



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Henri Lehtorinta

# OIKOSULKUMOOTTORIN TÄRINÖIDEN SELVITYS

Suuren pyörimisnopeuden moottorit

Tekniikka ja liikenne  
2014

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Henri Lehtorinta
Opinnäytetyön nimi	Oikosulkumoottorin värinöiden selvitys
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	38
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

---

Suuren pyörimisnopeuden moottoreissa ilmenee resonanssin aiheuttamaa värinää, joka aiheuttaa ongelmia tietyllä kierrosnopeudella. Tässä selvityksessä tutkittiin, mitkä asiat vaikuttavat resonanssin aiheuttamaan värinään ja miten värinän kierrosaluetta sekä amplitudia saadaan hallittua.

Tutkimuksessa tutkittiin ja testattiin ongelmallista runkokokoa 280. Valmis moottori tasapainotettiin, ja värinät mitattiin samalla, kun moottori ajettiin ylös lineaarisesti 1,3 -kertaiseen nimellisnopeuteen. Lisäksi moottorista mitattiin värinän spektrit, kun moottori oli käynnissä nimellisnopeudella. Vertailupohjana käytettiin aiemmin tehtyjä vastaavia mittaustuloksia.

Moottoreissa ilmenevä ongelman aiheuttaja on tuplataajuudella esiintyvä värinä. Värinään vaikuttaa suuresti ilmavälin tasaisuus, moottorin tasainen kiinnitys sekä rungon materiaali ja jäykkyys. Painavalla moottorilla resonanssitaajuus siirtyy pienemmälle taajuudelle.

Moottorin resonanssipistettä voidaan siirtää muuttamalla moottorin painoa tai moottorin rungon jäykkyyttä. Rungon jäykkyyttä voidaan muuttaa käyttämällä eri materiaalia. Moottorin painon muuttamiseksi voi mahdollisesti kokeilla erilaisten päätyjen käyttämistä, tai rungon sisään voi puristaa staattorin jatkoksi erikoisvalmisteisia teräsrenkaita, jotka myös jäykistäisivät runkoa.

## ABSTRACT

Author	Henri Lehtorinta
Title	Study on Vibration of Squirrel Cage Motors
Year	2014
Language	Finnish
Pages	38
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen

---

In high speed motors resonance causes vibration problems at a certain rotating speeds. In this thesis, we investigate the causes of this vibration, and how its position and amplitude can be controlled.

In this study, the focus was on the frame size of 280 which causes the most problems. The test motor was driven from 0 to 1.3 times its nominal rotating speed linearly within 300 seconds while its vibrations were measured. The vibration spectrums of the motor were measured while the motor was running on the nominal speed. The results were compared to similar measurements made before.

The vibration that causes problems is the twice line frequency. This vibration is sensitive to the foot flatness of the motor, frame stiffness and the consistency of the air gap between the stator and the rotor. With a heavy motor, resonance appears in low frequencies.

The resonance point of the motor can be moved by changing the weight of the motor or the stiffness of the frame. To change the weight of the motor, flanges can be changed, or steel rings could be pressed inside the frame. These steel rings would also support the frame by making it stiffer.

---

Keywords                      motor, vibration, resonance, two times frequency

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
	1.1 Tavoitteet .....	7
	1.2 Aiheen valinta .....	7
	1.3 Alkutilanne.....	7
2	ABB.....	9
	2.1 Historia.....	9
	2.2 ABB yrityksenä.....	9
	2.3 ABB Suomessa .....	10
3	YLEISTÄ .....	11
	3.1 Tärinän aiheuttajia .....	11
	3.2 Tuplataajuustärinä.....	12
	3.3 Roottori ei keskellä staattoria.....	13
	3.4 Akseli ei keskellä roottoria .....	15
	3.5 Runkojen resonanssit .....	16
4	MITTAUKSET.....	18
	4.1 Moottorin tasapainotus.....	18
	4.2 Koestus.....	21
	4.3 Rungon vaikutus .....	22
5	RUNGON MITTAUKSET .....	25
6	VALMIIN MOOTTORIN KOESTUS.....	26
	6.1 Tärinätasot.....	27
	6.2 Tärinän spektrit nimellisuopeudessa.....	30
	6.3 Moottorin resonanssitaajuus .....	31
7	ANALYSOINTI.....	33
8	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	36
9	KEHITYSIDEAT .....	37

## LÄHTEET

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuvio 1. Moottori tasapainotuskiekolla</b>	s.11
<b>Kuvio 2. Kaksinapaisen moottorin aaltoiluliike</b>	s.13
<b>Kuvio 3. Roottori ei keskellä staattoria</b>	s.14
<b>Kuvio 4. Roottori ei keskellä akselia</b>	s.15
<b>Kuvio 5. Nylonholkki pitämässä vastapainon ja kiilan paikoillaan</b>	s.19
<b>Kuvio 6. Tärinäanturin kiinnitysalku</b>	s.20
<b>Kuviot 7 ja 8. Tasapainotuslaitteen tarvitsemat tiedot ja kalibrointipaino</b>	s.21
<b>Kuvio 9. 280 SMB GJL250 -runko</b>	s.23
<b>Kuvio 10. 280 SMB GJS500 -runko</b>	s.23
<b>Kuvio 11. Moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona</b>	s.24
<b>Kuvio 12. Moottori valmiina koestettavaksi</b>	s.26
<b>Kuvio 13. Moottorin tärinätasot ennen tasapainotusta</b>	s.27
<b>Kuvio 14. Moottorin tärinätasot tasapainotettuna</b>	s.28
<b>Kuvio 15. Moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona</b>	s.28
<b>Kuvio 16. Tärinätasot kun kiekkoissa 3,6 g:n epätasapaino</b>	s.29
<b>Kuviot 17 ja 18. Tasapainotuslaitteen näyttämät tarvittavat painot, ja asteluvut sekä kiekon poraus</b>	s.30
<b>Kuvio 19. D-pään horisontaalinen tärinäspektri kokonaisarvoltaan 1,2 mm/s</b>	s.30
<b>Kuvio 20. N-pään horisontaalinen tärinäspektri kokonaisarvoltaan 1,0 mm/s</b>	s.31
<b>Kuvio 21. 280 SMA -moottorin resonanssipyörimisnopeudet</b>	s.33
<b>Kuvio 22. 280 SMB -moottorin resonanssipyörimisnopeudet</b>	s.34
<b>Kuvio 23. 280 SMC -moottorin resonanssipyörimisnopeudet</b>	s.34
<b>Taulukko 1. Runkojen painoja ja värähtelytaajuuksia</b>	s.25

**LYHENTEET JA KÄSITTEET**

ABB	Asea Brown Boweri
71-450	Runkokoot eli akselikorkeus millimetreinä
SMA, SMB, SMC	Moottorin teholuokka A-pienin, C-suurin
GJL	Suomugrafiittivalurauta
GJS	Pallografiittivalurauta
Ex	Räjähdysalttiin tilan moottori

# 1 JOHDANTO

Työssä perehdytään moottorin erilaisiin tärinää aiheuttaviin ilmiöihin, joita ilmenee taajuusmuuttajaohjatuissa suuren pyörimisnopeuden moottoreissa. Työssä tutkitaan tärinöiden aiheuttajia ja erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja näiden tärinöiden poistamiseksi.

Tässä työssä suurnopeusmoottorilla tarkoitetaan moottoria, jonka pyörimisnopeus ylittää 3600 r/min.

## 1.1 Tavoitteet

Työssä tutkitaan suurnopeusmoottoreiden materiaalien vaikutusta käytönaikaiseen tärinään ja pyritään luomaan parempi pohja suurinopeusmoottoreiden valmistamiseen. Tällä tutkimuksella on tarkoituksena parantaa suurinopeusmoottoreiden laatua ja parantaa tuotantovarmuutta, pienentämällä moottoreiden korjaus- ja/tai muokkaustarvetta.

Tällä hetkellä noin 10 %:lla moottoreista on jonkinlaisia ongelmia tärinätasojen suhteen, ja tätä osuutta pyritään pienentämään käyttämällä sopivampia materiaaleja näihin tarkoituksiin.

## 1.2 Aiheen valinta

Ollessani useamman kesän moottoritehtaan koekentällä töissä pääsin seuraamaan tärinäkoestusta ja myöhemmin sain myös itse koestaa näitä moottoreita. Näitä moottoreita testattaessa tuli ilmi moottorin tärinän ominaisuuksia ja koin sen mielenkiintoiseksi asiaksi. Myöhemmin kysyttäessä omia ideoita opinnäytetyön aiheeksi ehdotin tärinän tutkimusta, jolle vaikutti olevan tarvetta. Koekentällä saatu kokemus antoi tälle työlle hyvät lähtökohdat.

## 1.3 Alkutilanne

Alkutilanne opinnäytetyölle oli tällä hetkellä käytössä oleva tapa korjata suurnopeusmoottoreiden resonanssitärinää vaihtamalla runko vahvempaan materiaaliin. Tämä ei kuitenkaan poista ongelmaa, vaan ainoastaan pienentää sitä.

Suurnopeusmoottorin käytönaikainen resonanssitärinä on riippuvainen moottorin ominaistajuudesta ja moottorin käyttöajuudesta. Moottorin ominaistajuutta voidaan muuttaa esimerkiksi käyttämällä erilaista runkoa ja materiaalia. Rungon geometriaa muuttamalla voidaan muuttaa rungon painoa ja jäykkyyttä, jotka vaikuttavat rungon ominaistajuuteen.

## **2 ABB**

ABB Oy on maailman johtaviin kuuluva sähkötekniikan yritys, joka valmistaa muun muassa sähkömoottoreita, taajuusmuuttajia, muuntajia ja sähkökojeistoja. ABB:llä on pitkät suomalaiset juuret, sillä se pohjautuu Oy Strömberg Ab yritykseen, joka oli yksi ensimmäisistä suomalaisista sähkötekniikan yrityksistä.

### **2.1 Historia**

Strömberg sai nimensä perustajansa Gottfrid Strömbergin mukaan. Hän valmisti Suomen ensimmäisen tasavirtakoneen vuonna 1880. Strömberg toimi alun perin Helsingin Kampissa, josta se muutti Sörnäisiin ja myöhemmin Pitäjämäelle. Vuonna 1944 yritys laajensi toimintansa Vaasaan, koska se oli turvallisempi tuotantopaikka sotatarvikkeille, joita yritys valmisti. /1/

Sotien jälkeen Strömberg jatkoi sähkökoneiden valmistusta ja nousi Suomen kymmenen suurimman teollisuusyrityksen joukkoon, kunnes vuonna 1987 ruotsalainen ASEA osti yrityksen.

ABB syntyi vuonna 1988, kun ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen BBC yhdistyivät. /2/

### **2.2 ABB yrityksenä**

ABB on globaali sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka pääkonttori sijaitsee Sveitsissä. ABB:n palveluksessa on noin 150 000 henkilöä yli 100 maassa. Suomessa ABB työllistää 5 500 henkilöä. Osakkeet on listattu Zürichin, Tukholman ja New Yorkin pörsseissä.

ABB:n liiketoiminta koostuu viidestä divisioonasta, jotka on jaettu teollisuudenalojen mukaan.

