

**Tutkimusraportti
BVAL35-011168**

SÄHKÖGENERAATTORIN VÄRÄHTELYMITTAUKSET

Pitäjänmäki 5-7.2.2001

Kari Tammi, Kai Katajamäki, Paul Klinge, Seppo Aatola



Espoo 31.12.2001

		A Työraportti	
		B Julkinen tutkimusraportti	X
		Tutkimusraportti luottamuksellinen saakka	
Raportin nimi Sähkögeneraattorin värähtelymittaukset			
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES/VÄRE		Raportin numero BVAL35-011168	
Projektin nimi Pyörivast/pvkoelaite		Suoritteen numero VOSU00572	
Laatija(t) Kari Tammi, Kai Katajamäki, Paul Klinge, Seppo Aatola		Sivujen/ liitesivujen lukumäärä 12 / 20	
Avainsanat värähtely, moodianalyysi, käynninaikainen moodianalyysi, sähkökone, generaattori			
Tiivistelmä Sähkögeneraattorin värähtelymittaukset tehtiin Pitäjänmäessä 5-7.2.2001 uuden generaattorin koeajon yhteydessä. Mittaukset liittyvät TEKES:n VÄRE-tutkimusohjelman projektiin "Pyörivien koneiden värähtelyn hallinta". Mittausten tavoitteina olivat generaattorin laskennallisen mallin tulosten verifiointi sekä generaattorin ja siihen liitettävän dieselmoottorin muodostaman dieselaggregaatin dynamiikan tuntemuksen kehittäminen. Lisäksi tavoitteena oli mittaus- ja analyysimenetelmien testaus ja kehittäminen käyttäen VTT:n hankkimaa LMS Cada-X-ohjelmistoa ensi kertaa kenttämittauksissa. Jousille tuetun generaattorin runkorakenteista ja laakeripukeista mitattiin värähtelysignaaleja sekä roottorin keskivaiheilta sen siirtymäsignaaleja. Mittauspisteitä seitsemässä eri mittauspistesetissä oli yhteensä 37 kpl. Generaattoria herätettiin hydraulisella tärstimellä perinteisen moodianalyysin suorittamiseksi. Käynninaikaisen moodianalyysin suorittamiseksi generaattoria käytettiin sähkömoottorina erilaisissa ajotilanteissa. Erilaisia ajotilanteita saatiin aikaan vaihtelemalla kierroslukua ja magnetointia. Käynninaikaisen moodianalyysin tuloksia ns. normaalissa ajotilanteessa verrataan laskennallisiin tuloksiin MAC ja CoMAC -vertailujen avulla. Tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Lisäksi esitetään mittausten aikana tehtyjä havaintoja koejärjestelystä koskien tärstimen kiinnitystä, roottorin siirtymämittausta ja mittauspisteverkkoa ja kerrotaan myös käynninaikaisesta moodianalyysistä saaduista kokemuksista.			
Allekirjoitukset, Espoo 31.12.2001			
Harri Soininen Tutkimuspäällikkö		Kari Tammi Tutkija	
		Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT):			
VTT MANUFACTURING TECHNOLOGY Maritime and Mechanical Engineering	Tekniikantie 12, Espoo P.O.Box 1705 FIN-02044 VTT, Finland	Telephone +358 9 4561 Fax +358 9 455 0619 WWW: http://www.vtt.fi/val/	

	A	Work report	
	B	Public research report	X
		Research report, confidential to	
Title			
Vibration Measurements on Electric Generator			
Customer or financing body and order date/No.		Research report No.	
TEKES (Finnish National Technology Agency)/VÄRE		BVAL35-011168	
Project		Project No.	
Pyörivast/pvkoelaite		VOSU00572	
Author(s)		No. of pages/appendices	
Kari Tammi, Kai Katajamäki, Paul Klinge, Seppo Aatola		12 / 20	
Keywords			
vibration, modal analysis, operational modal analysis, electric machine, generator			
Summary			
<p>The vibration measurements on an electric generator were performed in Pitäjänmäki on 5-7 February 2001. The new generator was measured during its trial run period before the shipping to a client. The measurements were part of the project <i>Vibration Control in Rotating Machines</i> belonging to VÄRE technology program. The goal of the measurements was to verify computational results attained from the generator FE-model, and to develop the knowledge on the generator and diesel aggregate dynamic behaviour. The work was also aimed to test and to improve measurement and analysis methods for the new <i>LMS Cada-X</i> vibration analyser in VTT.</p> <p>The generator was installed on flexible spring elements. The acceleration signals were measured in the body and the bearing blocks of the generator. The rotor displacements were measured in the middle of the rotor bearing span. Measurement points were allocated in seven different sets, being 37 in total. Generator was excited with a hydraulic exciter for purposes of modal analysis. For operational modal analysis, the generator was run as an electrical motor. Different operation conditions were applied by varying the rotational speed and the magnetization in order to get comparative data.</p> <p>The results of operational modal analysis show good correspondence with the computational results in standard operation conditions. The paper presents also a discussion on improvements to the displacement measurement of the rotor, the fixation of the exciter, and the measurement grid. The experiences from operational modal analysis are also discussed. Future work should be focused on the development of operational modal analysis and measurement techniques of a rotating component.</p>			
Date Espoo December 31, 2001			
Harri Soininen		Kari Tammi	
Research Manager		Research Scientist	
		Checked	
Distribution (customers and VTT):			
VTT MANUFACTURING TECHNOLOGY Maritime and Mechanical Engineering	Tekniikantie 12, Espoo P.O.Box 1705 FIN-02044 VTT, Finland	Telephone +358 9 4561 Fax +358 9 455 0619 WWW: http://www.vtt.fi/val/	

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Koejärjestely	4
3	Tulokset.....	8
3.1	Käynninaikainen moodianalyysi.....	8
4	Pohdinta	11
5	Yhteenveto	12

1 Johdanto

Mittaukset liittyivät TEKES:n VÄRE-tutkimusohjelman projektiin "Pyörivien koneiden värähtelyn hallinta". Generaattorin värähtelymittaukset tehtiin Pitäjänmäessä 5-7.2.2001. Mittaukset suoritettiin uuden generaattorin koeajon yhteydessä ennen sen viimeistelyä ja toimitusta asiakkaalle, kuva 1. Mitatulle datalle tehtiin moodianalyysi.

Värähtelymittausten tavoitteena oli generaattorin laskennallisen mallin verifiointi ja generaattorin dynaamisen mallinnuksen kehittäminen. Mallinnuksen kehittäminen helpottaa generaattorin sekä generaattorin että dieselmoottorin muodostaman dieselaggregaatin (ns. gensetin) suunnittelua ja optimointia. Mittausten tavoitteena oli myös testata ja kehittää VTT:n hankkimaa LMS Cada-X-ohjelmistoa kenttämittauksissa sekä kerätä kokemuksia ohjelmistopakettiin kuuluvasta käynninaikaisesta moodianalyysistä.

Generaattorin runkorakenteista ja laakeripukeista mitattiin värähtelysignaaleja, lisäksi roottorista mitattiin sen siirtymäsignaaleja. Mittauspisteitä oli seitsemässä setissä yhteensä 37 kpl. Mittauksissa generaattoria herätettiin hydraulisella tärstimellä perinteisen moodianalyysin tekemiseksi. Käynninaikaisen moodianalyysin tarpeisiin generaattoria käytettiin sähkömoottorina erilaisissa ajotilanteissa, joita saatiin aikaan vaihtelemalla kierroslukua ja magnetointia. Tämä tehtiin vertailevan tiedon keräämiseksi sähkömagneettisten voimien vaikutuksesta generaattorin käyttäytymiseen.



Kuva 1. Generaattori tuotantolinjalla ennen koeajoa.

2 Koejärjestely

Generaattori oli tuettu tukipukkien päällä olleiden jousista muodostuvien Vibratec tukielementtien varaan. Tukielementtejä oli yhteensä kahdeksan: kaksi kummankin pään palkkien alla ja kaksi kummallakin sivulla runkolevyjen alla. Kussakin tukielementissä oli 14 jousia, elementin pystysuuntainen kokonaisjäykkyys oli 3780 kN/m ja vaakasuuntainen jäykkyys 2520 kN/m. Kuvassa 2 näkyvät generaattorin tuenta päästä (vas.) ja sivulta (oik.).



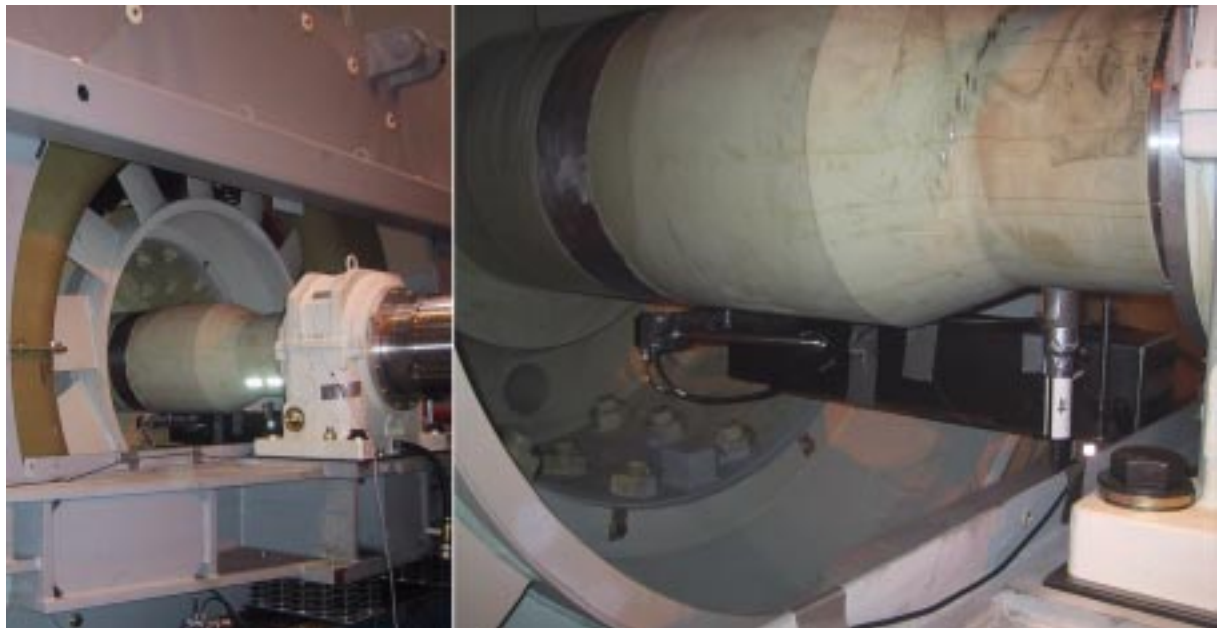
Kuva 2. Jousista koostuvat tukielementit N-pään palkin alla (vasen kuva) ja vasemmalla sivulla (oikea kuva).

Generaattorin herättäminen hydraulisen tärstimen avulla tapahtui pystysuuntaan N-pään alanurkasta (kuva 3), tärstimen voimasignaali mitattiin kaikissa mittauspisteseteissä. N-pään alanurkkaa sekä ristikkäistä ylänurkkaa D-päässä käytettiin referenssipisteinä mittausten ajan. Roottorin siirtymää mitattiin tarkoitusta varten tehdyn tukipalkin päähän kiinnitetyillä MEL M5L/4 laser-siirtymäantureilla (kuva 4). Laser-antureihin oli kiinnitetty kiihtyvyyssanturit tukipalkin värähtelyjen tarkkailemiseksi. Kiinteitä kanavia joka mittauksessa oli yhteensä 11 kpl (1 voima-, 2 siirtymä- sekä 8 kiihtyvyyssignaalia tukipalkissa ja referenssipisteissä). Jäljelle jääneisiin 17 kanavaan kytkettyjä kiihtyvyyssantureita siirrettiin eri mittauspisteisiin mittauspistesettien mukaisesti (valitut mittauspisteet näkyvät liitteen 1 kuvassa 1). Mittauspisteiden valinnassa käytettiin apuna laskennallisia tuloksia sijoittamalla pisteet kohtiin joissa mahdollisimman moni ominaisuus oli havaittavissa.

Signaalit mitattiin LMS:n Cada-X (FMON/GAM) ohjelmistolla, käyttäen Scadas III mittausetupäätä. Käytetyn laitteiston tyypit on esitetty taulukossa 1. Mittauksissa talletettiin tietokoneen kovalevylle sekä aikasignaaleja, että taajuusvasteita.



Kuva 3. Hydraulinen tärustin oli kiinnitetty lattiaan. Herättävä voima tuotiin tangon avulla N-pään vasempaan alanurkkaan. Herätevoima mitattiin tangon alapäästä.



Kuva 4. Roottorin taipumaa mitattiin kuvassa tummana näkyvän palkin päässä olevilla laserantureilla. Akselin pinta oli hiottu mitta-alueelta. Roottorin kierrosluku mitattiin oikealla näkyvällä optisella pulssianturilla.

Taulukko 1. Mittauksissa käytettyjen laitteiden tyypit ja sarjanumerot.

Laite	Laitteen tyyppi	Sarjanumero	VTT nro	Kytkeyty kanavaan
Voima-anturi	Kistler 9321B	647174	-	varausvahvistimeen
Varausvahvistin	Bruel&Kjaer 2635	1900686	-	1
Optinen siirtymäanturi	MEL M5L/4-10B24NK	080821A	821	2
Optinen siirtymäanturi	MEL M5L/4-10B24NK	126507	507	3
Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi	Bruel&Kjaer 4391	1685456	1	varausvahvistimeen
Varausvahvistin	Bruel&Kjaer 2635	921495	9	4
Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi	Bruel&Kjaer 4391	1685502	2	varausvahvistimeen
Varausvahvistin	Bruel&Kjaer 2635	974880	10	5
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10784	1	6, 7, 8
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10785	2	9, 10, 11
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10786	3	12, 13, 14
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10790	4	15, 16, 17 (*
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10791	5	18, 19, 20
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10792	6	21, 22, 23
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10793	7	24, 25, 26
3 suunnan ICP-kiiht. anturi	Endevco E63B-100	10797	8	27, 28 (**

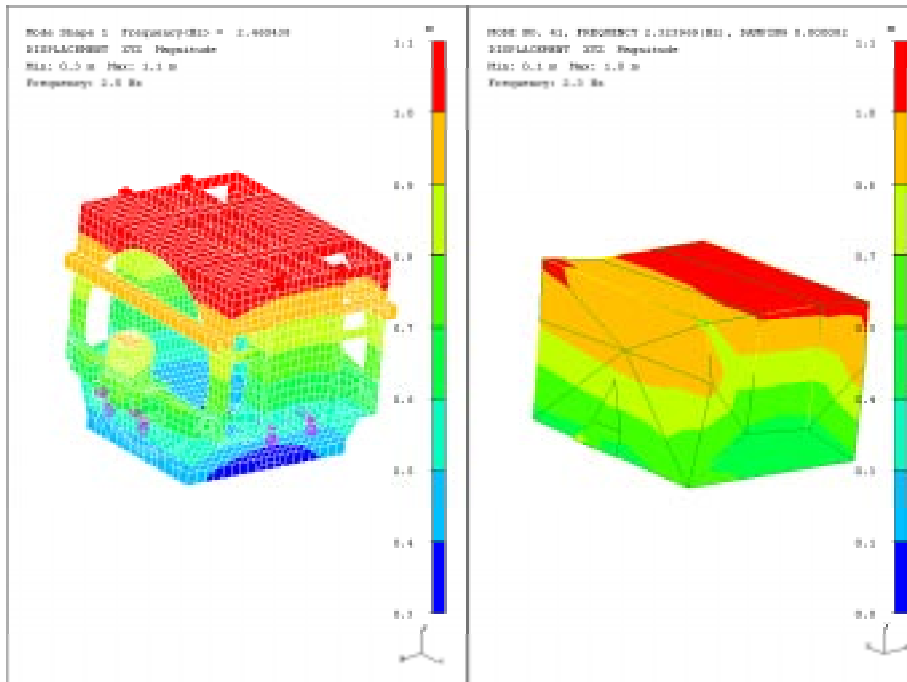
(* Anturi 8 kytketty kanaviin 15, 16 ja 17 seteissä 3 ja 7
(** Kytketty seteissä 1, 2, 4, 5 ja 6. Paikka tyhjä seteissä 3 ja 7

Generaattoria ajettiin sähkömoottorina testien ajan, sen roottoriin ei tuotu ulkopuolista mekaanista kuormaa. Eri ajotilanteita saatiin aikaan vaihtelemalla kierroslukua ja magnetointia. Ajotilanteita nimitettiin alunperin prosenttiluvuilla, joista ensimmäinen kertoo generaattorin kierrosnopeuden nimellisestä kierrosnopeudesta ja jälkimmäinen magnetoinnin maksimimagnetoinnista. Nimet eivät ole oikeaoppisia generaattorin toimintatilan kuvaajia, mutta havainnollisuuden vuoksi käytetään edelleen nimityksiä 0/0, 100/100, 100/50, 100/0, 50/100 ja 50/50. 100% kierrosluvussa vastaa roottorin nimellisuopeutta 514 kierrosta minuutissa, 50% vastaa 257 kierrosta minuutissa ja 0% luonnollisesti paikallaan olevaa roottoria. Magnetoinnin osalta 100% vastaa maksimimagnetointia, joka koetilanteessa oli saavutettavissa, 50% vastaa tyhjäkäyntimagnetointia ja 0% vastaa alimagnetoitua ajotilannetta. Kussakin ajotilanteessa virta- ja jännitearvot sekä staattorin että staattorin laakeriöljyjen lämpötilat kirjattiin ylös (taulukko 2). Staattorin laakerien voiteluun käytettiin ISO VG32-öljyä.

