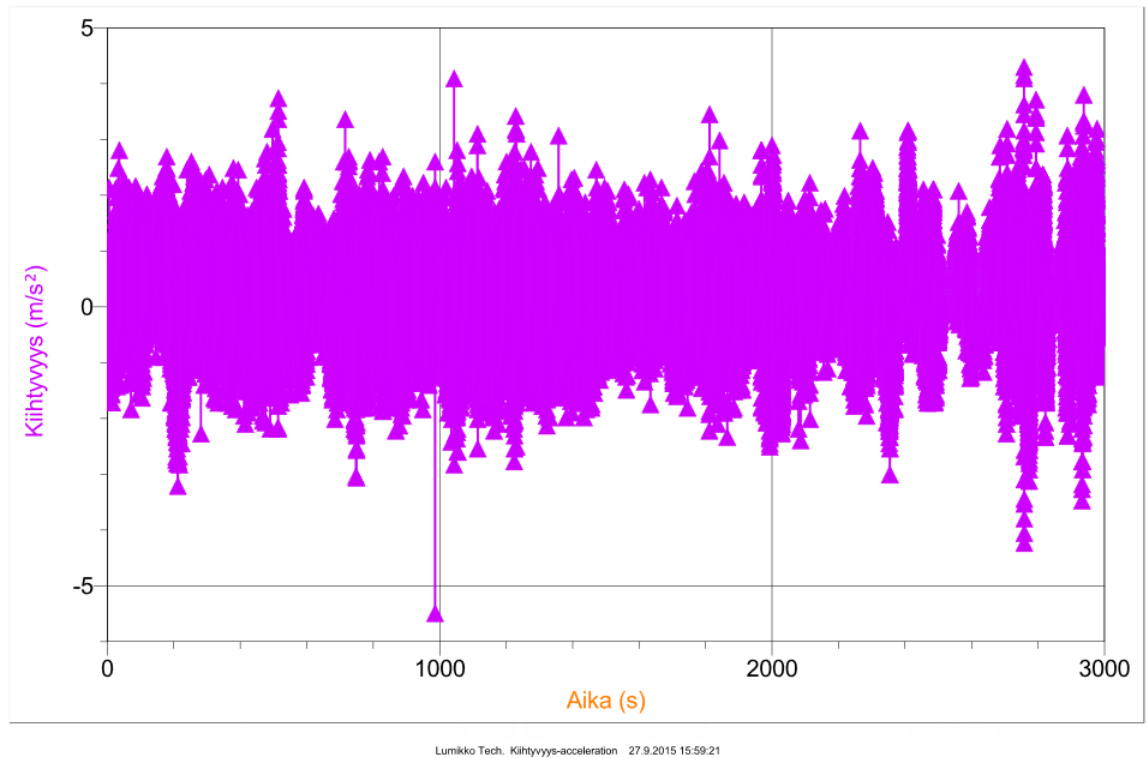
Jokainen mittaus 10 rpm kierrosnopeuden välein suoritettiin kolme kertaa. FMS-laitteisto antaa mittatulokseksi kuvion 4 mukaisen käyrän, josta otetaan huippuarvo (extreme). Huippu voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Tulosten yhdenmukaisuus tarkistetaan, ja poikkeavuudet karsitaan pois. Poikkeavuutena voi toimia esim. raskaan kappaleen pudottaminen lattialle lähellä testipenkkiä, mikä näkyy käyrässä poikkeavana piikkinä. Kolmen otoksen menetelmällä ja käyrien vertailulla nämä karsittiin pois.



Kuvio 4. Esimerkki mittaustuloksesta.

3.2 Vertailukohde

Vertailuarvoja mitattiin kiinnittämällä kiihtyvyyssanturi liikenteessä olevan lauhtutinyksikön viereen. Saadut kiihtyvyyssarvot (kuviossa 5) olivat odotettua pienemmät, kiitos hyvän jousituksen. Kuten kohdasta 3.3 käy ilmi, lauhtutinyksikön sisäiset värinät ovat suuremmat kuin mikään ulkopuolinen tekijä.



Kuvio 5. Kuorma-auton tärinä.

3.3 Moottoriyksikkö

Vertailun kohteena olevan Kubota-dieselmoottorien käyttökierrokset ovat 1600 (26,7 Hz), 1700 (28,3 Hz), 2200 (36,7 Hz) ja 2400 (40 Hz) rpm. Kun mitattiin moottorista lähtevää tärinää, anturi kiinnitettiin tuulettimeen, ei dieselmoottoriin. Tärkeintä ei ollut selvittää, minkälaisia kiihtyvyyksiä dieselmoottorissa ilmenee, vaan millaisina ne välittyvät tuulettimeen. Lopuksi lauhduttimen ilmanottoa hankaloitettiin pahvilevyllä, jolloin lauhdutin saatiin tekemään enemmän töitä. Mittaukset suoritettiin kolmessa suunnassa, joista taulukossa 1. (alla) suurimmat arvot.

Taulukko 1. Dieselmoottorin herätteet.

	RPM	Hz	m/s ²
Käynnistys	-	-	20,0
Tyhjäkäynti	1700	28,3	4,7
Työ	2310	38,5	8,0
Työ-Tukos	2310	38,5	14,4

Huomion arvoista on, että mittaustulosten mukaan lauhdutinyksikön itse aiheuttama kiihtyvyys on tyhjäkäynnillä samaa luokkaa kuorma-auton ajon aiheuttamien värähtelyjen kiihtyvyyksien kanssa. Lauhdutinyksikön tehdessä töitä kiihtyvyydet ovat merkittävästi kuorma-auton omia värähtelyjä suuremmat.

Testipenkin sähkömoottorien maksiminopeus on 2500 (41,7 Hz) rpm, mikä riittää kaikkien lauhdutinyksikön dieselmoottorin taajuuksien simulointiin. Moottoreilla pyöritetään kahdenlaisia epäkeskoja; suuria ja pieniä. Suurilla epäkeskopainoilla on massaa 200 gramma ja pienemmillä 100 grammaa. Turvallisuussyistä kaikki 1400 rpm suuremmat nopeudet testataan pienemmillä epäkeskopainoilla.

4 TÄRINÄTULOKSIA

4.1 Lähestymissuunta

Tärinätestipenkin värähtelymoodit vaihtelevat riippuen siitä, kummasta suunnasta taajuutta lähestytään. Jos halutaan saavuttaa kakkosmoottorin 18 Hz:n piikki kiihtyvyydessä (katso Kuvio 8), täytyy kierroslukuja nostaa, kunnes saavutetaan 1080 rpm. Mikäli taajuutta lähestytään laskemalla kierroslukuja, ei moodi pääse muodostumaan eikä tavoiteltavaa piikkiä kiihtyvyydessä synny. Huomioitavaa on, että testipenkin pitää antaa asettua haettavaa moodia edeltävään moodiin ennen siirtymistä, minkä jälkeen kierrosnopeutta on nostettava askeleittain. Kaikki mittaukset tässä työssä on tehty kierroslukuja nostattamalla.

4.2 Lämpötilan vaikutus ominaistajuuteen

Yksittäisen kappaleen lämpötilamuutos ei muuta kappaleen ominaistajuutta merkittävästi. Suuremman yhteisrakenteen ominaistajuus kuitenkin muuttuu lämpötilan vaihtuessa, mikä johtuu pääasiassa komponenttien kimmokertoimien muutoksista. Lämpötila vaikuttaa rakenteen värähtelyominaisuuksiin pääasiassa kolmella tavalla: materiaalien kimmokertoimien muutoksilla, komponenttien pituusmuutoksilla ja rakenteen värähtelyä vaimentavien mekaanisten ominaisuuksien muutoksilla. (Xia, Weng, Su & Xu, [viitattu 4.5.2017].)

