

Jani Haataja

TÄRINÄNMITTAUSLAITTEISTO

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Kevät 2007



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Jani Haataja	
Työn nimi Tärinänmittauslaitteisto	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Konenäkö ja mittaustekniikka	Ohjaaja(t) Pentti Romppainen, Ensio Poutiainen Toimeksiantaja Oulun yliopisto, Mittalaitelaboratorio
Aika Kevät 2007	Sivumäärä ja liitteet 29 + 1
<p>Insinööriytyön aiheena oli suunnitella ja toteuttaa ihmisen kehotärinänmittauslaitteisto. Tarkoituksena oli mitata ihmiseen penkin kautta siirtyvää työkoneentärinää. Laitteisto perustui EU-tärinädirektiiviin, joka taas pohjautui ISO 2631 -standardiin. Kansainvälinen ISO 8041 -standardi asettaa mittauksissa käytettäville antureille ja laitteistolle erilaisia vaatimuksia, joiden avulla laitteisto valittiin. ISO 2631-1 -standardi määrittelee laskutavat ja mittausvaatimukset kehotärinälle. Standardi sisältää menetelmät säännöllisen, satunnaisen ja transientin kehontärinänmittaukseen. Lisäksi standardissa on määritelty ali- ja ylipäästösuodatuskaavat, sekä taajuuspainotuskaavat. Taajuusalue kokokehotärinän mittaukseen oli 0,1 Hz – 80 Hz.</p> <p>Mittauslaitteisto koostuu kolmesta kolmiakselisesta kiihtyvyyssanturista, tiedonkeruukorteista ja tietokoneesta, jossa on LabVIEW-ohjelmointiympäristö. Tiedonkeruukortit keräävät kiihtyvyystietoa kiihtyvyyssantureilta ja välittävät tiedon tietokoneelle, jossa se tallennetaan analysointia varten.</p> <p>Ennen kiihtyvyystiedon analysointia sille piti suorittaa kaistanpäästösuodatus ja taajuuspainotus. Sen jälkeen saatu taajuuspainotettu kiihtyvyystieto oli standardien mukaisessa muodossa analysointia varten. Mitattavaa kiihtyvyystietoa voidaan verrata direktiivin määräämiin altistusrajoihin.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	kehontärinänmittauslaitteisto, kiihtyvyystieto, taajuuspainotus
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Jani Haataja	
Title A Human Vibration Measurement System	
Optional Professional Studies Measurement and Machine Vision	Instructor(s) Pentti Romppainen, Ensio Poutiainen
	Commissioned by University of Oulu, Measurement and Sensor Laboratory
Date Spring 2007	Total Number of Pages and Appendices 29 + 1
<p>The goal of this Bachelor's thesis was to design a human vibration measurement system. The purpose of the vibration measurement system is to measure the vibration transmission through a vehicle seat to the occupant. The system is based on International Standard (ISO 8041) that contains the performance specifications and tolerance limits for the instruments designed to measure vibration values. ISO 2631 defines the methods for the measurement of periodic, random and transient whole-body vibration. The frequency range for whole-body vibration measuring was from 0.1 Hz to 80 Hz.</p> <p>The measuring system consists of three accelerometers, a data acquisition unit and a computer that includes the LabVIEW programming environment. The data acquisition unit measures acceleration from the accelerometers and passes the acceleration information to the computer that saves the data for future analysis.</p> <p>The acceleration data was changed by feeding it through a band-pass filter and the frequency weighting system. After that the data was in the correct unit for analysing the potential effects of vibration on health, comfort, perception and motion sickness.</p> <p>Analysing the potential effects of vibration on health was left for another thesis.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	whole-body vibration, acceleration, frequency weighted
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Tämä insinöörityö on tehty Oulun yliopiston Kajaanin yliopistokeskuksen Mittalaitelaboratorion toimeksiannosta. Työn valvojana toimi Pentti Romppainen Kajaani ammattikorkeakoulusta ja ohjaajana Ensio Poutiainen Oulun yliopiston Kajaanin yliopistokeskuksen Mittalaitelaboratoriosta. Haluan osoittaa heille kiitoksen työn ohjaamisesta.

Kiitän myös muita työn ohjaukseen liittyviä henkilöitä.

Kajaanissa 10.4.2007

Jani Haataja

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 TÄRINÄMITTAUKSIIN LIITTYVÄ DIREKTIIVI JA STANDARDIT	3
2.1 Direktiivi	3
2.2 Standardit	4
2.2.1 ISO 2631	4
2.2.2 ISO 8041	8
2.2.3 ISO 10326	10
3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTTAMINEN	11
3.1 Vaatimukset mittauskohteiden osalta	11
3.2 Vaatimukset laitteiston osalta	11
3.3 Vaatimukset ohjelmiston osalta	11
3.4 Valinnat laitteistoksi	12
3.4.1 Istuinanturi	12
3.4.2 Päähän ja selkään sijoitettavat anturit	13
3.4.3 Tiedonkeruukortit	15
3.5 Laitteiston toteutus	16
3.6 Ohjelmiston toteuttaminen	17
3.6.1 Käyttöliittymä	18
3.6.2 Ohjelmiston toteutus	21
4 JÄRJESTELMÄN TESTAUS	25
5 TULOSTEN TARKASTELU	27
6 YHTEENVETO	28
LÄHTEET	29
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Vuonna 1991 perustettu Oulun yliopiston Mittalaitelaboratorio (MILA) toimii osana Kajaanin yliopistokeskusta. Toiminnan painopisteenä on puunjalostusteollisuutta palvelevan mitaustekniikan kehittäminen. MILAssa myös koulutetaan diplomi-insinöörejä paikallisen elinkeinoelämän tarpeisiin.

Tutkimusalueina MILAlla on:

- Mekaanisen puun mittaukset
- Sellun ja paperin karakterisointi
- Prosessimitaustekniikka
- Langaton instrumentointi
- Liikuntateknologian mittaukset
- Ympäristömittaukset

Liikuntateknologisissa tutkimuksissa kehitetään innovatiivisia mittausmenetelmiä ihmisen hyvinvoinnin edistämiseksi MILAn optisen osaamisen pohjalta. Mittauskohteina on ihmisen fysiologia ja biomekaniikka.

Työ tehtiin Tärviö-projektiin (Tärinänmittaus ja vaikutusten arviointi työkoneissa), joka on Kajaanin AMK:n kanssa toteutettu tärinän hallinnan kehitysprojekti. Tärviö-projekti on osa MILAn liikuntateknologioiden ryhmän toiminnoista.

Tärviö-projektin tavoitteena on mitata ihmiseen kohdistuvaa kokokehontärinää EU-direktiivin puitteissa. Kiihtyvyyssanturimittausten lisäksi valitaan liikuntatieteellisiä mittauksia, joiden avulla tutkitaan tarkemmin ihmisen kuormittumisen mekanismeja tärinäaltistuksessa. Yleisellä tasolla tavoitteena on luoda Kajaanin ammattikorkeakouluun, MILAan ja projektissa mukana oleviin yrityksiin kehotärinämittauksiin liittyvää osaamista.

Työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa tärinänmittauslaitteisto laboratorio-olosuhteisiin, jolla voitaisiin mitata ihmiseen kohdistuvan tärinän voimakkuus. Työssä suunniteltiin ja to-

teutettiin värinänmittauslaitteisto, jossa mitataan kiihtyvyyssantureilla ihmiseen kohdistuva värinäarvo. Kehotärinää tuli mitata kolmesta pisteestä koehenkilön istuessa; takapuolen alta, selästä ja päästä. Jokaisesta pisteestä tuli mitata kolme eri suuntaa eli x, y ja z. Tärinätieto tallennettiin raakadatana aikaleimalla, joka sitten voitiin analysoida jälkikäteen ISO-standardien mukaisesti. Laitteiston suunnittelu perustui ISO-2631-standardiin kehotärinälle, jossa oli myös vaatimukset tiedon käsittelyn suhteen. Tiedon tallennuksessa ja käsittelyssä käytettiin tietokoneelle tehtyä LabVIEW-ohjelmaa.

2 TÄRINÄMITTAUKSIIN LIITTYVÄ DIREKTIIVI JA STANDARDIT

EU:n tärinää koskeva direktiivi (44/2002/EY) on annettu 25.6.2002 ja se on tullut voimaan jäsenmaissa vuonna 2005. Direktiivi koskee terveyden ja turvallisuuden vähimmäisvaatimuksia työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysikaalisista tekijöistä (tärinä) aiheutuville riskeille. [3, s. 4] Direktiivi perustuu ISO-standardeihin, joita ovat esim. ISO 5349 käsitärinälle ja ISO 2631 kehotärinälle. Kehotärinään liittyvässä standardissa (ISO 2631) tärinää arvioidaan pääasiassa RMS-arvolla. Sen lisäksi tärinän arviointiin käytetään huippukerrointa (CF), tärinän annosarvoa (VDV) ja maksimitransienttiarvoa (MTVV). Direktiivi määrittelee kehotärinälle altistuksen raja-arvon ja toiminta-arvon. Suomessa direktiivi tulee voimaan heinäkuun 2007 loppuun mennessä, mutta maa- ja metsätaloudessa on siirtymäaika aina vuoteen 2014 asti.

