

Jukka Pirhonen

OPTI PC:N KIINTOLEVYN RASITUSTESTAUS

Insinööriyö

Kajaanin ammattikorkeakoulu

Tekniikan ja liikenteen ala

Elektroniikan tuotantotekniikan
koulutusohjelma

Kevät 2003

Osasto Tekniikka	Koulutusohjelma Tuotantotekniikka
Tekijä(t) Jukka Pirhonen	
Työn nimi OPTI PC:n kiintolevyn rasiustestaus	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Elektroniikan tuotantotekniikka	Ohjaaja(t) Heikki Savolainen Timo Pahkakangas
Aika 22.4.03	Sivumäärä 104 + 63
Tiivistelmä Tämän työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa rasiustesti harvesterin PC:n kiintolevylle. Testaustapana käytettiin ympäristötestausta ja menetelmänä satunnaistärinä. Testi perustuu harvesterin käytännön työskentelyolosuhteissa tehtyihin mittauksiin. Testaus tehtiin standardia IEC-68-2-64 mukailleen. Testattava kokonaisuus käsittää PC:n, rakin sekä näiden asennustelineen. Testin suunnittelussa otettiin huomioon laitteen rakenne ja komponentit suuntaa antavalla laskennalla ja taajuusvastemittauksilla. Testattava laite kiinnitettiin Z-suuntaista tärinystä lukuun ottamatta käyttöolosuhteita vastaavalla tavalla. Tärinystä tehtiin kolmessa eri suunnassa. Testauksen kokonaiskesto oli yhteensä 30 minuuttia. Kiintolevyn vaimennuksen tutkiminen oli osa tehtävää työtä. Työssä tutkittiin kiintolevyn tärinänvaimentimia ja vaimennusmenetelmää testattavassa mallissa. Vastemittaukset tehtiin kolmelle eri vaimennin jäykkyydelle. Yksi näistä valittiin varsinaiseen testaukseen	
Luottamuksellinen Ei	
Hakusanat Ympäristötestaus, kiintolevy, PC	
Säilytyspaikka Kajaanin AMK	

Faculty Faculty of Engineering	Degree programme Production Engineering
Author(s) Jukka Pirhonen	
Title An Environmental Test for the Hard Disk of Opti PC	
Alternative professional studies Electronics production	Instructor(s) Heikki Savolainen Timo Pahkakangas
Date 22.4 03	Total number of pages 104 + 63
<p>Abstract</p> <p>The main purpose of this final year project was to design and implement an environmental test for a hard disk which is in a computer in a harvester and to analyze the effects that mechanical stress causes in the tested model. The tested system comprises an attachment for a rack, the rack and a PC.</p> <p>In the test the whole unit was taken into account including the PC with its coverings, racks and critical components. The design of the test comprises calculations of the critical frequencies and frequency response investigations. The tests are based on the IEC standards for random and sinusoidal vibration. The test was made with random vibration. The specified test frequency range was from 20 Hz to 2000 Hz with the overall ASD-level of 0.01 g²/Hz in the X- and Y-direction. The Z-direction was tested with lower level. The duration of the test was 30 minutes.</p> <p>The project includes investigations of dampers and the used damping method of the hard disk with the tested PC cover model. The effects of the vibrations which occurred in the actual environment were analyzed. Three different elasticities of the damping material were tested with response investigations. One of these was selected to the test.</p>	
Confidentiality status No	
keywords Environmental testing, Hard Disk, PC	
Deposited at Kajaanin Plytechnic	

ALKUSANAT

Tämä työ oli kaikessa laajuudessaan suuri haaste, jonka toteuttaminen ilman asianmukaista ohjausta ja yhteistyöhenkilöitä olisi ollut lähes mahdotonta. Haluaisin kiittää erityisesti tämän insinöörityön ohjaajaa Heikki Savolaista Kajaanin ammattikorkeakoulusta sekä Timo Pahkakangasta Ponssen Kajaanin tuotantoyksiköstä. Lisäksi kiitos kuuluu kaikille niille muille henkilöille, jotka auttoivat tämän työn valmistumisessa.

Kajaanissa 12.5 2003

Jukka Pirhonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MÄÄRITELMIÄ JA LYHENTEITÄ

<u>1</u>	<u>JOHDANTO</u>	12
<u>1.1</u>	<u>Yritys ja sen toimenkuva</u>	12
<u>1.1.1</u>	<u>Yleistä</u>	12
<u>1.1.2</u>	<u>Opticontrol</u>	13
<u>1.2</u>	<u>Työn tavoite ja tehtävän rajaus</u>	13
<u>2</u>	<u>RASITUSKARSINTA</u>	14
<u>2.1</u>	<u>Rasituskarsintamenetelmien tehokkuus</u>	14
<u>2.2</u>	<u>Rasitusten vaikutus</u>	15
<u>2.2.1</u>	<u>Lämpötila</u>	15
<u>2.2.2</u>	<u>Tärinä, isku ja muut mekaaniset rasitukset</u>	16
<u>3</u>	<u>YMPÄRISTÖTESTAUS</u>	17
<u>3.1</u>	<u>Ympäristöluokitus</u>	17
<u>3.2</u>	<u>Käyttöolosuhteet</u>	17
<u>3.3</u>	<u>Mekaanisesti rasittavat käyttöolosuhteet</u>	18
<u>3.4</u>	<u>Testin rasitusasteiden määrittely</u>	20
<u>3.5</u>	<u>Mekaanisten rasitusten aiheuttamat vaikutukset</u>	22
<u>3.6</u>	<u>Ympäristöluokkien soveltaminen testivaatimukseen</u>	23
<u>3.7</u>	<u>Ympäristötestit ja niiden käyttötavat</u>	24
<u>3.7.1</u>	<u>Yleistä</u>	24
<u>3.7.2</u>	<u>Testien käyttötavat</u>	25
<u>3.8</u>	<u>Mekaanisten rasitusten jaottelu</u>	26
<u>3.9</u>	<u>Mekaaniset testit</u>	27
<u>3.9.1</u>	<u>Sinimuotoinen tärinätestaus (IEC 68-2-6 testi Fc)</u>	27
<u>3.9.2</u>	<u>Taajuusvastemittaus</u>	27
<u>3.9.3</u>	<u>Satunnaistärinätesti (IEC 68-2-34 Fd, -35 Fda, -36 Fdb, -37 Fdc, -</u> <u>64 Fh)</u>	28
<u>3.9.4</u>	<u>Kiihdytetyt tärinätestit</u>	29

3.9.5	Moodianalyysi	31
4	LAITTEIDEN JA KOMPONENTTIEN KIINNITYS (IEC 68-2-47, 1982)	32
4.1	Laitteet	32
4.2	Kiinnittimet	33
4.3	Tasapainotus	34
4.4	Kiinnittimen testaus	34
5	TÄRINÄN MITTAUS	35
5.1	Suureet: poikkeama, nopeus ja kiihtyvyys	35
5.2	Kiihtyvyyttä mittaavat anturit	36
6	TESTIN SUUNNITELUN TEORIA	37
6.1	Yhden vapausasteen mekaaninen värähtelijä	38
6.2	Sinivärähtely	40
6.3	Satunnaisvärähtely	41
7	TÄRINÄN JA ISKUJEN VAIMENNUS	45
8	TÄRINÄTESTAUKSEN SUUNNITTELU	48
8.1	Testauksen suunnittelun tavoitteet	48
8.2	Laitteen kriittisten komponenttien ominaistuuksien laskeminen	48
8.3	Laskennassa käytetyt kuormitustapaukset ja laskentakaavat	49
8.4	Lasketut ominaistuuudet	56
8.4.1	Kiintolevyn kiinnityslevyn ominaistuuksien laskeminen	60
8.4.2	Asennustelineen ominaistuuksien laskenta	63
8.4.3	Koko systeemin ominaistuuksien laskenta	66
8.5	Tärinämittausten analysointi	68
8.6	Ajoprofiilin laatiminen	77
8.6.1	Rasitustason ja testausajan laskenta	77
8.6.2	Ajoprofiilin muoto ja kiihtyvyyden tehollisarvo	80
9	KIINTOLEVYN VAIMENNUKSESTA	83
9.1	Kiintolevyn vaimentimet	83
9.2	Kiintolevyn sijainti systeemissä	85
9.3	Vaimentimien suunnittelusta	86
10	TESTAUKSEN SUORITUS	88
11	TESTAUSTULOKSET	91
11.1	Kiintolevyn taajuusvastemittaus X-suuntaisella täristyksellä	92

11.2	Kiintolevyn taajuusvastemittaus Y-suuntaisella täristyksellä	94
11.3	Kiintolevyn taajuusvastemittaus Z-suuntaisella täristyksellä	96
12	TULOSTEN ARVIOINTI	99
13	YHTEENVETO	101
	LÄHDELUETTELO	102

LIITTEET

Liite A	Mittauspisteiden ajankohdat
Liite B /1-4	Mittaustulokset-taulukko 1 ja 2
Liite C/1-2	Ajoprofiilit
Liite D	2-osainen testauskiinnitin
Liite E/1-2	Vastemittaus, testauskiinnitin
Liite F	Vastemittaus kiinnityspisteiden läheisyydestä
Liitteet G/1-6	Vastemittaus, koko systeemi
Liitteet H/1-6	Vastemittaus, kiintolevy, asennuskehikko ja PC
Liite I/1	Vastemittaus, keltainen ohut vaimennin
Liite I/2	Vastemittaus, keltainen paksu vaimennin
Liite I/3	Vastemittaus, sininen vaimennin

Liite I/4	Vastemittaus, vihreä vaimennin
Liitteet J/1-18	Mitattujen tärinöiden aikatasokuvaajat, mittaus 1
Liitteet J/19-36	Mitattujen tärinöiden aikatasokuvaajat, mittaus 2

MÄÄRITELMIÄ JA LYHENTEITÄ

ASD (Acceleration Spectral Density)

Kiihtyvyysspektrin tiheystaso.

Dynaaminen vahvistuskerroin Q (Hyvyyysluku)

Kuvaa resonanssikohdan terävyyttä tai loivuutta ts. resonanssikäyrän terävyyden mitta.

Iskupulssi (Shock pulse)

Kineettisen energian purkautuminen järjestelmään suhteellisen lyhyessä ajassa järjestelmän ominaistaajuuden käänteisarvoon nähden.

Kiihtyvyys (Acceleration)

Vektorisuure, joka määrittelee nopeuden muutosnopeuden.

Kriittinen taajuus

Taajuus, jolla vaurio tai pysyvä muutos voi tapahtua.

Kriittinen vaimennus

Minimivaimennus, joka sallii poikkeutetun systeemin palautumisen alkuperäiseen tilaansa ilman värähtelyä.

Mekaaninen isku

Mekaaniseen järjestelmään kohdistuva lyhytaikainen jaksoton heräte.

Mekaaninen värähtely

Kappaleen tai sen osan edestakainen liike tasapainoasemansa molemmin puolin.

Nopeus (Velocity)

Vektorisuure, joka määrittelee poikkeaman muutoksen ajan suhteen.

Poikkeama (Displacement)

Vektorisuure, joka määrittelee partikkelin tai kappaleen aseman muutoksen. Mitataan yleensä keski- tai lepoasemasta.

Resonanssi

Värähtelyjärjestelmän reaktanssista (impedanssin imaginääriosasta) aiheutuva tilanne, jossa vakiovoimainen sinimuotoinen heräte aiheuttaa maksimivasteen määräätaajuudella.

Tehollisarvo (RMS, Root Mean Square)

Taajuuskomponenttien hetkellisarvojen neliöiden summan neliöjuuri.

Satunnaistärinä

Värähtely, jonka hetkellinen amplitudi ei ole määritelty ajan suhteen. Sen spektri on jatkuvaa ja sen komponenttien amplitudit ja vaiheet ovat ajan satunnaisfunktioita.

Siirtyvyys (Transmissibility)

Kuvaa sitä, kuinka hyvin herätevärähtely välittyy värähtelijään.

Vahvistuskertoin

Mitatun vasteen suhde herätteeseen.

Vaimennus

Värähtelyenergian häviäminen (muuttuminen lämmöksi) värähtelevässä järjestelmässä ajan tai etäisyyden suhteen. Ilmiö, jossa aine kimmoisen muodonmuutoksen ansiosta pienentää tai hidastaa siihen kohdistuvaa kuormitusliikettä, erityisesti värähtelyliikettä.

Vaimennussuhde

Järjestelmän todellisen vaimennuksen suhde kriittiseen vaimennukseen resonanssitaajuudella.

Vapaa värähtely

Värähtely, joka on saanut alkunsa järjestelmään kohdistuneesta herätteestä ja jonka taajuus riippuu vain tarkasteltavan järjestelmän ominaisuuksista.

1 JOHDANTO

Metsäkoneiden tehokkuus on kasvanut koneiden toimintoja mittaavien ja ohjaavien mittauslaitteistojen sekä lisääntyneen elektroniikan lisäämisen myötä. Ympäristö, jossa harvesterit työskentelevät, asettavat korkeat kestävyysvaatimukset mekaniikan lisäksi koneen toimintoja ohjaavalle ohjausjärjestelmälle sekä elektroniikalle.

Yksi herkimmistä tärinän ja iskun vaikutukselle alttiista laitteista tietokoneessa on sen kiintolevy. Herkkyyden kasvaessa myös laitteen suojaukselle mekaaniselta rasitukselta asetetaan luotettavan toiminnan säilyttämiseksi uudet, yhä tiukemmat vaatimukset. Kiintolevyjen herkkyys tärinälle kasvaa, jolloin myös vaimennuksen ja kotelon rakenteen osuus korostuu. Metsäkoneen PC:n ympäristöolosuhteet, jatkuva tärinä ja iskutyypinen rasitus, voivat aiheuttaa kiintolevyn toiminnassa virheitä, jotka ovat este järjestelmän tehokkaalle toiminnalle.

1.1 Yritys ja sen toimenkuva

1.1.1 Yleistä

Ponsse-konserniin kuuluvat emoyhtiö Ponsse Oyj sekä tytäryhtiöt Ponsse AB Ruotsista, Ponsse AS Norjasta, Ponssé S.A. Ranskasta, Ponsse UK Ltd. Isosta-Britanniasta ja Ponsse USA Inc. Amerikan Yhdysvalloista. Konsernissa on henkilökuntaa noin 500 henkilöä. Vuonna 2001 konsernin liikevaihto oli 123,8 miljoonaa euroa.

Konserni suunnittelee, valmistaa ja markkinoi tavaralajimenetelmään perustuvia metsäkoneita sekä puunkorjukseen liittyvää tietotekniikkaa. Kajaanin tuotantoyksikkö on keskittynyt Ponssen koneiden tiedonsiirtojärjestelmien tuotekehitykseen ja tuotantoon. [1]

1.1.2 Opticontrol

Metsäkoneiden toimintoja ohjataan koneeseen asennetulta PC-tietokoneelta. Opti-ohjausjärjestelmä perustuu Windows-käyttöjärjestelmään. Opticontrol-ohjausjärjestelmä yhdistää nosturin, ajovoimansiirron, moottorin ja harvesteripään yhdeksi kokonaisuudeksi mittausjärjestelmää hyväksi käyttäen. Järjestelmä sisältää myös vikadiagnostiikkaa. [1]

1.2 Työn tavoite ja tehtävän rajaus

Tämän työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa rasitustestaus harvesterin PC:n kiintolevylle sekä tutkia kiintolevyn vaimennusta. Testattava näyte käsitti PC:n, räkin sekä näiden kiinnitystelineen. Näyte kiinnitettiin 2-osaiseen testauskiinnittimeen.

Testattavan kiintolevyn vaimennus ja kehikkorakenteen rasituksen kestävyys pyritään selvittämään testattavan version rasitustestauksella. Testin ensisijainen tarkoitus on selvittää kiintolevyn kestävyys testattavassa PC:n kotelarakenteessa mitatuissa rasitusolosuhteissa.

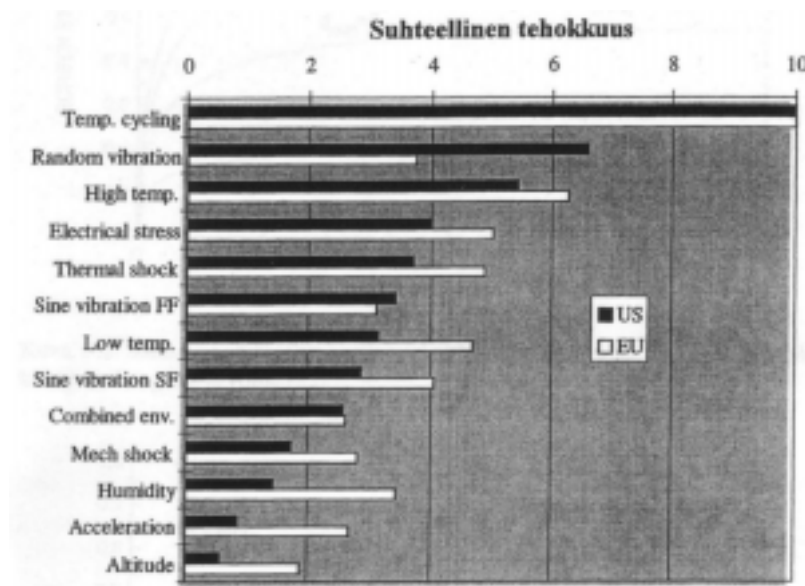
Rasitustestauksella on tarkoitus tutkia kiintolevylle aiheutuvia mekaanisia rasituksia kuten tärinää sekä iskuja. Tässä työssä keskitytään tärinän tutkimiseen. Rasitustestausmenetelmänä käytetään ympäristötestausta, jossa tutkittavalle systeemille suoritetaan mekaaninen rasitustesti satunnaistärinällä. Testiä suunniteltaessa on pyritty selvittämään laitteen rakenteen (asennuskehikot, asennustelineet), piirilevyjen ja yksittäisten komponenttien käyttäytyminen suuntaa antavalla laskennalla sekä taajuusvastemittauksilla.

Olemassa olevien vaimentimien ominaisuudet selvitetään, jonka perusteella testauksessa käytettävä vaimennin valitaan. Testaustulosten perusteella analysoidaan vaimentimille asetettavia vaatimuksia. Testi tehdään perustuen IEC 68-2-64-standardiin.

2 RASITUSKARSINTA

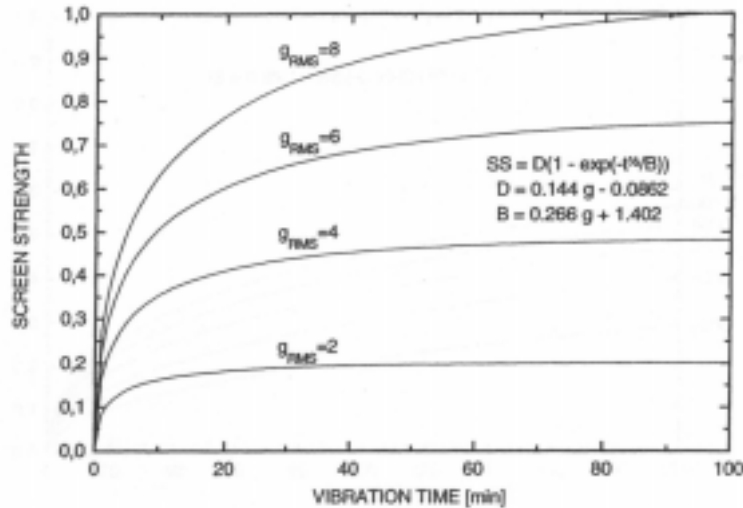
2.1 Rasituskarsintamenetelmien tehokkuus

Eri rasituskarsintamenetelmien tehokkuuksia on vertailtu perustuen amerikkalaiseen (US) ja eurooppalaiseen (EU) kokemuksiin (kuva 1).



Kuva 1. Rasituskarsintamenetelmien suhteellinen tehokkuus USA:ssa ja Euroopassa. [4]

Amerikkalaisen tutkimuksen mukaan satunnaisvärähtely on toiseksi ja eurooppalaisen tutkimuksen mukaan kuudenneksi tehokkain rasituskarsintamenetelmä. Syynä satunnaisvärähtelyn alhaiseen sijaan eurooppalaisessa tutkimuksessa voi olla sen vähäinen käyttö Euroopassa ja sen edellyttämän testaussuunnittelun puutteet. [4]



Kuva 2. Satunnaisvärähtelyn karsintatehokkuus värähtelyajan funktiona eri kokonaiskiihtyvyyden g_{rms} arvoilla. [4]

2.2 Rasitusten vaikutus

2.2.1 Lämpötila

Korkea lämpötila nopeuttaa useita komponenttien vioittumismekanismeja. Lisäksi liittimissä ja erilaisissa liitoksissa voi tapahtua materiaalien välisiä reaktioita, materiaalien vaellusta ja oksidoitumista.

Komponenttilevytasolta aina järjestelmätasolle lämpötilan ja sen vaihteluiden huomattavimmat vaikutukset rakenteille ja osille ovat erilaisista lämpölaajenemiskertoimista johtuvat mekaaniset jännitykset ja niistä johtuvat vauriot. Korkea ympäristölämpötila voi myös vaurioittaa tiettyjä materiaaleja (esimerkiksi muoveja) ja aiheuttaa komponenttilevyllä tai laitteen osissa yhdessä komponenttien oman tehonkulutuksen kanssa kuumia kohtia, joissa ylitetään suunnitellut maksimilämpötilat. Tästä voi seurata lämpötilan aiheuttamien vikojen lisäksi sellaisia parametrien muutoksia, jotka aiheuttavat virhetoimintoja.

Lämpötilan vaihteluihin liittyvät jännitykset voivat aiheuttaa mm. johdinliitosten, juotosten ja komponenttikoteloiden heikkenemistä.

Matalan lämpötilan aiheuttamat viat liittyvät usein kosteuden tiivistymiseen kylmimmille pinnoille, mikä kasvattaa vuotovirtoja ja lisää korroosioriskiä. Mikropiireillä ns. kuumiin elektroneihin liittyvät ongelmat voivat tulla esiin erityisesti matalassa lämpötilassa yhdessä korkean käyttöjännitteen kanssa.

Vaimennusmateriaaliin matalilla lämpötiloilla on jäykistävä vaikutus. Varsinkin ohuen ja huokoisen materiaalin jäykkyys ja vaimennusominaisuudet muuttuvat huomattavasti lämpötilan muuttuessa. [4]

2.2.2 Tärinä, isku ja muut mekaaniset rasitukset

Mekaaniset rasitukset kohdistuvat komponenttitasolla lähinnä isokokoiisiin ja raskaisiin komponentteihin, mikä edellyttää niiden liitoksilta riittävää mekaanista lujuutta sekä usein myös lisätuentaa. Samoin komponenttilevyt on tuettava riittävän hyvin, isokokoiset komponenttilevyt usein myös muutenkin kuin vain levyjen reunoista.

Yksiköiden kiinnitykset ja laitekehikot on myös suunniteltava siten, että ne kestävät rasitukset, joihin ne joutuvat laitetuotannossa, kuljetuksen ja asennuksen aikana sekä käyttöolosuhteissa. Komponenttilevyjen, yksiköiden ja isompien laitekokonaisuuksien tärinä ja iskujen kestävyys on tarvittaessa varmistettava testeillä. [4]

3 YMPÄRISTÖTESTAUS

3.1 Ympäristöluokitus

Ympäristöluokituksella pyritään muodostamaan tietty määrä olosuhteita, joiden sisään osa laitteiden käytöistä sisältyy. Luokat kattavat varastoinnin, kuljetuksen sekä käytön tyypilliset olosuhteet.

Ympäristöluokka on samankaltaisten tilojen ympäristöolosuhdeperheen systemaattinen esitys. Luokka muodostuu laitteen toiminnan kannalta merkittävistä ympäristötekijöistä.

Sovelluskohteita ympäristöluokille:

- ostajan ja valmistajan puolelta tapahtuva ympäristöolosuhteiden vaatimusten määrittely
- laitteen rasiusten siedon määrittely
- laitteelle sallitun esim. lämmönluovutuksen tai säteilyn rajoittaminen sellaiseksi, että määritellyn ympäristöluokan rajat eivät ylity. [16]

3.2 Käyttöolosuhteet

Sisäkäyttö (kiinteä asennus sisälle)

Laite on pysyvästi asennettu jonnekin tilaan tai kiinnitetty johonkin rakenteeseen, eikä tarkoituksena ole laitteen siirtely käytön aikana tai sen välillä. Olosuhteet sisältävät laitteen toiminnan ja valmiustilassa olemisen, asennuksen toiminnalliseksi, huollon ja korjauksen.

Ulkokäyttö (kiinteä asennus ulos)

Laite on pysyvästi asennettu ulos erilleen tai kiinnitetty johonkin rakenteeseen (seinään tai telineeseen), eikä tarkoituksena ole laitteen siirtely käytön aikana tai sen välillä. Kiinnitysrakenne ei oleellisesti suojaa laitetta.

Maa-ajoneuvokäyttö

Laite voi olla kiinteästi tai tilapäisesti asennettu ajoneuvon sisälle tai sen ulkopuolelle. Sisälle asennus tarkoittaa, että laitteella on jonkinasteinen suojaus ulko-olosuhteilta.

Laivakäyttö

Laite on joko kiinteästi tai tilapäisesti asennettu laivaan. Nimike laiva kattaa kaikki alustyyppit; moottorilaivat, purje-, moottori-, pelastusveneet sekä työlautat. Luokissa on yleensä maininta sen soveltuvuudesta moottorialuksille, jolloin moottorin aiheuttama värinä on huomioitu. Erillistä luokkaa, joka soveltuisi pelkästään moottorittomaan purje- tai soutuveneeseen ei ole.

Kannettava tai siirrettävä käyttö

Kannettavassa ja siirrettävässä käytössä laitetta siirretään toistuvasti, eikä sitä pakata tai muuten suojata siirtoa varten. Laitetta ei asenneta kiinteästi mihinkään rakenteeseen, eikä sillä ole pysyvää käyttöpaikkaa. Laite voi olla toiminnallisena myös siirron aikana. [16]

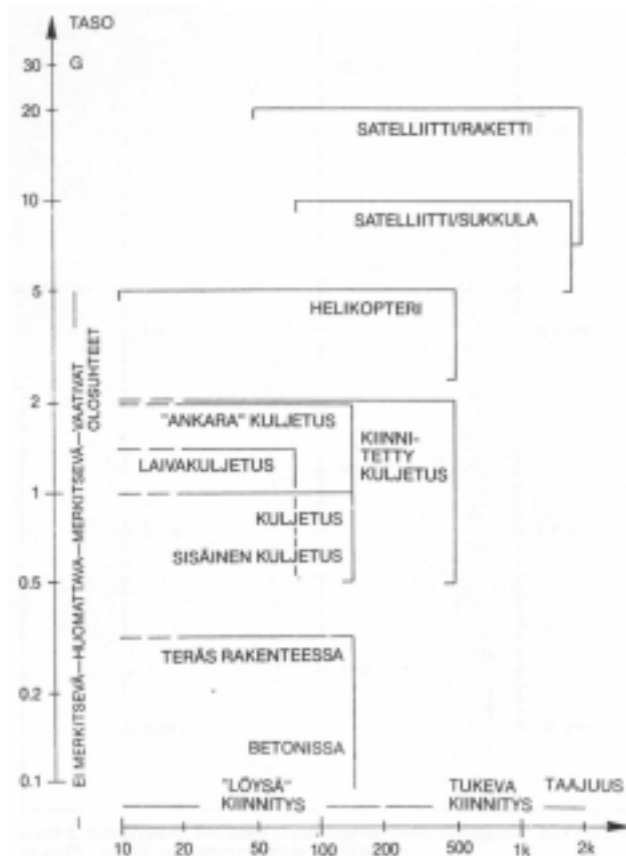
3.3 Mekaanisesti rasittavat käyttöolosuhteet

Ajoneuvoissa värinää ja mekaanista rasitusta aiheutuu mm. rakenteen välyksistä, valmistustoleransseista, pyörivien osien epätasapainoisuuksista ja edestakaisin liikkuvista osista. Pieni ja merkityksetönkin värinä saattaa resonanssien vaikutuksesta vahvistua huomattavaksi häiriötekijäksi.

Ajoneuvoissa tai kuljetuksissa esiintyvä kiihtyvyys on yleensä luokkaa 5...16 m/s^2 (huippuarvo n. 2-3-kertainen) taajuusalueella alle 150...500 Hz. Autokuljetuksissa maksimitasot esiintyvät yleensä taajuusalueella 5...30 Hz. Moottoreiden yhteydessä kiihtyvyys kohoaa luokkiin 40...300 m/s^2 .

Laitteen pudotessa vapaasti n. 0,5...0,8 m korkeudelta aiheuttaa törmäys suuruusluokaltaan 400...600 m/s^2 kiihtyvyyden, jonka vaikutusaika on 10...20 ms. Vastaavasti isketessä 20 gramman kiihtyvyyssanturia pöytään voidaan arvioida muodostuneen n. 1000 m/s^2 kiihtyvyyden, 6 ms pituisen, puolisiin muotoisen iskupulssin.

Kuvassa 3 on esitetty yleiskatsaus tärinän rasitustasoihin, jotka elektroniikan on kestettävä sovelluksesta riippumatta. Y-akselilla on rasitustason suuruus G-arvoina ja X-akselilla taajuus. [5, 11]



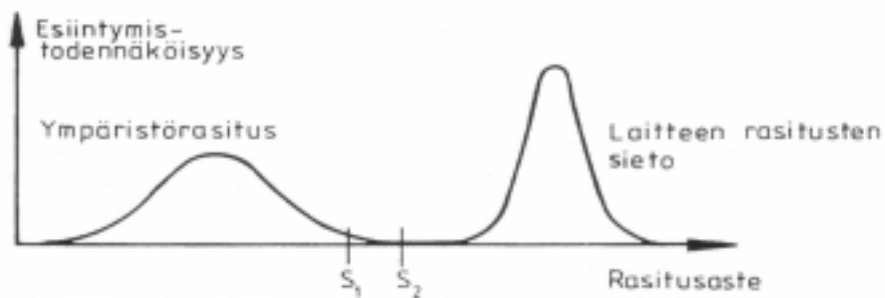
Kuva 3. Kestävyysvaatimukset elektroniikalle [11]

3.4 Testin rasitusasteiden määrittely

Tuotteen kyky selviytyä sille määritellyissä ympäristöluokassa tulee varmistaa ympäristötesteillä. Yleispäteviä ohjeita tietyn ympäristöluokan muuntamista testeihin ei ole mahdollista tehdä, koska muunnos riippuu ensisijaisesti:

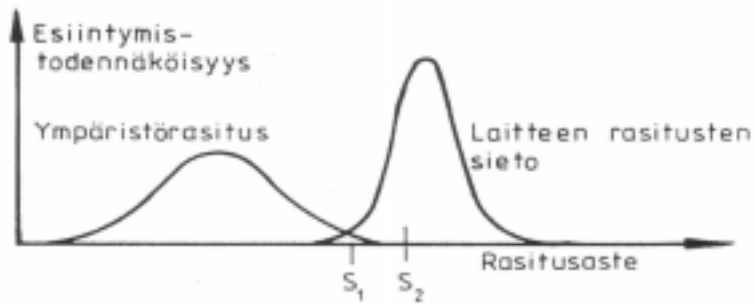
- laitetyypistä
- laitteen käyttötavasta
- oikean toiminnan merkityksestä

Yleensä testit tehdään suuremmilla rasituksilla kuin ympäristöluokassa on määritelty. Kuvassa 4 vasemmalla oleva käyrä esittää rasitusten esiintymistiheyttä ja oikealla oleva käyrä laitteen sietokykyä rasituksen suuruuteen nähden.



Kuva 4. Rasitus ja rasitusten sieto kohtuullisen sietovaran laitteelle [16]

Piste S_1 ilmaisee normaalisti ympäristöluokan 1 % (99 %) rasitusrajaa ja piste S_2 ympäristön suurimman rasitusasteen. Oikeanpuoleinen käyrä saadaan selville ainoastaan testaamalla suuri joukko laitteita eri rasitusasteilla. Mikäli testin rasitusaste määriteltäisiin ympäristön suurimman rasituksen mukaan niin tällöinkin laite pystyisi toimimaan, eikä oltaisi lähellä laitteen vikaantumista. Kuvassa 5 on esitetty vähemmän rasitusta sietävä laitetyyppi.



Kuva 5. Rasitus ja rasitusten sietokäyrä laitteelle, jonka rasitusten sieto on liian lähellä esiintyviä rasituksia [16]

Testattaessa tätä laitetyyppiä rasitusasteella S_2 , on todennäköistä, että saataisiin näkyviin todellisia vikoja ja paljastettua heikkoja kohtia. Tällöin saadaan tarkempi kuva laitteen ominaisuuksista ja voidaan tehdä tarvittavia parannuksia.

Testien rasitusastetta määriteltäessä tulisi myös huomioida mahdollisesta vikaantumisesta aiheutuvat seuraukset sekä laitteen kunnolle asetetut vaatimukset. Kunnan vaatimukset ja ympäristön rasitusten keskinäiset suhteet voidaan asettaa seuraavaan järjestykseen:

- normaalikunto; Laitteen toiminnalle ja kunnolle asetetut kaikki vaatimukset täyttyvät
- vajaa kunto; Kaikki ensisijaiseksi määritellyt ominaisuudet täyttyvät, toissijaiseksi määriteltyjen ominaisuuksien ei tarvitse täyttyä
- ajoittainen toiminta; Laitteessa esiintyy lyhytaikaisia toimintahäiriöitä, jotka poistuvat normaaleissa olosuhteissa
- toiminnan lakkaaminen; Laitteeseen tulee palautumaton vika muttei kuitenkaan vahingoita muita laitteita tai ympäristöään. [16]

3.5 Mekaanisten rasitusten aiheuttamat vaikutukset

Mekaaniset iskut rasittavat rakenteita ja liitoksia ja vauriot ovat yleensä pysyviä. Rasituksia vastaan voidaan suojautua eristämällä laite ja värinän tai iskujen lähde toisistaan tai kasvattamalla laitteen sietokykyä. Iskun amplitudia voidaan vaimentaa rakenteiden ja esim. kumityynyjen ja jousien avulla. Värinä on iskuja suurempitaajuista jatkuvaa rasitusta, joka aiheuttaa materiaalien väsymistä ja kulumista, mikä tekee havaitsemisen iskuvaurioita vaikeammaksi. Laitteen värinäherkkyys riippuu sen osien luonnollisesta värähtelytaajuudesta, joten suunnittelussa on pyrittävä sijoittamaan luonnollinen taajuus odotetun värinäkaistan ulkopuolelle. Todellisissa olosuhteissa esiintyy harvoin puhtaita värähtelymuotoja. Elektroniikkalaitteiden ympäristöissä on usein sekoittuneita värähtelytaajuuksia ja voidaankin puhua satunnaisvärähtelystä.

Rasitukset voidaan jakaa yleisiin mekaanisiin rasituksiin, väsymisrasitukseen ja resonanssien aiheuttamiin vaikutuksiin. Näistä aiheutuvia tyypillisiä vikoja ovat mm. mekaaniset viat, lujuuden heikkeneminen ja rakenteen pettäminen, toiminnalliset häiriöt sekä lisääntynyt kuluminen.

Värähtelyolosuhteissa rakenteiden merkittävin vaurioitumistapa on niiden väsyminen edestakaisessa liikkeessä. Rakenteen jonkin kohdan taipuessa syntyy jännityksiä, jotka voivat aiheuttaa mikrohalkeamia ja johtaa vähitellen rakenteen murtumiseen.

Materiaalin kestävyyttä jännitysten suhteen mitataan sillä, kuinka monta edestakaista jännityssykliä materiaali kestää. Väsymisjaksojen määrä mitataan tilanteessa, jossa värähtely on sinimuotoista ja sen amplitudi on vakio. Rakenneteräksillä väsymisjaksojen määrä on tavallisesti 10 milj. Jos materiaali kestää tämän määrän taivutuksia, se kestää niitä rajattomasti. Joillain materiaaleilla (esim. alumiinilla) ei ole selvää väsymisrajaa, vaan väsymislujuus pienenee jatkuvasti väsymisjaksojen kasvaessa.

Se kuinka pitkän aikaa materiaali kestää värähtelyjä, riippuu värähtelyjaksojen määrästä. Väsymisaika riippuu siis värähtelyn taajuudesta. Jos värähtelevä

ysteemi on lineaarinen, syntyvät jännitykset ovat suoraan verrannollisia värähtelyn amplitudiin tai kiihtyvyyteen. Jos värähtelyn taajuus on vakio, jaksojen määrä on suoraan verrannollinen aikaan.

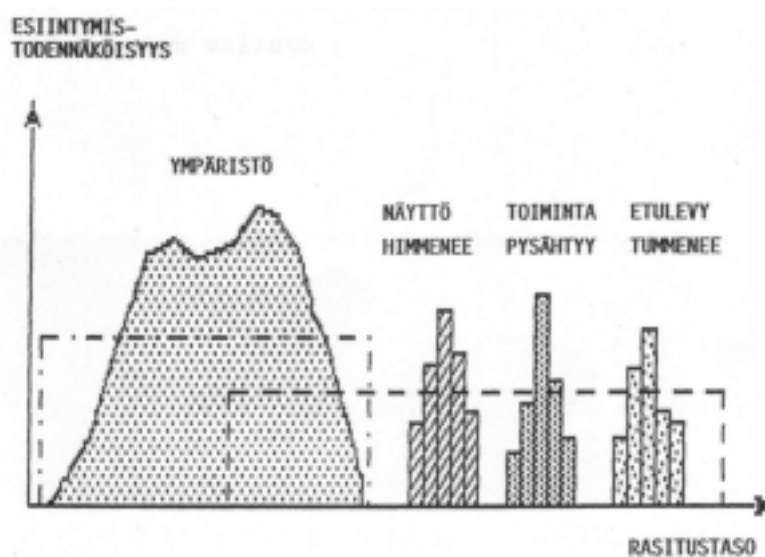
Jos rakennetta rasitetaan usealla jännitystasolla, eli värähtelyn amplitudi ei ole vakio, voidaan laskea jännitystasojen yhteisvaikutus. Materiaalin murtumiseen vaikuttaa mm. eri jännitysten tapahtumajärjestys.

Käytännössä mekaaniset rasitukset eivät esiinny yksinään, vaan samanaikaisesti esiintyvät lämpötilojen vaihtelut, kosteus, korrosio jne. kiihdyttävät rasitusten vaikutuksia. [5, 6, 11 16]

3.6 Ympäristöluokkien soveltaminen testivaatimuksiin

Ympäristöluokkia sovellettaessa testivaatimuksiin tulisi testattavista muuttujista valita kohteen kannalta vain oleelliset muuttujat. Rasitustasoa valittaessa ja tuloksia arvioitaessa on huomioitava vikojen seuraukset.

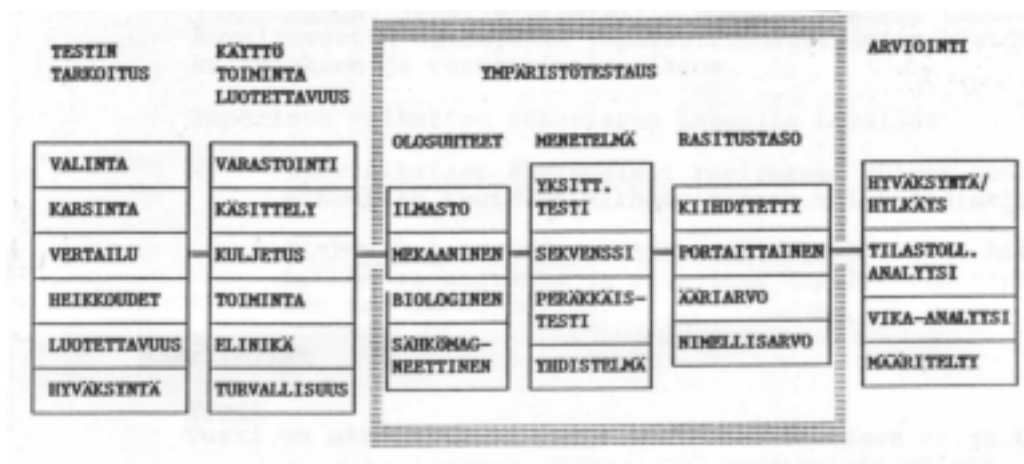
Jos halutaan löytää kaikki vikatyypit yhdestä näytteestä, voidaan soveltaa kuvan 6 katkoviivan rasitusjakamaa. Ympäristöyhteensopivuuden verifiointiin riittää pistekatkoviivalla merkitty jakauma.



Kuva 6. Esimerkki vikatyyppien esiintymistodennäköisyyksistä [5]

Luotettavuutta arvioitaessa on otettava huomioon jakautumasta riippuvat kiihdytysvaikutukset. Erityisen ankarissa rasituksissa tehtävien luotettavuustestien tavoitteet poikkeavat ympäristöyhteensopivuudesta, sillä niissä pyritään nopeasti löytämään pitkäaikaista luotettavuutta huonontavat vikamekanismit.

Testityyppiä valittaessa on kiinnitettävä huomio mm. siihen, mikä on testin tarkoitus ja laitteen käyttöolosuhteissa esiintyvät rasitustyypit (kuva 7). [5]



Kuva 7. Testin valinta [5]

3.7 Ympäristötestit ja niiden käyttötavat

3.7.1 Yleistä

Ympäristötestien tarkoituksena ei ole matkia tuotteen todellisia ympäristöolosuhteita, vaan toistaa ympäristöolosuhteiden vaikutuksia. Ympäristötesteillä voidaan testata tuotteen soveltuvuutta tiettyihin ympäristöolosuhteisiin käytön, kuljetuksen ja varastoinnin aikana.

Ympäristö vaikuttaa pääasiassa kahdella tavalla:

- lyhytaikaiset äärimmäiset rasitukset voivat suoraan aiheuttaa tuotteen virhetoiminnan tai tuhoutumisen.
- pitkäaikaiset tavanomaiset rasitukset voivat hitaasti huonontaa tuotetta ja aiheuttaa lopulta sen virhetoiminnan tai tuhoutumisen. [5]

3.7.2 Testien käyttötavat

Ympäristötestien eräs käyttötapa on tyyppitestaus, jolla todetaan tuotteen kyky sietää tiettyjä ympäristöolosuhteita. Testien kohteena on muutamia yksiköitä, joten testi ei kerro mitään tuotteen luotettavuudesta tai pitkäaikaisesta rasitusten siedosta.

Testaus ei ole ajallisesti sidottu, vaan se voidaan tehdä esim. prototyypivaiheessa, ennen sarjatuotannon aloittamista tai vaikkapa huollon jälkeen (korjaavan toiminnan apuvälineenä). Supistettu prototyypitestaus voidaan tehdä yhden kappaleen ominaisuuksien selvittämiseksi.

Luotettavuustesteissä (IEC 605: Equipment reliability testing) testataan monia yksiköitä ja käytetään pitkiä testausaikoja, mutta testiolosuhteet ovat kohtuullisen lievät. Ympäristöolosuhteet ovat usein jaksottaisesti vaihtelevia ja tarkoituksena on matkia tyypillisiä käyttöolosuhteita. Testin tarkoituksena on saada aikaan satunnaisvikoja.

Pitkäaikaisen rasituksen siedon testissä testataan muutamia yksilöitä ja käytetään pitkiä testausaikoja. Testiolosuhteet ovat ankarat testin kiihdyttämiseksi ja tarkoituksena on saada aikaan ajasta riippumattomia vikoja. Testillä pyritään aikaansaamaan systemaattisia vikoja, kuten esim. suunnittelu-, valmistus- tai kulumisvikoja.

Rasituskarsinta (stress screen) on tuotelinjan loppupäässä käytetty tarkastuksia edeltävä ympäristörasituskäsittely, jolla pyritään löytämään (ja karsimaan)

lähinnä valmistuksessa syntyneet piiloviat. Käytetyt rasitukset eivät saa ylittää tuotteen tai materiaalien sähköisiä tai mekaanisia rasituskynnyksiä aiheuttaen vaurioita tai kiihdyttäen väsymisilmiöitä. Rasituskarsinta on tehokas laadunvalvonnan työkalu, jolla nopeutetaan sellaisten vikojen syntymistä ja havaitsemista, jotka eivät paljastu muilla testaus- ja tarkastusmenetelmillä.

Vanhennus (burn-in) on tehokas tapa parantaa toimitettavan tuotteen luotettavuutta. Sen tarkoituksena on poistaa varhaisvikoja eli tuotteen vikataajuus on jo vakiotaajuusalueella käyttöönottovaiheessa. Vanhennusta käytetään sekä laitteille että komponenteille. [5]

3.8 Mekaanisten rasitusten jaottelu

Mekaanisella testauksella pyritään varmistamaan tuotteen kesto ja toiminta määritellyissä mekaanista rasitusta aiheuttavissa ympäristöolosuhteissa.

Fysikaalisen luonteensa tai esiintymistapansa perusteella mekaaniset rasitukset voidaan jakaa seuraavasti:

- jatkuva värinä (sinimuotoinen, satunnainen)
- epäjatkuva värinä (isku, jyskytys)
- jatkuva kiihtyvyys
- vapaa putoaminen
- vierähdys
- keinuminen, nyökkiminen
- staattinen kuorma [5]

Jatkuva värinä on luonteeltaan joko sinimuotoista tai satunnaista (random). Suurten laivojen, potkurikoneiden ja helikoptereiden värinä on sinimuotoista. Tämä on jaettavissa moottoreista, vaihdelaatikoista jne. johtuviin perustaaajuuksiin ja näiden harmoonisiin taajuuksiin. Suihkukoneilla, pyörivillä liikkuvilla ajoneuvoilla, pienillä nopeilla veneillä jne. värinä on laajakaistaista, luonteeltaan satunnaista kohinaa, jolla ei ole toistettavuutta. [5]

3.9 Mekaaniset testit

3.9.1 Sinimuotoinen värinätestaus (IEC 68-2-6 testi Fc)

Sinimuotoinen värinätestaus on vielä satunnaistärinätestausta yleisempi johtuen testauslaitteiston ohjausjärjestelmän ja mittaussignaalin yksinkertaisuudesta. Testaus voi sisältää tietyn taajuusalueen kattavan pyyhkäisyn, resonanssitaajuuksien tutkimisen tietyllä taajuusalueella, rasituksen testikohteen resonanssitaajuuksilla tai testauksen kiinteillä taajuuksilla.

Yleisin menetelmä on määrättyjen taajuuksien välillä tapahtuva logaritminen pyyhkäisy, jossa sekä pyyhkäisy nopeus että aika ovat tai jaksojen lukumäärä on määrätty. Suositeltavat rasitustasot on määritetty IEC 68-2-6 standardissa.

Pyyhkäisyn jälkeen voidaan testiä jatkaa testaamalla tuotetta sen kriittisillä taajuuksilla spesifikaation ilmoittaman tai standardin suositteleman ajan.

Vaihtoehtoisesti voidaan tuotetta täristää kiinteillä, ennakkoon määritellyillä taajuuksilla. Tätä voidaan käyttää, mikäli tuotteella tiedetään olevan kriittisiä taajuuksia, rakenteesta tai käytöstä johtuvia taajuuksia.

Tärinätestaus suoritetaan tuotteesta riippuen 1 –6 eri suunnassa. [5, 2]

3.9.2 Taajuusvastemittaus

Taajuusvastemittaukset voidaan suorittaa testattavalle laitteelle silloin:

- kun halutaan tutkia esim. prototyypin mekaanisen rakenteen hyvyttä
- kun halutaan tutkia esiintyykö laitteessa kriittisiä taajuuksia taajuusalueella, joilla tiedetään käyttösovelluskohteessa esiintyvän voimakasta värinää
- kun halutaan tutkia tarkasti laitteen käyttäytymistä värinän aikana esim. rakenteiden väsymistä ja laitteen toiminnallisuutta.

Normaalisti taajuusvastemittaukset suoritetaan pyyhkäisemällä yksi testijakso samoilla arvoilla kuin rasiustesteissä. Jos rasiustestinä käytetään satunnaistärinää, taajuusvastemittauksia varten määritellään erikseen sinimuotoisen pyyhkäisyn taso. Kun mittaukset tehdään ennen ja jälkeen rasiustestin, voidaan saatuja tuloksia vertaamalla todeta rakenteessa tapahtuneet muutokset.

Prototyypin laitteelle mittaukset suoritetaan lopullisia vaatimuksia pienemmillä tärinäarvoilla ja pyyhkäisynepeuksilla, jolloin estetään laitteen mahdollinen rikkoutuminen ja saadaan samalla tärkeimmät mittaustulokset.

Laitteen toiminnallisuutta voidaan myös seurata taajuusvastemittauksen aikana, jolloin saadaan selville laitteen toiminnan mahdolliseen häiriintymiseen vaikuttavat kriittiset taajuudet. [5]

3.9.3 Satunnaistärinätesti (IEC 68-2-34 Fd, -35 Fda, -36 Fdb, -37 Fdc, -64 Fh)

Satunnaistärinä simuloi puhdasta sinimuotoista tärinää paremmin todellisissa olosuhteissa esiintyviä rasiuksia. Sinitärinä testaa ainoastaan pistemäisesti esim. yksittäisiä resonansseja jättäen testattavan näytteen muut resonanssitaajuudet huomioimatta. Satunnaistärinäessä rasiutetaan sitä vastoin rakennetta ja sen resonansseja samanaikaisesti koko taajuusalueella. Näin saadaan myös tarvittava testausaika lyhyemmäksi.

Satunnaistärinän ja sen testausmenetelmän monimutkaisuuden vuoksi standardi on jaettu neljäksi erilliseksi standardiksi, joista yksi kattaa spesifikaation laatijan tarvitsemat tiedot ja loput kolme sisältävät testauksessa tarvittavat tiedot. Jako kolmeen perustuu testien toistettavuusluokkiin; toistettavuus hyvä, keskinkertainen ja huono.

Satunnaistärinätestauksen yhteydessä suoritetaan usein myös resonanssimittaukset sinimuotoisella tärinällä. Pyyhkäisevässä

satunnaistärinäessä on pyritty yhdistämään sinitärinän yksinkertaisen ohjausmenetelmän ja satunnaistärinän edut. Menetelmässä on korvattu taajuusalueen yli pyyhkäisevä pistetaajuus kapeakaistaisella satunnaistärinällä.

Sini satunnaistärinällä (sine on random)-testissä on lisätty yksi tai useampi kiinteä tai pyyhkäisevä sinitaajuus laajakaistaisen satunnaistärinän yhteyteen.

Satunnaistärinä satunnaistärinällä (random on random)-testissä on yhdistetty yksi tai useampi kapeakaistainen satunnaistärinä pyyhkäisemään laajakaistaisen spektrin yhteyteen.

Satunnaistärinätestin rasitusaste ilmoitetaan taajuusalueena, kiihtyvyysspektrin tiheystasona eli ASD-tasona (Acceleration Spectral Density, vastaava amerikkalainen PSD, Power Spectral Density) ja testin kestoajana. Käytetty ASD-taso (m^2/s^3 tai g^2/Hz) on riippumaton mittaus- tai ohjausjärjestelmän kaistanleveydestä.

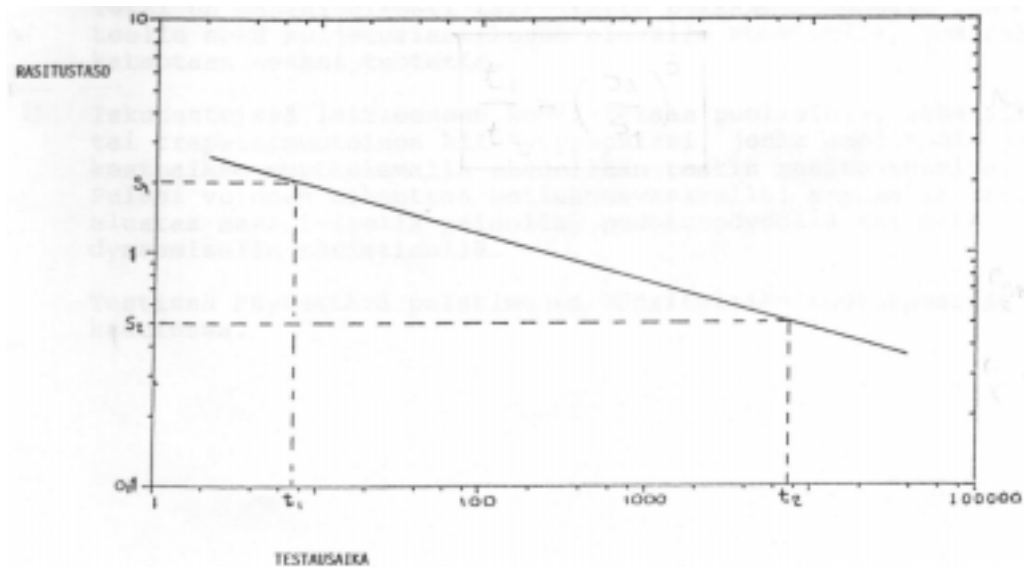
Testissä vaikuttava tehollinen kokonaiskiihtyvyys (rms) saadaan laskettua ASD-tason ja taajuusalueen tulon neliöjuurena tai luettua suoraan standardien taulukoista. Satunnaistärinäessä esiintyvien kiihtyvyyshuippujen jakautumassa saattaa olla huomattavia vaihteluita, mutta sen rms-arvo pysyy muuttumattomana. [3, 5]

3.9.4 Kiihdytetyt tärinätestit

Tärinätestien rasitusastetta määriteltäessä on ilmoitettava tärinän muoto (sini- tai satunnainen), taajuusalue, rasitusaste ja kestoajaksi muiden ao. standardeissa mainittujen tietojen ohella. Etsittäessä vastaavuutta testattavan näytteen todellisiin käyttöolosuhteisiin, joudutaan etsimään rasitusasteelle ja ajalle oikea suhde.