ABB:n menestys perustuu pitkälti jatkuvaan tuotekehitykseen ja yrityksellä onkin seitsemän tutkimuskeskusta ympäri maailmaa. Tuotekehityksen tuloksena ABB on kehittänyt monia sähkötekniikan perusratkaisuja, kuten suurjännitetasavirran siirron pitkillä välimatkoilla sekä uudentyyppisen sähköeristysratkaisun laivoihin.

Nykyään ABB on maailman johtava teollisuuden moottoreiden ja taajuusmuuttajien, tuuliturbiinigeneraattoreiden sekä sähköverkkojen toimittaja. /3/

### **2.3 ABB Suomessa**

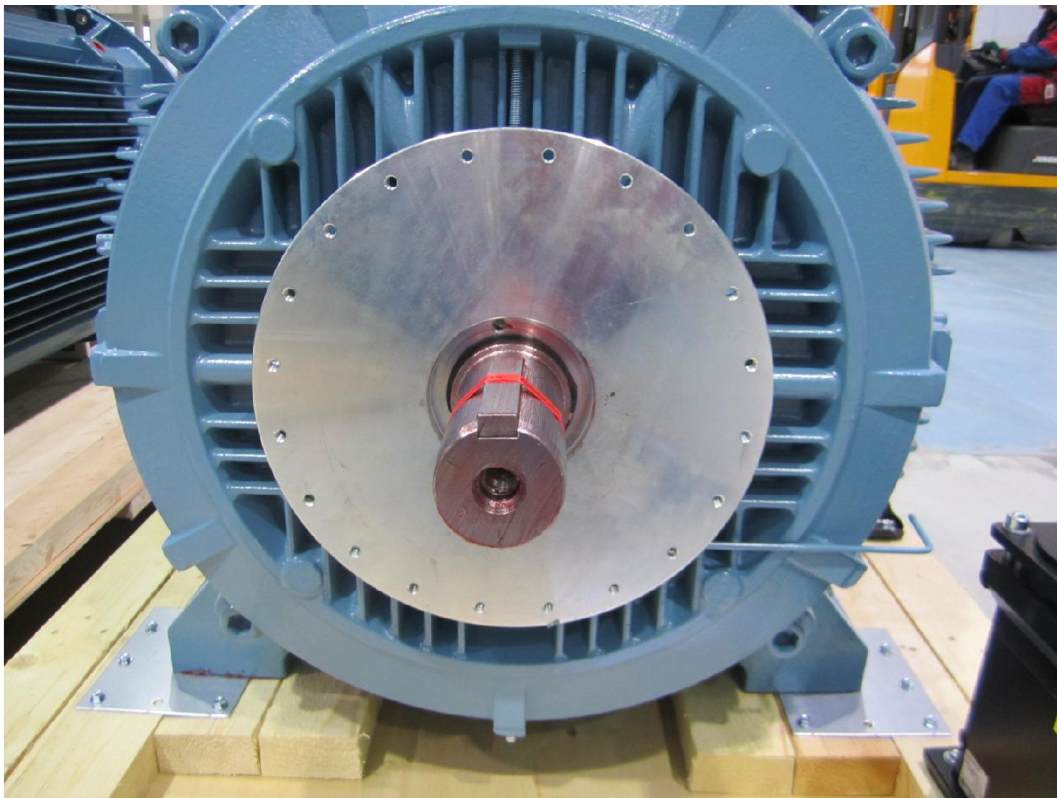
Suomessa ABB:n tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. Suomessa ABB on yksi suurimmista teollisuuden työnantajista ja pääkaupunkiseudulla suurin. Yrityksen liikevaihto on 2,3 miljardia euroa, ja vuosittain tuotekehitykseen käytetään 184 miljoonaa euroa. /4/

Vaasassa moottorit ja generaattorit -yksikkö on keskittynyt pääosin pienjännite-erikoismootoreihin. Näitä erikoismootoreita ovat esimerkiksi räjähdysvaarallisen tilan moottorit, vesijäähdytetyt moottorit, suurinopeusmoottorit sekä muut erikoisia ratkaisuja vaativat moottorit.

### 3 YLEISTÄ

#### 3.1 Tärinän aiheuttajia

Moottorissa tärinää aiheuttaa useimmiten epätasapaino roottorissa, joka korostuu, kun roottoria pyöritetään yli 3600 r/min. Tärinää pyritään vähentämään tasapainottamalla roottori sen suunnitellulla pyörimisnopeudella. Kun roottori asennetaan staattorin sisään voi tasapainotus olla magneettikentässä erilainen. Tästä syystä suurinopeusmoottoreihin asennetaan erilliset tasapainotuskiekot molempiin päihin ja ne tasapainotetaan uudelleen kokonaisuena pakettina. Kuviossa 1 on moottori tasapainotuskiekoilla.



**Kuvio 1. Moottori tasapainotuskiekoilla**

Lisäksi moottoreihin tulee aina jonkinlainen sähköinen resonanssipiste. Resonanssi syntyy, kun sähköinen taajuus osuu koneen luonnolliseen resonanssiin. Resonanssi näkyy terävänä piikkinä tärinässä, kun moottoria ajetaan lineaarisesti tavoitenopeuteen. Resonanssitärinä johtuu materiaalien ja sähkövirran taajuuden kerrannaisista, ja sitä on mahdotonta poistaa kokonaan.

Tähän tärinän pisteeseen voidaan kuitenkin vaikuttaa käyttämällä eri materiaaleja ja muuttamalla moottorin rakennetta. Rungolla on tässä kohdassa suuri merkitys, sillä vahva runko ei kunnolla kiinnitettynä pääse tärisemään yhtä paljon kuin joustavampaa materiaalia oleva runko. Kovemmasta materiaalista valmistettu runko saattaa värähtelevässä käytössä lisätä laakereiden rasitusta ja täten lyhentää niiden käyttöikä. Joustavammasta materiaalista valmistetulla rungolla varustettu moottori saattaa olla joissain tilanteissa parempi, sillä näin saadaan siirrettyä resonanssiipikki pois käytettävältä pyörimisnopeudelta. Helpoin tapa muuttaa moottorin resonanssipistettä onkin muuttaa rungon materiaalia tai tyyppiä. Rungon materiaalina voidaan vaihtoehtoisesti käyttää pallografiittirautaa GJS500, joka on jäykempää ja täten siirtää ominaistajuutta korkeammalle pisteelle samalla pienentäen resonanssin tärinää. Ongelmana tässä materiaalissa on sen korkea hinta.

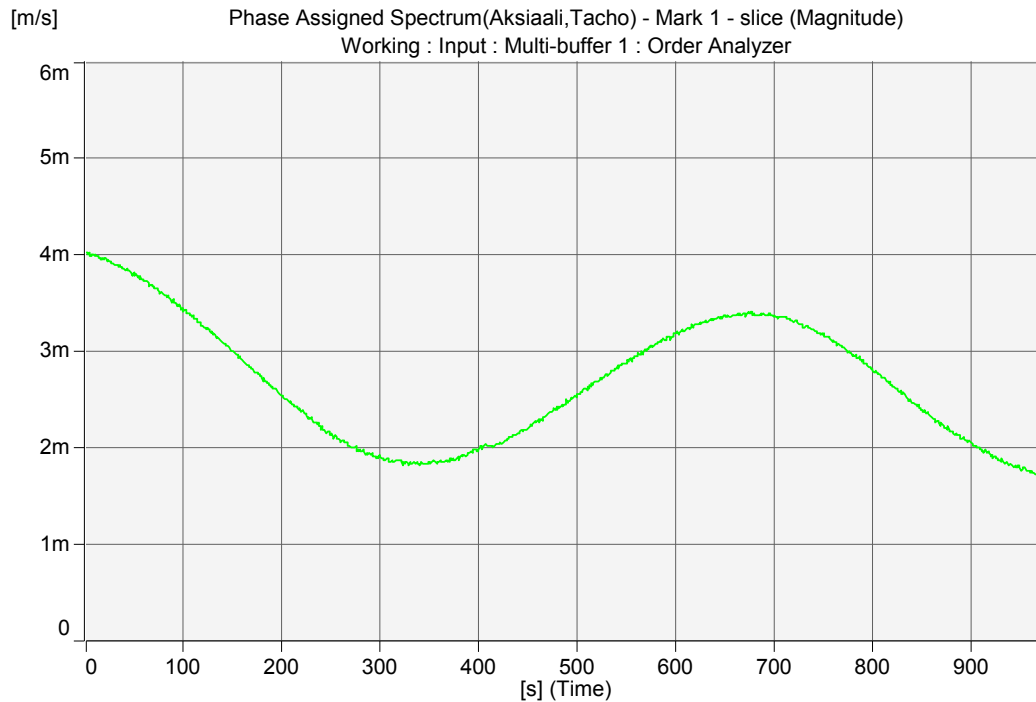
### **3.2 Tuplataajuustärinä**

Tuplataajuus eli kaksi kertaa syöttötaajuuden tärinä aiheutuu staattorin ja roottorin vaikutuksista toisiinsa. Syöttölähteen jännite vaihtelee positiivisen ja negatiivisen puolitaallon välillä siniaaltoisesti jokaisessa jaksossa. Virta aiheuttaa staattorin ja roottorin välille sähkömagneettisen voiman, joka on voimakkaimmillaan virran ollessa korkeimmillaan positiivisella tai negatiivisella puolella. Tämä aiheuttaa kaksi paikallista voiman huippuarvoa jokaiseen jaksoon.

Tähän tärinään vaikuttaa suuresti moottorin jalkojen tasainen vastaaminen alustaan, ilmavälin tasaisuus sekä rungon jäykkyys. Tärinään ei vaikuta moottorin kuorma, sillä vaikka kuorman lisääntyessä staattorin ja roottorin virrat suurenevät ne kumoavat toisensa. Tästä syystä tuplataajuudellisen tärinän aiheuttava epätasainen magneettikenttä, ei muutu kuorman mukana.

Kaksinapaisessa moottorissa tuplataajuus aaltoilee ajan myötä, koska sen taajuus on lähellä tuplakierrostärinän taajuutta. Koska nämä kaksi tärinää ovat lähes samantaajuisia, ne lisäävät toisiaan ollessaan samassa vaiheessa ja vähentävät toisiaan ollessaan eri vaiheessa.

Tuplakierrostarinää voi aiheuttaa ellipsinen tai kulunut laakeri, taipunut akseli tai löystyneet osat. Kuviossa 2 on esimerkillinen tilanne kaksinapaisen moottorin värinän aaltoilusta. Kuviossa 2 on mitattu erään kaksinapaisen 280SMA-moottorin värinää 1000 sekunnin aikajaksolla. Tämä ilmiö tapahtuu niin tyhjäkäynnissä kuin täydellä kuormallakin. Tyhjäkäynnissä taajuus lähestyy synkroninopeutta ja sen muuttumisnopeus on 5-15 min välillä.