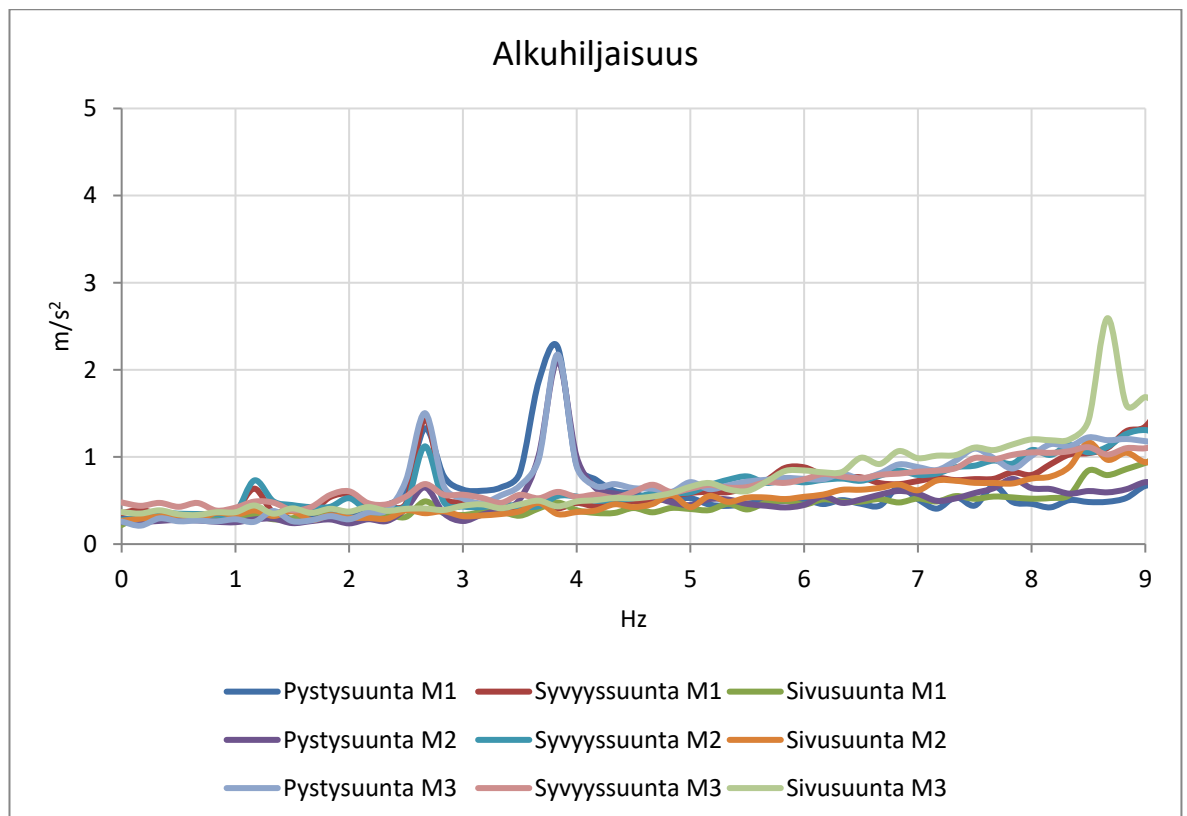
Lämpötilan noustessa komponenttien jäykkyys, eli kyky vastustaa muodonmuutosta, laskee. Tämä muutos on lineaarinen niiden lämpötilojen rajoissa, joissa testipenkkiä tullaan käyttämään. Lämpötilan vaikutusta testipenkin rakenteellisiin mittoihin vahvistaa sisäkehikon alumiininen rakenne. Alumiinin lämpölaajenemiskerroin ($23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) on suurempi kuin liitoksissa käytettyjen ruostumattomasta teräksestä ($17,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) valmistettujen ruuvien ja muttereiden kertoimet. Liitoskohdat ovat oleellinen osa rakenteen värähtelyä vaimentavia rakenteellisia ominaisuuksia.

Tällä hetkellä ainoa tapa selvittää lämpötilan vaikutus monimutkaisen rakenteen, kuten sillan, ominaistajuuteen on rakentaa se ensin ja mitata jälkikäteen. Ainoa

tapa selvittää testipenkin käyttäytyminen eri lämpötiloissa on mitata muutos olosuh- teiden vaihduttua.

4.3 Alkuhiljaisuus

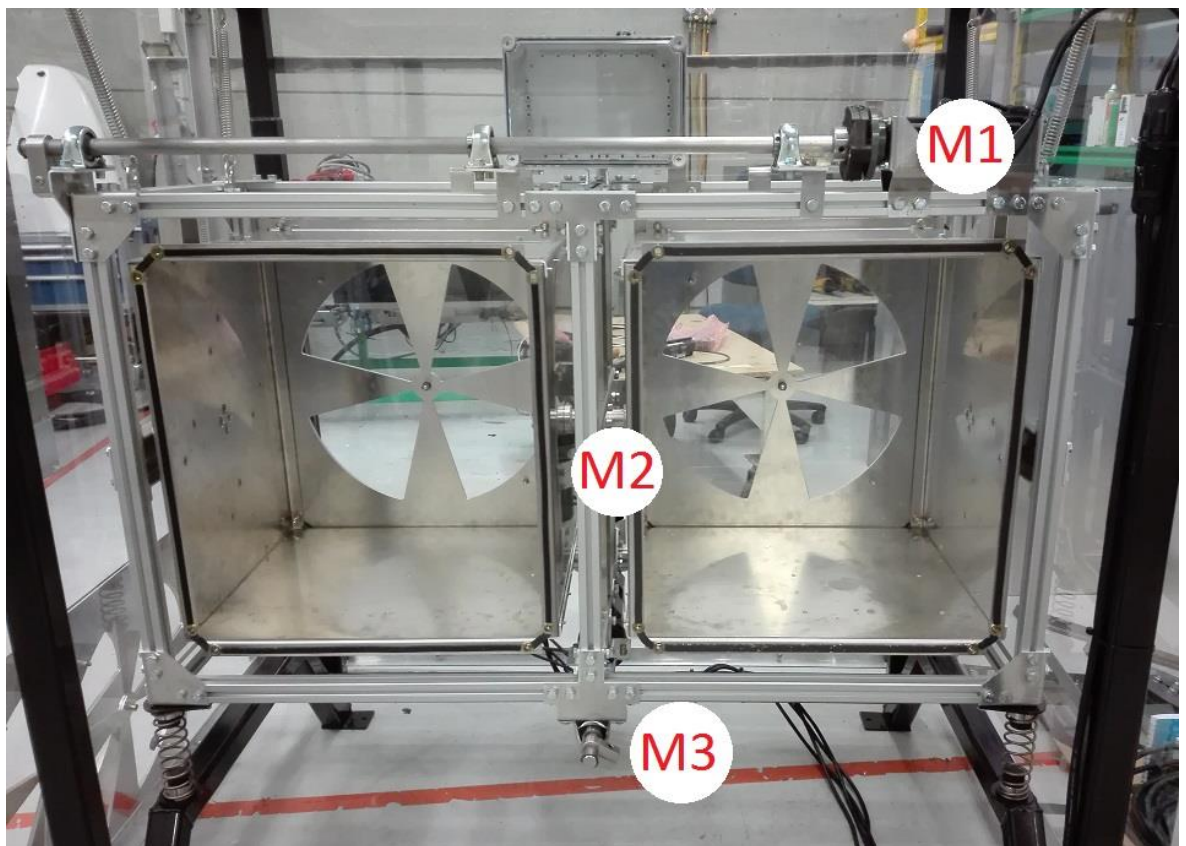
Testipenkin moottorien käydessä matalilla kierroksilla kiihtyvyydet ovat odotetusti hyvin pieniä. Testissä käytetyn hallin normaali taustakohina vaihtelee 0,2 ja 0,4 m/s² välillä ja on suurempi tekijä kuin mikään testipenkin aiheuttama liike alle 1 Hz:n ajossa. Alle 10 Hz:n ajossa löytyy neljä moodia (katso Kuvio 6.) joissa kiihtyvyydsar- vot kasvavat tasaisesta noususta eroten havaittavasti, mutta näillä ei saavuteta kuin maksimissaan 2,5 m/s². Maksimiarvot ovat lähellä kuorma-auton liikkeen aiheutta- mia kiihtyvyyksiä tasaisella tiellä, mutta samat kiihtyvyydet on helpompi tuottaa suu- remmilla kierrosluvuilla. Vertailun vuoksi, napakka isku lattiaan 100x150 mm puu- palkilla lähellä testipenkkiä aiheuttaa noin 5 m/s² piikin, mikä vastaa kuorma-auton oven sulkemista. Muiden herätteiden alla matalilla kierroksilla saadut kiihtyvyydet ”hukkuvat meluun”.



Kuvio 6. Alkuhiljaisuus.

Täten voidaan todeta, että testipenkin ajo alle 10 Hz:n taajuuksilla, tai alle 600 rpm nopeuksilla, käyttäen yksittäisiä isoja painoja ei saavuta tarvittavia kiihtyvyyksiä tuulettimien testaukseen. Jos testipenkkiä halutaan ajaa pienillä kiihtyvyyksillä pitkäaikaista testausta ajatellen, suositellaan suurempia kierrosnopeuksia. Tällöin yli 2 m/s^2 kiihtyvyydet eivät rajaudu hyvin kapealle hertsialueelle, kuten huiput kuviossa 6.