Kiihdytetyt testit käytetään, koska ei ole mahdollista tärinää laittaa sen koko käyttöajan vastaavaa aikaa. Haluttu rajallinen testiaika saadaan

”summaamalla” todellisuudessa esiintyvät maksimirasitukset ja huomioimalla lisäksi matalamman tärinätason aiheuttamat rasitukset.



Kuva 8. Esimerkki rasitustason ja testausajan keskinäisestä suhteesta [5]

Kuvassa 8 on esitetty eräs esimerkki rasituksen ja testausajan keskinäisestä suhteesta. Sinimuotoinen tärinätesti noudattaa potenssilakia

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^n$$

missä

t_1 = testauksen 1 testausaika

s_1 = testauksen 1 rasitustaso

t_2 = testauksen 2 testausaika

s_2 = testauksen 2 rasitustaso

n = kokonaisvaikutuksen suhde

Potenssin n ollessa suuruusluokkaa 5 lyhenee testausaika t 32-kertaisesti tärinän kiihtyvyydestason s kaksinkertaistuessa kokonaisvaikutuksen pysyessä

silti karkeasti vakiona. Ajan ja kokonaisvaikutuksen suhde ei ole vakio, vaan se vaihtelee tuotekohtaisesti.

Testiä kiihdytettäessä on huomioitava, etteivät testin aikana esiintyvät kiihtyvyydet ylitä todellisuudessa esiintyviä maksimitasoja, ja näin tuo esille epätodellisia vikaantumismuotoja. [6]

3.9.5 Moodianalyysi

Ympäristötestauksessa testattava kappale kiinnitetään täritimeen ja rasitetaan määrättyllä tasolla kestävyuden tai luotettavuuden arvioimiseksi. Toinen sovellus on tuottaa tärinää tutkittavaan kappaleeseen rakenteen vasteen määrittämiseksi tai sen tutkimiseksi, kuinka tärinä välittyy rakenteessa. Täristimellä tuotetaan halutulla taajuusalueella vakiovoimalla pyyhkäisevä sinimuotoinen signaali. Vasteet mitataan kiihtyvyyssantureilla tutkittavan rakenteen halutuista pisteistä ja tulostetaan tai tallennetaan taajuuden funktiona.

Yhden täristimen sijasta voidaan käyttää useampia täristimiä eri vaiheessa ja erilaisilla kiihtyvyytasoilla toisiinsa nähden. Koska useimmissa sovellutuksissa kiinnostuksen kohteena on rakenteen käyttäytyminen sen resonanssitaajuuksilla, riittää isojenkin rakenteiden täritykseen suhteellisen pienikokoinen täristin.

Vaihtoehtoisesti sinimuotoisen tärinän sijasta voidaan rakennetutkimuksissa käyttää iskua, jolloin herätteen antavaan vasaraan on liitetty anturi vertailuarvon saamiseksi. [6]

4 LAITTEIDEN JA KOMPONENTTIEN KIINNITYS (IEC 68-2-47, 1982)

Näyte kiinnitetään yleensä spesifikaatiossa määritetyllä tavalla. Laite-tyyppiset testattavat näytteet kiinnitetään niiden normaaleilla kiinnitysmenetelmillä ja – tavoilla, jollei ole toisin määritelty.

Mikäli testikappaleen kannalta maan vetovoiman suunnalla on merkitystä, kiinnitetään testattava näyte siten, että maan vetovoima vaikuttaa samansuuntaisena kuin mitä se on käytössäkin. Tarvittaessa määritellään myös näytteen lämpötilarajat ja sallittu magneettikentän voimakkuus. [6]

4.1 Laitteet

Testattava näyte kiinnitetään mekaanisesti joko suoraan testauslaitteen kiinnityspintaan tai tukevalla kiinnittimellä, tai spesifikaation muuten määrittelemällä tavalla. Kiinnityksen tulee vastata laitteen normaalisti käytettävää kiinnitysmenetelmää.

Testattavan näytteen liitäntöjen, kuten kaapelit, letkut, jne. tulee olla vastaavasti kuin testattavan ollessa käyttötilassaan. Tarvittaessa liitännät sidotaan kiinnittimeen.

Mikäli testattavalla laitteella käytetään tärinän vaimentimia, testataan laite normaalisti myös vaimentimillaan. Spesifikaatio voi vaatia lisätestin, jossa ulkoiset vaimentimet ovat joko poistettu tai lukittu, osoittamaan, että testattava näyte täyttää sille asetetut rakenteelliset kestävyysvaatimukset. Spesifikaatio määrittelee käytettävän rasiustason. [6]

4.2 Kiinnittimet

Kiinnittimen tehtävänä on välittää luotettavasti testauslaitteen ympäristöolosuhteet testattavaan kohteeseen ja varmistaa, että testattavan kiinnityspisteissä täyttyy spesifikaation määrittelemät ympäristöolosuhde vaatimukset.

Tärinässä täristimen teho (työntövoima) on pääparametri, joka rajoittaa testattavan näytteen kokonaismassaa ja kiinnitintä. Räsitusasteista tärkeimmät ovat taajuusalue ja poikkeama ja/tai kiihtyvyys. Testauslaitteen suoritusarvoista suuri työntövoima ja laaja taajuusalue eivät normaalisti sovi yhteen.

Tärinätestauksessa kiinnittimet ovat yleensä monimutkaisempia kuin muissa testeissä. Täristimen taajuusvaste muuttuu liitettäessä kiinnitin ja testattava kappale täristimeen, mikä tulee huomioida.

Kiinnittimen materiaalia valittaessa kannattaa kiinnittää huomiota sen jäykkyyteen ja massaan. Materiaalin vaimennusominaisuudella on merkitystä etenkin tärinätestauksessa. Esimerkiksi alumiinin sisäinen vaimennus on nelinkertainen verrattuna teräkseen. Eri metallien välisillä vaimennuseroilla on kuitenkin suhteellisen pieni merkitys kiinnittimen käyttäytymiseen, mutta tietyissä olosuhteissa se on otettava huomioon.

Kiinnitettäessä testattava näyte kiinnittimeen on huomioitava, ettei kummassakaan tapahdu muodonmuutoksia. Muutokset osoittavat, ettei kiinnitin ole jäykkä ja testattavan kappaleen kiinnityspisteissä ei ole testin vaatimaa räsitusastoa. [6]

4.3 Tasapainotus

Testattavan kappaleen ja kiinnittimen painopisteen tulisi olla mahdollisimman alhaalla, samassa linjassa tärustinpöydän painopisteen kanssa ja kohtisuorassa pöytään nähden.

Täristimeen kiinnitettävää liukupöytää käytetään etenkin silloin, kun testattava näyte on ”painopisteherkkä” tai vaatii muuten monimutkaista kiinnitinrakennetta. [6]

4.4 Kiinnittimen testaus

Ennen varsinaista testin suoritusta voi olla syytä varmistaa, että testivaatimukset voidaan saavuttaa. Testaus voidaan suorittaa kiinnitin kuormittamattomana, kuormitettuna vastaavalla dynaamisella massalla tai kuormitettuna todellisella testattavalla kappaleella. Viimeksi mainitussa tapauksessa on varmistus syytä suorittaa alhaisemmalla amplituditasolla kuin mitä lopullinen testi edellyttää. Vastaava varmistus voi olla syytä tehdä suoritettaessa myös muita dynaamisia testejä. [6]

5 TÄRINÄN MITTAUS

5.1 Suureet: poikkeama, nopeus ja kiihtyvyys

Haluttaessa eliminoida tärinää ja sen vaikutuksia joko suunnitteluvaiheessa tai jälkikäteen vaimentamalla, on tiedettävä tärinän esiintymistaajuuudet ja amplitudi. Tärinää voidaan kuvata poikkeamalla, nopeudella ja kiihtyvyydellä.

Tärinän poikkeama on liikkuvan mittauspisteen etäisyys sen luonnollisesta lepotilasta. Hitailta koneilla liikkeen suuresta pituudesta johtuen poikkeama on helposti visuaalisesti havaittavissa ja optisesti mitattavissa oleva suure. Poikkeama-arvoilla on erityisesti merkitystä koneenosien sovituksissa ja pyörivien koneiden tasapainotuksessa etenkin alhaisilla taajuuksilla. Suurilla kierrosnopeuksilla ja korkeilla taajuuksilla poikkeama on pieni ja vaikea nähdä. Tärinän tasoa kuvaa tällöin paremmin nopeus tai kiihtyvyys.

Tärinän nopeuden mittaus soveltuu hyvin pyöriville koneille, joilla saattaa olla hyvin laakea nopeusspektri 1 kHz taajuusalueelle asti. Nopeuden tehollisarvo antaa parhaan indikaation tärinän vaarallisuudesta taajuusalueella 10...1000 Hz. Tämä perustuu siihen, että tärinän nopeus on verrannollinen tärinän sisältämään energiaan ja tärinä on yhtäläillä painottunut sekä matalilla että korkeilla taajuuksilla.

Korkeilla, yli 1 kHz taajuuksilla on mitattava tärinän kiihtyvyyttä, koska taajuuden kasvaessa sekä poikkeaman että nopeuden taso alenee nopeasti kiihtyvyyteen verrattuna.

Nykyaikaisilla mittalaitteilla on mahdollista mitata kaikkia kolmea suurta. Suositeltavinta on valita se suure, joka antaa esiintyvistä tärinästä kuvaavimman ja tasaisimman spektrin. Tällöin saadaan myös mittalaitteen dynamiikka-alue käytettyä parhaiten hyväksi.

Sinimuotoisella värinällä on poikkeaman, nopeuden ja kiihtyvyyden suhde matemaattisesti tarkoin määritelty. [6]

5.2 Kiihtyvyyttä mittaavat anturit

Kiihtyvyydsanturien toiminta voi perustua esim. seismiseen massaan, joka ohjaa potentiometriä tai vastussiltaa. Tämän tyyppisten antureiden etuna on matala impedanssi ja toiminta myös matalilla taajuuksilla.

Pietsosähköinen kiihtyvyydsanturi on yksi yleisimmin kiihtyvyyksien mittaukseen käytettävistä antureista. Sen pietsosähköiseen materiaaliin (kvartsi, turmaliini tms.) vaikuttava mekaaninen rasitus (puristus, venytys tai leikkaus) aiheuttaa materiaalin pintoihin rasitusvoiman ja samalla myös kiihtyvyyteen verrannollisen sähköisen varauksen. Tämä voidaan edelleen integroida, jolloin saadaan nopeuteen ja edelleen poikkeamaan verrannolliset signaalit.

Seisminen massa aiheuttaa puristusvoiman pietsosähköiseen elementtiin puristukselle herkässä anturityypissä ja leikkausvoiman elementteihin leikkaukselle herkässä tyyppissä. [6]

6 TESTIN SUUNNITELUN TEORIA

Siirtyvyys (vahvistuskerroin) saadaan

$$S = \frac{a_v}{a_{ref}}$$

missä

S = siirtyvyys

a_v = mitattu vaste

a_{ref} = referenssi eli heräte

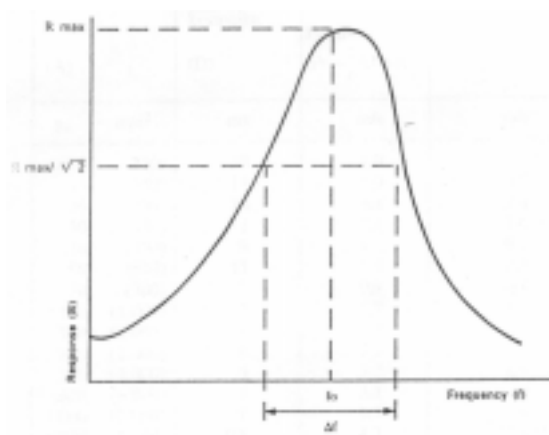
Dynaaminen vahvistuskerroin Q (kuva 9) saadaan kaavalla

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

missä

Q = dynaaminen vahvistuskerroin

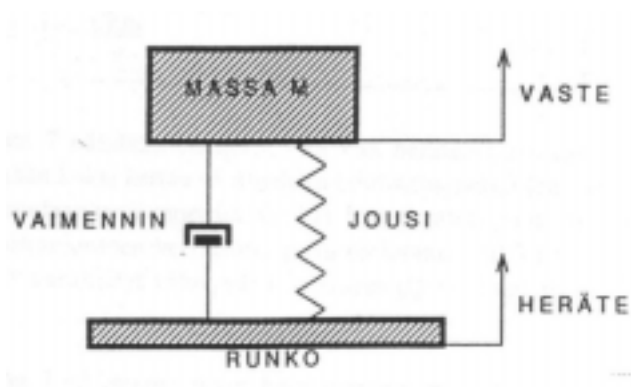
ζ = vaimennussuhde



Kuva 9. Dynaaminen vahvistuskerroin [10]

6.1 Yhden vapausasteen mekaaninen värähtelijä

Mekaaniset rakenteet, joilla on massaa ja jotka ovat kimmoisia, voivat toimia värähtelijöinä. Värähtelijä on yhden vapausasteen värähtelijä, jos sen jokaisen pisteen asema voidaan ilmoittaa yhden koordinaatin avulla. Kuvassa 10 on esitetty yksinkertainen yhden vapausasteen värähtelijä, jossa jäykkä massa on kiinnitetty alustaan jousen ja vaimentimen avulla. Jos massa poikkeutetaan lepoasennostaan kuvan 10 tilanteessa, se alkaa värähdellä vapaasti.



Kuva 10. Yhden vapausasteen värähtelijä [11]

Tietyin edellytyksin värähtely on sinin muotoista ja sen taajuus (f_0) on

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

missä

f_0 = värähtelijän ominaistaajuus, Hz

k = jousivakio, N/m

m = massa, kg.

Kaavasta voidaan johtaa ominaistaajuudelle myös seuraava esitysmuoto

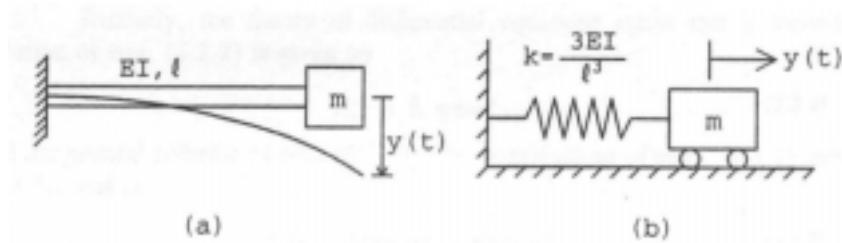
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad (2)$$

missä

g = maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyyys, $9,81 \text{ m/s}^2$

δ_{st} = staattisen tilan poikkeama eli jousen painuma, m.

Ulokepalkin dynaamista käyttäytymistä voidaan mallintaa yhdellä vapausasteella kuvan 11 mukaisesti.



Kuva 11. a) Ulokepalkki b) Vastaava yhden vapausasteen värähtelijä [12]

Kuvassa

E = värähtelevän kappaleen kimmomoduli

I = värähtelevän kappaleen pintahitausmomentti

l = värähtelevän kappaleen pituus

m = värähtelevän kappaleen massa

$y(t)$ = värähtelevän kappaleen maksimi poikkeama

k = värähtelevän kappaleen jousivakio

[11, 12]

6.2 Sinivärähtely

Sinivärähtely on harmoninen värähtely ja sisältää vain yhtä taajuutta. Sinivärähtelyn poikkeama (S) voidaan esittää kaavalla

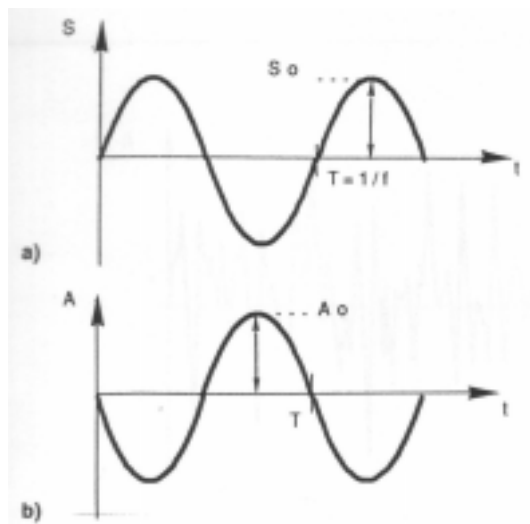
$$S = S_0 \sin \omega t, \quad (3)$$

missä

S_0 = maksimi poikkeama eli amplitudi, m

ω = värähtelyn kulmataajuus ($\omega = 2\pi f$), rad/s

t = aika, s.



Kuva 12. Sinivärähtely ajan funktiona: a) poikkeama ja b) kiihtyvyys [11]

Kuvassa 12 b on esitetty värähtelyn kiihtyvyys ajan funktiona. Kuvasta ilmenee, että poikkeama ja kiihtyvyys ovat keskenään vastakkaisessa vaiheessa. Tärkein kiihtyvyyttä kuvaava suure on kiihtyvyyden maksimiarvo (A_0), eli kiihtyvyyden amplitudi, joka on amplitudin (S_0) ja kulmataajuuden (ω) avulla esitettyinä

$$A_0 = S_0 \omega^2 \quad (4)$$

Värähtelyn voimakkuus voidaan ilmoittaa amplitudin tai kiihtyvyyssamplitudin avulla. Yleensä sinivärähtely ilmoitetaan taajuuden f ($=\omega/2\pi$) ja kiihtyvyyssamplitudin (A_0) avulla.

Kiihtyvyys (A_0) ilmoitetaan usein maan vetovoiman aiheuttaman kiihtyvyyden g ($9,81 \text{ m/s}^2$) kerrannaisena. Symbolina käytetään G_0 :aa, jonka yksikkö on $9,81 \text{ m/s}^2$. Kiihtyvyyden (G_0) avulla amplitudille (S_0) saadaan kaava

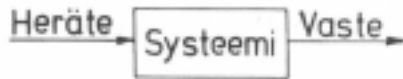
$$S_0 = \frac{G_0}{4,0 f^2} \quad (5)$$

[11]

6.3 Satunnaisvärähtely

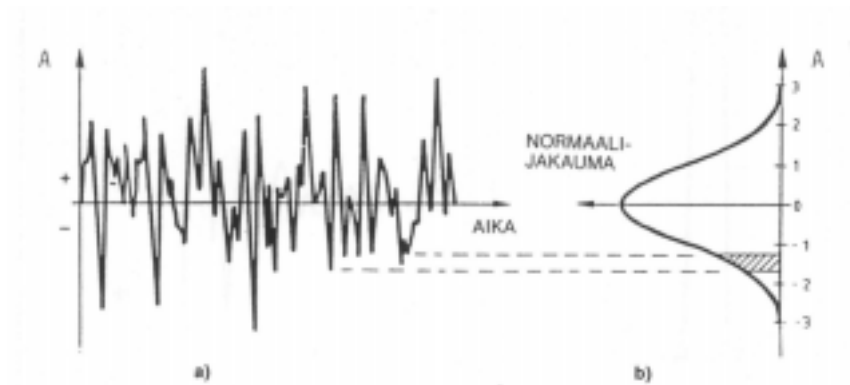
Tarkkojen kaavojen sijasta satunnaisvärähtelyä voidaan kuvata tilastollisilla suureilla. Satunnaisvärähtelyn herätteissä on näennäisestä epäsäännöllisyydestä huolimatta tiettyä tilastollista säännöllisyyttä, jota voidaan kuvata keskiarvolla, neliöllisellä keskiarvolla sekä erilaisilla taajuussisältöä kuvaavilla suureilla, jotka perustuvat Fourier-analyysiin. Tilastolliset menetelmät vaativat luotettavaan tulokseen pääsemiseksi suuren määrän mittaustuloksia. Mittaus voidaan suorittaa jaksoina, joista saadaan näytteitä ja näistä voidaan muodostaa näyteryhmä.

Satunnaisvärähtelyyn liittyvissä tarkasteluissa dynaamista systeemiä tarkastellaan "mustana laatikkona", johon menee sisään (input) jokin herätesignaali ja josta tulee ulos jokin vastesignaali (output) (kuva 13). Molempia voi olla useampiakin. Olennainen rajoitus on se, että systeemi on lineaarinen ts. herätteen ja vasteen välillä on tietty lineaarinen suhde, joka yleensä muuttuu taajuuden funktiona.



Kuva 13. Systeemi ”modifioi” herätteen vasteeksi [7]

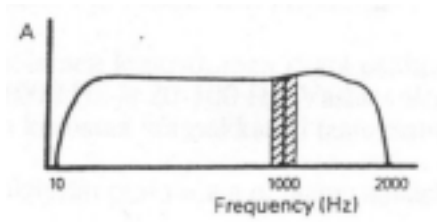
Satunnaisvärähtely sisältää tietyn taajuuskaistan sisällä kaikenlaisia sinivärähtelyjä, joiden voimakkuus vaihtelee jatkuvasti. Värähtely on satunnaista, eli sitä ei voida esittää millään yhtälöllä ajan funktiona. Kuvassa 14 a on esitetty satunnaisvärähtelyä ajan funktiona.



Kuva 14. Satunnaisvärähtely: a) ajan funktiona ja b) kiihtyvyyden funktiona [11]

Koska kiihtyvyyden arvo vaihtelee, värähtelyn voimakkuus ilmoitetaan kiihtyvyyden tehollisarvon avulla. Satunnaisvärähtelyssä kiihtyvyyden arvo on normaalijakautunut niin, että keskiarvo on nolla (kuva 14 b). Kiihtyvyyden tehollisarvo (A_{rms}) on normaalijakauman yhden keskihajonnan (δ) arvo. Normaalijakauman mukaisesti suurimmat esiintyvät kiihtyvyydsarvot ovat käytännössä 3-kertaisia tehollisarvoon nähden.

Vakiotasaisen laajakaistaisen satunnaistärinän mitattu amplitudi riippuu käytettävän analysaattorin kaistanleveydestä. Kuva 15 esittää vakiotasoisista laajakaistaista satunnaistärinää taajuusalueella 10-2000 Hz. Mitattu G_{rms} -kiihtyvyytaso on riippuvainen käytetystä analysaattorin kaistanleveydestä taulukon 1 esimerkin mukaisesti.



Kuva 15. Vakiotasoinen laajakaistainen satunnaistärinä [10]

Taulukko 1. Vakiotasoisen laajakaistaisen satunnaistärinän esimerkkisarvot [10]

Kaistan leveys, B [Hz]	G_{rms} , [g]	g^2	P (ASD), [g^2/Hz]
160	4	16	0.1
40	2	4	0.1
10	1	1	0.1

Kiihtyvyyden tehollisarvon ja spektritiheyden välillä pätee yhtälö

$$G_{rms} = \sqrt{PB} \quad (6)$$

missä

G_{rms} = kiihtyvyyden tehollisarvo, g tai $9,81 \text{ m/s}^2$

B = kaistaleveys (kuvassa 15, $f_3 - f_2$), Hz

P = kaistan B vakio spektritiheys ASD (rasitustaso), g^2/Hz .

Yhtälön mukaan kiihtyvyyden tehollisarvo on sitä suurempi mitä laajempikaistaista satunnaisvärähtely on.

Kuvan 16 mukaisen testausprofiilin positiivisen tai negatiivisen tiheystasokäyränmuutosta (3 dB/oktaavi) vastaavan G_{rms} -tason laskukaavat nousevalle (a) ja laskevalle (b) luiskalle ovat:

a)

$$\frac{ASD_2(f_2 - f_1)}{Z_1} \left[1 + \frac{f_1}{f_2} \right] \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{R}{3} + 1$$

b)

$$ASD_3 f_3 \log_{10} \frac{f_4}{f_3} \quad (8)$$

missä

ASD_2 = rasiustaso taajuudella f_2 , g^2/Hz

ASD_3 = rasiustaso taajuudella f_3 , g^2/Hz

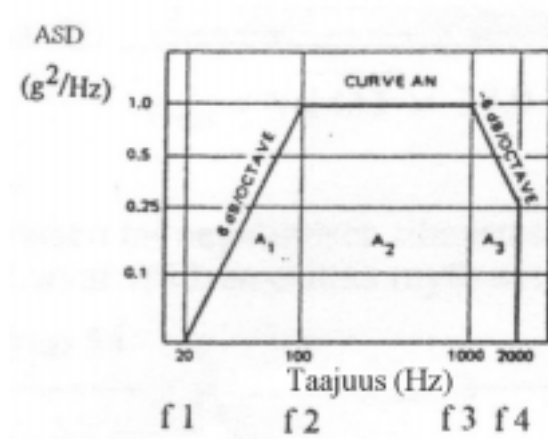
f_1 = lähtötaajuus, Hz

f_2 = testauksessa käytettävän taajuuskaistan alarajataajuus, Hz

f_3 = testauksessa käytettävän taajuuskaistan ylärajataajuus, Hz

f_4 = lopetustaajuus, Hz

R = testauksessa käytettävä nousu- ja laskunopeus, dB/oct



Kuva 16. Testausprofiili [10]

[7, 10, 11]

7 TÄRINÄN JA ISKUJEN VAIMENNUS

Sovelluksesta riippumatta tehokas värinän hallinta vaatii useimmiten useita tekniikoita. Useimmissa sovelluksissa ne voidaan hallita absorptiolla, esteiden ja seinämien koteloiden käytöllä, rakenteellisella vaimennuksella sekä värinän eristyksellä.

Värähtelyjen aiheuttamien haittojen eliminoinnissa tavoitteena on saada värähtelevän rakenteen tai systeemin ominaisuuksiin ja herätteisiin vaikuttamalla värähtelyamplitudit niin pieniksi, että haitat voidaan katsoa merkityksettömiksi. Yleensä massa, joustavuus ja vaimennus ovat jatkuvasti mutta eivät tasaisesti jakautuneita.

Koneeseen kohdistuva äkillinen isku aiheuttaa hetkellisesti korkean ja kestoltaan lyhyen jännitysvoimahuipun. Joustavaa tuentaa käytettäessä iskusta aiheutuvan jännitysvoiman maksimi on alhaisempi ja jännitysvaikutuksen kesto on pitempi. Äkillisen ja korkean jännityshuipun tilalla on tasaisempi ja hitaampi iskuenergian absorptiokuvio. Iskuvärähtelyjen kesto on verrannollinen huippukohdassa saatavaan vaimennukseen. Jännityshuippu on sitä matalampi mitä pitempi joustava matka on eli mitä joustavampi tuenta on kysymyksessä.

Ensimmäistä amplitudia pienentäessään vaimennus vähentää maksimireaktiota. Iskuvaikutusta vastaan syntyy vaimennusreaktio, jonka suuruuteen täytyy löytää sopiva kompromissi. Äärettömän suuri vaimennus on käytännössä yhtä huono ratkaisu kuin jäykkä asennus.

Vaimennuksessa on otettava huomioon oikea mitoittaminen, vaimennintyyppi ja sen jousto-ominaisuudet kaikissa suunnissa, vaimentimien oikea sijoittaminen, kuormitus sekä asennus. Epäonnistunut vaimennus voi siirtää ympäristöön huomattavasti suurempia värinävoimia kuin vaimentamaton asennus, mikä on huomioitava suunnittelussa.

Suuren sisäisen häviön omaava materiaali vastustaa värinävoimien synnyttämää värähdysliikettä ja joustoliike vaimenee nopeasti, kun voimat

lakkaavat vaikuttamasta. Solumuovit on esimerkki tällaisesta materiaalityypistä.

Ominaistaajuus pienenee värähtelevän massan kasvaessa. Samoin ominaistaajuus on sitä pienempi, mitä suurempi on vaimentimien staattinen painuma, myös siinä tapauksessa, että värähtelevä massa pysyy samana.

Vaimennussuhde ε on vaimennuksen läpi tulevien värähtelövoimien (F_p) suhde värähtelövoiman tuottamiin värähtelövoimiin (F) eli

$$\varepsilon = \frac{F_p}{F} \quad (1)$$

missä

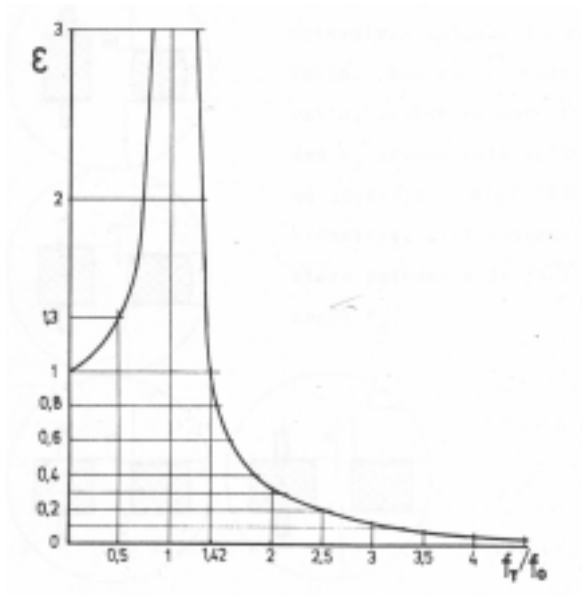
ε = vaimennussuhde

F_p = vaimennuksen läpi tuleva värähtelövoima

F = värähtelövoiman tuottama värähtelövoima

Mitä pienempi ε :n arvo sitä tehokkaampi vaimennus. Jos värähtelövoiman taajuus f_t on sama kuin massajousiyhdistelmän ominaistaajuus f_0 eli $f_t/f_0 = 1$, vaimennusta ei synny. Tällöin vaimennuksen sijaan syntyy vaarallinen resonanssivärähtely. Jotta vaimennusta syntyisi, yhdistelmän ominaistaajuutta on alennettava ja värähtelövoiman taajuutta nostettava niin, että värähtelövoiman taajuus on vähintään n. 1,5-kertainen ominaistaajuuteen nähden (kuva 17).

Mikäli $f_t/f_0 = 0,5$ on $\varepsilon = 1,3$. Vaimennus on tällöin alikriittisellä alueella, jolloin ε :n arvo ei voi koskaan olla alle yhden. Varsinaista värähtelövoimien vaimenemista ei tapahdu. Alikriittinen "vaimennus" saattaa tulla kyseeseen hyvin alhaisilla taajuuksilla koneen resonanssin estämisessä tai matalataajuisen runkoäänen vaimennuksessa. Tällöin $f_t/f_0 \leq 0,5$. Värähtelövoiman taajuus saa olla korkeintaan puolet massajousiyhdistelmän ominaistaajuudesta, jotta resonanssi vältettäisiin.



Kuva 17. Vaimennussuhteen kuvaaja [15]

Huomioitavia asioita värinän vaimennuksessa:

- mitä "löysempi" kiinnitys on, sitä suurempi staattinen painuma a ja sitä pienempi f_0 on.
- vaimennussuhteen tulee olla pienempi kuin 0,35 - 0,4 jotta värinätaajuus ei olisi liian lähellä resonanssitaajuutta
- vaimennuksessa pyrkimyksenä on saada ominaistaajuus f_0 mahdollisimman paljon värähtelytaajuutta f_t pienemmäksi
- ominaistaajuus ja herätevoiman taajuus on pidettävä eri suuruisina ei-toivottavan resonanssi-ilmiön välttämiseksi
- alikriittisellä alueella ε :n arvo ei voi koskaan olla alle yhden, koska tällöin varsinaista värinävoimien vaimentumista ei tapahdu.

[8, 9, 15]

8 TÄRINÄTESTAUKSEN SUUNNITTELU

8.1 Testauksen suunnittelun tavoitteet

Testauksen suunnittelun tavoitteena on saada aikaan testi, jonka rasitustasolla saadaan testattua kiintolevyn kestävyyttä käytännön olosuhteissa esiintyvillä häiriötaajuuksilla ja mekaanisilla rasituksilla. Testiä suunniteltaessa huomioidaan systeemin rasituksen kestävyys ja mahdolliset kriittiset taajuudet. Ennen testauksen suorittamista selvitetään kiintolevyn nykyisen vaimennuksen ominaisuuksia. Selvityksen perusteella valitaan testauksessa käytettävä vaimennintyyppi.

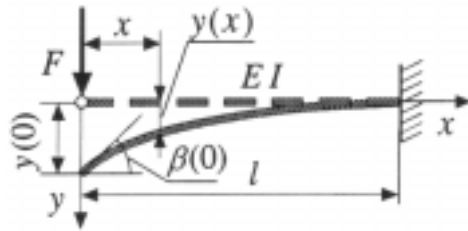
8.2 Laitteen kriittisten komponenttien ominaistajuuksien laskeminen

Laitteen eri osien ominaistajuuksien laskennalla pyritään saamaan kuvaa laitteen käyttäytymisestä resonointitapauksessa. Kun testattavaan laitteeseen kohdistetaan tärinällä heräte, voidaan laskettuja arvoja verrata ajettuihin vasteisiin. Kriittisten taajuuksien selvittäminen on tärkeää resonointien varalta. Satunnaistesti pyyhkäisee testin tietyllä taajuuskaistalla, millä välillä saattaa tapahtua vahvistuksia ja rasitukset saattavat nousta hyvin korkeiksi. Kun taajuusvastemittaukset tehdään koko laitteelle saadaan lasketuista arvoista suuntaa antavia viitteitä siitä mikä resonoi ja ennakoida myös vaarallisia vahvistuksia.

Laskennassa huomioitavat rakenteet ovat yksinkertaistettuja malleja, mikä tulee ottaa huomioon laskennan tarkkuutta arvioitaessa. Myös tuentatavat sisältävät usein monimutkaisia liitin/tuki-yhdistelmiä, joille on hankala saada tarkkaa tuentatapaa. Seuraavassa on laskettuja arvoja laitteen eri komponenteille ja osille.

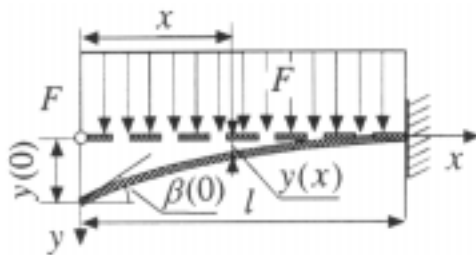
8.3 Laskennassa käytetyt kuormitustapaukset ja laskentakaavat

Kuormitustapaus 1



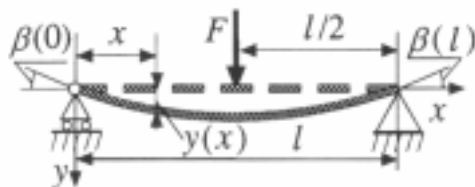
$$\delta = y_{\max} - y(0) = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (1)$$

Kuormitustapaus 2



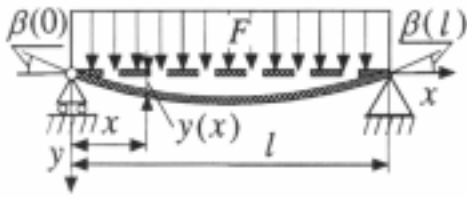
$$\delta = y_{\max} = y(0) = \frac{Fl^3}{8EI} \quad (2)$$

Kuormitustapaus 3



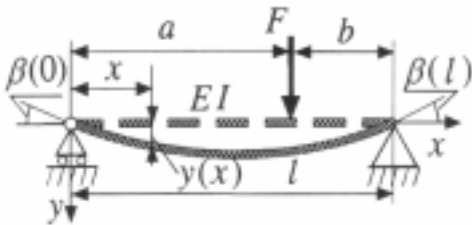
$$\delta = y_{\max} = y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (3)$$

Kuormitustapaus 4



$$\delta = y_{\max} = y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5Fl^3}{384EI} \quad (4)$$

Kuormitustapaus 5



$$\delta = y(a) = \frac{Fa^2b^2}{3EI l} \quad (5)$$

$$y_{\max} = \frac{Fbl^2}{27EI} \sqrt{3 \left(1 - \frac{b^2}{l^2}\right)^3}, \text{ kun } a > b$$

Kuormitustapaus 6



$$\delta_1 = \frac{Fcl^2}{8EI} \quad (6)$$

$$\delta_2 = \frac{Fc^2}{3EI} \left(c + \frac{3l}{2} \right)$$

Kuormitustapaus 7



$$\delta = \frac{Fl^3}{185EI} \quad (7)$$

Ominaistaajuuden laskentakaava

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

missä

f = systeemin ominaistaajuus, Hz

k = systeemin jousivakio, N/m

m = systeemin massa, kg

Voiman laskentakaava

$$F = mg \quad (9)$$

missä

F = voima, N

m = massa, kg

g = maan vetovoiman kiihtyvyys, $9,81 \text{ m/s}^2$

Jousivakion laskentakaava

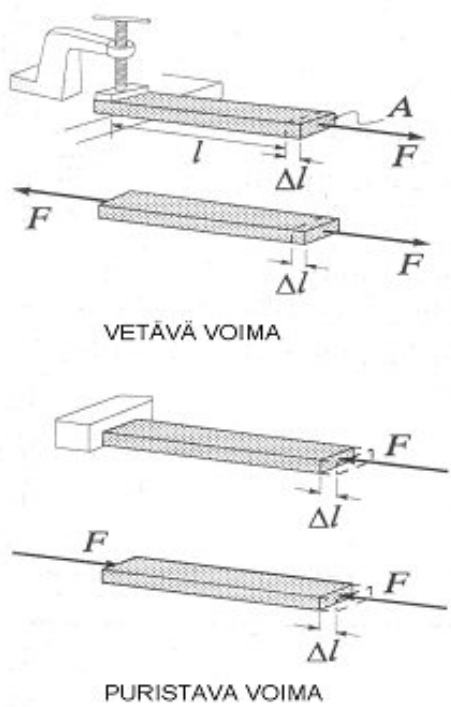
$$k = \frac{F}{\delta} \quad (10)$$

k = systeemin jousivakio, N/m

F = voima, N

δ = systeemin taipuma, m

Venymän ja puristuksen laskentakaava



$$\Delta l = \frac{F l}{A E} \quad (11)$$

missä

Δl = kappaleen pituuden muutos (käytetään usein myös δ merkintää), m

F = kappaleen poikkipinta-alalle A vaikuttava voima, N

l = kappaleen pituus, m

A = kappaleen poikkipinta-ala, jolle voima kohdistuu, m^2

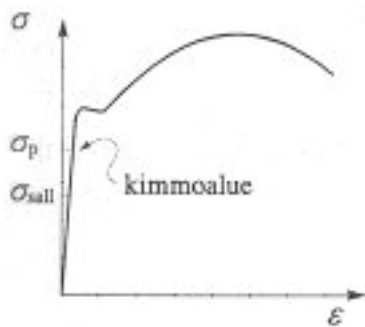
Kaava (11) saadaan normaalijännityksen

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

suhteellisen venymän

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

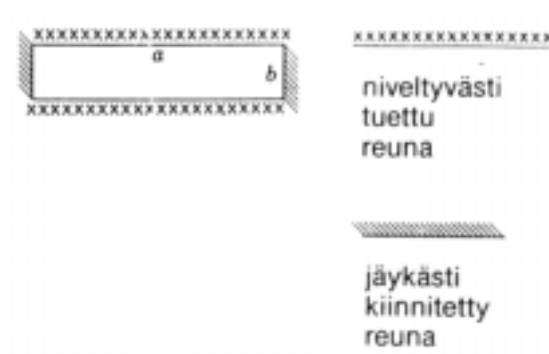
ja Hooken lain



$$\sigma = E \varepsilon$$

avulla.

Piirilevyn ominaistajuuksen käytettävä laskentakaava



$$f_n = \frac{\pi}{3,46} \left[\frac{D}{\rho} \left(\frac{16}{a^4} + \frac{8}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$D = \frac{E h^3}{12 (1 - \mu^2)}$$

missä

f_n = ominaistajuuus, Hz

D = piirilevyn jäykkyysluku, N/m²

h = levyn paksuus, m

μ = Poissonin luku

ρ = levyn massa pinta-alayksikköä kohti, kg/m²

$$\rho = \frac{m}{a b} = r h$$

missä

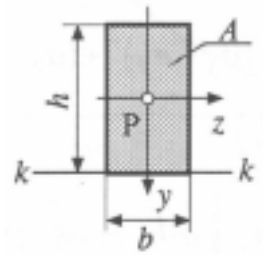
m = levyn massa, kg

a = levyn pituus, m

b = levyn leveys, m

r = tiheys, kg/ m³

Eräitä poikkipinta-alojen pintahitausmomenteja:

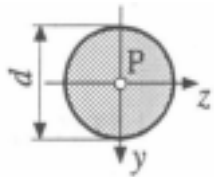


$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

missä

b = poikkipinta-alan leveys

h = poikkipinta-alan korkeus



$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2)$$

missä

d = poikkipinta-alan halkaisija

[13, 17]

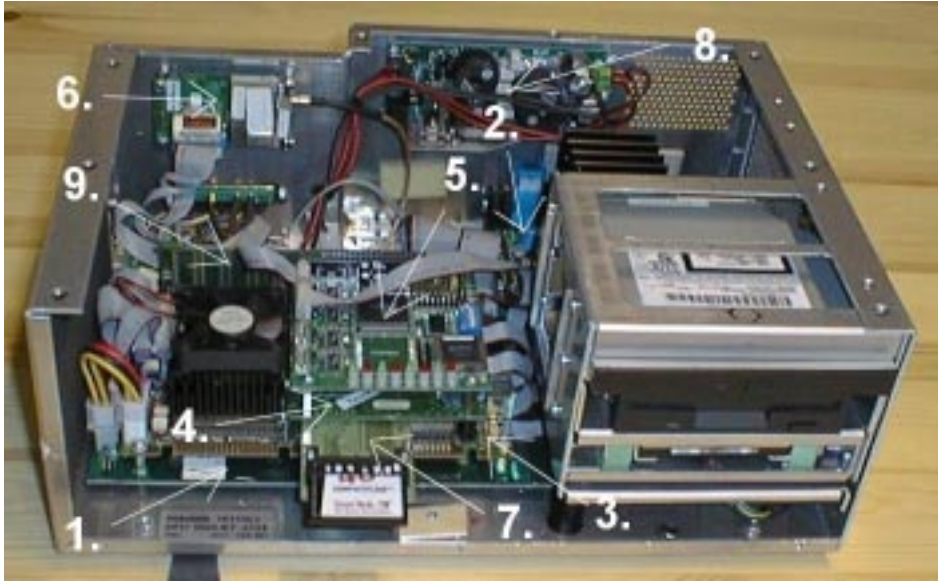
8.4 Lasketut ominaistajuudet

Piirilevyjen ominaistajuudet (taulukko 2) on laskettu $32\ 100\ \text{N/mm}^2$ kimmo-modulilla (epoksi/lasi). Monikerrospiirilevyillä ominaistajuus saattaa olla saatuja arvoja korkeampi. Piirilevyjen tukirakenteita suunniteltaessa pyritään estämään niiden resonointi keskenään laskemalla taajuudet riittävän erilaisiksi ja suunnittelemalla tuennat sopiviksi. Seuraavalla laskennalla etsitään piirilevyjen taajuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Monilla komponenteilla on vaikutus piirilevyn resonointiherkkyyteen. Näistä esimerkkinä suuri kokoiset komponentit kuten alumiinijähdyttimet, jotka alentavat ominaistajuutta. Muita taajuuteen vaikuttavia tai herkästi resonoivia komponentteja voi olla esim. ohuella metallikuorella suojatut liittimet, kelat, piirilevyä tukevat muoviset liittimet piirilevyjen alla, BGA-piirit ja erilaiset metallilevyt. Taulukkoon 3 on koottu laskennalla komponenteille saatuja arvoja. Komponenttien tuentatapa ja suunta vaikuttaa komponentin taajuuteen. Lasketuissa arvoissa on huomioitu kriittisin suunta.

PC:n kotelo sisältää 9 piirilevyä: 2 kotelon takaseinällä, 4 kerroksina päällekkäin alatasolla, 1 osittain kerroksittain asetetun toisen ja kolmannen piirilevyn välissä, 1 erillään muista asennuskehikon takana sekä muistikampa. Takaseinällä vasemmalla puolella oleva piirilevy käsittää kaksi kerrosta. PC:n piirilevyt (+räkin sisällä oleva piirilevy) on numeroitu myös taulukkoon 2. PC:n piirilevyjen sijainti näkyy kuvasta 18.

Taulukkoon 4 on koottu systeemin eri osille laskettuja ominaistajuuksia. Tärkeimpien komponenttien laskenta on esitetty tarkemmin myöhemmässä vaiheessa.



Kuva 18. PC:n piirilevyt

1. PC:n kotelon pohjalla oleva suurin piirilevy (318 mm x 188 mm x 1,5 mm)
2. Oikeassa yläkulmassa (ylhäältä, PC:n etupuolelta kuvattuna) kotelon pohjalla sijaitseva piirilevy (120 mm x 110 mm x 1,5 mm)
3. Toinen kerroksittain asetetuista piirilevyistä (180 mm x 120 mm x 1,5 mm)
4. Kolmas kerroksittain asetetuista piirilevyistä (90 mm x 96 mm x 1,5 mm)
5. Ylin kerroksittain asetetuista piirilevyistä (neljäs) (90 mm x 96 mm x 1,5 mm)
6. PC:n kotelon takaseinällä vasemmalla oleva piirilevy (alempi kerros: 71 mm x 40 mm x 1,5 mm, ylempi kerros: 35 mm x 40 mm x 1,5 mm)
7. Osittain toisen ja kolmannen piirilevyn välissä sijaitseva piirilevy (50 mm x 129 mm x 1,5 mm)
8. PC:n kotelon takaseinällä oikealla sijaitseva piirilevy (122,5 mm x 48 mm x 1,5 mm)
9. Muistikampa
10. Räkin sisällä oleva piirilevy (ei kuvassa)

Taulukossa 2 olevat arvot on laskettu periaatteella, jossa piirilevyn suurimman alan perusteella lasketaan piirilevyn värähtelytaajuus. Näin saadaan alin mahdollinen taajuusarvo. Laskennalla saatujen arvojen tarkkuutta arvioitaessa

on syytä huomauttaa, että kaikkia komponentteja ei ole otettu huomioon. Piirilevyjen pintahitausmomentit on laskettu (1) mukaan lukuun ottamatta räkin piirilevyä, joka on laskettu eri menetelmän avulla.

Taulukko 2 . PC:n piirilevyjen ominaistajuudet, laskennalla saadut arvot

Piirilevy	Ominaisuus [Hz]	Kaava nro
8	38	3
2	66	3
1	73	4
3	94	4
7	106	4
5	174	4
4	191	4
6	214	4
9	315	2
10	2125	12

Taulukko 3. Eri komponenteille laskettuja ominaistajuuksia

Komponentti	Ominaistajuus [Hz]	Piirilevyllä nro	Kaava nro
4 x TO-92 +metallilevy	59	2	2
Ledit	59	5	1
VDRI (sivuttaisuunta)	102	2	1
Kela, musta (pieni)	175	8	2
Jäähdytin	250	2	1
Metallilevy + 3 x TO-220	256	2	2
Paristo (+ piirilevy)	318 (+ 465)	6	1
Sarjaportti (uros)	400	3	1
Sarjaportti (naaras)	412	3	1
liitin (metallin värinen)	430	3	1
TO-92	1138	2	1
Kela, musta (iso)	1222	8	2

Taulukko 4. Systemin eri osien lasketut ominaistajuudet

Osa systeemissä	Ominaistajuus [Hz]	Kaava nro
CD+kiinnitysteline	99	5, 4
Koko systeemi	171	1
Levykeasema + kiinnitysteline	200	5, 4
Kiintolevy + vaimennin + teline	282	5, 4
Räkin ja PC:n kiinnitin Z-suunta (X)	362 (6)	1
Levykeaseman runko	449	4
Asennusteline +CD, FD ja HD	626	11, 7
PC:n kotelo	919	4
Räkki	1378-1451	6
Pelkkä asennusteline	1854	11, 7

8.4.1 Kiintolevyn kiinnityslevyn ominaistajuuden laskeminen

Jousivakion määrittämiseksi on ensin laskettava pintahitausmomentti. Laskennassa käytetään pintahitausmomentin kaavaa (1). Laskenta on suoritettu kiintolevyn nähden kiinnityslevyn pituussuuntaisesta leikkausosalta. Alat on jaettu kahdeksi suorakulmion muotoiseksi alaksi. Tällöin saadaan

$$I = \frac{b_1 h_1^3}{12} + 2 \times \frac{b_2 h_2^3}{12}$$

missä

b_1 = kiintolevyn kiinnityslevyn alaosan pituus, 128,5 mm.

h_1 = kiintolevyn kiinnityslevyn korkeus (= levyn paksuus), 1,5 mm

b_2 = kiintolevyn kiinnityslevyn päädyn taivutusosan pituus (= levyn paksuus), 1,5 mm.

h_2 = kiintolevyn kiinnityslevyn päädyn taivutusosan korkeus, 5,5 mm.

Pintahitausmomentiksi saadaan:

$$I = \frac{128,5\text{mm} \times (1,5\text{mm})^3}{12} + 2 \times \frac{1,5\text{mm} \times (5,5\text{mm})^3}{12} = 78 \text{ mm}^4$$

Jousivakio lasketaan venymän/taipuman kaavalla (5)

$$\delta = \frac{Fa^2b^2}{3EI l}$$

missä

δ = taipuma

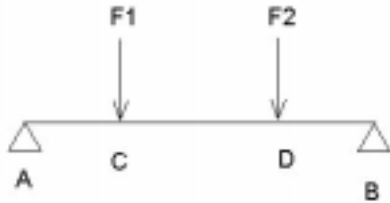
F = vaikuttava voima pisteessä c

a = pisteen c ja a välinen etäisyys, kiintolevyn etäisyys kiinnityslevyn reunasta laskettuna vaimentimen keskeltä, 24,5 mm

b = pisteen c ja b välinen etäisyys, kiintolevyn vaimentimen pitempi etäisyys kiinnityslevyn reunasta, 106,5 mm.

E = alumiinin kimmomoduli, 72 000 N/mm²

l = kiinnityslevyn pituus kiintolevyyn nähden leveysuunnassa, 131 mm



Kuva 19. Kiintolevyn kiinnityslevyn tuentapisteet ja vaikuttavat voimat

Kiintolevyn ja vaimentimien aiheuttama voima jakautuu kuvan 19 mukaisesti tasan molemmille tuille (F1 ja F2). Kun nämä ovat yhtä suuret saadaan pisteessä c vaikuttava voima laskemalla esim. F1

$$F_1 = \frac{m_1 g}{2}$$

missä

m_1 = kiintolevyn (0,098 kg) ja molempien ohuiden keltaisten vaimentimien (0,0492 kg) yhteenlaskettu massa, 0,1472 kg

g = maan vetovoiman kiihtyvyys, 9,81 m/s²

Voimaksi saadaan

$$F_1 = \frac{0,1472 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{2} = 0,72 \text{ N}$$

Kiintolevyn ja vaimentimien painon aiheuttama taipuma pisteessä c saadaan laskettua sijoittamalla saadut arvot kaavaan (5)

$$\delta = \frac{0,72N \times (24,5mm)^2 \times (106,5mm)^2}{3 \times 72000N/mm^2 \times 77,70mm^4 \times 131mm} = 0,002236 mm$$

Myös kiinnitystuen tasaisesti kuormittunut massa aiheuttaa taipuman, joka saadaan kaavalla (4)

$$\delta = \frac{5Fl^3}{384EI}$$

Taipuman kaavan muut tekijä ovat samat kuin edellä lukuun ottamatta voimaa. Voima saadaan laskemalla staattisen kuorman suuruus kohdassa c. Tämä on

$$F_l = \frac{(m_l \times g)a}{l}$$

missä

m_l = kiinnityslevyn massa

g = maan vetovoiman kiihtyvyys, $9,81 m/s^2$

a = c kohdan etäisyys lähimmästä tukipisteestä (a)

l = kiinnityslevyn pituus kiintolevyyn nähden sivuttaissuunnassa

$$F_l = \frac{(0,091kg \times 9,81m/s^2) \times 24,5mm}{131mm} = 0,17N$$

Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan levyn taipuma, joka on

$$\delta = \frac{5 \times 0,17N \times (131mm)^3}{384 \times 72000N/mm^2 \times 77,70mm^4} = 0,000889mm$$

Taajuus saadaan laskettua kaavojen (8), (9) ja (10) avulla seuraavasti:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8), \quad k = \frac{F}{\delta_{kok}} \quad (10) \quad \text{ja} \quad F = mg \quad (9)$$

supistuvat muotoon

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{\text{kok}}}}$$

missä

δ_{kok} = kiintolevyn, vaimentimien ja kiinnityslevyn aiheuttama kokonaistaipuma.