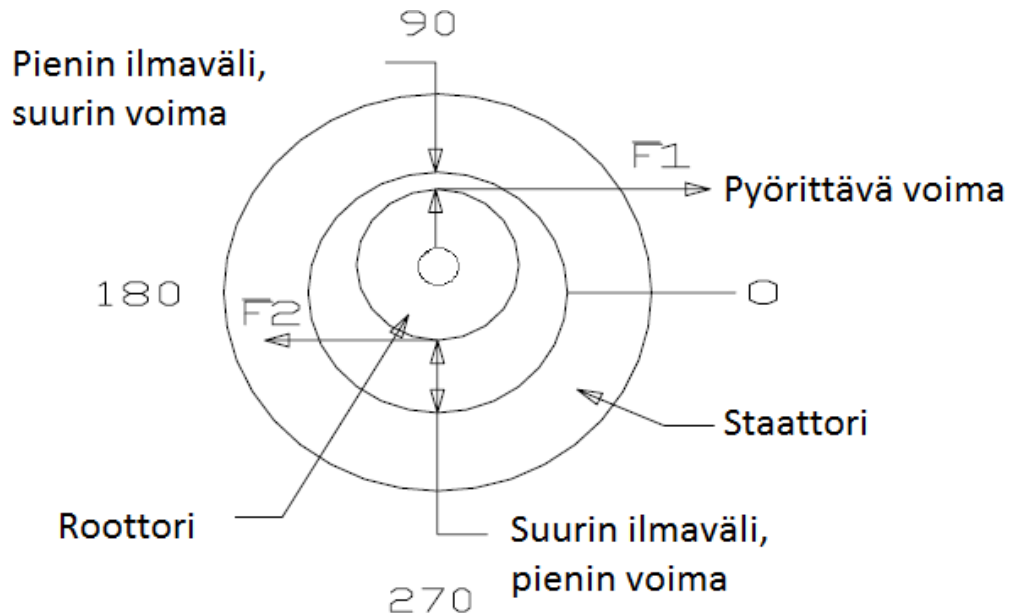
**Kuvio 2. Kaksinapaisen moottorin aaltoiluliike**

Kaksinapaisessa moottorissa sähkömekaaninen voima pyrkii vääntämään staattorin ellipsiseen muotoon. Pääasiallisesti tätä liikettä vastustaa staattorin runko ja käämityksen vahvuus staattorin ympärillä. Nelinapaisen moottorin on napojen etäisyys on toisiinsa nähtynä puolet kaksinapaiseen verrattuna. Nelinapainen moottori onkin paljon jäykempi liikkeelle, joka ilmenee paljon pienempänä tuplataajuuden värinänä.

### 3.3 Roottori ei keskellä staattoria

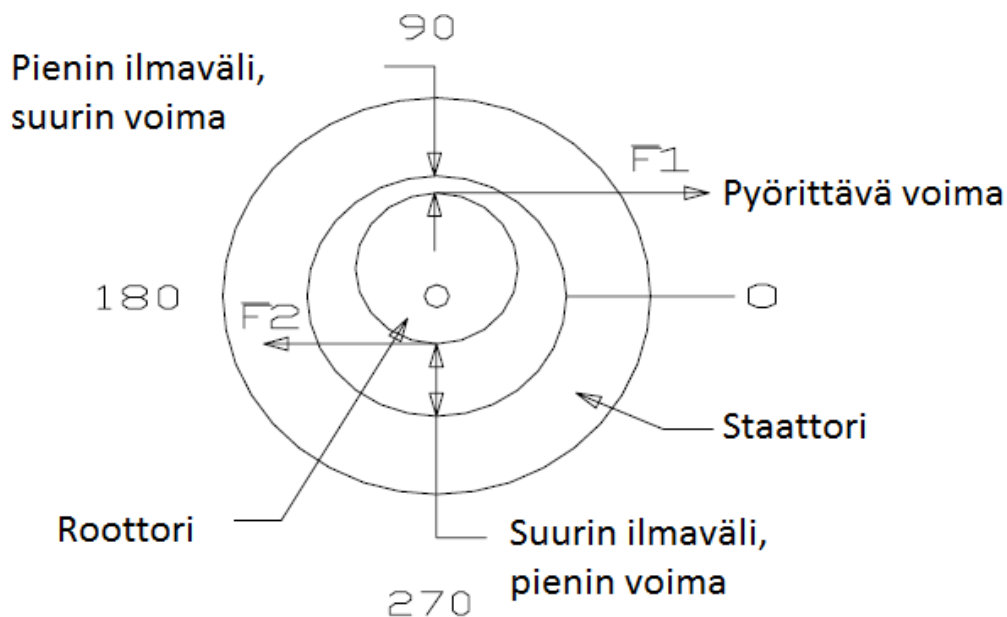
Tuplataajuuden värinä kasvaa suuresti, jos ilmaväli ei ole tasainen roottorin ja staattorin välillä. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että sähkömagneettinen voima on suurimmillaan pienimmässä ilmavälissä ja pienimmillään suuressa

ilmavälissä. Magneettikenttä kiskoo pienimmän ilmavälin kohdalla roottoria kohti staattoria ja roottori pyrkii kohti pienempää ilmaväliä. Tämä aiheuttaa akselin värinää ja saattaa rasittaa laakereita. Kyseinen tilanne syntyy, kun roottori ei ole täysin keskellä staattoria, kuten on esitetty kuviossa 3.



**Kuvio 3. Roottori ei keskellä staattoria /5/**

Tässä tilanteessa pienin ilmaväli on aina samassa kohdassa. Pyörivä kenttä etenee pienimmän ilmavälin ohitse ja saavuttaa huippuarvonsa, jolloin pienimmän ilmavälinkohdalle muodostuu maksimivoima, joka pyrkii pienentämään ilmaväliä. Tämä toistuu jokaisessa jaksossa kahdesti, sillä jokaisessa jaksossa pyörivällä vuolla on positiivinen ja negatiivinen huippuarvonsa. Esimerkiksi 50 Hz verkossa ilmiö aiheuttaa 100 Hz värähtelyä moottoriin. Kuviossa 3 voiman suunta roottorissa kohdistuu ylöspäin.



**Kuvio 4. Roottori ei keskellä akselia /5/**

### 3.4 Akseli ei keskellä roottoria

Epäkeskoroottori aiheuttaa minimi-ilmavälin, joka pyörii samaa tahtia roottorin kanssa. Vuon aiheuttava magnetomotorinen voima pyörii moottorin synkroninopeutta, ja roottori pyrkii pyörimään samaa tahtia staattorin aiheuttaman kentän kanssa, mutta jättämän takia se jää jälkeen. Jättämä siis määrää kuinka tiheästi vuon maksimiarvo osuu pienimmän ilmavälin kohtaan. Kun minimi ilmaväli osuu vuon maksimi kohtaan, on voima suurimmillaan. Voima pienenee vastaavasti osuessaan suurimman ilmavälin kohtaan. Tämä aiheuttaa epätasaisen magneettikentän, joka pyörii samaa tahtia roottorin kanssa ja muuttaa amplitudiaan jättämän mukaan.

Tuloksena on pyörimisnopeuden värinä, jonka voimakkuus muuttuu jättämän mukana. Esiintyvä muuttumistaajuus on kaksi kertaa roottoritaajuus. Kuviossa 4 on esitettyä tilanne, jolloin pienin ilmaväli kiertää roottorin mukana. Esimerkiksi kaksinapaisella moottorilla, täydellä kuormalla, 3564 r/min nopeudella syöttötaajuudella 60 Hz saadaan jättämäksi 36 r/min mikä aiheuttaa taajuuden  $2 \cdot 36 \text{ r/min} = 72 \text{ r/min}$  eli 1,2 Hz. Tämän ilmiön aiheuttaman värinän suunta vaihtelee pienimmän ilmavälin mukana.

Epätasainen magneettikenttä voi aiheuttaa myös syöttötaajuuden tärinää, eli tärinää, jonka taajuus on sama syöttötaajuuden kanssa. Jos roottori tai staattori pääsee liikkumaan puolelta toiselle, voi myös pienin ilmaväli liikkua puolelta toiselle. Kun tämän liikkeen taajuus osuu samaan vuon taajuuden kanssa, epätasainen magneettikenttä alkaa vetää puolelta toiselle pienimmän ilmavälin mukana ja aiheuttaa näin syöttötaajuudella olevaa tärinää. Yleensä tämä tärinä on olematonta, mutta jos staattorin tai roottorin ominaistajuus osuu samaan syöttötaajuuden kanssa, voi tärinä olla suurtakin.

Magneettisten voimien vaikutuksesta staattorirunko alkaa värähdellä kuten teräsrinkula sitä lyötäessä. Jokaisella moottorilla on oma luonnollinen taajuutensa. Jos moottorin resonanssitaajuus on lähellä syöttävää taajuutta, aiheutuu suurta tärinää. Staattorin värähtely saattaa aiheuttaa resonanssitaajuuksia, jotka ovat lähes saman taajuisia syöttöjännitteen taajuuden kanssa. /5/

### 3.5 Runkojen resonanssit

Normaalisti käytettävä rungon valumateriaali on GJL250, jossa G = valu, J = rauta, L = suomugrafiitti ja luku on materiaalin murtolujuus  $N/mm^2$ . Vastaavasti GJS500 tarkoittaa pallografiittista valurautaa, jossa S = pallografiitti jonka murtolujuus on  $500 N/mm^2$ .

Tällä hetkellä tiedetään, että esimerkiksi 280 SMC -runkokoon moottorin resonanssipiste on noin 4400 r/min normaalilla GJL250-rungolla ja GJS500-rungolla se on 4800 r/min. 280 SMA -rungon resonanssipiste on 4500 r/min ja GJS500 -rungolla se on 4900 r/min. Aiemmin tehtyjen runkomittausten perusteella voidaan sanoa rungon taajuuden vaihtelevan +/- 5 % välillä eli +/- 300 r/min. Tämän vaihtelevuuden aiheuttaa tämän hetken tiedon mukaan pelkästään rungon painon poikkeavuus, joka saattaa olla suurimmillaan 5 kg. Joissain tapauksissa saattaa kahden samanlaisen moottorin resonanssin amplitudi olla kaksinkertainen toisiinsa verrattaessa. Syy tällaiseen käytökseen on vielä epäselvä. Ilmeisimmin tähän vaikuttaa valun laatu, jäykkyys ja ilmavälin tasaisuus.

Kaikenkokoisissa moottoreissa ilmenee näitä ongelmia, mutta selvästi eniten niitä ilmenee juuri 280 -runkokoon moottoreissa, joten tässä työssä perehdytään syvemmin juuri tämän runkokoon moottoreihin ja niiden rakenteen muuttamiseen. Tämän kokoluokan moottorin ongelman aiheuttaa sen käyttöalue, joka useasti osuu resonanssialueelle. Suuremmissa ja painavammissa moottoreissa tätä ongelmaa ei esiinny niin useasti, sillä niiden resonanssitaajuus osuu useasti matalammalle kierrosluvulle.