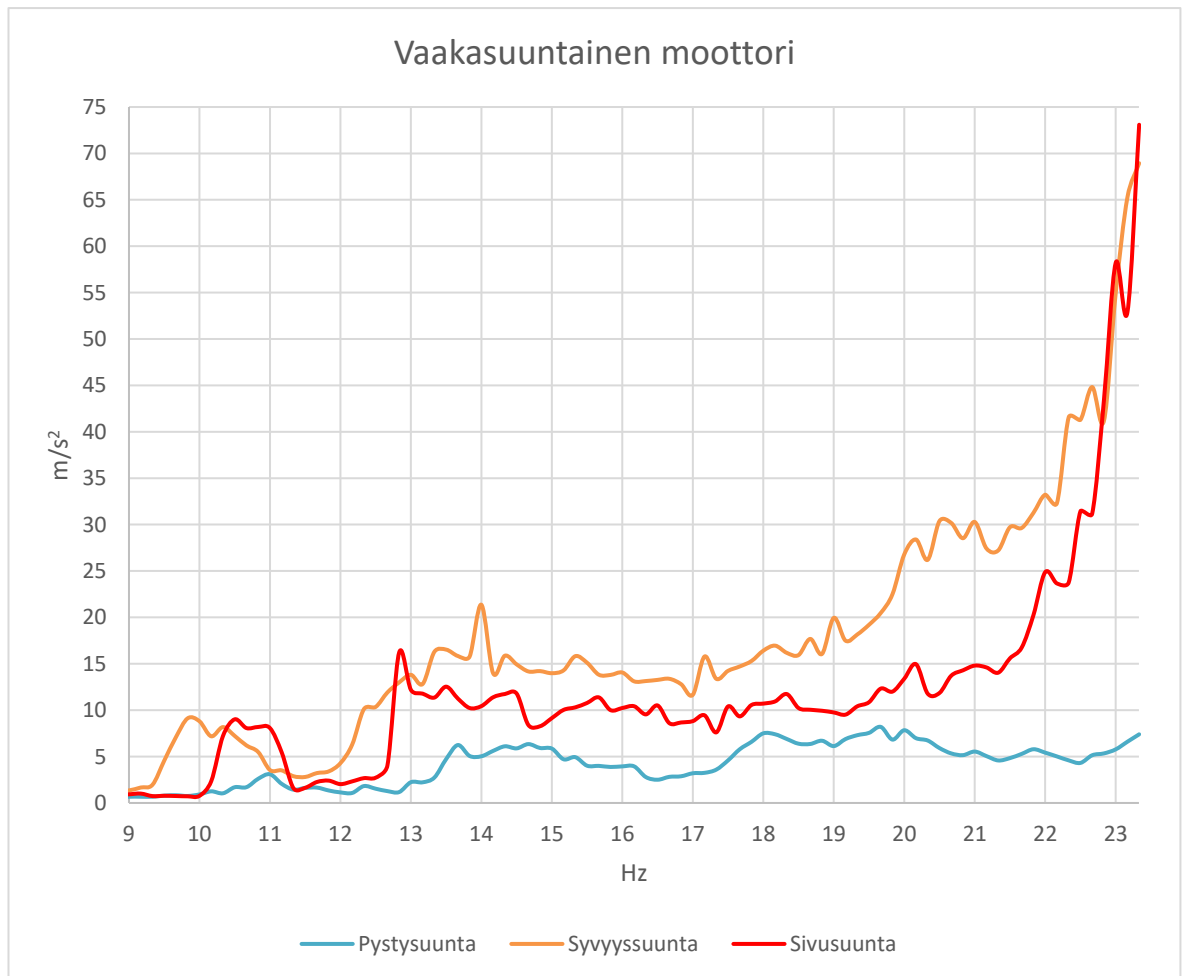
4.4 Vaakasuuntainen moottori



Kuva 4. Moottorien sijoitus.

Testipenkin vaakasuuntainen moottori on sijoitettu vaakatasoon sivusuunnassa sisäkehikon päälle (Kuva 4, M1). Ajo suoritettiin isolla painolla. Akselin sivuttaissuunnan pitäisi korostaa pysty- ja syvyysliikettä, mutta kuten kuviosta 7 (alla) näkyy, pystysuuntainen värähtely jää heikoksi. Matalilla kierroksilla pystysuuntainen liike on tasaista, mutta muuttuu kierrosten noustessa nyökytykseksi. Toisin sanoen, sisäkehikko kiertyy oman sivuttaisakselinsa ympäri akselin liikkumatta pystysuunnassa. Syynä tähän on moottorin sijoittaminen sisäkehikon etureunaan. Koska epäkeskon

paino on sijoitettu akselin päähän, eikä keskelle, tämä synnyttää vipuvoiman, joka pyrkii kääntämään sisäkehikkoa pysty akselin ympäri. Sivusuunnan kiihtyvyydet ovat odotettua suuremmat, mikä on mielenkiintoista ottaen huomioon epäkeskon painon pyörimissuunnan.

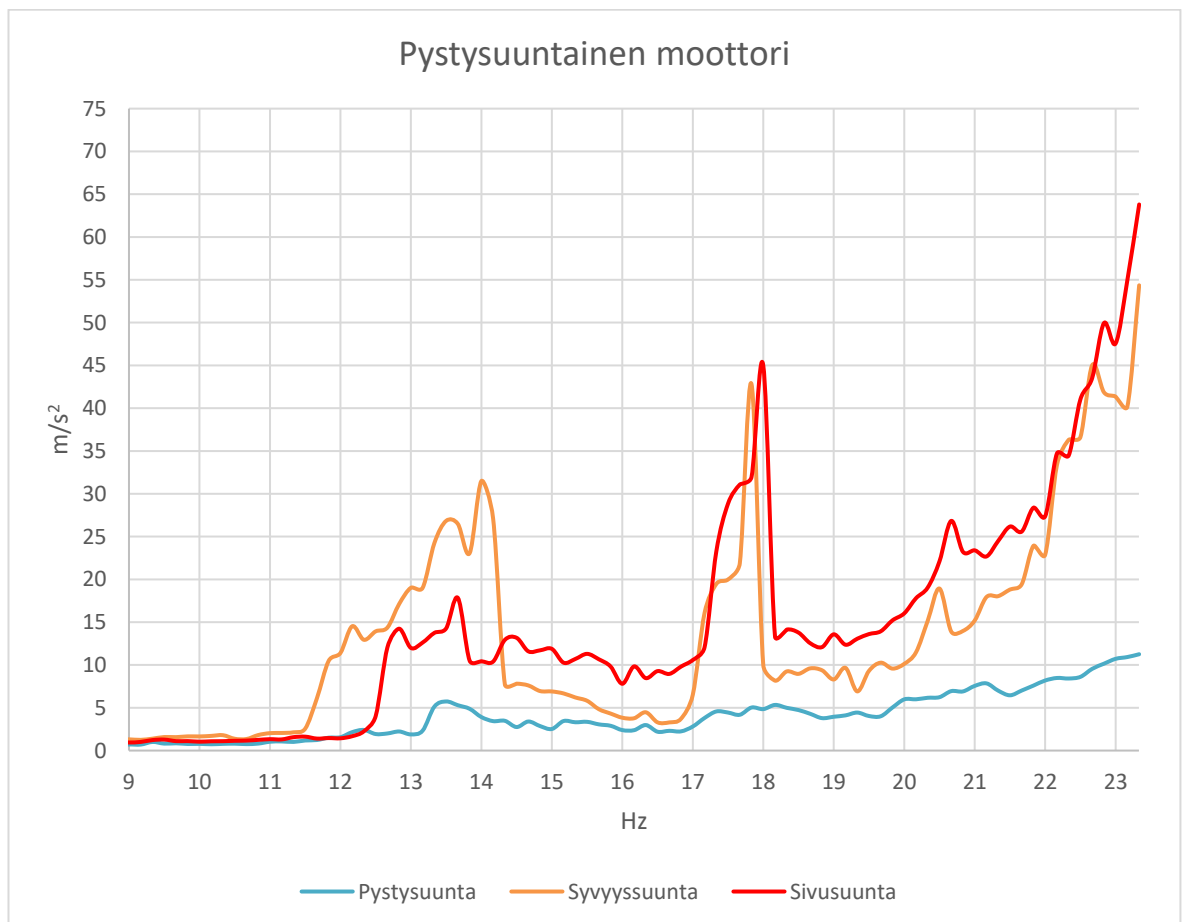


Kuvio 7. Vaakasuuntainen moottori.