Mitatuilla signaaleille tehtiin käynninaikainen moodianalyysi eri mittausasetit yhdistäen. Näin saatiin aikaan kattava mittauspisteverkko 100/100 ajotilanteelle. Muut ajotilanteet mitattiin vain mittauspistesetin 1 avulla.

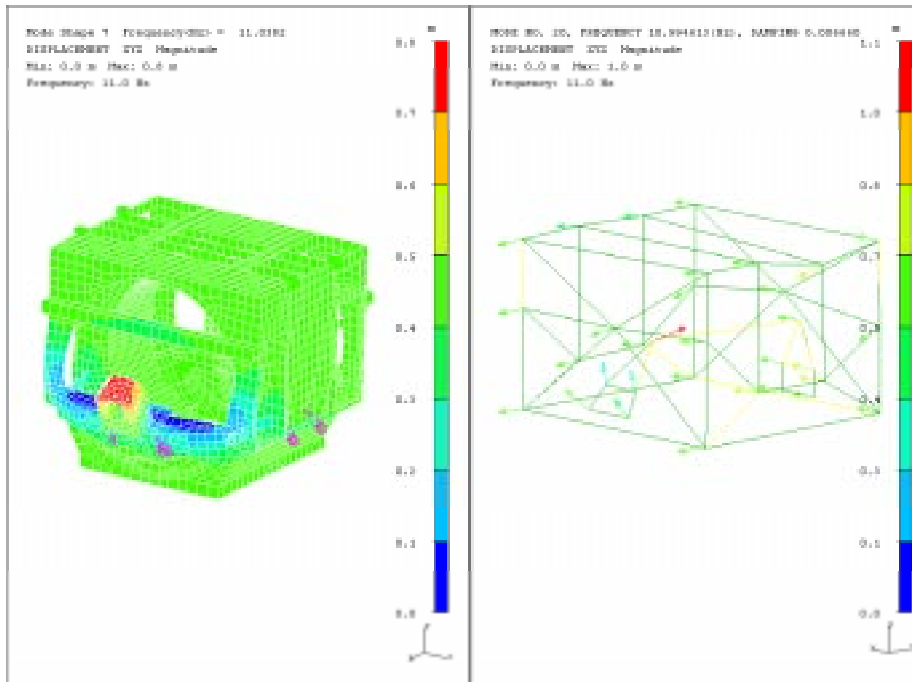
Käynninaikaisen moodianalyysin tulosten tulkitsemiseksi kolmen eri analyysin tulokset siirrettiin I-Deas -ohjelmistoon. Tämän avulla mahdollistettiin tulosten parempi visualisointi ja vertailu laskennallisiin tuloksiin. Kriteerinä lasketun ja mitatun muodon tunnistamiseksi pidettiin yli 50 % korrelaatiota MAC-vertailussa¹. Tässä kappaleessa käydään läpi muutama esimerkkitapaus, täydelliset vertailut on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 5 on esitetty pitkittäinen jäykän kappaleen ominaismuoto, jonka mitattu taajuus on 2,3 Hz ja vastaava laskettu 2,5 Hz. Kuvassa 6 näkyy puolestaan alapalkin ominaismuoto, taajuus 11,0 Hz.



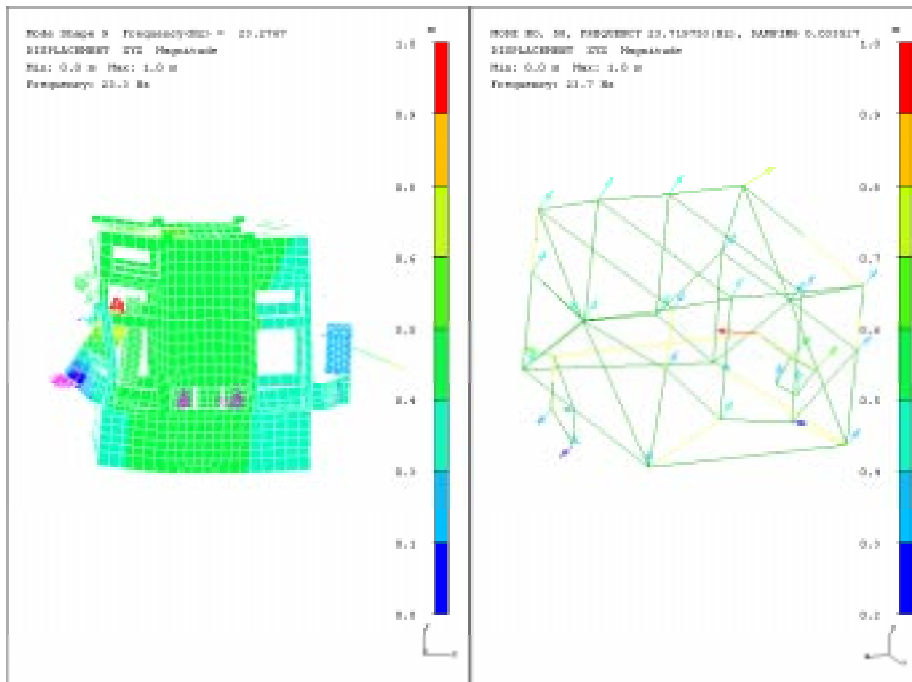
Kuva 5. Pitkittäinen jäykän kappaleen muoto. Vasemmalla laskentamallin antama tulos ja oikealla mitattu ominaismuoto, taajuus 2,3 Hz.

¹ MAC (Modal Assurance Criterion) kuvaa vertailtavien moodimallien samankaltaisuutta.

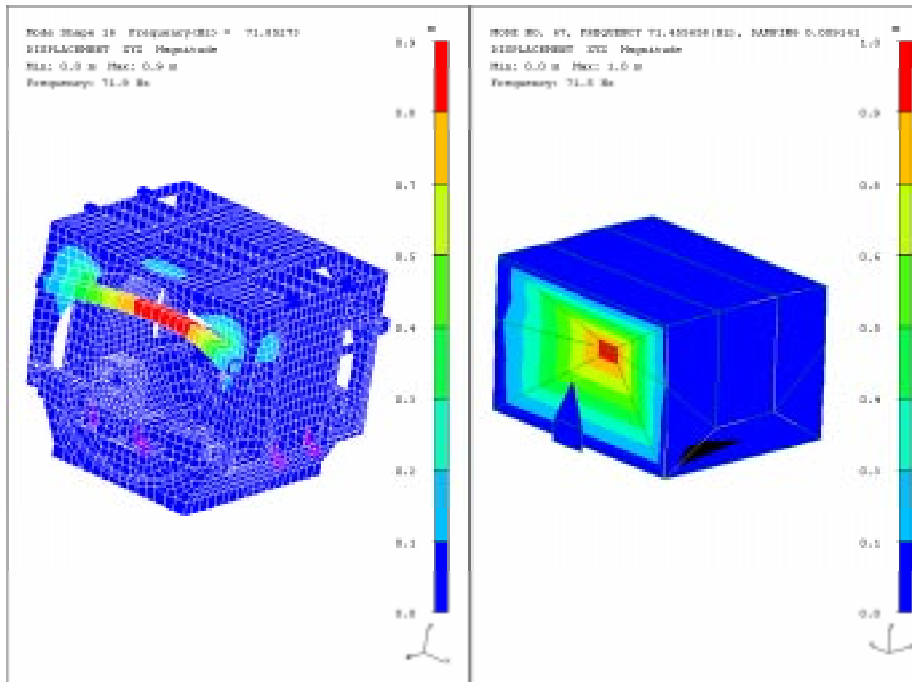


Kuva 6. Alapalkin ominaistajuus 11,0 Hz (vasemmalla laskettu, oikealle mitattu muoto).

Roottorin ominaistajuuden odotettiin löytyvän 20 Hz ympäristöstä. Sellaiseksi voidaan tulkita kuvassa 7 mitattu ominaismuoto, taajuus 23,7 Hz. Kuvassa 8 puolestaan on esitetty yläpalkin ominaistajuus 71,5 Hz.



Kuva 7. Roottorin ominaismuoto näkyy voimakkaana liikkeenä laakeripukissa. Mitattu taajuus 23,7 Hz.



Kuva 8. Yläpalkin ominaisuoto, mitattu taajuus 71,5 Hz.

4 Pohdinta

Moodianalyysin tulokset

Moodianalyysin tulokset ovat selkeitä ajotilanteelle 100/100 ja ne vastaava laskentatuloksia. Moodianalyysi tehtiin muillekin ajotilanteille, mutta niiden vertailun osoittautui käytännössä mahdottomaksi, koska mittauspisteverkko oli huomattavan harva verrattuna 100/100 ajotilanteeseen (1 mittauspistesetti vs. 7 settiä).

Käynninaikaisen moodianalyysin tulosten mukaan muutamat muodot ovat kytkeytyneitä toisiin ominaisuotoihin. Kytkeytyminen saattaa johtua pyörivän roottorin hyrrävoimien vaikutuksesta tai generaattorin runkoon kiinnitetystä tärhistimestä.

Käynninaikainen moodianalyysi antaa välituloksena useita värähtelymuotoja, joista ohjelman käyttäjän on valittava ominaisuodot ja jätettävä valitsematta pakkomuodot sekä menetelmän tuottamat ylimääräiset värähtelymuodot. Päätöksenteon avuksi ei ole olemassa systemaattista keinoa, vaan käyttäjän on huomioitava mahdolliset pakkovärähtelytaajuudet ja niiden monikerrat sekä osattava tulkita stabilisaatiodiagrammia. Jos pakkomuoto ja ominaisuoto sijaitsevat hyvin lähekkäin (ero taajuuksissa alle 1 Hz), päätöksenteko on ongelmallista. Tällöin vaimennuksen tarkastelu saattaa auttaa ratkaisussa, koska pakkomuodon vaimennus on hyvin pieni (alle 0.1%). Vaimennuksen tarkastelu saattaa auttaa myös stabilisaatiodiagrammiin ilmestyvien olemattomien muotojen tunnistamisessa, jos voidaan olettaa ominaisuotojen vaimennuksen olevan tietyllä alueella. Aiempien mittausten tai mallituksen avulla saatu ennakkotieto rakenteen dynamiikasta auttaa luonnollisesti päätöksenteossa.

Huomioita mittausjärjestelystä

Rakennetta herätettäessä ulkopuolisella tärstimellä tulee huomioida rakenteen ja tärstimen välille syntyvät vuorovaikutukset. Generaattorimittausten tapauksessa vuorovaikutusten johdosta rakenteeseen syötetty herätespektri ei vastannut suunniteltua.

Noin sadan hertsin taajuudella värähtelevän tuen päähän kiinnitettyjen laseranturien käytön aiheuttamat vaikeudet johtuvat resonanssin aiheuttamasta vaihesiirrosta. Vaihesiirto alkaa resonanssin kymmenesosan suuruisella taajuudella ja päättyy resonanssitaajuutta kymmenkertaisella taajuudella. Tuennan taajuuden olisi pitänyt olla vähintään luokkaa 250 Hz, jotta roottorin 24 hertsin suuruinen taivutustaajuus olisi kyetty mittaamaan. Laseranturien signaaleja pyrittiin korjaamaan niihin kiinnitettyjen kiihtyvyyssanturien avulla. Menetelmä on herkkä mittausjärjestelmän vaihelineaarisuudelle; pienikin ero signaalien kulkuajoissa aiheuttaa virhettä lopputuloksiin.

5 Yhteenveto

Käynninaikaisen moodianalyysin tuloksina saatiin generaattorin ominaisuudet ajoitilanteessa 100/100. Mm. seuraavat ominaisuudet havaittiin analyyseissä (kaikki tulokset on esitelty liitteessä 1):

- pitkittäinen jäykän kappaleen muoto 2,3 Hz
- alapalkin taivutustaajuus 11,0 Hz
- roottorin taivutustaajuus 23,7 Hz
- yläpalkin taivutustaajuus 71,5 Hz.

Laskentamalli korreloi hyvin mittaustulosten kanssa. Vähäinen informaatio roottorin käyttäytymisestä vaikeutti tulosten tulkintaa ja näkyy liitteessä olevien MAC-vertailujen matalina korrelaatioarvoina.

Kerätyn kokemuksen mukaan käynninaikaisten moodianalyysin tulosten tulkintaa helpottaa analysoitavan rakenteen dynamiikan laskennallinen ja kokeellinen tuntemus. Ominaisuusmuotojen valinta analyysin yhteydessä perustuu ohjelman käyttäjän tekemiin päätöksiin.

Liite 1. Laskennalliset ja mitatut ominaismuodot

Kolmen eri käynninaikasen moodianalyysin tulokset siirrettiin I-deas-ohjelmistoon ja niitä vertailtiin laskettuihin tuloksiin. Taulukossa 1 on esitetty mittaus- ja FE-mallin vastinsolmut. Kuva 1 esittää mittausmallin solmuja ja kuva 2 laskentamallin vastinsolmuja.