## 4 MITTAUKSET

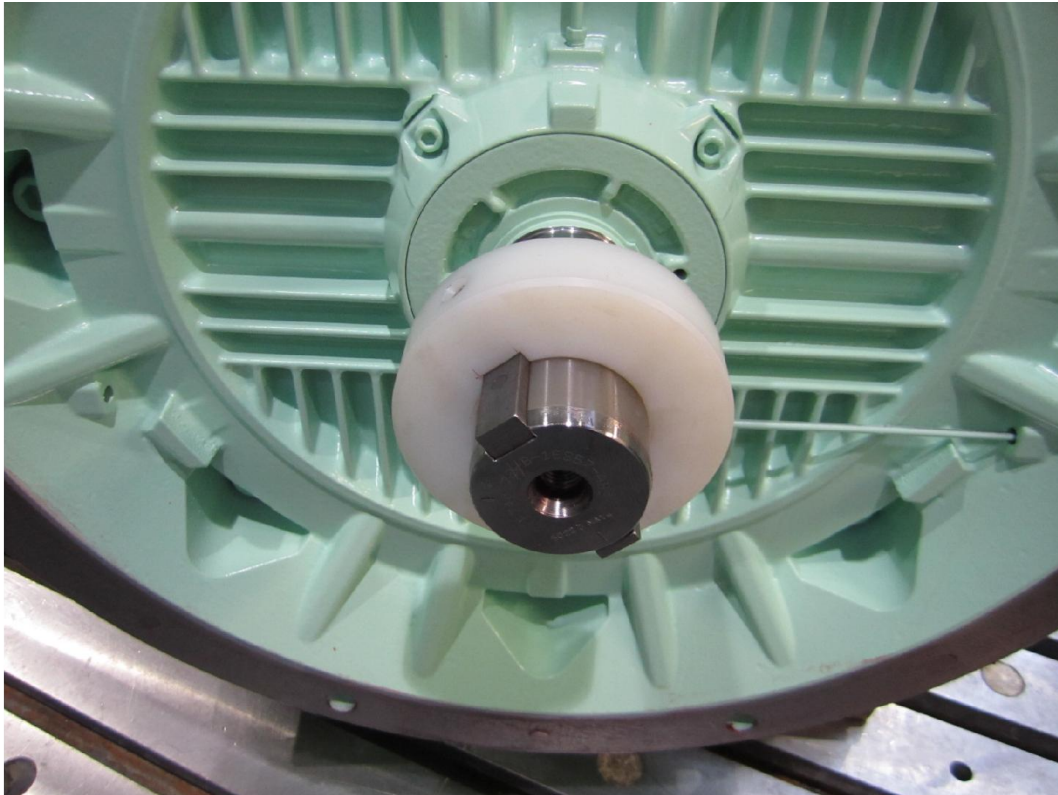
### 4.1 Moottorin tasapainotus

Suurnopeusmoottoreissa roottorin tasapainotuksella on suuri osuus moottorin tärinään. Kun roottoria pyöritetään erityisen nopeasti, pienikin epätasapaino kertautuu ja aiheuttaa täten tärinää. Suurnopeusmoottoreiden roottorit tasapainotetaan aina suunniteltuun nopeuteen, mutta tasapainotus muuttuu hieman kun roottori laitetaan staattoripakettiin ja kun moottoriin kytketään sähkö. Tästä syystä suuren pyörimisnopeuden moottoreiden roottorit tasapainotetaan lisäksi vielä erillisillä tasapainotuskiekoilla, sillä pelkkä roottorin tasapainotus ei riitä.

Tasapainotuskiekoilla tehtävä tasapainotus suoritetaan moottorin ollessa kiinnitettynä alustaan. Ennen kiinnitystä varmistetaan, että moottorin jalat asettuvat tukevasti alustaan ja tarvittaessa lisätään materiaalia jalan alle. Tällä estetään rungon vääntyminen kiinnitysvaiheessa, sillä rungon vääntyessä sen ominaistaajuus muuttuu.

Moottorin oikea kiinnitys suoritetaan ristikiristyksellä ja momenttiavaimella, jolloin moottori saadaan tukevasti kiinnitettyä alustaan. Yleisimmin kiristysmomenttina käytetään 200 Nm, mutta tämä vaihtelee ruuvikoon mukaan. Lisäksi täytyy tarkistaa, mille kiilatyypille akselin tasapainotus on tehty ja sen perusteella joko poistaa kiilat tai asentaa sopiva vastapaino paikoilleen.

Mahdollinen vastapaino asennetaan paikalleen nylonholkilla, joka pitää kiilan ja painon paikallaan. Joissain tilanteissa käytetään teräksestä valmistettua holkkia, koska nylonholkki ei kestä suurimpia pyörimisnopeuksia. Kuviossa 5 on nylonholkki asennettuna akseliin. Moottorin tuulettimen ollessa muovinen suoritetaan tasapainotus ilman tuuletinta. Metallinen tuuletin täytyy olla kiinni tasapainotuksen aikana, sillä se vaikuttaa tasapainotukseen. Metallisen tuulettimen maksimi pyörimisnopeus on 5300 r/min.



**Kuvio 5. Nylonholkki pitämässä vastapainon ja kiilan paikoillaan**

Tasapainotuskoneen anturit asennetaan moottorin D- ja N-päähän vaaka-akselille ja akselille asennetaan kierroslukua mittaava laseranturi. Moottorin D –pää on moottorin etupuoli ja N –pää on moottorin perä, jossa on yleensä tuuletin.

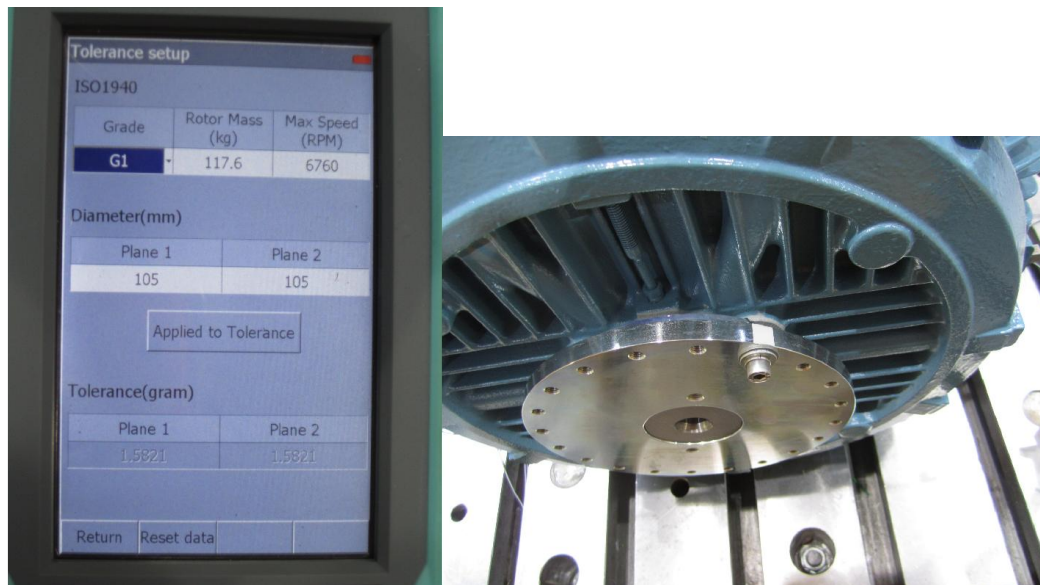
Antureita ei voi koskaan asentaa moottorin jäähdytysripoihin tai muihin ohuisiin kohtiin, sillä ne saattavat vahvistaa rungon värähtelyä. Tärinäanturit kiinnitetään moottoriin erillisillä kiinnitysaloilla, jotka liimataan moottorin runkoon. Kuviossa 6 on tärinäanturin muovinen kiinnitysalka oikein asennettuna.



**Kuvio 6. Tärinäanturin kiinnitysalku**

Kuviossa 7 on tasapainotuslaitteen tarvitsemat moottorin tiedot: pyörivä massa, tasapainotusnopeus sekä tasapainotuskiekkujen säde.

Moottori ajetaan tasapainotusnopeuteen, ja otetaan mittaus. Tämän jälkeen asennetaan kalibrointipaino tasapainotuskiekkoon ja kerrotaan mittalaitteelle painon koko, asema asteina ja etäisyys akselin keskikohdasta. Kalibrointipainon täytyy olla suurempi kuin moottorin tasapainotukseen vaadittava paino. Moottori ajetaan uudelleen tasapainotusnopeuteen, ja otetaan uusi mittaus. Tasapainotuskone laskee tasapainotukseen tarvittavat painot ja ne asteluvut, joihin painot tulee asentaa. Tasapainotuskiekkoihin asennetaan laitteen ilmoittamat painot, ja moottori ajetaan uudelleen tasapainotusnopeuteen, jolloin otetaan uusi mittaus. Kuviossa 8 on käyttämämme 24,3 g kalibrointipaino ja kierrosnopeusanturin tarvitsema heijastin-teippi.



**Kuviot 7 ja 8. Tasapainotuslaitteen tarvitsemat tiedot ja kalibrointipaino**

Tasapainotuskiekoissa on valmiiksi paikat painoille, joten asteluvut eivät aina ole täsmälleen oikeat, ja haluttuun lopputulokseen päästään tekemällä ensin muutama kokeilu erilaisilla painoilla ja painojen paikoilla. Painoilla ei ole varsinaista maksimimäärää, mutta jos tasapainotukseen tarvitaan useamman kymmenen gramman painoja, täytyy roottori lähettää uudelleen tasapainotettavaksi. Jos moottorin tasapainotukseen vaadittava massa alkaa kasvaa jokaisen pyörittämisen jälkeen, on syytä epäillä, että roottorin oikosulkurenkaat ovat alkaneet repeytyä. Repeytyminen saattaa johtua liian suuresta pyörimisnopeudesta tai virheellisestä roottorista.

#### **4.2 Koestus**

Pulse-mittalaite käyttää samoja antureita kuin tasapainotuslaite. Pulse-mittalaitteen värinäanturit asennetaan moottorin D- ja N-päihin vaaka- ja pysty akselille, sekä akselin suuntaisesti. Lisäksi moottorista mitataan pyörimisnopeus akselilta laseranturilla.

Asiakkaan vaatimuksen mukaan moottori ajetaan 1,3 kertaa nimellisuopeuteen lineaarisesti 300 sekunnin aikajaksolla, ja mittalaite mittaa moottorin värinän. Tällä saadaan selvä kuvaaja, jossa on x-akselilla aika sekunteina ja y-akselilla

tärinän suuruus nopeutena mm/s. Mittalaitteella voidaan havainnoida tarkkaa kierrosnopeutta ja senhetkistä tärinää.

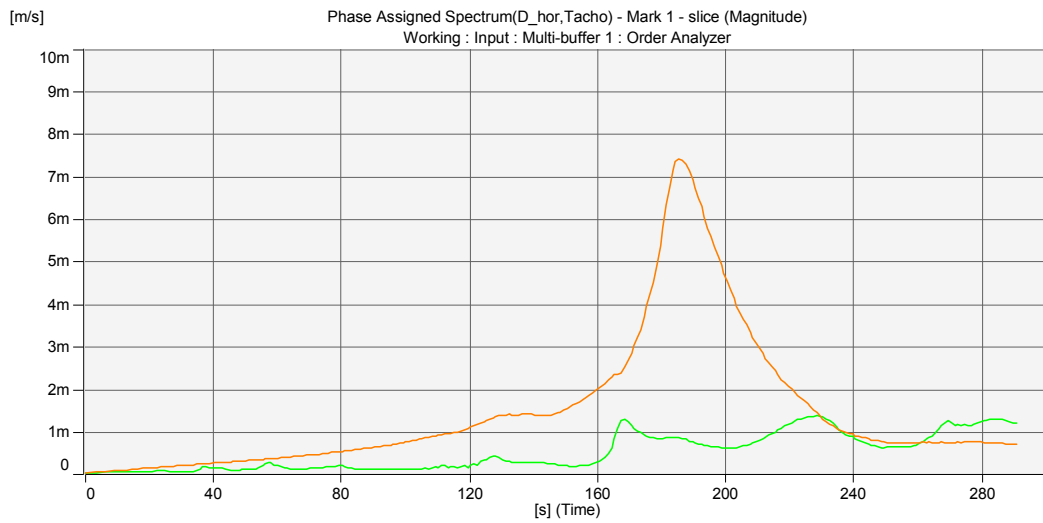
Tasapainotuksen jälkeen moottori ajetaan nimellisnopeuteen, jolloin mitataan tärinän spektrit. Spektreissä nähdään, millä taajuudella moottori värähtelee nimellisnopeudessa. Tästä mittauksesta nähdään moottorin tärinän luonne ja voidaan määrittää tärinän lähde.