2.1 Direktiivi

EU:n direktiivi kehotärinälle sisältää kaksi arvoa. Jos tärinä ylittää alemman toimenpidearvon, niin työnantaja on velvollinen seuraamaan, arvioimaan ja mittaamaan tärinää sopivin väliajoin. Tärinän vaikutusta työntekijään tulee kuitenkin joka tapauksessa arvioida direktiivin voimaantullessa työpaikalla. Ylempi raja-arvo ei taas saa ylittyä normaalin kahdeksan tunnin työpäivän aikana. Mikäli raja-arvo ylittyy, niin työnantaja on velvollinen välittömiin toimenpiteisiin tärinän vähentämiseen.

Direktiivi määrittelee seuraavat arvot kehotärinälle:

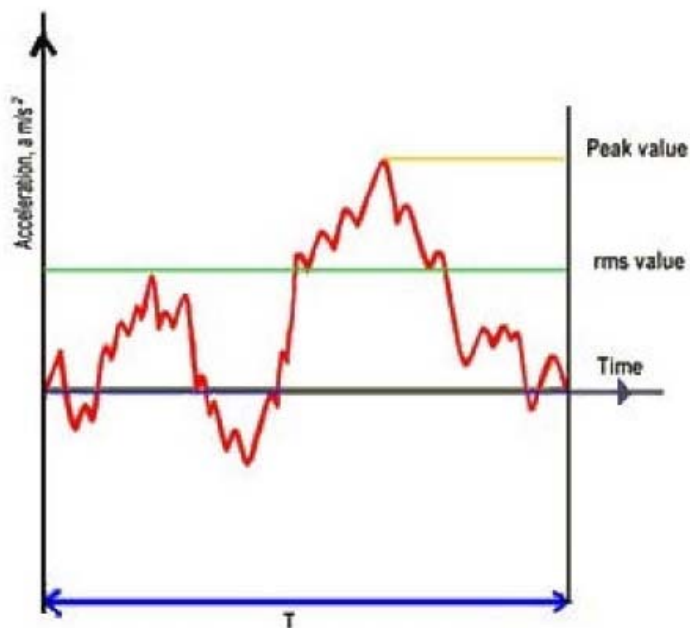
- $1,15 \text{ m/s}^2$ ei saa ylittyä kahdeksan tunnin työpäivänä (raja-arvo)
- $0,5 \text{ m/s}^2$ ylittyessä pitää tärinää tarkkailla (toimenpidearvo)

Mittauksista saadut tiedot tulee säilyttää myöhempiä analyysyjä varten. Mittaukset ja arviointi tulee myös suorittaa sopivin väliajoin ja erityisesti olosuhteiden muuttuessa. Mittauksissa käytettävien laitteiden tulee täyttää annetut ISO-standardit.

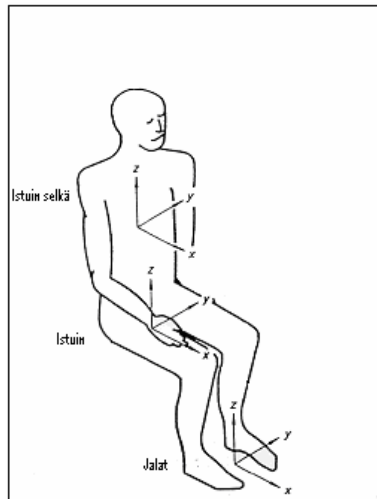
2.2 Standardit

2.2.1 ISO 2631

ISO 2631-1 -standardi määrittelee laskutavat ja mittausvaatimukset kehotärinälle. Standardi sisältää menetelmät säännöllisen, satunnaisen ja transientin kehontärinän mittaukseen. Lisäksi standardissa on määritelty ali- ja ylipäästösuodatuskaavat, sekä taajuuspainotuskaavat. Kiihtyvyyden RMS-arvolla on määritelty standardissa kehontärinän vaikutusta terveyteen. Jokaisesta koordinaattisuunnasta ihmisen ja tärinän aiheuttajan rajapinnasta lasketaan RMS-arvot. Vaakasuuntaisia akseleita x ja y painotetaan kertoimella 1,4, jos huippuarvo (CF, Crest Factor) on alle 9 ja henkilö on istuva tai seisova. Jos huippuarvo ylittyy, niin käytettävissä on kaksi vaihtoehtoista menetelmää MTVV ja VDV. RMS-arvo on ilmoitettava joka tapauksessa MTVV:n tai VDV:n yhteydessä. Huippuarvon laskemiseen käytetyt arvot on esitelty kuvassa 1 ja kuvassa 2 on esitetty koordinaattisysteemi kehotärinänmittaukseen. [6.]



Kuva 1. Huippukertoimen laskennassa käytetyt arvot [9.]



Kuva 2. Kehotärinän koordinaattisysteemi [6.]

Suodatus ja taajuuspainotus

Mitatulle kiihtyvyydelle suoritetaan kaistanpäästösuodatus ja taajuuspainotus. Ali- ja ylipäästösuodatuskaavat on esitetty yhtälöissä (1) ja (2). Taajuuspainotukseen tarkoitetut kaavat on esitetty yhtälöissä (3) ja (4).

Alipäästö:

$$H_l(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{Q_2\omega_2} + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^2}. \quad (1)$$

Ylipäästö:

$$H_h(s) = \frac{1}{1 + \frac{\omega_1}{Q_1s} + \left(\frac{\omega_1}{s}\right)^2}. \quad (2)$$

Kiihtyvyydenopeusmuunnos:

$$H_t(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)K}{1 + \frac{s}{Q_4\omega_4} + \left(\frac{s}{\omega_4}\right)^2}. \quad (3)$$

$H_t(s)$ on 1, kun ω_3 ja ω_4 ovat äärettömiä.

Nouseva askel:

$$H_s(s) = \frac{1 + \frac{s}{Q_5\omega_5} + \left(\frac{s}{\omega_5}\right)^2}{1 + \frac{s}{Q_6\omega_6} + \left(\frac{s}{\omega_6}\right)^2} \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2. \quad (4)$$

$H_s(s)$ on 1, kun ω_5 ja ω_6 ovat äärettömiä.

Näiden kaavojen avulla voidaan laskea koko painotettu siirtofunktio suodatuksineen:

$$H(s) = H_h(s) * H_l(s) * H_t(s) * H_s(s). \quad (5)$$

Kaavoissa olevat parametrit (f_1, f_2, \dots ja Q_1, Q_2, \dots) on määritelty standardissa ISO 2631-1 (1997) (taulukko 1).

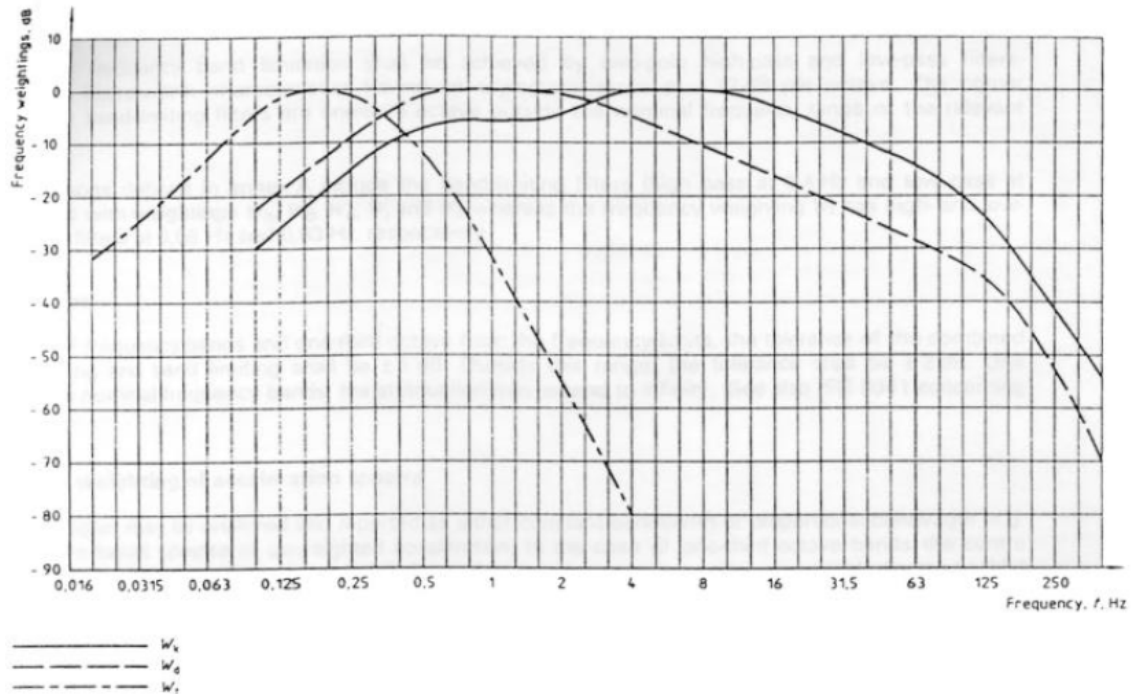
Taulukko 1. Painotusparametrit

Painotus	Kaistanpäästö		Kiihtyvyyys-nopeusmuunnos			Nouseva askel			
	f1 Hz	f2 Hz	f3 Hz	f4 Hz	Q4	f5 Hz	Q5	f6 Hz	Q6
wk	0,4	100	12,5	12,5	0,63	2,37	0,91	3,35	0,91
wd	0,4	100	2,0	2,0	0,63	∞	—	∞	—
wf	0,08	0,63	∞	0,25	0,86	0,0625	0,80	0,1	0,80

Suodatuksen ja painotuksen jälkeen saadaan taajuuspainotettu kiihtyvyystieta, joka on standardin mukainen terveysvaikutusten arvioimisen kannalta. Standardi antaa myös taajuuskuvaajat joihin voidaan verrata suodatuksen ja taajuuspainotuksen toimivuutta standardin mukaisesti (esim. kuva 3).