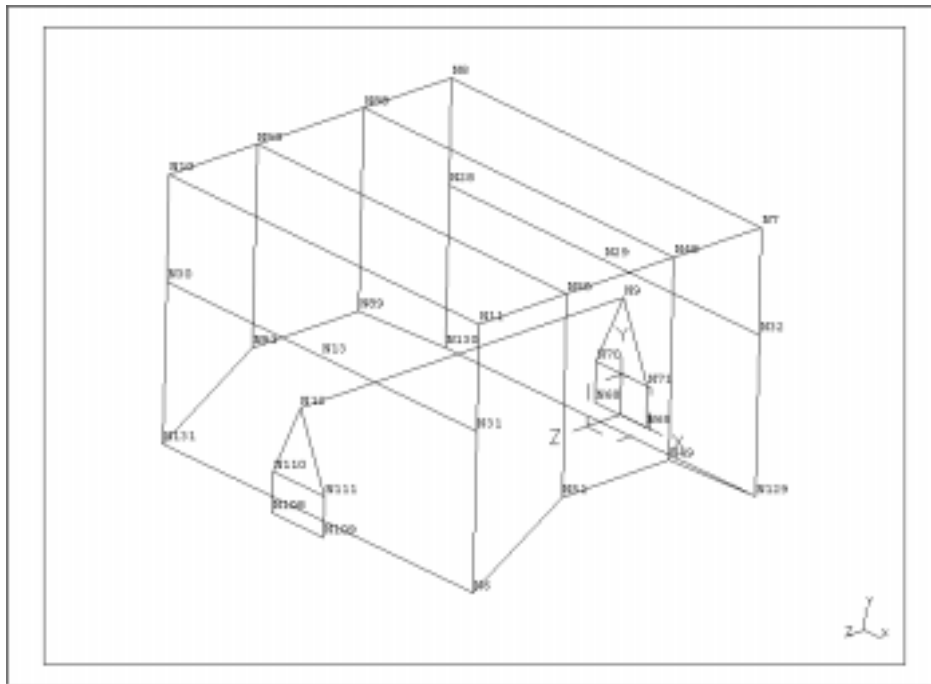
Liitteen tuloksissa on esitetty kolmen eri moodianalyysin, jotka on tehty valitsemalla ominaismuodot (navat) eri tavoin stabilisaatiodiagrammista. Kuvassa 3 on MAC-vertailun tulos, verrokkeina moodianalyysin 1. tulokset ja laskennalliset tulokset. MAC-vertailusta nähdään mitkä laskennalliset muodot vastaavat mitattuja, ja päinvastoin. Huomataan, että tietyillä mitatuilla muodoilla on useita laskennallisia vastineita.

Kuvassa 4 olevasta CoMAC-vertailusta voidaan nähdä, että suurimmat eroavaisuudet laskennan ja mittausten välillä esiintyvät laakeripukeissa. Tämä johtuu siitä, että roottorin käyttäytymisestä ei saatu mittaustietoa kuin laakeripukkien välityksellä. Suurehko massa tulee siis kuvattua pienellä määrällä pisteitä kun taas laskentamallissa roottorin käyttäytyminen on taas kuvattu verrattain tarkasti.

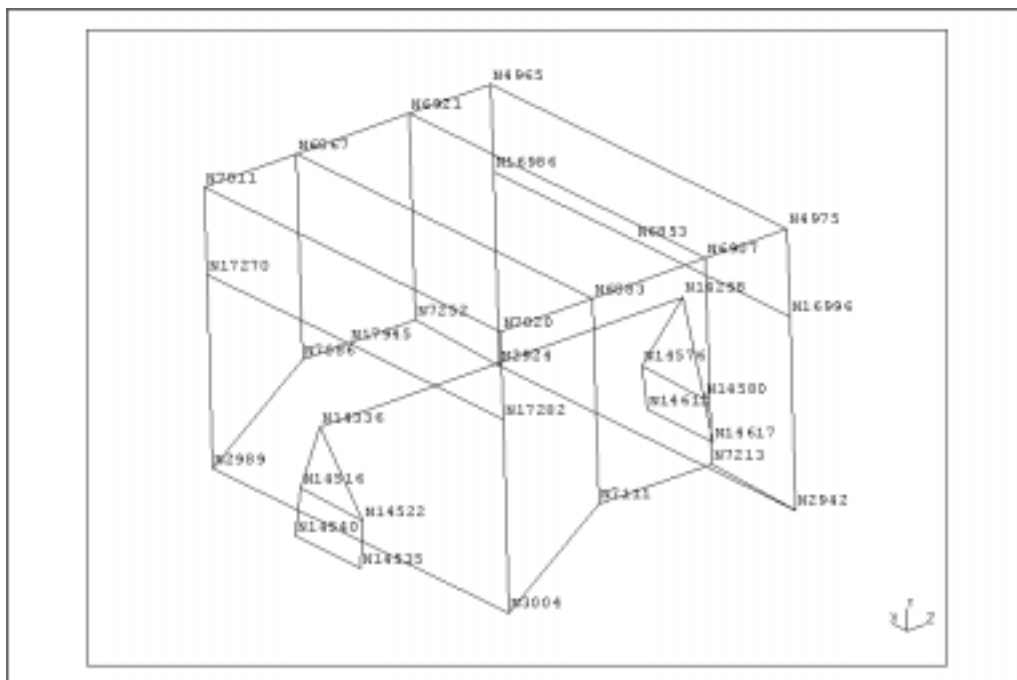
Taulukkoon 2 on kerätty mitatut ja lasketut muodot taajuuksineen, niiden suhteellinen ero sekä MAC-luku indikoimaan muotojen vastaavuutta. Parhaiten vastaavat ominaismuodot on esitetty kuvissa 5-11.

Taulukko 1. Mittaus- ja FE-mallin toisiaan vastaavat solmut.

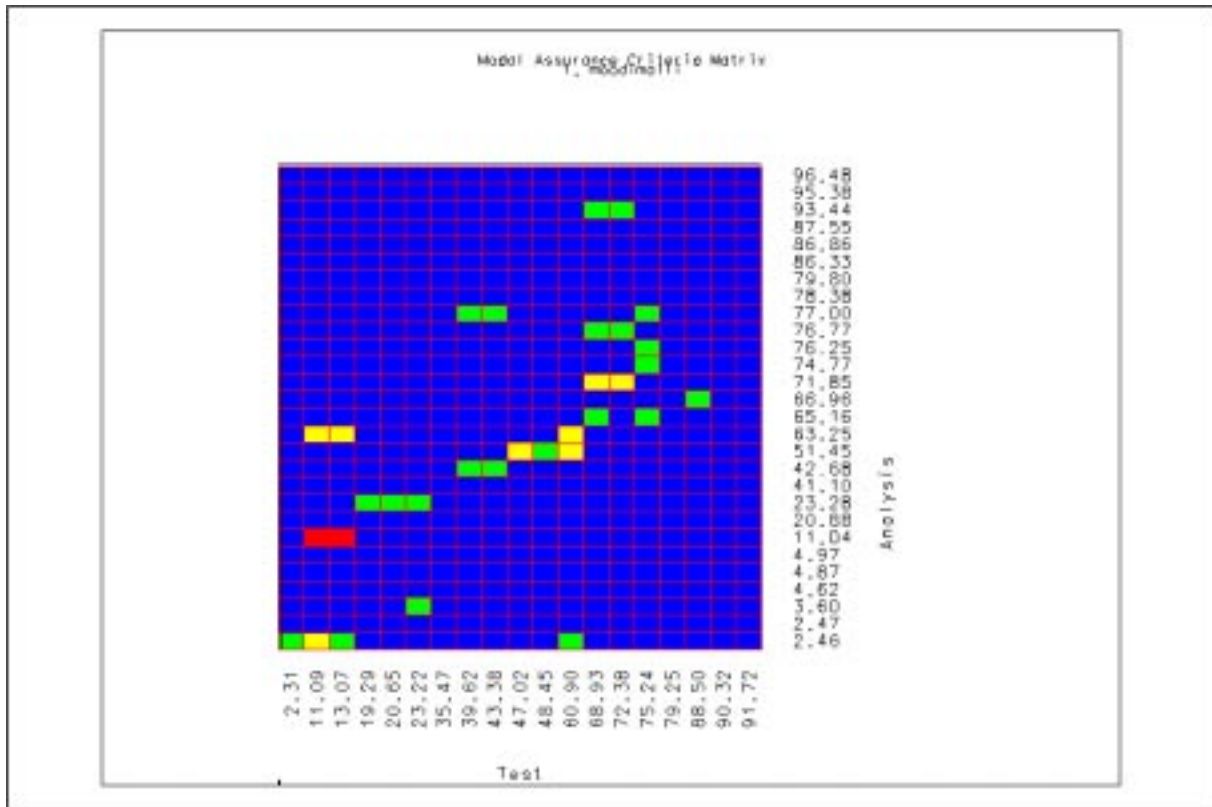
Mittausmallin solmu	Laskentamallin solmu	Etäisyys (m)
6	3004	0.143
7	4975	0.048
8	4965	0.000
9	14258	0.173
10	7011	0.039
11	7020	0.062
12	14336	0.136
13	17945	0.163
28	16986	0.150
29	6853	0.159
30	17270	0.155
31	17282	0.162
32	16996	0.157
48	6907	0.096
49	7213	0.108
50	6883	0.074
51	7111	0.084
68	14612	0.188
69	14617	0.212
70	14576	0.139
71	14580	0.158
88	6921	0.083
89	7252	0.097
90	6867	0.056
91	7086	0.069
108	14540	0.168
109	14535	0.194
110	14516	0.115
111	14522	0.156
129	2942	0.137
130	2924	0.129
131	2989	0.134



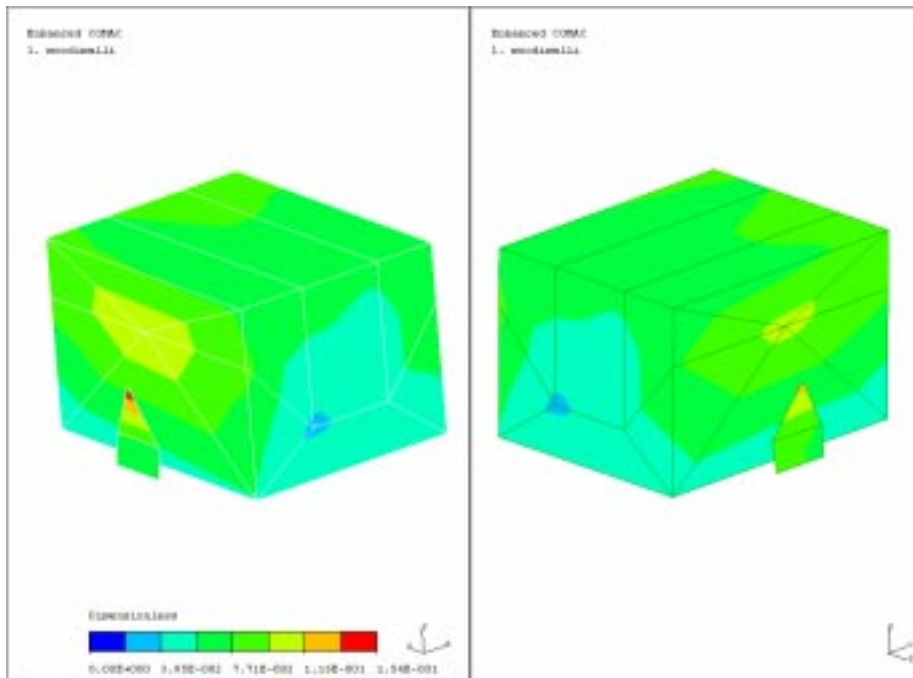
Kuva 1. Mittausmalli.



Kuva 2. Mittauspisteitä vastaavat laskentamallin pisteet.



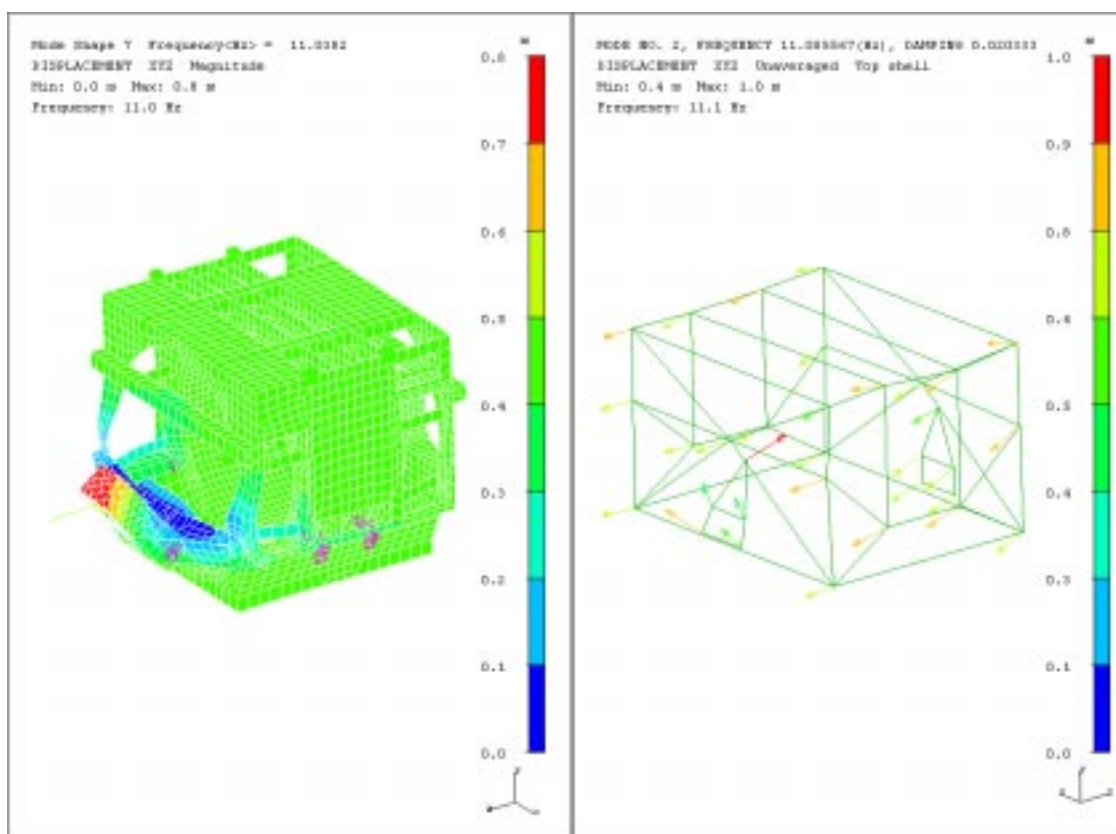
Kuva 3. MAC-vertailu 1. moodimallin kanssa.



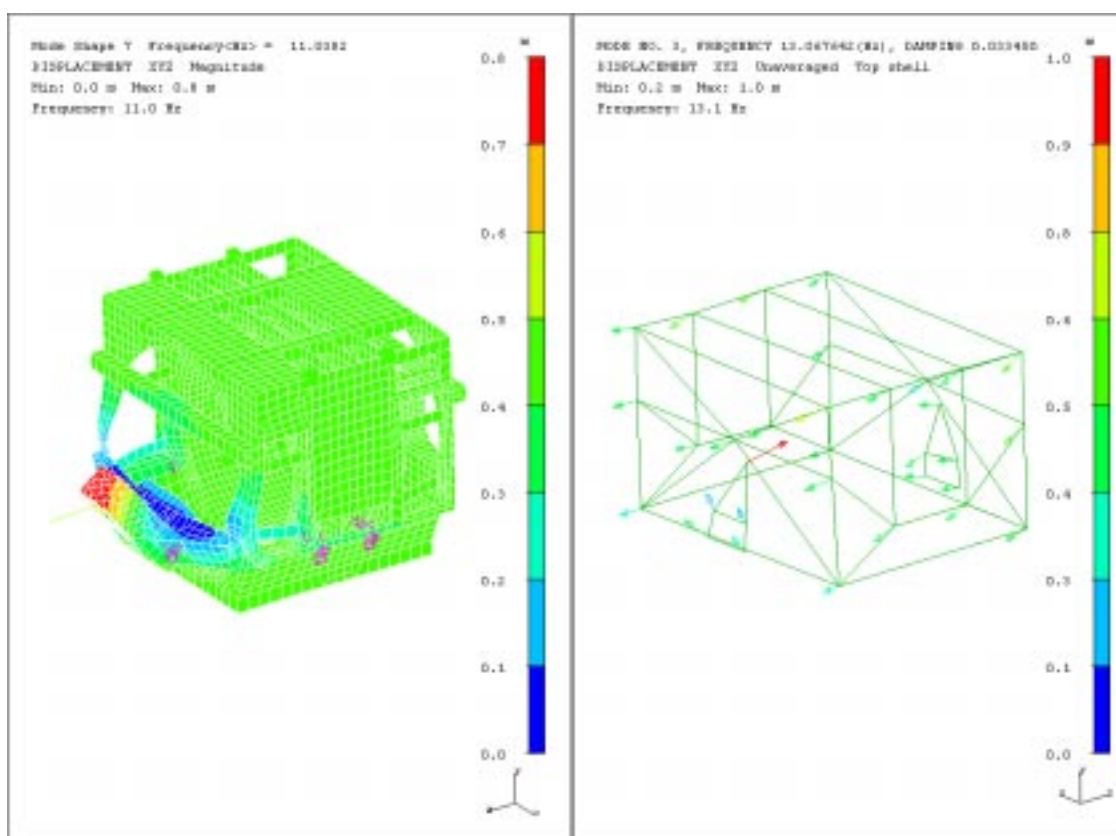
Kuva 4. CoMAC-vertailu näyttää, että suurimmat poikkeamat mallien välillä esiintyvät laakeripukeissa.