### **4.3 Rungon vaikutus**

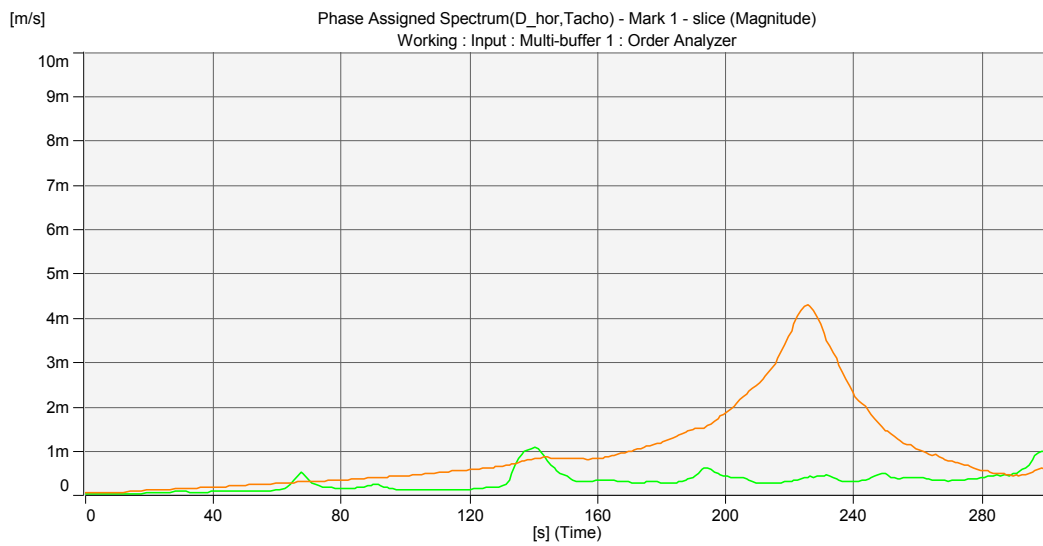
Rungon materiaali vaikuttaa suuresti rungon ominaistaajuuteen. Normaalisti moottorin rungot valmistetaan suomugrafiittivaluraudasta GJL250. Jos moottorin käyttöalue osuu resonanssin kohtaan, on moottoriin mahdollista vaihtaa pallografiittivalurautarunko GJS500. Suomugrafiittivaluraudalla on hyvät vaimennusominaisuudet ja se vaimentaa hyvin mekaanista värähtelyä. Korkean vaimennuskyvyn omaavalla materiaalilla on alhainen kimmokerroin ja siten myös alhaisempi ominaistaajuus. Pallografiittivaluraudalla vaimennusominaisuudet ovat hieman huonommat kuin suomugrafiittivaluraudalla, mutta koska sen murtolujuus ja jäykkyys ovat suurempia, pienentää se tuplataajuustärinän amplitudia. Lisäksi pallografiittivalurautaisen rungon ominaistaajuus on korkeampi, joten resonanssipiste siirtyy korkeammalle. Pallografiittivalurautaisen rungon käyttäminen ei ole kannattavaa, sillä sen hinta on kahdeksankertainen suomugrafiittivalurautaiseen verrattuna. Suurimpana syynä korkeaan hintaan on pallografiittivalurautaisten runkojen pieni menekki.

Kuviossa 9 nähdään 280 SMB -moottorin käyttäytyminen normaalilla GJL250-rungolla ja kuviossa 10 on sama moottori GJS500-rungolla. Kuvioissa vihreä kuvaaja on vertikaalinen tärinä ja oranssi on horisontaalinen. Vertikaalinen tärinä ei pääse nousemaan kovin suureksi, sillä moottori on kiinnitetty tukevaan alustaan ruuveilla 200 Nm momentilla. Kuviossa 11 on moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona. Kuviossa 9 horisontaalinen tärinä saavuttaa maksimiarvon 7,5 mm/s pyörimisnopeudella 4000 r/min, kun vastaavasti kuviossa 10 maksimiarvo 4,3 mm/s saavutetaan pyörimisnopeudella 4700 r/min.

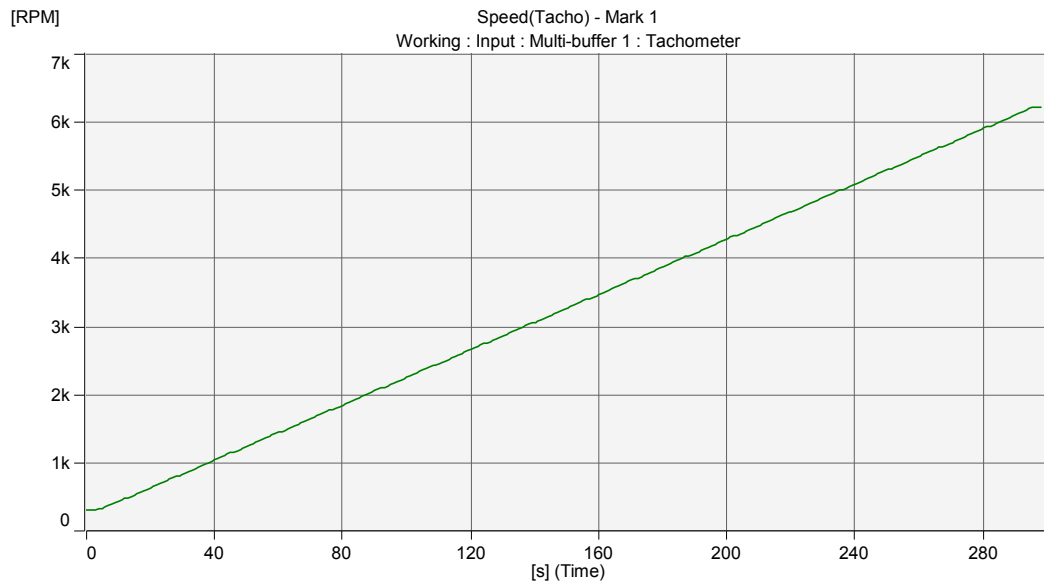
Kuvioista voidaan huomata moottorin resonanssipisteen siirtyvän korkeammalle GJS500 -rungolla ja samalla moottorin resonanssin aiheuttama tärinä pienenee.



**Kuvio 9. 280 SMB GJL250 -runko**



**Kuvio 10. 280 SMB GJS500 -runko**



**Kuvio 11. Moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona**

Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi kuvioissa 9 ja 10 mitatut käyrät on mitattu samalla moottorilla, johon ainoastaan vaihdettiin erilainen runko.

## 5 RUNGON MITTAUKSET

Runkojen seinämäpaksuus vaihtelee, sillä staattorin paikka ei välttämättä aina osu keskelle runkoa. Tämä voi heikentää rungon jäykkyyttä ja siten suurentaa tuplataajuustärinää. Lisäksi suuruuteen voi vaikuttaa rungon valun laatu, sillä huonosti onnistuneen valun jäykkyys on huonompi, ja täten huonolla valulla tuplataajuuden tärinä on suurempaa.

Taulukossa 1 on mitattu viiden 280 SM -runгон paino sekä niiden värähtelytaajuudet. Mittaukset suoritettiin moottorin ollessa kannatuksissa nostokorvasta, ja heräte annettiin vaakatasossa jolloin nosturin resonanssi jää mahdollisimman pieneksi.

Kaikki rungot ovat vertailupohjaltaan samanlaisia, ja ainoa poikkeavuus on paino. Kevyimmän ja painavimman rungon välinen painoero on 5 kg. Kaikki rungot ovat valmiiksi työstettyjä.

**Taulukko 1. Runkojen painoja ja värähtelytaajuuksia**

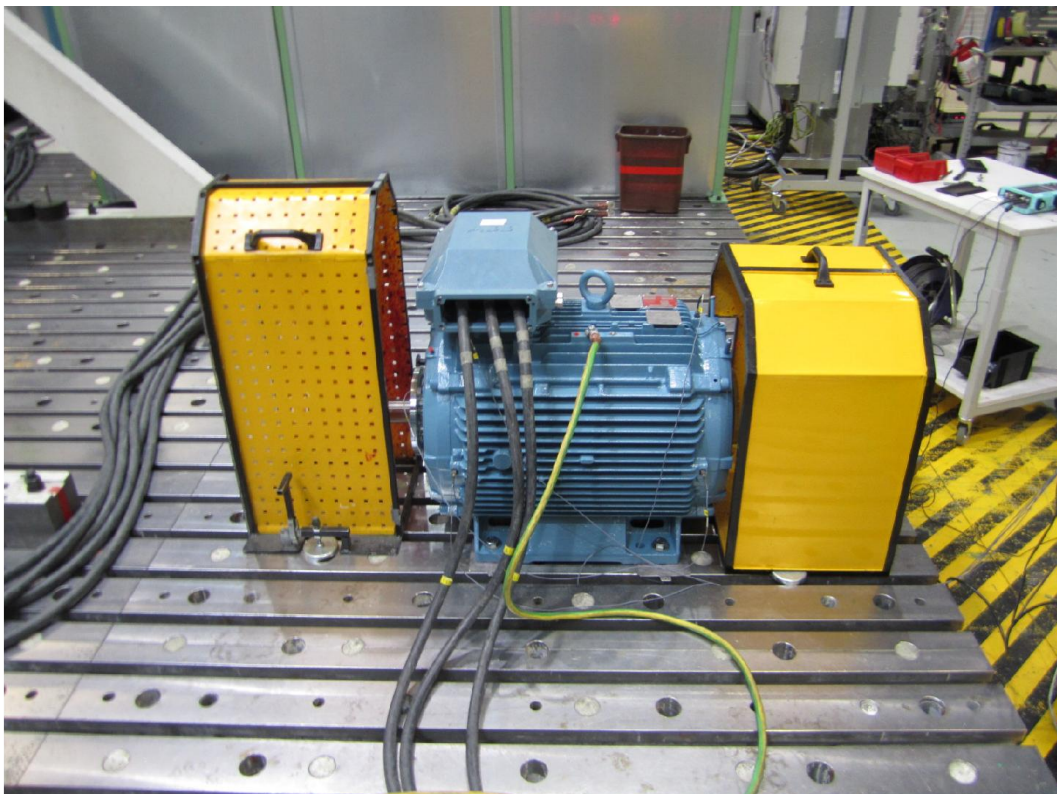
Runko	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Paino kg
1	409	498	1014	1099		204,5
2	406	491	974	1075		201,0
3	403	488	992	1074		199,5
4	403	485	987	1066	987	200,0
5	413	497	807	1002	1092	203,0
6	408	493	798	993	1081	202,5

Kuten taulukosta havaitaan, painavammalla rungolla on suuremmat ominaistajuudet. Tämä johtuu siitä, että kyseinen runko on jäykempi kuin sitä kevyemmät rungot.