4.5 Pystysuuntainen moottori

Pystysuuntaisen moottorin ajo suoritettiin myös isolla painolla. Moottori on sijoitettu sisäkehikon taakse, keskelle, ja pystysuuntaan (Kuva 4, M2). Akselin pystysuunnan pitäisi aiheuttaa pääasiassa sivuttais- ja syvyysliikettä, mutta 23 hertsin paikkeilla sivusuuntaiset kiihtyvyydet ovat yllättäen ensimmäistä moottoria pienemmät. Pienemmillä nopeuksilla testipenkki näyttää asettuvan samoihin moodeihin samoilla

nopeuksilla moottorin akselin suunnasta riippumatta. Tämä tarkoittaa pystysuuntaista liikettä kakkosmoottorille vajaan 4 hertsin paikkeilla, mikä akselin suunnan huomioiden on mielenkiintoinen näky. Testin kannalta oleellisilla nopeuksilla (katso Kuvio 8.) kakkosmoottori kuitenkin eroaa ykkösmoottorista. Epäkeskon sijainti akselin päässä aiheuttaa nyökyttävää liikettä, mutta ei samoissa määrin kuin ensimmäisessä moottorissa.

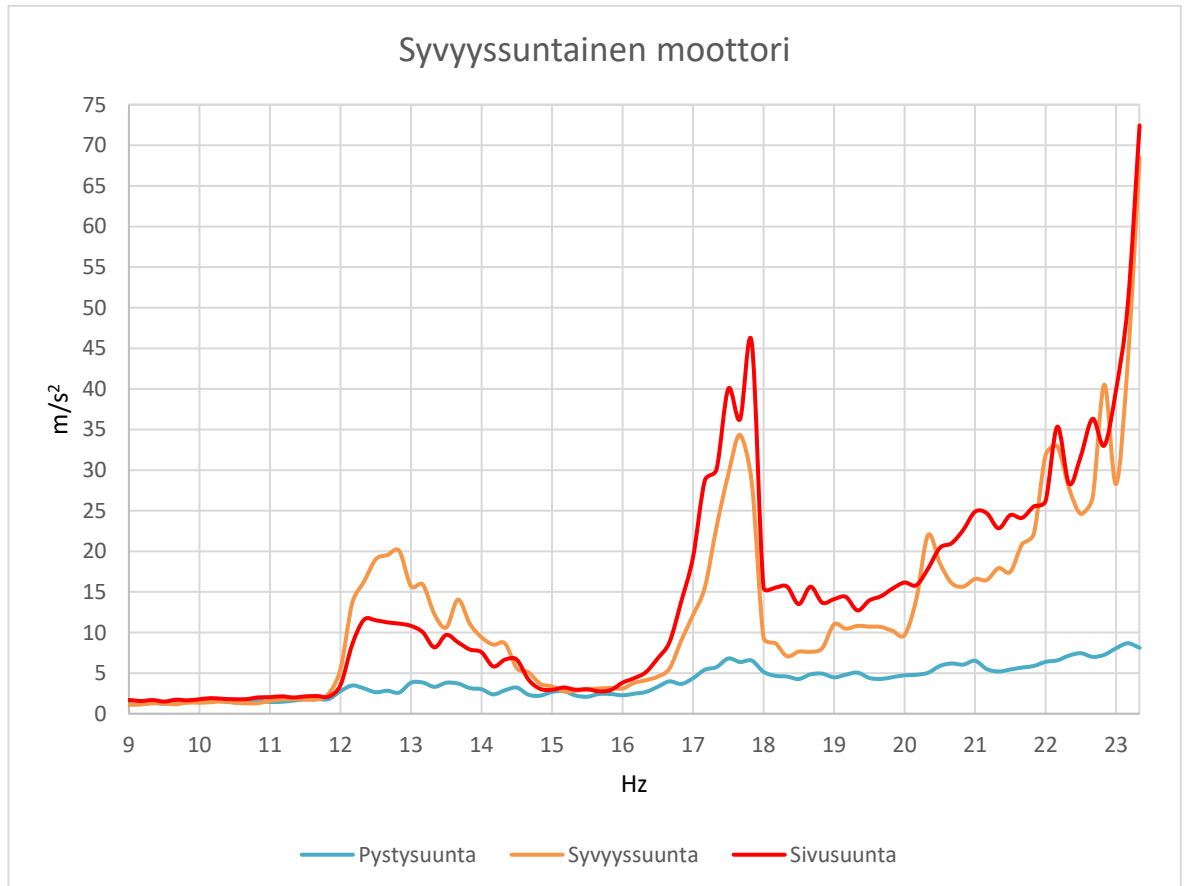


Kuvio 8. Pystysuuntainen moottori.

4.6 Syvyysuuntainen moottori

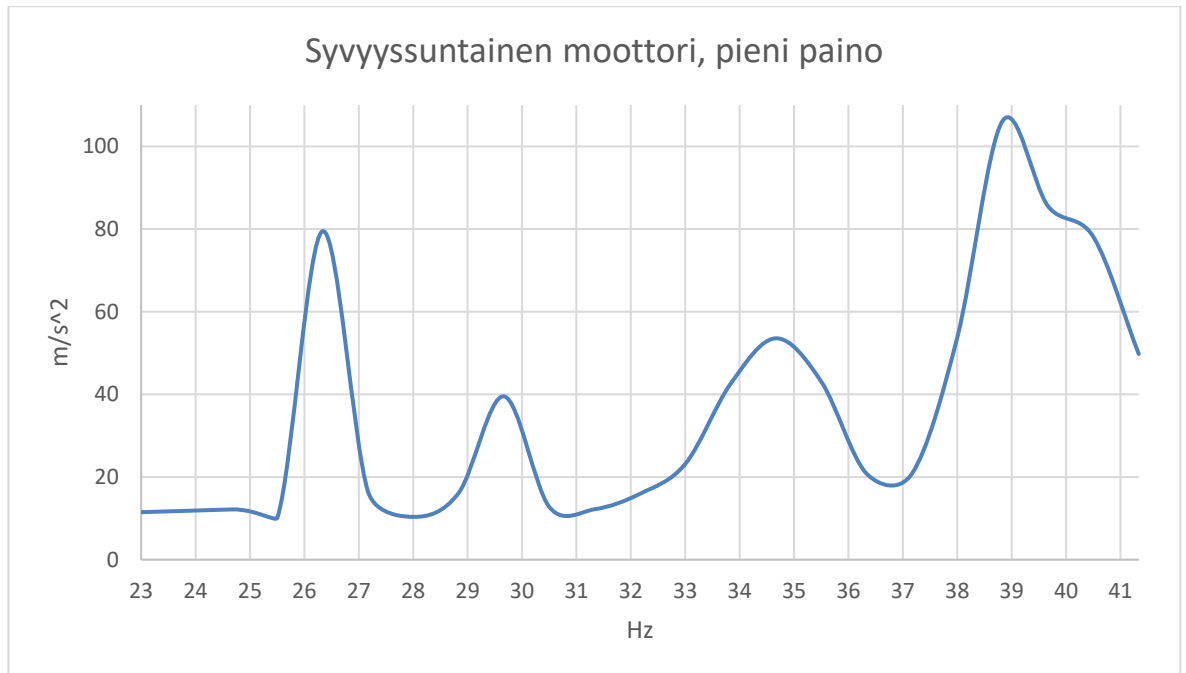
Syvyysuuntainen moottori on sijoitettu sisäkehikon alle, keskelle, vaakatasoon syvyysuunnassa (Kuva 4, M3). Testi ajettiin isolla painolla. Syvyysuuntaisen akselin

tulisi korostaa pysty- ja sivusuuntaista liikettä. Mittaustulokset (katso Kuvio 9.) muistuttavat kakkosmoottorin tuloksia. Tämä selittyy moottorien ja akselien sijainnilla, jotka ovat hyvin samanlaiset, vain 90 astetta eri kulmissa.



Kuvio 9. Syvyysuuntainen moottori.