Taulukko 2. Taajuusvertailu 1. moodimallin kanssa.

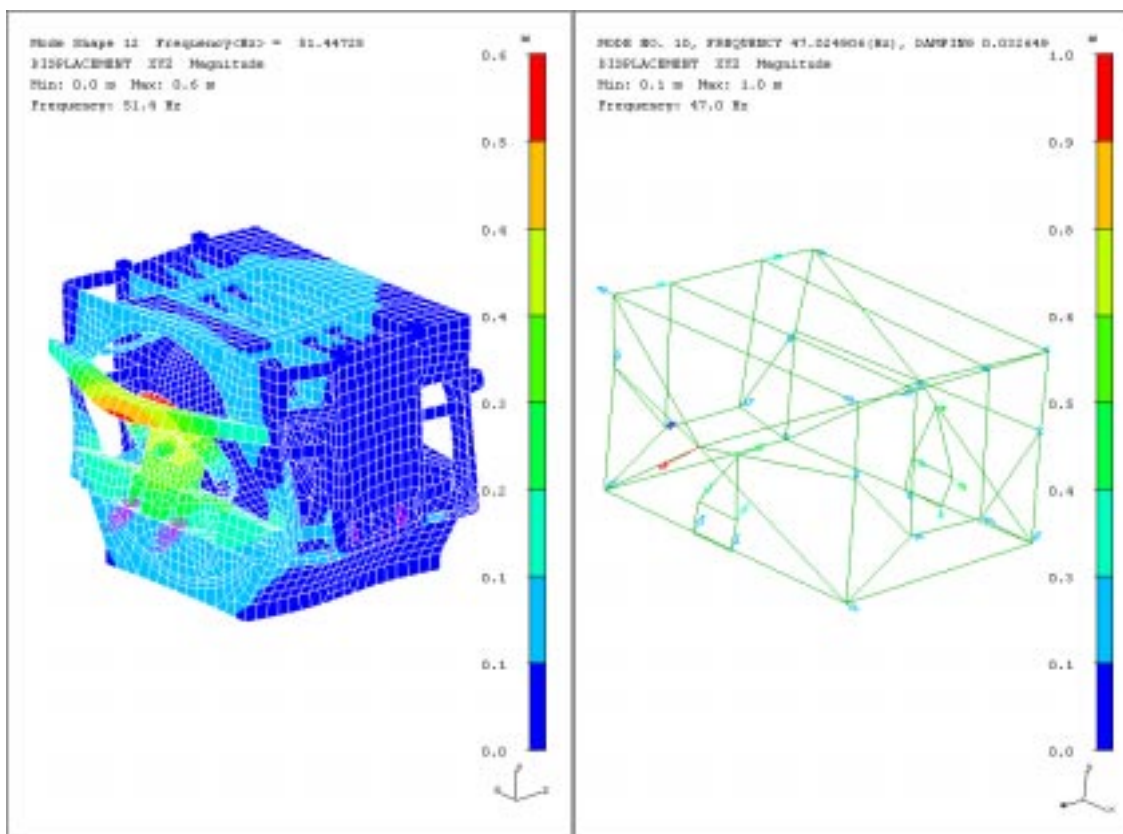
EMA no	FEM no	EMA (Hz)	FEM (Hz)	Ero (%)	MAC	Huom.
1	0	2.3	---	---	---	
2	7	11.1	11.0	-0.4	0.92	Kuva 5
3	7	13.1	11.0	-15.5	0.90	Kuva 6
4	0	19.3	---	---	---	
5	0	20.6	---	---	---	
6	0	23.2	---	---	---	
7	0	35.5	---	---	---	
8	0	39.6	---	---	---	
9	0	43.4	---	---	---	
10	12	47.0	51.4	9.4	0.50	Kuva 7
11	0	48.5	---	---	---	
12	13	60.9	63.2	3.8	0.63	Kuva 8
13	16	68.9	71.9	4.2	0.61	Kuva 10
14	16	72.4	71.9	-0.7	0.67	Kuva 11
15	0	75.2	---	---	---	
16	0	79.3	---	---	---	
17	0	88.5	---	---	---	
18	0	90.3	---	---	---	
19	0	91.7	---	---	---	
0	1	---	2.5	---	---	
0	2	---	2.5	---	---	
0	3	---	3.6	---	---	
0	4	---	4.6	---	---	
0	5	---	4.9	---	---	
0	6	---	5.0	---	---	
0	8	---	20.9	---	---	
0	9	---	23.3	---	---	
0	10	---	41.1	---	---	
0	11	---	42.7	---	---	
12	12	60.9	51.4	-15.5	0.62	Kuva 9
0	14	---	65.2	---	---	
0	15	---	67.0	---	---	
0	17	---	74.8	---	---	
0	18	---	76.3	---	---	
0	19	---	76.8	---	---	
0	20	---	77.0	---	---	
0	21	---	78.4	---	---	
0	22	---	79.8	---	---	
0	23	---	86.3	---	---	
0	24	---	86.9	---	---	
0	25	---	87.6	---	---	
0	26	---	93.4	---	---	
0	27	---	95.4	---	---	
0	28	---	96.5	---	---	



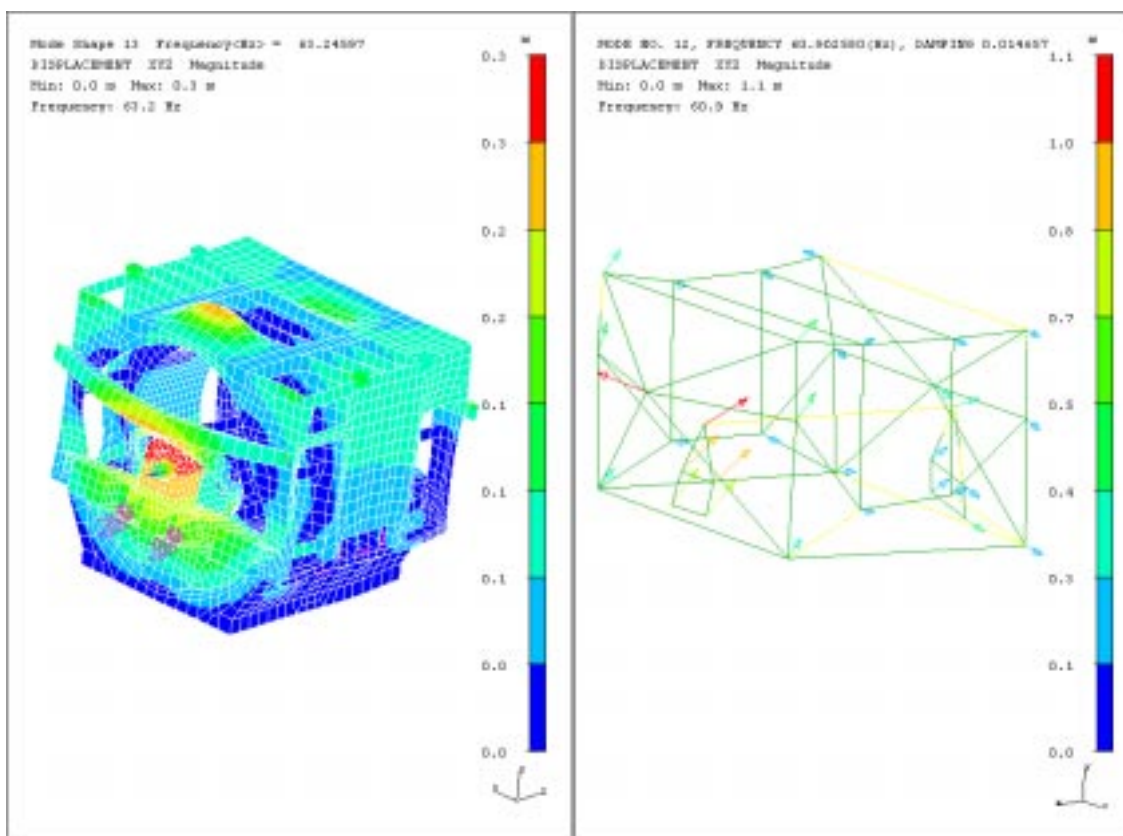
Kuva 5. Alapalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 11,1 Hz.



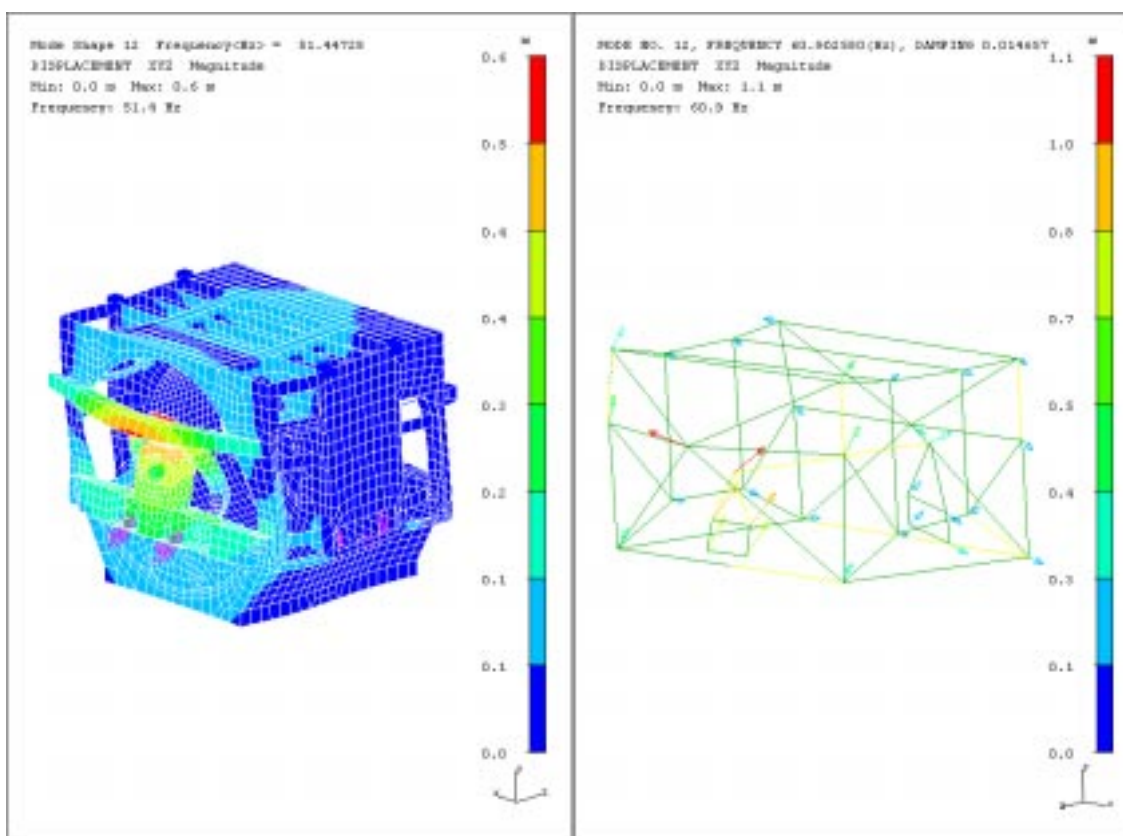
Kuva 6. Alapalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 13,1 Hz.



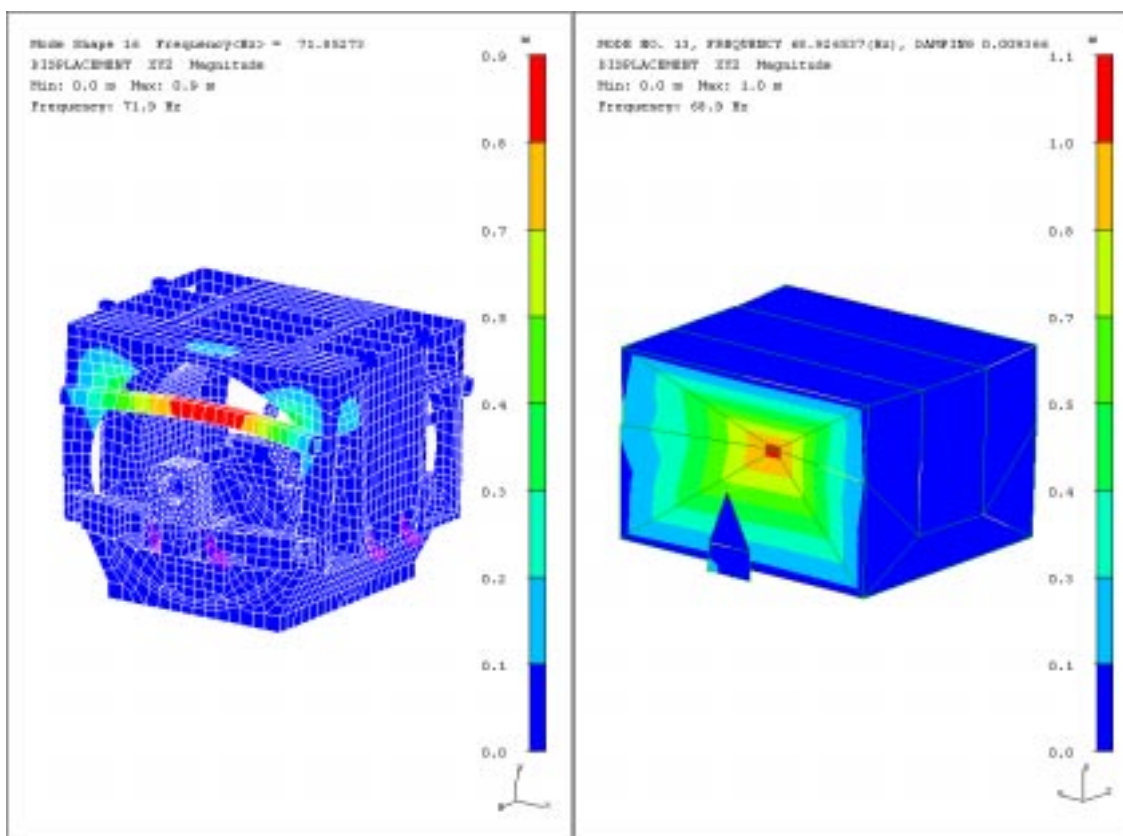
Kuva 7. Yläpalkin ja laakeripukin ominaismuoto, mitattu taajuus 47,0 Hz.