Näin saadaan taajuus, joka on

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(9,81\text{m/s}^2) \times 10^3 \text{mm/s}^2}{0,002236\text{mm} + 0,000889\text{mm}}} = 282 \text{ Hz}$$

8.4.2 Asennustelineen ominaistaajuuden laskenta

CD:n, levykeaseman ja kiintolevyn asennustelineen tuenta on laskettu tasan kolmelle tuelle:

k_1 = asennustelineen muovituki (POM)

k_2 = asennustelineen ylätuki

k_3 = asennustelineen alatuki

Muovituen jousivakio saadaan kaavoilla (10) ja (11) seuraavasti:

$$\Delta l = \frac{F l}{A E}$$

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{F}{\Delta l}$$

Sijoittamalla pituuden muutoksen kaavan jousivakion kaavaan saadaan supistettua kaava muotoon

$$k_1 = \frac{AE}{l}.$$

Kun

$$A = 177 \text{ mm}^2$$

$$E_{\text{POM}} = 3000 \text{ N/mm}^2$$

$$l = 35 \text{ mm},$$

Saadaan

$$k_1 = 15171 \text{ N/mm}.$$

Asennuskehikon ylätuen pintahitausmomentti voidaan laskea kaavalla (1)

$$I_{\text{ylätuki}} = \frac{bh^3}{12}$$

jonka arvoksi saadaan

$$I_{\text{ylätuki}} = 433 \text{ mm}^4.$$

Jousivakioksi saadaan kaavalla (7) ja (10)

$$k_2 = \frac{185EI}{l^3}$$

joka on

$$k_2 = 2399 \text{ N/mm} .$$

Alatuen I:n arvoksi saadaan samalla pintahitausmomentin kaavalla kuin ylätuen tapauksessa (1)

$$I = 27 \text{ mm}^4 .$$

Jousivakio saadaan kaavoilla (7) ja (10)

$$k_3 = \frac{185EI}{l^3}$$

joka on

$$k_3 = 150 \text{ N/mm} .$$

Taajuus voidaan laskea kaavalla (8) kolmen eri tuennan jousivakiot summaamalla

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{kok}}}{m}}$$

missä

$$k_{\text{kok}} = k_1 + k_2 + k_3, \quad 17720 \text{ N/mm}$$

m = pelkkä asennuskehikko, 0,1306 kg

Taajuudeksi asennuskehikolle saadaan (ilman siihen kiinnitettäviä laitteita)

$$f = 1854 \text{ Hz} .$$

CD, levykeasema ja kiintolevy vaimentimiseen asennettuina taajuudeksi saadaan

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{kok}}{m}}$$

m = kaikki asennettuina, 1,1458 kg

$$f = 626 \text{ Hz}$$

8.4.3 Koko systeemin ominaistajuuden laskenta

Ominaistaajuus on laskettu Z-suunnan (pystysuunnan) mukaan kaavoilla (10) ja (1). Systeemin painopiste määritettiin kokeellisesti. Värähtelijän pituus on laskettu painopisteestä. Pintahitausmomentti on laskettu räkin kiinnikkeen juuressa olevan reiän kohdalta.

Kun

$$k = \frac{F}{\delta}$$

ja

$$\delta = \frac{Fl^3}{3EI}$$

k saadaan sijoittamalla taipuman lauseke jousivakion kaavaan, jolloin myös voimat supistuvat pois. Näin saadaan lauseke

$$k = \frac{3EI}{l^3}$$

missä

$$E_{Fe} = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 194\,672 \text{ mm}^4$$

$$l = 195 \text{ mm}$$

Laskettu arvo sijoitetaan kaavaan (8) ja kun massa tiedetään voidaan laskea ominaistajuuus

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

missä

$$k = 16540 \text{ N/mm}$$

$$m = 14,3 \text{ kg}$$

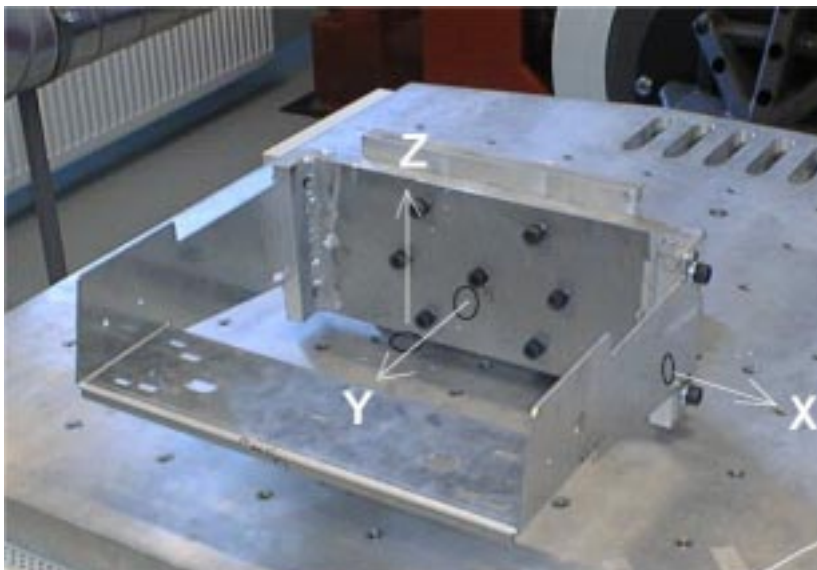
$$f = 171 \text{ Hz}$$

8.5 Tärinämittausten analysointi

Käytännön tärinämittaukset suoritettiin 16.1 2003 Puolangalla. Mittaukset on otettu käytännön hakkuu- ja raivaustöissä olleen Beaver-tyyppisen harvesterin hytistä. Tärinät mitattiin kahdella SKF:n pietsosähköisellä magneettikiinnitteisellä kiihtyvyyssanturilla ja tallennettiin Casio-merkkiselle data-nauhurille, mistä tärinät voitiin kerätä tarkempaa analysointia varten. Työvaiheet on jaettu osakokonaisuuksiin, joissa esiintyy suurimmat tärinät. Nämä ovat:

- harvesteripää tarttuu puuhun
- nosturi osuu toppariin (ääriasentoonsa)
- puu kaatuu harvesteripään pidellessä siitä kiinni
- harvesteri ajaa lumisia penkereitä ja osuu kantoihin
- puuta liikutetaan harvesteripäässä.

Mittaukset suoritettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisellä kerralla mitattiin X- ja Y-suuntainen tärinä ja toisella kerralla X- ja Z-suuntainen tärinä. Kuvassa 20 on esitetty antureiden kiinnityspaikat. Z-suuntainen tärinä mitattiin räkin pohjasta, Y-suuntainen räkin takaosasta ja X-suuntainen räkin ja PC:n kiinnittimen tyvestä läheltä alapuolella sijaitsevaa reikää.



Kuva 20. Antureiden kiinnityskohdat

Data-nauhurilta kiihtyvyydet on analysoitu ja kerätty värähtelyn mittauksissa yleisesti käytettävillä Micrologin CMVA55- ja CMVA10-tiedonkeruulaitteilla sekä Prism²-ohjelmalla.

Prism²-ohjelmalla laadittiin reitti seuraavilla asetuksilla:

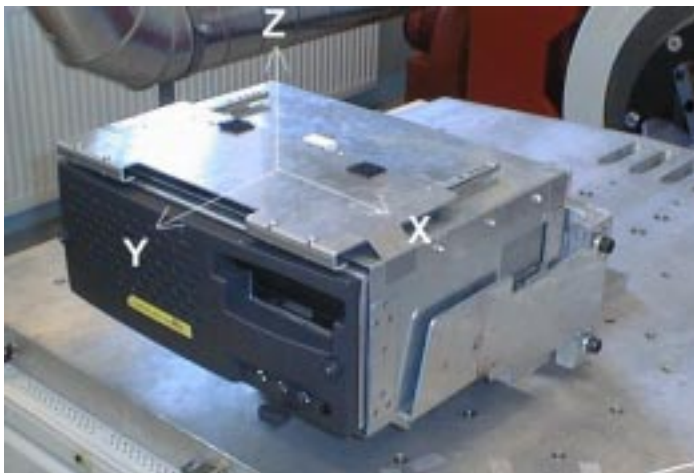
- pistelaji: kiihtyvyys
- täysskaala-alue: 5 Gs
- ilmaisu: huipusta huippuun
- anturien herkkyys: 100 mV
- alarajataajuus: 1
- ka. tyyppi: keskiarvo
- nopeus: 60 Hz
- viiva: 1600
- taajuuslaji: taajuus
- alkutaajuus: 0 Hz
- lopetus taajuus: 1600 Hz
- keskiarvoja: 1
- ikkuna: hanning
- spektrinotto: aina
- talleta: aikataso
- varaston koko: 16
- hälytystason tyyppi: tasohälytys
 - o alempi hälytysraja: 100
 - o ylempi hälytysraja: 100

Tehty reittiasetus ladattiin mittauspisteiseen Micrologille, jolla haettiin data-nauhurilta ajankohdat, jolloin mittauspisteen työvaiheen tärinöitä esiintyi käytännössä.

Liitteessä A on mittauspöytäkirjan otos, joista ilmenee ajankohdat jolloin mittaus on suoritettu. Mittaus 1 on otettu aikavälillä 0 – 31:34. Siinä data-nauhurin

kanava 1 vastaa leveyssuunnan kiihtyvyyksiä (X-suunta) ja kanava 2 pituussuunnan kiihtyvyyksiä (Y-suunta).

Mittaus 2 on otettu aikavälillä 33:13 – 52:16. Siinä kanava 1 vastaa leveyssuunnan kiihtyvyyksiä (X-suunta), kanava 2 pystysuunnan kiihtyvyyksiä (Z-suunta). Suunnat on määritelty harvesterin kulkusuuntaan nähden. Kuvassa 21 Y-suunta on harvesterin kulkusuuntaa vastaan.



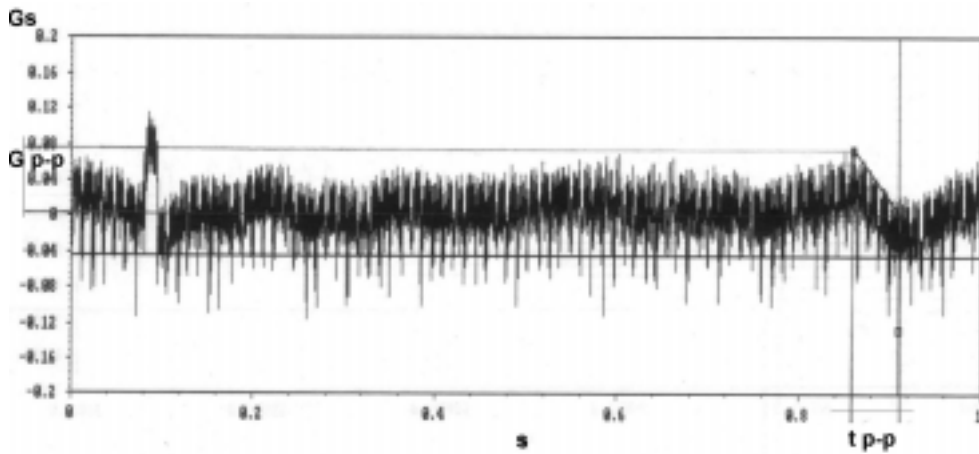
Kuva 21. Mitattujen kiihtyvyyksien mittaussuunnat

Johtuen Microlog-tiedonkeruulaitteen skaalaus ominaisuuksista, esiintyvien värähtöiden saaminen Micrologille käytetyillä reittiasetuksilla edellyttää 5 sekunnin ennakkoa mittauspöytäkirjassa olevaan aikaan nähden.

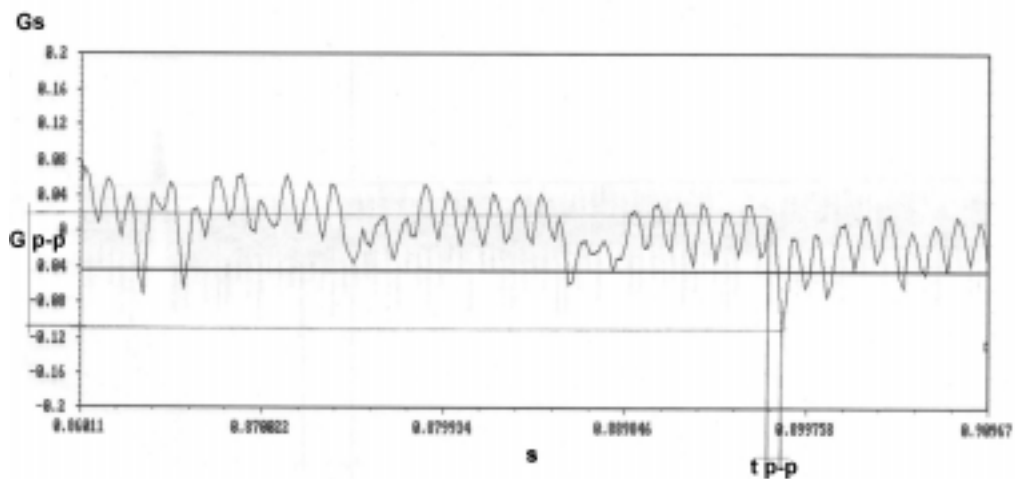
Reittiasetuksena käytettiin aikatasoa. Aikatasosignaali kuvaa mitattavan kohteen liiketilaa ajan funktiona anturin mittaussuunnassa. Värähtelymittauksissa liiketilan yksikkönä on yleensä kiihtyvyys. Aikatason pituus määräytyy FFT viivaluvusta ja maksimitaajuudesta ja se saadaan jakamalla FFT viivaluku maksimitaajuudella. [14]

Rasitustestityypin määrittelemiseksi on selvítettävä minkä tyyppinen värähtely on kyseessä. Kuvissa 22 ja 23 on esimerkkejä esiintyvistä värähtöistä. Värähtely on mitattu työvaiheessa, jossa harvesteri liikuttaa puukuormaa kourassa. Kuvassa 22 on sinimuotoista aaltoilevaa ja hetkittäin jaksollista värähtelyä sekä puolisinin

muotoinen pieni isku. Kuvassa 23 esiintyy satunnaistärinän tapaista, ei puhtaasti satunnaista, tärinää.



Kuva 22. Tärinän aikatasokuvaaja 1 sekunnin jaksossa



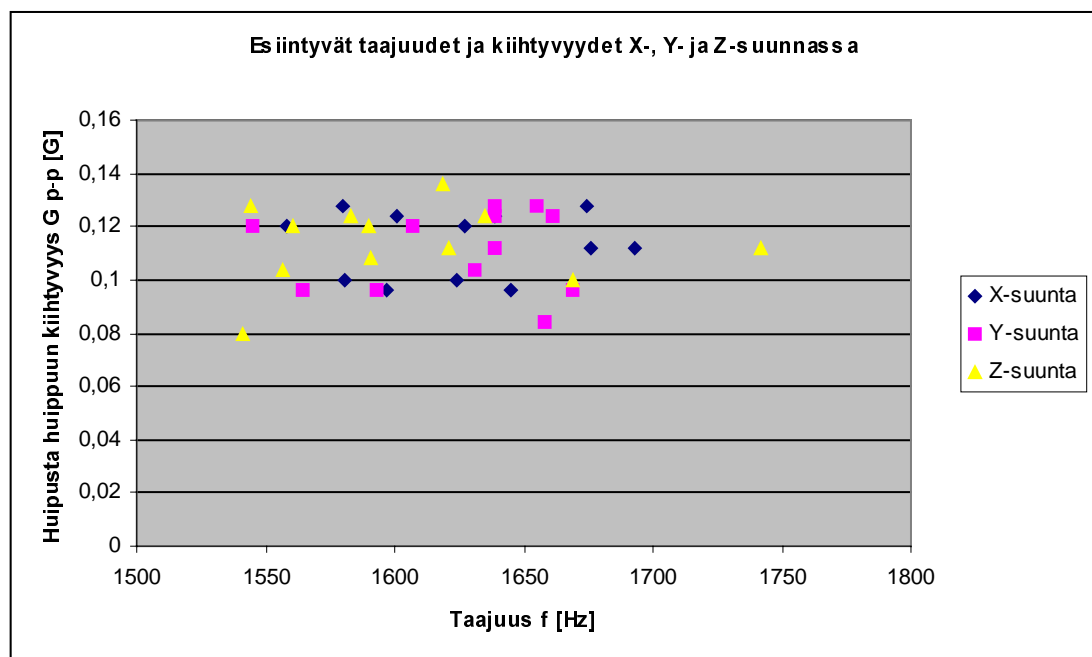
Kuva 23. Tärinän aikatasokuvaajan tarkennettu jakso

Mitattujen tärinöiden perusteella harvesterin työoloissa esiintyy kolmea eri tyyppin tärinää. Mikään näistä ei esiintynyt puhtaasti omana tyyppinään. Pieniä iskuja, sinimuotoista aaltoilevaa ja ajoittain jaksollista tärinää sekä jatkuvaa satunnaistärinää, joka ei kuitenkaan ollut puhtaasti satunnaista.

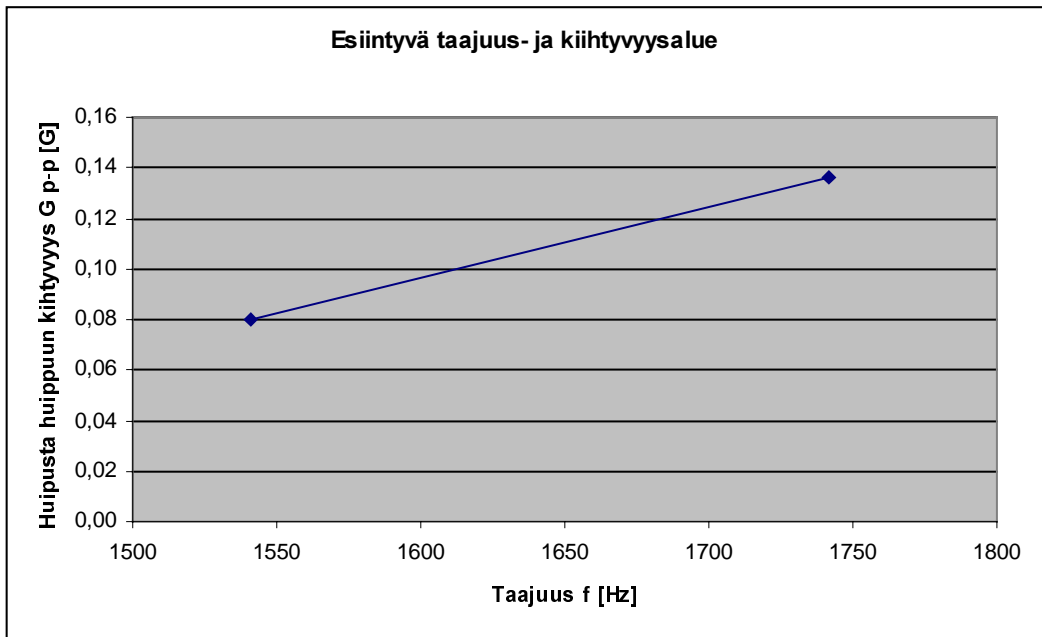
Värähtelyjaksojen suurimmat huipusta huippuun kiihtyvyydet sekä taajuudet on taulukoitu on esitetty liitteessä B. Kuvissa 24-29 on esitetty suuret ja matalat taajuudet ja niissä esiintyvät kiihtyvyydet graafisesti.

Korkeilla taajuuksilla taajuudet on laskettu siten, että aikatasokuvaajan kiihtyvyyshuipun kohdalle tarkennetun aikavälin sisältämien huipusta-huippuun –käyrien lukumäärä on jaettu tarkennetun aikavälin pituudella. G_{p-p} -kiihtyvyys valittu tarkennetun aikavälin sisältämän suurimman kiihtyvyyshuipun perusteella. Aikaväli, missä kiihtyvyyshuippu esiintyy, on yleensä hyvin pieni. Saadut taajuudet ovat tarkkoja arvoja.

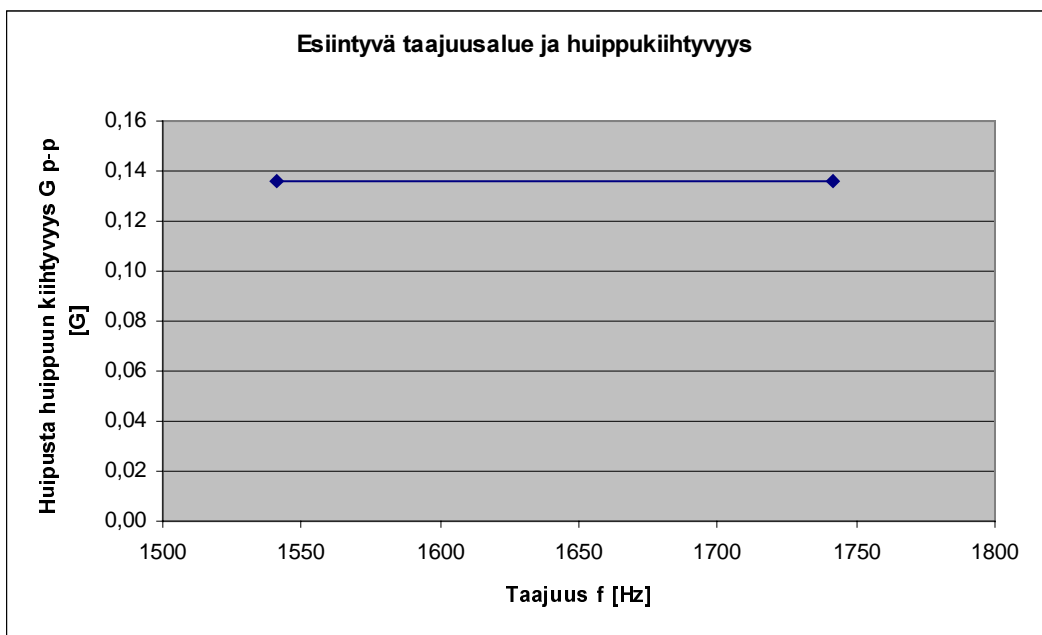
Matalilla taajuuksilla laskenta on suoritettu 1 sekunnin aikatasokuvaajien sisältämien kiihtyvyyshuippujen perusteella. Taajuuksien laskentatarkkuus ei ole korkeiden taajuuksien luokkaa.



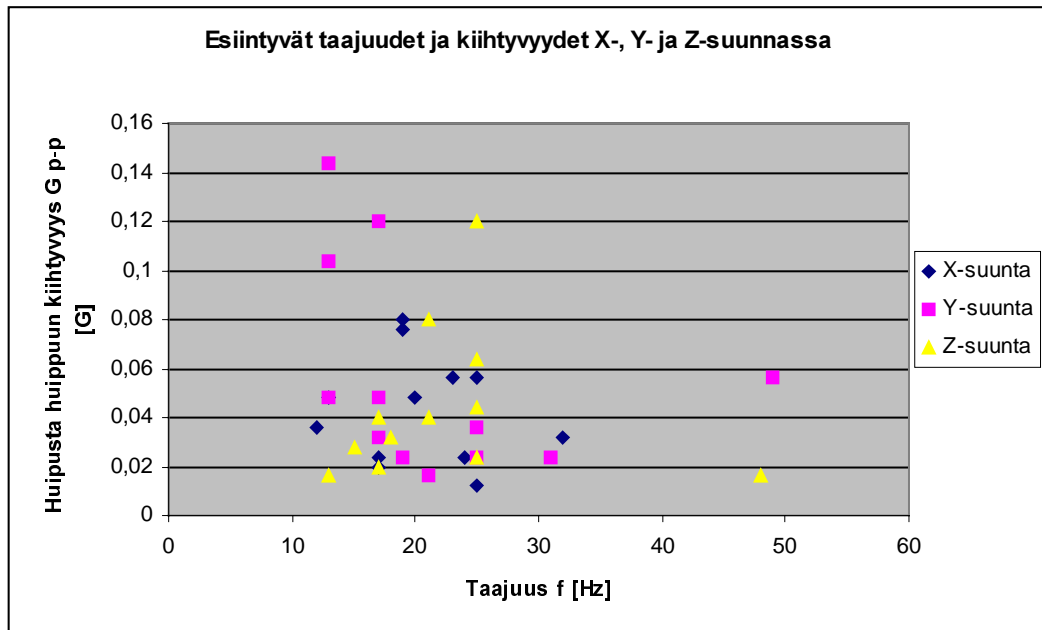
Kuva 24. Esiintyvät G_{p-p} -arvot ja korkeat taajuudet X-, Y- ja Z-suunnassa



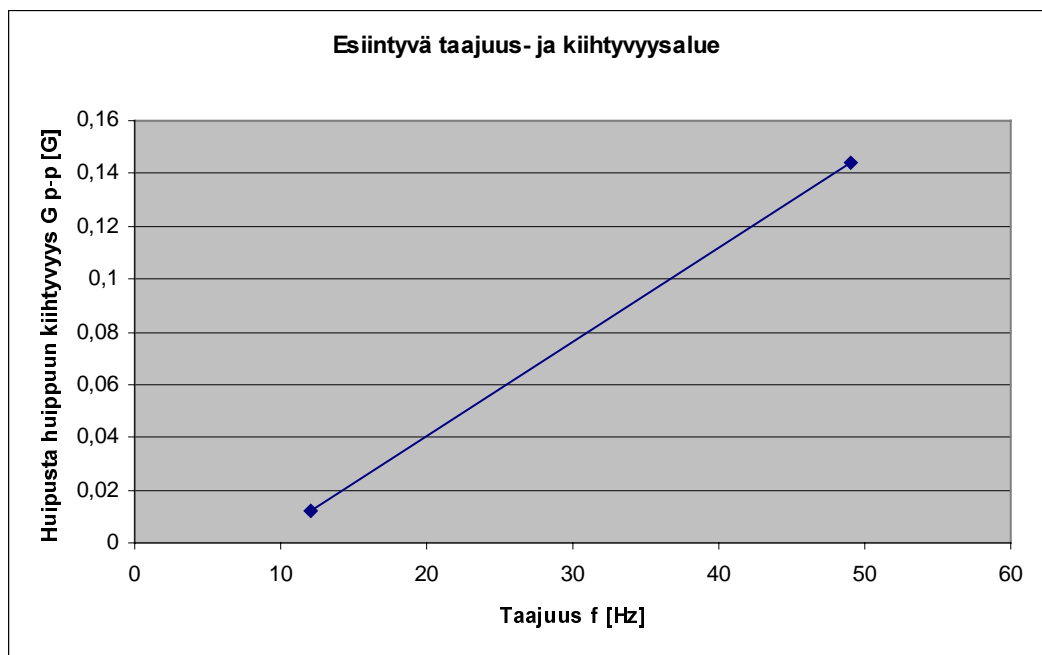
Kuva 25. Korkeilla taajuuksilla esiintyvä kiihtyvyys alue



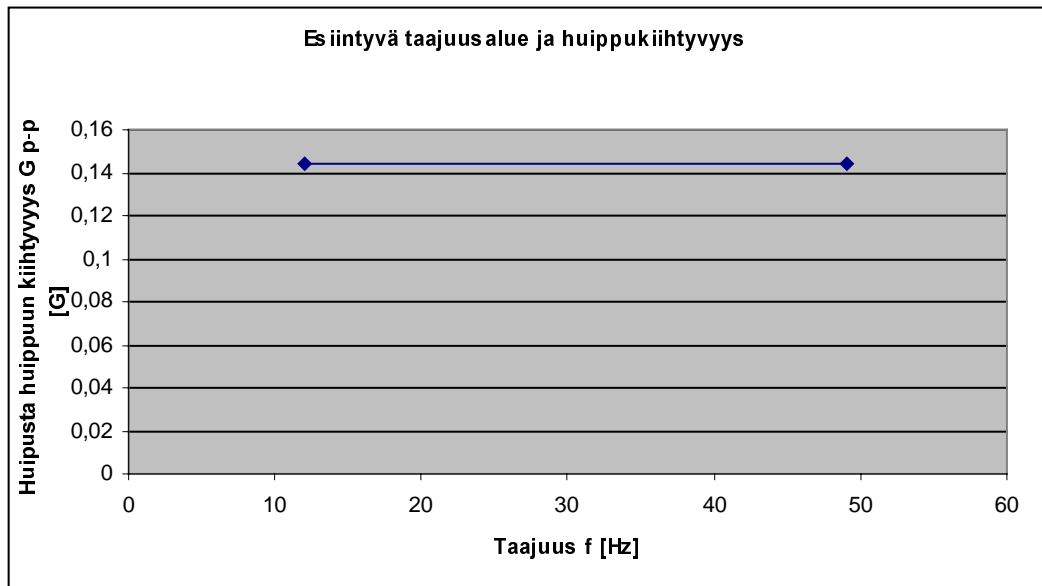
Kuva 26. Suurin kiihtyvyys ja korkea taajuusalue



Kuva 27. Esiintyvät G_{p-p} -arvot ja matalat taajuudet

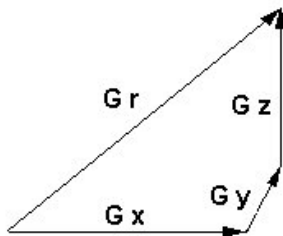


Kuva 28. Matalilla taajuuksilla esiintyvä kiihtyvyys alue



Kuva 29. Suurin kiihtyvyys ja matala taajuusalue

Tärinän kokonaisvoimakkuuden kuvaukseen on käytetty X-, Y- ja Z-suunnan resultanttia. Esiintyvien kiihtyvyyksiä voidaan mallintaa kuvan 30 mukaisella vektoriesityksellä:



Kuva 30. Esiintyvien kiihtyvyyksien resultantti.

Kiihtyvyyden resultantti saadaan muotoon

$$Gr = \sqrt{Gx^2 + Gy^2 + Gz^2}$$

missä

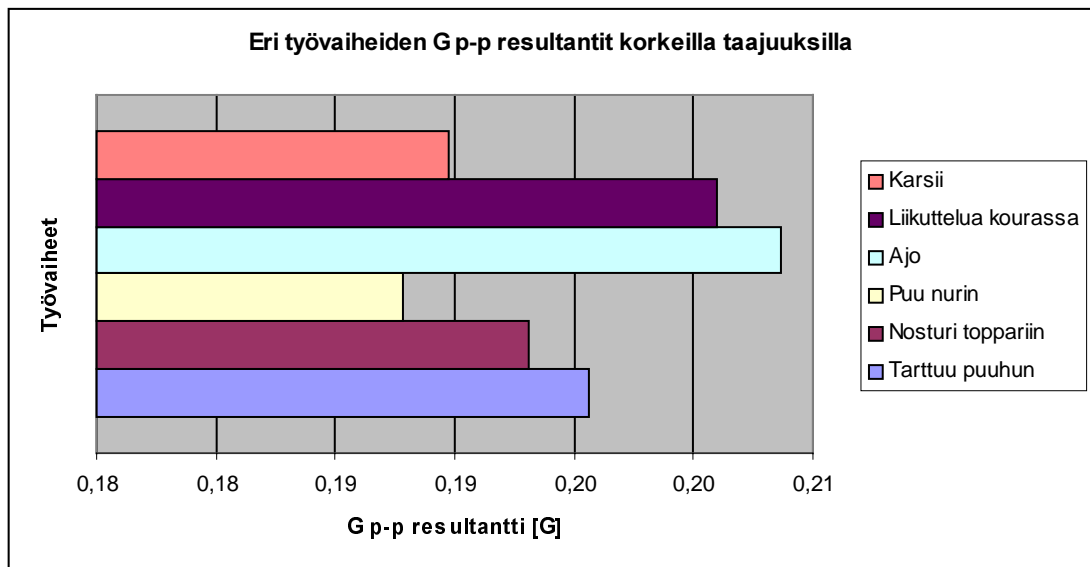
Gr = Kiihtyvyyksien resultantti

Gx = Mittauspisteen X-suunnassa esiintyvä huipusta huippuun kiihtyvyys

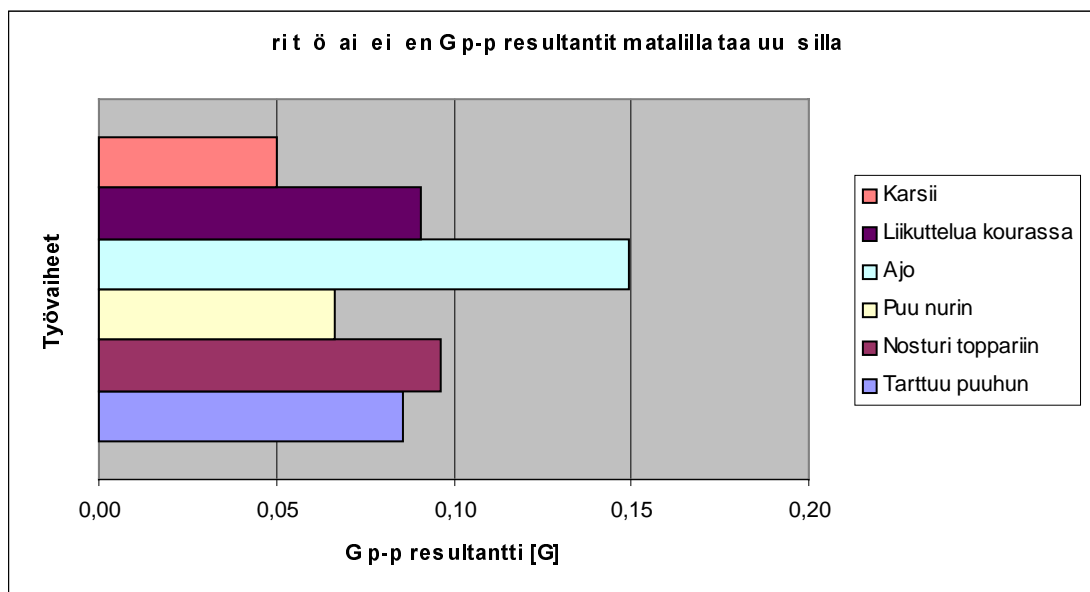
G_y = Mittauspisteen Y-suunnassa esiintyvä huipusta huippuun kiihtyvyys

G_z = Mittauspisteen Z-suunnassa esiintyvä huipusta huippuun kiihtyvyys

Kuvien 31 ja 32 työvaihekohtaiset kiihtyvyyksien resultanttiarvot on laskettu tällä menetelmällä.



Kuva 31. Eri työvaiheiden G_{p-p} -arvojen resultantit korkeilla taajuuksilla



Kuva 32. Eri työvaiheiden G_{p-p} -arvojen resultantit matalilla taajuuksilla

8.6 Ajoprofiilin laatiminen

Testin ajoprofiilit on laadittu käytännön kiihtyvyyksmittauksissa (liite B) esiintyvien matalien ja korkeiden taajuuksien sekä maksimikiihtyvyyden perusteella. Testin suurin rasitustaso on painotettu korkeille taajuuksille, jolla pyrittiin löytämään laitteen rakenteesta väsymiselle alttiit kohdat.

Korkeimman rasitustason ja taajuuden muutossuhteen avulla voidaan laskea myös alemmat rasitustasot. Näiden perusteella voidaan tietokoneen laskentaohjelmalle syöttää profiili, joka laskee sille poikkeaman, nopeuden sekä kiihtyvyyden tehollis- ja maksimiarvon.

X-suunnalle on laadittu ajoprofiili, jonka rasitustaso on alempi Z- ja Y-suunnan ajoprofiilia johtuen systeemin tuentatavan heikkoudesta kyseisessä suunnassa. PC:n ja räkin kiinnittimen pintahitausmomentti on hyvin alhainen verrattuna voimaan, joka testissä voi siihen kohdistua. Tämä saattaisi johtaa testattavan kappaleen ennen aikaiseen rikkoutumiseen ja haitata testauksen onnistumista.

8.6.1 Rasitustason ja testausajan laskenta

Suurin huipusta-huippuun kiihtyvyys suoritetuissa mittauksissa oli ”liikuttelua kourassa”- työvaiheen aikana syntynyt 0,14 g. Käytännössä kiihtyvyydet ovat kolmikertaisia tehollisarvoon nähden, jolloin tehollisarvo saadaan kaavalla

$$G_{rms} = \frac{G_{p-p}}{3}$$

joka on

$$G_{rms} = \frac{0,14g}{3} = 0,0467g .$$

Tehollisarvon lauseke saadaan muotoon

$$ASD = \frac{(G_{rms})^2}{B}$$

missä

$$B = (f_5 - f_4) + (f_3 - f_2)$$

$$B = (1800\text{Hz} - 1500\text{Hz}) + (100\text{Hz} - 40\text{Hz})$$

Vastaukseksi saadaan

$$B = 360 \text{ Hz.}$$

Kun testauksen kaistan leveys tiedetään voidaan esiintyvien kiihtyvyyksien ASD-taso laskea:

$$ASD = \frac{(G_{rms})^2}{B} = \frac{(0,0467\text{g})^2}{360\text{Hz}}$$

Vastaukseksi saadaan

$$ASD = 6,05 \times 10^{-6} \text{ g}^2/\text{Hz.}$$

Saatu arvo lähin standardiarvo on $0,005 \text{ g}^2/\text{Hz}$. Rasiustason ollessa hyvin matala valitaan yhtä tasoa ylempi arvo testaukseen, joka on $0,01 \text{ g}^2/\text{Hz}$. G_{p-p} -arvon perusteella lasketun ja standardin mukaisen ASD-tason suhde on

$$\text{suhde} = \frac{0,01\text{g}^2 / \text{Hz}}{6,05 \times 10^{-6}}$$

ja vastaukseksi saadaan

$$\text{suhde} = 1653.$$

Rasitus aika on laskettu vuoden aikajaksolle, jossa oletetaan, että metsäkone tekee työtä 12 kk vuodessa, 4 viikkoa kuukaudessa, 5 päivää viikossa ja 8 tuntia päivässä. Tuntia kohden rasitukset on laskettu siten, että sekunnin aikavälillä olevien värinöiden kestoajat on kerrottu kaksi kertaa 60:lla. Rasitus on tällöin jatkuvasti maksimissa. Testausaika on laskettu ”liikuttelua kourassa”-työvaiheen esiintyvien rasitusten kestoajojen mukaan. Laskenta on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Värinän kesto aika vuotta kohden.

Aikayksikkö	Kerroin	kesto [s]
sekunti	1	0,46
minuutti	60	27,6
tunti	60	1656
päivä	8	13248
viikko	5	66240
kuukausi	4	264960
vuosi	12	3179520

Tunteina kestoksi saadaan noin 883 tuntia. Rasitustason noston suhteen ollessa 1653 saadaan ajaksi

$$t = \frac{3179520 \text{ s}}{1653}$$

$$t = 1924 \text{ s}$$

Minuutteina arvo on

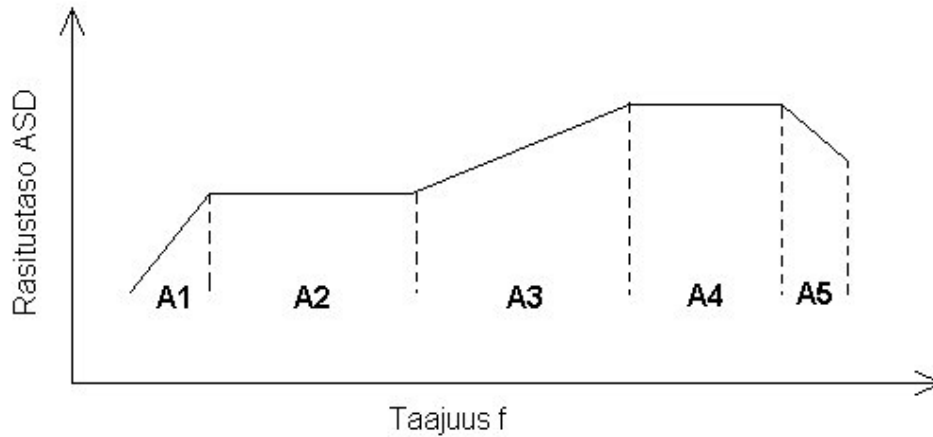
$$t = \frac{1924 \text{ s}}{60}$$

$$t = 32 \text{ min}$$

Valitaan testausajaksi standardin mukainen 30 minuuttia. Testaus suoritetaan kolmessa suunnassa (X, Y ja Z). Testausaika kutakin suuntaa on tällöin 10 minuuttia.

8.6.2 Ajoprofiilin muoto ja kiihtyvyyden tehollisarvo

Satunnaistärinän G_{rms} -arvo perustuu ajoprofiilin pinta-aloihin (kuva 33).



Kuva 33. Ajoprofiilin muoto ja alueet

Kuvan 33 ajoprofiilin taajuudet ja rasiustasot ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Testin ajoprofiilin taajuudet ja rasiustasot (ASD $0,01 \text{ g}^2/\text{Hz}$)

Taajuus f, [Hz]	ASD-taso, [g^2/Hz]	Nousu- ja laskunopeus, [dB/oct]
f1 20	ASD1 0,0003369	3
f2 40	ASD2 0,0006722	
f3 100	ASD3 0,0006722	3
f4 1500	ASD4 0,0100000	
f5 1800	ASD5 0,0100000	-3
f6 2000	ASD6 0,0090032	

Taulukon 6 arvoilla ja nousunopeuden ollessa 3 dB/oct saadaan ajoprofiilin kaavoilla

$$A_1 = \frac{ASD_{2,3}(f_2 - f_1)}{Z_1} \left[1 + \frac{f_1}{f_2} \right]$$

$$Z_1 = \frac{R}{3} + 1$$

$$A_2 = ASD_{2,3}(f_3 - f_2)$$

$$A_3 = \frac{ASD_{4,5}(f_4 - f_3)}{Z_1} \left[1 + \frac{f_3}{f_4} \right]$$

$$A_4 = ASD_{4,5}(f_5 - f_4)$$

$$A_5 = ASD_{4,5} f_5 \log_{10} \frac{f_6}{f_5}$$

Sijoittamalla kaavoihin Z- ja Y-suuntaisen ajoprofilin arvot (taulukko 6) saadaan

$$A_1 = \frac{0,0006722 g^2 / Hz(40Hz - 20Hz_1)}{\frac{3}{3} + 1} \left[1 + \frac{20Hz}{40Hz} \right]$$

$$A_1 = 0,01g^2$$

$$A_2 = ASD_{2,3}(f_3 - f_2)$$

$$A_2 = 0,0006722 g^2 / Hz(100Hz - 40Hz)$$

$$A_2 = 0,04g^2$$

$$A_3 = \frac{ASD_{4,5}(f_4 - f_3)}{Z_1} \left[1 + \frac{f_3}{f_4} \right]$$

$$A_3 = \frac{0,01g^2 / Hz(1500Hz - 100Hz)}{\frac{3}{3} + 1} \left[1 + \frac{100Hz}{1500Hz} \right]$$

$$A_3 = 7g^2$$

$$A_4 = ASD_{4,5}(f_5 - f_4)$$

$$A_4 = 0,01g^2 / Hz(1800Hz - 1500Hz)$$

$$A_4 = 3g^2$$

$$A_5 = ASD_{4,5}f_5 \log_{10} \frac{f_6}{f_5}$$

$$A_5 = 0,01g^2 / Hz \times 1800Hz \times \log_{10} \frac{2000Hz}{1800Hz}$$

$$A_5 = 0,82g^2$$

$$A_{kok} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

$$A_{kok} = 0,01g^2 + 0,04g^2 + 7g^2 + 3g^2 + 0,82g^2$$

$$A_{kok} = 11g^2$$

$$G_{rms} = \sqrt{A_{kok}}$$

$$G_{rms} = \sqrt{11g^2}$$

$$G_{rms} = 3,3g$$

Saatu arvo on suuntaa-antava. Tehollisarvon tarkka-arvo Y- ja Z-suuntaiselle täritykselle on 3,5 g. Arvo nähdään ajoprofiilin oikeasta yläkulmasta (liite C).

Vastaavalla tavalla laskettuna saadaan myös X-suuntaiselle täritykselle tehollisarvo, jonka tarkka-arvo on

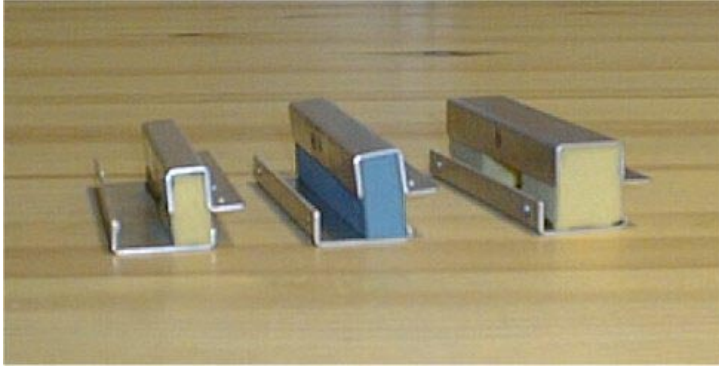
$$G_{rms} = 0,35 g.$$

9 KIINTOLEVYN VAIMENNUKSESTA

Vaimentimien vaimenninmateriaali on solumaista polyuretaania (PUR). Sitä on saatavana 12 mm ja 25 mm mattoina. Materiaalia käytetään yleisesti mm. koneiden ja laitteiden tärinän eristykseen ympäristöstään. Kiintolevyn pieni massa vaikeuttaa vaimenninmateriaalin käyttöä sille tarkoitetulla alueella. Testatun kiintolevyn aiheuttama kuormitus alittaa huomattavasti G-tyyppin (keltainen) vaimennin materiaalin spesifikaatioiden ilmoittaman $0,015 \text{ N/mm}^2$ kuormitustason. Tällöin joustoa ei juurikaan ilmene ja iskutyypiset tärinät välittyvät suoraan kiintolevylle. Tämä ei tehtyjen kiihtyvyyssmittauksien perusteella vielä aiheuta kiintolevyn rikkoontumista, sillä käytännössä esiintyvä suurin $0,14 \text{ G}$:n kiihtyvyyshuippu alittavaa reilusti kiintolevylle asetetun toiminnallisen 1 G :n tärinänsietorajan.

9.1 Kiintolevyn vaimentimet

Vaimentimista valittiin kolme alimman kuormitettavuuden omaavaa materiaalia, joille tehtiin taajuusvastemittaukset (liite I). Mittaukset on suoritettu kiintolevyn sivu-, pituus- ja pystysuunnassa. Vaimentimet on esitetty kuvassa 34. Vihreä vaimennin kooltaan ja rakenteeltaan samanlainen kuin sininen (kuvassa 34 keskellä) vaimennin. Keltaista vaimennintyyppiä oli kahta eri paksuutta. Näistä oli leikattu pala pois keskeltä vaimennuksen lisäämiseksi. Kiintolevyn kiinnitys vaimentimiin tapahtui kuvan 35 mukaisella tavalla.



Kuva 34. Vaimentimet ja niiden rakenne

Kullakin kuormitettavuudella on oma värinsä. Kuormitettavuusarvot kuvaavat materiaalien dynaamista kuormitettavuutta.

- Sylomer G (Keltainen), 0,015 N/mm²
- Sylomer R (Sininen), 0,035 N/mm²
- Sylomer L (Vihreä), 0,08 N/mm²



Kuva 35. Kiintolevyn kiinnitys vaimentimiin

Vastemittauksien kuvaajista havaitaan, että keltainen vaimenninmateriaali antaa matalilla taajuuksilla alhaisemmat vasteet verrattuna vihreään tai siniseen vaimentimeen. Materiaalien erot tulevat selkeimmin ilmi noin 50 Hz:n vastekäyrän kohdalla. Sinisellä ja vihreällä vaimentimella resonanssiipikki on huomattavasti korkeampi ja terävämpi kriittisimmässä X-suunnassa.

Taajuusalueella 100-300 Hz ilmenevät ohuen ja leveän vaimennin tyypin suurimmat erot, jotka ovat X- ja Z-suunnassa. Taajuuksilla 0-100 Hz vasteet ovat samaa suuruusluokkaa. Ohuen vaimentimen etuna verrattuna leveämpään on alemmat vasteet matalilla taajuuksilla (0-200 Hz) ja haittana suuri resonointi X-suunnassa 300 Hz:n taajuudella. Y-suunnassa taajuusalueella 0-300 Hz leveä vaimennin vaimentaa ohutta vaimenninta paremmin.

9.2 Kiintolevyn sijainti systeemissä

Testattavan mallin kehikkorakenteen asennustelineessä on CD, levykeasema sekä kiintolevy. Testattava malli poikkeaa jonkin verran uuden kehittelyn alla olevasta mallista. Tässä versiossa kiintolevy on sijoitettu asennustelineen alimpaan osaan (kuva 36). Uudessa versiossa sijainti saattaa muuttua. Myös kiintolevyjen lukumäärä saattaa nousta kahteen, mikä nostaisi vaimennettavaa painoa. Tämä vähentäisi vaimennettavan systeemin ja vaimennin materiaalin spesifikaatioiden ilmoittamaa dynaamisen kuormitettavuuden välistä eroa ja vaimennusmenetelmä nykyisellä materiaalilla saattaisi toimia tehokkaammin.



Kuva 36. Kiintolevyn sijainti PC:ssä

9.3 Vaimentimien suunnittelusta

Oikea mitoittaminen on edellytys vaimennuksen syntymiselle käytettävällä vaimenninmateriaalilla. Tärinöiden kunnollista vaimentumista ei tapahdu mikäli vaimennettavan systeemin (kiintolevy vaimentimineen) luonnollinen taajuus ei ole spesifikaatioiden ilmoittamalla toiminnallisella alueella.

Kiintolevyn vaimennuksessa on vaikeutena aikaansaada suuria staattisia painumia johtuen vaimennettavan kappaleen pienestä massasta (0,098 kg). Myös vaimennin materiaalien tuoteluetteloiden ilmoittamat kuormitettavuudet ovat korkeita vaimennettavaan massaan nähden. Tilannetta voidaan korjata jonkin verran vaimentimen pinta-alan sopivalla vähennyksellä sekä kuormituksen lisäyksellä.

Vaimentimen tasaisen jouston kannalta olisi vaimentimen pinta-alat laskettava sellaiseksi, että jokaisessa suunnassa vaimennin joustaisi yhtä paljon. Esimerkiksi keltaisissa ohuissa vaimentimissa joustoa tapahtuu enemmän sivuttaissuunnassa kuin pysty –tai pituussuunnassa. Tärinämittaustulokset osoittavat, että suurimmat kiintolevylle kohdistuvat voimat syntyvät enimmäkseen pituussuunnassa. Mikäli iskuja halutaan vaimentaa jossain tietyssä suunnassa, niin mitatuissa olosuhteissa iskujen vaimennus olisi suunniteltava pituussuuntaan (Y). Iskujen suunnat riippuvat paljon olosuhteista ja harvesterin käyttöympäristöstä, minkä takia iskujen vaimennuksen suunnitteluun tarvittaisiin suurempi määrä kiihtyvyyksmittauksia eri käyttöympäristöissä ja rasisolosuhteissa.

Yleensä laitteiden vaimentimia mitoitettaessa vaimennettavan systeemin ominaistaajuus lasketaan vähintään 1,5-kertaa pienemmäksi kuin häiriötaajuus. Tällöin päästään ylikriittiselle alueelle, jossa varsinainen vaimennus tapahtuu. Testattavan laitteen vaimennuksen suunnittelussa ongelmana on häiriötaajuuksien matala sijainti, 20 Hz – 30 Hz. Vaimentimet olisi mitoitettava alle kriittisen vaimennuksen, milloin ollaan alikriittisellä alueella. Tällöin ei saada aikaan luotettavaa vaimennusta, vaan ollaan koko ajan riski alueella. Matalilla taajuuksilla tapahtuva resonointi voi helposti vaikuttaa myös kiintolevyn

tärinä. Tästä syystä kiintolevylle kohdistuvien iskujen vaimennus on erittäin vaikeaa.

Koko systeemi välittää tärinöitä. Värähtelevässä systeemissä tapahtuu resonointia, jotka voivat vahvistua ja välittyä myös kiintolevylle asennuskehikon ja kiinnityslevyn välityksellä. Luotettava vaimennus toimisi ainoastaan kiintolevyn läheisyydessä resonoivien kappaleiden välittämien tärinöiden vaimennuksessa. Koska häiriötaajuudet ovat pieniä ei tämä luultavasti parantaisi merkittävästi kiintolevyn kestäkykyä.

Mikäli tärinät halutaan poistettua olisi ne vaimennettava mahdollisimman aikaisessa vaiheessa ennen kuin tärinät pääsevät välittymään systeemin rakenteessa. Tässä kuitenkin tullaan tilanteeseen, jossa joudutaan huomioimaan koko systeemin komponentit ja osat sekä arvioimaan muutoksien kokonaisvaikutusta.

Pienenkin tärinän vaimennuksella on merkitystä kiintolevyn toiminnan parantamisen kannalta. Siksi jonkinlainen vaimennus on kannattavaa tehdä mikäli halutaan parantaa kiintolevyn toiminnan luotettavuutta. Ehtona tälle on kuitenkin, että vaimennusmenetelmä ei aiheuta muita rasittavia olosuhteita, kuten lämmön nousua. Tällä voi olla toiminnan kannalta negatiivinen vaikutus. Tästä johtuen vaimentimilta vaaditaan avointa rakennetta kiintolevyn ilmanvaihdon takia.