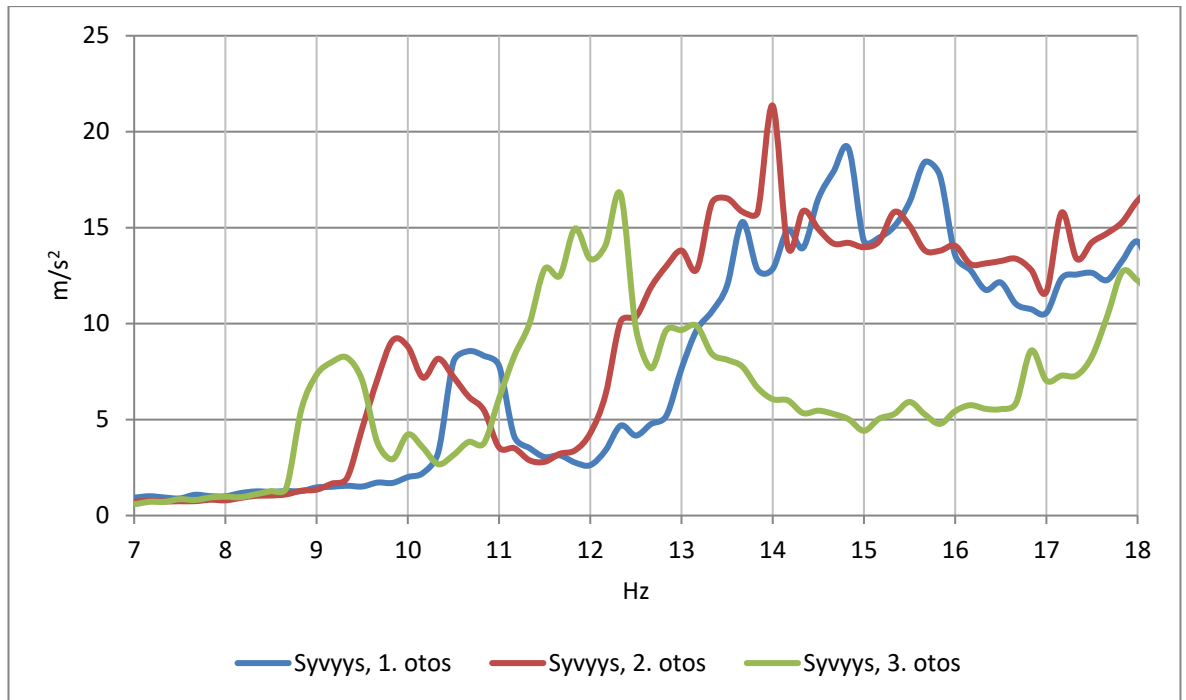
Koska kolmannen moottorin alkuperäistarkoitus oli simuloida dieselmoottorin ääntä kierrosluvuilla 1700-2500, vaihdettiin siihen pienempi paino nopean ajon testiä varten. Pienen painon ajossa saadaan kuvion 10 (alla) kaltaisia kaavioita. Muistutuksena; lauhdutinyksikön dieselmoottorin aiheuttamat kiihtyvyydet työvaiheessa olivat väliltä 8 - 14,4 m/s². Vastaavia arvoja löytyy mittaustulosten "laaksoista", mutta suuremmilla nopeuksilla korostuu entisestään ongelmaksi havaittu ominaistajuuden muutos (katso **4.7 Ominaisajuuden muuttuminen**). Tämä käytännössä esittää kapean hertsialueen moodin ylläpitämistä testipenkin ominaistajuuden jatkuvasti muuttuessa. Tässä vaiheessa ei testattaessa saatu kahta samanlaista tulosta.



Kuvio 10. Syvyysuuntainen moottori pienillä painoilla.

4.7 Ominaisaajuuden muuttuminen

Testipenkin kiihtyvyyksiä mitatessa havaittiin muutoksia testipenkin resonanssitaajuuksissa. Kolmeen kertaan tehdyt mittaukset ensimmäisenä päivänä olivat kaikki yhdenmukaisia. Toisen testikerran tulokset olivat yhdenmukaisia toistensa kanssa, mutta erosivat edellisistä tuloksista kuvion 11 (alla) osittamalla tavalla. Kolmannen testikerran tulokset erosivat aiemmista tuloksista, eivätkä enää olleet toistensa kanssa täysin yhdenmukaisia. Testipenkin painojakaumaa, asentoa tai testiolosuhteita ei ollut muutettu, ja anturin paikka ja asento oli aina sama.



Kuvio 11. Ominaistaajuuden muutos.

Testipenkin värähtelyominaisuuksien muutokset viittaavat rakenteellisiin muutoksiin. Tarkemmin, ominaistaajuuden eksponentiaalisesti kiihtyvä laskeminen viittaa rakenteen ”löystymiseen”. Löystymisellä tässä tapauksessa tarkoitetaan liitoskohtien liikkumavapauden kasvua sekä rakennusmateriaalien väsymistä.

Sisäkehikon liitoskohtien löystyminen todennettiin paikan päällä. Osa ruuveista oli päässyt löystymään, mutta niiden kiristämällä ei päästy jäljittelemään alkuperäisiä testituloksia eikä se lopettanut ominaistaajuuden kiihtyvää muutosta.

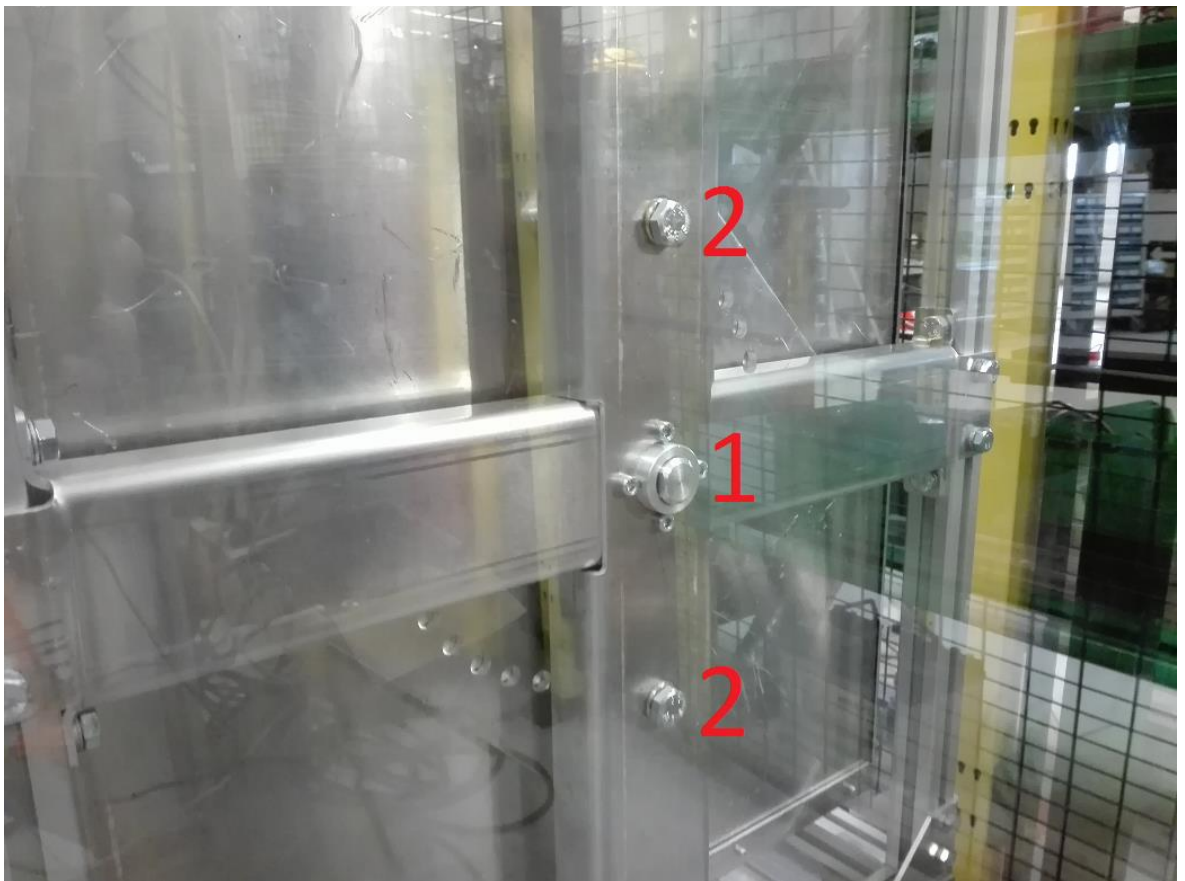
4.8 Johtopäätökset

Testipenkillä saavuttaa tarvittavat arvot, jotta voitaisiin simuloida tärinää, jolle tuuletin altistuvat. Valitettavasti testipenkki ei ole tarpeeksi tarkka muuttuvine ominaistaajuuksineen, jotta sillä voitaisiin toistaa samoja arvoja vain kierrosluvut syöttämällä. Testipenkki on kykenemätön toistamaan samoja moodeja muutamaa käyttökertaa kauemmin, mikä käy vastoin suunniteltua käyttötarkoitusta.