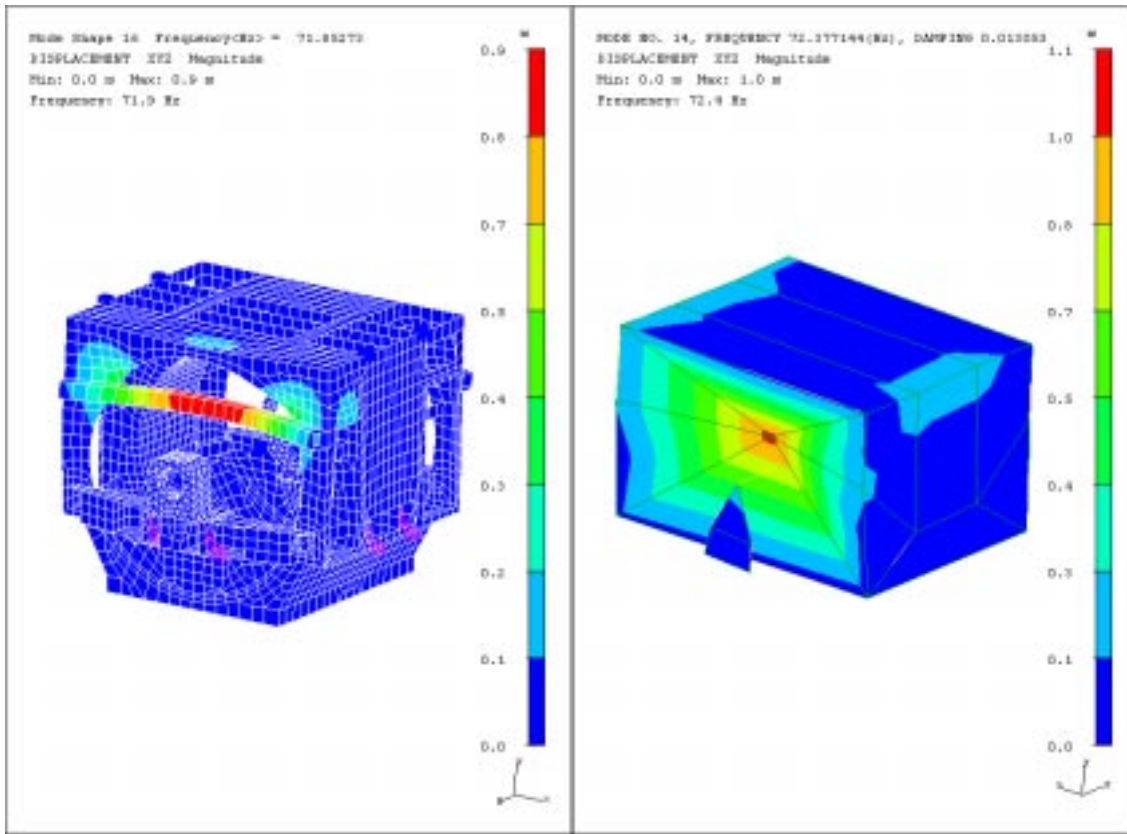
Kuva 8. Yläpalkin, laakeripukin muotojen lisäksi paikallisia muotoja, mitattu taajuus 60,9 Hz.



Kuva 9. Yläpalkin ja laakeripukin muoto, mitattu taajuus 60,9 Hz.

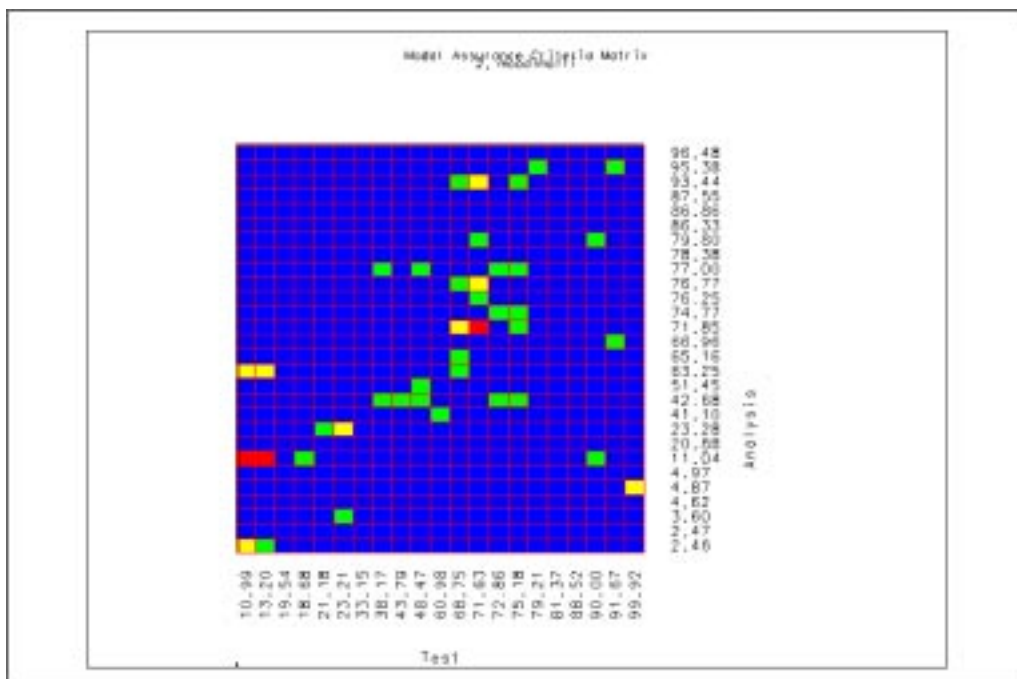


Kuva 10. Puhdas yläpalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 68,9 Hz.



Kuva 11. Yläpalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 72,4 Hz.

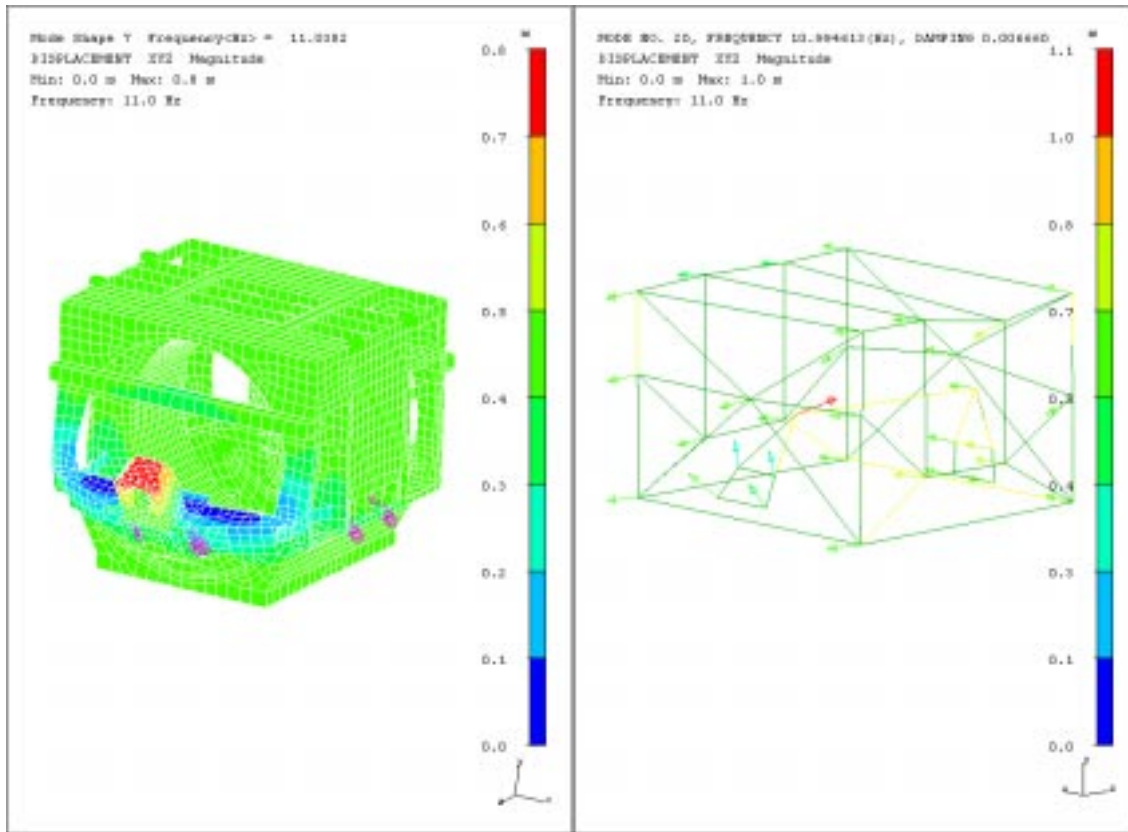
Vastaava MAC-vertailu tehtiin myös 2. moodimallille, kuva 12. Laskettujen ja mitattujen taajuuksien vertailu on nähtävissä taulukossa 3 ja parhaiten korreloivat muodot on esitetty kuvissa 13-21. Kuvat 18-21 ovat erikoisia, vertailu löytää yhteneväisyyksiä hyvin eri taajuuksilla esiintyvistä muodoista.



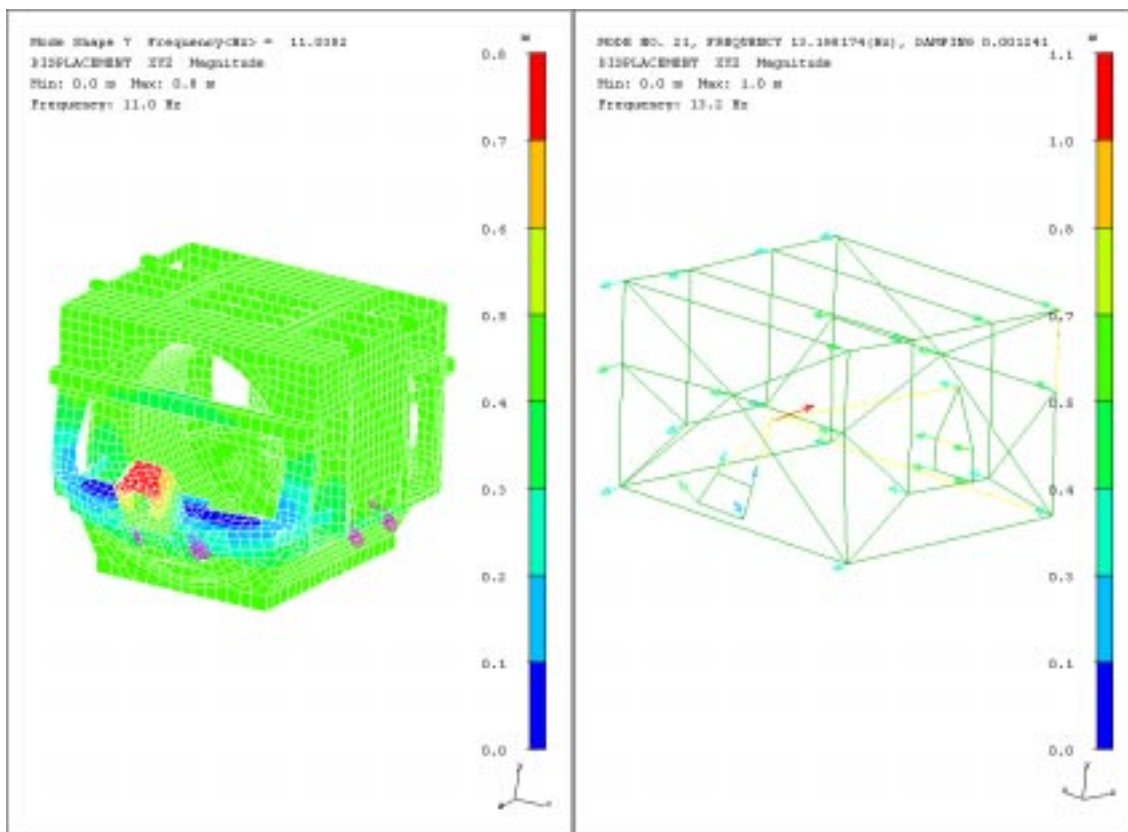
Kuva 12. MAC-vertailu 2. moodimallin kanssa.

Taulukko 3. Taajuusvertailu 2. moodimallin kanssa.

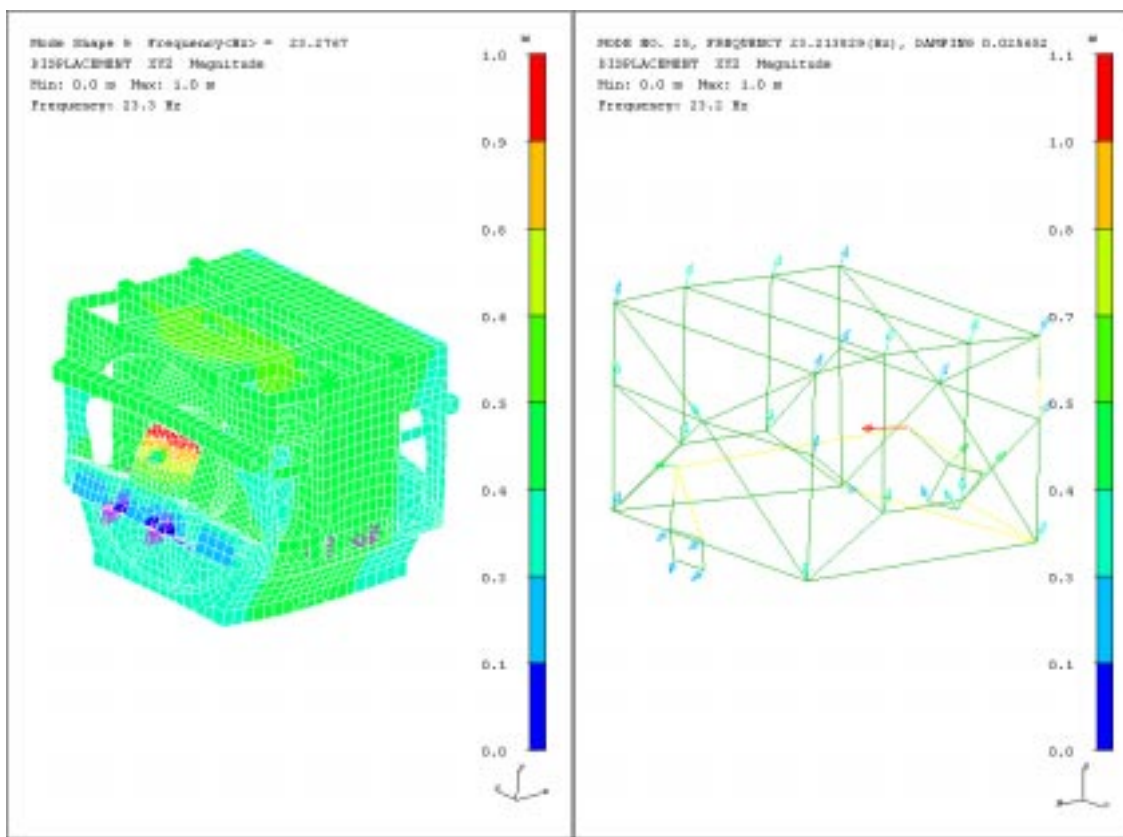
EMA no	FEM no	EMA (Hz)	FEM (Hz)	Ero (%)	MAC	Huom.
20	7	11.0	11.0	0.4	0.86	Kuva 13
21	7	13.2	11.0	-16.4	0.78	Kuva 14
22	0	19.5	---	---	---	
23	0	18.7	---	---	---	
24	0	21.2	---	---	---	
25	9	23.2	23.3	0.3	0.53	Kuva 15
26	0	33.1	---	---	---	
27	0	38.2	---	---	---	
28	0	43.8	---	---	---	
29	0	48.5	---	---	---	
30	0	61.0	---	---	---	
31	16	68.8	71.9	4.5	0.61	Kuva 16
32	16	71.6	71.9	0.3	0.75	Kuva 17
33	0	72.9	---	---	---	
34	0	75.2	---	---	---	
35	0	79.2	---	---	---	
36	0	81.4	---	---	---	
37	0	88.5	---	---	---	
38	0	90.0	---	---	---	
39	0	91.7	---	---	---	
40	5	99.9	4.9	-95.1	0.59	Kuva 18
20	1	11.0	2.5	-77.6	0.50	Kuva 19
0	2	---	2.5	---	---	
0	3	---	3.6	---	---	
0	4	---	4.6	---	---	
0	6	---	5.0	---	---	
0	8	---	20.9	---	---	
0	10	---	41.1	---	---	
0	11	---	42.7	---	---	
0	12	---	51.4	---	---	
20	13	11.0	63.2	475.2	0.52	Kuva 20
0	14	---	65.2	---	---	
0	15	---	67.0	---	---	
0	17	---	74.8	---	---	
0	18	---	76.3	---	---	
0	19	---	76.8	---	---	
0	20	---	77.0	---	---	
0	21	---	78.4	---	---	
0	22	---	79.8	---	---	
0	23	---	86.3	---	---	
0	24	---	86.9	---	---	
0	25	---	87.6	---	---	
32	26	71.6	93.4	30.5	0.58	Kuva 21
0	27	---	95.4	---	---	
0	28	---	96.5	---	---	