## 6 VALMIIN MOOTTORIN KOESTUS

Tutkittavana moottorina on 280 SMA -moottori, jonka nimellinen pyörimisnopeus on 5200 r/min ja jossa on normaali GJL250 -runko. Moottorin resonanssiipiikki osuu oletettavasti noin 4500 r/min kohdalle, eli kyseisen moottorin käyttöalueen ulkopuolella, joten ongelmaa ei ilmene. Moottorin roottori on tasapainotettu pyörimisnopeudelle 5200 r/min, eli tasapainotuskiekkoihin asennettavat painot korjaavat ainoastaan magneettikentän aiheuttamaa tasapainotuksenmuutosta.

Moottorin testaaminen aloitetaan kiinnittämällä se lattiaan. Moottorin jalkojen alle laitetaan 2 mm paksut levyt, joilla varmistetaan kaikkien jalkojen tasainen vastaaminen lattiaan. Jos osa levyistä pääsee heilumaan, jalat eivät ole tasaiset ja tämä korjataan lisäämällä ohuita levyjä, kunnes kaikki jalat vastaavat alustaan tasaisesti. Moottoriin asennetaan tasapainotuslaitteen anturit ja Pulse-mittalaitteen anturit. Kuviossa 12 on moottori asennettuna alustaan ja valmiina testattavaksi.

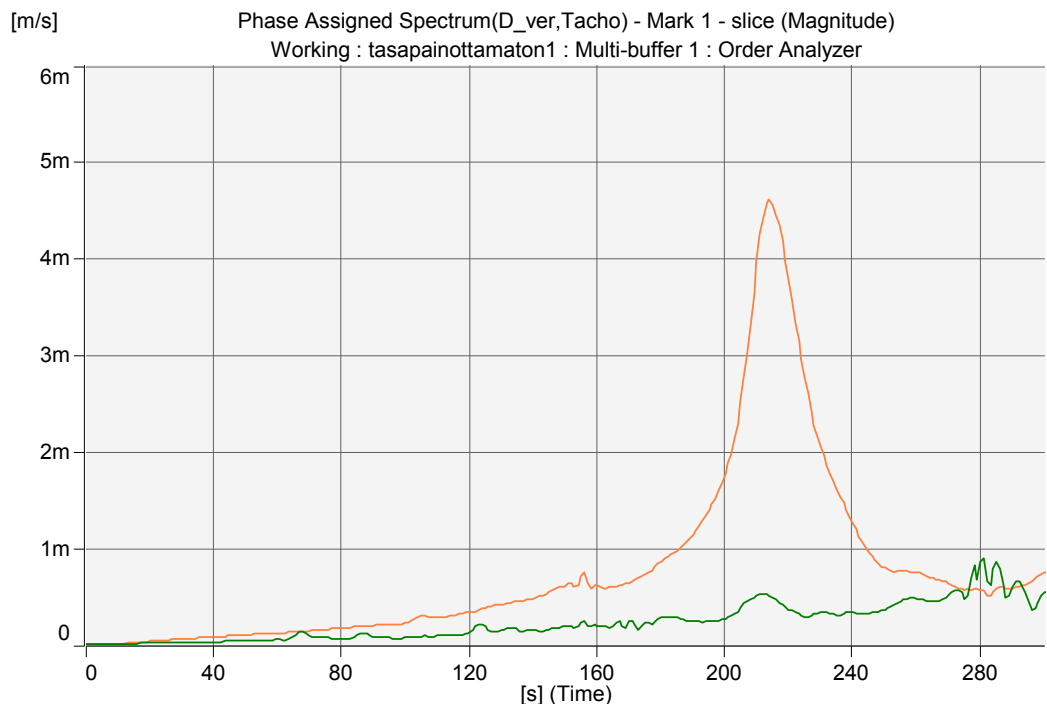


**Kuvio 12. Moottori valmiina koestettavaksi**

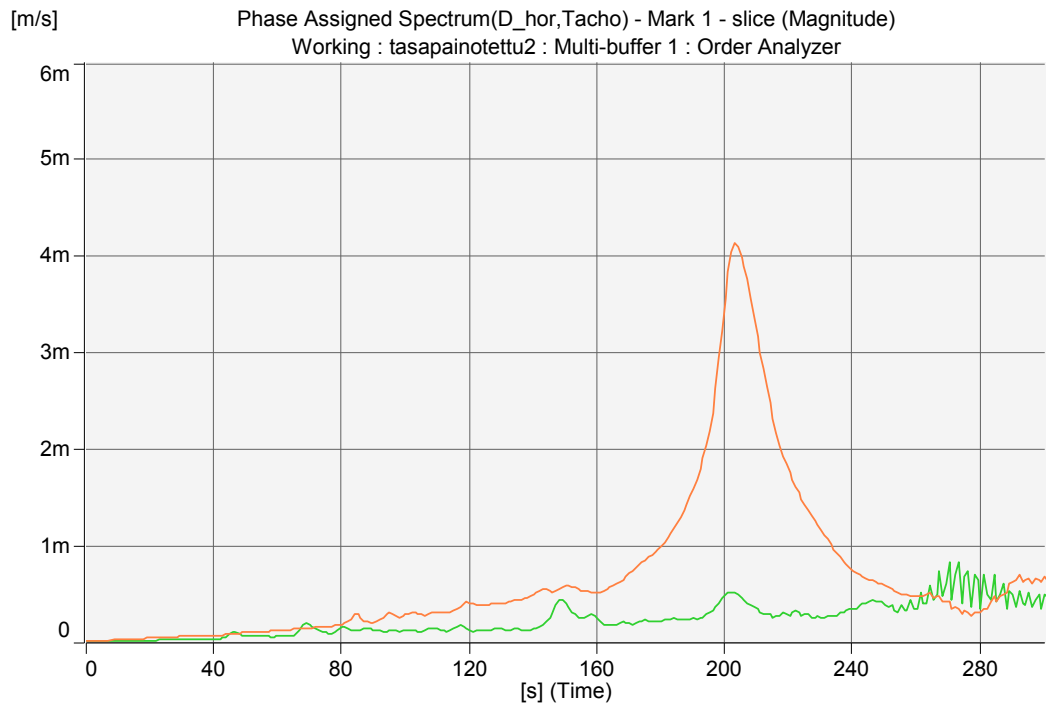
## 6.1 Tärinätasot

Moottorista mitattiin tärinätasot, kun se ajettiin ylös 6760 r/min nopeuteen 300 sekunnin aikajaksolla. Tasapainotuksen merkitystä voidaan vertailla mittaamalla tärinät ennen tasapainotusta. Alla olevassa kuviossa 13 on mittaus ennen tasapainotusta, ja kuviossa 14 on vastaava mittaus tasapainotuksen jälkeen. Kuvioon on merkitty horisontaalinen tärinä oranssilla ja vertikaalinen vihreällä.

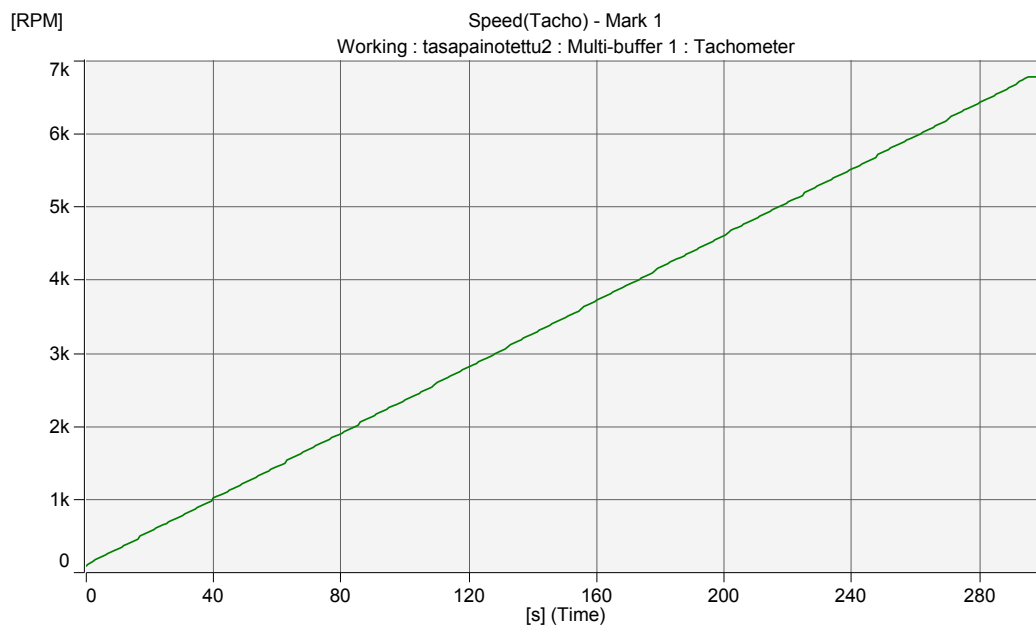
Ennen tasapainotusta moottorin tärinän huippu saavutti arvon 4,6 mm/s, ja tasapainotuksen jälkeen arvo oli 4,3 mm/s. Molemmissa tilanteissa huippu saavutettiin kierrosluvulla 4670 r/min. Kuvioissa 13 ja 14 huippu on eri kohdassa, sillä mittaus on aloitettu eri kierrosnopeudelta. Tärinän huippupiste huojuu hieman, joten voidaan sanoa, että tasapainotuskiekoilla tehtävä tasapainotus ei vaikuta huipputärinänsä merkittävästi, sillä roottori on jo valmiiksi tasapainotettu hyvällä tarkkuudella. Tässä moottorissa ilmenevä tärinän voimakkuus on verrattain pieni, sillä joissain moottoreissa se saattaa olla jopa 12 mm/s. Moottorin pyörimisnopeus on luettavissa kuviosta 15.