Epäonnistunut vaimennus voi siirtää ympäristöön huomattavasti suurempia tärinävoimia kuin vaimentamaton asennus. Tämän takia ennen uuden vaimennusmenetelmän käyttöönottoa tulee ottaa huomioon vaimennusmenetelmän käytön mahdolliset haittavaikutukset.

10 TESTAUKSEN SUORITUS

Testattavalle näytteelle (kiintolevy) suoritettiin rasitustesti satunnaistärinällä 14.4 2003 Kajaanin ammattikorkeakoulun ympäristötestauslaboratoriossa. Kiintolevyn toiminnallista testausta ei suoritettu mitattujen kiihtyvyyksien alhaisen tason takia. Testattava kokonaisuus (kuva 37) käsitti seuraavat osat:

- 2-osainen testauskiinnitin (liite D)
- PC: OPTI 2000-KY-2158 (16311464), jossa kiintolevy
- räkki: OPTI-RÄKKI-254 (1631 466)
- räkin ja PC:n kiinnitysteline



Kuva 37. Testattava kokonaisuus ja testaussuunnat

Testattava kiintolevy on Fujitsun MHN2100AT-typin kiintolevy. Laittevalmistajan ilmoittamia tekniset tiedot laitteelle:

- korkeus: 9,5 mm
- leveys: 70 mm
- pituus: 100 mm
- paino: 0,098 kg
- tärinän kestävyys (toiminnallinen): 1 G, 5 Hz – 400 Hz taajuusalueella

- tärinän kestävyys (ei toiminnallinen): 5 G, 5 Hz – 500 Hz taajuusalueella
- iskunkesto (toiminnallinen): 175 G 2 ms
- iskunkesto (ei toiminnallinen): 800 G 2 ms, 120 G 11 ms
- komponentin elinikä: 3 vuotta
- lämmönkesto (toiminnallinen): 5 – 55 °C
- lämmönkesto (ei toiminnallinen): -40 – 65 °C

Kiintolevyn vaimentimiksi valittiin keltaiset ohuet vaimentimet. Tämän vaimenninmateriaalin jousto-ominaisuudet olivat parhaimmat matalilla taajuuksilla.

Testaus suoritettiin laitteistolla, joka käsitti seuraavat laitteet:

- tärustin: LDS V850-440-HBT900C (liukupöytä asennettuna)
- kompressori: Hydrapower ltd W-DA90LK-H
- vahvistin: Spak serier amplifier SPA30KCE
- ohjausohjelmisto: Dactron Shaker Control

Testiä suoritettaessa on huomioitava mahdolliset rajoitukset joita käytettävä testauslaitteisto asettaa testille. Tehdyssä testissä kiihtyvyydet ja rasiustasot olivat niin pieniä, ettei niillä ole rajoittavaa merkitystä testauslaitteiston suorituksen kannalta. Seuraavassa LDS V850-täristimen tiedot 440-liukupöydällä ja SPA30K vahvistimella:

- voiman huippuarvo (sini): 22,20 kN
- voiman huippuarvo (random), rms: 22,20 kN
- puolisinin huippu: 66,7 kN
- taajuusalue: 0 – 3000 Hz
- maksimi liikepituus: 50,8 mm
- maksimi nopeus (sini): 2 m/s
- maksimi kiihtyvyys (random), rms: 490,3 m/s² (50 G)

Ennen testauksen aloittamista suoritettiin X- Y- ja Z-suunnassa seuraavat vastemittaukset:

- 1) Koko systeemin taajuusvastemittaukset painopistettä vastaavilta akseleilta (liite G)
- 2) Kiintolevyn vasteiden mittaus testattavat vaimentimet (ohuet keltaiset) asennettuina. Koko testattava systeemi kiinnitettynä kuten testausta suoritettaessa lukuun ottamatta PC:n kansiosaa, joka irrotettiin tämän mittauksen ajaksi.
- 3) PC:n, asennuskehikon ja kiintolevyn vastemittaukset tärityssuuntaa vastaan olevasta suunnasta (liite H).

Lisäksi taajuusvastemittaus suoritettiin X-suunnassa testauskiinnittimen ja koko testattavan systeemin (räkki ja PC) kiinnittimen kiinnityskohtien läheisyydestä (liite F).

Näytteen testaus suoritettiin seuraavassa järjestyksessä:

- 1) Z-suuntainen täritys, 10 minuuttia, ASD 0,01 g²/Hz.
- 2) Y-suunta täritys, 10 minuuttia, ASD 0,01 g²/Hz.
- 3) X-suuntainen täritys, 10 minuuttia, ASD 0,0001 g²/Hz.

Testauksen jälkeen suoritettiin vastemittaukset 1, 2 ja 3 kuten ennen testausta. Vastemittausten kuvaajat on esitetty ennen testausta suoritettujen kuvaajien yhteydessä liitteissä G ja H sekä testaustuloksissa.

11 TESTAUSTULOKSET

Kiintolevyn välittömässä läheisyydessä olevissa liitoksissa, kiinnitystelineissä tai kehikoissa ei näkynyt silminnähtäviä vaurioita. Kiintolevyssä ei näkynyt merkittäviä vaurioita. Sen alapuolella sijaitsevan piirilevyn kiinnitys oli jonkin verran löystynyt toiselta puolelta. Kiintolevyn ruuviliitokset vaimentimien alumiinitukiin pysyivät jäykkinä. Testatuissa vaimentimissa ei näkynyt suuria merkkejä vaurioista. Liimaus alumiinirakenteisiin oli lähes vastaavassa kunnossa kuin ennen testausta. Toisen puolen liimaus oli jonkin verran auennut. Asennuskehikon kiinnitys PC:n koteloon oli pysynyt jäykkänä ja neljä ruuviliitosta ja muovituen liitoskohta olivat tiukasti kiinnitettynä myös testauksen jälkeen.

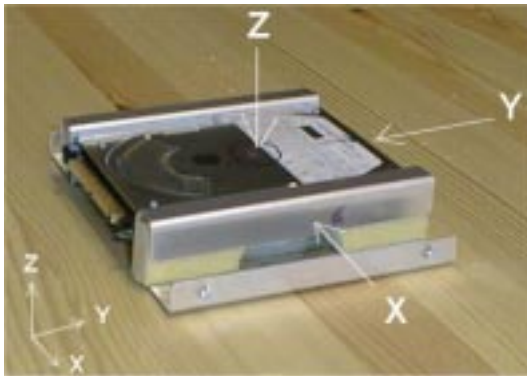
Testauskiinnittimelle $0,0001 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ASD-tason profiililla tehdystä taajuusvastemittauksesta (liite E) nähdään, että suurin määrä resonointipiikkejä osuu 400 Hz:n ja 1000 Hz:n väliin. Myös korkean taajuuden testausalueella (1500 Hz- 1800 Hz) on havaittavissa resonointia. Kiinnitin ei pysty välittämään tarkastuspisteen (anturi liukupöydässä) tärinää kovin hyvin enää korkeilla taajuuksilla johtuen juuri resonoinnista. Nämä tulee huomioida ennen testiä ja testin jälkeen suoritettuja vastemittauksia luettaessa.

Koko systeemille Y-suunnassa tehdystä vastemittauksesta (liite G/3) havaitaan, että Y-suuntaiset suuret resonanssihuiput ovat testin seurauksena tasoittuneet ja vasteet ovat selvästi nousseet X- ja Y-suunnassa erityisesti 100 –400 Hz:n välillä. Suurimmat tärinät ovat luultavasti kohdistuneet kiintolevylle juuri edellä mainituissa suunnissa ja taajuusalueilla. Alhaisilla taajuuksilla (0-100 Hz) vastekäyrät ovat laskeneet huomattavasti. Z-suunnassa tehdystä vastemittauksesta (liite G/5) nähdään, että resonanssihiikit keskittyvät testauksen seurauksena taajuuksille 40 Hz, 100 Hz sekä taajuuksien 200 Hz ja 300 Hz välille. Maan vetovoima vaikuttaa Z-suunnassa tehdyssä mittauksessa PC:n pituussuuntaan, jolloin 200 Hz:n ja 300 Hz:n välin resonanssihiikki johtuu mahdollisesti koko testattavan systeemin ominaistaajuudesta.

PC:n rungosta, asennuskehikosta ja kiintolevystä pituussuunnassa (Y) mitatuista vasteista (liite H/3) havaitaan, että n. 30 Hz:n kohdalla kiintolevyn vasteet ovat testauksen seurauksena alentuneet huolimatta siitä, että asennuskehikon ja PC:n vasteet ovat kasvaneet jonkin verran. 80 Hz:n kohdalla kiintolevyn vasteet ovat nousseet merkittävästi ennen testausta suoritettuihin vasteisiin verrattuna. 300 Hz:n ja 400 Hz:n kohdalla on havaittavissa kiintolevyn vasteissa nousua, joka johtuu luultavasti testauskiinnittimen resonoinnista. Myös asennuskehikosta ja PC:n rungosta mitatut vasteet osoittavat, että resonanssipeikkejä on muodostunut samoille taajuuksille.

11.1 Kiintolevyn taajuusvastemittaus X-suuntaisella täristyksellä

Kuvissa 39 ja 40 on esitetty kiintolevyn vasteet keltaisilla ohuilla vaimentimilla asennettuna ennen testiä ja testin jälkeen. Koko systeemi on ollut kiinnitettynä normaalia kiinnitystapaa vastaavalla tavalla PC:tä lukuun ottamatta, joka oli vasteiden ajan avattuna kuvan 18 mukaisella tavalla. Täritys on tehty X-suunnassa. Anturien kiinnitys (kuva 38) on seuraava:

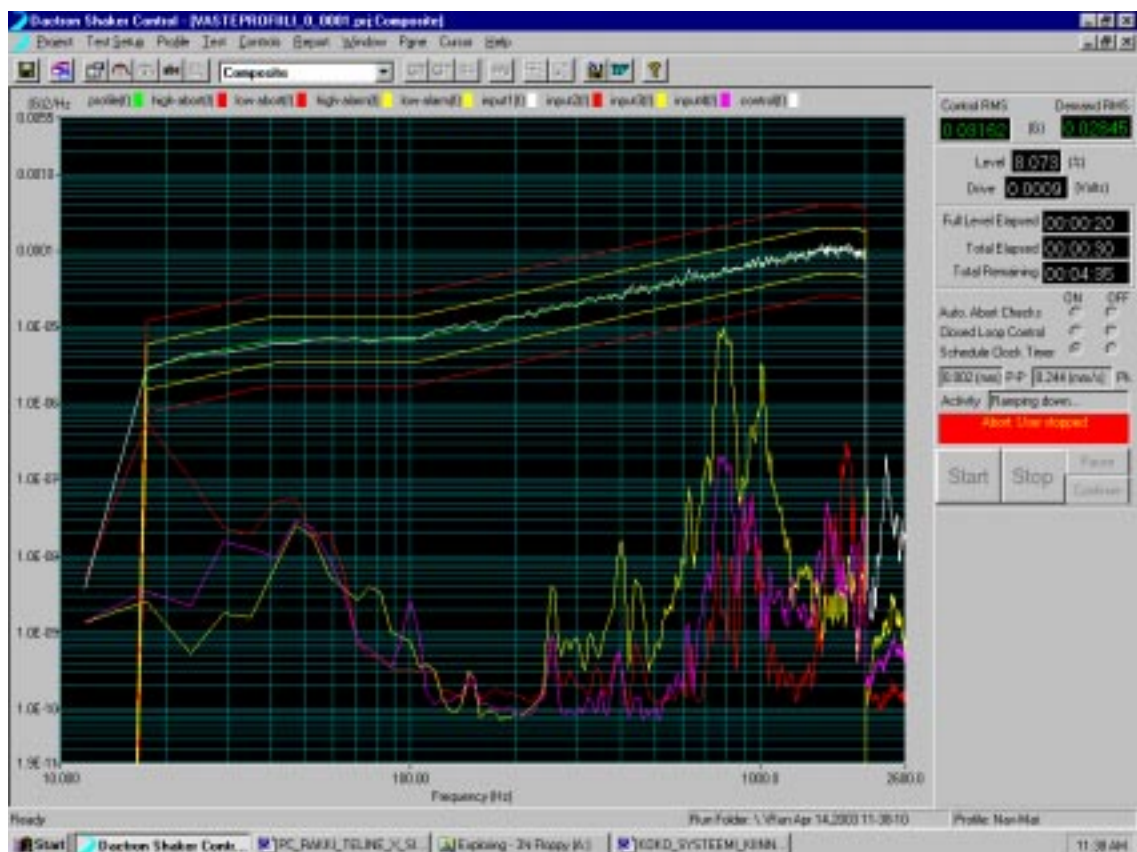


Kuva 38. Anturien kiinnityspaikat

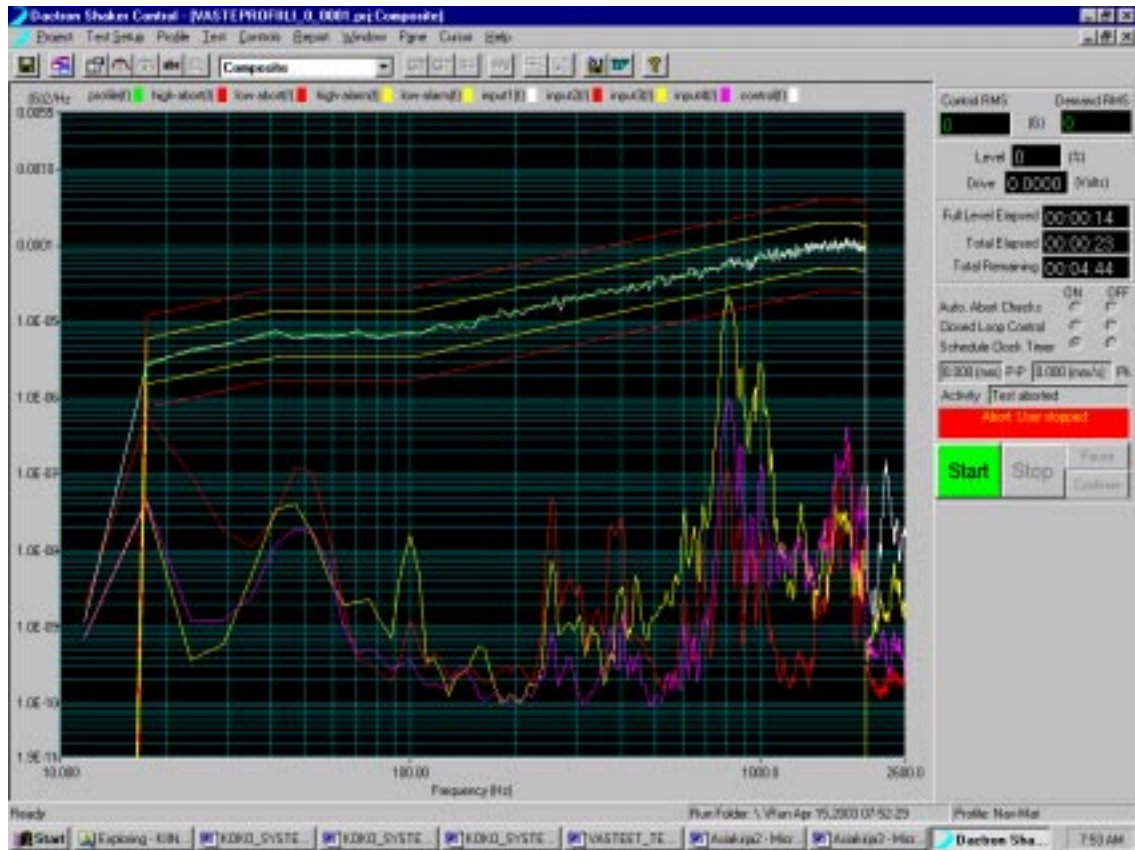
- punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä PC:n etupuolelta kuvattuna, X-suunta
- keltainen 3 kiintolevyn päällä, Z-suunta
- violetti 4 kiintolevyn päädissä, Y-suunta.

Taajuusvastemittaukset osoittivat joitain rakenteen jäykkyyden muutoksia, joilla oli vaikutuksia myös kiintolevyn tärinä. Vertaamalla X-suuntaisen vastemittauksen kuvaajia ennen testiä (kuva 39) ja testin jälkeen (kuva 40) voidaan vasteista havaita tiettyjä muutoksia.

Resonointipiikit osuvat X-suuntaisessa tärityksessä taajuuksille 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz-300 Hz väli ja 400 Hz. Kiintolevyn leveyssuuntainen tärinä (X-suuntainen) on kasvanut erityisesti 200 Hz-300 Hz välin ja 400 Hz:n resonanssipeikkien kohdissa. Pystysuunnassa (Z-suunta) ja resonanssi piikin huippu on noussut testauksen suorituksen seurauksena erityisesti 100 Hz:n kohdalla. Pituussuunnassa (Y-suunta) tulokset osoittavat, että ennen mittauksia 30 Hz, 50 Hz ja 100 Hz:n kohdalla olevat piikit ovat testauksen seurauksena muodostaneet yhden suuremman piikin 50 Hz:n kohdalle.



Kuva 38. Vastemittaus tehty ennen testauksen suorittamista



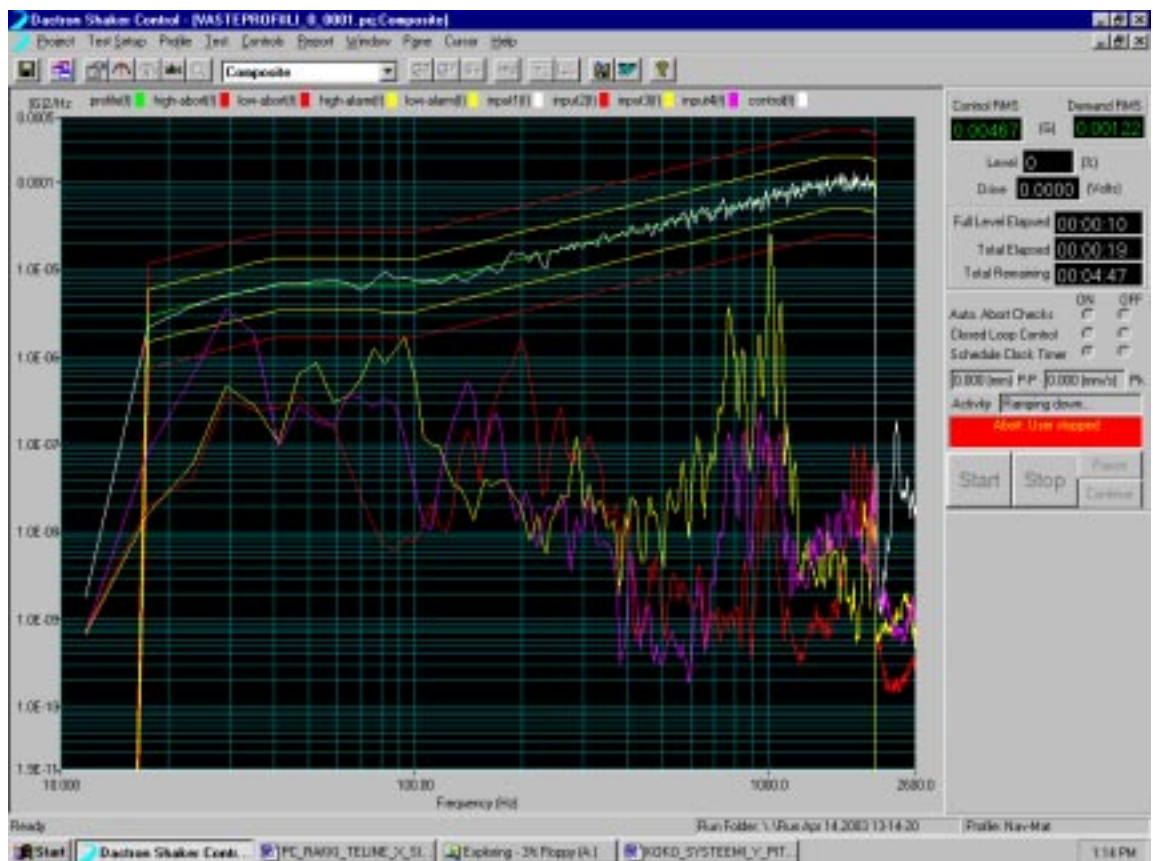
Kuva 39. Vastemittaus tehty testin suorittamisen jälkeen

11.2 Kiintolevyn taajuusvastemittaus Y-suuntaisella tärityksellä

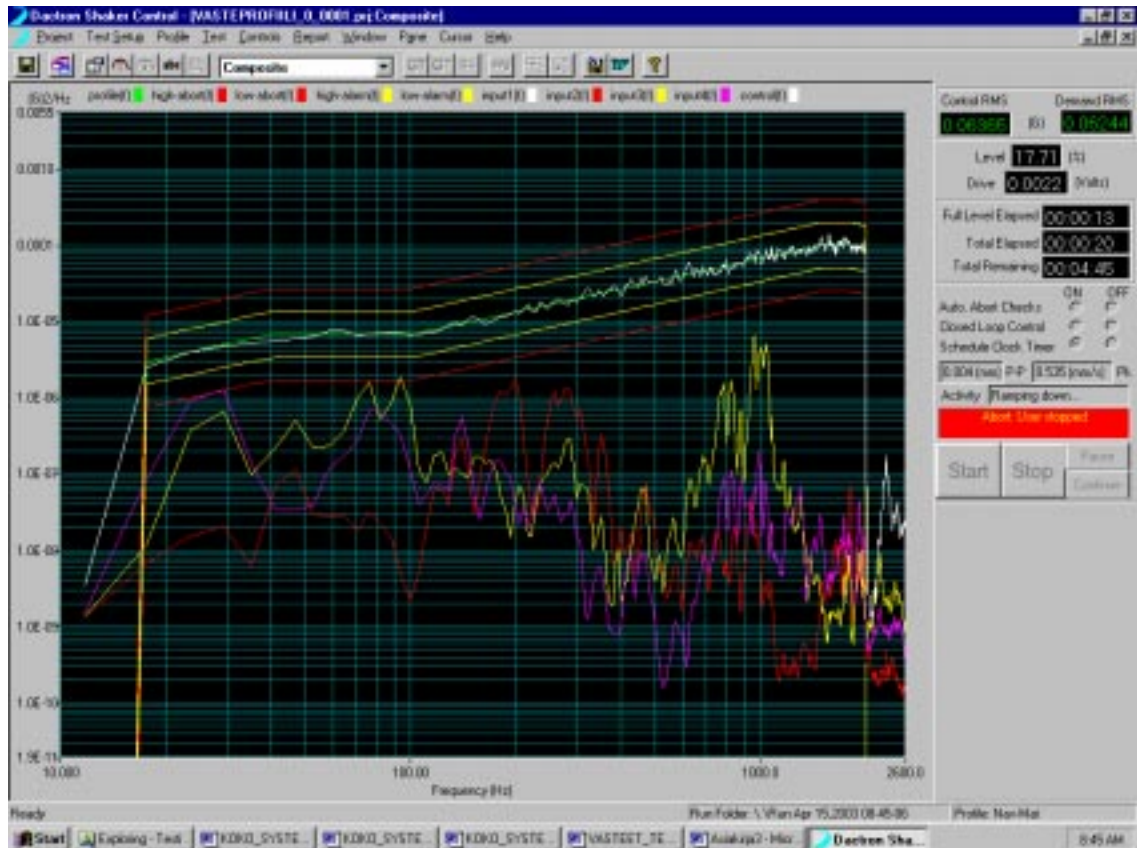
Kuvissa 41 ja 42 on esitetty kiintolevyn vasteet keltaisilla ohuilla vaimentimilla asennettuna ennen testiä ja testin jälkeen. Täritys on tehty kuvan 40 mukaisesti Y-suunnassa. Systemin ja antureiden kiinnitys on kuten X-suuntaisessa tärityksessä.

Suurilla taajuuksilla (700 Hz –1000 Hz) tapahtuva tärinä on vähentynyt selvästi testauksen seurauksena. Matalilla taajuuksilla on havaittavissa vaimennin materiaalin alkujäykkyyden poistumista, jolloin rakenteen resonanssiipiikit ovat nousseet selvemmin esille mahdollisesti kiintolevyn vaimentimien alkujäykkyydestä johtuvista pienemmistä resonanssiipiikeistä. Suurimmat resonointipiikit osuvat Y-suuntaisessa tärityksessä taajuuksille 30 Hz, 90 Hz – 100 Hz välille, 100 Hz-200 Hz välille ja 300 Hz. Vertaamalla ennen testiä ja

testin jälkeen tehtyjen vastemittauksien Y-suuntaista tärinää (violetti kuvaaja) kuvaajia havaitaan, että ennen testiä 30 Hz:n suurin piikki ja 40 Hz – 90 Hz välillä olevat pienemmät resonanssiipiikit ovat testauksen seurauksena muodostaneet kaksi suurta resonanssiipiikkiä taajuuksien 30 Hz ja 80 Hz kohdalle. Taajuuksien 100 Hz- 200 Hz välillä olevat kaksi suurta piikkiä ovat testin seurauksena muodostuneet kahdeksi resonanssiipiikiksi, joista ensimmäinen on noussut ja jälkimmäinen laskenut.



Kuva 41. Vastemittaus tehty ennen testauksen suorittamista



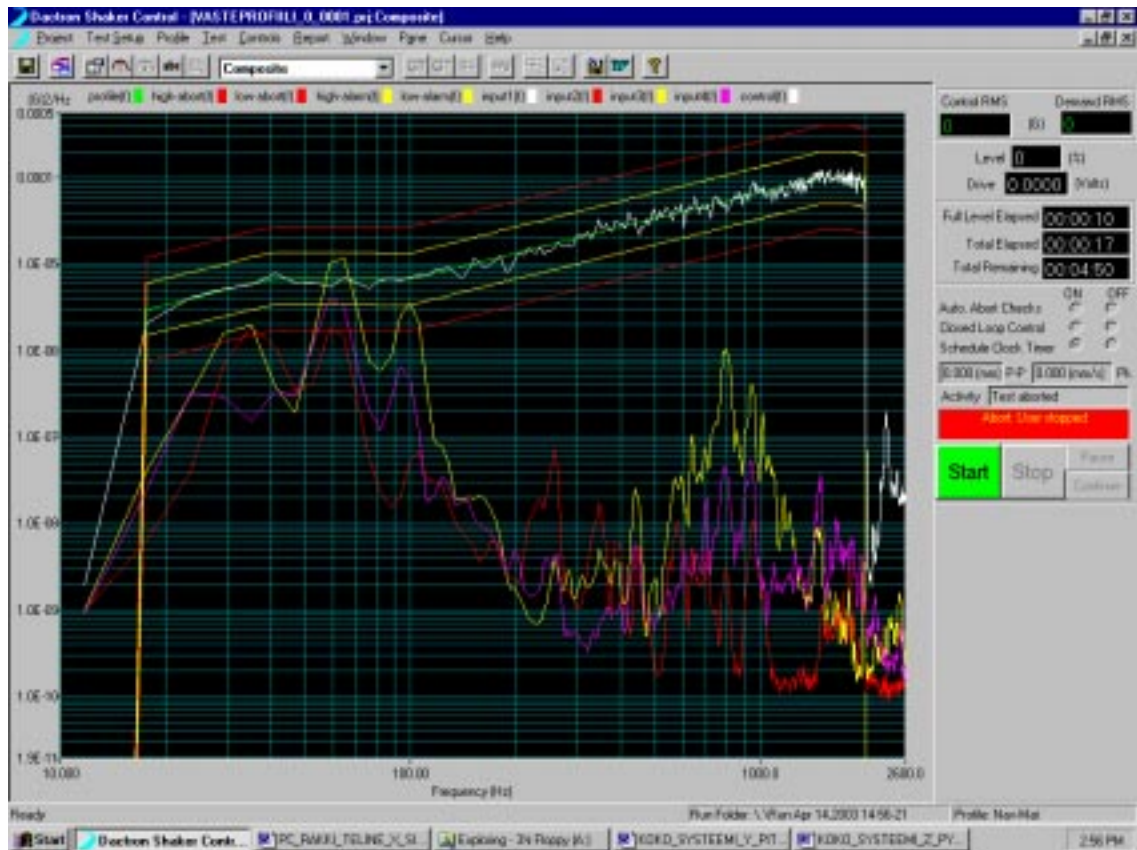
Kuva 42. Vastemittaus tehty testin suorittamisen jälkeen

11.3 Kiintolevyn taajuusvastemittaus Z-suuntaisella täristyksellä

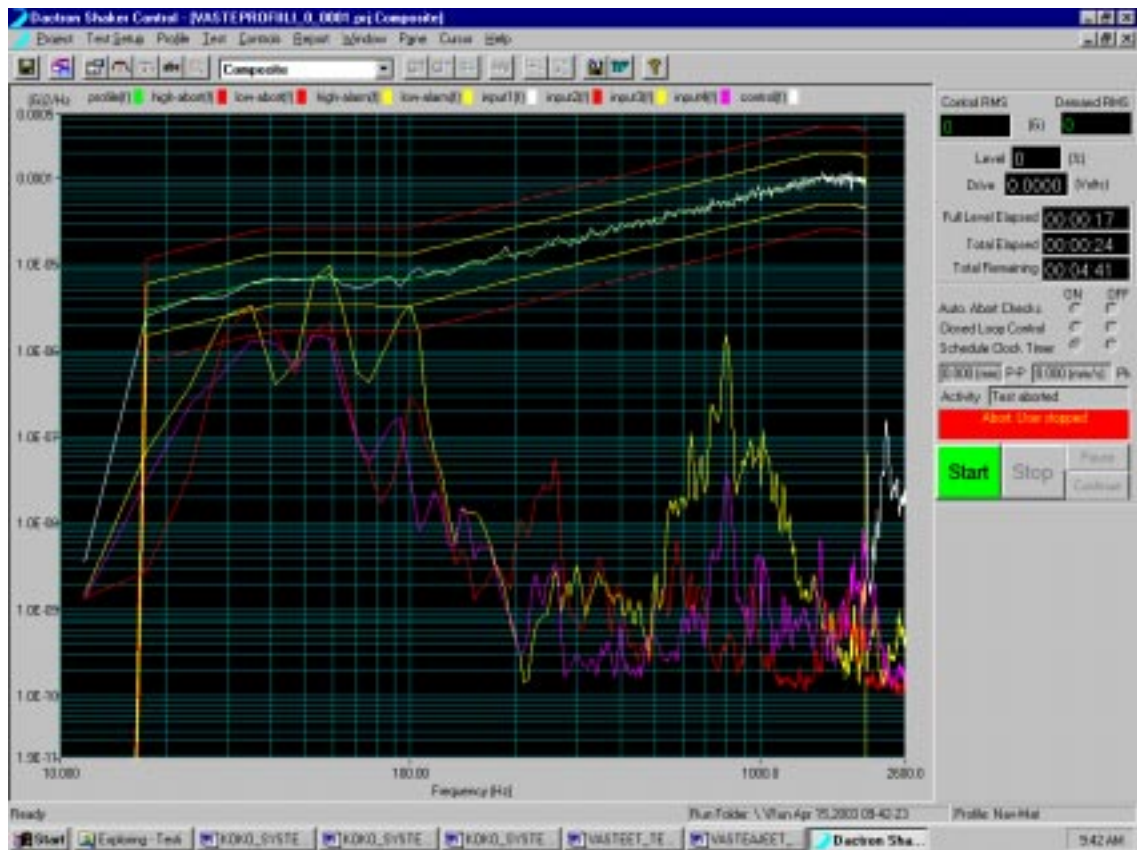
Kuvissa 43 ja 44 on esitetty kiintolevyn vasteet keltaisilla ohuilla vaimentimilla asennettuna ennen testiä ja testin jälkeen. Täritys on tehty kuvan 40 mukaisesti Z-suunnassa. Systemi on kiinnitetty kuten X- ja Y-suuntaisessa tärityksessä lukuun ottamatta testauskiinnitintä. Ainoastaan testauskiinnittimen 2-osa (liite D) on Z-suuntaisessa testauksessa kiinnitettynä täristimen liukupöytään. Anturien kiinnitys on ollut kuten X- ja Y-suuntaisessa tärityksessä.

Suurimmat resonointipiikit osuvat Z-suuntaisessa (keltainen kuvaaja) tärityksessä taajuuksille 30 Hz – 40 Hz välille, 50 Hz – 70 välille Hz ja 90 Hz – 100 Hz välille sekä 100 Hz – 200 Hz välille. Vertaamalla ennen testausta ja testauksen jälkeen tehtyjen vastemittausten kuvaajia voidaan havaita, että

kiintolevyn pystysuuntainen tärinä on kasvanut testin jälkeen tehdyssä kuvaajissa jonkin verran taajuuksien 30 Hz – 40 Hz välillä ja vaimentunut taajuuksien 50 Hz – 70 välillä Hz. Lisäksi ennen testiä tehdyn mittauksen yksi suuri resonanssipeakki Y-suunnassa (violetti kuvaaja) on testin seurauksena vaimentunut kahdeksi pienemmäksi resonanssi piikiksi.



Kuva 43. Vastemittaus tehty ennen testauksen suorittamista



Kuva 44. Vastemittaus tehty testin suorittamisen jälkeen

12 TULOSTEN ARVIOINTI

Harvesterin työskentely-ympäristön aiheuttamat räsitukset kiintolevyille vaihtelevat ajankohdasta ja paikasta riippuen. Tehdyt mittaukset suoritettiin talvella, mikä on voinut vaimentaa erityisesti ajovaiheen yhteydessä syntyviä tärinöitä. Ottaen huomioon, että suurimmat tärinät esiintyvät juuri kanton ajojen yhteydessä, on todennäköistä, että suurempia tärinöitä saattaa esiintyä käytännössä.

Microlog-tiedonkeruulaitteen soveltuvuus räsitustestin perustiedon mittaukseen ei ole paras mahdollinen. Vaikeutena oli saada esiintyvät tärinät 1-2 s:n väliselle aikajaksolle. Tärinän mittauksia suoritettaessa data-nauhurilta tuli huomioida 5 sekunnin aikajakso, joka kuluu mittauslaitteen skaalaus-toimintoon ennen varsinaisen tiedon keräystä. Tämä saattoi osaltaan vaikuttaa siihen, että suuria kiihtyvyyshuippuja saatiin laajasta otannasta huolimatta aika vähän. Lisäksi kiihtyvyyksmittauksien aikatazon alkuvaiheessa esiintyvä hyppäys on ongelma. Microlog vaati alarajataajuuden, jotta mittaus voitiin suorittaa. Tämä taajuus asetettiin 1 Hz:n kohdalle, joka voi selittää kyseistä hyppäystä.

Käytetyllä testausprofiililla ei pystytty selvittämään rakenteen ja kiintolevyn iskunkestokykyä. Väsymisreaktiot antavat kuitenkin viitteitä niistä heikoista rakenteista, jotka saattavat olla herkkiä myös iskuille. Profiilin räsitustaso matalilla taajuuksilla olisi saattanut olla jonkin verran korkeampi, jolloin testaus olisi ehkä antanut paremman kuvan systeemin ja kiintolevyn kestosta iskuille.

Käytetyn testauskiinnittimen resonanssit vaikuttavat X-suunnassa matalilla taajuuksilla 40 Hz, 100 Hz kohdalla ja erityisesti taajuuksilla 600 Hz – 700 Hz, jolloin resonanssit vaikuttavat kaikissa suunnissa (X, Y ja Z). Nämä rasittavat systeemiä ja niiden vaikutus näkyy myös tehdyissä vastemittauksissa. Testauskiinnittimen ja PC:n ja räkin kiinnittimen kiinnityskohdat resonovat lähes samalla tavalla (liite F). Näin ollen kiinnitin välittää tärinät tasaisesti molemmilta puolilta.

Ennen testausta suoritettavat vastemittaukset osoittivat ohuen keltaisen vaimentimen heikkoudet 300 Hz taajuusalueella. Testin suorituksen jälkeen suoritettavat vastemittaukset X-suunnassa osoittivat, että voimakasta vastekäyrien nousua tapahtui juuri edellä mainitun taajuusalueen kohdalla. Varsinainen häiriötaajuus ei ole tällä alueella, jolloin vahvistumisella ei olisi niin suurta merkitystä kiintolevyn kestävyuden kannalta.

Kiintolevystä mitatut vasteet osoittivat, että testauksen seurauksena resonointipiikit keskittyvät tietyille taajuuksille. 40 Hz:n ja 100 Hz:n kohdalla tämä johtuu osittain kiinnittimestä. 100 Hz –400 Hz alueella resonoivat osat ovat luultavasti laitteen jonkin osan resonansseja. Koko systeemille laskettu ominaistajuus 171 Hz on huomioitava testauksen aiheuttamia kiintolevyn vasteiden muutoksia arvioitaessa. Laskettu ominaistajuus on laskettua arvoa huomattavasti korkeampi, mahdollisesti 200-300 Hz:n välillä, koska g vaikuttaa pituussuuntaan (Y). Resonanssien keskittyminen systeemissä saattaa johtua osittain siitä, että systeemin rakenteessa on tapahtunut jatkuvan tärinän aiheuttamia väsymisilmiöitä, jolloin mm. kiinnityslevyt ja asennuskehikko alkavat herkemmin resonoimaan niiden ominaistajuuksilla.

Amplitudin kasvuun vaikuttaa myös mahdolliset vahvistukset systeemissä. Tällöin tärinä on amplitudiltaan suurempaa. Kun rakenne on ”löysempi” on kiintolevykin alttiimpi vahingoittumiselle ja pienillekin iskuille.

Kiintolevylle ennen testiä ja testin jälkeen tehdyistä vastemittauksista voidaan havaita, että vasteet nousivat suoritettavan rasitustestin seurauksena: X-suuntaisella täristyksellä havaittiin resonoinnin kasvua taajuuksien 50 Hz, 100 Hz, 250 Hz ja 400 Hz kohdalla, Y-suuntaisella täristyksellä 80 Hz:n kohdalla ja Z-suunnassa 400 Hz:n kohdalla. Laskennan mukaan näillä taajuuksilla resonoivia osia ovat osa piirilevyistä, CD kiinnitystelineineen ja levykeaseman runko. Näillä voi olla vaikutusta Z-suuntaisen tärinän vahvistuksen osalta.

13 YHTEENVETO

Tässä työssä on käsitelty ympäristötestausmenetelmistä mekaaniset testit, tärinätestauksen suunnittelu sekä testauksen toteutus. Työssä suoritettiin laajakaistaiseen satunnaistärinästandardiin IEC 68-2-64 perustuen satunnaistärinätesti harvesterin kiintolevylle. Koko testattava näyte muodostui PC:stä ja kiintolevystä, jotka olivat asennettuina käyttöolosuhteita vastaavalla tavalla Z-suuntaista testausta lukuun ottamatta.

Tavoitteena oli suorittaa ympäristössä esiintyviin rasituksiin perustuva testi. Käytännön kiihtyvyydsmittaukset suoritettiin Beaver-harvesterille tammikuussa 2003. Mittaukset tehtiin kiihtyvyydsmittauksina Data-nauhurille, mistä tärinät mitattiin ja analysoitiin Microlog-tiedonkeruupäätteellä sekä Prism²-ohjelmalla. Testauksen taajuuskaistat perustuvat näihin mittauksiin. Kiihtyvyydet olivat suoritettujen mittausten perusteella hyvin alhaiset, mikä johti varsinaisen testin rasiustason nostoon. Y- ja Z-suuntaisen testauksen rasiustaso ja nousunopeudet on valittu standardin mukaan.

Testin kokonaiskesto aika oli 30 minuuttia. Ajoprofiilit sisälsivät kaksi testattavaa taajuuskaistaa, 40 Hz- 100 Hz ja 1500 Hz –1800 Hz. Profiilin rasiustason huippu Y- ja Z-suunnissa oli 0,01 g²/Hz. Johtuen testattavan systeemin pienestä pintahitausmomentista tärinätaristettävään massaan nähden rasiustasoa alennettiin X-suunnassa 0,0001 g²/Hz:iin.

Visuaalinen tarkastus osoitti ettei merkittäviä vaurioita kiintolevylle, vaimentimille tai näiden välittömässä läheisyydessä oleville rakenteille, kiinnityksille tai kiinnitystelineille aiheutunut testauksen seurauksena. Vastemittaukset osoittivat joitain PC:n rakenteen heikkenemisiä, joilla on vaikutusta myös kiintolevyn tärinään. Myös kiinnittimellä oli vaikutusta leveys suunnassa (X) rakenteen väsymiseen ja siten myös kiintolevyn kestävyteen.

LÄHDELUETTELO

- 1 Ponsse konserni. 23.9.2002. [WWW-dokumentti]
<http://www.ponsse.fi/suomi/index_sf.html>
- 2 IEC, International Electrotechnical Commission. Environmental testing, Part 2: Test Methods, Test Fh: Vibration, broad-band random (digital control) and guidance. 68-2-64 IEC:1993.
- 3 International Electrotechnical Commission. Basic environmental testing procedures, Part 2: Tests—Test Fc: Vibration (sinusoidal). Publication 68-2-6, Fourth edition, 1970.
- 4 Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Tutkimusraportti, KOTEL 239. Rasituskarsinta.
- 5 Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Työryhmäraportti, KOTEL 203. Ympäristöttestauskäsikirja.
- 6 Elektroniikan luotettavuus ja käyttövarmuus. [WWW-dokumentti]
<http://www.ele.tut.fi/teaching/74521/Luotettavuus_ja_kayttovarmuus.pdf>
- 7 Airila Mauri, Karjalainen Jussi A., Mantovaara Urpo, Nurmi Lasse, Ranta Aarno ja Verho Arto. Koneenosien suunnittelu 4, Erityisalueet. Werner Söderström Osakeyhtiö, Porvoo, Helsinki, Juva. WSOY:n graafiset laitokset Porvoo 1985. Toimittaja, Wacklin, Tauno. ISBN 951-0-13223-3.
- 8 Mekaaniset rakenneosat, värinänvaimentimet. Paulstra esite nro 732313.

- 9 Jennifer Renninger. Understanding damping techniques for noise and vibration control. 2.12.2002 [WWW-dokumentti]
<<http://www.earsc.com/engineering/understandingdamping/understandingdamping.phtml>>
- 10 Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Työryhmäraportti, KOTEL 215. Ympäristötestauskäsikirja, 2-osa.
- 11 Lahdenperä Matti, Rantala Pekka. Mekatroniikka, Elektroniikan tärinäsiETOisuus. Tekninen tiedotus 11/90.
- 12 Spyrakos, Constantine C. Finite Element Modeling in Engineering Practice Includes Examples with Algor[®]. 1996 Constantine C. Spyrakos. Toimittanut Algor publishing division. Library of Congress Catalog Card No: 94-60886, ISBN: 0-9652806-0-8.
- 13 Tammertekniikka, tekniikan kaavasto. 3. painos. Jyväskylä, Gummerus 2001. ISBN 951-9004-74-2.
- 14 Seilonen Tommy, (Kemppainen Markku), Värähtelymittaukset Kemira Agro Oy:ssä. Kajaanin teknillinen oppilaitos, konetekniikan osasto. Insinööriyö 1996.
- 15 Jormanainen, Pentti. Kone- ja laitosasennuksen tärinänvaimennus. Valtion painatuskeskus, Helsinki, 1987. ISBN 951-860-699-4.
- 16 Nevalainen Olavi. Ympäristövaikutusten huomioonottaminen ja testaus. VTT Automaatio, turvallisuustekniikka, elektroniikan tuotetekniikka, 2001. [WWW-dokumentti]
<http://www.machina.hut.fi/kurssit/41/199/TKK_YMP_TEST01.pdf>

- 17 Mäkelä Mikko, Mäkelä Riitta ja Siltanen Olavi.
Insinöörikoulutuksen fysiikka. Tammertekniikka, Gummerus,
Jyväskylä 1997. ISBN 951-9004-61-0.

LIITTEET

Liite A	Mittauspisteiden ajankohdat
Liite B/1-4	Mittaustulokset-taulukko 1 ja 2
Liite C/1-2	Ajoprofiilit
Liite D	2-osainen testauskiinnitin
Liite E/1-2	Vastemittaus, testauskiinnitin
Liite F	Vastemittaus kiinnityspisteiden läheisyydestä
Liitteet G/1-6	Vastemittaus, koko systeemi
Liitteet H/1-6	Vastemittaus, kiintolevy, asennuskehikko ja PC
Liite I/1	Vastemittaus, keltainen ohut vaimennin
Liite I/2	Vastemittaus, keltainen paksu vaimennin
Liite I/3	Vastemittaus, sininen vaimennin
Liite I/4	Vastemittaus, vihreä vaimennin
Liite J/1-18	Mitattujen tärinöiden aikatasokuvaajat, mittaus 1
Liite J/19-36	Mitattujen tärinöiden aikatasokuvaajat, mittaus 2

Työvaihe	Kiihtyvyyden suunta	Aika	DAT-nauhurin mittauskanava (L =2, R=1)
Nurin	Z	42:05	L
Karsii	Z	40:03	L
Liikut. kourassa	Z	44:59	L
Nost. toppariin	Z	37:09	L
Tarttuu puuhun	Z	43:47	L
Ajo	Z	20:36	L
Nurin	Y	22:45	L
Karsii	Y	20:36	L
Liikut. kourassa	Y	25:53	L
Nost. toppariin	Y	24:20	L
Tarttuu puuhun	Y	22:32	L
Ajo	Y	22:32	L
Nurin	X	20:30	R
Karsii	X	22:45	R
Liikut. kourassa	X	23:52	R
Nost. toppariin	X	27:19	R
Tarttuu puuhun	X	20:42	R
Ajo	X	35:31	R

MITTAUS 1						
Työvaihe	Suunta	G p-p [G]	Taajuus f [Hz]	p-p [kpl]	EQV f	
Tarttuu puuhun	X	0,12	1627	141	12	
	Y	0,12	1607	82	20	
	Z	0,112	1621	91	18	
Nosturi toppariin	X	0,124	1638	26	63	
	Y	0,112	1638	32	51	
	Z	0,124	1635	93	18	
Puu nurin	X	0,12	1558	113	14	
	Y	0,124	1662	43	39	
	Z	0,08	1541	79	20	
Ajo	X	0,096	1597	85	19	
	Y	0,12	1545	83	19	
	Z	0,136	1619	66	25	
Liikuttelua kourassa	X	0,128	1675	83	20	
	Y	0,108	1638	92	18	
	Z	0,12	1560	64	24	
Karsii	X	0,124	1601	102	16	
	Y	0,096	1669	22	76	
	Z	0,128	1544	46	34	
Keskiarvo		0,116	1610	75	28	
MITTAUS 2						
Työvaihe	Suunta	G p-p [G]	Taajuus f [Hz]	p-p [kpl]	EQV f	
Tarttuu puuhun	X	0,128	1580	81	20	
	Y	0,096	1565	123	13	
	Z	0,1	1669	66	25	
Nosturi toppariin	X	0,1	1624	67	24	
	Y	0,096	1593	35	46	
	Z	0,112	1742	91	19	
Puu nurin	X	0,112	1693	74	23	
	Y	0,104	1631	86	19	
	Z	0,108	1591	87	18	
Ajo	X	0,096	1645	53	31	
	Y	0,128	1655	122	14	
	Z	0,124	1583	63	25	
Liikuttelua kourassa	X	0,112	1676	45	37	
	Y	0,124	1638	90	18	
	Z	0,104	1556	38	41	
Karsii	X	0,1	1580	49	32	
	Y	0,084	1658	34	49	
	Z	0,12	1590	33	48	
Keskiarvo		0,110	1629	75	25	

Mittaustulokset –taulukko 1

Liite B /2

Työvaihe	R, G p-p [G]	X, G p-p ² [G]	Y, G p-p ² [G]	Z, G p-p ² [G]
Tarttuu puuhun	0,20	0,0154	0,0117	0,0112
Nosturi toppariin	0,19	0,0125	0,0108	0,0139
Puu nurin	0,19	0,0135	0,0130	0,0088
Ajo	0,20	0,0092	0,0154	0,0169
Liikuttelua kourassa	0,20	0,0144	0,0135	0,0125
Karsii	0,19	0,0125	0,0081	0,0154

Suunta	Max G p-p [G]	Min G p-p [G]	Max f [Hz]	Min f [Hz]
X	0,128	0,096	1693	1558
Y	0,128	0,084	1669	1545
Z	0,136	0,08	1742	1541

Max G p-p [G]	0,14
Min G p-p [G]	0,08
Max f [Hz]	1742
Min f [Hz]	1541

MITTAUS 1					
Työvaihe	Suunta	G p-p [G]	p-p [kpl]	p-p aikaväli	Taajuus f [Hz]
Tarttuu puuhun	X	0,04	1	0,087	12
	Y	0,04	1	0,040	25
	Z	0,03	1	0,068	15
Nosturi toppariin	X	0,02	1	0,060	17
	Y	0,05	1	0,060	17
	Z	0,12	1	0,040	25
Puu nurin	X	0,06	1	0,040	25
	Y	0,02	1	0,040	25
	Z	0,02	1	0,060	17
Ajo	X	0,08	1	0,052	19
	Y	0,12	1	0,060	17
	Z	0,04	1	0,060	17
Liikuttelua kourassa	X	0,08	1	0,052	19
	Y	0,02	1	0,048	21
	Z	0,08	1	0,048	21
Karsii	X	0,02	1	0,060	17
	Y	0,02	1	0,032	31
	Z	0,02	1	0,080	13
Keskiarvo		0,05	1	0,055	20
MITTAUS 2					
Työvaihe	Suunta	G p-p [G]	p-p [kpl]	p-p aikaväli	Taajuus f [Hz]
Tarttuu puuhun	X	0,05	1	0,051	20
	Y	0,10	1	0,079	13
	Z	0,02	1	0,040	25
Nosturi toppariin	X	0,02	1	0,041	24
	Y	0,05	1	0,080	13
	Z	0,04	1	0,048	21
Puu nurin	X	0,06	1	0,044	23
	Y	0,02	1	0,053	19
	Z	0,03	1	0,055	18
Ajo	X	0,01	1	0,040	25
	Y	0,14	1	0,080	13
	Z	0,06	1	0,040	25
Liikuttelua kourassa	X	0,05	1	0,080	13
	Y	0,03	1	0,060	17
	Z	0,04	1	0,040	25
Karsii	X	0,03	1	0,031	32
	Y	0,06	1	0,021	49
	Z	0,02	1	0,021	48
Keskiarvo		0,05	1	0,050	24