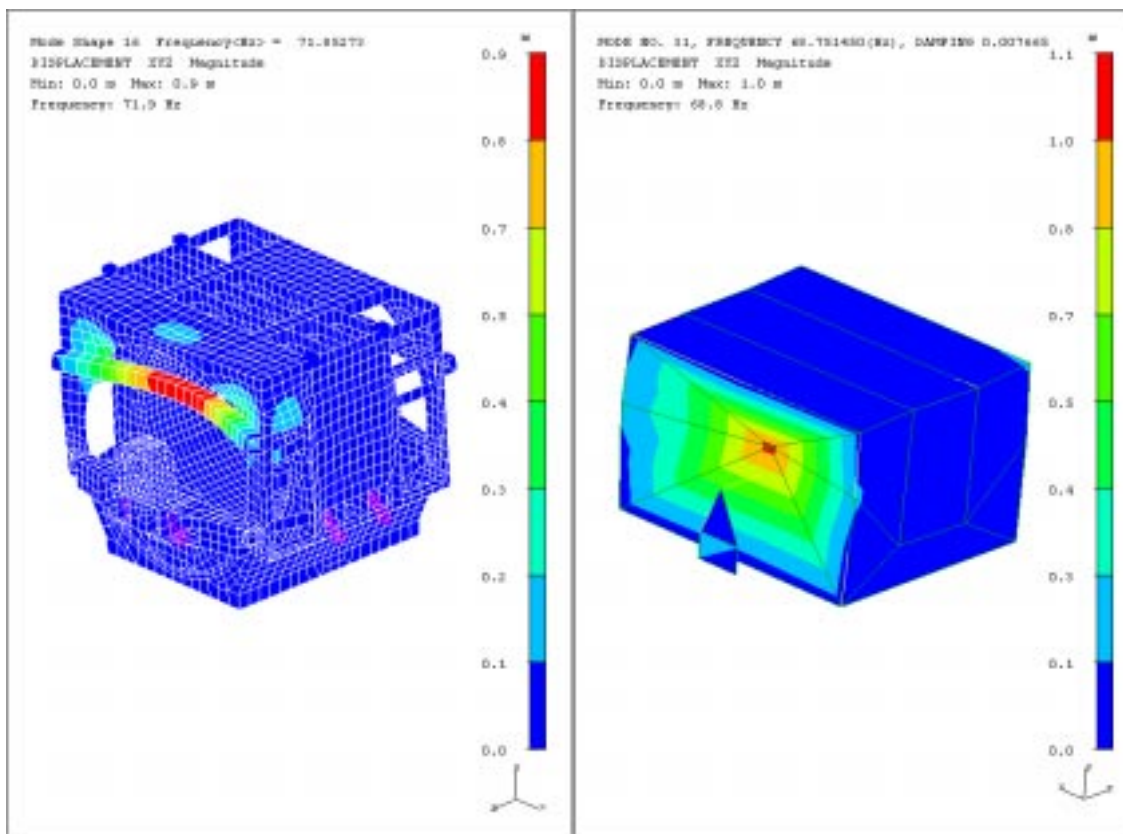
Kuva 13. Alapalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 11,0 Hz.



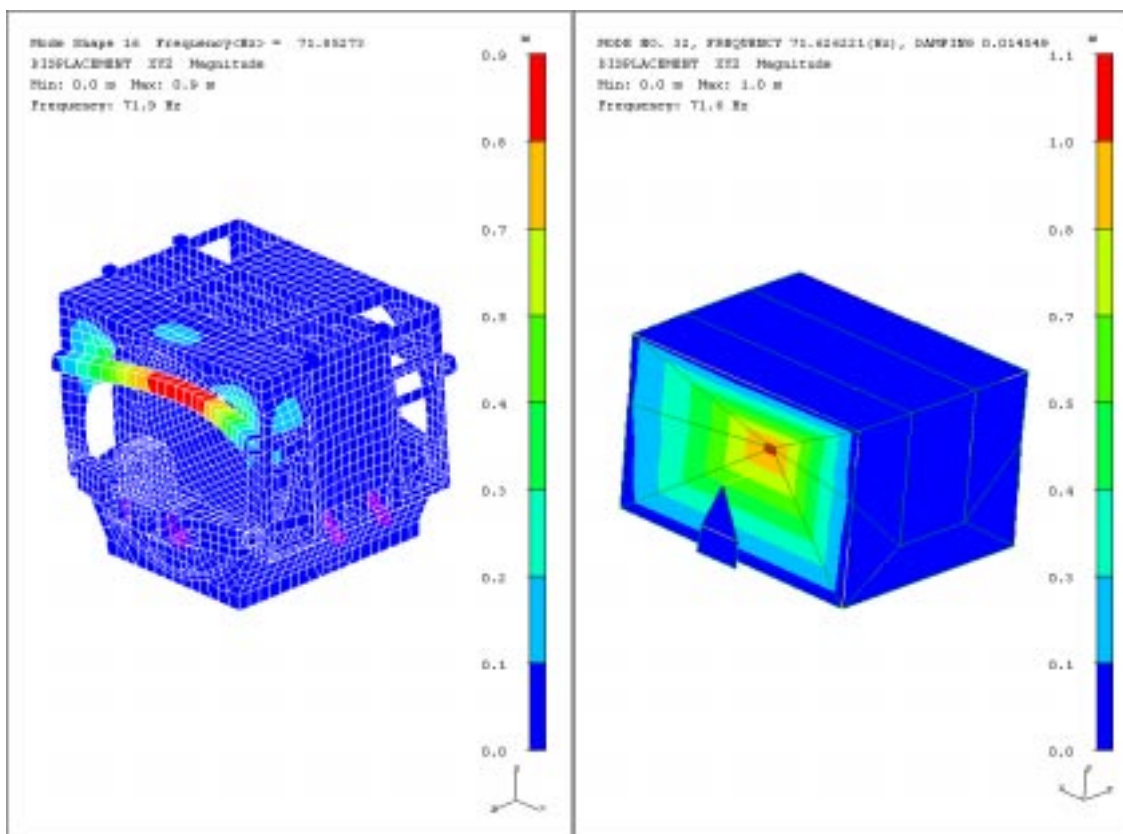
Kuva 14. Alapalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 13,2 Hz.



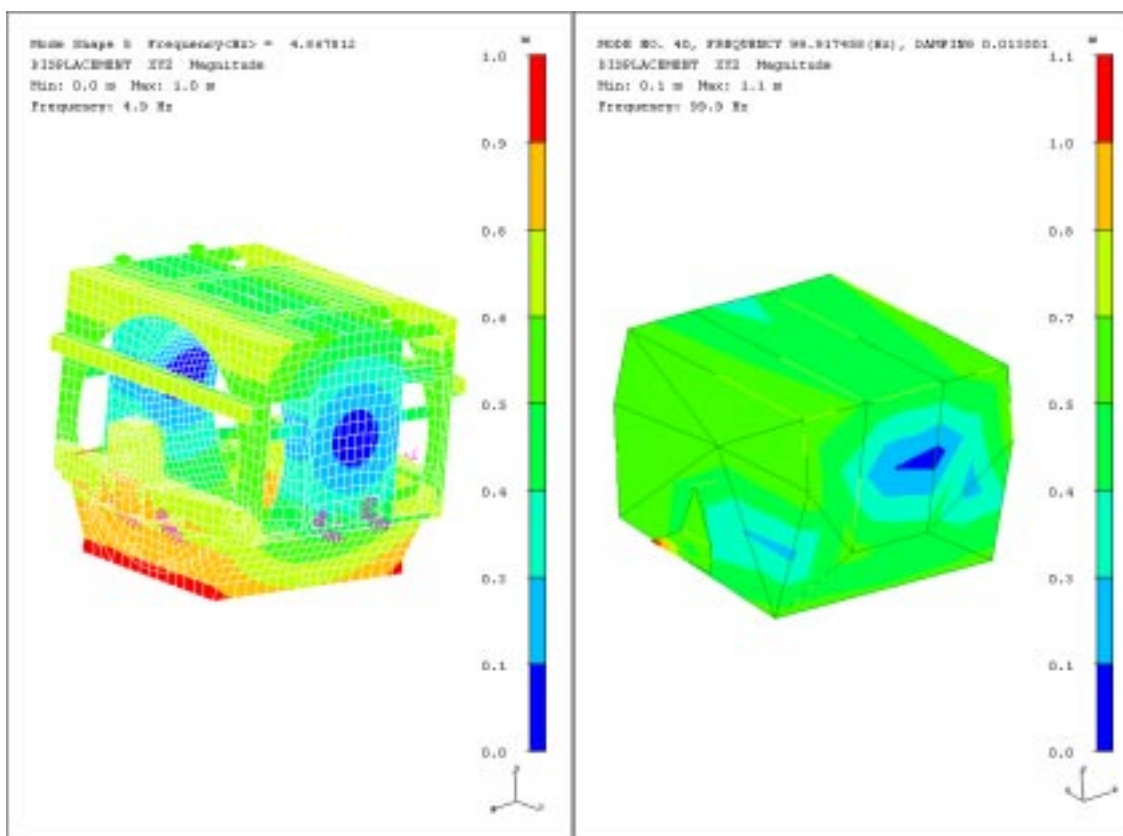
Kuva 15. Roottorin ominaisuusmuoto, mitattu taajuus 23,2 Hz. Vertaa kuva 27.



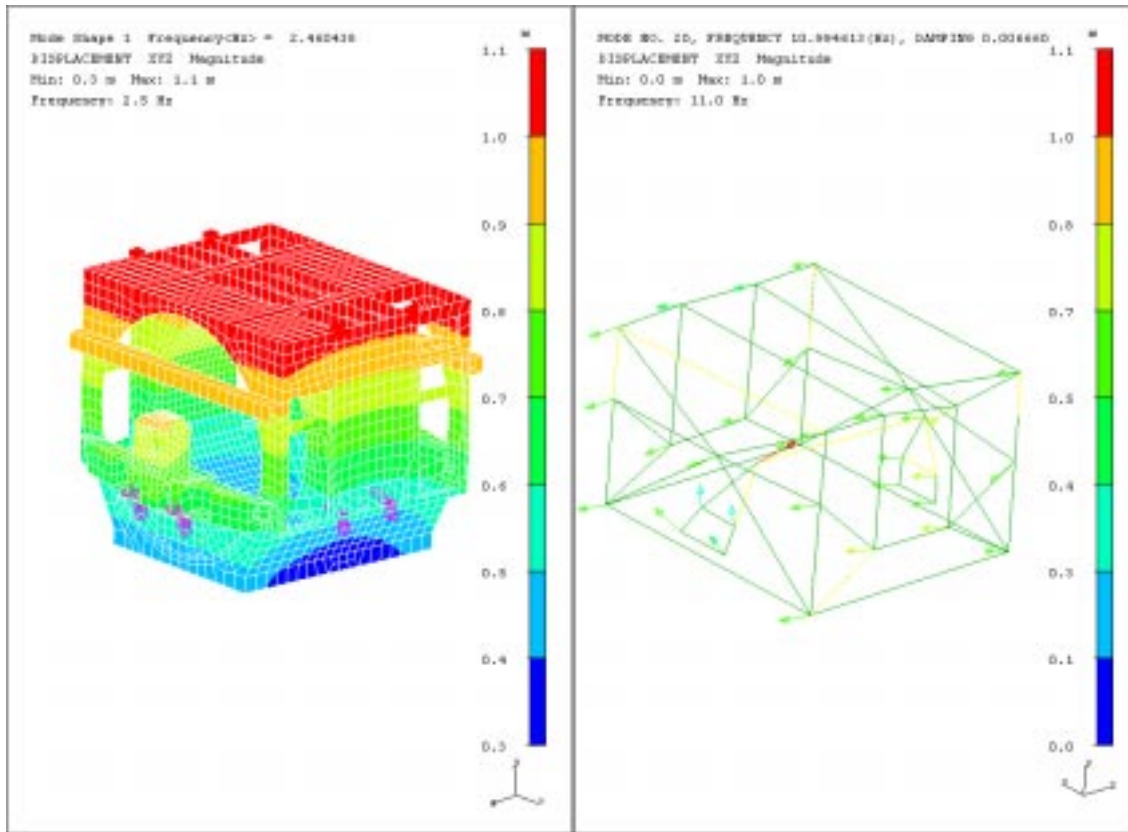
Kuva 16. Yläpalkin taivutusmuoto, mitattu taajuus 68,7 Hz.



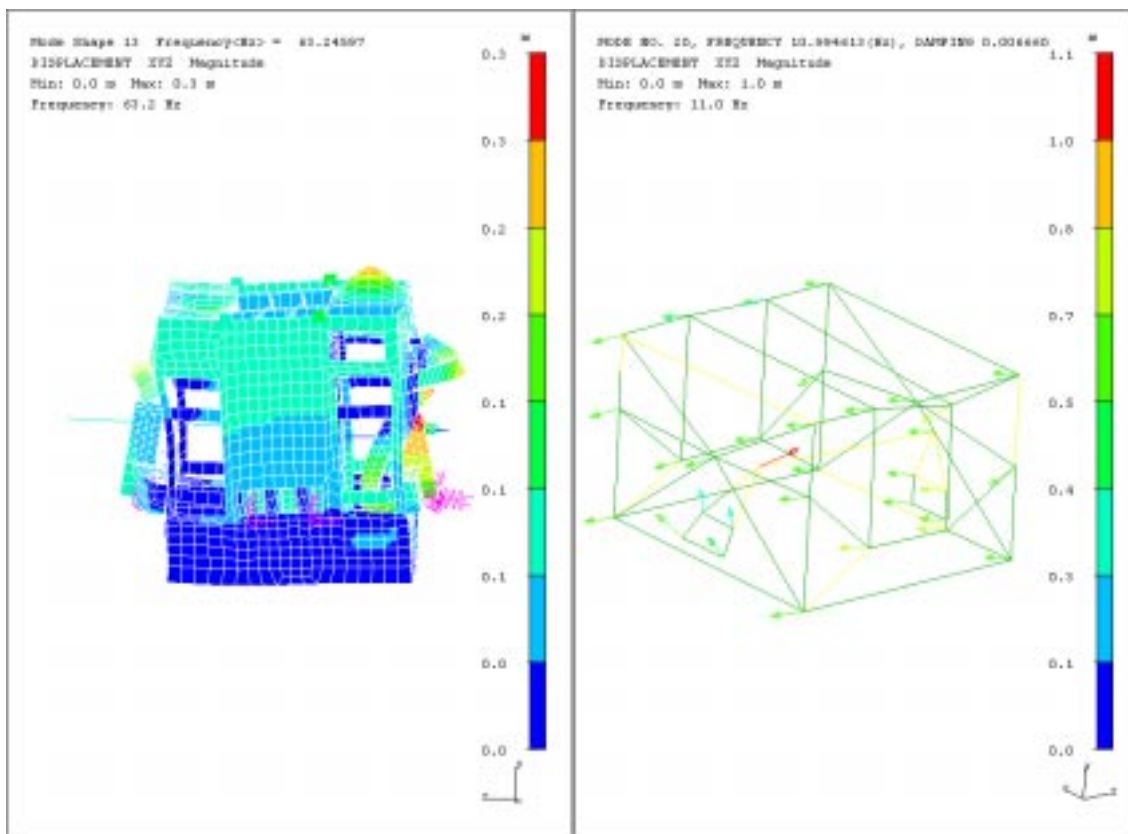
Kuva 17. Yläpalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 71,6 Hz.