**Kuvio 13. Moottorin tärinätasot ennen tasapainotusta**



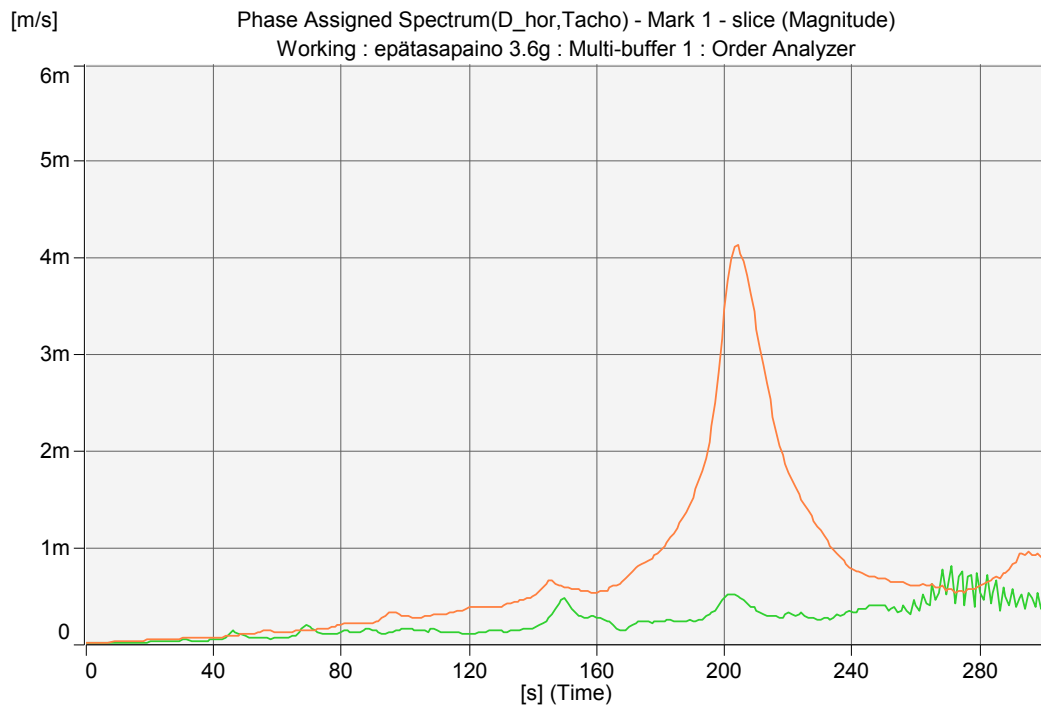
**Kuvio 14. Moottorin värinätasot tasapainotettuna**



**Kuvio 15. Moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona**

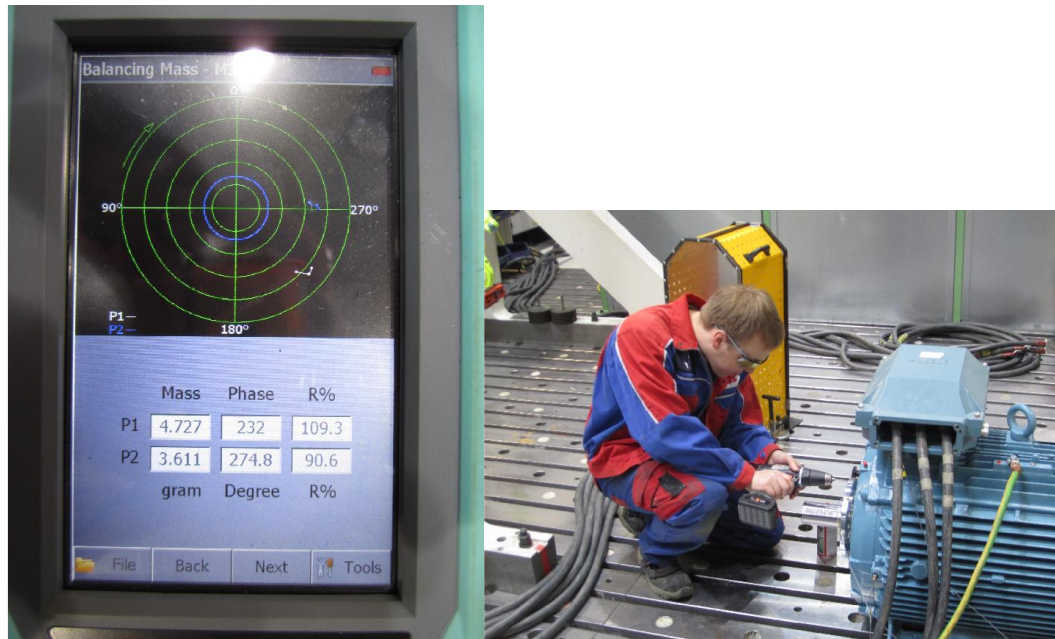
Tasapainotuksessa moottoriin lisättiin N -pään kiekkoon 4,2 g paino ja D -päästä porattiin pois noin 3,4 g, jolloin lopulliseksi jäännöspainoksi jäi N -päähen 0,7 g ja D -päähen 0,4 g, kun tasapainotusluokan sallittu jäännöspaino on 1,58 g.

Moottorin tasapainotuskiekkoihin asennettiin 3,6 g, eli tuplasti tarkkuusluokan epätasapaino, samaan kohtaan D- ja N -päihin. Alla olevassa kuviossa 16 on mitattu värinän käyrä. Verrattaessa kuviota 16 edellä oleviin kuvioihin 13 ja 14 huomataan ainoastaan pieniä eroja käyrissä. Käyrien lopussa oleva värinä on häiriötä tai seurausta huonosti kiinnitetystä anturista.



**Kuvio 16. Värinätasot kun kiekkoissa 3,6 g:n epätasapaino**

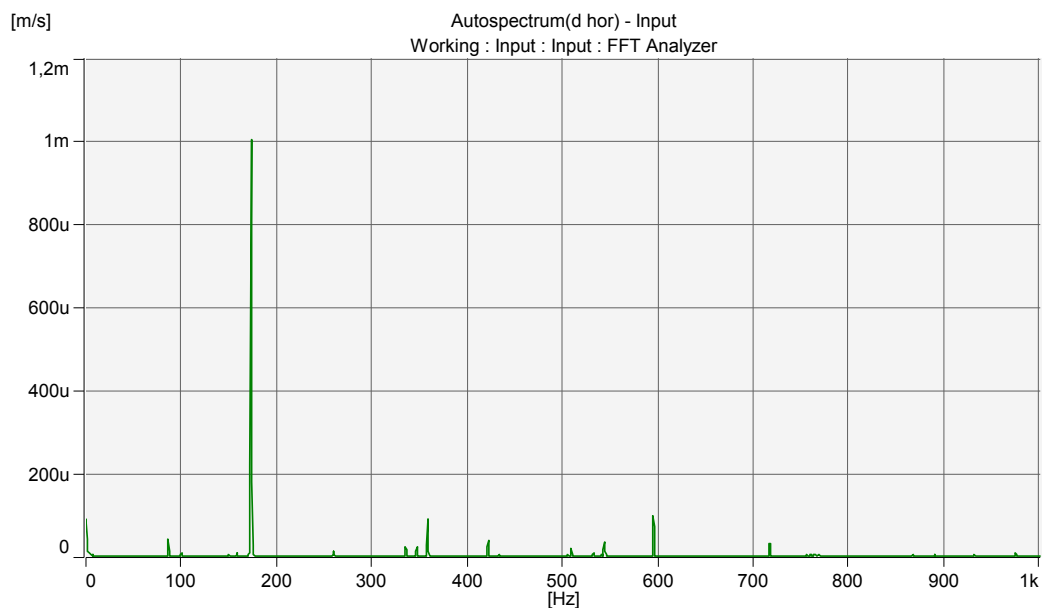
Kuviossa 17 on tasapainotuslaitteen näkymä, jossa on laitteen ilmoittamat tarvittavat korjauspainot ja niiden asteluvut tasapainotuslevyissä.



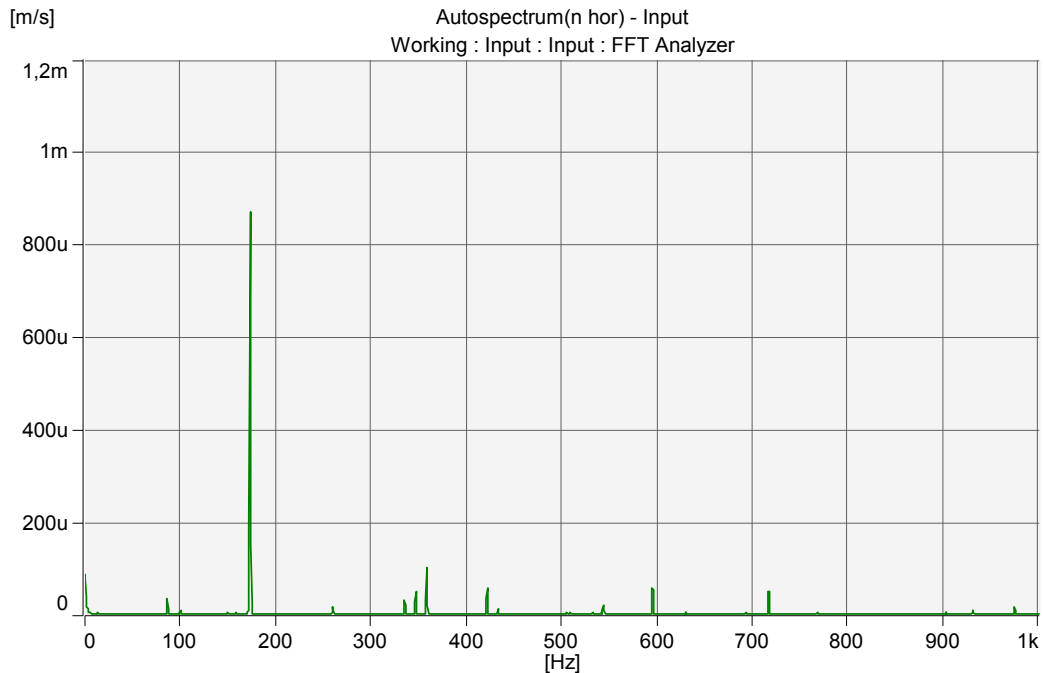
Kuviot 17 ja 18. Tasapainotuslaitteen näyttämät tarvittavat painot ja asteluvut, sekä kiekon poraus

## 6.2 Tärinän spektrit nimellisuudessa

Tasapainoituksen jälkeen moottorista mitattiin tärinän spektrit, jotka ovat nähtävissä alla olevissa kuvioissa 19 ja 20. Spektrit mitattiin moottorin nimellisuudella 5200 r/min. Kuvioissa 19 ja 20 ilmoitettu tärinän kokonaisarvo on mittalaitteen ilmoittama kokonaistärinä.



Kuvio 19. D-pään horisontaalinen tärinäspektri kokonaisarvoltaan 1,2 mm/s



**Kuvio 20. N-pään horisontaalinen värinäspektri kokonaisarvoltaan 1,0 mm/s**

Moottorissa oleva värinä on lähes kokonaan tuplataajuudella, joten voidaan olettaa sen johtuvan osittain ilmavälin epätasaisuudesta. Ilmavälin mittaamiseksi täytyisi moottori purkaa ja lähettää mitattavaksi. Samalla jää todentamatta, vaikuttaako moottorin rungon seinämäpaksuuden tasaisuus värinään. Epätasainen ilmaväli on erittäin vaikea saada mitattua luotettavasti ja on yleensä miltei mahdoton korjata. Joissain tilanteissa epätasaisen ilmavälin voi saada korjattua vaihtamalla moottorin päätylaipat, mutta tämän toimivuus on epätodennäköistä, sillä tällöin päätylaippojen täytyisi olla ulkona toleransseista.

Vastaavanlaista sähköistä värinää voi aiheuttaa myös virheellinen käämitys, joka aiheuttaa epätasaisen magneettikentän. Virheellisesti käämittyä staattoria on mahdotonta saada korjattua, ja tällöin joudutaan tekemään kokonaan uusi staattori. Virheellinen käämitys näkyisi todennäköisesti myös moottorin sähköisissä arvoissa, joten tästä tuskin on kyse.