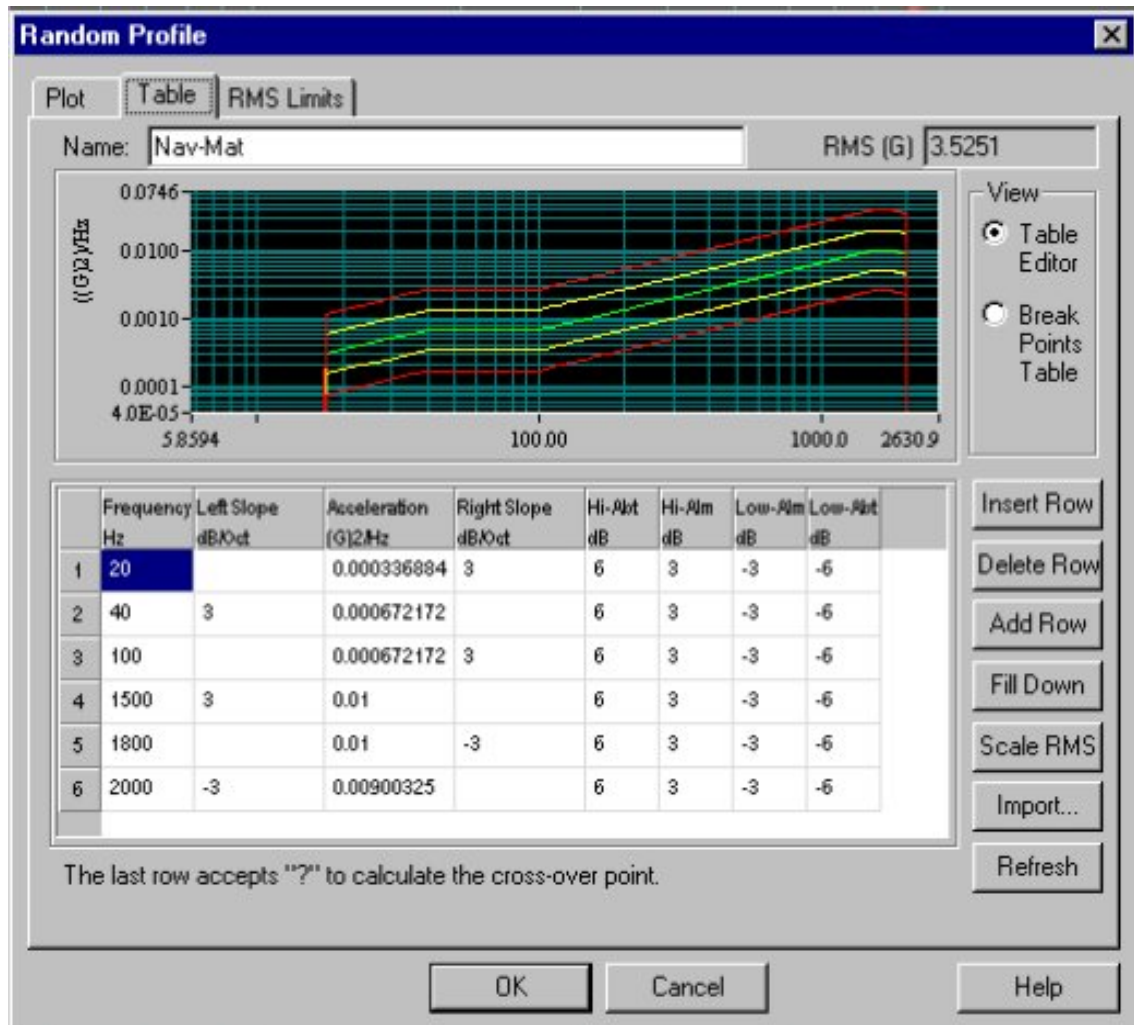
Mittaustulokset-taulukko 2

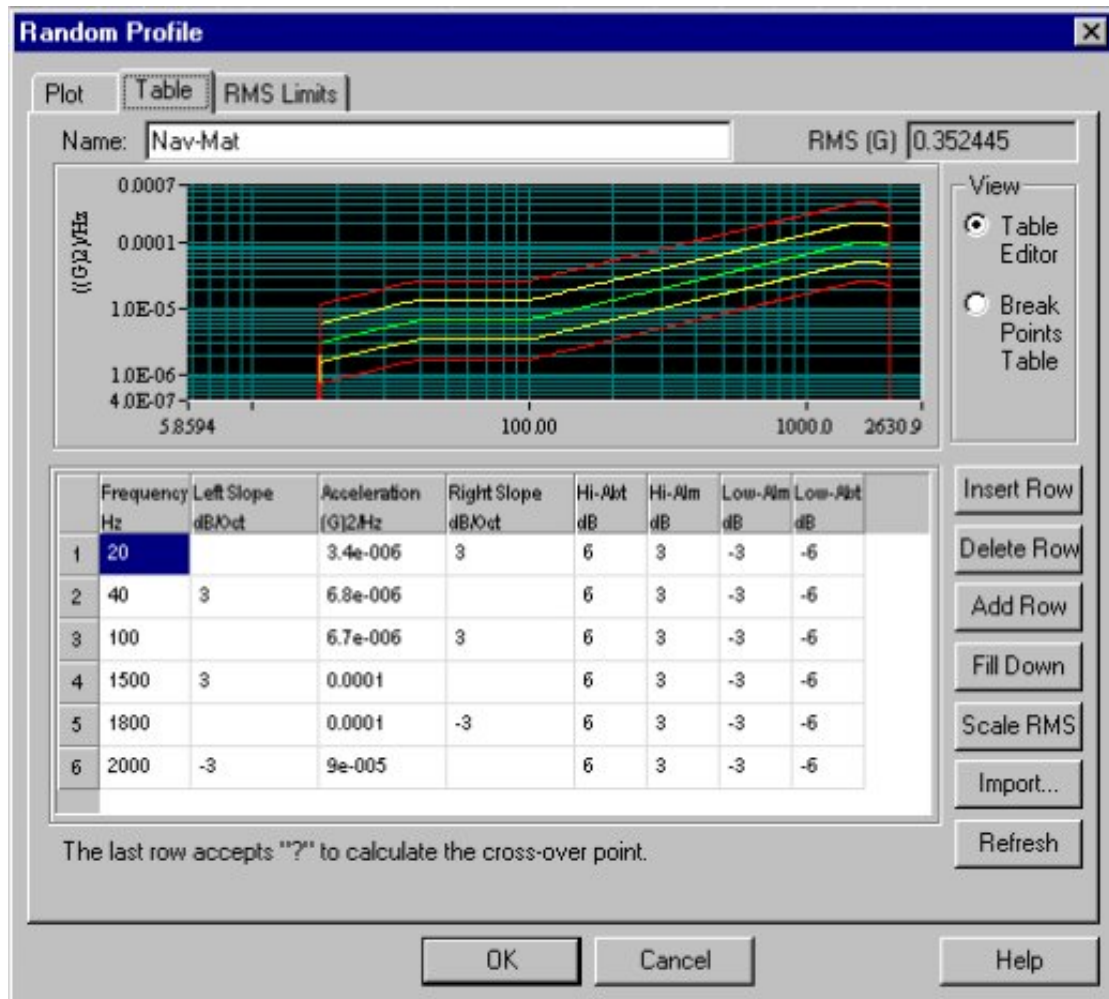
Liite B/4

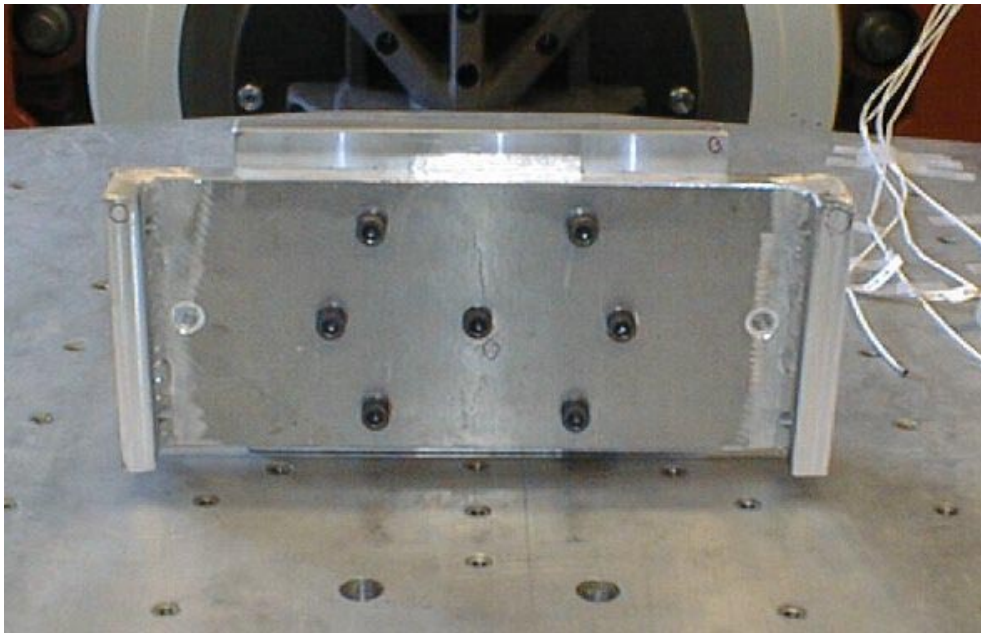
Työvaihe	R G p-p [G]	X, G p-p ² [G]	Y, G p-p ² [G]	Z, G p-p ² [G]
Tarttuu puuhun	0,09	0,0018	0,0049	0,0007
Nosturi toppariin	0,10	0,0006	0,0023	0,0064
Puu nurin	0,07	0,0031	0,0006	0,0007
Ajo	0,15	0,0021	0,0174	0,0027
Liikuttelua kourassa	0,09	0,0038	0,0006	0,0038
Karsii	0,05	0,0007	0,0016	0,0003

Suunta	Max G p-p [G]	Min G p-p [G]	Max f [Hz]	Min f [Hz]
X	0,08	0,012	32	12
Y	0,144	0,016	49	13
Z	0,12	0,016	48	13

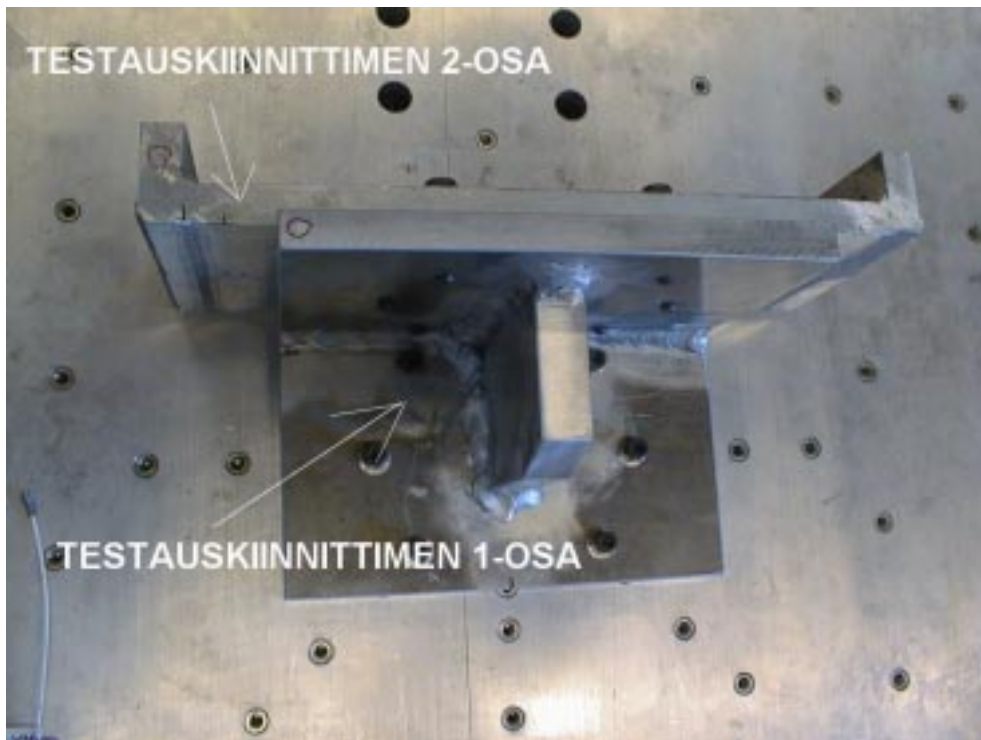
Max G p-p [G]	0,144
Min G p-p [G]	0,012
Max f [Hz]	49
Min f [Hz]	12



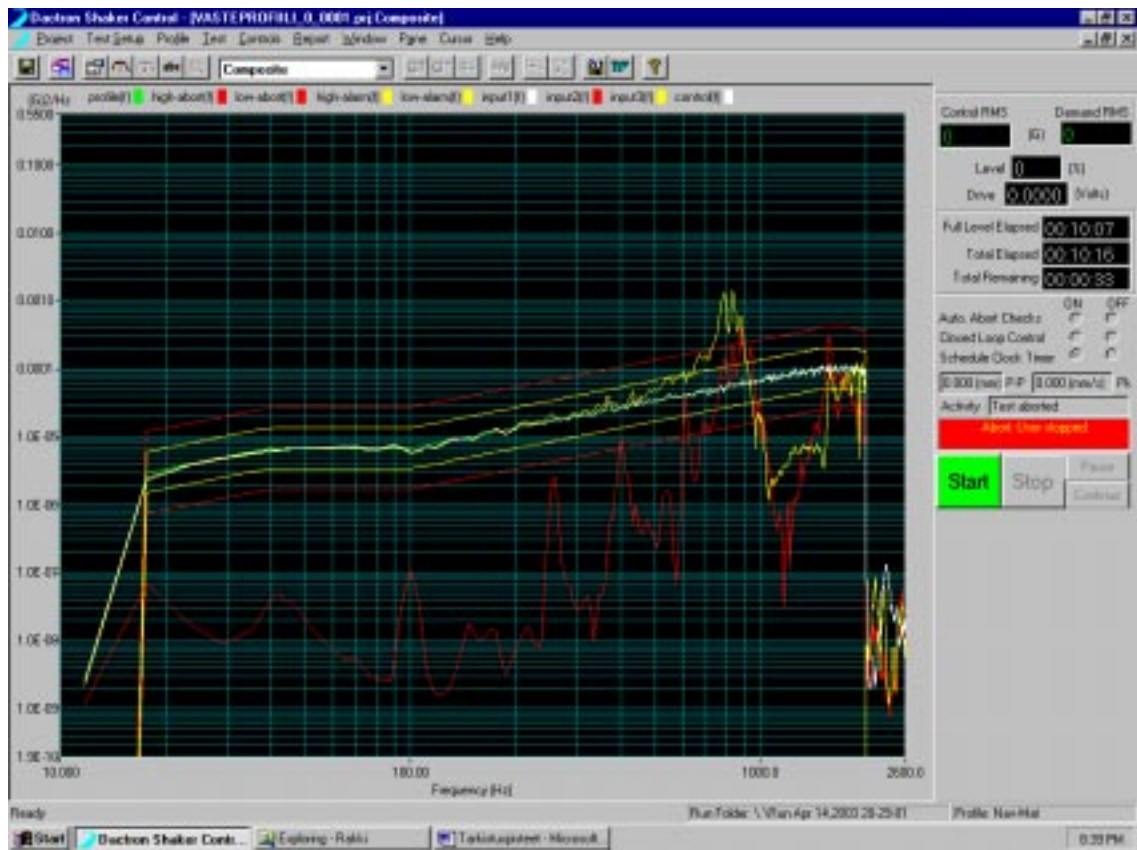




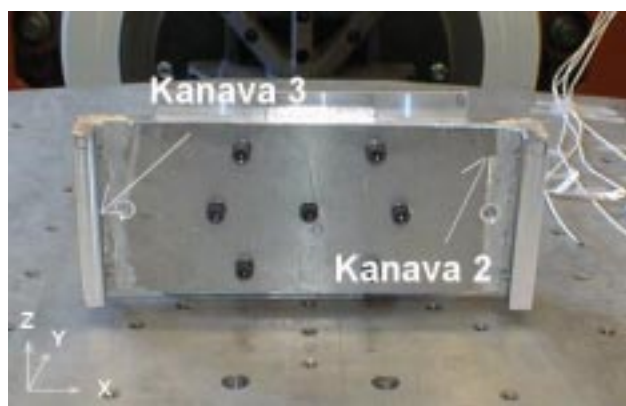
Kuva. Testauskiinnitin edestä kuvattuna



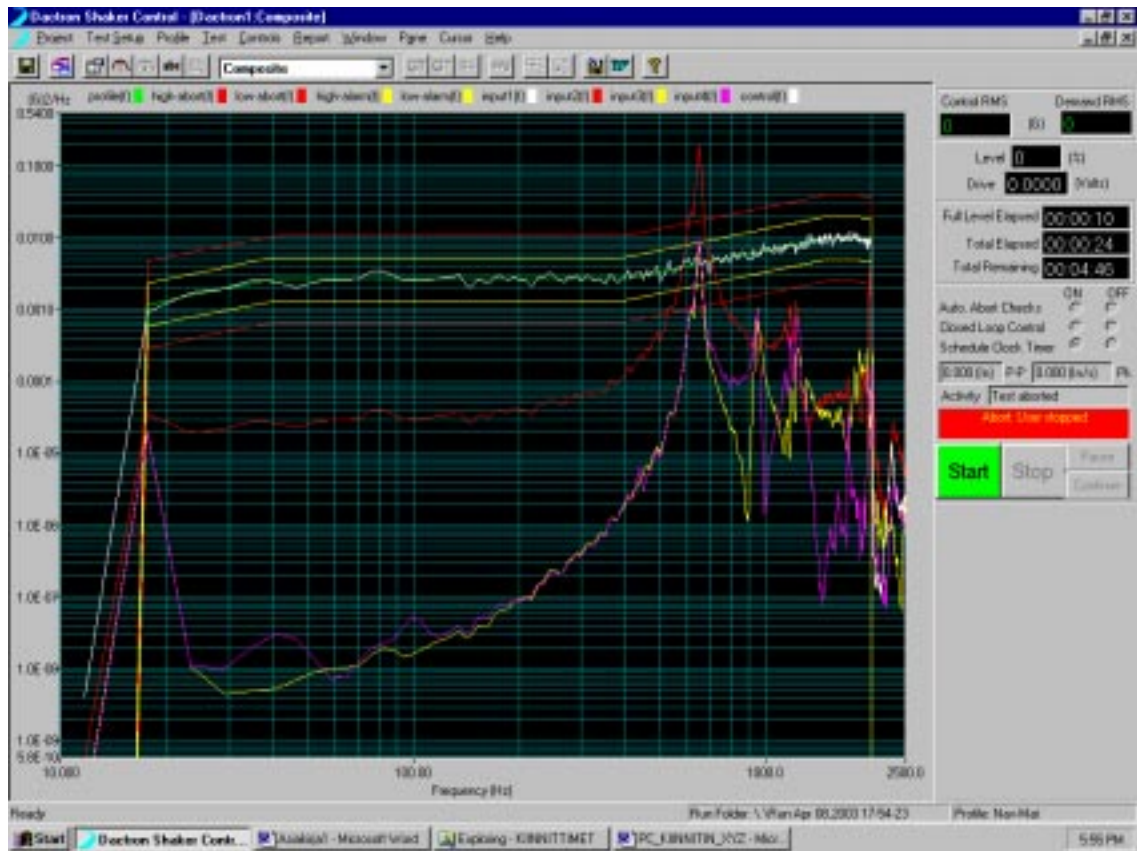
Kuva. Testauskiinnitin ylhäältä kuvattuna



Täristys X-suunnassa vasteprofiililla. Mittauspisteinä (tarkistuspisteinä) ovat kiinteästi asennetut anturit testauskiinnittimessä. Punainen (kanava 2) on kiinnitetty Y-suuntaan, keltainen (kanava 3) X-suuntaan. Vasteet on mitattu koko systeemi paikallaan asennettuna.



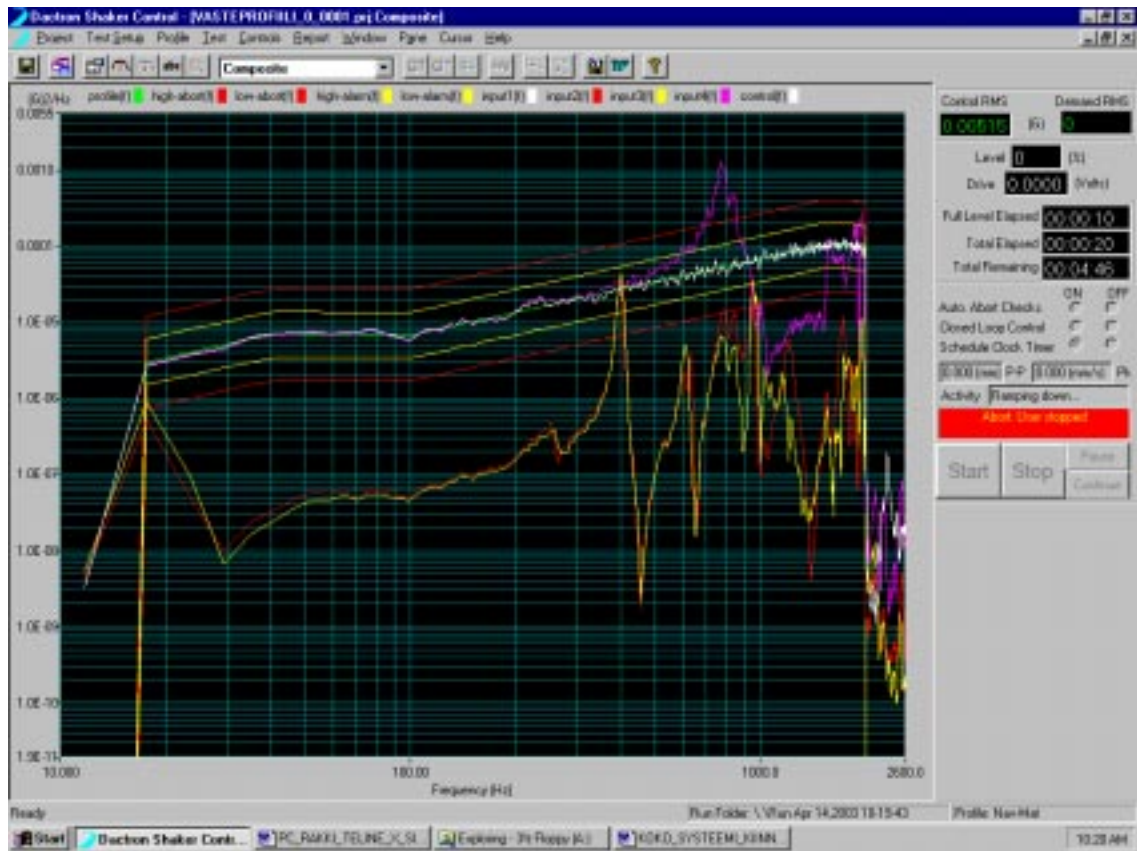
Kuva. Anturien kiinnityspaikat



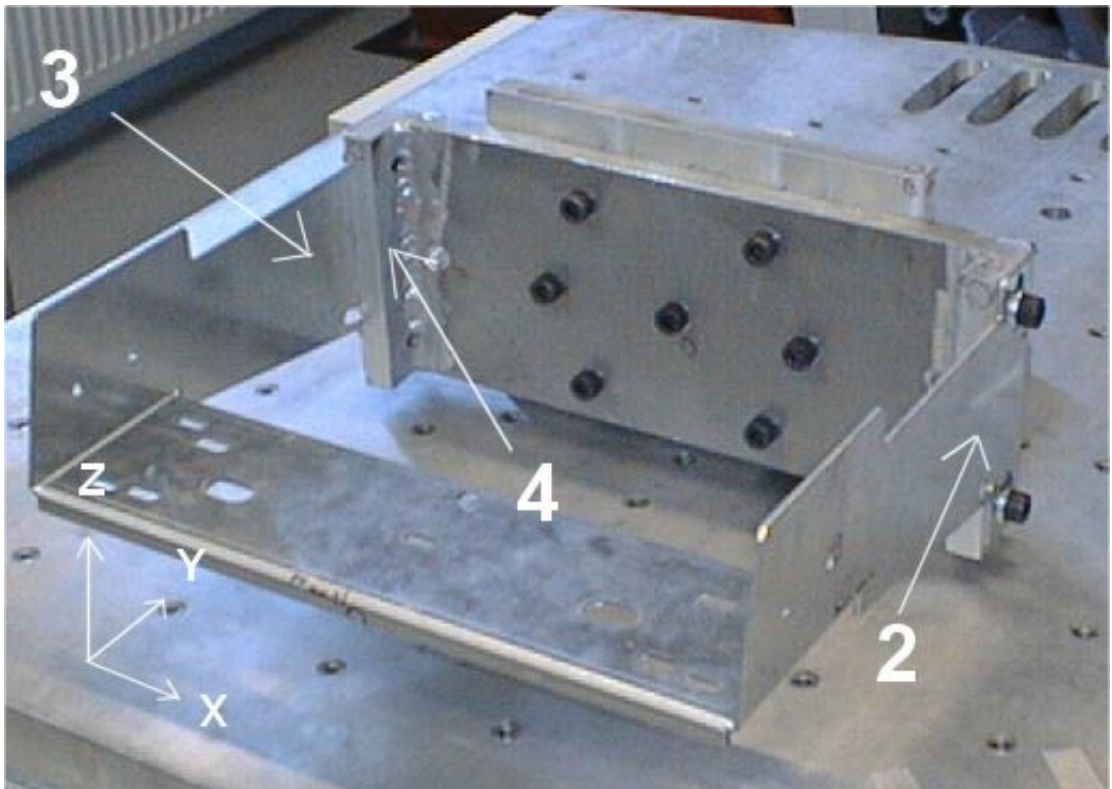
Täristys Y-suunnassa. Anturien kiinnitys oikeaan ylänurkkaan PC:n kiinnityssuunnasta katsottuna: Punainen 2 täristyssuuntaa vastaan (Y), keltainen 3 kiinnittimen päällä (Z), violetti 4 kiinnittimen sivu (X). Vasteet mitattu pelkästään kiinnittimestä.



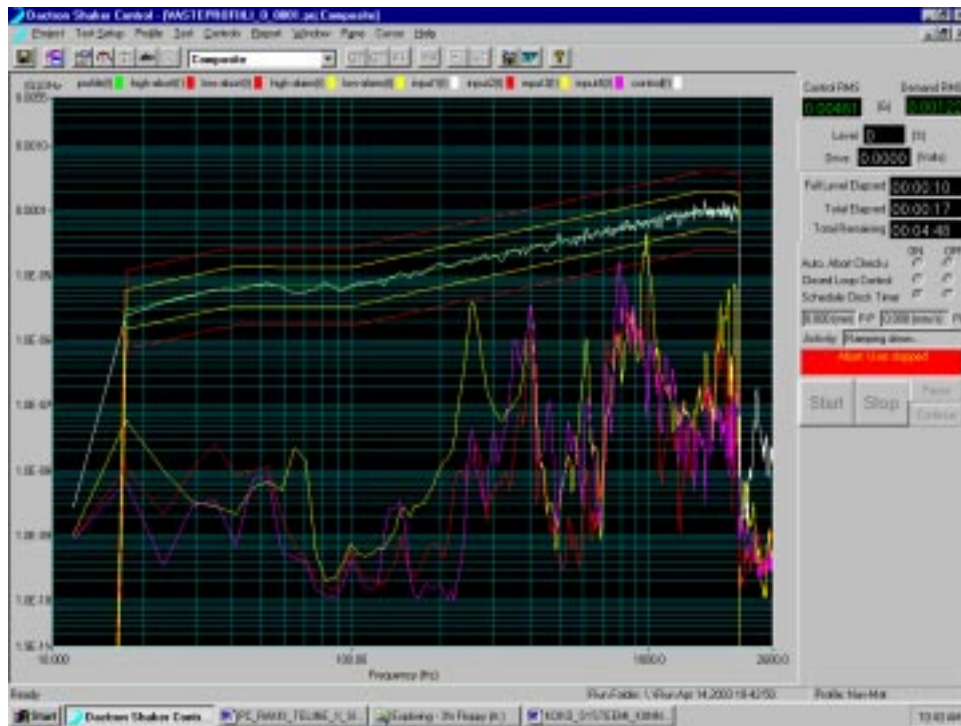
Kuva. Anturien kiinnityspaikat



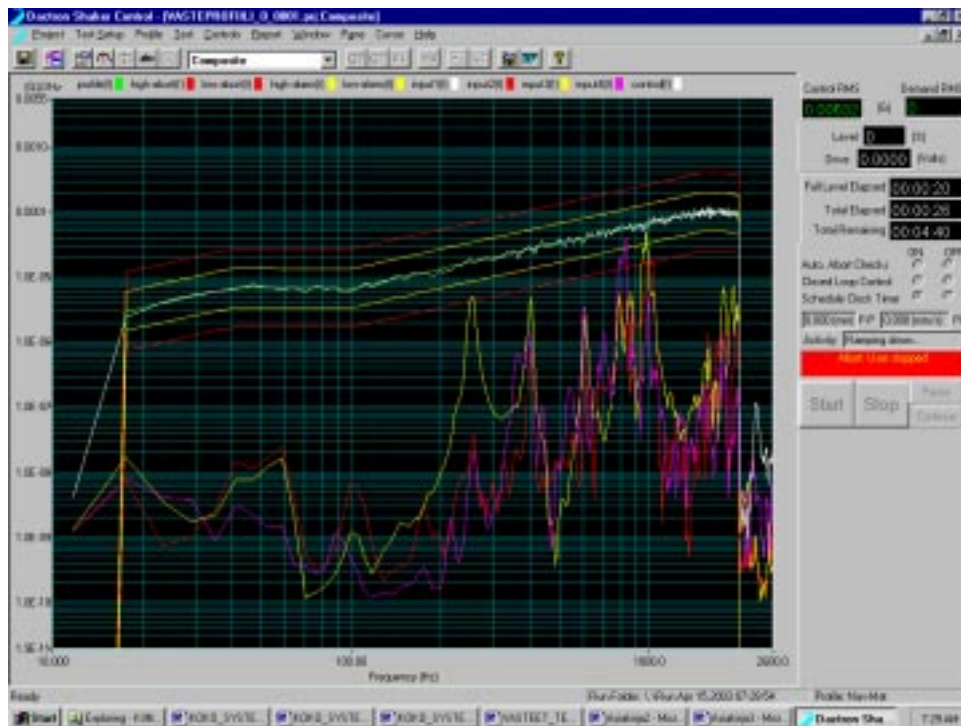
Testauskiinnittimen ja PC:n sekä räkin kiinnittimen kiinnityskohtien läheisyydestä tehty vastemittaus. Mittaus tehty kaikki asennettuna (kiinnitin, jossa räkki ja PC). Täritys PC:n etupuolelta kuvattuna leveysuunnassa (X-suunnassa). Kaikki anturit kiinnitettynä X-suuntaan: Punainen 2 PC:n ja räkin kiinnittimen oikealla sivulla (PC:n etupuolelta kuvattuna) (X), keltainen 3 vasemmalla sivulla (X), violetti 4 testauskiinnittimen vasemman puoleisella sivulla sisällä (X).



Kuva. Anturien kiinnityspaikat

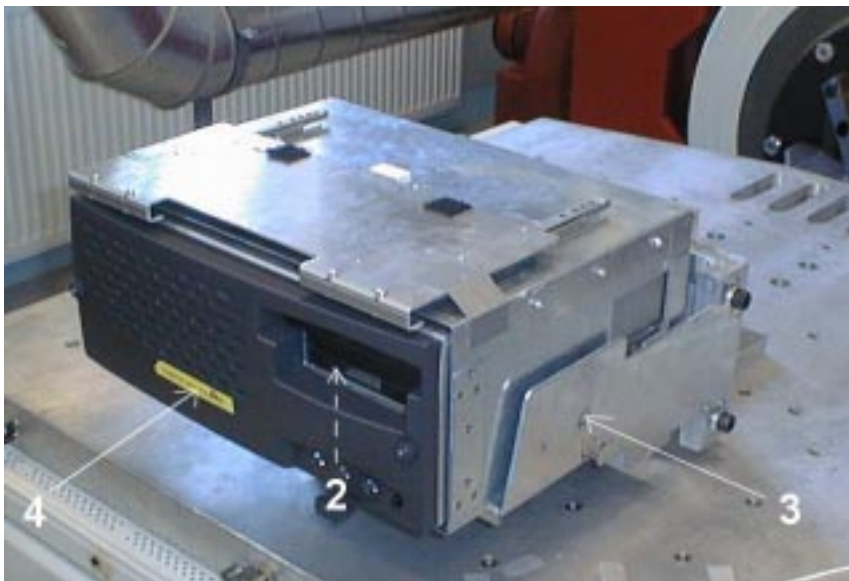


Kuva. Vasteet ennen testiä

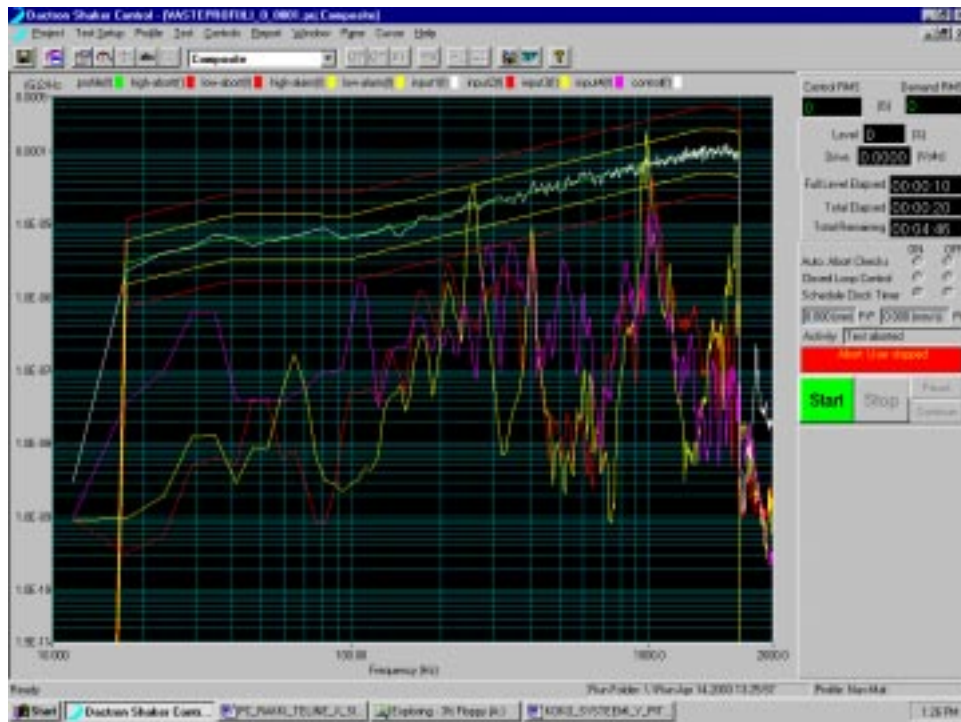


Kuva. Vasteet testin jälkeen

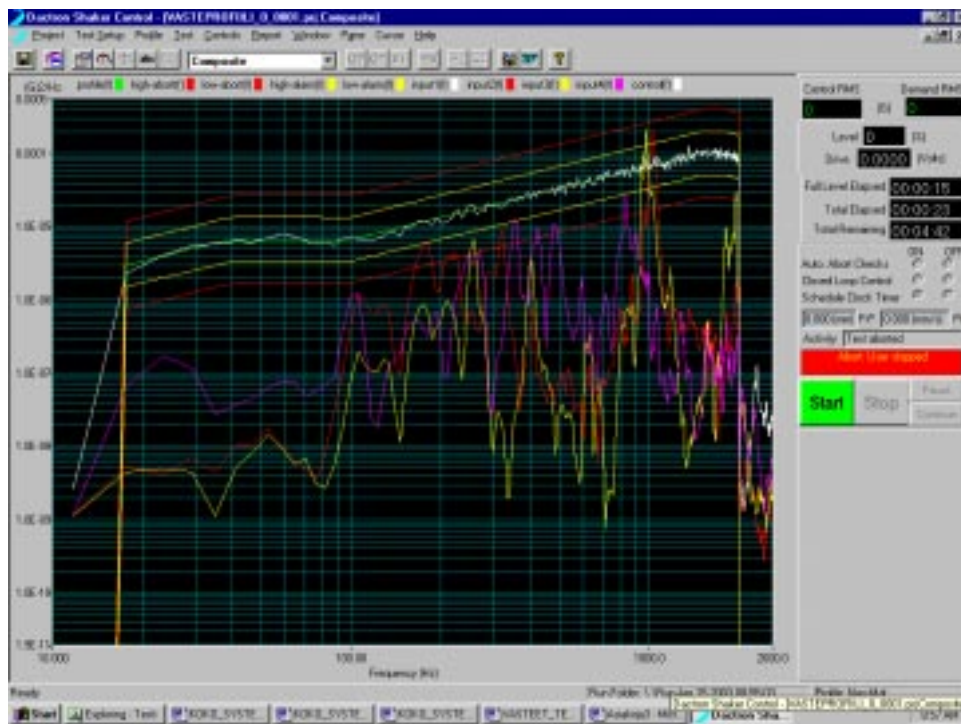
Täristus suoritettu PC:n etupuolelta kuvattuna leveyssuunnassa (X-suunnassa). Anturit kiinnitetty painopistettä vastaaville akseleille: Punainen 2 kiinni systeemin alapuolella asennustelineessä (Z-suunta), keltainen 3 räkin asennustelineen oikeaan kylkeen (PC:n etuosasta kuvattuna) (X), violetti 4 PC:n muoviseen etuosaan (Y).



Kuva. Anturien kiinnityspaikat

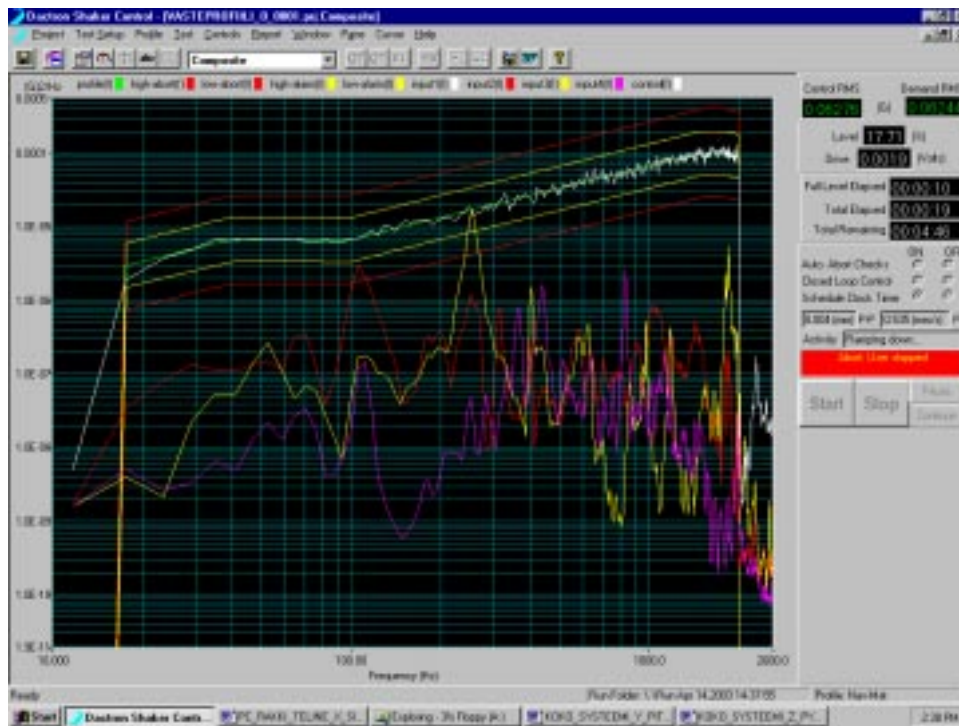


Kuva. Vasteet ennen testiä

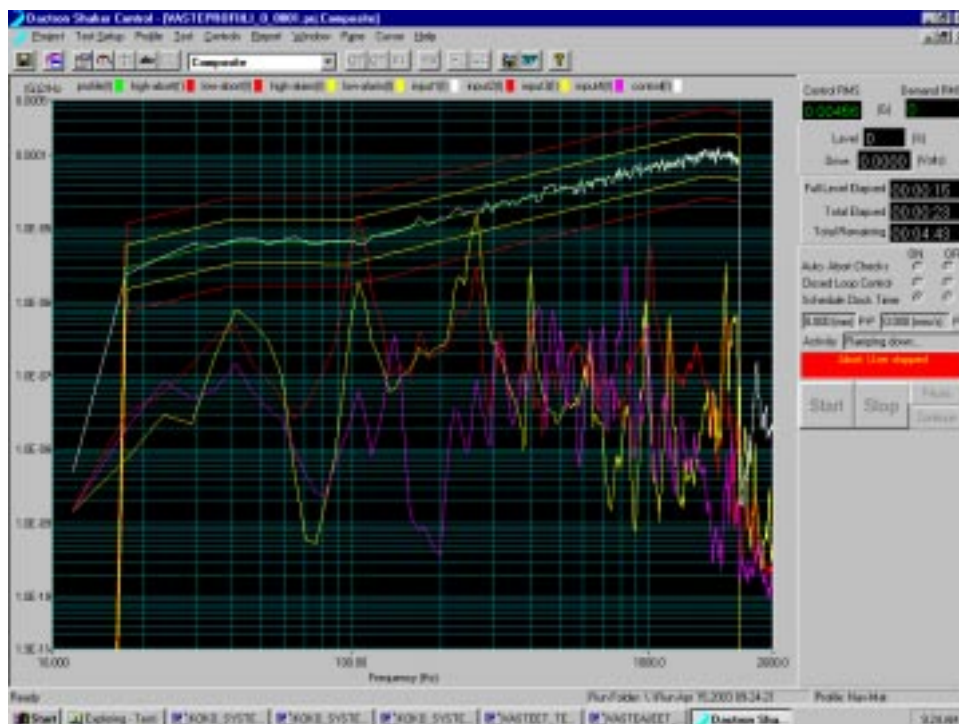


Kuva. Vasteet testin jälkeen

Täristys PC:n etupuolelta kuvattuna pituussuunnassa (Y-suunnassa). Anturien kiinnitys systeemin painopisteitä vastaavilla akseleille: Punainen 2 kiinni systeemin alapuolelle asennustelineeseen (Z), keltainen 3 räkin asennustelineen oikeaan kylkeen (PC:n etuosasta kuvattuna) (X), violetti 4 PC:n muoviseen etuosaan (Y) .

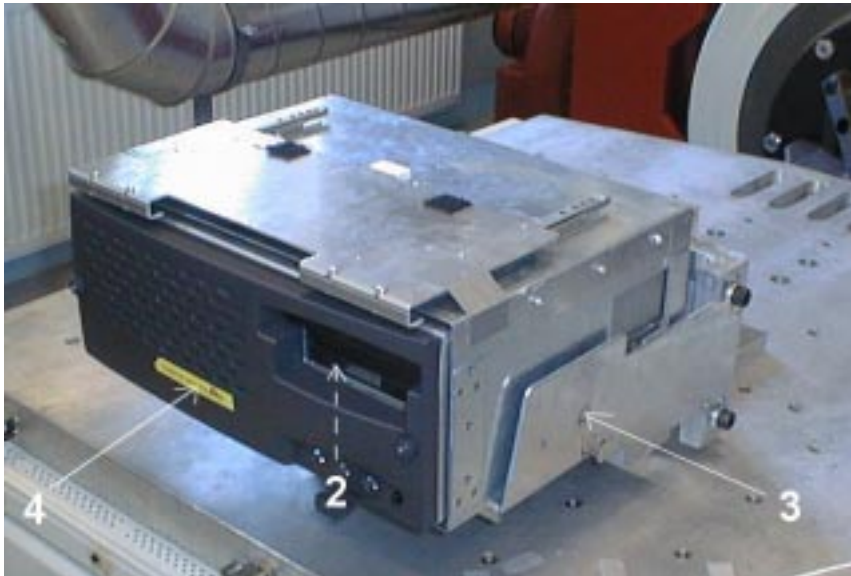


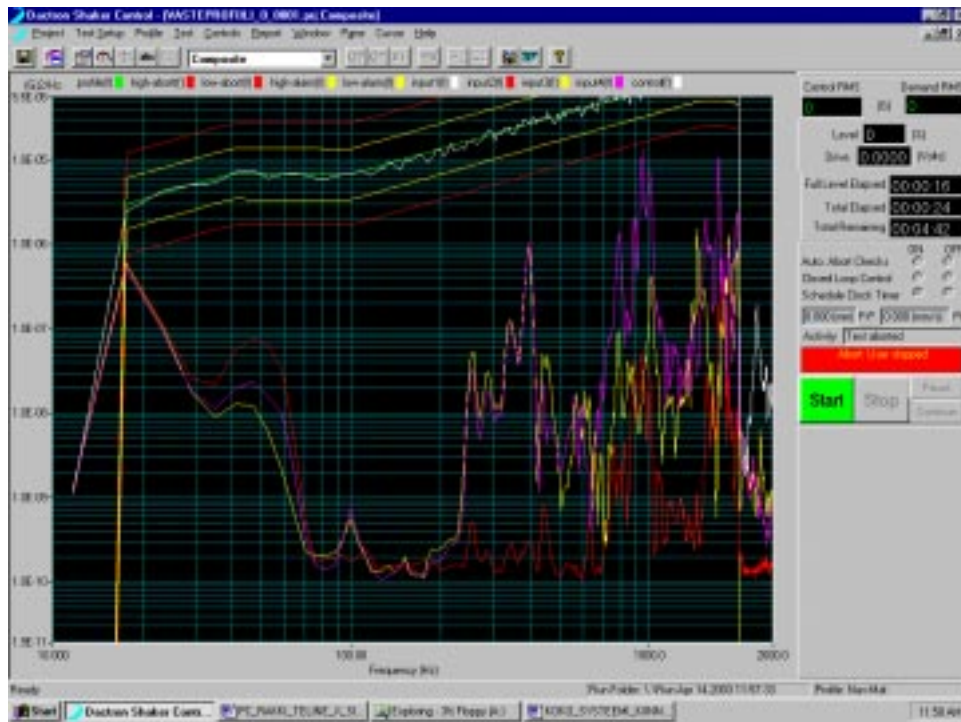
Kuva. Vasteet ennen testiä



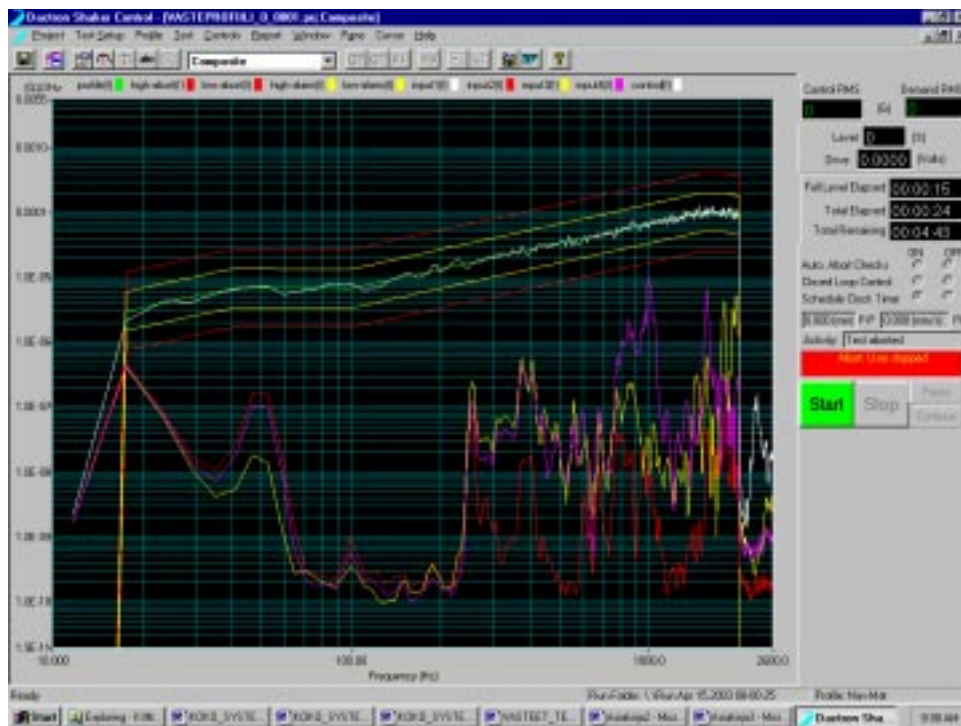
Kuva. Vasteet testin jälkeen

Täristys PC:n etupuolelta kuvattuna pystysuunnassa (Z-suunnassa). Anturien kiinnitys systeemin painopisteitä vastaavilla akseleille: Punainen 2 kiinni systeemin alapuolelle asennustelineeseen (Z), keltainen 3 räkin asennustelineen oikeaan kylkeen (PC:n etuosasta kuvattuna) (X), violetti 4 PC:n muoviseen etuosaan (Y) .



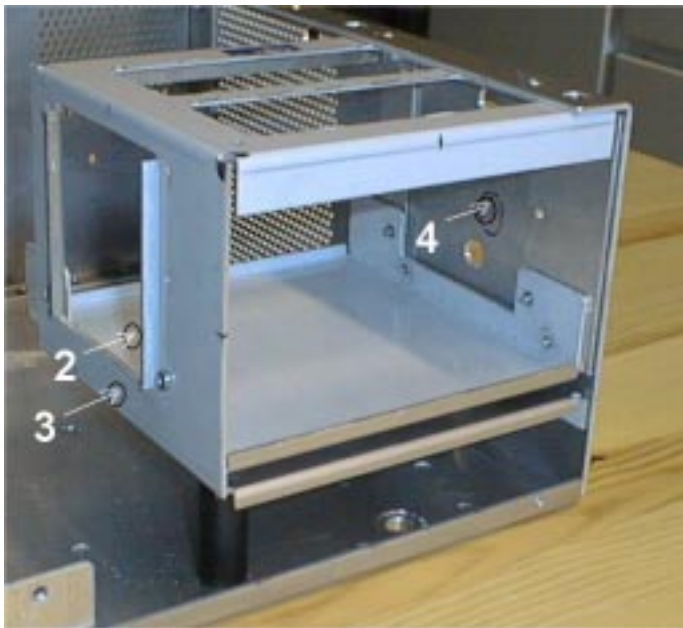


Kuva. Vasteet ennen testiä

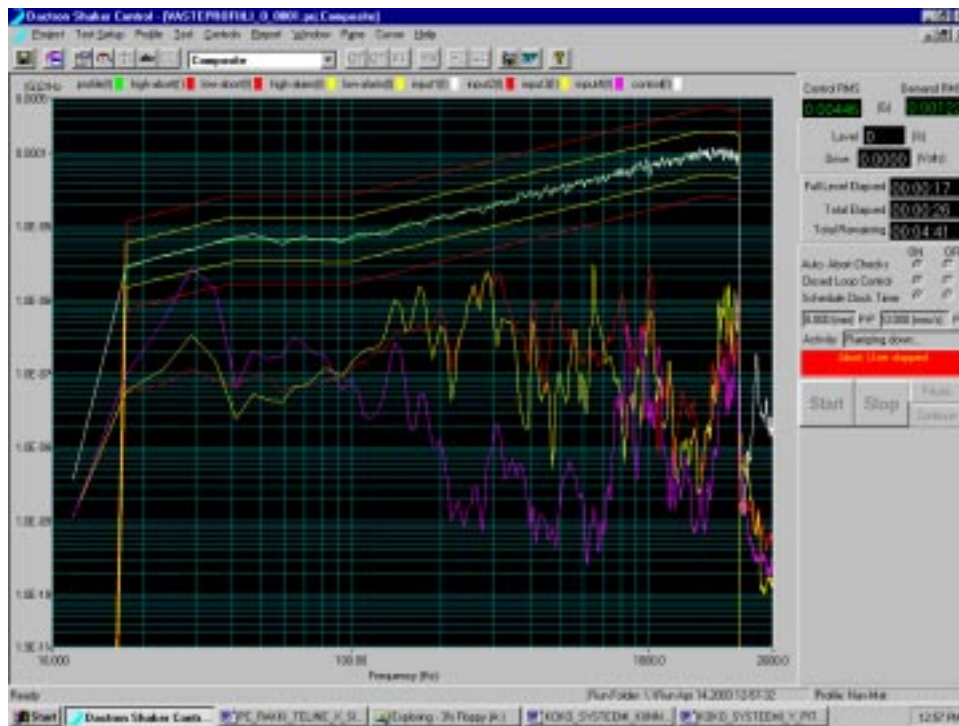


Kuva. Vasteet testin jälkeen

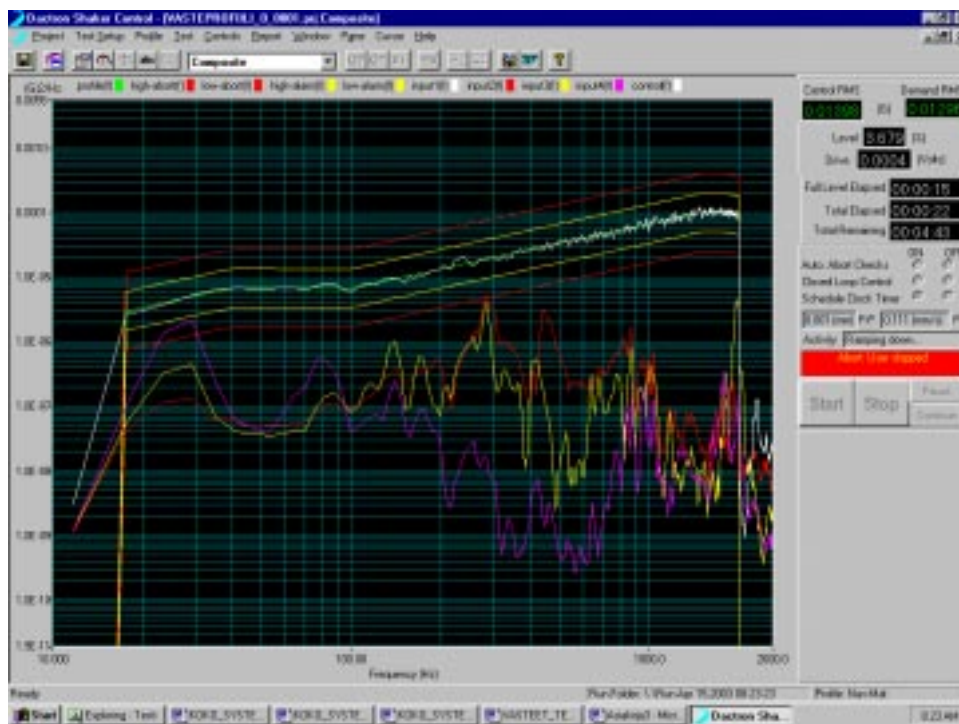
Vastemittaus. PC, asennuskehikko (CD, FD ja HD) ja kiintolevy keltaisilla ohuilla vaimentimilla. Koko systeemi kiinnitettyinä. PC:n kansi otettu pois. Täristys X-suunnassa. Anturien kiinnitys: Punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä PC:n etupuolelta kuvattuna (X), keltainen 3 asennuskehikon vasemmassa kyljessä (X), violetti 4 PC:n oikeassa kyljessä (asennuskehikon väliin jäävä alue, jossa suora kontakti PC:n kehikkoon) (X).