Eri taajuuksia on standardissa painotettu eri tavoilla. Painotettuja taajuuskäyriä käytetään, koska tutkimusten mukaan eri taajuudet vaikuttavat ihmiseen eri tavalla. Näin halutaan tuoda niiden taajuuksien vaikutukset paremmin esiin ja yhdenmukaistaa eri akselien suuntaiset tärinät. Kuvassa 3 w_k -käyrä kuvaa pystysuuntaisen tärinän taajuuspainotusta, w_d kuvaa vaa-

kasuuntaisen värinän taajuuspainotusta ja w_f pystysuuntaisen värinän taajuuspainotusta matkapuhoinvoinnille. [8.]



Kuva 3. ISO 2631-1 (1997) painotuskäyrät [6.]

Työssä käytetään digitaalisia suodattimia, koska niistä on helppo tehdä tarkkoja ja niiden ominaisuudet pysyvät samoina koko käyttöajan. Digitaalisten suodatinten ominaisuudet määräytyvät niiden kertoimien kautta, eivätkä tietokoneohjelman kertoimet muutu esimerkiksi ajan myötä tai lämpötilan vaihdella. Tarkkuus saadaan myös helposti paremmaksi lisäämällä laskentatehoa ja laskentatarkkuutta. Suodattimilla on useita teorian kannalta hyviä ominaisuuksia.

Analysointi

Tämän jälkeen taajuuspainotettu kiihtyvyyssarvo voidaan analysoida tarkemmin standardissa määritetyillä analysointimenetelmillä terveysvaikutusten arvioimiseksi. Analysointimenetelmät on esitetty yhtälöissä (6) – (10).

Kiihtyvyyden RMS-arvo (neliöllinen keskiarvo, $a_{wr.m.s}$) määritellään standardissa seuraavalla yhtälöllä, jossa a_w on taajuuspainotettu kiihtyvyyssarvo ja T on mittaukseen kulunut aika.

$$a_{wr.m.s} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt}. \quad (6)$$

Huippukerroin (CF) on suurimman arvon ($\max(a_w(t))$) ja RMS-arvon suhde, eli yhtälö on

$$CF = \frac{\max(a_w(t))}{r.m.s(a_w)}. \quad (7)$$

VDV:tä (tärinän kiihtyvyyden annosarvo) käytetään piikkien havaitsemiseen, joka on määritetty seuraavalla yhtälöllä, jossa T on mittaukseen kulunut aika.

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt}. \quad (8)$$

MTVV (maksimi transientti tärinän arvo) on RRMS-maksimiarvo. Tämä lasketaan pienin aikavälein t_0 (standardi suosittelee ajaksi 1 s), jotta saataisiin hetkelliset piikit huomioitua paremmin. MTVV:lle on voimassa yhtälö

$$MTVV = \max(a_w(t_0)). \quad (9)$$

Kohtisuorien akseleiden vektorisummasta saadaan yhdistetty RMS-arvo. Tässä kertoimella k on tarkoitus painottaa akseleiden suuntia riippuen, onko henkilö istuva, seisova vai makaava. Yhdistetty RMS-arvo määritellään yhtälöllä

$$a_{xyz} = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}. \quad (10)$$

2.2.2 ISO 8041

Laitteistovaatimukset on määritelty ISO 8041 -standardissa, joka asettaa mittauksissa käytettäville antureille ja laitteistolle erilaisia vaatimuksia. Standardissa määritellyt tärinän mittausvälineet voivat olla yksittäisiä tiedonkeruulaitteistoja, jotka keräävät tietoa ja tallentavat sen myöhempää analysointia varten esim. tietokoneella. Laitteistot voivat olla myös yhdisteltyjä, eli ne keräävät tietoa ja myös analysoivat sen. Tässä standardissa määritellyt tärinänmittauslaitteistot on tarkoitettu mittaamaan yhdestä tai useammasta sovelluksesta, kuten:

- käsitärinän
- kehotärinän 0,5 Hz:stä 80 Hz:iin
- pientaajuuskehotärinän 0,1 Hz:stä 0,5 Hz:iin

ISO 8041 -standardissa on paljon päällekkäisyyksiä ISO 2631-1 -standardin kanssa, kuten taajuuspainotukset ja analysointiyhtälöt (RMS, VDV, MTVV).

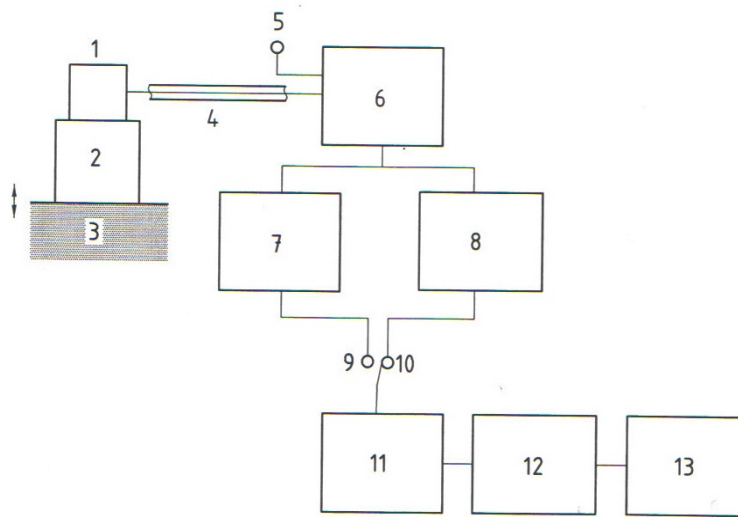
Istuimesta mitattaessa järjestelmälle on määritelty tarkat arvot, jotka sen täytyy täyttää. Muualta kehosta mitattavaan tärinään (tässä tapauksessa selkä ja pää) on määritelty myös järjestelmän vaatimukset. Istuimesta mitattaessa osa vaatimuksista on taulukon 2 mukaisia. Lisäksi standardista löytyy määrittymiset mitattaville suunnille (x, y ja z).

Taulukko 2. Laitteistovaatimukset

Anturin maksimikokonaismassa	450 g
Anturin maksimikoko	leveys 300 mm, korkeus 12 mm
Anturin maksimiasennusetäisyys tärinäläheestä	10 mm
Toimintalämpötila	-10 °C – 50 °C
Anturin maksimikihtyvyykesto	1000 m/s ²
Minimiresonointitaajuus	800 Hz

Muualta kehosta suoritettavaan mittaukseen käytettävien anturien vaatimukset ovat melkein samat kuin istuinanturilla, mutta paino ei saa ylittää 50 grammaa anturilta. Anturi saa olla kooltaan 30 millimetriä korkea kuutio. [7.]

Kuvassa 4 on esitetty standardin mukaisen tärinänmittauksen eri osa-alueet. Tärkeimpiä näistä mittausten kannalta ovat anturit, mittayksikkö, suodatus ja taajuuspainotus, laskuprosessit ja näiden esitys näytöllä.

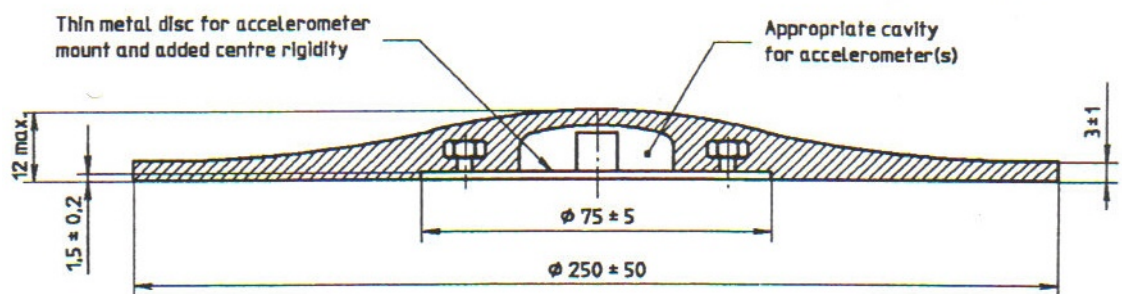


Kuva 4. Tärinänmittauksen osa-alueet (1. anturi, 2. liitinosa, 3. tärinäpinta, 4. kaapeli, 5. sähkön syöttö, 6. mittayksikkö, 7. kaistanpäästösuodatus, 8. taajuuspainotus (myös kaistanpäästösuodatus), 9. kaistanpäästösuodatus, 10. taajuuspainotettu lähtö, 11. aikapainotus, 12. las- kuprosessit, 13. näyttö) [7.]