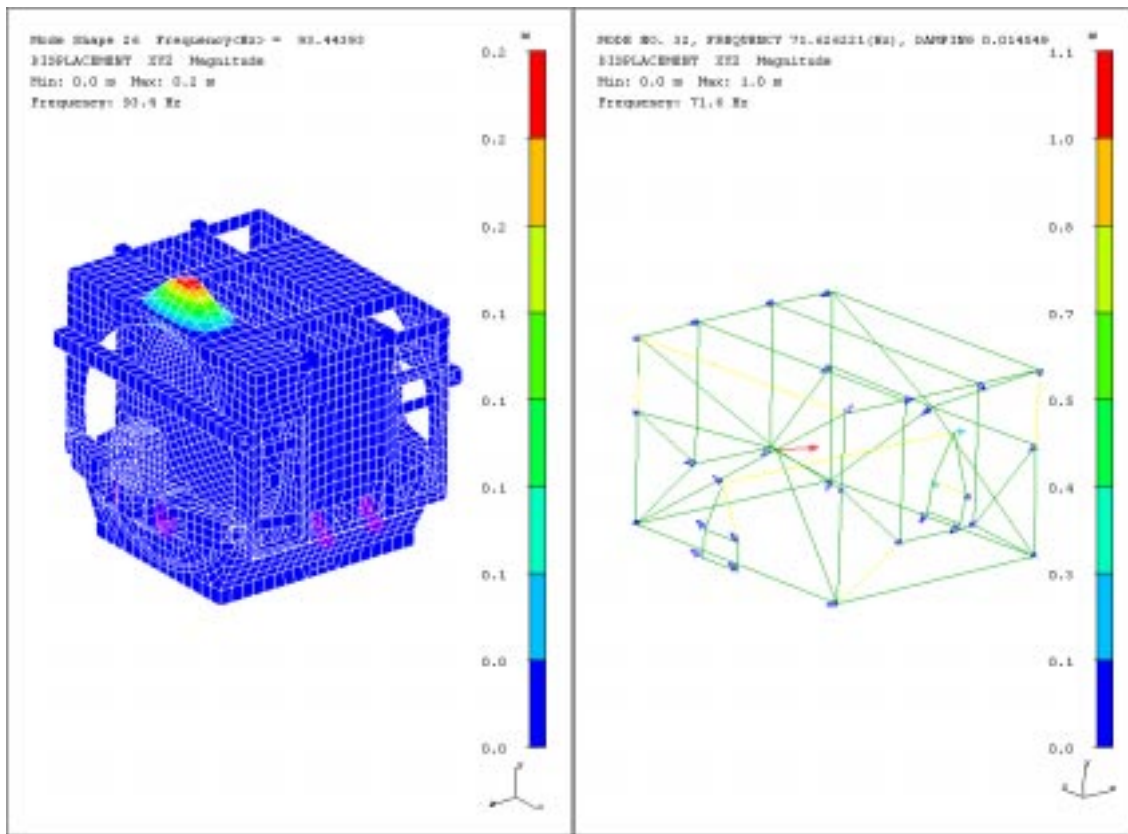
Kuva 18. Erikoisuus: generaattorin laskennallinen jäykän kappaleen muoto osuu vertailussa yhteen 100 Hz mitatun muodon kanssa. Samantyyppinen ongelma ilmenee kuvissa 19-21.



Kuva 19. Mitattu taajuus 10,9 Hz.

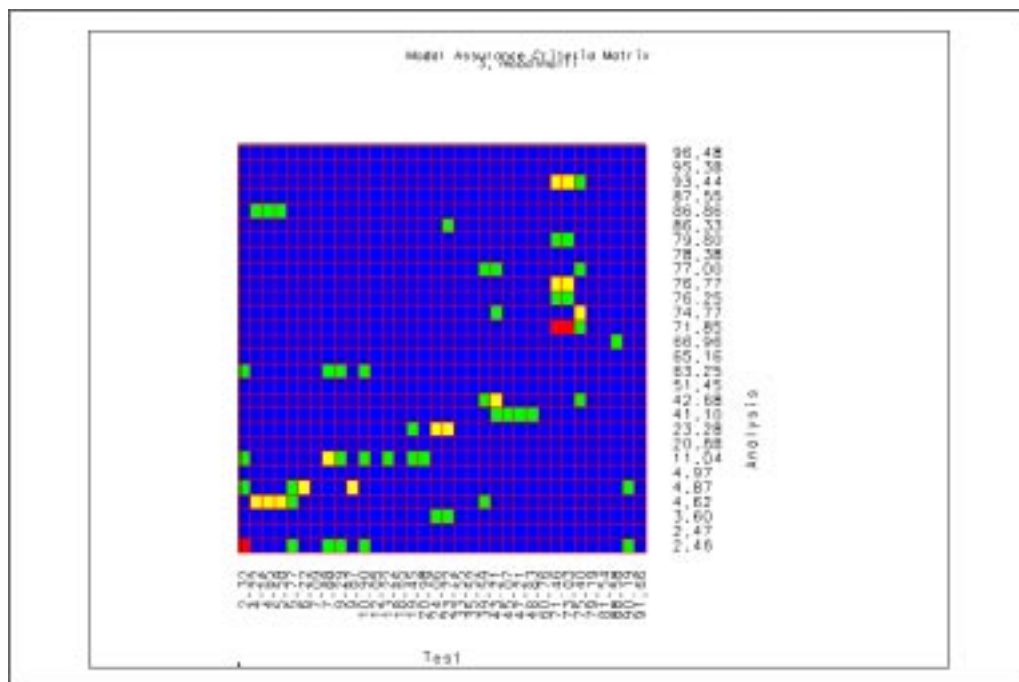


Kuva 20. Mitattu taajuus 11,0 Hz.



Kuva 21. Mitattu taajuus 71.6 Hz.

MAC-vertailu tehtiin myös 3. moodimallille, kuva 22. Laskettujen ja mitattujen taajuuksien vertailu on nähtävissä taulukossa 4 ja parhaiten korreloivat muodot on esitetty kuvissa 23-29.

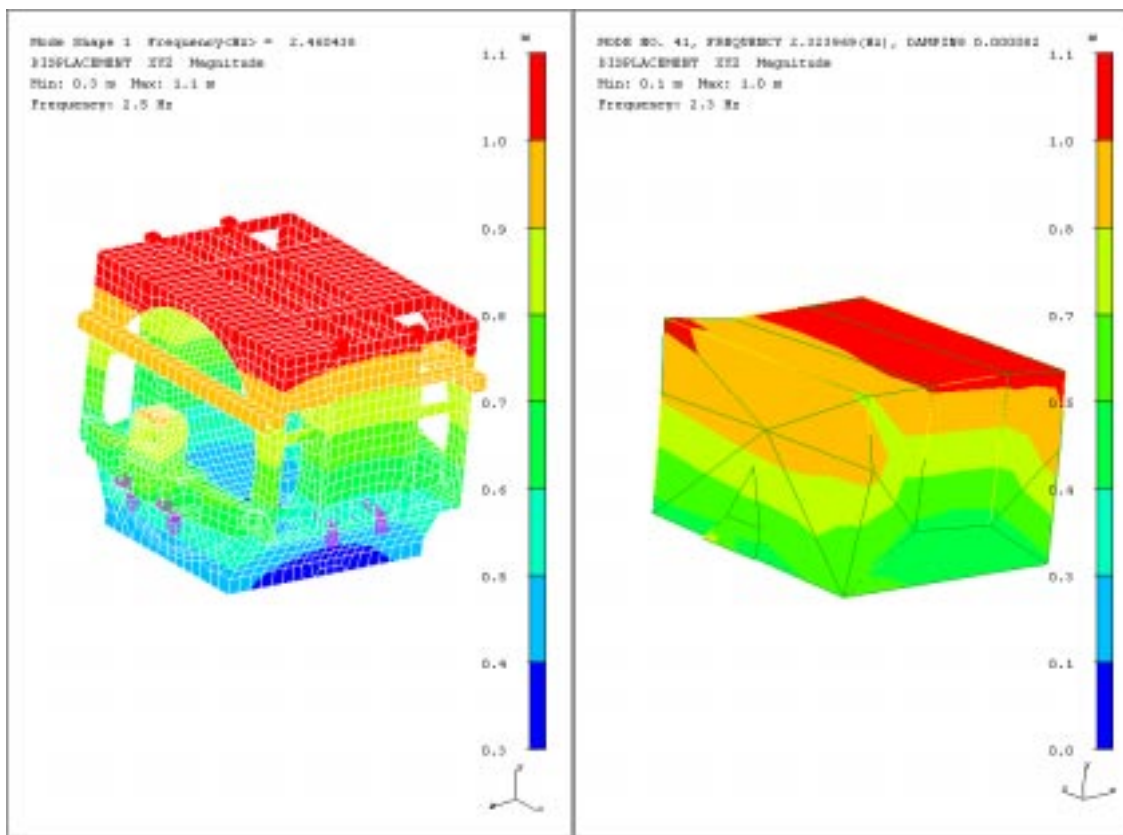


Kuva 22. MAC-vertailu 3. moodimallin kanssa.

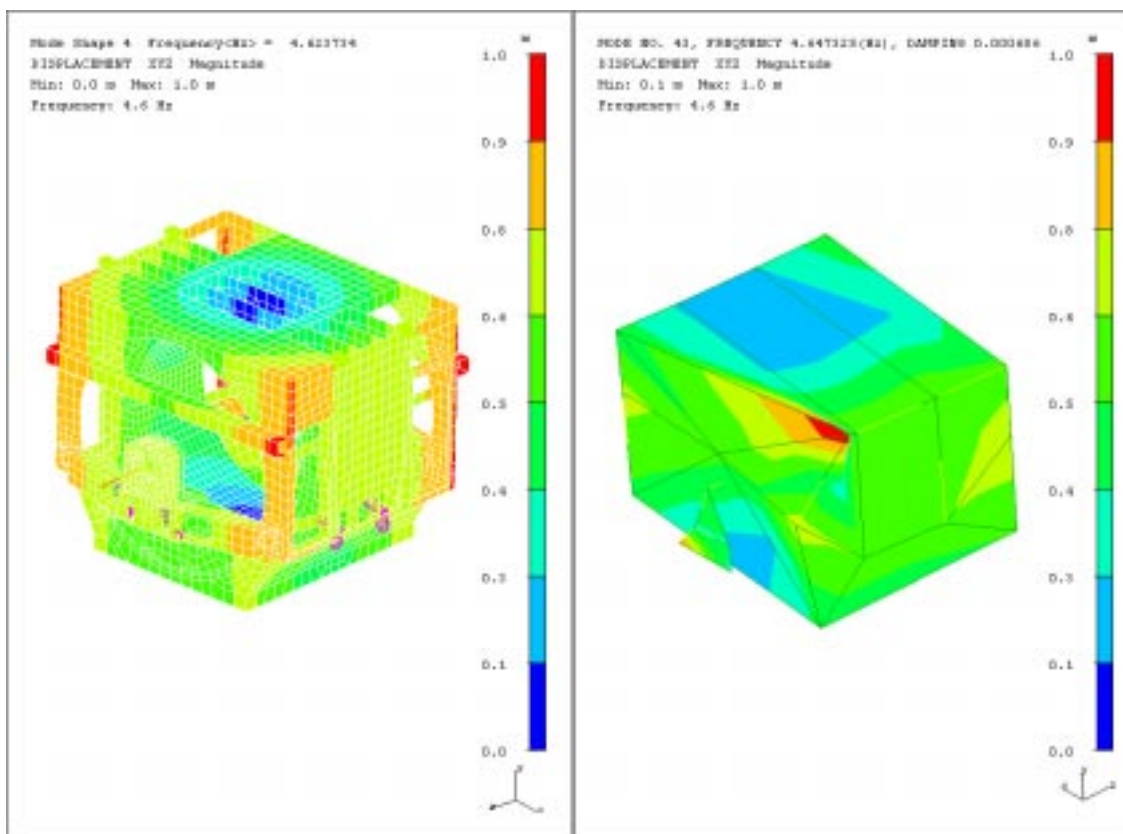
Taulukko 4. Taajuusvertailu 3. moodimallin kanssa.

EMA no	FEM no	EMA (Hz)	FEM (Hz)	Ero (%)	MAC	Huom.
41	1	2.3	2.5	5.9	0.82	Kuva 23
42	0	4.2	---	---	---	
43	4	4.6	4.6	-0.5	0.58	Kuva 24
44	0	5.6	---	---	---	
45	0	5.8	---	---	---	
46	5	6.2	4.9	-21.7	0.56	Kuva 25
47	0	7.1	---	---	---	
48	7	7.9	11.0	40.1	0.56	Kuva 26
49	0	9.3	---	---	---	
50	0	9.9	---	---	---	
51	0	10.9	---	---	---	
52	0	12.1	---	---	---	
53	0	13.2	---	---	---	
54	0	18.6	---	---	---	
55	0	19.4	---	---	---	
56	0	21.0	---	---	---	
57	0	24.1	---	---	---	
58	9	23.7	23.3	-1.9	0.56	Kuva 27
59	0	33.5	---	---	---	
60	0	35.5	---	---	---	
61	0	39.6	---	---	---	
62	0	43.2	---	---	---	
63	0	45.1	---	---	---	
64	0	47.2	---	---	---	
65	0	48.8	---	---	---	
66	0	60.8	---	---	---	
67	16	71.5	71.9	0.6	0.76	Kuva 28
68	16	73.0	71.9	-1.6	0.65	Kuva 29
69	0	75.4	---	---	---	
70	0	79.2	---	---	---	
71	0	81.5	---	---	---	
72	0	88.6	---	---	---	
73	0	90.2	---	---	---	
74	0	91.7	---	---	---	
0	2	---	2.5	---	---	
0	3	---	3.6	---	---	
0	6	---	5.0	---	---	
0	8	---	20.9	---	---	
0	10	---	41.1	---	---	
0	11	---	42.7	---	---	
0	12	---	51.4	---	---	
0	13	---	63.2	---	---	
0	14	---	65.2	---	---	
0	15	---	67.0	---	---	
0	17	---	74.8	---	---	