### 6.3 Moottorin resonanssitaajuus

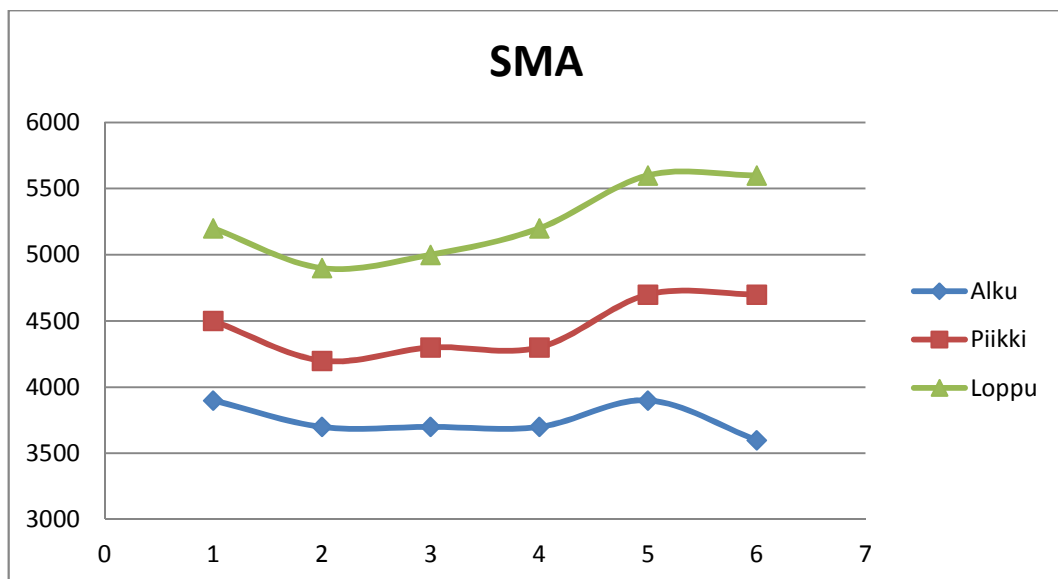
Moottorista voidaan mitata myös sen ominaistaajuus Pulse-mittalaitteella asentamalla siihen 3-suuntainen värinäanturi ja antamalla moottorille heräte, eli lyömällä sitä mittalaitteen vasaralla. Tämän moottorin ominaistaajuus on 156,7

Hz, joka on sama äänin taajuuden kanssa. Voidaan siis varmasti sanoa äänin olevan tuplataajuustään.

## 7 ANALYSOINTI

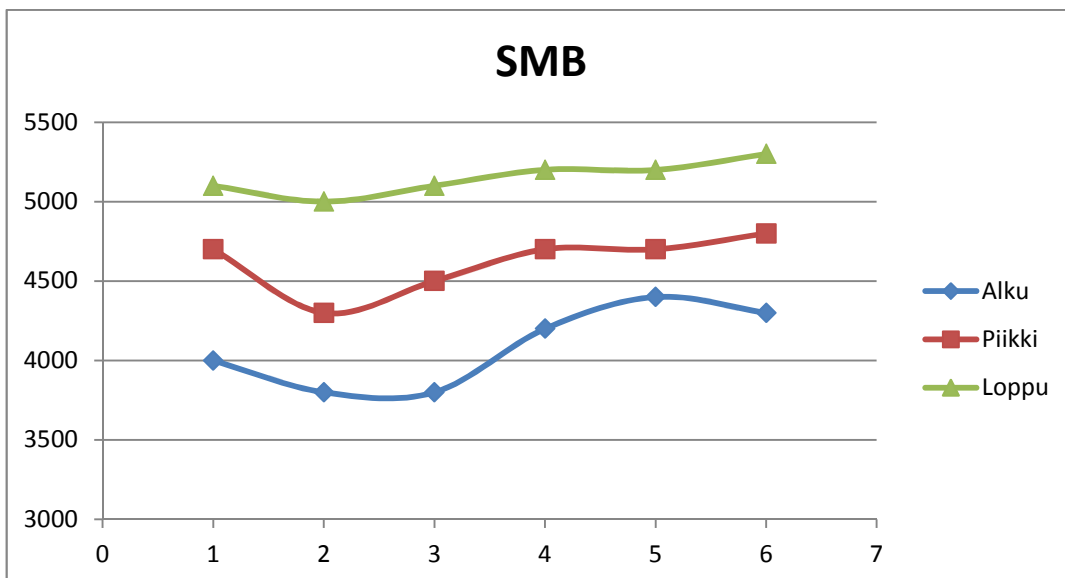
280 SMA-moottorin resonanssin keskiarvot normaalilla rungolla osuvat 4450 r/min kohdalle eli noin 74 Hz taajuuteen. Alla olevassa kuviossa 21 on esitetty kuuden eri moottorin resonanssin alku, huippu ja loppu.

Pyörimisnopeus on y -akselilla ja mitatun moottorin numero on x-akselilla. Alku- ja loppu-pyörimisnopeudet on otettu pisteestä, jolloin värinä ylitti 2 mm/s arvon.



**Kuvio 21. 280 SMA -moottorin resonanssipyörimisnopeudet**

280 SMB moottorin resonanssin piikki normaalilla rungolla osuu noin 4320 r/min kohdalle eli 72 Hz taajuudelle. Alla olevassa kuviossa 22 on kuuden eri SMB-moottorin resonanssinpiikin alku, huippu ja loppu.



**Kuvio 22. 280 SMB -moottorin resonanssipöörimisnopeudet**

Kuviossa 23 näkyy 280 SMC-moottorin resonanssiipiikin sijainti. Resonanssin piikki osuu kierrosluvulle 4390 r/min, eli 73,1 Hz taajuudelle.



**Kuvio 23. 280 SMC -moottorin resonanssipöörimisnopeudet**

Pallografiittivalurautaisella rungolla moottorin resonanssin alue nousee noin 400 r/min kaikissa teholuokissa.

Vanhoja mittaustuloksia selatessa huomataan toistuva ilmiö: kaikissa moottoreissa ongelmia aiheuttaa tuplataajuustärinä. Usein tuplataajuustärinä on jopa lähes ainoa merkittävä tärinä. Tätä olisi syytä tutkia ja todentaa mahdolliset aiheuttajat, kuten ilmaväli ja rungon jäykkyys. Oletettavasti suurin muuttuja moottoreiden

välillä on juurikin ilmaväli, jonka vaihtelua aiheuttaa roottorin halkaisijan muutokset. Roottorin on havaittu olevan joissain moottoreissa kartio, jolloin toisessa päässä ilmaväli on pienempi. Tällainen tilanne on harvinainen ja se vaikuttaa myös moottorin hyötysuhteeseen ja lämpenemään.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Moottoreiden resonanssin aiheuttamaa tärinää ei voida poistaa, mutta sen sijaintia ja amplitudia voidaan muuttaa erilaisilla rungoilla ja materiaaleilla. Ongelman aiheuttajana moottoreissa on suurimmalta osin tuplataajuustärinä. Tuplataajuustärinään vaikuttaa ilmavälin tasaisuus, rungon jäykkyys ja jalkojen tasainen vastaaminen alustaan.

Jalkojen tasainen vastaaminen varmistetaan testausvaiheessa lisäämällä tarvittava määrä materiaalia jalkojen alle. Rungon jäykkyyttä ei voida moottorikohtaisesti todeta, joten valun aiheuttamat erot voivat aiheuttaa muutoksia koneiden välillä. Ilmavälin mittaamiseksi moottori täytyisi purkaa ja mikä aiheuttaisi viivästystä moottoreiden valmistumisaikaan. Ilmaväli vaihtelee todennäköisesti jonkin verran ja tämä olisi tärkeä saada todettua, jotta valmistusprosessia voitaisiin mahdollisesti parantaa.

Vaihtamalla rungon materiaaliksi GJS500 saadaan resonanssin pistettä siirrettyä noin 400 r/min korkeammalle. Pallografiittivalurauta GJS500 on murtolujuudeltaan ja jäykkyydeltään vahvempaa, joten se myös pienentää resonanssin aiheuttamaa tärinää noin kolmanneksen. Pallografiittivalurautaisen rungon käyttö on perusteltua, jos moottorin suunniteltu nimellisaika osuu normaalirungon resonanssipisteeseen.

Tuplataajuustärinään vaikuttavan ilmavälin tasaisuuden toteaminen on työläs toimenpide, sillä moottori täytyy purkaa. Identtisten koneiden väliset tärinätasojen erot johtuvat oletettavasti erilaisista ilmaväleistä tai rungon valun jäykkyyden muutoksista. Molemmat aiheuttavat helposti suuria muutoksia tuplataajuuden tärinään.

## 9 KEHITYSIDEAT

Moottoreihin voitaisiin suunnitella uusi runko vahvemmallalla seinämällä, jolloin jäykkyys ja paino lisääntyisivät. Näin rungon ominaisuudet olisivat suurnopeusmoottorille paremmat. Rungon materiaaliksi voisi sopia suomugrafiittivalurautaa GJL350, jolla on suurempi murtolujuus ja jäykkyys kuin normaalilla GJL250:lla. Selvää on kuitenkin, että rungon täytyisi olla jäykempi, sillä pienemmällä jäykkyydellä olevalla rungolla resonanssin aiheuttama tuplataajuudentärinä kasvaa helposti suureksi.

Moottoreissa voisi kokeilla käyttää räjähdysalttiin tilan runkoja ja päätyjä, koska niissä on paksummat seinämät. Paksummilla seinämillä saataisiin moottoriin lisää painoa ja samalla lisättyä jäykkyyttä.

Moottoreihin voisi myös rakentaa vakiokoneesta poikkeavat päädyt, joiden seinämäpaksuus olisi suurempi. Näissä erikoisvalmisteisissa päädyissä voisi myös soveltaa tiukempaa toleranssia, jolloin päätylevyt tukisivat koko runkoa tehokkaasti.

SMA-moottorille voisi laskea pidemmän roottori- ja staattori -paketin vaikutukset, sillä pidemmällä paketilla saadaan moottoriin lisättyä painoa ja samalla moottorin jäykkyys kasvaa. Tämä voisi olla joissain tapauksissa järkevämpi vaihtoehto verrattuna pallografiittirungon käyttämiseen. Vaihtoehtoisesti pienen tehon moottorina voisi käyttää pienempää runkokokoa, jolloin resonanssipiste siirtyisi muualle.

Mikäli staattori ei ole aivan rungon pituinen, jää rungon sisään tyhjää tilaa ja tällöin voisi staattorin lisäksi runkoon puristaa metallisen renkaan staattorin jatkoksi, joka jäykistäisi ja lisäisi moottorin painoa. Rengas olisi mitoiltaan staattorin ulko- ja sisähalkaisijan kokoinen kappale, joka mitoitettaisiin sopivan pituiseksi ja puristettaisiin runkoon staattorin lisäksi joko molempiin tai toiseen päähän.

## LÄHTEET

/1/ ABB Oy, 2014. Suomalaiset juuret. Viitattu 30.1.2014.

<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>

/2/ Wikipedia, Strömberg(yritys). Viitattu 30.1.2014.

[http://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg\\_\(yritys\)](http://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg_(yritys))

/3/ ABB Oy, ABB lyhyesti, Yhtymä. Viitattu 30.1.2014.

<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/yhtyma>

/4/ ABB Oy, ABB lyhyesti, Suomessa. Viitattu 30.1.2014.

<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>

/5/ Siemens Oy, An analytical approach to solve motor vibration problems, Viitattu 12.2.2014.

<http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-motor/anema-motors/specification/Documents/approach-to-solving-motor-vibration-prob.pdf>