2.2.3 ISO 10326

ISO 10326-standardi määrittelee perusvaatimukset kehotärinänmittaukseen tarkoitetulle istuinanturille ja mittauksille. Lisäksi standardi määrittelee istuinlevyn materiaalin, muodot ja painon tarkemmin.

Materiaalina istuinlevylle täytyy olla kumi tai muovi. Standardista löytyvät levyn mitat on esitetty kuvassa 5. Siitä nähdään, että kiihtyvyyssanturi sijaitsee istuinlevyn alapuolella olevassa metallilevyssä, joka on ruuvattu kiinni istuinlevyyn.



Kuva 5. Istuinanturin mitat [9.]

Lisäksi standardista löytyy vaimennetun penkin testaus- ja raportointimenetelmä. Vaimennuksen testausmenetelmä on tarkoitettu soveltumaan laboratorio-olosuhteisiin.

3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTTAMINEN

Tärinän mittauksessa piti ensin huomioida mittauskohteiden vaatimukset. Seuraavaksi valittiin oikeanlaiset laitteistot, joilla mittaukset pystyttiin suorittamaan. Viimeisenä täytyi huomioida vaatimukset ohjelmiston osalta, jolla saadut arvot voidaan tallentaa ja analysoida.

3.1 Vaatimukset mittauskohteiden osalta

Mittauskohteena on ihminen, johon kohdistuva värinä tulee mitata. Standardien mukaisesti värinää tuli mitata ihmisen istuinluiden ja penkin välistä. Siihen tuli käyttää määriteltyä istuinlevyä, johon kiihtyvyyssanturi on upotettu.

Työn tavoitteena oli mitata myös päähän ja selkään kohdistuvaa värinää. Selkään ja päähän anturit tultiin sijoittamaan võiden avulla.

3.2 Vaatimukset laitteiston osalta

Mittausanturien vaatimukset löytyivät ISO 8041 -standardista. Anturien tuli olla kolmiakselisia kiihtyvyyssantureita. Lisävaatimuksena tuli valita anturit, jotka täyttävät standardin vaatimukset, mutta ovat myös edullisimmat markkinoilta löytyvät.

Sen jälkeen tuli suunnitella mittayksikkö johon anturit voitaisiin liittää ja mitata niiden antamaa tietoa. Mittayksikön tuli olla liitettävissä tietokoneeseen, jotta LabVIEW-ohjelmointiympäristössä voitaisiin käsitellä saatavaa kiihtyvyystietoa. Saadut kiihtyvyyssarvot tuli olla myös synkronisoituja keskenään.

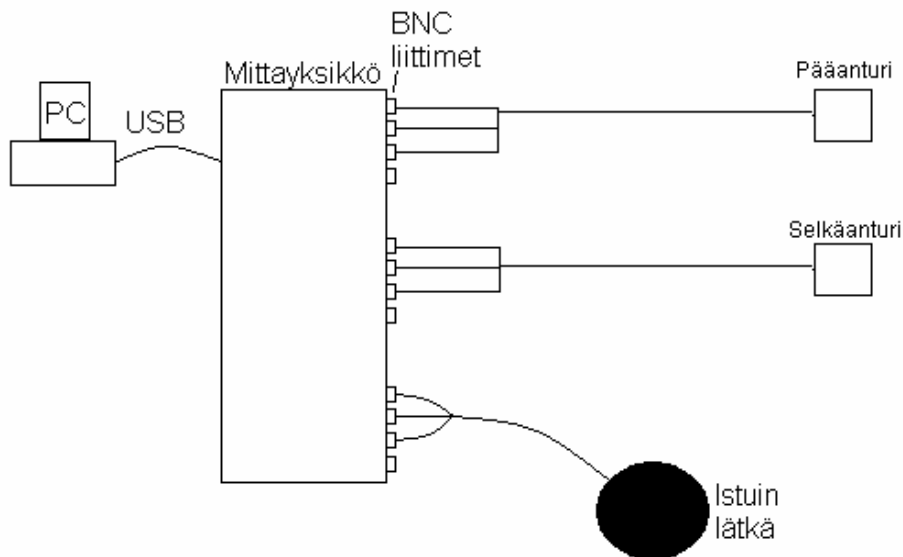
3.3 Vaatimukset ohjelmiston osalta

Ohjelmiston tuli pystyä tallentamaan pitkäaikaisia mittauksia kiintolevyille. Sillä täytyi pystyä lukemaan tallennettu data sekä suodattamaan ja taajuuspainottamaan se. Painotettu tieto täy-

tyi pystyä analysoimaan ISO 2631-1 -standardin mukaisilla menetelmillä, jotta tärinää voitaisiin arvioida terveysvaikutusten kannalta.

3.4 Valinnat laitteistoksi

Anturien valintaa vaikeutti hintakilpailuttaminen, koska piti etsiä mahdollisimman halvat anturit. Anturien liittimien suhteenkin oli alkuperäisessä suunnitelmassa tarkoitus saada mahdollisimman yksinkertainen liitännämenetelmä mittayksikköön. Liittiminä suunniteltiin käytettäväksi BNC-liittimiä, jotka on helppo kytkeä nopeasti paikoilleen. Suunniteltu mittauslaitteisto on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Suunniteltu mittauslaitteisto

3.4.1 Istuinanturi

Istuinanturiksi valitsimme Svantek:n anturi, joka täyttää standardin vaatimukset. Samassa yhteydessä tilattiin kyseisen valmistajan referenssimittari. Kuvassa 7 on esitetty Svantek:n istuinanturi. Anturin liittimet on toteutettu BNC-liittimillä, joten se on helposti liitettävissä mittauslaitteisiin.



Kuva 7. Svantekin istuintanturi (SV 39A/B, Puola)

Ominaisuudet

Istuintanturin taajuusalue on 0,5 Hz – 3000 Hz ja sen mittausalue on $\pm 50 \text{ m/s}^2$. Koska kaikki markkinoilla olevat istuintanturit ovat piezoresistiivisiä, niin sellaista anturia ei ollut saatavilla jonka taajuusalue lähtisi 0,1 Hz:stä. Tästä johtuen jouduttiin tekemään kompromissio istuintanturin osalta ja valitsemaan anturi joka lähtee 0,5 Hz:stä. Anturin lähtö on 100 mV aina yhtä g:tä kohti ja maksimijännitealue on $\pm 5 \text{ V}$. Sen maksimikiiktyvyydenkesto on 1500 m/s^2 , joka täyttää myös vaatimukset.

3.4.2 Pään ja selkään sijoitettavat anturit

Pää- ja selkäantureissa päädyttiin kahden valmistajan välille hinnan ja laadun perusteella. Valmistajat olivat PCB ja Crossbow. Hintakilpailun kautta päädyttiin valitsemaan Crossbow:n (500 €) anturit, jotka olivat 5 kertaa halvemmat kuin PCB:n (2500 €). Miinuksena näissä oli kuitenkin BNC-liittimien uupuminen, joiden tilalla oli riviliittimillä toteutettu liitäntäsystemi. Tästä johtuen rakennettiin erillinen BNC-adapteri, johon tuodaan jännite 5 V:n muuntajalta. Adapteri on esitetty kuvassa 9, itse anturit ovat kuvassa 10.



Kuva 9. BNC-adapteri



Kuva 10. Crossbow:n kiihtyvyyssanturit (San Jose, Kalifornia)

Ominaisuudet

Antureiden taajuusalue on 0 Hz – 100 Hz ja ne pystyvät mittaamaan alueella ± 4 g. Anturit ovat kapasitiivisia, joten ne pystyvät mittaamaan 0 Hz:stä lähtien. Antureiden lähdöt ovat 500 mV (± 25 mV) aina yhtä g:tä kohti ja jännitealue on 0 V – 5 V. Niiden maksimikihtyvyydenkesto on 2000 m/s², joka on myös vaatimukset täyttävä.

3.4.3 Tiedonkeruukortit

Mittayksikön valintaa oikeastaan helpottivat vaatimukset siitä, että kaikilta antureilta tuleva tieto tulisi olla synkronoitua keskenään (samanaikaisia). Koska ohjelmointiympäristönä tultiin käyttämään LabVIEW:ä, niin ensimmäisenä tutkittiin NI:n (National Instruments) valmistamat mittayksiköt. NI:n valikoimista löydettiin hyvin nopeasti hyvä tiedonkeruukortti, joka voidaan liittää tietokoneeseen USB-väylään (NI USB-9233 kuvassa 11). Kortin hyvä puoli oli myös, että siihen voitiin liittää kiihtyvyyssanturit BNC-liittimillä.



Kuva 11. National Instruments USB-9233 mittayksikkö (Austin, Texas)

Koska käytettäviä kiihtyvyyssantureita oli kolme kappaletta ja jokaisesta anturista saatiin kolme lähtöä (x, y ja z), niin BNC-liitäntöjä tarvittiin yhdeksän kappaletta. Tästä johtuen tilattiin erillinen moduuli, johon voidaan liittää kahdeksan NI-9233-korttia. Mittauksiin tarvitaan kolme tiedonkeruukorttia, jolloin joka kortista jää myös yksi BNC-liitäntä vapaaksi myöhempää mahdollista järjestelmän päivitystä varten. NI:n moduuli, johon tiedonkeruukortit liitettiin on esitetty kuvassa 12.