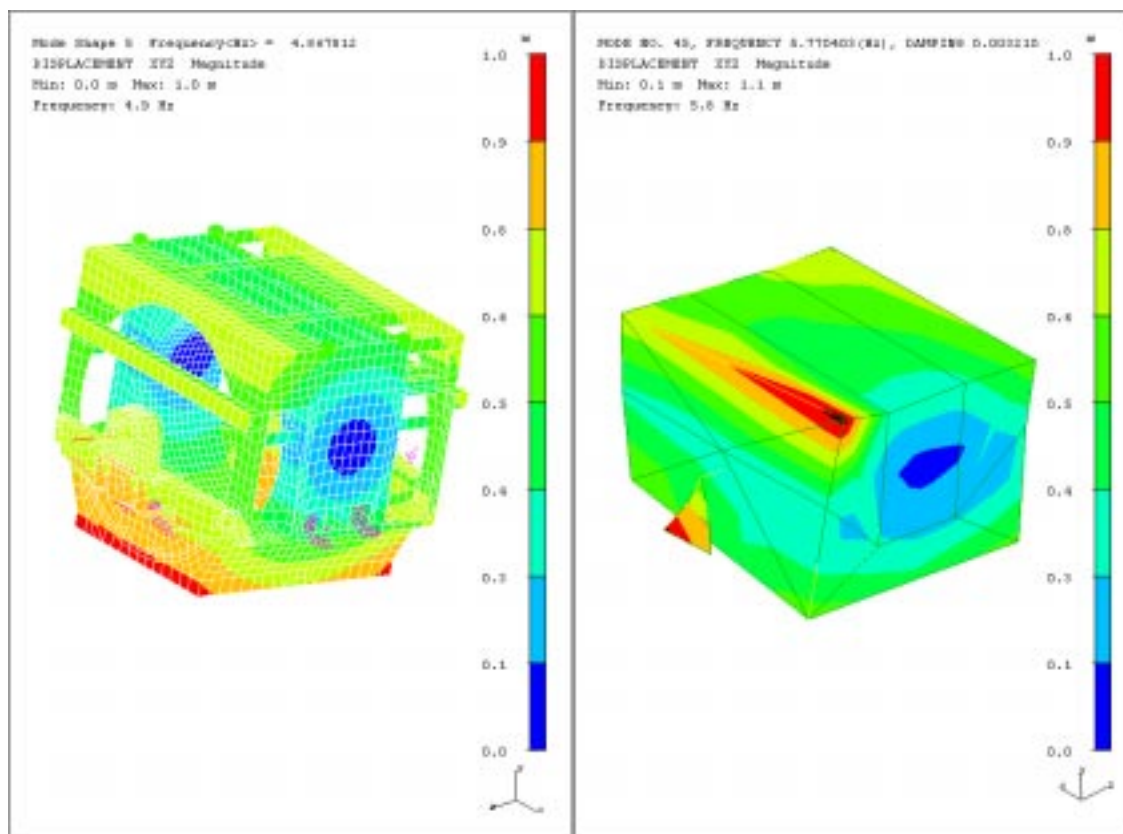
0	18	---	76.3	---	---	
67	19	71.5	76.8	7.4	0.50	
0	20	---	77.0	---	---	
0	21	---	78.4	---	---	
0	22	---	79.8	---	---	
0	23	---	86.3	---	---	
0	24	---	86.9	---	---	
0	25	---	87.6	---	---	
67	26	71.5	93.4	30.8	0.57	
0	27	---	95.4	---	---	
0	28	---	96.5	---	---	



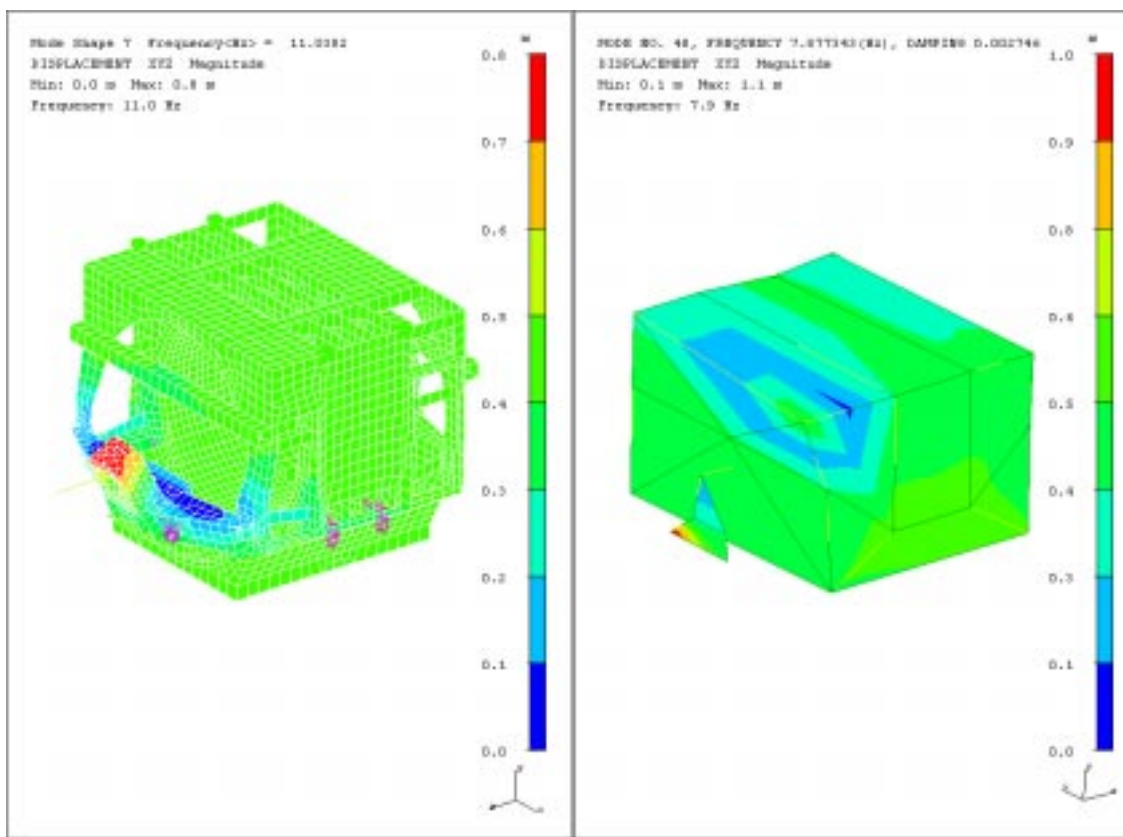
Kuva 23. Roottorin suuntainen jäykän kappaleen liike, mitattu taajuus 2,3 Hz.



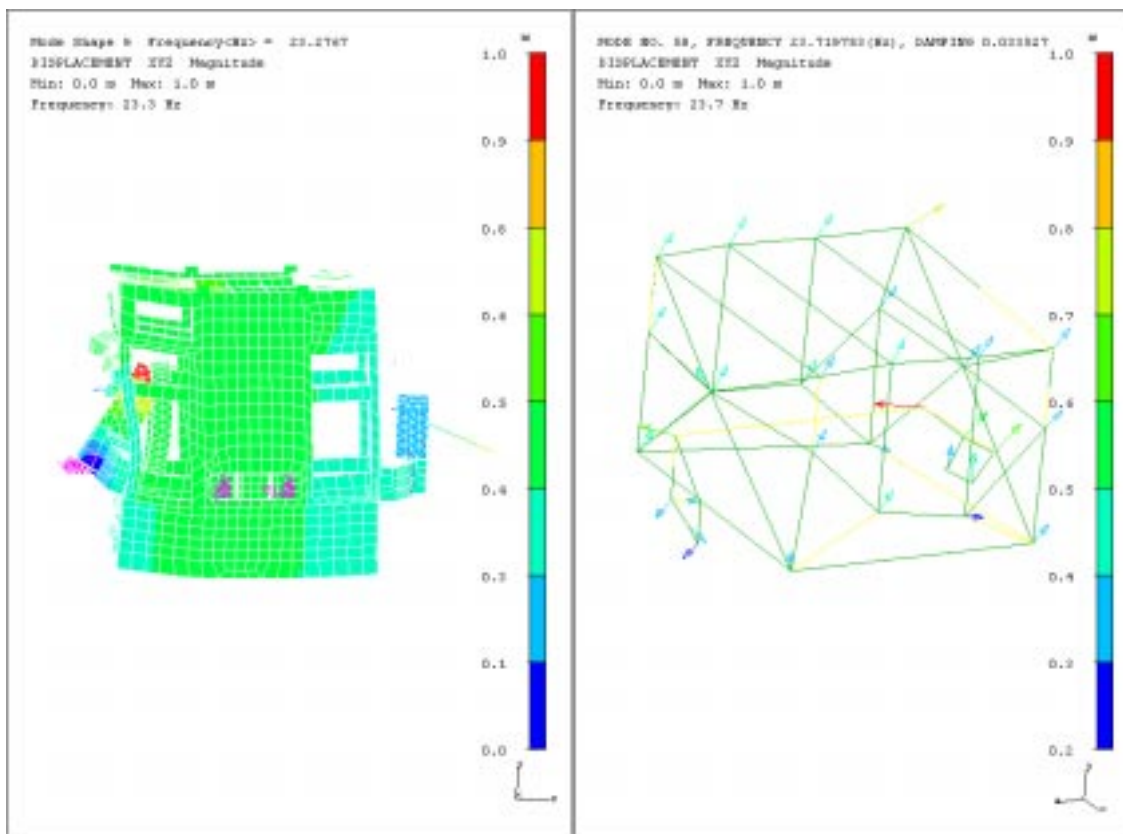
Kuva 24. Pysty akselin ympäri kiertyvä jäykän kappaleen liike, mitattu taajuus 4,6 Hz. Mittauksista tehdyssä analyysissä mallin ylänurkan siirtymät näyttävät erikoisilta.



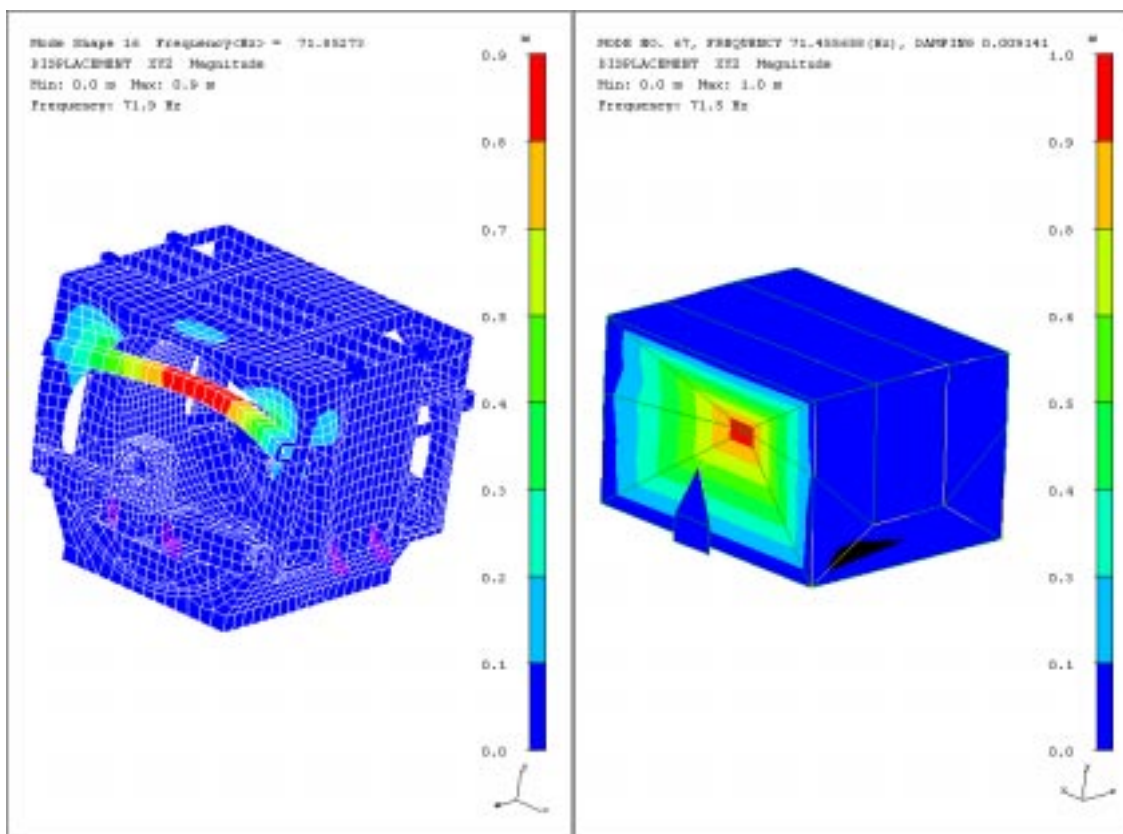
Kuva 25. Jäykän kappaleen liike, mitattu taajuus 5,7 Hz.



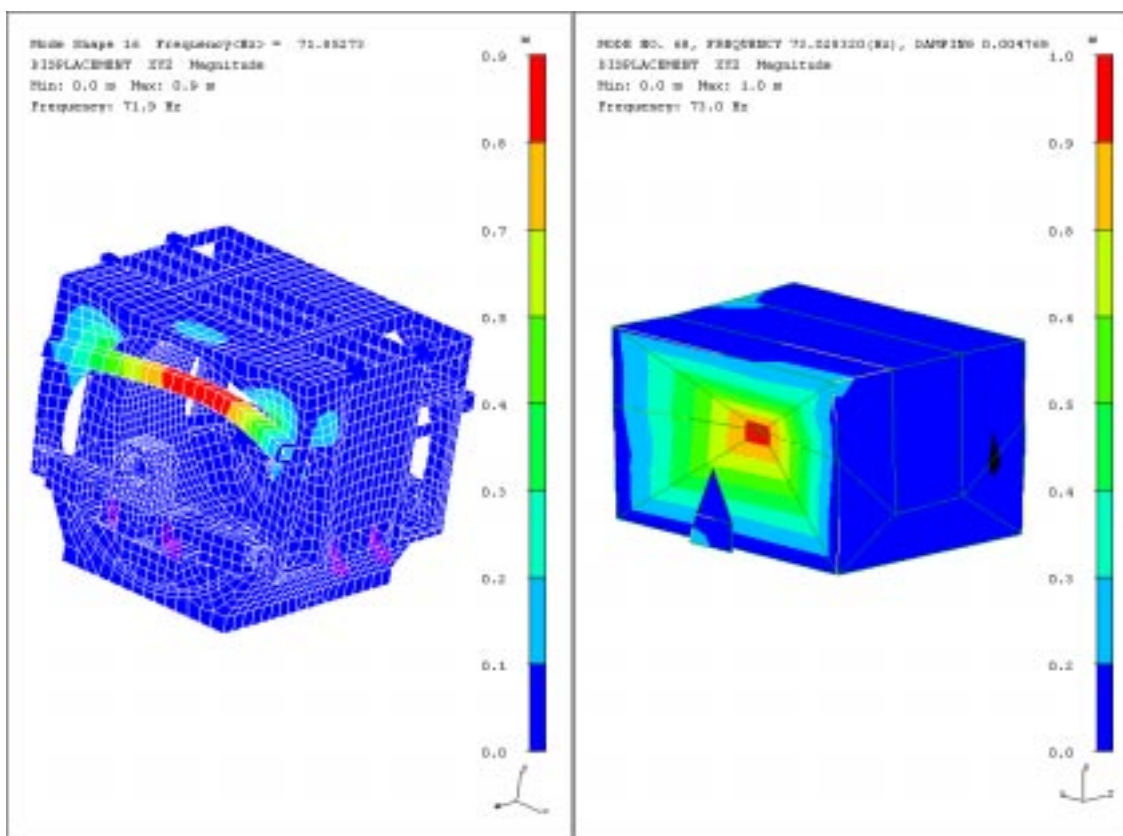
Kuva 26. Alapalkin muoto, mitattu taajuus 7,9 Hz.



Kuva 27. Roottorin ominaismuoto, mitattu taajuus 23,7 Hz. Vertaa kuva15.



Kuva 28. Yläpalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 71,5 Hz.



Kuva 29. Yläpalkin ominaismuoto, mitattu taajuus 73,0 Hz.