5 ONGELMIA JA EPÄKOHTIA

5.1 Tuuletinlaatikoiden kiinnitysten tärinää vaimentava vaikutus

Vaikka testipenkin tuuletinlaatikoiden kiinnitys tuntuu käsिमääräisesti jämäkältä, tärinätestauksen aikana tapahtuu merkittävää liikettä sisäkehikon ja tuuletinlaatikoiden välillä. Kehikon pysty- ja syvyysuuntainen liike tärinän aikana tapahtuu laatikoiden kiinnitystappien (numero 1, kuvassa 4) ympäri. Kiinnitysruuveihin (numero 2, kuvassa 4) kohdistuu ajon aikana tarpeeksi vipuvoimaa, mikä saa niiden kiinnityksen joustamaan.



Kuva 5. Tuuletinlaatikon kiinnitys.

Pienikin jousto ja väljyys kiinnityksessä aiheuttavat sen, että laatikko on liikkeessään kehikkoaan hiukan jäljessä. Tämä toimii ikään kuin jousena, mikä vaimentaa moottorista kehikon kautta tuuletinlaatikoihin välittyvää syvyys- ja pystysuuntaista tärinää. Tuulettimiin kohdistetusta tärinästä menee näin osa hukkaan.

5.2 Pystysuuntaisen kiihtyvyyden puute

Testipenkin sisäkehikko lepää kahdeksan jousen varassa, joista neljä on puristusjousia ja neljä vetojousia. Puristusjouset sijaitsevat sisäkehikon alapuolella, yksi joka kulmassa, ja ovat pystysuorassa. Vetojouset sijaitsevat sisäkehikon yläpuolella, yksi joka kulmassa, ja ovat pystysuuntaisia säädettävällä kulmalla syvyysuunnassa. Suurin osa yhteisestä jousivoimasta vastustaa sisäkehikon pystysuuntaista liikettä.

Lisäksi sivusuuntaisen moottorin ja epäkeskoakselin sijoitus sisäkehikon etureunaan aiheuttaa pystysuuntaista liikettä enemmän momenttia sisäkehikon sivuakselin suuntaisesti. Ylös-alas-liikkeen sijaan se edes ajaa nyökyttävää liikettä. Koska testattavat tuulettimet sijaitsevat tämän kiertoliikkeen keskipisteessä, on pystysuuntaisen liikkeen vaikutus haluttua vähäisempi. Kaikki tämä käy hyvin ilmi alla olevasta taulukosta (Taulukko 2.), jossa kartoitetaan moottorien aiheuttamia G-voimia.

Taulukko 2. Kiihtyvyyssjakauma.

1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G
9,8 m/s ²	19,6 m/s ²	29,4 m/s ²	39,2 m/s ²	49,0 m/s ²	58,8 m/s ²	68,7 m/s ²	78,5 m/s ²

RPM	Hz	Pysty M1	Syvyys M1	Sivu M1	Pysty M2	Syvyys M2	Sivu M2	Pysty M3	Syvyys M3	Sivu M3
1200	20,0	7,8	26,8	13,4	6,0	10,1	16,0	4,7	9,7	16,2
1210	20,2	7,0	28,4	15,0	6,0	11,5	17,8	4,8	14,1	15,8
1220	20,3	6,7	26,2	11,8	6,2	15,2	19,0	5,0	22,0	17,9
1230	20,5	5,9	30,4	11,9	6,2	18,9	22,1	5,9	18,6	20,4
1240	20,7	5,3	30,2	13,7	6,9	13,9	26,8	6,2	16,1	21,0
1250	20,8	5,2	28,5	14,3	6,9	14,0	23,2	6,1	15,7	22,6
1260	21,0	5,5	30,3	14,8	7,6	15,2	23,4	6,5	16,6	24,9
1270	21,2	5,1	27,4	14,6	7,8	17,9	22,7	5,5	16,5	24,7
1280	21,3	4,6	27,2	14,0	7,0	18,0	24,5	5,2	17,9	22,8
1290	21,5	4,8	29,7	15,6	6,5	18,8	26,2	5,5	17,5	24,5
1300	21,7	5,3	29,6	16,7	7,0	19,4	25,6	5,7	20,9	24,1
1310	21,8	5,8	31,3	20,3	7,6	23,9	28,4	5,9	22,2	25,5
1320	22,0	5,4	33,2	24,9	8,2	22,9	27,4	6,4	31,8	26,2
1330	22,2	5,0	32,3	23,7	8,5	33,4	34,7	6,6	32,9	35,4
1340	22,3	4,6	41,6	23,8	8,4	36,3	34,5	7,2	27,8	28,3
1350	22,5	4,3	41,3	31,4	8,6	36,6	41,0	7,5	24,6	31,7
1360	22,7	5,1	44,8	31,2	9,5	45,0	43,5	7,0	26,6	36,3
1370	22,8	5,3	41,2	43,4	10,1	41,9	49,9	5,3	40,5	33,0
1380	23,0	5,8	54,9	58,2	10,7	41,3	47,6	8,1	28,3	39,9
1390	23,2	6,6	65,3	52,9	10,9	40,2	55,0	8,7	43,4	50,4
1400	23,3	7,4	68,9	73,1	11,3	54,4	63,8	8,1	68,5	72,5

5.3 Ruuvikiinnitykset

Odotetusti, tärinälle altistuvat ruuviliitokset pääsevät löystymään. Ei niin odotetusti, ruuviliitosten kireydellä on suuri vaikutus koko rakenteen ominaistajuuteen. Sisäkehikon käyttäytyminen muuttuu ruuvien löystyessä sekä niitä kiristäessä. Ruuviliitosten muutokset tekevät pitkäaikaisesta ajosta mahdottoman, eikä niiden jatkuva kiristäminen takaisin alkuperäislukemiin momenttiavaimella ole realistinen ajatus. Ruuvilukitteet auttavat aluksi, mutta löystyvät nekin, kun alumiini niiden alta muovautuu puristusvoiman ja liitokseen kohdistuvan vipuvoiman vaikutuksesta.

5.4 Materiaalin muovautuminen ja väsyminen

Rakenteen ominaistajuuden muutokset voi suurimmilta osin laittaa liitoskohtien löystymisen piikkiin. Alumiiniin, etenkin vipuvoiman alla, syntyy painaumia, mikä antaa ruuviliitoksille enemmän liikkumavaraa. Tällainen plastinen muovautuminen ei ole materiaalin väsymistä eikä testejä ajettu tarpeeksi kauan, jotta väsymistä olisi voitu tutkia.

5.5 Laakerien kesto

Testipenkin testauksen loppuvaiheilla havaittiin yhdessä vaakasuuntaisen epäkeskoakselin laakereista rohinää, mikä näkyi myös pienten nopeuksien testituloksissa. Näillä tiedoilla on vaikea sanoa, vahingoittaako epäkesko laakereita vai oliko kyseinen laakeri poikkeustapaus.

6 LOPPUPÄÄTELMIÄ

Testipenkki ei sellaisenaan sovellu simulointitehtäviin. Tehtävä vaatii tiettyjen kiihtyvyyssarvojen simulointia pitkillä aikaväleillä, mitä laite jatkuvasti muuttuvalla ominaistajuudellaan ei pysty saavuttamaan. Tavoitekiihtyvyydet saavutettiin ja ylitettiin, mikä todistaa laitteen toimivuuden periaatteessa. Valitettavasti se ei kuitenkaan täytä simulointitehtävän vaatimuksia. Ilman rakenteellisia muutoksia ominaistajuutta ei saada pysymään vakiona.

Jotta ominaistajuuden vaihtelut saataisiin loppumaan, testipenkin sisäkehikon täytyy olla kiinteä. Sisäkehikon ruuviliitokset elävät ja löystyvät liikaa, jotta testipenkillä saataisiin ajettua samoilla arvoilla pysyvästi. Sisäkehikon voisi hitsata kiinteäksi rakenteen jäykistämiseksi. Huomioitavaa kuitenkin on, että eksponentiaalisesti kiihtyvä ominaistajuuden muutos saattaa viitata materiaalin väsymiseen. Testipenkkiä ei ajettu tarpeeksi kauan minkään rakenteen pettämiseksi, mutta jos materiaali jostain pettää, se pettää heikoimmasta paikasta, eli tässä tapauksesta tuuletinlaatikoiden kiinnityskohdista. Tuuletinlaatikoiden kiinnitysmekanismien uusiminen vaatii koko sisäkehikon uudelleensuunnittelua. Kiinnityksen on oltava pinta pintaa vasten jäykkä ja lukittava paikoilleen ruuveilla, mieluiten useammasta kuin kahdesta pisteestä. Mikäli sisäkehikko korvataan raskaammalla teräsvalmisteisella kehikolla, täytyy testipenkin jouset uudelleenmitoittaa ja korvata. Epäkeskojen on myös vaikeampi liikuttaa raskaampaa sisäkehikkoa.