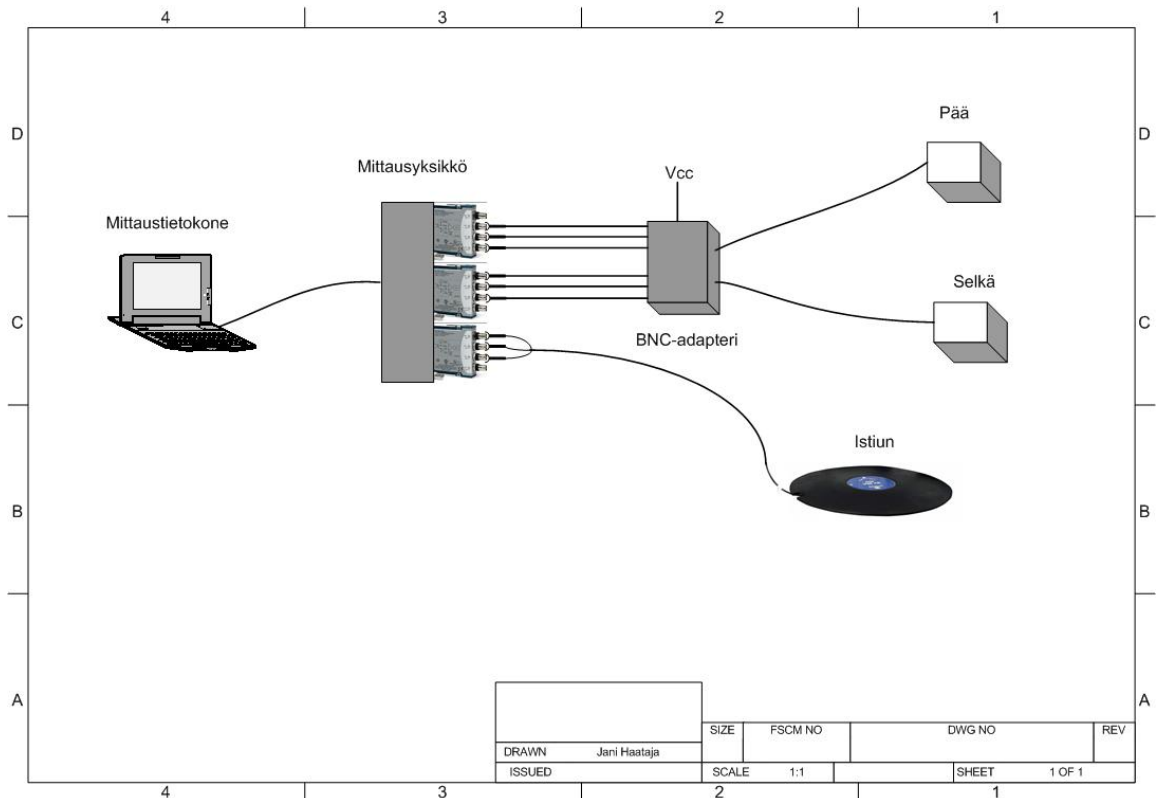
Kuva 12. National Instruments CompactDAQ USB -tiedonkeruusysteemi (Austin, Texas)

Ominaisuudet

Yhdessä NI-9233-kortissa on neljä synkronoitua analogista tuloa ja ADC -resoluutio on 24-bittinen. Näytteistystaajuus on 2 kS/s – 50 kS/s ja toimintajännitealue on ± 5 V.

3.5 Laitteiston toteutus

Pää- ja selkäanturi liitettiin rakennettuun BNC-adapteriin, josta vietiin BNC-liittimet tiedonkeruukortille. Istuinanturi liitettiin suoraan tiedonkeruukortille. Lopuksi mittayksikkö liitettiin tietokoneen USB-väylään. Laitteiston lopullinen toteutus esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Laitteiston toteutus

3.6 Ohjelmiston toteuttaminen

LabVIEW on National Instrumentsin kehittämä ohjelmointiympäristö, joka perustuu graafiseen G-kielen. Siitä on saatavissa versiot Windowsiin, Linuxiin, Mac:iin, Solarikseen ja joillekin PDA-laitteille. LabVIEW-ohjelmat ovat siirrettävissä eri käyttöjärjestelmien välillä, kuitenkin pois sulkien tietyt rajoitukset kuten tiedostopolkujen formaatit tai ActiveX-komponentit. [4.] [5.] LabVIEWn graafisella ohjelmointiympäristöllä tarkoitetaan, että ohjelmointiin liittyvät operaatiot (symboliset ohjelmaelementit) asetellaan hiirellä graafisessa käyttöliittymässä ja langoitetaan yhteen. Näitä elementtejä kutsutaan virtuaalityökaluiksi (Virtual Instrument, VI). Ne ovat lyhyitä ohjelmia tai aliohjelmia, jotka ovat joko ohjelman valmistajan kehittämiä tai ohjelmoijan itsensä tekemiä. Virtuaalityökalujen ajettavuus mahdollistaa niiden testaamisen luontivaiheessa ilman erillistä pääohjelmaa. Virtuaalityökalut voivat toimia myös toisten virtuaalityökalujen aliohjelmina, joten niillä voidaan rakentaa myös monimutkaisempia ohjelmistorakenteita.

Käyttötarkoitus

LabVIEW on hyvä ohjelmointikieli mittaus- ja testaussovelluksissa, mutta kypsyytensä ja helppokäyttöisyytensä ansiosta se soveltuu usein myös yleisohjelmointikieleksi. Joitain operaatioita sillä on kuitenkin työläs tehdä, esimerkiksi mutkikkaat merkkijonojen käsittelyoperaatiot ja vastaavat kannattaa tehdä jollain muulla ohjelmointikielellä (ja mahdollisesti integroida LabVIEWiin esimerkiksi .NET-komponenttina). OpenG on kuitenkin tuottanut joitain LabVIEW-laajennoksia. Tyypillisiä muita kohteita ovat mm. PC-pohjaiset teollisuusautomaatio-sovellukset ja hyvinkin laajat ja hajautetut tiedonvarastointi- ja analysointisovellukset. Tehokkuutensa vuoksi se kilpailee täysin esim. C/C++-ohjelmoinnin kanssa.[4.] [5.]

Käyttöliittymän toteutuksessa työssä käytettiin LabVIEW-ohjelmointiympäristöä, jolla luettiin mittayksiköltä tulevia kiihtyvyyssignaaleja. Signaalit tallennettiin txt-tiedostoon, josta niitä pystyttiin sitten analysoimaan jälkikäteen.

3.6.1 Käyttöliittymä

Käyttöliittymässä ensimmäisenä määritellään mitattavan henkilön nimi, paino, pituus ja ikä, sekä mittaaajan nimi. Seuraavaksi määritellään mittaustietojen tallennushakemisto ja tallennustiedosto. Sitten määritellään mittauksen kesto tai halutaanko mitata, kunnes itse keskeytetään. Ulkoasu mitta-arvojen syötölle on esitelty kuvassa 14.

Ohjelman mittaussuorituksen aikana voidaan seurata tärinän käyttäytymistä eri anturien eri aksleilla. Kun mittaukset ovat valmiita, niin ohjelma tallentaa mitatun raakatiedon kiintolevylle. Mittaus-välilehden ulkoasu on esitelty kuvassa 15.

Seuraavaksi tärinä-tieto voidaan hakea tiedostosta ja valita sille halutut analysointitavat. Kun ohjelma on analysoinut datan, niin ne tallentuvat automaattisesti, jotta ne voidaan tulostaa myöhemmin tiedostosta. Analysoinnin ulkoasua on esitelty kuvassa 16.

Tulostuksessa voidaan valita analysoitu mittaustiedosto ja tulostaa graafisesti halutun anturin tiedot. Siinä voidaan myös tallentaa tietyn akselin (x, y tai z) arvot pelkästään omaan tiedostoon. Ulkoasu on esitelty kuvassa 17.