Kuva. Anturien kiinnityspaikat

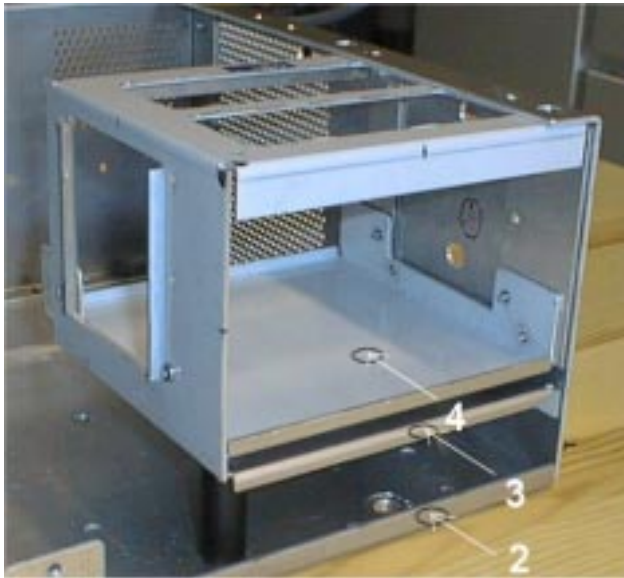


Kuva. Vasteet ennen testiä

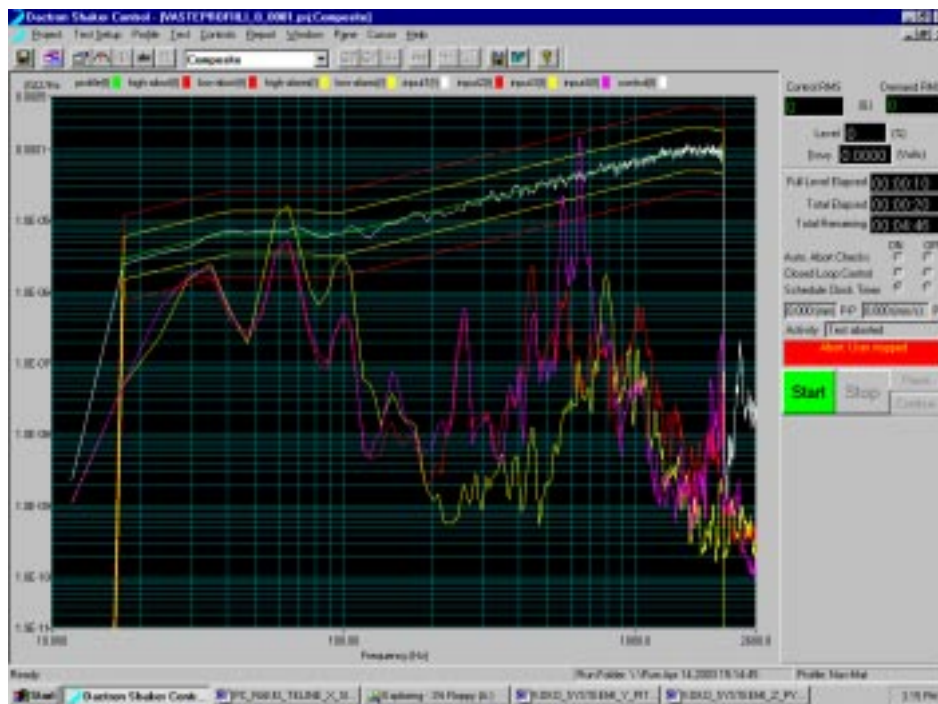


Kuva. Vasteet testin jälkeen

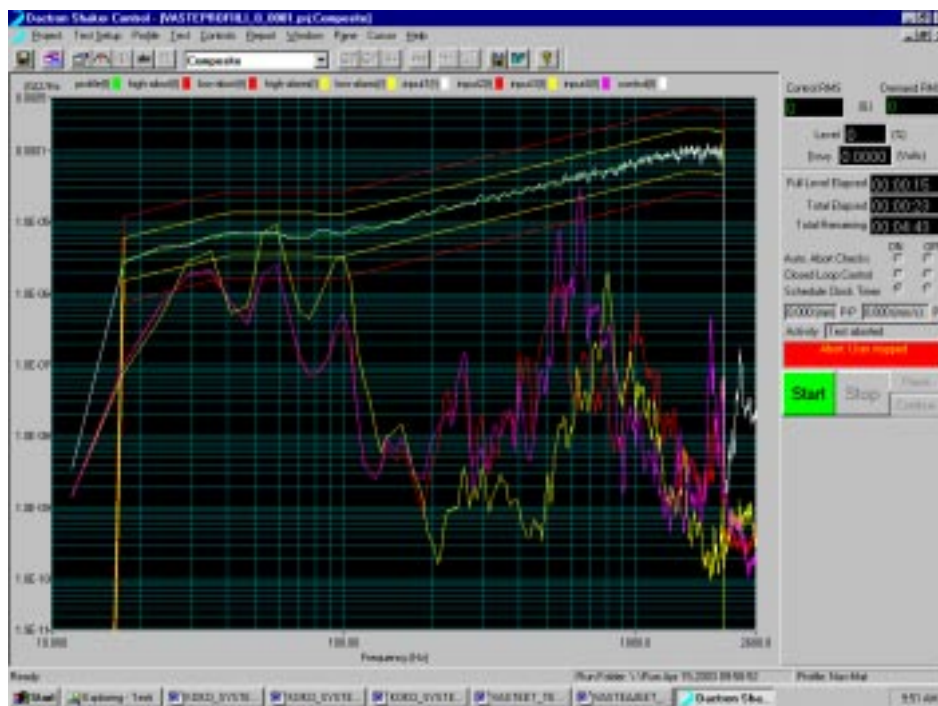
Vastemittaus. PC, asennuskehikko (CD, FD ja HD) ja kiintolevy keltaisilla ohuilla vaimentimilla. Koko systeemi kiinnitettyä. PC:n kansi otettu pois. Täristys pituussuunnassa (Y-suunnassa) kuvattuna PC:n etupuolelta. Anturien kiinnitys: Punainen 2 PC:n alaosassa (Y), keltainen 3 asennuskehikon päädyssä (Y), violetti 4 kiintolevyn päädyssä (PC:n etupuolelta kuvattuna) (Y).



Kuva. Anturien kiinnityspaikat.

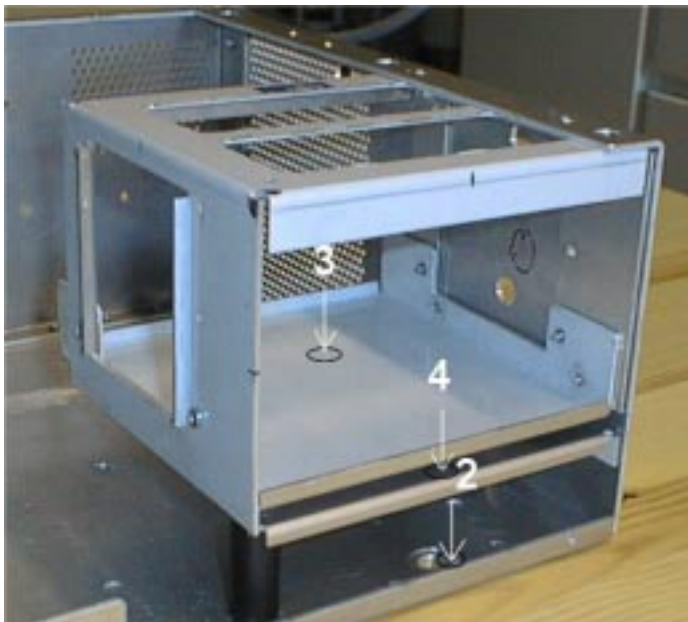


Kuva. Vasteet ennen testiä

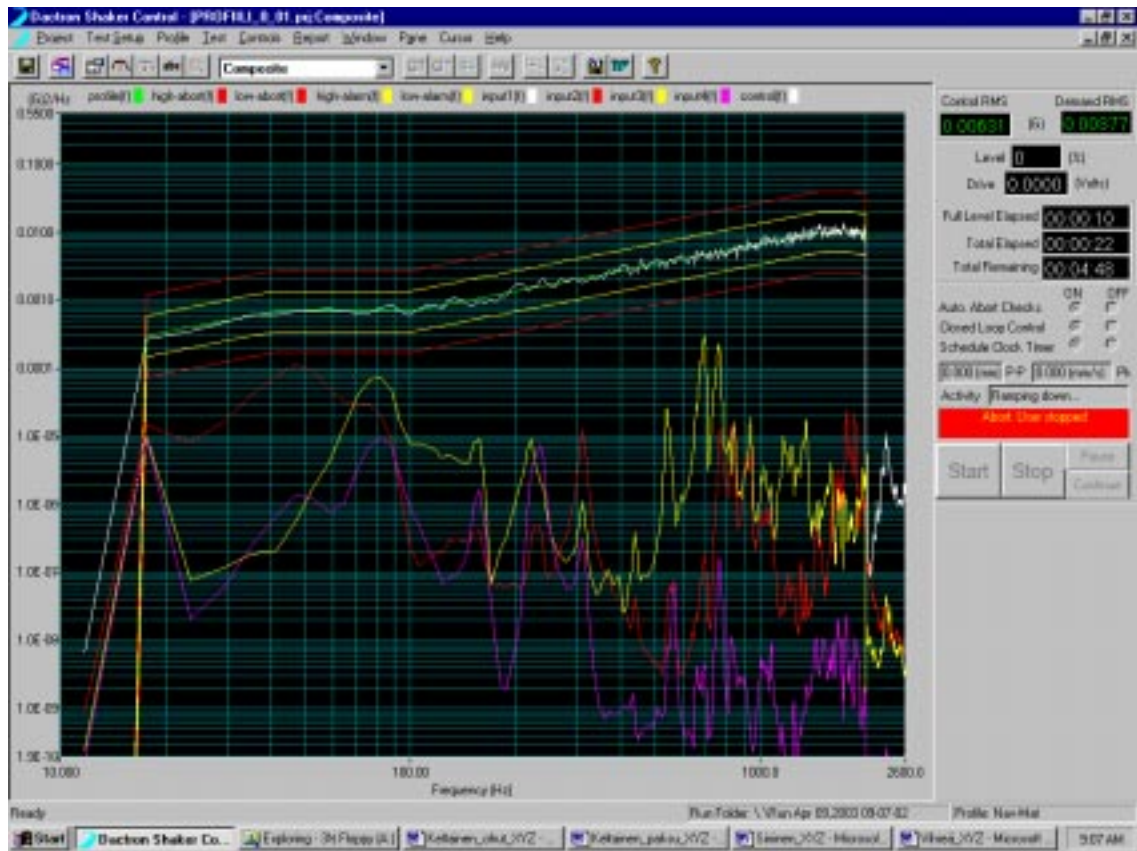


Kuva. Vasteet testin jälkeen

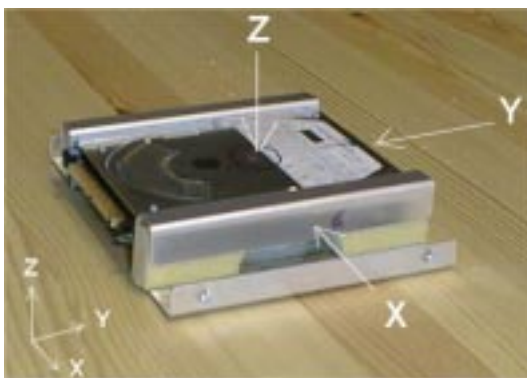
Vastemittaus, PC, asennuskehikko (CD, FD ja HD) ja kiintolevy keltaisilla ohuilla vaimentimilla. Koko systeemi kiinnitettyinä. PC:n avattuna (kuten kuvassa 18). Täristys pystysuunnassa (Z-suunnassa) kuvattuna PC:n etupuolelta. Anturien kiinnitys: Punainen 2 PC:n pohjassa (Z) asennuskehikon alla, keltainen 3 kiintolevyn päällä (PC:n etupuolelta kuvattuna) (Z) , violetti 4 PC:n asennuskehikon alaosan päällä (HD:n asennustelineen alla) (Z).



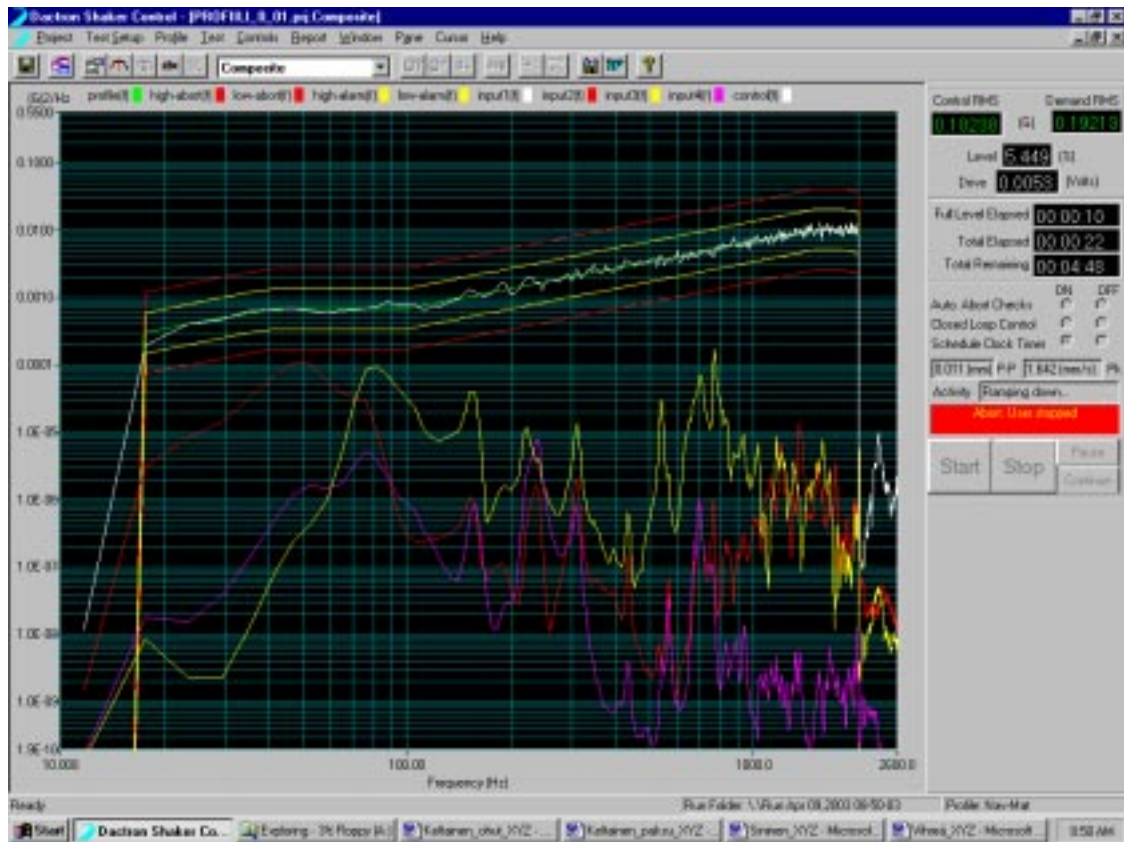
Kuva. Anturien kiinnitys



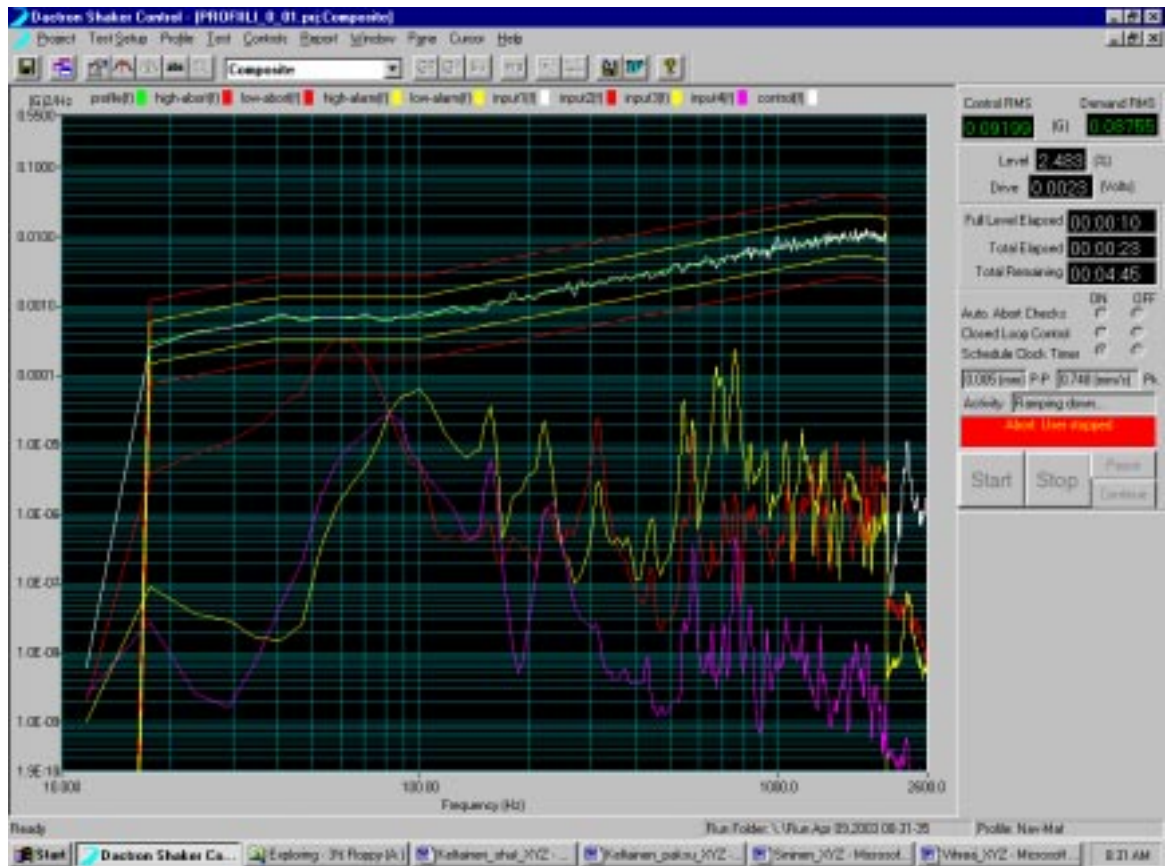
Täristys X-suunnassa. Anturien kiinnitys: Punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä (X), keltainen 3 kiintolevyn päällä (Z), violetti 4 kiintolevyn päty (Y).



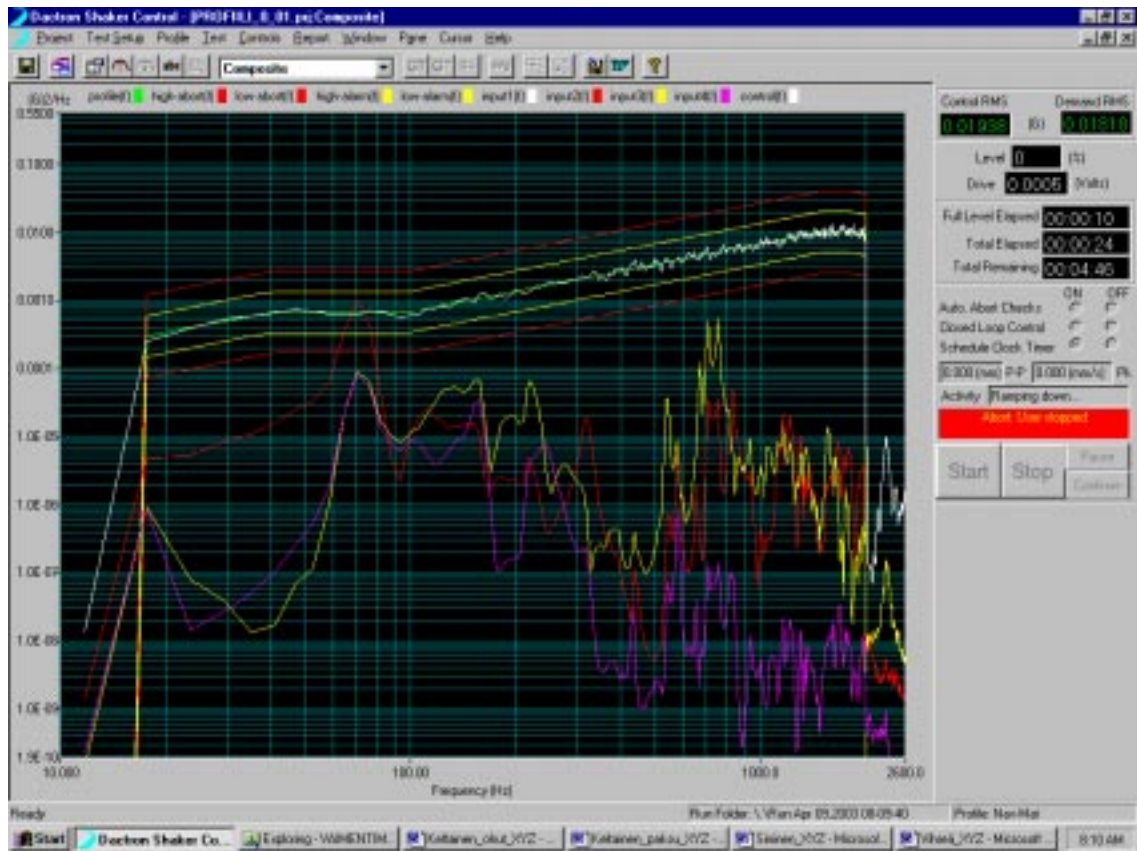
Kuva. Anturien kiinnitys



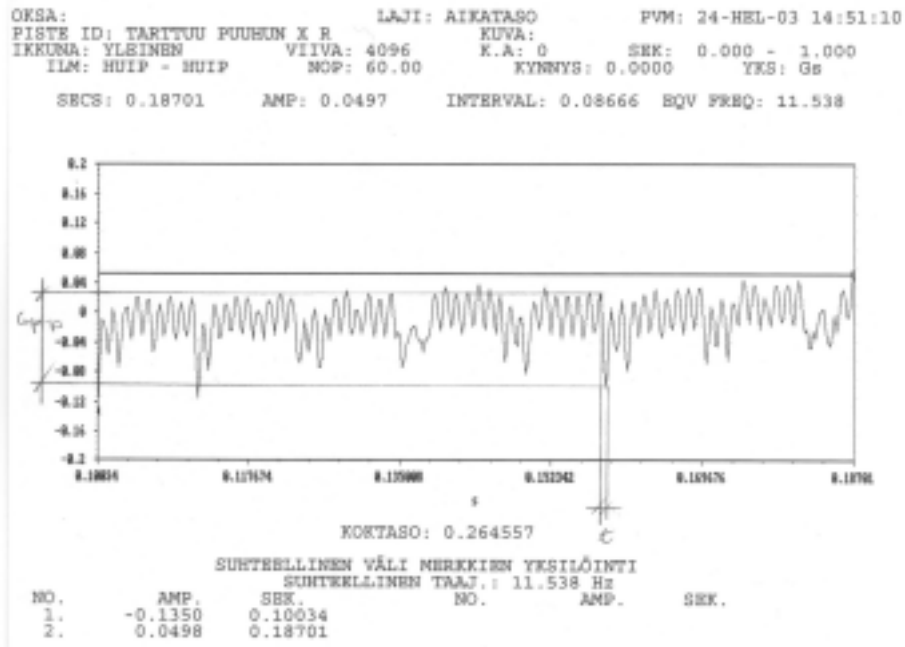
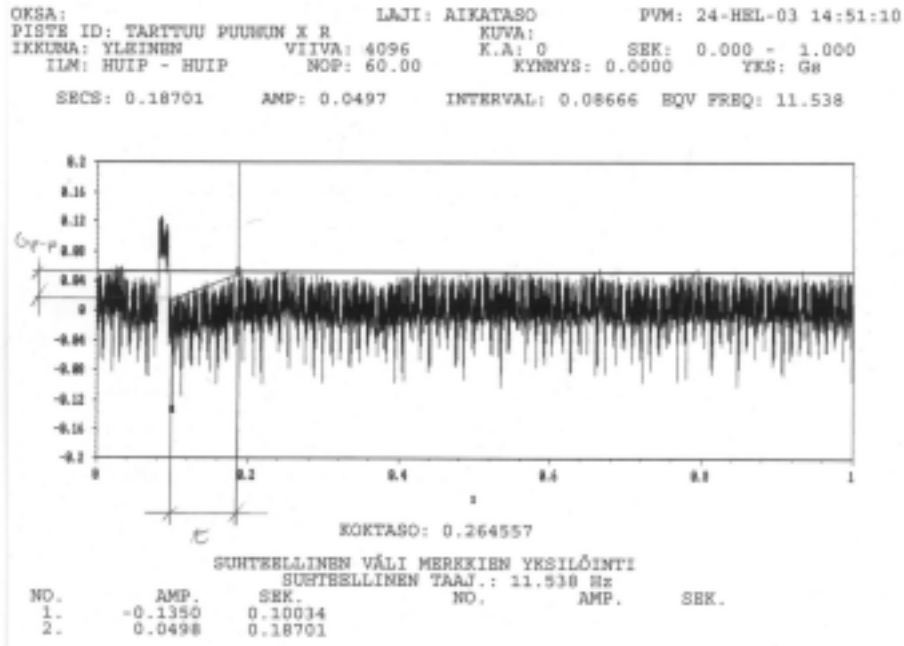
Täristys X-suunnassa. Anturien kiinnitys: Punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä (X), keltainen 3 kiintolevyn päällä (Z), violetti 4 kiintolevyn päty (Y).



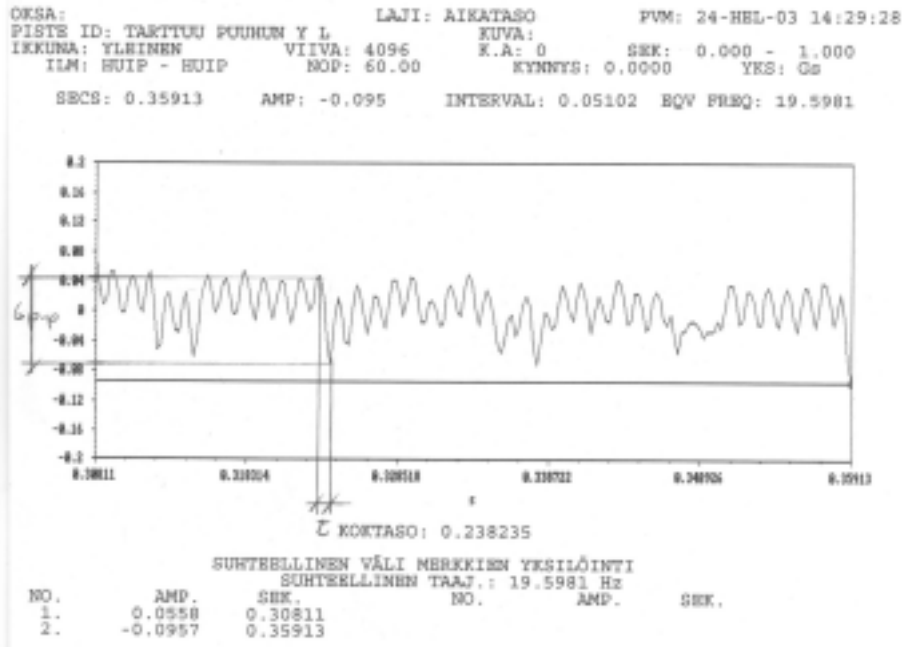
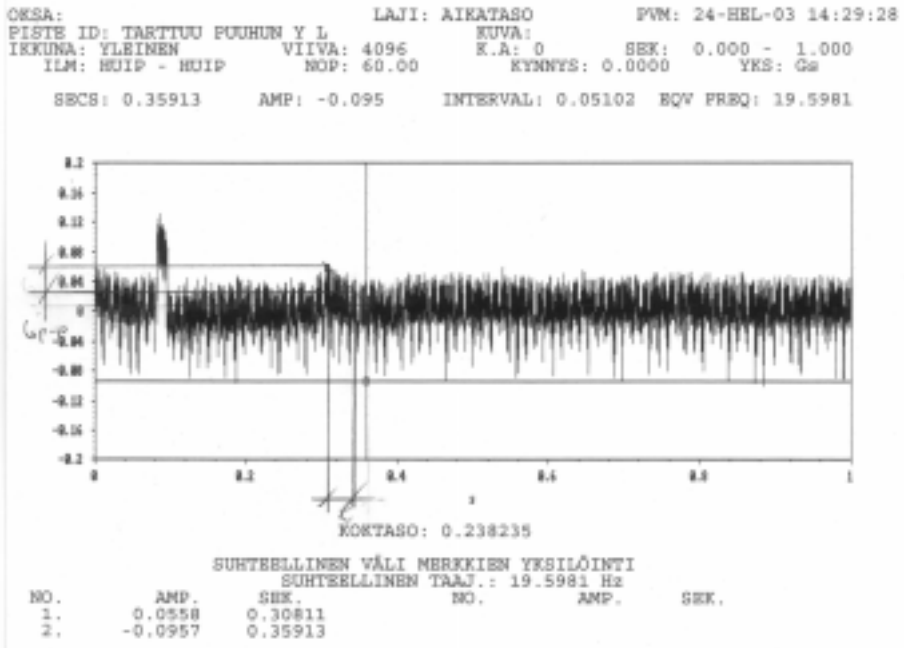
Täristys X-suunnassa. Anturien kiinnitys: Punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä (X), keltainen 3 kiintolevyn päällä (Z), violetti 4 kiintolevyn pääty (Y).



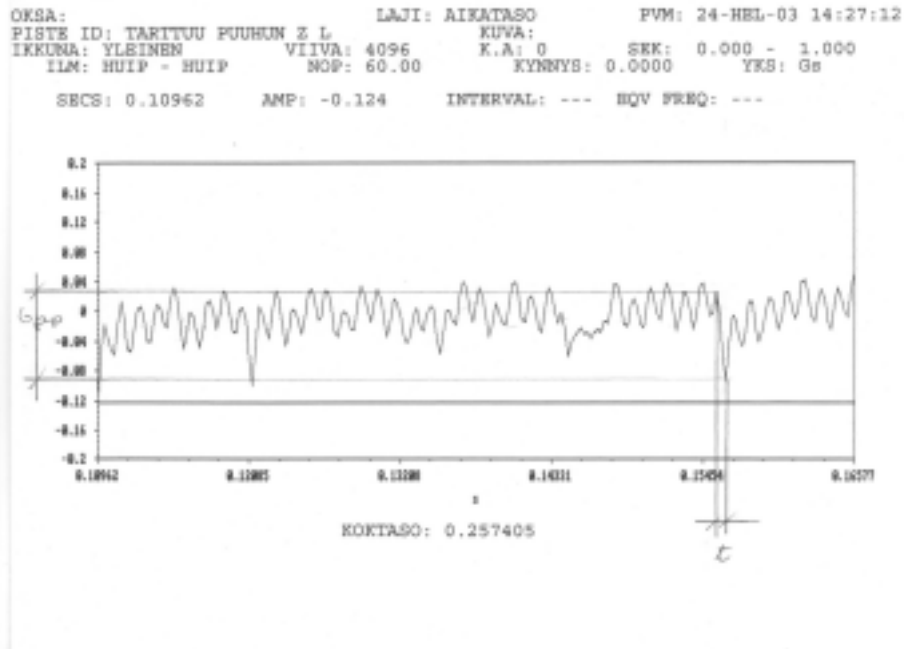
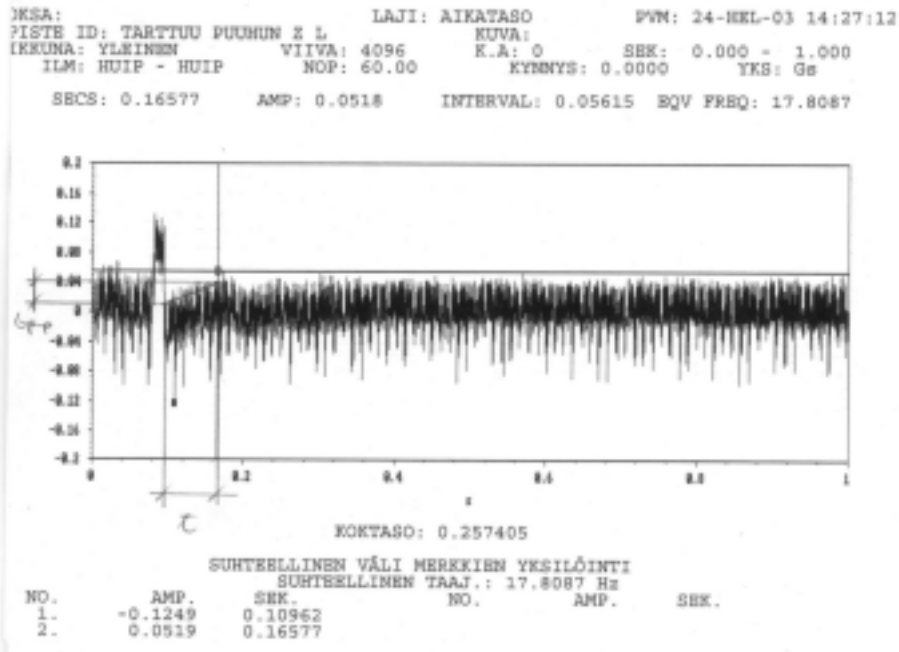
Täristys X-suunnassa. Anturien kiinnitys: Punainen 2 kiintolevyn vasemmassa kyljessä (X), keltainen 3 kiintolevyn päällä (Z), violetti 4 kiintolevyn pääty (Y).



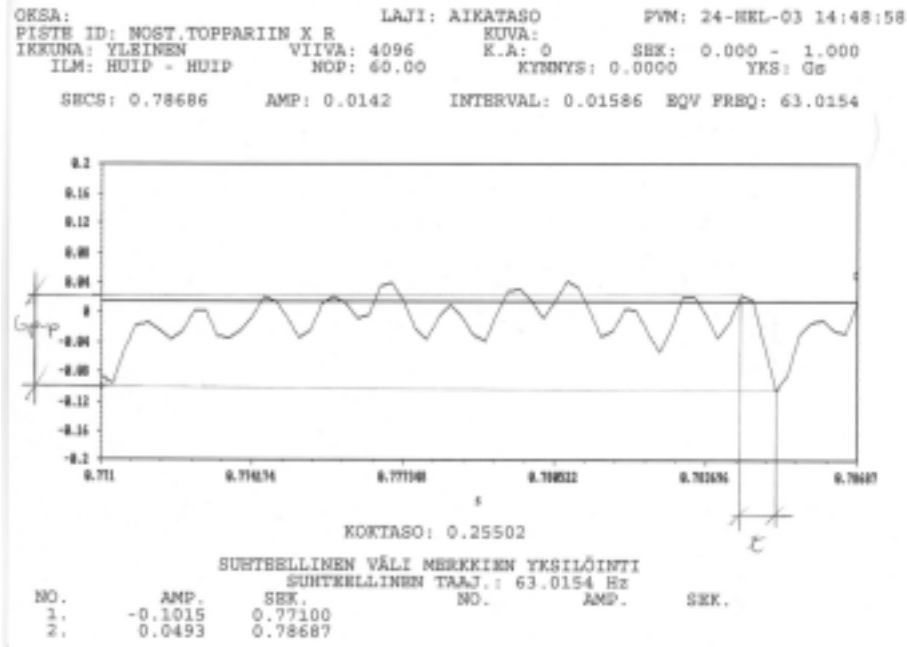
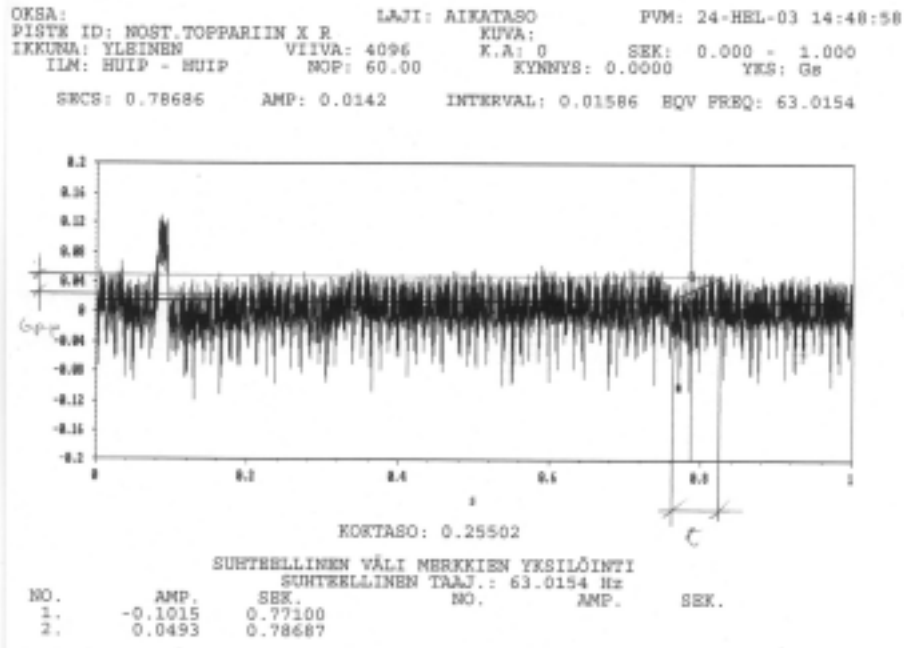
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, X-suunta



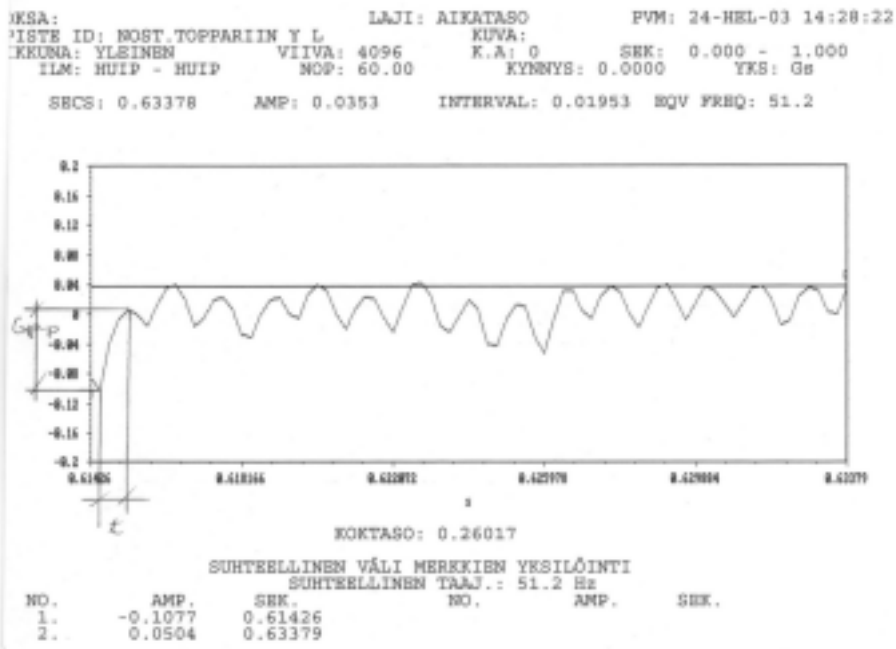
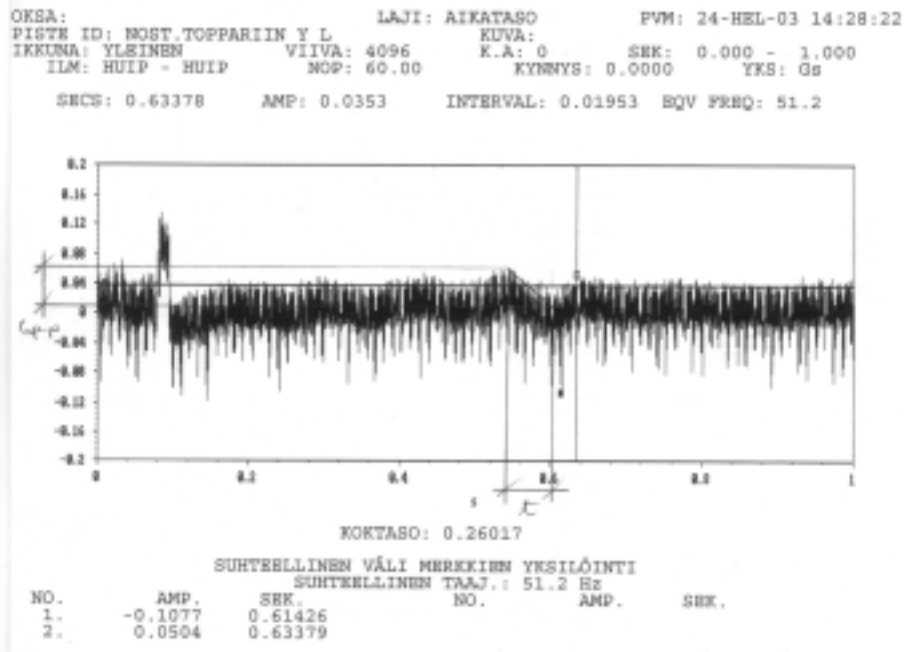
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, Y-suunta



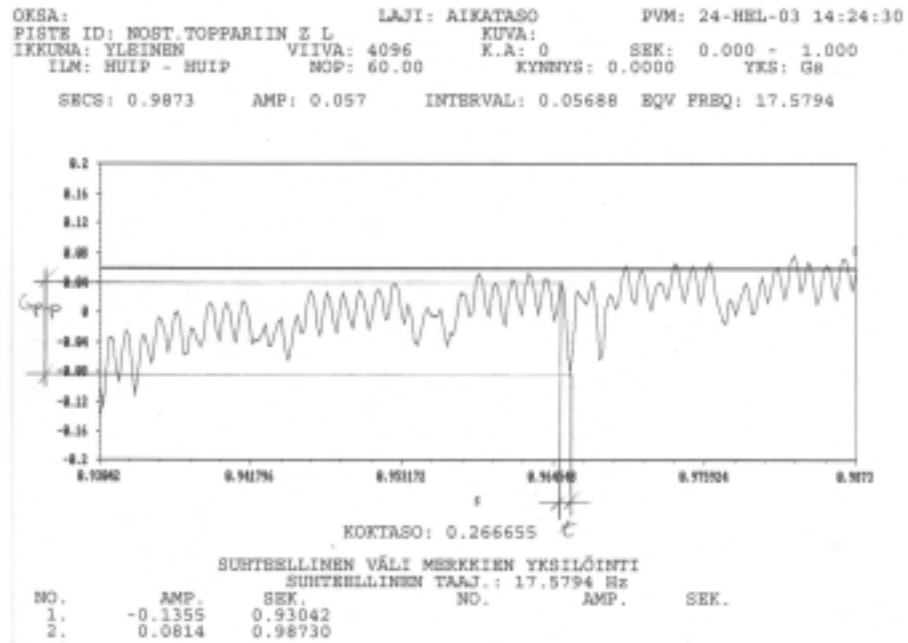
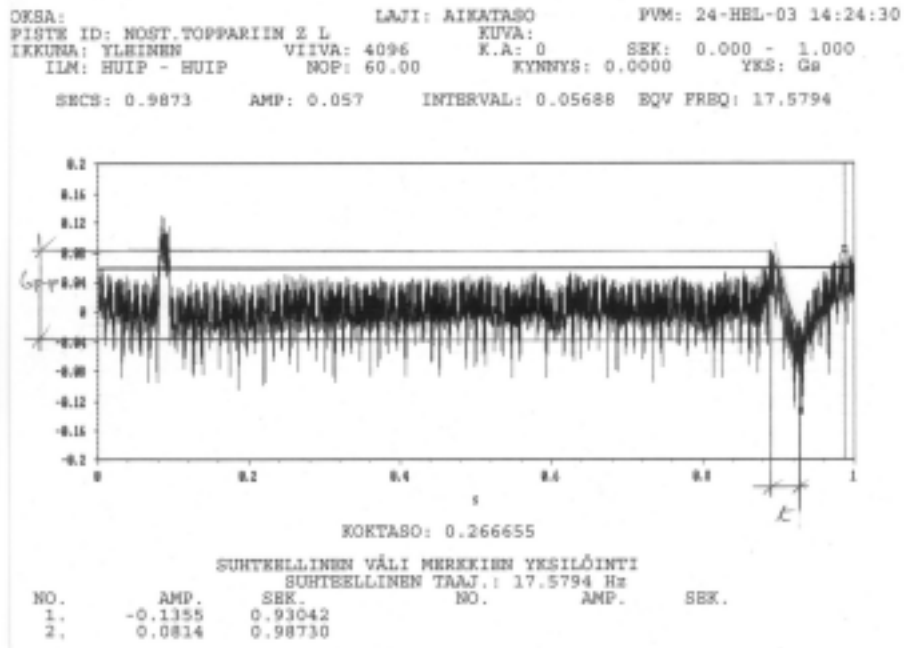
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, Z-suunta



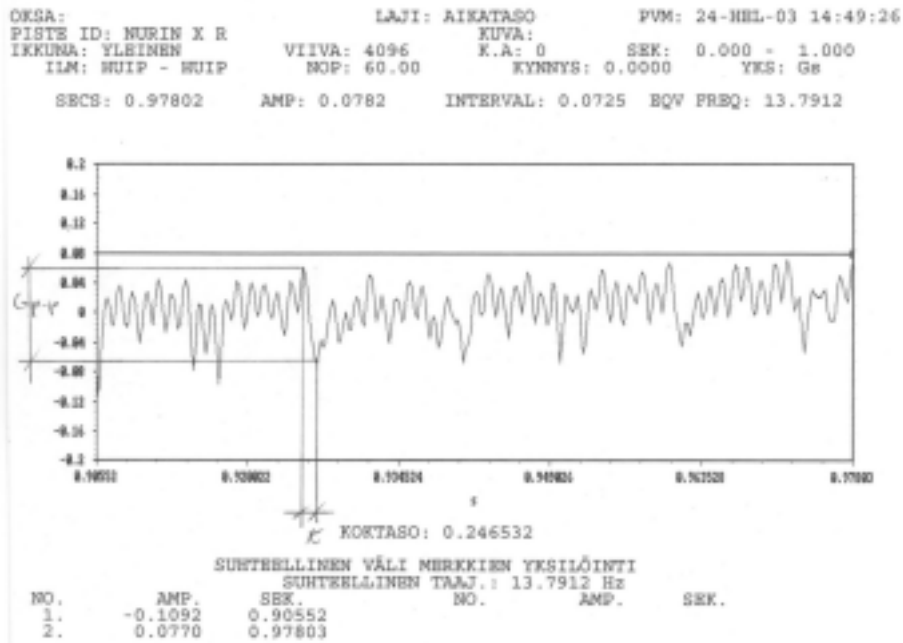
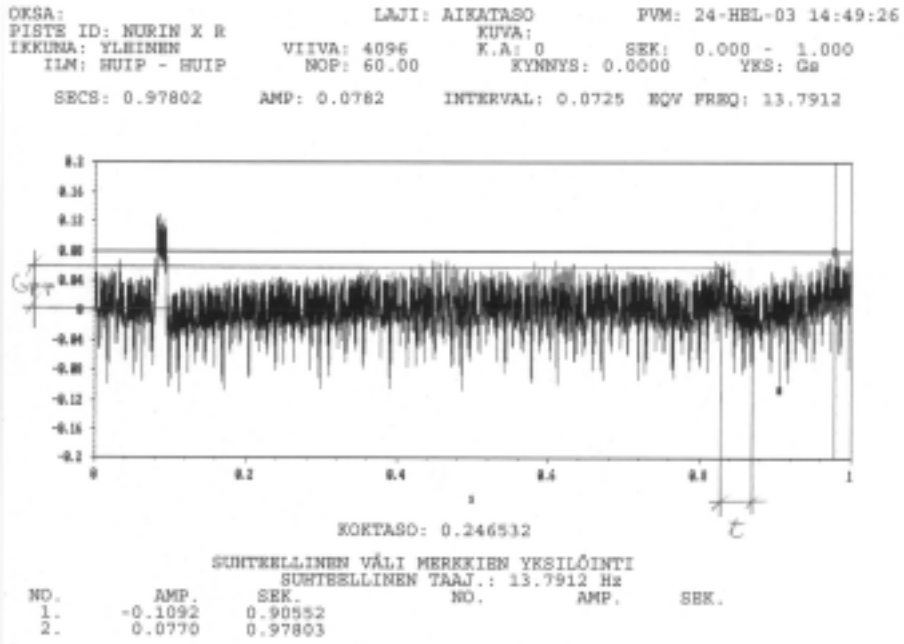
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, X-suunta



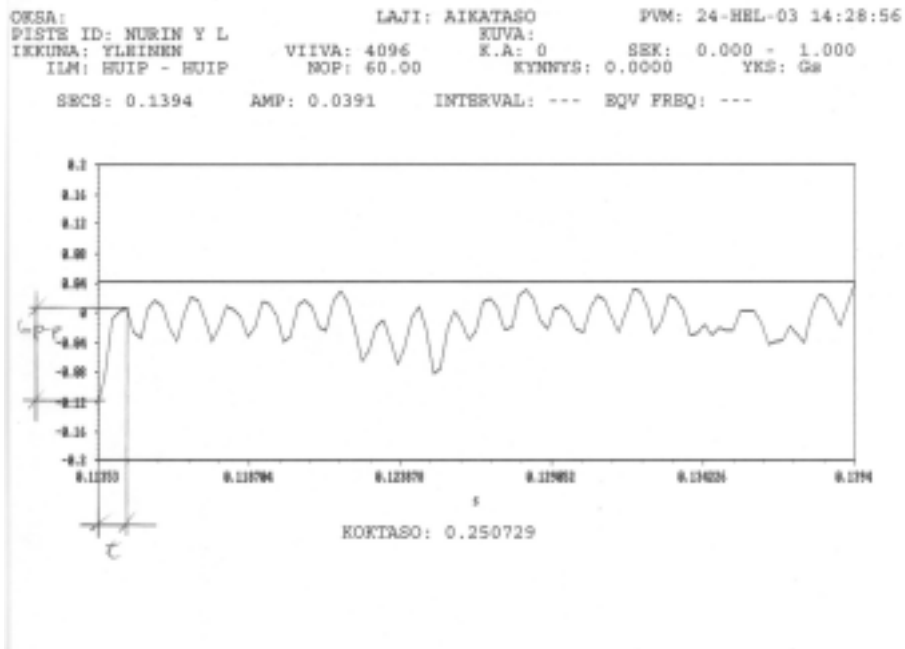
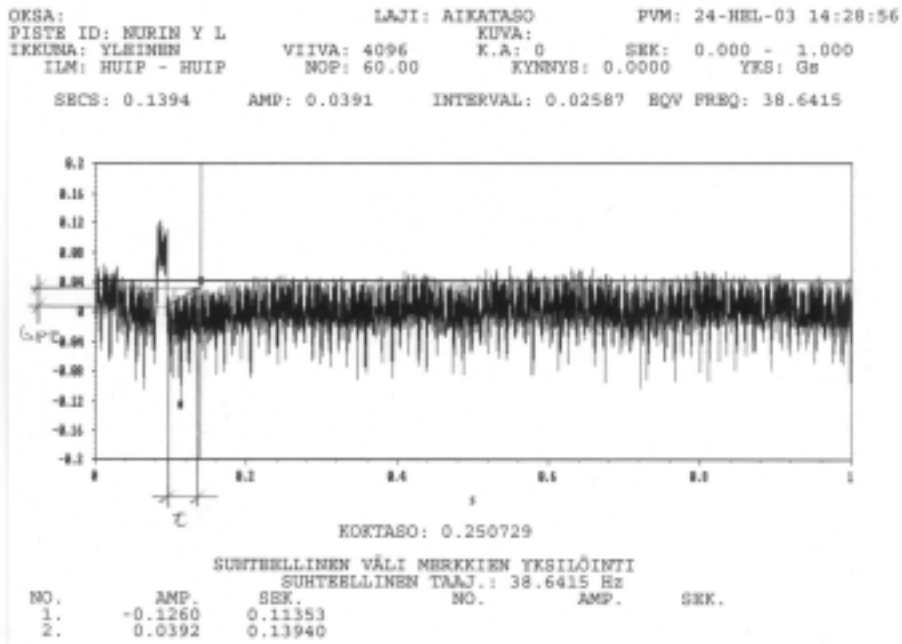
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, Y-suunta