Ilman vertailukohteita on epäselvää, oliko testiajon aikana rohisemaan ruvennut laakeri heikkolaatuinen vai vaurioittaako epäkesko laakereita. Alun perin käyttötarkoitukseen mitoitettu laakeri pesineen painoi 1,5 kilogrammaa kappale, joten painon pudottamiseksi suunnittelussa siirryttiin kevyempään nykyiseen vaihtoehtoon. Mikäli kävisi ilmi, että laakerit eivät tosiaan kestä epäkeskojen vempuusta, täytyisi uusia laakereita varten suunnitella ja valmistaa laakeripesät itse painon pitämiseksi rajoissa.

LÄHTEET

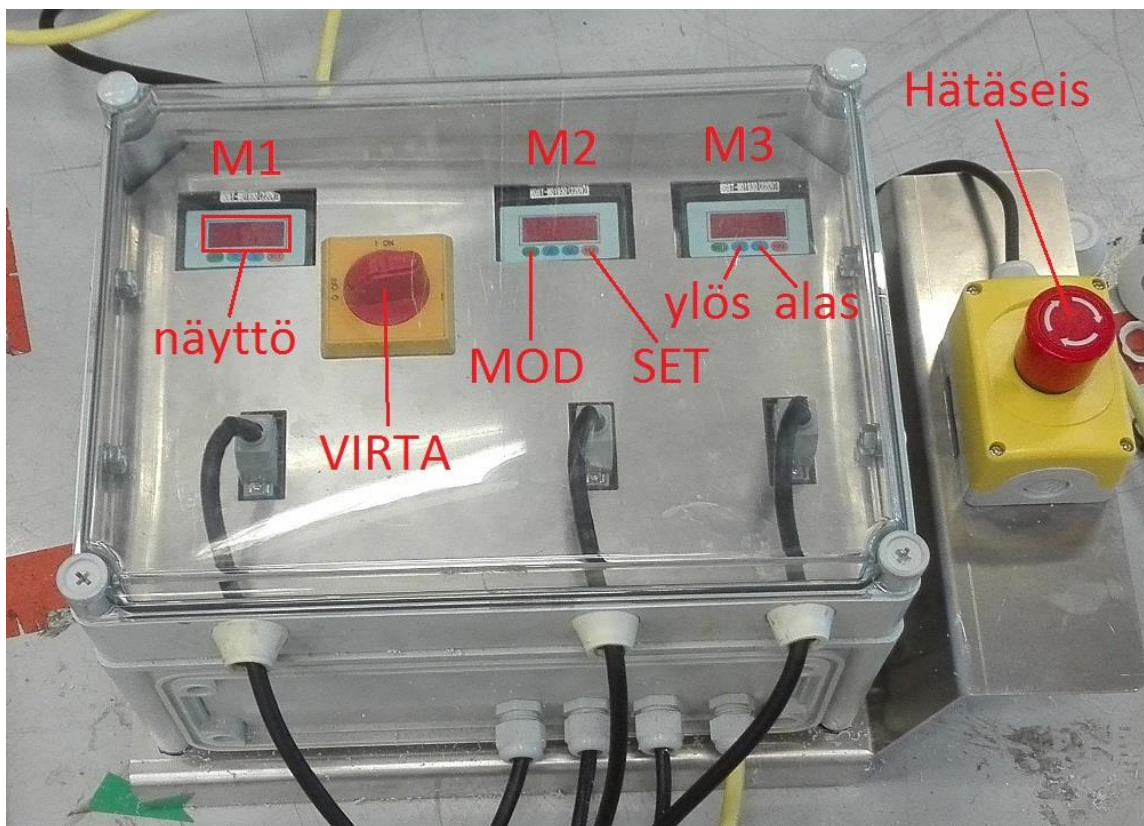
- Dow, S. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. V-Trainer Library CD, [viitattu 8.4.2017]. Saatavana: <http://www.vibrationschool.com/mans/Indexa.htm>
- Hossein, S. & Abdollah, K. 2015. The Effect of Temperature on the Natural Frequency. [Verkkójulkaisu], [viitattu 10.5.2017]. Saatavana: <http://www.e-penerbitan.org/BTT/2015/Supp2/520-528.pdf>
- Inman, D. 2001. Engineering Vibration. 2. Edition. Yhdysvallat: Pearson Education.
- LMS International. 2005. LMS Test.Xpress & Test Lab Modal Analysis. Belgia: LMS International.
- Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2007. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa II. 7. painos. Suomi: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Helsinki: Yliopistopaino.
- Scheffer, C. & Girdhar, P. 2004. Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance. Alankomaat: Elsevier.
- Xia, Y. & Weng, S. & Su, J. & Xu, Y. 2011. Temperature Effect on Variation of Structural Frequencies: from Laboratory Testing to Field Monitoring. [Verkkójulkaisu], [viitattu 4.5.2017]. Saatavana: https://www.researchgate.net/publication/266050808_Temperature_Effect_on_Variation_of_Structural_Frequencies_from_Laboratory_Testing_to_Field_Monitoring

LIITTEET

Liite 1. Tärinäsimulointitestipenkin ohjausyksikön käyttöohje

Liite 2. Tärinäsimulointitestipenkin ajoarvot

Liite 1. Tärinäsimulointitestipenkin ohjausyksikön käyttö



Ohjausyksikkö

Testipenkkiä hallitaan ohjausyksikön kautta. Ohjausyksikössä on kolme taajuusmuuttajaa; yksi joka moottorille.

- Kytke **virta** päälle ja odota hetki.
- Valitse moottori **M1**, **M2** tai **M3**. (Mielessäsi. Mitään ei tarvitse painaa.)
- Pidä **MOD** -nappia hetki pohjassa ja vapauta, jolloin näytössä lukee **dn000**.
- Paina **MOD** –nappia kerran. Näytössä lukee **Fn000**.
- Paina **ylös** kahdesti. Näytössä lukee nyt **Fn002**.
- Pidä **SET** –nappia hetki pohjassa ja vapauta, jonka jälkeen näytössä lukee **Jog_0**.
- Paina kerran **ylös**. Näytössä lukee nyt **Jog_1**.
- Pidä **SET** –nappia pohjassa hetki ja vapauta, jolloin näytössä lukee **0000**.
- Kierroksia nostetaan/lasketaan **ylös/alas** –napilla. **SET** –napilla liikutaan ykkösten, kymppien, satojen ja tuhansien välillä.

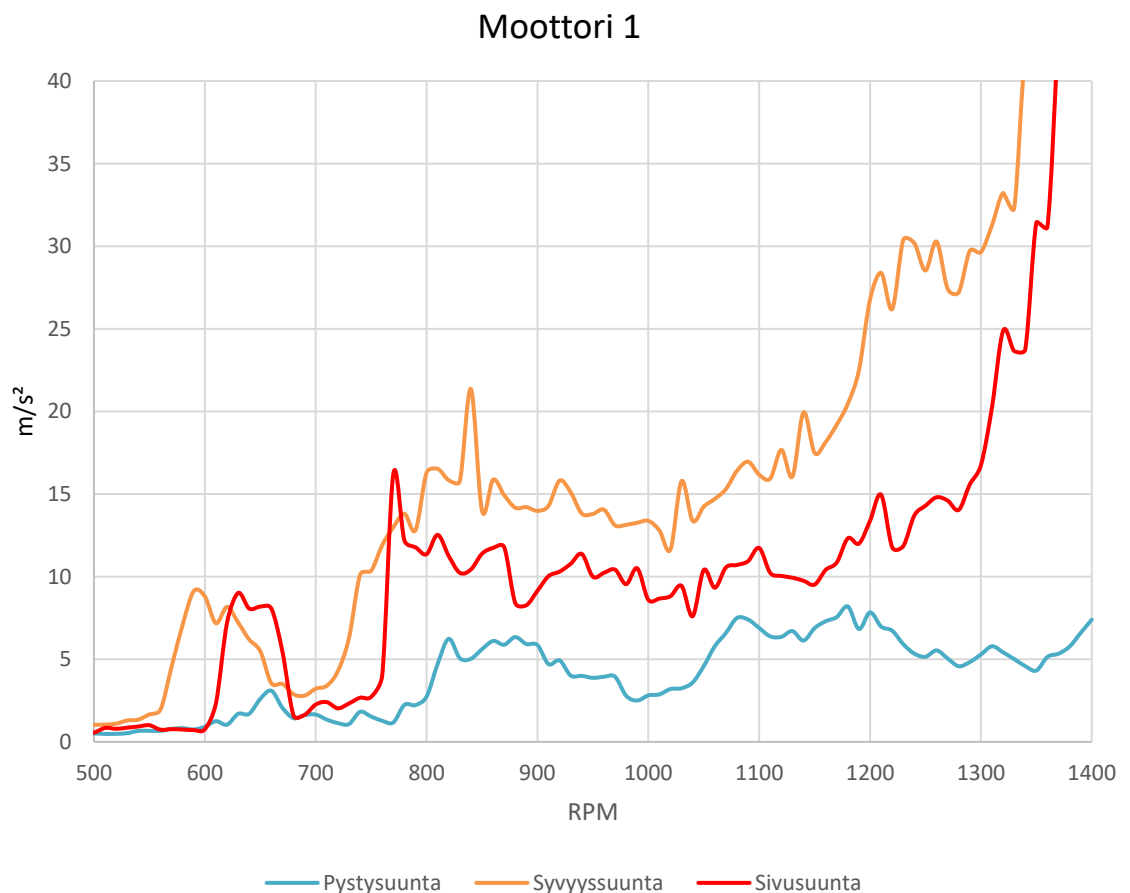
Liite 2. Tärinäsimulointitestipenkin ajoarvot