Mittausarvot Mittaus Analysointi Tulostus

Mittaaja
Jani

Nimi
Tärinä Ville

Paino
80

Pituus
183

Ikä
24

Polku
C:\Documents and Settings\opiskelija\

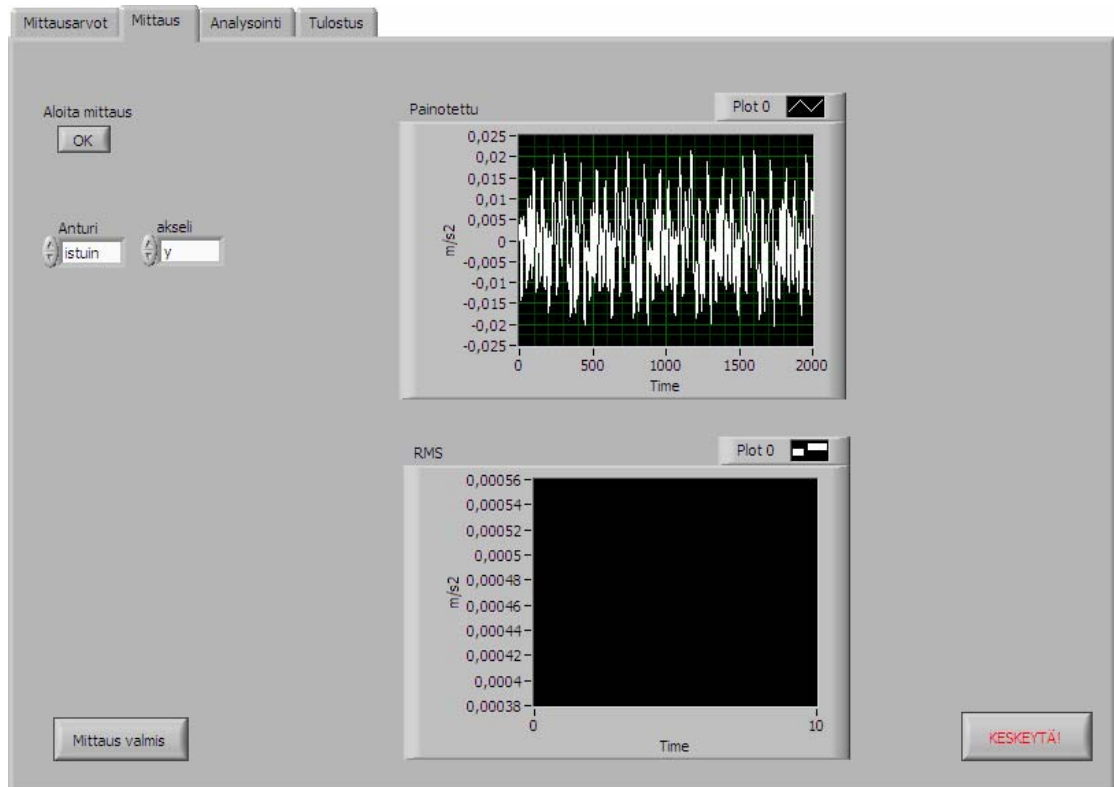
Tiedoston nimi
Mittaus

Anturit
Istuinanturi

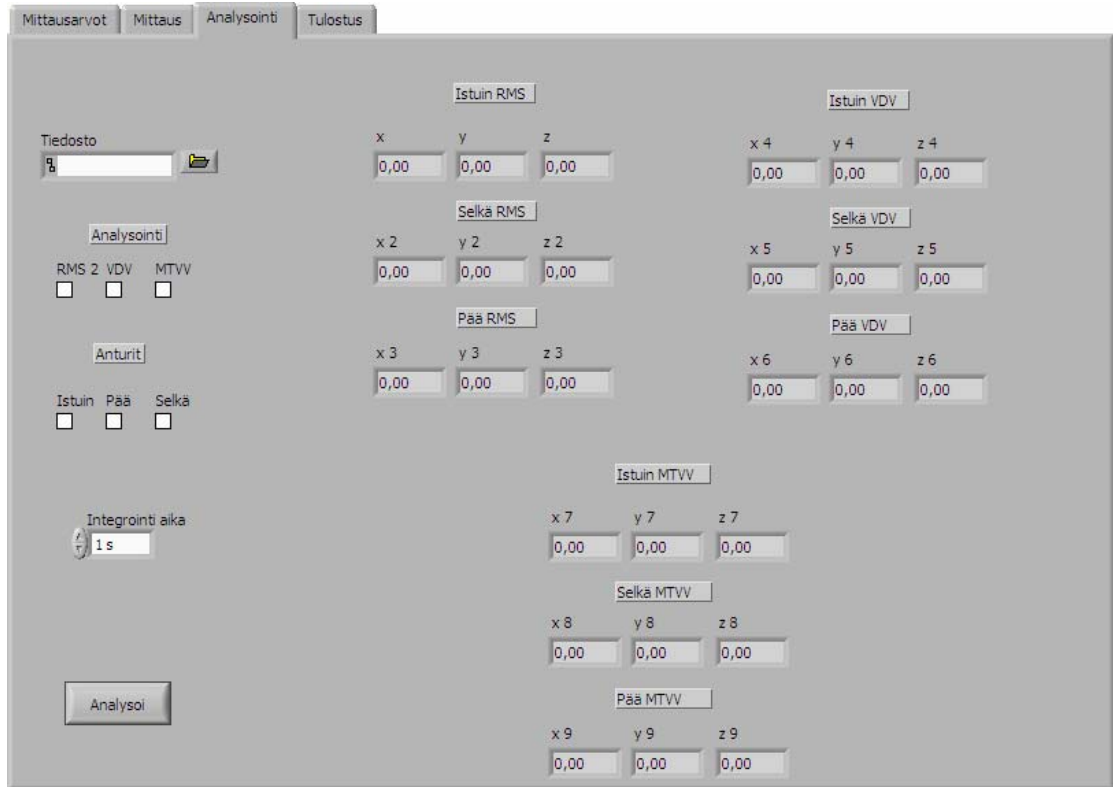
Jatkuva mittaus
 Kyllä

Mittausaika (s)
5

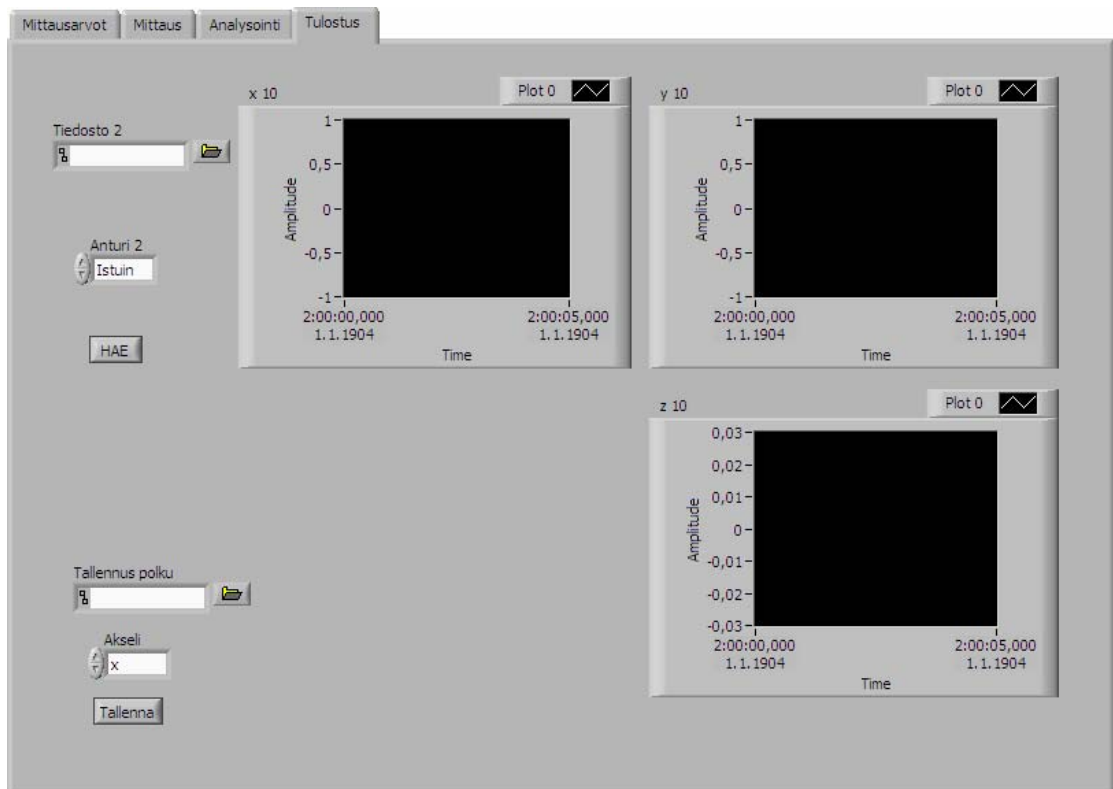
Kuva 14. Käyttöliittymä (mittausarvot)



Kuva 15. Käyttöliittymä (mittaus)



Kuva 16. Käyttöliittymä (analysointi)