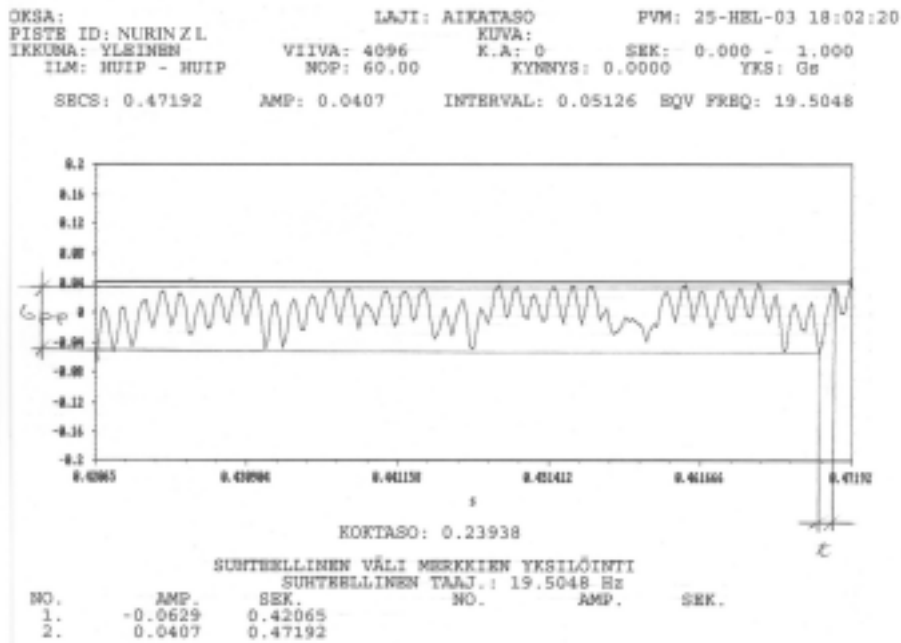
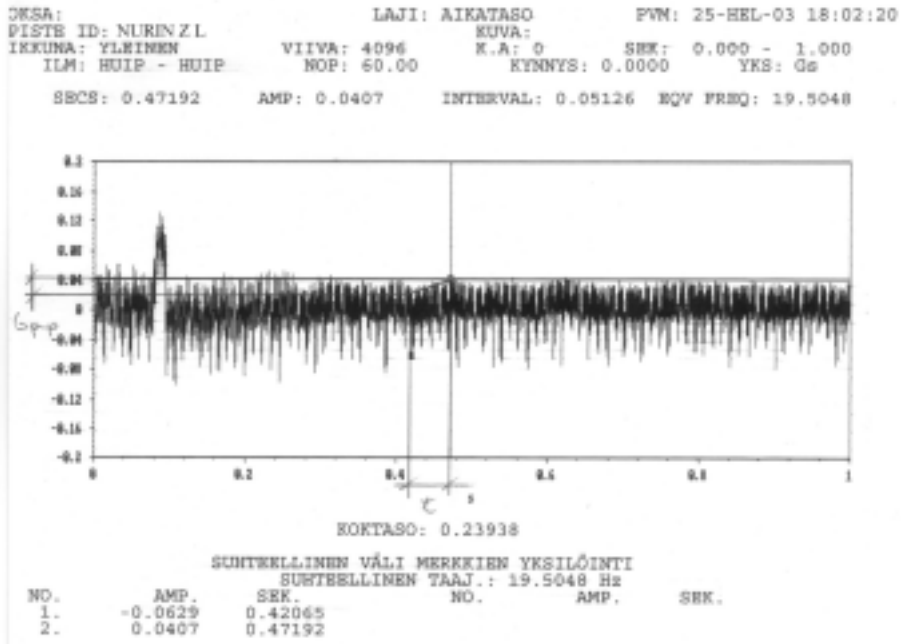
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, Z-suunta



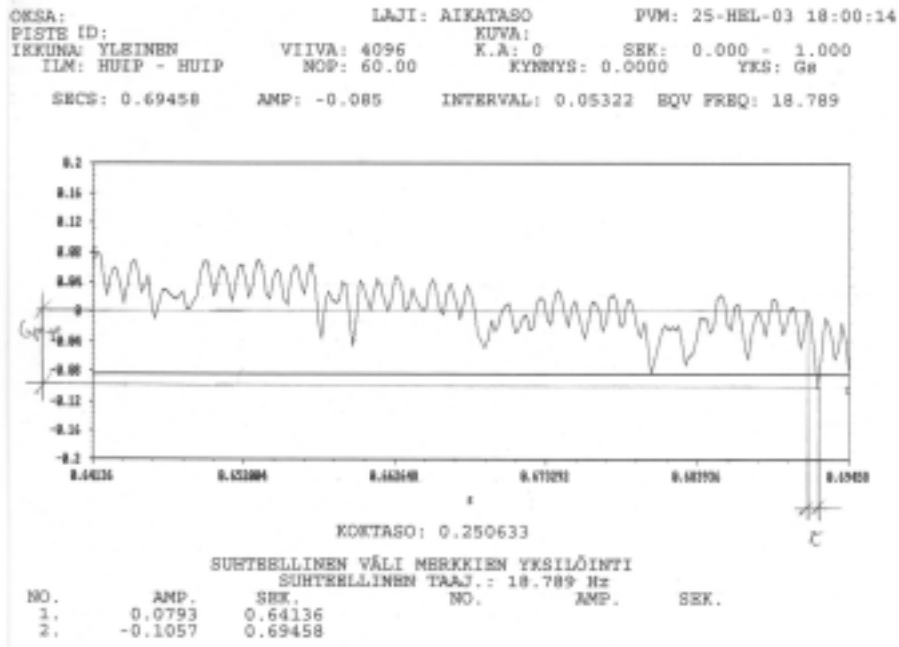
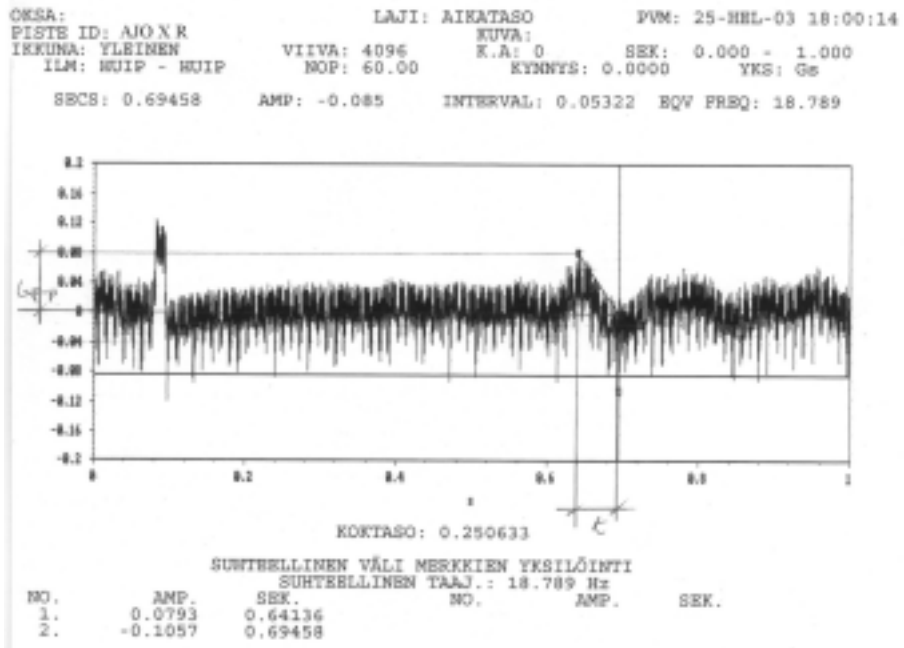
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, X-suunta



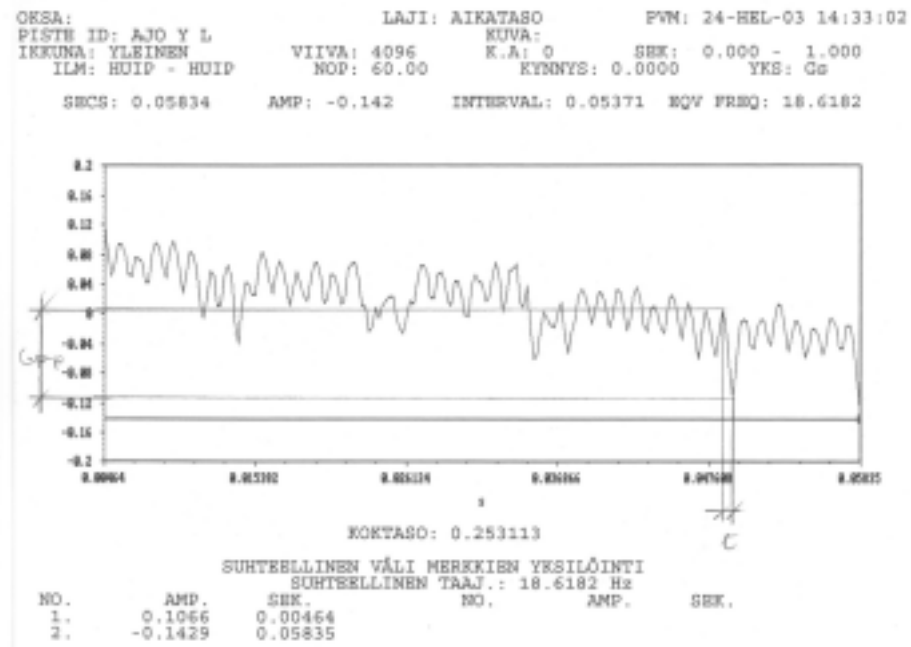
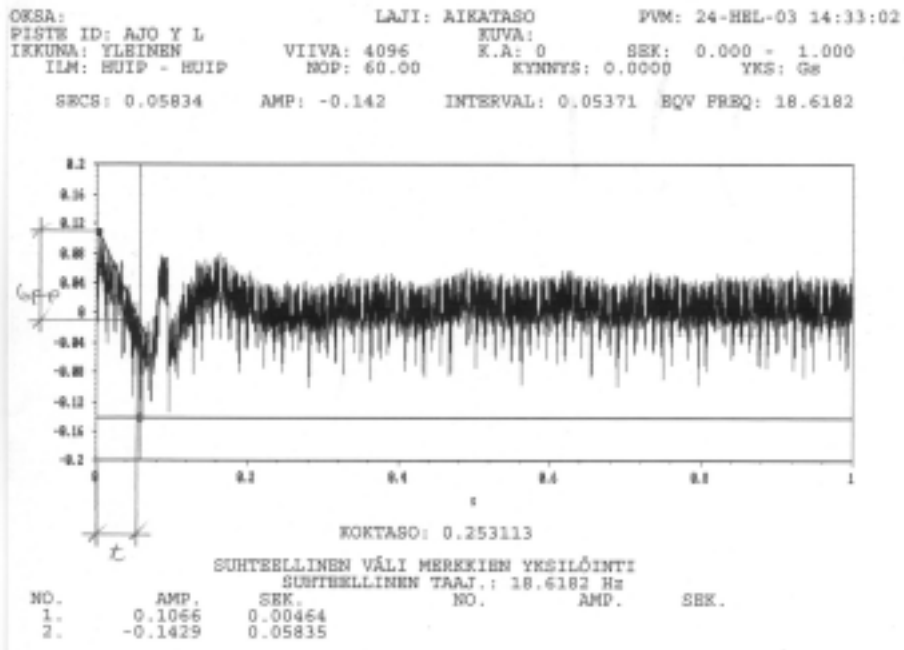
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, Y-suunta



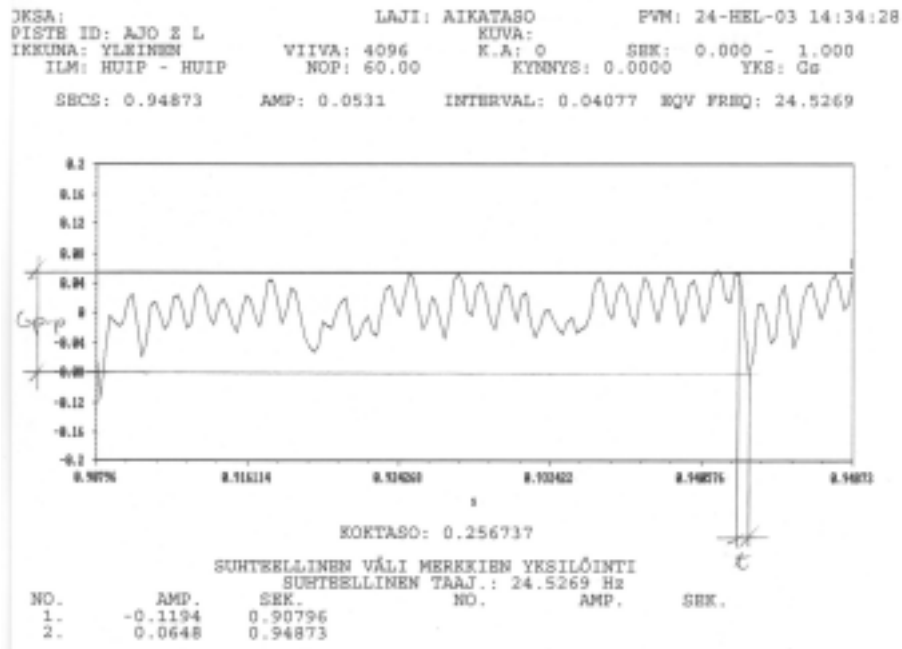
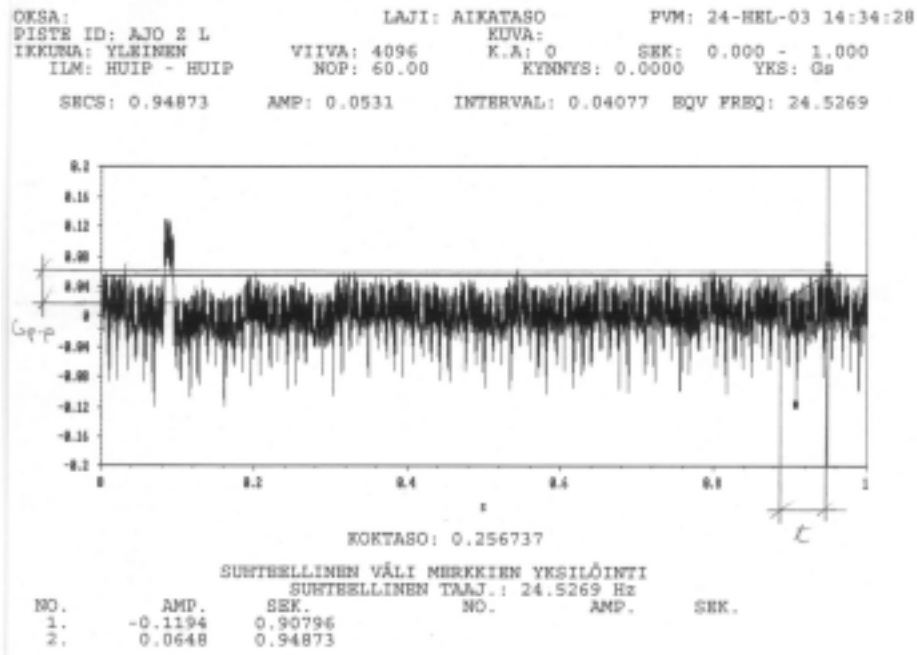
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, Z-suunta



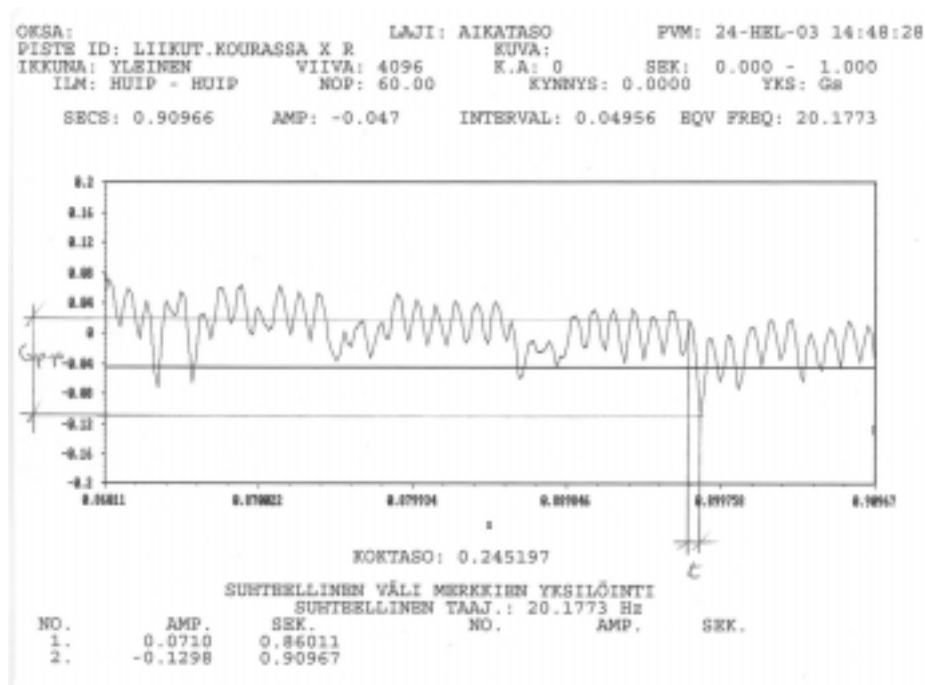
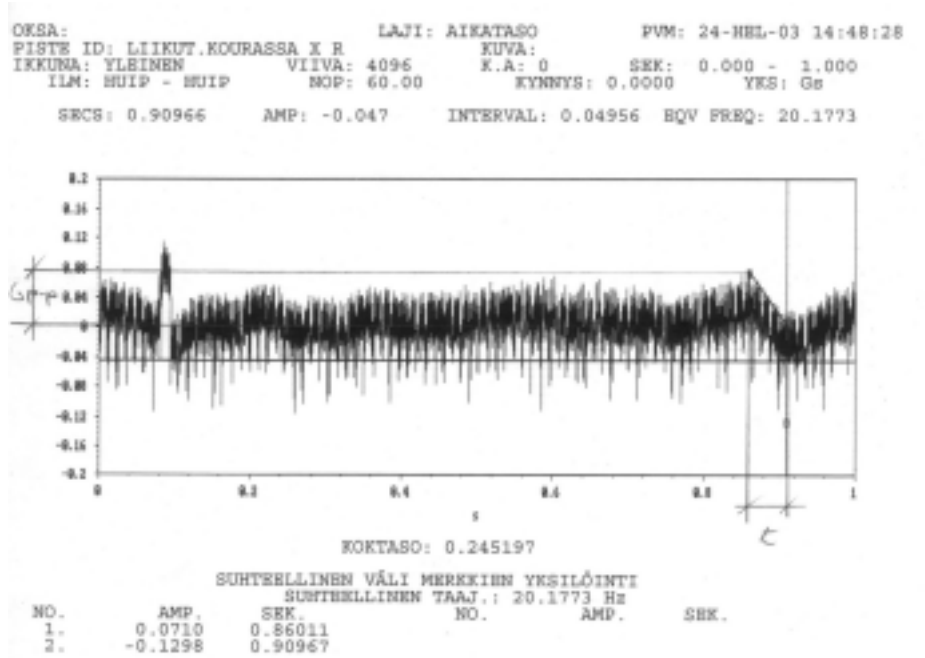
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, X-suunta



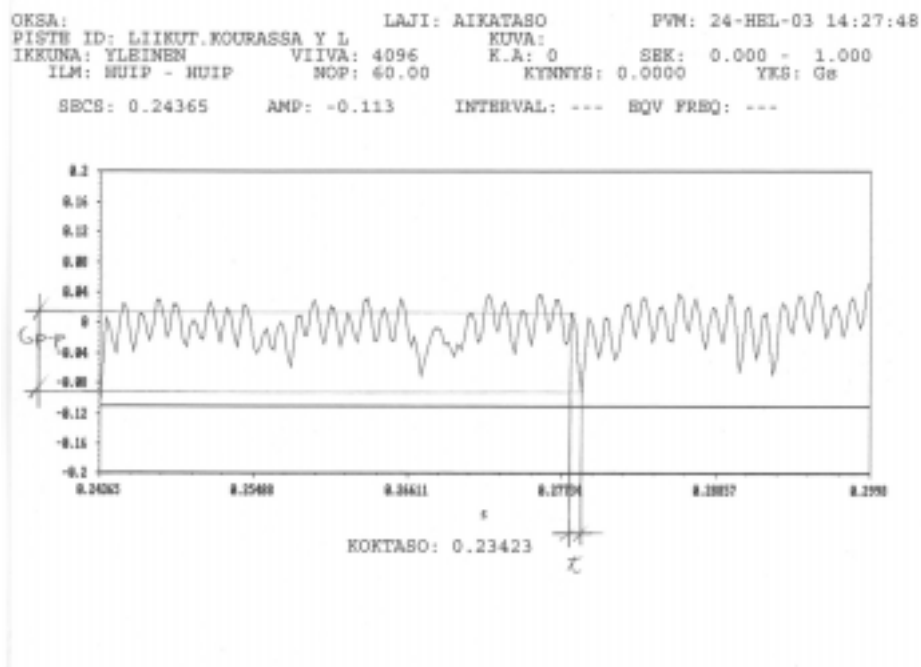
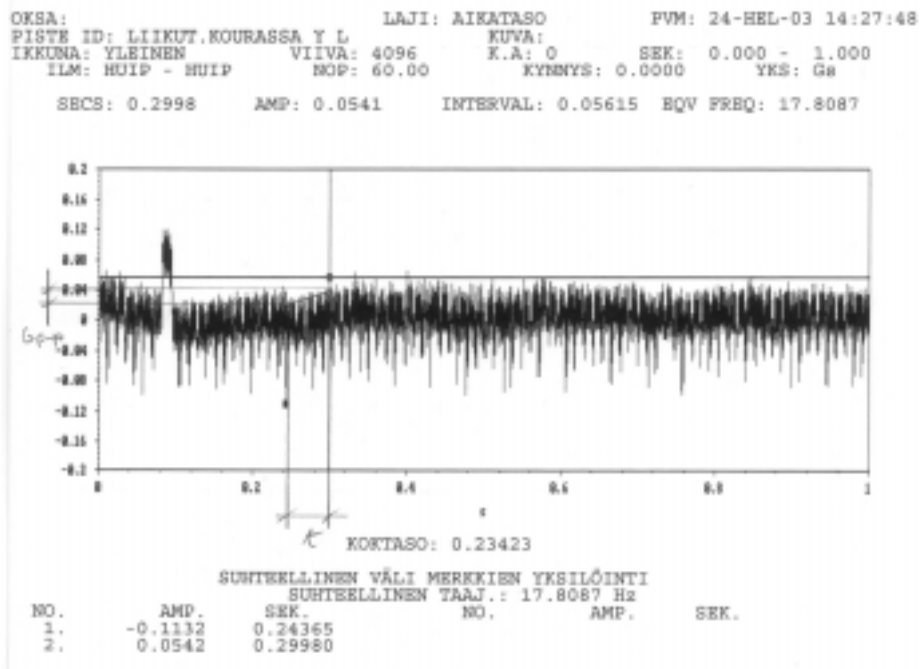
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, Y-suunta



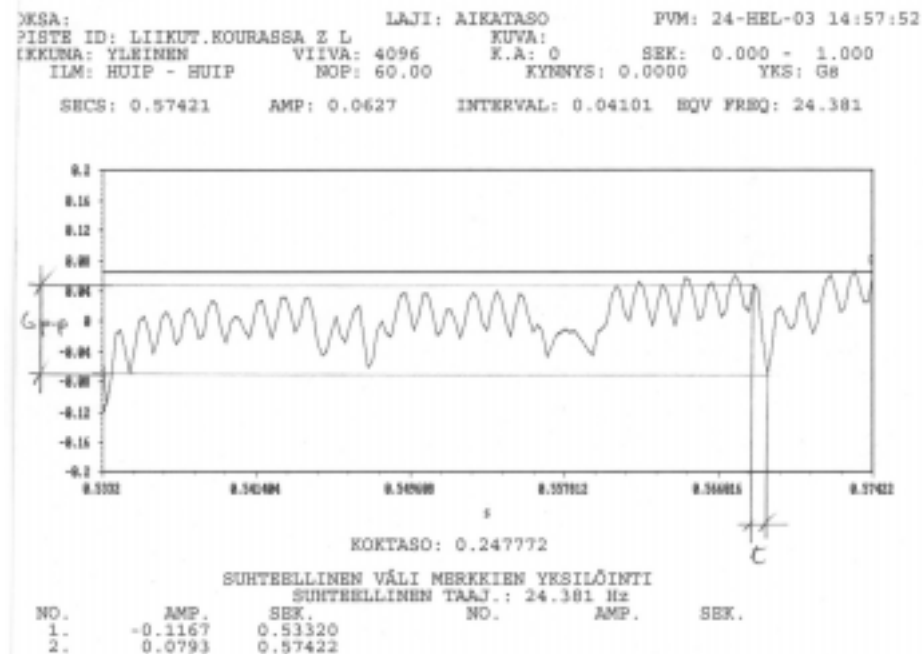
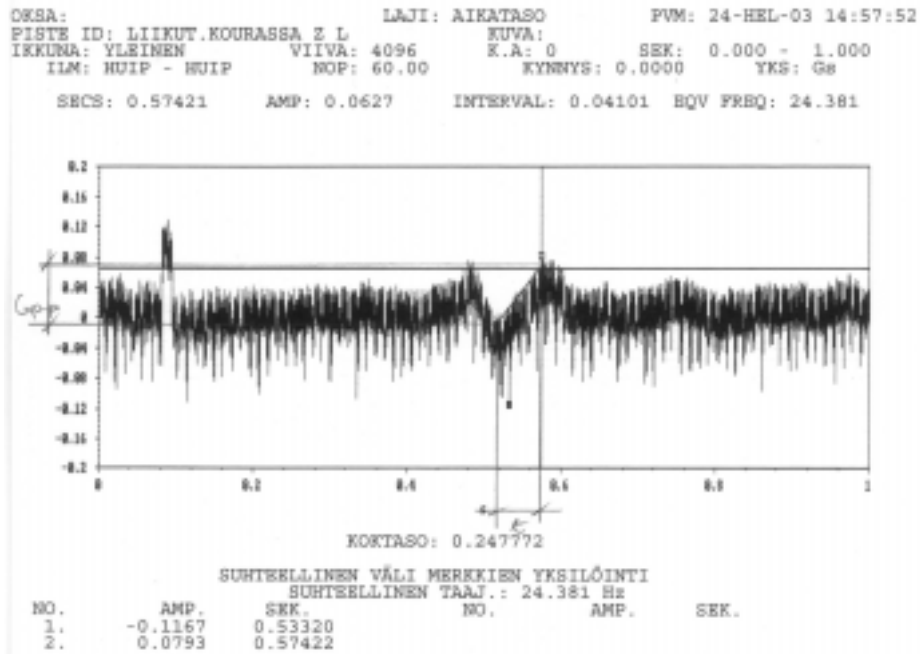
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, Z-suunta



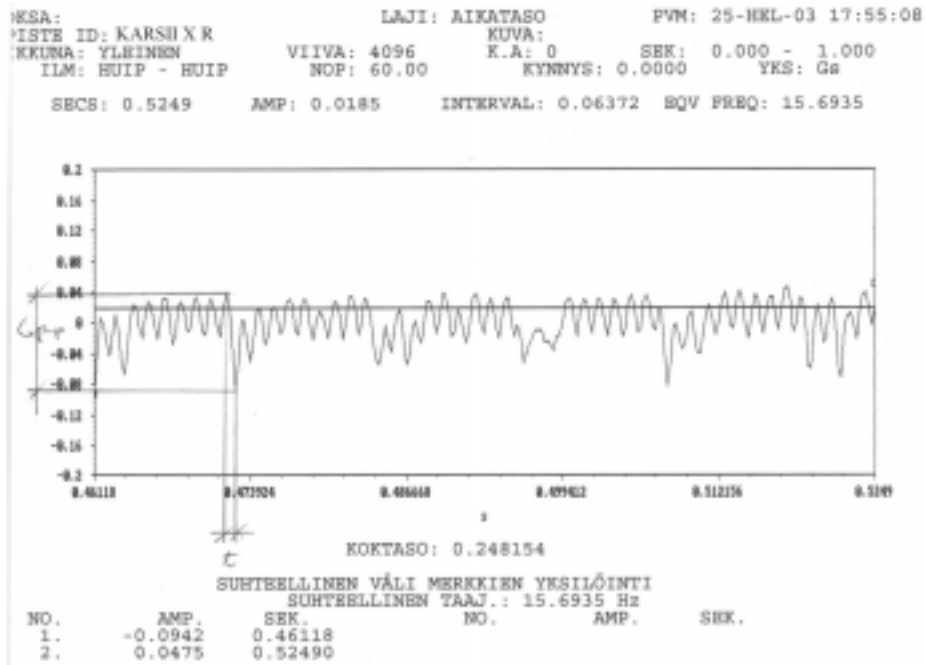
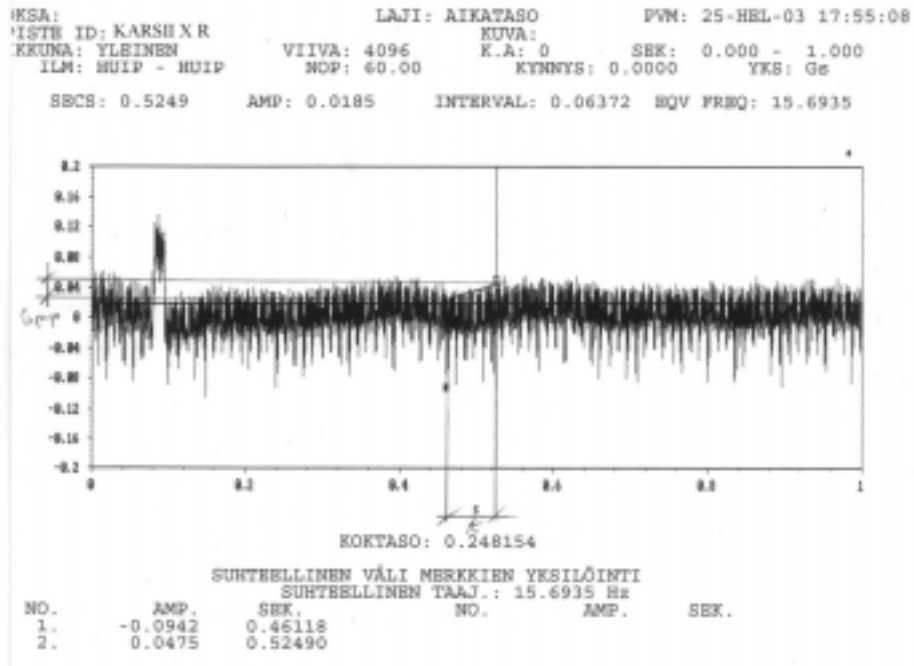
Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, X-suunta



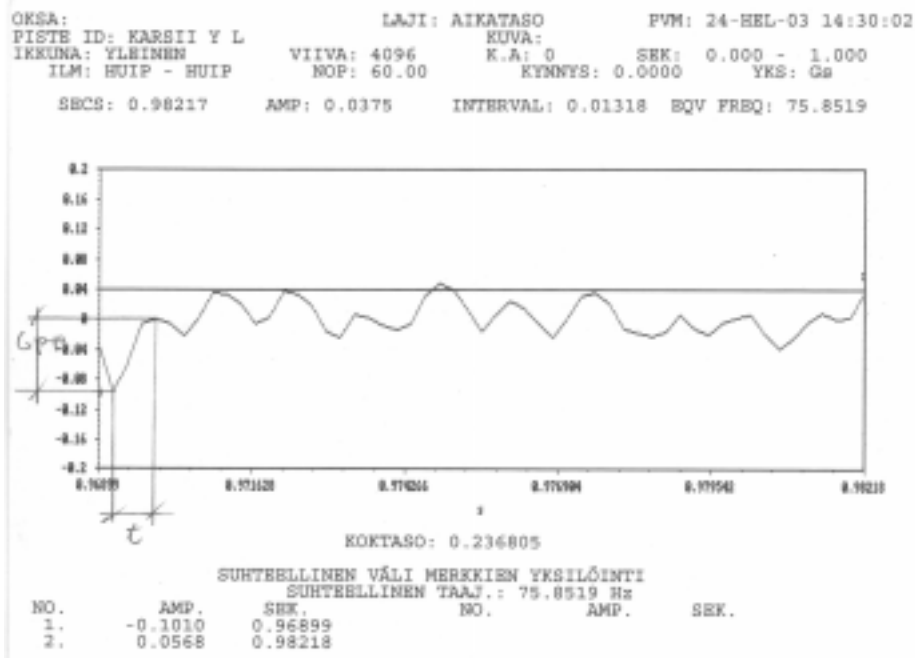
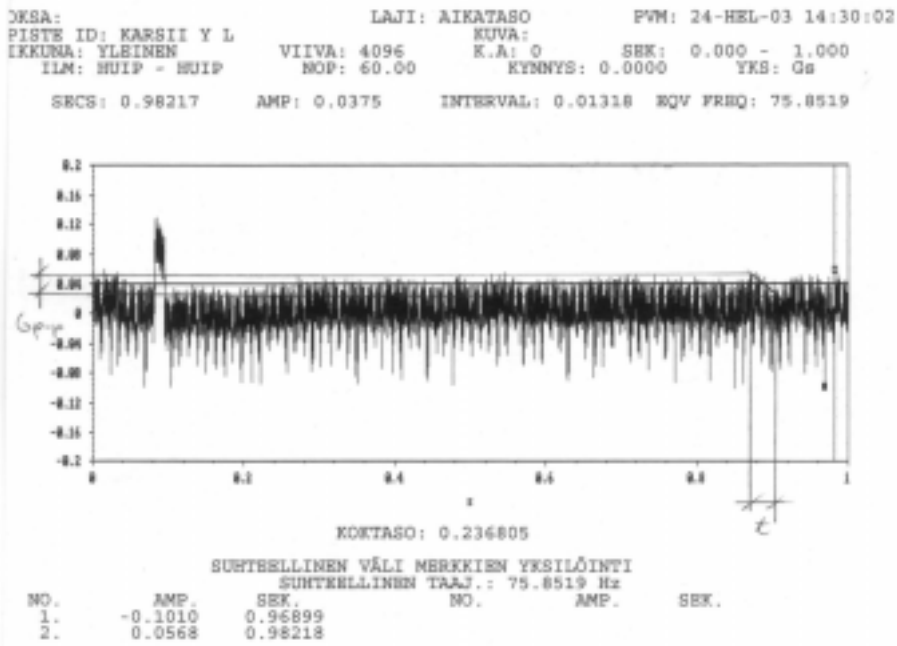
Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, Y-suunta



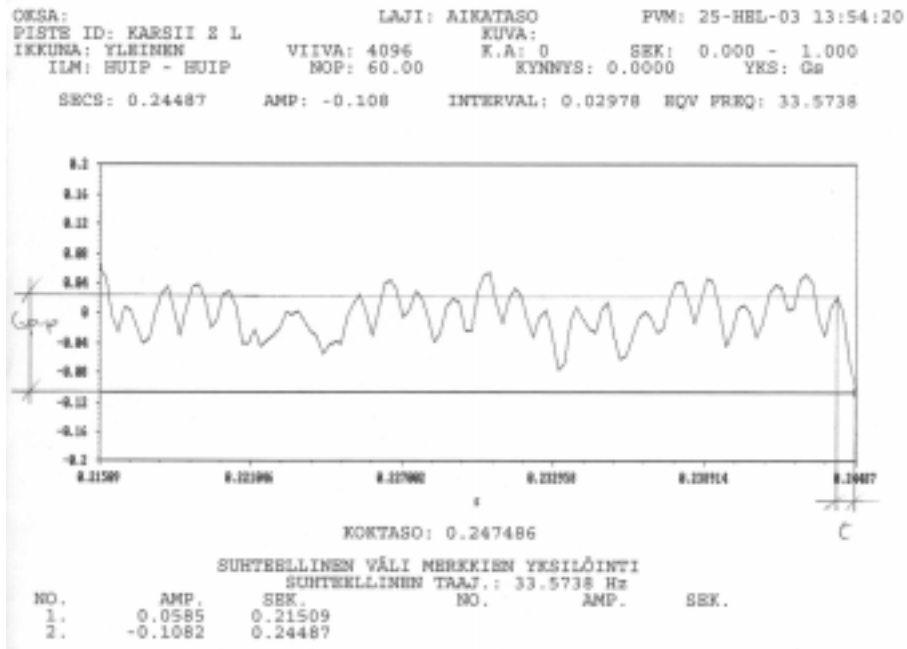
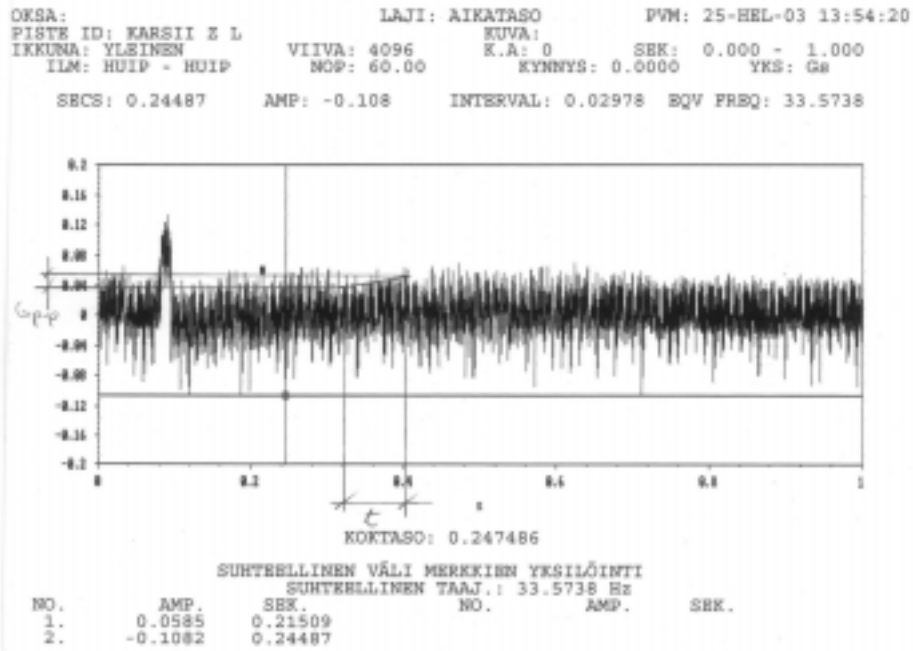
Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, Z-suunta



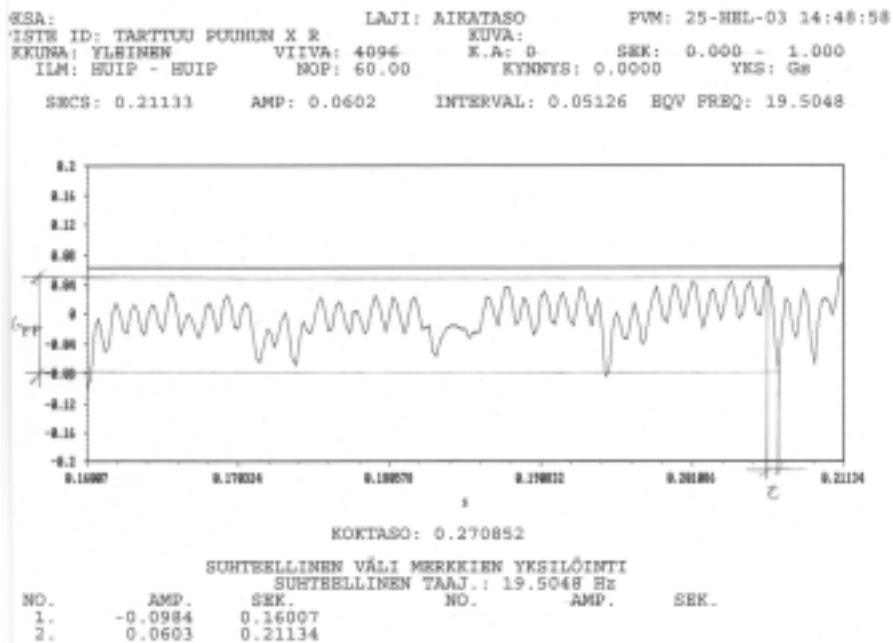
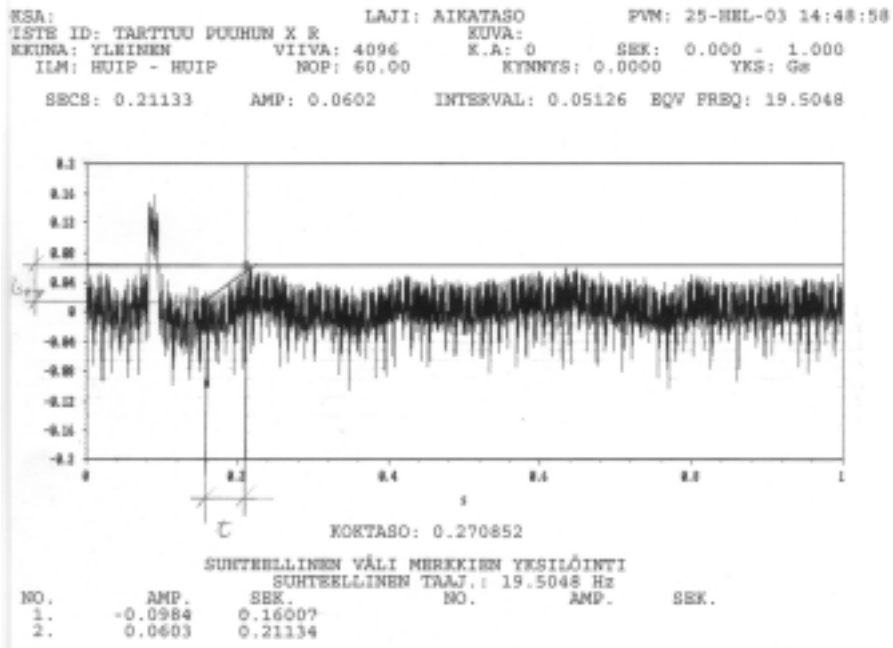
Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, X-suunta



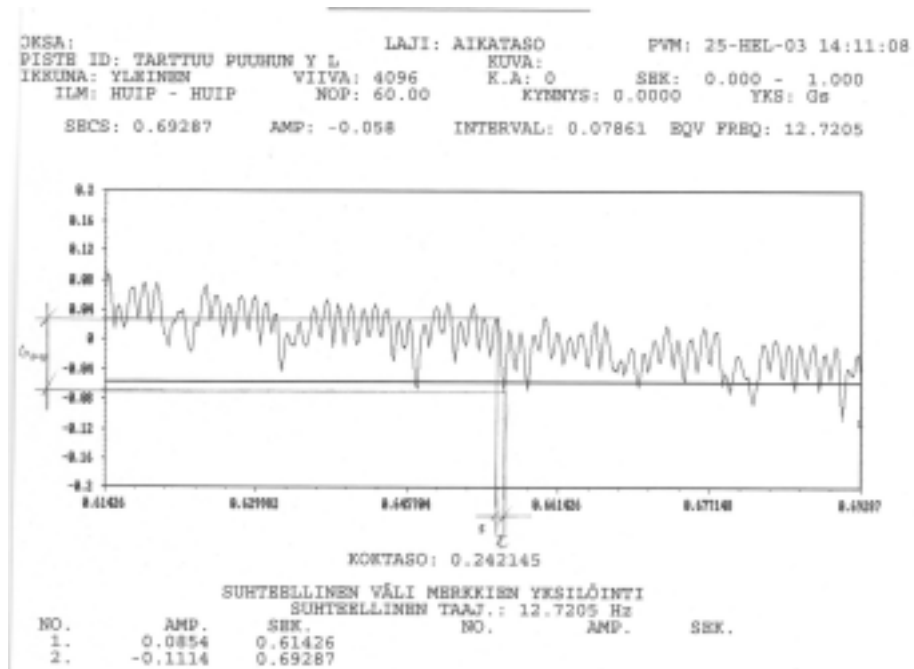
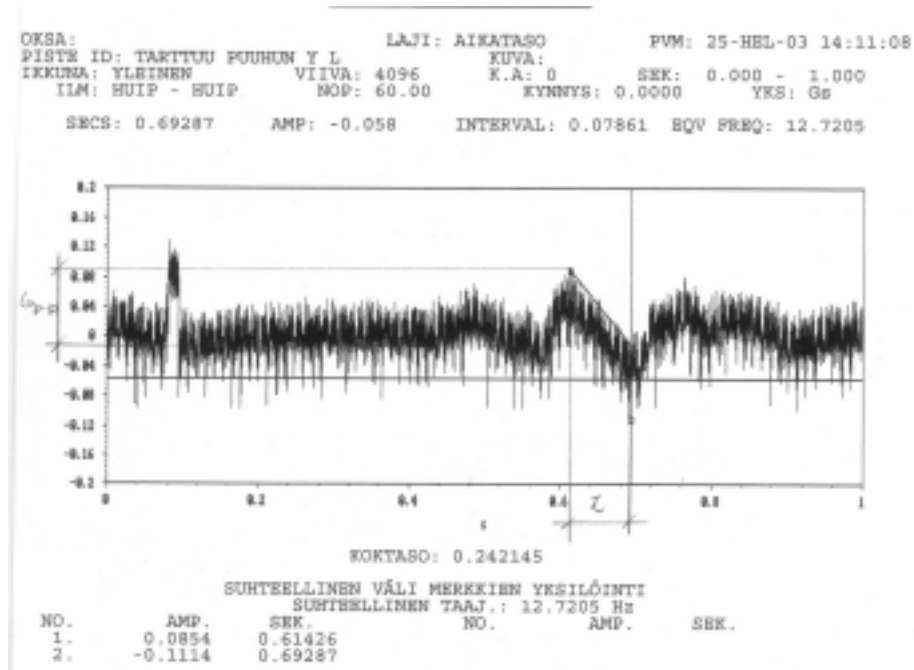
Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, Y-suunta



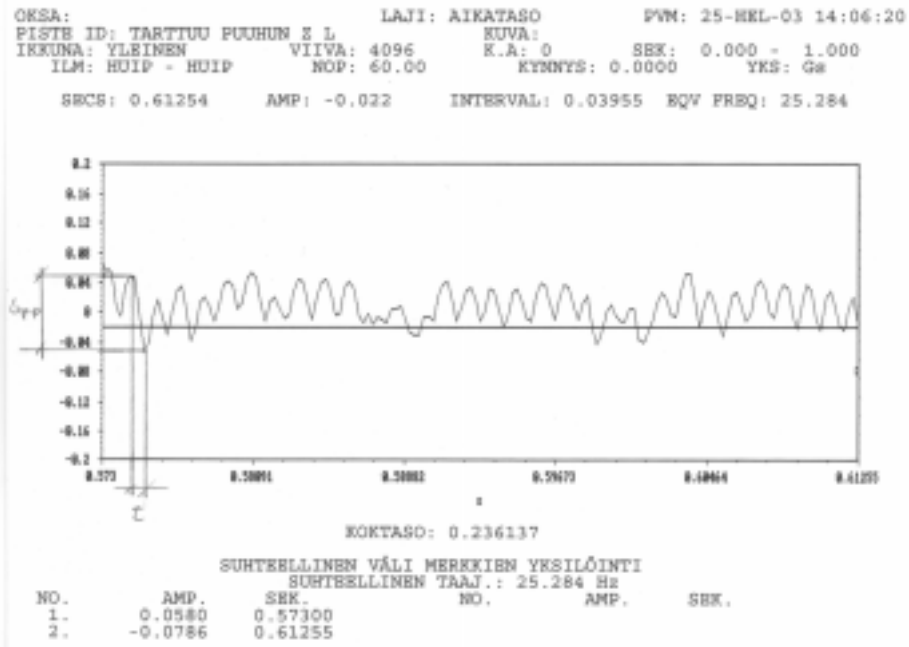
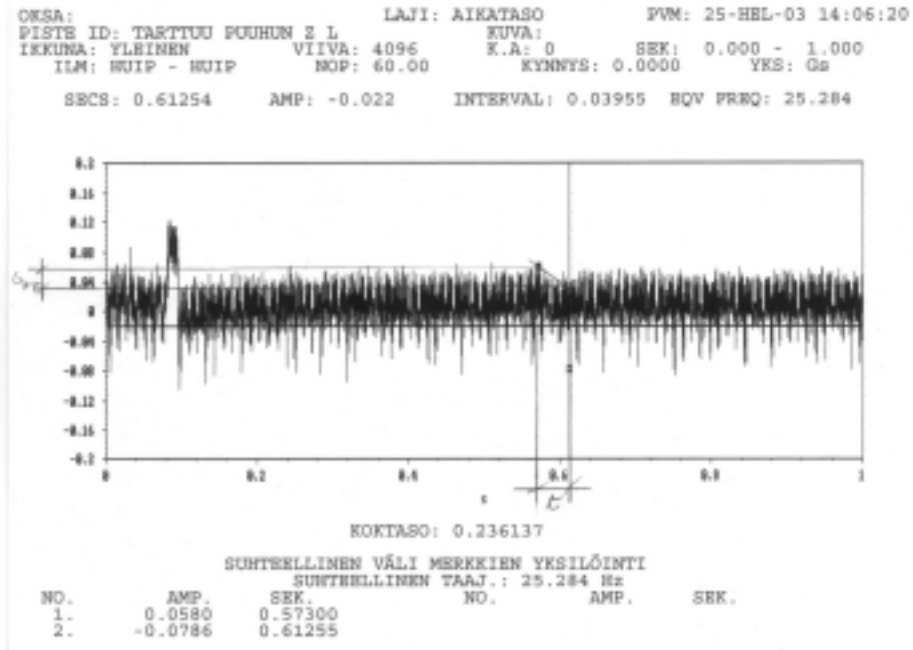
Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, Z-suunta



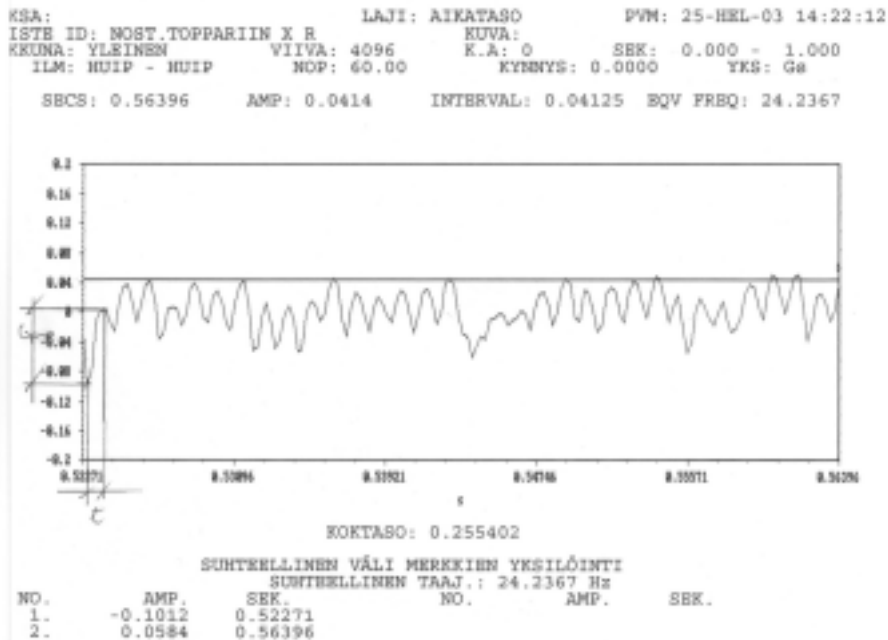
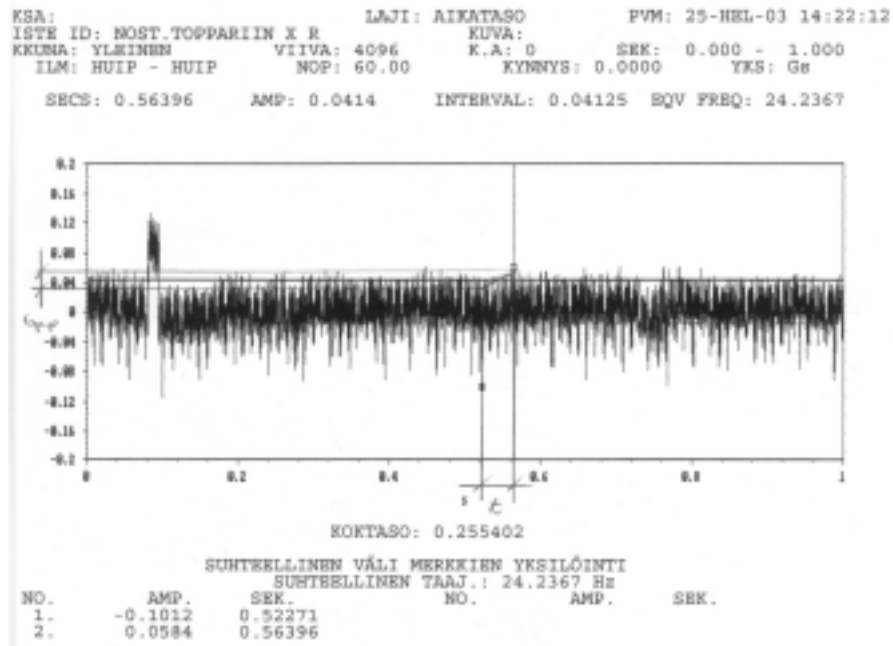
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, X-suunta