Koska ohjausyksiköllä säädellään kierroslukuja, alla olevissa taulukoissa on muutettu hertsit kierrosluvuiksi (RPM) testipenkin käytön helpottamiseksi. Mukana lauhduttimen moottoriyksikön kiihtyvyyсарvot joita voi pitää kiihtyvyyden (m/s^2) tavoitearvoina.

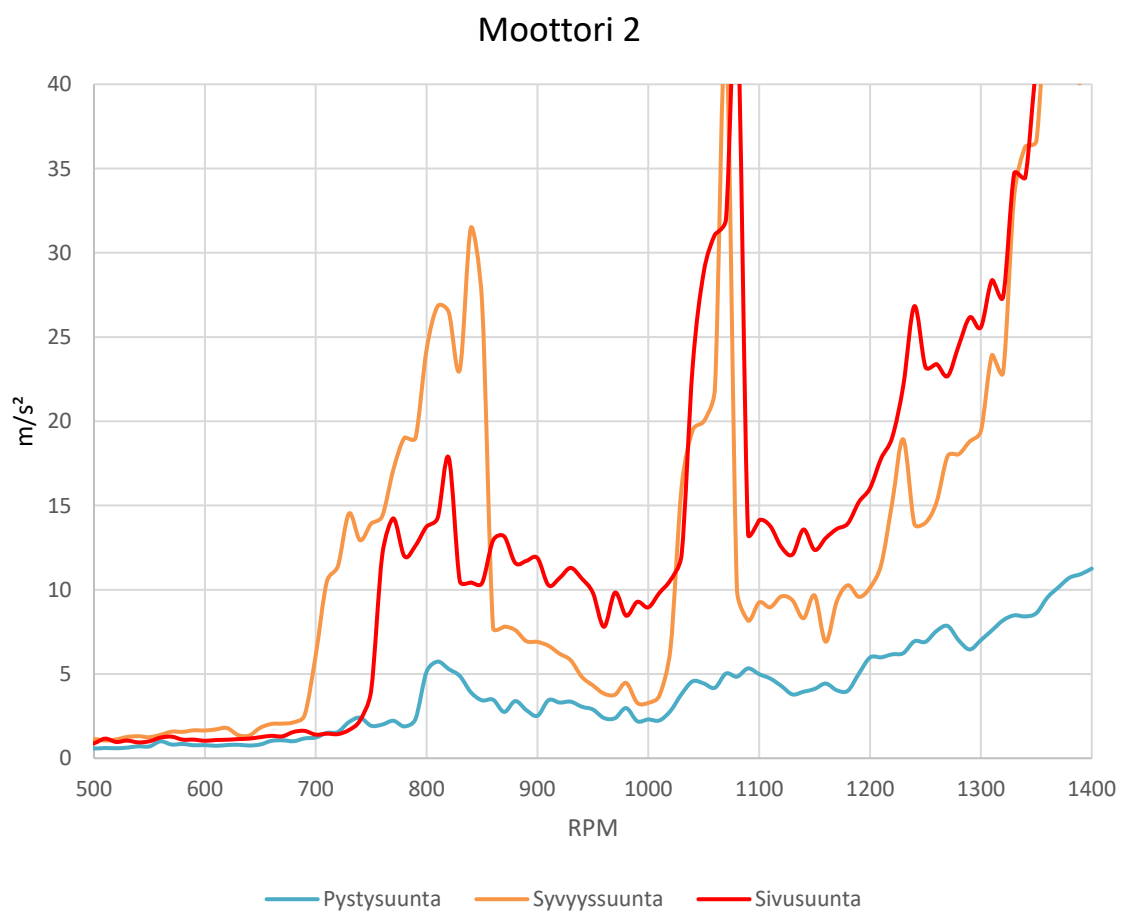
Moottoriyksikön kiihtyvyyсарvot

Vaihe	Tyhjäkäynti	Työ	Työ-Tukos	Käynnistys
m/s^2	4,7	8,0	14,4	20,0

Muistutuksena, että taulukoiden arvot eivät ole luotettavat ominaistajuuden muuttumisen vuoksi (Katso kohta 4.7) eikä moottorien yhteisvaikutuksia ole tämän vuoksi päästy testaamaan.

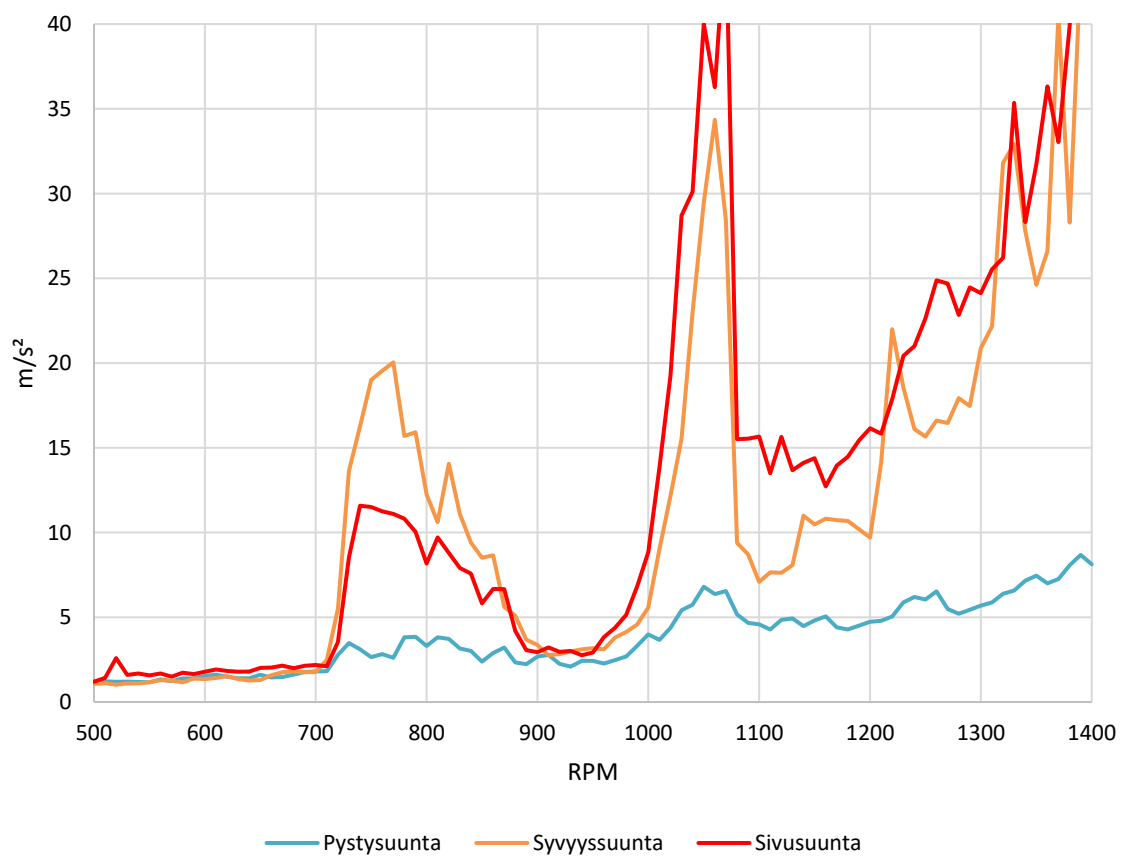


Moottorin 1 ajoarvot.



Moottorin 2 ajoarvot.

Moottori 3



Moottorin 3 ajoarvot.