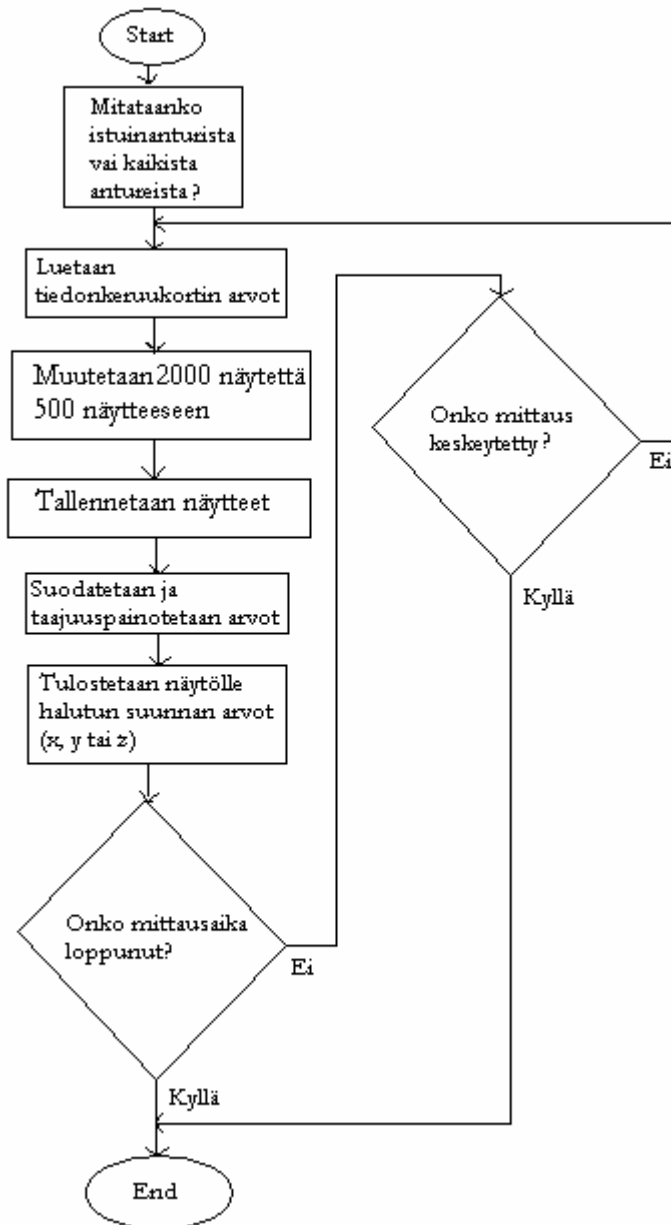
Kuva 17. Käyttöliittymä (tulostus)

3.6.2 Ohjelmiston toteutus

Tiedonkeruuta varten LabVIEWissa on eri väylävaihtoehtoja, kuten USB, GPIB, VXI ja RS232 varten tarkoitettuja laiteajureita. Tiedonkeruuseen tarkoitetuille tiedonkeruukorteille (DAQ, Data Acquisition) löytyy LabVIEWin kirjastosta valmiit ajurit ja ohjaamiseen tarvittavat toiminnot. Ohjelman mukana tulevat valmiit VI-kirjastot käsittävät laajat toiminnot signaalin mittaamiseen, käsittelyyn, suodattamiseen, tilastointiin ja laskentaan.

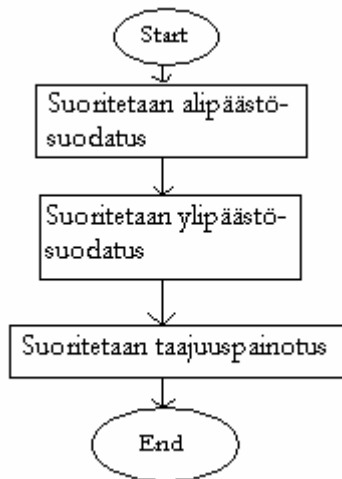
Pääohjelma on toteutettu event case -rakenteella, jossa voidaan tietyn napin painaisulla ohjata ohjelma suorittamaan haluttu toiminto. Event case -rakenteeseen saadaan lisättyä haluttu määrä tapahtumavaihtoehtoja, jotka ovat periaatteessa yksittäisiä ohjelmia. Aina yhden event case -rakenteen suoritettua ohjelma palaa odottamaan seuraavan toiminnon käskyä. Ohjelmassa on omat rakenteet tiedonkeruulle, analysoinnille, tulostukselle ja ohjelman pysäytykselle.

Tiedonkeruu tapahtui asettamalla tiedonkeruukortit toimintakuntoon ja asetukset niille Measurement & Automation Explorer (MAX) -ohjelmalla. MAXin avulla voidaan varmistaa korttien toimivuus sekä konfiguroida ne. MAXissa kortit asetettiin lukemaan jatkuvaa signaalia kiihtyvyyssantureilta ja määriteltiin mitkä liittimet olivat käytössä. Sen jälkeen tallennettiin asetukset niin sanotuksi tehtäväksi (Task). Tehtäviä tehtiin kaksi erilaista, jotta voidaan valita käytetäänkö pelkästään istuinanturia vai jokaista anturia. Seuraavaksi tehtiin mittausohjelma, jossa DAQmx Read.vi -tiedonkeruufunktiolla luetaan MAXilla tehdyn tehtävän mukaisesti kiihtyvyyssantureita. Antureilta saatava aaltomuotoinen tieto muutetaan sitten taulukoiksi sekunnin välein. Järjestelmä mittaa 2000 näytettä sekunnissa johtuen tiedonkeruukortin miniminäytteistystaajuudesta, mutta ohjelmallisesti näytteistys muutetaan arvoon 500 S/s. Mitatut arvot tallennetaan aina sekunnin välein, jottei koneen kaatuessa menetettäisi mitään tietoja. Ohjelman aikana suoritetaan myös suodatus ja painotukset saadulle signaalille, jolloin voidaan katsella mittausten aikana tärinäarvoja. Lohkokaavio ohjelmasta on esitetty kuvassa 18.



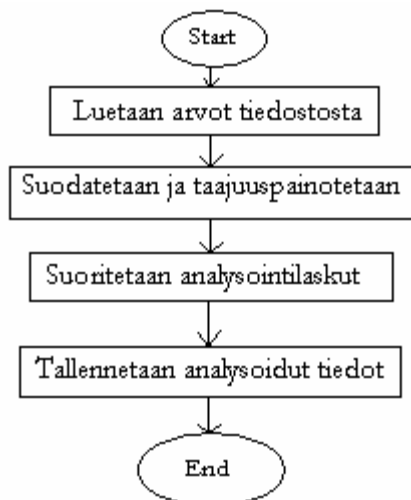
Kuva 18. Tiedonkeruun lohkokaavio

Kuvassa 19 on esitetty lohkokaavio suodatus- ja taajuuspainotusohjelmasta, joka suorittaa raakadatalle standardien mukaisen käsittelyn ennen analysointia. Tässä ohjelmassa on käytetty IIR-suodatinta, johon syötetään MATLABilla lasketut kertoimet suodatusta varten. MATLAB-koodi on esitetty liitteessä 1.



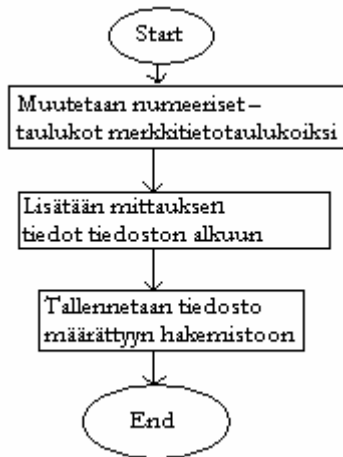
Kuva 19. Suodatus ja taajuuspainotus lohkokkaavio

Analysointiohjelman teko aloitettiin lisäämällä käyttöliittymään eli etupaneeliin vaihtoehtoja kiihtyvyydestiedon analysointiin. Seuraavaksi lisättiin event case -silmukkaan analysointiosa, jossa laskutoimitukset suoritettiin. Standardin ISO 2631 mukaisesti laitettiin valittaviksi analysointimenetelmiksi RMS-, VDV-, MTVV- ja yhdistetty RMS -arvo, jotka saatiin sitten esitettyä graafisessa ja taulukkomuodossa. Ohjelma lukee valitun tiedoston värinätiedot ja suodattaa sekä taajuuspainottaa ne. Sitten ohjelma suorittaa valitut analysoinnit taajuuspainotetulle kiihtyvyydestiedolle ja näyttää saadut tulokset, sekä tallentaa ne. Lohkokaavio ohjelmasta on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Analysointilohkokaavio

Analysoiduntiedon tallennuksessa numeeriset taulukot muutettiin merkkietoformaattiin, josta ne yhdisteltiin samaan merkkietotiedostoon. Ohjelma luo valittuun hakemistoon tiedoston, jonka mittaja määrittelee. Tiedostoon se asettaa otsikoksi päiväyksen ja kellonajan, jonka alle tulee mittajan nimi ja mitattavan henkilön tiedot. Niiden jälkeen tulee analysoidut kiihtyvyyystaulukot eri antureiden akseleilta. Ensimmäisessä taulukossa on esitetty aikaleima. Ohjelman lohkokaavio on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Tiedostoon tallennus -lohkokaavio

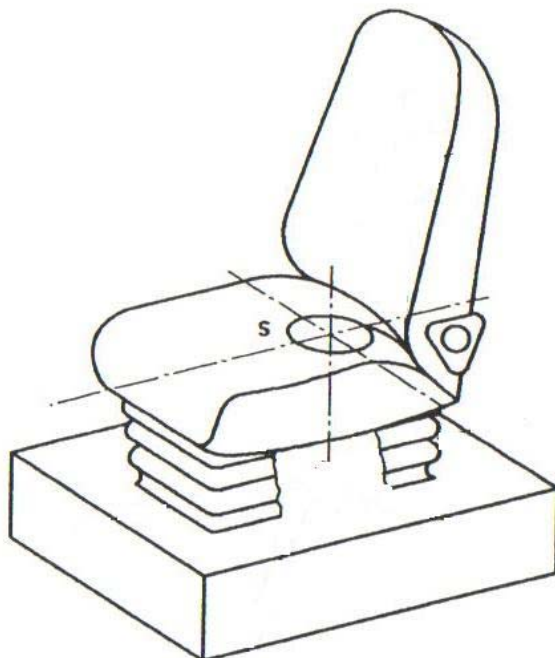
4 JÄRJESTELMÄN TESTAUS

Ensimmäinen testausvaihe oli testata kaistanpäästösuodatus ja taajuuspainotus. Testaus tapahtui syöttämällä tietyn taajuista signaalia ohjelmaan ja vertaamalla saatuja arvoja ISO 2631-standardista löytyviin arvoihin. Näin voitiin päätellä, että taajuuspainotusohjelma toimi oikealla tavalla.