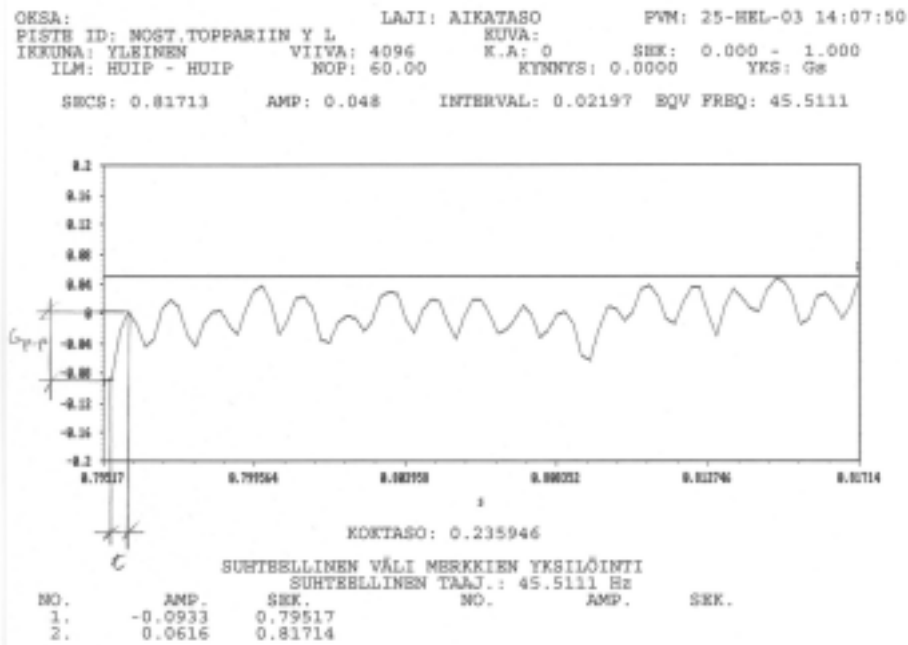
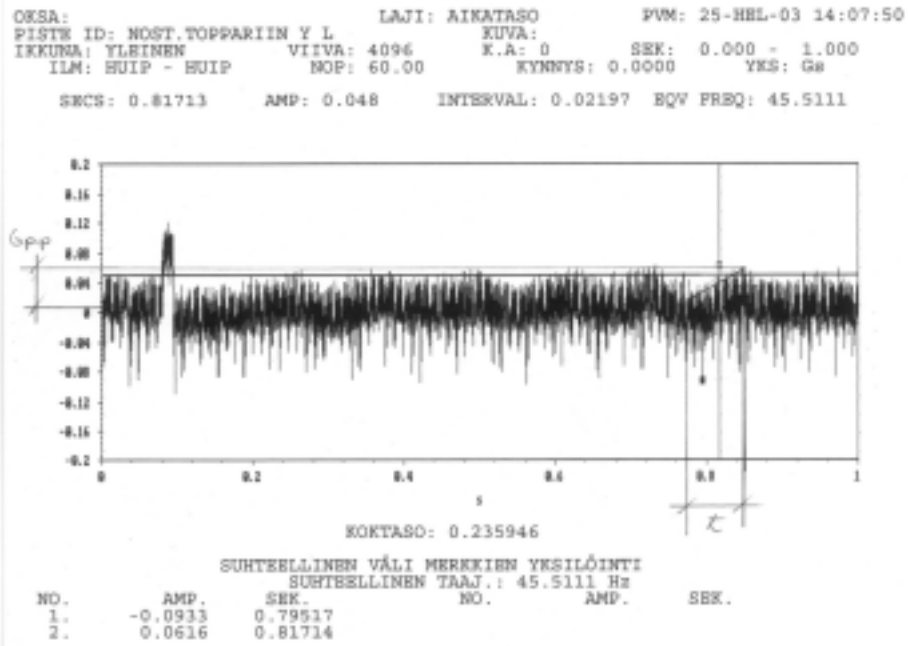
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, Y-suunta



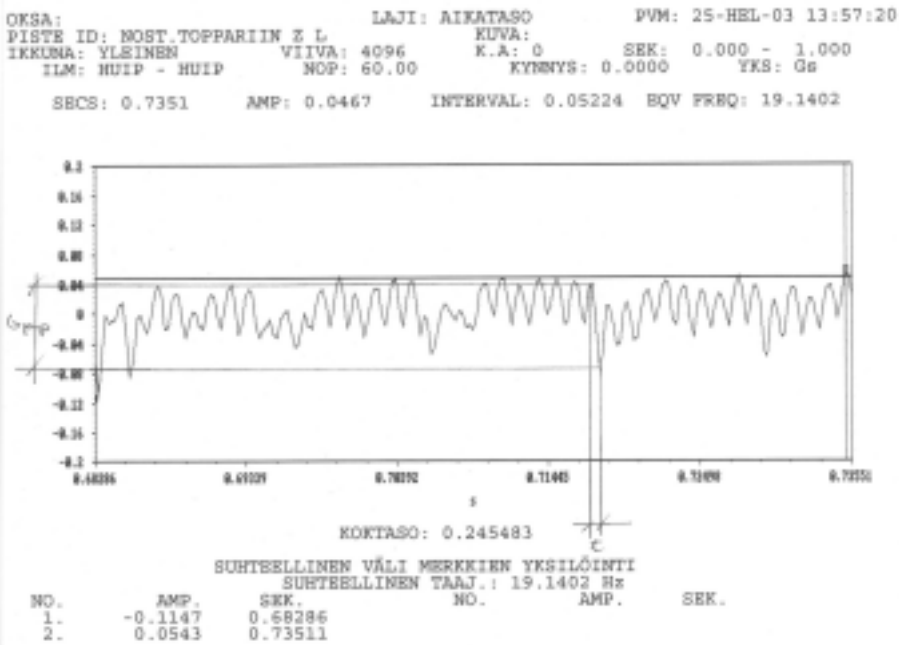
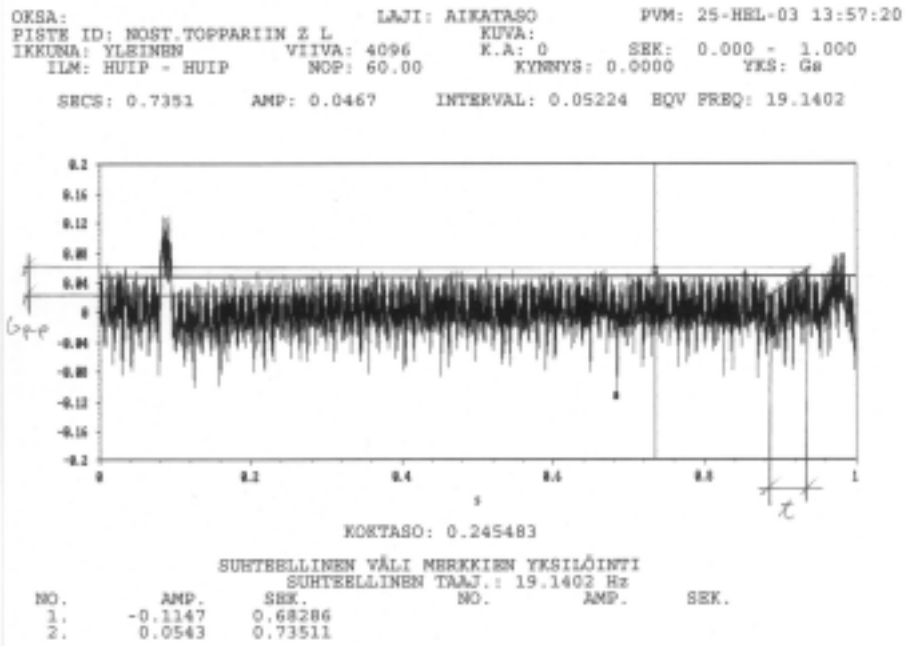
Kuva. Aikatasokuvaajat, tarttuu puuhun, Z-suunta



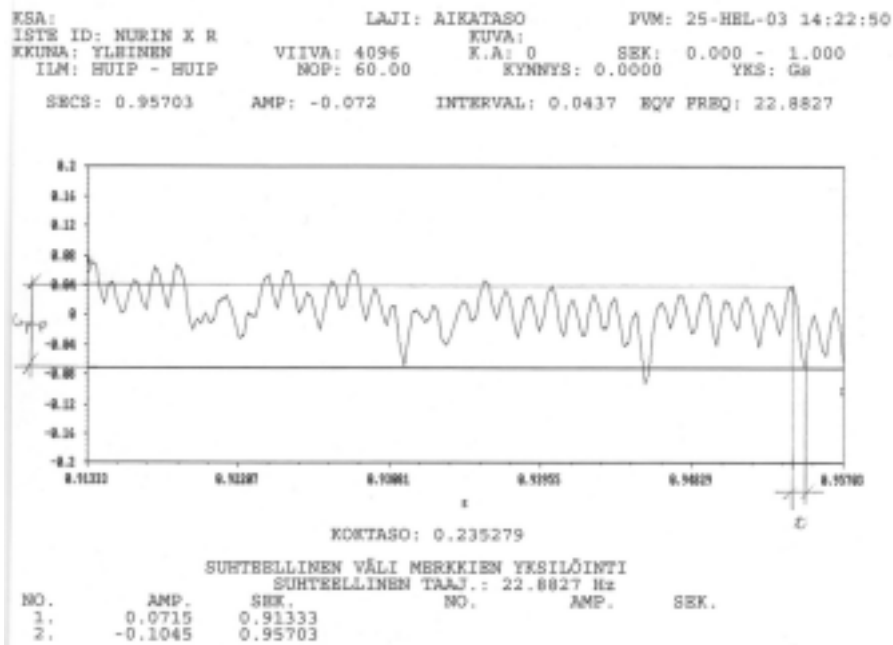
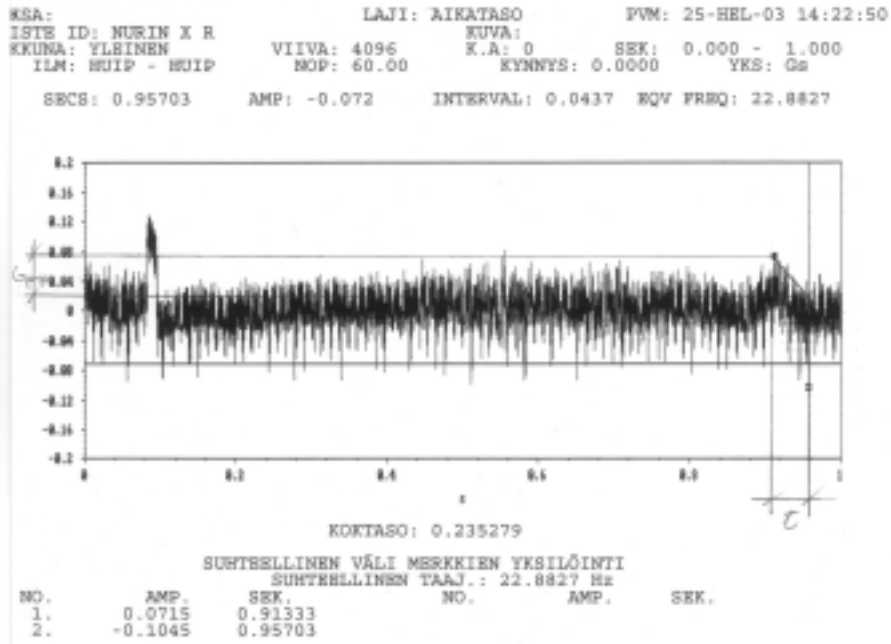
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, X-suunta



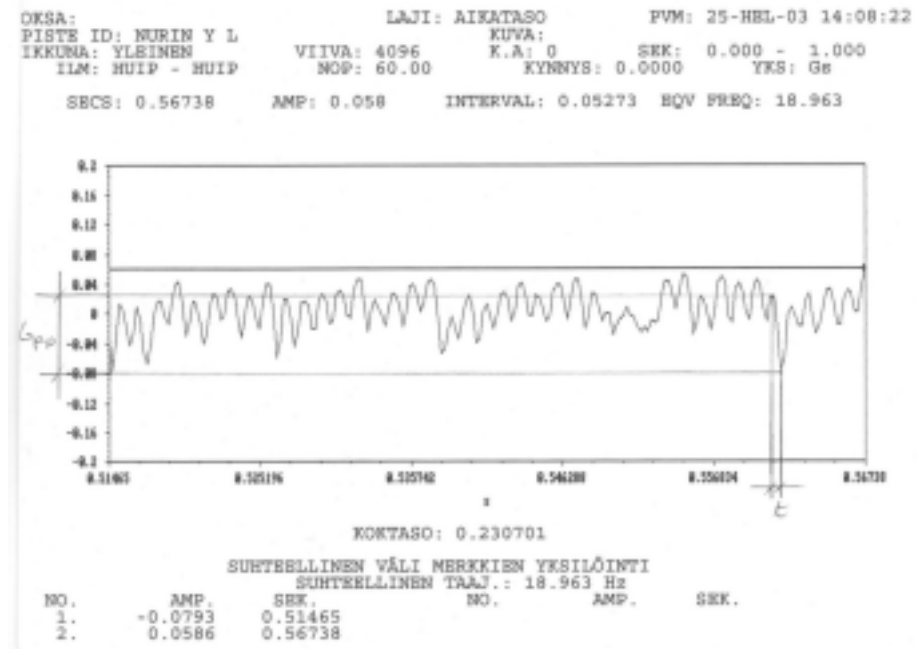
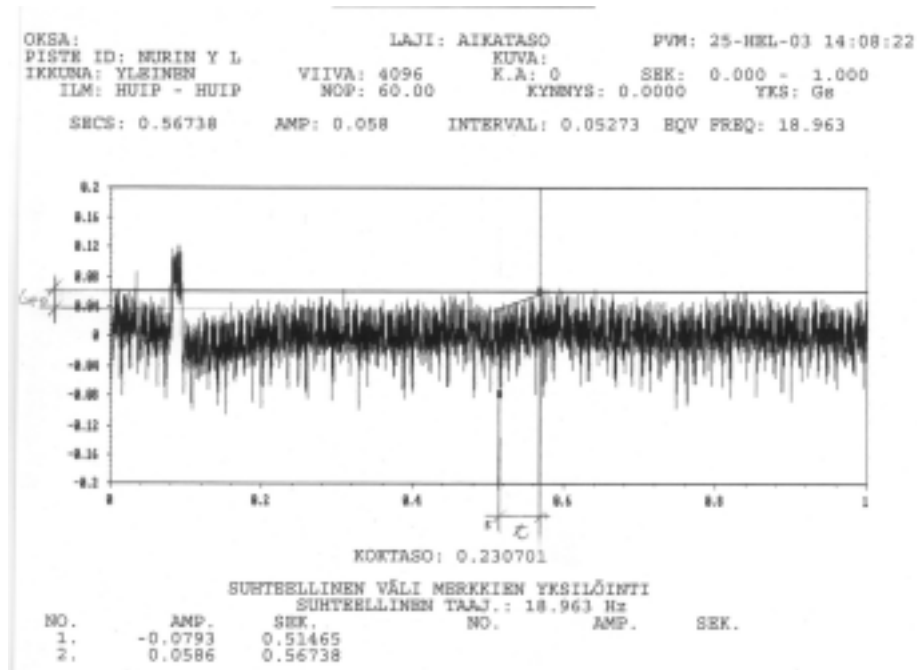
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, Y-suunta



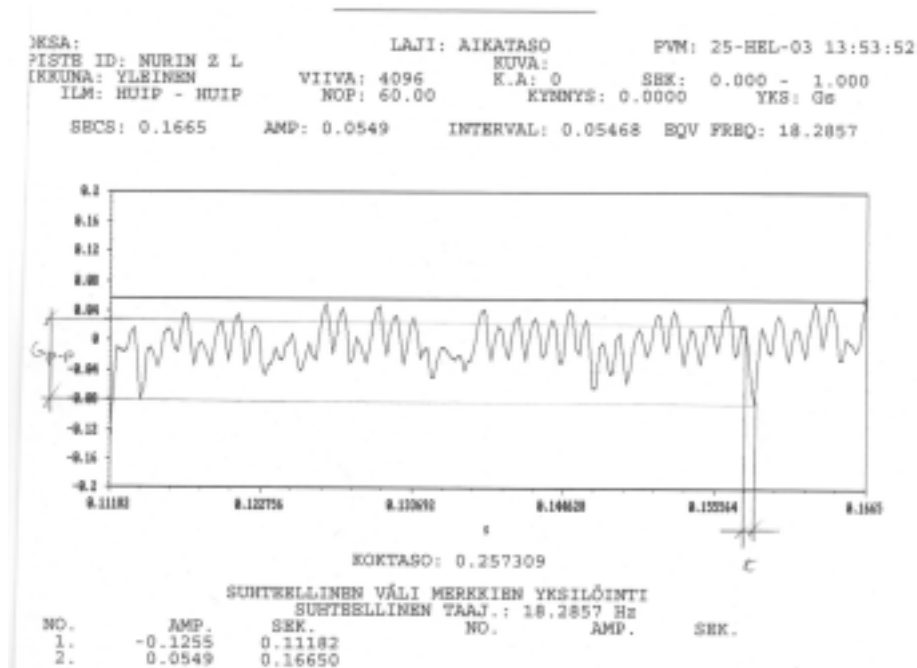
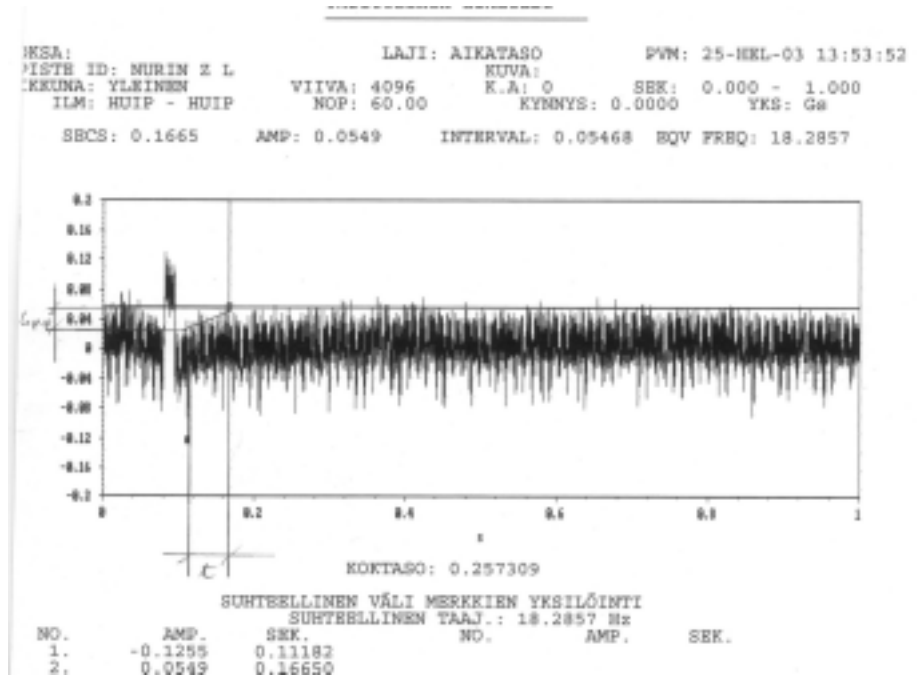
Kuva. Aikatasokuvaajat, nosturi toppariin, Z-suunta



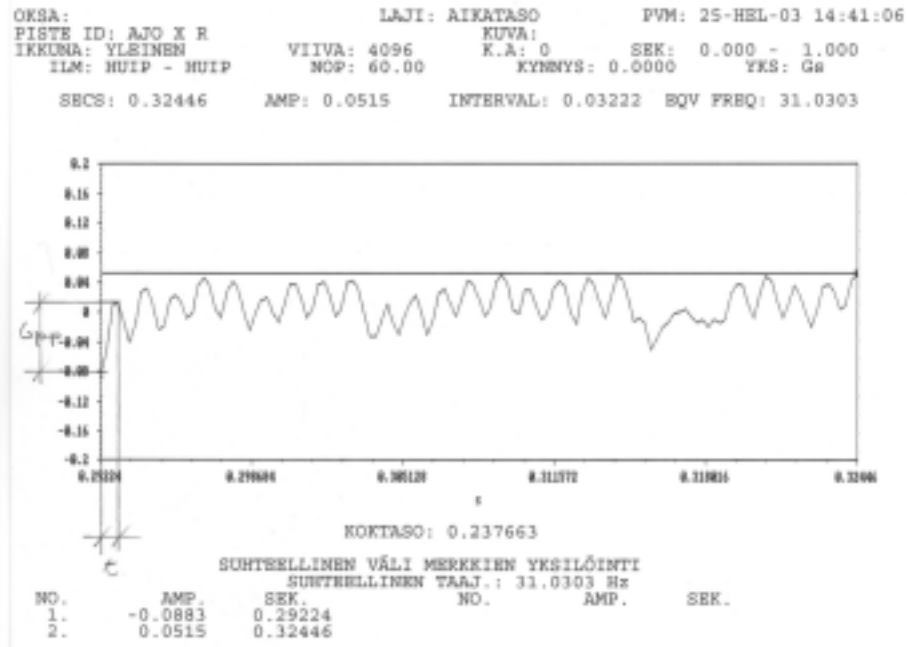
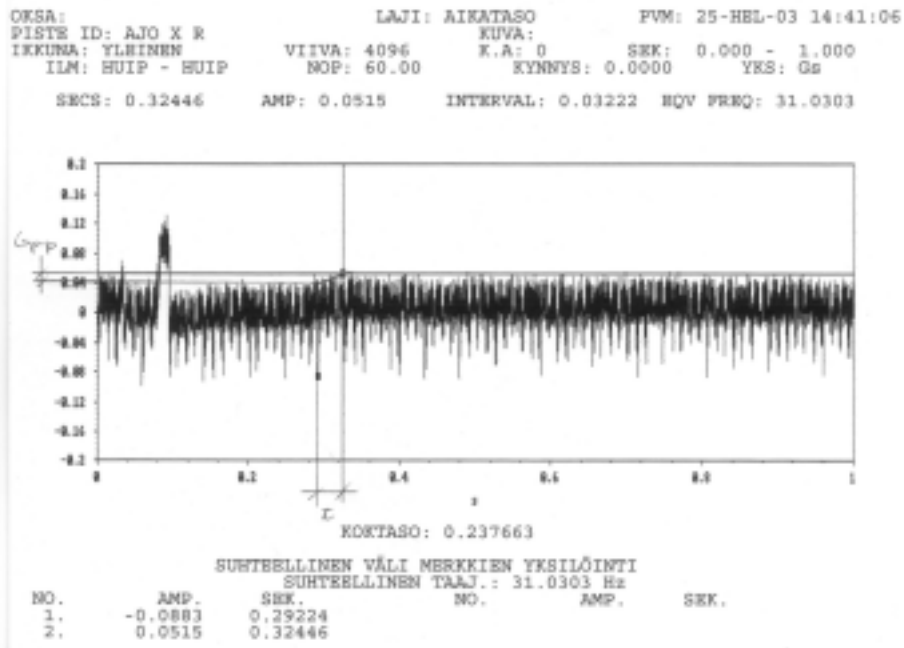
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, X-suunta



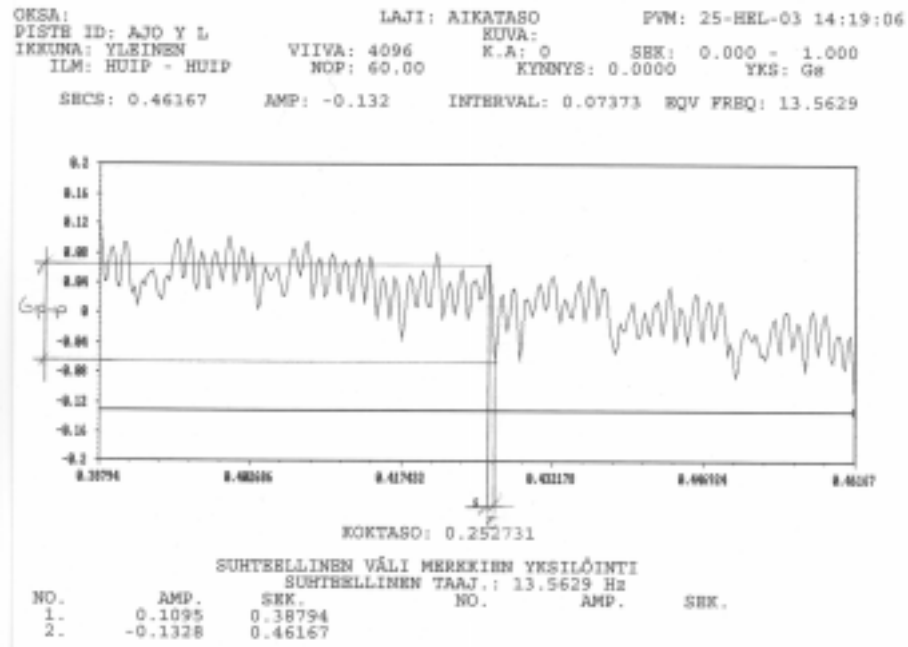
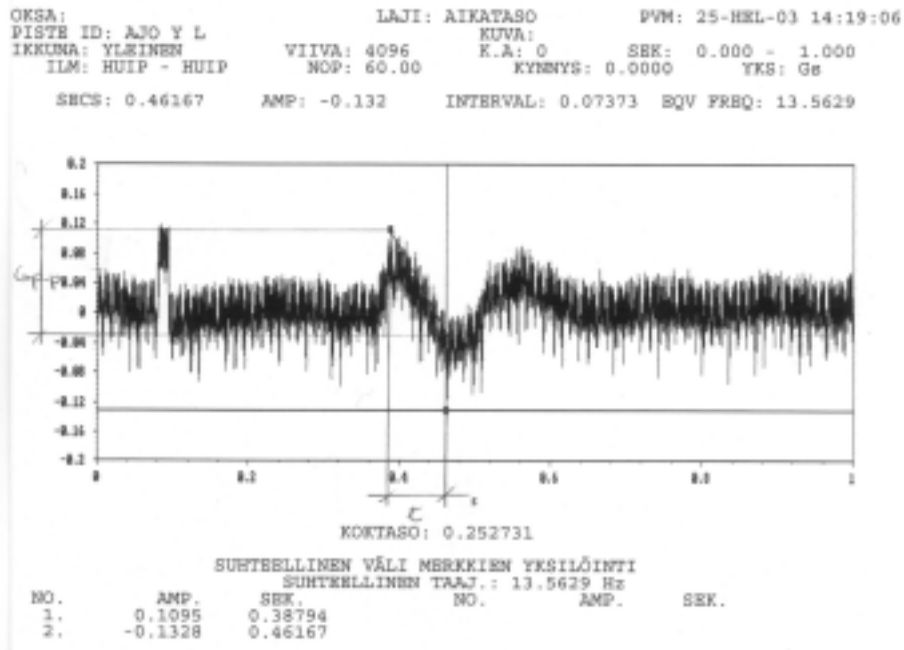
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, Y-suunta



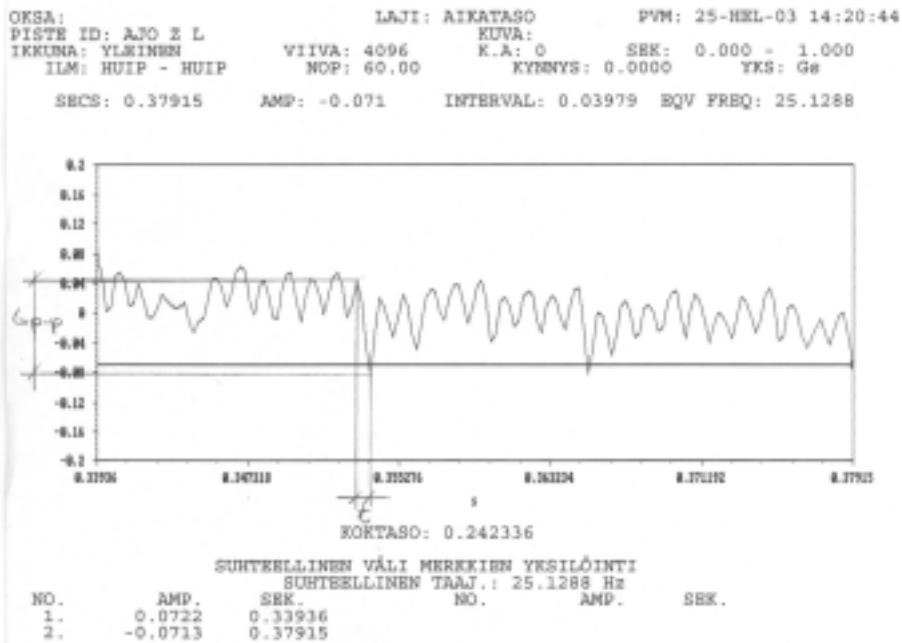
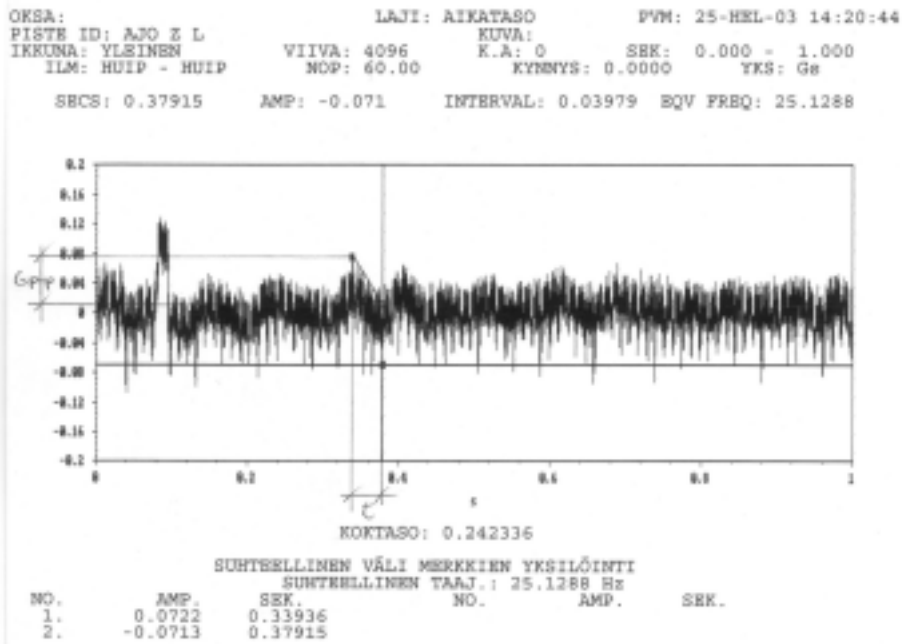
Kuva. Aikatasokuvaajat, puu nurin, Z-suunta



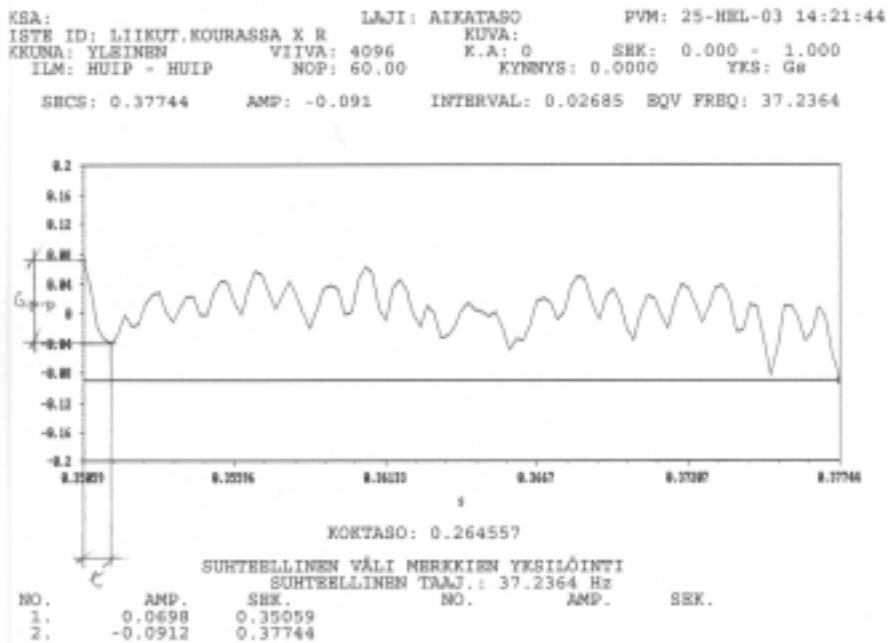
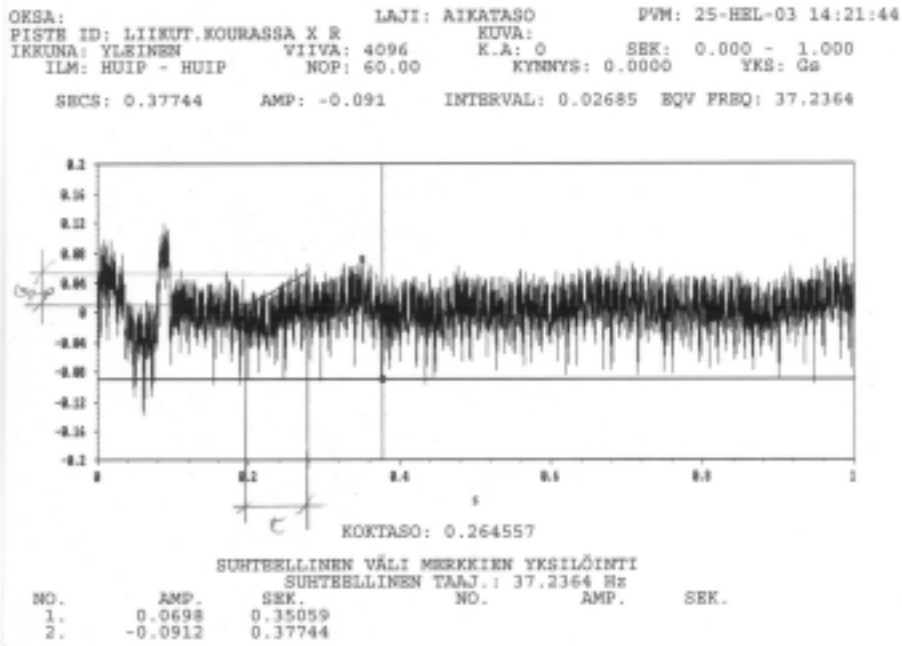
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, X-suunta



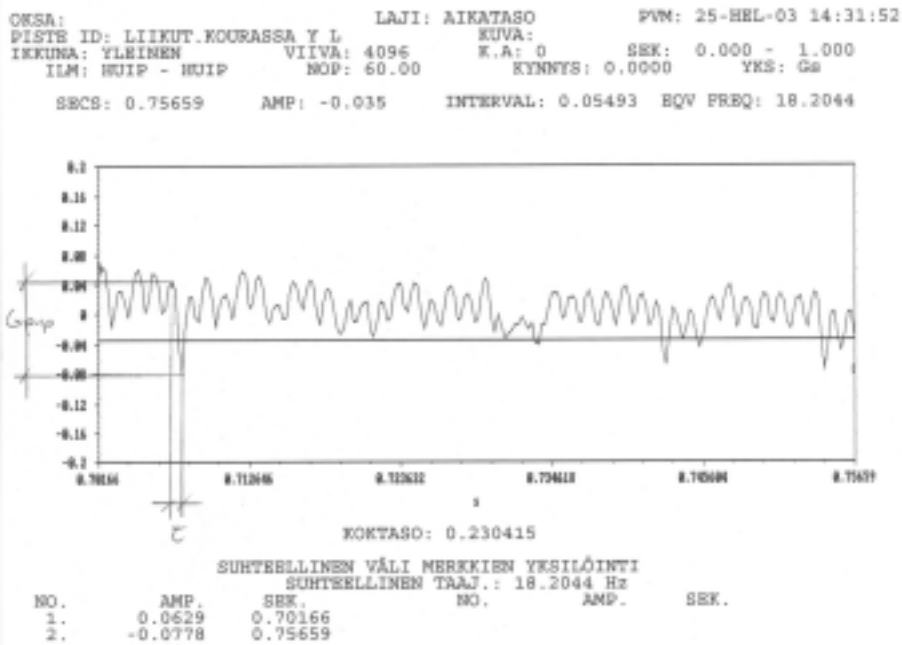
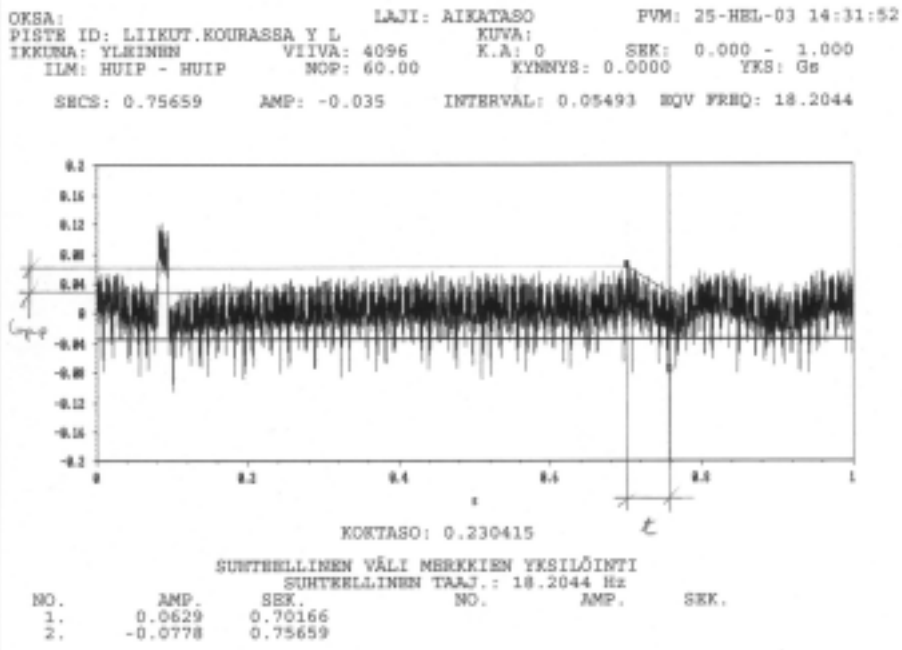
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, Y-suunta



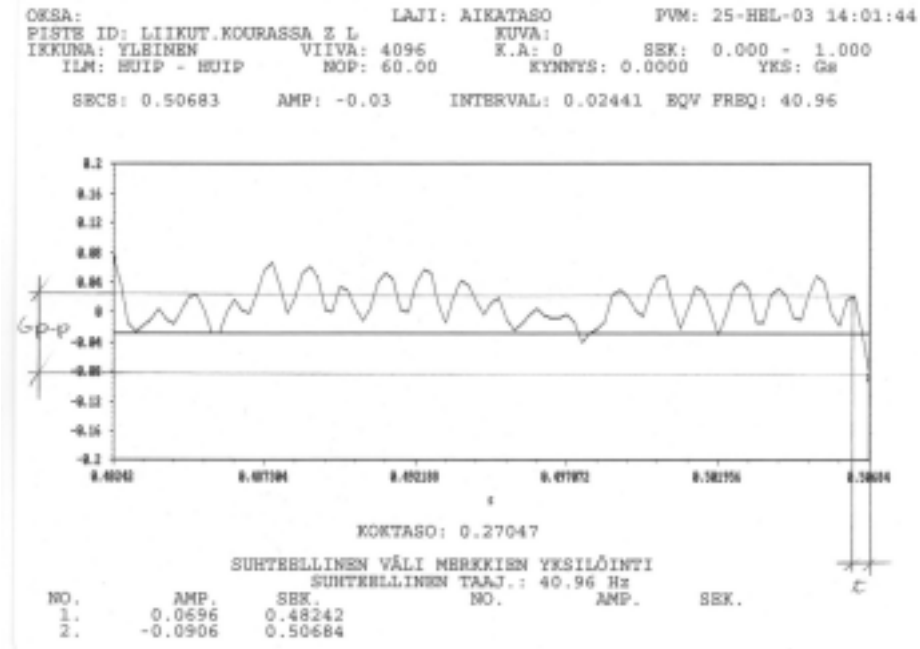
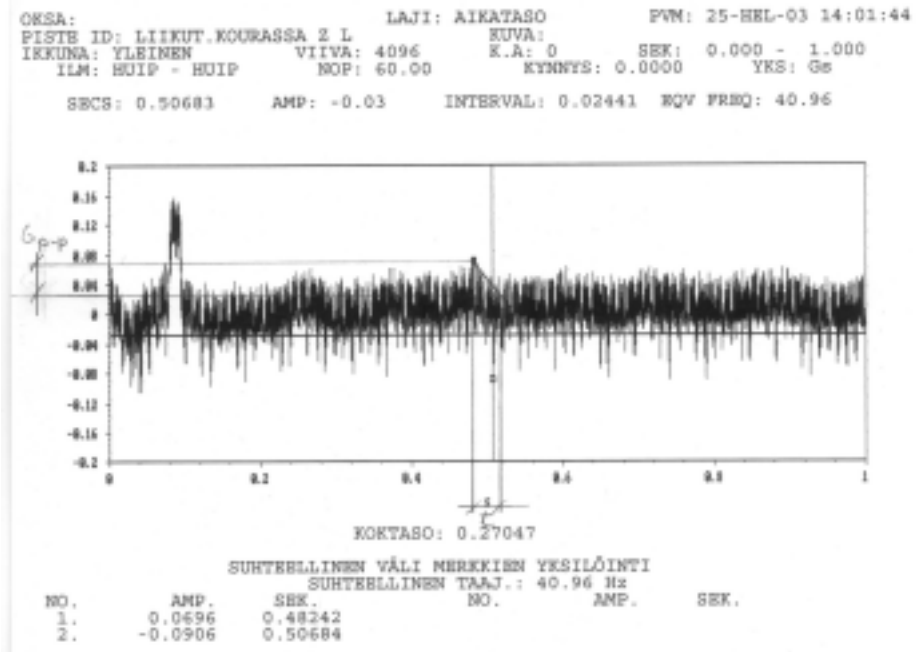
Kuva. Aikatasokuvaajat, ajo, Z-suunta



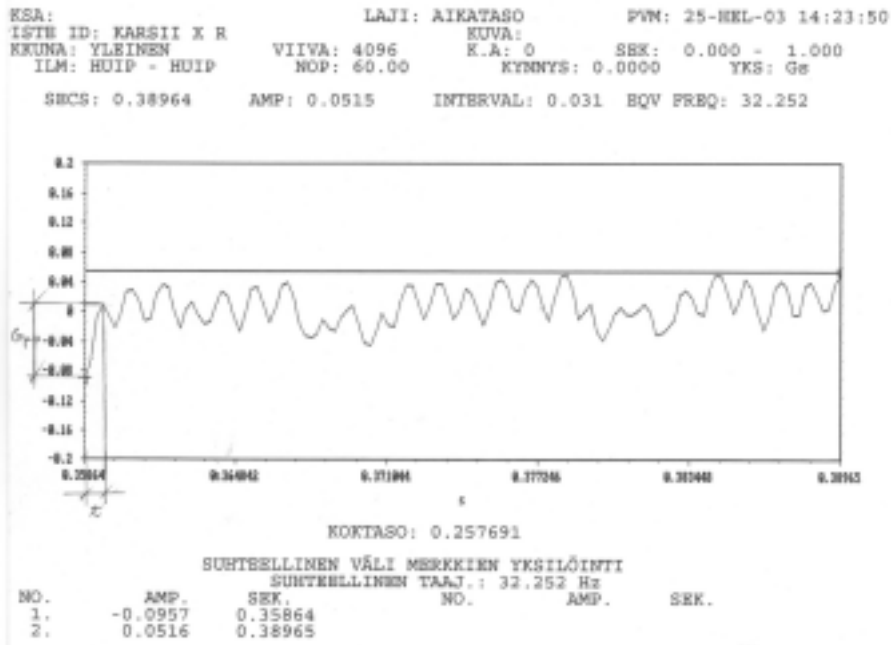
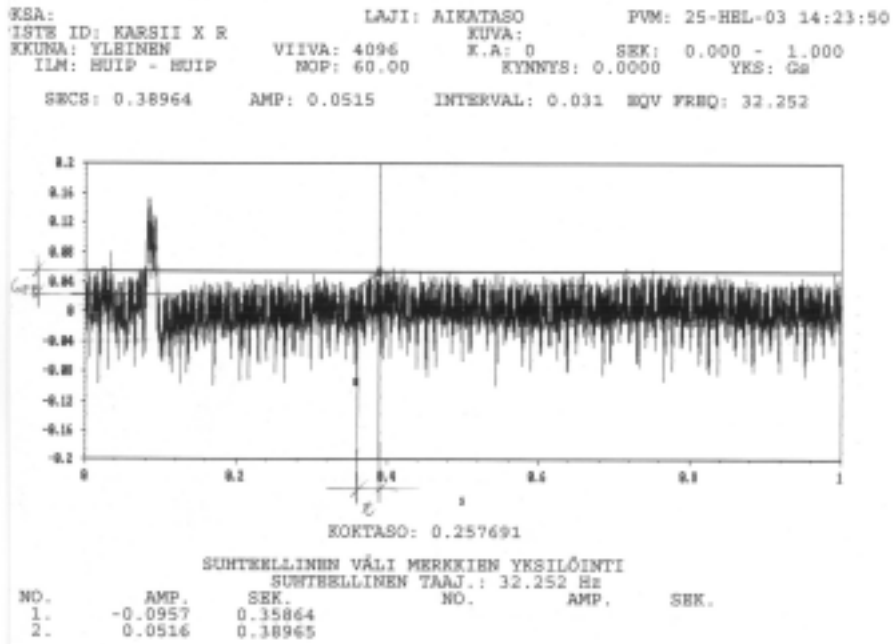
Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, X-suunta



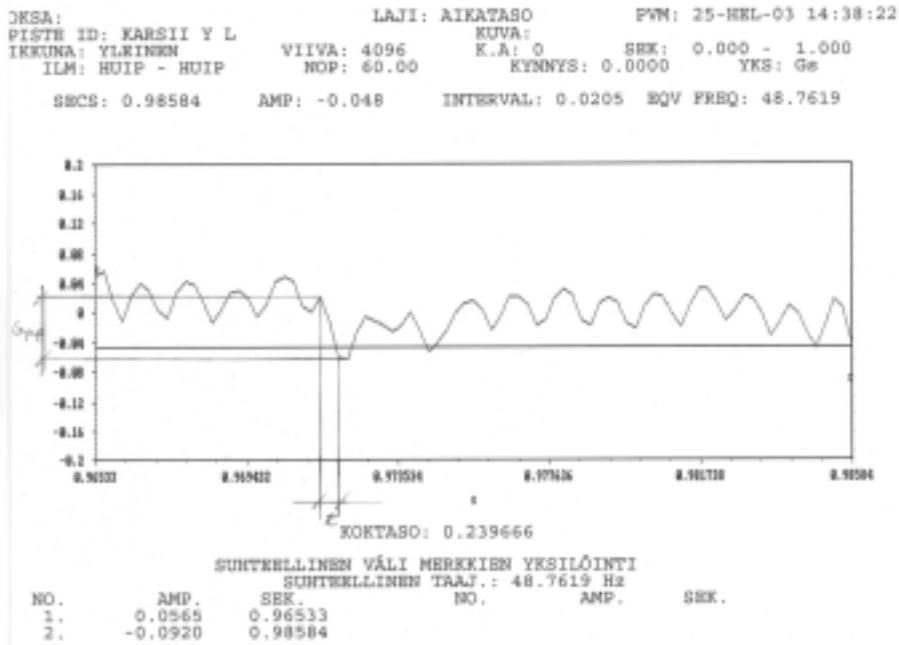
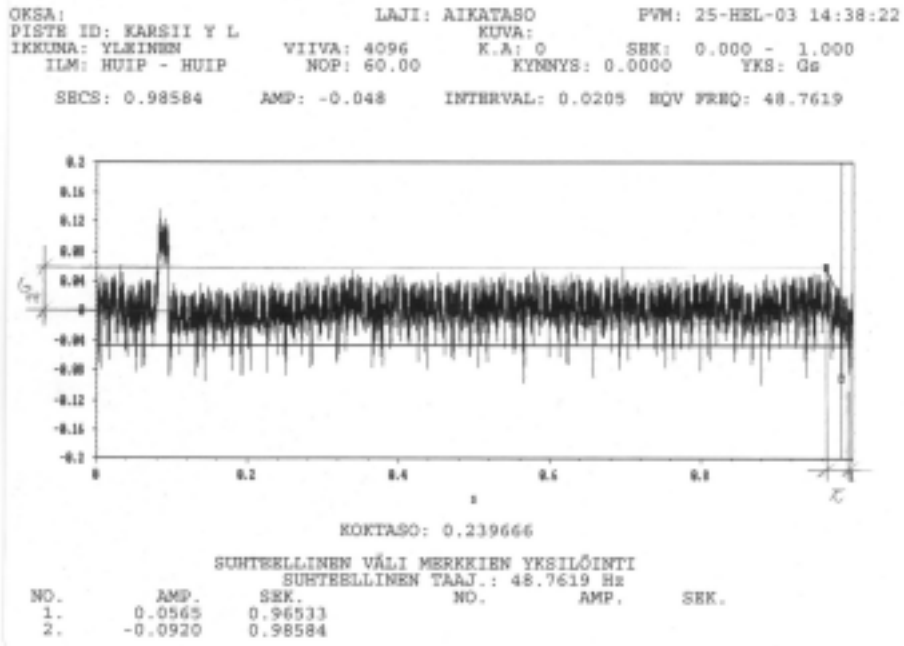
Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, Y-suunta



Kuva. Aikatasokuvaajat, liikuttelua kourassa, Z-suunta



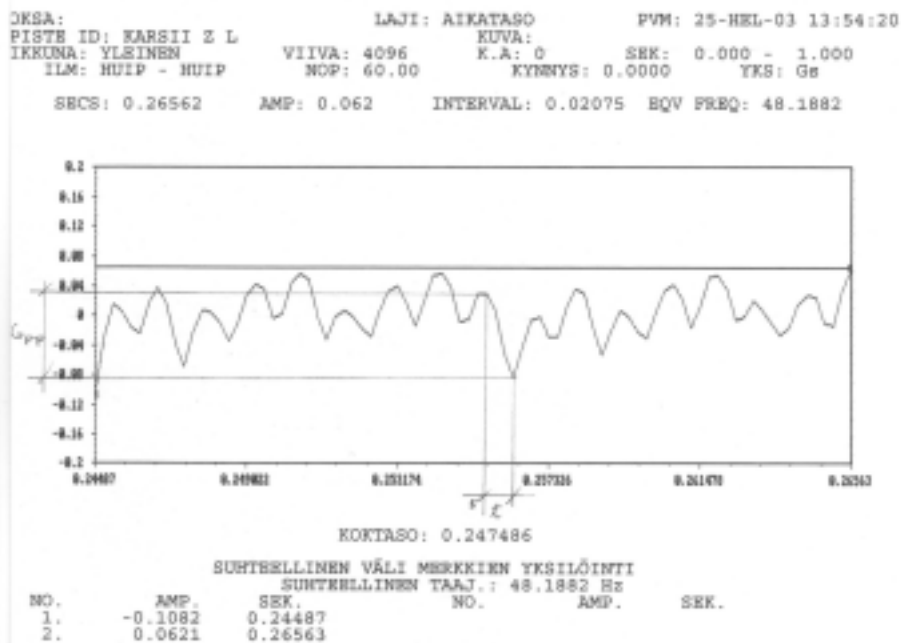
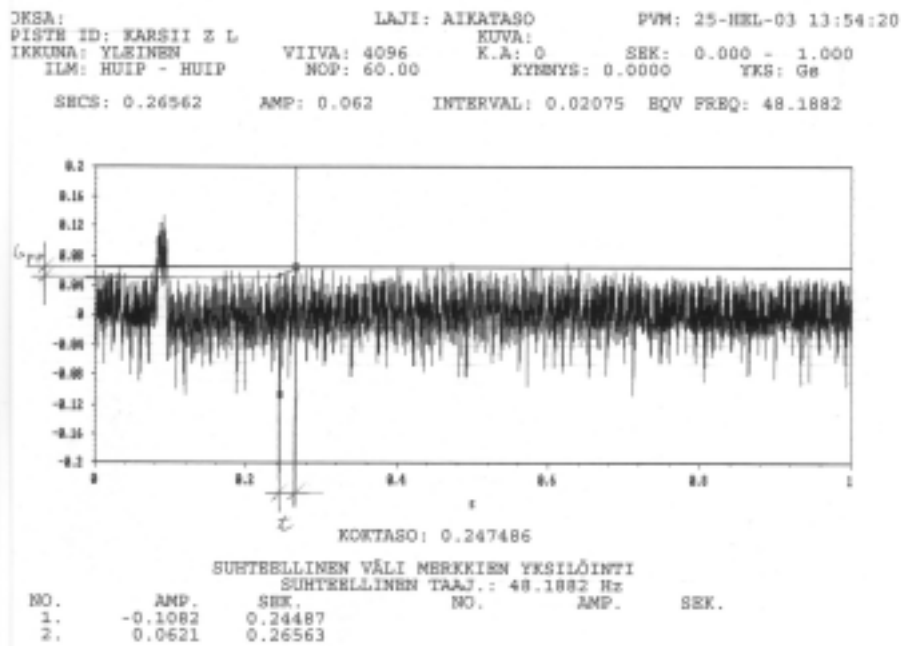
Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, X-suunta



Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, Y-suunta

Mitattujen värinöiden aikatasokuvaajat, mittaus 2, Z

Liite J/36



Kuva. Aikatasokuvaajat, karsii, Z-suunta