Tiedonkeruun ja tallennuksen toiminta testattiin lukemalla tallennettu txt-tiedosto ja vertaamalla taulukkomuodossa tiedonkeruuvaiheessa saatuja arvoja.

Tärinänmittaukseen lähdetessä ensimmäinen vaihe oli suorittaa standardin mukainen ihmisen anturointi. Anturien asettelun jälkeen voidaan alkaa suorittamaan mittausta. Mittausten valmistuttua mittaustulokset tallennettiin ja analysoitiin.

Istuinanturin tuli sijoittua standardin mukaisesti penkin ja ihmisen väliin istuinluiden kohdalle (kuva 25). Istuinanturi teipataan paikoilleen, jotta saataisiin mahdollisimman vertailukelpoisia mittaustuloksia.



Kuva 25. Istuinanturin sijainti.

Selästä tärinää mittaava anturi tulee sijoittaa ristiselän kohdalle (L4 -nikama) ja anturin kiinnitykseen käytetään vyötä. Päästä tärinää mitattaessa anturi sijoitetaan otsaan, johon se kiinnitettiin myös vyöllä.

Seuraavaksi laitetaan laitteisto päälle ja käynnistetään LabVIEW-ohjelma. Ensimmäisenä määritellään mitattavan henkilön nimi, paino, pituus ja ikä, sekä mittaajan nimi. Seuraavaksi määritellään mittaustietojen tallennushakemisto ja tallennustiedosto. Sitten määritellään mittauksen kesto tai haluttiinko mitata, kunnes itse keskeytetään. Ohjelman mittaussuorituksen aikana voidaan seurata tärinän käyttäytymistä eri anturien eri akseleilla. Kun mittaukset ovat valmiita, ohjelma tallentaa mitatun raaka-tiedon kiintolevyille.

Analysoinnissa valitaan halutut analysointimenetelmät tallennetulle tiedolle ja laitetaan ohjelma suorittamaan niitä. Tämän jälkeen ne voidaan tallentaa tiedostoon talteen ja tulostaa halutut analysoinnit.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Insinööriyön tuloksena on mittauslaitteista, jolla voidaan mitata ihmiseen kohdistuvaa tärinää ja tallentaa sekä analysoida se. Laitteisto mahdollistaa standardien mukaiset mittaukset ja niiden analysoinnin. Laitteiston avulla voidaan testata esimerkiksi erilaisten työkonoiden tärinän siirtymistä työntekijään ja aloittaa toimenpiteet tärinän hallitsemiseksi, mikäli arvot ovat liian suuret.

Laitteiston ohjelman avulla voidaan määrittellä, että mitataanko pelkästään standardin mukaisesti penkistä ihmiseen siirtyvää tärinää vai lisäksi myös päästä ja selästä.

Laitteiston ominaisuudet ovat:

- Mittausalue 0,1 Hz – 80 Hz
- Standardien mukainen taajuuspainotus
- RMS-, VDV-, MTVV-analysointimenetelmät

Laitteiston eri osa-alueita on testattu yksitellen onnistuneesti. Esimerkiksi taajuuspainotusohjelmasta saadun signaalin amplitudivaste on ISO 2631 -standardiin verrattuna vaatimusten mukainen. Suodatus- ja taajuuspainotusohjelmien toiminta voidaan muutenkin olettaa oikeanlaisiksi, koska ne on tehty ISO 2631 -standardin vaatimusten mukaisesti. Myös tiedontalennus- ja lukuohjelma toimivat oikein, kun arvoja vertailtiin keskenään.

Parannusehdotukset

Laitteistoon voisi vielä lisätä yhden kiihtyvyyssanturin, jolla voitaisiin mitata tärinälähteen tärinä. Näin voitaisiin tutkia istuimien tärinän vaimennusta.

Laitteistoon voitaisiin liittää myös jokin muu mittausanturi, jolla mitattaisiin samanaikaisesti ihmisen kehon käyttäytymistä tärinän kanssa.

Analysointimenetelmiä voitaisiin lisätä standardien ulkopuolelta, koska niitä on ainakin parikymmentä erilaista.

6 YHTEENVETO

Insinööriyössä toteutettiin ihmisen kokokehotärinän mittauslaitteisto, jota ohjattiin tietokoneella LabVIEW-ohjelmointiympäristössä. Antureina käytettiin kolmiakselisia kiihtyvyyssantureita, joilta mitattiin tietoa NI:n USB-9233 tiedonkeruukorteilla. Tiedonkeruukorteilta tiedon luku tapahtuu USB -väylän kautta.

Aluksi tärinänmittauslaitteisto suunniteltiin paperille ja mietittiin eri komponenttien liitännävaihtoehtoja. ISO-standardeista tutkittiin tarkemmat vaatimukset laitteistolle, joiden perusteella anturit valittiin. Anturien liittämiseksi tiedonkeruukortteihin valittiin vaihtoehdoksi BNC-liittimet, jotka on helppo ja yksinkertaista liittää. Tiedonkeruukorttien liitännäväyläksi helpoin tapa oli valita USB-väylä, jolla onnistui nopea tiedonsiirto. Sitten toteutettiin ohjelmisto LabVIEW:lla, jolla luettiin tiedonkeruukorteilta tärinädata ja tallennettiin se haluttuun paikkaan kiintolevyllä. Ohjelmistolla voitiin myös analysoida tärinädata jälkikäteen halutuilla menetelmillä. Analysointia varten toteutettiin standardien mukainen kaistanpäästösuodatus ja taajuuspainotus. Standardien mukaiset analysointimenetelmät toteutettiin viimeisenä.

LÄHTEET

- 1 Työterveyslaitos, Tärinätauti. Luettu 7.2.2007. [WWW-dokumentti].
<http://www.ttl.fi/Internet/Suomi/Aihesivut/Ammattitaudit/Ammattitautiluettelo/T%C3%A4rin%C3%A4tauti.htm>
- 2 Kajaanin AMK, Tärinän mittaus ja vaikutusten arviointi työkoneissa. Luettu 1.2.2007. [WWW-dokumentti].
<http://www.kajak.fi/yrittys/tutkimus/hankkei/tarvio.htm>
- 3 Simo-Pekka Leino et al. Tärinänhallinta tulevaisuudessa . VTT:n tutkimusraportti, 23.10.2006.
- 4 Wikipedia, Tietosanakirja. Luettu 8.2.2007. [WWW-dokumentti].
<http://fi.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>
- 5 Jorma Narikka, LabVIEW-ohjelmointi. Luettu 8.2.2007 [WWW-dokumentti].
<http://www.mit.jyu.fi/opiskelu/seminaarit/ohjelmistotekniikka/labview/>
- 6 ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. 15.7.1997.
- 7 ISO 8041. Human response to vibration - Measuring instrumentation. 1.4.2005.
- 8 Marjanen Ykä, Master Thesis 2002, Luettu 5.1.2007.
- 9 ISO 10326.

LIITEIDEN LUETTELO

- 1 MATLAB -koodi

MATLAB -koodi:

funktion $y = \text{isofilwk}(x, fs)$

$f1 = 0.4;$

$f2 = 100;$

$f3 = 12.5;$

$f4 = 12.5;$

$Q4 = 0.63;$

$f5 = 2.37;$

$Q5 = 0.91;$

$f6 = 3.35;$

$Q6 = 0.91;$

$w3 = 2 * \pi * f3;$

$w4 = 2 * \pi * f4;$

$w5 = 2 * \pi * f5;$

$w6 = 2 * \pi * f6;$

$nyq = fs/2;$

% Kaistanpäästö

$[b1, a1] = \text{butter}(2, f1/nyq, 'high');$ % kertoimet ylipäästölle

$[b2, a2] = \text{butter}(2, f2/nyq);$ % kertoimet alipäästölle

% a-v transition

$B3 = [1/w3 \ 1];$

$A3 = [1/w4/w4 \ 1/Q4/w4 \ 1];$

$[b3, a3] = \text{bilinear}(B3, A3, fs);$ % kertoimet a-v transition

% upward step

$B4 = [1/w5/w5 \ 1/Q5/w5 \ 1] * w5 * w5 / w6 / w6;$

$A4 = [1/w6/w6 \ 1/Q6/w6 \ 1];$

$[b4, a4] = \text{bilinear}(B4, A4, fs);$ % kertoimet upward step

$y = \text{filter}(b2, a2, x);$

$y = \text{filter}(b1, a1, x);$

$y = \text{filter}(b3, a3, x);$

$y = \text{filter}(b4, a4, x);$